

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2006-2008

課題番号：18204018

研究課題名(和文) 宇宙第一世代の星の観測的研究

研究課題名(英文) Observational study of the first stars of the Universe

研究代表者

松本 敏雄 (MATSUMOTO TOSHIO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部赤外・サブミリ波天文学研究系・名誉教授

研究者番号 60022696

研究成果の概要：

近赤外領域(波長1-5 μm)において空の明るさと揺らぎを求めた。赤外線天文衛星「あかり」の観測から100秒より大きな角度にこれまで知られている放射成分では説明できない揺らぎが存在し、これが宇宙第一世代の星の痕跡である可能性が高いことを示した。また、波長1 μm 付近でのスペクトルと空の揺らぎの観測を目的としてロケット実験CIBERを企画・遂行した。観測は2009年2月に成功し興味ある結果を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	17,300,000	5,190,000	22,490,000
2007年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2008年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
年度			
年度			
総計	27,000,000	8,100,000	35,100,000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：宇宙論、赤外線天文学、ロケット実験

1. 研究開始当初の背景

当時近赤外領域に未知の放射成分が存在し、それが宇宙第一世代の星である可能性がすでに指摘されていたが、宇宙からの観測が不可欠なためデータはIRTS, COBEに限られていた。このため、新たな宇宙からの観測、とりわけこれまで観測例のなかった波長1 μm でのスペクトルおよび広い角度範囲での揺らぎの観測が望まれていた。

2. 研究の目的

ビッグバン以後宇宙はどのように進化してきたか、一様等方な宇宙から現在のような

複雑な宇宙がどのように形成されたか、は天文学の未知の課題として残されてきた。とりわけ、宇宙が始まって最初の星(種族 III)の観測は重要とされてきたが、個々の天体はあまりにも暗く直接観測は困難であった。このため、近赤外領域での背景放射の観測結果から手前の放射成分の寄与を差し引き、種族 III の星の痕跡を探ることを試みた。我が国初の軌道赤外線望遠鏡IRTS, NASAの宇宙背景放射観測衛星COBEによって行われ観測の結果、近赤外領域に未知の超過放射成分(以下CIBと略す)が等方的に存在することが明らかとなった。この放射成分は種族 III

によるものと思われるが、それを確認するのはさらなる観測事実が必要であった。このため、我々は本研究において以下の目的を設定した。

(1)波長 1 μm 付近のスペクトルの観測

種族 III の星の光は周囲のガスを電離し、最終的にかなりのエネルギーがライマン α として放射される。背景放射のスペクトルを詳しく調べることで種族 III の星形成が行われた時期の赤方偏移を知ることが出来る。とりわけ、これまで観測例がない波長 1 μm 付近のスペクトルを観測することにより種族 III の星形成が終わった時期がわかるとされている。波長 0.8-1.6 μm の範囲での低分散分光観測を広い黄緯範囲で行い、CIB のスペクトルに特徴的な構造があるかどうかを調べる。この目的を達成するためにロケット実験を計画・実行する

(2)背景放射の揺らぎの観測

種族 III の星起源と思われる背景放射の存在が IRTS, COBE の観測から明らかになったが、その解析にはまだ不確定性が残されている。とりわけ、もっとも大きな前景成分である黄道光をモデルによって差し引いていることが問題点として指摘されている。このためモデルと無関係に CIB を観測する手段として揺らぎの観測が重要である。黄道光は極めてスムーズであることがわかっているため、有意な揺らぎが検出されればそれが CIB 起源であることを示していると考えられるからである。この目的のために我が国初の赤外線天文衛星「あかり」によって近赤外領域における空の揺らぎの観測を行う。

3. 研究の方法

上記 2 目標を達成するため、以下のミッションを遂行する。

(1) 観測ロケット実験 CIBER (Cosmic Infrared Background Experiment)

波長 1 μm 付近のスペクトルを観測するためにはスペース観測が不可欠である。衛星観測には時間と膨大な経費が必要なため、手軽に行うことが出来る観測ロケット実験を行う。日本の観測ロケットはデータ転送速度が遅く、姿勢制御の精度にも問題があるため NASA の観測ロケットを用いる。このため、カリフォルニア工科大学の J.Bock 博士を代表者とし、アメリカのいくつかの大学、及び韓国天文研究院(KASI)と協力して実験を進めることとした。

(2) 「あかり」による CIB の揺らぎの観測

「あかり」は 2007 年 2 月に打ち上げられた我が国初の赤外線天文衛星である。「あかり」に搭載されている赤外線カメラによって黄道の北極方向(NEP)を観測し、CIB の揺らぎの検出を目指す。「あかり」は NASA の赤外線天文衛星 Spitzer に比べ、2 μm 帯の波長

