

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目： 基盤研究 (C)
 研究期間： 2007~2009
 課題番号： 19540260
 研究課題名 (和文) 確率微分方程式を用いた銀河宇宙線太陽変調と宇宙粒子および反粒子の起源の研究
 研究課題名 (英文) A study of the solar modulation of galactic cosmic rays and the origin of cosmic particles and anti-particles using stochastic differential equations
 研究代表者
 柳田 昭平 (YANAGITA SHOHEI)
 茨城大学・理学部・教授
 研究者番号： 40013429

研究成果の概要 (和文)： カレントシートを含む Parker-type や Fisk-type の惑星間空間磁場 (HMF) モデルを構築し、銀河宇宙線太陽変調を確率微分方程式でシミュレーションすることで、太陽変調の宇宙線電荷符号依存性の定量的な解析を可能とする空間フル 3 次元コードを開発した。銀河宇宙線強度の 22 年周期変動を定性的に再現できたが、陽子/反陽子比の変動の定量的再現には至らなかった。一方で HMF の極性が異なる時期の AMS および PAMELA による電子/陽電子比の観測結果は再現できた。

研究成果の概要 (英文)： We have built models of heliospheric magnetic field (HMF) corresponding to Parker-type and Fisk-type HMF including resultant current sheets. We have developed a fully 3D simulation code based on a coupled stochastic differential equations which allows us to investigate charge dependence of the solar modulation of galactic cosmic rays. The 22-year periodicity of the intensity of protons was reproduced nicely, however, we failed in reproducing quantitatively the time variation of the anti-proton to proton ratios. The energy dependence of positron to electron ratios observed by BESS and PAMELA experiment during different polarity of HMF is reproduced well by our model with Fisk-type HMF.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 物理学 ・ 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード： 宇宙線、太陽変調、反陽子、確率微分方程式

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙粒子線観測技術の発展

20 世紀初頭に発見された高エネルギー宇宙粒子線の起源について、早くから超新星爆発との関連が示唆されてきた。近年では超新

星残骸からのシンクロトロン X 線、TeV ガンマ線が発見され、また衝撃波統計加速機構の研究の新しい展開と相まって、宇宙物理学の大きな謎、宇宙線の起源をめぐる研究が急速に進んでいる。また最近十数年にわたる、超伝導磁石を用いた直接観測実験により、従来の実験とは比較にならない高い精度で、宇宙粒子線のエネルギースペクトルとその時間変化が得られてきている。特に宇宙反粒子（反陽子）の観測が革命的に発展してきた。

(2) 宇宙線太陽変調

太陽圏内に進入したエネルギー数十 GeV 程度以下の銀河宇宙線は、太陽風や惑星間空間磁場による強度変動、すなわち太陽変調現象を生じる。太陽変調現象は、銀河宇宙線そのものや太陽圏環境に関する情報を我々に与えてくれる一方で、宇宙線エネルギースペクトルに隠れた貴重な物理情報の抽出を困難にする。それゆえ宇宙粒子および反陽子の起源解明をはじめとする様々な研究分野で太陽変調現象の詳細解明が求められている。しかしながら、これまで数々行われてきた太陽変調現象の数値実験は、未だ観測結果を十分に説明することができていない。

(3) 確率微分方程式を用いた数値計算手法

太陽圏に進入してくる銀河宇宙線の伝播過程は、Parker 移流拡散方程式と呼ばれる Fokker Planck 型 (FPE) の偏微分方程式で記述される。従来の太陽変調の研究は、Crank-Nicolson 法等による Parker 方程式の数値解法によって進められてきた。これに対し本研究者等は、数学者伊藤の定理により、この FPE が、それに等価な連立確率微分方程式 (Stochastic Differential Equation = SDE) に置き換えられることに着目し、SDE を用いて宇宙線伝播過程の数値解を求める新手法を提案した (Yamada et al., 1998, Yamada et al., 1999, Zhang, 1999)。

2. 研究の目的

本研究は、太陽圏内における宇宙線伝播過程の計算に確率微分方程式を用いた強力なシミュレーション技法を開発展開し、宇宙粒子の精密直接観測解析結果 (BESS 実験) との詳細な検討を実施することで、宇宙粒子および反粒子の起源研究に資することを目的とする。

