

# 太陽中性子観測による太陽フレア現象における 粒子加速機構の研究

渡 邊 恭 子

〈名古屋大学太陽地球環境研究所宇宙線研究室 〒464-8601 愛知県名古屋市中種区不老町〉

e-mail: kwatana@stelab.nagoya-u.ac.jp

近年、太陽フレア現象において電波・H $\alpha$ 線・X線・ガンマ線等による多波長観測が進み、太陽フレアがどのように発生・発達するのか、その仕組みが明らかになりつつある。しかし、太陽フレア現象中で粒子が高エネルギーへ加速される機構、特にイオンの加速機構については、観測手段も少なく、よく理解されていないのが現状である。イオン加速の情報を得るためには太陽中性子を用いることが有効であるが、太陽中性子イベントはまれにしか観測されないイベントであり、地上に設置されている観測装置では、第22太陽活動期まででわずか5例しか観測例がない。しかし、第23太陽活動期には名古屋大学太陽中性子観測国際ネットワークも形成され、これにより新たにいくつかの太陽中性子イベントが観測された。そこで、これらの太陽中性子データと電磁波による太陽フレア観測データを用いて包括的な解析を行った。その結果、太陽フレア現象で見られるイオンの加速機構について新しい発見が得られた。

## 1. はじめに

宇宙線が発見されて以来、その加速機構、すなわち、いつ・どこで・どのように宇宙線が加速されているのかについて研究することは、宇宙線研究の主要な研究テーマの一つになっている。宇宙線の大部分は陽子などの荷電粒子である。しかし、荷電粒子は電荷を持っているため、加速領域付近の磁場や惑星間空間磁場などの影響を受け、進路を曲げられる。たとえそれが地球に到達しても、その加速場所や加速時間に関する正確な情報はほとんど失われている。一方、電磁波や中性子、ニュートリノといった中性粒子は、磁場の影響を受けないので、加速場所やエネルギーなどの加速時の情報をもったまま地球に到達する。したがって、加速機構の解明にはこれらを用いることが有効である。しかし、ニュートリノは観測

が困難であり、電磁波は電子起源のものと区別がつかない。これより、イオンの加速機構を解明するためには中性子が有用であるが、中性子は静止系で生存時間が900秒と短いため、加速情報という物理的に意味のある情報をもって地球に到達する中性子は太陽起源のもののみとなる。

典型的な恒星である太陽は時々爆発的なエネルギー解放現象を引き起こす。この現象はフレアと呼ばれており、その放出エネルギーは数分から数十分の間に  $10^{29}$ – $10^{33}$  エルグ ( $10^{22}$ – $10^{26}$  ジュール) 程度になる。最も大きな太陽フレアでは  $\sim 10^{34}$  エルグ ( $\sim 10^{27}$  ジュール) ものエネルギー放出が観測されている<sup>1)</sup>。これは広島原爆10兆発にも相当する巨大なエネルギーである。太陽フレアによって発生したエネルギーは、電磁波放射やプラズマ加熱、粒子加速などに費される。粒子加速のなかでも電子の加速については、制動放射による

硬 X 線やジャイロシンクロトロン放射による電波を観測することで、よく理解できるようになってきた。一方、イオンの加速機構については、まだ十分な理解が得られていない。イオンが加速された様子は、加速されたイオンそのものではなく、加速イオンと太陽大気の相互作用によって生成された中性子や核ガンマ線を観測することによって知ることができる。しかし、電子の加速が強いフレア (electron rich flare と呼ばれている) やリムフレア (太陽のリム (limb: 縁) で発生したフレアのこと) では、核ガンマ線が電子の制動放射によるガンマ線の連続成分に埋もれてしまい、核ガンマ線を観測できないことがある。したがって、高エネルギーまで加速されたイオンの情報だけを得ることができるのは、太陽中性子のみとなる。

太陽中性子は加速されたイオンが太陽大気と相互作用することによって生成され、地球近傍まで到達する。低エネルギー (100 MeV 以下) の中性子は地球大気による減衰を受けるため、宇宙で観測する必要があるが、高エネルギー (100 MeV 以上) の中性子は地上で観測することができる。宇宙と地上で同時観測を行えば、広いエネルギー範囲の太陽中性子、(もとをたどれば太陽表面で加速されたイオン) のエネルギースペクトルが得られる。また、太陽中性子のエネルギー測定から、飛行時間法を用いて中性子の生成時刻の情報を得ることにより、イオン加速が瞬間的に起こっているのか、連続的であるのかも知ることができる。太陽中性子を観測することの重要性は、1951 年に Biermann らによって指摘されていたが<sup>2)</sup>、実際に観測されたのはそれから 30 年ほど後の 1980 年のことだった。これは太陽中性子の流量が少なく、また検出器の感度が不十分で、観測するのが困難であったためである。

太陽中性子が観測されるフレアが高い頻度で起こるのは、太陽活動が活発なとき、つまり太陽活動極大期である。太陽には 11 年の活動周期があ

ることが知られており、その太陽活動の変化は黒点の数によって見積もることができる。黒点の数が増えるにつれて太陽フレアの発生率も増加し、太陽活動極大期には、GOES 衛星の軟 X 線測定装置で観測した X 線強度のクラスのうち最大のクラスである、X クラスの太陽フレアが数多く発生する。

