

## 日米共同飛翔体赤外線天体干渉計

### JUStInE: Japan-United States Infrared Interferometer Experiment

松尾太郎<sup>1</sup>、David T. Leisawitz<sup>2</sup>、金田英宏<sup>1</sup>、芝井広<sup>1</sup>、太田峻介<sup>1</sup>、宮田隆志<sup>3</sup>、上塚貴史<sup>3</sup>、大藪進喜<sup>4</sup>、松尾宏、江澤元<sup>5</sup>、和田武彦、土居明広<sup>6</sup>、米国 JUStInE チーム

1. 名古屋大学大学院理学研究科, 2. NASA Goddard Space Flight Center, 3. 東京大学大学院理学系研究科, 4. 徳島大学教養教育院, 5. 国立天文台, 6. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

#### 要旨

本プロジェクトは、日本の Far-Infrared Interferometric Telescope Experiment (FITE) と米国の Balloon Experimental Twin Telescope for Infrared Interferometer (BETTII) が一つのチーム JUStInE (ジャスティン) を結成し、ニューメキシコ州の NASA の気球基地から 2026 年に技術実証フライト、2027 年に科学フライトを実施するものである。日本からは FITE で開発したゴンドラ・姿勢制御系・望遠鏡光学系を提供し、米国からは極低温干渉光学系・超伝導検出器・データ取得システムを提供する。2025 年に日本の開発機器を NASA の Goddard Space Flight Center へ輸送し、米国の開発機器と組み合わせて一つのフライトシステムとして統合する。

JUStInE は、Double Fourier 分光技術を採用し、Herschel に比べて約 1桁高い空間分解能で、波長 30 から 90 $\mu\text{m}$  にわたる広い波長帯で原始惑星系円盤や進化末期の恒星を分光撮像し、その温度構造を決定する。本プロジェクトで獲得される干渉技術と、宇宙科学研究所が中心となって推進する SILVIA において獲得される編隊飛行技術を組み合わせて、将来の編隊飛行型赤外線宇宙干渉計に発展することが期待される。本予稿では、初めに JUStInE の将来計画における立ち位置を説明するため、宇宙干渉計の科学的意義と将来計画を述べる。次に、JUStInE 計画の概要と予算申請における現状を述べる。最後に、2022 年度に実施した姿勢制御系の改良について紹介する。

#### JUStInE 計画の背景

中間・遠赤外線は、温度 10 から 300K の天体の放射波長域であり、また様々な分子の吸収・放射の波長域である。高解像度・高感度の赤外線観測が実現すれば、初代天体 (Population III) や初代銀河の形成現場から生命を宿す地球型惑星の探査に至るまでのバリエーションの宇宙史を開拓することができる。しかし、図 1 に示すように、波長 10 - 300 $\mu\text{m}$  の中間・遠赤外線における空間分解能は、他の波長帯域に比べて、大きく制限されている。理由は、波長が長くなるにつれて回折限界像が広がるために可視光や近赤外線に比べて空間分解能は低下するからである。他方、長い波長の電波においては、天体からの光の位相を測定することができるため、複数台の望遠鏡からの光を干渉させることによって空間分解能を向上させる「天体干渉計」を容易に実現することができる。天体干渉計の空間分

解能は望遠鏡間隔の最大距離によって決定されるので、その回折限界による低下を望遠鏡間の距離を離すことで、その限界を打破できる。

天体干渉計の歴史は古く、その最初の観測は 1921 年までさかのぼる (Michelson and Pease 1921)。その後、多様な波長で天体干渉計の技術が応用され、特に、ALMA などの電波干渉計において最先端の成果が次々と生み出された。同時に、地上における可視光や近赤外線の波長帯においても天体干渉計の技術は応用されてきた (e.g., Beckers et al. 1990, Colavita and Wizinowich 2000, Ten Brummelaar et al. 2005, Hinz et al. 2016)。しかし、電波に比べて波長が短いために、大気の影響による大きな光の位相の乱れが、可視光・赤外線天体干渉計の高性能化を長年にわたって阻んできた。長時間の露光が難しいために、単一開口の望遠鏡に比べて感度は大幅に低下する。さらに別々の離れた

