



ニュースリリース

平成 27 年 2 月 27 日

報道解禁日時

日本時間 平成 27 年 2 月 27 日 (金) 4 : 00
(アメリカ東部時間 2 月 26 日 14 : 00)

国立大学法人 千葉大学
国立大学法人 東京大学
自然科学研究機構 国立天文台

スーパーコンピュータ「京」で解き明かした宇宙線加速：
天体衝撃波における高エネルギー電子生成機構の新理論を発表

概要

千葉大学（学長：徳久剛史）大学院理学研究科 松本洋介 特任助教、東京大学（総長：濱田純一）大学院理学系研究科 天野孝伸 助教、星野真弘 教授、国立天文台（台長：林正彦）天文シミュレーションプロジェクト 加藤恒彦 専門研究職員らの研究グループは、スーパーコンピュータ「京」を用いたシミュレーションによって、超新星残骸衝撃波を始めとする様々な天体衝撃波で高エネルギーの電子を効率よく生成することができるメカニズムを明らかにしました。宇宙物理学の謎のひとつである「相対論的エネルギーを持つ電子の存在」の解明に大きく迫ることができると期待されることから、本成果は、アメリカ科学振興協会（AAAS）発行の *Science* 誌に 2 月 27 日掲載されます。

背景

超新星爆発の名残である超新星残骸やブラックホールから飛び出すジェットなどの天体における爆発現象は、電波から X 線・ガンマ線にわたる様々な波長の電磁波で明るく輝いています。これらの電磁波は、ほぼ光速で動きまわる電子によって放射されていると考えられていますが、この相対論的なエネルギーを持つ電子がどのようにして作られたかは、宇宙物理学の謎の一つとして残されています。超新星残骸の場合もジェットの 경우도、中心天体から宇宙空間に超音速で放出されたガスが星間ガスと相互作用して衝撃波を作るため、相対論的電子は衝撃波において生成されていると考えられていますが、その具体的なメカニズムは解明されていません。粒子間の衝突がほとんど起きない高温で希薄なプラズマ中に衝撃波が作られる^{*1}ため、荷電粒子が加速される現場は非一様な媒質中のプラズマ過程が支配する強い非線形なシステムとなっています。そのため、高性能なコンピュータの力を借りずに粒子加速のメカニズムを理解することは非常に難しいものでした。

内容

松本洋介特任助教らの研究グループは、超新星残骸衝撃波を始めとする天体衝撃波の波面で磁気リコネクション^{※2}と呼ばれるプラズマ過程が起きることで、電子が効率的に加速されることを発見しました。衝撃波の構造はこれまでもプラズマの第一原理シミュレーション^{※3}を用いて研究されていますが、波面近傍の細かな構造を分解して計算するのは困難でした。研究グループは、スーパーコンピュータ「京」が有する高い計算能力を使って100億個のプラズマ粒子の運動を解き進めることにより、これまで探ることができなかった衝撃波の構造を明らかにすることに成功しました。

