

CIBER-2 計画と ISAS 観測ロケットによる 宇宙赤外線背景放射観測の展望

松浦周二, 佐野圭, 橋本遼, 児島智哉, 太田諒, 瀧本幸司, 檀林健太, 山田康博, 鈴木紘子, 古谷正希
(関西学院大), 津村耕司 (東北大), 高橋葵 (総研大/ISAS), 松本敏雄, 和田武彦, 中川貴雄 (ISAS),
James Bock (Caltech) and CIBER collaboration (Caltech, Rochester IT, UC Irvine, KASI, ASIAA)

概要

初代星や原始ブラックホールなどによる宇宙初期天体の放射は、可視光や近赤外線宇宙背景放射として観測される可能性がある。これまでの人工衛星や観測ロケットを用いた観測により、近赤外線の宇宙背景放射には既知の天体では説明のつかない超過成分が見つかったが、超過成分が宇宙初期に起因するか否かは今後の研究に委ねられた。そこで我々は超過成分の解明を目指し、NASA の観測ロケットを用いた国際共同実験 CIBER-2 を計画している。本稿では CIBER-2 の概要と進捗状況を述べるとともに、ISAS の観測ロケットを用いた将来の宇宙背景放射観測の可能性を示す。

1. はじめに

熱いビッグバンで始まった宇宙のバリオン（主に水素）は宇宙の膨張に伴って冷え、プラズマから中性水素へ相転移する。初期にはプラズマと強く結合していた光は、40 万年ほどで水素の中性化に伴い自由に伝播できるようになる。この残光は赤方偏移して現在は 2.7 K の黒体放射スペクトルをもつ宇宙マイクロ波背景放射（CMB）として観測されている。CMB 温度は極めて高い精度で等方的であるが、主にダークマターの密度ゆらぎに起因する 10 万分の 1 ほどの非等方性がある。密度ゆらぎは銀河団などの構造を重力的に形成する種であると考えられている。

構造形成理論の実証には初期から現在までの事象を観測により追跡することが必要である。そのひとつとして、CMB ゆらぎの偏光度による銀河間電子密度の測定から、初期の中性水素ガスは数億年後に再び電離されたことが示されている。再電離の原因は、初期の星や銀河、あるいは原始ブラックホールなどが発した紫外線であると考えられており、これを検証すべく様々な手法で初期天体が探査されている。我々は、このような初期天体の光の痕跡を宇宙背景放射として捉えることを目指している。

2. 可視光・近赤外線の宇宙背景放射

初期天体の紫外線は宇宙膨張により可視光や近赤外線に赤方偏移することから、初期天体が明るい点源ならば地上の大望遠鏡を用いて観測が可能である。しかし、銀河形成以前の天体は個別に小さく点源に分解して観測できない可能性が高い。そのような場

合は多数の天体をまとめて背景放射として観測する方法が有望である。ただし、可視近赤外波長域では地球大気発光が明るいため、空間的に広がった背景放射の観測には大気圏外からの観測が必要である。

近赤外線（1-5 μm ）の宇宙背景放射観測は、主に日本や米国のグループにより行なわれてきた。1980 年代から 1990 年代にかけて名古屋大学のグループが ISAS の観測ロケットを用いて精力的に観測を進めたが、短い観測時間により測定精度が制限されるとともに、のちに述べるような環境放射が測定値の確度に大きく影響した^{1, 2)}。米国では 1989 年に COBE 衛星が打上げられ、赤外線の全波長帯での宇宙背景放射の全天サーベイ観測が行なわれた³⁾。日本では 1995 年に ISAS ロケット実験の実績を受け継ぐ SFU 搭載宇宙赤外線望遠鏡 IRTS により近赤外線の背景放射スペクトルを観測した⁴⁾。2006 年に打上げた「あかり」衛星では、それまでより大きな口径 70 cm の望遠鏡により点源除去性能を向上することで確度の高い背景放射観測を行なった⁵⁾。

図 1 は、以上の観測結果をまとめたものである。ここに示した観測値は、太陽系内の黄道光や銀河系内の星光およびダスト放射からなる前景放射を評価し生の観測値から差引くことで得られた銀河系外成分である（図 2）。観測値は互いに若干の違いがあるものの、おおむね一致している。違う観測であることや前景放射の差引き系統誤差を考慮すると、むしろ互いに良く一致していると言えるだろう。ここで注目すべきは、近赤外線のいずれの観測値も系外銀河の積算光（図 1 の黒実線）よりも 2 倍ほど明るいことである。

