磁気流体乱流中における宇宙線の異常輸送のテスト粒子シミュレーション

黒江 健斗 [1]; 羽田 亨 [2]; 大塚 史子 [2]; 松清 修一 [3]
[1] 九大・総理・大海; [2] 九大総理工; [3] 九大・総理工

Test particle simulation of Anomalous cosmic ray transport in MHD turbulence

Kento Kuroe[1]; Tohru Hada[2]; Fumiko Otsuka[2]; Shuichi Matsukiyo[3]
[1] Earth System, Kyushu Univ.; [2] ESST, Kyushu Univ; [3] ESST Kyushu Univ.

Diffusion of particles in general is often described as a classical diffusion, in which individual particles undergo the well-known Brownian motion, and the pdf (probability distribution function) of particles evolves according to the classical diffusion equation. Some examples are the motion of pollens in the air, a drop of ink in water, and the motion of a crowd of people in an open space. On the other hand, cosmic rays (energetic charged particles) can behave quite differently as they are scattered by MHD (magnetohydrodynamic) turbulence in space plasma. These particles may sometimes be trapped for a long time by large amplitude MHD wave packets, or they may travel long distance without much changing its velocity and traveling direction when the turbulence is weak. Given a distribution of the MHD turbulence, a typical cosmic ray trajectory may consist of multiple events consisting of trapping and ballistic motions (walk-stick model).

From this perspective, we study the nature of cosmic ray diffusion in the MHD turbulence, in particular, how the macroscopic parameters that describe the turbulence, such as the total energy and the power-law index, are related to the statistical properties of the cosmic ray diffusion. In this poster presentation, we show (1) diffusion of particles within the framework of the walk-stick model, and (2) diffusion of cosmic rays in a given turbulent MHD field.

First we consider the walk-stick model, in which the particles are assumed to alternate walk (velocity v=1 or -1) and stick (v=0) in the one-dimensional space. The time interval for the walk and the stick events (t_{walk} and t_{stick}) are determined by respective probability distribution functions. If we use the normal distribution function to determine t_{walk} and t_{stick}, we obtain the Brownian motion time series. Instead, if we use the power-law distribution (with the power-law index mu and nu for the walk and the stick events, respectively), we can generate the so-called Levy walk time series. For an ensemble of particles we define the diffusion coefficient D(tau) = <delta x^2 >/ tau, where delta x is the traveling distance within time scale, tau. When D(tau) ~tau^{-gamma}, we have normal diffusion (gamma=0), sub-diffusion (-1 <gamma <0), and super-diffusion (0 <gamma <-1).

Then we consider a physical model in which cosmic rays travel in a given MHD turbulence. The turbulence is generated by superposition of many monochromatic MHD waves. The wave amplitude is given so that the wave power spectrum obeys the power-law with a given power-law index, i.e., A=epsilon$*$$k^{-alpha}$. The wave phases are assumed to be random. Cosmic ray equation of motion is numerically time integrated by Buneman-Boris method. By evaluating ensemble average of cosmic rays we compute the time scale dependent diffusion coefficient. When tau <10^3, D is almost proportional to tau, implying that the cosmic rays are making ballistic motion when the time scale is less than the mirror-reflection time scale. Beyond this time scale, there appear regimes with normal and anomalous diffusion with different characters. Details of the computations will be explained in the presentation.

多くの場合、粒子拡散現象は、個々の粒子はブラウン運動を行い、粒子の集合である確率分布関数の時間発展は古典拡散方程式にしたがって記述される。一方で宇宙線（高エネルギー荷電粒子）の磁気流体乱流中の拡散は、これとは質的に異なる可能性がある。たとえば、大振幅波動に粒子が閉じ込められたり、また乱流の影響が小さい領域では長時間速度がほとんど変化せずに運動を続けたりするからである。このような停滞と歩行との繰り返しによる粒子運動モデル (walk-stick model) を用いて、宇宙線の輸送を考えることができる。

本研究の目的は、磁気流体乱流中における宇宙線の拡散について理解を深めることであり、特に乱流エネルギーやベキ則で与えた乱流スペクトルのベキ指数のような巨視的パラメータが、宇宙線輸送の統計にどのような関係を持つかを調べることである。本発表では、(1) walk-stick model による粒子の拡散、(2) 磁気流体乱流中の宇宙線の拡散の２点について、テスト粒子シミュレーションを行った結果を述べる。

まず初めに、１次元方向に walk (v=1 or -1) と stick (v=0) を繰り返す粒子のモデル (walk-stick model) を考える。それぞれの時間 (t_{walk}, t_{stick}) を対応した確率分布関数から決定する。一般的な粒子の拡散であるブラウン運動の場合は、ガウス分布より t_{walk} と t_{stick} を求め、宇宙線の拡散のモデルとなる levy-walk の場合は、t_{walk} を P ~$x^{-\mu}$、t_{stick} を P ~$x^{-\nu}$ としたベキ乗分布を用いて決定する。また、粒子の統計を議論するために、時間スケール τ を用いた拡散係数 D(τ) = ＜Δ x^2 ＞ / τ を導入する。ここでΔ x は時間スケール τ における粒子の移動距離である。拡散係数を D(τ) ~ $\tau^{-\gamma}$ で表したときの γ の値によってそれぞれの拡散は、通常拡散（normal diffusion、 γ =0）, 準拡散（sub-diffusion, -1 ＜ γ ＜ 0）, 超拡散（super-diffusion, 0 ＜ γ ＜ 1）となる。

次に、磁気流体乱流中の宇宙線の運動を考える。乱流は多数の波動関数の重ね合わせによって生成し、単一波の振幅と波数は A= ε $*$$k^{-\alpha}$ により与える。位相はランダムとする。Buneman-Boris 法により宇宙線の軌道を計算し、粒子のアンサンブル平均を評価することにより、拡散係数の時間スケール依存性を評価する。ミラー反射時間よりも短い時間スケールでは、拡散係数はほぼ τ に比例し、運動はほぼ ballistic であることがわかるが、これよりも長い時間スケールの領域において、通常拡散、異常拡散の領域が現れる。計算法の詳細および計算結果について、ポスターにて発表する。