域で観測できること、コールドシャッターを備えているため信頼度の高いダークフレームが得られることが特徴である。

4. 研究成果

(1) 観測ロケット実験 CIBER

CIBER は日、米、韓の国際協力で進められた。各国の分担は以下のものであった(但し、経費の分担と同じではない)。

日本: クライオスタット、光学系の設計製作
アメリカ: 検出器、搭載エレクトロニクス、地上試験、打ち上げ作業

韓国: 地上試験設備

装置の製作は 2006 年度から始まり、2007 年夏にクライオスタットと光学系が完成した。全体の構成図を図 1 に示す。

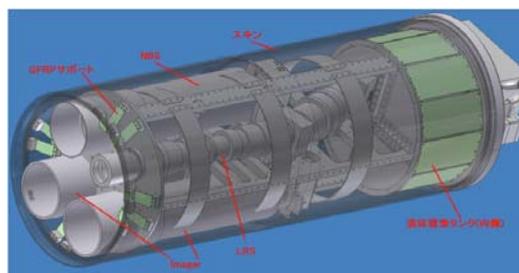


図 1 CIBER の構成図

CIBER は 4 台の望遠鏡よりなる。以下、その仕様を示す。

LRS: 低分散分光器

口径	7.3 cm
波長範囲	0.7-1.6 μm
波長分解能	$\lambda/\Delta\lambda \sim 20$
検出器	HgCdTe, 256x256
画角	4 度 x 4 度、1 分/pixel

IMAGER (2 台)

口径	10 cm
波長範囲	I(0.9 μm) and H(1.6 μm)
検出器	HgCdTe, 1024x1024
画角	2 度 x 2 度、7 秒/pixel

NBS: Narrow band spectrometer

口径	7.5 cm
波長範囲	0.8542 μm
検出器	HgCdTe, 256x256
画角	8.5 度 x 8.5 度、2 分/pixel

LRS の目的は 1 μm 付近でのスペクトルを正確に測定することである。IMAGER は I 及び H バンドで空の揺らぎの測定を目的としている。NBS は太陽のフラウンホーファー線(CaII)を挟帯域で測定し黄道光の寄与を調べることを目的としている。

完成したクライオスタット、望遠鏡は 2007 年 7 月にカルテクに送られ、検出器を取り付

けたうえ、搭載エレクトロニクスと組み合わせて各種試験、較正が行われた。この試験には日本から大学院学生津村耕司が常時参加し、松本、松浦、和田は必要に応じて適宜参加した。

2008年7月にニューメキシコ州ホワイトサンズのNASAロケット基地において第一回打ち上げキャンペーンが行われた。しかし、この時には我々の装置に不具合があったため、一旦カルテクに持ち帰り、2009年2月に再挑戦を行った。幸い今回は大きな問題もなく、2月25日午前3時45分にCIBERは打ち上げられた(図2)。ロケットは最高高度330kmに達し、約5分間にわたって目的としたデータを得ることに成功した。



図2 CIBER 打ち上げの瞬間

結果は現在解析中であるが、日本側で解析中のLRSの結果を一部以下に示す。

問題点として長波長側で熱放射成分が漏れ込んでいることがわかった。これはバップルが短く性能が十分ではなかったためと考えられる。また、 $1.6\mu\text{m}$ にピークを持つ環境放射も低高度で観測された。これらの結果、とりあえず、良好なデータは波長 $1.4\mu\text{m}$ 以下に限られることになった。

とはいえ、データの質はよくS/Nについても当初の予定通りの結果が得られた。観測された各点のデータの高黄緯と低黄緯のスペクトルの差を求め、これを黄道光のスペクトルと見なした結果が図3である。黄道光は太陽光を惑星間空間塵が散乱したものであり、散乱が一様であるなら本来太陽光と同じスペクトルを示すはずである。CIBERの結果は $1\mu\text{m}$ 付近での黄道光は極めて深い吸収を持つことが示された。これは惑星間空間塵の持つ物性的な性質の結果であると考えられ、塵の起源に関わる興味深い結果である。

黄道光のスペクトルがこれまで考えられ

てきたものとはかなり異なることから、CIBERの検出についてもそれなりの考慮が必要となった。今後黄道光とともに一様等方成分がどの程度残るか解析を続ける予定である。