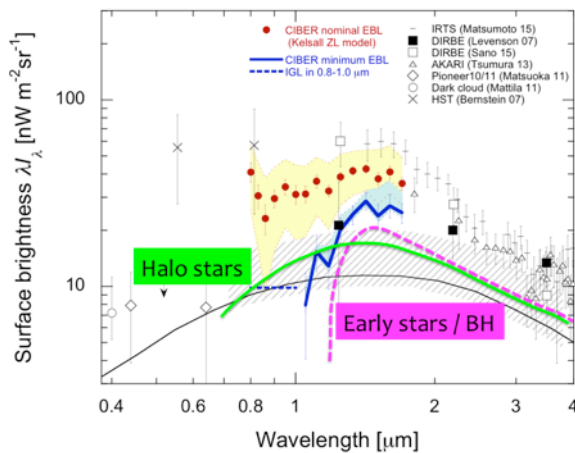


図1 可視近赤外域の宇宙背景放射の明るさ

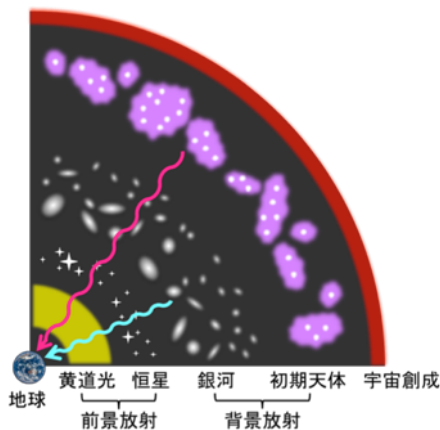


図2 可視近赤外域の前景放射と背景放射

可視光では HST による観測⁶⁾ (図1の×)や暗黒星雲の掩蔽を利用した地上観測⁷⁾ (図1の○)が行なわれてきたが、銀河光や黄道光が特に明るいため、宇宙背景放射の観測を精度良く行なうのは容易ではない。そこで、黄道光の影響を最小化すべく1970年代の惑星探査機 Pioneer10/11により深宇宙で取得された測光データが再解析された⁸⁾が観測値の確度は低い(図1の◇)。

可視光・近赤外線の波長域では、宇宙背景放射の直接測定だけでなく、Blazar(活動銀河核)からの TeV 領域の超高エネルギーガンマ線が銀河間空間を伝搬する間に背景光子との衝突で吸収されることを用いた背景放射の間接測定が、1990年ごろから TeV ガンマ線の大気チェレンコフ光の地上観測により進められてきた⁹⁾。この手法は直接測定のような前景放射の差引き系統誤差に影響されない点で優れているが、吸収前のガンマ線スペクトルを仮定する原理的な不確実性がある。ただし、近年は多くの Blazar が観測され、ガンマ線放射スペクトルの理解が進むこ

とで確度が向上している。図1の斜線領域は近年のガンマ線吸収による背景放射測定を統合して得られた誤差範囲である⁹⁾。2 μm より長い波長では系外銀河の積算光と直接観測の両者とも矛盾しないが、短波長では明らかに直接観測値のほうが明るい。これは直接観測での前景放射(黄道光)の差引き不足による可能性が高い。

以上の状況を鑑みると、可視光と近赤外線の境界である波長1 μm 付近で確度の高い観測を行なうことが重要な課題である。この波長帯は観測が不足しているだけでなく、背景放射超過の原因となりうる初期天体や銀河ハロー星(図1のマゼンタの破線と緑の実線)のスペクトル分別のためにも重要である。

3. ロケット実験 CIBER

前節で述べたように可視光～近赤外線での背景放射スペクトルを観測することが喫緊の課題となった。そこで我々は、NASA の観測ロケットを用いた可視近赤外域の宇宙背景放射を観測する CIBER (Cosmic Infrared Background Experiment) を日米韓の国際共同実験として実施した¹⁰⁾。CIBER の観測装置は、液体窒素冷却した、口径10 cm の2波長(1 μm, 1.6 μm)イメージャー、口径5 cm の広帯域(0.8-1.8 μm)分光計、および口径10 cm ファブリペロー狭帯域(0.85 μm 周辺)分光計からなり、宇宙背景放射のスペクトルとゆらぎ(非等方性)を測定する。2009-2013年に4度の実験を実施し、いずれも観測データの取得に成功した。一般に単発のロケット実験では観測時間が短いことから再現性確認や系統誤差評価が不足する傾向にあるが、CIBER では観測機器のパラシュート回収による複数回実験でこれを克服できた。

