

SciBar 検出器を用いた太陽中性子観測計画

名古屋大学太陽地球環境研究所

永井 雄也 松原 豊

ynagai@stelab.nagoya-u.ac.jp ymatsu@stelab.nagoya-u.ac.jp

2013 年 (平成 25 年) 8 月 19 日

1 はじめに

K2K 実験の前置検出器として用いられた SciBar 検出器 [1] を宇宙線検出器として使用する計画 (SciCRT 計画) が進行中である。SciCRT は SciBar for Cosmic-Ray Telescope を表す。SciCRT の観測の狙いは太陽表面でフレアによって生成される中性子である。SciCRT によって中性子の検出感度と粒子弁別能力が向上し、これまでより多くのイベントをより高いエネルギー分解能で解析することができるようになることが期待されている。本稿ではこの SciCRT 計画の概要と現在までの進捗状況を紹介します、これからの観測について述べる。

2 研究の背景

宇宙線の加速機構を知る上で、もっとも近いイオン加速源である太陽を観測することは重要である。特にフレアやコロナ質量放出 (CME) のような太陽表面での突発現象では 10GeV 以上のエネルギーまでイオンが加速されていることが分かっている。

2.1 太陽フレアによる粒子加速

太陽フレアは、磁気リコネクションにより磁場に蓄えられたエネルギーが解放されることによって起きると言われている現象であり、多波長での増光が観測されている。解放されるエネルギー総量や大きさはさまざま、エネルギーは最大級のフレアでは約 10^{34} erg にもなり、サイズの大きなフレアになると、フレアループの先のとがったカスプ構造が観測できる (図 1)。カスプ構造の頂点がリコネクションがおこなわれている領域だと考えられている。リコネクション点周辺で加速された粒子は磁場に巻きつきながら太陽の外側とフレアループの足元 (太陽表面) に放出される。このうち足元方向に放出された粒子は太陽表面と相互作用をすることでさまざまな波長の光子やハドロンを生成する。この内光子、 π^0 中間

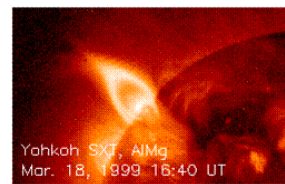


図 1: ようこう衛星の捉えた太陽フレア。太陽から突き出して明るく輝いているループ構造がフレアである。ループの磁場に閉じ込められ暖められたガスにより構造が分かる。

子、中性子は磁場から逃げ出すことができるため、観測が可能である。光子は電子由来でも生成されるが、 π^0 中間子、中性子は高エネルギーに加速されたイオンによって太陽大気中の原子核を破碎して作られるため、イオン加速の有力な証拠となる。これらの粒子を生成するためには、中性子で数十 MeV 以上、 π^0 中間子で 300MeV 以上のイオンが必要になる。われわれはどのような機構によってイオンがどのくらいのエネルギーまで加速されるかを知るためにこの太陽中性子の観測を行っている。

これまでの観測で太陽中性子イベントは 10 例ほど検出されているが、そのエネルギースペクトルは誤差が大きくかつさまざまな指数 (べき) を持っている。したがって今後の観測はスペクトルのべきを決め、加速効率を求めることと、イオンと電子加速の違いの有無を調べることが焦点となる。

2.2 太陽中性子観測

太陽中性子は二次粒子であるため数は少ないが、中性粒子であるため太陽表面や惑星間磁場の影響を受けず地球近傍まで到達する。寿命が 15 分程度あるので、運動エネルギーが 270MeV で 50% が崩壊せずに地球に到達する。中性子の観測は宇宙空間では衛星、地上では中性子モニタや太陽中性子望遠鏡で行われてきた [2]。衛星観測では装置の大きさの制限から上限が決められ、

