

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2014

課題番号：22540264

研究課題名(和文) 確率微分方程式を用いた Fermi、CTA時代の宇宙線起源伝播モデルの構築

研究課題名(英文) Study of the origin and propagation of the Galactic cosmic rays based on stochastic differential equation methods in the era of Fermi and CTA

研究代表者

柳田 昭平 (Yanagita, Shohei)

茨城大学・名誉教授

研究者番号：40013429

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：銀河宇宙線はエネルギー的考察と、超新星残骸からの高いエネルギーガンマ線放射の検出、および超新星爆発に伴う衝撃波による効率的な加速機構の理論的考察から、超新星残骸にその起源を持つと考えられる。本研究では銀河内での超新星発生が時間的、空間的に離散的である事実を全面的に取り入れて、加速源である超新星残骸から太陽系に到達する宇宙線の伝播を、確率微分方程式を用いて数値的に解き、この伝播プロセスを特徴付けるパラメータB/C比のエネルギー依存性を導き、AMS-02による最新の観測結果を再現できること、星間空間乱流磁場がKraichnanモデルで記述されることを見いだした。

研究成果の概要(英文)：The Galactic cosmic rays are considered to be originated in supernova remnants (SNR) by considerations of energetics, detections of very high energy gamma ray emissions from SNRs, and quite effective acceleration by the associated shock waves. We numerically investigated the propagation process of the cosmic rays from SNRS where they are accelerated to the solar system based on stochastic differential equation methods by fully taking into account the discreteness of the occurrences of supernova explosions in the Galaxy. Calculated energy dependence of B/C which is the most important parameters to characterize the propagation process nicely agrees with the recent observational results by AMS-02. This result suggests the structure of turbulent interstellar magnetic field is described by the Kraichnan model.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 起源と伝播 Fokker-Planck方程式 確率微分方程式

1. 研究開始当初の背景

地上チェレンコフ望遠鏡による TeV 領域ガンマ線の観測から、約 50 ケの超新星残骸を含む、パルサー、パルサー風星雲などの天体で~100 TeV までのエネルギーを持つ宇宙線が加速されていることが確認されていた。加速された宇宙線は乱れた銀河磁場中を銀河外に向かって流れ出す銀河風による移流の影響を受けつつ約 10^7 年の寿命で銀河外へと伝播拡散すると考えられていた（この描像は現在でも同じ）。宇宙線の加速源は、エネルギー的な考察からも超新星残骸での衝撃波加速にあることは、ほぼ確実である。一方伝播過程については、leaky box model、Moskalenko 等によって開発され公開されている GALPROP と呼ばれるコードにもとづく二つの代表的モデルが提唱されている。しかしどちらのモデルも共通の、また個別の問題をかかえている。まずどちらのモデルも、超新星爆発が時間的にも空間的にも離散的に発生し、しかも超新星残骸中出の宇宙線加速は、ある有限な時間継続することを取り入れた計算ができない。特に leaky box model では、宇宙線の源は、その閉じ込め領域内で時間的、空間的に一様と仮定したモデルとなっていて、全く現実的でない。GALPROP では、宇宙線伝播を記述する Fokker-Planck 方程式を通常の数値解法を用いて解く際に、非物理的、人工的な境界条件 (free escape boundary) を導入せざるを得ず、またその境界の位置のエネルギー依存性を考慮しない等の問題をかかえている。

本研究代表者は、Fokker-Planck 方程式を、それに等価な確率微分方程式に置き換えて数値的に解く独特な手法を、銀河宇宙線太陽変調現象研究に適用し、太陽変調の 22 年周期、その荷電依存性の解明に成功していた。そこで本研究では、確率微分方程式を用いた手法を、銀河宇宙線の星間空間伝播過程の研究に適用することを試みることにした。