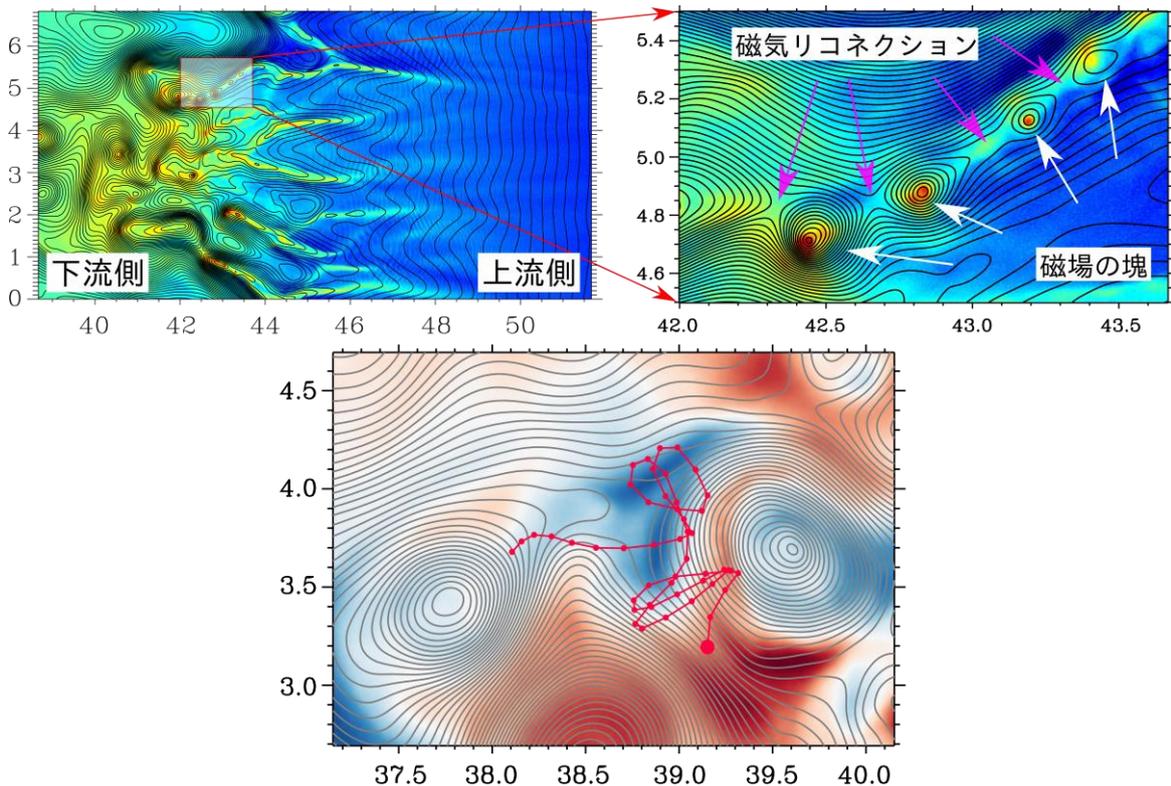


図1：(上段左) 衝撃波の構造。色は電子密度、線は磁力線を表す。(上段右) 一部領域の拡大図。(下段) 電子が磁場の塊(灰色線)に衝突しながらエネルギーを獲得する様子(赤線)。背景色は磁場の紙面に垂直な成分の大きさを表す(Matsumoto et al., *Science*, 2015 の図より)。

これまでにない高解像度のシミュレーションを行ったところ、衝撃波面で一部のプラズマが上流に向かって反射されることで、長く伸びた磁場の反転構造が作られ、その構造の中で磁気リコネクションが発生して磁場の塊が噴出することが明らかになりました(図1上段)。衝撃波に埋め込まれた小さなスケールで磁気リコネクションによる爆発現象があちらこちらで起きることで、ランダムに運動する磁場の塊がたくさん現れます。この磁場の塊と電子が繰り返し衝突することで、高エネルギーの電子が作られることが明らかになりました(図1下段)。

このような、粒子が散乱体と衝突を繰り返しながらエネルギーを獲得するメカニズムは、1949年にイタリアの物理学者エンリコ・フェルミによって提唱され、現在ではフェルミ加速*⁴として知られています。今回の研究ではこのフェルミ加速のメカニズムが、衝撃波では磁気リコネクションを介して極めて有効に働くことを、大規模シミュレーションによって初めて見出しました。磁気リコネクションは太陽フレアやオーロラを引き起こすメカニズムとしてこれまで知られていましたが、天体衝撃波における宇宙線加速においても重要な役割を果たすことが明らかになったのは、驚きです。

今後の展望

今回の成果は、超新星残骸衝撃波だけでなく、宇宙に存在する様々な衝撃波における粒子加速の解明にも寄与します。衝撃波に埋め込まれた反転磁場領域で発生する磁気リコネクションによる粒子加速は、かなり一般性をもって応用できると考えられるからです。この新しい加速メカニズムを含め、高エネルギー電子がどのような状況で最も効率良く生成されるかを明らかにすることは、今後の課題です。スーパーコンピュータ「京」の計算資源をさらにフル活用して、現在その解明を目指した研究に取り組んでいます。

本研究は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたもので（課題番号:hp120222, hp120287）、科学研究費補助金基盤研究(C) 26400266、HPCI 戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」により援助を受けて行われました。

発表雑誌

雑誌名 : *Science* (Published on February 27)