太陽中性子は 1980 年 6 月 21 日のフレアで SMM (Solar Maximum Mission) 衛星に搭載されている GRS (Gamma Ray Spectrometer) という検出器によって初めて観測された<sup>3)</sup>。そして 1982 年 6 月 3 日のフレアでは、同じ SMM 衛星とスイスのユングフラウヨッホに設置されている中性子モニターという装置によって、太陽中性子は宇宙と地上で同時に観測された<sup>4)</sup>。この後、いくつかの大きな太陽フレアに伴って発生した太陽中性子が観測されたが、地上で観測できたのは第 22 太陽活動期までに、たったの 5 例であった。

5 例では太陽中性子観測から太陽フレア現象におけるイオン加速機構を理解するにはまだまだ不十分である。そこで名古屋大学太陽地球環境研究所宇宙線研究室の太陽中性子観測グループでは、太陽中性子観測のための装置開発を行い、それを用いて第 23 太陽活動期に発生した太陽フレアに伴った太陽中性子イベントの探索を行った。

## 2. 太陽中性子観測装置

まず、現在太陽中性子観測に用いている装置について紹介する。

従来太陽中性子は、中性子モニター (図 1) という装置によって測定されてきた。中性子モニターには IGY 型と NM64 型の 2 種類あり、NM64 型のほうが検出効率が良い。中性子モニターは鉛とポリエチレン (NM64 型の場合。IGY 型の場合はパラフィン)、BF<sub>3</sub> 比例計数管から構成されており、入ってきた高エネルギーの核子を数える装置である。中性子モニターはすでに世界 50 カ所以上に設置されており、国際ネットワークを形成し

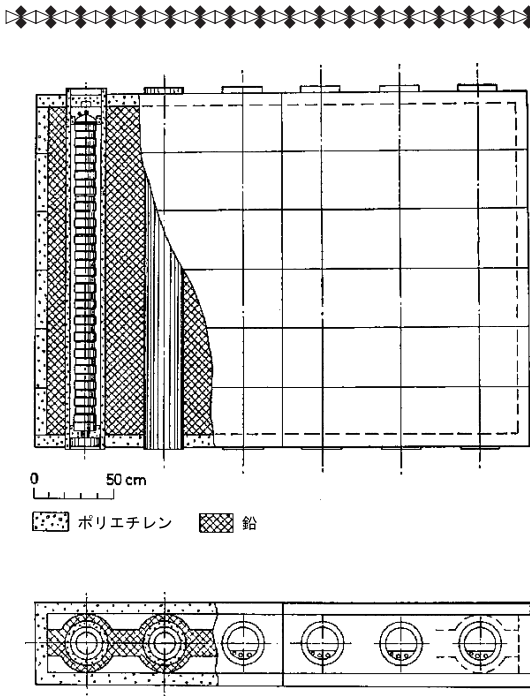


図1 NM64型中性子モニター。

ている。しかし太陽中性子を地上で観測する場合、中性子は地上に到達するまでに地球大気との相互作用によって減衰されるので、十分な量の中性を観測するためには、装置を標高の高いところに設置しなければならない。このような高山に設置されている中性子モニターは10台ほどしか

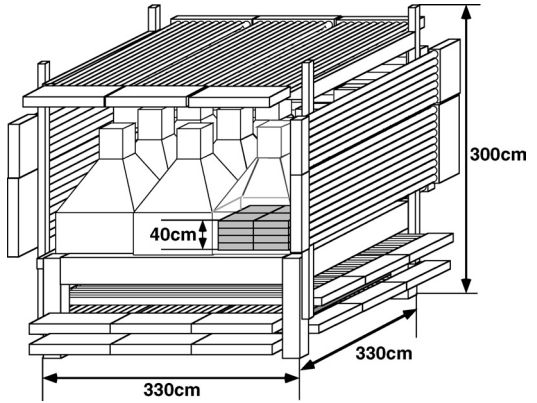


図2 チベット太陽中性子望遠鏡。

ない。また、中性子モニターはもともと宇宙線の強度変動を観測するために設置された装置であるので、太陽中性子を観測するために必要ないくつかの機能が不足している。まず、核子の個数を数えているだけであるので、中性子のエネルギーを直接測定することができない。また、中性子の到来方向を知ること、そして中性子と荷電粒子を区別することもできない。しかし、太陽中性子の発生時刻を仮定することによって、飛行時間法を用いてエネルギーを推定することはできる。すなわち、エネルギーの高い中性子ほど発生場所から地球に到達する時間が短く、エネルギーの低い中性

