



**No. 73**  
**2010.9.30**  
 東京大学宇宙線研究所

記載の記事は宇宙線研究所ホームページ ([http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/ICRR\\_news](http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/ICRR_news)) からでも御覧になれます。

## CONTENTS

天体粒子加速研究の発展と現状	寺澤 敏夫	1
テレスコープアレイ (TA) 実験の研究紹介	佐川 宏行	6
Ashra によるガンマ線バースト光学閃光観測	太田 一陽	13
人事異動		16
ICRR-Seminar		16
ICRR-Report		16

### 研究紹介

## 天体粒子加速研究の発展と現状

寺澤 敏夫

【宇宙線研究所】

### 宇宙線起源と粒子加速天体

ヘス V.F. Hess により宇宙線が発見されてから約 100 年が経過した。星間空間を満たす宇宙線のエネルギー密度の考察から、宇宙線は超新星爆発に伴って作られたものとするアイデアは 1930 年代のバーデ W. Baade、ツイッキー F. Zwicky に遡る [1]。しかし、彼らは具体的な宇宙線加速のメカニズムを解明したわけではなかった。バーデ達の 40 数年後の 1970 年代末に提案され、その後 30 年余を経て確立した現在の通説によれば、 $10^{15}$ eV 程度以下のエネルギーの宇宙線粒子は天の川銀河内の超新星爆風前面の衝撃波統計加速機構 [2] (後述) により生成されと考えられている。他方、極高エネルギー宇宙線、すなわち  $\sim 10^{19}$ eV 以上のエネルギーを持つ宇宙線粒子は銀河系外に起源を持つことは間違いない [3]。極高

エネルギー宇宙線の加速源の候補天体として考察されてきたのはガンマ線バースト (GRB = Gamma Ray Bursts) や、活動銀河核 (AGN = Active Galactic Nuclei) から放出されたジェットが作る相対論的衝撃波、そして、銀河団内の衝撃波などであり、いずれも何らかの衝撃波の関与が必須であると考えられている。

話を  $10^{15}$ eV 以下のエネルギーの宇宙線粒子に戻そう。超新星爆発が宇宙線生成の原因であることの間接的証拠は、スターバースト銀河 M82 (図 1) の観測からも得られている [4]。最近の高エネルギーガンマ線観測により、M82 中心部の宇宙線エネルギー密度は  $250 \text{ eV cm}^{-3}$  と推定されているが、このエネルギー密度は、天の川銀河内の我々の近傍での値の 500 倍にも達する。このエネルギー密度の値は M82 での高い超新星爆発率を考慮した宇宙線加速モデル

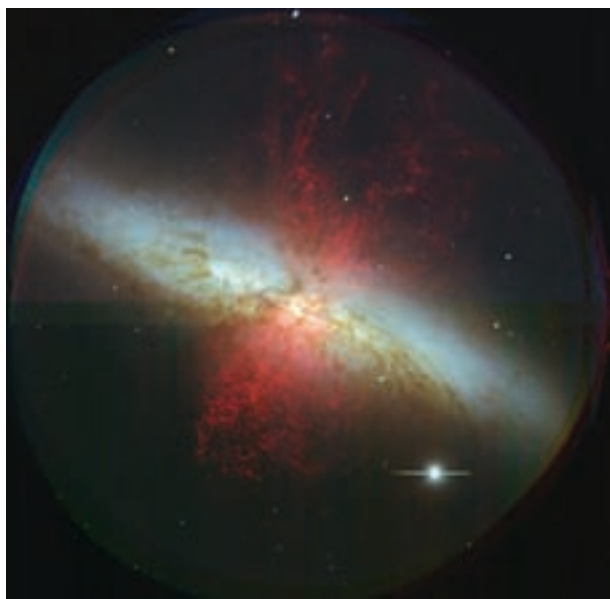


図1：すばる望遠鏡により得られたスターバースト銀河M82像（国立天文台提供）。この銀河では、星形成が普通の銀河よりずっと活発で、超新星爆発の頻度も数年に1回と天の川銀河の10倍以上である。

