

ASTE 計画におけるボロメータを使用した 連続波観測装置の開発と評価

平成 16 年 3 月 19 日

東邦大学 4 年 物理学科 00R604 新井 敬朗

要旨

本論文はアタカマサブミリ波望遠鏡実験 (ASTE) 計画で運用される連続波観測装置 (3色ボロメータ受信機) の光学系を中心にした研究開発の経緯をまとめたものである。光学系では反射防止コートのフィルター設計と製作、フーリエ分光器を用いた透過率の評価等を行った。システム性能を光学的に評価した結果、雑音等価フラックス密度 (NEFD) が6月時点より10倍改善させることに成功した。さらにシステムを向上させるための議論をした。期待できるサイエンスについても初めに触れ、最後にチリでの観測は速報結果として触れる。

開発状況について

開発状況としてビームパターンの測定 (5章参照) から光学系実験がスタートした。その結果、非点収差 (焦点が二つある) が起こっていた。原因を追求するために光学系ソフト ZEMAX を使って、システムの光学系の見直しを行った。そして楕円鏡の設計が間違っていることが分かった。

残念ながら、楕円鏡の設計を直した時の光学系とボロメータ素子を合わせた実験室でのシステムの評価は、時間的に行う余裕がなくチリに発送してしまったのでその結果はないがチリで楕円鏡の交換して観測をした結果、ビームに非点収差がないことが確認できた。(付録参照)

システムの光学的な性能として中心周波数と帯域幅等を決めるためにメッシュフィルターの透過率測定、システム全体での周波数に依存する強度分布を測定した。(4章5節参照)

また光学系として、ビームをロスなく伝えるために光学系素子の評価とフィルターのARコートを行った。結果としてフィルターの透過率 (フィルター効率) が6月と比べて350GHz帯で9倍、650GHz帯で12倍、850GHz13倍向上した。(4章4節参照)

以上の様々な実験し開発した結果最後にシステムの性能として、実験室系でシステムの lower limit の指標になる雑音等価エネルギーフラックス密度 (NEFD) が、6月のチリのミッションより10倍程度よくなった。この論文は光学系の実験から観測によるシステムの評価までを基本的にまとめたものである。論文の最後に感度計算を行い本システムの実験系における感度評価を行った。なにを改良することで、さらに感度が上がるか議論し、次のプロジェクトサブミリ波カメラ (STJ素子のアレイ化) の開発につなげていきたいと考えている。

目 次

第 1 章	はじめに	1
1.1	サブミリ波天文学	2
1.2	ASTE と ALMA	3
1.3	検出器の違い	6
1.3.1	直接検出器	6
1.3.2	ヘテロダイン受信機	7
1.4	3色ボロメータの必要性	7
第 2 章	ボロメータについて	9
2.1	ボロメータの検出方法	9
2.2	ボロメータの原理	10
2.3	ボロメータのノイズ源	14
2.4	ボロメータの測定からわかること	16
2.5	ボロメータの波長に対するレスポンスについて	17
第 3 章	冷却系実験	18
3.1	ASTE クライオスタット	18
3.2	ヒートスイッチ	19
3.3	金属の熱伝導	20
3.4	0.3K 冷却システム	24
第 4 章	光学系	27
4.1	焦点面光学系	28
4.1.1	焦点面分割鏡	29
4.1.2	楕円鏡	29
4.1.3	シミュレーション結果と考察	31
4.2	フーリエ分光器	37
4.2.1	フーリエ変換	37
4.2.2	フーリエ変換を用いた分光の原理	38
4.2.3	分解能とアポタイゼーション関数について	40
4.2.4	マーチンパレット型フーリエ分光器	42
4.3	フーリエ分光器を用いた測定から分かることの原理	43

4.3.1	薄膜中の光の干渉を利用した屈折率を求める方法	43
4.3.2	単層での反射防止膜の原理	45
4.4	フィルターについて	46
4.5	バンドパスフィルター	50
4.6	受信機全体での FTS 評価	60
4.7	迷光対策として	61
4.7.1	サブミリ波吸収体の評価	62
第 5 章	総合性能評価	63
5.1	ビーム効率とアンテナ効率について	64
5.2	光学系の総合実験 ビームパターンの測定	68
5.3	光学系の総合実験 hot-cold 法によるビームの効率 η_{beam}	74
5.4	光学系の総合実験 ボロメータシステムでのノイズ評価	75
5.5	NEFD の求め方	77
5.5.1	NEP と NEFD から分かる性能	79
5.5.2	効率向上するために残された問題点	82
第 6 章	結論	85
6.1	性能評価 1 実験室	86
6.2	性能評価 2 チリ	87
第 7 章	今後の方針と課題点	88
付 録 A	回転遷移について	i
付 録 B	吉永フィルターの成分表	ii
付 録 C	観測から能率を求める方法	iii

目 次

1.1	ALMA の検出感度@ http://www.nro.nao.ac.jp	4
1.2	ASTE 望遠鏡	4
1.3	ALMA サイトの大気の窓	5
1.4	ボロメータ	7
1.5	SIS ミクサ	8
2.1	熱モデル	10
2.2	ボロメータの原理図	10
2.3	ボロメータと読み出し回路 [1]	11
2.4	$P_V(t)$ の階段関数	12
2.5	ボロメータの I-V 特性 @ 12/30 チリでの測定 (0.399K)	16
2.6	ボロメータの波長依存性	17
3.1	実際のクライオ内部	18
3.2	ヒートスイッチ模式図	19
3.3	ヒートスイッチの評価	21
3.4	0.3K 冷凍機評価	24
3.5	0.3K オペレーション の状態	25
3.6	0.3k オペレーション	26
4.1	ビーム伝送系	28
4.2	焦点面光学系	28
4.3	焦点面分割鏡	29
4.4	楕円鏡	30
4.5	ボロメータでの spot 図	32
4.6	焦点からずれたところの spot 図	32
4.7	円鏡での spot 図	33
4.8	再設計時のボロメータでの spot 図	34
4.9	再設計時の焦点からずれたところの spot 図	34
4.10	シミュレーションでの光路	36
4.11	FTS 装置	37
4.12	FTS の原理	38

4.13	インターフェログラム	40
4.14	マーチンパレット型フーリエ分光器	42
4.15	単層での AR コート	45
4.16	AR 吉永フィルター@シミュレーション	48
4.17	AR 吉永フィルター	49
4.18	AR ブラックポリエチレン@シミュレーション	49
4.19	AR ブラックポリエチレン@測定	50
4.20	ICM 型メッシュフィルター拡大写真と図	50
4.21	測定結果	51
4.22	ch1 の斜入射の測定結果	52
4.23	理論式 (4.65) との比較	53
4.24	透過率と最大周波数との関係	54
4.25	バンド幅による透過率減少の説明	54
4.26	フィルター効率	56
4.27	フィルターの位置	57
4.28	受信機全体の FTS 評価	60
4.29	バッフル	61
4.30	吸収体の評価	62
5.1	効率 のイメージ	63
5.2	光学系の総合実験	68
5.3	ガウシアンフィットの例	69
5.4	、 、 を行う原因となったビームパターン@ 9/13	72
5.5	、 の項目を行なった結果の実験室の最終的なビームパターンの 測定結果@ 12/4	73
5.6	FFT アナライザーによるノイズ測定	76
5.7	チョッパーの動き方	77
5.8	ノイズ成分	82
5.9	振動ノイズのチリと実験室の比較	83
5.10	NEFD の大気透過率依存性	84
C.1	木星の観測結果 (1/13)	v

表 目 次

1.1	サブミリ波帯にある CO 輝線とその励起密度	3
2.1	I-V 評価@チリ	17
3.1	性能評価	22
3.2	1.5 倍ヒートスイッチの評価	25
4.1	光学系の設計パラメータ	29
4.2	楕円鏡 パラメータ	30
4.3	12 月の焦点面光学系のパラメータ@楕円鏡	32
4.4	ZEMAX で焦点を結ぶように設計を変えたとき@チリで使用	34
4.5	ビーム形状とサイズ	35
4.6	0.3K ステージが光軸方向に 0.04 度ゆがんでいる時のビームパターン	35
4.7	フィルターの測定値	47
4.8	透過率測定結果	48
4.9	メッシュフィルターの測定値	55
4.10	フィルターのまとめ	58
4.11	吸収体の成分表	62
5.1	ビームパターンの測定結果	69
5.2	実験室での測定結果	80
5.3	NEFD から分かること	82
B.1	吉永フィルタのレシピ	ii
C.1	現在行っている観測データの解析結果	iv

第1章 はじめに

銀河の中心部にある AGN (活動銀河核) のミリ波・サブミリ波観測を行いたいと考えていたことが本研究を行う動機になった。この銀河の中心にある AGN の周辺は小さなダストによって覆われていることが多い。ダストとはチリの事でこのチリの分子が AGN 周辺には多く存在していると考えられている。AGN 周辺の物質がどのように分布しているか調べることで、AGN の構造を明らかにしたいと考えている。我々が開発している受信機で我々の銀河の中心 (SgrA) を観測することで中心がどのような構造になっているか明らかにしたいと考えている。SgrA は 350GHz 帯では論文 [10] によると中心付近に存在する塵が AGN 内部に落ち込むことで 2 ~ 3 Jy でバースト的に時間変化することが分かっている。この 350GHz の観測結果をふまえて 650GHz と 850GHz 帯での観測を行って本当にそれが正しいか観測することで明らかにしたいと考えている。

ダストの種類とエネルギー状態などから様々な物理量を得ることができる。また遠くの銀河も見ることが出来る点も魅力である。ドップラー効果により地球上で考えられる分子のエネルギー状態による周波数がどのくらいずれるかなどが分かれば、速度成分に対する情報が得られたり、分子の分布が分かることにより構造や密度などの情報が得られる。

ほかの銀河の AGN を観測することができれば AGN がどのようにしてできたかを解明できると考え開発を行なっている。

これらのサイエンスを可能とする電波の領域がサブミリ波である。電波の中では最も波長が短いものとして波長が 10 mm から 1 mm (周波数 30GHz ~ 300GHz) のものを「ミリ波」と呼び、波長が 1 mm から 0.3 mm (周波数 300GHz-1THz) のものを「サブミリ波」と呼んでいる。

ラジオの電波の波長が 300m 程度から波長 4m 程度なのに対して遠赤外線は波長が 0.05m 程度であり、ミリ波・サブミリ波は遠赤外に近い波長帯である。宇宙空間にある非常に冷たい (30K 程度) 星間物質からは光や近赤外は放射されないが、ミリ波やサブミリ波では検出することができる。

太陽系の惑星も太陽の反射光ではなく放射によって検出できる。今までサブミリ波は、技術的な困難と空気中の水蒸気に吸収されやすい波長帯のために、本格的な観測が進んでいない領域であった。そのサブミリ波の観測を可能にする計画が日本がチリで行なうアタカマサブミリ波望遠鏡実験 (ASTE) 計画である。そのなかの連続波観測装置 (3 色ボロメータ受信機) を開発した。

ボロメータは、入射した電磁波を熱エネルギーに変換する受信素子である。周

波数帯域が広く周波数を選択的に選ぶのにフィルターが必要になる。フィルターを使うことで3色にすることが可能なシステムになっている。

このシステムは連続波観測（光を光子として捉えていて、周波数に対してある程度の帯域幅がある）にフーリエ分光器を組み合わせることでライン観測（光を波として捉えていてある周波数に対して感度を持つ）が行えるシステムになっており、一度に大量なデータを短時間に取得できる装置であることが利点である。

3つの周波数を同時に取れる連続波受信機であることがサイエンス的に大きなポイントがある。それはダストの黒体放射のスペクトルの傾き（SED）を観測できること（3周波数において同時に観測することからスペクトルの傾きが分かる）とフーリエ分光器を併用することで輝線観測としても使える点である。

この章でサブミリ波で行える天文学と現在行っているプロジェクトの説明、開発している検出器について、開発の背景とサブミリ波での天文学について紹介する。

1.1 サブミリ波天文学

サブミリ波天文学が重要になってきている理由の一つとしてダストの情報を知る必要がでてきたことにある。低温のダストのスペクトルはサブミリ波帯でピークを持つためサブミリ波帯が重要になっている。サブミリ波を用いたサイエンスとして原始惑星系円盤（惑星の初期形成の段階）、原始銀河（銀河が形成されている場所）などのダストの密度を知ることができると期待されている。その中で個人的に原始銀河に興味があり、銀河の中心にある銀河中心核（AGN）がどのように形成できたのか、巨大ブラックホール形成について（中質量ブラックホールの衝突問題）について知りたいと思いこの観測装置の立ち上げの実験に参加している。例えばこれらの天体に含まれるダストの一部としてサブミリ波帯には分子輝線の代表的なCOやCSをはじめ様々な分子の多数の遷移輝線¹が存在する（表1-1）。

これらの分子輝線はミリ波帯の分子輝線に比べ高い励起臨界密度を持つものが多い。高温高密度な領域を選択的にトレースすることができる。また同一分子の異なる遷移過程による輝線が多数存在することから分子ガスに対してなにかの物理モデル（降着円盤、流体モデルなど）を過程することで分子ガスの温度や密度、視線方向からの速度情報といった物理量を直接導出することが可能となる。

連続波観測により分子輝線観測とは独立な方法で星間物質の情報を得ることができる。3色ボロメータは、350GHz、650GHz、850GHzにおける周波数帯で同時受信可能な検出器である。

分子輝線の情報と合わすことで星間物質の物理状態をより正確に議論できるようになると考えられている。低温なダストのスペクトルはサブミリ波でピークをもち、スペクトルのべき指数を求めること（ $S_\nu \propto \nu^\alpha$ ）で様々な現象について議論で

¹付録A 参照 回転遷移について

表 1.1: サブミリ波帯にある CO 輝線とその励起密度

遷移	ν (GHz)	臨界密度 (cm^{-3})
J=1-0	119	1.4×10^3
J=2-1	237	1.4×10^4
J=3-2	356	5.0×10^4
J=4-3	474	1.2×10^5
J=5-4	593	2.5×10^5
J=6-5	711	4.3×10^5
J=7-6	830	6.9×10^5

きる。星間物質の分布や、ダストのサイズなどが議論できる。

連続波検出器であるボロメータ検出器は視線方向に存在するダストの熱放射の SED (エネルギースペクトル分布 (図 1.1)) の傾きを一度の観測で得られる。

1.2 ASTE と ALMA

本格的にサブミリ波観測を目指す ALMA の実現には検出器やアンテナ、冷却系や相関器などほとんどすべての分野において技術的に向上することが必要である。

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) 建設予定地は、サブミリ波観測に最も適したサイト (調査の結果図 1.3) のチリ北部アタカマ砂漠である。

標高 5000m の所に位置し、人と受信機システムにとって大変厳しい環境である。このような背景のもとで計画されたのが ASTE 計画 (Atacama Submillimeter Telescope Experiment) である。ASTE 計画は国立天文台が製作した超高精度サブミリ波アンテナを ALMA サイトに設置して以下の 2 つの項目を行なうことを目的としている。

サブミリ波用のアンテナとサブミリ波受信機システムの評価

ASTE の受信機システムは大気窓 (図 1.3) に合わせて、ライン観測用に 100,230,345,490,670,850GHz 用の SIS ミクサが、連続波観測用に 3 色 (350,650,850GHz) ボロメータが搭載されている。またサブミリ波カメラがこれから搭載される予定である。これらのシステムの評価 (受信機とアンテナ) を行っている。

去年の 6 月、現在の 12 月から 2 月まで、システムの評価として受信機の性能とアンテナの評価などを行なった。システムの性能としては去年の 6 月より 40 倍ほどシステムの性能が向上した (実験室で評価したときのシステム性能は 6 月と比べ 10 倍向上)。このシステムの向上については、5 章で詳しく議論する。

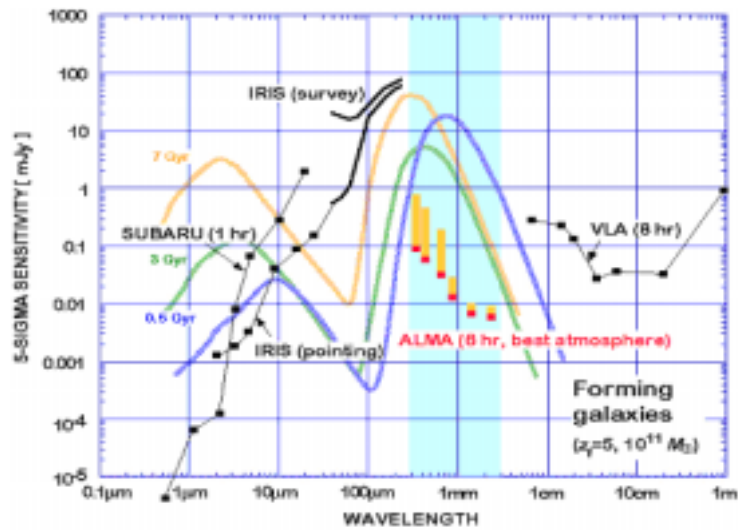


図 1.1: ALMA の検出感度@<http://www.nro.nao.ac.jp>

最良の条件の場合（赤）と平均的な条件の場合（オレンジの縦棒）で示してある。若い銀河（年齢 5 億年（青）、30 億年（緑）、70 億年（黄））のスペクトルエネルギー分布（SED）を重ねて示してある。この図から、宇宙の構造形成に重要な寄与を及ぼす比較的低温の物質からの放射はミリ波からサブミリ波に至る領域に極大を持つ事がわかる。また、ミリ波サブミリ波領域では遠方にある若い銀河が近傍にある銀河と同程度の明るさで検出されることがわかる。



図 1.2: ASTE 望遠鏡

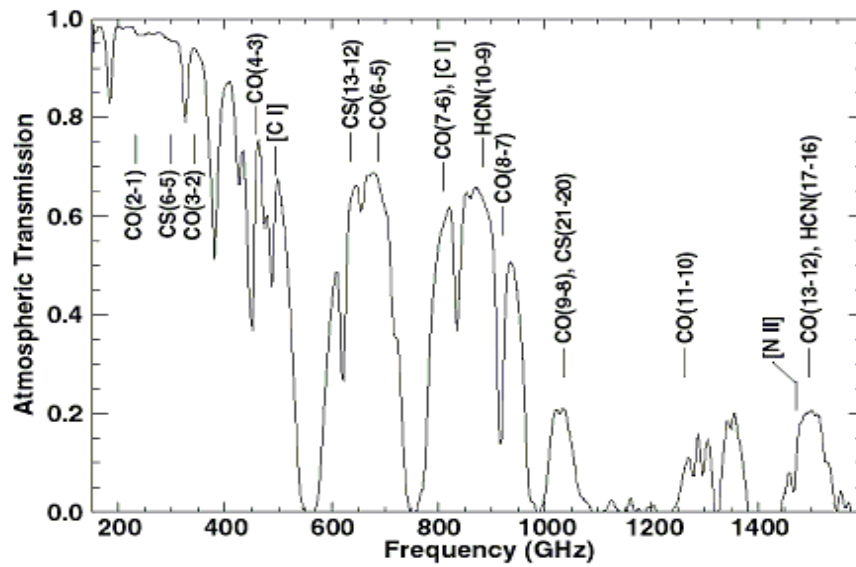


図 1.3: ALMA サイトの大気窓

Matsushita, Matsuo et al(1999)PASJ

南半球では世界初の本格的なサブミリ波観測を行なうこと
 現在存在するサブミリ波の大型望遠鏡（口径 10 m クラス）はすべて北半球に存在する。ASTE は上限周波数 800GHz 以上と既存のものに比べ高く、南半球初というだけでなく、世界最高性能のサブミリ波観測装置となり、サブミリ波天文学の開拓も担う。[7]

1.3 検出器の違い

直接検出器とヘテロダイン検出器の大きな違いは直接フォトン粒子として捉えるか波動として捉えるかの違いである。

直接検出器 … 光子検出器・熱型検出器（ボロメータ）など

光子そのものに対応した信号を読み出す 連続波観測

光をフォトンとして捉えそのエネルギーに対応したものを検出する。

例えばボロメータは光子のエネルギーを熱エネルギーに対応させて検出している。ある程度の帯域幅を持ったものが観測できるので連続波観測として使用される。

ヘテロダイン受信機 … ラジオなど

信号の位相情報を見る（ミキシングしている） ライン観測

周波数がわずかに異なる2つの波を重ね合わせるとその周波数の差に等しいうなりが観測できる。このうなりから必要な情報を取り出すことをヘテロダイン法という。光も波と考えると光のうなり＝光ビートを生じる。この光ビートから情報を取り出すことを光ヘテロダイン干渉法と呼ぶ。ある周波数における情報だけが分かるライン観測に向いている受信機である。

1.3.1 直接検出器

直接検出器とは入射した電磁波をフォトンとして検出する装置のことである。半導体素子が近赤外から遠赤外のフォトンエネルギーに相当するギャップエネルギーを持つことを利用し光を検出するものが一般的である。

最も長波長なものでは波長 $200\ \mu\text{m}$ で感度を持つ圧縮型 Ge:Ga 検出器がある。サブミリ波帯でギャップエネルギーを持つ半導体素子はこれまでのところ InSb のホットエレクトロンボロメータがあるだけでこれら半導体技術をそのままサブミリ波帯で使用することは難しい。

現在サブミリ波帯で使用可能な直接検出器としては、入射した電磁波のエネルギーを熱エネルギーに変換して検出するボロメータがある。その他の直接検出器として量子ドットを用いた検出器（東大）の研究や、Ga:As を用いたフォトコンダクター（マックスプランク研究所）などが研究されている。

ボロメータには

ボロメータは2次元アレイ化が難しい

(同じ性能をもつ素子を作るのが難しい点から)

動作条件が厳しい（素子が動作する温度が極低温で、振動に弱い）

などの問題がある。

また我が研究室ではこの問題を解決するために最近注目を集めている SIS 接合を用いた超伝導サブミリ波カメラを開発研究をしている。これは超伝導体のギャップエネルギーがサブミリ波帯にあることを応用したものでボロメータに変わる新たなサブミリ波帯の直接検出器として期待されている。同研究室で現在ボロメータと平行して実験が行なわれている。[7]

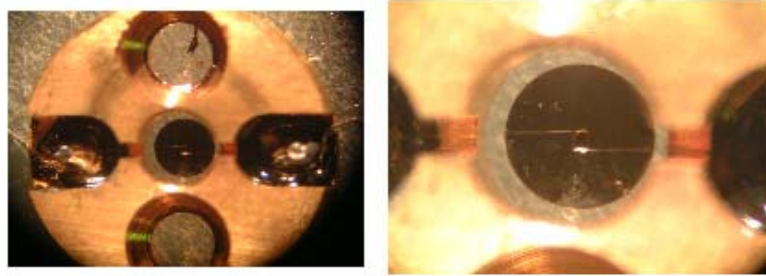


図 1.4: ボロメータ

1.3.2 ヘテロダイン受信機

ミリ波、サブミリ波帯の検出技術として現在最も主流であるのが SIS ミクサを用いたヘテロダイン受信機である。SIS 接合の強い線形性を用いたもので、ミリ波、サブミリ波帯では超伝導体に Nb (ニオブ) を用いたものが広く使われている。SIS ミクサは雑音温度に換算して $h\nu/k_B$ なる量子限界をもつ。しかし近年の研究開発によって量子限界に迫る低雑音温度なミクサがつくられるようになっていく。問題点として

量子限界が周波数に比例して増加すること

SIS 接合面積を周波数に比例して小さくする必要があること

などの理由から高い周波数帯で良いミクサを作ることは技術的に難しい。また 800GHz 以上の周波数帯ではフォトンのエネルギーが Nb の超伝導ギャップエネルギーを超えるためより大きなギャップエネルギーを持つ超伝導材料を用いた SIS ミクサを開発する必要がある。[7]

1.4 3色ボロメータの必要性

我々の開発する3色ボロメータは 350GHz, 650GHz, 850GHz 同時受信可能なボロメータシステムである。ボロメータは入射した電磁波を熱エネルギーに変換しまうため分光観測はそのままだと不可能である。しかしフーリエ分光器などの分光器を組み合わせることで分光が可能である。ボロメータは周波数帯域が広く、現



図 1.5: SIS ミキサ

在サブミリ波帯で最も感度の高い検出器である。我々のシステムはこのボロメータの持つ特徴から ASTE に対して以下の重要な役割を担う。

ASTE 初期のサブミリ波連続波観測システムとして我々のシステムはサブミリ波帯で 3 周波数帯で同時受信可能である。SCUBA(JCMT) や SHARK(CSO) などのシステムに比べ貧弱ではあるが、ダストの熱的放射の SED の傾きを一度の観測で得ることができることから、低温ダストの柱密度やサイズについての議論が可能である。連続波のサーベ이의観測はボロメータの一年後に搭載される予定である超伝導サブミリ波カメラに譲ることとなるが ASTE 立ち上げ期から搭載されるサブミリ波観測装置として ASTE を使ったサイエンスの初期成果を上げることが期待されている。[7]

第2章 ボロメータについて

ここでは主にボロメータで検出する原理と検出に伴うノイズについて述べる。ボロメータは光のエネルギーを熱エネルギーに変え電氣的に検出される。次章以降で議論される冷却系と光学系の話に結びつけるように次の視点

ボロメータは 0.3K より低い温度で最適な動作をするため 0.3K 以下に冷却すること

十分なエネルギー感度を持つための光学的な設計に注目されたい。

ボロメータ素子における感度をより良くする為には、冷却系と光学系の二つの課題をどう克服していくかである。

2.1 ボロメータの検出方法

光子による直接励起された電荷によって検出されるのではなく光子を吸収し、そのエネルギーを熱に変換し検出をする。

- 熱エネルギーは感度の良い温度計によって検出される。
- 検出器の波長に依存するレスポンスはほぼ平らである。また光子を吸収する物質に依存するレスポンスと同じで広い。

半導体もしくは超伝導体の温度計センサーを基にしているボロメータは、微光熱検出器で特にサブミリ領域で多くの応用が想定される検出器である。

可能な限り最も高い性能にするには、1 K 以下¹に冷やす必要がある。検出器は熱浴 T_0 の温度と熱伝導 G の弱い熱的な状態でつながっている。

- この他に熱を失うパスがないことを仮定する。
- 時間変化するパワーとして、 $P_V(t)$ を導入。
- 検出器は、一定のパワー P_0 を吸収する。

そのパワーは輻射を吸収することによるものと仮定する。

検出器の温度は $P_V(t)$ に依存した時間で変化する。

そのパワーは熱浴より T_1 の温度上昇によるものである。

古典的で簡単な形のボロメータは図で説明される。

¹ボロメータを 10mK 程度に冷却して 20g のフッ化リチウム単結晶 8 個の吸収体とそれらに取り付けられた高感度抵抗温度計 (サーミスター) からなる極低温熱量計型検出器 (東大) で、ダークマターを検出しようとするグループ (みのわ研究室) 等もある。



図 2.1: 熱モデル

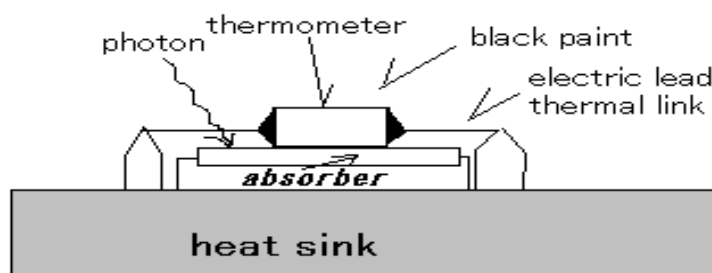


図 2.2: ボロメータの原理図

ボロメータはシリコンもしくはゲルマニウムの小さいチップから成る。チップは低雑音増幅とシグナルを結合するのに適当な抵抗と大きな温度係数の抵抗の両方を持つようにドーピングされている。検出器のチップは電気的な接触（チップに半田付けされてる薄い線）でつるされている。これらの線（グラファイト）は熱浴と結ばれている。検出器の電気的な抵抗を計測することで決定できる電圧によって発生する電流を流す線である。

ボロメータは抵抗による変化に対応して電圧が変化する。抵抗がチップの温度の強く関係する関数である。すなわち入射電力は電圧における変化を測定すればよい。

よってボロメータのシグナルは電気的に作り出されることになる。検出器による基本的な電気的な雑音の種類がグラファイトや熱浴の熱変動まで及ぶ。これらの効果をできるだけ少なくするためには極低温にする必要がある。低温で高性能を得ることができるわけである。[1]