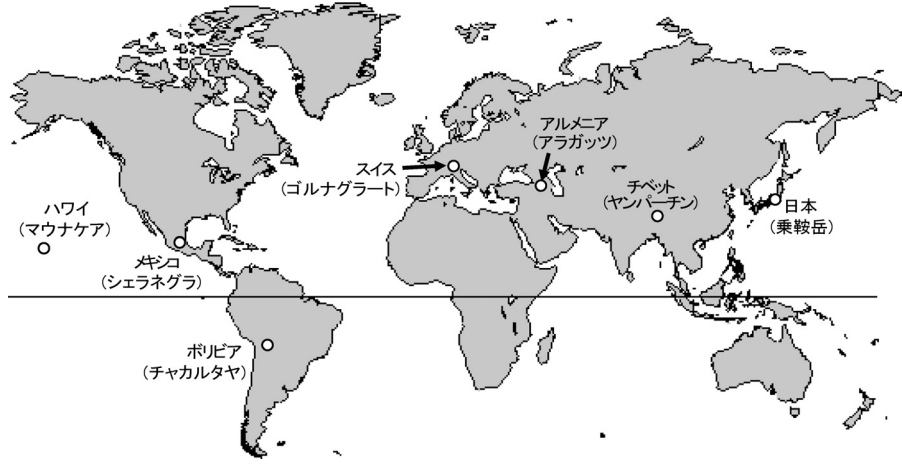


図3 太陽中性子望遠鏡国際ネットワーク。

子はそれより遅れてやってくるということを用いた手法であるが、これらの中性子がすべて同時に発生したという仮定をおかないとエネルギースペクトルの推定はできない。

そこで名古屋大学太陽地球環境研究所では、太陽中性子を検出するのに最適な、太陽中性子望遠鏡(図2)という装置を開発した。この装置は比例計数管とシンチレーションカウンターで構成されており、荷電粒子と中性粒子の区別ができ、中性子のエネルギーと到来方向も測定することができる。太陽中性子望遠鏡は現在、スイス(ゴルナグラート)・アルメニア(アラガッツ)・チベット(ヤンパーチン)・乗鞍岳・ハワイ(マウナケア)・メキシコ(シェラネグラ)・ボリビア(チャカルタヤ)の世界7カ所の高山に設置され、国際ネットワークを形成している(図3)。

これらのネットワークを用いて第23太陽活動期の太陽中性子の観測が行われた。

### 3. 第23太陽活動期に観測された太陽中性子イベント

第23太陽活動期には100個以上のXクラスの大きな太陽フレアが発生した。これらすべての太陽フレアについて太陽中性子イベントの有無を調べたところ、2000年11月24日<sup>5)</sup>、2001年8月25日、2003年10月28日<sup>6)</sup>、2003年11月2日と2003年11月4日<sup>6)</sup>に発生した太陽フレアに伴って、大きな信号が中性子モニターで観測されていた(表1)。これら五つの太陽中性子イベントは、どれも5シグマ以上の統計的有意性をもって観測

されていた。今回はこの中から、2003年11月4日に観測された太陽中性子イベントを中心に、第23太陽活動期に観測された太陽中性子イベントについて紹介する。

#### 3.1 2003年11月4日に観測された太陽中性子イベント

2003年11月4日19:29UTにX28というとても大きな規模の太陽フレアが発生した。これは観測史上最も大きなクラスをもった太陽フレアであった。このフレアの開始時刻から軟X線強度がピークに達した19:53UTまでの間に、とても強い強度のガンマ線がINTEGRAL衛星によって観測されていた(図4)。ガンマ線強度は19:45UT辺りにピークをもっていた。

太陽中性子観測国際ネットワークのうち、強い強度のガンマ線が発生していた時刻(19:45UT)にどこの検出器が一番観測条件が良いかについて調べたところ(図5)、ボリビアとメキシコ、ハワイにある検出器がよい条件であることがわかった。ボリビアのチャカルタヤには中性子モニターと太陽中性子望遠鏡があったが、この日は停電のためデータを取得できなかった。メキシコのシェラネグラに設置した太陽中性子望遠鏡はまだ観測を開始していなかった。よって信号を観測できたのは、ハワイのマウナケアにある太陽中性子望遠鏡と、ハワイのハレアカラとメキシコシティに設置されていた中性子モニターであった。

2003年11月4日X28の太陽フレアに伴って観測された太陽中性子の信号を図6に示す。ハレアカラの中性子モニターで一番大きな信号が19:

表1 第23太陽活動期に観測された太陽中性子イベントの一覧。イベントを発生した太陽フレアと、イベントの観測場所、検出器の種類(検出器名の前に付いている数字は、設置されている検出器の台数)を示した。

イベント発生日時	フレアクラス	活動領域の場所	観測場所	検出器
2000年11月24日14:51UT	X2.3	N22 W07	チャカルタヤ	12NM64
2001年8月25日16:23UT	X5.3	S17 E34	チャカルタヤ	12NM64
2003年10月28日9:51UT	X17.4	S16 E08	ツメブ	18NM64
2003年11月2日17:03UT	X8.3	S14 W56	チャカルタヤ	12NM64
2003年11月4日19:29UT	X28	S19 W83	ハレアカラ	18NM64



