



Title	Collisionless Plasma Instabilities in the Supernova Remnant Shocks
Author(s)	大平, 豊
Citation	大阪大学, 2010, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/58014
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

【66】	
氏 名	おお ひら ゆたか 大 平 豊
博士の専攻分野の名称	博 士（理 学）
学 位 記 番 号	第 2 3 5 9 6 号
学 位 授 与 年 月 日	平 成 22 年 3 月 23 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当 理学研究科宇宙地球科学専攻
学 位 論 文 名	Collisionless Plasma Instabilities in the Supernova Remnant Shocks (超新星残骸衝撃波での無衝突プラズマ不安定性)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 高原 文郎 (副査) 教 授 常 深 博 教 授 高 部 英 明 准教授 藤 田 裕 准教授 湯 川 論

論 文 内 容 の 要 旨

質量の重い星（太陽質量の約 8 倍以上）や白色矮星に質量降着がある場合は、その星の一生の最後
に大爆発を起こす。その残骸を超新星残骸と呼ぶ。若い超新星残骸（爆発後数千年以内）は、電波か
ら T e V ガンマ線にまでわたる幅広い波長域で観測される。これらの観測結果から、温度が一千万度
程度の M a x w e l l 分布した熱的電子と、エネルギーが 1 0 T e V 以上にまで伸びるべき型の分布
をした非熱的電子が存在していることが分かっている。また、陽子も銀河宇宙線の源として 1 0 ¹⁵ 乗
e V まで加速されていると考えられている。さらに超新星残骸の衝撃波近傍では、星間空間の磁場が
3 μ G 程度から 1 0 0 μ G 程度にまで増幅されていることが示唆されている。長い間、精力な研究が
行われたにもかかわらず、電子の加熱・加速機構や磁場増幅機構はいまだ明らかになっていない。
星と星との間の宇宙に漂うガス（星間空間ガス）は、非常に希薄で粒子間同士の衝突がまれである。
そのため、電子を加熱、加速するためには 2 体間のクーロン相互作用ではなく、多体系プラズマの集
団的振る舞いによって生じる電場や、磁場を利用する必要があると考えられている。本論文では、上
記の未解明な電子の加熱・加速機構と磁場増幅機構を調べるために行った、無衝突衝撃波で生じる無衝

突プラズマ不安定性の線形解析と、プラズマ粒子シミュレーションの結果を報告する。

まず初めに、多次元系での電子加熱機構と電子波乗り加速を調べるために、無衝突衝撃波垂直衝撃波遷移層で生じる無衝突プラズマ不安定性について調べた。2次元の線形解析と2次元プラズマ粒子シミュレーションを行い、多次元性の重要性和新しい無衝突プラズマ不安定性を発見した。その結果初めて、超新星残骸で観測されている電子温度の一千万度を再現する事に成功した。

次に、超新星残骸衝撃波での中性粒子の効果について調べた。星間空間ガスは完全電離している訳ではないので、超新星残骸の周りには中性粒子が存在する。超新星残骸の周りの中性粒子の割合は、ほぼ5割程度なので、その中性粒子は無衝突衝撃波に大きな影響を持つ。その中性粒子は主に、衝撃波下流領域や衝撃波の前方で、電荷交換反応によってイオン化される。この電荷交換反応によってイオン化された荷電粒子がプラズマ不安定性を引き起し、磁場を $100\mu\text{G}$ 程度にまで増幅できる事を示した。さらに荷交換反応によってできたイオンは、衝撃波の構造や、衝撃波で加速された粒子のエネルギースペクトルを変える事を明らかにした。

論文審査の結果の要旨

本論文は、超新星残骸の衝撃波におけるプラズマ不安定についての理論的研究を行ったものである。超新星残骸の衝撃波は銀河宇宙線の起源の最有力候補であるとともに、シンクロトロン放射の観測から相対論的電子が加速されていることが知られている。この衝撃波は無衝突プラズマ衝撃波であるため、その形成機構やイオンや電子の加熱・加速機構の理解にはプラズマ不安定の解析が本質的に重要である。これまでイオンの加速機構については拡散的粒子加速機構を軸に多くの研究が進められてきたが、電子の加熱・加速機構については基本的な問題が未解決のまま残されている。その中で、磁場が衝撃波面の法線方向に垂直な垂直衝撃波に対しては、1次元粒子シミュレーションによって、反射イオンと上流プラズマとの間の2流体不安定の一種であるブーネマン不安定が励起され、形成された電場ゆらぎに捕捉された電子が運動電場により強く加速されるという波乗り加速が広く議論されてきた。本論文では、2次元で考えると斜め伝播のブーネマンモードも強く成長するために、運動電場が利用できず波乗り加速は実際には生じないことを示し、電子加速の問題を振り出しに戻した。次に、ブーネマン不安定によって電子が加熱されると、1次元の場合にはイオン音波不安定が生じて、更なる電子加熱を起こすため、典型的な超新星残骸では 100keV 程度まで電子温度が上昇してしまうことが知られていた。観測的には電子温度は 1keV 程度なので、理論と観測との間に大きな矛盾があった。本論文では、2次元で考えるとイオン音波よりも斜め伝播のイオン2流体不安定の成長率が大きいことを示した。このモードは電子温度がイオン温度よりも高い時に存在するイオンプラズマ振動を介在したものなので、イオン加熱を起こす。その結果、イオン音波不安定が抑圧されるため、実現される電子温度は観測と整合的な 1keV 程度となることを示した。これは世界で初めて観測と一致する電子温度を理論的に導出したもので大きな意義がある。本論文では、線形解析とともに2次元粒子シミュレーションコードを用いた非線形発展の研究も行っておりこれらの結果を得ている。また、超新星残骸の衝撃波は無衝突であるとともに、電離イオンとともに多数の中性原子を含んでいるという特徴を持っている。この点はごく最近まで注目されていなかったが、電離イオンが構成する衝撃波面を自由に通過する中性原子がその後電離されると、ピックアップイオンと呼ばれる特徴的な速度分布を持つことになり、背景イオンとの間でさまざまなプラズマ不安定を起こし、磁場の増幅や粒子の加速に重要な役割を果たすことになる。本論文はまたこの点について世界で始めて論じており、高い独創性をしめしている。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。