2.2 ボロメータの原理

ボロメータにおけるパラメータの重要なものに、熱容量 C 、熱伝導率 G 、サーミスターの温度係数 α の値を知る必要性がある。これらはボロメータ自身の性能

を示すことになる。

ここから、電気感度 S_E 、時定数 τ 、雑音等価エネルギー NEP (Noise Equivalent Power) について評価することができる。

NEP の定義

$$NEP = \frac{\Delta P}{\sqrt{\Delta f}} \quad df \text{ 周波数帯域幅} \quad P \text{ パワー [W]}$$

これらの値を得るためには、どのようなパラメータを必要とし、実験として何を知ればいいのか述べる。そのためにはボロメータがどういう状態になっているか知ることである。

そこで簡易的なボロメータの原理図は図 2.3 のようになる。ここで、図にかかれているパラメーターは、半導体サーミスターの抵抗値 R_b 、熱浴 T_0 バイアス電圧 V_b 、ロード抵抗 R_L 定電圧 V である。ロード抵抗 R_L は $R_L \gg R_b$ になっていて

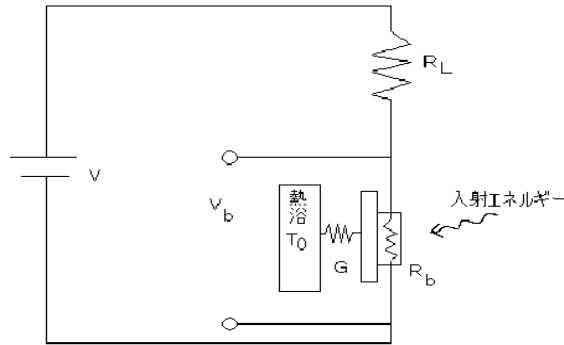


図 2.3: ボロメータと読み出し回路 [1]

直列につながっている。回路には定電圧がかかっている。回路を流れる電流 I は $R_L \gg R_b$ において、 $I \sim V / R_L$ で与えられる。すなわち、 R_b に寄らず、一定の値を持つ。よってボロメータの電圧 V_b を測定すればサーミスターの抵抗値を求められる。ボロメータで発生するジュール熱を P_E とし、ボロメータに入射エネルギーが無い時を考え、ボロメータの温度 T_b を $T_0 + \xi_0$ とすると熱伝導率 G は

$$G = \frac{P_E}{\xi_0} \quad (2.1)$$

で与えられる。

外部からの入射エネルギー

$$P(t) = P_0 \exp(i\omega t) \quad (2.2)$$

があるとき効率 η で入射した電力がボロメータの内部エネルギーに変換されるとき

$$\eta P_V(t) = \frac{dQ}{dt}$$

$$= \frac{Cd\xi_0}{dt} \quad (\text{ここで } dQ = Cd\xi_0 \text{ より}) \quad (2.3)$$

ここで η は量子効率である (検出器によって吸収されたパワーの割合)
 C は熱容量で

$$\frac{dQ}{d\xi_0} = C \quad (2.4)$$

によって定義される。ここで $P_V(t)$ が階段関数だとすると ($t < 0, P_V(t)=0$ で $t > 0, P_V(t)=P_1$ である関数) よりトータルパワー $P_t(t)$ は次の微分方程式が成り立つ。

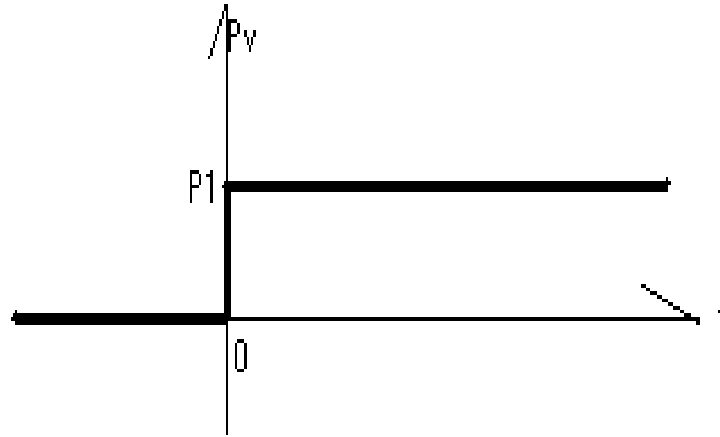


図 2.4: $P_V(t)$ の階段関数

$$P_t(t) = P_0 + \eta P_V(t) = G\xi_0 + C \frac{d\xi_0}{dt} \quad (2.5)$$

ここで上式の解を

$$\xi = \xi_0 + \xi_1 \exp(i\omega t) \quad (2.6)$$

とすると ξ_1 は

$$\xi_1 = \frac{\eta P_0}{\dot{G}} \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.7)$$

で与えられる。ここで τ 、 \dot{G} は

$$\tau = \frac{C}{G} \quad \dot{G} = G - \alpha P_E \quad (2.8)$$

α はサーミスターの温度係数で

$$\alpha = \frac{dR_b}{R_b dT_b} \quad (2.9)$$

である。熱的時定数 τ_T を

$$\tau_T = \frac{C}{G} \quad (2.10)$$

とするとサーミスター場合温度係数は負であり $\tau_T > \tau$ となる。検出器の熱的な時定数を検討すると長い時間が経った時と τ_1 を比べて ξ_0 は $P_0 + \eta P_V(t)$ に比例している。

温度上昇に伴い Joule 熱によるエネルギーの散逸が減少するため電熱フィードバックと呼ぶ。

(2.9) 式により入射したエネルギーとボロメータの温度の関係が明らかである。しかし測定として読み出すのはボロメータにかかる電圧 V_b でありボロメータの電氣的感度 S_E (入射電力とボロメータにかかる電圧の関係式) が必要になる。

$\omega = 0$ でボロメータの電氣的感度 S_E は

$$S_E = \frac{dV_b}{dP} = \frac{dV_b}{dR_b} \frac{dR_b}{dT} \frac{dT}{dp} = \frac{\eta \alpha V_b}{G - \alpha P_E} \quad (2.11)$$

となる。ここで注目すべきは S_E に入射光子をエネルギーとして扱ってるため入射光子の周波数が式に表れていないことである。

上式よりボロメータにかける電圧を高くして、熱伝導率を低くすると高い電氣的感度を得られることがわかる。しかし電圧をかけすぎると Joule 熱 が大きくなりボロメータの温度が上昇してしまい η が小さくなり感度がよくないことがわかる。

[3] 電氣的感度は実際に評価をする際、実験式としてこの式を変更する方が便利であるため式変形をする。ボロメータの抵抗は $R_b = \frac{V_b}{I_b}$ である。ここで、これらの値を変化したときにできる抵抗値 Z を次式で表せる。

$$Z = \frac{dV}{dI} \quad (2.12)$$

また、この式は、リニアリティがないので Z は

$$\begin{aligned} Z &= R \frac{d(\log V)}{d(\log I)} \\ &= R \frac{\frac{d(\log P)}{d(\log R)} + 1}{\frac{d(\log P)}{d(\log R)} - 1} \end{aligned} \quad (2.13)$$

と書き換えることができる。いま、熱伝導 G とサーミスターの温度係数 α に関するパラメータを次のように定義する。

$$H = \frac{G}{\alpha(T)P} \quad (2.14)$$

とする。式 (2.1) と式 (2.9) より、

$$\begin{aligned} \frac{d(\log P)}{d(\log R)} &= \frac{1}{I^2} \\ &= \frac{dPdT}{dTdR} = \frac{G}{\alpha(T)P} = H \end{aligned} \quad (2.15)$$

と書きかえられるので式 (2.13) は

$$\begin{aligned} Z &= \frac{R(H+1)}{H-1} && \text{より} \\ H &= \frac{Z+R}{Z-R} \end{aligned} \quad (2.16)$$

よって式 (2.11) は、

$$S_E = \frac{V}{P(H-1)} = \frac{V(Z-R)}{2VIR} = \frac{1}{2I} \left(\frac{Z}{R} - 1 \right) \quad (2.17)$$

よって、I-V の関係がわかれば、電氣的感度を求めることができ測定することが可能である。²

2.3 ボロメータのノイズ源

ボロメータシステムの感度を決定づける主なノイズ源としては、ボロメータの抵抗で発生するジョンソンノイズ、ボロメータの熱浴との熱抵抗で発生するフォノンノイズなどのボロメータ自身が発生させるノイズと背景放射の温度揺らぎによるノイズが挙げられる。以下に理論的に説明できるジョンソンノイズ、フォノンノイズ、背景放射の揺らぎについて、実際の測定方法から、分かるノイズ測定についてまとめる。

ジョンソンノイズ

一般に、抵抗 R の両端の電圧において発生する熱雑音電圧は、抵抗の絶対温度を T とすると

$$V_J = 4k_B T R \Delta f \quad (2.18)$$

と表される。ここで Δf はシステムの周波数帯域幅であり、積分時間 T_{int} との関係は

$$\Delta f = \frac{1}{2T_{int}} \quad (2.19)$$

である。(ナイキストの定理)³

ボロメータの読み出し回路での電熱フィードバックによる影響を考慮すると

$$V_J \cong \left(\frac{R_b + Z_b}{2} \right) \frac{4k_B R \Delta f}{R} \quad (2.20)$$

²この関係について、詳しく議論しているのが小出氏の修士論文 [7] と岡庭氏による卒業論文である。詳しいことはここでは述べないが、実験から電氣的感度を測定するにはバイアス電圧とボロメータの出力、そのときのボロメータの温度が分かることで求められる。

³標本化定理ともいう「入力信号として最大周波数 f_{MAX} までの交流信号を A-D 変換したのち、これを D-A 変換して戻したとき、原信号が忠実に再生するためには、少なくとも $2f_{MAX}$ 以上のサンプリング周波数 f_S でサンプリングする必要がある」という定理。すなわち積分時間は、ある周波数の帯域幅を時間に戻した時の 2 倍必要であるという定理。

と表される。ここで Z_b はボロメータのインピーダンスで

$$Z_b = \frac{dV_b}{dI_b} \quad (2.21)$$

である。NEP(Noise Equivalent Power) に換算すれば

$$NEP_J = \frac{V_J}{\eta_{bol} S_E \sqrt{df}} \quad (2.22)$$

$$= \frac{S}{\frac{4kT}{P} \frac{G}{\eta |\alpha(T)|}} \quad (2.23)$$

となる。[1]

フォノンノイズ

ボロメータはある有限の熱伝導率 G で熱浴と結ばれておりボロメータに蓄えられる熱エネルギーに揺らぎが生じる。この揺らぎに起因するノイズを等価な入射エネルギー ΔP_{phonon} に換算すると、

$$\Delta P_{phonon} = \frac{q \frac{4k_B T_b^2 G df}{\eta_{bol}}}{\eta_{bol}} \quad (2.24)$$

と表すことができる。従って NEP は

$$NEP_{phonon} = \frac{q \frac{4k_B T_b^2 G}{\eta_{bol}}}{\eta_{bol}} \quad (2.25)$$

となる。

これらの2つのノイズは、ボロメータのバイアス電圧と出力電圧を測定することによって、求めることができる。[1]

ノイズ測定について

ボロメータシステムにおけるノイズの測定は、FFTアナライザー⁴を用いて、これらのノイズを一緒に測定し評価することができる。ただし、ジョンソンノイズとフォノンノイズ、アンプノイズ(読み出し回路素子に関するノイズ)は、理論的なNEPとして評価できる。しかし、ノイズの測定からその結果を引いたものは、振動などのノイズ(ボロメータの電氣的なノイズとは別なノイズ)になる。

$$NEP_{\text{実測}} = \frac{\text{FFT アナライザーによるノイズ測定 } V_n \left(\frac{V}{\sqrt{Hz}} \right)}{\text{電氣的な感度 } S_E \left(\frac{W}{V} \right)} \quad (2.26)$$

⁴FFTアナライザーは、信号を周波数領域で捉えて表示する測定器。計測信号をA/D変換した後、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform)することによって捉えた信号を表示する

2.4 ボロメータの測定からわかること

以上で述べたジョンソンノイズ、フォノンノイズはそれぞれ独立な事象である。従ってボロメータの NEP はこれら 2 つのノイズが支配的であるとき

$$NEP_{bol}^2 = NEP_J^2 + NEP_{phonon}^2 \quad (2.27)$$

と表される。前節で導出したボロメータの基本的パラメーター (熱容量 C 、熱伝導率 G 、温度係数 α) とボロメータの電気的感度 S_E 、時定数 τ 、ボロメータ自身のノイズ (ジョンソンノイズ、フォノンノイズ) との関係式によれば

電気的感度 S_E を高く α 大きく V_b 大きく G 小さく
 時定数を小さく C 小さく G 大きく
 NEP_J 、 NEP_{phonon} 小さく G 小さく T_b 小さく α 大きく

となる。従ってできるだけ低温で熱伝導率、熱容量が小さく、温度係数 α が大きいサーミスターを使用することが高性能ボロメータの設計条件となる。

ASTE 搭載用ボロメータは動作温度 0.3K で時定数が小さいことを満たすことが必要とされる。[7] この I-V 特性は 300K の黒体 (電波吸収体のエコソープ) を見て

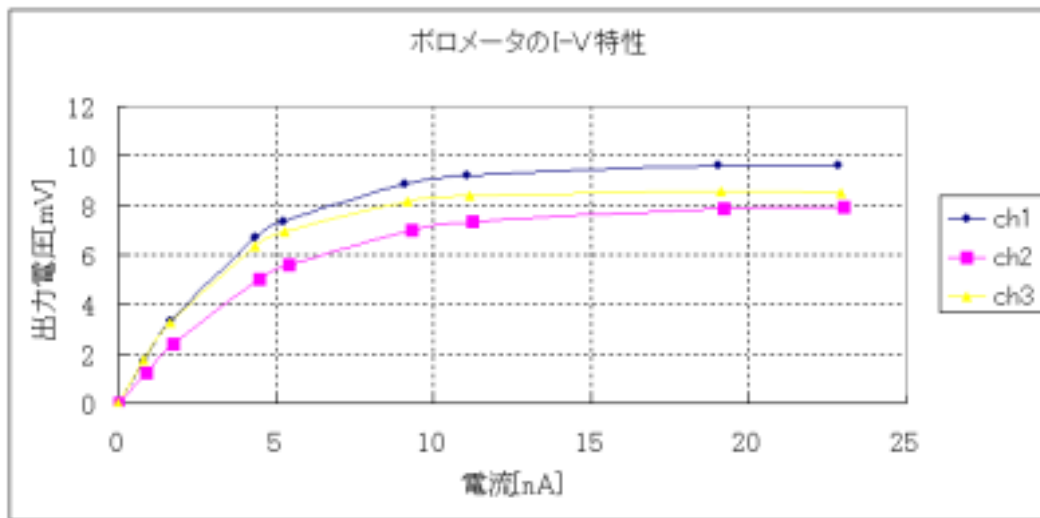


図 2.5: ボロメータの I-V 特性@ 12/30 チリでの測定 (0.399K)

いる時のものでここから電気的感度、ジョンソンノイズ等を算出することが可能である。ここで、実際にチリで測定した結果をまとめると
 となる。ノイズの評価も含めこれらは 5 章の最後にまとめる。

表 2.1: I-V 評価@チリ

ボロメータ	SK3502	SK6504	SK8503
S_E	3.24E+07	2.71E+07	3.48E+07
NEP(Johnson)	1.43E-16	1.50E-16	1.27E-16

2.5 ボロメータの波長に対するレスポンスについて

ボロメータは、前に述べたように温度に対し敏感に動作する。 S_E に入射フォトンの周波数が式に表れていないことからわかるが、ボロメータ自身が感度を持つ波長帯全てに対し、一様なレスポンスを持っている。3色ボロメータ素子は入射フォトンの吸収する波長帯全てのレスポンスが平らであることである。三色す

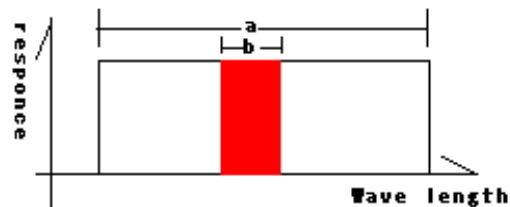


図 2.6: ボロメータの波長依存性

a の波長範囲は素子の入射フォトンの吸収と波長域によって決まるレスポンス関数
b は a の波長範囲のレスポンスの大部分をカットした時（フィルターによるカット）のレスポンスに対する波長範囲

なわち三つの感度をそれぞれ持つためには、素子が3つ必要であり、それぞれ感度を持つ波長帯を変える必要がある。この波長選択方法については、第4章の光学系で述べるが、バンドパスフィルターで、必要な波長帯のみ透過するものを用いることで、3チャンネルに分けることができる。⁵⁶

⁵a のレスポンスの範囲が決まってしまう理由としては短波長側は受信素子が入射電磁波を吸収できず突き抜けてしまうためである。長波長側は吸収する基盤の大きさより長い波長は吸収できないためである。そのため a のレスポンスの範囲が決まってしまう。

⁶二章の参考文献は、Detection of light (Chapter2 と Chapter9) である。

第3章 冷却系実験

前章で、述べたようにボロメータ検出器を最適に動かすには0.3 kの極低温な状態を作り出すことが必要になってくる。そのために必要な0.3 k冷凍機とそれを動かすために必要なヒートスイッチの原理と評価について述べる。

冷却実験をするにあたって次の熱の移動に注意を払いながら測定器のセットアップと装置の評価を行なった。

熱を移動させる物理的な様式として以下のことが上げられる。

- ・ 熱伝導 分子・電子の運動・熱エネルギー
- ・ 熱放射 物体から温度に応じた電磁波が放射する。
ステファン-ボルツマンの法則 $E = \sigma T^4$
- ・ 対流熱伝達 流体の中の温度差による密度勾配
- ・ 相変化を伴った熱移動 蒸発・融解など

3.1 ASTE クライオスタット

受信機を冷やすためのクライオスタットである。これは GM 冷凍機（Gifford-McMahon 型でヘリウムを圧縮して冷却する装置）と、0.3K 冷凍器を組み合わせたりモートで冷却できる低振動クライオスタットである。リモート運用するために必要な装置を評価した。



図 3.1: 実際のクライオ内部

3.2 ヒートスイッチ

0.3K 冷却オペレーション（後述）を自動制御するために必要な装置の一つとしてヒートスイッチというものがある。まずは、ヒートスイッチについて原理と評価、実際の使われ方について述べる。ヒートスイッチとは図のような構造をしている。

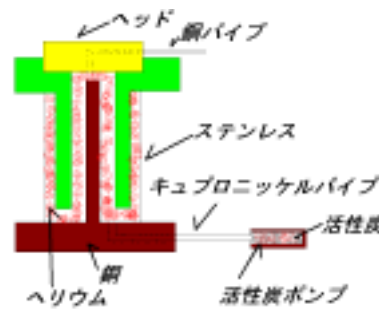


図 3.2: ヒートスイッチ模式図

一般にヒートスイッチは熱を伝導したり断熱したりする装置のことである。今回 ASTE の冷却系に用いているヒートスイッチは一般的な機械式ヒートスイッチではなくガス型ヒートスイッチを用いている。ガス型にすることによって冷却の自動化にすることに成功した。（ON と OFF を電圧を用いることによって可能となった）

ガス型ヒートスイッチの原理について述べる。

図にある活性炭は 4K 以下の温度でヘリウムを吸着することができる物質である。

ヒータなどで温度を上げることでそのヘリウムが、ヒートスイッチ充満して熱伝導を良くすることと、ヒータを切り温度を 4K 以下にし真空の状態にし熱を伝えにくくする装置である。

ON と OFF について

ON の原理

活性炭ポンプのヒータに電圧をかけポンプを温めると活性炭に吸着していた He ガスがパイプの中を伝って内部にガスが充満する。この時を ON 時と呼びポンプを温めることを ON にするという。

OFF の原理

OFF はポンプに電圧をかけないときである。この時ヘリウムは活性炭ポンプによって吸着され内部は真空状態となりヘッドと銅はステンレスを伝わって熱を逃がすしかなくなる。実際にはヘッドにある温度計による熱源（10 μ W）によって、ヘッドが暖まるのでより早く熱平衡になりやすい。OFF の確認は ON 時でヘッドの温度が下がっているが、OFF にすると温度が上昇するのでこの温度上昇（温度変化）があったとき OFF 確認とした。

3.3 金属の熱伝導

ヒートスイッチの評価のなかで特に重要なのは熱伝導である。それを物理的に数値で表すと熱伝導率 $k(T)$ という単位で表現しなければならない。そこで実験に用いた熱伝導の式の導出について述べる。熱伝導の定義は一般に

$$\frac{dQ}{dT} = -k(T) A \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

でこれを実験で使えるように次のような仮定をおこなった。

- ・ 断面積 A の均一で長さ L の物体
- ・ 両端の温度が T_1, T_2 のもの

そうすると熱伝導の式は

$$Q = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} k(T) dT \quad (3.2)$$

となる。これを書き直して

$$k(\Delta T) = \frac{L}{A} \frac{dQ}{d\Delta T} \quad (3.3)$$

ここで気体分子論（電子を気体分子として近似）にしたがって金属の熱伝導を考えると今 x 方向の粒子流は（粒子の流れ）

$$j_U = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.4)$$

で与えられる。粒子の比熱を c だとすると、粒子が局所的な温度 $T + \Delta T$ の温度領域から局所的な温度 T の領域に動く時粒子は $c\Delta T$ のエネルギーを放出するので粒子の平均自由行程 l の両端の温度差が ΔT だとすると、

$$\Delta T = \frac{dT}{dx} l_x = \frac{dT}{dX} v_x \tau \quad (3.5)$$

で与えられる。ここで n は分子の濃度であり平衡状態では等しい大きさの流れが互いに逆方向に存在する。

$\langle \quad \rangle$ は平均値を示す。また τ は衝突の間の平均時間である。よって、エネルギーの正味の流れは

$$j_U = -n \langle v_x^2 \rangle c \tau \frac{dT}{dx} = -\frac{1}{3} n \langle v^2 \rangle c \tau \frac{dT}{dx} \quad (3.6)$$

で与えられる。 v が一定だとみなすこのように書き換えられるので

$$j_U = -\frac{1}{3} C v l \frac{dT}{dx} \quad (3.7)$$

熱伝導率 $k(\Delta T)$ は

$$k = \frac{1}{3} C v l \quad (3.8)$$

となる。ここで、前式 (3.3) と熱伝導率を次のように仮定すると

$$k(\Delta T) = 2\alpha\Delta T + \beta \quad (3.9)$$

熱量 Q は温度差 ΔT を用いて次のように書ける。

$$Q = \frac{L}{A}\alpha\Delta T^2 + \beta\Delta T + \gamma \quad (3.10)$$

この式を用いて熱伝導率測定の評価をおこなった。[2]

ヒートスイッチの性能評価の方法と性能評価



図 3.3: ヒートスイッチの評価

$$Q = \frac{L}{A}\alpha\Delta T^2 + \beta\Delta T + \gamma$$

を用いて熱伝導率の測定を行った。つまり、熱量 Q は

$$Q = I^2 R \quad (3.11)$$

より与えられる。

また、 ΔT はヘッドと 4K ステージの温度差とするとヒートスイッチの熱伝導率を測定することができる。ただし、表に用いた値は次ページにおける測定値のグラフを微分することによって求めたものである。ヒートスイッチの評価のまとめとして、金属の熱伝導を考える。つまり、OFF 時の熱伝導率 (ステンレスの熱伝導率と同じになれば性能として評価ができる) と熱伝導の物性表を比べることで、熱的に切れることが出来るスイッチか判断しやすい。

表 3.1: 性能評価

	ON の熱伝導率 [mW/K]	式 [mW/K]	OFF 熱伝導率 [μ W/K]	式 [μ W/K]
No4	48.2	$= 10.4T + 37.8$	110	$= 60T + 50$
No5	49.3	$= 15T + 34.3$	150	$= 80T + 70$
No6	17.2	$= 5.2T + 12$	28	$= 8T + 20$
No7	43.4	$= 7.2T + 36.2$	44	$= 4T + 40$
No8	35.2	$= 8.4T + 26.8$	18	$= 8T + 10$

そのためには、ヒートスイッチの断面積 A と長さ L までの値が必要で、それを考慮した結果 No.4 と No.5 のヒートスイッチは OFF することができないものだった (表からも一目瞭然で判る)。たとえば No.6 の OFF 時の熱伝導率と物性表のステレンスの熱伝導率の値を比べると

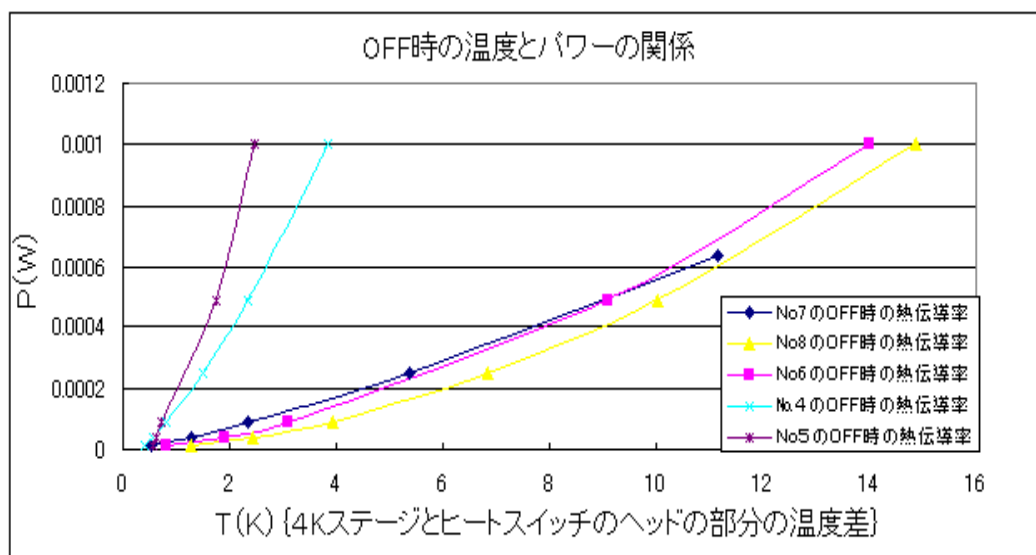
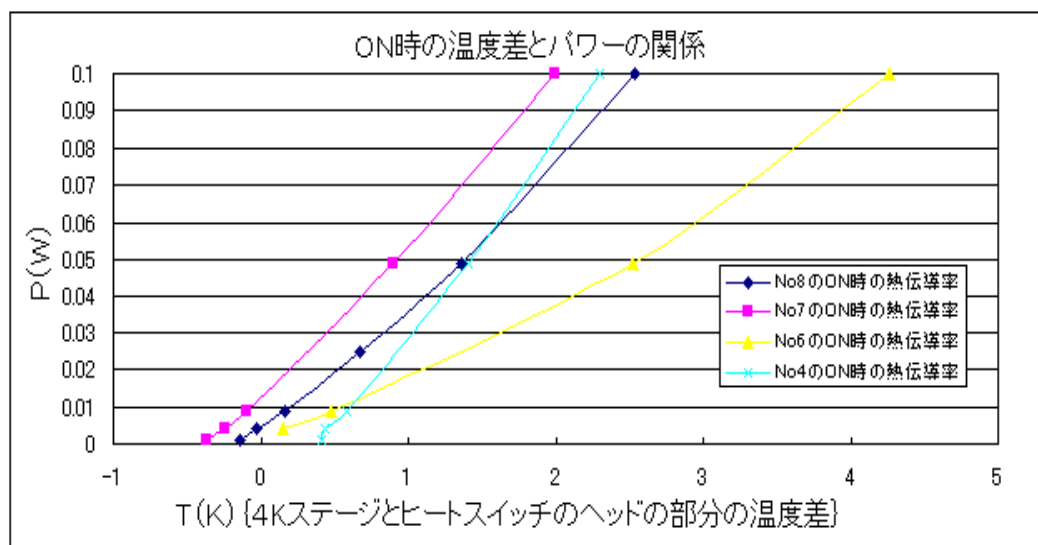
ステレンスの熱伝導率 $0.0015[\text{W}/\text{cmK}]$

No.6 の熱伝導率が $0.0016[\text{W}/\text{cmK}]$

より No.6 は、正常に OFF ができてることが測定から判った。
No.4 と No.5 は、ON 時と OFF 時の間の値より、熱接触が考えられ実際に分解した結果、銅とステレンスが接触して熱接触があった。

