

ミリ波観測による初期宇宙探査

大学院理学研究科

天文学専攻 服部 誠 (hattori@astr.tohoku.ac.jp)

東北大学で液体ヘリウムを使用した実験を開始した当初、ヘリウムを入れたクライオスタット運搬中にすれ違った物性実験の先生に「天文が何の為にヘリウムを使うのか？」と素朴な質問な投げかけられたことが今でも強く印象に残っています。本研究ノートはその質問への回答として執筆させて頂くことにしました。詳しい研究内容は、参考文献を当たって頂くこととし、本論はヘリウムを使い出してから過去 20 数年間何をやってきたのかの概説とさせていただきます。

1. ミリ波観測による初期宇宙探査



図 1. スペイン領テネリフェ 島テイデ観測所近辺の夜空。
本多俊介氏撮影。

私の研究室は、2000 年以降、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光観測により宇宙年齢がまだ 10^{-38} 秒歳程度しか経っていない宇宙創成期の解明 [1,2] を目指した研究に取り組んでいます¹。この時

¹ 以下の URL から私の大学院の講義ノートをダウンロードできます。このことについて詳しく理解したい方はこちらをご参照ください。

“<https://www.astr.tohoku.ac.jp/~hattori/CMBCosmology>”

期の真空の相転移により、それ以前は統一されていた強い力・弱い力・電磁気力から強い力の分離が起きたと考えられています。この真空の相転移に伴い僅か 10^{-36} 秒の間に宇宙の半径が 10^{30} 倍以上となる急膨張が起こります。宇宙創成期にこのような激しい膨張が起きた時期があったとする宇宙進化モデルをインフレーションモデルと呼びます。現代の最先端の観測結果から、宇宙の幾何学がほぼ平坦であることが示されていますが、これはインフレーションモデルの予言通りです。また、インフレーションモデルは、銀河・銀河団・超銀河団などの天体の起源について見事な説明を与えます。インフレーション期の時空の量子揺らぎにより生成された重力波が宇宙背景重力波として現在も宇宙に充滿していることを予言します。宇宙背景重力波は非常に微弱で直接検出が可能になるには恐らく 100 年はかかると思われる。宇宙背景重力波の存在は、CMB に特徴的な偏光シグナルを刻印します。この偏光シグナルの検出による宇宙背景重力波の存在証明によるインフレーションモデルの検証が、私の研究室の最大の目標です。

CMB はビッグバン宇宙の残光で、そのスペクトルは、温度 2.725K の黒体スペクトルと非常に良い精度で一致しています。放射強度のピークは、波長約 2mm・周波数約 150GHz のミリ波域に現れます。高精度の CMB 観測には、大気吸収の影響を極力抑えるため標高が高く乾燥した場所あるいは宇宙空間からの観測が要求されます。図 1 は、私の研究室が開発・観測運用に関わる日西蘭韓共同 CMB 偏光観測実験 GroundBIRD 望遠鏡 [2] を設置するカナリア諸島テネリフェ 島の観測

サイトで作業の合間に日本の若手研究者達を撮影した写真です。シルエットの人物は、右から私の研究室の院生の田中氏、京大院生の末野氏、筑波大助教の本多氏と奥様です。GroundBIRD 実験は、来年度から本格観測を開始します。私の研究室では、主にリモート運用のための環境整備と和蘭宇宙研究所(SRON)と共同で本観測用ミリ波超伝導カメラ(Microwave Kinetic Inductance Detectors [3,4])の開発を行っています。

以下の節では、CMB 偏光観測による初期宇宙探査を目指して私の研究室が極低温センターから液体ヘリウムの供給を受けて、これまで行ってきた研究活動について概説します。

