

日本天文学会早川幸男基金渡航報告書

2025 年 6 月 10 日採択

申請者氏名	横山将汰 (会員番号 7551)
連絡先住所	〒 263-8522 千葉県千葉市稲毛区 1-33
所属機関	千葉大学
職あるいは学年	特任研究員
任期 (再任昇格条件)	2 年 (再任不可)
渡航目的	研究集会での口頭発表
講演・観測・研究題目	Cosmic Ray Heating in the Early Universe: Joule Heating by Return Currents and its Impact on the Thermal Evolution of the Intergalactic Medium at Redshift around 10
渡航先 (期間)	スイス連邦 (2025 年 7 月 14 日～7 月 25 日)

本渡航では、2025 年 7 月 14 日-24 日に行われた宇宙線国際会議 39th International Cosmic Ray Conference (ICRC2025) に参加し、「Cosmic Ray Heating in the Early Universe: Joule Heating by Return Currents and its Impact on the Thermal Evolution of the Intergalactic Medium at Redshift around 10」という題目で口頭発表を行いました。ICRC は 2 年に一度開催される伝統ある宇宙線に関する国際会議で、宇宙線に関する最新の観測結果や理論の進展が活発に共有される場となっています。

今回の口頭発表では、宇宙線が駆動するガス加熱過程を新たに提唱し、その初期宇宙の銀河間空間への影響について議論しました。非熱的高エネルギー粒子である宇宙線は、現在の宇宙では主に超新星残骸衝撃波で加速されていると考えられていますが、初期宇宙の銀河においても同様の過程で宇宙線が加速されると期待されます。加速された宇宙線が銀河間空間へ流出すると、さまざまな相互作用によりガスを加熱し、特に赤方偏移 10 (宇宙年齢約 5 億年) 程度の時代では、その影響が中性水素からの 21-cm 線信号として観測できる可能性があります。宇宙再電離期の銀河間空間からの 21-cm 線信号の観測は、SKA (Square Kilometer Array) によって本格化すると期待されています。従来、銀河間空間の温度上昇の主な要因は銀河からの X 線による加熱と考えられてきましたが、近年では宇宙線による加熱効果も考慮され始め、中性ガスの電離と自由電子との Coulomb 相互作用による宇宙線直接加熱の効果が計算されるようになっていきます。このような背景を踏まえ、我々は宇宙線流が駆動する「抵抗性加熱」という新しい加熱機構を提唱し、それが銀河間空間の加熱に支配的な役割を果たしうることを示してきました (Yokoyama and Ohira 2023)。

宇宙線が銀河から流出すると、宇宙線電流 J_{CR} を打ち消すために、熱的電子が帰還電流 $J_e \approx -J_{\text{CR}}$ を作りますが、このとき熱的電子と熱的陽子との間には相対速度が残ります。宇宙論的なタイムスケールでは、熱的粒子間の Coulomb 衝突は無視できず、衝突により抵抗が生じますが、帰還電流は維持されるため、ガスは抵抗性電場 $E = \eta J_e$ の散逸により加熱され続けます。我々の先行研究では、この抵抗性加熱による加熱率の評価と銀

河間空間温度の時間進化の計算を行いました、今回の発表ではこれをさらに拡張した最新の結果を報告しました。

再電離前の銀河間空間は電離度が低いので、荷電粒子間の衝突だけでなく、熱的電子と中性原子間の衝突も重要となります。本講演では中性粒子との衝突を含めた抵抗を評価し、 10^3 K 程度の環境でこれが支配的となることを示しました。さらに、加熱率が温度と電離度に大きく依存することから、新たに電離度の時間発展を取り入れ、銀河間空間の温度進化を調べました。その結果、典型的な銀河と銀河間空間の環境では宇宙線駆動の抵抗性加熱が X 線加熱などよりも支配的となり、100 K を超える高温領域が 30 kpc 程度まで広がることが分かりました。このような高温領域は、この時代の宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) よりも温度が高いため、21-cm 線の放射領域として観測されうることを議論しました。今後は、公開コードに本加熱機構を実装するなどの形で、より現実的な 21-cm 線信号の予言を行うことを計画しています。

発表後には、Ellis Owen 氏をはじめ、多くの方から本加熱過程の物理や応用性に関して質問をいただきました。本研究はこれまで主にプラズマ物理や銀河進化の研究者の前で発表することが多かったのですが、今回は宇宙線理論の専門家の方々から大変貴重なフィードバックを得ることができました。いただいたコメントを踏まえ、新たな応用天体を模索しながらモデルを改善していきたいと考えています。また、会期中には CERN の実験施設を見学させてもらうことができ、理論家の私としては、実際の粒子実験の雰囲気味わう大変有意義な経験となりました。さらに実験系の研究者の方々とも多く知り合うことができ、今後も分野を超えた交流を大切に、研究の幅を広げていきたいと気持ちを新たにしました。

2 年に一度行われる ICRC は、私にとってホームのような学会であると同時に、2 年間の自分の成長を試す試金石のようにも捉えています。この 2 年間は、宇宙線加熱の初期宇宙への応用を議論するうえで宇宙進化の勉強に偏重していましたが、宇宙線やニュートリノの最新の観測結果に触れる中で、今後はより宇宙線の基礎物理の解明に寄与できるよう努めたいと決意を改めました。末筆ながら、本学会への参加を援助していただいた早川幸男基金に心より御礼申し上げます。本渡航で得た貴重な経験を糧に、まずは 2 年後の ICRC を見据えて研究に一層邁進してまいります。本渡航を支えてくださった関係者の皆様に、改めて深く感謝申し上げます。