

## 2001年4月15日イースターイベントの新解釈

JAXA/名古屋大学 村木 綏

2001年4月15日、第23太陽活動期で7番目にランクされる巨大な太陽フレアが太陽表面のS20W85の位置に発生した。最近このイベントを詳細に解析した結果、太陽中性子と13GeV以上の高エネルギー太陽宇宙線が存在することを突き止めた。この2つの新観測事実が何を意味するのか、ようこう衛星の観測結果と併せて報告する。そして2008年10月シャトルで打ち上げられるJAXAの宇宙環境衛星SEDAへの期待を述べる。

まず衛星搭載機器で観測した本フレアの特徴は次のとおりである。

- (1) 太陽表面西側のリム近くで発生したリムフレアなので、磁気ループの発展を横側から詳細に観測できた。
- (2) ようこう衛星が、衛星の日陰および南大西洋上空粒子異常帯を避けて、フレアの始まりからX14までの成長過程を観測できた。
- (3) フレアの強度は一気にX14に増加するのではなく、図1に示すように22分間の間に3段階にわけて成長した。これは大部分のインパルスフレアがいきなりXクラスまで成長するのとは異なっている。
- (4) フレアがX1から成長を始めた13:45UTころからX10に到達した13:50UTにかけて、図2に示すようにラインガンマ線の放出があった。従ってこのときイオンの加速があったと考えられる。
- (5) ラインガンマ線の放出は約6分間継続した。その間3回のピークがあり、このピークに対応して硬X線のピークも3回見られる。
- (6) ようこう衛星の軟X線の画像を解析すると、13:28UT C4クラスのフレアが発生した時、2個の磁気ループが根元の2箇所で交差している。このループ・ループ衝突により磁気ループ内部のプラズマが加熱されたと考えられる。
- (7) 続いて13:40UT M1クラスのフレアが観測された時、先のC4のフレアを起こした磁気ループのひとつの先端が、別の磁気ループの頂上に衝突した。
- (8) 続いて13:48UT X10クラスのフレアへと成長した。その時さらにMクラスのフレアを起こした磁気ループが、Mクラスのフレアが発生した磁気ループよりさらに根元の（磁場の強い）磁気ループの頂上に衝突した。これによりXクラスのフレアが作られ、硬X線が根元と頂上の3箇所で見られた。
- (9) フレアは典型的な増田フレアの形をしているが、磁気ループ頂上部は惑星間空間へは開放されておらず、前のMフレアの磁気ループとつながっており、典型的な増田フレアではない。

一方地上観測装置で得られた結果は次のとおりである。

- (1) チャカルタヤ観測所 (5,250m)に設置されている中性子モニターには 13:51UT から 14:51 UT までの 30 分間に図 3 に示すように観測値の増加が見られる。この増加の有意性はバックグラウンドに対して  $8.2\sigma$  である。従って偶然とは考えられない。
- (2) 信号強度の時間発展を 3 分値で見ると、14:06UT-14:12UT に別のピークが見られる。
- (3) そこで 13:51UT-14:01UT の始めのピークは中性子が、2 つ目のピークは陽子が作ったと解釈した。そしてそれぞれに対してベキ関数で fit した。
- (4) その結果、中性子のスペクトルは微分形でベキ  $\gamma = -4.0 \pm 0.1$ , 陽子のスペクトルは図 4 に示すように 650MeV から 13GeV の範囲で  $\gamma = -2.75 \pm 0.15$  で書けることがわかった。
- (5) この事実は太陽表面でもショック加速が存在する可能性を強く示唆する。
- (6) 太陽中性子は、ガンマ線が作り出された時間帯に同じ発生分布で作られたとすると実験データを説明できる。
- (7) 欧州各地および北極圏、南極大陸に設置されている中性子モニターはこのフレアに伴う GLE(Ground Level Enhancement)を観測した。
- (8) チャカルタヤの観測装置は GLE を観測していない。これはチャカルタヤの cut-off rigidity が 12.6GV と高いため、エネルギーの低い GLE 成分の陽子は地球に入射できなかったからであろう。チャカルタヤのシンチレータカウンターの最もエネルギーの低い成分と (>40MeV)と中性子モニターは日変化を観測している。日変化の最小値は地方時で 11 時 (15UT)頃であった。
- (9) チャカルタヤのシンチレータカウンターの最もエネルギーの高い成分は (>160MeV) 13:45UT 頃  $2\sigma$  の信号の増加をとらえた。これは非常にエネルギーの高い太陽中性子によって作られた信号である可能性が高い。
- (10) スイスとアルメニアに設置されていたプラスチックシンチレータ中性子計は 13:56UT - 13:59UT に  $3\sigma$  程度の信号の増加を観測した。 $3\sigma$  の信号は、確率的に非常に稀な現象とは言えないが、2 箇所ですべて独立に同じ事象を観測した事実は、偶然とは考えにくい。これは 15GeV 以上の太陽からの陽子が大気中で衝突して、ミューオンを作り出しそれが減衰せず山の上の装置で受信された可能性が高い。

