

成果に関連して出版、もしくは印刷、投稿中の論文リスト

(1) このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

- 日本物理学会秋季大会（大阪 2005 年 9 月）
「銀河宇宙線太陽変調の 22 年周期と荷電依存性」三宅晶子、柳田昭平
- 日本天文学会秋季年会（札幌 2005 年 10 月）
「カレントシートと銀河宇宙線の太陽変調」三宅晶子、柳田昭平
- 太陽圏シンポジウム・STE 研究集会（名古屋 2006 年 1 月）
「銀河宇宙線の太陽変調問題－数値実験によるアプローチ」三宅晶子、柳田昭平、吉田龍生

成果の概要

1 Introduction

太陽圏内に進入したエネルギー数十 GeV 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。この現象は、BESS 実験による 1 次起源反陽子の探索に代表されるように、宇宙線自体の研究だけでなく近接関連分野の研究にも大きな影響を与えることがあり、太陽変調現象に関する詳細な理論的解明が強く要請されている。そしてこれまで太陽変調に関する多くの数値実験が行われてきたのだが、未だ観測結果を十分説明することができていない。そこで本プロジェクトでは、確率微分方程式を用いた新手法で銀河宇宙線の太陽変調問題を数値実験し、太陽変調現象の詳細を調べた。

2 Numerical Model

宇宙線の伝播問題を扱う際には、移流拡散方程式を用いたシミュレーション手法が通常用いられる。しかし本プロジェクトでは、この方程式をそれに等価な確率微分方程式、SDE (Stochastic Differential Equation) で記述し、数値解を求める手法で研究を進めた。SDE は 1 階常微分方程式なので扱いが容易であり、標準的計算手法よりも容易かつ柔軟に太陽変調問題に対する解を導出できる。また SDE は、個々の粒子の運動を時間に対して後ろ向きに解くことができるため、銀河宇宙線がたどった軌跡や到達時間、エネルギー損失量など、標準的計算手法では得られなかった新しい物理情報を提供する。本プロジェクトで詳細に調べたこれらの物理情報は、銀河宇宙線の強度変動の特徴をよく説明するものであった。

太陽圏モデルには、等速・等方的な太陽風 (400km/sec)、パーカースパイラル惑星間空間磁場を設定した。パーカースパイラル惑星間空間磁場は、カレントシートと呼ばれる磁気中性面を境にしてその方向が反転する。カレントシートは太陽の自転運動のために太陽圏を波打ちながら伝播し、また太陽活動に合わせてその形状を変化させている。その実際の構造は複雑であり、太陽変調に関する数値計算ではしばしば、太陽活動の変動が瞬時に太陽圏全体に伝わる単純化された構造が想定される。本プロジェクトでは、上記の単純化されたカレントシートモデルと、太陽活動の変動が太陽風に乗って徐々に伝播するモデルの 2 種類を想定し、そのモデルの違いが計算された太陽変調の 22 年周期変動にどう影響するのかを調べた。この他本プロジェクトでは、SDE がもたらした新しい物理情報を調べて銀河宇宙線の根本的挙動を探り、また銀河宇宙線陽子・反陽子のエネルギースペクトルについても数値計算した。

3 Results and Discussion

今回行った結果の一例を示す。図 1 に、ある太陽活動時期 (tilt angle $\sim 30^\circ$) に地球近傍で 0.1GeV、1GeV、5GeV で観測された銀河宇宙線陽子の到達時間分布を示す。左右の図は惑星間空間磁場の極性が異っており、左図は極性 qA (銀河宇宙線粒子の電荷 q と惑星間空間磁場の極性 A の関係) が正、右図は負の状態である。これらの図を比べると到達時間分布には極性 qA

依存性とエネルギー依存性があり、 $qA > 0$ の場合には大体 10 日前後の到達時間でエネルギーが低くなるほどに日数が長くなるのに対し、 $qA < 0$ になると圧倒的に到達時間が長くなり、そのエネルギー依存性も顕著に現れている。

これと同様に、銀河宇宙線のエネルギー損失量分布 (図 2) についても極性 qA 依存性が見受けられ、またエネルギー依存性に関しては $qA > 0$ の場合にはほとんど見られないが $qA < 0$ の場合には、エネルギーが低くなるほどに損失量が大きくなることが分かった。以上のように、SDE がもたらした新しい物理情報からは、太陽圏内に進入した銀河宇宙線は、極性 qA 依存性とエネルギー依存性が複雑に混じり合った状態で運動するとの結論を得た。

