

論文の内容の要旨

Spectral measurements of the diffuse near-infrared radiation with the CIBER rocket experiments

(CIBER ロケット実験による近赤外線拡散放射のスペクトル観測)

氏名 新井俊明

1. 概要

近赤外線波長域における宇宙からの拡散放射は、惑星間ダストによる太陽光の散乱光である黄道光、銀河系内の星の重ね合わせである星の光と星間ダストによるその散乱である銀河系内拡散放射、さらに、系外銀河光の重ね合わせや宇宙初期に起源を持つ宇宙背景放射からなる。宇宙からの拡散放射は、星間物質や宇宙進化史に関する重要な情報を含んでいる。しかし、これらの研究の「かぎ」となる近赤外線波長域における拡散放射のスペクトル観測は、ほとんど行なわれてこなかった。本研究は、近赤外線拡散放射のスペクトル観測を行なうロケット実験CIBER(Cosmic Infrared Background Experiment)の実施と、その観測データに基づいて宇宙ダストの研究を行なうものである。

2. 目的

近赤外線拡散放射の観測は、地球大気の強力な放射に阻まれるため地上からは行なうことが困難であり、衛星やロケットを用いて宇宙空間から行なわれてきた。図1には、これまでに観測された宇宙からの拡散放射の輝度を、可視光から近赤外線までの波長に対して、全天で最も暗い空について示す。黄道光(図1の青色のデータ)の輝度は全波長で卓越し、その放射スペクトルはその起源から太陽に類似すると考えられるが、短波長の近赤外線では詳細がわかっていない。既知の系外銀河の重ね合わせ(図1

の実線)は、等方な輝度分布をもつ宇宙背景放射として観測されるはずであるが、宇宙初期天体からの寄与も含めて、宇宙背景放射の輝度はよくわかっていない。銀河系内拡散放射(図1の赤色データ)は、可視域において系外銀河の重ね合わせと同等の輝度をもつが、近赤外線においては輝度が極めて低いことや他の放射成分との混合により、未知のままとなっている。つまり、過去に観測が充分に行なわれてこなかった可視から近赤外の波長域において、拡散放射の放射スペクトルを測定することが、重要な課題となっている。

黄道光と銀河系内拡散放射は、いずれも宇宙ダストによる星の光の散乱が起源であるため、これらのスペクトル観測により、ダストのサイズや構成物質の屈折率や吸収率などの物理的性質に関する情報が得られる。また、太陽系では、太陽とダストおよび観測者間の幾何学的配位が明確であるため、黄道光の偏光測定により、ダストの散乱過程について直接的な情報がスペクトル測定とは独立に得られる。本研究では、以上のような方法により、太陽系および銀河系のダストの性質を明らかにする。これらの結果は、系外惑星系や系外銀河の研究基盤ともなりうる。

これまでの宇宙背景放射の観測値(図1の黒色のデータ)は、系外銀河の重ね合わせよりもはるかに高い輝度をもつことがわかっており、宇宙初期起源の放射による可能性が議論となっている。放射起源の候補として、宇宙初期に形成された大質量の星々や原始ブラックホールによる紫外線放射があげられており、それらが事実ならば宇宙進化研究に極めて大きなインパクトを与える。しかし、ここに示した宇宙背景放射の観測結果は、観測した全輝度から黄道光や銀河系内拡散放射からなる前景放射の輝度を差し引いて得られたものであり、予測よりも高い輝度は前景放射の不定性に起因する可能性もある。つまり、黄道光や銀河系内拡散放射の精度の良い成分分離とその詳細な研究が宇宙背景放射の研究においても最も重要な課題である。

3. 観測

我々はこれまでに宇宙の拡散放射の分光観測が行われていない波長 0.8-1.8 μm を観測するためのロケット実験 CIBER を行っている。CIBER には、拡散放射の分光観測と変更分光観測する装置 LRS(Low Resolution Spectrometer、表1に装置の仕様を示した)を始めとする4つの装置を搭載している。本論文では、LRS の観測による拡散放射の(偏光)分光観測について述べる。

