KEK 測定器開発室への提案書

CMB偏光観測用超伝導カメラの開発

坦安耂

KEK 加速器研究施設	:	吉田光宏
KEK 素粒子原子核研究所	:	後田裕、住澤一高、田島治、羽澄昌史*、
		樋口岳雄
KEK 物質構造科学研究所	:	清水裕彦、森嶋隆裕
東京工業大学	:	石野宏和
東北大学	:	大田泉、服部誠
理化学研究所	:	有吉誠一郎、佐藤広海

(* – Contact person: masashi.hazumi@kek.jp)

2007年4月22日

提案要旨

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 偏光の精密測定を目標とした、EHF(Extremely High Frequency、 30-300GHz) 領域の高感度ミリ波カメラの開発を行う。アレイ化に適した超伝導検出器を要素技術とし て用いる。製作した検出器の性能試験を行うために、ミリ波発生装置と検出器読み出しシステムを構築 する。低温装置の開発、使用が必要となるが、これに関しては、先行している STJ 赤外線検出器グルー プと共同で進めていく。その他の面でも共通の要素については助け合いながら進めていく。以上の活動 を通して、超伝導検出器の技術が KEK に導入され、育てられていく。

1

目 次

1	はじめに	3
2	超伝導センサーアレイ技術	5
3	STJ センサーアレイ技術	6
4	ミリ波、テラヘルツ波発生器技術	7
5	超伝導カメラの応用例 5.1 MuFT を用いた CMB 偏光気球観測	8 8 9
6	開発課題	10
	6.1 超伝導センサー部	10
	6.2 読み出しエレクトロニクス部	11
	6.3 ミリ波・テラヘルツ波発生器	11
	6.4 冷凍機	11
7	開発計画	12
	7.1 平成 19 年度計画	12
	7.2 平成 19 年度予算	13
	7.3 平成 20 年度	13
	7.4 平成 21-22 年度	14
8	まとめ	14

1 はじめに

全科学分野における最近 10 年間のもっとも重要な科学上の進展は何かという問いに対する一つの答 えは、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)の精密測定を通し、人類が宇宙のはじまりに関して、はるかに 深く理解するようになったこと、であろう。CMB 波長スペクトル精密測定によるビッグバンモデルの 検証、CMB 温度揺らぎの非等方性発見によるインフレーション仮説の検証、ダークマター、ダークエ ネルギーの定量的研究により、驚くべき宇宙の姿が明らかになりつつある。2008 年より観測を開始する 欧州の Planck 衛星は WMAP より高い角度分解能を利用して、 $\ell ~ 2500$ 程度までの CMB 温度揺らぎ の精密測定を行い、又、ダスト側(高周波数側)の偏光全天マップも作成する予定である。¹こうして宇 宙の誕生と進化の謎に関して、更なる知見が得られると期待されている。

Planck 衛星後の CMB 研究の最大目標は、CMB 偏光の精密測定により、インフレーション時に放出 された重力波を発見することである。重力波の痕跡は、重力が「スピン2」を持つことに起因する、いわ ゆる「B モード CMB 偏光」として観測される。この重力波は現在提案されているいかなる重力波直接検 証実験でも到達できないほど小さいが、CMB 偏光の精密測定を通して検出することが可能である。従っ て、この測定はインフレーション理論の真偽をテストする最も重要な測定と考えられている。B モード CMB 偏光の検出に成功すれば、宇宙誕生後 10⁻³⁸ 秒後という極限の世界の観測的探求という全く新し い学問分野が拓かれる。更に、B モード CMB 偏光の大きさの測定により、インフレーションポテンシャ ルの深さが決定できるため、宇宙誕生の解明と同時に、10¹⁶GeV という、加速器では直接到達不可能な GUT スケールの物理に光をあてられるようになる。すなわち、B モード CMB 偏光の測定は、「究極の 高エネルギー物理学」という一面を持ち、素粒子原子核研究所が取り組むにふさわしいテーマである。