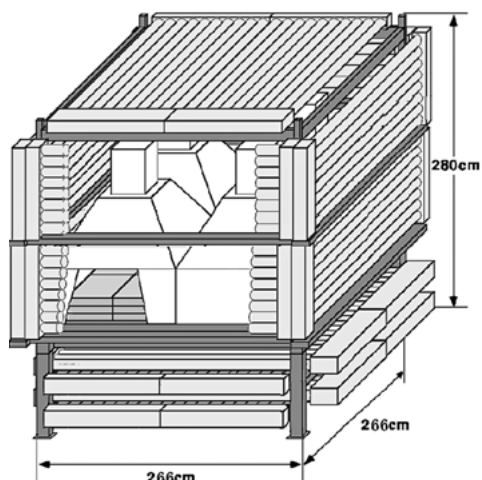


図 2: メキシコ・シェラネグラ山に設置されている太陽中性子望遠鏡。シンチレータと周りを覆う比例計数管でできている。

10-100MeV 程度のエネルギーに感度をもつ。一方、地上観測では大気による減衰の影響のため下限が決められ、50MeV-10GeV 程度のエネルギーに感度をもつ。これは太陽表面でのイオン加速の観測では最高エネルギーの領域にあたる。これまでの太陽中性子望遠鏡ではシンチレータを中性子のターゲットとし複数の閾値でこの信号を得て、その下層に並べた比例計数管により反跳陽子を検出する方法を用いて中性子を検出していた (図 2)。バックグラウンド宇宙線の除去のためにシンチレータの上部にアンチカウンタとして比例計数管を置き、さらにその上部に γ 線除去のための鉛を設置しているものなどもある。現在スイス、アルメニア、チベット、乗鞍、ハワイ、メキシコ、ボリビアの 7カ所で 24 時間体制で観測を行っている。

3 SciCRT 計画

SciCRT はこれまでの太陽中性子望遠鏡と異なり、比例計数管を用いずにシンチレータバーのみで構成された検出器である。この計画は K2K 実験で KEK 側の前置検出器として作られた SciBar 検出器を用いることが決まった。

3.1 計画の全容

SciBar 検出器は K2K 実験が終わった後、アメリカ Fermi 研究所 (FNAL) で SciBooNE 実験に用いられ、実験終了後は大切に保管されていた。SciBar は長さ 3m、断面が 1.3cm \times 2.5cm のシンチレータバーを井桁状に組んだ装置で、シンチレータ数は 14,848 本になる (図 3)。シンチレータバーの中央には波長変換ファイバが通してあ

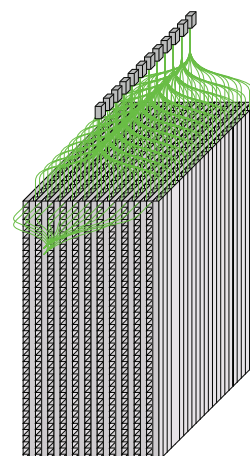


図 3: SciBar 検出器の概略図 [3]



図 4: 本稿で紹介される INAOE とシェラネグラ山をメキシコシティと共に地図に示したもの (元絵は <https://maps.google.co.jp>)。

り、束ねて 64ch マルチアノード光電子増倍管 (MAPMT) で信号を読み出し、ADC 値として記録される。

本計画は、SciBar をメキシコの 4,600m 高山であるシェラネグラに運び込み、太陽中性子望遠鏡として用いる、というものである。図 4 に示されるようにシェラネグラは赤道に近い高山で太陽中性子観測に最適で、2003 年より名古屋大学を中心とするグループが既に太陽中性子観測を開始している。また、口径 50m の大型電波望遠鏡 (LMT) が山頂で観測を行ったり、超高エネルギー γ 線天文学を行う HAWC が 4,100m で建設を開始しているなど、実験を行う上での電力供給やネットワークの整備も進んでいる。FNAL から検出器を陸路で運べるのも魅力であった。さいわいにも、K2K, SciBooNE のグループから SciBar を宇宙線実験に用いることについての同意を得ることができ、大量の光検出器・エレクトロニクスも使わせていただけることになった。また、シェラネグラで新しい実験を行うためにはメキシコの研究所 INAOE の承認が必要だったが、既にメキシコ自治大学のグループと共同で観測を行っていることもあって問題なく許可を得ることができた。INAOE はシェラネグラ