ヒートスイッチのガス詰

No.4 と No.5 のヒートスイッチの修理をした。手順としては、
 まず中身を分解するため銀口ウ付けされてた部分を溶かし分解する。
 熱接触していた部分を取り除く
 銅板の幅 0.1mm の管を入れて銀口ウ付けしながら銅版を抜く
 ことで真空層の幅 0.1mm の幅を作る。
 ヒートスイッチを真空に引きながらベーキングする。
 1 気圧のヘリウムを流し、ヒートスイッチを液体ヘリウムの中
 につけて活性炭に吸着させる。
 封じ切りをする (ガスが出てこないようにする)。
 以上のことを行い修理した結果 No4 と No5 を修理することに成功した。



共同測定者岡庭氏

3.4 0.3K 冷却システム

実際に 0.3K の温度を作るのにヒートスイッチがどのように使われるのか述べる。図のような装置が 0.3K 冷凍機である。

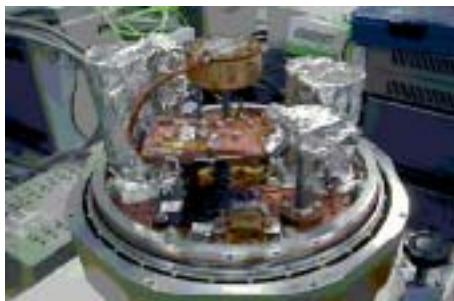


図 3.4: 0.3K 冷凍機評価

原理としては、 ^4He と ^3He を、真空引き（クライオポンピング）にすることで、温度を下げる方法である。ヒートスイッチの活性炭の吸着による温度コントロールと活性炭ポット（ ^4He と ^3He が入っている）のヒーターによる温度コントロールの 2 つの温度をコントロールすることで ^4He と ^3He を液化させて 0.3K ヘッドを冷やす。

その温度のコントロールの方法は、活性炭ポットを暖めることで、0.3K ヘッドに液化した ^4He と ^3He を溜める。そしてヒートスイッチを ON にすることで、活性炭ポットを 4 K に戻す。

その結果急激に 0.3K ヘッドが真空中に引かれることで、0.3K の温度を作る。ここで、重要なことが自動制御である。

つまりこれらの温度コントロールは、電圧のかけ方で、全ての温度をコントロールできる点（ヒーターは全て抵抗であり電圧制御により温度制御ができる）である。従来からある機械式ヒートスイッチ（手で動かし熱接触を取る装置）ではなく、ガス型ヒートスイッチを採用したわけである。

0.3K オペレーション方法をまとめると

まず、すべてのヒートスイッチを ON にして、すべて 4K の温度にする。

その後、すべてのヒートスイッチを OFF にする。

^4He の活性炭ポットを暖めて、0.3K ヘッドに液化した ^4He を溜める。

^4He の活性炭ポットを暖めずヒートスイッチを ON にして 4K にする。

0.3 K ヘッドにあった液化した ^4He が活性炭ポンプへ。

^3He の活性炭ポットを暖めて、0.3 K ヘッドに液化した ^3He を溜める。

^3He の活性炭ポットを暖めずヒートスイッチを ON にして 4K にする。

0.3K ヘッドにあった液化した ^3He が活性炭ポンプへ。

以上のオペレーションを実行することで 0.3K の温度を作る。実際に ^4He と ^3He が液化するための温度（活性炭ポット）を、図で示すと以下のような条件で 0.3K オ

ペレーションができる。 また、0.3K ヘッドから 0.3K ステージ（実際にボロメー

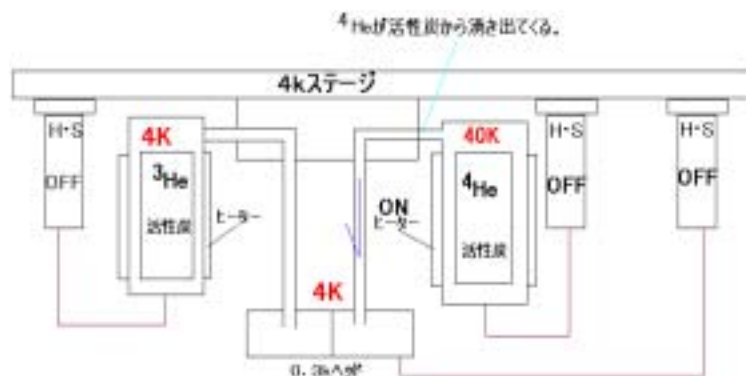


図 3.5: 0.3K オペレーション の状態

タ素子や光学系素子が搭載してある場所)に温度を伝える(銅ストラップ)ことが必要である。4 K ステージと熱が切れてる必要があり、今まで、述べてきたヒートスイッチの性能より、もっと高い性能をもたせることが持ち時間を長くさせることと温度を下げることにつながる(4 K からの熱の出入りを減らすことで、温度が下がる)。

1.5 倍ヒートスイッチを評価し搭載している。その熱伝導率のパラメータは以下のようになっている。

表 3.2: 1.5 倍ヒートスイッチの評価

ON時までの時定数	3 分
OFF時までの時定数	5 分
ON時の 熱伝導率 (1 K 上昇させるのに必要なパワー) [mW/K]	36
式 [mW/K]	$= 0.6T + 35.4$
OFF時の 熱伝導率 (1K 上昇させるのに必要なパワー) [μ W/K]	12.6
式 [μ W/K]	$= 5.1T + 7.5$

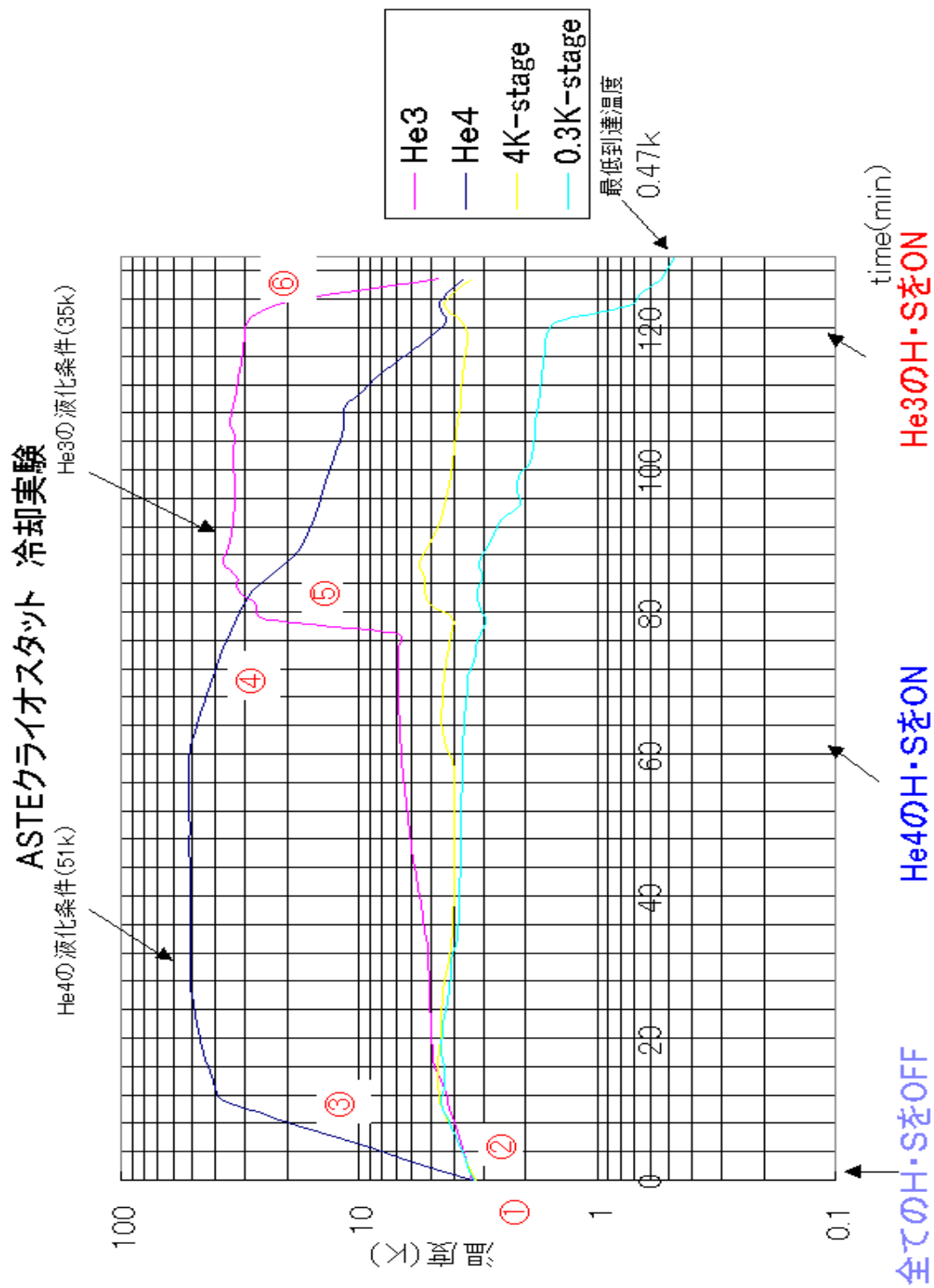


図 3.6: 0.3k オペレーション

第4章 光学系

次にボロメータの感度を上げるためには、いかにロスなくエネルギーを伝えれるか、またボロメータで、測定すべき波長帯以外の波長帯をいかにカットすることができるかが重要になってくる。そこで光学系について考える必要がある。光学系の問題点は

1. 非点収差をなくすこと 丸いものを丸く見えるようにする
2. ビームのロスを減らすこと 天体からのエネルギーをロスなく伝えること
3. サイドロープ（光の漏れ）を減らすこと
4. どれだけ有効にビームが使われているか ビームの効率を求める

この課題点に対して行ったことは

1. 光学系の設計パラメータの確認を行なう
焦点面光学系についてのシュミレーションを行なった（ZEMAX 使用）
2. 中心周波数とバンド幅を求める
バンドパスフィルターの透過率測定（フーリエ分光器を使用）
3. ロスの少ない光学系にする
光学フィルターの反射防止コーティングのシュミレーション（Essential Macleod 使用）とフィルター作成
4. 迷光対策（サイドロープを減らす）¹をする
斜入射に対するビームを防ぐバッフルとそれに塗る吸収体（サブミリ波帯での吸収がある物質）の製作と評価（第4章）
5. ビームの形状を測定をしてシステムの性能を求めるため
3色ボロメータクライオでのビームパターン、ビーム効率の測定（第5章）

焦点面光学系を考えることによってシュミレーションからのビームパターンの形状と実際に測定されたビーム形状の違いについて考察することができる。

目的としてビームパターン測定の実験（第5章1節）で非点収差が起きていたのので、その原因を追求するために焦点面光学系の設計を見直した。またボロメータの感度がブロードであることから、バンドパスフィルターが必要（3つの波長を選択することが出来る）であるので周波数と透過率の関係を測定したまた必要としない波長帯（可視、遠赤外領域）を通さないフィルターが必要である。

¹光の漏れによるものを防ぐ。フィルタなどを通らずに迷い込んできた光を光の光路に制限をつけるものである。

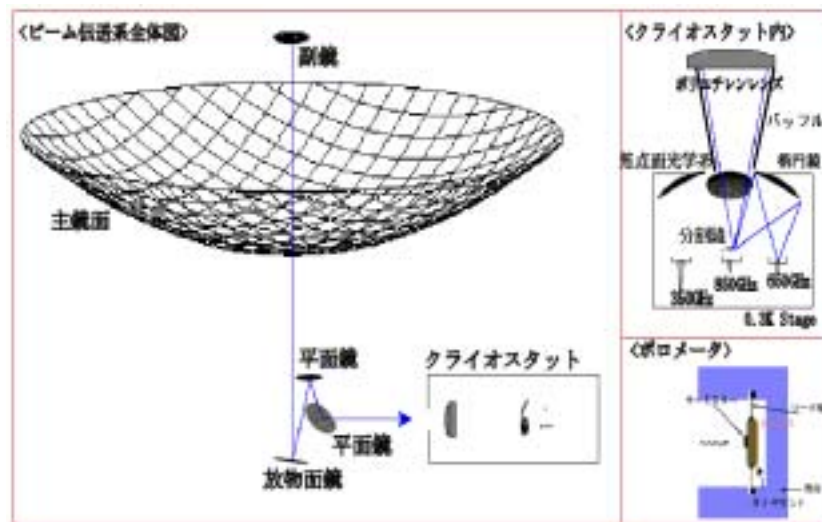


図 4.1: ビーム伝送系

透過してほしい波長帯のフィルター透過率を向上させるために AR (アンチ反射) コーティングをしたフィルターを作製した。

4.1 焦点面光学系

焦点面光学系について具体的にどのような光学系をしているか下の写真に示す。

主に行ったシミュレーションは図にある現状の設計パラメーターの見直しを行ったことと、0.3K ステージが傾いた時など色々な状況を考慮した場合のシミュレーションを行った。また簡単に焦点面光学系と光学的収差について説明する。

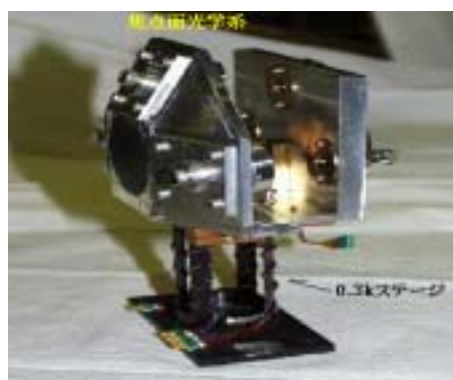


図 4.2: 焦点面光学系

4.1.1 焦点面分割鏡

焦点面分割鏡は、クライオスタットから入ってくる光が、ポリエチレンレンズによって、集光され ($F = 2$)² 焦点を結ぶところで、3つに分割する平面鏡がある (焦点面分割鏡)。実際に、分割した光は、光軸 (入射光) に対して 25 ° の方向に光の方向を変える。

実際に行ったシミュレーションでは、一つのビームを 25 ° の方向にビームを飛ばすことを行った。3つに分割された全てを考えるのではなく一つの系で考えた単純なモデルで考えている。

これは3方向とも同じ光学系なので、1つだけ考えれば良いと判断しシミュレーションを行った。

表 4.1: 光学系の設計パラメータ

光学系パラメータ	焦点位置 (mm)	ビームのはねる角度
ポリエチレンレンズから焦点面分割鏡	204.8	25
焦点面分割鏡から楕円鏡まで	37.51	0
楕円鏡からボロメータまで	34	25

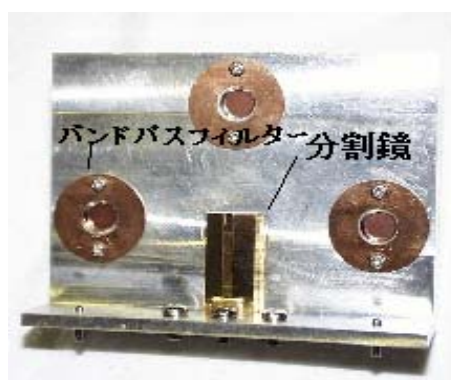


図 4.3: 焦点面分割鏡

4.1.2 楕円鏡

この鏡は、以下のパラメータによって形状が決まる鏡である。
楕円には焦点が二つありそれを利用した光学系である。

²F 付きビームとは、焦点距離 f とレンズの開口の大きさから決まる値である。焦点距離 (f) \div レンズの口径 (D) で求められる。

この設計パラメータと実際にシミュレーションから出てきたパラメータについて考察した結果、設計パラメータに間違いがあることがわかった。どのような考察をしたか後で述べる。現状の光学系パラメータでのビーム形状（シミュレーション）と比較することで、よりわかりやすく説明する。

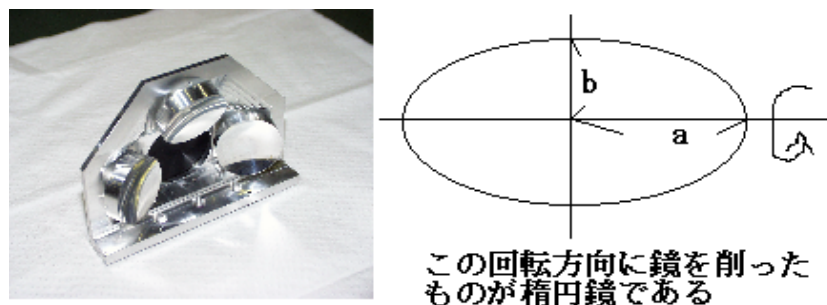


図 4.4: 楕円鏡

表 4.2: 楕円鏡 パラメータ

a = 光軸方向の径	b = 光軸に垂直な方向の径	r = 焦点位置 (楕円)
c x = 曲率	c y = 曲率	R x = 楕円半径 (x 軸)
R y = 楕円半径 (y 軸)	k x = コニック (曲率二次曲面)	k y = コニック (曲率二次曲面)
z = 楕円鏡の形状の表面の関数		

$$R = \frac{b^2}{a} \quad (4.1)$$

$$c = \frac{1}{R} \quad (4.2)$$

$$k = -e^2 = -\frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (4.3)$$

$$r = \sqrt{a^2 - b^2} \quad (4.4)$$

このパラメータを用いて三次元で楕円鏡を考えると

$$Z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x)c_x^2 x^2 - (1 + k_y)c_y^2 y^2}} \quad (4.5)$$

と表せる。

レンズの収差について

レンズや鏡を扱う時

$$\sin\theta = \theta \quad \text{および} \quad \cos\theta = 1 \quad (4.6)$$

とおくのがガウス領域での幾何光学である。この場合光線がほとんど軸と平行の場合に限られてしまいレンズの焦点距離に対して、その大きさが極めて小さいことになるから、レンズは暗くて不便な設計になる。口径比（レンズの焦点距離と口径比）の小さいレンズを用いるためには、近軸光線以外を考えなければならない。次の近似までを使うと

すなわち

$$\sin\theta = \theta - \frac{\theta^3}{6} \quad \text{および} \quad \cos\theta = 1 - \frac{\theta^2}{2} \quad (4.7)$$

までとるとガウス領域のように像は結ばない。これによるずれはザイデル領域（ザイデルの研究より）と呼ばれ、これが5つに分類されてるのでザイデルの5収差と呼ばれている。

球面収差 光軸上の点から出た光がレンズを通り焦点を結ぶ際レンズが大きいと焦点に集まらず錯乱円になる。他の収差は、光軸上では0となるが、この球面収差は光軸上でも存在する。

コマ収差 光軸以外から光が出るとき、レンズの中央を通る光と縁を通る光とで焦点の位置が異なる時に起こる収差である。光軸以外の点の像は彗星が尾を引いたようになる。

非点収差 光軸以外の方向の光線が一点に集まらず、レンズの円周に平行な方向の直線状に集まり次に軸を含む半径上の直線に集まるために起こる。楕円鏡の場合、焦点が二つあるため、一つの焦点が結ぶ点の位置ともう一つの焦点が結ぶ位置が異なるため、像が点にならずに楕円の形になる。

像面の湾曲 光軸に対して垂直な平面から出る光の像が平面上に出来ず、湾曲した面上にできる収差。

歪曲 物体の視野によって倍率が異なる時に、直線の像は曲線となり、像の形は元の物体と異なる時の収差である。

4.1.3 シミュレーション結果と考察

シミュレーションを行う理由は、ビームパターンの実験結果（後述）が非点収差していることが分かりその原因追求のために行った。

表 4.3: 12 月の焦点面光学系のパラメータ@楕円鏡

楕円鏡					
現状	設計値		x 方向		y 方向
r	15.65	r	15.65	r	0
a	34	a	34	a	30.184
b	30.184	b	30.184	b	30.184
R	26.796	c x	0.0261	c y	0.0331
K	0.2688	R x	38.298	R y	30.184
Z	3.3877	K	0.2688	K	0
		Z	3.3877	Z	0

今の光学系の焦点面設計パラメータは、次のようになる。この設計の楕円鏡を使うと、焦点を二つ持つことになり、非点収差が起こることが ZEMAX でのシミュレーションを行った結果である。ZEMAX はレンズ設計や光学系設計に用いるソフトで、spot 図は、実際に焦点面でどのようなビーム形状をしているかシミュレーションする。また焦点からずれた位置で、どのような収差が起こるか評価した。

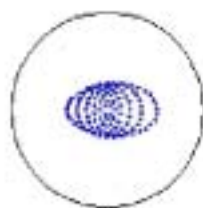


図 4.5: ボロメータでの spot 図



図 4.6: 焦点からずれたところの spot 図

ここから明らかに焦点を二つ持っていて、ビーム形状 (spot 図)³が、楕円になっていることが、確認できる。(後で記述する実験結果と似てる結果である)。

この楕円鏡は一番初めは加工ミスで円鏡であった。このときのスポット図を表すと次のようになり、全然焦点を結ばず、光学系として破綻していたことがわかった。



図 4.7: 円鏡での spot 図

そこで設計に間違いがないか確かめるために楕円鏡の設計パラメータを確認と計算を行った。単純に設計値の計算で楕円の長軸と短軸の関係が

$$b = a \cos 25 = 34 \cos 25 = 30.814 \quad (4.8)$$

とすべきであるが、実際の楕円鏡は値を $b=30.184$ としてあったため焦点で、非点収差していると考え ZEMAX 上でもう一度、焦点を結ぶように楕円鏡のパラメータを計算した。

³spot 図の青いところが実際に焦点で結ぶ光の形 (ビーム形状) である。波長の長いサブミリ波は、ガウシアンビームになっていて、黒い丸はガウシアン分布での $1/e$ となる範囲を示している。(array disk) 基本的にはこの中にビームが収まっていれば問題はない。

その結果 となった。

表 4.4: ZEMAX で焦点を結ぶように設計を変えたとき@チリで使用

楕円鏡					
修正版	設計値		x 方向		y 方向
r	14.37	r	14.37	r	0
a	34	a	34	a	30.814
b	30.814	b	30.814	b	30.814
R	37.515	c x	0.0267	c y	0.0325
K	0.2175	R x	37.515	R y	30.814
Z	2.8875	K	0.2175	K	0
		Z	2.8875	Z	0



図 4.8: 再設計時のボロメータでの spot 図



図 4.9: 再設計時の焦点からずれたところの spot 図

焦点面でのビームのサイズは次のようになる。

表 4.5: ビーム形状とサイズ

ch	350 μ		450 μ		850 μ	
状態	現状	修正版	現状	修正版	現状	修正版
楕円鏡でのビームの大きさ（半径）	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
分割鏡でのビームの大きさ	9.64	9.66	9.64	9.66	9.64	9.67
焦点面でのビームの大きさ	0.36	0.14	0.36	0.15	0.36	0.15
形状	横長	丸	横長	丸	横長	丸

ステージが全体として光軸方向に 0.04 度の歪みがあり、それを考慮した場合のシミュレーション結果を表にした。

表 4.6: 0.3K ステージが光軸方向に 0.04 度ゆがんでいる時のビームパターン

0.04 度の歪みがある時	350 μ		450 μ		850 μ	
状態	現状	修正版	現状	修正版	現状	修正版
楕円鏡でのビームの大きさ（半径）	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
分割鏡でのビームの大きさ	9.64	9.66	9.64	9.66	9.64	9.67
焦点面でのビームの大きさ	0.37	0.16	0.37	0.16	0.37	0.16
形状	横長	丸	横長	丸	横長	丸

修正された場合のビーム形状を見ると非点収差はなく、この歪みは効率には影響を与えないことがわかった。（ただし楕円鏡とボロメータが平行に位置してないときは非点収差になる。）

今の設計での光路を示すと次のようになる。

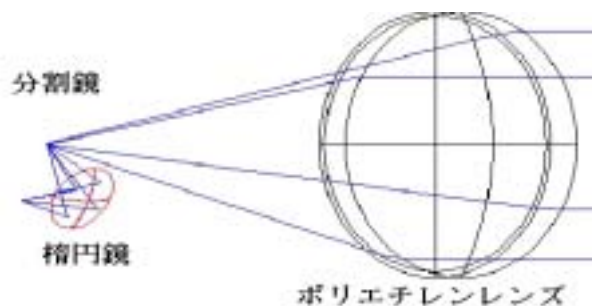


図 4.10: シミュレーションでの光路

ZEMAX のシミュレーション結果として

楕円鏡の設計パラメータに間違いがあることが分かり、それを修正することで非点収差がなくなることが分かった。パラメータに間違いがあることが分かった。このシミュレーション結果に基づいたビームパターン、効率の実験をすることができない状態で、実験を終了せざるを得なかったが現状との比較の元では、実験を行えば非点収差がなくなると考える。現状のビーム形状が、実験とシミュレーションとで似ている結果からしかいえない。実験結果については、次章でまとめるのでその時にもう一度議論する。(5.2 で実験結果と比較する)

4.2 フーリエ分光器

本実験で行ったAR - コートしたフィルターやバンドパスフィルターの透過率測定などをするのに、フーリエ分光器という分光器を使用した。フーリエ分光器 (FTS) は、マーチンパブレット型というものである。基本的には、マイケルソン干渉計と変わらないが、ビームスプリッターのところに45度偏向板がついている点が特徴的である。基本的な分光方法は変わらず、あるひとつの状態にあるビームのみ取り出してフーリエ分光している。原理は、マイケルソン干渉計の干渉を利用している。実際にフーリエ変換と対応して、簡単に原理を説明する。[8][9]



図 4.11: FTS 装置

4.2.1 フーリエ変換

フーリエ変換分光法はフーリエ変換を基本としている。今基本周期を T とする周期関数 $f(t)$ があるとする。 $f(t)$ は

$$f(t) = f(t \pm nT) \quad n : \text{自然数} \quad (4.9)$$

は、どんな形であれ周期関数 \cos と \sin であらわすことができる。

$$f(t) = \frac{a_0}{T} + \frac{2}{T} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t) \quad (4.10)$$

$$\omega_n t = \frac{2\pi}{T} n \quad (4.11)$$

ここで係数 a_n 、 b_n はフーリエ係数と呼ばれ、

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos \omega_n t dt \quad (4.12)$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin \omega_n t dt \quad (4.13)$$

の関係がある。また、これらは、オイラーの関係式を用いることで一般的に一つの式で表せる。

$$f(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp(i\omega_n t) \quad (4.14)$$

$$c_n = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(i\omega_n t) dt \quad (4.15)$$

フーリエ変換の積分区間を広げることによりフーリエ係数 c_n は連続関数 $F(\omega)$ に置き換えられるので、フーリエ変換は、

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (4.16)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(i\omega t) dt \quad (4.17)$$

4.2.2 フーリエ変換を用いた分光の原理

図のようなマイケルソン干渉計があったとする。マイケルソン干渉計とは、ビームスプリッターで分けられた二つの光に光路差をつけ合成した時にできる干渉を利用した分光方法である。光路差をつけるために可動鏡を使用することが一般的である。

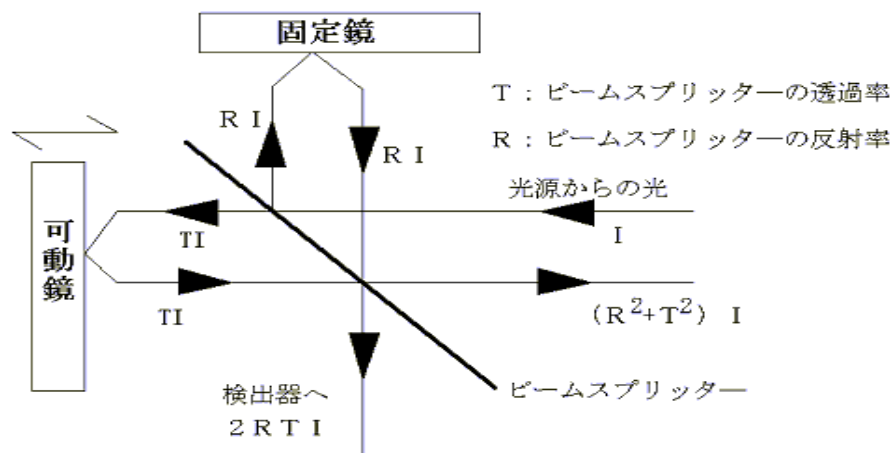


図 4.12: FTS の原理

可動鏡の位置と光の強度変化から、フーリエ変換を行ない目的のスペクトルを得ることができる。今マイケルソン干渉計に強度 I の単色光が入射し、ビームスプリッターのこの波長に関する光の透過率と反射率がそれぞれ T と R とすると検出器には $2RTI$ の強度の光が入射することになる。

