

理工学研究科

2019年3月

修士論文

制振合金 M2052 のロケット搭載光学系への応用

47017006 太田諒

(物理学専攻)

概要

これまでの宇宙赤外線背景放射(Cosmic Infrared Background ; CIB)の観測結果によると、近赤外領域において既知の星や銀河の光の足し合わせを超過する輝度成分を持っていることが明らかになっている。現在この超過成分の起源は未解明であり、宇宙再電離期に誕生した初代星からの紫外線放射によって説明するモデルや、銀河の合体によって、ハロー領域に弾かれた星の積算光によって説明するモデルが提唱されている。この起源解明のためには、放射スペクトルを可視光から近赤外領域で連続的に観測する必要がある。この放射スペクトルと空間的揺らぎの高精度観測を目的とした宇宙赤外線背景放射観測ロケット実験(Cosmic Infrared Background ExpeRiment-2 ; CIBER-2)を進めている。

CIBは、地球大気の影響で、地上での観測は困難であるから、観測装置を2段式固体ロケットに搭載して大気圏外に打ち上げて観測を行う。また、開発中の観測装置には、全アルミニウム合金で製作された直径 28.5cm の大口径の反射望遠鏡と 15 枚の非球面レンズから成る撮像光学系を搭載し、前例のない広視野・広波長同時観測を可能とする。装置全体は観測時に液体窒素によって 77K に冷却され、自身や周囲の熱による赤外線放射を遮断する仕様になっている。観測装置はロケット打ち上げ時に負荷される振動と液体窒素による冷却を経ても要求される光学的な機能性能を保持しなければならず、これには機械的強度も含まれる。そのため、開発中の装置に対して実際の観測環境に沿った冷却試験と振動試験を実施する必要がある。

観測装置に対して複数回の振動試験を行った結果、装置の光学系の中でも特に望遠鏡部分に複数の振動数で大きな共振が確認された。この大きな共振によって望遠鏡の材料であるアルミニウム合金の降伏応力を超える強い応力が生じることが判明し、共振を抑える構造を検討することが急務となる。ここで要求されるのは、低温下でも高い制振性を持ち観測装置と熱的に良好な接触をする構造である。そこで注目したのが、川原らによって開発された Mn-20Cu-5Ni-2Fe (M2052)合金である。M2052 合金は、金属でありながら高い制振性を持ち、この要求を満たす可能性が高い。そして、M2052 合金を装置の構造に組み込むことによって再び振動試験に臨んだ結果、望遠鏡に対して十分な制振効果が得られた。その後、望遠鏡全体を冷却し振動試験を行った結果、常温時と変わらない制振効果が得られ、低温下でも十分な制振性を持つことが判明した。

M2052 合金は制振構造としては十分な性能を持つことが分かったが、冷却時に装置の素材であるアルミニウム合金と良好な熱接触をすることが好ましいため、M2052 合金の低温下での伝熱性を調査する必要がある。そこで、M2052 合金の熱伝導率を液体窒素温度から常温にかけて測定し、その温度依存性を求めた。その結果、M2052 合金を組み込んで冷却時の望遠鏡の伝熱性に問題がないことを確認した。

目次

第 1 章 序論

- 1.1 初期宇宙と宇宙背景放射
- 1.2 宇宙赤外線背景放射(CIB)の観測

第 2 章 ロケット実験 CIBER-2

- 2.1 CIBER-2 概要
- 2.2 CIBER-2 観測装置

第 3 章 機械環境試験

- 3.1 概要
- 3.2 ランダム振動
- 3.3 振動を評価するパラメータ
- 3.4 CIBER-2 観測装置振動試験
- 3.5 試験のシミュレーション
- 3.6 全体系振動試験
- 3.7 望遠鏡単体振動試験

