

令和2年12月15日

報道機関 各位

東北大学学際科学フロンティア研究所
東北大学大学院理学研究科
自然科学研究機構 国立天文台

宇宙空間でイオンが電子より高温になる理由を解明 -プラズマ中の“音波”がイオンを選択的に加熱-

【発表のポイント】

- ブラックホールの降着円盤^(注1)や太陽風^(注2)を構成している高温・希薄なプラズマ^(注3)の乱流を大規模数値シミュレーションで再現.
- イオンと電子が乱流によってどのように加熱されるか調査.
- 縦波^(注4)的なゆらぎが存在するとイオンが選択的に加熱されることを発見.

【概要】

太陽から吹き出る太陽風やブラックホールを取り巻く降着円盤はプラズマで出来ています. 宇宙に存在するプラズマは高温・希薄であるため, プラズマを構成するイオンと電子の間の衝突がほとんど起こらない無衝突状態にあります. そのためイオンと電子は直接相互作用をせず, 異なった温度を取ることが可能です. 実際に, これらの天体現象ではイオンの方が電子より遥かに高温になっていることが分かっていました. しかし, なぜイオンが電子より高温になるのか? この疑問の答えは長年の未解決問題でした.

東北大学学際科学フロンティア研究所の川面洋平助教(大学院理学研究科兼任)を中心とした国際チームは, 国立天文台の「アテルイII」^(注5)をはじめ複数のスーパーコンピュータを用いて無衝突プラズマ乱流のシミュレーションを行い, イオンと電子がどのように乱流によって加熱されるかを調査し, この問題を解決しました. プラズマの乱流中には縦波的ゆらぎと横波的ゆらぎが存在していますが, これまで行われてきた研究では横波的ゆらぎのみが考えられてきました. 本研究では, 世界で初めて縦波的ゆらぎを含む無衝突乱流を計算し, イオンが縦波的ゆらぎのエネルギーを選択的に吸収することで電子より高温になることを突き止めました(図2). この結果は, 2019年に公開されたイベントホライズン望遠鏡^(注6)によるブラックホールの影の撮像結果を解析する際にも重要となります.

本研究の成果は, 2020年12月11日に発行された米国の科学雑誌「Physical Review X」に掲載されました.

【詳細な説明】

宇宙に存在する物質のうち、ダークマター以外の「目に見える」物質の99%はプラズマ状態にあると考えられています。そのため、プラズマの持つ性質を知ることは様々な天体现象を理解する上で重要です。プラズマが重要となる天体现象の代表例としては、太陽から吹き出る太陽風やブラックホールを取り巻く降着円盤などが挙げられます。しかし、これらの天体におけるプラズマの物理的性質には未解明な点が多く存在しています。その一つがイオンと電子の温度差です。天体プラズマは高温で希薄なため、粒子の間の衝突がほとんど存在しません。このような状態を無衝突状態と呼びます。無衝突状態では、プラズマを構成するイオンと電子の間に直接的な相互作用が存在しません。そのため、イオンと電子は異なった温度を取ることが可能です。これは私達の身の回りではなかなか見られない特徴です。例えば、熱いコーヒーに冷たいミルクを注げば、あっという間にコーヒーとミルクは同じ温度になります。しかし天体プラズマではイオンと電子は異なった温度を維持しています。実際に、人工衛星による太陽風の観測や降着円盤の理論モデルから、これらの天体现象ではイオンの方が電子より遥かに高温になっていることが知られていました。しかし、なぜイオンが電子より高温になるのか？この疑問の答えは長年の未解決問題でした。その答えを得るためには無衝突プラズマの基礎性質を深く理解する必要があります。