可動鏡が動くとき二つの光の位相差を σ とおくと、検出器に入射する光の強度 I_{obs} は

$$I_{obs} = 2RTI(1 + \cos\sigma) \quad (4.18)$$

の形で強度変化が起こる。光路差を x とおき、単色光の波数を k_0 とすると位相差は

$$\sigma = 2\pi x k_0 \quad (4.19)$$

となる。今理想的なビームスプリッタ（吸収が無いもの）を考える。

$$I_{obs} = \frac{4RTI}{2}(1 + \cos 2\pi x k_0) \quad (4.20)$$

ここで、 $4RT$ はビームスプリット効率と呼ばれ、1に近い方がビームスプリッタとして望ましい。ここで簡単にするために、 $R = T = \frac{1}{2}$ とする。更に多色光が入射している時、出力は波数に幅があるので、それを波数幅とすると Δk をもつ構成スペクトル要素に対する和となる。すなわち

$$I_{obs} = \sum_i \frac{I_{k_i}}{2}(1 + \cos 2\pi x k_i) \Delta k \quad (4.21)$$

従ってスペクトル強度分布 $B(k)$ に対して書き直すと

$$I_{obs}(x) = \int_{k_1}^{k_2} \frac{B(k)}{2}(1 + \cos 2\pi x k) dk \quad (4.22)$$

と書ける。光路差がない時、すなわち $x=0$ の時

$$I_{obs}(0) = \int_{k_1}^{k_2} B(k) dk \quad (4.23)$$

常に位相差に関係なく出力されてしまう成分 I_0 を消去するため式 (4.22) の第1項の分を取り除く

$$I_0 = \int_{k_1}^{k_2} \frac{B(k)}{2} dk = \frac{I_{obs}(0)}{2} \quad (4.24)$$

よって、これは、常に出力されてしまう成分なので、式 (4.22) から式 (4.24) を引いた値が干渉出力波形は、

$$I_{obs}(x) = \int_{k_1}^{k_2} \frac{B(k)}{2} \cos 2\pi x k dk \quad (4.25)$$

これを全積分範囲に広げ、数学的な取り扱いをするため物理的には k は正だが、負の波数 k を考えたほうが、便利であるので、

$$I_{obs}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B(k)}{2} \cos 2\pi x k dk \quad (4.26)$$

とする。これをインターフェログラムという。⁴ 今スペクトル $B(k)$ を偶関数

⁴従来の分散型による分光器では、直接 $B(k)$ を測定している。フーリエ分光器は出力として得られるのはインターフェログラムである。

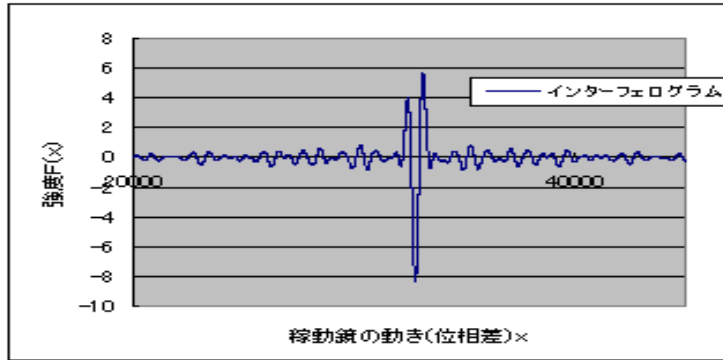


図 4.13: インターフェログラム

$B_{even}(k)$ と奇関数 $B_{odd}(k)$ の和とすると

$$I_{obs}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_{even}(k) + B_{odd}(k)}{2} \cos 2\pi x k dk \quad (4.27)$$

$$I_{obs}(x) = \int_0^{\infty} B_{even}(k) \cos 2\pi x k dk \quad (4.28)$$

実際には、インターフェログラムが、非対称となるために負の波数 k を考慮できなくなるので、複素数表示を用いて表すことが一般的である。

$$I_{obs}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(k) e^{-2\pi x k i} dk \quad (4.29)$$

$$B(k) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{obs}(x) e^{2\pi x k i} dx \quad (4.30)$$

フーリエ分光器は、分散型の分光素子（プリズムや回折格子）を用いた分光法よりもはるかに入射光の利用率高く高い光伝送能⁵を持っている。強い光源や、分散素子が得にくい遠赤外やサブミリ領域では、フーリエ分光器が不可欠な測定手段となっている。

4.2.3 分解能とアポタイゼーション関数について

フーリエ分光器の設定として、重要なパラメータに、スペクトル分解、アポタイゼーション関数、スキャンスピードなどがある。スペクトル分解とスキャンスピードは、可動鏡のスピードと動く距離に依存したものである。アポダイゼーション関数とは、フーリエ変換するとき、積分範囲は無限までとすることはできないことから、インターフェログラムにあう重み関数的なものとして考える関数である

$$B(k) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{obs}(x) e^{2\pi x k i} dx \quad (4.31)$$

⁵ 分光器の明るさを表す指標の一つで、分光器の開口面積と受信光立体角の積で定義される分光装置の不変量となる。

であるが、実際には、光路差は有限である。従って実際に得られるものは、真のスペクトル $B(k)$ ではなく、ある装置関数がかかった $B'(k)$ というものであることに注意する必要がある。すなわち

$$\begin{aligned}
 B'(k) &= \int_{-L}^L I_{obs}(x) e^{2\pi x k i} dx \\
 &= \int_{-L}^L I_{obs}(x) A(x) e^{2\pi x k i} dx \\
 &= \int_0^\infty I_{obs}(x) A(x) e^{2\pi x k i} dx \\
 &= B(k) * F(k)
 \end{aligned} \tag{4.32}$$

ここで、 $A(x)$ は光路差の窓関数と呼ばれるものである。

$$\begin{aligned}
 A(x) = \text{rect}\left(\frac{x}{2L}\right), \quad \text{rect}(x) &= 1 \quad -\frac{1}{2} < x < \frac{1}{2} \\
 \text{rect}(x) &= 0 \quad -\frac{1}{2} > x, x > \frac{1}{2}
 \end{aligned} \tag{4.33}$$

である。また、 $F(k)$ は、 $A(x)$ をフーリエ変換したもので、装置関数に対応する。

$$F(k) = 2L \text{sinc}(2\pi k L) \quad (\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}) \tag{4.34}$$

得られるスペクトルは真のスペクトルと装置関数のコンボリューションであることが分かる。よって、線幅が無限小の輝線スペクトルは線幅 $\frac{1}{2L}$ に広がってしまう。線スペクトルに対応したインターフェログラムは長く裾野を引いてしまう。窓関数を式 (4.33) のような矩形にしてみると、サイドローブ (副極大) が現れる。このようなノイズ成分が現れる時アポタイゼーション関数を用いる。分解能を犠牲にし、サイドローブを減少させ、スペクトルをスムーズにする。窓関数 $A(x)$ を適当な関数に変えることである。サイドローブを小さくさせ、分解能を低下させない関数が望ましい。本実験では $A(x) = \cos(x)$ で行なった。フーリエ分光法では、スペクトル分解⁶ δk を $\delta k = \frac{\eta}{L}$ で定義する。 η は、使用するアポタイゼーション関数で変わる。分散型の分光器のスペクトル分解はスリット幅で決まるがフーリエ分光法ではアポタイゼーション関数と可動鏡の光路差で決まる。

⁶理論分解である。すなわち走査した光路差 = 可動鏡の動く距離で決まる。しかし実際は、光路差 0 を中心に対照的になるので、同じ情報を含んでいる。物理的な分解はこの 2 倍で $\frac{1}{L}$ になる。

4.2.4 マーチンパレット型フーリエ分光器

実際に使用したフーリエ分光器は、マーチンパレット型である。マイケルソン型との違いはビームスプリッター⁷とポラライザー⁸とアナライザー⁹を用いていることである。ビームスプリッター、ポラライザーとアナライザーには同一のワイヤーグリットを用いているワイヤーグリットはワイヤーのピッチを g とする時 $\lambda \geq 2g$ の波長で使用が出来る。次のような光学系で表せる この光学系に角振動数

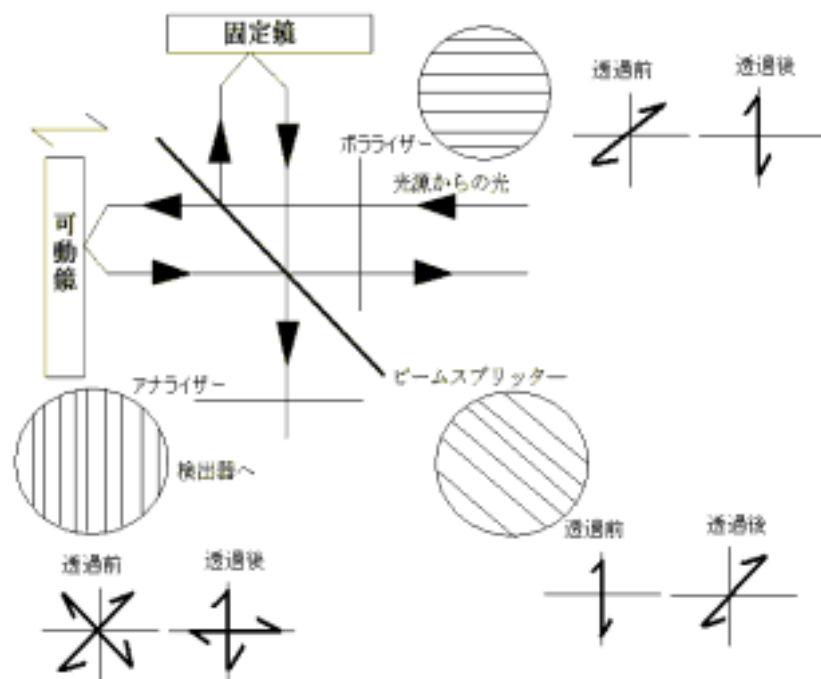


図 4.14: マーチンパレット型フーリエ分光器

ω の単色光が入射するときその光を

$$\vec{E} = (\alpha + \beta) a \cos(\omega t) \vec{I} = a^2 \quad (4.35)$$

とする。ここで初めにポラライザーで、直線偏向されるのでそれは

$$\vec{E}_0 = \vec{a} \beta \cos(\omega t) \quad (4.36)$$

と表せ、45 度に傾いたビームスプリッターで 45 度の偏向板でビームが分けられるので

$$\begin{aligned} \vec{E}_a &= a \beta \cos(\omega t) \cdot (\cos 45, \sin 45) \\ &= \frac{a \cos(\omega t) \vec{t}}{\sqrt{2}} + \frac{a \cos(\omega t) \vec{n}}{\sqrt{2}} \end{aligned} \quad (4.37)$$

⁷直線偏光を偏光方向に対して+45 度、-45 度に分割する

⁸自然光を直線偏光にするもの

⁹分割された 2 つの直線偏光を再び合成するもの

と表せる。また可動鏡と固定鏡で 90 度回転されてくる。それがもう一度ビームスプリッターで合成されるので

$$\begin{aligned}\vec{E}_b &= \frac{a \cos(\omega t + \sigma_1) \vec{n}}{\sqrt{2}} + \frac{a \cos(\omega t + \sigma_2) \vec{t}}{\sqrt{2}} \cdot (\cos 45, \sin 45) \\ &= \frac{a \cos(\omega t + \sigma_1) \vec{n}}{2} + \frac{a \cos(\omega t + \sigma_2) \vec{t}}{2}\end{aligned}\quad (4.38)$$

となる。この成分がアナライザーで x 方向と y 方向に分けられるので透過側の方は

$$|\vec{E}_t| = \vec{E}_b \cdot \vec{\alpha} = \frac{a}{2} [\cos(\omega t + \sigma_1) + \cos(\omega t + \sigma_2)] \quad (4.39)$$

$$= a \cos(\omega t + \bar{\sigma}) \cos\left(\frac{\sigma}{2}\right) \quad (4.40)$$

反射側のほうは

$$|\vec{E}_n| = \vec{E}_b \cdot \vec{\beta} = a \sin(\omega t - \bar{\sigma}) \sin\left(\frac{\sigma}{2}\right) \quad (4.41)$$

$$\text{ここで } \bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \sigma = \sigma_1 - \sigma_2 = 2\pi kx$$

となって光の強度は透過側と反射側で

$$I_t = \langle |E_t|^2 \rangle = \frac{a^2}{4} (1 + \cos(2\pi kx)) I_n = \langle |E_n|^2 \rangle = \frac{a^2}{4} (1 - \cos(2\pi kx)) \quad (4.42)$$

となる。これを多色光にすると式 (4.21) と同じ式になりあとは、フーリエ変換することでスペクトルを得ることができる。このマーチパブレット型はマイケルソン型で使われるビームスプリッターが波長に依存することから目的のスペクトルが得られにくいためワイヤーグリッドやマイラーを使い目的の波長帯で使いやすくするメリットがある。[8]

4.3 フーリエ分光器を用いた測定から分かることの原理

フーリエ分光器を使用し、透過率測定をすることが主にすることだが、反射防止膜 (AR-コーティング) の設計においてその透過率測定の結果から屈折率の測定、吸収率の測定を行った。そこで、AR コーティングができる原理の説明をする。

4.3.1 薄膜中の光の干渉を利用した屈折率を求める方法

薄膜で平行平板の透過スペクトルには、多くの干渉フリンジを見られる。この隣り合った干渉フリンジから屈折率を求めることが出来る。

今ここで、フリンジが見れる波長を λ_1 、 λ_2 とし、物質の厚さ、 m を整数とする時、

$$2nd = m\lambda_1 \quad (4.43)$$

$$2nd = (m + 1)\lambda_2 \quad (4.44)$$

の隣り合う干渉フリンジがあるのでこの二式から m を消去すると

$$2nd = \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)^{-1} \quad (4.45)$$

また、波数で考えると

$$2nd = \frac{2\pi}{k_2 - k_1} \quad (4.46)$$

となり、屈折率を求めることが出来る。

また、物質には吸収があるのでそれを考慮しなくては行けないので、吸収率の求め方として、波長に依存する透過率を T_i 、吸収係数 α 、厚みを d とする時

光が吸収性のある物質の薄い層を通る時に吸収される光量は、入射光量と物質の吸収係数の積に比例する。

よって、厚みのある吸収性のある物質を通過する光の強度は、以下の Beer の法則で表現されるように、厚みに関して指数関数的に減少する。

$$T_i = \exp(-\alpha d) \quad (4.47)$$

吸収係数 α が波長に依存するので、 T_i も同様に依存する。

フィルター特性の別の表し方として、透過光量ではなく、減光量で表す方法がある。透過率の αd を、光学厚さ（オパシティ）という。

複数のフィルターの重ね合わせせた透過率は、個々のフィルターの透過率の積 $T_1 \times T_2 \times T_3$ になる。透過率が積算的であるので、何桁にも範囲が広がりがねないので、対数表現で透過率を表す方が便利である。

光学濃度は、不透明度の 10 を底とする対数で、次式で与えられる。

$$D = 10 \log(1/T) \quad [dB] \quad (4.48)$$

フィルターでの減光量が大きいき、光学濃度の値が大きくなる。ここで重要な点は、光学濃度は加算的であるということである。

フィルターを複数枚重ねた場合のトータルの光学濃度は、個別の光学濃度の和になる。[4]

4.3.2 単層での反射防止膜の原理

まず単純なマックスウェル方程式から導き出される反射と透過に関する振幅の係数はつぎのようになる。

今媒質が図のようにあり屈折率が $n_0 < n_1 < n_2$ で、膜厚（屈折 $n_1 d$ の媒質）が d の膜があるとする。

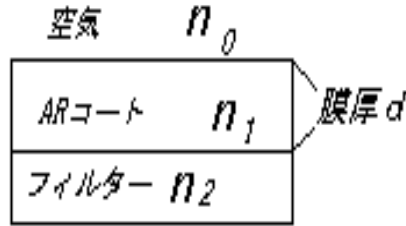


図 4.15: 単層での AR コート

また、この薄膜は、平行平板であるとする時
反射 r 及び透過 t の光の振幅は $n_0 \Rightarrow n_1$ では

$$r_0 = \frac{n_0 \cos \theta_0 - n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1} \quad (4.49)$$

$$t_0 = \frac{2n_0 \cos \theta_0}{n_1 \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_1} \quad (4.50)$$

さらに、全体の反射と透過に関する振幅の係数は光学的な膜厚（ $n_1 d$ ）によって変化するので

干渉効果による位相差 は

$$\delta = \frac{4\pi n_1 d \cos \theta_1}{\lambda} \quad (4.51)$$

また、平板によって反射された波の複素振幅と透過された波の複素振幅は振幅を A^i とすると

$$rA^i, tt'r'A^i(\exp i\delta), \dots, tt'r'^{2p-3}A^i(\exp i(p-1)\delta) \quad (4.52)$$

$$ttA^r, tt'r'^2A^i(\exp i\delta), \dots, tt'r'^{2(p-1)}A^i(\exp i(p-1)\delta) \quad (4.53)$$

よって、この系全体の反射係数 r と透過係数 t は $n_1 \Rightarrow n_2$ での反射係数を r_2 と透過係数 t_2 とすると

$$r = \frac{r_0 + r_2 \exp(i\delta)}{1 + r_0 r_2 \exp(i\delta)} \quad (4.54)$$

$$t = \frac{t_0 t_2 \exp(i\delta)}{1 + r_0 r_2 \exp(i\delta)} \quad (4.55)$$

よって、反射率 R と透過率 T は

$$R = |r|^2 = \frac{r_0^2 + r_2^2 + 2r_0r_2\cos 2\delta}{1 + r_0^2 + r_2^2 + 2r_0r_2\cos 2\delta} \quad (4.56)$$

$$T = |t|^2 = \frac{t_0^2 t_2^2 \exp(2i\delta)}{1 + r_0^2 + r_2^2 + 2r_0r_2\cos 2\delta} \quad (4.57)$$

ここで、垂直入射 ($\theta_0 = \theta_1 = \theta_2 = 0$) の時の反射率が 0 になるための膜厚を求めると

$$n_1 d = (2m + 1) \frac{\lambda}{4} \quad (m = 0, 1, 3,) \quad \text{位相条件} \quad (4.58)$$

で

$$R = \left(\frac{(n_0 n_2 - n_1^2)}{(n_0 n_2 + n_1^2)} \right)^2 \quad (4.59)$$

ただし $n_0 < n_1 < n_2$ である。よって、

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad \text{振幅条件} \quad (4.60)$$

である。

反射防止コートを行なう際にこれに吸収を考慮し、更に二層による反射防止コーティングを使った。

シミュレーションに使った Essential Macled のソフトは、吸収、二層による反射防止コーティングを考慮し、波長依存に対する透過率を計算してくれるソフトである。

ただし、諸定数については、それぞれ単体で屈折率、吸収率を求めシミュレーションに反映させた。[4]

4.4 フィルターについて

フィルターは 3 色ボロメータが広い周波数に渡って感度を持つため、必要としない周波数(可視光、遠赤外領域等)をカットし、必要とする周波数(350GHz, 650GHz, 850GHz)をできるだけロスなく(透過率が高い)通すことが必要となる。

より透過率を高くするために反射防止コート (AR) をしたフィルターを作製評価する目的がある。

このクライオに入っている AR - コートしたフィルターは、吉永フィルター、ブラックポリエチレンのフィルターがある。それぞれどの波長をカットするのか、それはどんな意味があるのか述べる。

1 吉永フィルター

光とイオン分極の結合の結果、エネルギーギャップが生じることがある。このエネルギー範囲の光は結晶中に入れず、強い反射を起こす。この反射を Reststrahlen

反射という。吉永フィルターはこの現象を利用しているフィルターである。イオン結晶が、赤外領域で高い反射率を持つ現象である。元となるフィルターの大部分は、ポリエチレンで、そこに数種類の結晶を混ぜて作成する。

(レシピについては Appendix を参照)

このフィルターは、サブミリ波領域で高性能なローパスフィルターとして使用されている。

AR-コートした吉永フィルターは、吉永フィルターの屈折率 n より小さい (\sqrt{n} 程度) の屈折率のポリエチレン (低密度) を、融着法によってフィルターにコーティングした。

2 ブラックポリエチレン

ポリエチレンに粉末状のブラックカーボンを混ぜたもので、サブミリ波から遠赤外にかけて、緩やかに吸収係数が増加するフィルターである。

近赤外と可視光を遮断するフィルターとしてよく使われる。

ボロメータは温度に敏感 (第三章参照) なので、赤外光の遮断はとても有効である。また、これらのフィルターは、ローパスフィルターで、 50 cm^{-1} 付近より長波長側をカットしてくれるフィルターで、そこでのボロメータの感度をなくす効果がある。また、クライオ自体の温度を下げる効果もある。

表 4.7: フィルターの測定値

屈折率	10 ~ 20 (cm^{-1})	20 ~ 30 (cm^{-1})	融点 ()
ブラックポリエチレン ($t=0.13\text{mm}$)	1.64	1.64	120 ~ 130
吉永フィルター (チリ用 $t=0.24\text{mm}$)	1.90	2.14	150
ZITEX ($t=0.1\text{mm}$)	1.26	1.26	328
低密度ポリエチレン ($t=0.075\text{mm}$)	1.55	1.55	130

測定値より EssentialMacled の光学系ソフトで、シミュレーションを行い 4.3.2 の原理から導いた (4.37) 式を用いて ($n_0 = 1$ 空気の屈折率) AR コートすべき物質を選んだ。また、サブミリ波帯での透過率を持ち、融点くっつける物質の融点が違うものを選択した。AR 吉永フィルターは低密度ポリエチレンを融着 1 (110 度で 0.1 t の力を全体にかけながら 5 分) 融着 2 (130 度で 1 t の力を全体にかけ 1 分) の二つの融着を行なって、2 つの物質を付けて、AR コートを行なった。実験室用で使ったフィルターは厚みがあり、融着が不完全だったため反射防止コートになっていなかった。また、吉永フィルターを作成する際ブラックカーボンの量が多すぎたため全体的に透過率が悪い状態になってしまった。一方でチリで使ったフィルターは、融着がうまくできている。そのため今回はこのフィルターを採用している。

表 4.8: 透過率測定結果

フィルターの名前	350GHz	650GHz	850 G H z
吉永 filter(t=0.24mm)	75	60	50
AR-吉永 fiter(t=0.37mm)	76	77	67
Black polyethylene(t=0.13mm)	85	95	85
AR-Blackpolyethylene(t=0.33mm)	96	96	94
ZITEX(t=0.1mm)	95	95	90
AR-吉永 fiter(実験室 t=0.40mm)	70	60	40

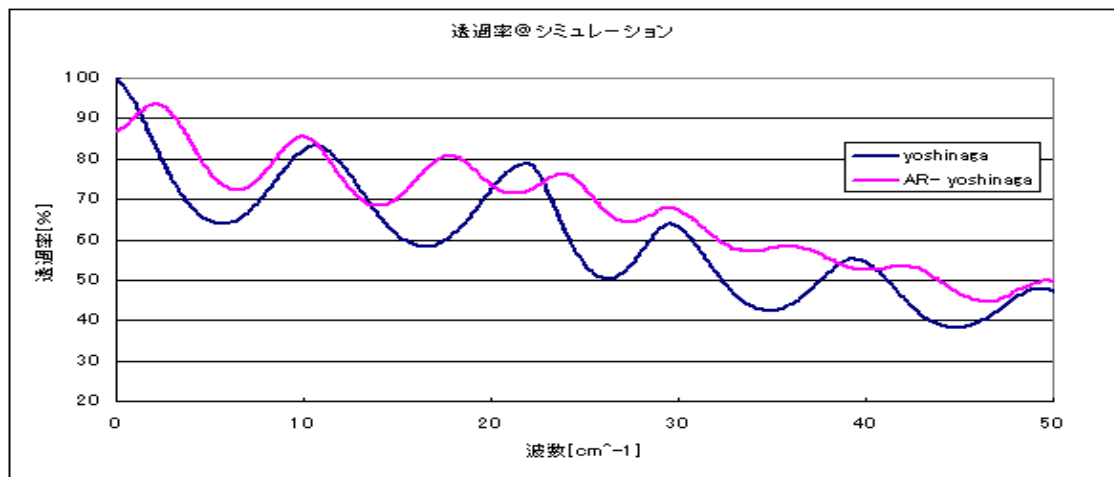


図 4.16: AR 吉永フィルター@シミュレーション

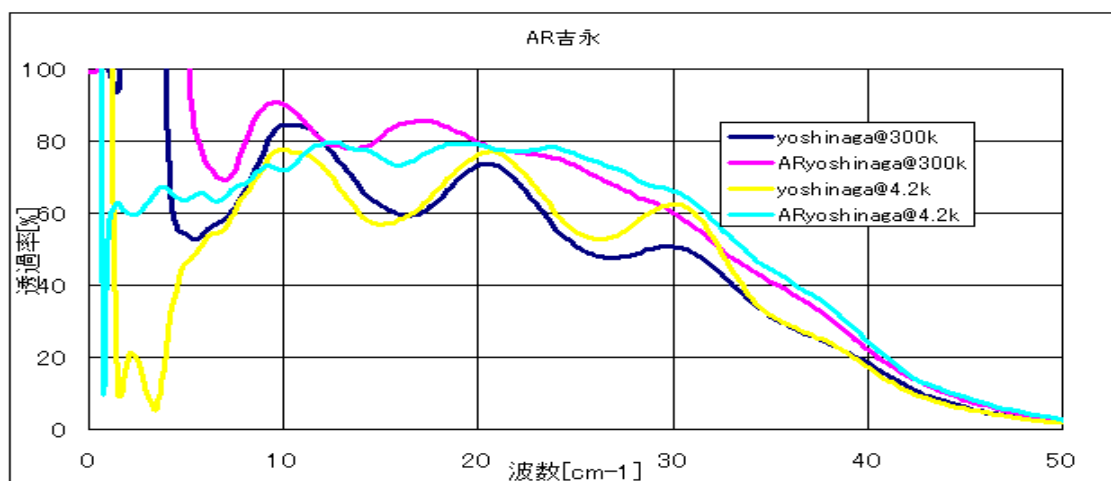


図 4.17: AR 吉永フィルター

吉永フィルター作成者小林氏

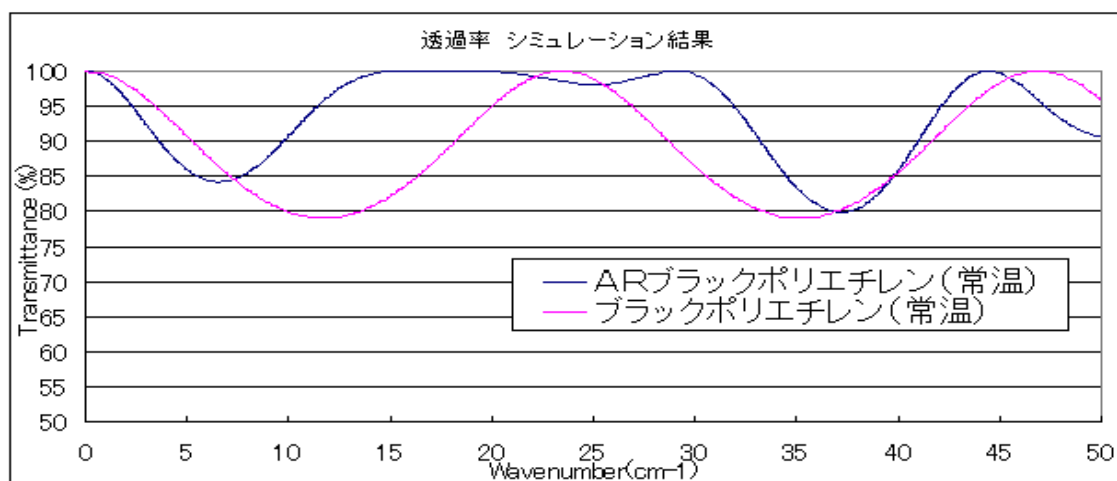


図 4.18: AR ブラックポリエチレン@シミュレーション

同様に AR ブラックポリエチレンは、ZITEX を融着 (126 度で 1 分) を行い 2 つの物質を付けて、AR コートを行なった。

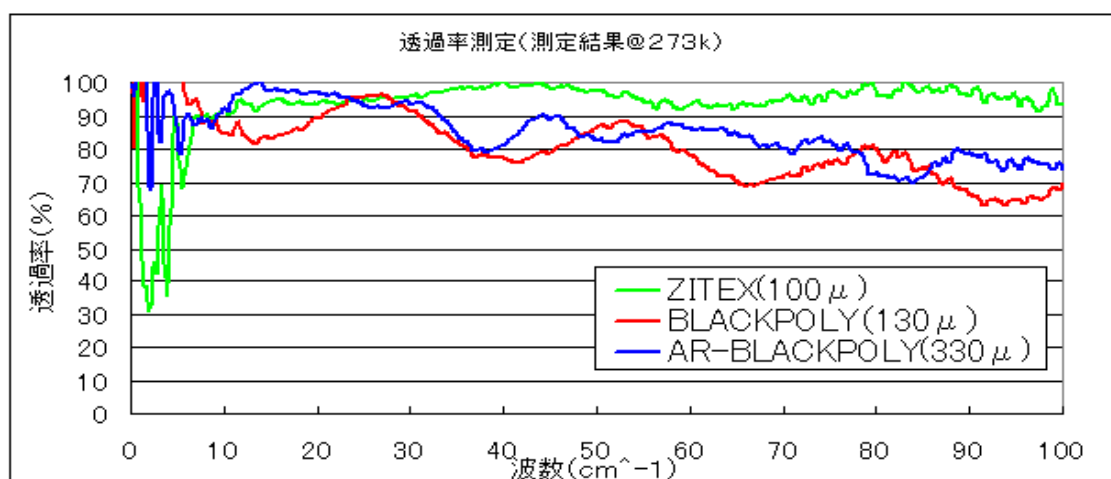


図 4.19: AR ブラックポリエチレン@測定

4.5 バンドパスフィルター

バンドパスフィルター¹⁰を測定した目的として中心周波数（最も透過率の高い周波数）と帯域幅（バンド幅）を測定することである。また斜入射から影響についても考える必要があるので測定を行った。ここでバンドパスフィルターとして本システムではメタルメッシュフィルターを採用している。メタルメッシュフィルター（Inductive Cross Mesh）の構造は次のようになっており、 g の値で、透過する波長の選択を行い、 a と b の値で、バンド幅（FWHM=Full Width at Half Maximum の幅）を決めている。このフィルターが何層か重なっており、実際に理論的に説