第 4 章 M2052 合金の制振性

- 4.1 M2052 合金の物性
- 4.2 M2052 合金を用いた振動試験
- 4.3 試験結果
- 4.4 データ解析

第 5 章 M2052 合金の伝熱性

- 5.1 伝熱の原理
- 5.2 熱伝導率の測定方法
- 5.3 実験のシミュレーション
- 5.4 測定結果
- 5.5 考察

第 6 章 本研究の総括

- 6.1 結論
- 6.2 今後の展望

謝辞

参考文献

第 1 章 序論

1.1 初期宇宙と宇宙背景放射

おおよそ 138 億年前にビッグバンによって始まったとされる宇宙は、非常に高温かつ高圧で電子や陽子は電離した状態であった。その後、膨張により冷却され宇宙の温度はおおよそ 3000K まで低下し、誕生から 38 万年後に電子が原子核に捉えられて最初の水素原子が生まれた。この中性化された時期は宇宙マイクロ波背景放射として観測されており、そのスペクトルは 2.73K の黒体放射に極めてよく一致する。しかし、宇宙背景放射の偏光観測によると、近傍の宇宙からおおよそ 125 億光年までの宇宙は電離された状態であることが知られている。したがって、赤方偏移 $z \sim 10$ までに宇宙は何らかの原因で再び電離されている。宇宙マイクロ波背景放射の観測により、この宇宙再電離は $z \sim 20$ に始まり、 $z \sim 11$ ではほぼ電離が完了していたことが分かっている。この宇宙空間に存在する水素原子を再び電離させるには大量の紫外線放射が必要であり、そのような高いエネルギーを持つ紫外線を放射した原因として、非常に重い第一世代の天体やその超新星爆発によって生まれるブラックホールが考えられている。

第一世代の天体は金属を含まない星であり、現在まで未だ観測された例はなく理論的な存在である。特に $z \sim 11$ から $z \sim 20$ の間に生成された第一世代の天体は太陽の質量の 100 倍を超える大質量天体であり、このような大質量で金属を含まない星はエディントン限界で輝いており、 $T \sim 100000\text{K}$ の黒体放射スペクトルに一致すると考えられている[1]。この時代の天体の観測を個別に直接行うことは、現在の観測技術では難しい。しかし、これらの積算光は背景放射として観測することが可能である。このような第一世代の天体の光を受けて電離した周囲の水素原子はライマン α 線を放射し、その放射は赤方偏移により現在では近赤外線領域おおよそ 1000nm にピークを持つスペクトルとして観測できると予測される。

1.2 宇宙赤外線背景放射(CIB)の観測

宇宙赤外線背景放射(CIB)とは、空の明るさから太陽による黄道光、星の光、銀河内拡散光などを差し引いて残る銀河系外に起源を持つ赤外線拡散光である。したがって、CIB を観測するためには、観測した空の明るさから前景放射を差し引く必要がある。特に近赤外線領域において、空の明るさの中で大きな成分を持つのは地球の大気光と太陽による黄道光である。大気光はおおよそ高度 100km に存在する OH 分子の振動回転による放射である。この放射を避けて CIB を観測するためには、大気圏外で観測を行う必要がある。また、大気光のない宇宙で支配的な放射は黄道光であるため、CIB を観測するためには、空の明るさから黄道光を差し引く必要がある。NASA の観測衛星 DIRBE/COBE によって黄道光の強さは季節的に変化することが明らかになり、この結果を用いて Kelsall らにより黄道光のモデル化がなされている[2]。これまでの CIB 観測はこのモデルを用いることが一般的であった。

近年の CIB 観測結果によると、近赤外線領域で遠方銀河からの銀河積散光以外の超過成分が含まれていることが明らかとなった。そこで、CIBER-2 の前身となるロケット実験 CIBER が実施され 0.8~1.7 μm の連続スペクトルを観測した。黄道光と銀河拡散光による CIB への寄与は、それぞれの黄緯依存性と銀河依存性の空間相関を用いて推定されるため、CIBER では複数の天域を観測した。CIBER の観測結果によると、図 1.1 に示すように CIB は 1.5 μm 付近にピークを持つスペクトル形状であることが判明した。また、図 1.2 に示すように CIB の強度の空間的揺らぎは 15 分角程度の角度スケールで、黄道光や既知銀河の全ての空間的揺らぎの足し合わせの予測値を大きく上回る結果が得られた。

宇宙再電離の時期に誕生した第一世代の天体からの寄与によって CIB を説明するモデルでは、CIB のスペクトル強度は 0.5~1[nWm⁻²sr⁻¹]程度と推定されており、CIBER の観測結果による CIB の超過成分は 10[nWm⁻²sr⁻¹]程度の大きさを持つので、初代星からの寄与だけでは説明できないことが明らかとなった。そこで、近傍銀河(Z<2)が銀河間相互作用する際に、潮汐力を受けてダークハロー領域に飛ばされた大量の暗い星々の拡散光(Intra-Halo Light ; IHL)が寄与しているという新たなモデルが提唱された。そこで、新しい CIB 観測ロケット実験 CIBER-2 によって CIB のさらなる精密観測を実施し、IHL モデルの検証を行う。図 1.3 から CIB のゆらぎの平均輝度に対する予測値の比率[5]は IHL モデルでは 10%程度、初代星モデルでは 1%程度とされており、その検出のためには CIBER の 10 倍の感度を要する。