2. ミリ波ボロメトリック天体干渉計の開発

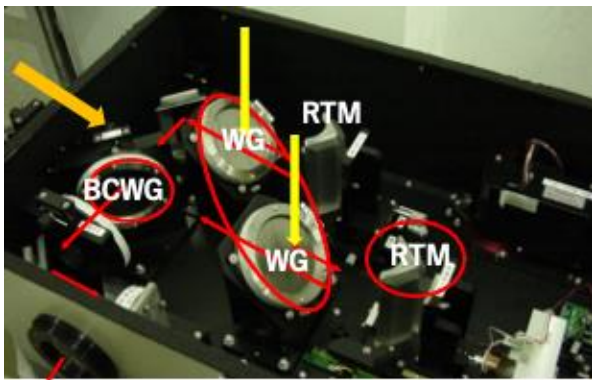


図 2.相互相関型フーリエ分光器。無限遠にある点光源からのビームを黄色の矢印で示した鉛直上方から 2つのワイヤーグリッド(WG)に入射するよう導く。WGによって反射された成分は、ルーフトップミラー(RTM)で反射され再び WGに入射する。偏光方向がフリップするため再入射したビームは、WGを透過し、BCWG と名付けたワイヤーグリッドで合成される。赤丸で囲った RTM を前後に動かすことで合成する二つのビームの光路差に変調をかける。オレンジ色の矢印の方向からビームを入射させることでフーリエ分光器として使用することもできる。

地上からのミリ波観測の大敵は大気存在です。大気の揺らぎを克服して宇宙からのシグナルを拾い出すために、大気放射が変動するより速くシグナルに変調を掛ける手法がとられます。私達は、フーリエ分光器を拡張したミリ波ボロメトリック天体干渉計を開発し、可動鏡の移動によりシグナルに変調を掛けることで大気揺らぎを克服する方針を採用しました[5-7]。通常フーリエ分光器は、自己相関干渉シグナルを測定します。

Wiener-Khinchin の定理に基づいて、取得したシグナルをフーリエ変換することで分光が行えます。ボロメトリック天体干渉計では、相互相関シグナルを測定します。図 2に私たちが作成した相互相関型フーリエ分光器の写真を示しました。二つのワイヤーグリッドに入射するビームの合成することで相互相関干渉シグナルが取得できます。まずフーリエ分光器の場合と同様、光路差についてフーリエ変換し、相互相関シグナルを周波数毎に分解します。得られたデータから Van Cittert Zernike の定理に基づいて、光源の像を合成することができます。光源からのビームが入射する二つのワイヤーグリッドに張られるワイヤーの向きの組み合わせを変えることで4つ全てのストークスパラメーターの天球面上での空間分布を測定することができます。

検出器は、中性子を適量ドーピングした Ge サー

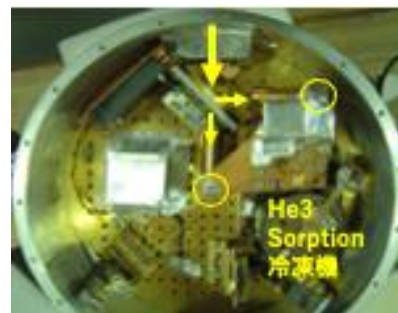


図 3. ボロメータ検出器のクライオスタット内部の写真。

ミスターを用いて私の研究室で開発したミリ波ボロメータを用います。内部の写真を図 3 に示しました。



図 4.左：クライオスタットへのヘリウム注入の様子。右：ガスバックによるヘリウムガス回収の様子。

ボロメータは、 ^3He 吸着型冷凍器を用いて 0.3K 以下に冷却して駆動します。液体ヘリウムをクライオスタットに注入後、減圧して 1.5K まで温度を下げ、 ^3He 冷凍器を駆動します。図 4にサブセンターで液体ヘリウムを注入する様子を示しま

した。ヘリウムの回収率が各研究棟別に計算され課金率が決められる為、注入した場所で回収を行うことが原則です。その為、図4の右の写真のように一立米のガスバックに一旦回収して、サブセンターで回収します。