CIBER による可視近赤外域での背景放射スペクトルの観測結果¹¹⁾を図1に示す。COBE 衛星の全天観測結果をもとにした黄道光モデルを CIBER の観測値から差引きして得た背景放射スペクトル(図1の●)は、これまでの衛星による観測と系統誤差(図1の黄色い領域)の範囲で矛盾がない。また、黄道光モデルに依存しない強固な制限値として、波長1 μm 以下の可視域で背景放射が銀河の積算光と一致する(超過がゼロ)ように黄道光を5%程度多く差引きすることで近赤外域での下限値を得た(図1のエラーバー付き青実線)。その結果、銀河の積算光に対する近赤外線の超過が確定的になった。この下限値のスペクトル形状は初期天体のものに良く似ており非常に示唆的であるが、これをもって初期天体の寄与の証拠とまでは言えない。

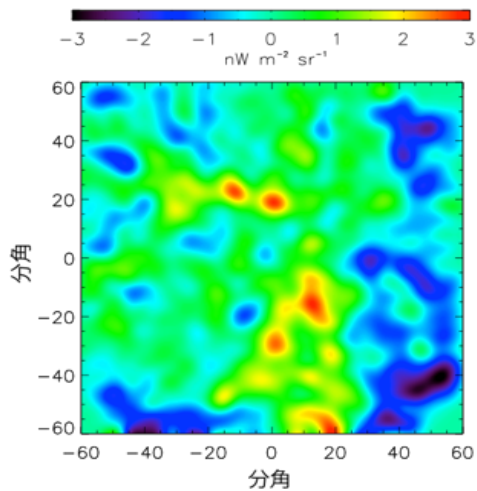


図3 CIBERで観測された背景放射の非等方性

CIBERによる背景放射ゆらぎの観測結果¹²⁾もまた非常に興味深い。観測された数分角スケールの背景放射ゆらぎ(図3)は、銀河クラスタリングの観測から推定される銀河積算光のゆらぎと比べて2倍以上の振幅を示した。このゆらぎ超過が初期天体によるとすれば、ゆらぎのスペクトルは可視域から近赤外にかけて急増することが予想されるが、「あかり」やSpitzerによる長波長での観測結果^{13, 14)}と比較すると、むしろ短波長ほどゆらぎが大きい。この結果を近傍銀河のダークハローに潜む星々のモデルで説明を試みたが¹²⁾、個別の銀河ハローの観測結果とは整合していない。近年、ゆらぎの超過成分を原始ブラックホールにより説明する試みもあり、2017年に初検出された重力波源のブラックホールとの関連も議論されている¹⁵⁾。今後、宇宙背景放射の近赤外超過の解明は科学に大きなインパクトを与えるであろう。

4. 次期ロケット実験 CIBER-2

CIBERで明らかになった近赤外超過の解明にはさらなる観測が必要である。特に、CIBERにはない可視光スペクトルと多波長バンドのゆらぎ観測による初期天体の寄与の検証が課題である。それにはCIBERの10倍以上の感度が必要であり、これを実現する新しいロケット実験がCIBER-2である(図4)。

CIBER-2観測装置の構成を図5に示す¹⁶⁾。CIBER-2では、ゆらぎ観測の精度を決定づける点源除去能力の格段の向上のため、口径をCIBERの3倍に拡大した30 cm望遠鏡を搭載する。CIBERと同等以上の視野角を確保するため、望遠鏡の後段には収差補正した結像のためのレンズ光学系を設置する。可視光から近赤外の広い波長範囲をカバーするため、ダイク