2. 研究の目的

Fermi 衛星搭載のガンマ線検出器 LAT 検出器、CANGAROO, HESS, MAGIC, VERITAS などの解像型空気チェレンコフ光望遠鏡 (IACT) による 100 MeV~100 TeV のエネルギー領域の高エネルギーガンマ線観測から、超新星などの活動的天体が銀河宇宙線の加速源であることが加速機構も含めて定量的に議論できるようになって、20 世紀初頭での Hess によるその発見以来宇宙物理の大きな謎の一つである宇宙線の起源をめぐる研究が急激な展開を見せている。また建設が進む高角度分解能、高感度の IACT による超高エネルギーガンマ線の観測を目的とする国際共同研究 CTA により、銀河宇宙線の起源、分布の研究がさらに急激に進展すると期待されている。一方 BESS, PAMELA などの飛翔体を用いた宇宙線の精密直接観測から、原子核成分、電子成分はもとより、反陽子、

陽電子などの反粒子のエネルギースペクトル得られ、その特徴とダークマターとの関連が示唆されている。これらの観測から宇宙線の起源、ダークマターについての物理を展開するには、宇宙線の銀河内での伝播過程の詳細な解明が不可欠である。本研究では銀河宇宙線の加速源を超新星残骸と仮定して、伝播を記述する Fokker-Planck (FP) 方程式を、それに等価な連立確率微分方程式 (SDE) に置き換え、粒子の軌跡を時間逆向きに解く独特な手法を用いて、宇宙線の起源伝播モデルを構築する。また同時に二次成分としての反陽子、陽電子のスペクトルを見積もり、観測結果との比較からダークマターの寄与を推定する。陽電子については近傍パルサーからの寄与も定量的に見積もり、宇宙高エネルギー粒子の起源について新たな視点を提供することを目的とする。

3. 研究の方法

宇宙線の伝播は一般に Fokker-Planck (FP) 型の拡散移流型の偏微分方程式で記述される。FP 方程式は、Itoh の定理により、連立確率常微分方程式 (SDE) に等価であることが知られている。本研究では、銀河宇宙線の源は、超新星残骸 (SNR) にあると仮定して、地球近傍に到達する宇宙線の星間空間中の伝播過程の詳細を、この連立確率微分方程式を数値的に解くことによって観測結果との比較から調べ上げ、宇宙線の起源解明に密接に関連する物理量を導出する。この際、SDE を用いた研究は初めての試みであるので、伝播過程でのエネルギー損失は無視できること、また拡散過程は等方的、すなわち拡散テンソルはスカラーであるとの単純な仮定をする。この仮定では、元の FP 方程式は、時間の関数としての粒子の位置を表す確率変数 $\mathbf{r}(t)$ についての SDE、 $d\mathbf{r} = \Sigma \sigma_s d\mathbf{W}_s$ という簡単な確率微分方程式となる。ここで $d\mathbf{W}_s$ は、時間ステップ dt を幅に持つ Gauss 分布で表せる Wiener 過程、 $\sigma_s = (2\kappa)^{1/2}$ で κ は、拡散係数である。シミュレーションの詳細は発表論文 (Astron. & Astrophys., 573, A134(2015)) にゆずるが、まず過去 5×10^8 年に遡って、超新星爆発は、銀河系全体で平均として 100 年に 3 回の頻度でランダムに発生し、その空間分布は銀河面へ射影した場合の動径方向の綿密度が、分子雲の分布に、また銀河面垂直方向にはあるスケールハイトの指数関数的にランダム分布するように発生したとして超新星残骸のリストを用意しておく。各 SNR での宇宙線加速は、超新星爆発後 10^5 年にわたり一様に進むと仮定する。またその時の SNR は半径 30 パーセクの球状であると仮定する。こうしておいて、太陽系から出発して、宇宙線の軌跡 $\mathbf{r}(t)$ を、上記 SDE を時間に逆向きに適当な時間ステップ Δt で積分して行く。各ステップ毎に通過した星間物質の厚みを計算し、それを積分して行く。このステップを、宇宙線が、あるアクティブな (即ち宇