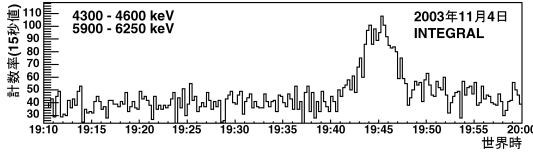


図4 2003年11月4日 X28 の太陽フレアで INTEGRAL 衛星によって観測されたガンマ線のタイムプロフィール。

45UT から 15 分間観測され、その統計的有意性は 7.5 シグマであった。メキシコシティの信号もハレアカラと同じ時刻に観測されており、その統計的有意性は 5.2 シグマであった。ハワイの太陽中性子望遠鏡でも 2 シグマ程度の信号が観測された。

中性子モニターは入ってきた中性子のエネルギーを測定することができないため、これらの観測された信号から直接、中性子のエネルギースペクトルを導出することができない。

そこで、ガンマ線のピーク時刻を太陽中性子の発生時刻と仮定することにより、中性子の飛行時間法を用いて、観測された太陽中性子のエネルギーを求めることにした。

飛行時間法を用いると、2003年11月4日にハレアカラの中性子モニターで観測された中性子の

エネルギー ( $E$ ) は 60–900 MeV と求めた。観測された信号に検出器の検出効率<sup>7)</sup>と大気による減衰率<sup>8)</sup>を掛け合わせて、太陽表面で発生した太陽中性子のエネルギースペクトルを求めたところ(図7)、べき  $\alpha_n$  が 3.9 のべき関数 ( $E^{-\alpha_n}$ ) できれいに書き表すことができた。

### 3.2 衛星によるガンマ線観測

強い強度のガンマ線は、第 23 太陽活動期に観測された他の太陽中性子イベントでも観測されていた。観測されたガンマ線のタイムプロフィールを図8に示す。2000年11月24日と2001年8月25日のイベントでは、「ようこう」衛星に搭載されているガンマ線観測装置 (GRS) で強い強度のガンマ線が観測されていた。2003年10月28日のイベントは2003年11月4日のイベントと同様、INTEGRAL 衛星によって、そして2003年11月2日のイベントは RHESSI 衛星によって観測されていた。どのイベントにおいてもイオン加速の証拠である核ガンマ線成分を含む、4–7 MeV 当たりのエネルギー範囲で、とても強い強度のガンマ線が観測されていたことがわかる。

このガンマ線イベントの中で一つ特記しておきたいイベントは2003年10月28日のイベントで

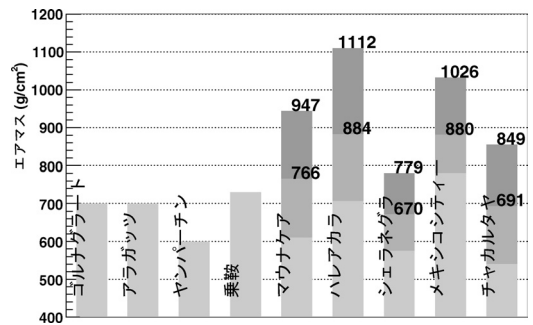
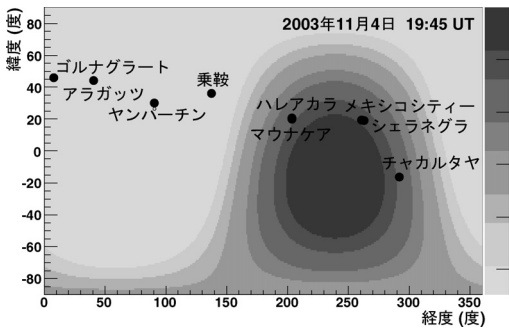


図5 左図：2003年11月4日 19:45UT (世界時) における太陽高度。日本を中心とした世界地図の中に、太陽中性子望遠鏡といくつの中性子モニターの設置場所を示した。色が濃い場所ほど太陽が検出器の真上となり、観測条件が良いことを示している。右図：各観測場所まで太陽中性子がたどり着くまでに、太陽中性子が通り抜ける地球大気量。ゴルナグラート・アラガッツ・ヤンバーチン・乗鞍は夜であったため、真上方向のエアマスのみを記載。上の数字は太陽中性子が太陽から検出器の上までまっすぐに飛んできたときに中性子が通り抜けてくる大気量、下の数字は最短経路効果という、大気散乱による中性子の経路変化を考慮した場合に中性子が通り抜けてくる大気量。

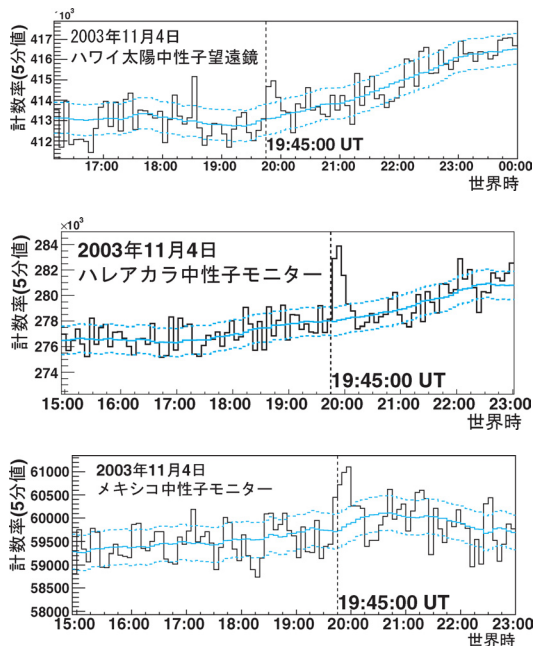


図6 2003年11月4日 X28 の太陽フレアに伴って観測された太陽中性子の信号。真中の薄い実線は観測データの移動平均，その上下にある破線は平均からの変動（±1 シグマ）を示している。上：ハワイ太陽中性子望遠鏡。中：ハレアカラ中性子モニター。下：メキシコ中性子モニター。

