

修士論文

CMB 観測実験 GroundBIRD の焦点面検出器アライメントと
長期運用に向けた角度データ取得システムの最適化

京都大学 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室

片岡 敬涼

2025年1月 24日



概要

gaiyou(CMB で迫りたい物理 (ニュートリノ質量和、tau)、GB、自分のやったことがどう重要なのかを簡潔に記す)

本論文の構成を述べる。第 1 章で CMB に関する理論的な背景、第 2 章で GroundBIRD 実験の概要を説明する。以降は第 3 章と第??章の 2 部構成になっており、第 3 章で GroundBIRD の角度データ取得システムの改善について、第??章で焦点面検出器のアライメント較正との結果について述べる。第 4 章で今後の展望を述べ、第 5 章でまとめを述べる。

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 CMB の温度異方性と現代宇宙論	1
1.1.1 CMB の温度異方性	1
1.1.2 Λ -CDM モデル	3
1.1.3 地平線問題	5
1.2 CMB の偏光とインフレーション理論	5
1.2.1 インフレーション理論	5
1.2.2 CMB の偏光モード	6
1.2.3 偏光 B モードの探索状況	9
1.3 CMB の偏光とニュートリノ質量和	10
1.3.1 宇宙の再電離と光学的厚み τ	10
1.3.2 ニュートリノ質量和との縮退	12
1.3.3 偏光 E モードと τ	12
第 2 章 GroundBIRD 実験	14
2.1 実験概要	14
2.1.1 GroundBIRD 望遠鏡とスキャン戦略	14
2.1.2 超伝導検出器 MKID	15
2.1.3 観測する周波数帯域	17
2.1.4 物理ターゲット	18
2.2 現在の観測状況	19
2.2.1 検出器のフルアレイインストール	19
2.2.2 リモート観測システム	21
第 3 章 仰角データ取得システムの改善	22
3.1 望遠鏡仰角データ取得システムの改善	22
3.1.1 角度情報データ取得の概要	22
3.1.2 仰角データ取得における問題点	25
3.1.3 PYNQ を用いた新システムの導入	28
3.1.4 PYNQ イメージファイルの作成	29
3.2 望遠鏡への実装	30
3.2.1 新データ取得システムのインストール	30
3.2.2 同期信号取得の確認	31
3.2.3 同期信号の分配と仰角データ取得の確認	31

3.3 メンテナンスと安定運用	32
3.3.1 動作の不安定性	32
3.3.2 電源供給方法の見直し	34
3.3.3 Zynq 温度のモニター	36
第 4 章 今後の展望	39
4.1 大気揺らぎに由来するノイズのモデリング	39
4.2 両偏波アンテナを搭載した焦点面検出器のアップデート	39
第 5 章 まとめ	40
第 6 章 謝辞	41
参考文献	42
付 錄 A Zynq への linux 搭載	45

第1章 序論

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) は我々が観測できる宇宙最古の光であり、宇宙初期を知る重要な手がかりとなっている。CMB が持つ温度異方性の観測を基に現代宇宙論の基礎が作られた。しかし、宇宙初期には現在の理論では説明できない物理現象が存在し、これを説明する有力な理論としてインフレーション理論が提唱されている。CMB の偏光にインフレーションの痕跡が残ると考えられており、様々な CMB 観測実験が始動している。また、CMB の偏光観測はニュートリノ質量和に対する制限を与えられ、素粒子物理学にも大きな影響を持つ。この章では、CMB とそれを取り巻く宇宙論の関係について述べる。

1.1 CMB の温度異方性と現代宇宙論

1.1.1 CMB の温度異方性

ビッグバン理論は宇宙初期が高温高密度であり、膨張しながら星や銀河を作り、今に至るという宇宙のシナリオを予言した。ビッグバンの証拠には宇宙膨張を示すハッブルの法則やビッグバン元素合成 (Big Bang Nucleosynthesis; BBN[1]) と呼ばれる初期宇宙の軽元素の生成過程が挙げられる。そしてもう 1 つの証拠は CMB の周波数スペクトルがほぼ 2.725 K の黒体放射のスペクトルと一致するという観測事実 [2] である。このことで宇宙初期は熱平衡状態だったことが証明された。

宇宙初期は高温高密度であり、バリオン物質がイオン化しており、光子は電子と頻繁に散乱される不透明な状況であった。宇宙が膨張して冷えていくにつれてイオンの中性化が進み、電子の個数密度も減少していく。宇宙の温度がおよそ 2970 K、宇宙年齢にしておよそ 37 万年で光子と電子の散乱率がハッブルパラメータ (宇宙の膨張率) よりも小さくなり、光は散乱されずに真っすぐ進むようになる。この時期を“宇宙の晴れ上がり”または“最終散乱時刻”と呼ぶ¹。我々観測者は最終散乱時刻に対応する“最終散乱面”に囲まれており、そこから散乱されることなく届く CMB 光子を観測することができる。

CMB がほぼ 2.725 K の黒体放射のスペクトルを持つと同時にわずかな温度異方性を持つことも発見された。ある空の 1 点での CMB 温度を $T(\theta, \phi)$ とする。全方向で平均した温度は

$$\langle T \rangle = \frac{1}{4\pi} \int T(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi = 2.725 \text{ K} \quad (1.1)$$

¹ 宇宙の晴れ上がりは光子と電子の散乱率がハッブルパラメータより小さくなる時期、最終散乱時刻は CMB 光子が電子と最後に散乱する時刻として定義されるため厳密には異なる時刻を表すが、ほぼ同時刻とみなしてもよい。

である。この空の1点 (θ, ϕ) における温度揺らぎを

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) \equiv \frac{T(\theta, \phi) - \langle T \rangle}{\langle T \rangle} \quad (1.2)$$

と定義する。Planck衛星によって観測された温度揺らぎ [3] は $\sim 100 \mu\text{K}$ であり、わずかな温度異方性を示している(図1.1)。

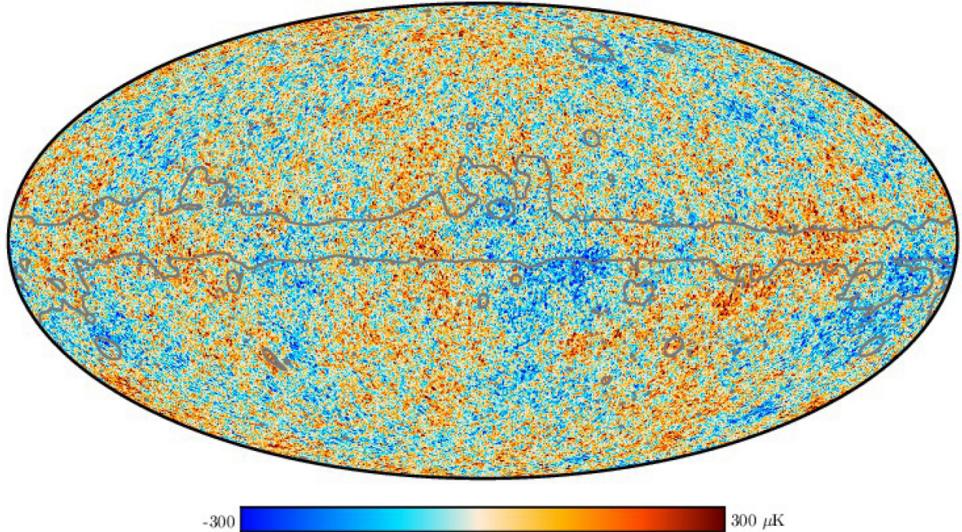


図 1.1: Planck衛星によって観測された CMB の温度異方性のマップ。

CMB実験ではCMBの観測データと望遠鏡の角度データを用いて図1.1で示すようなCMBの異方性を表す“マップ(強度分布図)”を作成する。このマップを球面調和関数 $Y_\ell^m(\theta, \phi)$ で展開してパワースペクトル(C_ℓ)作成することで、宇宙論パラメータを求めることができる。空(天球面上)の (θ, ϕ) (図1.2)に対して単位ベクトル \hat{n} を

$$\hat{n} \equiv (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta) \quad (1.3)$$

と定義する。この時、CMBの温度異方性 $\Delta T(\hat{n}) \equiv T(\hat{n}) - \langle T \rangle$ を球面調和関数で

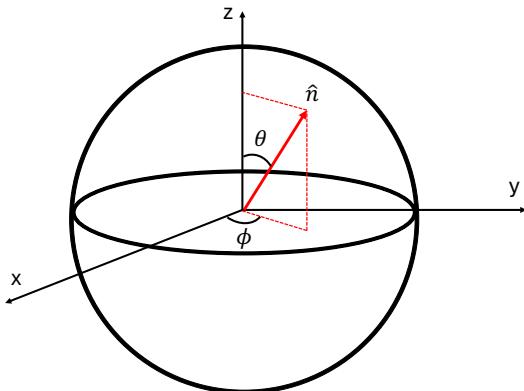


図 1.2: 天球面の座標。

$$\Delta T(\hat{n}) = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_\ell^m(\hat{n}) \quad (1.4)$$

と展開する。ここで、 $a_{\ell m}$ は展開係数である。また、 m は揺らぎの方向を決め、 ℓ は揺らぎのスケールの大きさを表す。 ℓ と角度スケール ($\delta\theta$) の関係は

$$\delta\theta = 180^\circ/\ell \quad (1.5)$$

と表せる。しかし、展開係数 $a_{\ell m}$ は添字 m による座標依存性があるため、パワースペクトル C_ℓ は展開係数 $a_{\ell m}$ に対して

$$C_\ell \equiv \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} a_{\ell m}^* \quad (1.6)$$

と定義することで、座標に依らない物理量として扱うことができる。

1.1.2 Λ -CDM モデル

CMB のパワースペクトルの測定により、 Λ -CDM モデルと呼ばれる宇宙の進化を記述する標準理論が構築された(図 1.3)。 Λ -CDM モデルは、6 つのパラメータのみで宇宙を記述するもので、 Λ はダークエネルギーに対応するAINSHUTAIN の宇宙定数を表し、CDM は “Cold Dark Matter” を意味する。現在での Λ -CDM モデルのパラメータを表 1.1 にまと

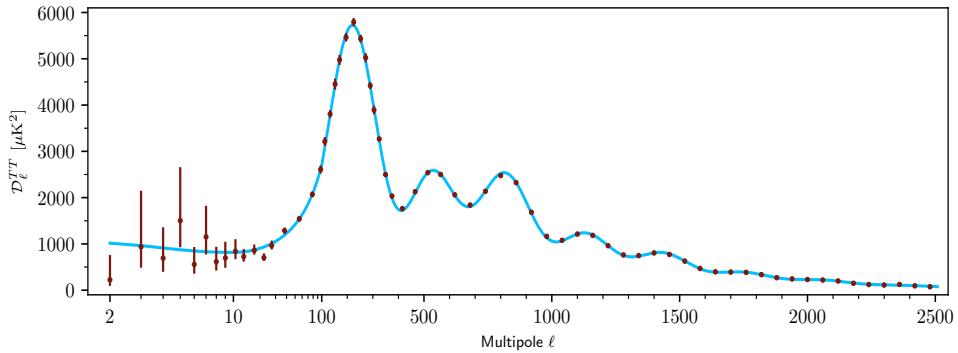


図 1.3: Planck の観測から計算された CMB の温度パワースペクトル [3]。縦軸の D_ℓ^{TT} は $D_\ell^{TT} = \frac{\ell(\ell+1)C_\ell}{2\pi}$ を表す。青の線は Λ -CDM モデルのベストフィットを表す。

める。現在では我々の知っているバリオン物質はエネルギー密度でたったの 5% で、ダ

表 1.1: Planck の観測から得られた Λ -CDM モデルの宇宙論パラメータ [3]。これらの値の推定には CMB の偏光、lensing のパワースペクトル、バリオン音響振動も用いる。

$\Omega_b h^2$ (バリオン密度)	0.02242 ± 0.00014
$\Omega_c h^2$ (CDM 密度)	0.11933 ± 0.00091
$100\theta_{MC}$ (最終散乱面の見込み角度)	1.04101 ± 0.00029
τ (再電離期における光学的厚み)	0.0561 ± 0.0071
$\ln(10^{10} A_s)$ (スカラー型の原始揺らぎの振幅)	3.047 ± 0.014
n_s (スカラー型の原始揺らぎのべき係数)	0.9665 ± 0.0038

クエネルギーが約70%、CDMが25%を占めている。一方で、宇宙初期では異なるエネルギー密度の組成を持っている。

Λ -CDMモデルにおける一様等方な宇宙では、エネルギー密度 $\epsilon(t)$ 、圧力 $P(t)$ 、スケールファクター $a(t)$ の関係は、フリードマン方程式³

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\epsilon - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (1.7)$$

と、流体方程式

$$\dot{\epsilon} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\epsilon + P) = 0 \quad (1.8)$$

と、状態方程式

$$P = \omega\epsilon \quad (1.9)$$

で表せる[4]。ここで G はニュートンの重力定数である。また、 K は空間曲率を表し、 $K=0$ で平坦宇宙を表す。 ω は宇宙を占める成分ごとに異なるパラメータであり、成分は

- 放射(相対論的粒子、 $\omega = \frac{1}{3}$)
- 物質(非相対論的粒子、 $\omega = 0$)
- ダークエネルギー($\omega = -1$)

に分けられる。各成分ごとに方程式が成り立つとすると、式(1.8)と式(1.9)から成分 i のエネルギー密度は

$$\epsilon_i(a) = \epsilon_{i,0}a^{-3(1+\omega_i)} \quad (1.10)$$

となる。ここで、 $\epsilon_{i,0}$ は現在での値である。 a は宇宙初期では0に近づくため、 ω が大きい成分ほど優勢になる。逆に宇宙の膨張するにつれて ω が小さい成分ほど優勢になる。そのため、現在ではダークエネルギー優勢であるが、宇宙の初期では放射や物質が優勢であった。

放射、物質優勢宇宙でのスケールファクターの時間依存性を見る。成分 ω の1成分宇宙でかつ平坦であると仮定すると式(1.7)は以下の単純な形になる。

$$\dot{a}^2 = \frac{8\pi G\epsilon_0}{3}a^{-(1+3\omega)} \quad (1.11)$$

スケールファクターが $a \propto t^q$ の幂乗に従うと仮定すると

$$a(t) \propto t^{2/(3+3\omega)} \quad (1.12)$$

で表せる。したがって放射優勢期、物質優勢期では宇宙は減速膨張であったことが分かる(表1.2)。

ダークエネルギー優勢宇宙では式(1.10)から、エネルギー密度は一定であり、式(1.7)を解くことで

$$a(t) \propto e^{Ct} \quad (C = \text{Const}) \quad (1.13)$$

を得られ、宇宙は加速膨張する。

²時刻 t での宇宙の広がりを表す膨張因子

³本論文では $\hbar = c = 1$ の自然単位系を用いる。

表 1.2: エネルギー成分ごとのスケールファクターの時間依存性。

エネルギー成分	$a(t)$	$\ddot{a}(t)$
放射	$t^{1/2}$	< 0
物質	$t^{2/3}$	< 0
ダークエネルギー	e^{Ct}	> 0

1.1.3 地平線問題

平坦な空間を動径 r 方向に進む光の経路は $ds^2 = -dt^2 + a^2(t)dr^2 = 0$ であり、これより光子が到達できる共動距離（宇宙の膨張に依らない距離）は

$$r = \int_0^r dr' = \int_0^t \frac{1}{a(t')} dt' \quad (1.14)$$

となる。これにスケールファクターをかけて物理的距離にすると

$$d_{\text{hor}}(t) \equiv a(t)r = a(t) \int_0^t \frac{1}{a(t')} dt' \quad (1.15)$$