宙線加速が進行中である) SNR に 30 パーセク以内に入るまで続ける。アクティブな SNR に遭遇したら、そこまでの経過時間 (即ち宇宙線の年齢) と全通過物質量を記録し、新たな別の粒子の軌跡を同様にして追うプロセスを続ける。十分な統計精度が得られるように各エネルギー毎に 1000 ケの粒子についてこのプロセスを繰り返す。

4. 研究成果

上述の手法で得られた、太陽系に到達した宇宙線の年齢分布を、代表的なエネルギーについて図 1 に示す。同じエネルギーであっても

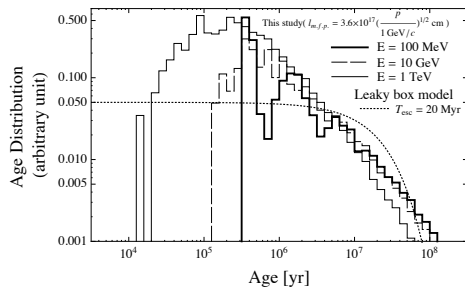


図 1 年齢分布

年齢は同じではなく、広い範囲に分布すること、低いエネルギー領域に、観測されるエネルギーに依存した鋭いカットオフが見られる。カットオフの位置はエネルギーと共に減少している。また図には示さないが 1 GeV/n のエネルギーの宇宙線の平均年齢は Be-10 等の長寿命放射性 2 次核種の直接観測から推定されている年齢と良く一致している。本研究で推定した年齢は、“宇宙線が、その源である SNR から太陽系に到達するまでに経過した時間”を指し、多くの現在までの研究で採用されている“銀河系からの脱出時間”とは異なることを強調しておく。カットオフの存在は、超新星の発生が空間的、時間的に離散的であるからである。図 1 の中程に leaky box model から予想される年齢分布を点線で示したが、この離散性を考慮できないモデルにはカットオフは現れず、ゼロまで連続分布してしまう。

図 2 には、宇宙線が、その源から、太陽系に到達するまでに通過した星間空間物質の厚

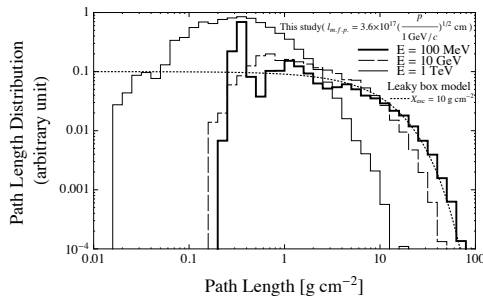


図 2 path length の分布

さの分布 (PLD) を、図 1 に示したものと同じ

代表的なエネルギーについてプロットした。年齢分布と同様に、同じエネルギーを持って観測された宇宙線であっても、その PL は広い範囲にわたる分布を示し、またエネルギーに依存して、小さな PL の領域に鋭いカットオフが見られる。図の中程に leaky box model から予想される PLD を点線で示した。源の分布が連続的であることを仮定したモデルでは、PLD はゼロまで連続的に分布する。両図のカットオフは、宇宙線が、太陽系に到達するには、そのエネルギーに依存して、有限な最小の時間と PL が必要であることを意味し、当然その存在が予想されるこれらの物理量を定量的に与える。図 1, 2 に示した分布は、直接観測できるものではないが、宇宙線の伝播について極めて重要な情報を与えてくれる。またこれらの情報は、宇宙線の源としての超新星の分布を考慮しない FP 方程式の通常の数値解法でもとめる GALPROP あるいはそれに類似の DRAGON などの公開されているコードを用いる手法では得られず、確率微分方程式を用いる本研究が、最もその特質を發揮するところである。

本研究では拡散過程は等方的と仮定しているので、宇宙線の星間空間中での伝播の平均自由行程が決まれば拡散係数が決まってしまう。平均自由行程の運動量依存性は、星間空間乱流磁場構造で決まる。乱流磁場モデルとして Kolmogorov, Kraichnan モデルを採用した場合と、平均自由行程に Bohm 拡散を仮定した場合の 3 つの場合について、図 2 に示したような PLD を計算し、その平均をエネルギーの関数として図 3 に示す。