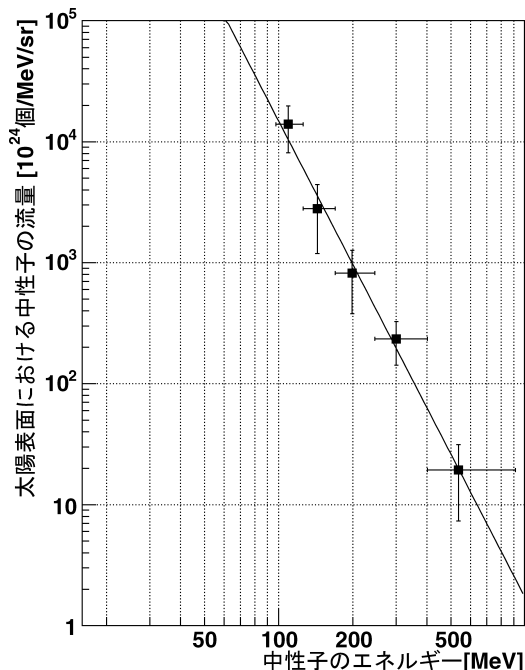


図7 INTEGRAL 衛星で強い強度のガンマ線が観測されていた時刻（19:45UT）に太陽中性子が瞬間的に発生したと仮定して，ハレアカラの中性子モニターで観測された信号から計算した，太陽中性子の太陽表面上でのエネルギースペクトル。

ある。このイベントでは、イオン加速起源の核ガンマ線のタイムプロファイル（2.2 MeV（中）と 4.4 MeV+6.1 MeV（下））と、電子加速成分である制動放射ガンマ線（4.7-6.0 MeV（上））でタイムプロファイルが異なっていることが確認されている。制動放射ガンマ線は二つのピークが見られるが、核ガンマ線ではピークは一つしかない。ガンマ線のエネルギースペクトルを書いてみたところ（図9）、11:02-11:03UT では制動放射しか見られないが、11:03-11:15UT には制動放射成分の上に核ガンマ成分が見られる。このことから、イオン加速と電子加速のタイムプロファイルは異なっていることがわかった。

### 3.3 太陽中性子イベントのまとめ

第23太陽活動期に観測された太陽中性子イベ

ントでは、同時に強度の強い硬 X 線やガンマ線が「ようこう」、RHESSI, INTEGRAL などの衛星で観測された。また同じ時刻に、2.223 MeV の太陽大気中の水素の、中性子捕獲に伴う核ガンマ線や、太陽大気中の炭素や酸素の原子核の励起による核ガンマ線も観測された。これらのガンマ線の発生時刻と中性子のタイムプロファイルを比べることにより、高エネルギーの太陽中性子はガンマ線が発生した時刻に同時に生成されていることが明らかになった。

第23太陽活動期に観測された5例の太陽中性子イベントについて、核ガンマ線や高エネルギーガンマ線が発生した時刻にデルタ関数的に太陽中性子が作られたと仮定して、太陽中性子の太陽表面上でのエネルギースペクトルを導出したとこ

