

宇宙赤外線背景放射観測実験 CIBER: 4 回の打上げ観測の科学成果

津村耕司¹、松浦周二²、松本俊雄³、和田武彦³、James Bock⁴、他 CIBER チーム

¹東北大学 学際科学フロンティア研究所、²関西学院大学 理工学部 物理学科

³宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所、⁴California Institute of Technology

概要

我々は、銀河系外背景光(EBL, Extragalactic Background Light)の詳細観測を目的として、NASA の観測ロケットを用いた天文観測プロジェクト Cosmic Infrared Background ExpeRiment (CIBER)を実施した。CIBER では 2009 年から 2013 年にかけて 4 回の打ち上げ観測を成功させ、科学成果を挙げた。

1. 銀河系外背景光 (EBL)

大型望遠鏡による遠方銀河観測とは相補的に、EBL の観測を通して、宇宙誕生から現在に至る星形成の歴史を探ろうとしている。大型望遠鏡では検出できない暗い天体からの光を、宇宙の歴史を通した(遠方宇宙から観測者までの)積分値である EBL として検出することで、大型望遠鏡でも検出できないような暗く隠された星形成を探ろうという試みである。

1990 年代後半の COBE/DIRBE[1]および IRTS[2]の観測により、既存の銀河進化モデルから推測される全ての銀河からの光の積算では説明できない EBL 超過が初めて検出された。この観測結果は、この宇宙にはまだ我々の知らない未知の隠された光源の存在を示唆しているため、宇宙の星形成史を理解するために更なる詳細観測が必要である。そこで我々は、CIBER によって世界で初めて、EBL がピークとなる $1\mu\text{m}$ 帯でのスペクトルと空間的ゆらぎの観測を実施した。

2. Cosmic Infrared Background ExpeRiment (CIBER)

2.1 ロケット実験の概要

CIBER とは、NASA の観測ロケット[3]を用いた EBL 観測を主目的とした日米韓の国際協力実験であり、2009 年から 2013 年にかけて 4 回の打ち上げ観測を成功させた[4](図 1)。CIBER では、NASA の観測ロケット Terrier-Black Brant IX (1-3 回目)および Black Brant XII (4 回目)に、後述の 3 種類 4 本の冷却赤外線望遠鏡を搭載し、NASA White Sands Missile Range



図 1 CIBER の打ち上げ前の集合写真(左)、打ち上げの瞬間(中央)、打ち上げ後の回収(右)

(1-3 回目)、および NASA Wallops Flight Facility (4 回目)から打ち上げ観測を実施した。ロケットは最高高度約 330km(1-3 回目)および 580km (4 回目)に達し、大気光の影響がほぼなくなる高度 200km 以上にて約 420 秒(1-3 回目)および 620 秒(4 回目)の天文観測を成功させた(図 2)。

1-3 回目の打ち上げ観測後は、観測装置をパラシュートにて落下させ回収後(図 1 右)、装置の修理・改造をし、次回以降の観測に再利用した。高価な装置を含む観測システムを再利用することで、コスト削減だけでなく、短期間での繰り返し観測や、打ち上げ観測前後での装置の性能比較実験などが可能となり、単発のロケット観測と比較して格段に観測の信頼性を高めることができた。4 回目の打ち上げでは、より高い高度と長い観測時間を求めて、回収はで

きないがより高高度が達成可能なロケットを利用して観測を行い、プロジェクトを締めくくった。

使用した NASA の観測ロケットは飛行中に複数天域の指向観測を行うことができる。観測天域は打ち上げ前に事前に設定しておくが、希望があればリアルタイムオペレーションも可能である。CIBER では指向精度は 15 分角、姿勢安定性 3 秒角 (30 秒間)程度であった[4]。

観測ロケットには 10Mbps の通信速度を有するテレメトリ装置を 3 台搭載することで、取得した天文画像観測データをリアルタイムでダウンリンクした[4]。

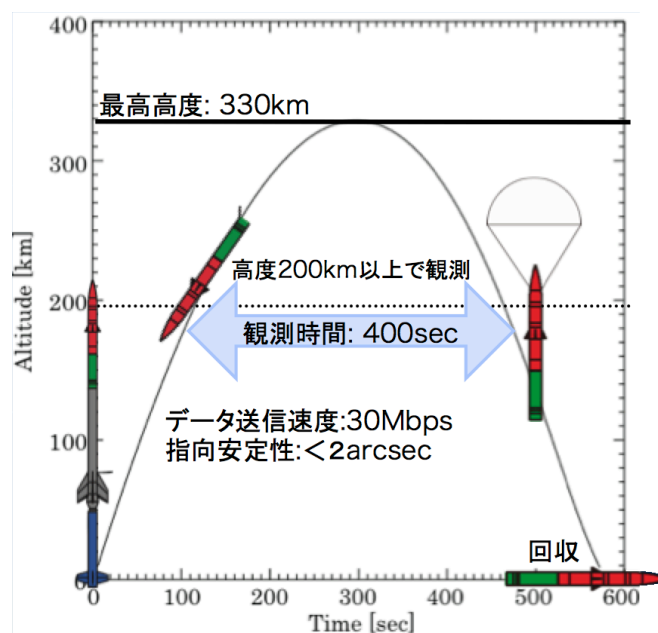


図 2 ロケット実験の概要 (1-3 回目の場合)

