

令和 6 年 6 月 23 日現在

機関番号：52101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03956

研究課題名（和文）非線形拡散過程を考慮した銀河宇宙線太陽変調モデルの構築とその汎用化

研究課題名（英文）Solar modulation model considering the nonlinear diffusion process and its generalization

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：非線形拡散過程を考慮した精密太陽変調モデルを構築し、BESS、PAMELA、AMS-02、CALETによる宇宙線陽子や電子の観測結果と比較することで、太陽圏内における磁気乱流の駆動メカニズムとGeV領域の局所星間空間エネルギースペクトルを推定した。またCALETによる低エネルギー陽子・電子の解析が進み、最新の観測結果を用いた理論検証が実現した。その他、宇宙線エネルギースペクトルの汎用化データ公開のためのデモサイトを制作した。本研究成果を論文として報告し次第、データ公開サイトにて公開する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、太陽変調モデルを用いて太陽圏内における磁気乱流の駆動メカニズムを逆に探る新しい手法を確立できた。またGeV領域のLISの検証は、近年発見されている様々な宇宙線核種の数十GeV領域におけるエネルギースペクトル冪指数の変化に関連する可能性もあり、今後の進展が期待される。その他宇宙線エネルギースペクトルの汎用化と汎用データの公開は、宇宙線を専門としない関連学術研究や実用科学に寄与できると期待される。

研究成果の概要（英文）：A precise solar modulation model that takes into account nonlinear diffusion processes was constructed, and by comparing it with fluxes of cosmic ray protons and electrons observed by BESS, PAMELA, AMS-02, and CALET, the driving mechanism of magnetic turbulence in the heliosphere and the local interstellar space energy spectrum in the GeV region were estimated. In addition, analysis of low-energy protons and electrons by CALET progressed, and theoretical consideration was achieved using the latest observation results. We also created a demo site to make general-purpose data on cosmic ray energy spectra available. As soon as the results of this research are reported as a paper, we will open these data by using the data public site.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：銀河宇宙線 太陽風 磁気乱流 シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 2000年代以降、低エネルギー銀河宇宙線の精密観測技術は目覚ましい進歩と遂げている。1990年代から続く BESS 気球実験に続き、PAMELA 衛星や国際宇宙ステーション (ISS) に搭載された AMS-02 が宇宙空間での高精度観測の成果をあげ、2015年からはカロリメータ型宇宙電子望遠鏡 CALET による高精度観測も ISS の「きぼう」日本実験棟で開始された。これらの豊富な宇宙線観測データは太陽圏内における宇宙線伝播モデル (太陽変調モデル) の精密化に有用である。

(2) 惑星間空間磁場の定常成分・乱流成分比とそれらの特徴的スケール比の発達過程 (動径方向依存性) は、磁気乱流の駆動メカニズムに依存する。Voyager 1、2 と Pioneer 11 による惑星間空間磁場の観測から、太陽圏内における磁気乱流の駆動メカニズムは WKB 近似には従わず、ストリーム相互作用モデルとピックアップイオンモデルの混合によることが示唆されている。太陽変調に非線形拡散過程を導入し、観測を再現する磁気乱流モデルを探ることで、磁気乱流の駆動メカニズムを特定できる。

(3) CALET による全電子 (電子 + 陽電子) の初期観測結果を用いて銀河宇宙線電子の局所星間空間エネルギースペクトル (LIS) を推定した結果、得られたスペクトル構造は宇宙線の銀河系内伝播から予想される従来のスペクトル構造では説明できず、数 GeV 領域に未知成分の付加を要するものであった。この特徴的構造は、太陽圏近傍の白色矮星における粒子加速で説明できる可能性がある。一方、申請段階の体調変調モデルには拡散係数に簡略化を施しており、それがこのような結果をもたらした可能性もある。局所星間空間近傍を起源とする宇宙線成分の是非を議論するためには、厳密な理論解に基づいた非線形拡散係数をモデルに導入する必要がある。

(4) 宇宙開発の発展とともに宇宙天気予報の重要性が高まる昨今、太陽変調精密モデルの構築は宇宙線による被ばくやシングル・イベント効果の予測等の宇宙利用リスク管理への応答に貢献する。加えてグランドミニマム期に代表される過去の極端な宇宙環境下における宇宙線太陽変調の再現をも可能にする。