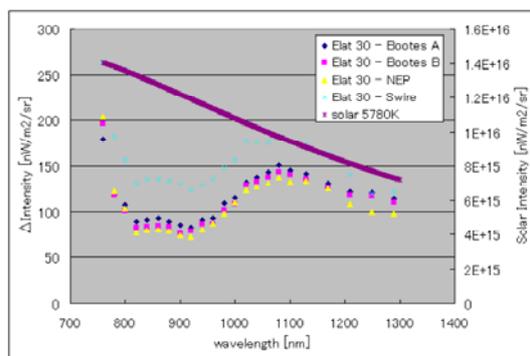


図3 CIBER で得られた黄道光のスペクトル

なお、観測装置は一部損傷を受けたが無事回収された。バップル性能の向上など、改修を行った上、1年後に再度実験を行う予定である。

(2) 「あかり」による空の揺らぎの観測

「あかり」は黄道の北極方向での大規模サーベイを行った(図4)。この際装置の安定性を確認するため、特定の方向を月2回近赤外、中間赤外の全波長域で撮像観測を行った。このうちの近赤外領域の撮像データを用いて揺らぎの解析を行った。

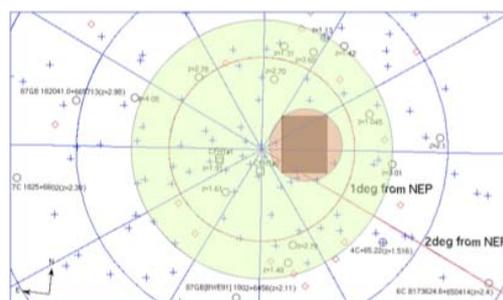


図4 「あかり」が行った北極サーベイ。濃い茶色の部分の中心が定期的に観測した領域。

観測波長は2.4, 3.2, $4.1\mu\text{m}$ 。画角は10画角、1.5秒角/pixelである。地球光が鏡筒に入らない2007年9月から2008年3月までの撮像データを足し合わせ、S/Nの向上をはかった。さらに星、銀河などの手前の天体をマスクし、空の揺らぎを求めた。

図5に最終的な空の揺らぎの結果を示す。約24等(AB)より明るい銀河が除かれている

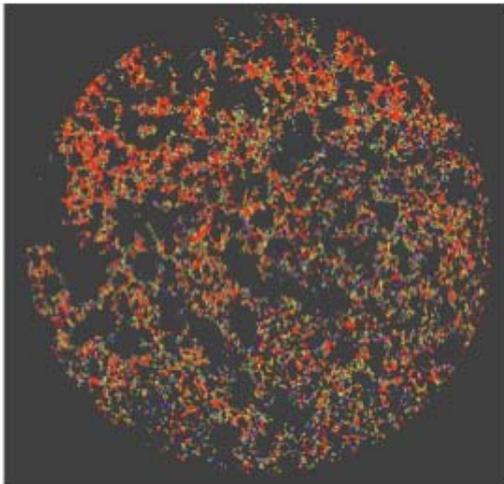
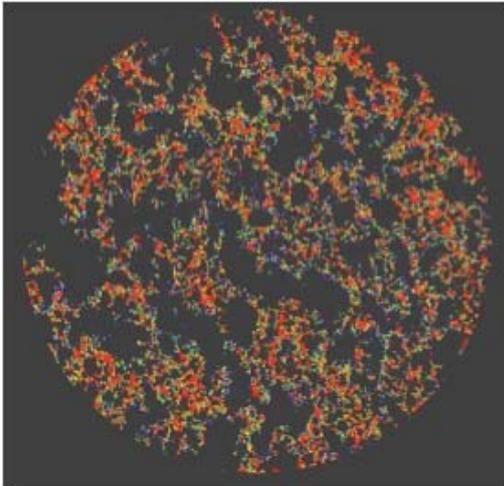
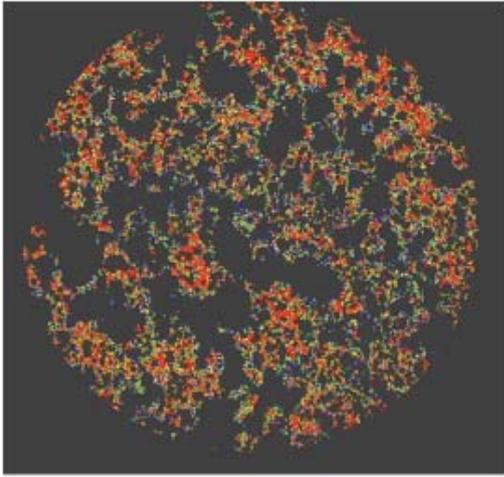


図5 「あかり」によって得られた北黄極方向の空の揺らぎマップ。上から波長 2.4, 3.2, 4.1 μm の結果。直径は 10 分角。

図5の結果は全ての波長帯において大きな構造が存在することを示している。2点相関関数およびパワースペクトル解析を行った結果、100秒角以上に銀河のショットノイズでは説明できない大きな揺らぎが存在することが示された。また、この揺らぎ成分は青い星のスペクトルを持つこと、また波長間の相関は弱いことがわかった。これらの結果はSpitzerの観測にたいして言われている近傍銀河のクラスタリングが揺らぎの原因とする説を否定するものである。