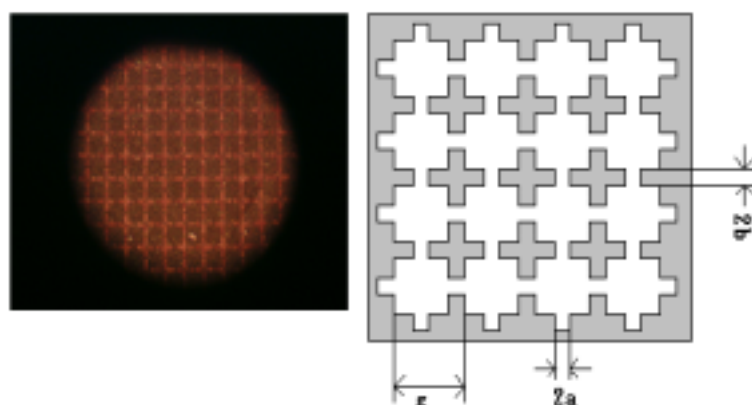


図 4.20: ICM 型メッシュフィルター拡大写真と図

明することが難しい。どのような原理で、波長選択を行っているかという共振

¹⁰光のスペクトルから特定の波長だけを透過させることができる帯域フィルターである。

現象を利用して波長選択をしている。

g の長さにあった波長の長さが共振を起こし透過する。それ以外の波長は透過しないというものである。

$$g - 2a = \frac{\lambda}{2} \quad (4.61)$$

の関係が成り立つ。

透過率が何%になるかは実際に実験しないと分からない。

この測定の実験の目的の一つは、実際にどの周波数で透過率がどのくらいあるのか知ることである。またバンドパスフィルターになっているか検討し、さらに斜めから入ってきた光がどのような振る舞いを起こすか検討する実験も行なった。

バンドパスフィルター測定結果

測定結果からまずいえる事は評価項目であるバンドパスのフィルターになっていることである。中心周波数も目的とする周波数（350GHz、650GHz、850GHz）からさほどずれてないことが分かった。（表 4.5 参照）ただし ch2、ch3 では、バン

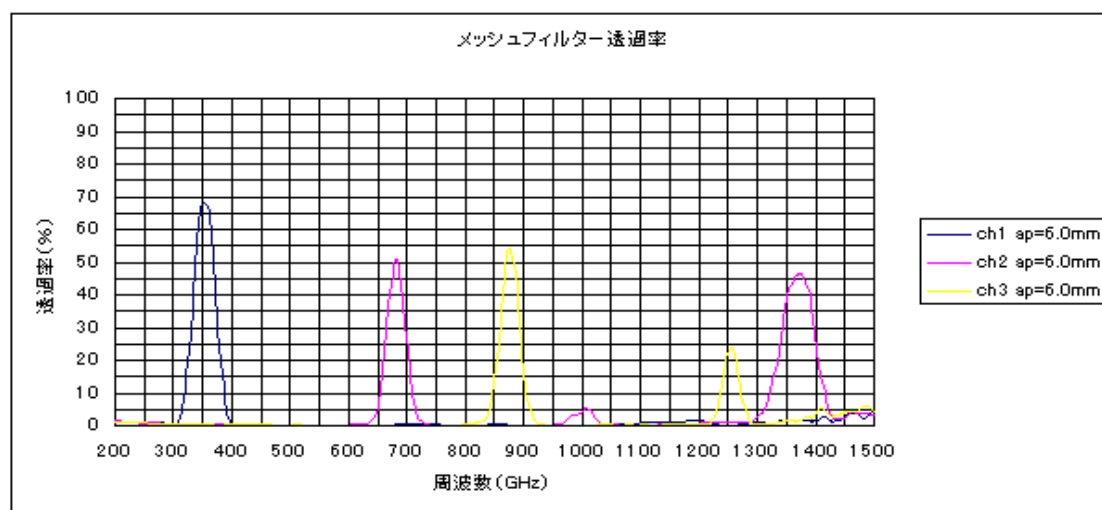


図 4.21: 測定結果

ドが2つ形成されているのが分かった。それらについて、物理的に考えてみる。バンド形成の周波数帯は、式（4.36）から整数倍の位置で、共振現象が起こりうることが分かる。その部分のリークした部分（本来あってほしくはない周波数帯）は、他のフィルターでカットする必要があることが分かった。（4章4節参照）角度依存に関しては予想どおり、他の周波数でのリークはなく角度がきつくなるにつれて透過率が減少する傾向がわかった。

これは、入射光量が

$$I(\theta) = I_0 \cos(\theta) \quad (4.62)$$

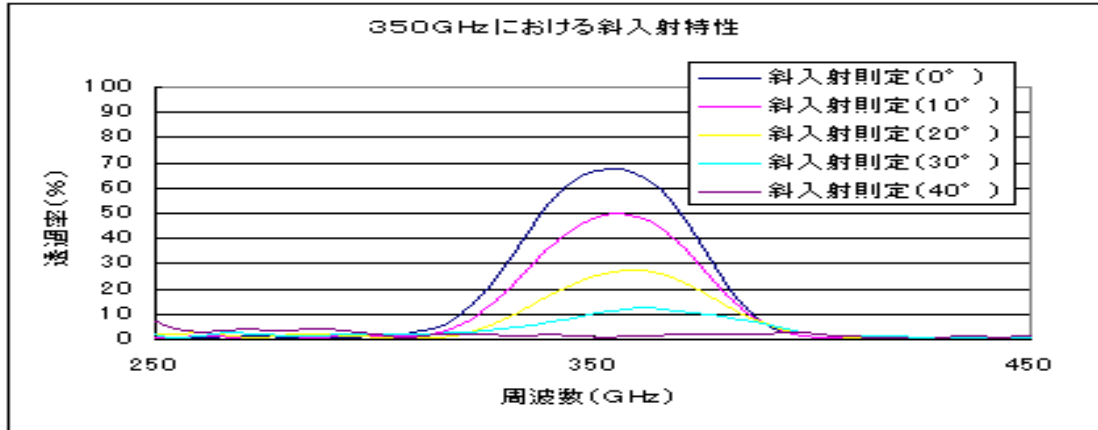


図 4.22: ch1 の斜入射の測定結果

ずつ減少（光軸に対し垂直な面でのメッシュフィルター大きさが減るため）し透過率が減少したと考えられる。しかし、透過率は、

$$T = \frac{\text{メッシュフィルター有り}}{\text{メッシュフィルター無し}} \quad (4.63)$$

で計算されるため、お互いに光軸に対し垂直な面でのメッシュフィルター大きさが減るため、キャンセルしてしまい、この物理的効果は影響を及ぼさない。メッシュフィルター単体での性質が関係しているものとする。幾何的なものは、分母分子に共通でありその効果はキャンセルされてしまう。ここで仮定として、角度依存による効果で実際に透過率が下がるためにはメッシュの見かけの長さが縦 b と横 a の比で異なることが影響を与える必要がある。長さ a 、 b （図 4.20）が十字型の透過面積の大きさに影響を与えるためである。

簡単に考えるために、回転方向に垂直な方を b とし、回転方向と平行なものを a とする。

この仮定が正しければ現象して、バンドパスフィルターが、与える中心周波数がシフトしなくてはならない。式 (4.61) を、変形する。

$$a(\theta) = a(0)\cos(\theta), g(\theta) = g(0)\cos(\theta) \quad (4.64)$$

から $g-2a=L$ とおくと

$$\lambda_{max}(\theta) = 2L\cos(\theta) = \lambda_{max}(0)\cos\theta \quad \theta = \text{斜入射する角度} \quad (4.65)$$

となる。

そこで実験結果を詳しく見て、最大透過率を持つ中心周波数と角度について、理論式 (4.65) と比較した。その結果、測定精度の問題もあるが、理論式よりもずれが小さいことがわかった。

これは、式 (4.65) が、単層でのものであり、実際に測定したメッシュフィルターは多層であるため一概に比較はできない。性能評価としては 10 度の角度までは、中心周波数が変わらないことが分かった。(図 4.23)

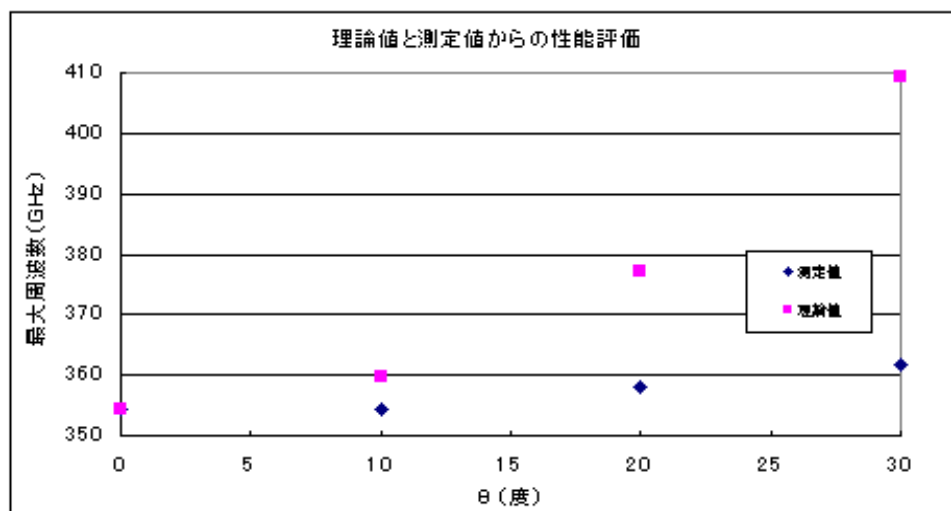


図 4.23: 理論式 (4.65) との比較

その仮定が正しいかは、バンド幅と $2b$ と $2a$ の長さから分かる¹¹ので、

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda} = \gamma + \tau f\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4.66)$$

から、 γ と τ は、定数よりバンド幅が可変であるかどうか分かれれば、 b と a の長さの比が違ってくるので、透過率の減少について、説明を与えることができる。(図 4.24、図 4.25)

$$T = -\alpha\theta + \beta \quad (\text{周波数} = \text{一定の時}) \quad (4.67)$$

の関係があることがわかった。

¹¹論文 (6) Resonant array bandpass filters for the infrared を参照

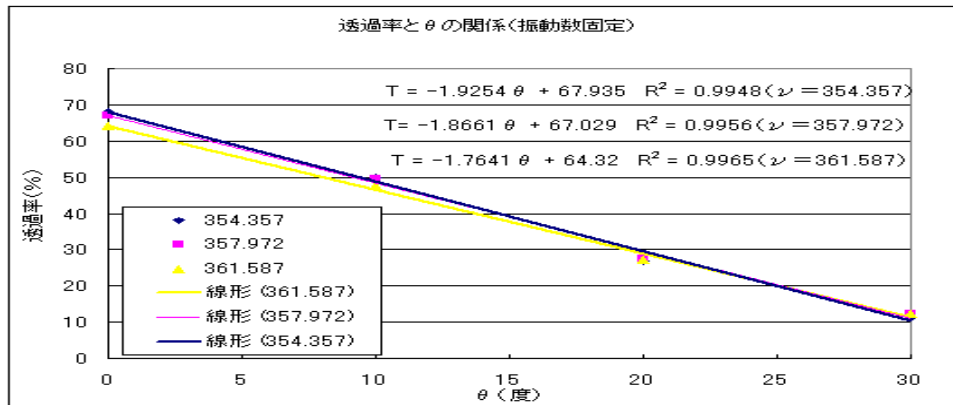


図 4.24: 透過率と最大周波数との関係

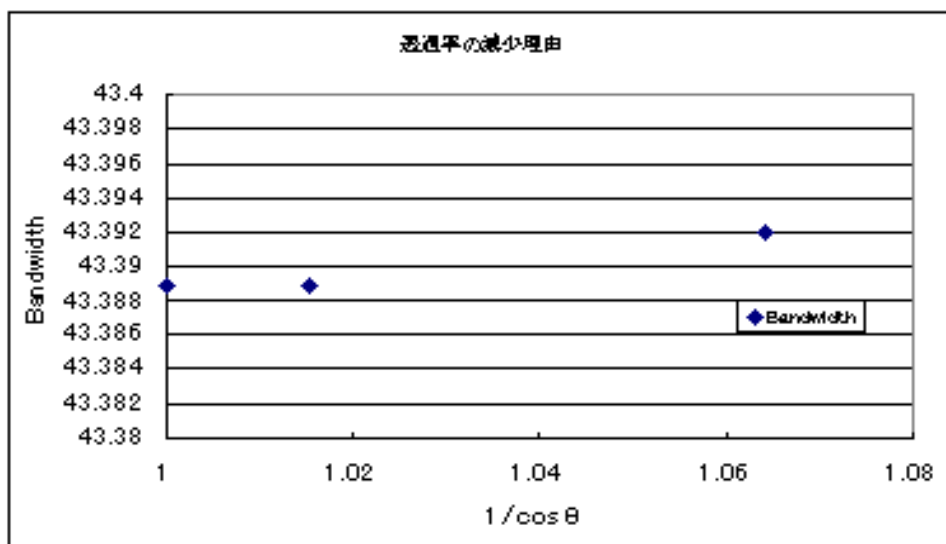


図 4.25: バンド幅による透過率減少の説明

中心周波数は角度に依存すること、また透過率も角度に依存することが分かった。この両者を結びつけるグラフについて考察しようとする。すなわち $T(\theta, \nu)$ の関数である。

物理的にこの関数を解くにはメッシュの数と g の長さ、 a と b の長さの測定、誘電率の測定、フィルターの吸収率測定などが行なわれ、実際に誘電体のモデルを解かない限り結論はでない。ここで、問題となるのが、メッシュの g の値が、1 枚目と最後の値が、見た目と同じであることが確認できる程度である。実際にこの長さを計測してないためこれ以上議論が展開できない。メッシュの枚数が不明で更に g などの長さが異なるため（リークをなくす目的で中心周波数を通す長さにしてリークする周波数を変える事で相補的にリークをなくすことができる）、誘電体モデルとして解けない（値として不定な部分が多すぎる）。透過率を上げようとするリークする場所が増え、リークをなくそうとすると透過率が減少してしまうと考えられる。また今回測定したメッシュフィルタで 650GHz 帯の透過率が悪いことは、劣化が原因ではないかと推測する。フィルタの一部が剥離していたからだと考える。本来ならば、全バンドで 70 % の透過率があるはずで、（出荷前に測定された時）それが、50 % 程度になっているのは、測定系での間違いが無い限り、素子の劣化ではないかと結論付ける。斜入射に対する対策としては、式 (4.66) の傾きの値が何で決まるかを実験（ g, a, b , メッシュの枚数等の値を変化させること）から評価することで、斜入射に対する対策が行なえると考え。そのためには、メッシュの様々な異なるものを分析しなくてはならない。ここで、一番初めの実験の目的は入射による中心周波数がシフトするかどうか、中心周波数がどこであるか、またその時の透過率はどのくらいかを評価するための実験である。よって、測定結果をまとめると

表 4.9: メッシュフィルターの測定値

	ch1	ch2	ch3
中心周波数 (GHz)	354	683	878
バンド幅 Δf	40	36	33
Q 値	9	19	27
透過率 (メッシュフィルター単体) %	68	51	54
透過率 (AR フィルターでカットした結果) %	52	37	34

ここで選択度 Q^{12} は

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad \Delta f \text{ はバンド幅 } \left(\frac{T}{\sqrt{2}} \right) \text{ となる周波数の幅} \quad (4.68)$$

¹² 選択度 Q が大きいほどより性能がよいバンドパスフィルターであることを示す。

ch2 は、ちょうど 2 倍のところの周波数でもう一つのリークをもっている。
ch3 は、 $\frac{3}{2}$ 倍のところでリークしている。
この位置で、2つのメッシュフィルターは、共振を起こしていることがわかった。
他の倍数のところでは、干渉を利用しリークを消している設計になっていると考える。
このリークは、他のフィルターを使って、カットする必要がある。
例えば AR コートしたフィルターを使用し 3 チャンネルの透過率（フィルター効率）とする。その結果図 4.26 のグラフとなる。

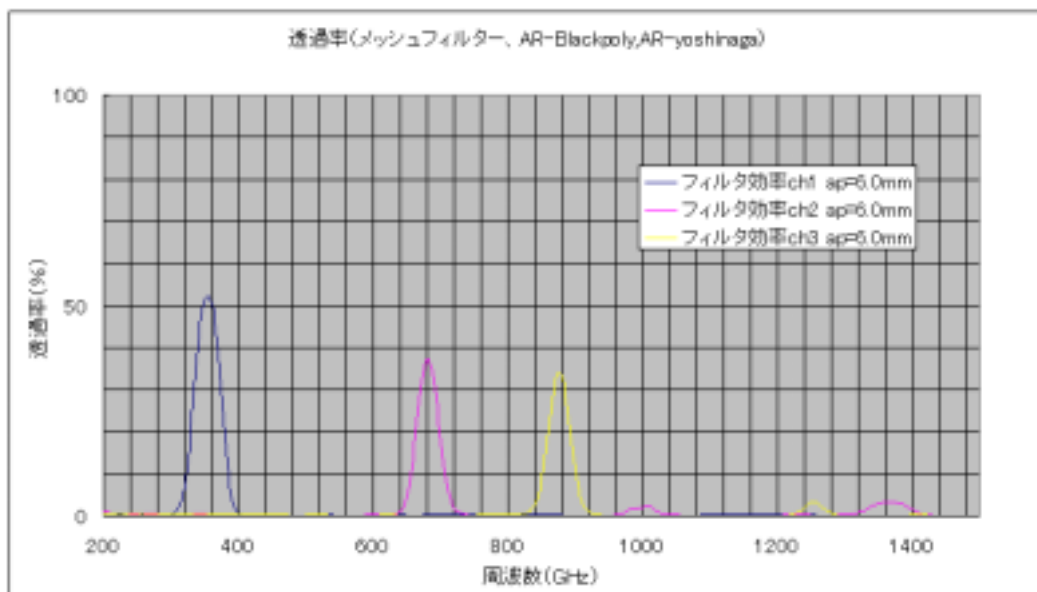


図 4.26: フィルター効率

AR 吉永、AR ブラックポリエチレン、バンドパスフィルター

ここで実際にクライオスタットにどんなフィルター¹³¹⁴が入っているか示す
(以前のものと比較を含める)。

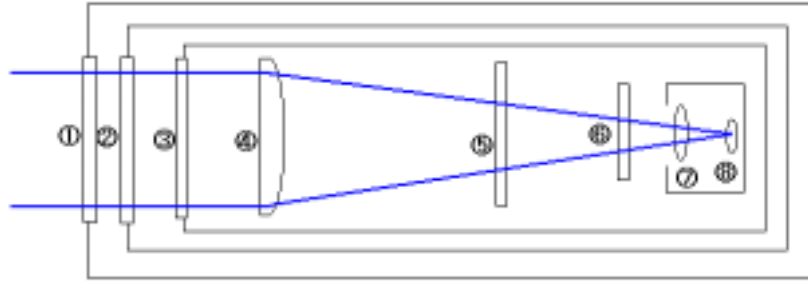


図 4.27: フィルターの位置

6 月のチリと比べると実験室での総合効率が、全体的に約 2 倍の透過率が、向上したことが分かる。実験室で 0.3 K ステージが冷えたことにより、以前ついていた 4 K のサファイアの反射コーティングされた窓を一枚はずし、新しい AR コートしたサファイアに変えたこと、AR サファイアを一つはずし ZITEX に変えたことがチリで透過率が、大きく向上した。(350GHz 帯で 9 倍、650GHz 帯で 12 倍、850GHz13 倍) また、反射防止コートをすることで 650GHz、850GHz 帯での、透過率向上に成功した。この結果次章で述べる光学系効率が向上した。

フィルター効率の結果と 2 章で求めた電氣的感度、次の章でビーム効率、NEFD (Noise Equivalent Flux Density) の値を求める。

¹³サファイアの透過率 nagata et al

¹⁴polyethylene lens の透過率 koide et al[7] 参照

表 4.10: フィルターのとめ

場所	チリ 6 月 (透過率)				12 月実験室 (透過率)				
	名前	350GHz	650GHz	850GHz	名前	350GHz	650GHz	850GHz	stage
	polyester	90	80	85	polyester	90	80	85	300K
	ZITEX(400 μ m)				ZITEX				40K
	polyester				polyester				40K
	サファイヤ				サファイヤ				40K
	polyester				polyester				40K
	ZITEX(400 μ m)	40	40	40	ZITEX	40	40	40	40K
	Black polyethylene	85	95	85	AR-Blackpolyethylene	96	96	94	40K
	ZITEX(400 μ m)				ZITEX(400 μ m)				4K
	ポリエステル				ポリエステル				4K
	サファイヤ				サファイヤ				4K
	ポリエステル				ポリエステル				4K
	ZITEX(400 μ m)	40	40	40	ZITEX(400 μ m)	40	40	40	4K
	polyethylene lens	85	75	67	polyethylene lens	85	75	67	4K
	ZITEX	95	95	90	——				4K
	吉永 filter	75	60	50	AR-吉永 filter(実験室)	70	60	40	4K
	ZITEX	95	95	90	——				4K
	吉永 filter	75	60	60	——				0.3K
	Bandpass filter	68	51	54	Bandpass filter	68	51	54	0.3K
	総合透過率	3.59	1.51	1.02	総合透過率	5.59	2.82	2.31	0.3K

場所	チリ 1 月現在 (透過率)				
	名前	350GHz	650GHz	850GHz	stage
	polyester	90	80	85	300K
	ZITEX				40K
	polyester				40K
	サファイヤ				40K
	polyester				40K
	ZITEX	90	90	80	40K
	AR-Blackpolyethylene	96	96	94	40K
	——				4K
	——				4K
	ZITEX	95	95	90	4K
	——				4K
	——				4K
	polyethylene lens	85	75	67	4 k
	——				4K
	AR-吉永 filter (チリ)	76	77	67	4 k
	——				4K
	——				0.3K
	Bandpass filter	68	51	54	0.3K
	総合透過率	32.45	19.34	13.95	0.3K

測定した際の考慮点（メッシュフィルタ）

メッシュフィルタ自体が小さいため、入射エネルギー量が少ない事が、測定する際に考慮すべき点が多かった。考慮した点を列挙し、その理由とともに述べる。

- 1 迷光対策
- 2 プログラマブルゲイン
- 3 治具の製作
- 4 絶縁対策
- 5 角度依存

の大きく分けて5点について考慮した。ほとんどはノイズに対する改良点である。

1. 迷光はメッシュフィルタに入らずに受信機に入ってくる光のことである。この迷光が入ってこないように対策を行なった。対策をする前は測定した際、全体的にブロードに広がったリークがあった。この原因を追求した結果フーリエ分光器自体に光のリークがあったためだと分かり、それを除去するためにメッシュフィルタに光が入る前と後を完全に仕切る治具とそれにサブミリ波の吸収帯をつけて、リークを減らすように改良をした。その結果ブロードに広がったリークはなくなり、図 4.21 にあるような測定結果が得られた。

2. プログラマブルゲインとは受信機で測定した結果をコンピュータに取り込む時に、ビットの値にゲインをかけるというものであるが測定した結果のノイズまでもが大きくなってしまう。またメッシュフィルタが小さいため (6mm 径)、もともと入ってくる入射光が少ないので信号 S とノイズ N の比 $\frac{S}{N}$ が悪くなってしまう。よってプログラマブルゲインの設定を考えなくてはならないことである。バックグラウンド測定するとき（メッシュがないとき）の $\frac{S}{N}$ より、ノイズが拡大してしまい正しい透過率を出せなかった。そこで、コンピュータ上では、ゲインにおける補正を行わない測定を行い、電氣的にゲインをかけて、バックグラウンドとメッシュのゲインのかけ方を同じにして測定を行うことで、ノイズ拡大の原因を取り除くことができた。

3. 治具の製作は角度依存を考えたとき、メッシュフィルタの面積と同じ開口のバックグラウンドを測定しているが、実際は角度を変えることで、メッシュフィルタの厚みの分だけ入射する光量が減少してしまう。そのため、メッシュフィルタの形状と同じ物を製作し、厚みによる減少を、同じようになるような治具をつくり、バックグラウンド測定とメッシュフィルタ測定での、入射光量を同じになるようにした。

4. 絶縁対策は、この実験にかかわらずフーリエ分光器を使用する場合行うことで、受信機と測定器との間で、絶縁対策を行う必要がある。それを行わないとノイズが入ってしまう。サランラップなどを使用し、測定器との絶縁を行った。

5. 角度依存は、メッシュフィルタが多層膜であり、メッシュの張り方が一枚一枚違うため、常にメッシュフィルタが同じ位置になるように印をつけて測定を行った。その結果再現性がある測定が、行うことができるようになった。

以上が、メッシュフィルターを測定する際に考慮押したことと改善したことである。

4.6 受信機全体での FTS 評価

受信機に対する FTS 評価を行なったのは、今まで測定されたものを 1 つのシステムとして組まれたときの総合評価の 1 つとして行なわれた。受信機全体での光学的評価として、問題点がどこにあるか確認するためにも行なわなければならない実験である。図 4.28 は大気のエネルギー強度（システム全体を通ってきたもの）が分からないので、分光器にかけた周波数に依存した強度分布である。ここで注目すべき点は 350GHz 帯での短波長リーク、650GHz, 850GHz 帯のダブルピークである。これはメッシュフィルターの測定を行なうきっかけになった 1 つである。中心周波数やバンド幅などもここから分かる。