今回、東北大学学際科学フロンティア研究所の川面洋平助教を中心にオックスフォード大学、プリンストン大学、カリフォルニア大学バークレー校、アリゾナ大学、メリーランド大学の研究者で構成される国際研究チームは、スーパーコンピュータを用いて無衝突プラズマ乱流のシミュレーションを行い、イオンと電子がどのように乱流によって加熱されるかを調査し、この長年の問題を解決しました。無衝突プラズマでは、私達が身の回りの水や空気の流れを調べる際に使う流体力学モデルを使うことが出来ません。そのため運動論と呼ばれる第一原理モデルを使う必要があります。しかし、運動論は流体力学より遥かに複雑なモデルです。そこで、研究チームは磁場閉じ込め核融合の研究で用いられているジャイロ運動論^(注7)というモデルを用いて無衝突プラズマ乱流のシミュレーションを行いました。ジャイロ運動論は、乱流の持つ様々なゆらぎのうち、ゆっくりとした変動にのみフォーカスすることで、本来の運動論よりもシミュレーションにかかる数値コストを大幅に下げることが可能になります。研究チームはこの「核融合のモデルを天文学へ応用するという学際研究」によって、天体プラズマの未解決問題を解き明かすことに成功しました。このシミュレーションには、国立天文台が運用する天文学専用スーパーコンピュータ「アテルイII」並びにイギリス、イタリアにあるスーパーコンピュータが用いられました。

プラズマの乱流の中には横波的ゆらぎと縦波的ゆらぎが存在します。横波的ゆらぎとは磁力線が弦のように振動するものです。一方、縦波的ゆらぎとは音波のように密度や磁場の強度が振動するものです。これまで行われてきた無衝突プラズマ乱流の研究では、横波的ゆらぎのみが存在する状況が想定されてきました。横波的ゆらぎのみが存在するときは、イオンが選択的に加熱される可能性と電子が選択的に加熱さ

れる可能性のどちらもあり得ました。本研究では、世界で初めて縦波的ゆらぎと横波的ゆらぎが共存するという、現実の天体現象により近い状況で無衝突プラズマ乱流のシミュレーションを行いました。その結果、イオンは縦波的ゆらぎの持つエネルギーを電子より効率よく吸い取るため、あらゆる状況でイオンは電子より強く加熱されることが明らかになりました(図2)。

この発見は、さまざまな天体現象でイオンが電子より高温である事実を説明できるものです。特に、2019年に公開されたイベントホライズン望遠鏡によるブラックホールの影の撮像結果を解析する際に、イオンが電子に比べどれくらい強く加熱されるかという情報が必要になります。そのため、本研究の結果は降着円盤の観測結果をより精度良く理解するために重要な成果とすることができます。