を得る。この $d_{\text{hor}}(t)$ を“地平距離”と呼び、ある時刻 t までに光が到達できる距離、すなわちある時刻 t で相関を持つて距離を表す。放射優勢期では、表 1.2 のスケールファクターを式 (1.15) に代入すると $d_{\text{hor}}(t) = 2t$ となる。物質優勢期でも同様にして $d_{\text{hor}}(t) = 3t$ を得られる。つまり、減速膨張宇宙では地平距離は t に比例して増加する。これは宇宙初期では地平距離が宇宙の膨張よりも速く広がることを意味する。CMB が最終散乱時刻での散乱光であるが、最終散乱時の地平距離は天球上の見込み角で約 2° しかない。すなわち、 2° 以上離れた領域同士は地平距離より離れており、相関を持てない。一方で、CMB の温度異方性は図 1.1 のように $100 \mu\text{K}$ の精度で等方的であり、相関を持たないはずの領域まで温度が一致している。既存の理論ではこの観測結果を説明することはできず、“地平線問題”と呼ばれる。この他にも宇宙初期で極端に平坦であったという“平坦性問題”や、モノポール（磁気单極子）が存在しない“モノポール問題”などが未解決な問題となっており、新たな理論による説明が求められる。

1.2 CMB の偏光とインフレーション理論

1.2.1 インフレーション理論

地平線問題をはじめとする現在の宇宙論が抱える問題を解決する有力な理論として“インフレーション理論”が提唱されている。この理論はビッグバンより前の初期に宇宙が加速膨張したとする理論である。加速膨張によって地平距離が大きく引き伸ばされ、最終散乱面全体で相関を持つようになり、CMB 温度異方性の観測結果を説明することができる。表 1.2 にあるように、ダークエネルギーのように働く機構があれば加速（指数関数的）膨張を実現できる。インフレーションではインフラトンと呼ばれるスカラー場を導入して加速膨張を説明

する。インフラトン ϕ が一様な空間でポテンシャル V を持つとすると、エネルギー密度は

$$\epsilon_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi) \quad (1.16)$$

となり、インフラトン場の圧力は

$$P_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi) \quad (1.17)$$

で与えられる。インフラトン場が

$$\dot{\phi}^2 \ll V(\phi) \quad (1.18)$$

のようにゆっくり変化する時、インフラトン場はダークエネルギーのように振る舞う。すなわち、インフレーションを起こすための条件は

- $\dot{\phi}$ が十分小さい
- $\epsilon_\phi \sim V(\phi)$ が大きく、優勢である

である。

初期宇宙でこの条件をどう満たすのかを見る。式 (1.8) より、インフラトン場の流体方程式は

$$\dot{\epsilon}_\phi + 3H(t)(\epsilon_\phi + P_\phi) = 0 \quad (H(t) = \dot{a}/a) \quad (1.19)$$

である。これに式 (1.16) と式 (1.17) を代入すると

$$\ddot{\phi} + 3H(t)\dot{\phi} + \frac{dV}{d\phi} = 0 \quad (1.20)$$

を得る。これは摩擦力を受ける粒子の運動方程式と同じであり、 $3H(t)\dot{\phi}$ が摩擦項に対応する。インフラトン場が “終端速度” に達した ($\ddot{\phi} = 0$) 時に

$$\dot{\phi} = -\frac{1}{3H} \frac{dV}{d\phi} \quad (1.21)$$

となる。これより、式 (1.18) の条件は

$$\left(\frac{dV}{d\phi}\right)^2 \ll 9H^2V \quad (1.22)$$

に置き換えられる。すなわち、インフラトンポテンシャルの勾配が十分小さく、摩擦項が十分大きければインフラトン場は加速膨張を引き起こすことができる。この条件は “スローロール条件” と呼ばれる (図 1.4)。

1.2.2 CMB の偏光モード

インフレーション理論は宇宙の加速膨張を説明するが、その際に原始重力波が生成されると考えられている [5]。この原始重力波は CMB に空間非対称な “B モード” と呼ばれる偏光パターンを残す。つまり、CMB の偏光 B モードを観測することでインフレーション理論の検証が可能になる。

まず、CMB の偏光が生成される原理を説明する。CMB に偏光ができるには

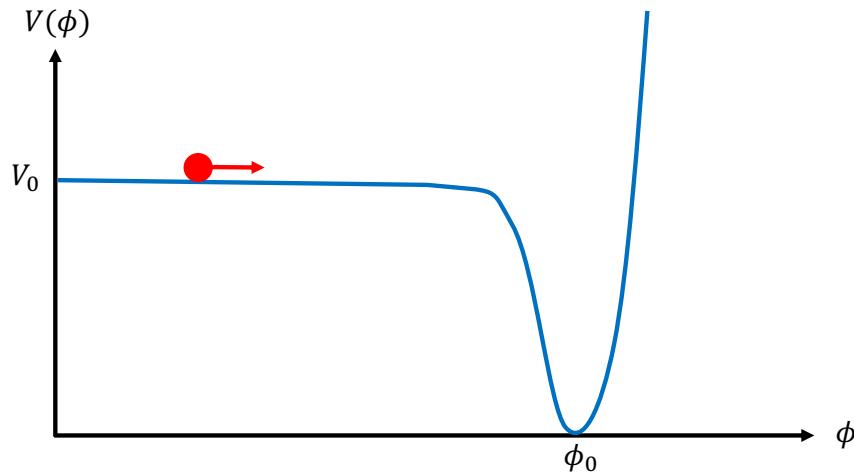


図 1.4: インフレーションを起こせるポテンシャルの例。ポテンシャルの最小値は $\phi = \phi_0$ であり、 ϕ は ϕ_0 に向けてゆっくりと転がっていく。その間、インフラトン場は一定のエネルギー密度 $\epsilon_\phi \sim V_0$ として加速膨張に作用する。

- トムソン散乱
- 電子から見た四重極の温度異方性

の 2 つが鍵となる [6]。CMB の偏光は図 1.5 で示すように電子とのトムソン散乱によって生まれる。実際にはあらゆる方向から入射する光が電子と散乱されるため、光の温度が等しければ重ね合わせによって無偏光として観測される。しかし、CMB にはわずかな温度異方性があり、電子の静止系において四重極の温度異方性があれば偏光を観測できる（図 1.6）。

CMB の偏光を表す観測量として、デカルト座標軸 (x, y) と、それに対して 45° 傾けた (a, b) 軸をとり、各軸での電場成分に対してストークスパラメータ Q, U を

$$Q \propto E_x^2 - E_y^2 \quad (1.23)$$

$$U \propto E_a^2 - E_b^2 \quad (1.24)$$

と定義する。しかし、この量は観測者の系の取り方によって変化するため、 Q, U を組み合わせて観測者の系に依存しない偏光成分として E モードと B モードを定義する（図 1.7）。ある波数ベクトル ℓ が作る偏光分布を考える時、E モード偏光は ℓ に平行か垂直であり、空間対称である。一方で、B モード偏光は ℓ に対して 45° 傾いており、空間非対称である。これによって偏光成分を区別できる。

偏光 B モードは原始重力波と重力レンズ効果の 2 つの要因から生成される。CMB に異方性をもたらすインフラトンの揺らぎは“スカラー型揺らぎ”と“テンソル型揺らぎ”に分けられ、原始重力波はテンソル型揺らぎに対応する⁴。重力レンズでは、最終散乱時刻で生じた E モードが我々に届くまでに重力レンズ効果によってその偏光軸が回転し、B モードとして観測されるものである。つまり、インフレーション理論の検証には原始重力波に由来する偏光 B モードを観測することが必要である。

⁴一方で、スカラー揺らぎは偏光 E モードのみを生成する

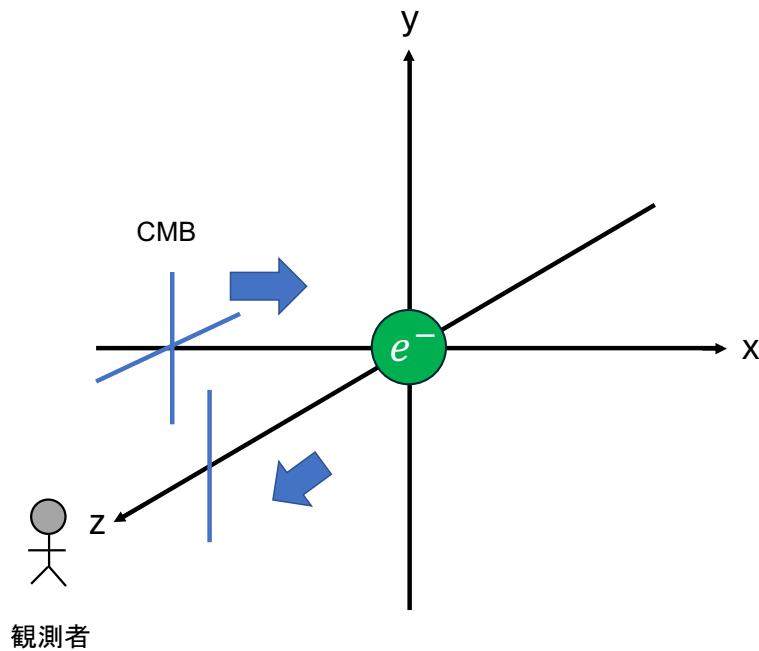


図 1.5: 偏光が生じる原理。 x 軸方向に入射する無偏光であった光が z 軸方向(観測者のいる方向)に散乱されると、 y 軸方向の直線偏光のみが残る。

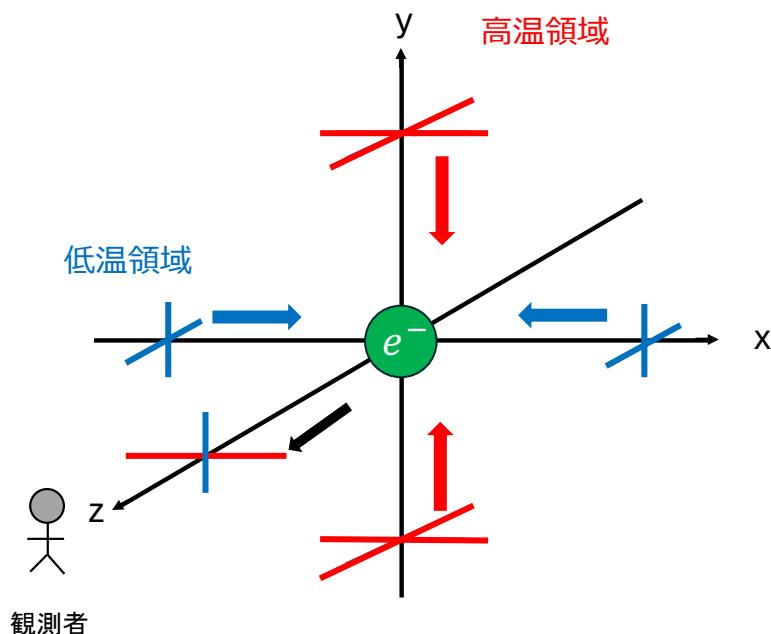


図 1.6: 電子の静止系で四重極の温度異方性によって作られる直線偏光。高温領域と低温領域が 90° ごとに分布する時、直線偏光を観測できる。

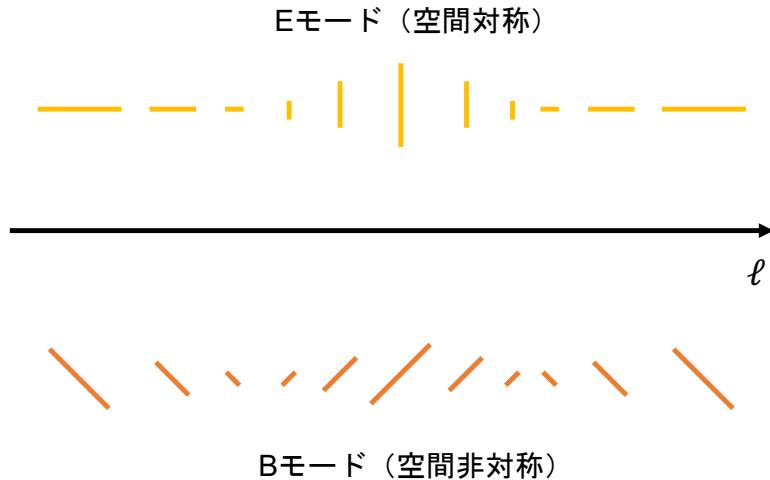


図 1.7: 波数ベクトル ℓ に対する偏光 E モードと B モード。線の長さがストークスパラメータの大きさに対応する。

1.2.3 偏光 B モードの探索状況

B モードの探索は、温度異方性と同様にして B モードの CMB パワースペクトルを計算し、スペクトルの振る舞いを見ることで行える(図 1.8)。原始重力波由来の B モードと重力レンズ由来の B モードはスペクトルの ℓ 依存性の違いから区別できる。また、原始重力波由来の B モード探索は重力レンズの影響が少ない大角度スケールで行う必要がある。原始重力波の振幅は慣例的にスカラー型揺らぎの振幅との比で表す。この比の値を“テンソル・スカラー比” r と呼ぶ。波数 q に対して、原始重力波とスカラー型揺らぎのパワースペクトルをそれぞれ $P_{\text{重力波}}(q)$ 、 $P_{\text{スカラー}}(q)$ とすると r は

$$r(q) = \frac{4P_{\text{重力波}}(q)}{P_{\text{スカラー}}(q)} \quad (1.25)$$

と表せる。インフレーションの発見は偏光 B モードのパワースペクトルを得ること、すなわち 0 ではないテンソル・スカラー比の発見であり、多くの CMB 実験によってこの r に対する制限が与えられている。現在では Planck 衛星の結果に BICEP/Keck 実験の観測結果を加えたもので、 r に対して

$$r(q = 0.002) < 0.036 \text{ (95 \% Confidence Level)} \quad (1.26)$$

という上限が与えられている [8]。

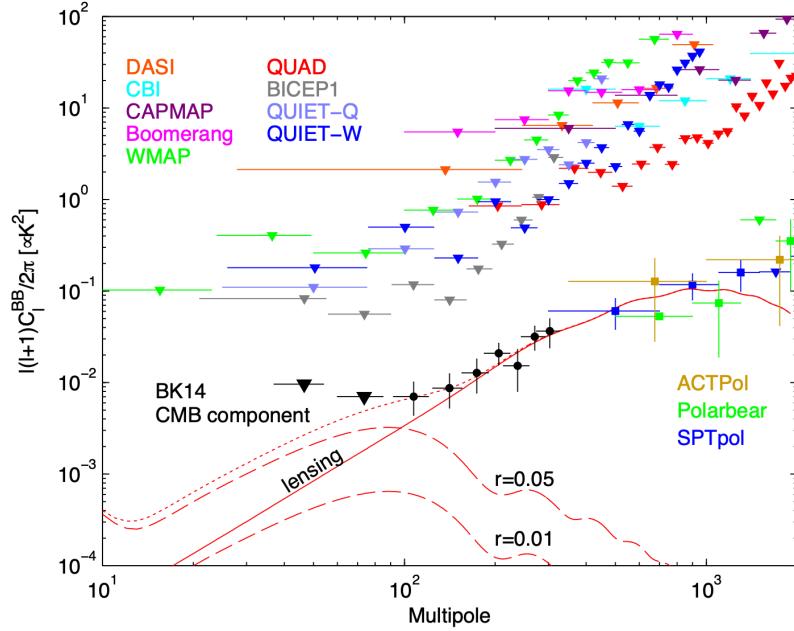


図 1.8: 偏光 B モードパワースペクトルの理論予想 [7]。重力レンズ由来の B モードスペクトルは原始重力波由来のものと振る舞いが異なる。また、テンソル・スカラー比の値によってもスペクトルの大きさが異なる。