Mission	WMAP (100GHz)	Planck (100GHz)	CMBPOL
Duration	8 years	1.2 years	2-8 years
Detectors/Band	8	8	150 - 1000
NET/BLIP1	~ 60	~ 4	~ 2
$\mathrm{NET}/1^{\circ}\times1^{\circ}$	$\simeq 6 \mu \mathrm{K}$	$\simeq 1 \mu K$	$20-100 \mathrm{nK}$

表 1: CMBP 測定に要求される感度 (CMBPOL の項) と WMAP、Planck の感度。参考文献 [1] による。

インフレーションモデルが予言する B モード CMB 偏光を測定するには、30-300GHz という EHF (Extremely High Frequency)領域をカバーし、Planck 測定器の感度を少なくとも 10 倍は向上させた新 しい測定器が必要となる。[1] そのような測定器は現存しないため、開発が必要となる。表 1 に、B-mode 観測に要求される感度と、WMAP、Planckの感度を示す。ミリ波のうち、特に 100GHz 以下の領域に ついては、長らく HEMT²を用いたレシーバーが使われてきた。WMAP はその一例である。しかし、 100GHz 以上では HEMT の量子ノイズは大きくなってしまう。異なる測定器による系統誤差をなくすた め、次世代の検出器開発では、同一技術で EHF 帯をカバーすることが要求されるので、HEMT は不向 きである。従って、高い周波数領域で使われてきたボロメータタイプの検出器、もしくはそれと競合し得

 $^{^{1}\}ell$ は角波数で角度(θ)に反比例する($\ell \simeq \pi/\theta$)。

²High Electron Mobility Transistor (高電子移動度トランジスタ)。高い周波数への応用に使われる。

る性能を持つ直接検出器を低い周波数でも使えるようにするほうが実現性が高い。その場合、単一の測 定器の NEP(Noise-Equivalent Power)を下げても解決策とならない。地上や気球観測による実験では、 すでに CMB そのものに由来した光子雑音から来る原理的な限界が測定精度を支配している。衛星の実 験でも、Planck ではそのレベルに近づいてきている。従って、今後の開発は、検出器のアレイ化(ピク セル化)による測定精度の向上が取るべき方向と考えられる。

アレイ化を考えた場合、焦点面での実効的測定器数を増やすために、測定器の集積度を上げることが 有効である。超伝導検出器は、アレイ化に適し、ミリ波に対する感度が非常に高く、フォトリソグラフィ 技術により容易に偏光検出用アンテナを組み込める自由度を有する。そこで我々は、超伝導検出器を要 素技術として用い、CMB 偏光精密測定に適した高感度超伝導ミリ波カメラの開発を行うことを提案す る。以下の条件を満たすものの開発を目標とする。

- CMBの観測に最適な70GHz付近のミリ波を中心に、EHF(Extremely High Frequency、30-300GHz) 領域をカバーする。
- アレイ数 100 かそれ以上。
- ーチャンネルあたりでは、Planck の測定器と同程度の性能 (NEP $< 10^{-17}$ W/ \sqrt{Hz})。



図1に、高感度超伝導ミリ波カメラの概念図を示す。

図 1: 高感度超伝導ミリ波カメラの概念図。

ミリ波イメージングは、サブミリ波・テラヘルツイメージングと並び、長らく未開拓領域であったが、 要素技術の発達とともに近年注目を浴びるようになった。ミリ波は、高い透過力(プラスチック、壁、衣服、煙、霧などを透過)とマイクロ波より高い分解能を併せ持ち、しかも被爆の恐れがない。従って、本 提案が目標とする超伝導ミリ波カメラは、広範な産業分野への応用が可能である。又、以上の活動を通 して、KEK に超伝導測定器の技術を根付かせ、発展させていくことを目指すことも強調しておきたい。