により説明されている。

超新星爆発に関連して忘れてならないのは、ある種の超新星の爆発後に残される回転中性子星（パルサー）である[5]。若いパルサーは、 $10^{12}$ ガウス程度の磁場を持ちつつ、数百分の1秒～数分の1秒の周期で高速自転しており、天然の超高電圧発電機と見なすことができる。まずこの発電機のパワーにより、電子・陽電子が対生成され、パルサーの周囲の空間をプラズマとして満たす。これをパルサー磁気圏と呼ぶ。パルサーの表面近くでは磁気圏は星と共回転している。パルサーからの距離に比例して回転速度が上昇し、やがて光速近くに達すると共回転が破れ、磁気圏の外へとパルサー風として吹き出す。理論的モデルによると、このパルサー風は相対論的な風で、ローレンツ因子は $10^6 \sim 10^7$ に達していると考えられている。したがって、風の中の個々の電子、陽電子は $10^{11} \sim 10^{12}$ eV程度のエネルギーを持つが、それにはとどまらない。パルサー風はやがて周りの星間物質と衝突するが、そこには衝撃波が形成される。この衝撃波を舞台として、パルサー風を構成する電子・陽電子の一部のエリート粒子は、さらに千倍以上、 $10^{14} \sim 10^{15}$ eV程度にまで加速されると考えられている[6]。また、そこまでは加速されなかったその他大勢の電子・陽電子も、衝撃波で加熱された高温プラズマとして、パルサーの周りを取り囲んで広がり、「パルサー星雲」として観測される。有名な「かに星雲」は、1054年に爆発した超新星が残



図2：すばる望遠鏡により得られたかに星雲像（国立天文台提供）。中心部にパルサーがある。

したパルサーの作るパルサー星雲である（図2）。

### 衝撃波の内部構造

上に述べたように、宇宙の様々な局面で衝撃波が重要な役割を果たしている。まず、そうした天体衝撃波と、超音速飛行するロケットなどの前面に形成される日常的な衝撃波との違いについて述べたい。衝撃波の静止系では、衝撃波面に流れ込むガス（上流側のガス）は超音速であるが、衝撃波面から流れ出るガス（下流側のガス）は亜音速である。超音速→亜音速の差の分の運動エネルギーは衝撃波面で熱エネルギーへ転化されるが、その転化を担うのが衝撃波面における散逸機構である。大気中の衝撃波と、天体衝撃波の基本的な違いはこの散逸機構の担い手である。大気中の衝撃波では、頻繁な分子間衝突が散逸を担い、衝撃波面の厚みは衝突の平均自由行程の数倍程度である。一方、宇宙のガスは一般に電離しており、中性ガス中の分子間衝突に対応するのは荷電粒子間のクーロン衝突だが、それで現実の天体衝撃波の散逸が説明できるだろうか？図3に、太陽面爆発に伴って形成された惑星間空間衝撃波の地球近傍での観測例を示す[7]。衝撃波到着（▽印）の前後で太陽風速度が約450km/sから約900km/sに増大し、同時に磁場強度も数nTから数十nTへと増大している。これらの速度・磁場の増大は1秒以内に起きており、観測者に対する衝撃波の伝搬速度を考慮すると対応する衝撃波面の厚みは数百km以下であることがわかる。しかし、クーロン衝突に基づいて図3の場合の平均自由行程を計算すると1天文単位を越え、観測された衝撃波面の厚みより5桁以上も大きくなってしまふ。すなわち、この衝撃波

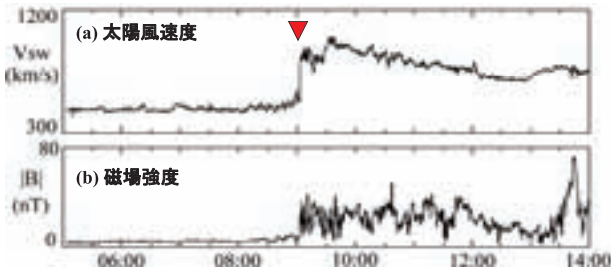


図3：1994年2月21日5時～14時（世界時）に観測された (a)太陽風速度と、(b)磁場強度の変化。世界時09：03：21の衝撃波到着を▽印で示す。磁場強度の MKS 単位 nT(ナノテスラ)は10倍すると天体物理学でよく使われる  $\mu\text{G}$ (マイクロガウス) 単位に変換される。例えば、 $10\text{nT}=100\mu\text{G}$  である。

