

太陽中性子観測による粒子加速機構の解明

土屋 暁 (名古屋大学大学院 太陽地球環境研究所)

Abstract

私たちのグループは宇宙線の加速機構の一つであるイオン加速のメカニズムを解明するため、地上での中性子観測を行っている。観測には旧来使われていた中性子モニタではなく太陽中性子望遠鏡を用いる。2013 年から最新の太陽中性子望遠鏡 SciCRT (SciBar Cosmic Ray Telescope) をメキシコ・シエラネグラ山 (4,600m) の山頂付近に設置して観測を開始した。SciCRT はこれまでの太陽中性子望遠鏡と比較して非常に大きな体積を持ち、中性子に対する感度がとても高い。さらに、15,000 チャンネルの高い精度で宇宙線の飛跡を捉えることができる。しかし、SciCRT による観測はシンチレータ全てを用いた観測に至っていない。ゆえに体積を活かしたエネルギー測定や到来方向の決定精度がまだ不十分である。また、解析の方法も確立されていない。私の研究はこの SciCRT のハード・ソフト両面からの性能の向上しつつ太陽中性子イベントが起きてもいいように備えることである。また、太陽中性子イベントはそろそろ起きてよく、イベントを検出してイオン加速機構の解明に努めたい。

1 Introduction

粒子加速は電荷によって電子加速とイオン加速に分けられる。私たちはこの内のイオン加速のメカニズムを明らかにするべく、惑星間空間の磁場で散乱されるイオンそのものではなく磁場の影響を受けない中性子を観測している。太陽大気中で p - p / p - α / α - p / α - α などの反応によって生成された中性子はイオンの運動方向やエネルギーの情報を保持しているためこの研究の観測対象に適している。ここで、現在考えられている宇宙線源や太陽フレアにおけるイオン加速の候補となっている 2 つの加速機構について述べる。

統計加速

速度 v の磁気雲に高速粒子が入射した場合を考える。この場合、粒子のエネルギー変化量 $\Delta E/E$ は、正面衝突で $2v/c$ 増加し、追突では $2v/c$ 減少する。しかし、衝突の方が起こる確率が大きいので、統計的には加速され、衝突 1 回あたりのエネルギーの変化量は $\frac{4}{3}(\frac{v}{c})^2$ である。このような粒子の加速機構を統計加速という。

ショック加速

ショック加速の基本的な概念は統計加速と一緒である。ただし、この場合は加速領域にショック波面が生

成されている場合を考える。すると、粒子の静止系からのショック波面にあたるプラズマ流を見たとき、粒子の流れが上流にいても下流にいても接近してくるように見え、粒子は常にエネルギーを得ることになる。よってショック加速では統計加速よりも効率的に加速されることになる。粒子のエネルギーの変化量 $\Delta E/E$ は、ショックの上流速度と下流速度の差を v とすると $\frac{4}{3}\frac{v}{c}$ となる。

このようにして加速されたイオンは太陽大気との相互作用で中性子を生成する。この中性子が地上で観測されることになる。中性子は地表に到達するまでに地球の大気中で相互作用を起こして減衰を受ける。この相互作用による減衰の影響をできる限り少なくするために我々は、より標高の高い場所に検出器を設置する必要がある。また、24 時間常に太陽中性子イベントに備えるためには低緯度で様々な経度の場所に望遠鏡を設置する必要がある。これまで、これらの標高・経度・緯度の条件に適した場所 7 カ所に太陽中性子望遠鏡を設置して観測を行ってきた。それによって過去に 10 例の太陽中性子が観測されているが、イオン加速機構を解明するにはさらに観測数を増やす必要がある。特に、これまではエネルギースペクトルを求めるために生成時のタイムブ

ロファイル仮定してきたが、今後はその仮定なしにスペクトルを決めるのが最大の課題である。タイムプロファイルの仮定をした解析ではスペクトルのべきは-4程度で、ショックのような効率の良い加速は期待できない。

表 1: 現在設置されている太陽中性子望遠鏡

地点	経度	緯度	高度 [m] (air mass[(g/cm ²)])
Cornergrat			
スイス	7.8° E	46.0° N	3,135(690)
Aragrats			
アルメニア	40.5° E	44.2° N	3,200(670)
Yangbajing			
中国・チベット	90.5° E	30.0° N	4,300(600)
Mt.Norikura			
日本	137.5° E	36.1° N	2,770(730)
Mauna Kea			
アメリカ	203.7° E	19.8° N	4,200(610)
Sierra Negra			
メキシコ	262.7° E	19.0n° N	4,580(575)
Mt.Chacaltaya			
ボリビア	292.0° E	16.2° S	5,250(540)