図 5: FNAL でのファイバ抜き取り作業の様子。ファイバは INAOE で再び挿入するので、その時作業がしやすいようしおりをはさんでいる。

と同じプエブラ州にあり、高度 2,150m で、メキシコシティとシェラネグラの間に位置している。

そして本研究は平成 22 年度よりいよいよ実現に向けて進むことになった。この検出器は多方向宇宙線ミュオン検出器としても使用できるので、宇宙線の時間変動を研究している信州大学など、ほかの国内研究者も加わるようになった。計画の進行は、(1)SciBar を FNAL で梱包して、INAOE に輸送、(2) 平行して SciBar の小型版をシェラネグラで試験し、(3)INAOE で宇宙線用の筐体を作り、宇宙線データを取得する、(4) 最終的に本体をシェラネグラに運び、本観測を開始する、という順番で行うことになった。以下、それぞれについて述べていく。

3.2 装置の輸送

SciBar のシンチレータ部分は、FNAL の地下のニュートリノビームラインに設置されていた。これを 2011 年 2-3 月にクレーンによって運び出し、ファイバの抜き取り作業を行った。図 5 はその作業の様子である。井桁状に組んだシンチレータバーは接着され (layer と呼ばれる)、計 64layer あるが、三つの木箱に梱包してメキシコに送り、2011 年 4 月に INAOE に到着した。読み出し回路は KEK に保管されていたものを名古屋でキャリブレーションを行った後、2011 年秋にメキシコへ輸送した。

3.3 小型試作機 mini-SciCR

SciBar のシェラネグラへの導入に先立ちわれわれは小型試作機を製作し、これを用いて山頂での動作試験を行った。小型試作機は SciCRT と同じ構成で作られているが、シンチレータバーの数が 64×2 本で長さが 20cm である点が異なる (図 6)。2010 年 10 月 19 日、現在の太

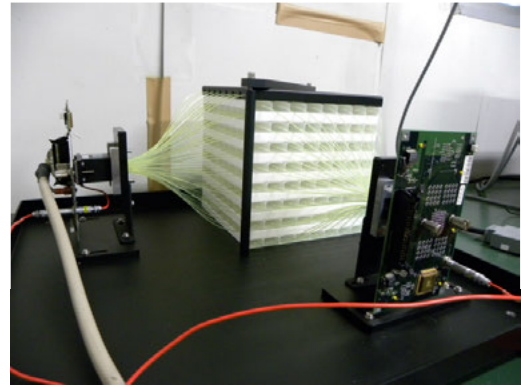


図 6: mini-SciCR の検出部。

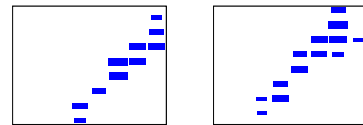


図 7: mini-SciCR の捉えた宇宙線の軌跡を図 6 の 2 面からみた図の例。2 面の軌跡それぞれから立体的な粒子の軌跡を再構成することができる。四角形の大きさで信号の大きさを表している。

陽中性子望遠鏡が設置されているシェラネグラ山頂の観測所に小型試作機を設置した。その後、1 年以上安定して動作することを確認し、図 7 のような宇宙線信号を得ることができた。小型試作機の性能評価を行うためにモンテカルロ計算を行った。検出器に入ってくるバックグラウンド粒子分布情報と検出器に入った粒子の応答の二つに分けて計算した。前者については、装置の高度・地磁気強度などから、バックグラウンド宇宙線の粒子種・角度・エネルギースペクトルを求めることができる汎用の粒子・重イオン輸送計算コードである PHITS [4] を用いて見積もった。装置内での宇宙線粒子のふるまいについては Geant4 を用いた。名古屋でのキャリブレーション測定の結果を用いて、ペDESTALランによるホワイトノイズ、LED を用いて測定したクロストーク率を用いてエネルギー損失から ADC 値を求めた [5]。図 8 は名古屋での観測結果とモンテカルロを一本のシンチレータバーの ADC 分布で比較したものである。左側の鋭いピークはペDESTALによるもので、右の緩やかなピークはおもに宇宙線ミュオンによって作られている信号である。同様にシェラネグラでの観測結果を図 9 に示した。双方でモンテカルロ計算の結果は実験データを計数率、エネルギー分布共によく再現していることが分かる。

