

DESTINY application: Out-of-ecliptic Mission for measuring the Cosmic Infrared Background Radiation

(DESTINY 応用ミッション：黄道面外からの宇宙背景放射観測)

Shuji Matsuura¹, Toshiaki Arai¹, Yosuke Onishi^{1,2}, Kei Sano^{1,3}, Mai Shirahata⁴,
Kohji Tsumura⁵, and DESTINY working group

¹Department of Space Astronomy and Astrophysics, Institute of Space and Astronautical Science (ISAS),
3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa, 252-5210 Japan

² Graduate School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo,
152-8550 Japan

³ Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033
Japan

⁴ JASMINE Project Office, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo,
181-8588 Japan

⁵ Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University, 6-3 Aoba, Aramaki-aza,
Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8578 Japan

ABSTRACT

We propose a future space astronomy mission for measuring the cosmic background radiation at visible and near-infrared wavelengths as a possible application of a newly proposed small satellite system for deep space exploration, DESTINY. Out-of-ecliptic orbit with large inclination angle can mitigate the contamination by zodiacal light, which is the most intense foreground radiation at the wavelength of interest, and provide great advantage over the near-earth orbit for accurate background measurement.

1. ミッションの目的

本ミッションは、将来の小型深宇宙探査機として検討が進められている DESTINY の応用として、天文学・宇宙論のホットトピックである宇宙赤外線背景放射を深宇宙の環境を利用して精密に観測する提案である。

現代の宇宙進化描像においては、現在の星や銀河・銀河団などの天体構造は、ビッグバンによる宇宙創成時のマイクロな密度ゆらぎが階層的に成長して形成されたと考えられている。つまり、宇宙初期のどこかの時点で最も小さなスケールの天体である星が最初に形成されたはずである。星々は、宇宙年齢 1-3 億年ごろに大質量星として形成され、それらによる紫外線は同時代の宇宙全体を完全電離したと考えられている。その紫外線放射は、宇宙膨張による赤方偏移により、現在は可視～近赤外の波長域 ($0.5\text{-}5\ \mu\text{m}$) の宇宙背景放射として観測される可能性がある [1]。宇宙赤外線背景放射を捉え、宇宙最初期の星形成を研究することは、極めて重要な科学的課題となっている。

これまでに、米国の COBE 衛星、日本の IRTS や「あかり」衛星などの近地球衛星により、宇宙赤外線背景放射の観測が行なわれた [2-4]。その結果、図 1 に示すように、宇宙背景放射の観測値は、我々が知りうる限りの全ての銀河放射の総計による推定値を大きく超える輝度をもつことが明らかになってきた。超過成分が上述のような宇宙初期の星々であれば極めて重要な発見であるが、最近のロケット実験 CIBER による赤外線背景放射の空間的ゆらぎの観測結果によれば、超過成分の多くは銀河同士の衝突や潮汐作用により銀河からはぎ取られた星が大量に銀河ハローに存在していることに由来する可能性がある [5]。いずれにせよ、背景放射超過成分の

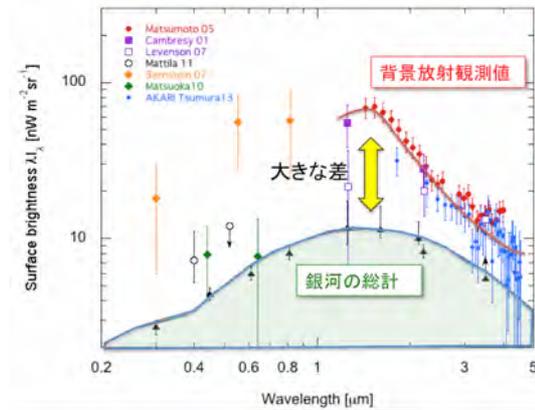


図 1 Result summary of previous background measurements.

解明は重要な科学成果をもたらす。

しかし、宇宙背景放射の観測値を得るには、10 倍近く明るい前景放射を差引く必要があり、その差引き誤差が観測精度を決定づけている。前景放射は、太陽系内ダスト（惑星間ダスト）による太陽光散乱である黄道光が主成分である。特に、可視近赤外域（波長 $0.5\text{-}1\ \mu\text{m}$ 付近）では、黄道光が極めて明るく、図 1 の観測値も互いに齟齬が大きい。つまり、宇宙赤外線背景放射をより正確に測定するには、黄道光の影響を低減することが肝要である。本ミッションでは、黄道光の影響を著しく低減した観測を DESTINY により実現するものである。

また、黄道光の立体的観測により、惑星間ダストの空間分布を明らかにすることも、本ミッションの重要項目である。惑星間ダストは彗星または小惑星により供給され、ある寿命をもって太陽へ降着する。つまり、黄道光観測により得られるダスト分布から、太陽系始原天体である彗星の活動度や進化をグローバルに調べることができる。このような研究は、太陽系科学にとって極めて重要な価値をもつ。