2 超伝導センサーアレイ技術

アレイ化に適したミリ波超伝導体センサーのなかで、現在のところ、最もよく開発が進んでいるのは、 NIST等が中心となっている転移端センサー(Transition-Edge Sensor、TES)ボロメータである [2]。TES では、超伝導体をちょうどその転移温度付近に保っておく。TESが光子を吸収すると、光子のエネルギー は熱に変換されて温度が上昇し、吸収されたエネルギーに比例して素子の抵抗値が大幅に増加する。こ れによる電流の瞬間的な落ち込みを SQUID で検出し、信号を電圧パルスに変換する。この方式のアレ イ化には、SQUID の信号をまとめるマルチプレクサーが必要となり、ミリ波より短い波長領域での開発 が進んでいるが、100GHz 以下の実証機はない。

ボロメータタイプとは異なる方式として、準粒子を数える方式がある。入射光子がクーパー対を壊すと「準粒子」が生成される。超伝導体-絶縁体-超伝導体という SIS 構造を用意すると、片側の超伝導体で生成 された準粒子が絶縁体の障壁をトンネル効果ですり抜けてもう一つの超伝導体に流れる。この電流信号を 電子回路で増幅し、検出する。トンネル効果が鍵なので、SIS 構造を持った検出器を STJ(Superconducting Tunneling Junction)検出器と呼ぶ。SQUID を使用する必要はないため、アレイ化の読み出しシステム がより簡単になることが期待できる。ただし、極低温で動作するマルチプレクサーなどの開発は必要で ある。

最近、MKID (Microwave Kinematic Inductance Detector) という新しい方法で準粒子を数える超伝 導センサーが発表された [3]。これは超伝導体がマイクロ波の振動数で電磁気的に共鳴する性質を利用し ている。準粒子ができるとこの共鳴は鋭さを失って波の伝播が遅くなり、共鳴振動数が小さくなる。こ の変化は出来た準粒子の個数に比例した大きさを持つため、準粒子生成量を検出できる。この方式の利 点は、アレイ化に際し、各素子を異なる振動数で動作させれば振動数空間で多チャンネル読み出しが出 来ることである。一方、まだ開発の初期段階であり、ノイズが大きい。また、サブミリ波での報告のみ で、EHF 領域でのテストはない。

TES ボロメータ、MKID いずれの場合も、100GHz 程度のミリ波を効率よく検出するために、リソグ ラフィ技術によりダイポールアンテナを測定器上に直接形成する方法を試している。このような「アン テナ結合型センサーアレイ」の開発は、大アレイ化に向けた有望な手段と考えられている。図2にバー クレーで開発が進んでいる TES ボロメータアレイの例を示す。



図 2: TES ボロメータアレイの例。

超伝導ミリ波カメラの開発と大きく関連する分野として、X線天文学用のマイクロカロリメータ、及びTESカロリメータの開発がある。Astro-Eには、NASAゴダード宇宙飛行センター、ウィスコンシン大学、東京都立大学、宇宙科学研究所によって開発、製作された、衛星搭載機器としては世界で初めてX線マイクロカロリーメータ(XRS)が搭載された。打ち上げは不幸にして失敗に終わった³が、X線光子のもつエネルギー測定に伴う不定性が0.2%という、X線CCD(6keVのX線に対して2%)を1桁上回る、非常に優れたエネルギー分解能を達成した。素子の冷却には固体ネオン、液体ヘリウム、断熱消磁冷凍機の3段冷却装置(住友重機械工業製)が用いられ、動作温度65mK(絶対零度0.065度)を実現している。

将来の X 線天文学計画 (DIOS) のための、より応答速度が高く、視野の広い測定器アレイとして、 TES カロリメータの開発が ISAS・首都大・早稲田大・SII ナノテクノロジーによって進められている。 [4] 超伝導体には Ti が用いられている。アレイの同時信号読み出しのために、異なる周波数の交流バイ アスを印加し駆動させ、周波数空間で多重化するマルチプレクス方式の開発が行われている。 [5] 又、 NeXT 衛星用の小型軽量冷凍機の開発も進んでいる。これら X 線天文学用の技術は、超伝導ミリ波カメ ラへの転用が可能なものと考えられる。