望遠鏡からの光を結合することが技術的に難しくなるため、干渉計を構成する望遠鏡の台数も制限された。その結果、U-V 平面(天体干渉計の空間周波数平面)を埋めることができず、単一望遠鏡と同様のイメージオリティーの獲得は困難であり、光源の視直径やアストロメトリなどの情報に限定される。特に、可視光・赤外線天体干渉計においては、複素鮮鋭度(干渉縞の Visibility の複素振幅)の実部のみが獲得されるため、対称な構造のみに感度を有することになり、単一望遠鏡と同じ像を得ることができない。その点において、多数の望遠鏡から構成される ALMA は、U-V 平面を十分に埋めつつ、各望遠鏡がヘテロダイン検出を採用するために、電場の振幅に加えて位相も測定できる。つまり、完全な形での複素鮮鋭度(実部と虚部の両方)を取得するため、単一望遠鏡と同じ像を原理的に復元することができる。

宇宙干渉計は、大気の大擾乱による位相の乱れがないために、安定した干渉縞を取得することが可能である。また自由に基線長や基線の変換方向を変化させることができるため、最小の望遠鏡の数で U-V 平面を密に埋めることができる。さらに、本計画の JUSStInE で採用する、Double Fourier 分光技術を採用することにより、完全な形での複素鮮鋭度が取得でき、その複素鮮鋭度は波長方向に分解される。つまり、可視光・赤外線干渉計において高解像度の分光撮像ができる(Mariotti and Ridgway 1988, Leisawitz et al. 2002, Matsuo et al. 2008)。以上より、赤外線宇宙干渉計は、地上望遠鏡で構成される赤外線干渉計に比べて、その性能を大幅に向上することが期待される。

### 宇宙干渉計計画に向けた動き

赤外線宇宙干渉計は、先述の通り、複数の小型望遠鏡を複数打ち上げることで、単一望遠鏡では得られない解像度を実現するものである。2021年に米国10年委員会より推薦された望遠鏡計画も口径が JWST 程度であり、実現可能なコストと時間スケールを踏まえれば、単一望遠鏡の口径は最大でも 6m 程度に留まるだろう。宇宙望遠鏡の巨大化という方向性に限界が見えてきたことを

踏まえて、宇宙干渉計の実現に向けた技術開発が日米欧において加速しつつある。

赤外線宇宙干渉計の実現において鍵となるのが光学系に要求される精度である。電波より短い赤外線においては、天体からの光は強度しか得られないので、複数台の望遠鏡からの光を直接、検出面において干渉させて位相情報を取得する必要がある。その結果、電波干渉計に比べて、光学系に要求される精度は厳しくなる。干渉計として成立させるには、宇宙空間で数十メートル以上離れた2台以上の望遠鏡を観測波長と同程度の精度で光路長を制御しなければいけない。

宇宙干渉計は大別して次の二つの方式がある。1台の望遠鏡として構造的に結合した方式と複数台の宇宙望遠鏡を独立に飛行させる方式がある。後者は、日本の理工連携を進める超小型衛星3機の宇宙干渉計 SEIRIOS が世界に先駆けて編隊飛行の技術試験を実施する予定である(Matsuo et al. 2022)。さらに、JAXA 宇宙科学研究所が主導して進めている SILVIA がある。SILVIA は、超小型衛星では実現できない、衛星間の距離を 10 $\mu$ m の精度で安定に制御できる編隊飛行干渉計である。この技術は、欧州がリードして検討を進めている、Large Interferometer for Exoplanets (LIFE)に引き継がれる(Quanz et al. 2021)。JAXA 宇宙科学研究所「宇宙科学技術ロードマップ」の中で、新たな観測手法を拓く先進キー技術としてフォーメーションフライト・干渉計技術が明記されており、その方向性と完全に整合する。

一方で上述の技術実証においては、搭載する観測装置の重量や電力が大きく制限されるため、本格的な赤外線観測装置を搭載することが困難である。そこで、JUSStInE は、本格的な赤外線観測装置を気球に搭載して、赤外線の波長帯域で干渉縞を取得し、高解像度観測のデモンストレーションを行う。編隊飛行の実証と相補的な役割を担う。

JUSStInE は技術実証だけでなく、2030年代初頭に打ち上げを目指す、Space Interferometer for Cosmic Evolution (SPICE)のプレカーサーとしても期待される。実際、米国と欧州を中心に SPICE の検討が進められており、2023年度に提案書を NASA

に提出する予定である。SPICEは、JUStIIInEと同じく、構造的に結合された干渉計であり、後述の通り、Double Fourier 分光法を採用する。JUStIIInEと同じ観測手法で天体の3次元データ（空間2次元と波長1次元）を取得する。