2. 研究の目的

非線形拡散過程を考慮した精密太陽変調モデルを構築することで、太陽圏内における磁気乱流の駆動メカニズムと GeV 領域の局所星間空間エネルギースペクトル (太陽系近傍の白色矮星における粒子加速など) を明らかにする。また、過去数十年にわたるエネルギースペクトルの数値解を汎用データベースとして公開することで、素粒子・宇宙線物理学や宇宙プラズマ物理学、その他宇宙線強度データを必要とする関連学術分野における研究の基盤構築に資する。

3. 研究の方法

宇宙線伝播計算の数値解法としては、確率微分方程式 (SDE) を用いた解法を採用した。SDE を用いた数値解法は、Fokker-Planck 型の移流拡散方程式に等価な SDE を数値的解く手法であり、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る。個々の宇宙線粒子の軌跡やエネルギー損失履歴を時間に対して後ろ向きに計算し、求めた太陽圏境界での宇宙線分布関数と境界条件として設定した LIS をもとに、観測地点 (初期位置) でのエネルギースペクトルを算出した。非線形拡散過程を考慮した拡散係数としては、Shalchi による擬似非線形拡散モデルに基づく拡散係数を採用した。磁場情報として惑星間空間磁場の定常成分のみを含む標準的な拡散係数モデルに対し、本非線形拡散係数モデルは乱流磁場成分も含み、惑星間空間磁場の定常成分・乱流成分比とそれらの特徴的スケール比の発達過程 (動径方向依存性) をモデル設定できる。観測を再現するパラメータを反復計算により求めることで、磁気乱流の駆動メカニズムを推定した。また、構築した太陽変調モデルによる数値計算結果は、BESS、PAMELA、AMS-02、CALET による観測結果と比較・検証した。

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) 惑星間空間磁場のカレントシートのティルト角を用いた非一様太陽風速度の数値モデル
予備的研究の段階で、NASA (OMNI Web) の提供する地球近傍での太陽風速度と太陽黒点数の観測データをパラメータとする非一様太陽風数値モデルは構築できていた。しかし、黒点数は太陽活動毎に最大値が変化する特徴を持っているため、太陽活動周期が半周期経過し、その周期の最大値が明らかになるまでは太陽風数値モデルを立てられないという課題があった。

そこで新たな試みとして、黒点数の代わりに Wilcox 太陽観測所が提供する惑星間空間磁場のカレントシートのティルト角を用いた非一様太陽風の数値モデル化を行った。これまでの観測から、カレントシートのティルト角はどの太陽活動期でも最大 75 度程度になることがわかっ

ている。そのため、各周期におけるカレントシートのティルト角の最大値はほぼ一定と仮定しても、推定される太陽風速度の緯度依存性に与える影響は小さいと考えた。図1に、本研究で構築した非一様太陽風速度数値モデルを示す。地球近傍での太陽風速度とカレントシートのティルト角の観測データをパラメータとし、黒点数を用いた数値モデルと同程度に再現性の良いモデルが完成した。

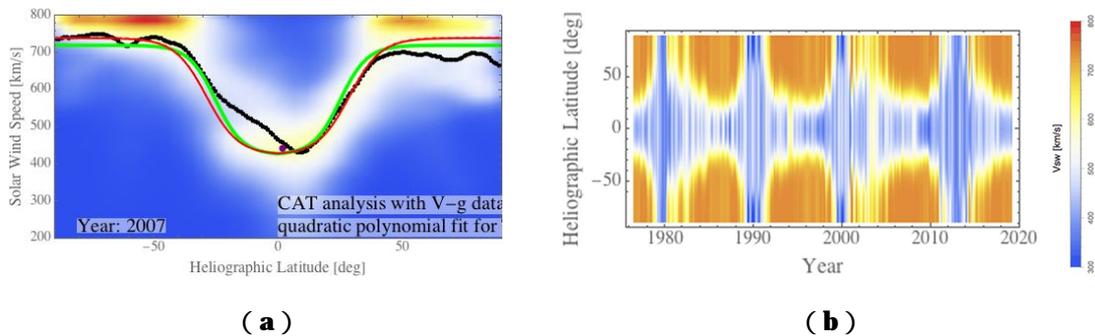


図1 : (a) IPS 観測により得られた 2007 年の太陽風速度の緯度依存性の観測結果 (1 年間の速度分布を示す背景マップと緯度毎の平均値を示す黒線) と非一様太陽風速度数値モデルでの再現結果 (赤線)。 (b) 非一様太陽風速度数値モデルで再現した 1975 年から 2020 年にわたる太陽風速度の緯度依存性の推移。