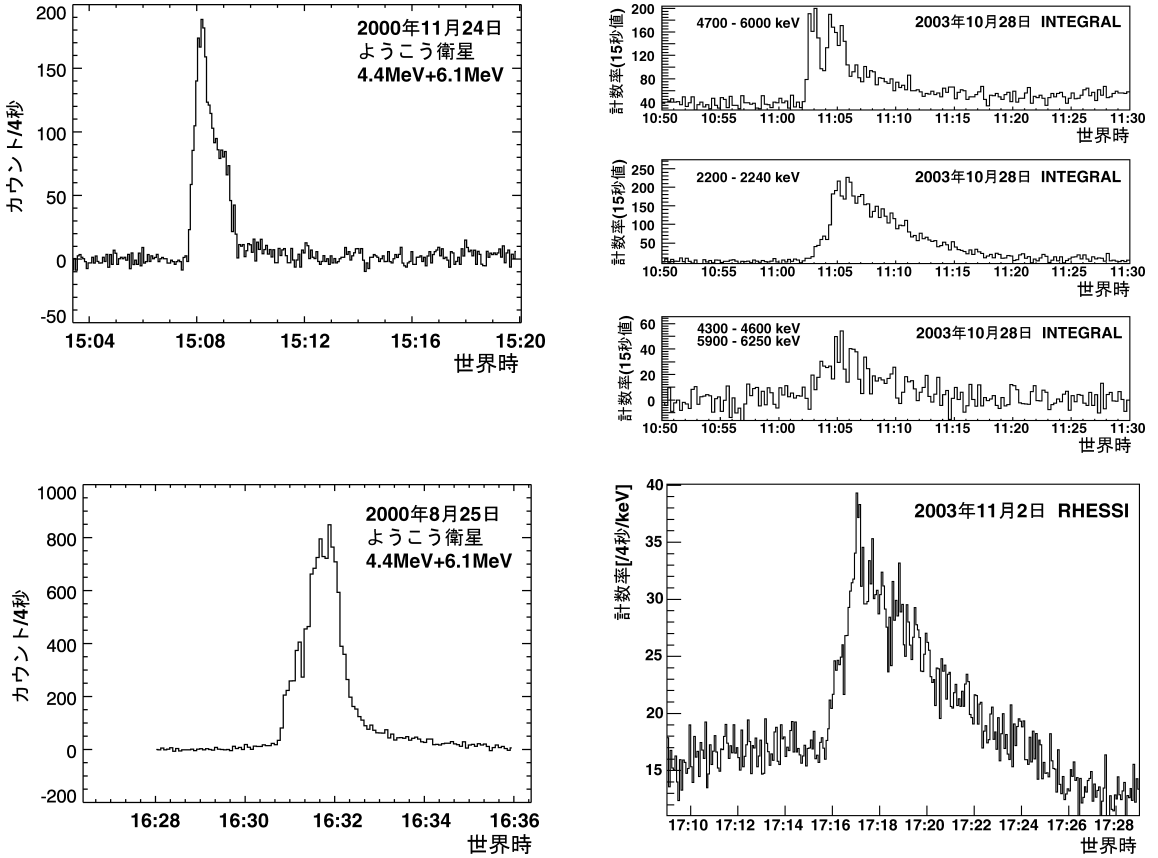


図8 第23太陽活動期に観測された太陽中性子イベントで観測されたガンマ線のタイムプロファイル。左上：2000年11月24日に「ようこう」衛星によって観測された、核ガンマ線成分が含まれている4.4 MeVと6.1 MeVのガンマ線のタイムプロファイル。左下：2001年8月25日に「ようこう」衛星によって観測された、4.4 MeVと6.1 MeVのガンマ線のタイムプロファイル。右上：2003年10月28日にINTEGRAL衛星で観測された、4.7-6.0 MeV(上)、2.2 MeV(中)、4.4 MeV+6.1 MeV(下)のガンマ線のタイムプロファイル。右下：2003年11月2日にRHESSI衛星によって観測された、4-7 MeVのガンマ線のタイムプロファイル。

ろ、すべてのイベントのエネルギースペクトルがべき関数でよく書き表すことができ、その値はべき $\alpha_n=3-4$ であった。これより、太陽フレア現象中におけるイオンの加速機構としては、ショック加速機構がもっともらしいと言える。

また、太陽中性子がガンマ線と同じタイムプロファイルをもって発生していると仮定して、太陽中性子のタイムプロファイルを解析したところ、デルタ関数的に発生したと仮定したときよりもべきは硬くなり、べき $\alpha_n=2-4$ の範囲に入ることが

わかった。太陽中性子は時間幅をもって発生していると考えることにより、数十分にわたる太陽中性子の信号のタイムプロファイルを容易に説明することができた。

また、中性子のエネルギースペクトルから、元の加速された陽子のスペクトルを求めることができる。太陽フレアで加速されたイオンのスペクトルから太陽大気中で生成される太陽中性子のスペクトルを求めた研究<sup>9)</sup>の結果を用いて、加速されたイオンのスペクトルを求めたところ、観測され

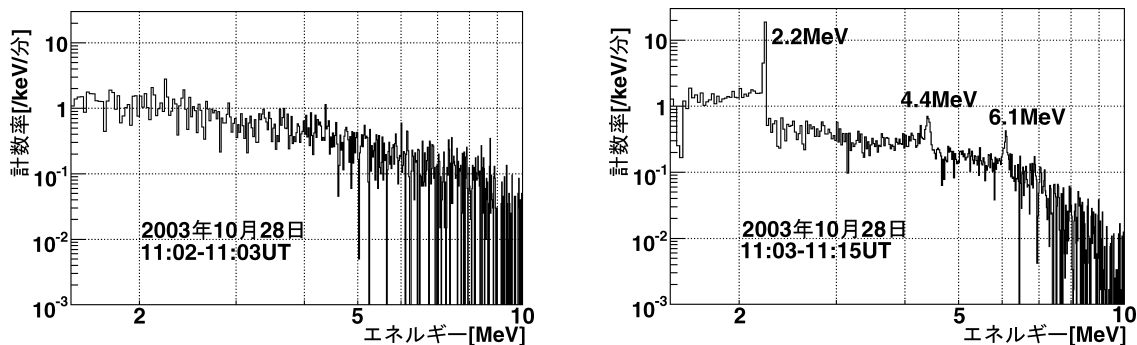


図9 2003年10月28日に INTEGRAL 衛星によって観測されたガンマ線のエネルギースペクトル. 左: 11:02-11:03UT. 右: 11:03-11:15UT.

