

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^{1,2}、David T. Leisawitz³、金田英宏¹、芝井広、下川徹¹、太田峻介¹、宮田隆志⁴、
上塚貴史⁴、米国 JUStInE チーム

1. 名古屋大学大学院理学研究科, 2. NASA Ames Research Center, 3. NASA Goddard Space Flight Center,
4. 東京大学大学院理学研究科

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 2025 年に技術実証フライト、2026 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。2024 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 μm 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、初めに宇宙干渉計の重要性を述べる。また、FITE プロジェクトの総括として、打ち上げに至らなかった原因を述べる。最後に、その解決策とともに、JUStInE 計画の概要を述べる。

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、初代天体や銀河 (Population III) 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オ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 μm 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、その限界を打破することができる。

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、大気の影響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 JUStInE 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。

FITE プロジェクトの総括

JUStInE 計画の概要を述べる前に、FITE プロジェクトの総括として、打ち上げまで至らなかった原因について述べる。FITE は、2008、2010年にブラジル、2018年にオーストラリアにおいて打ち上げの準備を進めたものの打ち上げには至らなかった。その最大の原因は、日本で光学系を組み立てて輸送したことで、日本から外国へ輸送する際に機器の破損が生じたことである。日本で光学系の組み立てを行う必要があった背景には、現地には最低限の施設しかなく、

6m という巨大な光学系を調整することが困難であったことがある。そこで、日本において大部分の光学系の調整を済ませ、現地では最低限の光学系の調整のみを実施するという方針が取られた。しかし、言い換えれば、6m の巨大光学系を一体物として運ぶことであり、細心の注意を払って輸送しても破損の可能性は高くなる。実際、2008年の輸送では軸外し放物面鏡が、2018年の輸送ではクライオスタット内部の寒剤のタンクを支える脚が破損した。現地で最低限の光学系調整だけの方針であったため、現地で光学系を調整する方式が確立しておらず、その場で何とか組み立てたということである。オーストラリアでの打ち上げでは、万全を期して打ち上げの3ヶ月前に入ったが、機器の損傷による対応のために、打ち上げウインドウ終わりの直前に準備が完了した。その結果、打ち上げを実施できなかった。

以上より、FITEプロジェクトの最大の問題点は、海外輸送前に光学系調整を実施し、現地において最小限の調整だけに止めるという方針にある。後述するように、本計画の JUStInE では光学系の調整方針を見直し、同様の問題を回避できると考える。

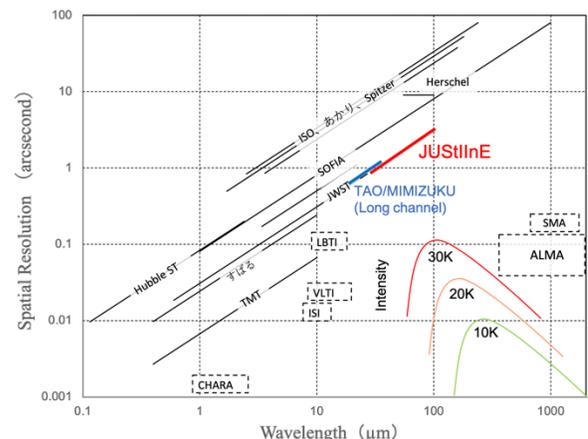


図1. 可視光から電波における現存および計画中の望遠鏡の空間分解能

JUStInE 計画の概要

本計画 (Japan-United States Infrared Interferometry Experimentation: JUStInE)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

飛翔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 μm の分光撮像を一度に実現する。JUStInE 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。

JUStInE 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 JUStInE 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・ゴンドラ・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 のゴンドラ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。

図3は、望遠鏡光学系と極低温光学系を組み合わせた設計図である。波長 30 から 90 μm 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 μm 、60 - 90 μm)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。図 4 に極低温光学系の 1 チャンネルの全体を示している。

JUStInE は、2025 年と 2026 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 JUStInE 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。

現在、NASA が公募する Astrophysics Research and Analysis (APRA) に計 6 億円規模の予算を申請する予定であり、2022 年にプロジェクトが開始される場合、Design review が 2024 年の 6 月、Pre-integration review が 9 月、Mission Readiness review が 2025 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 2024 年に 1 月に NASA Goddard Space Flight Center へ輸送され、2024 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 2025 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、2025 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、2 回目のフライトを迎える。

表 1. JUStInE 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 μm
Wavelength range (long)	60 - 90 μm
Raw resolving power	R ~ 10
Resolving power on Double Fourier	R ~ 100
Beam combine type	Michelson Beam combiner