本研究成果をまとめた論文は、2020年12月11日に発行された米国の科学雑誌「Physical Review X」に掲載されました。

本研究はJSPS科研費19K23451および20K14509の助成を受けたものです。

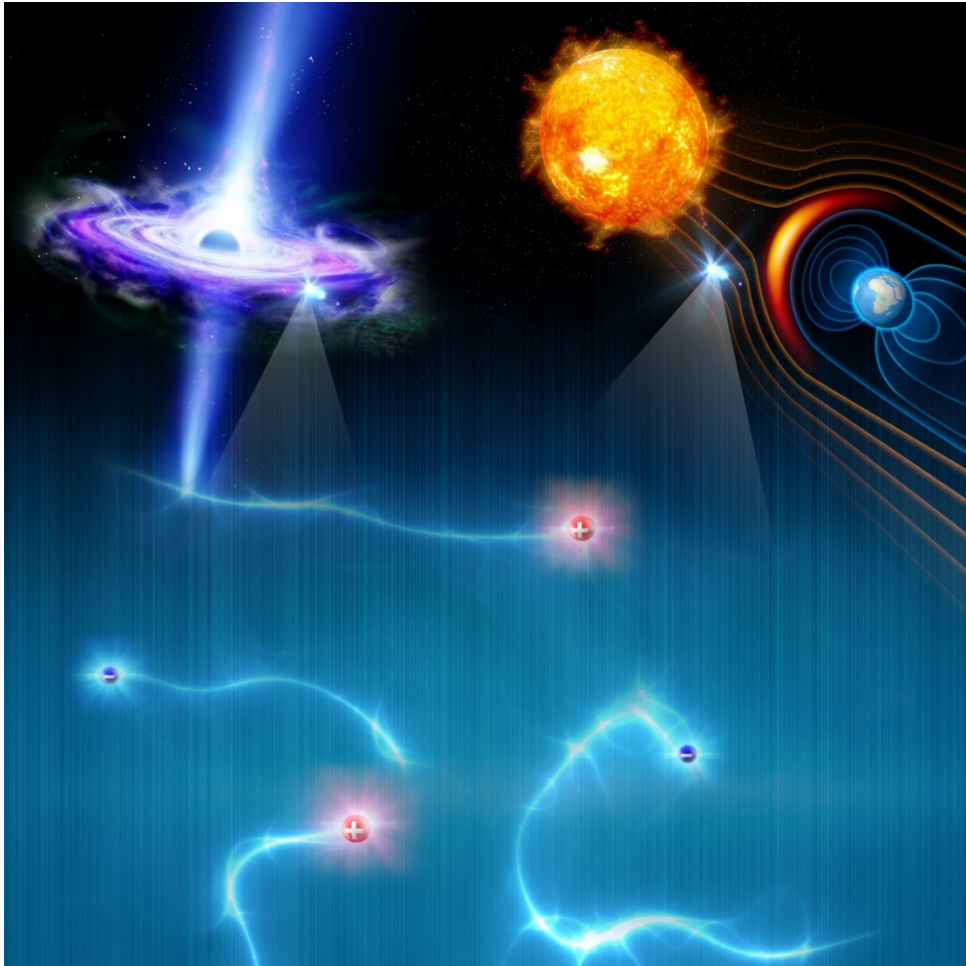


図1:本研究の概念図. 降着円盤や太陽風の中で、プラズマを構成しているイオンと電子が乱流によって加熱される。(クレジット:川面洋平)

