

PRESS RELEASE (2024/07/29)

太陽圏の果てで宇宙線はどのように作られるのか

～スーパーコンピュータ「富岳」による世界最高精度の計算で再現～

ポイント

- ① 宇宙線（宇宙放射線）^(※1)の生成機構は発見以来未解明
- ② 大規模かつ高精度な第一原理計算^(※2)で太陽圏外縁環境を再現し初期の宇宙線生成機構を解明
- ③ 次期太陽圏探査ミッションでの検証に期待

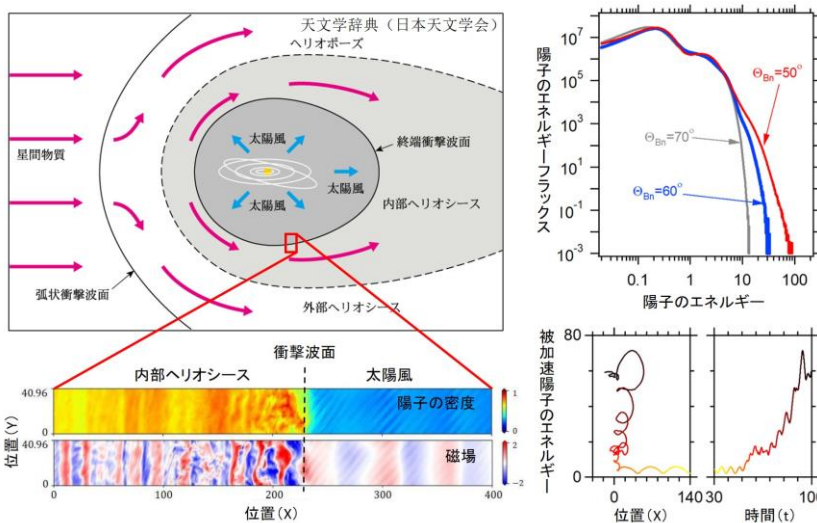
概要

宇宙空間を飛び交う放射線（宇宙線）は 1912 年に発見されました。地上の加速器では到底実現できないような高いエネルギーをもちますが、その生成機構は発見以来謎のままです。

九州大学大学院総合理工学研究院の松清修一教授と千葉大学国際高等研究基幹の松本洋介准教授は、太陽圏の外縁で生成されることが知られている宇宙線異常成分（この領域で生成される宇宙線を特別にこのように呼びます）の加速過程を調査しました。太陽圏とは、宇宙空間において太陽を起源とするプラズマが占める領域のことで、最低でも数百億キロメートル以上にわたって広がっているとされています。過去に唯一、太陽圏外縁の直接探査に成功したボイジャー探査機^(※3)はたしかに宇宙線異常成分を観測したものの、その生成率が探査当時の理論的予測と明らかに異なるなど、宇宙線生成機構の謎は深まっていました。研究グループが注目したのは外縁領域に存在する衝撃波での粒子加速で、加速のトリガーとなる初期の加速機構がどのように発現するのかという点です。スーパーコンピュータ「富岳」^(※4)を使って宇宙プラズマ衝撃波の大規模かつ高精度な第一原理計算を行い、宇宙線異常成分の種になる陽子の初期加速過程を世界で初めて解き明かしました。

宇宙線には遠く離れた高エネルギー天体現象の情報を我々に伝えるメッセンジャーとしてのほたらきがあるほか、銀河や生命の進化にも影響を与えられていると考えられており、その生成機構の解明は自然科学のさまざまな分野の研究を促進することが期待されます。

本研究成果は米国の雑誌 The Astrophysical Journal Letters に 2024 年 7 月 29 日（月）午後 5 時（日本時間）に掲載されました。



研究者からひとこと：

宇宙線異常成分の加速には複数のモデルがあり、目下数値計算による検証が盛んです。ここでは従来よりも格段に精度の高い第一原理計算を用いて衝撃波による加速過程を詳細に調べました。計算コストのかかる第一原理計算で陽子の初期加速を再現することに世界で初めて成功したのは、「富岳」の高い計算能力のおかげです。

図. 太陽圏の模式図と計算結果

左上）太陽圏の模式図。この図の赤枠の領域（終端衝撃波とその近傍）を第一原理計算で再現。

左下）計算で再現した衝撃波近傍のようす。上は陽子の密度、下は磁場構造を表す。

右上）内部ヘリオシースの陽子のエネルギー分布。図中の角度は衝撃波面に対する磁力線の向きを表す。

右下）代表的な被加速粒子の軌道とエネルギーの変化。左右の線の同じ色が同じ時刻に相当する。

【研究の背景と経緯】

宇宙線は宇宙誕生の初期段階から存在しており、宇宙におけるエネルギー輸送や星形成、銀河や生命の進化にも影響を与えていると考えられています。積極的な宇宙利用を進める人類にとっては、宇宙空間で宇宙線の脅威から宇宙飛行士や宇宙機を守る（宇宙線により宇宙飛行士が被ばくしたり、宇宙機が誤作動や故障を起こしたりすることがある）ことも喫緊の課題です。