2 Methods/Instruments and Observations

私たちが SciCRT に使用する検出器は、元々 K2K(KEK-to-Kamiokande) 長基線ニュートリノ振動実験の KEK 側の前置検出器として使用されていたものを転用したものである。そのため、粒子の弁別能力や感度は十分に高い。この SciBar14,848 本を井桁状に組み、メキシコ・シエラネグラ山頂に設置している。中性子が飛来すると中性子がシンチレータ内の原子核と反応して反跳粒子として陽子が生成される。この陽子の電離損失によるシンチレーション光が、ファイバーを通してマルチアノード光電子増倍に入ることによって検出される。過去の太陽中性子望遠鏡が、反跳陽子のエネルギー損失で4段階のエネルギーごとに計数率をモニターしていたのに対し、粒子軌跡を捉えてイベントごとにエネルギーを決定できる。それゆえ、エネルギー測定精度の面でとても優れているのが特徴である。また、シンチレータを井桁状に組んでいることで到来方向も同時に知ることができる。

ここで問題になってくるのが、宇宙線の主成分であ

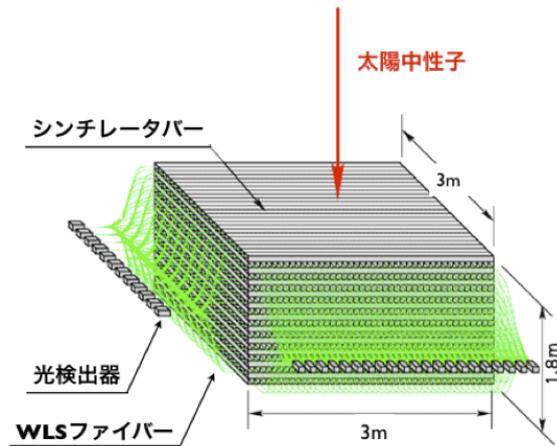


図 1: 新型太陽中性子望遠鏡 SciCRT(元絵は京大グループ)

る荷電粒子 (主には μ 粒子) による信号である。荷電粒子による信号を中性子の信号と区別するためには、エネルギー損失の違いを利用する。陽子が電離損失するときは、他の粒子に比べて重いので電離損失が大きくなる。一方、 μ 粒子であれば電離損失は $2.0MeV/(g \cdot cm^2)$ でほぼ一定となる。このような粒子のことを MIP(Minimum Ionizing Particle) という。また、高山ではバックグラウンドとしての γ 線も多く、 γ 線との分離はより重要な課題となる。



図 2: 実際に検出されたイメージ。中性子が入射して生成された陽子の飛跡が見えていると思われるイベント。



図 3: 実際に検出されたイメージ。 γ 線が入射して電子対生成を起こしていると思われるイベント。

SciCRT は図 1 のような構造になっている。われわれは井桁状の X 方向と Y 方向の一つのセットをスーパーブロック (SB) と呼ばれるまとまりとして考え扱っている。この新型太陽中性子望遠鏡は前述の通り、元は別の実験で使用していたものを転用したという経緯から、本実験への装置の最適化が必要である。それゆえ、2013 年に SciBar がシエラネグラ山頂に設置されてから現在に至るまでに最適化の作業を行ってはいるものの、稼働するに至っているのは全部で 8 個ある SB の内 3 つだけである。また、データの読み取りの方法が宇宙線実験に最適化されていないので、新しい読み出しの方法を導入する努力を行っている。



図 4: シエラネグラ山頂に設置されている SciCRT。写真は 2013 年 5 月の様子。

3 Prospect

今後の私の研究課題は、VME ではなく SiTCP と呼ばれる KEK で開発されたプロトコルを用いた読み出し回路の改良による読み出し速度の向上と、それによって得られたデータの解析手法の提案である。最終的にこれらの目標を達成するために、現在は SiTCP に関する勉強と現在用いられているデータ解析のプログラムの理解を深めているところである。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。本研究を進めるにあたっての SciCRT のメンバーの方々からのご指導に感謝いたします。

Reference

- 永井雄也 2011, 名古屋大学大学院修士論文
- 佐々井義矩 2013, 名古屋大学大学院修士論文