日本では超伝導ミリ波アレイの取り組みはないといってよい。THz 帯での STJ 超伝導検出器アレイの開発は、理研、国立天文台、名古屋大、東京大などでおこなわれている。

我々の取り組みは、STJ技術を用い、転移温度の低い超伝導体を使用することにより、EHF帯に感度 をあわせ、アレイ化を目指すことである。次の節では、より具体的にSTJを用いたミリ波カメラについ て述べる。

3 STJ センサーアレイ技術

表 2 は代表的な金属超伝導体のパラメータを示している。臨界温度 (T_C) と温度 0K におけるギャップ エネルギー 2 Δ には比例関係があり、より波長の長い (エネルギーの低い) ミリ波の検出にはより T_C の 低い超伝導体の使用が必要となる。なお、便利な換算式として、おおよそ

150 GHz (周波数) = 2 mm (波長) = 3 K (CMB 温度) = 0.6 meV (エネルギー)

が成り立つ。ここで、「3 K (CMB 温度)」とは、プランク分布に従う約 3K の CMB のピーク周波数が 約 150 GHz であることを意味する。表からわかるように、Al のビデオ検出型は、CMB に最適な周波数 をカバーしている。また、Al および、Al/Ta の組み合わせで、30-300GHz の領域をカバーできることが わかる。動作温度に関しては、めやすとして、 $0.1T_C$ の温度を実現すれば、良好な動作が得られること がわかっている。従って、Al や Ta を使用した場合、ADR(Adiabatic Demagnetization Refrigeration= 断熱消磁冷却)を用いて 100mK 以下を達成すれば、十分に試験が出来る。

STJの開発状況について、国内では、主に理研・産総研・埼玉大・東京大等でX線、THz、EUV、可視 光、低エネルギー粒子、巨大分子等の検出を目指した開発が進められている。理研では、Nb/Al、Ta/Al を併用したタイプの測定器の実績があるが、純Alでの実績はまだない。図3にNbを用いたアンテナ付 きビデオ検出アレイ(650GHz)の例を示す。

³Astro-E2 は無事打ち上げに成功したが、XRS は冷凍機のヘリウムが抜けてしまうというトラブルにより、残念ながら寿命 1ヶ月で終わってしまった。難しいものである。

超伝導体	臨界温度 (T_C)	ギャップエネルギー (2Δ)	フォトン検出閾値	ビデオ検出帯域
	[K]	[meV]	[GHz]	[GHz]
Nb	9.23	3.1	750	375-750
Pb	7.193	2.4	580	290-580
Ta	4.39	1.4	340	170-340
In	3.4035	1.1	270	135-270
Al	1.196	0.34	80	40-80
Ga	1.091	0.31	75	37-75
Mo	0.92	0.26	60	30-60
Zn	0.852	0.22	50	25-50
Cd	0.56	0.15	36	18-36
Ti	0.39	0.10	24	12-24
Hf	0.165	0.04	10	5-10

表 2: 代表的な金属超伝導体のパラメータ。フォトン検出閾値を 2 Δ とした場合、ビデオ検出帯域 f は $f < 2\Delta$ であるが、実際の運用上、ノイズが十分小さく快適に使用できる範囲のめやすは $\Delta < f < 2\Delta$ であるので、それを示してある。

海外ではローレンスリバモア、Yale 大学、ESA/ESTEC、Twente 大学、ミュンヘン工科大学などで 開発が行われている。Alを用いた STJ としては、ミュンヘン工科大学のグループが Pb 吸収体を加えた 検出器により、5.9KeV の X 線に対して約 70mK に冷やして 12eV という分解能を達成している。しか しながら、Pure Al でのビデオ検出の例はなく、又、Al STJ を使った気球、衛星での運用実績もない。 なお、センサーの開発と並んで低温読み出し回路の開発も重要であるが、海外では、すでに述べた TES ボロメータアレイの読み出しの開発研究が進んでいる。一方、国内での取り組みは少ない。既述の TES カロリメータの読み出し開発以外には、STJ アレイを用いたサブミリ波用読み出し回路のための GaAs JFET の開発が国立天文台と情報通信研究機構 (NICT) で行われている [6]。

