

Press Release

核融合プラズマ中の乱流が織り成すマルチスケール相互作用 —スーパーコンピュータ「京」で得られた新発見—

名古屋大学大学院理学研究科（研究科長：松本 邦弘）素粒子宇宙物理学専攻の前山 伸也（まえやましんや）助教、同 渡邊 智彦（わたなべともひこ）教授、日本原子力研究開発機構の 井戸村 泰宏（いどむらやすひろ）研究主幹、核融合科学研究所の石澤 明宏（いしざわあきひろ）助教らを中心とする研究グループは、スーパーコンピュータ「京」を用いた研究によって、核融合プラズマ中に存在する幅広いスケールにおよぶ乱流間の相互作用—「マルチスケール相互作用」のメカニズムを明らかにしました。

磁場閉じ込め型核融合炉は、超伝導コイルにより作り出す強力な磁場を利用して、1 億度超の高温・高圧の電離気体（プラズマ）を閉じ込めることで、核融合反応を引き起こし、そのエネルギーを取り出そうという試みで、国際協力の下で盛んに研究開発が進められています。プラズマ中で生じる乱流は、プラズマの閉じ込め性能を劣化させてしまうため、乱流現象の機構解明が重要な研究課題となっています。核融合プラズマ乱流に関して、これまで、イオンが作る乱流と電子が作る極微細な乱流は相互作用しないというスケール分離の仮定に基づいた研究が行われてきました。

本研究グループは、「京」の高い演算性能をフル活用することで、イオンが作る乱流と電子が作る乱流が混在する複雑なプラズマ乱流の振る舞いを正確にシミュレーションすることに初めて成功しました。その結果、イオンが作る乱流による電子の極微細な渦の引きちぎりや、電子が作る乱流によるイオンの層流状流れの減衰といった、マルチスケール相互作用の存在を突き止めました。さらに、これらの相互作用が、プラズマの閉じ込め性能に影響を与えうることを明らかにしました。

本研究の成果は、従来のスケール分離の仮定が成立しない状況をシミュレーションで示したプラズマ物理学上の発見であるとともに、核融合炉におけるプラズマ閉じ込め性能の評価・予測の進展に大きく貢献するものです。本研究は名古屋大学、日本原子力研究開発機構、核融合科学研究所の共同研究として行われ、その研究成果は米国科学雑誌 Physical Review Letters 誌に 6 月 23 日に掲載されました。

【概要】

スーパーコンピュータ「京」を活用したこれまでにない精緻なプラズマ乱流のシミュレーションにより、核融合プラズマ中の電子が作る乱流とイオンが作る乱流の間に相互作用が存在することを突き止め、その物理機構を明らかにしました。従来はスケール分離が成り立つと考えられていた両乱流間に、マルチスケール相互作用が存在するという本研究の結果は、プラズマ物理学上の発見であるとともに、核融合炉のプラズマ閉じ込め性能の評価・予測に大きく貢献するものです。

【ポイント】

- ・スーパーコンピュータ「京」による超高解像度プラズマ乱流計算を実現。
- ・イオンと電子が作るスケールの異なる乱流の新たな相互作用を発見。
- ・核融合炉実現に向けて重要な乱流現象の解明に貢献。

【背景】

本研究のキーワードの一つである核融合、とりわけ世界的に研究が進んでいる磁場閉じ込め型核融合炉は、超伝導コイルにより作り出す強力な磁場を利用してプラズマを閉じ込める装置です。1億度を超える高温・高圧のプラズマを閉じ込めることで、粒子同士が高速に衝突し、核融合反応を引き起こします。海水から豊富にとれる水素同位体をプラズマ燃料として用いて核融合エネルギーを取り出すことで、化石燃料にもウランにも頼らない基幹エネルギー源を実現しようという理想の下、世界各国で盛んに研究開発が進められています。

本研究のもう一つのキーワードは乱流です。乱流は、大気、河川、海洋など、あらゆる流れの中に存在しますが、超高温・高圧の核融合プラズマにおいても例外ではありません。乱流は、その複雑な流れに従って様々なものをかき混ぜてしまう性質があります。核融合炉ではプラズマを閉じ込めておきたいので、乱流の有する強い混合作用は、プラズマの閉じ込め性能を劣化させてしまう天敵と言えます。

プラズマ中の乱流については、イオンが作る乱流と電子が作る極微細な乱流という異なるスケールの乱流が存在することが知られています。両者のスケールは数10倍～100倍程度離れているため、これまでは、両者の間に相互作用が存在しないというスケール分離の仮定の下で研究が行われてきました。