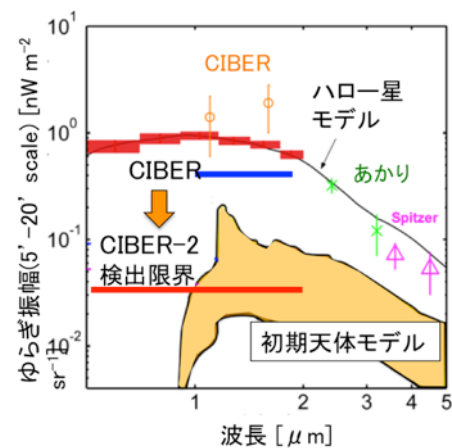


図4 CIBER-2の検出感度

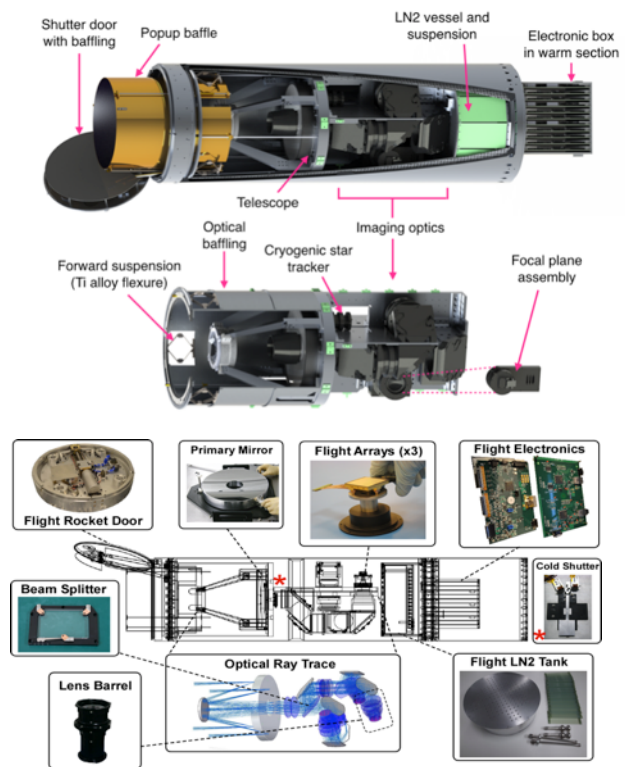


図5 CIBER-2観測装置の構成

ロリック・ビームスプリッターで3波長バンドに分割したうえ検出器上に置いたフィルタにより2波長を視野分割することで、合計6波長の測光バンドにて背景放射ゆらぎの撮像観測を行なう。また、検出素子の一部に設置したリニア・バリアブル・フィルタ(LVF)により全波長範囲での粗い(R~20)分光観測を行なう。検出器はTeledyne社の2048×2048素子HgCdTeフォトダイオードアレイHAWAII-2RGを波長バンド毎に用い(計3台)、これらを独自開発した電子回路で駆動する。観測装置自身の熱放射を低減

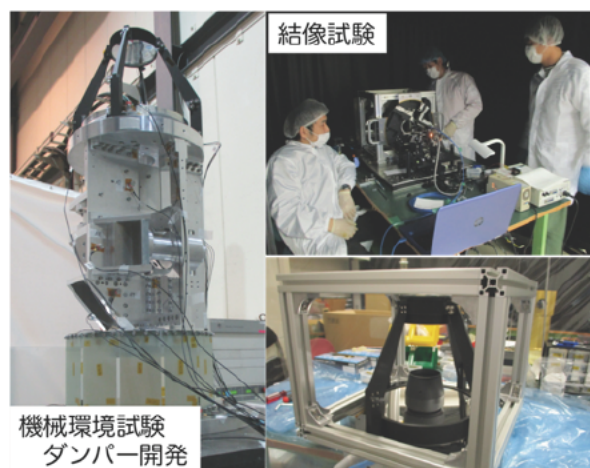


図 6 国内での光学系開発

するため、真空クライオスタット構造のロケット筐体内で観測装置全体を液体窒素により 90 K 以下に冷却する。観測装置の総重量は約 100 kg である。

観測装置は、2019 年に米国ニューメキシコ州 White Sands Missile Range (WSMR) にて NASA 観測ロケット Black Brant IX により最高高度 300 km 以上まで打上げられ、大気放射が十分に暗くなる 250 km 以上の高度で約 5 分間の観測を行なう予定である。CIBER の観測天域を中心に前景放射の評価のため黄緯や銀緯の違う 5-6 箇所の天域を指向観測する。CIBER では観測データを 10 Mbps×3 台の送信機を用いてテレメトリ受信したが、CIBER-2 はデータ発生量が格段に大きいため、主な観測データはオンボードメモリに格納しパラシュート着陸後に回収する。CIBER の飛行中の姿勢安定性は多くの場合、 ± 2 秒角/1 分間の程度であったが、打上げ時のロケット筐体の熱変形により望遠鏡と常温スタートラッカー間のアラインメントずれが生じ、大きな姿勢ドリフトが見られることもあった。そこで CIBER-2 では、望遠鏡の焦点面にスタートラッカーを独自に用意し、後のデータ解析によりドリフトの補正を行なうことにしている。