2.2 観測装置の概要

望遠鏡自身からの熱放射を低減させるため、観測装置は冷却されている必要がある。そのため、ロケットの外壁がクライオスタットを兼ねる構造となっており、中に搭載された望遠鏡は液体窒素により 100K 以下に冷却された状態でロケットが打ち上がるような設計となっている。その上で、温度差による熱収縮やロケットの打ち上げの振動に耐える構造にする必要がある。そこで、低温部の下部は液体窒素タンクを取り囲むように 12 枚の GERP プレートにより常温のロケット外壁と断熱的に結合して全体を支え、低温部の上部は観測装置が搭載された光学台がチタン合金のバネによりロケット外壁と結合することで、内部が低温になることによる熱収縮を吸収するようになっている[4]。GFRP プレートは帰還時の衝撃で壊れるが、簡単に取替え可能である。

観測ロケットは上空でシャッタードアが開き観測が開始する。この時、各装置に取り付けられたポップアップバッフルが飛び出ること、シャッタードアやその周辺からの迷光を遮るような構造となっている。シャッタードアは大気圏再突入までに閉じることで、中の装置を守る。

各観測装置は打ち上げ前に実験室で積分球と標準光源を用いたキャリブレーションを行うことで、面輝度の絶対測光を実現させた。また、打ち上げ後に回収できるので、後に同様の測定を行うことで装置の安定性の確認も行い、データの信頼性を高めた。

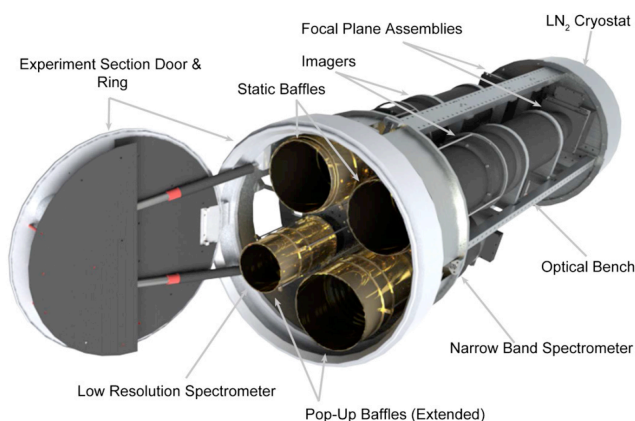


図 3 CIBER の外観図[4]。ロケット外壁は表示されていない

3. 各搭載装置の科学成果

3.1 Low Resolution Spectrometer

Low Resolution Spectrometer (LRS) とは、 $0.75\text{--}1.6\mu\text{m}$ 帯での EBL 分光を目的とする観測装置である[5](図 4 上)。口径 5 cm の屈折望遠鏡の内部に視野 5.4 度のスリットを 5 本持ち、プリズムによって面輝度を $\lambda/\Delta\lambda\sim 20$ の波長分解能で分光する。検出器は 256×256 ピクセルの HgCdTe 検出器(PICNIC)を用いた。

EBL のスペクトル抽出の最大の難しさは前景光との分離にある。最大の前景光である黄道光については、黄緯の異なる領域のデータの差分から黄道光のスペクトル形状を抽出し[6]、これと黄道光のモデル輝度[7]とを組み合わせることで黄道光を推定した。銀河系内ダストによる星間放射の散乱光(Diffuse Galactic Light, DGL)については、銀河系内ダストの遠赤外線における熱放射[8]との相関をとることで推定した[9]。これら前景光を観測値から差し引いた結果、EBL 超過を検出することに成功した[10](図 4 下)。