しかし、地球軌道での観測では、視線方向の積分量である黄道光からダスト分布を

決定することが難しかった。本ミッションでは、衛星の位置変化による黄道光の微分量として、特に彗星と関連が強い黄道面外のダスト分布を直接測定することができる。

2. ミッションの概要

黄道光の放射源である惑星間ダストの数密度は、太陽からの距離にほぼ反比例することがわかっているため、黄道光を低減する最も効果的な方法は、太陽から遠い深宇宙の軌道にて観測することである[6]。一つの方法は、小惑星帯以遠の外惑星領域まで達することであるが、データ送信可能量には大きく制限される。一方、太陽からの距離が1AUにありながらも大きな軌道傾斜角をもつ黄道面脱出軌道をとるならば、かなり大きなデータ通信量を確保しながら、惑星間ダスト密度の低い環境が得られる。

図2には、高傾斜角軌道による黄道面脱出を、COBE衛星データに基づく惑星間ダスト数密度のモデル[7]の等高線図上に模式的に示したものである。惑星軌道に投入したのち、複数回の地球スイングバイにより、軌道傾斜角を増大する。軌道傾斜角は3年ほどで約30度にまで到達し、太陽からの距離が1AUの場合、黄道面外距離 Z_h は約0.5AUに達する。なお、 $Z_h=0$ が黄道面(地球軌道)である。

図3には、地球軌道から観測する場合の黄道光(図中青点線)が $Z_h=0.5$ AUにおいていかに低減するかを示した(赤破線)。黄道面脱出軌道

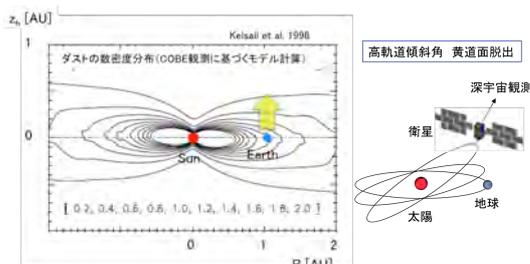


図2 Out-of-ecliptic mission by taking large inclination orbit.

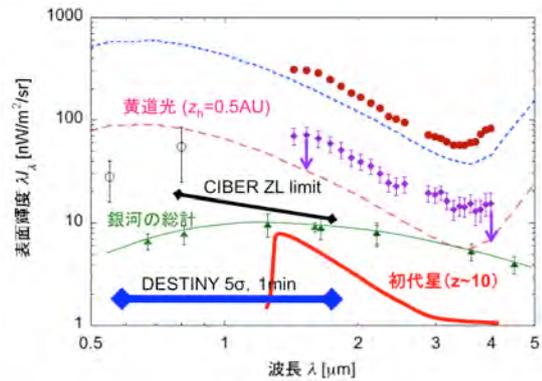


図3 Reduction of the zodiacal light intensity in an out-of-ecliptic orbit compared with that in the earth orbit. The expected sensitivity of this mission is indicated.

では、黄道光の明るさが、地球軌道の約5分の1となり、これまでの宇宙背景放射観測値(紫データ点◆)よりも低いレベルにまで達することがわかる。黄道光の差引誤差は、現在の約5%から約1%に低減するため、銀河の総計(緑実線)や初代星(赤実線×0.1~1)による背景放射を有為を検出することが可能になる。

3. 観測装置の概要

宇宙初期天体からの放射は、水素ライマン α 輝線や銀河間ガスによるライマン端吸収により、急峻な紫外線スペクトルをもつことが予測され、これが赤方偏移して可視・近赤外波長に出現することが予想される(図3赤実線)。その検出には、可視近赤外域での分光観測が有効であるが、様々な赤方偏移の星々が寄与するため波長分解能は粗くてよい。また、宇宙背景放射は空間的に広がった微弱な放射であるため、それを精度良く測定するには、星や銀河のような点状天体を空間分解し除去する必要がある。そのため、観測装置には十分に高い解像度と検出感度とが要求される。

光学系	10cmφ オフセットグレゴリアン 反射望遠鏡+収差補正レンズ
視野	全視野： 5 度角 ピクセル視野： 20 秒角
観測波長	範囲： $\lambda=0.6\text{-}1.7\mu\text{m}$ 分解能： $\lambda/\Delta\lambda=20$ (分光フイ ルター / 多色撮像)
検出器	1k×1k HgCdTe or InGaAs
動作温度	120K (検出器, 光学系ともに) 放射冷却のみ
検出限界 (1 分間積分)	拡散放射： $1\text{ nWm}^{-2}\text{sr}^{-2}$ (3σ) 点源： 17 AB mag (5σ)
重量 (推定)	光学系： 3.5kg 構体・遮光板： 2.5kg 計装・エレキ： 2kg 合計： 10kg (20%マージン)
サイズ (推定)	300mm×300mm×300mm 以下 断熱脚による空隙含む

表 1 Specifications of the science instrument

表 1 には、上記の要請を実現する装置仕様を示す。このような装置の実現性は、同科学目的のロケット実験 CIBER の観測装置において実証済みである[8]。本ミッションでは、黄道面外の環境により、その性能をフルに発揮できるようになる。