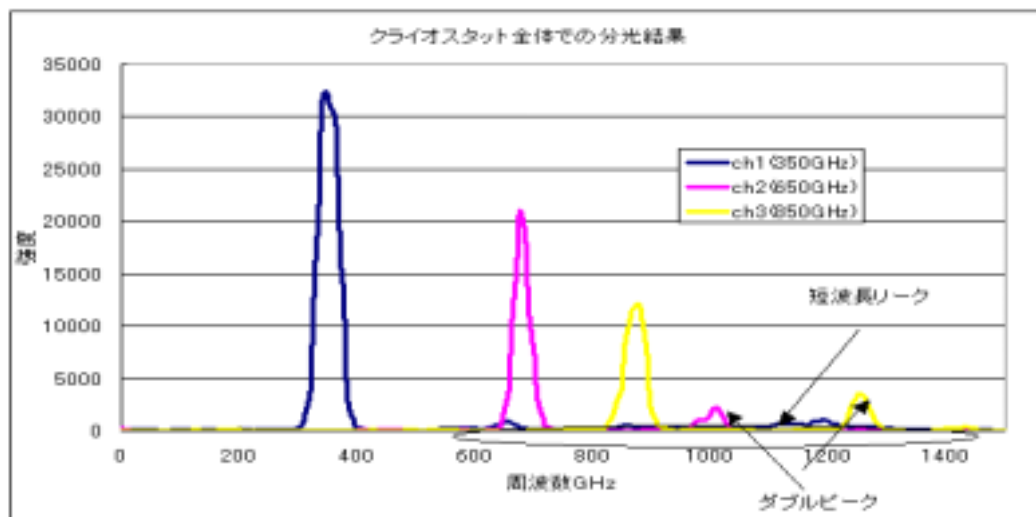


図 4.28: 受信機全体の FTS 評価

4.7 迷光対策として

受信機の迷光対策としてバッフルの取り付け（作製岡田氏）とサブミリ波吸収体を4 Kのステージ周辺に塗布した。また、電波吸収体であるエコソープをボロメータとバンドパスフィルターの間に入れた。その結果斜入射による影響が少なくなり、FTS 評価のCH1のブロードに広がった短波長リークを減らすことができた。また、ボロメータが余計なエネルギーを受け取らなくて良いので、0.3Kステージの温度が低くなり、持ち時間も伸ばすことができた。バッフルとはポリエチレンレンズで集光されたF付のビームと同じ形状のものにし、その内部にもサブミリ波吸収体を塗布した。

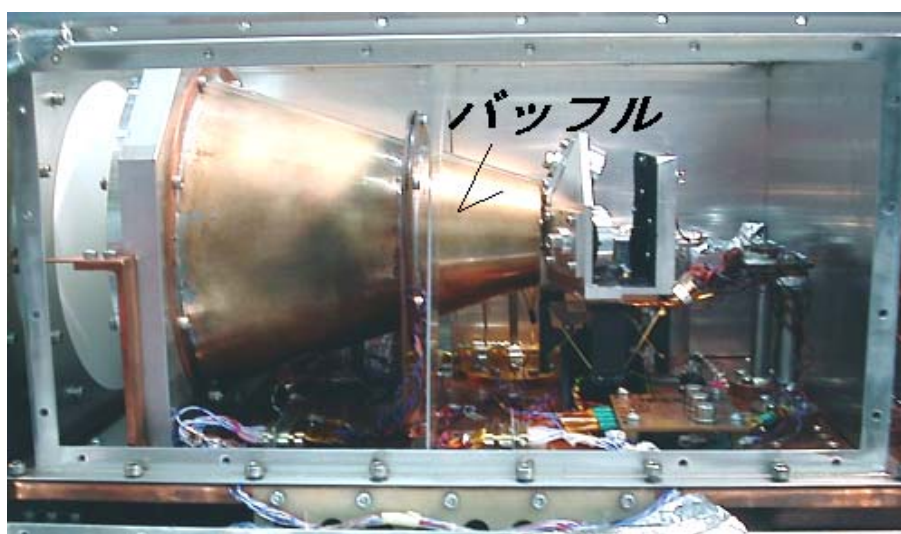


図 4.29: バッフル

結果的には、当然ビームの量が減った（余計なものがカットされたため）がシステムとしては、冷却温度の向上とボロメータの感度が上がったこと、短波長リークが減ったことなど様々なメリットがあった。

4.7.1 サブミリ波吸収体の評価

電波吸収体のエコソープより受信機のあらゆるところに塗りやすく吸収率の大きい物質を作製するためにスタイキャストを採用し、そこにサブミリ波を吸収する物質¹⁵として、カーボンとガラスフィーズを様々な量と大きさ、厚みを変えて物質を作製した。(守氏作成)

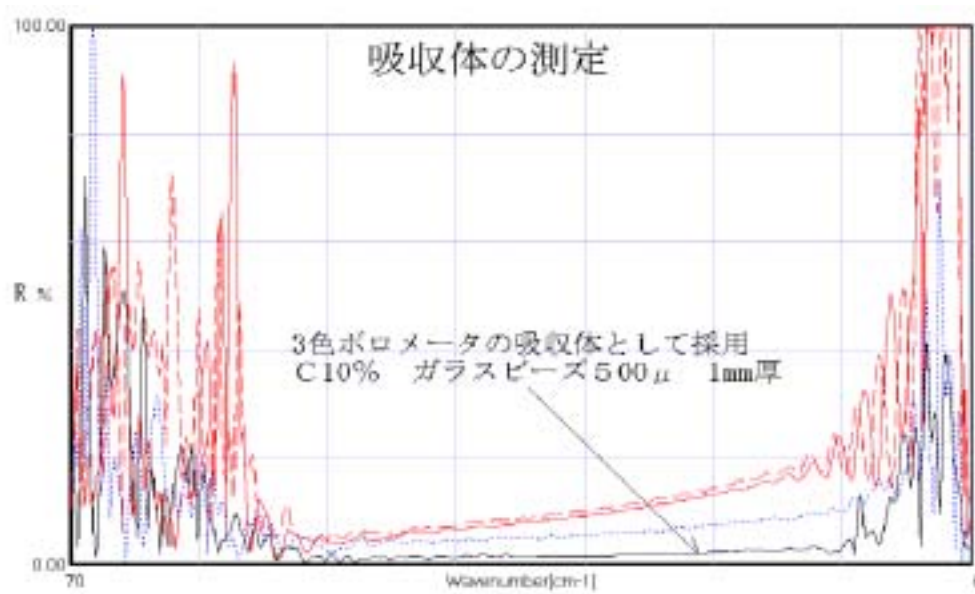


図 4.30: 吸収体の評価

表 4.11: 吸収体の成分表

	カーボン（全体に対する割合）	ガラスフィーズの径	サンプルの厚さ
赤（点線）	10 %	500 μ m	0.5m
黒	10 %	500 μ m	1mm
青（点線）	20 %	500 μ m	0.5mm
赤	20 %	300 μ m	0.5mm

その物質を FTS で反射率測定することで、吸収の割合を評価した。透過 T+反射 R = 1 が、一般的な式だが、物質の吸収率 A を考慮すると透過 T+反射 R+吸収率 A = 1 となり反射率の小さなものは物質が吸収しているか透過しているか分かる。また透過しにくくするようにアルミの板にサンプルを塗り評価した。

¹⁵吸収率に関しては P.43 参照

第5章 総合性能評価

ここで今まで求めてきたことを用いて実際の3色ボロメータの性能についてまとめる。受信機の評価として、NEFD (Noise Equivalent Flux Density) 雑音等価フラックス密度の値を求める。それぞれ求めているのは天体からの信号がどれだけ

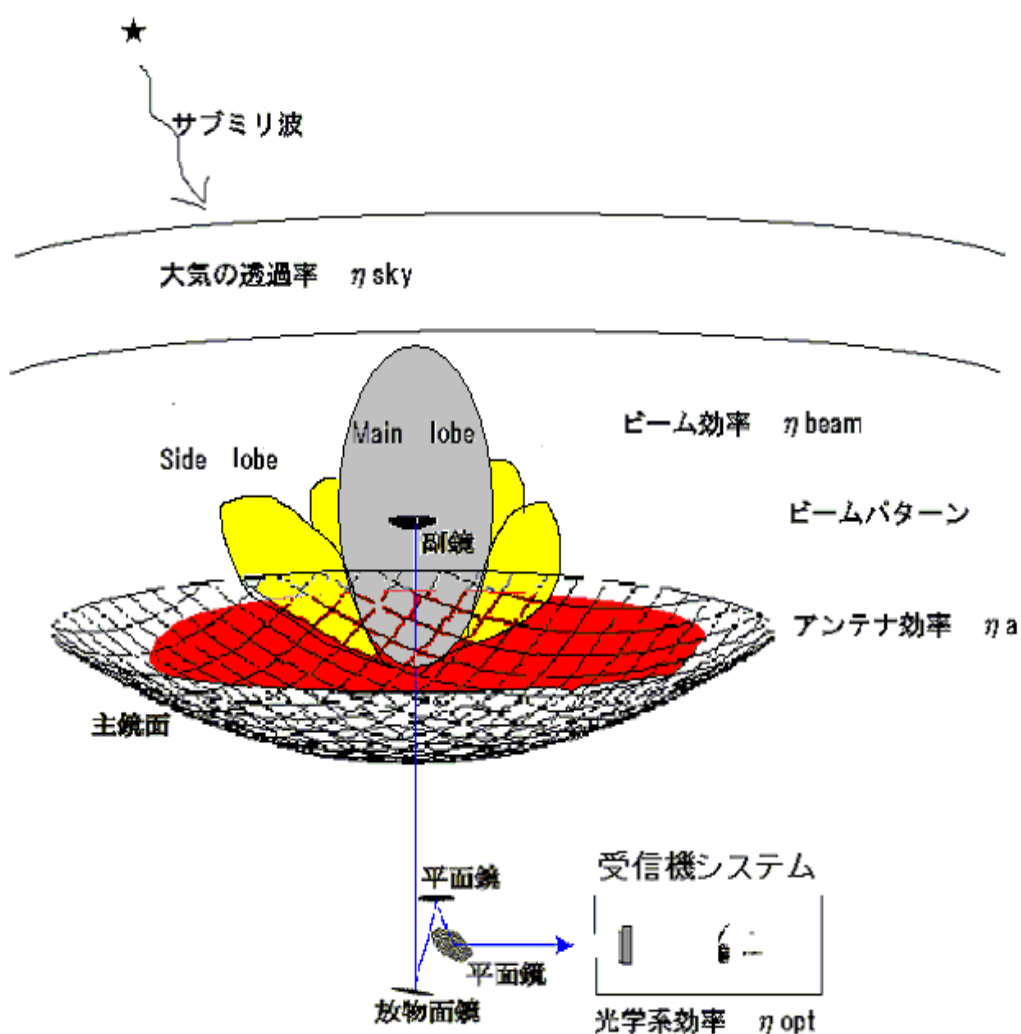


図 5.1: 効率 のイメージ

ロスなく信号が入ってくるかを表している。アンテナがどれだけ有効に使われる

かを表した η_a ¹ アンテナからのビームがどれだけきれいかをあらわす η_{beam_ant} とボロメータ内部の光学系でのビームのきれいさをあらわす η_{beam_bol} のふたつがある。今回実験的に求めたのは η_{beam_bol} である。また、大気による吸収による効果は大気の透過率 η_{sky} である。これらの効率を求めるために、光学の総合実験として次の光学系で実験をした。ビームプロファイル(ビームパターン)と、ビーム効率を求める実験について述べる。また、前章でシュミレーションしたビームパターンと実験の比較を行なう。

5.1 ビーム効率とアンテナ効率について

まず、今回実験室で行ったことについて述べる前に、どのようなことが分かれば、ビームの効率とアンテナ効率が分かるか、説明する。はじめに、ビームの効率とアンテナ効率の定義を述べる。

アンテナ効率

物理的なアンテナの開口面積 A から予想されるある点における電波源 (point source) を受信した強度に対して、実際に受信した強度は、弱くなる。実際に受信した強度から求められる開口面積 A_e を有効開口面積という。アンテナ効率は、どれだけ有効にアンテナの開口を使っているかを表している。

$$\eta_a = \frac{A_e}{A} \quad (5.1)$$

また、アンテナの放射の理論から次の関係がわかっている。

$$A_e = \frac{\lambda^2}{\Omega_A} \quad (5.2)$$

ここで、 Ω_A は、受信機が、測定できるビームのサイズであり、立体角である。これは、次のように定義される。

$$\Omega_A = \int_{beam \text{ の見える範囲}} \int P(\theta, \phi) d\theta d\phi \quad (5.3)$$

$P(\theta, \phi)$ は、ビームパターン、あるいはアンテナパターンになる。また、通常電波ではビームパターンはガウシアンで近似することが多い。近似できるのは、中心で一番強度のある分布 (メインローブと呼ぶ) である。その中で、ビームパターンの半分になる位置 (HPBW) までの領域にある立体角を Ω_M と表すと次のようにかける。

$$\Omega_M = \int_{mainlobe \text{ の見える範囲}} \int P(\theta, \phi) d\theta d\phi \quad (5.4)$$

¹全体の開口面積に対して赤色の部分が有効に使われているイメージ (実際はでこぼこしているためこのように境界を引くことはできない)

これを、計算してみると

$$\begin{aligned}
 \Omega_M &= \int_0^Z \int_0^{Z_{\text{mainlobe の見える範囲}}} P(\theta, \phi) d\theta d\phi \\
 &= \int_0^Z \int_0^{2\pi} r d\phi \int_0^{Z_{\text{mainlobe の分布の端}/2}} P(r, \phi) dr \quad \text{座標変換} \\
 &= \int_0^Z 2\pi r P(r) dr
 \end{aligned}$$

となる。ここで $P(r)$ は、ガウシアンで近似できるので、もし main lobe を同じビーム幅を持つガウシアンで近似すると

$$P(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{\frac{HPBW^2}{4\ln 2}}\right) \quad (5.5)$$

となる。よって、 Ω_M は

$$\Omega_M = \int_0^Z 2\pi r \exp\left(-\frac{r^2}{\frac{HPBW^2}{4\ln 2}}\right) dr$$

(積分範囲が無限大になるのは、ガウシアンで近似したからである。)

$$\Omega_M = \int_0^Z 2\pi r \exp\left(-\frac{r^2}{\frac{HPBW^2}{4\ln 2}}\right) dr \quad (5.6)$$

$$x = \frac{4\ln 2 r^2}{HPBW^2} \quad r dr = \frac{HPBW^2}{8\ln 2} dx$$

とおくと

$$\begin{aligned}
 \Omega_M &= \int_0^Z \frac{\pi HPBW^2}{4\ln 2} \exp(-x) dx \\
 &= \frac{\pi HPBW^2}{4\ln 2}
 \end{aligned} \quad (5.7)$$

ここで、アンテナ効率に話を戻すと式 (5.1)、式 (5.2) より、

$$\eta_a = \frac{\lambda^2}{A\Omega_A} \quad (5.8)$$

となる。測定できないパラメータは Ω_A である。これを求めるためにもう少し議論する。またビーム効率 η_{beam} を考えていくことにする。定義は

$$\eta_{beam} = \frac{\Omega_M}{\Omega_A} \quad (5.9)$$

である。これは、ビームのうちどれだけが main lobe にあるかを示している。ここでも、測定できないパラメータは、 Ω_A である。

Ω_A について

Ω_A を求めるためには、温度が一定 T_2 (強度変化がない) 直径 D の円盤 (惑星や黒体炉など) を考えそれを受信することを考える。ここで、次の定義式を導入する。受信機 (アンテナの温度とも言い換えれる) の強度 T_1 (温度) は次のように表せる。

$$T_1 = \frac{\int_{\text{beam の見える範囲}} \int_{\text{beam の見える範囲}} T_2 P(\theta, \phi) d\theta d\phi}{\int_{\text{beam の見える範囲}} \int_{\text{beam の見える範囲}} P(\theta, \phi) d\theta d\phi} \quad (5.10)$$

これは、ある強度 T_1 は、ビームパターン (アンテナパターン) の分布に依存した point source の強度 T_2 の平均値である。また、 T_2 は、一定なもの (温度と大きさ) を扱うことで計算が簡単になる。また、この式の分母は、 Ω_A より、 T_1 は

$$\begin{aligned} T_1 &= T_2 \frac{\int_0^{\frac{D}{2}} 2\pi r P(r) dr}{\Omega_A} \\ &= \frac{T_2}{\Omega_A} \int_0^{\frac{D}{2}} 2\pi r P(r) dr \end{aligned}$$

ここで、分布 $P(r)$ が、式 (5.5) のように近似できるとすると、

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{T_2}{\Omega_A} \int_0^{\frac{D}{2}} 2\pi r P(r) dr \\ &= \frac{T_2}{\Omega_A} \int_0^{\frac{D}{2}} 2\pi r \exp\left(-\frac{r^2}{\frac{HPBW^2}{4\ln 2}}\right) dr \end{aligned}$$

となる。ここで、 $\frac{4\ln 2 r^2}{HPBW^2}$ を x とおくと

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dr} &= \frac{8\ln 2}{HPBW^2} r \\ r dr &= \frac{HPBW^2}{8\ln 2} dx \end{aligned}$$

よって、

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{T_2}{\Omega_A} \frac{\pi HPBW^2}{4\ln 2} \int_0^{\frac{\ln 2 D^2}{HPBW^2}} \exp(-x) dx \\ &= \frac{T_2}{\Omega_A} \frac{\pi HPBW^2}{4\ln 2} \left(1 - \exp\left(-\frac{\ln 2 D^2}{HPBW^2}\right)\right) \end{aligned}$$

ここで式 (5.7) より

$$T_1 = \frac{T_2 \Omega_M}{\Omega_A} \left(1 - \exp\left(-\frac{\ln 2 D^2}{HPBW^2}\right)\right) \quad (5.11)$$

この式の

$$\Omega_M \left(1 - \exp\left(-\frac{\ln 2 D^2}{HPBW^2}\right)\right) = \Omega_S$$

とおく。

これは見ている point source の立体角とも言える。また Ω_S は、point source の形状と、ビームパターンからの $HPBW$ が分かれば求めることができる。(ビームパターンの測定) によって、 Ω_A は

$$\Omega_A = \frac{T_2 \Omega_S}{T_1}$$

これを使うとビーム効率は式 (5.9) と上式を用いると

$$\eta_{beam} = \frac{T_1}{T_2} \frac{1 - \exp\left(-\frac{\ln 2 D^2}{HPBW^2}\right)}{1} \quad (5.12)$$

となり、求めるべきビーム効率は T_1, T_2 の強度が分かればよい。(hot-cold 法より測定) もしくは、アンテナ効率を用いて

$$\eta_{beam} = \frac{\eta_a A \Omega_M}{\lambda^2} \quad (5.13)$$

アンテナ効率 η_a も同様に

$$\eta_a = \frac{\lambda^2 T_1}{A T_2 \Omega_S} \quad (5.14)$$

となり、実験をすることでこれらの効率を求めることができる。ただし、実験室で評価できるのは η_{beam} のみで、アンテナの効率は、サイトで惑星などの point source を測定しないとでてこないパラメータである。受信機の評価をする際このアンテナ効率 η_a は、以前チリで測定した結果を使用する。

5.2 光学系の総合実験 ビームパターンの測定

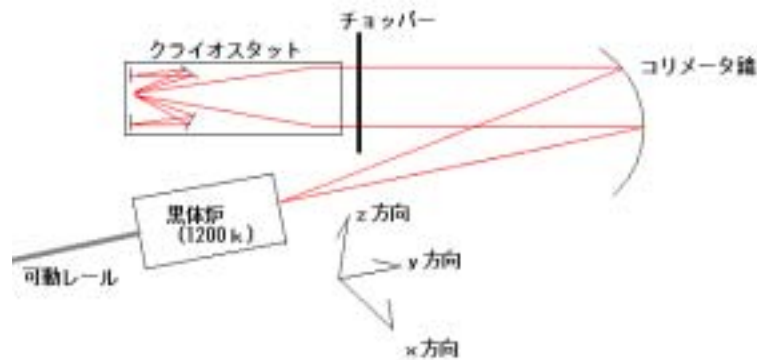


図 5.2: 光学系の総合実験

まず黒体炉の熱輻射式は、輝度 $B \left[\frac{W}{m^2 Hz} \right]$ で表すと

$$B = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (5.15)$$

となり、ここで、 $T = \text{一定}$ とすると周波数と面積のみの関数となる。
この周波数に依存した輝度をビームとする。

まず、実験準備として、図 5.2 における光学系のセットアップを行なう。

それは、

クライオスタットにレーザをつけて、光軸をあわせることである。

次に行なうことは、

焦点を探すことである。

信号強度が一番大きいところが焦点であるので黒体炉を上下左右前後に動かし焦点位置を見つける。

その際に描かれるのが、ビームパターンである。おおよその焦点位置が求まったら二軸を固定し一軸を動かしビームのパターンをとる。そこに描かれる位置と強度のグラフの関数形の main lobe は、ガウシアン分布でフィットできる。(前章で行なった光学系シミュレーションはガウシアンビームを用いて計算している) すなわち

$$P(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (5.16)$$

である。

ガウシアン分布でフィットした結果を表にまとめると下の表になる。

表 5.1: ビームパターンの測定結果

	ch1			ch2			ch3		
軸	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1/e の幅 σ [mm]	11.5	—	12.6	5.4	—	6.1	5.1	—	4.8
ピーク位置 [mm]	-17.7	2120	12.6	39.8	2032.5	278	11.6	2082.5	275
ピーク時の出力 [vout]	181.1	180	277.3	206.8	185.1	206.3	74.6	72.4	72.8

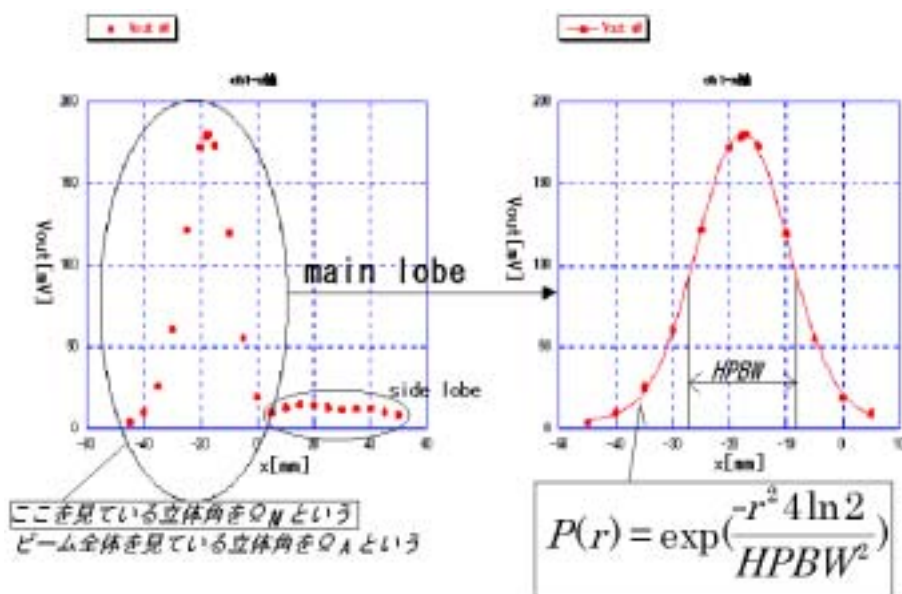


図 5.3: ガウシアンフィットの例

この実験で得られることは、ビームの形状 (x と z の σ の値) とそれぞれの焦点の位置 (y のピーク位置) がわかる。また、ビームの形状から、式 (5.20) をもちいて、HPBW(half-power beamwidth) を求めることができる。これはビームの大きさである。

第4章で、ZEMAX による光学系のシミュレーションを行ないビームの大きさを求めた。ただしこのシミュレーションには、実際の大きさとは異なる。それは、メッシュフィルター等のフィルターによる効果を考慮していないからである。また、このビームパターンは楕円鏡の設計値が、間違っている場合であるのでその時のシミュレーション結果と比べる必要がある。

実験結果の縦と横の比と図 4.5 を比べればよいが、明らかにビームの形状は丸では

ない。またシミュレーションにもあるように焦点位置からずれるとビーム形状が更に楕円に歪むことが分かる。測定結果を受けてそれぞれの周波数帯で、焦点距離が違っても考慮に入れる必要があることが分かった。

測定結果を良く見るとメインのピーク以外に大きなサイドローブがあることがわかる。

これらの原因として考えられることが、

ボロメータに入っているビームが2本あることがあるのでは？

焦点面の光学系が、おかしいのでは？

光がリークしているのでは？(と関係している？)

などが考えられる。

の原因を追求し、メッシュフィルタの特性を再評価し、メインピーク以外にリークしている所があることが分かった (ch2 と ch3)。そのピークを減らすために、吉永フィルタの再作製² (小林氏) をした。

に関しては焦点面光学系の設計の見直しを行なったわけである。その結果として楕円鏡のパラメータに間違いがあることが発覚し、楕円鏡の再加工が行なわれた。

は、メッシュフィルタの測定でも書いたように、迷光が与える影響を減らすためにバッフルを作製 (岡田氏) し、サブミリ波の吸収体³ (守氏作成) を塗った。またシステム全体 (4K の box 全体) をブラックペイント (サブミリ吸収体) で、塗り迷光が無いようにした。(結果的に温度を冷やすことにもつながった。)

ビームパターンの改善が分かるように , , を行う原因となったビームパターンと , を行った結果のビームパターンの二つのグラフを載せて改善されたことについて述べる。図 5.4 から、まずいえることは、ch1 すなわち 350GHz 帯では、全体的に広がったリーク (光の漏れ) があるのが分かる。(同じような現象が ASTE クライオ全体でのエネルギー透過と周波数の関係を求める実験@ FTS でも起こっていた)

これは、バッフルをつけることと、4 k box 全体に塗った吸収体、仕切り板 (受信機と 4K の間) をいれて、光のリークが少なくする状態にすることでこの現象をなくすことが出来た。また、全体的にビームがゆがんでいることと ch2、ch3 のサイドローブが、大きい原因として、メッシュフィルタが、リークしていて、他の周波数帯も見ているのでは？との疑問があった。(同じような現象が ASTE クライオ全体でのエネルギー透過と周波数の関係を求める実験@ FTS でもおこっていた) 実際メッシュフィルタの測定の結果 (図 4.21) より、分かるように、2つの周波数帯が存在していてその分サイドローブが大きくなったと考える。AR コートしたフィルタと、吉永フィルタの再製作によりリークしている透過率を減らした結果、サイ

²以前のレシピに TIBr、TlCl を加えることで、 40cm^{-1} のリークを減らすようにした。また、AR コートを行ない全体的な透過率を向上させた。

³なおこの吸収体を、フーリエ分光器で、測定をし評価を行なった。P.62 参照

ドローブを減少させることが出来た。また、ビームがゆがんでいることから焦点面光学系を見直した。その結果、非点収差がある事がわかり楕円鏡を作り直した。また、楕円鏡をつけずに直接ボロメータにビームを入れたときのビームパターンも測定し、その時の結果も載せる。これらのビームパターンをまとめた表を見れば分かるが、[図 10](#)、[図 11](#)、[図 12](#) のことを疑い評価と開発を繰り返すことで、非点収差を小さくすることができたことからビーム効率を改善、冷却性能向上につながった。また、[図 13](#) についての実験結果は ZEMAX の楕円鏡のパラメータ違いを修正したシミュレーション結果からチリでの観測結果のビーム形状は歪みがないことで、確かめられる。これは、実際にチリでの観測結果を解析することで分かる。ポイントソースの測定、惑星の Mapping が行なわれた結果を解析することで分かる。実際に木星を観測した結果を付録に示すが、その図から分かるように（四角い枠で囲ったものが木星）丸くなっているのが分かる。また、次の節にかかっている式を、変形することでビーム効率が分かるので、実験室系より向上していれば、光学的効率が向上しているのので、ビームの歪みが少なく効率よくビームを得ることができる。実験結果をまとめると、[図 10](#)、[図 11](#)、[図 12](#) を行なったことで、ビームが丸くなり、焦点が定まり、ボロメータにビームを最大限効率よく入れることができると考える。