【研究の内容】

前山伸也助教らの研究グループは、乱流中では渦がくっついたりちぎれたりする過程により、大小さまざまな渦が作られるため、イオンが作る乱流と電子が作る乱流の間にはスケールが大きく異なるにも関わらず相互作用が存在するという着想の下、イオンが作る乱流と電子が作る極微細な乱流を同時に、統一的に取り扱うマルチスケール乱流の研究に取り組みました。その解析には既存技術では不十分だったため、新しいシミュレーションコードを独自に開発する必要がありました。各研究機関の協力の下、コード基盤の開発(核融合科学研究所)、大規模

並列計算技術の開発(日本原子力研究開発機構)、物理モデルの拡張(名古屋大学)を進め、高速かつ高精度なマルチスケール乱流の解析を可能とするシミュレーションコードを開発しました。そして、スーパーコンピュータ「京」をフル活用し、2千億点もの計算格子による高い空間解像度を用いて、これまでにない精緻なプラズマ乱流シミュレーションを行うことで、イオンが作る乱流と電子が作る極微細な乱流との間に相互作用が存在することを実証しました。

特に顕著な成果として、

- イオン→電子の相互作用:イオンが作る乱流渦が極微細な渦を引きちぎることで、電子が作る乱流を抑制する働き
- 電子→イオンの相互作用:電子が作る乱流が層流状の流れを乱すことで、イオンが作る層流状の流れを減衰させる働き

というマルチスケール相互作用の物理機構を解明しました。また、これらの相互作用により、プラズマの閉じ込め性能が大きく影響されることを明らかにしました。

【成果の意義】

プラズマ物理学の観点からは、従来のスケール分離の仮定を覆し、電子が作る乱流とイオンが作る乱流の相互作用の重要性を明らかにした画期的成果と言えます。本研究が先駆けとなり、今後ますますプラズマ乱流のマルチスケール相互作用に関する研究が進展していくと期待されます。

核融合炉開発の観点からは、プラズマ閉じ込め性能の評価・予測がさらに高精度化されたという点で大きな貢献といえます。一方、今後の展望として装置設計や運転条件最適化といったさらに進んだ解析を考えると、どういった場合に電子が作る極微細な乱流が重要になるかという条件を明らかにすること、マルチスケール乱流によるプラズマ閉じ込め性能の劣化を大規模シミュレーションを行わずに見積もるモデルを構築することなどが求められますので、さらなる研究の進展が望まれます。

流体力学の観点からは、電子が作る極微細な乱流がより大きなスケールのイオンが作る乱流に大きな影響を与えるというのは特徴的です。中性流体乱流で一般的に用いられる、渦は大スケールから徐々に微小スケールへと崩れていくというエネルギー・カスケードの考え方が、プラズマ乱流では明らかに破れていると言えます。こうした特異な性質が、まだ知られていない乱流の素過程を明らかにしていく手がかりになるのではないかと考えられます。

本研究は、文部科学省の科学研究費補助金(No.26800283)、および、HPCI 戦略プログラム分野 4「次世代ものづくり」の支援の下に行われました。計算には理化学研究所計算科学研究機構のスーパーコンピュータ「京」(課題番号:hp120011)と、国際核融合エネルギー研究センターのスーパーコンピュータ「Helios」が使われました。本研究成果の一部ですでに発表されているものは、高性能コンピューティングに関する世界最大の国際学会である SC で高い評価を得てベストポスター賞を受賞し、核融合分野の中核的国際会議である IAEA 国際核融合エネルギー会議で招待講演に選出されるなど、国際的に注目を受けています。

【用語説明】

・核融合反応

2つの原子核が融合し、1つの原子核になる反応。水素の様な軽い元素同士の核融合反応では質量がわずかに減少し、エネルギーに変わる。

・プラズマ

高温の気体では、気体原子がイオンと電子に電離して別々に運動する。この電離した気体をプラズマという。

・核融合炉

プラズマを利用して核融合反応エネルギーを取り出す装置として研究が進められている。

・乱流

流速や圧力が不規則に変動する流れ。反対に、規則正しい整った流れを層流と呼ぶ。

・マルチスケール相互作用

スケール(時間の長さや空間の大きさ)が異なる現象の間に生じる相互作用。プラズマ中のイオンと電子が作る乱流のスケールはそれぞれの質量の平方根に比例する粒子軌道半径によって決まり、水素イオンと電子では約 40 倍のひらきがある。本文中では、これらの乱流間の相互作用を指す。