これらの解析事実をまとめると次のことが言えるだろう。

- (1) プラズマ粒子の高エネルギーへの加速は、まずループ・ループ衝突で加熱された高速風がより磁場の強い磁気ループ頂上への吹附けることで始まると考えられる。高速風から、運動量を得た別の磁気ループ内のプラズマ粒子がショック加速で高いエネルギーまで加速されるという描像で今回のフレアで作られた粒子スペクトルは説明できる。
- (2) ビーバーらの主張するCME内での粒子加速過程は、高エネルギー粒子の加速に作用していないのではないか。

それでは第24太陽活動期の観測に期待することをここで列挙しよう。

- (1) まず“ようこう”衛星に代わる“ひので”衛星がSXTの写真を提供してくれるだろう。
- (2) ガンマ線のデータはRHESSIやINTEGRALが提供してくれるだろう。ロシアのコロナ衛星が飛んでおれば、より豊富なガンマ線のデータを提供してくれるだろう。
- (3) とりわけ重要なことはJAXA/NASDAが準備してきた中性子カウンターを載せたSEDAが、2008年10月いよいよISSの暴露部に取り付けられることである。SEDAには30MeV-100MeVのエネルギーを有した太陽からの中性子を検出する装置が含まれている。中性子のエネルギーを用いた宇宙での中性子検出は世界初演である。
- (4) まずこの装置を使用すれば、地上では大気中での強い吸収で測定困難な60MeV以下の太陽中性子のエネルギースペクトルが求められる。
- (5) さらにこの装置を使うと、今回のイベントの様に(図3b参照)中性子と陽子の信号が区別しにくい場合でも、荷電粒子か中性粒子が入射したのか一発で区別できる。すなわち中性子と陽子の時間区分が明確になりイオン加速の時間により正確な制限を付けられるだろう。
- (6) また1982年6月3日のイベントのように長く時間的にテールを引く分布が中性子によるものなのか陽子によるものなのかが区別できるだろう。そしてイオンの加速が瞬時的加速過程のみで説明できるのか、gradualな加速過程も存在するのか明確にできるだろう。
- (6) 一方地上観測装置はアンチ機能が完璧でない(90%程度)ので、もう一層カウンターを増強する必要がある。そうすれば中性子の信号にミューオンの混入を避けることができる。そして100-500MeV領域の太陽中性子を検出するS/N機能を上げることができる。
- (7) 一方100MeV-100GeVのエネルギーを有した太陽粒子が、地球大気中でどれだけ減衰し2次粒子である中性子やミュー粒子を作り出すのか、Geant4を用いた正確な計算が望まれる。正確な補正をしたGLEのスペクトル導出が今後粒子の加速を解明する決め手となるだろう。