1.3 CMB の偏光とニュートリノ質量和

1.3.1 宇宙の再電離と光学的厚み τ

宇宙の晴れ上がり以降 CMB 光子は一切散乱されることはないかといえばそうではない。晴れ上がりの後、赤方偏移 $z \sim 20^5$ ⁵ の時期になると、最初の天体が誕生し、天体から発せられる強い紫外線によって宇宙に広がっていた中性水素原子が再び電離される。この現象を“宇宙の再電離”と呼ぶ。再電離によって生じた自由電子によって CMB 光子は再び散乱される。この再電離期を特徴付けるパラメータとして光学的厚み τ を

$$\tau \equiv \int_{t_{rs}}^{t_0} dt \bar{n}_e \sigma_\tau \quad (1.27)$$

と定義する。ここで、 t_{rs} は再電離が開始した時間、 t_0 は現在の時刻、 \bar{n}_e は自由電子の平均個数密度、 σ_τ は CMB と自由電子の散乱断面積を表す。つまり、光学的厚みは CMB にとって電子がどれほど不透明であったかを示す量である。

再電離期の散乱は CMB の異方性に角度スケールに応じて 2 つの効果をもたらす。1 つは $\ell \gtrsim 10$ の角度スケールで CMB の異方性が散乱によってならされて、パワースペクトルが $e^{-2\tau}$ で減衰する効果である。もう 1 つは $\ell \lesssim 10$ の大角度スケールで新しい偏光を作る効果で、偏光の強度は $1 - e^{-\tau} \sim \tau$ に比例する。パワースペクトルにすると、 $\tau^2(1 + 2\tau)$ に比例する。この ℓ 依存性は再電離期のハッブル長に対応している。また、 $\ell \lesssim 10$ での効果は偏光 E モードのパワースペクトルに対して現れる。

⁵ 赤方偏移 z はスケールファクターに対して $1 + z = \frac{1}{a}$ の関係である。

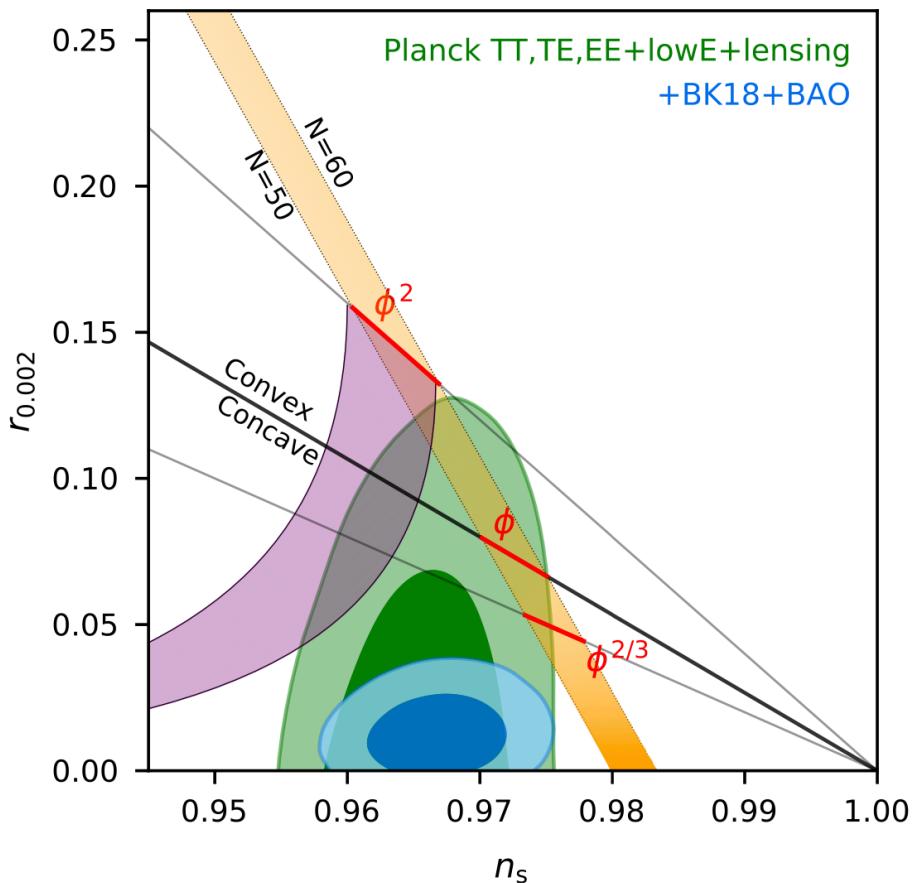


図 1.9: Planck 実験と BICEP/Keck 実験によって与えられた r と n_s 平面に付けられた制限 [8]。 n_s はスカラー揺らぎを特徴付ける量で、この値が 1 からずれていることがインフレーションを支持することを意味する。 N はインフレーションによるスケールファクターの膨張率を表す。また、実線でインフラトンのポテンシャルが ϕ の幕乗だと仮定した時の r と n_s の関係を示している。

1.3.2 ニュートリノ質量和との縮退

光学的厚み τ は宇宙の再電離期を特徴付ける他にもニュートリノ質量和 (Σm_ν) を知る手掛かりにもなる。光学的厚み τ とニュートリノ質量和 (Σm_ν) はともにその値によって $\ell \sim 1000$ の小角度スケールで観測される重力レンズ由来の B モードパワースペクトルの振幅を変える(図 1.10)。 τ の値が大きいほど、また Σm_ν が大きいほどスペクトルの振幅は小さくなる。

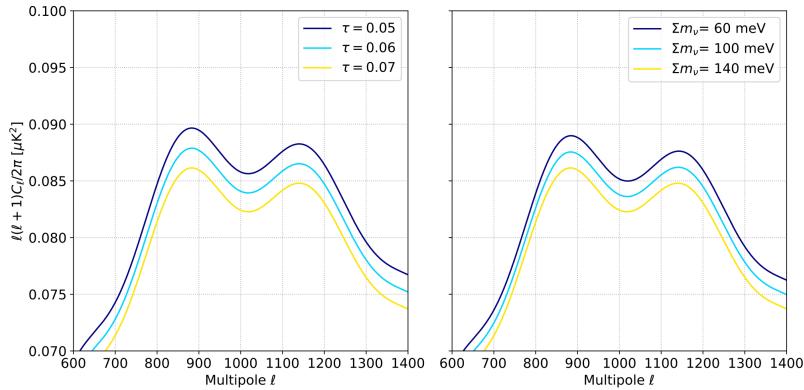


図 1.10: τ 、 Σm_ν によって変化する重力レンズ B モードパワースペクトル。[22] より引用。

ニュートリノは速度分散が大きく、小角度スケールでは構造形成を抑制するように働く。そのため、重力レンズによる影響も抑制される。この効果が質量和に応じて異なるため、スペクトルの振幅に違いが生まれる。 τ に関しても、同様な効果を生むため両者は縮退したパラメータとなっている。そのため、 τ を精度良く測定することで Σm_ν との縮退を解くことができる(図 1.11)。ニュートリノの質量和は素粒子物理学においても重要な課題であり、CMB の偏光観測からこの課題に迫ることは大きな意義がある。

1.3.3 偏光 E モードと τ

1.3.1 でも述べたように、重力レンズ由来の B モード以外にも E モードのパワースペクトルから τ の値を測定することができる。再電離によって $\ell \lesssim 10$ の大角度スケールで E モードのパワースペクトルに $\tau^2(1 + 2\tau)$ の依存性を生む。つまり、 τ が大きいほどスペクトルの振幅が大きくなる。そのため、E モードの観測から τ を精度良く測定することでも Σm_ν との縮退を解くことができる。温度異方性のパワースペクトルも含めてニュートリノ質量和に迫る τ の測定方法をまとめると表 1.3 のようになる。これより、偏光モードと角度スケール

表 1.3: τ の測定が可能なパワースペクトルのモードと角度スケール。

モード	角度スケール
温度異方性	小角度 (τ がスカラー型の原始揺らぎの振幅 A_s と縮退するため単独では難しい)
E	大角度 ($\ell \lesssim 10$)
B(重力レンズ)	小角度 ($\ell \sim 1000$)

に応じて τ 、そして Σm_ν にアプローチすることができる。

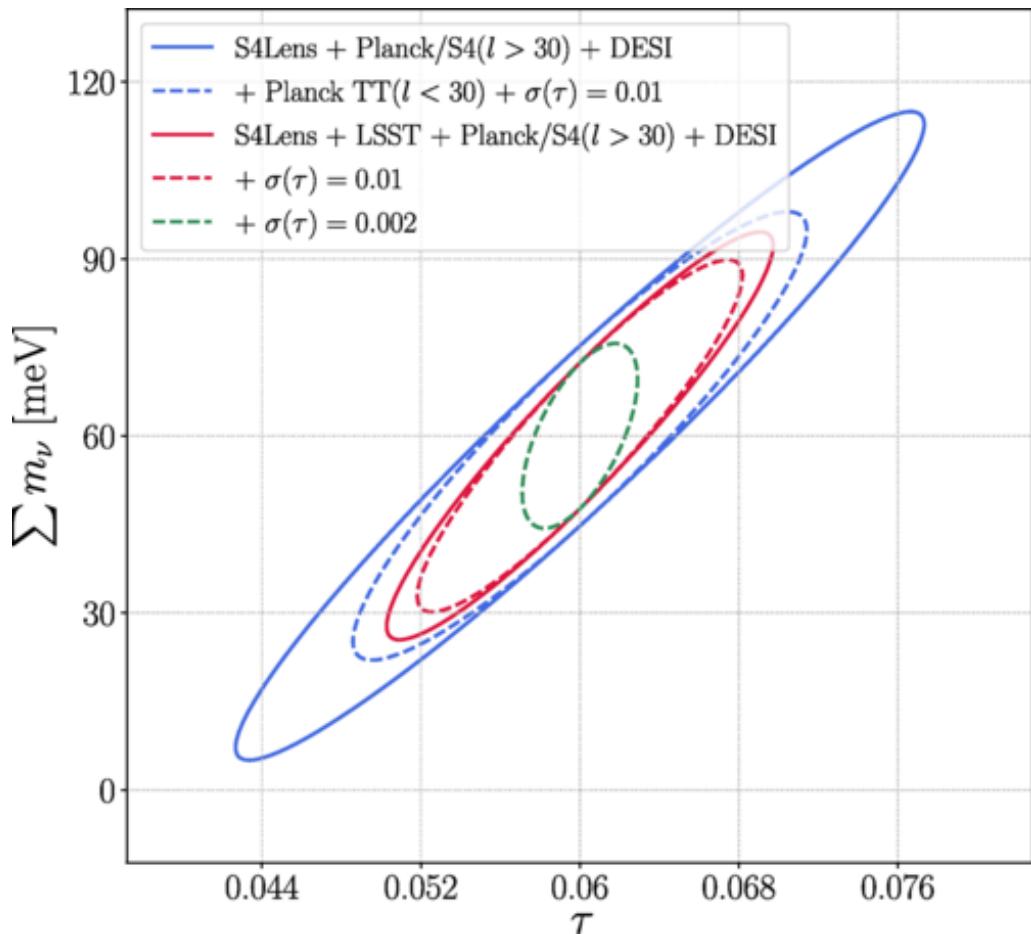


図 1.11: 縮退した τ と $\sum m_\nu$ 。図の楕円は 1σ の Confidence Level を表す。[9] より引用。

第2章 GroundBIRD 実験

CMB 観測実験には地上から観測する実験と衛星を用いて宇宙から観測する実験に分けられる。ここでは私が参加している GroundBIRD 実験(図 2.1)について実験の概要と現在の観測状況について説明する。

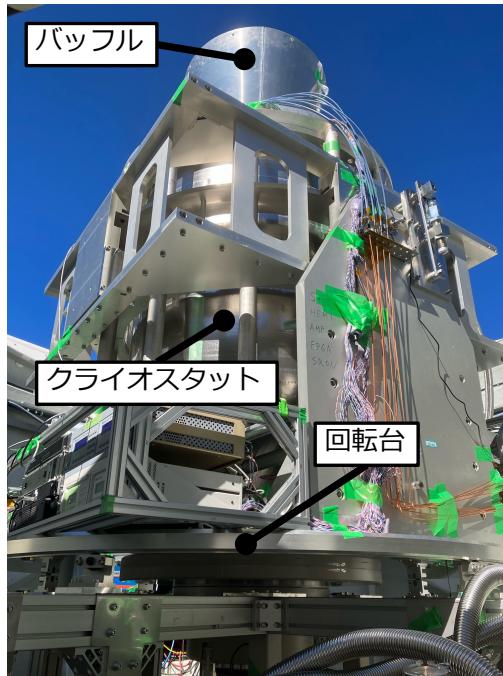


図 2.1: GroundBIRD 望遠鏡の外観。望遠鏡クライオスタットが方位角回転台の上に設置されており、回転台とともに最大で 20 RPM(1 分間で 20 回転) の速度で回転する。

2.1 実験概要

2.1.1 GroundBIRD 望遠鏡とスキャン戦略

GroundBIRD 望遠鏡はスペイン領カナリア諸島の 1 つであるテネリフェ島のティデ観測所(高度 2,400 m)に位置する地上 CMB 望遠鏡である。地上からの観測において最も邪魔なのが大気からの放射であるが、ティデ観測所は大気中の積算水蒸気量(Precipitable Water Vapor、以下 PWV と略す)がおよそ 3.5 mm[10] と、観測に適した場所である。

GroundBIRD はスキャン戦略に大きな特徴を持つ。地上からの観測では大気放射に由来するノイズが本来見たい CMB に混入する。大気放射は無偏光であるが、観測装置の不完全

性などで誤って偽偏光として観測されるおそれがある。特に、大気は刻一刻と揺らいでいるため、観測する空の領域ごとで観測される大気のノイズも揺らぎ、偽偏光を検出する影響は無視できなくなる。その影響を回避するためには大気揺らぎを抑制する変調が必要になる。GroundBIRD では、望遠鏡を最大で 20 RPM(3 秒で 1 回転)させる独自のスキャン戦略をとることで大気揺らぎを抑制した CMB 観測を実現する。加えて望遠鏡の仰角を 70° に固定し、方位角方向に高速回転させることで、全天の広い領域を観測することができる。望遠鏡の連続回転と地球の自転を組み合わせることで全天の約 45 % を観測することができる(図 2.2)。

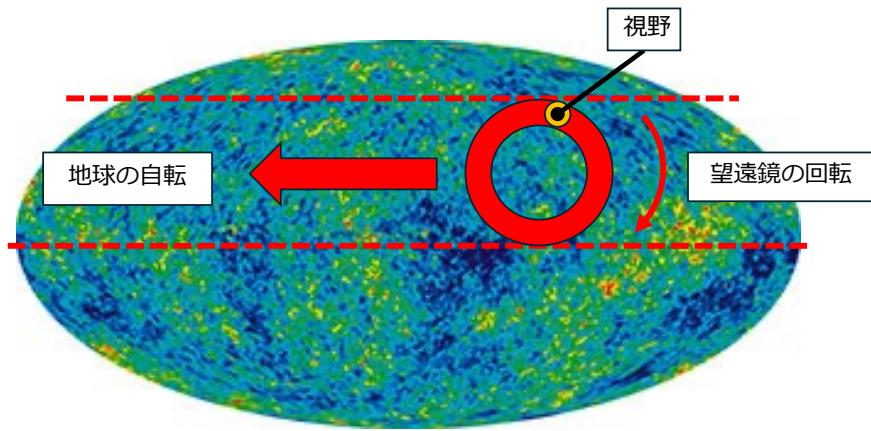


図 2.2: GroundBIRD のスキャン戦略。GroundBIRD は視野 $\pm 11^\circ$ で観測する。望遠鏡の回転と地球の自転を組み合わせることで 1 日で全天の約半分をカバーできる。