4 ミリ波、テラヘルツ波発生器技術

広帯域のミリ波、テラヘルツ波検出器の開発には、広帯域波長可変な光源が必要である。しかし、そ のような光源は検出器同様、未だ発展途上段階であり、測定器の効果的な開発のためには、小型で広帯 域な光源の開発は重要である。また希釈冷凍機に比ベメンテナンスも大幅に簡便なものが望ましい。こ のような背景から、小型・広帯域・ハイパワーにできる可能性のあるミリ波、テラヘルツ波発生器の開 発を検討する。現在光源としては表 3 のような物が考えられている。これらの中で、BWO もしくは Smith-Purcell 型のミリ・TH z 光源が、小型かつ高効率ハイパワーパルス光源として適していると考 えられ、これらを柱として、開発を検討する。なお BWO、Smith-Purcell 型どちらもグレーティング を用いた電磁波の結合モードを用いており、開発にはグレーティングの表面伝播モードの解析が必要で ある。



図 3: 理研で開発したアンテナ付きビデオ検出アレイ (650GHz)。

5 超伝導カメラの応用例

非常に広い帯域をカバーできる直接検出器の大規模アレイである、超伝導カメラの特徴を生かした応 用例を以下に挙げる。

5.1 MuFT を用いた CMB 偏光気球観測

CMB偏光観測実施における最大の課題の一つは、我々の銀河系内の成分 (foreground 成分、以下FGと呼ぶ)による偏光を如何に正確に差し引く事ができるかである。FG偏光成分は、90GHzを境に、低周波側ではシンクロトロン放射及び制動放射(以下シンクロ側)が、高周波側ではダスト放射(以下ダスト側)が、主たる放射成分である。現在計画されているものも含めて殆どのCMB偏光観測装置は、丁度主たるFG偏光成分が入れ替わる90GHzを境に、低周波側ではヘテロダイン受信器を、高周波側では直接検出器であるボロメータを用いている。このように低周波側と高周波側で質的に異なる検出器が用いられている為、シンクロ側とダスト側の偏光測定に含まれる系統誤差がキャリブレートされていないのが現状である。本計画で開発する超伝導カメラは、シンクロ側からダスト側を同一の検出器でカバーし、この問題を解決できる。しかしながら、超伝導カメラのこの特徴を生かした測定を行うには、広い帯域で分光・偏光・撮像観測が可能な光学系と組み合わせなければならない。そのような光学系の具体例の一つとして、東北大学のグループが開発を進めているMulti-Fourier Transform interferometer (MuFT)と呼ばれる装置がある。MuFTは、ボロメータやSTJのような直接検出器搭載可能なボロメ

発振方式	可能な周波数帯 (THz)	出力電力例	問題点
自由電子レーザー (FEL)	全波長域	>1 kW	大型
後進波管 (BWO)	0.2-1.1	1-50mW	強磁場が必要
Smith-Purcell 型 FEL	断続だが全波長域	数 kW 程度は可?	
p 型 Ge レーザー	広帯域 (1-4)	1W, 10μ	LHe 必要
光パラメトリック発振	広帯域 (0.6-2.6)	数 100mW (入力 1MW で)	超低効率
GaAs 光混合	広帯域 (0.6-3.0)	100 nW	超低効率
フェムト秒レーザー	広帯域	$1\mu W$	干渉性無し
炭酸ガスレーザー励起			
分子気体レーザー	断続的	$50 \mathrm{mW}$	波長可変不可

