平成 20 年度国立天文台天文シミュレーションプロジェクト成果報告書

無衝突衝撃波内部の不安定と接触不連続面

利用者氏名　大平　豊　(大阪大学)

利用カテゴリ　XT4A ・ SX9MD

X 線の空間・時間変化や、電波のスペクトルから超新星残骸では、星間空間の磁場を衝撃波圧縮した以上の 100μG 程度に、磁場が増幅されていることが示唆されている。また、地球に届く宇宙線のスペクトルの knee energy($\sim 10^{15.5}$eV) まで、宇宙線を超新星残骸で加速するためにも同程度の磁場増幅機構が必要とされている。理論的には、宇宙線が衝撃波面からしみ出すことで、衝撃波上流でプラズマ不安定を引き起し、磁場を増幅する機構が提唱されている。宇宙線起源の不安定として、resonant 不安定と nonresonant 不安定の 2 つがある。線形解析によって不安定成長することは示されているが、その非線形発展は明らかでない。理想 MHD シミュレーションによる研究はあるが、磁場の散逸がないので、正しい不安定の飽和を明らかにはできなかった。nonresonant 不安定に関して、プラズマ粒子シミュレーションの Particle-In-Cell(PIC) 法を用いた先行研究では、線形解析の結果とは異なる波が励起されると主張された。私はこの PIC 法を用いた先行研究は磁場の値や衝撃波速度が、超新星残骸で想定している状況とことなり、Weibel 不安定性を見ていることを線形解析によって明かにした。そこで私は、衝撃波で加速された宇宙線による nonresonant 不安定の非線形発展を、超新星残骸のパラメーターで 2 次元 PIC シミュレーションを用いて不安定の飽和やそれに伴うプラズマ加熱・加速について調べた。この不安定は上流の熱的プラズマに対しては MHD スケールだが、宇宙線にとっては MHD 近似が良くないスケールであり、PIC 法で調べるには非常に大規模な計算が必要となる。シミュレーションの設定として、上流静止系で宇宙線がしみ出している領域を、周期境界条件でモデル化した。宇宙線成分は非常に高エネルギーであり、PIC 法では数値的な衝突が生じてしまうので、高エネルギー宇宙線は無限に重たく励起される磁場の影響を受けないとして、粒子としては解かず、変わりに宇宙線が担う電流を定常的に流した。その宇宙線が担う電流成分を打ち消すように熱的電子と陽子を分布させた。また計算機資源の関係で、イオンと電子の質量比 $\mathrm{M_p/M_e}$ を現実より小さい ($\mathrm{M_p/M_e} = 10, 40$) 場合、衝撃波速度 $v_{\mathrm{sh}}/c = 0.1, 0.2$ の場合で調べた。その結果、先行研究の PIC シミュレーションの結果とは異なり、線形解析が予言する波が励起されることを示した。全てのパラメターで不安定の飽和は、宇宙線のドリフトエネルギーが磁場のエネルギーと熱エネルギーに等分配される所で終わることを明かにした。しかし飽和時には、熱的プラズマの平均速度は衝撃波速度に近い状態になっていた。衝撃波静止系では、これは上流プラズマの減速を意味しており、圧縮の機構が効いてくる。今回の計算は周期境界で行ったため、全体がドリフトしていまい、圧縮機構を解けないことになっていることにも気がついた。これはこれまでの先行研究ですべてに生じる問題である。今後この問題を解決するため、衝撃波構造を取り入れた計算コードを開発する。

また超新星残骸では、電波から X 線の観測により 10^{14}eV 程度にまで、電子が加速されていることが分かっている。有力な加速機構として diffusive shock acceleration(DSA) が提唱されているが、低エネルギー電子にはこれが適応できず、別の加速機構が必要とされている。無衝突垂直衝撃波遷移層では、衝撃波面で反射されたイオンが様々なプラズマ不安定を励起することが期待されているが、その非線形発展は未解明である。そのような領

域の電磁場を利用して電子加速・加熱が生じることが期待される。それらを調べるため、ちょうど反射イオンが磁場によって衝撃波面に帰ってくる境界を含む、非一様な場合の局所計算を可能とする計算コードを開発した。計算領域を局所化することで、現実の質量比の PIC シミュレーションが可能になる。現実的なパラメータを用いた結果、衝撃波遷移層では電子も反射され、その反射電子と上流の電子との間でも静電不安定性が励起されることを初めて発見した。電子は、ベキ型の分布をするが、衝撃波加熱で達成される熱的分布より多くの高エネルギー成分をつくることはできないことを明かにした。今回の計算とは異なる衝撃波遷移で、加速機構を調べる必要がある。

衝撃波静止系の計算方法を応用して、無衝突衝撃波の接触不連続面を効率よく計算するための計算コード開発を行った。現在は、コードの最適化を行っている。