観測方法は、定点での黄道光モニターを定期的に行なうほか、他の衛星や地上望遠鏡によるサーベイ領域や低前景放射の天域を選択的にマッピング観測する。このような観測を実施するには、黄道面外 0.5AU にて 1 ヶ月以上の期間行なうことが望ましい。また、黄道光の明るさを黄道面外距離の依存性としてモニターする観測を、全観測期間にわたり 1 日 1 回以上行なうことで、惑星間ダストの密度分布を調べることができる。

高い検出感度を得るには、赤外線検出器の暗電流を充分低く抑えるための冷却が必要である。120K で良く、冷却は容易である。3 年以上にわ

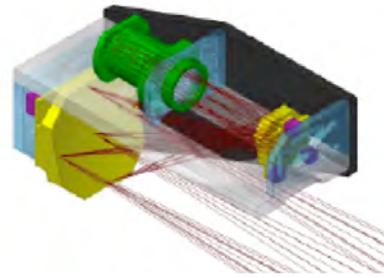


図 4 Optical design of the science instrument.

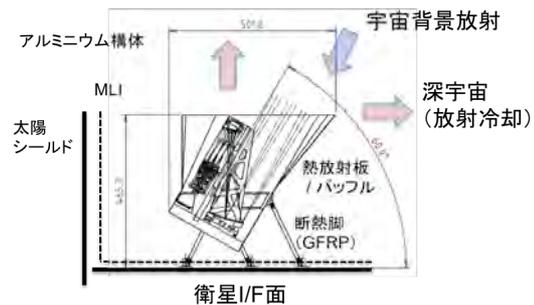


図 5 Cross-sectional view of the science instrument including thermal structure.

たる長期運用に耐えうる単純な装置構成や軽量化の観点から、放射冷却のみによる冷却が望ましい。深宇宙への放熱面の確保や、温度安定化のための機最長の波長を $1.7\mu\text{m}$ とすれば、温度要求は器への太陽光の入射を常時回避する衛星姿勢などが要求される。

要求される指向観測での姿勢安定度は、ピクセル視野角が広いため厳しいものではなく、1 分角/min 以下の程度である。また、特定天体の観測を目指すものではないため、絶対指向精度は 0.5 度程度あればよい。

図 4 には、観測装置の光学系構成例を示す。本来迷光の少ないグレゴリアン反射望遠鏡を、副鏡支持機構による散乱光を避けるため軸外しとする設計としている。広視野を確保するため、反射望遠鏡からの光を、収差補正レンズ光学系により、検出器上に結像する単純な構成となっている。

図5には、放射板を含む観測装置構成例について全系の断面図を示す。常温の衛星インターフェース面に対し、GFRPの断熱脚で支持する。観測装置へ太陽や地球から直接の入熱が無い限り、遮光板は低温に保たれ、望遠鏡バツフル内面や光学系構体の側壁の放熱のみで120K程度の温度は容易に実現できる。

4. まとめ

将来の小型システムによる深宇宙探査を目指すDESTINYの応用ミッションとして、IAUにて高傾斜角をとる黄道面脱出軌道からの宇宙赤外線背景放射観測を提案した。このミッションは、天文学と太陽系科学にまたがる科学的価値が極めて高いテーマに挑むものであり、実現が期待される。観測装置は既存の技術により実現可能性が高い。

参考文献

- 1) Barkana, R. & Loeb, A. : In the Beginning: The first Sources of Light and the Reionization of the Universe. *Phys. Rep.* **349**, pp. 125-238, 2001.
- 2) Hauser, M. & Dwek, E. : The Cosmic Infrared Background: Measurements and Implications. *ARA&A* **39**, pp. 249-307, 2001.
- 3) Matsumoto, T., *et al.* : Infrared Telescope in Space observations of the near-infrared extragalactic background light. *ApJ* **628**, pp. 31-43, 2005.
- 4) Tsumura, K., *et al.* : Low-Resolution Spectrum of the Extragalactic Background Light with AKARI InfraRed Camera. *PASJ* **65**, 121(7pp), 2013.
- 5) Zemcov, M., *et al.* : On the Origin of Near-Infrared Extragalactic Background Light Anisotropy. *Science*, **346**, pp. 732-735, 2014.
- 6) Matsuura, S., *et al.* : Joint Planetary and Astronomical Science with the Solar Power Sail Spacecraft. *Trans. JSASS, Aerospace Technology Japan* **12**, ists29, Tr_1-5, 2014.
- 7) Kelsall, T., *et al.* : The COBE Diffuse Infrared Background Experiment search for the cosmic infrared background. II. Model of the interplanetary dust cloud. *ApJ* **508**, pp. 44-73, 1998.
- 8) Zemcov, M., *et al.* : The Cosmic Infrared Background Experiment (CIBER): A Sounding Rocket Payload to Study the Near Infrared Extragalactic Background Light. *ApJS* **207**, 31(16pp), 2013.