表 3: ミリ波、テラヘルツ波発生器

トリック天体干渉計と呼ばれる装置の一種であり、4つのストークスパラメータ全てについて周波数及 び各周波数での2次元強度分布測定が可能である点が他のボロメトリック天体干渉計にない特徴である。

MuFTは、非分散型で分光を行う為、同一の検出器で広帯域をカバーできる超伝導カメラの特徴をフ ルに生かすことができる。従って超伝導カメラとMuFTを組み合わせることで広帯域・広視野・高感度 を持ったユニークなCMB偏光観測装置の実現が可能となる。広帯域での観測を行うには、大気中の酸 素及び水蒸気の吸収線の影響が避けられる大気球高度での観測実施が必要であり、東北大学のグループ はその計画の実現に向けた基礎開発及び競争的資金獲得の努力を行っている。東北大学の当面の計画は、 シンクロ側からダスト側を単一の検出器で測定する事を目的としており、検出器は1素子のNTD-Ge ボロメータでCMB偏光Bモード検出に十分な感度を持たない。本計画で開発される超伝導カメラで焦 点面検出器を置きかえることで感度の飛躍的向上が達成でき、CMB偏光Bモード検出を十分狙える観 測装置に発展できる。この装置のもう一つのユニークな点は、円偏光の測定が出来ることである。銀河 系成分の円偏光のマップが作成されれば、、アミノ酸の光学異性体の起源即ち生命の起源の研究分野に 革新をもたらす可能性を秘めた重要な結果となるであろう。

ボロメトリック天体干渉計は、直接検出器と天体干渉計の長所を併せ持った装置であり、遠赤外線天 文学及びCMB観測への応用で近年注目を集めている。ボロメトリック天体干渉計は、像平面に生成さ れる干渉パターンを観測するフィゾー型と時間方向に生成される干渉パターンを取得するマイケルソン 型の2種類に分類される。遠赤外線天文学への応用では、名古屋大学のグループがフィゾー型の気球観 測への応用開発を進めており、NASA Godard のグループがマイケルソン型(但し、double Fourier と 呼ばれるもので偏光測定が出来ない)の将来の衛星観測への応用を目指した開発を進めている。CMB 偏光観測への応用では、プラウン大学等で形成される米国のグループがフィゾー型に256素子のTES ア レイを搭載した気球観測計画を推進している。マイケルソン型をCMB偏光観測に応用するという点で も、MuFT に超伝導力メラを搭載した計画は、世界的にユニークな位置付けを持つ。

5.2 その他の応用

天文学への応用は、MuFT にとどまらず、地上ミリ波望遠鏡への搭載、将来の衛星搭載も考えられる。



図 4: MuFT プロトタイプ写真

その他、高い透過力と高い位置分解能を併せ持つミリ波イメージングには幅広い応用が考えられる。 例としては、ミリ波イメージングレーダー、プラズマの密度分布計測、コンクリート亀裂の非破壊検査、 食品の異物混入検知、半導体基盤の欠陥調査、生体計測、などがあげられる。

6 開発課題

6.1 超伝導センサー部

まず、Pure Al 超伝導体を用いた STJ 素子の開発が必要である。アレイ化には高い yield が要求され るため、現在のエッチング技術では不十分な可能性もある。その場合には、より効率的なエッチング法 の可能性などが課題となる。Al 超伝導体を用いたアンテナ結合型ミリ波カメラの試作に関しては、とな りあうセル間の干渉を防ぎ、かつ集積度の高いアレイを実現することが課題である。これは Al/Ta の超 伝導体についても同様である。理研では TES を作ることや、新しい検出原理に基づく超伝導検出器の試 作を行うことも可能である。アンテナ結合型ミリ波カメラが今のところのベースとなる候補であるが、 よりすぐれた技術の開発も重要な課題である。

6.2 読み出しエレクトロニクス部

低温で動作する ADC やマルチプレクサの開発が、大きな課題である。時空間でのマルチプレクスと 周波数空間でのマルチプレクスという二方式に大別されるが、両者の得失を比較し、将来的に非常に大 きなアレイ数 (1000 以上) を実現することが可能な技術を選定し、プロトタイプ作成を開始する。

