

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654169

研究課題名(和文)非ガウスの粒子拡散による宇宙線の衝撃波統計加速

研究課題名(英文)Diffusive shock acceleration of cosmic rays with non-Gaussian transport

研究代表者

羽田 亨(Hada, Tohru)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：30218490

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円、(間接経費) 570,000円

研究成果の概要(和文)：非ガウスのランダム歩行を行う宇宙線(高エネルギー粒子)が衝撃波統計加速を受ける過程を、テスト粒子計算およびフラクタル拡散方程式を用いて解析した。宇宙線は停滞と歩行を交互に繰り返すとし、停滞および歩行のそれぞれの時間スケールをベキ則で与え、衝撃波より注入された種粒子群が衝撃波統計加速を受ける過程をテスト粒子計算により解析した。注入された宇宙線の種粒子群が加速を受けて高エネルギーにいたるまでの時間スケールを、このパラメータと衝撃波圧縮比を用いて整理した。フラクタル拡散方程式に、背景流の不連続として衝撃波を導入し、衝撃波からデルタ関数として注入される宇宙線分布関数の時間発展を数値的に求めた。

研究成果の概要(英文)：The diffusive shock acceleration (DSA) is recognized as the most likely acceleration process to produce the observed power law spectrum of cosmic rays. One of the key elements of the DSA is the scattering of the cosmic rays by MHD turbulence, which is believed to exist both shock upstream and downstream. While the majority of past studies on the DSA adopt quasi-linear type model for the cosmic ray spatial diffusion, actual transport of the cosmic rays in a plasma with MHD turbulence can be qualitatively different. We studied the DSA process via test particle simulations by specifying non-Gaussian type scattering statistics to cosmic rays. The cosmic ray spectrum, spatial profile, and the acceleration time scale are evaluated, and are compared with observational data. In addition, fractal diffusion equation including the shock wave is numerically evaluated and the results are compared with the test particle simulations.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：宇宙線加速 非ガウス過程

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙天体プラズマ中には磁気流体乱流(以下、プラズマ乱流)が存在し、数多くの物理過程において重要な役割を果たしている。特に衝撃波における宇宙線の統計加速過程では、宇宙線の散乱体として衝撃波上流および下流域のプラズマ乱流の存在は本質的である。これらプラズマ乱流による宇宙線拡散を古典的拡散過程と捉え、これを衝撃波前後の流体圧縮と組み合わせた移流拡散モデルを考えると、この解は実際に観測される宇宙線スペクトルをある程度定量的に説明するものであり、広く受け入れられている。

(2) 一方、プラズマ乱流による粒子拡散は、乱流の電磁場を介した波動粒子相互作用によるものであり、一般に古典的(ガウスの)拡散であるとは限らない。例えば、磁力線垂直方向の空間拡散は、比較的短時間スケールでは不均一ラマ運動による磁力線乗り換えによる拡散、長時間スケールでは磁力線自身の3次元性的もつれによる拡散が支配的であり、後者は古典的拡散であるが、前者はいわゆる準拡散、つまり磁力線による粒子補足のために古典拡散よりも遅い過程となる。また乱流場が間欠的な場合、沿磁力線拡散は古典拡散よりも早い超拡散となることがある。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、このように宇宙線拡散が非ガウスの(非古典的)である場合の衝撃波統計加速過程を数値的および理論的に解析する。準拡散の場合には、宇宙線は十分に加速されないまま下流域に運ばれるため、宇宙線のエネルギースペクトルは標準的な加速モデルよりもソフトになることが期待される。一方、沿磁力線拡散ではプラズマ乱流に多く存在する間欠性のために超拡散となる時間スケールが存在する。この場合、下流域に流されるまでに宇宙線が多く衝撃波を横切ることができるため、標準的なモデルに比べてハードなスペクトルが実現し得る。準拡散・超拡散それぞれの場合に対し、宇宙線の散乱確率モデルを与え、これに基づいたテスト粒子計算により宇宙線スペクトルの時間発展を評価する。準拡散、超拡散の場合、それぞれ宇宙線フラックスのスペクトルは標準モデルに比べてソフト、ハードとなり、また衝撃波近傍での宇宙線密度は標準モデルに比べて減少、増大する。

(2) 非ガウスのな粒子運動を含む衝撃波統計加速の計算機シミュレーション、および非ガウスのな粒子アンサンブルの発展を記述する理論モデル(いわゆるフラクタル微分を含む)を用いて、新しい衝撃波統計加速モデルの構築を試みる。計算結果を最新の宇宙線観測データ、特に宇宙線フラックスのベキ則指数と比較検討し、モデルの妥当性を議論する。