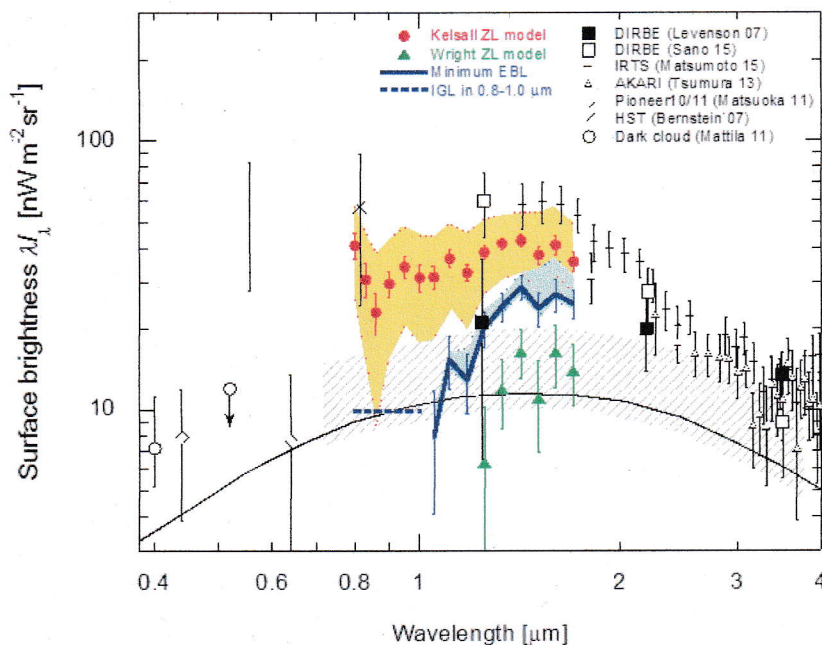


図 1.1 : CIBER で観測された CIB スペクトル[3]

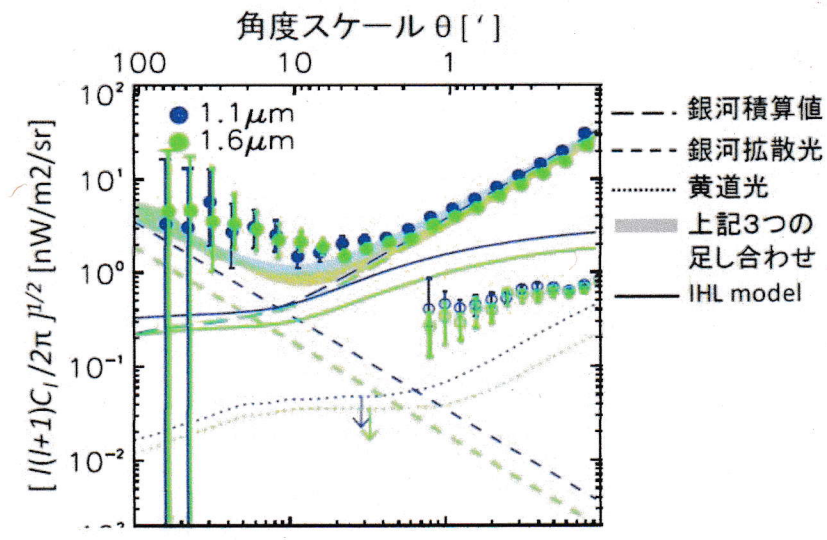


図 1.2 : CIBER による CIB の空間的揺らぎの実測値[4]

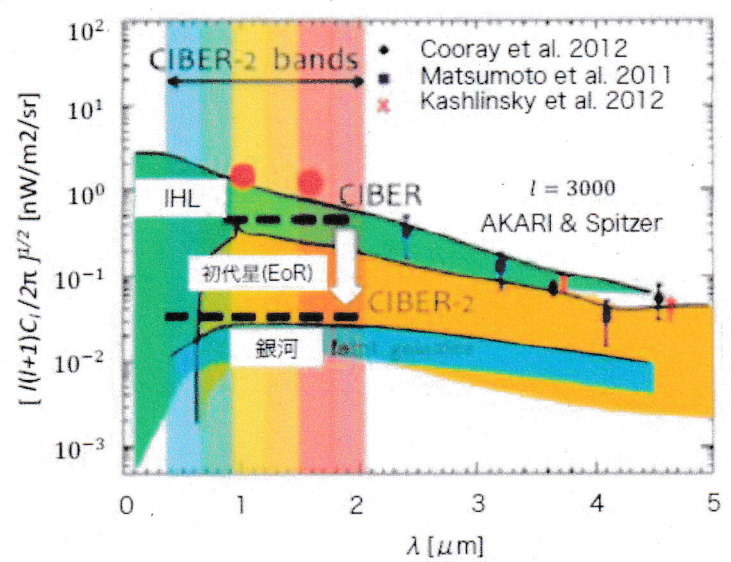


図 1.3 : 各モデルの CIB 揺らぎの放射スペクトルと CIBER による 1.1μm と 1.6μm の観測結果の比較