本研究目的の遂行に向けた研究目標としては、以下の (1) カレントシートモデルの構築、(2) 確率微分方程式を用いたフル 3 次元太陽変調コードの開発、(3) BESS による宇宙粒子観測とデータ解析、が挙げられる。

(1) カレントシートモデルの構築

太陽圏に進入した銀河宇宙線は、太陽風による外側への移流、それに従った断熱減速、惑星間空間磁場 (Heliospheric Magnetic Field = HMF) によるドリフトや拡散を起因としてその強度が変動する。その様子は太陽の黒点数の変動、すなわち太陽活動と逆相関の関係をもち、さらには 11 年ごとに反転する HMF の極性の影響も受けながら 22 年周期で変動する。

この 22 年周期変動は、HMF の幾何学的構造の影響を受けて宇宙線の軌跡が 22 年周期で変化することを起因としている。その中でも太陽圏赤道面周辺に存在する磁気中性面 (カレントシートとも呼ぶ) の影響は極めて大きく、その構造や変動の様子を詳細に再現したカレントシートモデルの構築は太陽変調コードの開発に必要不可欠である。そこで本研究ではまず、現実的なカレントシートモデルを構築する。

(2) 確率微分方程式を用いたフル 3 次元太陽変調コードの開発

SDE を用いた数値解法は極めてフレキシブルであり、時間変化する複雑な HMF 構造も比較的容易に取り込むことができる。そこで本研究では、SDE による太陽変調現象の数値計算を時間依存性も取り入れたフル 3 次元で行えるシミュレーションコードを開発する。

他方、SDE を用いた数値解法は、個々の宇宙線粒子の軌跡や運動量変化の履歴など、従来の手法では得られない重要な物理情報を提供する。これらの物理量は観測可能ではないが、例えば宇宙線陽子と反陽子の具体的物理量変化の履歴などは SDE 法によってのみ初めて明らかにされるものであり、観測される宇宙線反陽子の起源の探索に極めて重要な情報を与える。フル 3 次元太陽変調コードの開発と同時にこれらの物理情報も詳細に調べることで、太陽変調の理論的解明へも新知見を与える。

(3) BESS による宇宙粒子観測とデータ解析

BESS による極薄肉超伝導磁石を用いた宇宙線検出器気球実験では、0.2~500 GeV の宇宙線陽子、反陽子、ヘリウム等の時間変動も含めた絶対強度の精密測定が行われており、1992 年から 2002 年までのデータ解析がほぼ終了している。その後も BESS-Polar 実験による精密実験は継続されており、シミュレーション実験との比較検討を目指しデータ解析を進める。

3. 研究の方法

具体的研究方法としては、以下の 3 段階で行った。

(1) カレントシートモデルの構築

カレントシートの tilt angle は Wilcox 太陽観測所で過去 50 年間に渡り観測されており、これを太陽圏環境モデルに組み込むことで、過去 50 年間の観測結果に基づいて周期変動するカレントシートモデルを構築することができる。

- ① Wilcox 太陽観測所におけるカレントシートの tilt angle に関する観測結果を Parker-type HMF に組み込むことで、波打ちながら太陽圏境界へと広がるカレントシートモデルを構築した。
- ② 上記モデルを想定した太陽変調コードを開発し、過去 50 年間に渡る太陽変調の 22 年周期変動を数値計算した。
- ③ BESS による宇宙線陽子および反陽子の観測結果と本数値計算結果を比較し、本数値計算モデルを検証する。

(2) 確率微分方程式を用いたフル 3 次元太陽変調コードの開発

これまで数々行われてきた太陽変調現象の数値実験が未だ観測結果を十分に説明することができていない要因のひとつに、太陽圏極領域環境の設定の甘さが示唆されており、具体的には太陽風速度の緯度依存性や太陽光球面における磁力線の差動回転を起因とする HMF の乱れ (Fisk-type HMF) が考えられる。

- ① 太陽風速度の緯度依存性や Fisk-type HMF を近似表現した被修正 Parker-type HMF モデルを構築し、太陽変調コードに組み込むことで太陽変調への影響を検証した。
- ② Fisk-type HMF モデルを構築し、太陽変調コードに組み込むことで太陽変調への影響を検証した。