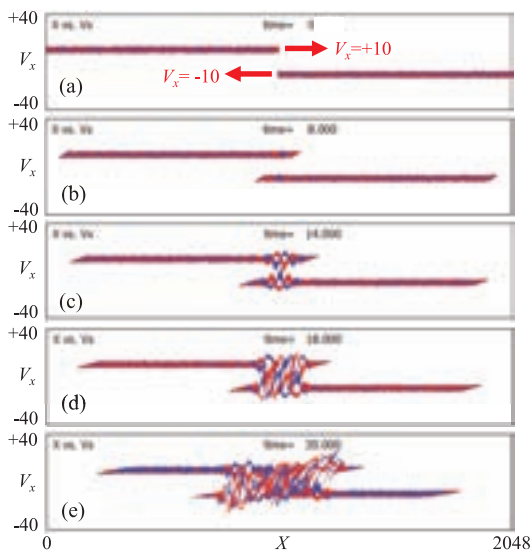


図4：2つの電子・陽電子ビームの衝突実験。空間 (X) はデバイ長、速度 ( $V_x$ ) は熱速度、時間はプラズマ振動周期で規格化されている。(a)は初期条件 ( $t = 0$ ) として置いた2つのビームの位相空間 ( $X - V_x$ ) 分布を示す。それらのビームは有限長(デバイ長の1024倍)、速度幅(熱速度)、平均速度(熱速度の10倍)を持ち、図の中央で左右から衝突している。青点が電子を表す個々の超粒子に、赤点が陽電子を表す個々の超粒子に対応している。(b)～(e)は電子・陽電子分布の時間発展 ( $t = 8, 14, 18, 30$ ) を示す。 $t = 8$ までは殆ど相互作用せず、互いにすり抜けているが、 $t = 14$ 以後はビーム不安定性により発生した静電場により、加速・減速を受け、位相空間分布が擾乱を受けているのが見られる。

の散逸機構はクーロン衝突では全く説明できず、別の物理機構が必要であることが明らかである。

図3の例のように、クーロン衝突の平均自由行程が系の空間スケールを越えるプラズマを「無衝突プラズマ」と称する。このような「無衝突プラズマ」で重要になるのは、個々の荷電粒子間に働くクーロン2体相互作用ではなく、荷電粒子が集団として作

る電磁場が個々の粒子に及ぼす電磁的集団相互作用である。この事情を粒子シミュレーション結果を参照して眺めてみよう。図4は2つの電子・陽電子ビームからなる系の衝突をシミュレートしたものである。この系では粒子間のクーロン衝突は無視できるよう設定されているが、ビーム不安定性により励起された静電場の影響を受けて、2つの粒子集団間に運動量交換(実効的「衝突」)が起きている。 $t = 14$ の段階では運動量交換に伴う位相空間の擾乱は規則的だが、 $t = 30$ の段階では位相混合が進んで乱流的となり、散逸(加熱)が起きている。

図4のシミュレーションは「絵解き」が目的なので、磁場の無い空間での1次元ビーム衝突実験であった。実際の宇宙ではあらかじめ存在する磁場の中で相互作用が起きるのが一般的であり、その磁場の強さ、方向により、さまざまな不安定性のモードが関与することになる。衝撃波における宇宙線加速の問題で特に重要となるのが、大振幅アルフェン波の磁場擾乱を作り出すイオンビームサイクロトロン不安定性(とその系統の不安定性)である。

### 衝撃波統計加速

無衝突プラズマ中で、集団相互作用により形成された衝撃波を「無衝突衝撃波」と呼ぶ。ここでは、無衝突衝撃波の周辺領域に、種となる非熱的粒子(大多数の熱的プラズマ粒子群よりエネルギーが高く、差別化された粒子)が注入されたとして話をすすめる。非熱的粒子は衝撃波の周りの磁場擾乱の中をランダムウォークしつつ、背景プラズマの流れに乗って輸送される。輸送により衝撃波面を横切るとき、プラズマ粒子群の圧縮に伴って、非熱的粒子は運動量を獲得し加速されることになる。加速された非熱的粒子の一部は有限の確率で衝撃波面に戻るのでさらに加速を受ける。この過程を繰り返すことにより、非熱的粒子は高エネルギーに到達できる。これが衝撃波統計加速モデルの骨子であり、1970年代末、複数の著者[2]によりほぼ同時に提唱された後、太陽圏内衝撃波の直接観測での検証を経てその基礎が確立され、多くの天体に応用されてきたという歴史がある。

簡単に、このモデルで期待される加速領域の構造について眺めておこう。今  $x < 0$  の領域から  $+x$  方向に超音速のプラズマ流が吹いており、 $x = 0$  にある衝撃波面で急激に減速・圧縮されているとする。最初に提唱された「標準理論」では、宇宙線のもつエネルギー密度は小さく、プラズマ・磁場のエネルギー密度に比べ無視できるとする。この場合、宇宙

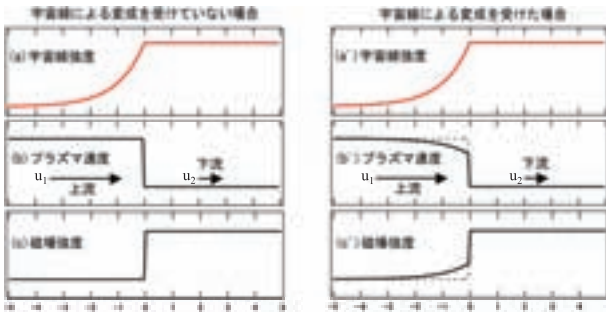


図5：(a)～(c)は加速される宇宙線をテスト粒子として扱う場合で、加速の反作用による衝撃波構造の変成は無視できるとして、(a)宇宙線強度の空間変化、(b)プラズマ速度変化、(c)磁場強度を描いた。プラズマ速度と磁場強度は衝撃波面 ( $x=0$ ) で不連続な変化を示す。一方、(a')～(c')は衝撃波構造が変成を受ける場合で、(b')プラズマ速度、(c')磁場強度とも、宇宙線のもつ圧力勾配の影響を受け、上流側でゆるやかな変化を示す。