「あかり」で見いだされた大角度での揺らぎは黄道光、銀河光、銀河のクラスタリング等の既知の放射成分では説明できないものであり、種族 III の星による揺らぎである可能性が高い。今後「あかり」による大規模サーベイのデータを解析することにより、より貴重な知見が得られるものと期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

① Swinyard, B., Nakagawa, T., Kawada, M., Matsumoto, T., Matsuura, S., Wada, T. 他 160 名, The space infrared telescope for cosmology and astrophysics: SPICA A joint mission between JAXA and ESA, Experimental Astronomy, Vol. 23-1, 193-219 (2009) 査読有

② Wada, T. 他 12 名, AKARI/IRC Deep Survey in the North Ecliptic Pole Region, Publ. Astron. Soc. Japan, Vol. 60, S517-529 (2008) 査読有

③ Kawada, M. Matsuura, S. 他 11 名, Performance of an Imaging Fourier Transform Spectrometer with Photoconductive Detector Arrays: An Application for the AKARI Far-Infrared Instrument, Publ. Astron. Soc. Japan, Vol. 60, S389-397 (2008) 査読有

④ Matsuhara, H., Wada, T., Matsuura, S., Nakagawa, T., Pearson, C. P., Kawada, M., Shibai, H. The AKARI (ASTRO-F) Mission as a Diagnostic Tool of Galaxy Evolution, ASP Conference Series, Vol. 381, 507 (2008) 査読有

⑤ Hirabayashi, M., Matsumoto, T. 他 10 名, Thermal design and its on-orbit performance of the AKARI cryostat, Cryogenics, Vol. 48, 189-197 (2008) 査読有

⑥ Takahashi, K., Ichiki, K., Sugiyama, N. Electromagnetic properties of the early universe, Physical Review D, Vol. 12,

124028 -124039 (2008) 査読有

⑦ Murakami, H., Kawada, M., Matsumoto, T., Matsuura, S., Wada, T. 他 80 名, The Infrared Astronomical Mission AKARI, Publ. Astron. Soc. Japan 59, S369--S376 (2007) 査読有

⑧ T. Onaka, H. Matsuhara, T. Wada, T. Matsumoto, 他 24 名, The Infrared Camera (IRC) for AKARI -- Design and Imaging Performance, Publ. Astron. Soc. Japan 59, S401--S410 (2007) 査読有

⑨ T. Wada, T. Onaka, T. Matsumoto, H. Murakami 他24名, Infrared Camera (IRC) Deep Survey in the Performance-Verification Phase, Publ. Astron. Soc. Japan 59, S515--S528 (2007) 査読有

⑩ Zaroubi, S., Thomas, R. M., Sugiyama, N., Silk, J., Heating of the intergalactic medium by primordial miniquasars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 375, Issue 4, pp. 1269-1279 (2007) 査読有

⑪ J. Bock, T. Matsumoto, Dae-Hee Lee, T. Wada, S. Matsuura, K. Tsumura 他 9 名, The cosmic infrared background experiment, New Astronomy Review, Vol. 50 I-3, 215-220 (2006) 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① 松浦周二、第一世代天体の赤外線観測の展望、日本物理学会、2006年9月22日、奈良女子大学
- ② 津村耕司、宇宙赤外線背景放射の広視野 2 次元揺らぎ解析、日本天文学会、2007年9月27日、岐阜大学
- ③ 松浦周二、近赤外宇宙背景放射のロケット観測実験:CIBER - 搭載機器開発の現状、日本天文学会、2007年9月27日、岐阜大学
- ④ 松浦周二、AKARI Deep Field South における遠赤外線宇宙背景放射の検出、日本天文学会、2008年9月12日、岡山大学
- ⑤ 津村耕司、宇宙赤外線背景放射のロケット観測計画 CIBER - 装置開発と打ち上げ報告-、日本天文学会、2008年9月13日、岡山大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 敏雄 (MATSUMOTO TOSHIO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・名誉教授

研究者番号: 66622696

(2) 研究分担者

松浦周二 (MATSUURA SHUJI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・助教

研究者番号: 10321572

和田武彦 (WADA TAKEHIKO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・助教

研究者番号: 50312202

川田光伸 (KAWADA MITSUNOBU)

名古屋大学大学院・理学研究科・講師

研究者番号: 50280558

杉山直 (SUGIYAMA NAOSHI)

名古屋大学大学院・理学研究科・教授

研究者番号: 70222057

(3) 連携研究者