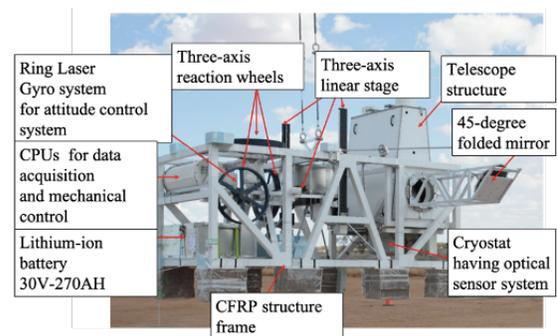


図 2. 2018 年のフライトリハーサル時に撮られた FITE ゴンドラ

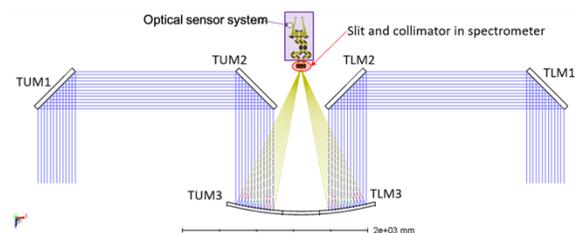


図 3. 望遠鏡光学系と極低温光学系

望遠鏡光学系の調整方針

JUStInE 計画は、FITE の望遠鏡光学系を利用する。従って、FITE 望遠鏡光学系の調整における問題点を改善しない限りは、JUStInE 計画の成功もない。そこで我々は、輸送前に行われる光学系調整の方針を取らず、代わりに現地において光学系の調整を実施する。さらに、打ち上げ基地だけでなく、NASA Goddard Space Flight Center への輸送後にも光学系の調整を行う。最終的に、極低温光学系の内部に設置される近赤外線検出器 (Hawaii2RG) において、望遠鏡光学系を通して天体の光を観測することで望遠鏡光学系の光学調整に問題がないことを確認する。なお、この近赤外線検出器の光軸は、極低温光学系の調整において遠赤外線検出器の光軸と一致させる。従って、打ち上げ前に近赤外線検出器で星からの光を取得できれば、遠赤外線検出器に天体からの光を導入できる光学系であることを証明できる。

輸送後に光学系を調整できることにより、光学系を輸送時に取り付ける必要がなくなり、光学

系の損傷のリスクが大幅に減少する。また、光学系の各システムはゴンドラへ容易に取り付け可能な設計にしているため、システムごとに輸送できるだけでなく、輸送後も組み立て時間の節約や不具合の確率を小さくすることができる。これまで機械的な仰角軸を積極的に基準としなかったが、仰角軸を基準として出発する点が新しい。また、TUM2、TLM2の駆動も、6軸の擬平行メカニズムであるラムダポッドを用いる。これらによって、短時間で干渉計の調整が完了すると見込まれる。6m サイズの光学系であるが、大掛かりな機器を使わずに、光路長 1mm および 3 分角の調整精度を達成できる見込みである。名古屋大学において本方式の確立のための実験が進められている。事前実験では、上記の数値が達成できる見通しである。

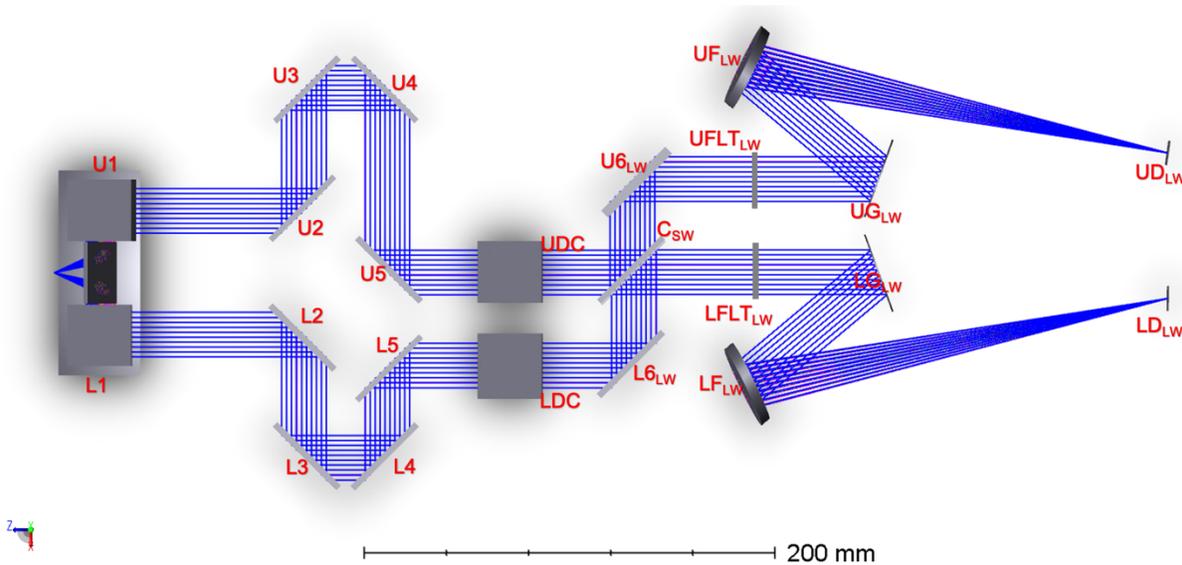


図 4. 極低温光学系の 1 チャンネル分 (60 - 90 μ m) の全体図

U と L は、Upper/Lower の頭文字である。U3 と U4 を紙面の上下に動かすことで光路差が変化する。UDC と LDC は、ダイクロイックミラーであり、二つのチャンネルに分割する。また、C_{sw} は 2 光束を結合するための半透鏡である。UFLT と LFLT のフィルターにおいて波長帯域を設定し、UG と LG の回折格子により波長分解能 10 が実現する。最後に、UD および LD の遠赤外線検出器において干渉縞を測定する。