いずれの方式でも、低温トランジスタの技術を確立する必要がある。低温で MOS トランジスタ(バルク)を動かすと、PD SOI で見られるようなキンク効果が発生し、問題となる。これは、ゲート直下の空乏化していないシリコン部分に、ドレイン領域でインパクト電離によって発生した電荷が蓄積されるからと理解されている。FD SOI で、ボディータイをきちんと取るとこのような効果が抑制できる可能性が指摘されており、[7] SOI グループ、STJ 赤外グループと協力して検討していく。

さしあたっての性能試験システムのノイズ低減化も課題であり、既存の増幅器の改良版を作る必要が ある。

6.3 ミリ波・テラヘルツ波発生器

図 5: BWO / Smith Purcell のグレーティングの電磁波伝播モード (左) と電磁波分布 (右)

図 5 は 100µm ピッチのグレーティング構造の電磁波シミュレーションを FDTD 法⁴を用いて行った 結果である。左図は広帯域の電磁波を与えた際に伝播したモードを示しており、右図はその中の モー ドの電磁波を表示した物である。今後の課題としては電子ビームとの相互作用を含めた発振シミュレー ションを行うこと、実際に 100µm ピッチのグレーティングの試作を行い、既存の電子銃を用いて、発振 の試験を行うことである。

6.4 冷凍機

AlのSTJの場合、120mK程度を実現すれば十分であり、これはADRによって達成できる。ただし、 検出器アレイの読み出し回路の仕様によってはトータルの発熱量が大きくなる可能性がある。又、今後

⁴Finite Difference Time Domain 法は電磁場解析の一手法である。日本語では時間領域差分法、有限差分時間領域法などと訳される。

の展開によっては、新しい超伝導体へ移行し、更に低い動作温度が必要になる可能性もある。赤外 STJ グループの目標は Hf の使用であり、冷凍機の仕様ははるかに厳しい。従って、赤外 STJ グループと協 力しながら必要な開発を行っていく。

7 開発計画

開発を4年計画とし、各年度の目標を以下のように定める。

- 平成19年度:要素技術の開発、基礎技術習得
- 平成 20 年度: プロトプロトタイプ開発(アレイ数1)
- 平成 21 年度: プロトタイプ開発 (アレイ数 16))
- 平成 22 年度: 実証モデル開発(アレイ数 100 ないし 256)

以下の役割分担を基本とする。

- 超伝導センサーの設計と製作(KEK、理研)
- 超伝導センサー評価試験(KEK、東工大、理研)
- ミリ波発生器開発(KEK)
- アレイ化と読み出しデザイン(KEK、理研)
- ・ 偏光測定のデザイン(KEK、東北大)
- 冷凍機(STJ赤外線グループと共同)

なお、これは現時点での分担であり、開発研究の進展(例えば新たな参加者があるなど)に応じ、臨機 応変に対処していくものとする。

- 7.1 平成 19 年度計画
 - 純アルミ STJ の製作技術確立。
 - 第一回試作(予定)を早期(可能なら5月)に行う。
 - 遠赤外フィルターと試作品で、80-300GHz に感度を持つ検出器を作り、性能試験をおこなう (6月以降)。
 - 測定結果のフィードバックをもとに、第2回以降の製作をおこない、アレイ化に必要な高い yield を実現する。
 - Al/Ta STJ の試作。純アルミでの経験をもとに、Al/Ta STJ を試作し、性能試験を行う。

- ミリ波発生装置用グレーティングの試作
- アレイ読み出し方法の検討。性能試験システムの改良(ノイズ低減化など)
- 偏光測定の conceptual design
- 他の超伝導測定器技術との比較検討
- 勉強会、グループミーティングを積極的に開き、情報交換を通して知識の向上を図る。また、国内 外の関連する検出器ワークショップにも数人を派遣し、情報収集に努める。
- 7.2 平成 19 年度予算

