

銀河宇宙線の地球近傍までの輸送過程に関する数値実験

#川野賀 大喜¹⁾, 松清 修一²⁾, 大塚 史子²⁾, 吉田 光太郎¹⁾

(¹⁾ 九大・総理工, (²⁾ 九大・総理工

Numerical Simulation of the Transport process of Galactic Cosmic Rays to 1 AU

#Taiki Kawanoga¹⁾, Shuichi Matsukiyo²⁾, Fumiko Otsuka²⁾, Kotaro Yoshida¹⁾

(¹Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, (²Faculty of Engineering Sciences, Kyushu University

Heliosphere is formed by the interaction between the supersonic solar wind plasma and the interstellar plasma. It is characterized by structures such as the termination shock and the heliopause, and is a region dominated by the solar wind plasma and magnetic field. Galactic cosmic rays (GCRs), coming from interstellar space partially penetrate into the heliosphere, experience the influence of heliospheric structure, and undergo highly complex motion before reaching the Earth. Our goal in this study is to understand how GCRs penetrate into the heliosphere and reach the Earth at the level of particle trajectory, by combining global MHD simulations with test-particle simulations.

In this study, we performed test-particle simulations using electromagnetic field data obtained from a global MHD simulation under the assumption of a steady solar wind, in order to investigate the penetration process of GCRs into the heliosphere. In the MHD simulation, the solar wind parameters at 1 AU were set to 400 km/s (velocity), 5.0 /cc (density), 35 μ G (magnetic field strength), and 10⁵ K (temperature), which were extrapolated to the inner boundary at 50 AU (from the Sun). At the outer boundary corresponding to the interstellar space (900 AU), the parameters were set to 23 km/s, 0.1 /cc, 6,300 K, and 3 μ G. While previous studies have been limited to discussions up to the inner boundary at 50 AU in global MHD simulations, here we extended the calculation domain up to 1 AU by applying the theoretical Parker spiral model inside 50 AU, and investigated the particle trajectories of GCRs. We also considered the effect of cosmic ray pitch-angle scattering due to turbulence, since the heliosphere is usually turbulent and the magnetic fluctuations are known to be comparable to the background field.

In this presentation, we focus on the trajectories of particles with Lorentz factors $\gamma = 10$ (~ 10 GeV) and $\gamma = 1000$ (~ 1 TeV). For $\gamma = 10$ particles, it was confirmed that they are trapped by the spiral magnetic field of the heliosphere and then guided into polar current, ultimately reaching the inner boundary mainly from the polar regions of the heliosphere. For $\gamma = 1000$ particles, some particles penetrated directly toward the inner boundary, while others exhibited large-scale motion in the heliosphere and eventually entered through the polar regions of the heliosphere. In particular, for $\gamma = 1000$, we launched 10¹⁰ particles outside the heliopause and conducted large-scale simulations, enabling us to investigate their statistical behavior in relation to characteristic trajectory features.

太陽圏は太陽から噴き出す超音速の太陽風プラズマや星間プラズマとの相互作用によって形成され、終端衝撃波やヘリオポーズなどの特徴的な構造を持ち、太陽風プラズマと磁場が支配的な領域である。星間空間から飛来する銀河宇宙線は、一部が太陽圏内部まで侵入し、太陽圏構造の影響を受け、極めて複雑な運動を経験して地球まで到達する。本研究の目的は、グローバル MHD 計算とテスト粒子計算を組み合わせ、銀河宇宙線が太陽圏へどのように侵入して地球まで到達するのか、粒子軌道レベルで理解することである。

本研究では、定常太陽風を仮定したグローバル MHD 計算から得られた太陽圏の電磁場データを用いてテスト粒子計算を行い、太陽圏への銀河宇宙線の侵入プロセスを調査した。MHD 計算では、1 AU での太陽風の速度、密度、磁場の強さ、および温度を、それぞれ 400 km/s、5.0 /cc、35 μ G、10⁵ K とし、これらの値は内側境界 50 AU (太陽から 50 AU 地点) に外挿される。星間空間に対応する外側境界 900 AU での値は、それぞれ 23 km/s、0.1 /cc、6,300 K、および 3 μ G とした。これまでの研究では、グローバル MHD データの内側境界である 50 AU までの議論がなされてきたが、本研究では、50 AU 以内での領域における計算については Parker spiral の理論式を適用することにより、1 AU までの銀河宇宙線の粒子軌道について調査を行った。また、太陽圏内は通常乱流的で、磁場揺らぎと背景磁場の強度が同程度となることが知られているため、乱流場による宇宙線粒子のピッチ角散乱の効果も考慮した。

本発表ではローレンツ因子 $\gamma = 10$ (~ 10 GeV) と $\gamma = 1000$ (~ 1 TeV) の粒子の粒子軌道について議論する。 $\gamma = 10$ の到達粒子は太陽圏のスパイラル磁場に捕捉された後、極域の電流渦に引き込まれ、主に極域から内側境界へ到達することが確認された。 $\gamma = 1000$ の粒子は直線的に内側境界へ到達する粒子や太陽圏内を大きく運動し、太陽圏極域から内部境界へ到達する粒子が多くみられた。特に $\gamma = 1000$ の粒子については、100 億個の粒子をヘリオポーズの外側に配置し、大規模粒子計算を行い、統計的ふるまいを粒子軌道の特徴にまで踏み込んで理解する。