宇宙線の生成機構は未だ謎ですが、中でも有力視されているのが宇宙プラズマ衝撃波による加速モデルです。地球近傍で観測される宇宙線異常成分（～数十メガ電子ボルト）は、太陽圏終端衝撃波で加速された宇宙線であると長年考えられてきましたが、ボイジャー探査機が初めて太陽圏終端衝撃波を直接探査した際（1号機：2004年、2号機：2007年）には、予想されたほどの宇宙線は観測されませんでした。理由はいまでも不明です。

【研究の内容と成果】

そもそも衝撃波で宇宙線が加速されるためには、宇宙線の種になる粒子（種粒子）が衝撃波の周りに潤沢に存在している必要がありますが、そのための条件や種粒子がどのように作られるのかがよく分からないという重大な未解決問題がありました。今回はこの種粒子の生成機構解明に取り組みました。宇宙線の主成分は陽子であり、太陽圏終端衝撃波の近傍にはこの領域特有のピックアップイオン^(※5)と呼ばれる陽子成分が多く含まれることが分かっています。このピックアップイオンを含む形で終端衝撃波の構造を第一原理計算で再現し、時間発展する衝撃波構造の中でのピックアップイオンの挙動を詳細に解析しました。衝撃波面に対して磁力線が斜めを向くことが重要であること、このとき衝撃波上流で励起される大振幅電磁波が一部のピックアップイオンを効率的に加速すること、加速の初期段階でピックアップイオンがサーフィン加速と呼ばれる特徴的な挙動を示すことなどを明らかにしました。

【今後の展開】

2025年打ち上げ予定の米国のIMAPミッション^(※6)では、今回調査した種粒子と同じエネルギー帯の高エネルギー中性粒子^(※7)の観測が行われます。粒子の全天マップが得られれば、広い太陽圏のどこで種粒子が作られているかの情報が得られ、衝撃波における宇宙線加速の理解が格段に進むことが期待されます。

【用語解説】

（※1）宇宙線

宇宙空間を飛び交う高エネルギーの粒子・放射線の総称で、宇宙放射線とも呼ばれる。

（※2）第一原理計算

膨大な数（数百億個）の電子と陽子の運動方程式と、マクスウェル方程式（電磁場の基礎方程式）を連立して解くプラズマの数値計算法。（無衝突）プラズマ物理学の第一原理に忠実に計算精度の高い方法だが、電子スケールのミクロな構造を解く解像度が必要なため陽子に関係する現象を扱うには大規模計算が不可欠である。

（※3）ボイジャー探査機

1977年に打ち上げられた米国の宇宙探査機で現在は太陽圏外の星間空間を航行中。2004年（1号機）と2007年（2号機）に太陽圏終端衝撃波を通過して貴重なデータを取得した。

（※4）スーパーコンピュータ「富岳」

スーパーコンピュータ「京」の後継機として理化学研究所が設置し、2021年3月から共用を開始した

計算機。2020年6月以降、世界のスーパーコンピュータに関するランキングにおいて、4部門で4期連続1位、うち2部門で9期連続1位を獲得するなど、世界トップレベルの性能を持つ。

(※5) ピックアップイオン

太陽圏外縁に存在する陽子成分。太陽圏外の星間空間に含まれる中性水素が、太陽圏内で太陽風の陽子と衝突して電荷交換したり、太陽光（光子）との衝突で電離したりすることで、太陽風とともに（太陽風にピックアップされて）運動する。

(※6) IMAP ミッション

NASAの次期太陽圏探査ミッションで、2025年に打ち上げ予定。太陽圏外縁で生成される高エネルギー粒子（含、高エネルギー中性粒子^(※7)）の一部が地球軌道付近まで到達したものを観測する。

(※7) 高エネルギー中性粒子

上記の電荷交換の際、最初に陽子だった粒子は中性化する。太陽圏外縁では電荷交換反応が盛んなため、外縁領域で加速された陽子の一部は中性化する。これらを高エネルギー中性粒子と呼び、ひとたび中性化した粒子の一部は電磁場の影響を受けずに地球近傍まで到達する。

【謝辞】

本研究はJSPS科研費（JP19K03953, JP22H01287, JP23K22558, JP23K03407）の助成を受けたものです。本研究は、文部科学省スーパーコンピュータ「富岳」成果創出加速プログラム「シミュレーションとAIの融合で解明する宇宙の構造と進化」（JPMXP1020230406）の一環として実施されたものです。また本研究の一部は、（スーパーコンピュータ「富岳」）の計算資源の提供を受け、実施しました（課題番号：hp230204, hp240219）。

【論文情報】

掲載誌：The Astrophysical Journal Letters

タイトル：Injection process of pickup ion acceleration at an oblique heliospheric termination shock

著者名：Shuichi Matsukiyo and Yosuke Matsumoto

DOI：10.3847/2041-8213/ad5d73

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学 大学院総合理工学研究院 教授 松清修一（マツキヨ シュウイチ）

TEL：092-583-7667 FAX：092-592-8447

Mail：matsukiy@esst.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL：092-802-2130 FAX：092-802-2139

Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

千葉大学 広報室

TEL：043-290-2018

Mail：koho-press@chiba-u.jp