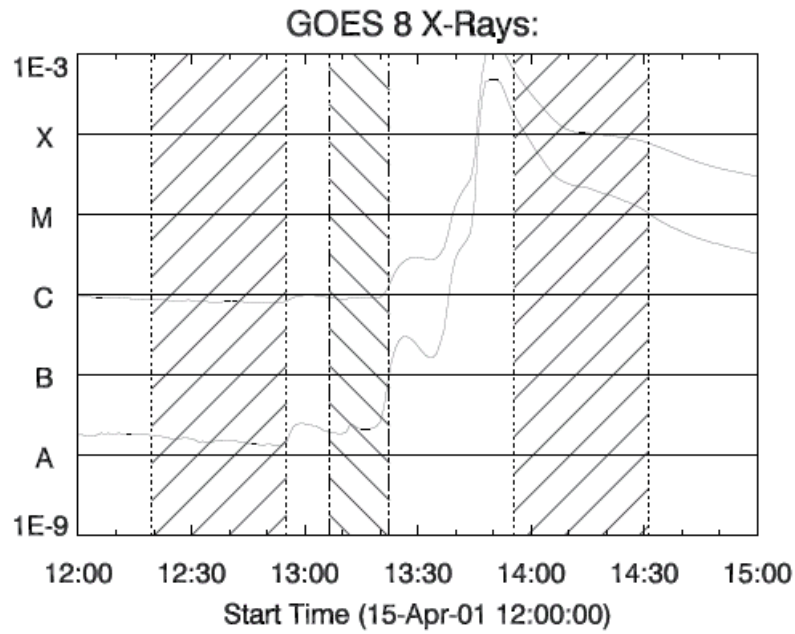


図 1. GOES 衛星によるフレアの開発図。図中の斜線はようこう衛星の日陰、および南大西洋上空粒子異常領域に対応。フレアは C4, M1, X10 と 3 段階に分けて増大していった。

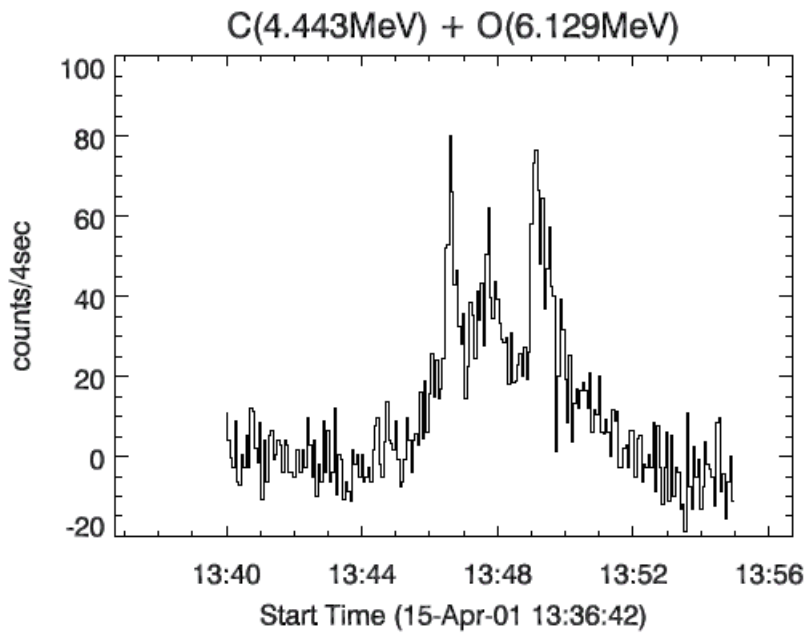


図 2. ようこう衛星のガンマ線検出器が捉えた C と O のラインガンマ線の時間発展。13:45UT から 13:51UT にかけて強い放射が 3 回に分けてあった。

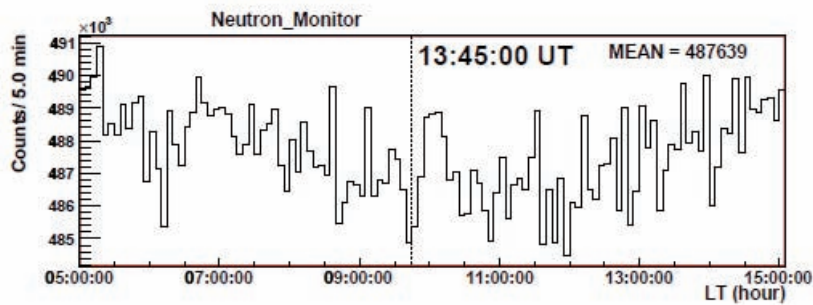


図 3 a. チャカルタヤ観測所に設置されている中性子モニターで観測されたフレアに伴うカウント値の変動 (5 分値)。13:45UT 以降に統計有意性  $8.2\sigma$  のピークが見られる。