(3) BESS による宇宙粒子観測結果との比較

太陽変調現象には太陽圏環境、星間空間での宇宙線エネルギースペクトル (Local Interstellar Spectrum = LIS)、宇宙線拡散係数が強く影響し、信頼性のある太陽変調モデルを構築するためにはこれら全ての方面からの考察が必要となる。このうち LIS や拡散係数を求めるためには、観測との比較を繰り返すことによって観測を矛盾なく再現できる数値をイテレーションする必要がある。

- ① BESS, AMS の観測データと本研究の数値計算結果を比較検討することで、観測を矛盾なく再現できる LIS や拡散係数を求めた。
- ② BESS, PAMELA の観測データと本研究の数値計算結果を比較検討することで、宇宙線粒子、反粒子の起源を探究した。

4. 研究成果

(1) カレントシートモデルの構築

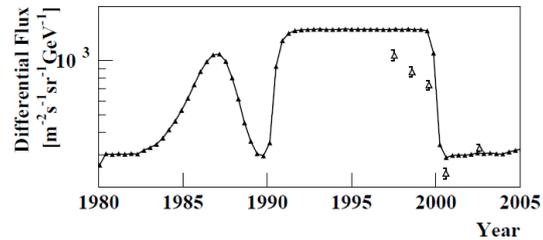


図 1 : 銀河宇宙線陽子強度の 22 年周期変動

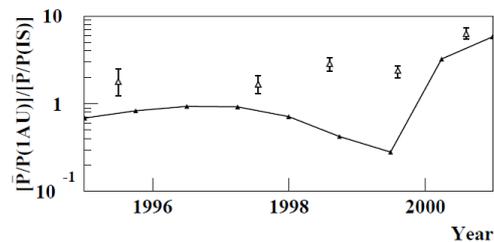


図 2 : 銀河宇宙線陽子・反陽子の強度比

Parker-type HMF のもと、過去 50 年間の観測結果に基づいて周期変動するカレントシートを想定し、銀河宇宙線陽子の 22 年周期変動を数値計算した結果を図 1 に示す。観測地点は地球 (太陽から 1 AU、赤道面)、銀河宇宙線のエネルギーは 1 GeV である。また白抜き三角は BESS による銀河宇宙線陽子強度の観測結果である。1980 年から 2005 年にわたる銀河宇宙線陽子の強度値は鋭いピーク値を持つ 11 年と平坦なピーク値を持つ 11 年を繰り返しており、本数値計算結果は太陽変調現象の 22 年周期変動を定性的に再現できた。また太陽活動減退期と太陽活動増進期で強度変動は対照的にならず、太陽活動減退期の方が緩やかに強度変動していることが分かる。この特徴は中性子モニターで観測される 22 年周期変動にも確認されている。つまりこの特徴は、カレントシートの周期変動の特徴が、太陽変調現象に直接影響した結果形成されるのだと解釈できる。

一方で本数値計算結果は、絶対値を含めた宇宙線強度変動の再現には失敗した。図 2 に、図 1 の場合と同じ条件で 1995 年から 2005 年にわたる銀河宇宙線陽子と反陽子の強度比を数値計算した結果を示すが、数値計算結果は白抜き三角で示した BESS による観測結果を再現できなかった。観測結果の再現に失敗した要因としては LIS や拡散係数の不定性、および太陽圏極領域環境の設定の甘さがある。特に HMF の極性 A と宇宙線の電荷 q の積 qA の符号 (単に極性と呼ぶ) が正とな

る時期 ($qA>0$: 図1に示した銀河宇宙線陽子の場合だと1990年~2000年の期間)での数値計算結果が観測結果と著しく一致しなかった要因については、太陽圏極領域環境が強く影響しているものと考えられ、具体的には太陽風速度の緯度依存性や太陽光球面における磁力線の差動回転を起因とするHMFの乱れ (Fisk-type HMF) があげられる。