タイトル : Stochastic electron acceleration during spontaneous turbulent reconnection in a strong shock wave (和訳: 強い衝撃波中の自発的乱流リコネクションによる電子の統計加速)

著者 : 松本洋介 (千葉大学)、天野孝伸 (東京大学)、加藤恒彦 (国立天文台)、星野真弘 (東京大学)

DOI : 10.1126/science.1260168

<<本件に関するお問い合わせ先>>

千葉大学大学院理学研究科 松本洋介

Tel : 043-290-2737

E-mail : ymatumot@chiba-u.jp

東京大学大学院理学系研究科 星野真弘

Tel: 03-5841-4584

Email : hoshino@eps.s.u-tokyo.ac.jp

用語解説

* 1 衝突がほとんど起きないプラズマ中での衝撃波（無衝突衝撃波）

宇宙空間のガスの大部分は電離した高温プラズマ状態で、粒子間の衝突がまれな無衝突プラズマとして扱われる。無衝突プラズマ中に形成される衝撃波を無衝突衝撃波といい、プラズマの運動エネルギーは衝撃波で電磁場を介して散逸し、熱エネルギーへと変換される。超新星爆発で発生した爆風が星間ガスと相互作用することによって無衝突衝撃波が形成されると考えられている（図2）。これがX線で明るく輝く超新星残骸として観測される。

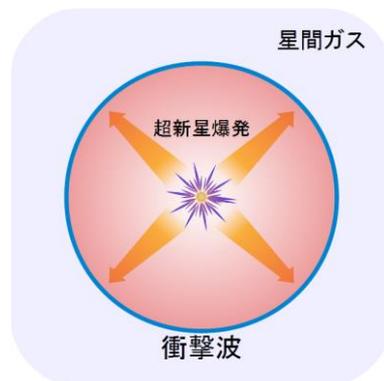


図2：超新星爆発によって発生する衝撃波

* 2 磁気リコネクション（再結合）

逆向きの磁力線同士が近づいた場合に磁力線が繋ぎ変わり、その配置が変化する現象（図3）。リコネクションに伴い、磁気エネルギーがプラズマの運動エネルギーと熱エネルギーへと変換される。繋ぎ変わった場所と場所の間にはループ状の磁力線構造（磁場の塊）が形成される。太陽フレアやオーロラは、磁気リコネクションによるエネルギー解放の結果であると考えられている。

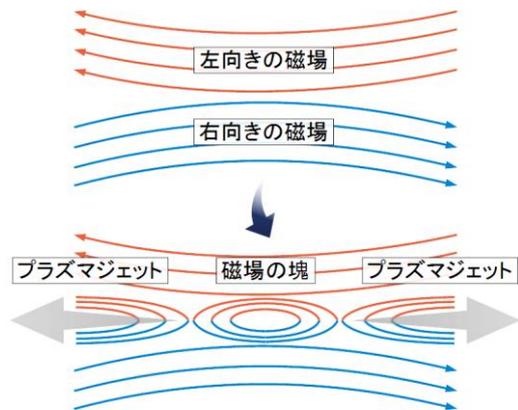


図3：線は磁力線で矢印が磁場の向きを表す。磁力線が繋ぎ変わり（上段から下段）、双方向に噴出するジェット（灰色矢印）と磁場の塊が作られる。

* 3 プラズマ第一原理シミュレーション

電磁場を記述するマクスウェル方程式と、荷電粒子の運動を記述するローレンツ方程式を連立させて解く計算手法。本手法はプラズマ中に存在する膨大な数の荷電粒子の運動を解くので、スーパーコンピュータの高い計算能力の利用が必須となる。

* 4 フェルミ加速

粒子が質量の大きな物体（散乱体）と弾性的に正面衝突した場合、その前後で粒子のエネルギーは増える。一方、追突した場合はエネルギーを失う（エネルギー、運動量の保存則）。粒子が何度も散乱体と弾性衝突を繰り返すことができる状況では、正面衝突する確率の方が追突する確率より一般に高いため、粒子は正味でエネルギーを獲得する。宇宙線はこのようなメカニズムで作られたのではないかと、1949年にイタリアの物理学者のエンリコ・フェルミによって提唱された。