野辺山電波観測所にこれらの装置を設置して、天体観測への応用実験を行いました。図5にこの時の観測装置の写真を示しました。この装置は、地物の先生のご協力を得て、一時期合同A棟の屋上に設置していました。



図 5. 野辺山電波観測所に設置したミリ波ボロメトリック天体干渉計試験観測施設。

この研究の立ち上げ時、旧科学計測研究所の池澤先生と柴田先生にご指導とご協力を頂きました。図4でヘリウム1000容器から伸びるトランスファーチューブとクライオスタットとの結合に用いるトランスファーチューブは、科計研の工場で作成していただいたもので今も大事に使わせていただいています。

この開発は、実験室[6]および天体観測[7]での実証実験を完了したところで一段落させ、CMB観測への応用は断念し、GroundBIRD実験[2]とSimons Observatory実験[1]に参画して今に至っています。

3. ミリ波吸収源の開発

宇宙背景重力波の存在証明に繋がるCMB偏光シグナルは、非常に微弱な為、検出器への雑音混入を抑制するための様々な工夫が凝らされています。その一つが、望遠鏡の鏡筒などで反射した

光が、検出器へ混入することを防ぐため、望遠鏡内部をミリ波吸収源で覆い尽くすことです。私達は、様々なエポキシ材にカーボンパウダー等様々な物質を色々な割合で混合した物質を3次元プリンターで成形して、優れたミリ波吸収源の開発を行っています[9,10]。図6に京都大学の共同研究者が開発したミリ波吸収源の例を示しました。ミリ波吸収源の設計の最適化には、用いる物質の光学定数(屈折率・吸収率)を知る必要があります。特に使用環境である1Kでの光学定数測定が重要です。その測定が私の研究室の担当です。



図 6. 左: Moth-eye 構造を参考にして 3D プリンターで成形したミリ波吸収源[9,10]。右: 蛾の目の顕微鏡画像。光を反射して目がキラッと目撃動物に発見されないよう広帯域の光に対して反射率を抑制する理想的反射防止構造になっている[8]。

現在、試料の液体ヘリウム温度以下での光学定数測定を実現するため試料用クライオスタットの立ち上げ準備を進めています。これまでは、試料を液体窒素に浸す事で、液体窒素温度での光学定数測定が限界でした。図7に試料用クライオスタットを用いた試料の液体ヘリウム温度での光学定数測定の風景を示しました。この測定では、節2で紹介した相互相関型フーリエ分光器を自己相関型フーリエ分光器として使用し、節2で紹介したボロメータを検出器として用います。

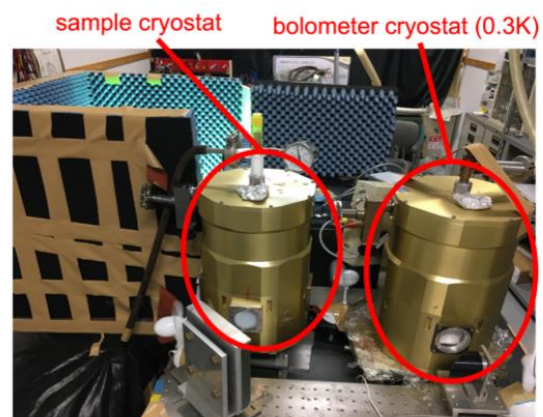


図 7. 試料のミリ波光学定数測定の様子。

現在、異常に速い試料クライオスタットのヘリウムの蒸発速度を抑えるために、クライオスタットの解体・改修・ヘリウム注入実験を繰り返し、一刻も早い1Kに少しでも近い温度での試料の光学定数測定実現を目指して悪戦苦闘しています。

