

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：52101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800145

研究課題名(和文) 銀河宇宙線源の時間的・空間的離散分布を考慮した銀河宇宙線伝播モデルの構築

研究課題名(英文) Propagation of the Galactic Cosmic Ray Considering the Discreteness of Cosmic Ray Sources

研究代表者

三宅 晶子 (MIYAKE, Shoko)

茨城工業高等専門学校・国際創造工学科・准教授

研究者番号：00613027

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：地球上で観測される銀河宇宙線のエネルギースペクトルや元素組成比などの特徴を紐解くことで、私たちは銀河宇宙線の源となる天体(超新星残骸)や銀河系内の環境、そこで繰り広げられる物理現象を理解することができる。本研究では、銀河宇宙線が源を離れ地球近傍に到来するまでのプロセス(銀河系内伝播過程)や高エネルギー陽電子の異常増加に関する知見を観測された銀河宇宙線から引き出すために、銀河宇宙線の銀河系内伝播を精密に計算できる数値シミュレーションモデルを開発した。

研究成果の概要(英文)：The galactic cosmic ray (GCR) observed at the Earth reveals various physical phenomena in the origin of the galactic cosmic rays (supernova remnants) and/or in the Galaxy. In order to obtain the crucial key for understanding the propagation of the GCRs in the Galaxy and an anomalous increase of the GCR positrons, we have developed the numerical model of the GCR propagation in the Galaxy by considering the discreteness of GCR sources and an anisotropic diffusion.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：銀河宇宙線 超新星残骸 銀河磁場 銀河系 太陽圏

1. 研究開始当初の背景

- (1) 銀河宇宙線の二次成分と一次成分の比のエネルギー依存性は、銀河宇宙線が源から太陽系へ到来するまでの通過物質量のエネルギー依存性によって決まる。また銀河宇宙線中の放射性核種の同位体比においては、太陽系到来時における銀河宇宙線の年齢のエネルギー依存性も放射性核種の崩壊量に反映されるはずである。したがってこれらの観測を再現しうる銀河宇宙線の通過物質量分布 (PLD: Path Length Distribution) および年齢分布 (AD: Age Distribution) を決めることが、銀河宇宙線伝播過程の理論研究における重要な研究課題のひとつとしてあげられる。しかし、PLD や AD の分布を推定できる銀河宇宙線伝播モデルは少なく、また toy model の域を脱していない。
- (2) 研究代表者は、確率微分方程式 (SDE: Stochastic Differential Equation) を用いた数値解法により等方拡散モデルにおける銀河宇宙線陽子の PLD や AD を数値計算し、これまで銀河風や星間空間における宇宙線再加速に由来するとして議論されてきた銀河宇宙線二次成分・一次成分比のエネルギー依存性が、銀河宇宙線源の離散分布を考慮することでも説明できるという知見を得た。
- (3) 他方、銀河宇宙線電子はシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱効果等によるエネルギー損失量が大きいため、高エネルギー電子の源は太陽系近傍に限られることが予想される。その場合、銀河宇宙線源の離散分布の寄与は強く、宇宙線源の空間分布や宇宙線加速継続期間が TeV 領域のエネルギースペクトルの構造に強く反映されると考えられる (e.g. Kobayashi et al. 2004) また PAMELA の観測した数十～数百 GeV 領域における銀河宇宙線陽電子成分の異常増加を説明する説として太陽系近傍のパルサーからの一次起源陽電子の存在も注目されており (e.g. Linden and Profumo, 2013)、この場合も宇宙線源の時間的・空間的分布の離散性の影響を無視できない。

2. 研究の目的

銀河宇宙線源 (超新星残骸) の時間的・空間的分布の離散性や銀河磁場による非等方拡散と銀河宇宙線二次成分・一次成分比や銀河宇宙線放射線核種の同位体比のエネルギー依存性との関連、また数十～数百 GeV のエネルギー領域における銀河宇宙線陽電子成分の異常増加の起源の定量的検証のために、銀河宇宙線源の時間的・空間的離散分布や銀河磁場による非等方拡散を考慮した精密銀河宇宙線伝播モデルを構築する。