回収した装置の故障箇所は修理し、1 年後に 2 回目の打上げを行なう。CIBER では、初回打上げの際に環境放射の影響が大きかったことや光学系に迷光が見つかるなどの問題があったが、装置を改良して臨んだ 2 回目の打上げでは良好な観測データが得られた。さらに 3 回、4 回と継続的に実施した実験の結果、信頼性の高い観測結果が得られた実績は、ロケット実験を行なうにあたり重要な教訓と指針を与える。CIBER-2 においても複数回の実験こそが良い成果をもたらすことは疑いない。

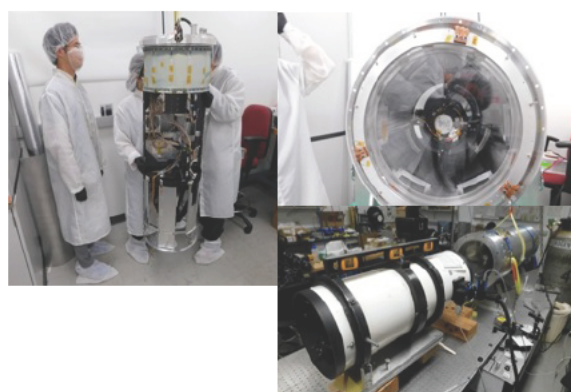


図 7 観測装置の組立て・試験@Caltech

CIBER-2 の観測装置の開発は、望遠鏡をはじめとする光学系と冷却系を日本（関西学院大学、東北大学、ISAS）、検出器と電気系、スタートラッカー、ロケット周辺機器および IF をアメリカ（カリフォルニア工科大学(Caltech)、ロチェスター工科大学(RIT)）、GSE を韓国（KASI）、LVF とレンズ鏡筒の一部を台湾（ASIAA）が担当する国際共同の分業体制で行なっている。各国で製作した部品を Caltech に集結し、組立て、調整、および試験を行ない、WSMR へ輸送し、ペイロード部に組込んで総合試験を行なったのちに打上げる。

フライト品の光学系は関西学院大学にて組立て・調整を行ない(図 6)、2018 年 3 月までにすべて Caltech に納品した。現在は光学系をクライオスタット（ロケット筐体）へ組込み低温での結像試験を行なっている（図 7）。フライト品の製作に先立ち、国内では試験モデルを用いた低温での評価を含む結像試験や振動試験を実施してきたが、機械共振が予想外に大きいなどの技術的課題が発生したため、これらを一歩ずつ解決しながら開発を進めてきた。

プロジェクトに新たに加わった大学院生や若手研究者らは、当初こそ開発要素の把握や開発手段の会得に苦労したが、徐々に開発主力として活躍するようになった。このような目に見える若手の成長は、ロケット実験のもうひとつの大きな意義である。

5. ISAS ロケットを用いた観測について

1990 年と 1992 年に実施した ISAS 観測ロケット S520-11 号機と S520-15 号機の実験では^{1,2)}、CIBER と同じく赤外線宇宙背景放射の観測を行なった。当時は、 0.1° /1 分間を切る安定度の指向観測が可能であったばかりか、ペイロードの一部の海上回収も行なわれた。しかし、その後の赤外線天文学は衛星が主流となり、同様な実験を国内で行なうことはな

表 1 ISAS - NASA 観測ロケット比較

	S-520 (現状)	Black Brant IX (CIBER)
到達高度 / 積載質量	300 km / 150 kg	300 km / 450 kg
姿勢安定性	±0.3 度	3 秒角 (30秒間)
指向精度	~1 度 ?	15 分角
通信速度 (down link)	1.6 Mbps	10 Mbps
装置回収	×	○

くなった。気づけば他の波長の天文学でも装置回収が可能で姿勢安定性の高い NASA 観測ロケットへ移行し、ISAS 観測ロケットは天文学に適した仕様が失われていった。