3. 研究の方法

(1) 非ガウスの粒子拡散による宇宙線の衝撃波統計加速の計算機シミュレーション: 非ガウスの粒子拡散を含む衝撃波統計加速のための計算機シミュレーションコードを作る。非ガウスの粒子としては、いわゆるレヴィ歩行統計にしたがう粒子を想定する(非常に高エネルギーであるため、粒子速度は殆ど光速で一定となり、レヴィ飛翔よりもレヴィ歩行が妥当なモデルとなる)。粒子が停滞と歩行を交互に繰り返すとし、停滞および歩行のそれぞれの時間スケールをベキ則で与え、これらのベキ則指数を外部パラメータとする。粒子散乱は等方的拡散であると仮定する。ベキ則指数の取り方により、ガウス統計(古典拡散)の場合を実現できるが、まずこの場合についてシミュレーションを行い、宇宙線フラックス、加速時間等について、既知の結論が再現できるかを確認する。

(2) 非ガウスの粒子拡散を行う宇宙線流体の従う発展方程式の提案: 非ガウスの粒子のアンサンブルの記述には、フラクタル微分が本質的に関わることが知られている。ここでフラクタル微分とは、通常の微分の一般化であり、例えば関数の1階微分、2階微分等を一般に p 階微分として、 p の値として任意の実数(時として複素数)を考えるものである。

フラクタル微分概念は古くからあるが、これが実際に計算できるのは限られた p の場合であった(半整数など)。比較的最近になり、フラクタル微分の精度よい数値計算法がいくつか提案され、応用が広がりつつある。この状況をふまえ、宇宙線の分布を流体としてとらえ(時間、位置、運動量の分布関数とみなす)、この分布関数の時間発展を記述する方程式を考える。これをまず、いくつかの簡単な仮定のもとで(厚みの無視できる衝撃波、衝撃波から定常の宇宙線種粒子の供給、散乱体である乱流は上流下流ともに無限に広がる、等)とき、宇宙線フラックス、加速時間などの統計量を評価する。上の計算機シミュレーション結果と比較検討する。

4. 研究成果

(1) ベキ型分布に従うランダム変数を生成するルーチンを用いて、レヴィ歩行統計に従う宇宙線の衝撃波統計加速の計算機シミュレーションを行った。粒子運動は、停滞と歩行を交互に繰り返すとし、停滞および歩行のそれぞれの時間スケールをベキ則で与えた(図1)。

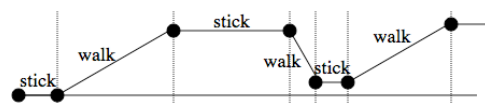


図1: 歩行-停滞モデル

多数の粒子を衝撃波中に置き、これらが衝撃波統計加速される様子を求めた(図2、図3)。古典拡散の場合についてフラックスのベキ則、加速時間、宇宙線の空間分布が、対流拡散モデル(宇宙線分布を時間、位置、運動量の関数として捉え、その時間発展を記述する流体モデル)により得られる結論と一致することを確認した。超拡散および亜拡散の場合に対して、上の諸物理パラメータを評価した。超拡散の場合にはより高いエネルギーまで加速が行われ、フラックスは「固い」ものとなるが、衝撃波から遠く離れた地点まで飛翔するため、加速時間は長くなる。亜拡散の場合にはその逆である。これらをシミュレーションにより定量的に評価し、ベキ指数および加速時間とレヴィ歩行を指定するパラメータとの関連を議論した。

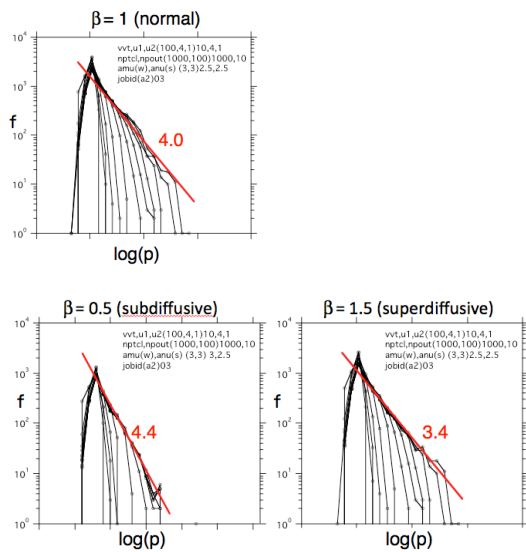


図2：非ガウスの拡散にしたがう宇宙線のフラックス分布の計算例。

(2) 非ガウスの粒子拡散を記述するフラクタル拡散方程式系について、数値解およびいくつかの典型的な例に対して解析解を求め、さらに上の(1)で述べたレヴィ歩行統計にしたがうテスト粒子を用いたシミュレーション解析を行った。それぞれの方法による粒子拡散が良い一致をすることを確認した。

(3) フラクタル拡散方程式に衝撃波(背景流の不連続)を導入し、その数値解を求めた。これをレヴィ歩行統計にしたがうテスト粒子計算結果と比較し、それぞれの方法から得られる解が一致することを確認した。フラックスのベキ則の漸近的振舞を議論した。

(4) 非熱的粒子群が持つ熱フラックスが、磁場擾乱と衝突してエネルギーを受け渡すことにより、非線形逆ランダウ過程により磁場擾乱を増幅させる。地球衝撃波近傍のSLAMSと呼ばれる大振幅磁場構造に対してこの過程を議論した。非線形ランダウ共鳴を含む方程式系を提案し、その数値積分により、初期に与えた微小磁場擾乱が比熱的粒子群