(2) 惑星間空間磁場の定常成分・乱流成分比の変動の導入と乱流磁場の駆動メカニズム、LIS の検証

惑星間空間磁場の定常成分・乱流成分比は変動することが観測的に分かっている。予備的研究の段階ではこれを一定と仮定した非線形拡散係数を仮定していたが、この変動も観測に基づき設定していきけるモデルに改良した。

図2に、惑星間空間磁場の定常成分・乱流成分比の変動を考慮した太陽変調モデルで計算した宇宙線陽子および電子のエネルギースペクトルを示す。いずれのスペクトルも BESS、PAMELA、AMS-02 のいずれかによる観測が行われた時期のものである。宇宙線の電荷 q と惑星間空間磁場の極性 A の組み合わせが正極性 ($qA > 0$) の結果 (図2 (a)) が観測よりも高いのは、本計算では太陽風速度の緯度依存性を考慮していないため、陽子が伝播する太陽圏極領域の太陽風が赤道面領域よりも高速で、強く断熱減速を受ける効果が含まれていないためと考えられる。惑星間空間磁場が負極性 ($A < 0$) の結果 (図2 (b, c)) においては、カレントシートのティルト角が急激に変化する時期の再現性があまり良くないものの、太陽活動周期全体の変動幅を再現する最適パラメータを反復計算した結果、乱流磁場成分の動径方向依存性はストリーム相互作用モデルとピックアップイオンモデルの混合による駆動メカニズムを示唆し、推定されたミキシングの程度も Voyager 1、2 と Pioneer 11 による惑星間空間磁場の観測結果に矛盾しないことが分かった。また推定された LIS は、非線形拡散過程を考慮した本太陽変調モデルにおいても局所星間空間近傍の白色矮星による加速等から示唆される GeV 領域の付加成分を考慮した方がより観測に近い結果となることがわかった。

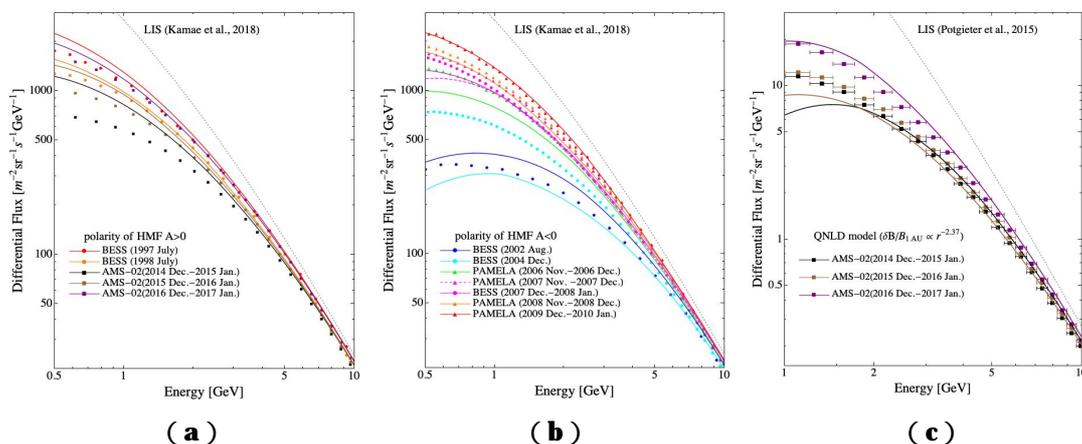


図2 : (a) $qA > 0$ における陽子のエネルギースペクトル。 (b) $qA < 0$ における陽子のエネルギースペクトル。 (c) $qA < 0$ における電子のエネルギースペクトル。 マーカーは BESS あるいは PAMELA、AMS-02 による観測結果を示し、実線はそれに対応する本太陽変調モデルでの数値計算結果を示す。陽子の LIS には、局所星間空間近傍の白色矮星での加速による宇宙線成分を考慮したモデルを設定した。また電子の LIS にも、銀河系内伝播から示唆される通常の冪型スペクトルと GeV 領域の付加成分を含むモデルを設定した。