3. 研究の方法

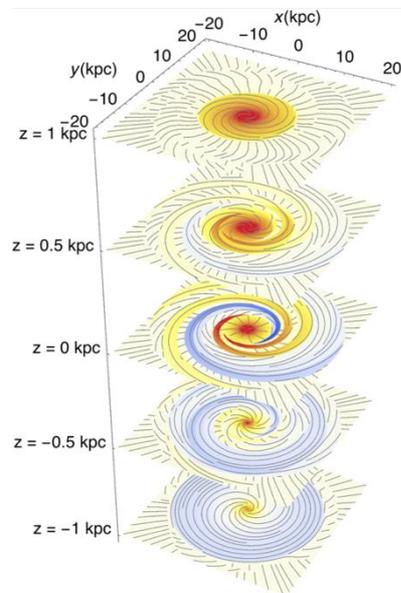


図1 銀河磁場 (Jansson et al., 2012)。色の濃淡が磁場強度の強弱、暖色・寒色の違いが磁場の向きの違いを示す。

本研究で構築した銀河宇宙線の銀河系内伝播モデルの要点を以下にまとめる。

- (1) SDE による数値解法を採用した。SDE を用いた数値解法は、Fokker-Plank 型の移流拡散方程式を用いた従来の手法とは異なるモンテカルロシミュレーション法の一つであり、個々の粒子の宇宙線の軌跡やエネルギー損失履歴などを求めることができる。これにより、PLD や AD は観測時のエネルギー毎の平均的な量としてではなく、観測エネルギー毎での分布として得ることができたため、銀河宇宙線二次成分・一次成分比などをより精密に導出することができた。
- (2) 銀河宇宙線源として超新星残骸を想定し、銀河系内の物質密度分布に依存した超新星爆発発生率や既知の太陽系近傍の若い超新星残骸データを考慮することで、超新星残骸のリスト (空間座標および超新星爆発の発生時刻のデータテーブル) を用意した。
- (3) Jansson et al. (2012) の提案した 3次元銀河磁場 (図1) を考慮した。このモデルは WMAP 等の観測によりパラメータに制限が与えられており、現実にも最も近い磁場構造を有すると期待される。また divergence free も満足している。
- (4) 銀河宇宙線の rigidity と銀河磁場の両方に依存する非等方拡散係数モデルを考慮した。rigidity と磁場強度に応じて拡散係数の大きさが変化するだけでなく、磁場に対して平行・垂直な成分を持つ。

以上すべての点が、本研究で構築した銀河宇宙線伝播モデルの強みであり、世界中の研究者がよく利用している銀河宇宙線電波計算コード GALPROP では得られない、あるいは考慮されていない点である。

またこの銀河系内伝播モデルとは独立に、太陽圏内で生じる低エネルギー銀河宇宙線の強度変動（太陽変動）を求める数値計算モデルの精密化も行ない、BESS や PAMELA の観測した太陽活動極小期から極大期にわたる強度変動を再現可能な精密太陽変動モデルも構築した。

4. 研究成果

本研究の研究成果を、主な項目に分類して以下にまとめる。

(1) 原子核成分比のエネルギー依存性

予備研究の継続として、磁場構造を考慮しない等方拡散モデルによる PLD や AD、銀河宇宙線ホウ素・炭素比 (B/C 比) の研究成果を本研究初年度にまとめ、論文 (雑誌論文(5)) として発表した。その際の B/C 比を図 2 に示す。これに対し、Jansson et al. (2012) の銀河磁場を考慮した非等方拡散モデルで得た PLD および B/C 比をそれぞれ図 3、図 4 に示す。これらの結果から、以下の知見を得た (雑誌論文(4))。