(2) 確率微分方程式を用いたフル3次元太陽変調コードの開発

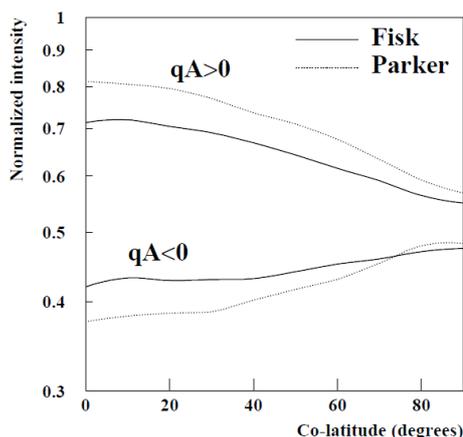


図3 : Fisk-type HMF における宇宙線強度の緯度依存性

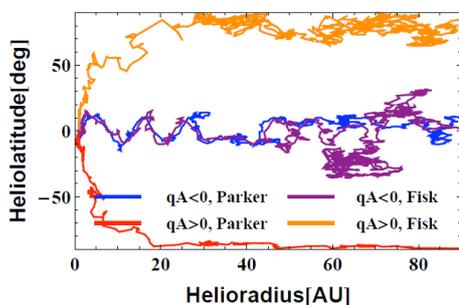


図4 : Fisk-type HMF における宇宙線陽子のサンプルパス

被修正 Parker-type HMF を考慮した3次元太陽変調コードでは、銀河宇宙線陽子強度の緯度依存性に関して単純な Parker-type HMF の場合との差を特に調査した。その結果、太陽風速度が変動する緯度領域では単純な Parker-type HMF を考慮した場合の数値計算結果とは大きく異なる結果を得た。これに関して宇宙線粒子挙動等を詳細に調べた結果、太陽風速度変動の影響でHMF強度が変動する領域では銀河宇宙線の滞在時間が増減し、それに伴って銀河宇宙線のエネルギー損失量も変動した結果、宇宙線強度変動が発生することが分かった。

他方、Fisk-type HMF を考慮した3次元太陽変調コードによる数値計算でも、銀河宇宙線強度の緯度依存性に関して単純な Parker-type HMF を考慮した場合の数値計算結果とは大きく異なる結果を得た。図3に、Fisk-type HMF における宇宙線強度の緯度依存性を数値計算した結果を示す。これは太陽圏緯度に関する宇宙線陽子の強度変動を示した図で、宇宙線観測地点と太陽との距離は1 AU、銀河宇宙線のエネルギーは1 GeVである。点線は Parker-type HMF、実線は Fisk-type HMF の場合の宇宙線強度であり、局所星間空間における強度値を1として絶対値を規格化した。極性 $qA>0$ のとき、Fisk-type HMF を考慮した場合の緯度勾配は Parker-type HMF を考慮した場合よりも太陽圏局領域で小さい値を示し、逆に極性 $qA<0$ の場合には逆の傾向を示している。これらの傾向は、銀河宇宙線が差動回転による磁場擾乱の影響を受け軌跡を乱し、余計にエネルギー損失することで説明できるが、本数値計算で確認した宇宙線陽子のサンプルパス (図4) はまさにその傾向を示す軌跡を描いた。そしてこれら Fisk-type HMF を考慮した場合の数値計算結果は、太陽圏観測衛星 Ulysses の南極-北極間探索により測定された銀河宇宙線強度の低緯度勾配値や CIRs (Co-rotating Interaction Regions) で加速されたと考えられる宇宙線粒子の太陽圏局領域での検出を定性的に説明できるものであった。

(3) BESS による宇宙粒子観測結果との比較

Fisk-type HMF を考慮した太陽変調コードに関し、太陽活動極小期の数値計算結果を BESS、AMS による陽子、反陽子、電子、陽電子の観測結果と比較することで、本開発コードの検証を行った。図5および図6に、宇宙線陽子および反陽子のエネルギースペクトルの数値計算結果を示す。図5において、点線は Parker-type HMF を考慮した場合の数値計算結果、実線は Fisk-type HMF を考慮した場合の数値計算結果を示し、白抜き三角は BESS による1997年の観測結果 ($A>0$) を示す。観測結果とほぼ一致している点線と実線は、極性 $qA>0$ を想定したときの数値計算結果であり、Parker-type HMF と Fisk-type HMF のどちらも観測結果を良く再現することができた。一方で極性 $qA<0$ を想定したときの数値計算結果 (他の点線と実線) は Parker-type HMF と Fisk-type HMF で異なる値を示した。両モデルの検証は $q<0$ となる反陽子に関する観測結果との比較で実現されるはずなのだが、大きなエラーバーのために両モデルとも観測結果と一致する結果となった。