(3) CALETによる最新観測結果との比較・検証

兼ねてより本太陽変調モデルの検証に用いたと考えていたCALETによる低エネルギー陽子・電子観測のデータ解析が進み、2015年10月から2021年5月までの陽子・電子計数率を用いて太陽変調の太陽変調の荷電依存性を議論することに成功した。ドリフト効果を考慮した数値計算モデルでCALETによる低エネルギー陽子・電子計数率の変動を再現でき、太陽活動極小期周辺に現れたヒステリシス構造も再現できた。これはドリフト効果が太陽変調現象に大きな役割を果たしていることを示す定量的な証拠であり、本研究成果(図3)はPhysical Review Lettersに掲載された(引用文献)。なお、本成果は標準的な拡散係数モデルを考慮した結果ではあるが、非線形拡散係数モデルでの計算では、2016年頃に確認される観測結果との比較の大きなズレ(図3(a)参照)が小さくなり、より微細な変動を再現することを確認した。

図3(a)に示す通り、宇宙線強度は2019年12月の太陽活動上の極小期から約半年遅れの2020年6月頃に極大を迎えた。太陽活動増進期にあたるその後の解析と太陽変調モデルによる検証を実施した結果、本体用変調モデルは太陽活動減退期における宇宙線強度変動を概ね再現できるが、太陽活動増進期は観測よりも早いペースで強度低下し、ヒステリシス構造の再現性が低くなることが明らかになった。この結果はこれまで予想されていた太陽活動減退期・増進期で異なるカレントシート構造の違いのみでは太陽変調22年周期変動のヒステリシス構造を説明できないことを意味している。一方でSolar Orbiterにより内部太陽圏の乱流磁場観測が進み、乱流磁場成分の動径方向依存性に異方性があることが明らかになってきた。この効果も含めて現行の太陽変調モデルにはまだ改良の余地があり、今後も引き続きモデルの改良を継続し、太陽活動全期間の観測が再現可能な太陽変調モデルの構築を進める。

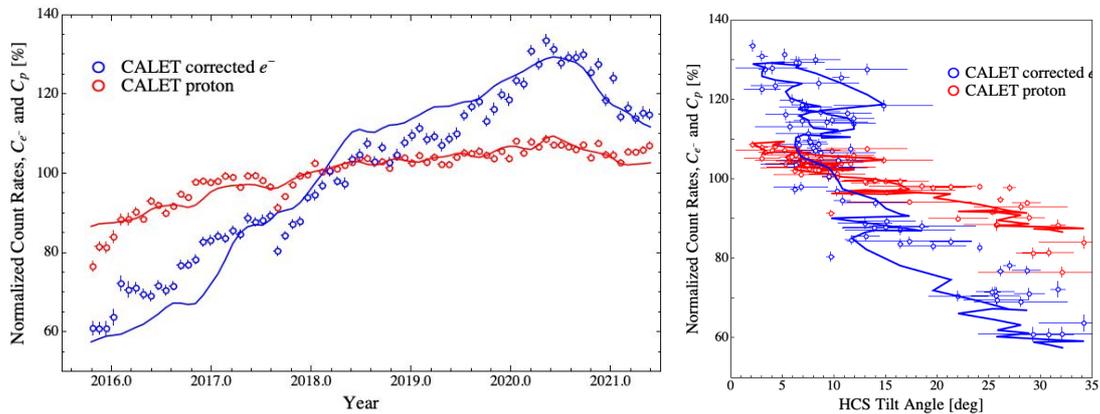


図3 : (a) CALETの観測した規格化された陽子・電子計数率の長期変動(2015年10月~2021年5月)とドリフトモデルでの計算結果との比較、(b) CALETの観測した規格化された陽子・電子計数率とカレントシートのティルト角との相関関係とドリフトモデルでの計算結果との比較。マーカーは観測結果、実線は計算結果を示す。また赤は陽子、青は電子を示す。

(4) 宇宙線エネルギースペクトルの汎用関数パラメータ公開のためのデモサイトの制作

その他、宇宙線エネルギースペクトルの汎用関数パラメータを公開するためのデモサイトの制作が完了した(図4)。汎用関数パラメータリストは、本研究成果を論文として報告し次第、データ公開サイトに公開する。