我々はこれまでに4回の打ち上げ観測を行ってきた(1回目:2009年2月25日、2回目:2011年7月10日、3回目:2012年3月22日、4回目:2013年6月5日)。1回目から3回目はアメリカ合衆国の White Sands Missile Range、4回目はアメリカ合衆国の Wallops Flight Facility で打ち上げをおこなった。また、1,2,4 回目の観測ではスペクトル観測を、3回目の観測では偏光観測を行った。本論文では、これらの観測のうち、2回目から4回目のデータを扱う。それぞれの観測では5つまたは6つの天域を $5^\circ \times 5^\circ$ の視野で、波長 0.8-1.8 μm を波長分解能 $R = \Delta \lambda / \lambda = 15-30$ で観測を行った。本観測では、拡散放射を精度よく成分分離することが重要であるため、観測天域は黄道光や銀河系内拡散放射を、空間的な分布を元に成分分離できるように選んだ。

我々はこのロケットを用いて、高度 200 km 以上の上空で 200 sec 以上の観測時間にわたり良質なデータを得ることに成功した。我々は得られた拡散放射を、地上で行った様々な実験を元に、校正した。

この校正により生じる系統的誤差は3%程度に押さえることに成功した。ロケットの高度が250 kmより低い天域では、残留大気放射が観測したスペクトルを汚染していたが、時間減衰する成分と高度変化する成分を持つモデルを作り、無視できる程度(250 kmより高高度で<1%以下)まで差し引くことに成功した。また、点源として検出できた星についてはマスクすることで取り除き、検出限界よりも暗い星は2MASSと銀河のモデルの星カタログを用いてモンテカルロシミュレーションを行うことで取り除いた。

4. 結果

この結果得られた拡散放射には黄道光、銀河系内拡散放射、宇宙背景放射が含まれている。まず、黄道光を成分分離する。我々は過去に黄道光を全天観測したDIRBE/COBE衛星の観測結果との空間分布に関する相関を取ることで、黄道光の成分を抽出した。図2は上記のようにして得られた黄道光のスペクトルを示している。我々は黄道光のスペクトルは太陽光のスペクトルに比べて赤いことを明らかにした。図3に、3回目打ち上げ観測で得られた黄道光の偏光スペクトルを示す。得られた結果は、太陽離隔が90度(NEP: Nothe ecliptic pole)と130度(BootesB)の天域における偏光スペクトルである。我々は観測したスペクトルと偏光スペクトルを、ダストの散乱モデルと比較することで惑星間ダストの大きさが波長に比べて十分大きいことを明らかにした。 $(2\pi a \gg \lambda)$ 。また、我々の観測した黄道光のスペクトルと偏光スペクトルは小惑星や彗星のものとよく一致した。この結果は、惑星間ダストの起源が小惑星または彗星であることを強く示唆する。

銀河系内散乱光については、光学的に薄い極限では星間ダストによる散乱光の輝度と熱放射の輝度は相関することを利用し、過去にIRAS衛星により観測された星間ダストの熱放射マップと空間的な相関を取ることで、観測データから銀河系内拡散放射を抽出した。銀河系内拡散放射のスペクトルを図4に示した。我々の観測結果が、波長域0.8-1.8 μm における銀河系内拡散放射のスペクトルとしては初めてのものである。我々は、観測を行った波長域において、銀河系内散乱放射は典型的な星のスペクトルより青いことを示した。この結果は、銀河系内ダストは比較的小さなダスト(典型的なサイズ $a=0.06 \mu\text{m}$)に支配されていることを示す。

これらの観測結果から、惑星間ダストと星間ダストのサイズ分布が異なることがわかる。この違いは、それぞれのダストの起源に起因するものだと考えられる。惑星間ダストは、そのサイズが大きいことから、彗星や小惑星の衝突や崩壊によって生じたものであると考えられる。一方、星間ダストは波長よりも小さなダストが支配的であることから、星から放出したガス中の重元素が凝縮したものであると考えられる。

