

数値計算を用いた宇宙線加速機構の解明

西野将悟 (名古屋大学)

利用カテゴリ XC-MD

地球には宇宙から陽子や原子核、電子といった粒子が降り注いでおり、そのような粒子は宇宙線と呼ばれる。宇宙線には 10^{20} eV 以上にも及ぶ高エネルギーな粒子が存在し、そのスペクトルはベキ型分布をしている。knee energy と呼ばれる 3 PeV 程度でベキ指数が変化しており、knee energy 以下のエネルギーの宇宙線は銀河内の超新星残骸で衝撃波フェルミ機構によって加速され则认为られている。衝撃波フェルミ機構とは、電磁場の擾乱により拡散された粒子が、衝撃波面を往復するすることで粒子が加速するという機構で、観測される宇宙線のスペクトルのベキ型分布やベキの指数の値を説明することができる (Bell 1978, Blandford & Ostriker 1978)。しかし、銀河内の磁場強度では衝撃波フェルミ機構で宇宙線が knee energy に到達できないことが知られている。そこで、Bell 不安定と呼ばれる磁場を増幅する機構が提唱されてる (Bell 2004)。Bell 不安定とは、宇宙線が作る電荷の偏りを打ち消すために宇宙プラズマに宇宙線と逆向きに電流が流れ、それによるローレンツ力が磁場を増幅させる機構である。実際に Bell 不安定の効果を考えることで knee energy を実現できるかどうか確かめるためには、何桁にもわたるエネルギーの範囲で宇宙線加速を数値計算しなければならない、そのためには Bell 不安定の効果を入れた MHD 方程式と移流拡散方程式を同時に解く必要がある。そのような計算が行えるコードに Inoue (2019) で開発されたコードがある。ただし、Inoue (2019) では Bell 不安定自体は扱っていたが、衝撃波は扱っておらず、Bell 不安定と粒子加速を同時に扱ってはいなかった。Inoue (2019) で開発されたコードを衝撃波による粒子加速に適用することで Bell 不安定の効果を入れた粒子加速のシミュレーションができると考えられる。そこで、昨年度の研究で、実際にそのコードで宇宙線加速の数値計算ができるかどうかを確かめるためのテスト計算を行った。以下でその成果について記す。

移流拡散方程式のテスト計算

Inoue(2019) のコードを用いて、様々な分解能で移流拡散方程式の定常解を数値的に求めた。一方、移流拡散方程式の定常解は解析的に解くことができ、

$$f \propto p^{-4} \quad (1)$$

となる。ただし、 f は位相空間における宇宙線の個数密度、 p は宇宙線の運動量の大きさである。これと数値解を比べることで、Inoue(2019) で移流拡散方程式が正しく解けているかを確認した。結果は図 1 のようになった。分解能を上げるほど数値解が解析解に近づくことが確認できた。

Bell 不安定のテスト計算

Bell 不安定によって磁場が正しく増幅するかを確かめるテスト計算を行った。磁場の擾乱として円偏波の磁場を一つおき、宇宙線電流を定常に流し、磁場がどのように変化するかを数値計算した。Bell 不安定による磁場の増幅は線形解析が行われている (Bell 2004)。

磁場の擾乱が不安定化するときの分散関係は、

$$\omega = \sqrt{\frac{B j_{\text{CR}}}{c \rho} k - \frac{B^2}{4 \pi \rho} k^2} \quad (2)$$

となることがわかっている。ただし、 ω は擾乱の成長率、 k は擾乱の波数、 c は光速、 ρ は流体の質量密度、 B は平均磁場、 j_{CR} は宇宙線による電流である。そこで、数値計算で得られた分散関係と線形解析で得られた分散関係を比較することにより、Bell 不安定による磁場増幅が正しく計算されているかを確認めた。結果は図 2 のようになった。数値計算の結果と解析解の結果がよく一致することが確認できた。

以上のテスト計算から Inoue(2019) で開発されたコードを用いて宇宙線加速の計算が可能であることがわかった。今後はこのコードで宇宙線加速の計算を行うことで、knee energy に対する知見を得て、修士論文に記述する。

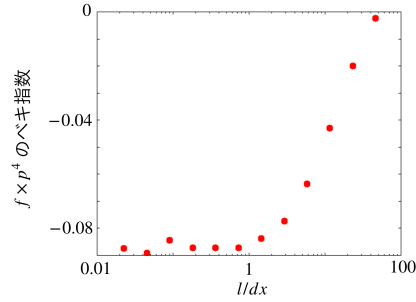


図 1: 分解能と $f p^4$ のベキ指数の関係。ただし、 l は宇宙線の衝撃波往復運動の運動範囲、 dx は 1 セルの長さ。

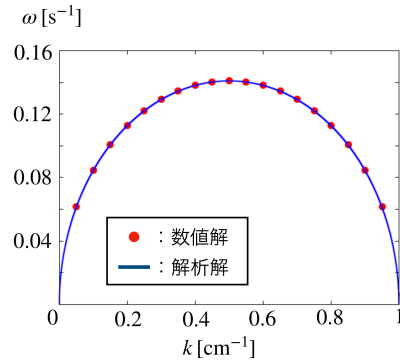


図 2: 磁場の擾乱の波数 k と成長率 ω の関係。赤い点が数値解で、青い線が解析解。