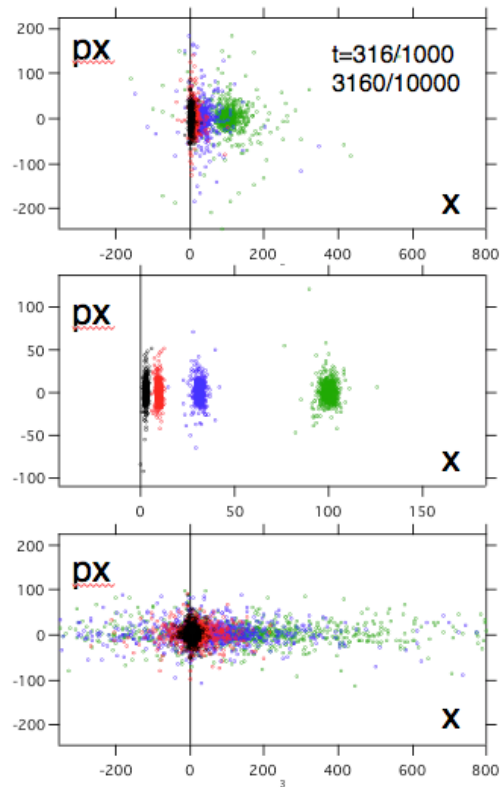


図3：位置-運動量位相空間内の宇宙線分布の時間発展。図中の $x=0$ の縦線が衝撃波、色つきの点群が宇宙線粒子であり、黒・赤・青・緑の順に時間発展している。上・中・下段がそれぞれ亜拡散、正規(ガウス)拡散、超拡散に対応する。

によりエネルギー供給を受け、大規模磁場構造に発展する様子を議論した。

(5) 衝撃波が複数存在する場合の粒子統計について、移流拡散方程式に基づく理論解析およびテスト粒子計算による議論を行った。任意の非一様背景流を、有限個の不連続領域に分割し、それぞれの領域での移流拡散解をもとめて接続することにより、非一様背景流と整合する非熱的粒子分布が求められる。太陽風などの宇宙プラズマ中で非ガウスの粒子分布がしばしば観測される事実との関連について議論した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① M. Nakanotani, S. Matsukiyo, T. Hada, Full Particle-In-Cell simulation of two colliding shocks, Proc. The 12th Asia Pacific Physics Conference, 10.7566/JPSCP.1.015103, 2014.

② T. Hada, Y. Nariyuki, M. A. Lee, Fluid modeling of short large amplitude magnetic

structures (SLAMS) near the earth's bowshock, Proc. Int'l Conf. Plasma Phys. 2011 (ICPP2011), Proc. CDROM. paper-id. 22E04, 2011.

[学会発表] (計 11 件)

① 羽田亨、成行泰裕、M. A. Lee, SLAMS の流体モデル, Japan Geoscience Union 2011 (JpGU2011), 2011.05.24, 幕張市

② T. Hada, Y. Nariyuki, M. A. Lee, Fluid modeling of SLAMS, AOGS2011, 2011.08.11, Taipei, Taiwan

③ T. Hada, Y. Nariyuki, M. A. Lee, Fluid modeling of short large amplitude magnetic structures (SLAMS) near the earth's bowshock, Int'l Conf. Plasma Phys. 2008 (ICPP2008), 2011.11.22, 金沢市.

④ 中野谷賢、羽田亨、松清修一、複数衝撃波による衝撃波統計加速、粒子加速に関する小研究会、東京大学・宇宙線研究所、2012.03.01

⑤ T. Hada, Y. Nariyuki, Y. Narita, Higher order statistics of MHD turbulence using multi-spacecraft data (invited), AOGS2012, 2012.08.15, Singapore.

⑥ T. Hada, Some modern analysis of space plasma waves, International Space Weather School (invited), 2012.09.18, Bandung, Indonesia.

⑦ 中野谷賢、松清修一、羽田亨、無衝突衝撃波における注入問題、日本物理学会第 68 回年次大会、29aEA-10、2013.03.27, 広島大学.

⑧ 中野谷賢、羽田亨、松清修一、複数の衝撃波による粒子加速の数値実験、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、No.03555、2013.05.24, 幕張市.

⑨ T. Hada, Diffusive shock acceleration of cosmic rays with non-Gaussian transport (invited), The 11th Int'l School for Space Simulations, 2013.07.16, Taoyuan, Taiwan.

⑩ T. Hada, Acceleration of cosmic rays in a non-uniform plasma flow, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2013.11.03, 高知大学.

⑪ 中野谷賢、松清修一、羽田亨、近接・衝突する二つの斜め衝撃波における粒子加速、地球電磁気・地球惑星圏学会, 2013.11.04, 高知大学.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：

国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

羽田 亨 (HADA, Tohru)

九州大学・大学院総合理工学研究院・教授

研究者番号：30218490

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：