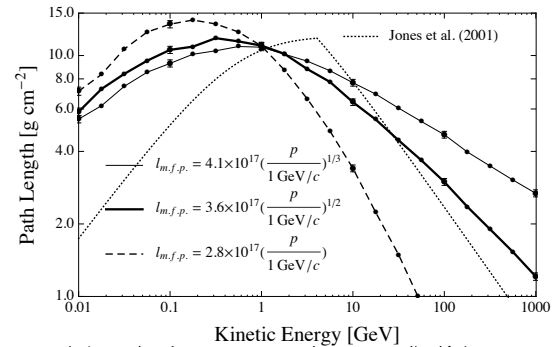


図 3 平均の PL のエネルギー依存性

平均自由行程は、乱流モデルにより異なる冪指数を持つ運動量の冪関数で表せ、絶対値は後述するように 1 GeV/n での B/C 比が観測値を再現するように規格化した。平均の PL は高エネルギー部ではエネルギーの単調減少関数となっており、その位置は乱流モデルによって異なるが約数百 MeV のところで最大値を示す。この折れ曲がりを持つ PLD の形は、以前より要請されていた形であるが、他の研究では、その存在を予測できる指導原理を持っていない、2 次成分の存在量の観測値を再現できるように手を入れていたに過ぎない。本研究で、上に凸な PLD が再現できたのは、宇

宙線の源となる超新星発生の離散性をあからさまに考慮したためと推測される。宇宙線中の全ての1次核種のPLDが図3のPLDで代表されるならば、伝播プロセスの解明に最も重要と考えられているB/C比のエネルギー依存性を、weighted-slabモデルの手法で計算できる。Bの存在量は、その2つの同位元素B-10とB-11に分けて扱う。親核種として、O-16, N-15, N-14, C-13, C-12を取り上げ、各エネルギー毎に、上述したB-10からO-16までの7種の核種の存在度についての連立微分方程式を、図2および3で示したPLDに従って数値積分すれば良い。

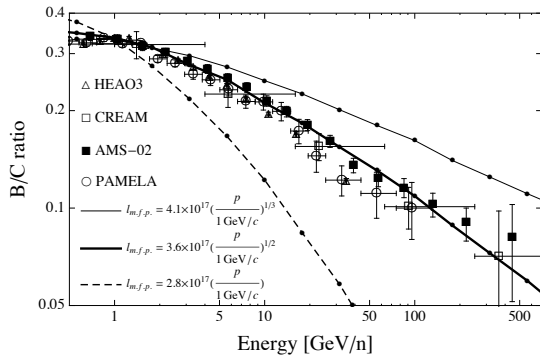


図4 B/C比のエネルギー依存性

B/C比の計算結果を、PAMELA、AMS-02等の飛翔体による直接観測結果とともに、図4に示す。計算結果は1 GeV/nでのB/C比が、AMS-02の結果と一致するよう規格化した。すなわちそうなるように平均自由行程の絶対値を決めた。計算値と観測値の比較にあたっては、観測値が太陽変調効果を受けて星間空間での値と変わってしまう事実を慎重に扱う必要がある。本研究では簡単のために、太陽変調効果をforce field theoryに基づいて、modulation parameterを知られている範囲で変化させ、B/C比への影響を調べ、1 GeV/nでは、変化は5%以下であると見積もった。従って上述した規格化は、妥当と考えられる。図4から明らかなようにKraichnanモデルの予測値が最新の観測結果を最も良く再現すると結論される。この結論はGALPROP等を用いた従来の手法による研究がKolmogorovモデルを支持するとの結論と一致しない。我々のモデルでは、拡散は等方的であるとの単純化(この点はGALPROPも同じだが)をしていること、また伝播中の2次加速、様々なエネルギー損失効果によるエネルギー変化を取り入れていない等の影響を更にチェックする必要があると思われる。A & Aへの論文投稿後、非等方的拡散の効果を、銀河の規則的磁場としてJanssonとFarrarによるモデルを採用し、予備的に検討した。この磁場モデルは、他のグループが提唱している規則的磁場のモデルと異なり、divergence freeであり、信頼性が高い。結果を図5に示す。予測されたように、Kraichnan、Kolmogorov両モデル、Bohmモデルどれも観測値を全エネ