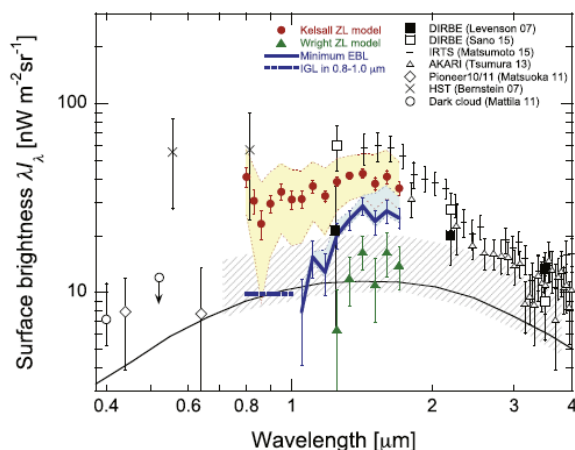
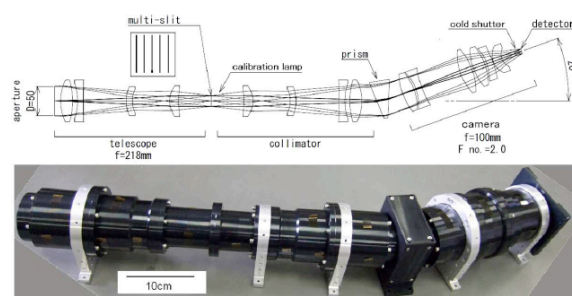


図 4 (上)LRS の外観図[5]。(下)LRS による EBL スペクトル[10]。

3.2 Wide Field Imager

EBL 観測の難しさは最大の前景光である黄道光の除去であるが、黄道光は度スケール以下では空間的に一様なため[11]、広視野観測により EBL の空間的ゆらぎを観測すれば、EBL と黄道光を分離するできる。CIBER では搭載された広視野カメラ (Imager) により EBL のゆらぎ観測を行なった[12]。

Imager は口径 11 cm 、視野 2 度の屈折望遠鏡で、フィルタのみが異なる ($1.1/1.6\mu\text{m}$ 帯) 2 台が搭載されていた(図 5 上)。検出器は 1024×1024 ピクセルの HgCdTe 検出器 (HAWAII-1)を用いた。これにより約 18 等までの点源をマスクし、 10 秒角から 1 度スケールでの EBL の空間的ゆらぎを観測した。

Imager が観測した画像(図 5 下)を 2 次元フーリエ解析した結果、 0.1 度付近に既知の成分では説明できない EBL 超過を検出した[13]。この空間的ゆらぎの超過の起源は何か、EBL のスペクトル超過(3.1 節)と同じ起源なのか等はまだ不明であるが、銀河周囲のダークハローに分布する、銀河同士の過去の相互作用により放出された大量の星々からの光とする仮説[14]などが提唱されている。

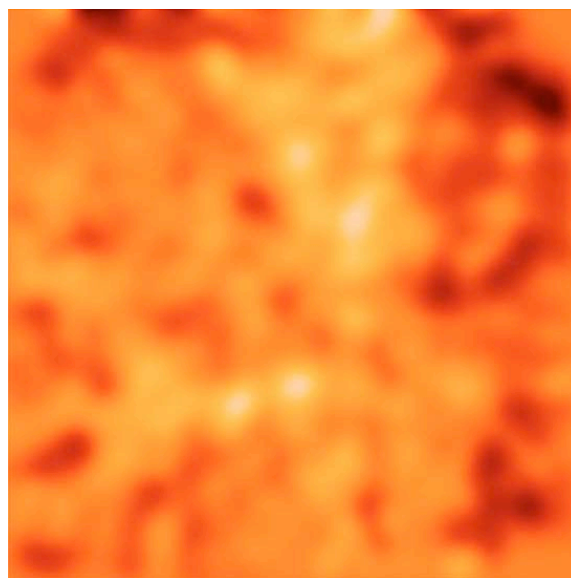
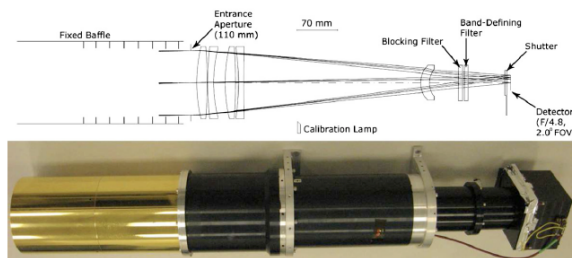


図 5 (上)Imager の外観図[12]。(下)Imager による EBL の空間的ゆらぎ[13]。

3.3 Narrow Band Spectrometer

EBL 観測における最大の誤差要因となる黄道光の絶対輝度測定を目的とした装置が Narrow Band Spectrometer (NBS) である[15](図 6 上)。黄道光は惑星間塵による太陽光の散乱光であるため、黄道光中のフラウンホーファー線を検出することで、黄道光の絶対輝度を測定しようという試みである。

