

二国間交流事業 共同研究報告書

令和6年4月1日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]
東京大学・大学院理学系研究科
[職・氏名]
名誉教授・尾中 敬
[課題番号]
JPJSBP 120219939

1. 事業名 相手国: フランス (振興会対応機関: OP) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 赤外線衛星による系外銀河および銀河系の物質進化の分光学的研究

(英文) Spectroscopic study of evolution of matter in galaxies and the Galaxy with infrared satellites

3. 共同研究実施期間 2021 年 4 月 1 日 ~ 2024 年 3 月 31 日 (3 年 0 ヶ月)

【延長前】 2021 年 4 月 1 日 ~ 2023 年 3 月 31 日 (2 年 0 ヶ月)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

The Saclay Nuclear Research Center・Staff Researcher・Frederic Galliano

5. 委託費総額(返還額を除く)

本事業により執行した委託費総額		3,705,000 円
内訳	1年度目執行経費	1,824,000 円
	2年度目執行経費	1,881,000 円
	3年度目執行経費	- 円

6. 共同研究実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

日本側参加者等	9 名
相手国側参加者等	10 名

* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

7. 派遣・受入実績

	派遣		受入
	相手国	第三国	
1 年度目	0	0	0(0)
2 年度目	3	0	0(0)
3 年度目	2	1	2(0)

* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣: 委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。

受入: 相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は委託費で滞在費等を負担した内数。

8. 研究交流の概要・成果等

(1)研究交流概要(全期間を通じた研究交流の目的・実施状況)

我々の住む銀河系が宇宙の中でどのように進化し、現在に至ったかは現代天文学の重要課題の一つである。銀河系では星間物質(ガスと固体微粒子(以下ダスト))から星が生まれ、星の内部の核融合反応がエネルギー源となり進化を支配している。核融合反応で生成された炭素、酸素、ケイ素や鉄などの重元素が星間空間に放出され、現在の銀河の姿を形作ってきたと考えられるが、星間物質の進化・変成から星の生成、銀河の進化に至る過程は十分な理解が得られていない。銀河進化の研究の大きな困難の一つは、ダストの強い吸収を受け、可視光では観測不可能な密度の高い領域で星生成活動が起こっていることである。星間ガス、ダストは星の放射を吸収し、電波、赤外線で放射する。特に銀河進化の原動力となっている星生成活動領域でのダストとガスは、その大部分のエネルギーを赤外線で放射しており、赤外線観測は銀河の活動・進化の研究に不可欠である。しかしながら、地上からの赤外線観測は大型望遠鏡といえども地球大気の吸収と放射により大きく影響を受け、観測が限られた波長帯に限定されるとともに、熱放射の影響で天体からの微弱な信号の検出が困難である。銀河中の物質進化を理解し、銀河進化の最先端の研究を行うには、大気圏外からの赤外線観測に基づく星間ガスとダストの定量的な解析が必須である。本研究は、21世紀初めに打ち上げられた *Spitzer*, *AKARI*, *Herschel* そして、研究期間中 2021 年に打ち上げられた *James Webb Space Telescope (JWST)* による、最新の赤外線観測データを最大限に組合せ、室内ダスト実験の成果も用いて、近傍銀河および銀河系内の星間ガスとダストの物理状態とその進化過程を解明することを目的とするものである。*JWST* による観測計画の策定も目的の一つである。

ダストは炭素、酸素、ケイ素、鉄などの重元素から成り、サイズにより放射する波長帯が異なる。 ~ 100 nm のダストは遠赤外線に、 ~ 10 nm のものは $20\text{--}100$ μm に、 ~ 1 nm のダスト(多環式芳香族炭化水素:PAH と呼ばれる)は $3\text{--}20$ μm に特徴的なバンド構造を伴った放射を示す。*Herschel* は遠赤外線をカバーし、*Spitzer* は $5\text{--}40$ μm の分光データを提供する。*AKARI* はこれらの衛星にない $2.5\text{--}5$ μm の分光データを与え、PAH のサイズに敏感な 3.3 μm 放射バンドのほか、水、二酸化炭素などの氷の吸収バンドや、水素の再結合線や水素分子の遷移線など星間物質進化に重要な情報を提供する。さらに *JWST* は、これまでにない、空間分解、波長分解能、感度をもつ観測データを提供する。前回の二国間共同研究で、*Spitzer*, *AKARI*, *Herschel* の衛星が取得したデータを共通に抽出する手法を確立し、複数の衛星データを用いた研究の有効性を示し、ガスとダストの物理量の間の関係が物質進化の研究に重要であることを定性的に示した。また日本、フランスともダストを合成する室内実験を精力的に行っており、双方の分析手法の特徴の情報交換を行い、新たな実験手法の開発を進めることも目的の一つである。本研究ではこのような背景、実績のもと、*JWST* による観測データも加え、物質進化に重要な対象天体に絞り、詳細解析を行い、最新の衛星のデータと室内実験からガスとダストの定量的な関係を初めて明らかにし、物質進化の研究を行うことを目的とした。