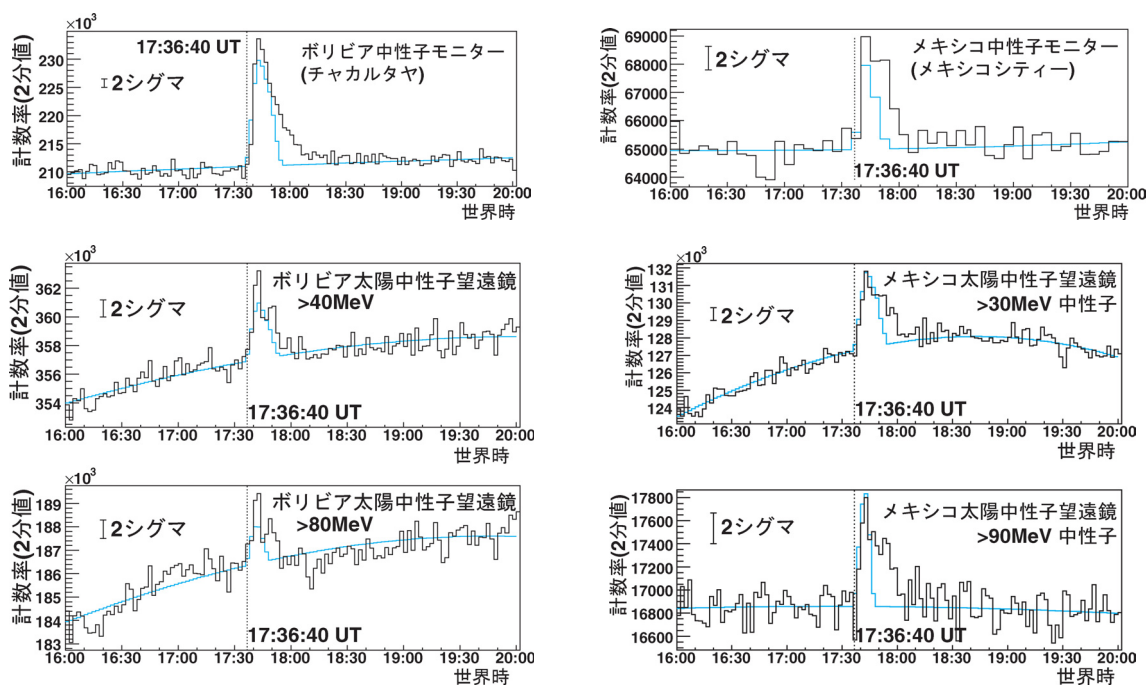


図10 2005年9月7日の太陽フレアに伴って各検出器で観測された太陽中性子の信号. ポリビアの太陽中性子望遠鏡では荷電粒子を除去するアンチカウンターが動作していなかったため、観測された信号は中性子によるものだけでなく陽子などの荷電粒子も含まれている。黒の実線が観測された信号を、青色の実線が、ポリビアの中性子モニターから求めたエネルギースペクトルを用いたときに、他の検出器でどのようなタイムプロファイルが観測されるかを示したものの。

太陽中性子のエネルギー範囲では、加速されたイオンのスペクトルは中性子のスペクトルよりも1程度ソフトになり ( $\alpha_p=3-5$ )、加速されたイオンの全流量は  $10^{30}-10^{33}$  個であることがわかった。

#### 4. 最新の太陽中性子イベント

最新の太陽中性子イベントについて報告する。2005年9月7日に発生した X17.0 の太陽フレアに伴って発生した太陽中性子が、ポリビアとメキ



シコに設置されている中性子モニターと太陽中性子望遠鏡によって観測された (図 10)。信号の統計的有意性は、ボリビアの中性子モニターで一つのピンだけで 40 シグマ (5 分値) を超え、メキシコシティの中性子モニターでも 9 シグマ (5 分値) の信号が観測されていた。太陽中性子望遠鏡でも 10 シグマを超える大きな信号が観測され、ボリビア太陽中性子望遠鏡の 40 MeV 以上の信号を捕らえるチャンネルで 12 シグマ (5 分値)、メキシコ太陽中性子望遠鏡では 30 MeV 以上の中性子のチャンネルで 16 シグマ (5 分値) の信号を観測した。

この日は INTEGRAL 衛星でガンマ線が観測されていただけでなく、GEOTAIL 衛星でも強い強度の硬 X 線が観測されていた。これらの電磁波のピーク時刻は 17:36:40UT であり、この時刻に太陽中性子も生成されたと仮定して太陽中性子のスペクトルを求めた。一番大きな信号が観測されていたボリビアの中性子モニターの信号を用いてスペクトルを求めてみたところ、図 11 のようなエネルギースペクトルが求まった。100 MeV 以下でエネルギースペクトルが曲がっており、一つのべき関数では説明できなかった。