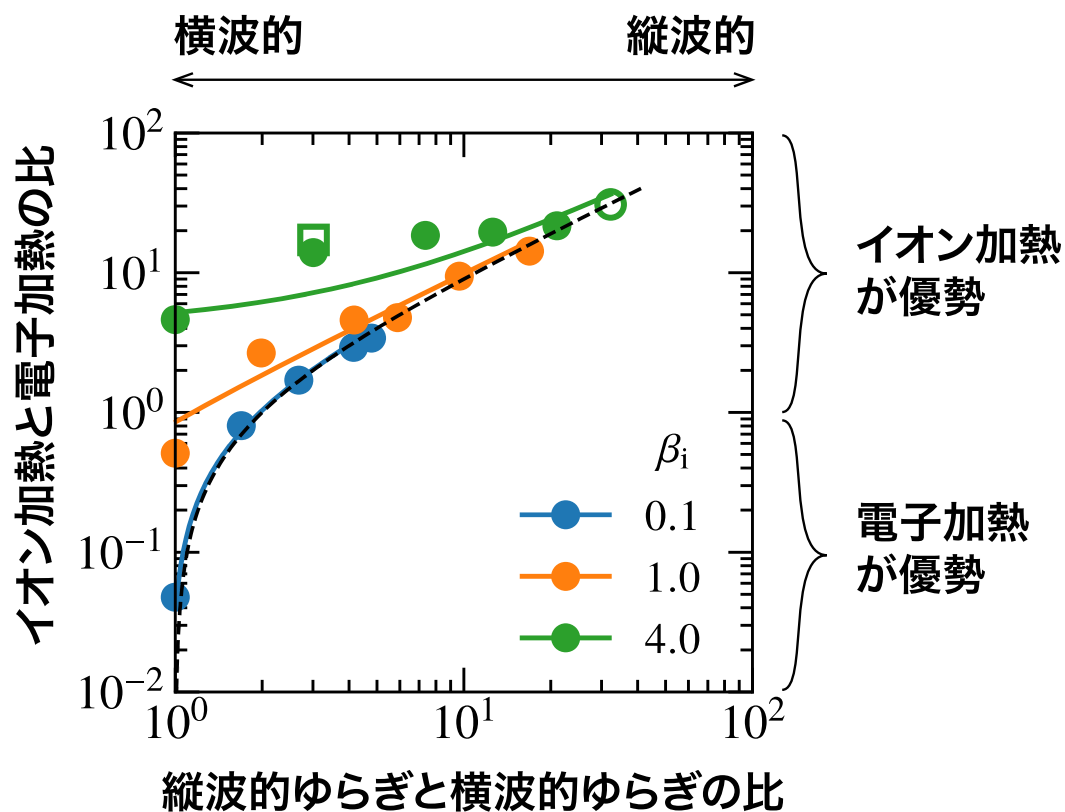


図2: 大規模数値シミュレーションによって得られたイオンと電子の加熱比と、縦波的ゆらぎと横波的ゆらぎの比の関係性. 横軸の値が大きいほど縦波的成分が増大する. 一方、縦軸の値が大きいほどイオンの加熱が増大し、1を超えるとイオン加熱の方が電子加熱より大きくなる. マーカーの色はプラズマの圧力と磁場の圧力の比 β_i に対応し、 β_i が小さいほどより強磁場になる. いずれの β_i に対しても、イオンと電子の加熱比は、縦波と横波の比の増加関数であるため、縦波的ゆらぎがイオンを選択的に加熱していることを示している. (Kawazura et al. (2020) Physical Review X を改変, © 2020 The American Physical Society)

【用語説明】

(注1) 降着円盤

ブラックホールや中性子星などの大質量星や誕生したばかりの若い恒星の周りを回転しながら中心に落下する円盤状のプラズマの流れ. プラズマは円盤中で乱流状態になっており、中心に向かって落ち込むにつれて高温に加熱される.

(注2) 太陽風

コロナと呼ばれる太陽の上層大気から吹き出すプラズマの風. 地球ではオーロラや

磁気嵐が太陽風によって引き起こされる。

(注3) プラズマ

プラスの電荷を帯びたイオンとマイナスの電気を帯びた電子で構成されるガス。個体、液体、気体に続く物質の第4の状態。宇宙に存在するダークマター以外の「目に見える」物質の99%はプラズマ状態にあると考えられている。

(注4) 縦波

波の進む方向と媒質の振動方向が平行であるもの。縦波の例である音波では、密度の変動方向が波の進む方向と平行になっている。プラズマ中では密度だけでなく磁場強度の変動も縦波になる。一方横波では波の進む方向と媒質の振動の方向が垂直になる。横波の例は弦の振動である。プラズマでは磁力線の振動が横波になる。

(注5) スーパーコンピュータ「アテルイⅡ」

国立天文台が運用するシミュレーション天文学専用のスーパーコンピュータ。国立天文台水沢キャンパス(岩手県)に設置されており、3.087 ペタフロップスの理論演算性能を持つ。

(注6) イベントホライズン望遠鏡

地球上に点在する電波望遠鏡を組み合わせることで地球サイズの仮想的な超巨大望遠鏡を作る国際プロジェクト。昨年、M87 銀河中心の巨大ブラックホールの姿を明らかにした。

(注7) ジャイロ運動論

イオンや電子が磁力線の周りを旋回する高速な運動を平均化し、ゆっくりとした運動のみを解く手法。磁場閉じ込め核融合の研究において広く使われている。

【発表論文】

雑誌名: Physical Review X

タイトル: Ion versus Electron Heating in Compressively Driven Astrophysical Gyrokinetic Turbulence

著者: Yohei Kawazura, Alexander A. Schekochihin, Michael Barnes, Jason M. TenBarge, Yuguang Tong, Kristopher G. Klein, and William Dorland

DOI: 10.1103/PhysRevX.10.041050

URL: <https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.10.041050>

【問い合わせ先】

(研究に関して)

東北大学 学際科学フロンティア研究所 (大学院理学研究科兼任)

助教 川面 洋平(かわづら ようへい)

E-mail kawazura@tohoku.ac.jp

(報道に関して)

東北大学 学際科学フロンティア研究所

URA 鈴木 一行(すずき かずゆき)

電話 022-795-4353

E-mail suzukik@fris.tohoku.ac.jp