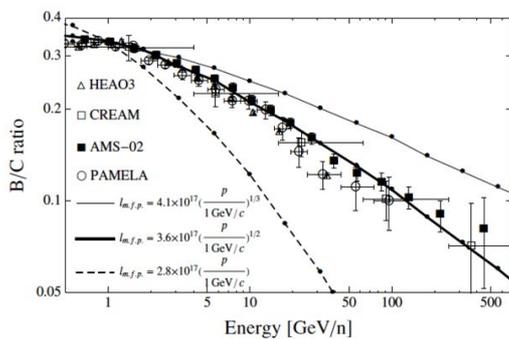


図 2 等方拡散での銀河宇宙線 B/C 比

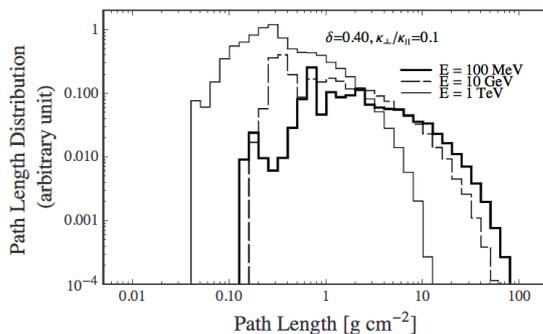


図 3 非等方拡散でのエネルギー毎の PLD

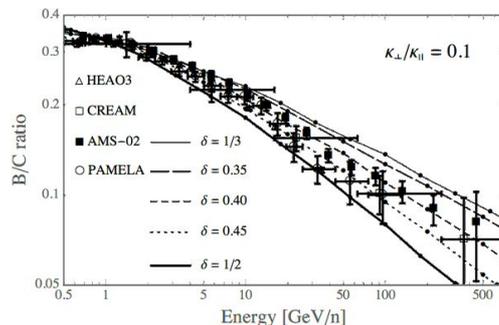


図 4 非等方拡散での銀河宇宙線 B/C 比

銀河磁場を考慮した非等方拡散モデルにおいても、銀河宇宙線源の空間的・時間的な離散性を考慮することで、銀河宇宙線の PLD や AD は上限値だけでなく下限値を持ち、エネルギーが低くなるほどに分布の形状が下限値周辺で乱れる傾向が維持される。(図 3 参照)

銀河磁場を考慮した場合、銀河宇宙線 B/C 比の観測結果を再現する拡散係数のモデルは Kraichnan-type と

Kormogorov-type の中間の rigidity 依存性を持ち、絶対値は磁場を考慮しない等方拡散モデルで見積もられた値よりも大きくなる。(図 4 参照)

銀河磁場に対して垂直な方向への拡散成分と平行な方向への拡散成分の比に依存して、B/C 比の観測結果から予測される銀河宇宙線が太陽系に到来するまでの伝播時間が変化する。これは拡散の非等方性の程度により伝播領域が変化することを意味しており、B/C 比に加えて放射性同位体元素比から非等方拡散の程度に制限を与えられることを示唆する。

(2) 一次起源電子のエネルギースペクトル

銀河宇宙線 B/C 比の観測値を再現できる拡散係数を考慮して、一次起源電子・陽電子にも適用可能な宇宙線伝播モデルを構築した。電子・陽電子のエネルギー損失 (想定した銀河磁場や物質密度分布に応じたシンクロトロン放射および逆コンプトン散乱) 既知の太陽系近傍の若い超新星残骸の年齢および空間分布、またそれら既知の超新星残骸の年齢に応じた、超新星残骸の大きさの変化および超新星残骸から逃げ出す銀河宇宙線のエネルギー変化を考慮することにより、一次起源電子のエネルギースペクトルを数値計算した。

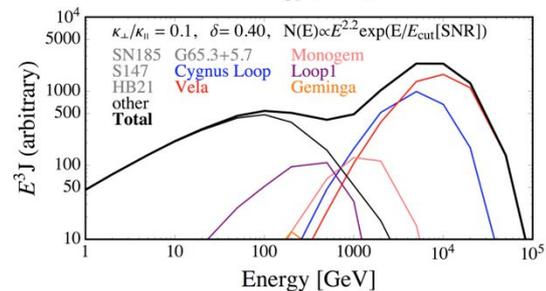
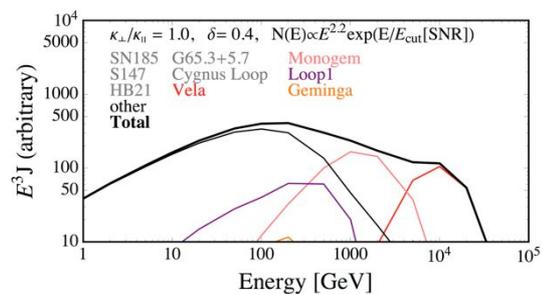


図 5 一次起源電子エネルギースペクトル (上下で想定した拡散係数の非等方性の程度が異なる。)

図5は拡散係数の非等方性の程度を変化させた場合の結果であり、以下の知見が得られた(雑誌論文(1))。

予想通りTeV領域の銀河宇宙線電子は太陽系近傍の若い超新星残骸(図5で色をつけた超新星残骸)に起源を持つ。

銀河宇宙線の源の候補としてあげられる超新星残骸のエネルギースペクトル形状への寄与の程度は、超新星残骸の大きさや宇宙線の逃げ出しのエネルギー依存性をどう考慮するかに依存する。

電子の場合にも拡散係数の銀河磁場に対する異方性やrigidity依存性をどう導入するかで源となる超新星残骸の空間分布が大きく変化し、結果として得られるTeV領域のエネルギースペクトル形状も大きく変化する。

一次起源陽電子の起源として考えられるパルサーに注目すると、Monogenからの寄与が比較的強く、TeV領域にピークを持つ。Gemingaからの寄与も、わずかながら数百GeVの領域に見受けられる。