次に、GroundBIRD の内部構造の概略を図 2.3 に示す。光学系は放物面の主鏡と双曲面の副鏡から成り、CMB がバッフルから入り、光学系で 2 回反射させた後に、焦点面検出器ステージに入る。クライオスタット内は真空中かつ低温になっており、外側のチャンバー部(300 K)、40 K シールド、4 K シールドの 3 層から構成されている。4 K シールドの冷却にはパルスチューブ冷凍機を使用している。GroundBIRD では超伝導検出器 “MKID(Microwave Kinetic Inductance Detector)” を採用しているため、焦点面の温度は極低温に保つ必要がある。焦点面の冷却には He ソープション冷凍機を使用し、温度を 280 mK 付近に保持している。

2.1.2 超伝導検出器 MKID

CMB 観測実験で使われる超伝導検出器として MKID と “TES(Transition Edge Sensor)” ポロメータがある。MKID は比較的新しい検出器であり、通常の CMB 実験では TES が使われている。GroundBIRD では高速スキャンのもとで角度分解能を失わないようにサンプリングレートを 1 kHz にしているため、検出器の応答時間が $< \mathcal{O}(1)$ ms であることが要求される。しかし、TES の応答時間は $\mathcal{O}(1)$ ms であり [11]、GroundBIRD の要求を満たしていない。一方で MKID の典型的な応答時間は $< \mathcal{O}(1)$ ms であり [12]、この要求を満たしている。そのため、GroundBIRD ではより時間応答性の良い MKID を採用している。

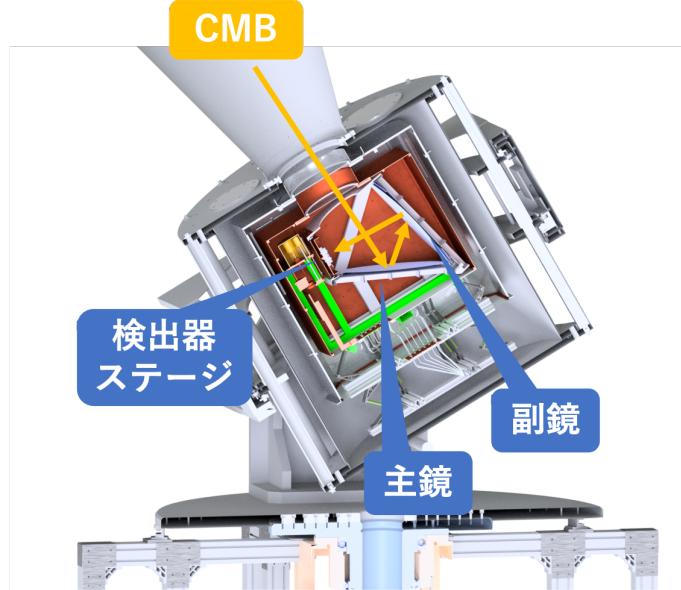


図 2.3: GroundBIRD 内部の概略図。バッフルを通って CMB が望遠鏡内に入り、主鏡と副鏡で反射されて検出器ステージに入る。

MKID の動作原理の概要を説明する。MKID は超伝導共振回路を応用した高感度な光検出器である。入射する光子のエネルギーに応じて変化する回路内のインダクタンスを、数 GHz で読み出す。MKID の電子顕微鏡写真 [13] と、等価回路を図 2.4 に示す。MKID は読み出し線、超伝導体からなる共振器回路、アンテナからなっている。アンテナから電磁波が入射すると超伝導共振器の状態が変化し、そのインピーダンスの変化を読み出すことで入射エネルギーを測定する。

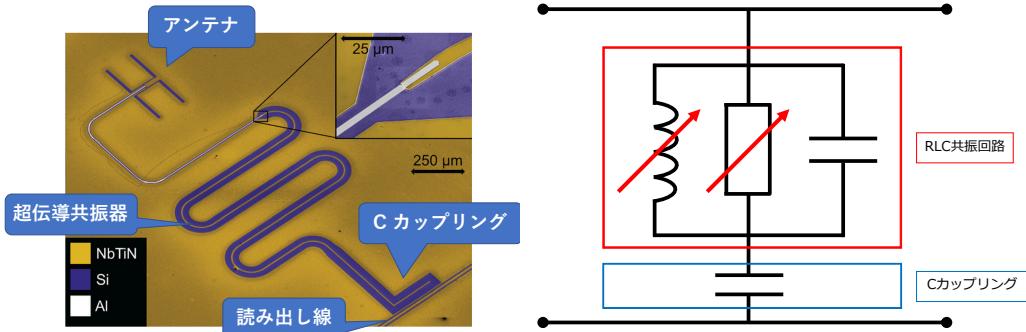
具体的には、検出器の温度上昇やエネルギーが $h\nu > 2\Delta$ (Δ は超伝導ギャップエネルギー) の光子との反応で、超伝導共振器内のクーパー対 (結合した電子対) が壊れる。対になっていた電子はエネルギーギャップより上の準位へと押し上げられる (図 2.5)。この過程で生成される電子を準粒子という。 Δ と超伝導転移温度 (T_c) の関係は $T=0\text{ K}$ の時に

$$2\Delta(T=0) = 3.52k_B T_c \quad (2.1)$$

と表すことができる [14]。ここで、 k_B はボルツマン定数である。この式より、MKID の材質として用いる超伝導体の転移温度と Δ は 1 対 1 対応しており、転移温度を適切に設定することで CMB のエネルギー ($\sim 160\text{ GHz}$) でクーパー対を壊すことができる。例えば、アルミニウムであれば転移温度は 1.2 K であり、対応する光子の必要エネルギーは 90 GHz になるため、CMB の検出が可能になる。また、MKID では入射信号によって生成される準粒子の数に比例した応答が得られるため、ギャップエネルギーに近いエネルギーの CMB に対して高感度な検出器になる。

準粒子によって共振器内の超伝導状態が変化し、可変インダクタンスの値が変化する。また、1 つの読み出し線に複数の共振器が容量性カップリング (Capacitive coupling; C カップリング) しており、1 対の読み出し配線を使って $\mathcal{O}(1000)$ 個の MKID を同時に読み出すこと

ができる。



(a) MKID の電子顕微鏡写真 [13]。読み出し (b) MKID の等価回路。可変インダクタンス線、超伝導共振器、アンテナからなる。と可変抵抗をもつ RLC 共振回路になっている。

図 2.4: 超伝導検出器 MKID

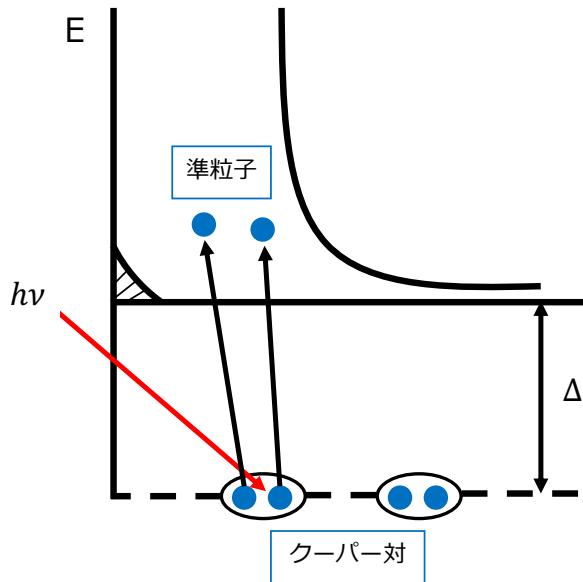


図 2.5: 入射光子による準粒子生成の模式図。縦軸は電子のエネルギーを表す。 $h\nu > 2\Delta$ のエネルギーを持つ光が超伝導共振器に入射すると、クーパー対が壊されてエネルギー準位が押し上げられ、準粒子になる。

2.1.3 観測する周波数帯域

CMB の偏光を観測するためには CMB と、銀河などから来る CMB と同周波数帯の放射である“前景放射”とを分離する必要がある。これらの前景放射はそれぞれ異なる周波数依存性を持つ(図 2.6)。主な前景放射には低周波側で卓越する“シンクロトロン放射”と高周波側で卓越する“ダスト熱放射”があり、CMB にとって大きなノイズとなる。そのため、低周波側 $\mathcal{O}(10)$ GHz から高周波側 $\mathcal{O}(100)$ GHz までの広い帯域での観測を行い前景放射を取り除

くことが求められる。[2.2.1](#)で述べるが、GroundBIRD は CMB に感度のある 145 GHz と、ダスト放射に感度がある 220 GHz の 2 つの帯域で観測する。一方で、低周波側は QUIJOTE¹のデータを使うことでカバーする。

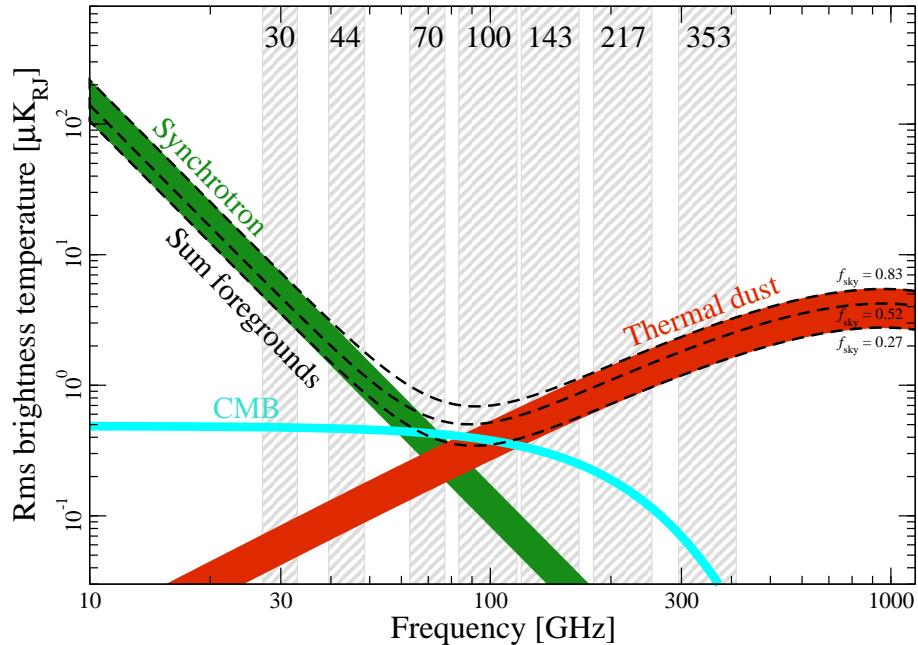


図 2.6: CMB と前景放射の偏光強度を周波数の関数として表した図。Planck[19] を参照。それぞれの前景放射は異なる周波数依存性を持ち、CMB これらを分離するためには広い帯域での観測が必要になる。

2.1.4 物理ターゲット

GroundBIRD が探る物理ターゲットは [1.3.3](#) で見た光学的厚み τ の地上からの再測定である。光学的厚み τ の測定は今までに WMAP や Planck といった衛星実験によって測定がされてきた。図 [2.7](#) に測定された τ の値の変遷を示す。誤差が小さくなってきており、最新の測定結果ではその誤差は $\sim 10\%$ である。しかし、平均値は系統的に下がっている傾向にあり、独立した測定によってこの結果の妥当性を評価する必要がある。そのため、地上実験(例えば CLASS[16] や QUIJOTE[17] など)からの τ の精密測定が始まっている。

特に GroundBIRD は独自のスキャン戦略を活かして τ の値に迫ることができる。高速スキャンによって大角度スケール ($6 < \ell < 300$) の CMB 偏光を測定することができる。大角度スケールと τ の関係を図 [2.8](#) に示す。偏光 E モードのパワースペクトルは大角度スケール ($\geq 10^\circ$) で τ に応じて異なる振る舞いをする。GroundBIRD はこの振る舞いを観測することができたため、 τ の測定に適している。3 年間の観測と、GroundBIRD と QUIJOTE の共同解析によって τ を誤差 $\sigma_\tau \sim 0.01$ で測定することを目指す [20]。これによって疑問の残る τ の測定を再検証することができ、縮退したニュートリノ質量和の精密測定を達成できる。

¹QUIJOTE(Q-U-I JOint Tenerife Experiment) 実験は GroundBIRD から 20 m ほどしか離れていない隣に位置する望遠鏡である。2 台の望遠鏡 (11, 13, 17, 19 GHz を観測する QT1 と 30, 40 GHz を観測する QT2) で構成される。

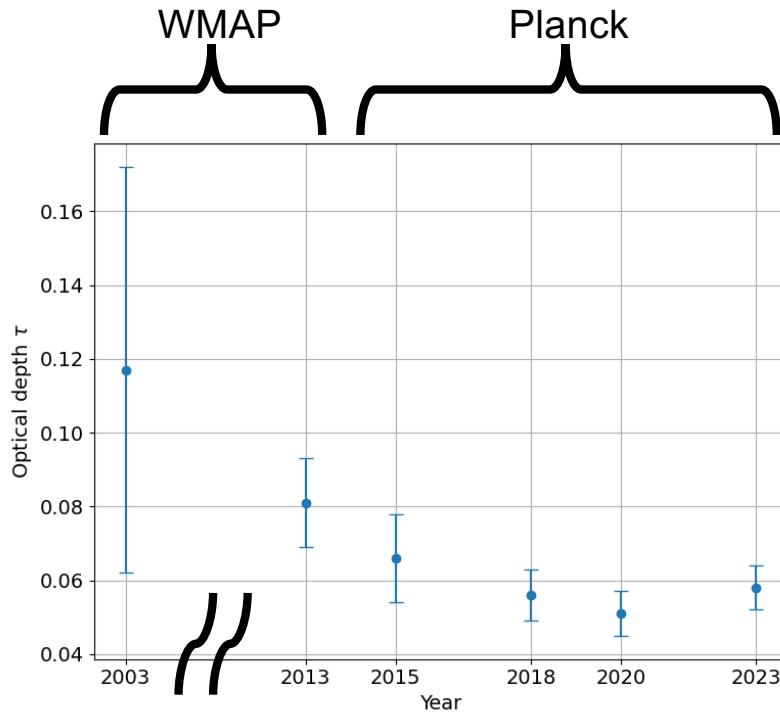


図 2.7: WMAP と Planck によって測定された光学的厚み τ の値 [15]。最新では誤差は $\sim 10\%$ である。

2.2 現在の観測状況

2.2.1 検出器のフルアレイインストール

GroundBIRD の現在の状況について説明する。2022年1月から2022年5月まではプロトタイプ検出器を用いたコミッショニング観測が行われた。コミッショニングデータを用いて望遠鏡の視線方向の較正 [21] や、偏光角較正、ノイズ特性の理解 [22] などがされてきた。並行して、2023年5月に全焦点面検出器のインストールが完了し、本格的な物理観測がスタートした。

インストールした焦点面検出器を図 2.9 に示す。23 個の MKID が 1 つのアレイに搭載されており、145 GHz が 6 アレイと 220 GHz が 1 アレイの全 7 アレイからなる。中央に 220 GHz アレイがあり、その周りを 145 GHz アレイが囲むように並んでいる。アレイごとに読み出しを行う。アレイ内での MKID の配置は図 2.9b によくなっている。各 MKID は片偏波アンテナを持つため、1 方向の偏光方向に感度がある。また、偏光方向は 45° ずつで 4 方向あり、異なる方向に感度のある MKID 同士で交互に配置されている。これにより、第??章で述べるような検出器間で差分を取る解析によって偏光測定をすることができる。