3.4 INAOE での予備観測

INAOE で、これまで水平方向を向いていた検出器を天頂方向に向けるための架台を製作した。シンチレータ

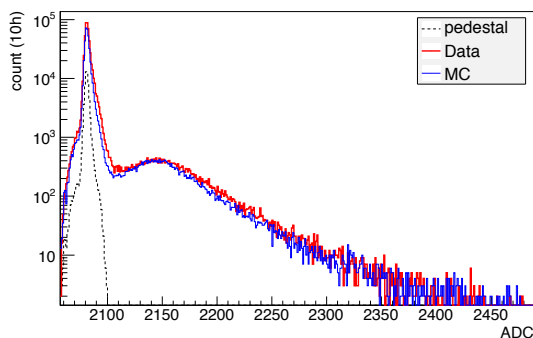


図 8: 名古屋で mini-SciCR を用いて宇宙線観測を行い、取得した一本のシンチレータバーでの ADC 分布。横軸は MAPMT 信号を AD 変換したデジタル値で、2080 のオフセットがある。観測データ (赤太線) とモンテカルロ計算 (青線) がよく一致している。左の鋭いピークはペDESTALピークで、右の広がったピークが宇宙線信号によるものである。

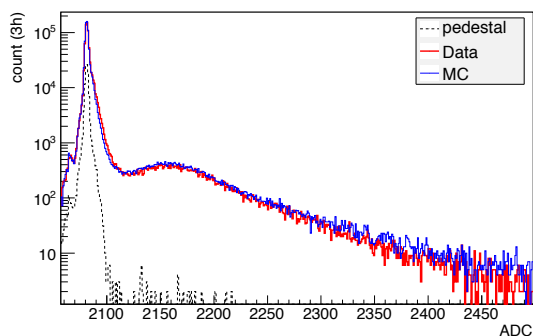


図 9: シェラネグラ山頂での ADC 分布。大気厚、地磁気強度などのパラメータを現地環境にすることでモンテカルロ計算とよく一致した。



図 10: 完成した架台と鉛直に向き直った検出器。シンチレータバーと架台の間の人が入っている隙間は MAPMT を収めるスペースである。



図 11: INAOE でのファイバ挿入作業の様子。

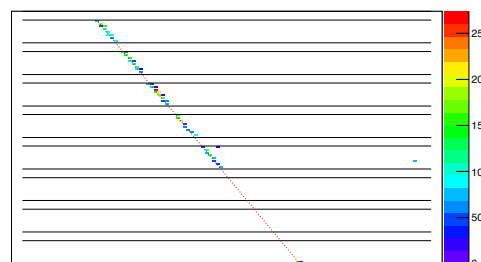


図 12: INAOE でのバックグラウンド宇宙線の軌跡の例。8layer ごとに筐体によるギャップがある。ここでは筐体五つ分の試験結果を示した。色は ADC 値を表す。また、斜めにひかれた点線は最上下の layer での最大 ADC 値を出力したシンチレータバーをつないだものである。点線と、宇宙線の軌跡はよく一致し、最上下 layer の信号のみでミューオンの方向を正確に決めることができることが分かる。

バー全体の重さは約 15t にもなり、そのまま重ねると下のシンチレータに荷重がかかりすぎ変形する危険性があるため 8layer ずつを一つの筐体 (SB:スーパーブロック) に収め、8つの SB を重ねる構造にした。図 10 は完成した 8つの SB を積み上げて INAOE に設置したものである。その後シンチレータバーにファイバの挿入作業を行った (図 11)。

2012 年 8 月、SB2 層を用いて全体の四分の一のシンチレータバーでの動作試験を行い、宇宙線信号を取得した。また、宇宙線信号を用いた ADC 値の MAPMT の印加電圧依存性を調べ、名古屋で Xe ランプで行った試験とほぼ同等の結果を得た。

最上下の XY の四つの layer は本来アンチカウンタおよびミューオン検出器として用いる予定だが、ここではこの 4 層のコインシデンスをとることで、軌跡の長い信号を取得した。装置の上寄り 5 層の SB と最上下 layer のアンチカウンタを用いた試験を行い、粒子弁別とモンテカルロ計算の比較を行った。SciCRT を貫通する粒子