しかし、100 MeV 以上の範囲ではべき  $\alpha_n = 3.8$  の一つのべきで書き表せるため、太陽中性子はこのスペクトルをもって 17:36:40UT に発生したと仮定して、他の検出器で観測された信号が説明できるかどうかについてシミュレーションを行った。すると、観測された増加のうち、最初の 15-20 分の信号は説明できるが、それ以上続いている信号の増加が説明できなかった。もし中性子がデルタ関数的にある時刻に発生していると仮定すると、中性子は図 11 のようなエネルギースペクトルをもたなければならない。しかし、中性子がガンマ線が発生している時間など、ある程度の時間幅をもって発生しているために、このようなエネルギースペクトルになったと考えることもできる。このイベントについては今後、ガンマ線の

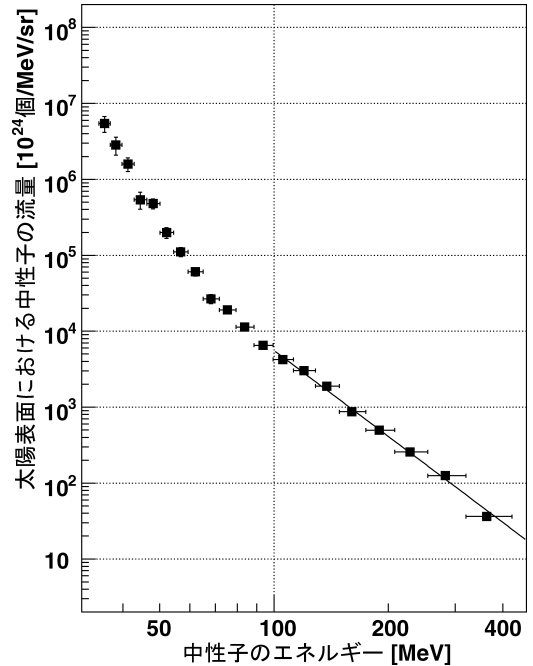


図 11 2005 年 9 月 7 日に観測された太陽中性子イベントにおける太陽中性子のエネルギースペクトル。

データと照らし合わせて詳細な解析を行うことにより、太陽フレア現象中にどのようなイオン加速が発生しているのかを知ることができると考えられる。

## 5. 今後の展望

現在までに太陽中性子イベントは 11 例しか観測例がなく、いまだにまれなイベントである。今後、太陽中性子を用いた太陽フレア現象中のイオン加速の研究を行っていくためには、現在ある太陽中性子検出器よりも検出効率が良い、新しい太陽中性子検出器の開発が必要である。名古屋大学太陽地球環境研究所宇宙線研究室では、第 24 太陽活動期に向けて、シンチレーションファイバーを用いた太陽中性子検出器の開発を行っている。

また、太陽中性子イベントを理解するためには、ガンマ線観測も必要不可欠である。現在、太陽フレアガンマ線の観測は RHESSI, CORONA

S-F, INTEGRAL などの衛星が活躍している。そのほかにも、GEOTAIL や「すざく」衛星の硬 X 線検出器も太陽からの硬 X 線を観測する装置として用いることができる。今後、これらの電磁波の観測データと太陽中性子観測データを包括的に解析することによって、太陽フレア現象中に発生しているイオン加速の機構を解明できるのではないかと思われる。

## 謝 辞

本稿は、筆者が名古屋大学在学時にまとめた博士論文に基づいて作成されています。指導教官である村木 綏教授、名古屋大学太陽地球研究所の松原 豊助教授、さこ隆志助手をはじめ、研究を進めるにあたり指導してくださった方々に感謝します。また、太陽中性子望遠鏡の維持に携わっている方々と、快く中性子モニターや衛星のデータを提供してくださった方々に感謝します。本稿の執筆を進めてくださった理研の寺田幸功研究員、原稿を丁寧にチェックしていただいた名古屋大学太陽地球研究所の増田 智助教授にも感謝します。なお、筆者は現在、日本学術振興会から特別研究員 (PD) として援助を受けて研究を進めています。

2006 年 4 月より Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720-7450, U.S.A. となります。

## 参考文献

- 1) Kane S. R., et al., 1995, ApJ 446, L47
- 2) Biermann V. L., et al., 1951, Z. Naturforsch. 6a, 47
- 3) Chupp E. L., et al., 1982, ApJ 263, L95
- 4) Chupp E. L., et al., 1987, ApJ 318, 913
- 5) Watanabe K., et al., 2003, ApJ 952, 950
- 6) Watanabe K., et al., 2006, ApJ 636, 1135
- 7) Clem J. M., Dorman L. I., 2000, Space Sci. Rev. 93, 335
- 8) Shibata S., 1994, JGR 99, A4, 6651
- 9) Hua X.-M., et al., 2002, ApJ 140, 563

### Solar Neutron Events Associated with Large Solar Flares in Solar Cycle 23

Kyoko WATANABE

*Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan*

**Abstract:** We have investigated ion acceleration mechanisms in solar flares by observing solar neutrons produced in association with these solar flares. In solar cycle 23, five solar neutron events were observed by ground-based neutron monitors. The statistical significances of all these events were, very high (more than  $5\sigma$ ), and the excesses were clear. At the solar flares, which produced solar neutron events, intense emissions of hard X-rays and high energy  $\gamma$ -rays were observed by many satellites. It seems that solar neutrons are produced with high energy  $\gamma$ -rays, especially line  $\gamma$ -rays of de-excited ions, simultaneously.