九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

無衝突乱流加速の数値シミュレーション

村主, 崇行
京都大学理学部物理学第二教室

https://doi.org/10.15017/1470181

出版情報：九州大学情報基盤研究開発センター全国共同利用システム広報. 3 (1), pp.10-11, 2009-10.
九州大学情報統括本部広報委員会
バージョン：
権利関係：

無衝突乱流加速の数値シミュレーション

村主　崇行[1]

概要　九州大学情報基盤センターの計算機を利用し，宇宙における非熱的粒子加速現象の研究を行いました．

1.　背景

宇宙線加速にはよく知られた，衝撃波面での 1 次 Fermi 加速モデルがあり，12 桁 ものエネル ギースケールにわたって観測されている宇宙線の冪スペクトルを説明します．また，近年になって ，シア加速や乱流加速などの新しいモデルが登場しています．宇宙線加速のシミュレーション研究 の大部分は，これらの加速過程をランダムウォークで近似したモンテカルロ的手法を採用していました．観測との比較のためには，電子の軌道を解析的に追跡 して，これら輻射過程による電子の運動エネルギーの損失を厳密に計算し，その貢献を 正確に見積もる必要がありました．

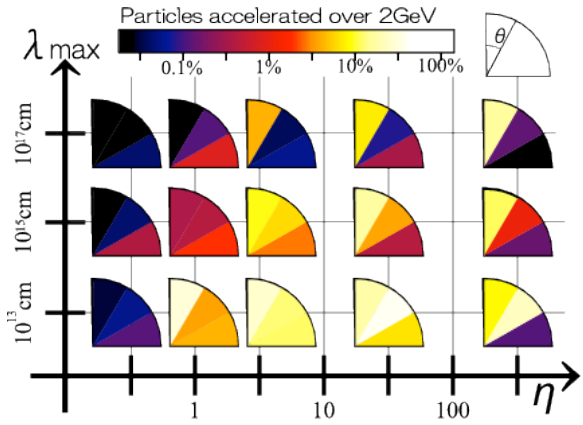

図 1：加速効率の依存性．

また，高エネルギー宇宙線は，磁場を介する無衝突過程でプラズマと結合し，加速されている と考えられています．宇宙線の大部分を占めるハドロンの加速過程は，宇宙線の観測と無衝突プラズマ理解を結びつける重要な布石となります．

しかし，宇宙線加速は，たとえば超新星残骸における加速をとってみても，加速天体の熱温度 における Larmor 半径(109 cm)から，天体から脱出するスケール(1017 cm)までの，サイズにして 8 桁，体積にして 24 桁にもわたる現象 であり，従来の計算手法では，エネルギースケールで 1 桁以下の幅の冪スペクトルを再現できるにとどまり，有効なモデル間の比較を行うこと等は不可能でした．

2.　乱流衝撃波における粒子加速のシミュレーション

そこで私は，乱流スペクトルを波数の対数の空間で解析的研究から与えることで，長さスケールにして 8 桁 にわたる 4 次元磁場構造を表現可能にするモデルを作って研究を進めてきました(図 1)．私のプログラムはおおまかに，大局的な衝撃波構造を MHD 衝撃波の解析解から，局所的な構造は乱流理論のスペクトルから計算し、時間変動する電磁場を求める部分と，その電磁場からローレンツ力をうけて運動するテスト粒子の軌道を決定論的に計算する部分から構成されています．プログラム作成上，乱流スペクトルを波数対数空間で表現することで，加速をひきおこす

[1] 京都大学理学部物理学第二教室　muranushi@tap．scphys．kyoto-u．ac．jp

背景電磁の物理的特徴をごく小さい計算量でとらえるよう工夫されています．粒子の運動をモンテカルロ法によらず解析的に追跡しているので，シンクロトロン輻射によるエネルギー損失等も直接正確に計算できます．基本的には，１演算ユニットが１粒子の追跡を担当しますが，乱流モードの計算に必要な三角関数などは共通のテーブル引きにより高速化されています．

その結果，乱流スペクトルの波長範囲や，一様磁場ベクトルと衝撃波面のなす角度に対する，宇宙線粒子のスペクトルの依存性があきらかになりました(図１；乱流の振幅（横軸），乱流の最大波長（縦軸），平均磁場の角度 θ に対する加速効率の依存性)．加えて，加速を引き起こす乱流モデルの違いが，実際にスペクトルの冪に反映されることをつきとめました．これは，広範囲のエネルギースペクトルが計算できるようになってはじめて得られた成果です． 以上の研究成果は，論文[1]にまとめています．

3. MHD 乱流における粒子のコヒーレント加速

さて，本研究を進めていくうちに，衝撃波面ではなく，乱流のある一様流体中でも粒子が加速されていることを発見しました(図２；粒子の位置(横軸)とエネルギー(縦軸)の関係)．そこで，ジャイロサーフィン加速などの既存の理論をあてはめるというアプローチ，および計算機を利用して，さまざまな強度・スペクトルの MHD 乱流での荷電粒子の加速について探索的計算を行うというアプローチを採った結果，最終的に，相対論的な初期速度の粒子を，一様磁場と乱流磁場が同程度になるような MHD 流体に入射させた場合，エネルギー増加率は低いものの，すべての粒子がコヒーレントに加速される特異な加速現象を発見しました(図３；時間(横軸)と粒子のエネルギー(縦軸))．この現象を説明する理論モデルを検討し，論文を準備中です．

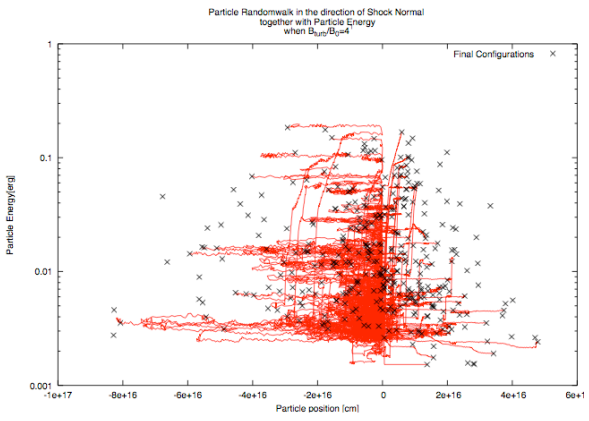

図２：衝撃波面付近の粒子加速．

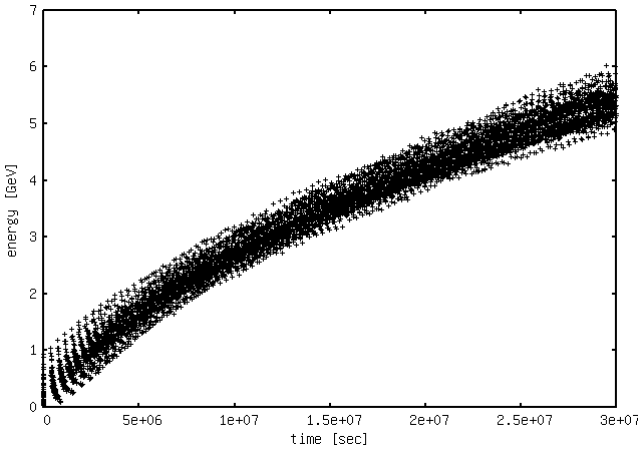

図３：コヒーレント加速．

参考文献

[1] T. Muranushi & S. Inutsuka *Direct Simulations of Particle Acceleration in a Fluctuating Electromagnetic Field Across a Shock,* The Astrophysical Journal Letters, Volume 691, Issue 1, pp. L24-L26 (2009)