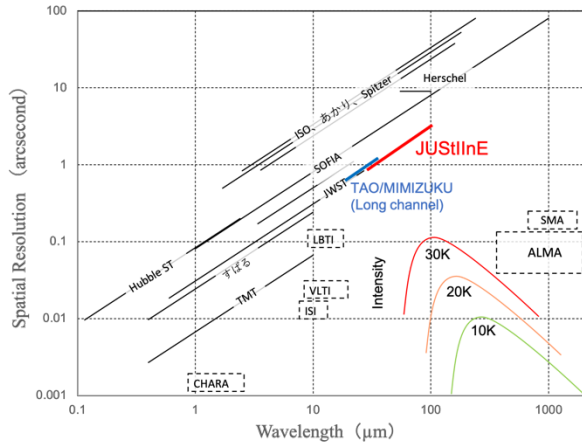


図1. 可視光から電波における現存および計画中の望遠鏡の空間分解能

### JUStIIInE 計画の概要

宇宙干渉計の先駆けとしての役割を担うべく、JUStIIInE計画が2020年に日本と米国の協力のもとで立ち上がった。本計画（Japan-United States Infrared Interferometry Experimentation: JUStIIInE）は、日本と米国の本格的な国際協力の下で、世界で初めて中間赤外線から遠赤外線の波長帯で飛行体天体干渉計を構築する。さらに、先行の赤外線宇宙望遠鏡に比べて約1桁高い空間分解能と、波長帯域 30 から 90 $\mu\text{m}$  の分光撮像を一度に実現する。JUStIIInE の成功を通して、本格的な宇宙赤外線干渉計の礎を我が国で築くことと同時に、日本と米国の国際協力の土壌を熟成し、将来の赤外線宇宙干渉計における協力を加速させることを目指すことが目標である。

JUStIIInE は、10 年以上にわたって、日本の FITE と米国の BETTII がそれぞれ開発を行い、フライトあるいはフライトリハーサルまで行ったチームが共同で進めるプロジェクトである。表1に JUStIIInE の主要なパラメーターを示す。日本から提供する項目は、集光光学系・ Gondola・姿勢制御系であり、FITE で開発された実績のあるシ

ステムである。図 2 は FITE の Gondola と姿勢制御系の全体図である。一方の米国は NASA Goddard Space Flight Center が中心となって、クライオスタット・極低温光学系・センサー系を構築する。米国および欧州の研究者約 15 名が参加する予定である。

波長 30 から 90 $\mu\text{m}$  の帯域を一度にカバーするために、二つのチャンネル(30 - 55 $\mu\text{m}$ 、60 - 90 $\mu\text{m}$ )から構成される。背景の熱放射を抑えるために、波長分解能 10 程度の回折格子による分光を行う。さらに、フーリエ分光が実施できるように、片側の光路の光路長を変化できるようにする。検出器は温度 500mK 以下で動作する、Transition Edge Sensor (TES) ボロメーターアレイである。

JUStIIInE は、2026 年と 2027 年の秋に New Mexico 州の Ft. Sumner から 2 回のフライトを実施する計画である。1 回目のフライトは、天体干渉計の技術実証として、太陽系内の衛星や小惑星などの明るい天体を観測する。アタカマ望遠鏡 TAO でも同じ天体を分光撮像し、Double Fourier 法が実施できているかを検証する。TAO は JUStIIInE の基線と同じ望遠鏡サイズを有しており、同じ分光像が取得できる見込みである。2 回目のフライトでは、原始惑星系円盤・進化末期の恒星・活動銀河核を狙う予定である。

表 1. JUStIIInE の主要な光学パラメーター

Item	Parameter
Baseline length	6.5 m
Diameter of each beam	400 mm
Wavelength range (short)	30 - 60 $\mu\text{m}$
Wavelength range (long)	60 - 90 $\mu\text{m}$
Raw resolving power	R ~ 10
Resolving power on Double Fourier	R ~ 100
Beam combine type	Michelson Beam combiner

### JUStIIInE 計画の現状

2021 年度に日本と米国の両方で予算申請が行われ、JUStIIInE の実現に向けて大きく前進した。日本では、JAXA 宇宙科学研究所が公募する小規模計画に応募し、後述の NASA への予算申請が認められるという条件において、採択される予定である。また、米国においても NASA の Astrophysics Research and Analysis (APRA)