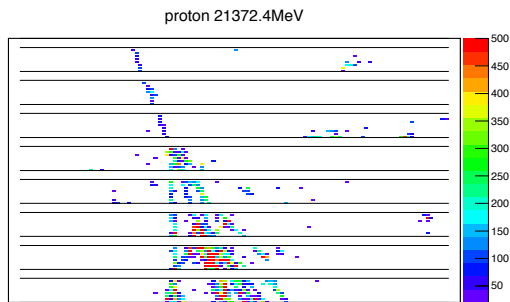


図 13: 約 20GeV の陽子が入射した場合のモンテカルロ計算の結果の一例。途中で枝分かれする軌跡が見て取れる。

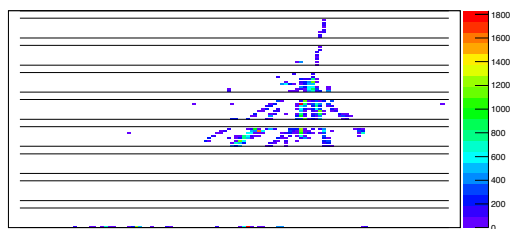


図 14: 実験データで見られるシャワー状になった軌跡。陽子入射のモンテカルロ計算の結果と軌跡がよく似ているので、陽子である可能性が高い。

は、100 本以上のシンチレータバーを通過することになるためほぼ正確な粒子弁別が可能になる。多方向宇宙線ミュオン検出器としての性能を調べるためにアンチカウンタの 4 層の同期信号を用いることで装置を貫通する粒子の軌跡を取得した。図 12 は貫通粒子のほとんどを占めるミュオンらしい信号の例である。解析の結果、全体の 92% がこのような単一のミュオンによる信号であることが分かった。この結果、最上下のシンチレータバーの ADC 情報を用いることでミュオンの入射方向を特定できることが分かった。シエラネグラ山頂で観測されるミュオンの典型的なエネルギーは数 GeV 程度であるが、1-10GeV のミュオンを仮定したモンテカルロ計算の結果、入射粒子の角度と最上下 layer の信号から再構成された角度は入射角に依存するが $\pm 0.5^\circ \sim 2.0^\circ$ となることが分かり、多方向宇宙線ミュオン検出器として十分な性能を持っていることが分かった。

また、モンテカルロ計算の妥当性を調べるため、観測データとの比較を行った。mini-SciCR 同様、INAOE の高度、地磁気を考慮して PHITS および Geant4 を用いて見積もった。20 ミリ秒の不感時間を持たせて行った測定結果、計数率は $45.7(\pm 0.2)\text{Hz}$ であったのに対し、モンテカルロ計算では $46.2(\pm 1.2)\text{Hz}$ となり、よい一致を示した。

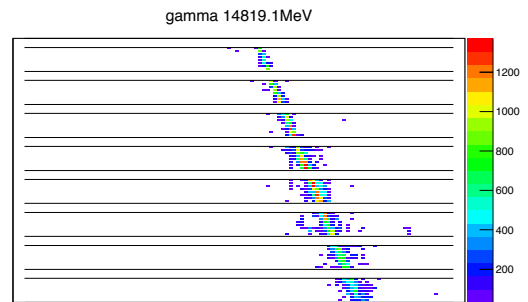


図 15: 約 15GeV の γ 線が入射した場合のモンテカルロ計算の結果の一例。陽子と違い、シャワーの枝は広がらず、太った一本の軌跡のように見え、中心に高いエネルギー損失がある。

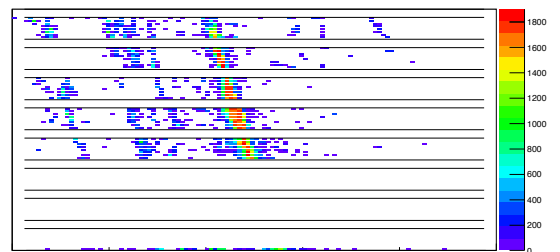


図 16: 実験データの内、 γ 線もしくは電子と推定されるイベント例。モンテカルロ計算同様太い軌跡と中心に高いエネルギー損失がある。大気中で作られたと思われる同時並行入射する粒子群を伴っている。