図7は、宇宙線電子および陽電子比の数値計算結果を AMS による1998年 ($A>0$) の観測結果 (白丸および黒丸) と比較した結果であ

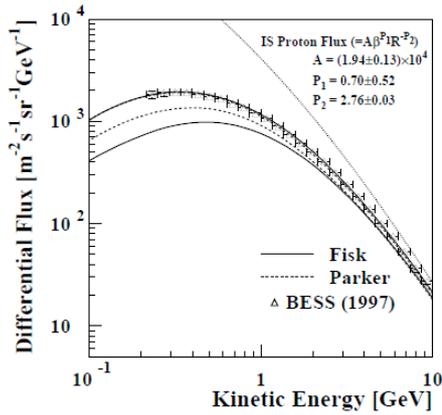


図5：Fisk-type HMFにおける宇宙線陽子のエネルギースペクトル

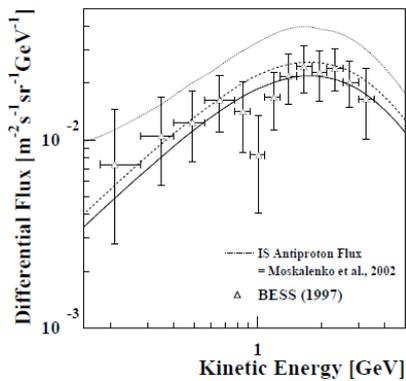


図6：Fisk-type HMFにおける宇宙線反陽子のエネルギースペクトル

る。点線はParker-type HMFを考慮した場合の数値計算結果、実線はFisk-type HMFを考慮した場合の数値計算結果を示す。白丸と黒丸で示したAMSの観測結果はどちらも1998年に直接測定されたデータを解析したものであるが、解析手法が異なり、白丸より黒丸の方が解析手法が新しい。本数値計算結果と観測結果の比較では、白丸で示した観測結果はParker-type HMFと良く一致したが、最新の解析手法を用いた黒丸の観測結果では大きなエラーバーのために両モデルとも観測結果と一致する結果となった。ただし図8に示したPAMELAによる2006年 ($A < 0$)の観測結果との比較では観測のエラーバーが小さく、実線で示したFisk-type HMFを考慮した場合の数値計算結果の方が観測結果と良く一致する結果を得た。

図7および図8に示した宇宙線電子および陽電子比の結果において、10GeV以上の観測結果は本数値計算結果とは全く一致していない。これは、一般的に考えられる超新星残骸起源の宇宙線電子と星間空間物質との相互作用の結果として生成される宇宙線電子・陽電子だけでは説明できない電子・陽電子の存在を示唆しており、宇宙粒子および反

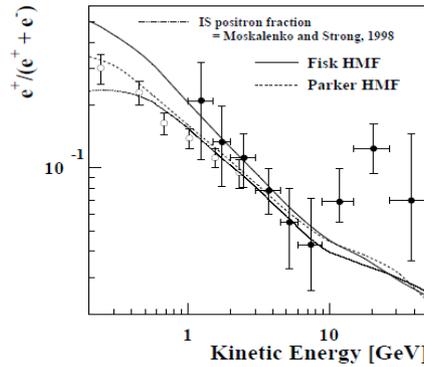


図7：宇宙線電子・陽電子比 ($A > 0$)

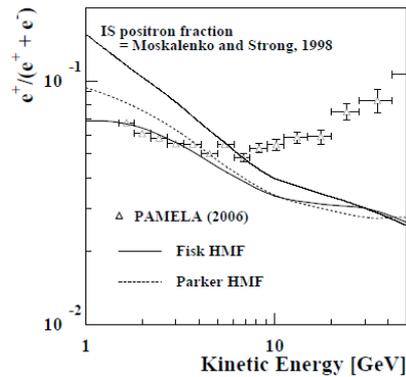


図8：宇宙線電子・陽電子比 ($A < 0$)

