

大局的な降着流の磁気流体計算と動的乱流場中でのテスト粒子計算

木村成生 (東北大学)

利用カテゴリ XC-B

近年の観測技術の発達により、EeVを超える超高エネルギー宇宙線や GeV から TeV の天体ガンマ線、TeV から PeV の天体ニュートリノなどが検出されている。これらの高エネルギー粒子の起源天体の解明、また、そのような高エネルギー粒子の生成機構の理解は、高エネルギー天体物理学の重要な課題となっている。活動銀河核ジェットや活動銀河核の降着流はこのような高エネルギー粒子の生成場所として有望な候補であり、そこでの粒子加速機構をシミュレーションを用いて調べたい。2019年4月に発表された Event Horizon Telescope によるブラックホールの影の撮像など、2019年度には高温降着流が非常に大きな話題となったため、計画を変更して高温降着流における動的乱流場中での粒子加速について計算を行った。

大局的な降着流の磁気流体計算と動的乱流場中でのテスト粒子計算

降着流での粒子加速を研究するため、Athena++を用いて降着流の大局的磁気流体シミュレーションを行った。初期条件としてポロイダル磁場をプラズマの中に閉じ込めた力学平衡にあるトーラスを点源ニュートン重力場中に用意する。そのトーラスは磁気回転不安定性に対して不安定であり、磁気乱流状態となって角運動量輸送が起こり、トーラスは降着を開始する。計算は球座標で行うが、極付近で密度が薄くなり計算が進まなくなるため、極から $\pi/6$ ずつ計算領域を切り取って計算を行った。初期トーラスの9回転時間後には十分に乱流場が発展した。そこから、初期トーラスの回転時間の $1/(2000\pi)$ の時間幅で乱流場のデータを出力し、動的な乱流場データを用意した。その後、そのデータを逐次読み込み、動的乱流場中でのテスト粒子の軌道計算を行うコードを開発し、動的乱流場中での宇宙線の振る舞いを計算した。その結果とスナップショットを用いた静的乱流場中でのものを比較し、違いを調べた。

今年度はメッシュ数が $(N_r, N_\theta, N_\phi) = (256, 128, 384)$ の磁気流体計算を行い、動的乱流場は100スナップショット分(初期トーラスの回転時間の $1/20\pi$)を用意し、粒子数20000体でテスト粒子計算を行った。テスト粒子はランダムにエネルギーを増減させ、粒子のエネルギー分布関数が広がっていく(図1)。計算開始から1-2 Eddy turnover time 後には、粒子エネルギー分布の分散は時間に比例して増加しており、宇宙線の振る舞いはエネルギー空間の拡散現象として記述できることがわかった(図2)。様々なエネルギーの場合に粒子計算を行った結果、エネルギー空間での拡散係数は粒子のエネルギーのおよそ二乗に比例して増加することもわかった。ここまでの計算では静的乱流場中での粒子計算結果とほぼ同じ結果となっている。しかし、細部を比べると、動的乱流場中での計算結果は静的乱流場中でのものと比べて高エネルギーの粒子がより増えている傾向にあり、計算の後半では動的乱流場中での拡散係数の増加率が静的乱流場中のものよりも少し大きくなっていった。今後、動的乱流場データの出力数を増やし、粒子計算をより長い時間まで計算してより詳細な比較を行い、動的乱流場が果たす役割を調べたい。また、メッシュ数を各軸1.5倍ほど大きくした高解像度計算を行うことでエネルギー空間の拡散係数の解像度の依存性も確認したい。