ミュオン以外の粒子に対しても同様に検証を行うため、最下の layer で 0.8MIP 以上のエネルギー損失があったシンチレータバーの本数が 10 本を超えるイベントについて粒子種の弁別を行った。まずハドロン成分について、モンテカルロ計算においても数 GeV の陽子は枝分かれする軌跡を残しており (図 13)、最下層では離れたシンチレータバーで反応する特徴がある。このようなイベントは観測データでも同様にとらえられている (図 14)。これらのイベントは全イベントに対しデータで $0.15(\pm 0.02)\%$ 、モンテカルロ計算で $0.16(\pm 0.03)\%$ となり、ほぼ同じ割合で存在していることが分かった。一方、数十 GeV 程度の γ 線が入射した場合、装置内で枝分かれをせず、塊になったシャワーを発達させることがモンテカルロ計算でも示される (図 15)。しかし、これほどの高エネルギーの γ 線は INAOE 高度 ($797\text{g}/\text{cm}^2$) では大気でシャワーを発達させてから到達するので、観測データでは単独のシャワーではなく周りにいくつもの並行した電磁成分の軌跡を伴うことになる (図 16)。ただし、シャワー核が軌跡に沿った塊として存在するというのははっきりとした特徴があるので、ハドロンイベントと容易に弁別可能である。このようなイベントはデータで



図 17: 山頂へ輸送される SciCRT 検出器 (オレンジのシートの中)。装置が重いため、ぬかるんでトラックが自力では進めず、ショベルカーで押しながら山を登っている。

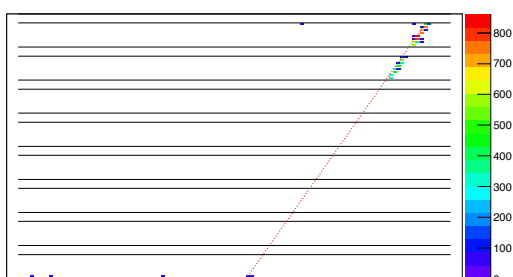


図 18: 山頂で観測された宇宙線の軌跡。この時点では SB 二つを使った。

は $0.16(\pm 0.02)\%$ 、モンテカルロ計算では $0.18(\pm 0.02)\%$ となった。データでは複数のシャワーが同時に観測されることがたまにあるので、それを考慮すると双方はよく一致している。

われわれはバックグラウンド宇宙線と装置のパフォーマンス、モンテカルロ計算に関して十分な理解ができたので装置をセラネグラ山頂の観測所へ輸送することにした。

3.5 シェラネグラ山頂での観測

2013年4月に装置を山頂へ輸送した。ファイバの挿入作業は、4,600mの山頂では空気が薄くて行えないので、ファイバを抜かずに架台に固定して運ぶこととした。山頂への道のりは舗装されていないので、いくつかの場所では自走では前進できず、ショベルカーで押して前へ進んだ(図17)。山頂では既設の太陽中性子望遠鏡観測小屋の北側に新たな観測小屋を建設し、そこに装置を設置した。その後、5月にアンチカウンタとSB二つを使ってデータ取得を行った(図18)。2013年9月にSciCRT

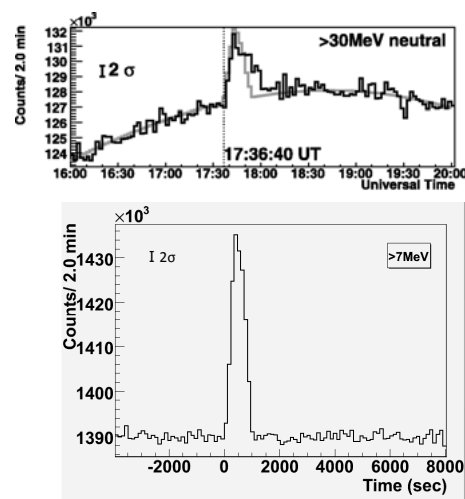


図 19: 2005年9月7日に現在の太陽中性子望遠鏡で得られた太陽中性子信号(上)と、同じイベントを仮定したときにSciCRTで観測した場合に期待される信号(下)。下の図の横軸は上の図の17:36:40を基準とした時刻である。この時刻に硬X線の時間変動はピークとなった。