本研究交流の前半は、新型コロナの流行のため渡航が大きく制限されたため、全体として計画を一年延長して実施した。またこの間にも、ロシアによるウクライナ侵攻の影響で燃料費が高騰し、フランスへの航空賃および滞在費が当初の計画に比べ大幅に増加した。一方、渡航制限が緩和した 2022 年度の後半から、フランス国内の年金制度改革反対のストライキが多発し、滞在中の行動が著しく制限されることがあったため、実施計画の大幅な見直しを行なった。当初は若手研究者を長期滞在させる計画であったが、以上の状況変化から、研究計画の前半はお互いの側で独立に研究を進め、研究内容の議論、進捗状況報告は、zoom を利用したリモート会議を中心に行うこととした。研究のまとめの時期に研究代表者が帯同する形で、若手研究者の渡仏を行ない、それ

ぞれの研究成果をまとめて発表・議論する形をとった。リモート会議で十分な議論が進められていたため、滞在した相手側研究所では集中した熱心な議論を取り交わすことができた。また若手研究者の成果内容をフランス側の多くの研究者に示すことができ、特に実験設備を実際に訪問し、リモートでは得られない、詳しい実験の内容についての情報の交換も行うことができた。このように、研究交流の目的は十分に果たせたと考えられる。

(2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

JWST の観測が進められる前までは、特に **Spitzer**, **AKARI** 衛星データを組み合わせた観測データの解析手法の開発とその応用的研究を進めた。フランス側では、これまで開発してきた階層的ベイジアン解析の手法を **Spitzer**, **AKARI** の分光データに拡張するプログラムを開発し、複数の銀河に適用して、銀河内の PAH と物理環境との関係を明らかにし、特に炭素系ダストの銀河内での進化・変性についての新しい知見を得た。この手法は JWST で取得された分光データにも応用し、さらに詳細な解析を進めることが期待される。一方、日本側ではこの手法を銀河系内の天体に適用し、炭素系ダスト中の重水素の検出や、窒素を含むダスト生成について、紫外線が重要であることを初めて観測的に明らかにするなど、多くの成果を上げた。

研究後半では、JWST の観測が進められ、このデータに基づいた解析を中心に進めた。JWST は従来の観測に比べて格段に精度の高い分光データを提供している。解析から炭素質ダストの持つバンドが、これまで予想されていたより、環境の違いによる変化がはるかに小さいことが明らかになった。この結果は、炭素質ダストが数少ない種類からなっているか、あるいは従来の描像を大きく変えることが必要になると考えられる。またガス輝線の解析も行い、これまで検出されていなかった CH_3^+ イオン分子の初めて観測し、気相における炭素系分子の生成に大きなインパクトを与える結果を得た。この結果は、炭素を含む分子の気相反応の描像を大きく変えるものである。JWST のデータは、多くの情報を含んでおり、現在、さらに詳細な解析が進行中である。重要な知見が将来の解析から得られることが期待される。

(3)相手国との交流(両国の研究者が協力して学術交流することによって得られた成果)

AKARI のデータ解析については、日本側に十分な経験がある一方、**Spitzer** のデータを合わせた階層的ベイジアン解析の手法はフランス側が開発してきたもので、この両者の知見・知識を組み合わせることで、データの価値を高めた新しい解析手法を開発し、新たな知見を得ることができた。またこの手法は、現在進行中の JWST のデータ解析にも有効であり、さらに重要な成果に発展することが期待される。一方、ダスト生成実験とその分析手法について双方の手法の情報の交換から、新しい実験計画につながる交流が進められており、今後の発展が期待される。

(4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

JWST は世界的にも注目を集めている、最大口径の宇宙望遠鏡である。この成果は社会的に大きなインパクトを持つ。研究代表者は、これらの成果を以下の東京大学大学院理学系研究科・および天文学専攻のサイトで一般に伝えている。

<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2023/8501/>

http://www.astron.s.u-tokyo.ac.jp/research_post/20240301/

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取組、成果)

上記のように若手研究者の長期派遣は、新型コロナ、物価の高騰などのため困難となったが、各年度とも1週間程度の派遣を行い、相手側研究所でそれぞれセミナーの形式で、若手研究者の研究成果の発表を行い、交流を進めることができた。これを契機に、今後も交流を続け、長期滞在する基盤を作ることができた。将来を担う若手研究者養成に十分な貢献を行うことができたと考えられる。

(6)将来発展可能性(本事業を実施したことにより、今後どのような発展の可能性が認められるか)

本研究で開発した、複数の衛星のデータを組み合わせた炭素質ダストバンドの解析の手法は、Spitzer, AKARI で得られている大量のデータを再解析し、新たな知見を得る研究につながることを期待される。また新しい JWST のデータなどにも適用可能なものであり、将来得られるデータ解析にも有効利用することができる。JWST の観測データの詳細解析は現在も進行中で、ALMA 等の他の観測装置を使用した新たな観測計画にも発展している。これらの観測から、今後も大きな成果が得られることが期待される。また室内実験での研究交流を通じて、新たな実験計画につながることを期待している。

(7)その他(上記(2)～(6)以外に得られた成果があれば記載してください)

例:大学間協定の締結、他事業への展開、受賞など

特になし。