最後に 145 GHz, 220 GHz のそれぞれの検出器と望遠鏡ビームの特性を表 2.1 に示す。

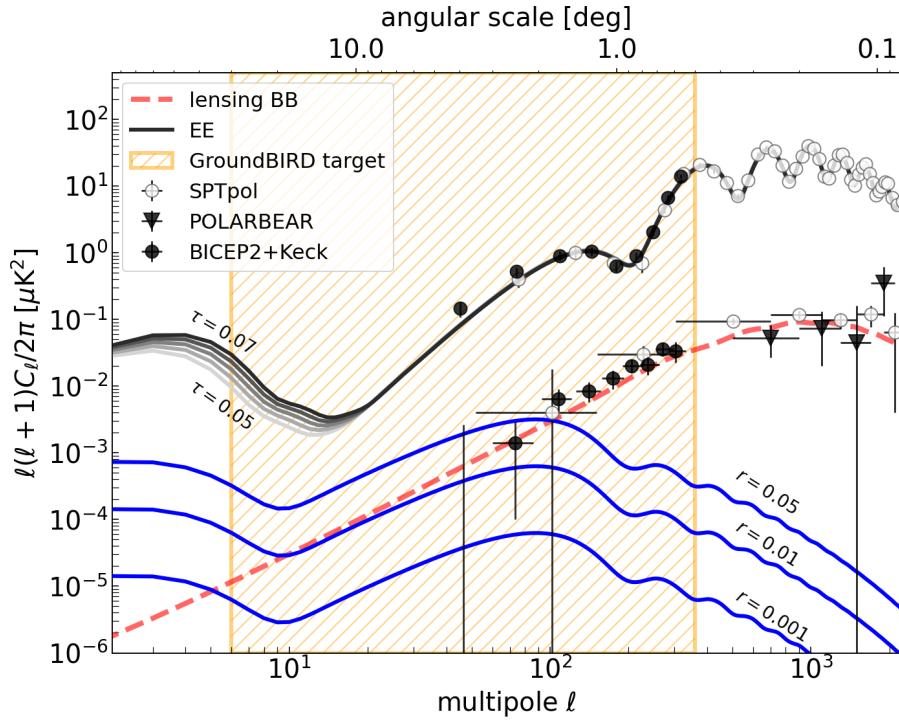
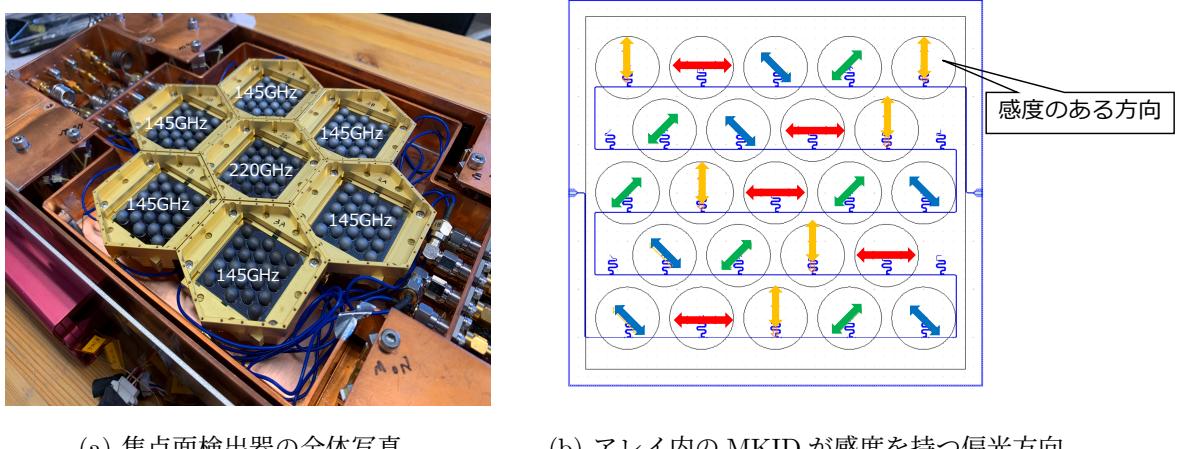


図 2.8: パワースペクトルの過去の観測結果と E,B モードの理論線、そして GroundBIRD の観測領域 [18] をオレンジで示す。青実線はテンソル・スカラー比を仮定した時の原始重力波由来の偏光 B モード、赤点線は重力レンズ効果由来の B モードを表す。黒実線は E モードであり、大角度スケール ($\geq 10^\circ$) で τ の値によってスペクトルに違いが生まる。



(a) 焦点面検出器の全体写真。

(b) アレイ内の MKID が感度を持つ偏光方向。

図 2.9: フルアレイの焦点面検出器 MKID

表 2.1: 145 GHz、220 GHz における検出器とビームの特性 [23]

	145 GHz	220 GHz
MKID 数	6 アレイ (138 ピクセル)	1 アレイ (23 ピクセル)
ビーム幅 (FWHM)	$0.60^\circ (36')$	$0.42^\circ (25')$
ビーム梢円率	< 1 %	< 2 %

2.2.2 リモート観測システム

焦点面検出器のフルアレイインストール後、本格的な観測が始まっているが、基本的に全ての操作(ドームの開閉、望遠鏡の回転など)をリモートから行なっている。観測の手順は以下のようにして行う。

1. 天候等が観測に十分適しているか確認
2. 問題がなければドームを開き、望遠鏡の回転を開始
3. 検出器のデータ取得を開始し、観測状況をモニター

望遠鏡をダストや雨、直射日光から守るために観測時間以外はドームを閉めている。観測開始前には天候状況(PWV、湿度、風速等)を確認し、観測するか否かを判断する。また、日光が望遠鏡の視野に入る日中や、冷却に使用するHeのメンテナンス時間以外は基本的に観測を継続する。そのため、観測シフトを日本時間と現地時間で分けることで1日を通して観測を続けている。また、Slackアプリケーションを導入し、アプリ内で対話的に観測状況を把握できるようになっている(図2.10)。



図 2.10: Slack アプリケーションを用いたモニター。Web カメラの映像から観測状況を確認できる。他にも観測中の検出器データのチェックや、サウンドモニターによる異音検知などが可能。

検出器をフルアレイでインストールし、観測システムが整ったことでGroundBIRD実験としては観測を続けてデータを蓄積する段階にある。そのため、求められることは

- 安定して長期的な運用と観測を続けられる
- 質の良いデータを取得する

ことである。現在の望遠鏡システムではこの条件を満たす上では不十分な点も多く、観測を続ける中でメンテナンスとアップグレードが必要である。以降の第3章ではデータ取得の長期運用のために仰角データ取得システムの改善を行い、第??章では検出器アレイとしてのデータの質を向上させるために検出器のアライメント較正を行なった。

第3章 仰角データ取得システムの改善

CMB 観測においては、検出器の時系列データと望遠鏡の角度データを途切れることなく連続的に取得し続けなければいけない。そのため、角度データ取得システムは安定的でかつ操作性がよいものであることが求められる。本章では既存の望遠鏡の仰角データ取得システムを改善し、その動作確認を行なった。

3.1 望遠鏡仰角データ取得システムの改善

3.1.1 角度情報データ取得の概要

はじめに、GroundBIRD 全体でのデータ取得システムの概要を述べる。CMB 観測においては検出器の信号を時系列データ（以下、TOD と略す）として取得する。最終的なマップ作成のためには、TOD と同期して望遠鏡の視線情報（角度データ）を取得することが求められる。GroundBIRD では望遠鏡の仰角方向と方位角方向で 2 つの角度データを取得している。連続回転する回転台の上部と下部は回転継手によって電気的に接続されている（図 3.1）。

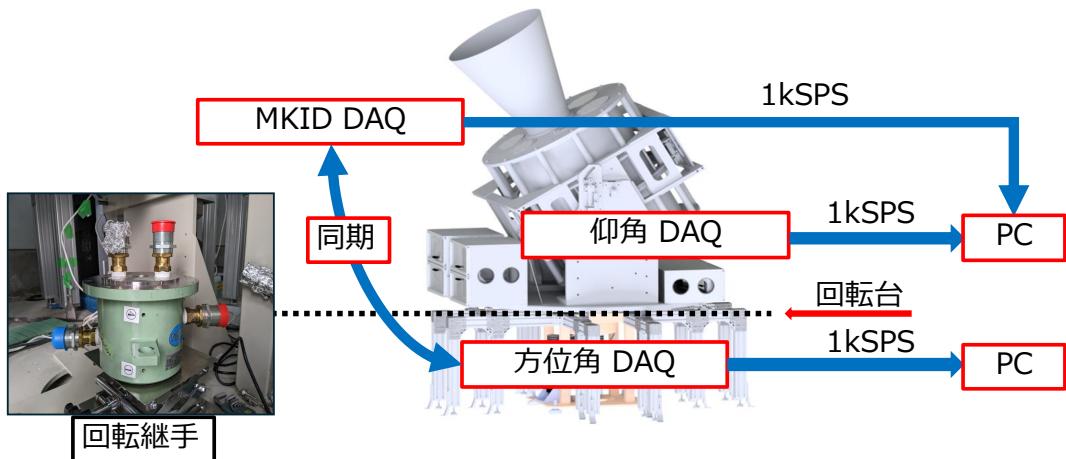


図 3.1: GroundBIRD の検出器データと角度データ取得系の概要。回転する回転台の上下での信号同期は“回転継手”が担っている。

仰角方向の角度データは、望遠鏡の側面に取り付けられたロータリーエンコーダー（Canon, R-1SL [24]）を使用し、Digilent 製の FPGA ボード Zybo Z7-20 ([25]、以下では単に Zybo と記す）で読み出す（図 3.2）。FPGA とは Field Programmable Gate Array の略で、様々な論

理回路がチップに搭載されており、使用者が配線を自由に組み合わせて論理回路を作ることができるデバイスである。FPGA では特定の演算を行う回路を作成できるため、高速処理を可能にする。また並列処理も得意である。エンコーダーは 4 秒角 ($1.1 \cdot 10^{-3}$ °) もの高い角度分解能を持つ。

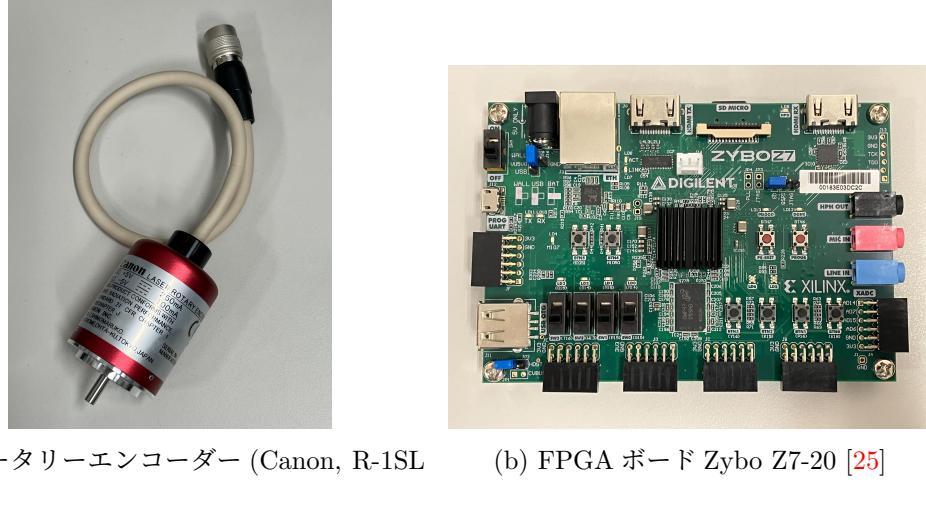


図 3.2: 仰角方向の角度データ読み出し

方位角方向の角度データは、回転台下部に取り付けられたロータリーエンコーダー (HEIDENHAIN, ERM220 [26]) を使用し、Xilinx 製の FPGA ボード Spartan3E [27] で読み出す (図 3.3)。エンコーダー自体の角度分解能は 2.6 分角 ($4.4 \cdot 10^{-2}$ °) である。さらに、平滑化フィルターを用いた方位角データの補完を行うことで、角度分解能を $5.7 \cdot 10^{-2}$ 分角 ($9.5 \cdot 10^{-4}$ °) に向上させている [28]。

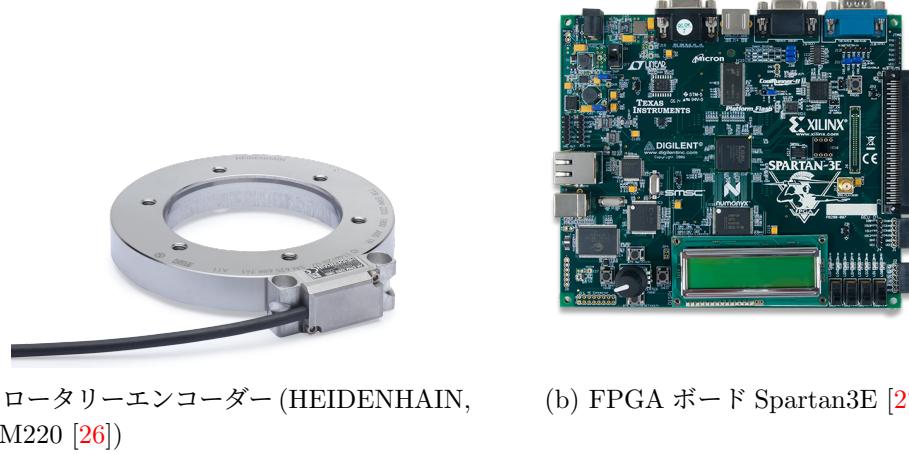


図 3.3: 方位角方向の角度データ読み出し

次に検出器のデータと方位角データに求められる同期精度を見積もる。時刻同期の精度を Δt とする。GroundBIRD の方位角方向の回転速度は最大で 120 °/s になる。方位角方向での角度分解能 $\Delta\phi$ は

$$\Delta\phi = 120^\circ/\text{s} \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

になる。時刻同期による角度の決定精度がエンコーダーの角度分解能よりも十分小さいことを課す。時刻同期による角度決定精度をデータ補完によって向上したエンコーダーの角度分解能である $9.5 \cdot 10^{-4}^\circ$ の 1% 未満と要求すると、 Δt の上限は

$$\Delta t < \frac{9.5 \cdot 10^{-4}^\circ \cdot 0.01}{120^\circ/\text{s}} = 79 \text{ ns} \quad (3.2)$$

となる。この正確な時刻同期が必要になるため、仰角と方位角の角度データ読み出しで共に FPGA ボードを使用している。先行研究 [28] により、時刻同期精度を 55 ns に抑え、要求を満たす精度を実現している。

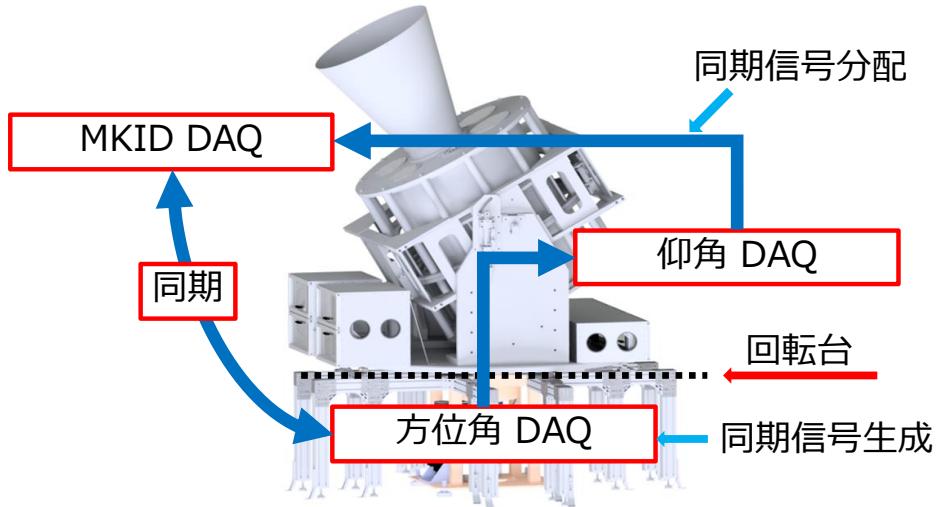


図 3.4: GroundBIRD の同期信号の流れ。回転台下部の方位角 DAQ ボードで生成された同期信号が回転継手を介して回転台上部の MKID の DAQ ボードに送信される。その際、仰角 DAQ ボードで同期信号を分配している。