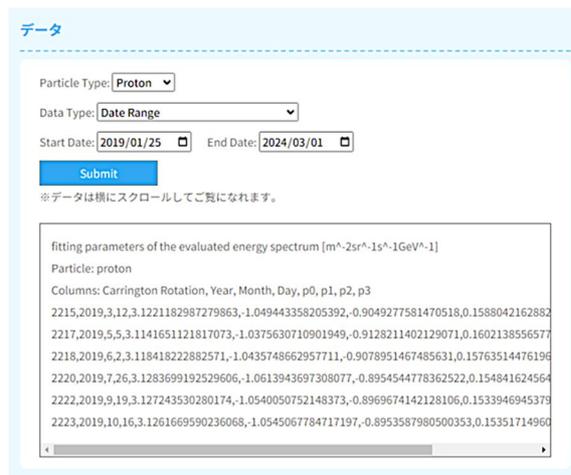


図4 : 研究成果公開用デモサイトの一例(汎用パラメータリストの出力画面)

<引用文献>

Adriani et al. (CALET Collaboration), "Charge-Sign Dependent Cosmic-Ray Modulation Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station", Physical Review Letters, 130, 211001 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Adriani O., Akaike Y., ..., Miyake S., ..., Munakata K. et al. (CALET Collaboration)	4. 巻 130
2. 論文標題 Charge-Sign Dependent Cosmic-Ray Modulation Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 211001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physrevlett.130.211001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Shoko Miyake, Kazuoki Munakata and Yosui Akaike for the CALET collaboration	4. 巻 -
2. 論文標題 Cosmic-Ray Modulation during Solar Cycles 24-25 Transition Observed with CALET on the International Space Station	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of 38th International Cosmic Ray Conference - PoS(ICRC 2023)	6. 最初と最後の頁 1253
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.444.1253	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shoko Miyake, on behalf of the CALET Collaboration	4. 巻 ICRC2021
2. 論文標題 Solar Modulation During the Descending Phase of Solar Cycle 24 Observed with CALET on the International Space Station	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 1270
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Shoko Miyake, Kazuoki Munakata, Yosui Akaike, for the CALET Collaboration
2. 発表標題 Cosmic-Ray Modulation during Solar Cycles 24-25 Transition Observed with CALET on the International Space Station
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三宅晶子, 宗像一起, 赤池陽水, 鳥居祥二, 他 CALETチーム
2. 発表標題 太陽圏内における宇宙線伝播を探る - 最新観測結果とその解釈 -
3. 学会等名 「宇宙線で繋ぐ文明・地球環境・太陽系・銀河 2023」研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三宅晶子, 宗像一起, 片岡龍峰, 加藤千尋, 鳥居祥二, 中平 聡志, 寺澤敏夫, 赤池陽水, 小林兼好, 他 CALETチーム
2. 発表標題 CALETの観測結果を用いた第24-25期太陽活動 遷移期間における太陽変調の理論的検証
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Miyake, K. Munakata, Y. Akaike, for the CALET Collaboration
2. 発表標題 Modeling the solar modulation of galactic cosmic rays based on the latest observation results by CALET on the International Space Station
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三宅晶子, 宗像一起, 赤池陽水, 鳥居祥二, 小林兼好, 片岡龍峰, 中平 聡志, 浅岡 陽一, 寺澤敏夫, 他 CALETチーム
2. 発表標題 CALETの7年間の観測に基づく太陽変調の荷電依存性の観測結果
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三宅晶子
2. 発表標題 銀河宇宙線太陽変調における惑星間空間磁場乱流成分の11年周期変動の影響
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shoko Miyake
2. 発表標題 Modeling the Solar Modulation Based on the Nonlinear Cosmic-Ray Diffusion Process
3. 学会等名 44th COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shoko Miyake, on behalf of the CALET Collaboration
2. 発表標題 Solar Modulation During the Descending Phase of Solar Cycle 24 Observed with CALET on the International Space Station
3. 学会等名 37th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅晶子
2. 発表標題 非線形拡散過程を考慮した銀河宇宙線陽子の太陽変調の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅晶子、宗像一起、加藤千尋、片岡龍峰、中平聡志、浅岡陽一、鳥居祥二、寺澤敏夫、赤池陽水、小林兼好、他 CALETチーム
2. 発表標題 CALETによる第24/25期太陽活動極小期の低エネルギー電子・陽子観測
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三宅晶子、片岡龍峰、宗像一起、高柚季乃、鳥居祥二、寺澤敏夫、他 CALETチーム
2. 発表標題 CALETによる低エネルギー電子・陽子の観測結果を用いた太陽変調モデルの構築
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	NASA/GSFC	Washington University	University of Maryland	他2機関
イタリア	INFN	University of Pisa	University of Padova	他3機関