宇宙背景放射の前景放射である黄道光と銀河系内拡散放射を精度よく決定したことによって、我々は宇宙背景放射に対する検出限界を推定することができる。推定した 1σ の検出限界は、 $10 \text{ nWm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ である。もし、宇宙背景放射がこれまで観測されているように約 $50 \text{ nWm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ の輝度を持つとすれば、我々は 5σ の精度で測定できる。一方、宇宙背景放射が既知の銀河の足し合わせで説明できる程度(約 $10 \text{ nWm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)の場合には 1σ で測定することができる。

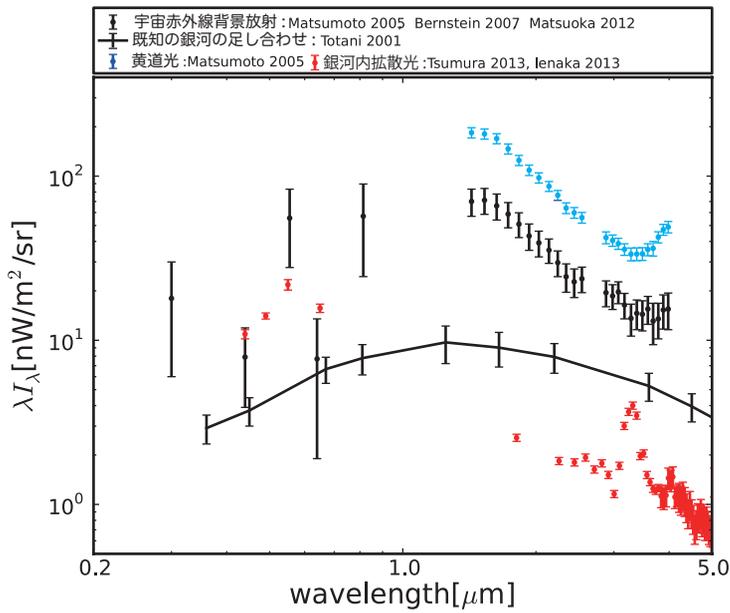


図 1 : 過去に観測されてきた黄道光、銀内拡散光、宇宙赤外線背景放射の輝度。既知の銀河の足し合わせから予測される宇宙赤外線背景放射を実線で示した。

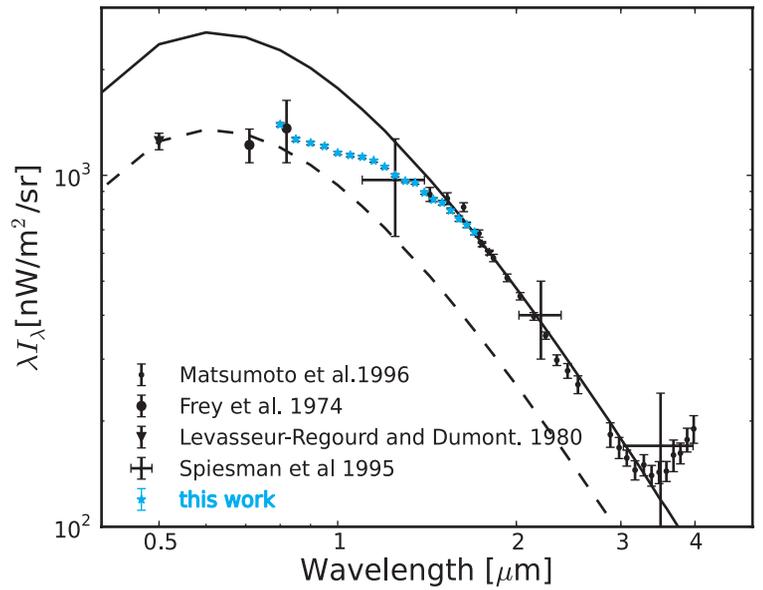


図 2 : 黄道光のスペクトル。我々の観測結果を青で示した。過去に可視域や長い波長域で観測されたデータを示した。黒い線や破線は太陽スペクトルを 1.8 μm と 0.5 μm でスケールしたものを示した。