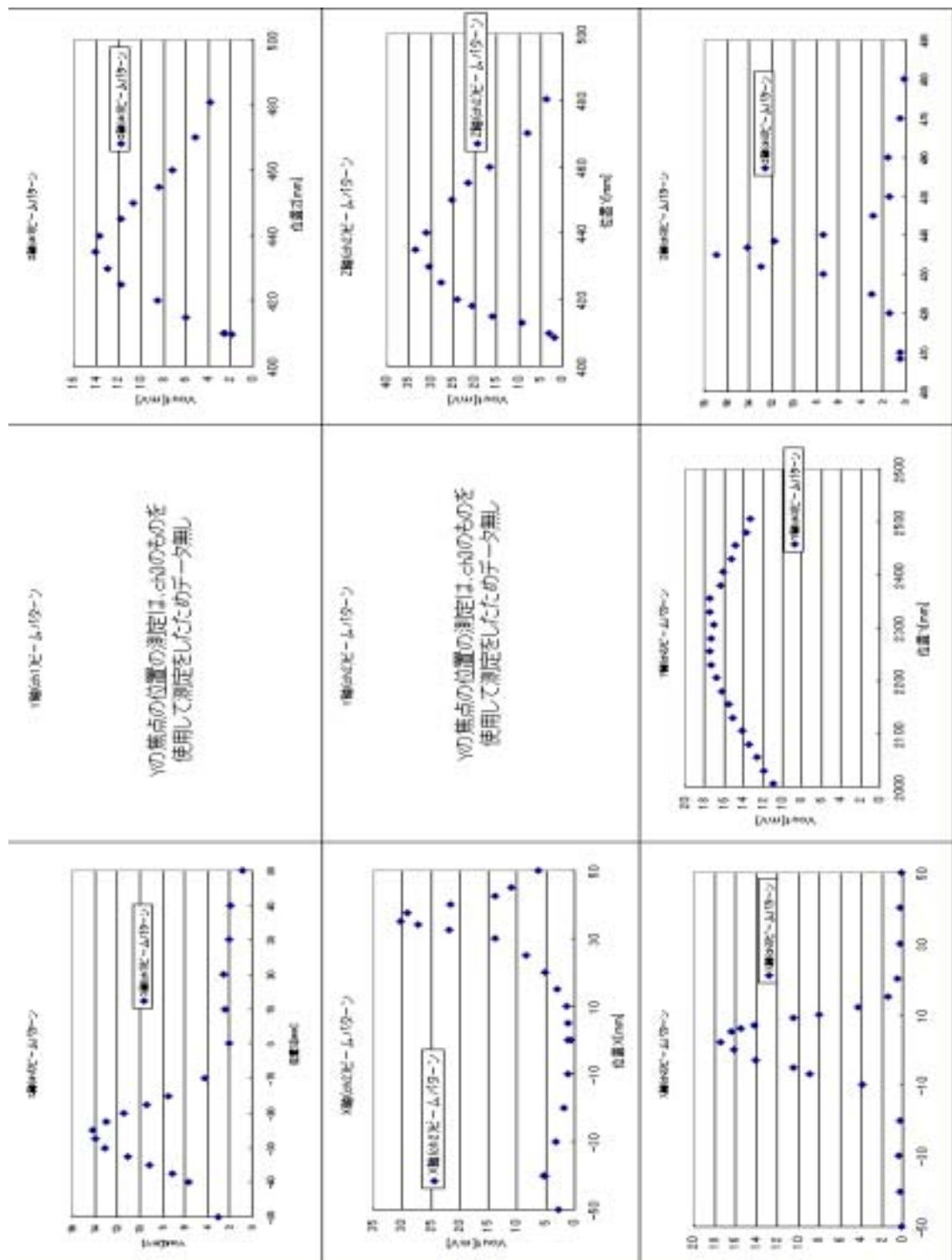


図 5.4: , , を行う原因となったビームパターン@ 9/13

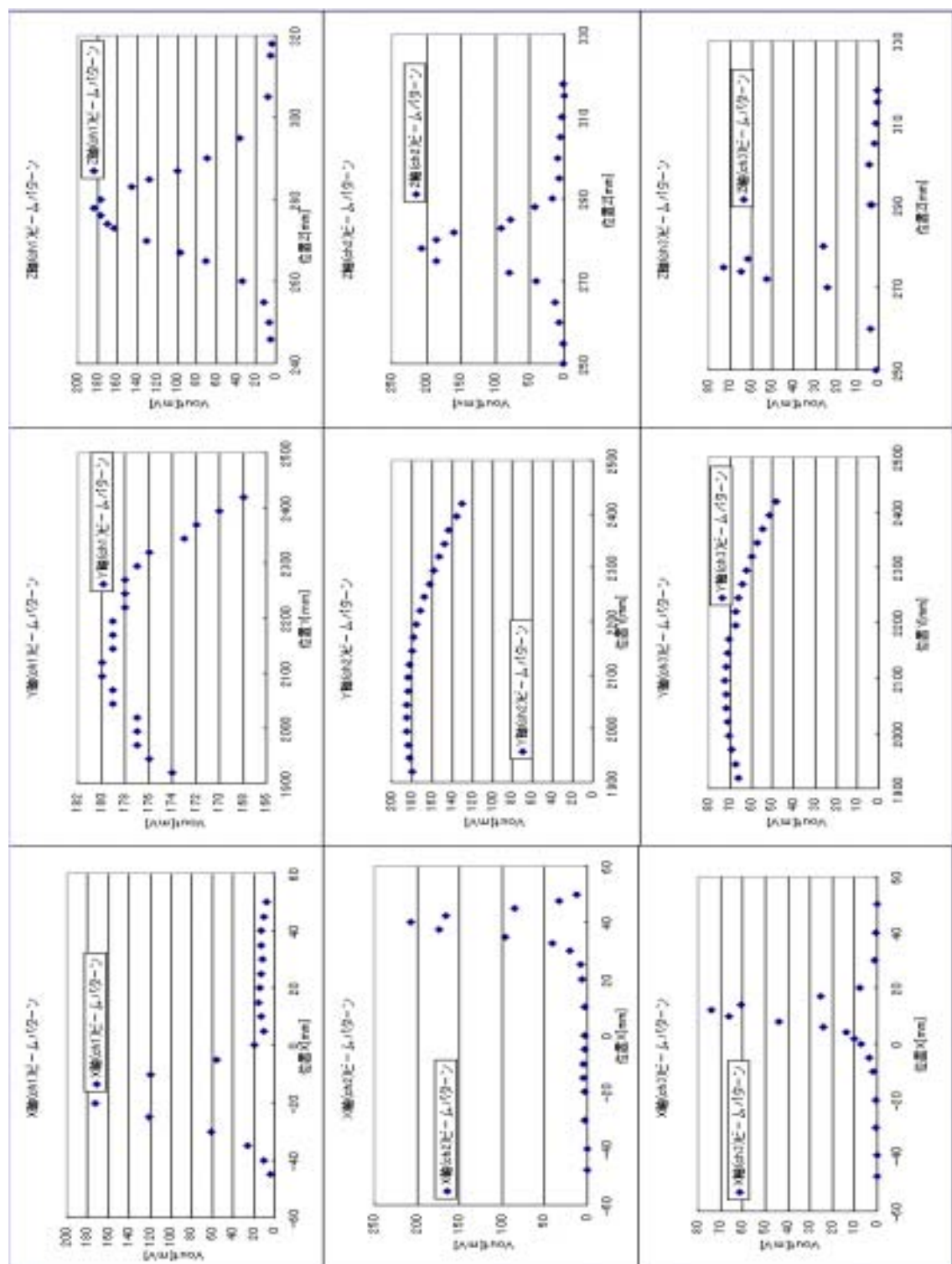


図 5.5: 、 の項目を行なった結果の実験室の最終的なビームパターンの測定結果@ 12/4

5.3 光学系の総合実験

hot-cold 法によるビームの効率 η_{beam}

実験では、 $T = 1200K$ 、 $300K$ 、 $77K$ の温度の時の、測定として読み出すボロメータにかかる電圧 V_b を測定することで、ビームの効率 η_{beam} を求める。ここで、電圧を読む時には、このまま値を読むと直流となり信号強度としてよみにくい。チョッパ⁴を用いて黒体炉とボロメータ信号は共に $f = 10 \text{ Hz}$ で、ロックインアンプ⁵に入れられて、信号電圧 V_b を測定する。黒体炉の開口面積を絞ることで点光源 (point source) となり点光源⁶におけるビーム効率⁷を求めた。ビームの効率 η_{beam} は式 (5.12) を実験室系で評価できるように変形すると強度 T_1 と T_2 は、感度 $[V/W]$ と変わらないので、

$$T_1 = \frac{V(1200K)}{2K_b \Delta T_1 B} \quad T_2 = \frac{V(77K)}{2k_b \Delta T_2 B} \quad (5.17)$$

より

$$\eta_{beam} = \frac{V_b(1200K)}{V_b(77K)} \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \frac{\Omega_{main}}{\Omega_{source}} \quad \Delta T_2 = 300 - 77 = 223K \quad \Delta T_1 = 1200 - 300 = 900K \quad (5.18)$$

である。ここで、 $\frac{\Omega_{main}}{\Omega_{source}}$ は、ビームの立体角である。すなわち Ω_{main} は、ボロメータが受信するメインビームの立体角で、 Ω_{source} は黒体炉 (point source) のビームの立体角である。また、式 (5.12) より

$$\frac{\Omega_{source}}{\Omega_{main}} = 1 - \exp(-\ln 2 \frac{\text{黒体開口}^2}{HPBW^2}) \quad (5.19)$$

また上式と式 (5.16) から、 σ と HPBW の関係が必要となる。 σ は $P(r)$ が $\frac{1}{e}$ となるときの r の値である。HPBW は $P(r)$ が $\frac{1}{2}$ となるときの r の値である。ここで、式 (5.5) と式 (5.16) より、

$$\sigma^2 = \frac{HPBW^2}{4 \ln 2} \quad (5.20)$$

が求まる。

hot-cold 法から求まるパラメータは $V_b(1200K)$ と $V_b(77K)$ 、 ΔT_1 、 ΔT_2 である。また、ビームパターンから HPBW、黒体開口を求められる。よって、2つの実験からビームの効率 η_{beam} が求まる。ここで注意する点として、 $V_b(77K)$ は、チョッパ -

⁴ プロペラのようなもので、光をさえぎったり光を入れたりする装置。その差が信号であり、アナログ信号を、デジタル (交流信号) に変換している装置。ここでは、 $300K$ で、キャリブを行なっている。 $300K$ (基準点) からどれだけエネルギーをもらっているかを考えている。 $k_b \Delta T$ で、エネルギーを校正している。

⁵ 2つの信号を同期させて電流の出力差を測定する装置。

⁶ 黒体の光が全てボロメータに入るように、リニアリティがある小開口で測定

⁷ source となるエネルギーフラックスは $300K-77K$ である。main lobe となるエネルギーフラックスは $1200K-300K$ である場合におけるビーム効率を求めた。

により、77K と 300K の強度を見ていることである。

ビーム効率を求める際 $V_b(77K)$ の光が入っている式は、重要なことが一つ言える。それは、77K の物体をどこ距離で見えるかである。これは点光源ではない。

つまり、式 (5.15) におけるエネルギーそのものが全体に広がっているからである。焦点の位置で見た時のエネルギーフラックスと、チョッパーが置いてあるところで見るところでエネルギーフラックスは本来同じ値にならない。

しかし実際は同じにならない。原因として考えられるのが、ボロメータに対して平行光のビームが入っていない。コリメータ鏡とは球面鏡であり平行光を作る鏡であるが実際には平行光を出していないからと考えられる。言い換えると、ボロメータ側から、見た時に黒体炉の開口のところを見ていないと考えることができる。もう一つ考えられる点は大気の揺らぎによるものが考えられる。また内部の光学系が非点収差を起こしているためであると考えられる。

77K が点光源でないため、ボロメータが見ている範囲を、全て覆うことができるぐらいの大きさだとすると、エネルギーフラックスが途中で吸収されエネルギー的に減少したと考えられる。両者のことが考えられるが本当の効率を考える時、もしビームが平行光でないからだとするとその分の補正を考慮しチョッパー直前での $V_b(77K)_{直前}$ と $V_b(77K)$ の比を効率にかける必要がある。つまり

$$\eta_{beam \text{ 補正}} = \frac{V_b(77K)_{直前}}{V_b(77K)} \eta_{beam} \quad (5.21)$$

となる。測定した結果は最後にまとめる。

5.4 光学系の総合実験 ボロメータシステムでのノイズ評価

P12 のノイズ測定にもあるようにシステム全体のノイズを FFT アナライザーを用いて評価した。ノイズを測定する大きな理由は NEP を

$$NEP_{\text{実測}} = \frac{\text{FFT アナライザーによるノイズ測定 } V_n(\frac{V}{\sqrt{Hz}})}{\text{電氣的な感度 } S_E(\frac{W}{V})} \quad (5.22)$$

として評価するために測定を行なった。なおここで、表に書いてある数値は、10000 倍にゲインがかかっているグラフの数値からゲインがかかっていない時の数値⁸になるようにしてある。また、このノイズを測定することで効率向上にあたって、何が問題点なのか見えてくるためにも必要である。

本当ならば 10Hz でのノイズを評価（チョッパー周波数と同じところ）しなくては

⁸グラフの数値/10000（ボロメータシステムにかかっているゲイン）

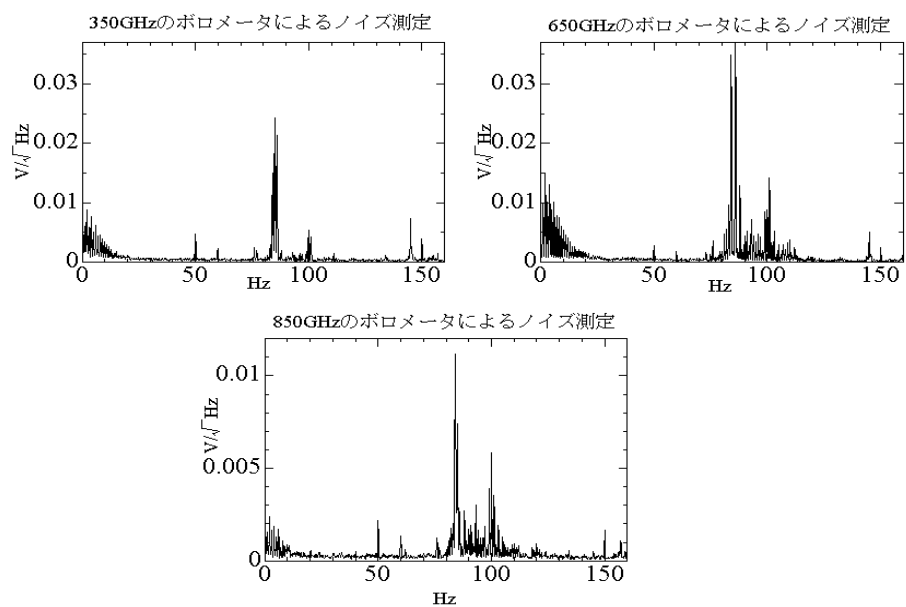


図 5.6: FFT アナライザーによるノイズ測定

測定者永田氏

ノイズ	350GHz	650GHz	850GHz
平均 V_n (10Hz)	2.54E-07	3.94E-07	6.41E-08
平均 V_n (15Hz)	1.22E-07	2.21E-07	3.80E-08

ならないが6月のチリでのノイズを評価をした際 15Hz で評価（ノイズが）してため、15Hz のデータをノイズとすることにした。1月では、10Hz で評価しているので10Hz のデータをノイズとすることにした。ここにはボロメータの理論ノイズ以外に振動ノイズ (GM 冷凍器の振動) や、回路からのノイズなどが含まれている。

5.5 NEFDの求め方

NEFD とは、Noise Equivalent Flux Density である。これがシステム全体の性能を示すことになる。

$$NEFD = \frac{NEP}{\eta_{chop}\eta_a\eta_{sky}AB} \quad (5.23)$$

である。ここで、 B = バンド幅（帯域幅）であり、メッシュフィルターの測定より分かっている。 A はアンテナの開口面積、 η_a は、アンテナ効率である。 η_{chop} は本来ならば図のような赤色のような信号データが理想的だが、実際は sin カーブ的に信号が得られる。そのため効率は面積比で考えると、 $\eta_{chop} = 0.5$ と算出できるがボロメータの時定数などの影響を受けて、sin カーブより少し少なめに見積もり今回は $\eta_{chop} = 0.4$ を採用している η_{sky} は大気の透過率である。

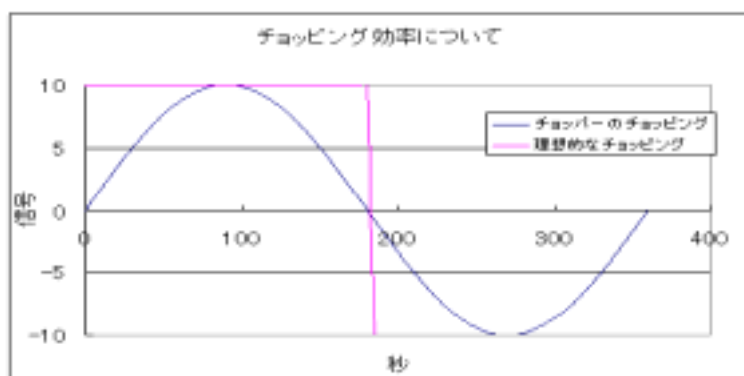


図 5.7: チョッパーの動き方

$$\frac{A_e}{A} = \eta_a \quad (5.24)$$

の関係があり、 η_{sky} は、図 1.3 より、それぞれの周波数における透過率を与えれば求まる。NEFD の単位は、 $[\frac{W}{m^2 Hz}]$ である。

ここで、天文で用いる単位としてジャンスキー⁹[Jy] という単位がある。天体から

⁹Jy という単位は 1931 年にはじめて銀河電波を捕らえたカール・ジャンスキー (K. Jansky) に由来する。光（輻射）や電波が運ぶエネルギーの流れは、毎秒 [s]・単位振動数当たり [Hz]・単位面積当たり [m^2] に運ばれるエネルギー量 [J] で測られる。単位の次元は $[\frac{J}{sm^2 Hz}]$ あるいは $[\frac{W}{m^2 Hz}]$ となる。

の電波は、微弱であるためこの単位が使われる。

$$1Jy = 10^{-26} \left[\frac{W}{m^2 Hz} \right] \quad (5.25)$$

ここで NEP はいろんな定義¹⁰ によって異なるが、ここでは、 $NEP_{\text{光学}}$ と、 $NEP_{\text{システム}}$ の二つの場合で計算する。

$NEP_{\text{光学}}$ は

$$NEP_{\text{光学}} = \frac{V_n(15Hz)}{S_{E \text{ opt}}} \quad (5.26)$$

$$S_{E \text{ opt}} = \frac{V_b(1200K)}{2k\Delta TB} \quad P = 2k\Delta TB \quad (5.27)$$

である。k=ボルツマン定数である。FFT アナライザによるノイズ測定より、 $V_n(15Hz)$ の測定値が与えられる。

これは、1200 k での光学系感度であることに注意する必要がある。 $NEFD$ は

$$\begin{aligned} NEFD_{\text{光学}} &= \frac{NEP_{\text{光学}}}{\eta_{\text{chop}}\eta_a\eta_{\text{sky}}AB} \\ &= \frac{2V_n(15Hz)k\Delta TB}{\eta_{\text{chop}}\eta_a\eta_{\text{sky}}V_b(1200K)A} \end{aligned} \quad (5.28)$$

また、もう一つの全体での $NEP_{\text{システム}}$ はまず、ボロメータ素子の感度を知る必要から式 (2.11) より S_E は

$$S_E = \frac{dV_b}{dP} = \frac{dV_b}{dR_b} \frac{dR_b}{dT} \frac{dT}{dp} = \frac{\eta\alpha V_b}{G - \alpha P_E} \quad (5.29)$$

ここで、光学系と電氣的感度を結ぶ式として光学系効率 η_{opt} を定義する。それは、

$$\eta_{\text{opt}} = \frac{V_b(77K)}{2k\Delta TS_E B} \quad (5.30)$$

である。これは、光学系に関する効率の積算で表すこともできる。

$$\eta_{\text{opt}} = \eta_{\text{beam}} \times \eta_{\text{filter}} \quad (5.31)$$

η_{filter} は、第4章で求めたり、改善を行ってきたフィルターの総合透過率である。よって、 $NEP_{\text{システム}}$ はビーム効率 η_{beam} も考慮する必要があるので

$$NEP_{\text{システム}} = \frac{V_n(15Hz)}{\eta_{\text{beam}}\eta_{\text{opt}}S_E} \quad (5.32)$$

¹⁰ どんな効率があるか考慮することによって変わってくる。今回効率として、実験で行った光学系に着目した NEP と、システム全体における効率を考慮した場合での NEP の二つの場合を考える。

となる。よって、

$$\begin{aligned} NEFD_{\text{システム}} &= \frac{NEP_{\text{システム}}}{\eta_{\text{chop}}\eta_a\eta_{\text{sky}}AB} \\ &= \frac{V_n(15Hz)}{\eta_{\text{chop}}\eta_{\text{beam}}\eta_{\text{opt}}\eta_a\eta_{\text{sky}}S_EAB} \end{aligned} \quad (5.33)$$

ここから分かるように透過率を向上させることで、NEP や NEFD を改善することができる。また、観測から η_{opt} を求めるには、アンテナを含んだ光学系で求めたビームパターンすなわちアンテナパターンとフィルターの透過率から分かる。アンテナが理想的とし、アンテナ効率のみだけ考えると、実験室での受信機評価したそのものが光学系効率となる。ここで、測定をまとめると

5.5.1 NEP と NEFD から分かる性能

NEP と NEFD は、それぞれシグナルとノイズ比が1 のときすなわちシグナルとノイズが同じ時にどれだけのエネルギーなどが入ってくるかを表している。NEP はシステムそのものの性能を示してる。例えば、受信機に入ってくるパワー P をシグナルとみなした時ノイズは N は次のようになる。

$$\frac{S}{N} = \frac{P}{NEP\sqrt{df}}$$

また、ナイキストの定理より

$$df = \frac{1}{2T_{\text{int}}} \quad (5.34)$$

の関係がある。

$$N = \frac{NEP}{\sqrt{2T_{\text{int}}}} \quad (5.35)$$

となり、この式を見れば分かるが、積分時間 T_{int} は、ノイズの帯域幅が 1[Hz] より、0.5[s] の積分時間で入ってくるパワーが P であれば、Noise

$$N = NEP \quad (5.36)$$

となる。積分時間が多くなるとノイズは減少することが分かる。このように NEP からは、ノイズレベルがどのくらいあるかなどの性能が分かる。逆算から、ノイズレベルを減らすのには、どのくらいの積分時間が必要になるか計算で求めることもできる。この NEP が小さいほど、受信機の性能がよいことが分かる。ここで、次に実際のシステムの評価として、NEFD について考えてみる。卒業研究において、フィルタ製作を行ったり、光学系素子の評価を行ったのは、この NEFD の改善が、目的である。

ビームがきれいでエネルギーロスが少ないシステムにするために行ってきた。ビー

表 5.2: 実験室での測定結果

測定値	350GHz	650GHz	850GHz
黒体開口 (inch)	0.2		0.1
x (1 / e) (mm)	11.5	5.4	5.1
z (1 / e) (mm)	12.6	6.2	4.8
焦点位置 (mm)	2137	2042	2092
ホーンウエストサイズ (mm)	1.04	0.55	0.43
V (1200 k) (V)	0.171	0.0477	0.0708
V (Hot-cold) クライオ前 (V)	2.22	0.65	0.61
V (Hot-cold) 黒体前 (V)	1.21	0.378	0.406
Selec@77K(V/W)	4.05E+07	3.72E+07	3.88E+07
Selec@300K(V/W)	3.43E+07	3.72E+07	3.79E+07
ノイズ@15Hz(V/ \sqrt{Hz})	1.22E-07	2.21E-07	3.80E-08
a	0.46	0.23	0.12
sky	0.8	0.2	
chop	0.4		
帯域幅 B(GHz)	40	36	33
計算値	350GHz	650GHz	850GHz
黒体開口 (mm)	5.08	5.08	2.54
(1 / e) (mm)	12.05	5.8	4.95
1/e ビームサイズ計算値 (mm)	10.9	5.5	4.4
ビームサイズ設計値 (mm)	11.2	6.1	4.6
H P B W (mm)	20.1	9.7	8.2
焦点距離 (mm)	206.2	207.1	206.6
m/ s	23	21.4	15.7
beam(%)	43.9	38.8	45.1
比 (ビーム補正)	1.8	1.7	1.5
beam (補正) (%)	80.6	66.8	67.8
Selec(V/W)	3.74E+07	3.72E+07	3.83E+07
opt(%)	2.41	0.71	0.65
アンテナ面積 A(m ²)	78.5		
NEP(W/ \sqrt{Hz})	1.25E-13	7.14E-13	1.25E-13
NEFD(Jy/ \sqrt{Hz})	27	1236	416

ムのきれいさはビーム効率から分かる。サイドローブをできるだけ少なくするために、システムの見直しを行い、楕円鏡を変えてビームを改善しようとした。この結果は、チリでの NEFD の結果から確かにビームが丸くなって、非点収差がない状態になっていることが分かった。さらに、ロスが少ない光学系にするためにフィルターに AR コートを施した。バンドパスフィルターの測定から帯域幅や、透過率の最大になる周波数を測定した。

これら全ては、NEFD を求めるために行ってきた実験である。

NEFD を求めることにより、ある積分時間に対して観測できる天体の輻射強度の下限値を与えることになる。

言い換えるとノイズレベル以上の輻射強度の天体を観測できるということである。NEP を考えたときに行った計算をもう一度考えてみる。NEFD は、実際のアンテナや、大気の透過率などを考えた観測に関する性能といえる。実際に観測をするときには以下についても考慮する必要がある。

- 1．観測中に天体を見ている時間から観測方法を決めなければならない。
- 2．必要とされる S/N からどのような科学的成果を狙うのか？
- 3．観測領域の広さ
- 4．観測条件 大気の透過率、安定度、天体の高度角など

実験室で求めた NEFD は、1.2.3 の点は、考慮できない。4. に関しては、大気の透過率を η_a で、与えていて、それは、時間依存がなく安定していると仮定している。天体の高度角は、ここでは、無視している。単純に性能評価する際にこれらの 1～4 までの条件が同じ時を考えなければならない。理想的に考える必要がある。例えば今観測すべき天体が、 $X[\text{Jy}]$ だとすると X は、観測すべき天体で決まる値なのでいま $20[\text{Jy}]$ とする。たとえば実際に 6 月にチリで観測した条件で求めた NEFD が、 $200[\text{Jy}/\sqrt{\text{Hz}}]$ であり、実験室で求めた NEFD もこの条件にあったものとし NEFD が $27[\text{Jy}/\sqrt{\text{Hz}}]$ であるとする。NEFD の性能を見るとき S/N で考えた方が簡単になるので、

$$X = \frac{S \times \text{NEFD}}{N \times \sqrt{2T_{\text{int}}}} \quad (5.37)$$

となる。ここで分かることが、変数としては積分時間だけであるので積分時間が長ければ長いほどよりエネルギーフラックスの小さな天体を観測できることが分かる。ここで、条件として、S/N がどのような値であるかによって考慮すべき積分時間が変わってくるが、時間依存としては $\frac{1}{\sqrt{2T_{\text{int}}}}$ である。いま、システムの下限値を与えるために、

$$\frac{S}{N} \geq 1 \quad (5.38)$$

より、

$$\frac{S}{N} = 1 \text{ のとき} \quad X = \frac{\text{NEFD}}{\sqrt{2T_{\text{int}}}} \quad (5.39)$$

となり、最悪時の条件においての積分時間が求められる。単純に 6 月の結果と実験室で比較してはいけませんが、(1.2.3.4 の条件などがあるため) 性能として、

表 5.3: NEFD から分かること

	6 月	現在
$T_{int}[s]$	50	0.5

NEFD が 10 倍向上したことにより、積分時間という面でみた時、100 倍向上していることが分かる。感度考えたときには 10 倍向上したことになる。

5.5.2 効率向上するために残された問題点

NEFD を向上させるための改善する点として、 $V_n(Hz)$ の値の改善すなわちボロメータ素子のノイズ (P.14 参照)、システム全体のノイズ (電気ノイズ、振動ノイズ) である。今回チリでこのノイズを切り分けるため、振動が大きくなる原因の GM 冷凍機の電源を切った状態での測定、ボロメータの感度を持たない 4 k の温度で回路ノイズを測定がされた。(松尾氏、江沢氏、小林氏)

ノイズの評価

FFT アナライザーを用いてノイズの評価から回路ノイズや GM の振動ノイズに含まれないノイズが意外と多いことが分かりこの原因を探っている。実験室では

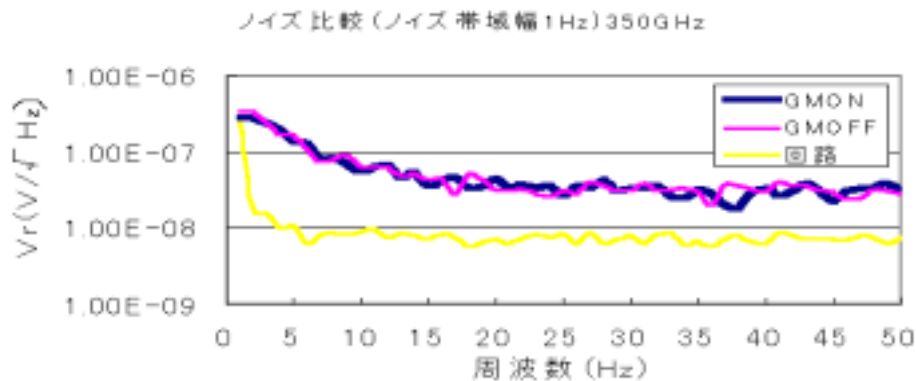


図 5.8: ノイズ成分

回路ノイズはボロメータから測定されるであろう理論ノイズレベルである。振動ノイズの大きな原因とされる GM 冷凍機の電源をとめた状態でもノイズがのっていることが分かる。