近年は ISAS 観測ロケットの意義をあらためて問うべく、観測ロケット専門委員会と理工学委員会によるユーザーアンケート調査が 2011 年と 2015 年に実施された。2015 年の調査に乗じて、私たちは同年に開催された大気球シンポジウム、および宇宙科学シンポジウムで、ISAS と NASA の観測ロケットの比較（表 1 はその一部）や天文分野ユーザーの科学目的および仕様希望等をまとめて報告した¹⁷⁾。近年の天文学では 1 分角程度の姿勢安定性を必要とする場合がほとんどである。また、科学的に価値の高い成果を出すため精密な観測が求められる場合、複雑で高価な装置が必要になることが多く、装置回収の可能性は最も重要な要素と言っても良い。

しかし、単目的化により早く安く大きな成果を出すロケット実験の原点に立ち戻り、現在の ISAS 観測ロケットの仕様でも重要な科学成果を得る実験を企画することはできる。ここまで紹介してきた赤外線宇宙背景放射の観測は、対象が空間的に広がりをもつため姿勢安定性要求は比較的緩い。また、過去に例のない観測パラメータはまだたくさん残っている。例えば、CIBER-2 の主目的のひとつでもある背景放射の可視光スペクトルを観測することで、近赤外超過の原因を探ることができる。0.1° 程度の姿勢安定性があれば、このような観測は十分に成立する。さらに具体的に述べるならば、ある程度の高い波長分解能（例えば R=100）で可視光の分光観測を行ない黄道光のフラウンホーファー線を精度良く観測できれば（図 8、青い線）、黄道光の差引き精度が格段に向上するであろう。また、可視光の測定機器は産業用に広く普及しているため、安価に装置を構成することができる。つまり、装置回収するよりもコストを下げられる可能性がある。

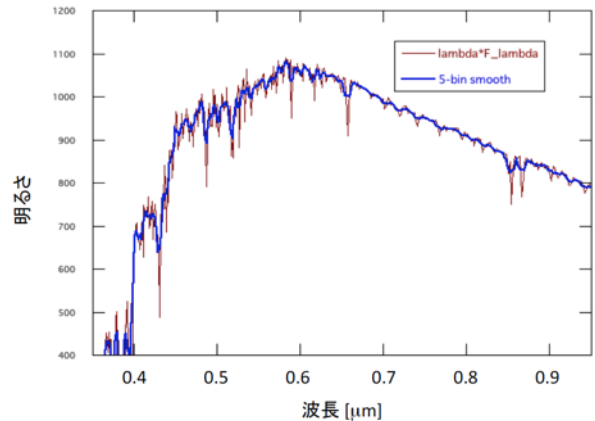


図 8 R=100 で分光観測する際の太陽スペクトル

ISAS 観測ロケットで可視光の背景放射を観測する際に懸念となる点は、環境放射によるデータ汚染である。図 9（上）に示したのは、S520-15 号機で観測された時間や高度に依存して変動する環境放射の明るさである²⁾。S520-15 号機は背景放射の近赤外スペクトルを観測するものであり、環境放射が特に強い波長のデータを示している。打上げ直後の上昇時（○）は地球外からの放射の 10 倍以上明るい 1.43 μm に代表される放射成分が見られ、これは時間の指数関数にしたがい減衰する。もうひとつは 3.41 μm に代表される高度依存する放射であり、むしろ下降時（△）のほうが明るく見えている。いずれも大気が十分希薄と考えられる高度 250 km 以上で見られた放射であり、安定的に存在する大気放射とは考えにくい。

図 9（下）に示すのは、環境放射のスペクトルである²⁾。上昇時の成分は 1.4 μm と 2.8 μm の付近にピークをもち広くスペクトル分布していることから、OH 分子の振動遷移によるものと考えられる。スペクトル形状からみた分子の温度は高度 90 km 付近の OH 層のものよりはるかに高く、一時的に強く励起された分子と推察される。下降時の成分は 3.3-3.4 μm 付近にピークがあることから、何らかの C-H 結合をもつ有機分子の振動遷移によるものと見られる。下降時に増加する現象からみて、ロケットモータの排気ガスが視線に入ったのではないかと推測している。いずれの分子にせよこのような高度には自然に存在しない量に対応する放射強度であることから、ロケットが持ち込み励起したガスであろう。同様の環境放射は S520-11 や CIBER でも観測されている^{1,11)}。