・スーパーコンピュータ

膨大な計算処理を目的とした大規模コンピュータ。

・「京」

理化学研究所に設置された国内最速のスーパーコンピュータ(2015年6月現在)。

・超伝導

特定の物質を極低温にすると電気抵抗がゼロになる現象。

・スケール分離

スケール(時間の長さや空間の大きさ)が非常に離れた現象を、相互作用を無視して別々に扱うこと。

【論文名】

題目: Cross-scale interactions between electron- and ion-scale turbulence in a Tokamak plasma

著者: 前山伸也(日本原子力研究開発機構、現名古屋大学)、井戸村泰宏(日本原子力研究開発機構)、渡邊智彦(名古屋大学)、仲田資季(日本原子力研究開発機構、現核融合科学研究所)、矢木雅敏、宮戸直亮(日本原子力研究開発機構)、石澤明宏、沼波政倫(核融合科学研究所)

掲載誌: Physical Review Letters

掲載巻・号・ページ: Vol. 114, No. 5, 255002

掲載年月日: 2015年6月23日

URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.114.255002>

DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.255002

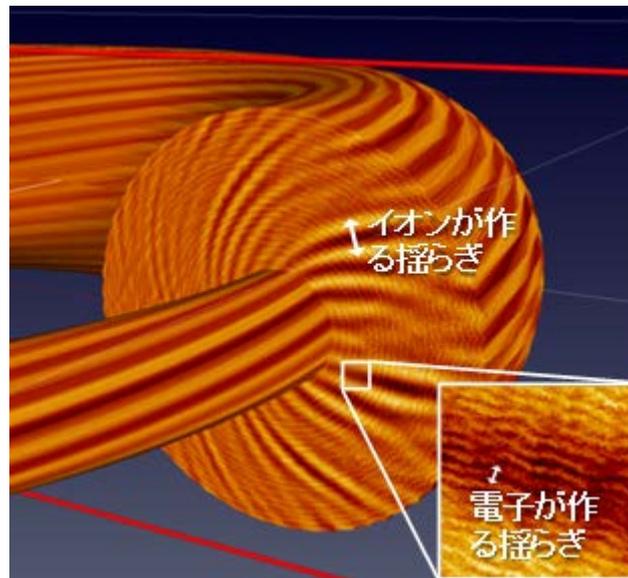


図1. スーパーコンピュータ「京」を用いたシミュレーションの結果。円環状に閉じ込められたプラズマの断面図に乱流による静電ポテンシャル揺らぎを描画している。イオンが作る比較的大きな揺らぎと電子が作る極微細な揺らぎ(拡大図中に表示)が共存している。上図ではスケールの離れた二つの揺らぎがはっきりと識別できるが、マルチスケール相互作用が進むにつれて、両者は混ざり合い、複雑な乱流状態へと発展していく。

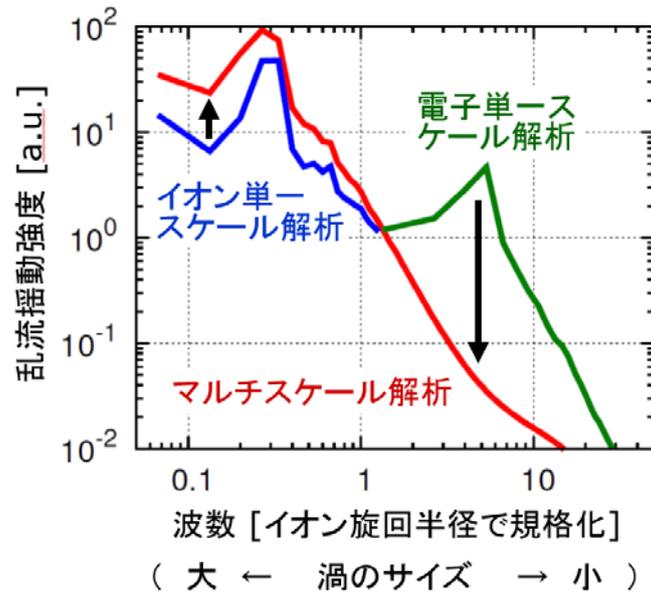


図2. マルチスケール相互作用による乱流揺動スペクトルへの影響。従来の電子スケールあるいはイオンスケールのみの単一スケール解析と比較して、マルチスケール解析では電子スケール乱流揺動強度の低減、および、イオンスケール乱流揺動強度の増大が起こっていることが見て取れる。