GM 冷凍機が振動源のノイズだったが、チリでは低周波のノイズは風などの自然界が作り出す $1/f$ ノイズが現れていることが分かる。

また切り分けとしてボロメータ以外の回路から発生するノイズ (主に読み出し回

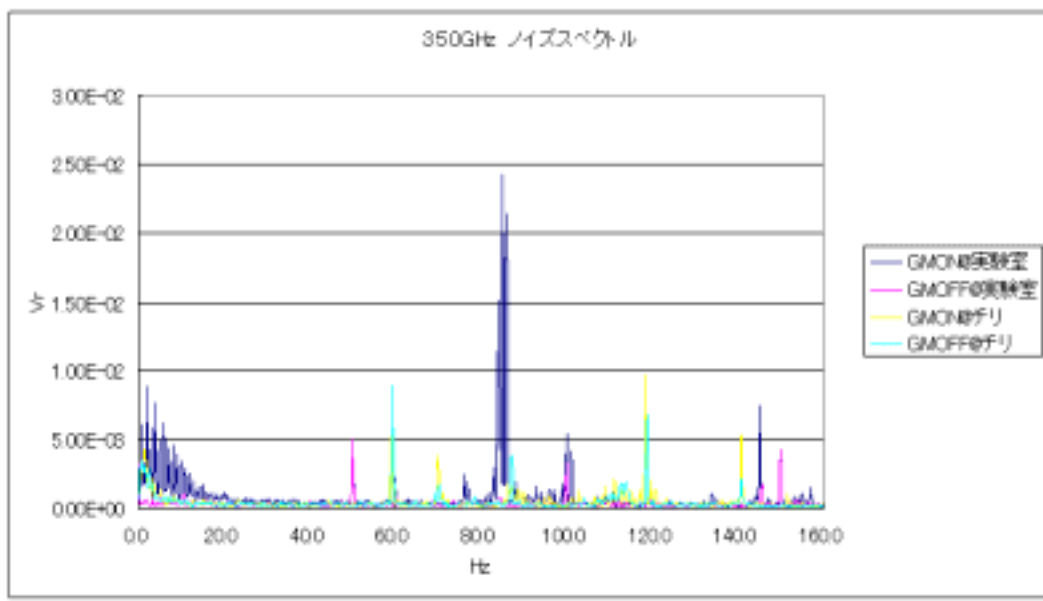


図 5.9: 振動ノイズのチリと実験室の比較

路の J-FET のノイズ) は、設計値どうりの値で、GM 冷凍機によるノイズもさほど大きくないことが分かる。チリで使用している交流電圧の周波数が 60Hz なのでその整数倍のところのノイズが大きいことが読み取れる。

ノイズが大きい原因の一つとしては、望遠鏡の駆動に関するノイズが含まれる ($1/f$ ノイズも含めて) と推測される。この他のノイズとしてはどのようなものがあるかこれから考えて原因を突き止め減らすようにしていきたい。

ノイズ以外に考えられること

また、光学系からは、フィルター効率の改善がもう少し必要である。

ポリエステル窓の AR コートとサファイア窓の AR コートが課題の一つである。楕円鏡を変えることでビームパターンが向上しビームの形状が丸に近いことが観測結果から分かった。そのことにより全体として NEFD を向上させることができると考え、よりシステムの性能を向上したと確信している。もう一つの問題点は、大気の透過率である。

最後に現在観測を行なっている結果から、チリでの最終的な NEFD が 350GHz に関して解析結果を添付したので 6 章を参照されたい。フィルター効率が実験室より 9 倍改善している (サファイアの枚数が異なることと AR コートによる効果)。その結果光学系効率も改善してるため全体的に NEFD の値は向上していて $5[\text{Jy}]$ 程度まで改善した。

実際運用する時期 (チリでは冬にあたる 6 月) では感度は向上するはずである。

感度が低い原因の 1 つとして 350GHz 帯では約 70 % ~ 50 % の透過率があるが、650GHz、850GHz 帯では、ほとんど透過率がない（湿度の影響など）ので、素子の感度とか光学系の感度を最高の性能にしてもそこでリミットがかかってしまう。またアンテナ性能はアンテナ効率で表せる。この値と大気の透過率を変化させることで、実際にどの程度 NEFD が変化するか一例として示す。

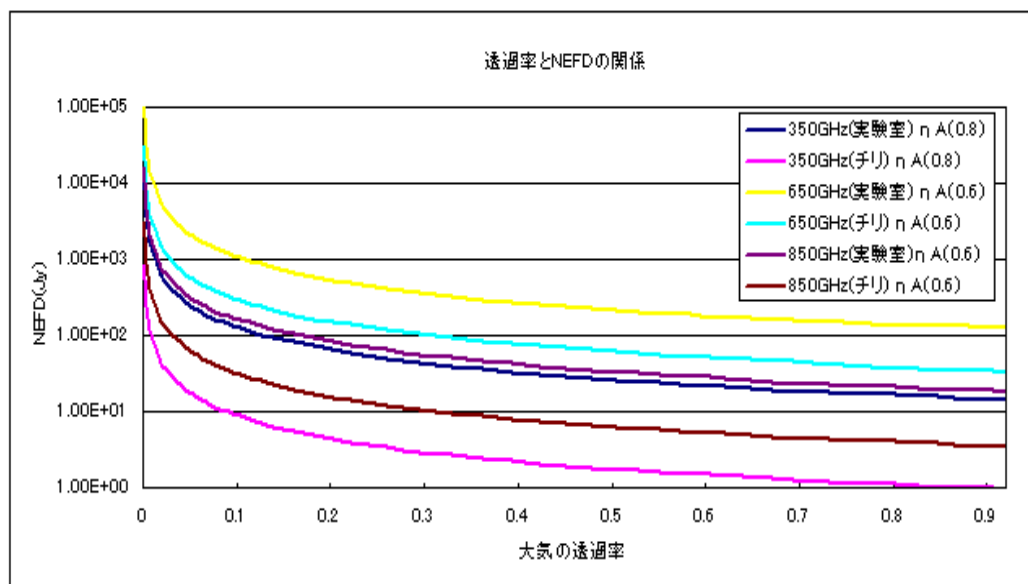


図 5.10: NEFD の大気透過率依存性

このグラフはシステムがどれだけ向上したか目安として示している

アンテナ性能に関しては、観測結果から算出されるが、解析がまだ終わっていないので、適当な値を選びフィティングしている。

第6章 結論

結論として3色ボロメータ受信機システムの性能評価と様々な実験から改善されたことをまとめる

冷却系

主に最低到達温度と持ち時間を改善することとボロメータの感度特性を目的とし実験を行った。

1. ヒートスイッチの評価により
自動オペレーション化するためのパラメータが決定
2. バッフルやサブミリ波吸収体により最低到達温度と持ち時間が改善
3. ノイズ測定によりどのようなノイズが支配的か測定
GMの振動ノイズと回路ノイズ以外のノイズが支配的だった。
この原因は現在究明中

光学系

主に光学系効率の改善することを目的とし実験を行った

1. フィルタの透過率を反射防止コートを行うことで
システム全体の透過率が改善
フィルターの透過率（フィルター効率）が6月と比べて
350GHz帯で9倍、650GHz帯で12倍、850GHz13倍向上
2. 焦点面光学系の見直しによりビームパターンが改善
非点収差をなくすことに成功
3. バッフルやサブミリ波吸収体により迷光を減らすことに成功
短波長リークを減らすことに成功
4. バンドパスフィルタの透過率測定と
受信機システムの周波数に依存した強度分布の測定より
中心周波数と帯域幅を求めることに成功

以上の測定および開発などよりシステム性能の指標である NEFD(雑音等価フラックス密度) が6月のチリでの測定より10倍改善することに成功した(実験室で評価)。まだ、目標となる NEFD ($0.1\text{Jy}/\sqrt{\text{Hz}}$) まで到達していない。現状は、実験室での評価で NEFD ($27\text{Jy}/\sqrt{\text{Hz}}$)、チリでの評価は NEFD ($7\text{Jy}/\sqrt{\text{Hz}}$) である。最後に実験結果のまとめとして性能評価をまとめたので参照されたい。今後方針と課題点については次章で述べる。

6.1 性能評価 1 実験室

HS の性能	No6	No7	No8	修理 No 4	修理 No 5	1.5 倍 HS
ON 熱伝導率 [mW/K]	17	43	35	39	25	36
OFF 熱伝導率 [μ W/K]	28	44	18	15	17	13
0.3 k 冷凍機の性能	He ⁴ の液化条件		He ³ の液化条件		最低到達温度	持ち時間
実験室	49[K]		39[K]		0.433	14 時間

ボロメータの性能 (シリアル)	350GHz(sk3502)	650GHz(sk6504)	850GHz(sk8503)
電氣的感度 (平均) [V/W]	3.74×10^{-7}	3.72×10^{-7}	3.83×10^{-7}
ノイズ@ (FFT アナライザー, 10Hz) [$\frac{V}{\sqrt{Hz}}$]	2.54E-07	3.94E-07	6.41E-08
ノイズ@ (FFT アナライザー, 15Hz) [$\frac{V}{\sqrt{Hz}}$]	1.22E-07	2.21E-07	3.80E-08
NEP _{bol} (@温度 K)	2.91E-16(@0.41K)	7.29E-15(@0.33K)	1.64E-16(@0.51K)

光学性能	350GHz	650GHz	850GHz
中心周波数@メッシュフィルター	354	683	878
バンド幅@メッシュフィルター	40	36	33
ビームサイズ (x,z) [mm]	(11.5, 12.6)	(5.4, 6.2)	(5.1, 4.8)
ビーム効率 (%)	43.9	36.4	45.1
光学系効率 (%)	2.4	0.7	0.6
NEP (10Hz) システム [W/ Hz]	2.57×10^{-13}	1.54×10^{-12}	2.29×10^{-13}
NEP (15Hz) システム [W/ Hz]	1.25×10^{-13}	7.14×10^{-13}	1.25×10^{-13}
NEFD (10Hz) システム [Jy/ Hz]	55	2660	760
NEFD (15Hz) システム [Jy/ Hz]	27	1236	416

6.2 性能評価 2 チリ

0.3 k 冷凍機の性能	He ⁴ の液化条件	He ³ の液化条件	最低到達温度	持ち時間
チリ	50[K]	38[K]	0.370	11 時間

ボロメータの性能 (シリアル)	350GHz(sk3502)	650GHz(sk6504)	850GHz(sk8503)
電氣的感度 (平均) [V/W]	3.24×10^7	2.71×10^7	3.48×10^7
ノイズ@ (FFT アナライザ, 3.8Hz) [$\frac{V}{\sqrt{Hz}}$]	1.36E-07	1.39E-07	1.25E-07
ノイズ@ (FFT アナライザ, 10Hz) [$\frac{V}{\sqrt{Hz}}$]	4.45E-08	5.26E-08	6.63E-08
NEP _{bol} (@温度 K)	E-16 (@0.37K)	E-16 (@0.37K)	E-16 (@0.37K)

光学性能	350GHz	650GHz	850GHz
中心周波数	354	683	878
バンド幅	40	36	33
木星の測定 (1/13) からビーム能率 30 % @EL=60deg			
光学系効率 (%)	14	7	6
NEP (3.8Hz) システム [W/ Hz]	$\approx 3 \times 10^{-14}$	$\approx 7 \times 10^{-14}$	$\approx 7 \times 10^{-14}$
NEFD (3.8Hz) システム [Jy/ Hz]	≈ 7	≈ 120	≈ 240

光学系効率は、 $\eta_{beam}, \eta_{filter}$ から求めている。 η_{beam} は、350GHz 帯での木星の観測結果より算出されている。大気の透過率、アンテナ効率などはチリで今回測定したものを使用していない。アンテナ効率に関しては現在観測を行い、解析をすることで明らかにしたいと考える。今回のチリでは大気の透過率が悪い状態なのでもう少しこの値は改善されると思われる。

第7章 今後の方針と課題点

NEFD の向上として

- ノイズを減らす
(目標値の 20[nV] までノイズを下げて現状の 1/10 程度減らす必要がある)
- フィルタの総合効率を向上させること
(バンドパスフィルタと AR コートフィルタと窓の透過率改善)

の二点が主に挙げられる。この課題をクリアすることで NEFD として 350GHz 帯で 100[mJy] 程度まで改善が見込めると考える。また冷却性能は振動ノイズだけが問題点としてまだあるが、冷却能力としては申し分のない性能を示していると考ええる。

観測を行っているので、正しい持ち時間などはわからないが、(望遠鏡を動かしているため通常よりも短くなると考えられる。) 約 10 時間ぐらい観測ができる能力がある。光学系としては透過率向上が問題点として残っている。

今後の方針として

- 上記の課題点をより明確にし克服すること
- ボロメータ素子の再製作
- ボロメータシステムに FTS を取り付けられるように
するため FTS を最適化する。
- サブミリ波の受信機としてより感度を持つ STJ (超伝導トンネル接合)
を用いた 9 素子サブミリ波カメラの作成と評価

などが主に考えられる方針である。長期的な目で見ても先程問題にしていた大気の透過率のことを考えるとサブミリ波におけるサイエンスを展開する上では、衛星ははずせないと考ええる。

また、次世代受信機としてのサブミリ波カメラ (STJ 素子) による更なる感度持つ素子が必要になるだろう。サブミリ波衛星望遠鏡ができれば、新たなテラヘルツにおける天文学が幕開けとなると考える。以上の事からまだまだやるべき課題とこれからの改善点、将来への展望が残されている。

謝辞

本研究を進めるにあたり多くの方々大変お世話になりました。特に外研先の国立天文台開発センターの松尾宏助教授、指導教官であり外研先を紹介してくださった東邦大学の北山哲講師には、心から感謝すると共に厚く御礼申し上げます。

松尾宏教授には、実験になれてない私を広い目で温かく見守ってくださいました。実験の心構えや実験の技術、物理的な知識や解釈など実験を進める上で必要な全ての面で適切にご指導頂きました。心から感謝いたします。

上村潔教授、北山哲講師には、物理や宇宙の素晴らしさを教授してもらい厚く御礼申し上げます。

科学研究員の永田洋久さんには実験の細かい技術、卒論を書くにあたって様々な助言など色々のご指導してもらいました。

国立天文台の岡田則夫さんには、ヒートスイッチの作製、真空技術などいろいろ面倒を見ていただきありがとうございました。

国立天文台の大淵善之さんには、クライオスタットやデュワーのことで大変お世話になりました。

東京大学天文教室の高橋英則助手には、フィルタ関係、FTS 関連で相談にのってもらいありがとうございました。

学振研究員の関口朋彦さんにはビームパターンの測定やボロメータ素子などで大変お世話になりました。

国立天文台の江澤元助手、科学研究員の山口伸行さんには、日本からのリモート観測の際に大変お世話になりました。

総研大学の有吉誠一郎さんには、メッシュフィルターの測定などで大変お世話になりました。実験姿勢など見習うものが大変多く色々面倒を見ていただきありがとうございました。

総研大学の守裕子さんには、光学系の実験全てにおいてお世話になりました。実験の質問などに丁寧に答えていただきありがとうございました。

東邦大学の小林純さんには、実験当初何も分からない私に様々な助言とご指導してもらい大変お世話になりました。

東邦大学の岡庭高志君には、ヒートスイッチなどの評価、卒業論文を書く際にいろんな討論の相手をしてもらいありがとうございました。

いろいろな面で面倒を見ていただいた国立天文台の松尾研究室の皆様
東邦大学の宇宙素粒子研究室の皆様
心より深く感謝します。

関連図書

- [1] Rieke "Detection of light :from the Ultraviolet to the Submillimeter"
- [2] Kobayashi Kiyoshi "工業熱力学"
- [3] Matsuo Hiroshi "固体物理物理" Vol.31 No.4 1996
- [4] Max Born "光学の原理 . . ."
- [5] J.J.Bock,M.Kawada,H.Matsuhara,P.L.Richards,and A.E.Lange
"Silicon-gap Fabry-Perot filter for far-infrared wavelengths"
1.July 1995/Vol.34,No.19/Applied optics 3651-3656
- [6] S.T.Chase and R.d.Joseph
"Resonant array bandpass filters for the infrared"
1.June 1983/Vol.22,No.11/Applied optics 1775-1779
- [7] Koide Naohisa "ASTE 搭載 3 色ボロメータの開発" 名古屋大学
- [8] Yatagai Toyohiko "光とフーリエ変換"
- [9] Utsuno Hiroshi "衛星搭載用遠赤外線分光器の開発" 名古屋大学
- [10] Jun-Hui Zhao,K.H.young,R.M.Herrnstein,P.T.P.Ho,T.Tsutsumi et al
"Variability of sagittarius A*:Flares at 1millimeter"
The Astrophysical Journal 586:L29-L32,2003 March 20

付 録 A 回 転 遷 移 に つ い て

サブミリ波帯の電波は、次のような物理現象を捉えてる。一つは回転遷移によるもの、二つ目は、それに振動が加わった回転振動遷移などがある。また、エネルギー準位が高いところから低いところにおちるときに放射される電磁波（メーザー）などがある。ここでは、回転遷移について述べる。力学において、運動量と慣性モーメント I には

$$P = I\omega \quad (\text{A.1})$$

の関係があり、エネルギーとは

$$E = \frac{I\omega^2}{2} \quad (\text{A.2})$$

の関係がある。慣性モーメントは $I = \mu l^2$ である。

ここで、 μ は、慣性質量であり、 l は化学結合距離である。また、量子力学において純回転準位間の遷移を考える。分子を剛体回転子とするシュレジンガ - 方程式を解くと、角運動量が次のように量子化される。

$$P = I\omega = \frac{\hbar \sqrt{J(J+1)}}{2\pi} \quad (\text{A.3})$$

と書ける。 J は分子の全角運動量子数である。

角運動量子数 $J+1$ から J へ遷移する時に放射されるエネルギー - $\Delta E = h\nu$ より、求めるべき周波数 ν は 115 G H z

$$\nu = \frac{h(J+1)(J+2)}{8\pi^2\mu l^2} - \frac{hJ(J+1)}{8\pi^2\mu l^2} = \frac{2h(J+1)}{8\pi^2\mu l^2} \quad (\text{A.4})$$

となり、化学組成と物質同士の結合距離、量子数が分かれば、回転遷移に関する電磁波の周波数が分かる。その中でも広い波長域で観測されている一酸化炭素 ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}$) 分子のスペクトルを例に上げる。

$$h = 6.6 \times 10^{-34} [\text{Jsec}]$$

$$c = 3.0 \times 10^8 [\text{m/sec}]$$

$$\text{水素原子の質量} = 1.7 \times 10^{-27} [\text{kg}]$$

$$\text{炭素 - 酸素原子間距離} = 1.1 \times 10^{-10} [\text{m}]$$

を与える。また、 $\Delta J = \pm 1$ の遷移のみを考えると双極子放射となる。 $J=1$ の遷移によって放射される電磁波の振動数は、119[G H z] となる。

付 録 B 吉永フィルターの成分表

吉永フィルターの作成に使用した物質の成分表を付け加えておく。これらの物質を、かき混ぜ細かくし、10 t の力をかけて一つの塊にする。それを、スパーサーに入れ、厚みを制御し、温度を 150 度程度で、1 t の力をかけながら押しつぶしフィルター作成を行う。

表 B.1: 吉永フィルタのレシピ

小林氏より

結晶	MgO を 1 とした時の配合比
MgO	1
ZnO	6
LiF	6
NaF	6
CaF ₂	6
BaF ₂	6
KCl	15
KBr	10
TlI	13
NaCl	5
CaCO ₃	6
CsBr	13
CsI	13
TlBr	13
TlCl	13
Poly	75
Carbon	3

この表の中にある物質のそれぞれの吸収バンドの重ねあわせによって、フィルターの性質が決まる。その中で特にポリエチレン量とカーボンの量で、フィルターの特性が決まる。ポリエチレンは、サブミリ波帯で透過率を持っている。

この量が少なすぎると、透過率の悪いフィルターができてしまう。カーボンの量を多く入れてしまうと、サブミリ波から遠赤外にかけて緩やかに吸収をもつので、サブミリ波帯で透過率を減少させてしまう要因となる。

カーボンの量が少ないと近赤外や可視光領域をカットしないフィルターができてしまう。

付 録 C 観測から能率を求める方法

アンテナ効率とビーム効率を算出するのに必要な観測情報として
アンテナ温度 $T_a = T_1$ を求める必要がある。アンテナ温度は次の式で表せる。

$$T_a = \frac{W_{on} - W_{off}}{W_{abs} - W_{off}} T_{room} \quad (C.1)$$

それぞれのパラメータの意味は

$$\begin{aligned} W_{on} &= \text{天体を観測（ポインティング観測）したときの信号} \\ W_{off} &= \text{空を観測したときの信号} \\ W_{abs} &= \text{電波吸収体を見たときの信号} \\ T_{room} &= \text{電波吸収体の温度（300 K）} \end{aligned}$$

であり

$$\begin{aligned} W_{on} &= AT_a e^{-\tau \sec Z} + AT_{sky}(1 - e^{-\tau \sec Z}) \\ W_{off} &= AT_{sky}(1 - e^{-\tau \sec Z}) \quad W_{abs} = AT_{sky} \\ T_{sky} &= \text{大気}の温度 \quad \tau = \text{光学的な厚み} \\ e^{-\tau \sec Z} &= \text{大気}の透過率 \quad (1 - e^{-\tau \sec Z}) = \text{大気}の放射率 \end{aligned}$$

となっている。

ここで問題になるのが大気の厚みの τ である。これは EL 角との依存関係がある。天頂の大気の厚みと地平方向の大気の厚みでは大気の厚みに違いが出てくる。観測で τ を求める必要がある。その観測と言うのが $\sec Z$ と呼ばれる観測である。これは EL 角を変えながら空を観測し信号を得る。これにより τ の情報を得ることができる。実際に測定するのは

$$W_{abs} - W_{off} = S_{r-sky} = AT_{sky} - AT_{sky}(1 - e^{-\tau \sec Z})$$

である。ここで $\sec Z = \frac{1}{\cos(90 - El)}$ で表せる。この観測したデータから EL に依存した S_{r-sky} を観測から求める。また、 $W_{on} - W_{off}$ は

$$\begin{aligned} W_{on} - W_{off} &= S_{pointing} = AT_a e^{-\tau \sec Z} + AT_{sky}(1 - e^{-\tau \sec Z}) - AT_{sky}(1 - e^{-\tau \sec Z}) \\ &= AT_a e^{-\tau \sec Z} \end{aligned}$$

これはポインティングの観測により $S_{pointing}$ が分かるので T_a が算出できる。また、ポインティング観測から HPBW を求めることが可能になるので全ての η が算出できる。(第5章参照) 式 (5.7) ~ (5.14) よりアンテナ効率 η_a とビーム効率 η_{beam} が算出できる。 τ から η_{sky} が求められ実験値の η_{filter} と η_{beam} より光学系効率 η_{opt} が計算でき NEFD が算出可能になる。

表 C.1: 現在行っている観測データの解析結果

NEFD 算出について	350GHz	算出方法とデータ
λ [m]	8.57.E-04	
チリでの総合透過率 η_f	32.5	
実験室のビーム能率 η_{beam}	43.9	(楕円鏡変える前)
受信機の光学系効率 η_{opt}	14.2	$\eta_f \eta_{beam}$
チリでのノイズ測定 V_n (10Hz)	4.45E-08	2003/12/31 データ
バンド幅 B [GHz]	40	実験室データ
電気的な感度 Se [V/W]	3.24.E+07	12/31 のデータ
アンテナ面積 A [m^2]	78.5	設計値
木星の黒体温度 T_b 2004/2/5	163.8	SCUBA のデータより
視直径 D [arcsec] 2004/2/5	43 "	SCUBA のデータより
視直径 D [rad]	2.08E-04	
EL	52	アンテナの高さ
HPBW[arcsec]	22	ビームパターン測定 (観測)
HPBW [rad]	1.07E-04	
NEP[W/\sqrt{Hz}]	2.20E-14	$V_n/(S_E \eta_f \eta_{beam})$
S_{chdata} (count El) 2/5	125	観測データ
S_{R-Sky} (count El) 2/5	1250	観測データ
解析結果	C402050738	2004/02/05 07:38 の観測データ
T_a	29	$T_{Room} S_{chdata}(El)/(El)$
T_{Room}	290	受信機室温度 (チョッパーの温度)
Ω_b (str)	1.29E-08	$\pi HPBW^2/4 \ln 2$
Ω_s (str)	1.20E-08	$\Omega_b(1 - \exp(-\ln 2(D^2/HPBW^2)))$
Ω_a (str)	6.77E-08	$T_b/T_a \Omega_s$
η_b	19	$\eta_a A \Omega_b/\lambda^2$
η_a	14	$\lambda^2 T_a/AT_b \Omega_s$
η_{sky}	29	$\exp(-\tau \sec Z)$
τ	0.98	350G の $\sec Z$ の観測 2/5
η_{chop}	50	\sin の面積/矩形波面積
NEFD [Jy/\sqrt{Hz}]	35	$NEP/(\eta_a \eta_{sky} BA)$
NEFD _{補正} [Jy/\sqrt{Hz}]	10	$NEP/(\eta_a \eta_{chop} BA)$

これは性能評価に用いた時の評価とは違う方法で算出した結果 (S/N の関係より式 (5.37) 観測した日も違う) である。

大気の透過率が 100 % のときの NEFD は $10[Jy/\sqrt{Hz}]$ となった この解析方法を他の観測結果に対しても行い 350GHz 以外の周波数帯でも比較検討する必要がある 現在解析を行なっている。

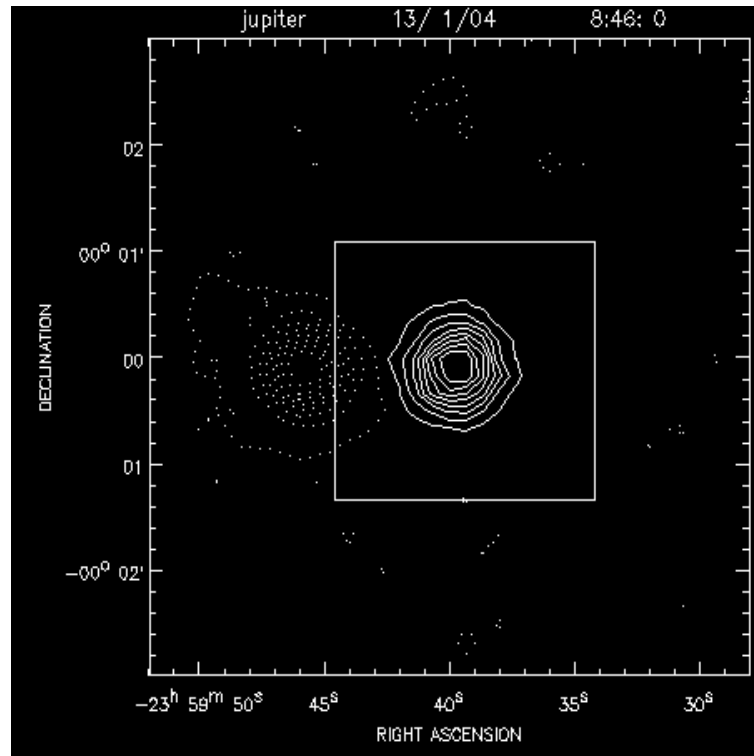


図 C.1: 木星の観測結果 (1/13)

実際の観測の結果として木星がある。これは木星の Map データでありこの観測結果からビームが丸いことが分かった。木星の視直径が分かることで、式 (5.12) が計算できる。また観測よりビーム効率などが分かる。このとき観測したチョッピング周波数は 3.8Hz で、アンテナのエレベーションは 60 度である。350GHz でみた木星である。