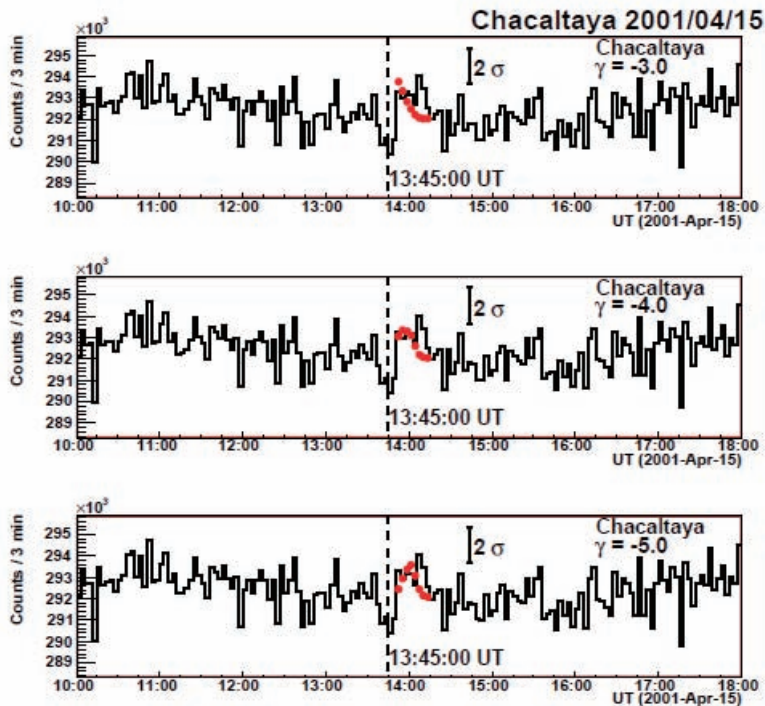


図 3 b. チャカルタヤ観測所に設置されている中性子モニターで観測されたフレアに伴うカウント値の変動の 3 分値。14:06-14:12UT に plot から飛び出したピークが見られる。このピークが 13GeV 以上のエネルギーを有する陽子である。またプロットはべきの値を  $-3.0$  から  $-5.0$  に変動したときどの値が最も良くデータを再現できるかを示す。微分値で  $\gamma = -4.0$  の時、最も良く観測データを再現できる。

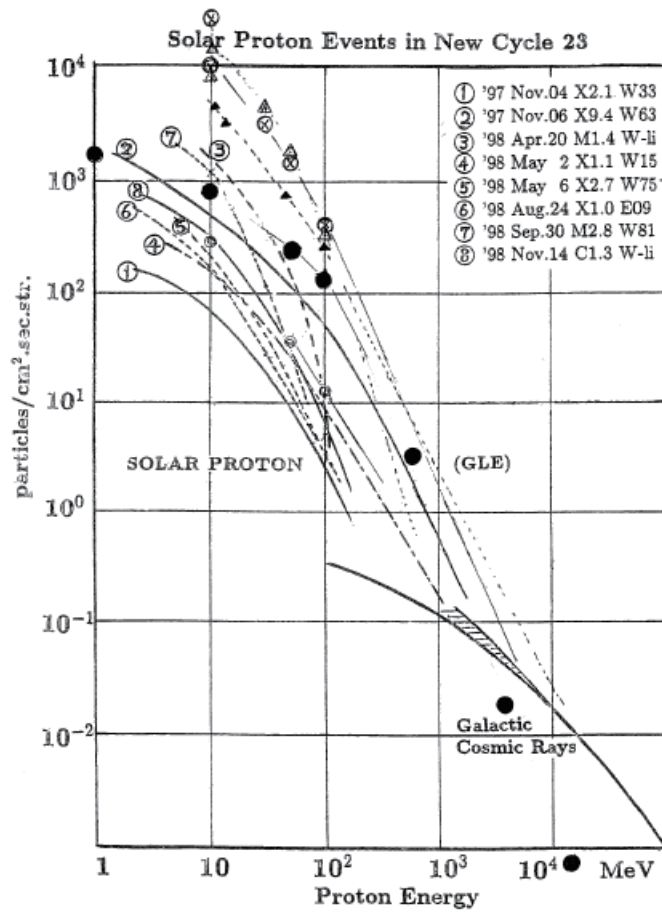


図4. 第23太陽活動期に観測された太陽宇宙線の積分スペクトル。黒丸(●)が今回のイースターイベントの値。右下の実線は銀河宇宙線の強度分布を示す。今回のチャカルタヤの観測点は今までGLE現象を解析したデータ点の中でも最も高い観測点に属し、すでに銀河宇宙線の強度の十分の一の低さである。