粒子の起源にせまる研究成果を得た。本研究成果はしかるべき科学論文で報告する予定であり、現在投稿論文を準備している。

今後の展望としては、太陽活動極小期以外の観測結果との比較によるLISおよび拡散係数の決定や太陽風終端衝撃波の導入、本数値計算結果とRUNJOB, ATICなどの高エネルギー宇宙線直接観測結果と合わせて行う宇宙線の超新星残骸での衝撃波統計加速モデルを検証があげられる。

(4) 銀河宇宙線の通過物質量分布の推定

上述した研究を進める中で、SDEを用いた数値解法を銀河中での宇宙線伝播過程に展開することで銀河宇宙線の年齢分布や宇宙線源の空間分布、通過物質量分布(PLD)の推定が行えることに気付き、これらの研究も同時進行で行った。第一段階として行った東方拡散モデルの計算では、銀河宇宙線のPLDおよび年齢分布が対数正規分布型になることや、比較的若い銀河宇宙線は、discrete source(とりわけ太陽系近傍で最近発生した超新星残骸)からの寄与が強いことが分かった。その後行ったエネルギー損失過程を組み込んだ数値計算では、太陽系近傍で最近発生した超新星残骸からの寄与が銀河宇宙線電子のPLDおよび年齢分布に強く影響することが分かった。本研究成果もしかるべき科学論

文で報告する予定であり、現在投稿論文を準備している。

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3件)

- ① 著者名 : H. Muraishi, S. Miyake, and S. Yanagita
論文標題 : A stochastic view of the propagation of galactic cosmic rays
雑誌 : Proceeding of the 31st International Cosmic Ray Conference, in press, 査読無
- ② 著者名 : 三宅晶子
論文標題 : 確率微分方程式を用いた宇宙線伝播過程の総合的研究
雑誌 : 茨城大学 博士学位論文、2009年、査読有
- ③ 著者名 : S. Miyake and S. Yanagita
論文標題 : The effect of a modified Parker field on the modulation of the galactic cosmic rays
雑誌 : Proceeding of the 30th International Cosmic Ray Conference, volume 1, pages 445-448, 2008, 査読無

[学会発表] (計6件)

- ① 発表者 : 三宅晶子、村石浩、柳田昭平
発表標題 : 銀河宇宙線陽子・電子の通過物質分布および年齢分布の推定
学会 : 日本物理学会第65回年次大会、岡山、2010年3月21日
- ② 発表者 : 村石浩、三宅晶子、柳田昭平
発表標題 : 確率微分方程式を用いた銀河宇宙線年齢分布の推定Ⅱ
学会 : 日本物理学会2009年秋季大会、兵庫、2009年9月13日
- ③ 発表者 : H. Muraishi, S. Miyake, and S. Yanagita
発表標題 : A stochastic view of the propagation of the galactic cosmic rays
学会 : 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz Poland, July 7-15, 2009
- ④ 発表者 : 三宅晶子、柳田昭平
発表標題 : 確率微分方程式を用いた銀河宇宙線年齢分布の推定
学会 : 日本物理学会2008年秋季大会、山形、2008年9月20日
- ⑤ 発表者 : 三宅晶子、柳田昭平
発表標題 : 太陽活動極小期における宇宙線反陽子エネルギースペクトル
学会 : 日本物理学会2008年秋季大会、山

形、2008年9月20日

- ⑥ 発表者 : 三宅晶子、柳田昭平
発表標題 : 太陽活動極小期における銀河宇宙線の太陽変調
学会 : 日本物理学会2007年秋季大会、札幌、2007年9月22日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳田 昭平 (Yanagita Shohei)
茨城大学・理学部・教授
研究者番号 : 40013429

(2) 研究分担者

山本 明 (Yamamoto Akira)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究所・共通基盤施設・教授
研究者番号 : 30113418

(3) 研究協力者

三宅 晶子 (Miyake Shoko)
茨城県立医療大学・保健医療学部・嘱託助手