NBS は口径7.5cm、視野は8.5度の屈折望遠鏡で、波長分解能は $\lambda/\Delta\lambda \sim 1000$ のファブリペロー分光によって、黄道光中の854.2 nm のCaII のラインを狙う設計となっている(図6下)。検出器はLRSと同じPICNICである。

NBS の観測により、黄道光中のフラウンホーファー線の検出には成功したが、精度がギリギリであったため、有力な 2 つの黄道光モデル[7, 16]の切り分けに現時点ではまだ成功していない。

4. 将来計画

CIBER により EBL 超過の存在とその性質が明らかにされたが、まだその起源の解明には至っていない。そこで、EBL をより詳細に観測することを目指した将来計画が検討されている。

1つ目は、CIBER の後継実験となる CIBER-2 である。CIBER-2 では、CIBER より集光面積が 10 倍大きい口径 28.5cm の冷却反射望遠鏡に加え、後置レンズ光学系内のビームスプリッターにより光路を 3 チャンネルに分割し、さらに各チャンネル内に 2 種類のバンドパスフィルターとリニアバリアブルフィルター(LVF)を搭載する事で、可視光から近赤外線に渡る 6 バンド同時撮像と低分散分光を同時に実現させる[17]。

もう 1 つは、JAXA 戦略的中型計画に提案中のソーラー電力セイル探査機による木星トロヤ群小惑星探査計画 OKEANOS に搭載される小型赤外線望遠鏡 EXZIT である[18]。EXZIT は口径 10cm の可視・近赤外望遠鏡で、LVF により面輝度分光観測ができる。OKEANOS が木星に向かうクルージング期間中に、EXZIT により世界で初めての黄道光の外からの EBL の直接観測を目指している。

参考文献

1. Cambr sy et al., 2001, ApJ 555, 563
2. Matsumoto et al., 2005, ApJ 626, 31
3. NASA Sounding Rockets Program Office, 2005, The NASA Sounding Rocket Program Handbook
<http://sites.wff.nasa.gov/code810/files/SRHB.pdf>
4. Zemcov et al., 2013, ApJS 207, 31
5. Tsumura et al., 2013, ApJS 207, 33
6. Tsumura et al., 2010, ApJ 719, 394
7. Kelsall et al., 1998, ApJ 508, 44
8. Schlegel et al., 1998, ApJ 500, 525
9. Arai et al., 2015, ApJ 806, 69
10. Matsuura et al., 2017, ApJ 839, 7
11. Pyo et al., 2012, ApJ 760, 102
12. Bock et al., 2013, ApJS 207, 32
13. Zemcov et al., 2014, Science 346, 732
14. Cooray et al., 2012, Nature 490, 514
15. Korngut et al., 2013, ApJS 207, 34
16. Wright, 2001, ApJ 553, 538
17. Shirahata et al., 2016 Proc.SPIE 9904, 99044J
18. Matsuura et al., 2013, JSAAS Int. Symp. On Space Tech. and Sci., 29, 2013-r-09

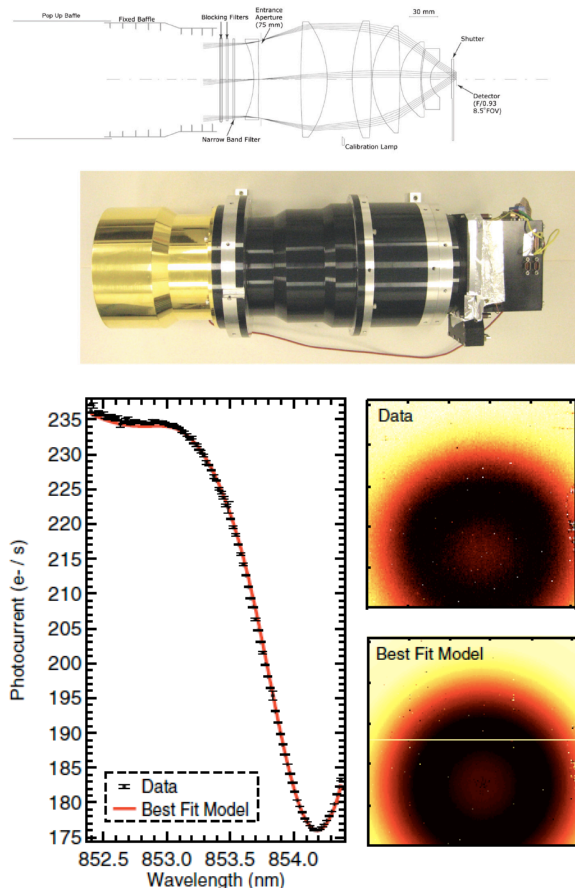


図 6 (上) NBS の外観図[15]。(下) NBS が実験室で観測した太陽のフラウンホーファー線