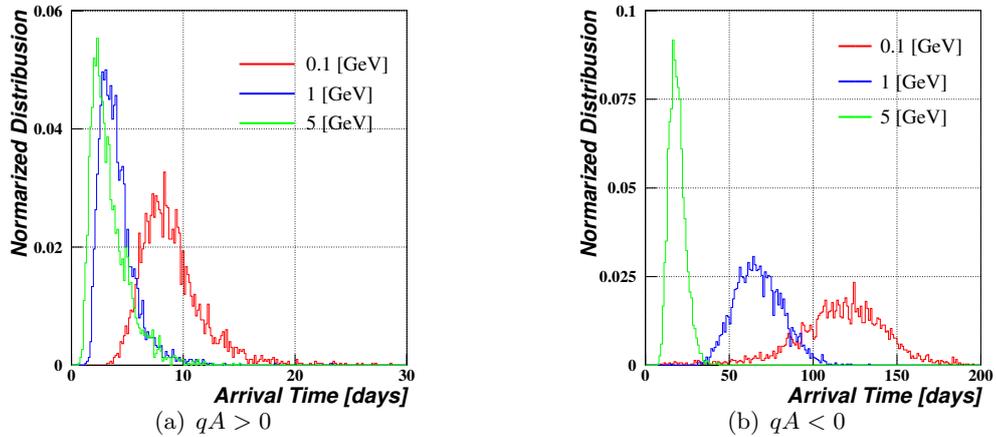


図 1: 到達時間分布

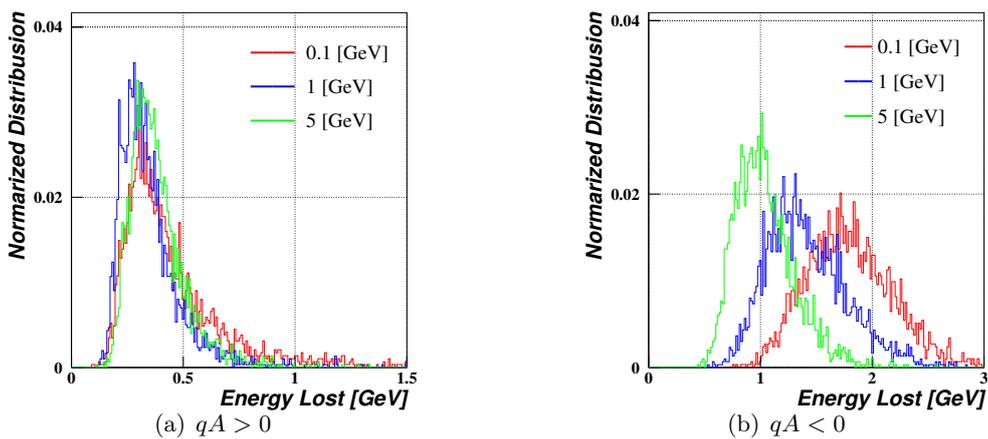


図 2: エネルギー損失量分布

図 3 に、太陽活動の変動が瞬時に太陽圏全体に伝わる単純化されたモデル (左図) と、太陽風に乗って徐々に伝播するモデル (右図) を想定した 22 年周期変動の計算結果を示す。これらの結果は $qA > 0$ でフラットなピーク値、 $qA < 0$ でシャープなピーク値を持ち、中性子モニ

ターの計数率の変動を定性的に再現した。カレントシートのモデルによる 22 年周期変動の違いについては、太陽活動に対する位相の遅れに関して明白な差が見受けられた。したがって 22 年周期変動を定量的に調べる際には、少なくとも太陽活動伝播の遅延を考慮する必要があることが分かった。

この他、銀河宇宙線のエネルギースペクトルに関する計算結果は BESS 実験による観測結果と比較・検討した(図 4)。その結果、本研究の計算は極性 $qA < 0$ では観測をよく再現するものの、 $qA > 0$ になると失敗してしまうこと、その原因はおそらく太陽圏極領域環境モデルに問題があるとの結論を得た。実際の太陽圏極領域には、横向き磁場のゆらぎを起因とする複雑な磁場構造が存在することが示唆されている。今後の研究では、Fisk field に代表される上記の磁場構造を想定して、 $qA > 0$ での数値計算も信頼性あるものにしていく予定である。

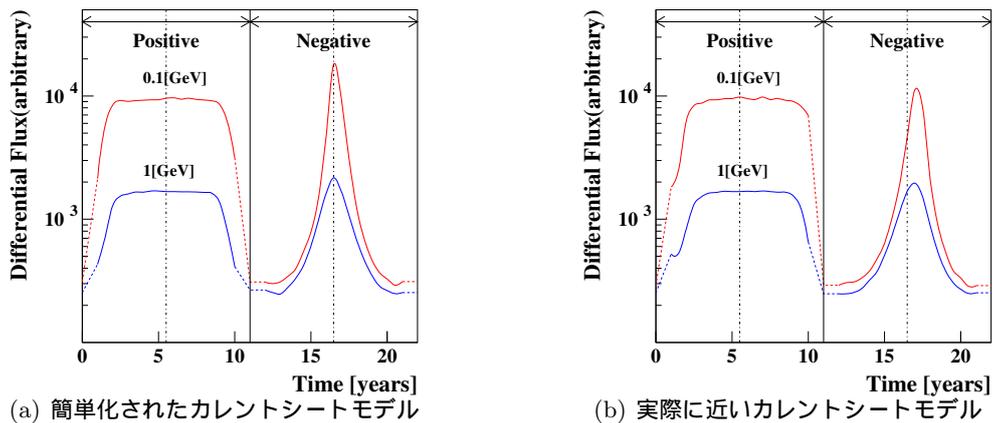


図 3: 22 年周期変動

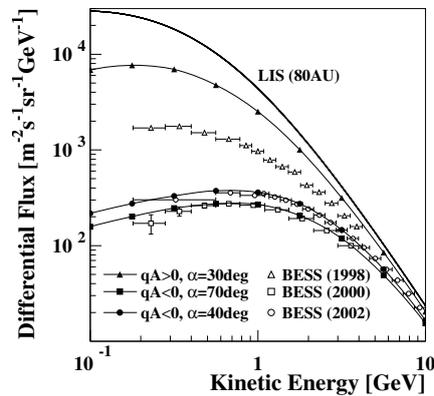


図 4: 銀河宇宙線陽子のエネルギースペクトル