可視域では OH 分子遷移は赤外域と比べて素早く減衰することが期待されるが、分子の励起温度が高いため予想以上に強い可能性もある。今後さらに調査と検討を進める必要があるだろう。

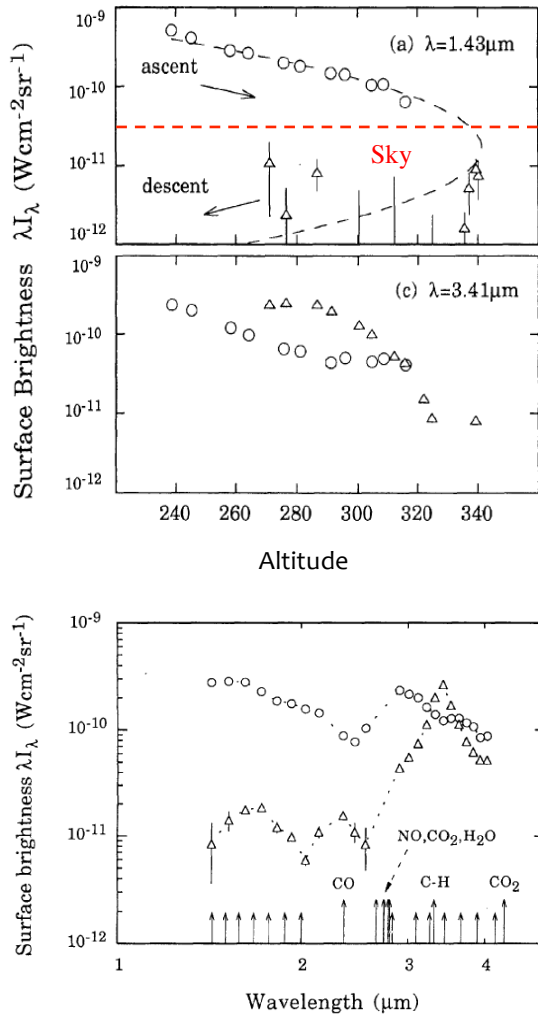


図 9 S520-15 号機で観測された環境放射の高度依存性 (上) およびスペクトル (下)

6. まとめ

NASA 観測ロケットを用いた CIBER の観測結果と次期計画 CIBER-2 の概要と開発状況を述べた. NASA ロケットでは装置回収が可能であること, 高い指向精度が得られること, またデータ通信量が大いことは科学成果を得るために本質的であった. ISAS の観測ロケットも同様な仕様を有することが望ましいが, 宇宙背景放射の観測においては, 現状の仕様であっても多大な利用可能性をもっている. ただし, 過去の実験で見られた環境放射の原因や影響は理解が十分には進んでおらず, 今後も調査と検討が必要である.

参考文献

- 1) Noda, M. *et al.*, *ApJ*, **391**, 456 (1992).
- 2) Matsuura, S., *et al.*, *PASP*, **106**, 770 (1994).
- 3) Hauser, M.G., *et al.*, *ApJ*, **508**, 25 (1998).
- 4) Matsumoto, T., *et al.*, *ApJ*, **628**, 31 (2005).
- 5) Tsumura, K., *et al.*, *PASJ*, **65**, 121 (2013).
- 6) Bernstein, R.A., *ApJ*, **666**, 663 (2007).
- 7) Mattila, K., *et al.*, *MNRAS*, **470**, 2133 (2017).
- 8) Matsuoka, Y., *et al.*, *ApJ*, **736**, 119 (2011).
- 9) H.E.S.S. Collaboration, *A&A*, **550**, A4(11pp) (2013).
- 10) Zemcov, M., *et al.*, *ApJ Suppl.*, **207**, 31(16pp) (2013).
- 11) Matsuura, S., *et al.*, *ApJ*, **839**, 7(15pp) (2017).
- 12) Zemcov, M., *et al.*, *Science*, **346**, 732 (2014).
- 13) Kashlinsky, A., *et al.*, *Nature*, **438**, 45 (2005).
- 14) Matsumoto, T., *et al.*, *ApJ*, **742**, 124(11pp) (2011).
- 15) Kashlinsky, A., *ApJL*, **823**, L25(6pp) (2016).
- 16) Shirahata, M., *et al.*, *Proc. SPIE 9904*, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 99044J (2016).
- 17) 津村ほか, 大気球シンポジウム, isas15-sbs-016 (2015).