(3) 二次起源粒子のエネルギースペクトルと電子・陽電子比

SDEによる数値計算で得た一次起源銀河宇宙線(${}^4\text{He}$ 、 ${}^3\text{He}$ 、陽子、電子)の通過物質質量を用いて、銀河宇宙線と星間空間物質との核破砕反応による核種の変化を数値計算し、地球近傍で期待される二次起源銀河宇宙線(重陽子、反陽子、電子の二次起源成分、陽電子)のエネルギースペクトルを求めた。これら7つの粒子に加えて、陽電子と電子の二次生成を計算するために K^\pm 、 μ^\pm も追加して、各核破砕反応での断面積をGeant4から取得した。図6は、一次起源銀河宇宙線の数密度がエネルギーのべき乗(${}^4\text{He}$ 、 ${}^3\text{He}$ 、陽子は $E^{-2.7}$ 、電子は $E^{-3.2}$)に比例すると仮定した場合に得られた結果であり、初期条件を1GeVでの陽子の微分粒子数数が100になるよう規格化して計算した。いくつかの単純化を施した結果にも関わらず、核破砕反応で生成された二次成分の量はオーダーで観測と一致するものが得られた。

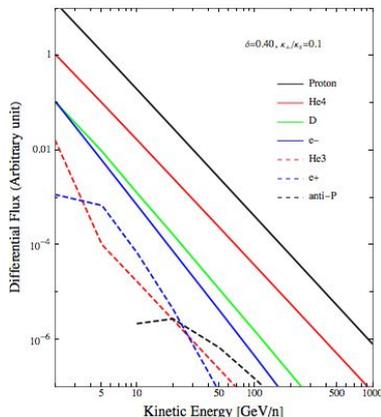


図6 銀河宇宙線エネルギースペクトル

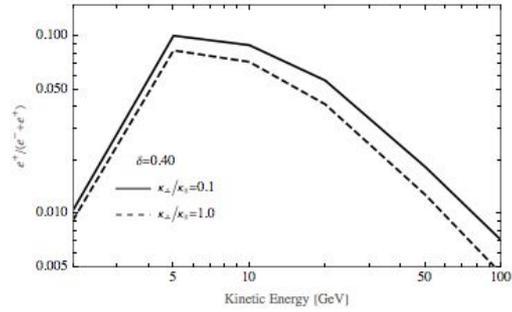


図7 電子・陽電子比

また電子および陽電子のエネルギースペクトルをもとに算出した電子・陽電子比を図7に示す。スペクトル構造が観測や他の理論モデルの結果よりも高エネルギー側にシフトしているが、これは各破砕反応の際、二次生成される粒子のエネルギーが一次粒子のエネルギーと等しいとの単純化を施したためであると考えられる。その点を除けば、一次起源陽電子の存在を無視した場合の電子・陽電子比として他の理論モデルと類似の結果が得られている。すなわち以上をもって、銀河宇宙線源の時間的・空間的分布の離散性と銀河宇宙線二次成分・一次成分比のエネルギー依存性、および銀河宇宙線陽電子成分の異常増加の起源を定量的に議論するための銀河宇宙線伝播モデルの基本枠が構築された。これをもとに、得られた結果を実際に観測と比較することで銀河宇宙線陽電子成分の異常増加等の定量的議論を行い、得られた結論はしかるべき科学雑誌等で成果報告する予定である。

(4) その他、付加的な研究成果

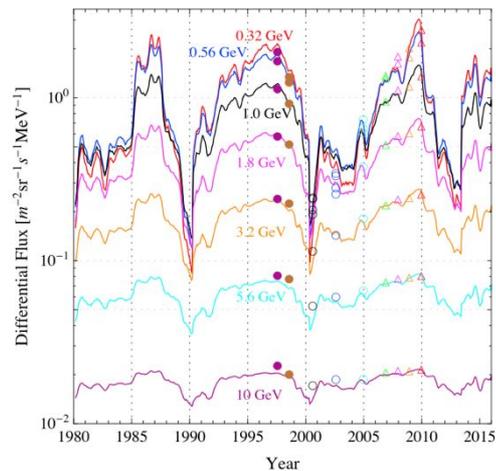


図8 低エネルギー銀河宇宙線陽子の22年周期変動(マーカーは観測値)

エネルギー数十GeV以下の銀河宇宙線のエネルギースペクトルを議論するために開発していた太陽圏内での宇宙線伝播モデルの改良も進め、BESSやPAMELAにより観測されたエネルギースペクトルや地上の中性子