平成 19 年度予算					
品目	単価 (千円)	数量	金額 (千円)		
液体ヘリウム	1.2/L	500L	600		
フォトマスク	250	2	500		
遠赤外線フィルター	500	2	1,000		
ミリ波発生用グレーティング試作	300	1	300		
性能試験システム改良 (アンプ購入等)	1,000		1,000		
国内旅費(KEK-理研仙台)	50	10	500		
			3,900		

表 4: 平成 19 年度予算要求

平成 19 年度予算要求を表 4 に示す。超伝導センサー試作のために、液体ヘリウム及びフォトマスクの 購入が必要となる。遠赤外線フィルターは、80-300GHz に感度のあるセンサーを簡便に作るために、試 作した Pure Al STJ センサーと結合させて使用する。KEK における本格的な性能試験システムの構築 に向けた読み出し部分の改良(増幅器等)の予算が必要である。現時点で、ミリ波を使った性能試験は 理研仙台(テラヘルツイメージング研究チーム)でしか行えないので KEK-理研仙台の旅費を計上する。

7.3 平成 20 年度

純アルミ STJ、および Al/Ta STJ でアンテナ結合型測定器のデザイン、製作、試験。ただし、前年度の「他の超伝導測定器技術との比較検討」の結果によって、優先度を変更する余地は残す。多チャンネル化の基礎開発に着手する。KEK にてフーリエ分光器を用いた性能評価システムの構築を行う。前年度の実績をもとに、競争的資金の獲得を積極的にすすめる。

7.4 平成 21-22 年度

CMB 偏光観測に使用可能なプロトタイプ多チャンネルアレイを製作し、所定の NEP 値を持つかどう か等の性能評価を行っていく。アレイ数 16 のプロトタイプを経て、最終年度はアレイ数 100-256 程度の 実証器を作り、試験をおこなう。

8 まとめ

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光の精密測定を目標とした、EHF領域(30-300GHz)の高感度ミリ波カメラの開発を行う。アレイ化に適した超伝導検出器を要素技術として用いる。超伝導検出器にはいくつかのタイプがあるが、全てを最初から網羅することは出来ないので、まずSTJ検出器について開発研究をすすめていく。製作した検出器の性能試験をおこなうために、ミリ波発生装置と検出器読み出しシステムを構築する。

具体的な仕様は CMB 観測に対して設定するが、開発されたものは「超伝導ミリ波カメラ」として広 い応用範囲を持つものとなる。又、この開発を通じて、KEK に超伝導測定器技術が導入され、根付いて いくことが期待される。したがって「共通の技術」を追求する測定器開発室の精神に沿った提案である と信ずる。

低温装置の開発、使用が必要となるが、これに関しては、STJ赤外線検出器グループと共同で進めて いく。その他の面でも、両グループで協力しつつ低温検出器の開発をすすめていく。

参考文献

- [1] J. Bock *et al.*, "Task Force on Cosmic Microwave Background Research," arXiv:astro-ph/0604101.
- [2] K. D. Irwin and G. C. Hilton, "Transition-Edge Sensors", Cryogenic Particle Detection, Ed. by C. Enss, Springer-Verlag, 2005.
- [3] P. K. Day *et al.*, "Antenna-coupled microwave kinetic inductance detectors", Nucl. Instrum. Meth. A 559, 561 (2006).
- [4] "Searching for cosmic missing baryons with DIOS Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor –", Y. Suto et al., arXiv:astro-ph/0402389v1.
- [5] 特許出願公開番号 特開 2002-214040、

http://jstore.jst.go.jp/image/patent/PDFpub/04/8/4851jpa_2002214040_0000.pdf .

- [6] H. Nagata *et al.*, "Cryogenic readout integrated circuits for submillimeter-wave camera", Nucl. Instrum. Meth. A 559, 823 (2006).
- [7] H. Ikeda, private communication.