はSB五つを使い定常観測を開始する。将来的には8つのSBを使い観測する予定である。

4 検出感度の見積もり

検出感度の見積もりは小型試作機と同様の方法で行った。太陽中性子の強度は過去に起きた太陽フレアによって見積もられた中性子の放射量を仮定した。その太陽中性子イベントは2005年9月7日にメキシコとボリビアの太陽中性子望遠鏡で検出され、推定された中性子の放射量および、べきは $6.1 \times 10^{27} (E/100\text{MeV})^{-3.8} \text{MeV}^{-1} \text{sr}^{-1}$ と推定された。モンテカルロ計算ではバックグラウンド宇宙線はPHITSにより求め、太陽中性子の大気伝搬については柴田モデル[6]を使って求めた。この9月7日のメキシコでの観測データとSciCRTで予想されるタイムプロファイルを図19に示した。バックグラウンドの中性子が緩やかに時間変動を持ちながら観測されている中で、フレアの時刻(17:36:40 UT)に中性子の計数の増大がみられる。これまでの太陽中性子望遠鏡ではバックグラウンドに対し 16σ の有意性で観測されたイベントにおいてSciCRTでは 57σ の有意性で観測できるようになることが分かる。これによりこれまでより細かい時間分布を特定できるようになる。中性子の到来時刻は放出時間とエネルギーに依存するため、観測時間とADC情報を用いることでより高いエネルギー分解能で太陽中性子信号の時間変動を調べることができると期待される。これにより、太陽フレアでの粒子加速の上限付近でのエネルギースペクトルを知ることができる。ほかの観測からは

得られないこの領域での制限を加えることで加速機構の詳細の解明に影響を与えることができると考えられる。これらの定量的な議論についてはスタディ中である。

5 今後の展望

近々の改良として側面から入射する荷電粒子を除去するためのサイドアンチカウンタの設置を予定している。これにより、現在の最上下 layer のみのアンチカウンタでは除去できなかった水平に近い角度で入射してくるバックグラウンドの荷電粒子を減らすことができる。また、現在の装置で中性子の検出効率の限界を決めているのは読み出し速度である。バックグラウンド中性子の装置全体での計数率は、短い軌跡しか作らないものも合わせると約 10kHz 程度であり、現在の 1kHz の読み出し回路では多くを取り逃している。この問題を解消するため、1 ボードあたり 1 ミリ秒かかっている読み出し時間を 0.1 ミリ秒まで減らせる SiTCP を用いたボードを開発中である。2,3 年後の実用を目標としている。

2013 年現在、太陽は 11 年周期をもつという活動サイクルの極大に達しつつある。太陽中性子を伴う大規模フレアは極大後の数年で多く起きている。前極大年から極小年にかけて 6 つの太陽中性子イベントが太陽中性子望遠鏡を用いて観測されている。2013 年から 2020 年頃にかけて同様にイベントが発生すれば、既設の中性子望遠鏡あたり一つ、SciCRT では 3 倍強高い検出感度のために三つほどのイベントが期待できる。今後の数年間が SciCRT の観測における重要な年となる。

6 謝辞

SciBar およびデータ収集系の使用を許していただいた SciBar・SciBooNE グループに感謝します。Fermi 国立加速器研究所の協力により FNAL から検出器を運ぶことができました。シェラネグラ山頂の使用許可と予備実験の場所を提供してくれた INAOE に感謝します。なお、本研究は SciCRT グループの研究であり、著者以外のすべての共同研究者に感謝します。

参考文献

- [1] K.Nitta, et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 2004, **535**: 147-151.
- [2] 渡邊恭子, 2004, 名古屋大学太陽地球環境研究所博士論文。
- [3] 山本真平, 2002, 京都大学ニュートリノグループ修士論文。

- [4] K.Niita, et al., JAEA-Data/Code 2010-022 (2010).
- [5] Y.Nagai, et al., Proc. 32nd Int. Cosmic Ray Conf., Beijing 2011.
- [6] S.Shibata, J.Geophysical R., 1994, **99**: 6651-6665.