ルギー領域で再現出来ていない。

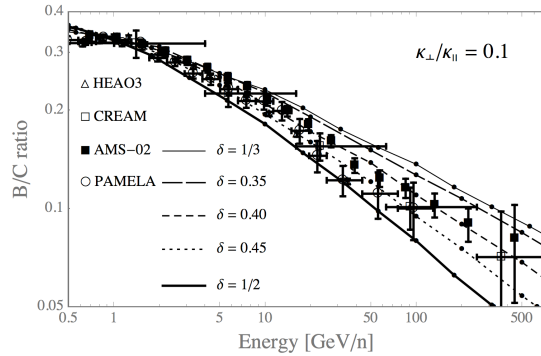


図5 非等方的拡散を仮定したB/C比

このシミュレーションでは磁場に垂直方向への拡散係数が、磁場に沿う方向への拡散係数の1/10であると仮定した。今後の課題として、ランダムな磁場の存在を考慮した詳細な検討が不可欠であると考えられる。また当初予定していた反陽子、陽電子など反物質についての計算も大きな課題として残されている。

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 S. Miyake, H. Muraishi, and S. Yanagita, A stochastic simulation method of the propagation of Galactic cosmic rays reflecting the discreteness of cosmic ray sources, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 573, 2015, pp. A134 1-5, 査読有
- ② Ryo Yamazaki, Tatsuo Yoshida, Yuke Tsuchihashi, Ryosuke Nakajima, Yutaka Ohira, Shohei Yanagita, Electron acceleration with improved Stochastic Differential Equation method: Cutoff shape of electron distribution in test-particle limit, *Journal of High Energy Astrophysics*, Vol. 5-6, 2015, pp. 1-8, 査読有

[学会発表] (計 7件)

- ① 三宅晶子、柳田昭平、『規則的銀河磁場が銀河宇宙線伝播に及ぼす影響：拡散係数の磁場依存性』、日本物理学会第70回年次大会、2015. 3. 21、早稲田大学早稲田キャンパス(東京都新宿区西早稲田)
- ② 三宅晶子、柳田昭平、『規則的銀河磁場が銀河宇宙線伝播過程に及ぼす影響』、日本物理学会2014年秋季大会、2014. 9. 19、佐賀大学本庄キャンパス(佐賀県佐賀市本庄町)
- ③ 三宅晶子、柳田昭平、『太陽系近傍における銀河宇宙線のエネルギースペクトルの起源』、日本物理学会第69回年次大会、2014. 3. 28、東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市北金目)
- ④ 三宅晶子、柳田昭平、『銀河宇宙線陽子・

電子の銀河系内伝播過程におけるドリフト効果』、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013. 9. 22、高知大学朝倉キャンパス（高知県高知市曙町）

⑤三宅晶子、柳田昭平、『確率微分方程式を用いた銀河宇宙線年齢分布の推定』、日本物理学会第 68 回年次大会、2013. 3. 29、広島大学東広島キャンパス（広島県東広島市鏡山）

⑥三宅晶子、柳田昭平、『Force-field 近似における modulation parameter の運動量依存性』、日本物理学会第 67 回年次大会、2012. 3. 24、関西学院大学（兵庫県西宮市上が原）

⑦三宅晶子、柳田昭平、『銀河宇宙線電子・陽電子比と銀河宇宙線太陽変調』、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010. 9. 14、九州工業大学戸畑キャンパス（福岡県北九州市戸畑区仙水町）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳田 昭平 (YANAGITA, Shohei)

茨城大学・名誉教授

研究者番号：40013429

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し