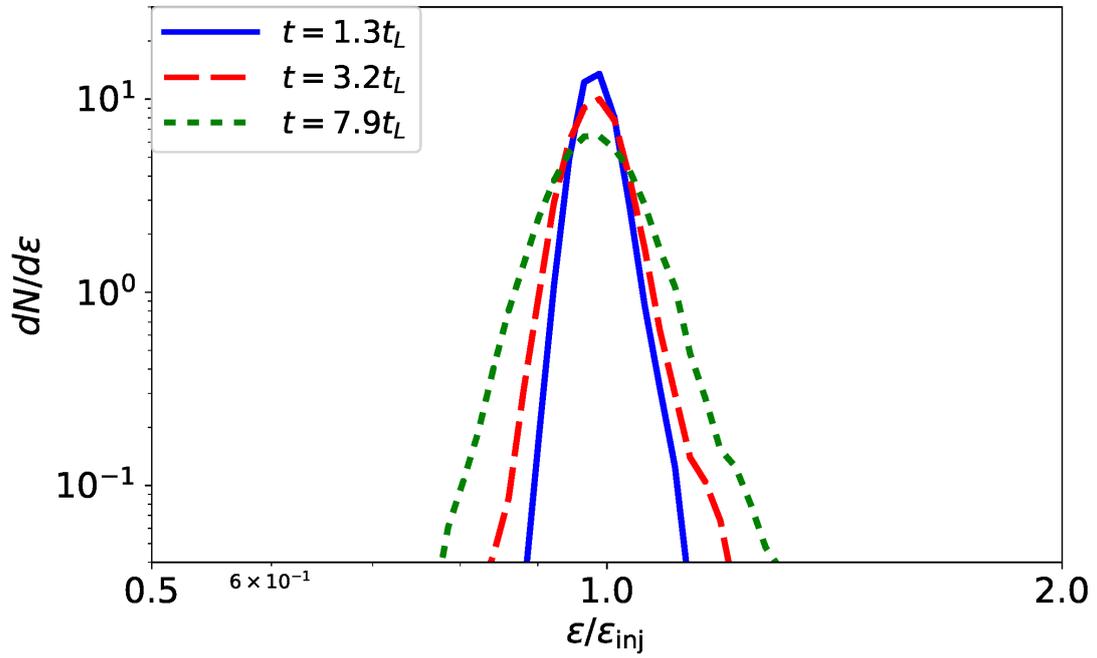


図 1: 粒子分布関数の時間発展。時間と共にエネルギー分布関数が広がっている。

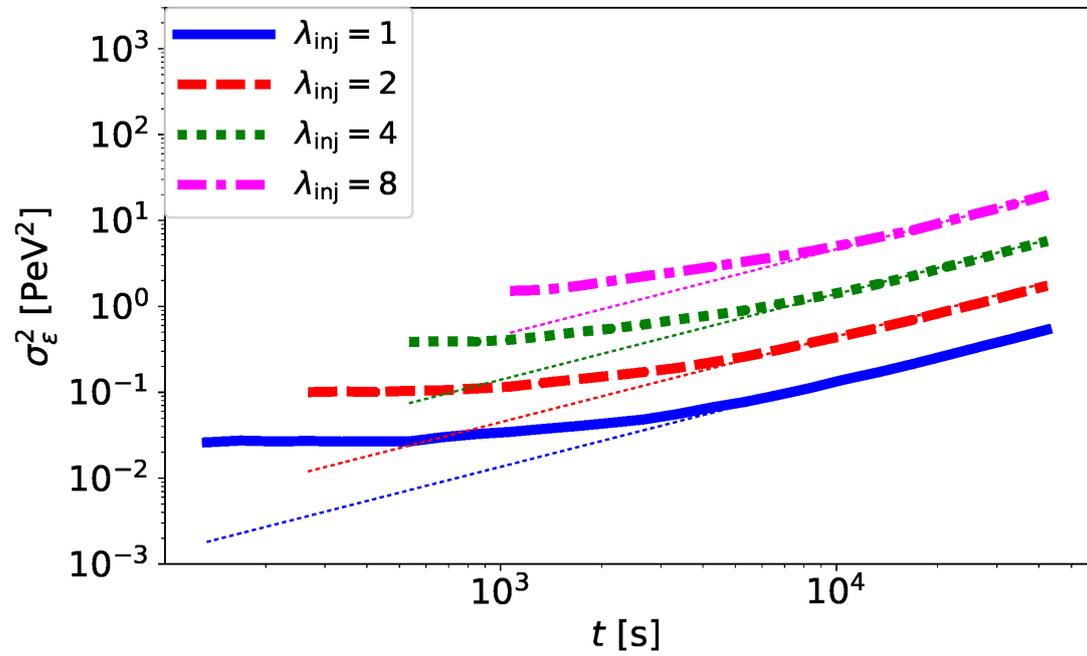


図 2: 粒子分布の分散の時間発展 (実線)。 $t > 10^4$ 秒では線形関数 (点線) とよく一致している。