モニターによる中性子係数率の22年周期変動(図8)を再現可能な銀河宇宙線太陽変動モデルを構築した(雑誌論文(2),(3))。

さらにこのモデルの応用として航空機高度における宇宙線被ばくの22年周期変動も計算した結果、次期太陽活動極少期周辺5年間における年間被ばく線量の平均値が前回の太陽活動極少期周辺5年間に比べて約19%増加することが分かった(雑誌論文(3))。この付加的な研究成果は社会的インパクトが強く、アメリカ地球惑星科学連合(AGU)のWeb記事や産経新聞の記事としても紹介された(次章〔その他〕参照)。

このほかにも、銀河宇宙線の銀河からの漏れ出しの寄与や系外銀河宇宙線の銀河系内での変動効果(銀河風による系外銀河宇宙線の断熱減速による2nd kneeの形成の可能性)についても研究を進展させた。本研究で構築した銀河宇宙線伝播モデルを用いることで、今後も銀河宇宙線や銀河宇宙線伝播する宇宙空間に関連する様々な物理的知見が得られることが強く期待される。今後も引き続き得られた研究結果の精査を進め、順次然るべき科学雑誌等で成果報告していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- (1) S. Miyake, "Anisotropic diffusion of high-energy cosmic-ray electrons in the Galaxy", *Proceedings of Science (ICRC 2017)*, 267, pp.1-8, 2017, 査読無, <https://pos.sissa.it/301/267/pdf>
- (2) S. Miyake, "Charge-sign dependence in the solar modulation during the solar cycle 23", *Proceedings of Science (ICRC 2017)*, 018, pp.1-8, 2017, 査読無, <https://pos.sissa.it/301/018/pdf>
- (3) S. Miyake, R. Kataoka, and T. Sato, "Cosmic Ray Modulation and Radiation Dose of Aircrews During the Solar Cycle 24/25", *Space Weather*, 15, pp.589-605, 2017, 査読有, DOI:10.1002/2016SW001588
- (4) S. Miyake and S. Yanagita, "Effect of the regular galactic magnetic field of the propagation of galactic cosmic ray in the Galaxy", *Proceedings of Science (ICRC2015)*, 491, pp.1-8, 2015, 査読無, <https://pos.sissa.it/236/491/pdf>
- (5) S. Miyake, H. Muraishi, and S. Yanagita, "A stochastic simulation of the propagation of Galactic cosmic rays reflecting the discreteness of cosmic ray sources, Age and path length distribution", *Astronomy and Astrophysics*, 573, A134, 2015, 査読有, DOI: 10.1051/0004-6361/20142442

〔学会発表〕(計6件)

- (1) S. Miyake, "Anisotropic diffusion of high-energy cosmic-ray electrons in the Galaxy", 35th International Cosmic Ray Conference, 2017
- (2) S. Miyake, "Charge-sign dependence in the solar modulation during the solar cycle 23", 35th International Cosmic Ray Conference, 2017
- (3) 三宅晶子, 柳田昭平, 規則的銀河磁場が太陽系近傍の超新星残骸を起源とする銀河宇宙線電子の銀河系内電波に及ぼす影響、日本物理学会2015年秋季大会、2015年
- (4) S. Miyake and S. Yanagita, "Effect of the regular galactic magnetic field of the propagation of galactic cosmic ray in the Galaxy", 34th International Cosmic Ray Conference, 2015
- (5) 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
- (6) 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、日本物理学会2014年秋季大会、2014

〔その他〕

- (1) 三宅晶子, 宇宙放射線と宇宙な研究生活の話、茨城工業高等専門学校 図書館カフェ、2017年12月19日(一般向け講演会)
- (2) 産経新聞、航空機での宇宙線被曝、2割増加 茨城高専などが予測、2017年5月29日(新聞掲載)
- (3) AGU Geo Space, Impending weak solar activity could expose aircrews to higher radiation levels, 4 April, 2017, <https://blogs.agu.org/geospace/2017/04/04/>, (Web記事掲載)
- (4) 三宅准教授ら、航空機高度での宇宙線被ばく量を2024年まで予測、http://www.ibaraki-ct.ac.jp/?page_id=8982, (プレスリリース)
- (5) 三宅晶子, 宇宙線と宇宙天気のお話、NNS なかネットワークシステム ひらめきサロン、2016年2月10日(一般向け講演会)

6. 研究組織

(1)研究代表者

三宅 晶子 (MIYAKE, Shoko)

茨城工業高等専門学校・国際創造工学科・准教授

研究者番号: 00613027