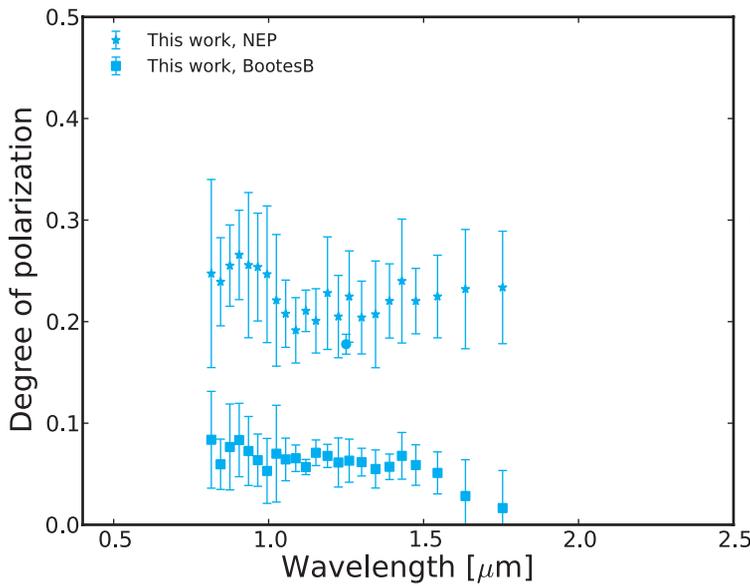


図 3 : 黄道光の偏光スペクト。NEP と BootesB の 2 天域の観測結果を示した。縦軸が偏光度、横軸が波長を示している。また過去に観測された可視域の結果と近赤外線域の結果を示した。

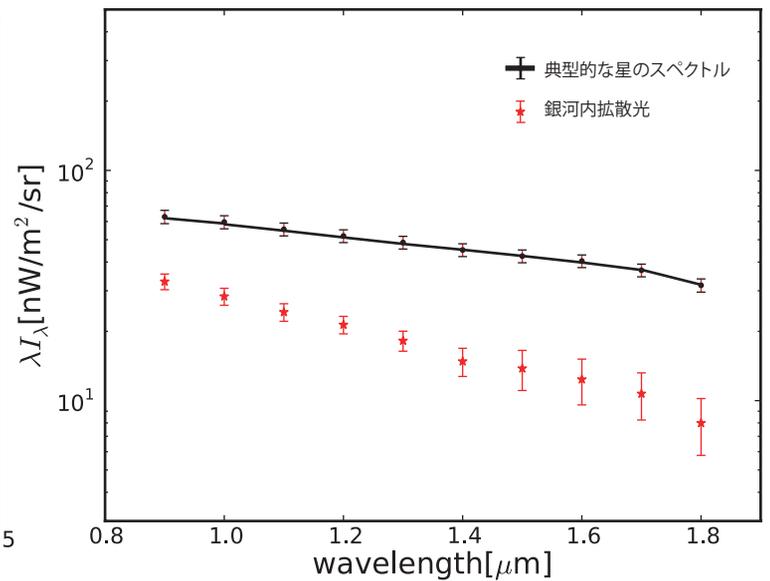


図 4 : 観測した銀河内拡散光のスペクトル。我々の観測結果を赤で示した。実線は様々な星のスペクトルを平均したものである。

パラメータ	口径	波長	波長分解能	検出器
値	50 mm	0.8-1.8 μm	$R = \Delta \lambda / \lambda$ 15-30	256×256 HgCdTe
パラメータ	視野	空間分解能	検出限界	暗電流
値	5°×5°	1.4' × 1.4'	5 nWm ⁻² sr ⁻¹ (3 σ, 200 pix, 25 sec)	< 0.6 e-/sec

表 1:LRS の仕様一覧