GroundBIRD での同期信号の流れを説明する (図 3.4)。望遠鏡が連続回転するため、回転台の上下の電気的な接続に同軸ケーブルのような通常の信号線は使用できない。そのため、回転継手を介して回転台上下での信号を共有している。また、回転台の上下のデータ取得系でレートの遅い “同期信号” を回転継手を介して共有することで時刻の同期を図っている。

同期信号によるデータ同期を次のステップで行なっている。

1. 回転台下部の方位角 DAQ ボードから 1 秒に 1 回、基準となる同期信号を出力する。
2. 回転継手を介して回転台上部に届いた同期信号を仰角 DAQ ボードに入力する。
3. 回転台下部では、同期信号を出力した時刻情報を方位角のエンコーダーデータと共に保存する。
4. 仰角 DAQ ボード同期信号を分配し、検出器の DAQ ボードに送る。
5. 同期信号の到達した時刻情報を検出器の TOD と共に保存する。
6. 2 種類の TOD の時刻情報を用いて、各時刻での検出器信号と角度データの同期を行う。

3.1.2 仰角データ取得における問題点

本論文の研究対象である仰角のデータ取得に関して詳細に説明する。仰角のデータ取得系が担う役割は以下の2つである。

- 仰角の角度データを取得する
- 同期信号の分配

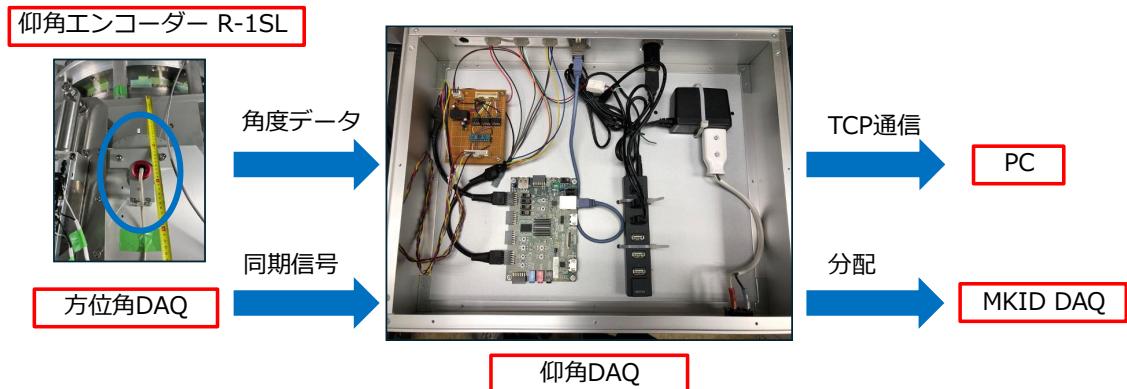


図3.5: 仰角データ取得システムの全体像。信号処理のほぼ全てを Zybo [25] が担う。信号の電圧変換、Zybo、電源からなるコンパクトなデータ取得系は1つのボックス内に配置されている。

データ取得系は非常にコンパクトであり(図3.5)、信号の処理は Zybo 内に搭載されている“Zynq [29]”と呼ばれるチップで行っている。Zynq は Xilinx が開発した、CPU、FPGA などが1チップに統合された System on Chip (SoC) の1つである。Zynq は CPU を搭載する Processing System (PS) 部分と、FPGA を搭載する Programmable Logic (PL) 部分に大きく分けられ、FPGA が得意とする並列処理や高速処理と、CPU が得意とする複雑な処理とで役割を分担できるため、効率の良い処理が可能となる。先行研究で FPGA に搭載するファームウェア¹の開発がなされており、実装されている。

FPGA 上でのファームウェアの全体図を図3.6に示す。設計には Vivado という Xilinx 製の開発ソフトを用いる。様々な IP コア(機能ごとの回路のまとめ)を IP インテグレータという GUI 上で配線し、全体のファームウェアを構成する。IP は自作の IP と、Xilinx 製の IP を組み合わせて使用している。

Zynq 内での処理の模式図を図3.7に示す。仰角エンコーダーはインクリメンタル方式を採用しており、エンコーダーからの出力信号は A 相、B 相、Z 相の3相からなる。エンコーダーからの出力パルス数で角度の変化量、A 相と B 相のパルスの立ち上がり順で回転方向が分かる仕様になっている。また、Z 相信号は1回転で1度出力され、回転の原点として使用される。3相の信号は Zynq 内のデコーダー部分で角度情報として翻訳され、1kSPS で “FIFO [30]” に充填される。FIFO とは first-in first-out メモリのこと、データを格納し、取り出

¹FPGA に組み込む機能を本論文ではファームウェアと呼ぶことにする。

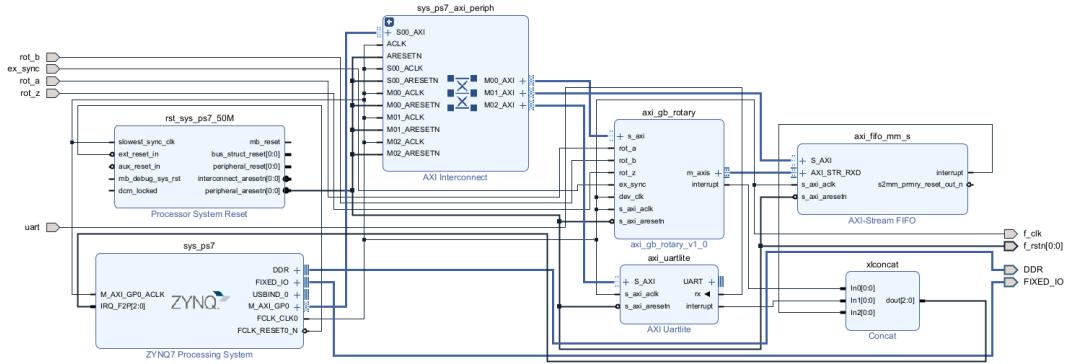


図 3.6: IP インテグレータの配線図。青く囲まれているブロックが IP コアを表す。ブロックの左側から出る線が入力信号で、右側から出る線が出力信号になっている。図中の “axi_gb_rotary” と呼ばれる IP が自作 IP で、デコーダーの役割を担っている。

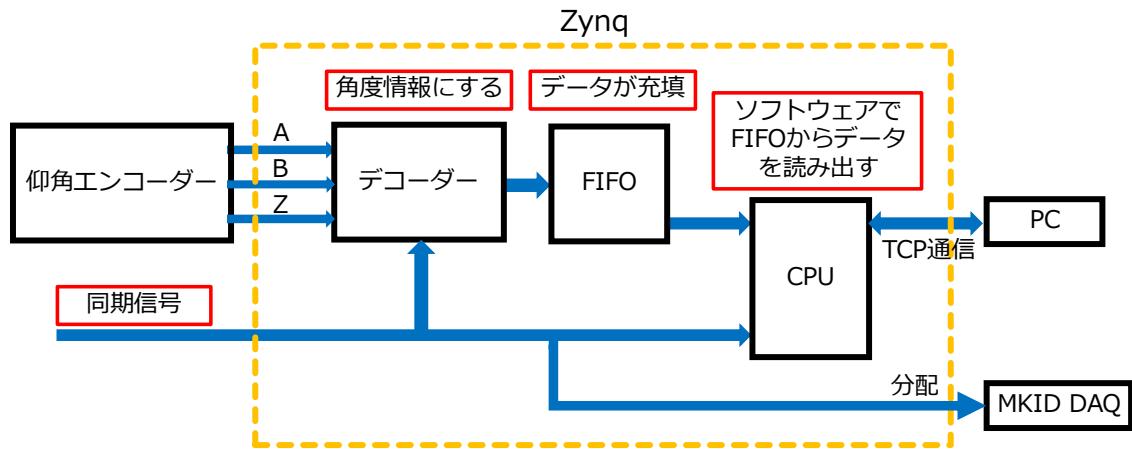


図 3.7: Zynq 内での信号処理。エンコーダーからの角度データ処理と方位角 DAQ ボードからの同期信号の分配を行なう。

す際は、格納した順番通りに先に格納したデータから取り出す構成になっている。FIFOに格納されたデータはCPUのソフトウェアで読み出し、TCP通信でPCへと送信される。

同期信号の通信方式はUART²を使用している。デコーダー部分では測定開始時からの経過時間として1kHzでインクリメントする“タイムスタンプ”を生成しており、同期信号が入力されると同期信号の時間情報を読み取り、このときのタイムスタンプ情報を取得する。タイムスタンプ情報はソフトウェアから読み出す。また、MKIDのDAQは複数のボードを使用するため、同期信号を分配させ、送信している。

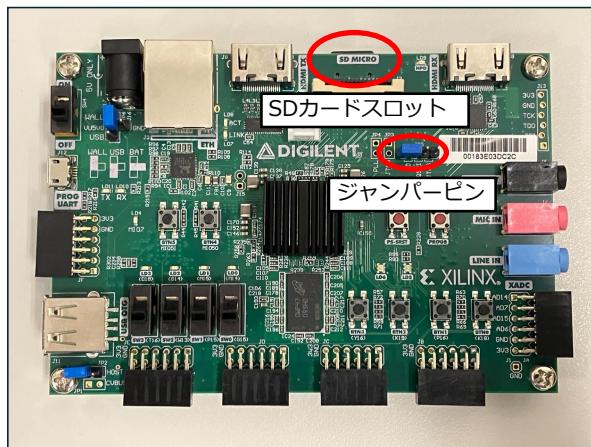


図 3.8: Zybo には SD カードスロットが付いている。システムを起動するために必要なファイルを SD カードに書き込み、スロットに差し込んで電源を入れることで稼働が開始する。ジャンパーピンは SD に設定しておく。

以上の構成で仰角 DAQ システムを稼働させていた(図 3.8)が、観測の長期運用を考えた際に、問題点を抱えていた。Zynq でのデータ処理と PC への通信を OS のない(ベアメタル³)環境でソフトウェアを動かすことで行っている。このことにより、システム全体が硬直的になっており、その扱いにおいて柔軟性がない。柔軟性がないことで起きる問題として以下のものが挙げられる。

- データ取得が異常終了した際のメンテナンスが難しい
- OS が介さない通信による信頼性の低下
- ソフトウェア、FPGA 面での改良が難しい

最も大きな問題はメンテナンス性である。観測の有無に問わず、望遠鏡の角度データは常に取得し続けており、安定した仰角データ取得が必要不可欠である。しかし、仰角エンコーダーから PC までのデータの流れが途切れてしまうことがある。それは、通信のエラーや停

²UART 通信では、送信側と受信側で通信速度を決めておき、1 byte (8 bits) ずつ情報のやり取りを行う。1 byte のまとめでは、“start bit (1 bit)”、“data (8 bits)”、“parity bit (1 bit、情報の誤検知に使用)”、“stop bit (1 bit)” の 4 つで構成され、全 11 bits になる。

³本来は「剥き出しの金属」という意味だが、転じて OS がインストールされていないコンピュータのことを指す。

電等による電源系統の不具合など様々な要因からくるもので、長期運用をする上ではある程度避けられないものである。その際、エンコーダーと Zybo 間の通信が切れて、Zynq 内でのエンコーダー情報が失われる。加えて、エンコーダーの原点情報も失われるため、通信を再開させた際に読み出した角度の値にオフセット値が乗ってしまう。Zynq 内で原点情報を記憶させるには望遠鏡の仰角を動かし、エンコーダーの Z 相信号を取得して値をリセットすることが必要であり、手間のかかる工程になる。この一連のメンテナンスをまとめると以下のステップに分けられる。

1. Zybo を再起動させて再度ソフトウェアを動かす
2. 望遠鏡の仰角を動かして Z 相信号を入力し、原点情報を記憶
3. 仰角を 70° まで動かして固定

この中で、Zybo の再起動と仰角を動かす際にケーブルに変な張力がかかっていないかの目視に現地での作業を要する。リモートでの望遠鏡運用を進める上で、少しでも現地で必要な作業を減らし、リモートでメンテナンスができることが望まれる。

また、Zybo と PC との TCP 通信を行うために、ペアメタル環境では TCP/IP のプロトコルスタックを独自で実装しなければいけない。今回は “lwIP (lightweight IP)” と呼ばれるオープンソースの TCP/IP プロトコルスタックを使用して TCP 通信を実装している。そのため、通信に関わるソフトウェアが複雑化する上、OS が通信を取り仕切るよりも信頼性に欠ける。

加えて、システムに組み込まれたソフトウェアや FPGA のファームウェアは固定化されており、今後の運用で変更点が生じた時に、SD カードに新しいファイルシステムを書き込んで全面的にシステム更新しなければならず、労力を要する。システムのカスタマイズ性を上げ、変更を容易にできるようになれば、運用に関わるコストを削減することができる。

3.1.3 PYNQ を用いた新システムの導入

上に述べた問題を改善するために、本研究では既存の Zynq システムに OS を搭載し、ソフトウェアを OS 上で動かすことによってシステム全体の柔軟性向上を試みた。これにより上記の問題点に対して

- データ取得が異常終了した際のメンテナンスをリモート主体で行える
- OS が通信を介することで信頼性が向上
- ソフトウェア、FPGA 面での改良をシステムを起動したまま行える

という改善が期待できる。一方でペアメタル環境に比べて OS をインストールすることで実行時間と使用メモリが増えるが、FIFO へのデータ充填と FIFO からの読み出しあともに 1 kSPS であり、FIFO の容量も十分であるため、性能に問題は出ない。Zynq に搭載する OS は基本的に linux ベースであるが、今回は “PYNQ [31]” と呼ばれる Ubuntu⁴、Jupyter および Python をベースとしたフレームワークを搭載した。PYNQ を採用した理由として

⁴ 今回は Ubuntu 22.04 がベースになっている

- ソフトウェアを PYNQ 上の Python スクリプトで動かせるため、通信スクリプトを簡潔に記述できる
- システム起動に必要なブートイメージファイルの作成が容易
- “Overlay” と呼ばれる機能を使用することで FPGA のファームウェアを Python で容易に変更できる

が挙げられる。

3.1.4 PYNQ イメージファイルの作成

PYNQ のイメージファイルを作成するにあたって、基本的な手順は [32] を参考にし、作業環境は Docker 上の Ubuntu 20.04 で構築した。その際に使用した開発ツールとバージョンを表 3.1 にまとめる

表 3.1: PYNQ イメージ作成で使用したツールとバージョン

ツール	バージョン
Vivado	2022.1
PYNQ linux イメージ	3.0.1
PetaLinux	2022.1

PetaLinux とは Xilinx が提供する、Zynq をはじめとする SoC 用の linux システムをビルドするためのツールである。この環境のもとで以下のステップで PYNQ イメージを作成した。

1. ベースとなる FPGA ファームウェアの作成

FPGA ファームウェアは Overlay によって Zybo 起動時に変更できるため、この時点では最も単純な回路を Vivado で準備してやれば良い。それをもとに Vivado 上でコンパイルをし、生成された 4 つの回路情報を持つファイル (.xsa ファイル、.bit ファイル、.hwh ファイル、.tcl ファイル) を取得する。