4. フーリエ分光器を応用した垂直入射光に対するミリ波反射率測定系の開発

成形後のミリ波吸収源の性能を知る直接的方法の一つは、使用する温度1Kでの反射率を測定することです。特にシミュレーションとの比較が容易な、垂直入射光に対する反射率測定が重要です。私の実験室で手持ちの装置を有効に活かして、この測定を実現するためフーリエ分光器を応用した垂直入射光に対する反射率測定系の構築に着手しました。図8にこの測定系のポンチ絵を示しました。肝になる光学素子は、偏光無依存で波長に依らず透過と反射に半々に分割できる理想的半透鏡です。

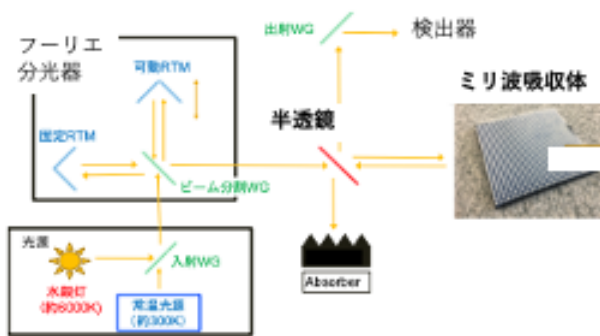
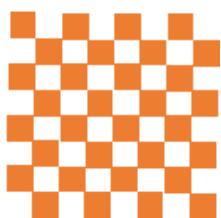


図 8. フーリエ分光器を応用した反射率測定計概念図。

昨年から高度教養教育・学生支援機構の富田知志先生と多元物質科学研究所の菊池伸明先生にご指導・ご協力頂き、自己補追膜を応用した理想的半透鏡の開発に着手しています。図9に自己補追デザインの例を示しました。赤色の部分は、鏡で白抜き部分は空洞です。Babinetの原理によりこのデザインで作られた膜は、波長に依存せず反



射と透過が半々になることが期待されます。ミリ波に対する実際の応用例が、既に発表されています[11]。

図 9. 自己補追膜の例。

5. 星間塵からの熱放射モデル構築

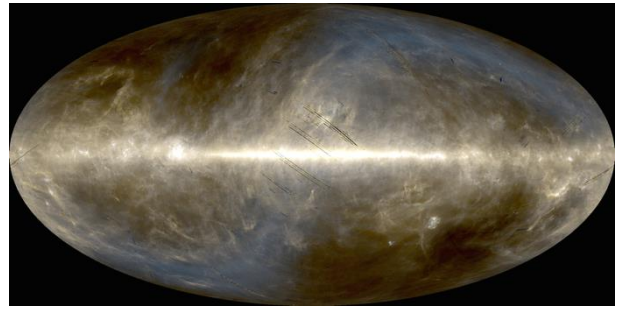


図 10. 「あかり」遠赤外線全天地図。JAXA 提供。

2014年に南極点でCMB偏光観測を行う米国のチームが宇宙背景重力波起源のCMB偏光シグナルを検出したという論文を発表しました[12]。ヤラレタ！と意気消沈したのですが、その後彼らが検出したシグナルが、銀河系内の星間塵からの熱放射であることが判明しました。現在も目指すシグナルは未検出のままで、私たちにも世界初検出のチャンスが残されています。図10に2006年に打ち上げられ、遠赤外線域(波長100ミクロン近辺)で全天探査を行った日本の赤外線観測衛星「あかり」が取得したデータから得られた遠赤外線全天地図を示しました[13]。青白い成分は、太陽系内の塵からの熱放射です。残りの赤みがかった成分は、その殆どが銀河系内の温度約20Kの星間塵からの熱放射成分です。画像中央に帯状に分布する放射強度の強い場所は、銀河系の円盤部分に該当します。この結果は、銀河系の星間塵が円盤状に分布していることを示しています。冒頭の図1の写真では、天の川の中央部が暗くなっています。これは、大量の星間塵によって星からの光が遮られているためです。星間塵の円盤の厚みが星が形作る円盤の厚みより薄いため天の川の中央が暗く、周囲は明るく見えています。図10を見ると星間塵からの熱放射線が無い天域が存在せず、空の至る方向も星間塵に覆われているこ