に計 8 億円規模の予算を申請し、条件付きで採択された。この条件付き採択とは、TRL レベルが相対的に低い要素の追加検討を行い、その検討で問題がないことが確認できれば、申請予算の全額が採択されるというものである。

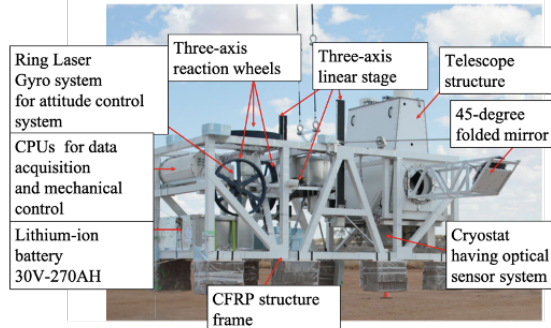


図 2. 2018 年のフライトリハーサル時に撮られた FITE ゴンドラ

追加検討が必要な項目は、温度変化や重力変化に対するゴンドラの安定性である。JUStInE の成功の鍵は、観測中に安定な干渉縞を取得できることである。ここで、JUStInE は Double Fourier 分光法を採用するため、遅延線を稼働させながら干渉縞を取得し、波長方向に分解された複素鮮鋭度を取得する。しかし、遅延線を稼働する間に、構造の変化に伴う光路差が形成されれば、フーリエ分光データに系統誤差が生じてしまう。一回あたりの遅延線の稼働時間は数秒間であるため、この時間スケールでの構造の安定性を調査する。この調査は、NASA の主導で進められ、2023 年の早い時期に結果がまとめられる。

2023 年度中に本プロジェクトの可否が決定される。JUStInE が採択される場合、2023 年の秋までにはプロジェクトが開始される見通しである。Design review が 2024 年の 6 月、Pre-integration review が 9 月、Mission Readiness review が 2026 年 7 月に実施される。FITE のゴンドラおよび望遠鏡光学系は 2025 年に 1 月に NASA Goddard Space Flight Center へ輸送され、2025 年秋までの 9 ヶ月間(予備日込み)、望遠鏡光学系と極低温光学系の光軸を一致させるための調整が行われる。2024 年秋から 2026 年夏までの間、Goddard において Flight システムとして完成させる。Mission Readiness Review を経て、7 月末から Ft. Sumner に輸送

し、打ち上げ準備を開始する。1 回目の打ち上げは、2026 年 9 月中旬を予定する。打ち上げ後から約半年間にわたって、損傷を受けたフライト品を取り替えて、再びフライトシステムとして構築し、2027 年 9 月に 2 回目のフライトを実施する。以上のように、日本と米国の両方でプロジェクトの開始を目指すため、日米で協力して NASA から課された追加課題に集中して対応を行なっている。

## 姿勢制御系の改良

JUStInE の観測波長は 30 から 90 $\mu\text{m}$  であり、その最短波長は FITE のそれに比べて、およそ 1/5 である。要求される姿勢精度は、およそ 5 倍高くなる。また、FITE では干渉縞取得を目標とするのに対し、JUStInE では、遅延線の動作中に姿勢を安定に保持する必要がある。つまり、姿勢の保持時間も長くなる。

以上を踏まえて、FITE の要求仕様に合わせて構築された姿勢制御系において、次の 3 点に集中して実験と検討を進めた。

1. JUStInE の要求仕様に耐え得ることの実験的な確認と検証
2. 現状の姿勢制御系における限界と、その限界を決めている要素の洗い出し
3. 姿勢制御精度の改善のための検討

現状の姿勢制御系で JUStInE の要求仕様を満たすことを確認した。しかし、振り子運動がある観測環境下においては、制御系の時間遅れによって振り子運動に追従することができないことが分かった。この時間遅れの改善には、制御ゲインの増加が求められるが、現状のモーターは回転数の整数倍で制御するために、制御ゲインの上昇は制御残差を発散させる。

FITE は 3 軸の姿勢制御系を採用するため、従来の気球望遠鏡に比べて、振り子運動の小さいため、上述の問題は相対的に小さい可能性がある。しかし、あらゆる観測環境に対応すべく、トルク制御できるモーターを調査し、JUStInE の要求仕様に耐え得るモーターの選定を行うことができた。今後、選定したモーターを姿勢制御系の 1 軸に採用し、ゲインを大きくした環境下でも制御残差が抑えられ、時間遅れの改善ができることを検証する予定である。