2. Zybo 用のスペックファイルの作成

スペックファイルは Zybo のスペック情報を.spec ファイルとして作成する。その後、作成した全ファイルをビルド用のディレクトリに置く。

3. ビルド

最後に make を実行してビルドを行い、PYNQ イメージファイル (.img ファイル) を生成して完了する。

4. イメージファイルの書き込みと PYNQ 起動

作成したイメージファイルを SD カードに dd コマンド等で書き込み、Zybo の SD カードスロットに差し込むことで PYNQ が起動する。また、起動時に Overlay スクリプトを走らせて図 3.6 で示したファームウェアで FPGA の回路を上書きするように設定した。これにより、本来の回路情報が PYNQ 上で再現される。

Overlay を用いて FPGA のファームウェアを変更する仕組みを図 3.9 に示す。



図 3.9: PYNQ から FPGA のファームウェアを変更する模式図。Vivado で設計した新しい回路ファイルを Overlay クラスに読み込ませることで容易に変更ができる。

Overlay に必要なファイルは Vivado でコンパイルをして生成される.bit ファイルと.hwh ファイルの 2 つである。これらは同じディレクトリに置いておく。Python で Overlay クラスをインポートし、.bit ファイルを読み込ませることで Overlay は実行される。その際、Overlay クラスは同じディレクトリにある.hwh ファイルも読み込んでくれる。図で示したように Overlay スクリプトはたった 2 行で書くことができ、ファームウェアの変更は非常に容易に実行できる。

最後に、Zynq 内で動かすスクリプトを PYNQ 用に Python で再構築した。

3.2 望遠鏡への実装

3.2.1 新データ取得システムのインストール

新しく導入した仰角データ取得システムを、自分の手元でできる動作確認をした後に実際の望遠鏡に実装、という流れでインストールした。

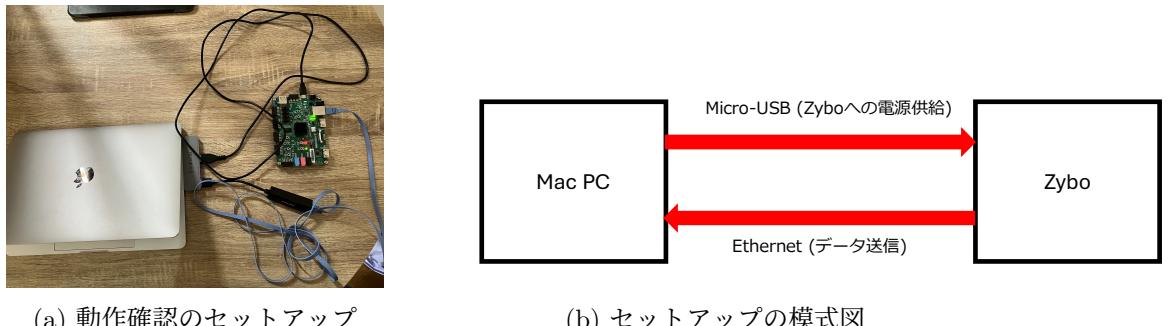


図 3.10: 新システムでの動作確認

動作確認を、図 3.10 に示したセットアップで行なった。ロータリーエンコーダーとは接続せず、同期信号も送らない単純なものである。図 3.10 の左図にあるように、Zybo の電源を入れ PYNQ が起動するとボード右側の “DONE” ランプが緑色に点灯する。自分の Mac PC

をデータ取得 PC として、Micro-USB で Zybo への電源供給を行い、データ通信は Ethernet ケーブルで行った。PC 上でデータ読み出しのスクリプトを動かして、Zynq の挙動に問題がないかをチェックした。期待される挙動は

- Zynq が正しく機能し、PC 側でデータを読み出せる
- エンコーダーデータは 0 として取得されている
- タイムスタンプは時間とともに加算されている

の 3 点である。データの通信が始まると Zybo の Ethernet コネクタ付近のランプが点滅し、PC 側でのデータ読み出しが正常に動くことを確認した。PC に保存したデータファイルをチェックし、期待されるデータを取得できていることも確認した。取得したエンコーダーデータとタイムスタンプデータのプロットを図 3.11 に示す。プロットの横軸はデータのサンプリングナンバー (1 kSPS) を表す。

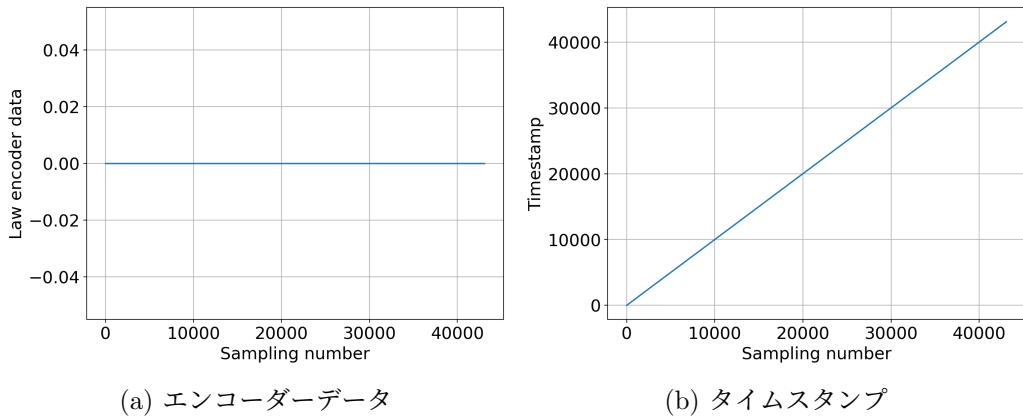


図 3.11: 動作確認で取得したデータ

以上の結果から新システムの挙動が問題ないと判断し、次に実際の望遠鏡にインストールした。インストールは SD カードを新システムのものに交換するだけで完了し、PYNQ の起動を確認した。

3.2.2 同期信号取得の確認

インストール後に実際の望遠鏡システムでデータを読み出せるかの動作確認を行なった。まず、方位角 DAQ からの同期信号を正しく取得して仰角データとして保存できているのかを確認した。結果を図 3.13 に示す。同期信号は 1 秒に 1 回出力されるので、仰角データでは同期信号の番号 (図では “Sync_id” と記す) が 1 秒で 1 ずつ増加する形で見えるはずであり、その結果を確認することができた。

3.2.3 同期信号の分配と仰角データ取得の確認

次に、取得した同期信号を MKID DAQ に分配できていることと仰角データを正しく読み出しているかを確認した。一度失ったエンコーダーの原点情報を再度取得するためにも、望

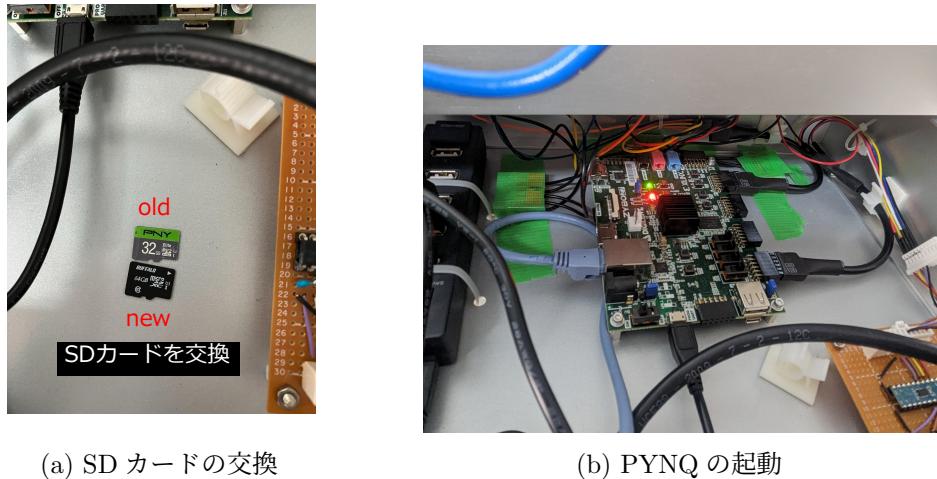


図 3.12: 新システムのインストール

遠鏡の仰角を 90° と 70° の間で何度か動かして、さらに並行して MKID のデータも取得した。それらのデータを使って確認を行なった。確認の手順は以下の通りである。

1. テスト用として取った MKID データを読み出す
2. 正しく動作していれば MKID データに同期した時間情報と仰角データを取得できる
3. その仰角データが正しい値を読み出せているかを確認

結果を図 3.14 に示す。MKID データから同期情報を取得でき、読み出した仰角データが 90° と 70° の間で正しく動いていることも確認した。

以上から新システムが実際の望遠鏡で問題なく動作することを確認した。その後、動作が安定して長期間行われるかをチェックした。

3.3 メンテナンスと安定運用

3.3.1 動作の不安定性

インストール後、動作の安定性に問題があり、データ取得が途切れることが何度も発生した。途切れる原因は Zybo の電源が一時的（データ取得開始後数時間）に落ちることによるものであった。インストール時の動作確認で問題がなかったことから、Zynq 内でのデータ処理と通信自体に問題がある可能性はないと考えた。他に原因となりうるものは

- OS が搭載されたことで Zybo の消費電力が上がり、一時的に電源供給量が足りなくなる
- Zynq での消費電力も上がり、Zynq の温度が許容値よりも高くなってしまう
- そもそも Zybo のボード自体がどこかで劣化している

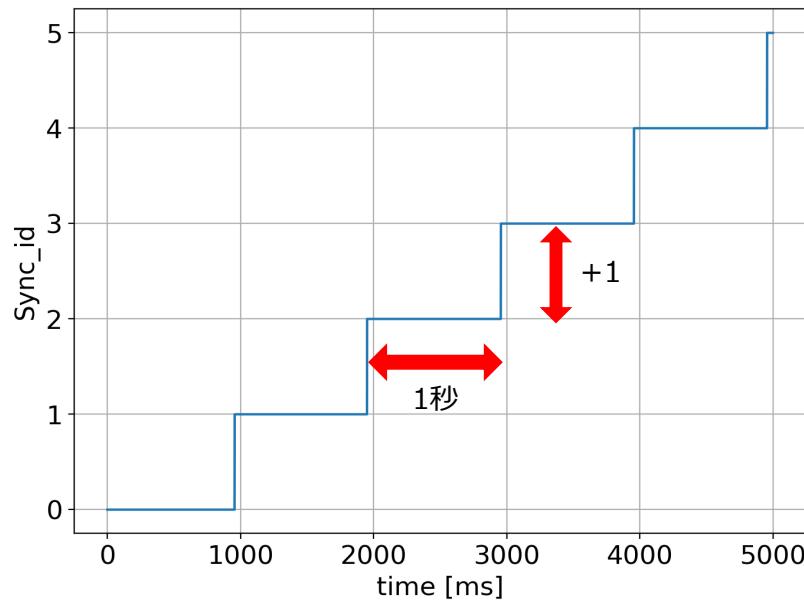


図 3.13: 仰角データからみた同期信号。方位角 DAQ からの同期信号を取得するごとに “Sync_id” が 1 ずつ加算される。

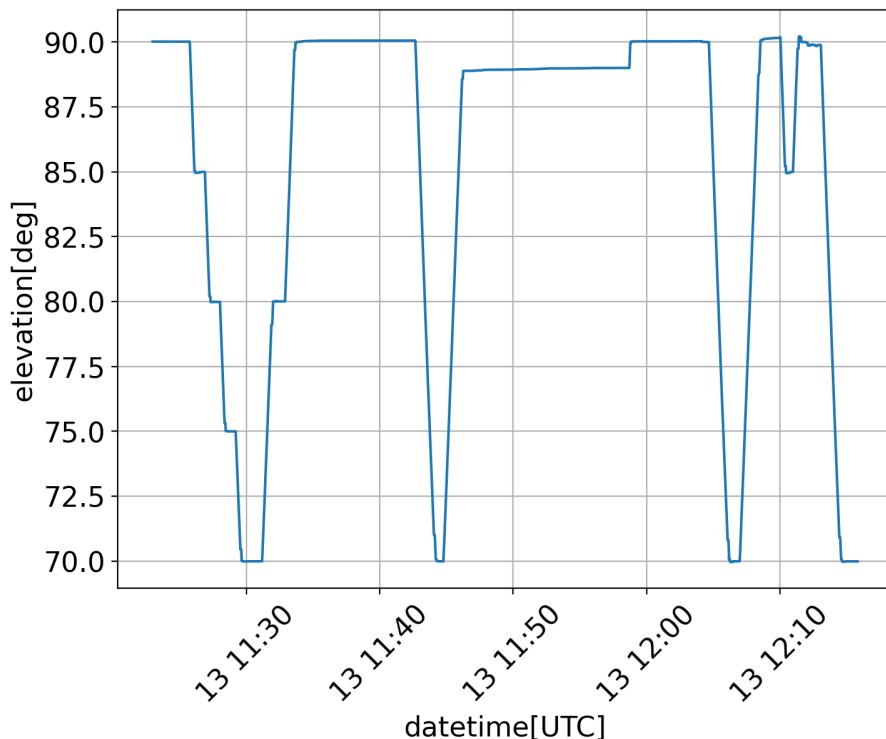


図 3.14: 読み出した仰角データ。横軸 (2024/3/13 の UTC 時間) の時間情報が実際の作業時間とリンクしており、MKID データで同期信号が正しく取得できていることを反映している。

が挙げられる。3つ目に関しては、経年劣化や落雷による停電時にダメージを受けたことなどが考えられるが、リモートからボード自体の性能を評価することが難しいため、まずは1つ目と2つ目の要因について調査した。結果として、1つ目の電源供給が原因である可能性が高いことが分かった。

3.3.2 電源供給方法の見直し

Zyboへの電源供給は図3.12の右図にあるように、Micro-USB端子から行なっていた。Zyboへの電源供給方法は他にバレルジャックから(図3.15)がある。

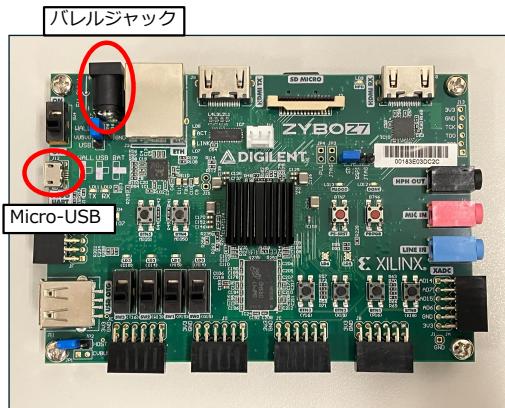


図3.15: Zyboへの電源供給方法。Micro-USBからとバレルジャックからの2通りがある。

この2種類の供給方法について比較すると表3.2のようになる。バレルジャックについては標準的なACアダプタの規格を参照する。

表3.2: 各電源供給方法での定格値

供給方法	定格電圧	定格電流	接続の安定性
Micro-USB	5V	最大 0.5 A	やや不安定
バレルジャック	5V	最大 4 A	安定

これより、供給できる電力量や接続の安定性に関してバレルジャックの方が優れていることが分かる。特に定格電流の値が大きく異なっており、従来のシステムではMicro-USBからの給電で間に合っていたが、OSが搭載されたことで給電が足りなくなった可能性が考えられる。スペックシート[33]でもバレルジャックによる電源供給が推奨されている(参考として、電力を大量に消費する処理をZynqに搭載した場合は12.5W以上の出力が必要)。そのため、Zyboへの電源供給方法をバレルジャックに変更して十分な電力を供給することで動作の安定性を図るのが良いと考えた。変更するにあたって新システムを稼働した際のZyboの動作安定性を給電条件を変えてテストした。行なったテストの様子を図3.16に、給電条件と結果を表3.3に示す。

基本的なセットアップは図3.10と同じで給電の条件のみが異なっている。テスト1では従来と同じでMicro-USBからの給電でデータ取得を動かし、数日にわたって動作の安定性を