² BICEP2による原始重力波起源のCMB偏光シグナル検出発表時、私はハーバードに滞在していました。その時行われたセレモニーの様子を取材しまとめた漫画が以下のURLからダウンロードできます。
“https://www.astr.tohoku.ac.jp/~hken/us.tohoku.abc/newsletter/BCNewsLetters_extra.pdf”

とが分かります。「あかり」遠赤外線全天探査は、打ち上げから搭載した液体ヘリウムが枯れるまでの1年半の間、行われました。

私のグループは、JAXA と東大の研究者と協力して得られたデータを処理して、遠赤外線全天地図を作成するプロジェクトに参画しました。私の目的は、CMB 観測にとって邪魔者の星間塵からの熱放射線を CMB 観測データから精度良く差し引くことです。プロジェクトは 2007 年夏に立ち上がり、2014 年 12 月全天地図第一版を完成し全世界に公開しました。私のグループは、「あかり」の装置開発や観測の実施には全く関わっていませんが、遠赤外線全天地図作成には大きな寄与を果たしました。

CMB 観測データから CMB 成分を正しく引き出すことを目的に着手した星間塵の研究ですが、最近はその物性の研究に興味を持って研究に取り組んでいます[14]。実験室で模擬的に星間塵を作成して、20K 以下に冷却した時のそのミリ波光学定数を測定できないかと考えています。

6. まとめ

以上、今日まで 20 数年間天文（私）が何の為に液体ヘリウムを使ってどんな研究を行ってきたのか、を概説させていただきました。詳しい解説は、端折って参考文献をあたってくださという姿勢で記述しました。そのため、突っ込んで理解したいと思われた方にはフラストレーションが溜まる内容になっていると思います。ご質問を持たれた方や研究内容に興味持たれた方は、下記担当者までお問合せください。

服部 誠：

内線 6509, hattori@astr.tohoku.ac.jp

謝辞

野辺山での観測では、液体ヘリウム 4000 を自分で購入し、自分達でクライオスタットに注入していました。購入量の半分程度は、無駄に蒸発させていました。一方、東北大では、技官の方に注入をお任せできます。さらに使用料も使った分

だけリッター400 円程度という破格の価格です。天国のような研究環境を提供して頂いている極低温センター様には、心より感謝しています。研究開発と一緒に取り組んでくれた共同研究者・学生の方々に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] Simons Observatory Collaboration, *J. Cos. Astropart. Phys.* **02** (2019) id.056.
- [2] S. Oguri *et al*, *J. Low. Temp. Phys.* **184**, (2016) 786.
- [3] J. Zmuidzinas, *Ann. Rev. Cond. Matt. Phys.* **3** (2012) 169.
- [4] H. Kutsuma *et al*, *Appl. Phys. Lett.* **115** (2019) 032603.
- [5] I. S. Ohta, M. Hattori and H. Matsuo, *Appl. Opt.* **45** (2006) 2576.
- [6] I. S. Ohta, M. Hattori and H. Matsuo, *Appl. Opt.* **46** (2006) 2881.
- [7] I. S. Ohta *et al*, *IRMMW-THz* **32** (2007) 4516522.
- [8] P. B. Clapham, and M. C. Hutley, *Nature* **244** (1973) 281.
- [9] S. Adachi *et al*, *Rev. Sci. Instr.* **91** (2020) 016103.
- [10] T. Otsuka *et al*, *Appl. Opt.* **60** (2021) 7678.
- [11] Y. Urade *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **114**, (2015) 237401.
- [12] BICEP2 Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **112** (2014) id. 241101.
- [13] Y. Doi *et al*, *Pub. Astron. Soc. Jap.* **67** (2015) id. 5022.
- [14] M. Nashimoto, M. Hattori, F. Poidevin, and R. Genova-Santos, *Astrophys. J. Lett.* **900** (2020) L40.