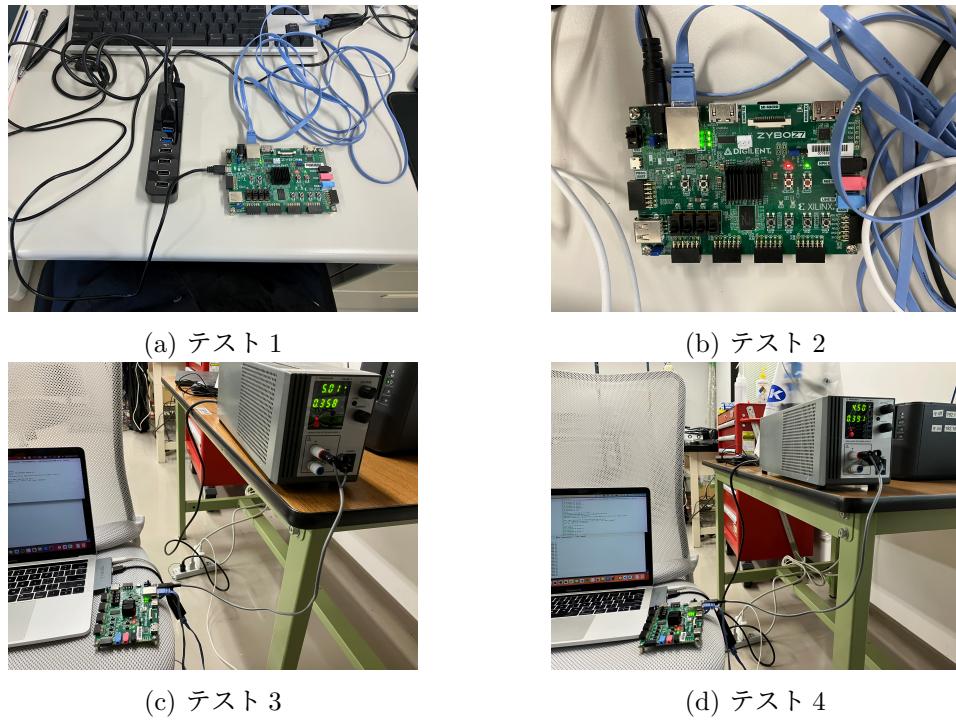


図 3.16: Zybo の安定稼働テスト

表 3.3: 安定稼働テストの給電条件と結果

	給電条件	動作の結果
テスト 1	従来と同じ USB	安定
テスト 2	バレルジャック (5 V、4 A の AC アダプタ)	安定
テスト 3	直流電源 (定電圧モード 5.0 V)	安定
テスト 4	直流電源 (定電圧モード 4.5 V)	不安定 (数時間で Zybo の電源が落ちる)

確認し、少なくとも3日以上はZyboの電源が落ちることなく稼働する結果を得た。これは現地で起きている問題と矛盾する結果となった。テスト2ではバーレルジャックから給電し、こちらも安定した稼働をすることを確認した。稼働が不安定である原因が特定できなかったため、条件を変え、さらに検証を行なった。

テスト3と4では直流電源(松定プレシジョン製)を使用し、与える電圧値を変えて稼働の安定性を確認した。USBの定格電圧が5Vであることと、Zyboで推奨されている供給電圧が4.5V～5.5Vであることから5.0Vと4.5Vを設定した。電源を定電圧モードにすることで電流値はZyboでデータ取得システムを動かすために必要な電流量になる。テスト3では5.0Vで行い、安定した稼働結果と電流値～0.36Aを得た。テスト4では4.5Vで行い、データ取得開始後数時間でZyboの電源が落ちる事象が複数回起き、現地での問題と同様の挙動を確認した。また、稼働中の電流値は～0.39Aであった。これより、データ取得システムの稼働に必要な電力量は比較的少ないことが分かるが、実際はエンコーダーデータと同期信号を取得し処理しているため、消費電力がこれよりも少なからず増えると考えれば、システムの稼働にはMicro-USBの定格電流値の0.5Aに近い電流量が必要になる。

テストの結果を踏まえると、Zyboへの供給電圧が定格通り5.0Vであればシステム稼働に必要な電流量がUSBの定格電流値を下回り十分な電力を供給できるが、電圧値のふらつきで5.0Vより小さくなると、稼働に必要な電力量を保持するために電流量が増加し、定格電流値に近づくためにUSBでの給電が一時的に不足してZyboの電源が落ちる可能性があると言える⁵。そのため、性能面に加えて、実際の問題への対処という意味でもバーレルジャックに変更することの妥当性を検証することができた。

Zyboへの電源供給をMicro-USBからバーレルジャックに変更し(図3.17)、システムを再起動させた。その後、動作が安定することを確認した。再起動して以降、半年以上の安定動作を続けている。

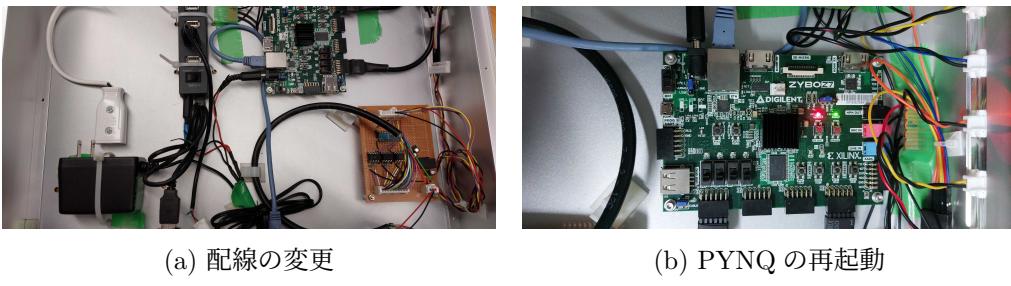


図3.17: 電源供給方法の変更

3.3.3 Zynq 温度のモニター

2つ目の要因についても調査し、問題がないことを確認した。ZyboのZynq部分にはヒートシンクが取り付けられており、ある程度の発熱は抑えられるはずだが、消費電力が高いと発熱量が増えてZynqの動作温度の上限(～85°C)を超えることは起きうる。しかし、3.3.2

⁵Zynq内蔵の“XADC”でZynqへの供給電圧をモニターできるが、Zybo全体への供給電圧をモニターできるわけではないため、実際のデータ取得システムに供給される電圧、電流値を正確に知る手法は確立できなかった。

で見たように新システムの消費電力が大きくななく、稼働中にヒートシンクを手で触っても熱くないため上限を超えるほどの発熱をしていることはまずない。そのことを Zynq 内の温度モニター機能を用いて確かめた。Zynq には “XADC(Xilinx Analog to Digital Converter) [34]” と呼ばれる ADC が内蔵されており、供給電圧と温度のモニタリング機能を有している。電圧と温度の値は OS システムの [/sys/bus/iio/devices/iio:devices0] ディレクトリに 出力される。特に温度情報は

- in_temp0_offset
- in_temp0_raw
- in_temp0_scale

の 3 つの値で与えられ、Zynq 温度は

$$T_{\text{Zynq}}(\text{°C}) = (\text{in_temp0_raw} + \text{in_temp0_offset}) \cdot \text{in_temp0_scale}/1000 \quad (3.3)$$

で求められる。定期的に Zynq の温度を読み出し、値を保存することで温度を確認できるようにした。読み出した温度のプロットを図 3.18 に示す。気温の影響もあるため Zynq 温度は夏季になると全体的に高くなるが、それでも動作温度の上限である 85°C よりも十分低い温度で動作していることが分かる。

今後は新しく導入したデータ取得システムの動作状況のモニターを継続して、安定的な運用とメンテナンスを続けていく。

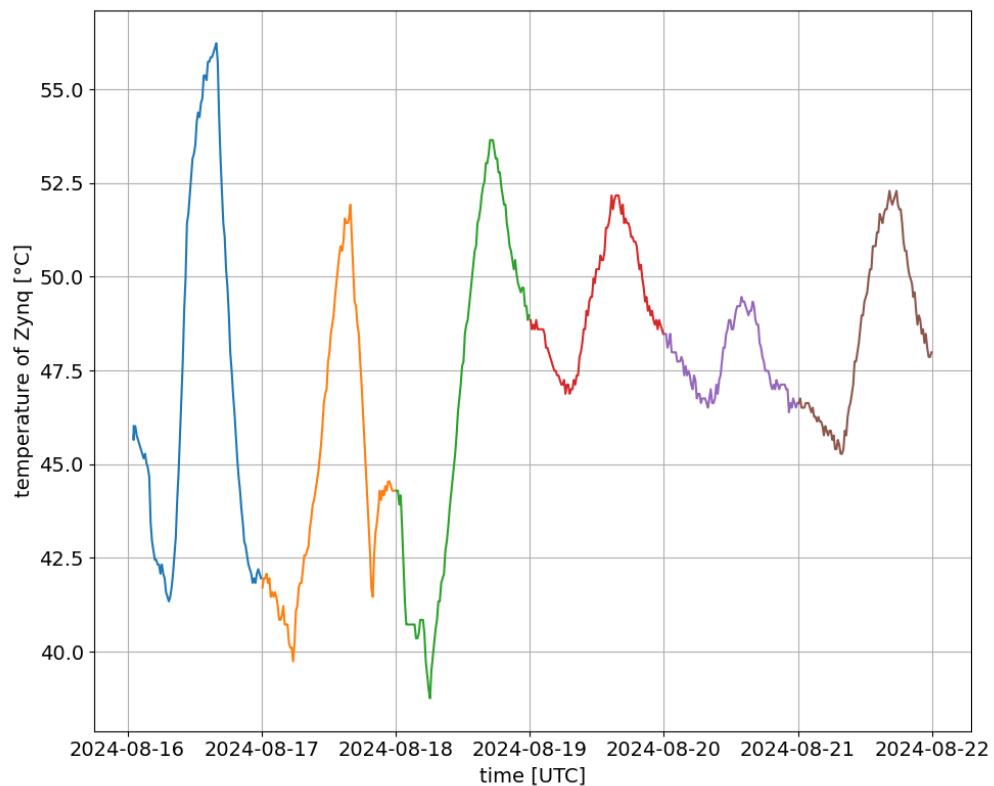


図 3.18: Zynq の温度モニター。2024/08 の 6 日分のデータをピックアップした。1 日の中でも気温の影響を受けて Zynq の温度も変動する。そのため、夏季の温度は冬季よりも全体的に高くなる。

第4章 今後の展望

- 4.1 大気揺らぎに由来するノイズのモデリング
- 4.2 両偏波アンテナを搭載した焦点面検出器のアップデート

第5章 まとめ

matome

第6章 謝辞

ありがとうありがとう

参考文献

- [1] Wagoner, Robert V. ; Fowler, William A. ; Hoyle, F., Astrophysical Journal, vol. 148, p.3 (1967) <https://doi.org/10.1086/149126>
- [2] J. C. Mather et al 1999 ApJ 512 511, <https://doi.org/10.1086/306805>
- [3] Planck Collaboration, A&A 641, A1 (2020), <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833880>
- [4] バーバラ・ライデン [著]. 牧野伸義 [訳]. 宇宙論入門. 森北出版
- [5] <https://arxiv.org/abs/1605.01615>
- [6] 小松英一郎. 宇宙マイクロ波背景放射. 日本評論社
- [7] Measurements od Degree-Scale B-mode Polarization with the BICEP/Keck Experiments at South Pole <https://arxiv.org/pdf/1807.02199>
- [8] <https://arxiv.org/pdf/2110.00483>
- [9] Byeonghee Yu, Robert Z. Knight, Blake D. Sherwin, Simone Ferraro, Lloyd Knox, and Marcel Schmittfull Phys. Rev. D 107, 123522 - Published 16 June 2023 <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.107.123522>
- [10] Julio A. Castro-Almazán, Casiana Muñoz-Tuñón, Begoña García-Lorenzo, Gabriel Pérez-Jordán, Antonia M. Varela, and Ignacio Romero " Precipitable Water Vapour at the Canarian Observatories (Teide and Roque de los Muchachos) from routine GPS" , Proc. SPIE 9910, Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems VI, 99100P (18 July 2016) <https://doi.org/10.1117/12.2232646>
- [11] P. A. R. Ade et al 2015 ApJ 812 176 <https://doi.org/10.1088/0004-637X/812/2/176>
- [12] P. K. Day, H. G. LeDuc, B. A. Mazin, A. Vayonakis, J. Zmuidzinas, Nature 425, 817-821 (2003) <https://doi.org/10.1038/nature02037>
- [13] R. M. J. Janssen, et al., High optical efficiency and photon noise limited sensitivity of microwave kinetic inductance detectors using phase readout. Appl. Phys. Lett. 103, 203503, 2013.
- [14] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer. Theory of superconductivity. Physical Review, 108:1175, 1957.

- [15] https://lambda.gsfc.nasa.gov/education/graphic_history/taureionization.html
- [16] arXiv:2309.00675 [astro-ph.CO] <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.00675>
- [17] Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 519, Issue 3, March 2023, Pages 3383–3431 <https://doi.org/10.1093/mnras/stac3439>
- [18] S.Honda, et al., On-site performance of GroundBIRD, a CMB polarization telescope for large angular scale observations. Proceedings Volume 11445, Ground-based and Airborne Telescopes VIII; 114457Q (2020)
- [19] Planck Collaboration, A&A 641, A4 (2020) <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833881>
- [20] K. Lee et al 2021 ApJ 915 88 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac024b>
- [21] Y.Sueno, et al., Pointing Calibration of GroundBIRD Telescope Using Moon Observation Data
- [22] 末野慶徳. Development of calibration and noise characterization methods for a CMB telescope, GroundBIRD, using its commissioning observation data. 京都大学理学研究科 博士論文 2024.
- [23] J. Choi, GroundBIRD: A Telescope for the Cosmic Microwave Background Polarization Measurement, ph.D thesis, Korea University (2015).
- [24] <https://canon.jp/biz/product/indtech/incremental-encoder/lineup/r1sl>
- [25] <https://digilent.com/reference/programmable-logic/zybo/start?redirect=1>
- [26] <https://www.heidenhain.co.jp/製品/角度エンコーダ/組込み型角度エンコーダ/erm-2000 シリーズ>
- [27] <https://japan.xilinx.com/support/documentation-navigation/silicon-devices/mature-products/spartan-3e.html>
- [28] 池満拓司. CMB 望遠鏡のデータ読み出しシステムの時刻同期と較正に関する開発研究. 京都大学理学研究科 修士論文 2020.
- [29] <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds187-XC7Z010-XC7Z020-Data-Sheet>
- [30] https://japan.xilinx.com/products/intellectual-property/axi_fifo.html
- [31] <http://www.pynq.io>
- [32] <https://wasa-labo.com/wp/?p=1102>
- [33] <https://digilent.com/reference/programmable-logic/zybo-z7/reference-manual?redirect=1>

- [34] http://www.kumikomi.net/fpga/sample/0008/FPGA08_042.pdf
- [35] M. A. Janssen, Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry (1993)
- [36] 中井直正、坪井昌人、福井康雄. シリーズ 現在の天文学. 宇宙の観測Ⅱ 電波天文学. 日本評論社
- [37] 末野慶徳. 超伝導検出器 MKID の評価系構築と TLS ノイズを抑制する研究. 京都大学理学研究科 修士論文 2021.
- [38] 武藤優真. 超伝導検出器 MKID の薄膜純度向上及び高感度化を目指した製作と性能評価. 京都大学理学研究科 修士論文 2024.
- [39] <https://www.astropy.org>
- [40] <https://healpy.readthedocs.io/en/latest/>
- [41] <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.periodogram.html>

付録A Zynqへのlinux搭載

時間あつたら書きたい