線は衝撃波面から  $x < 0$  の衝撃波遷上流側に向かいプラズマ流を遡って拡散するので、 $\exp(x/\lambda)$  型の空間構造を持つ (図5(a))。ここで空間構造のスケール  $\lambda$  は上流側のプラズマ速度  $u_1$  と、拡散係数  $D_1$  により  $\lambda = D_1/u_1$  で与えられる。このとき、衝撃波構造は宇宙線の影響を受けないので、速度変化(b)と磁場強度変化(c)は急激なままである。ここで、速度を衝撃波静止系で定義すると、上流・下流の速度  $u_1, u_2$  は  $u_1 > u_2$  の関係を満たし、マッハ数が大きい極限で  $u_2 \rightarrow u_1/4$  となる (非相対論的衝撃波の場合)。

### 加速の反作用

超新星残骸をはじめとする、多くの天体衝撃波では加速効率が非常に高く、被加速粒子のエネルギー密度が背景プラズマのもつ熱エネルギー密度・磁場エネルギー密度と同程度になる (凌駕する?) ことがあると考えられている。そのような状況下では、被加速粒子の反作用により衝撃波構造が変成を受けると期待され、宇宙線変成衝撃波 (CRMS = 'cosmic-ray-modified shocks' または 'cosmic-ray-mediated shocks') と呼ばれている [8]。この場合、上流側の宇宙線の圧力の勾配によってプラズマ流が部分的に減速・圧縮されるので、衝撃波構造は図5(b')、(c')のように変わると期待される。

CRMSの基礎的物理過程の観測的研究は、太陽圏内の衝撃波のうち、いくつかの強いものにおいて実現されている [9]。ただし、太陽圏で「宇宙線」粒子の役割を果たすのは、それぞれの場合に応じて加速されている非熱的粒子である。例えば、図6の例 [10] では惑星間空間衝撃波により加速された数

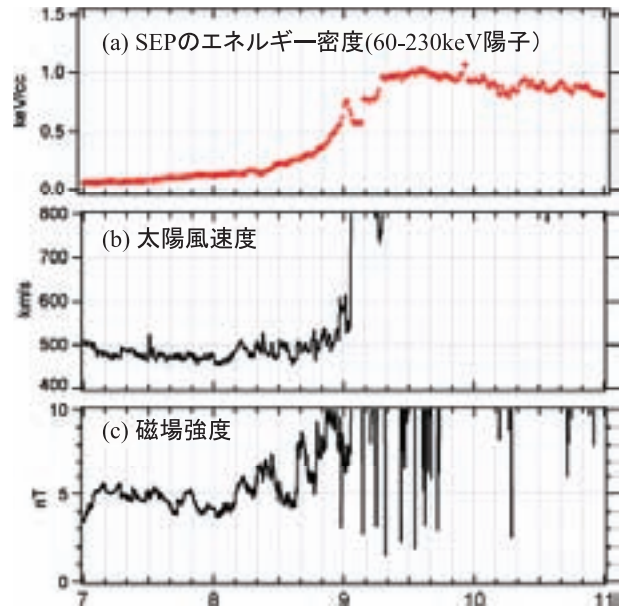


図6：1994年2月21日7時～11時 (世界時) に観測された (a)SEP エネルギー密度、(b)太陽風速度、(c)磁場強度の変化。図3に示した世界時09:03:21の衝撃波到着の±2時間のデータを示す。衝撃波到着前の変化を強調して図を描いたため、衝撃波到着後は(b)、(c)のグラフはスケールアウトしている。衝撃波静止系での速度は上流→下流で減少するが (図5(b'))、図6(b)では、衝撃波は観測者に向かって運動しているので、速度変化は増大のセンスとなっている。

十 keV～数百 keV のイオン (Solar Energetic Particles = SEP) がその役割を果たしている。図6で、(a)SEPのエネルギー密度は衝撃波到着 (09:03:21) に向け、緩やかに増大している。これは図5(a')にあたるものである。SEPのエネルギー密度の増大分は衝撃波上流の太陽風の運動エネルギー密度の15%に達しており、衝撃波の構造を変えることが期待される。実際、図6(b)に示した太陽風速度の変化を見ると、衝撃波到着以前の20分間に  $100 \text{ km s}^{-1}$  の増大が見られる。この変化はこの惑星間空間衝撃波がCRMS性を持つとして期待されるものである。

CRMS理論から期待されるように、磁場強度も衝撃波面に向かって増大している (図6(c))。ただし、増大しているのは静的磁場成分  $B_1$  ではなく、SEP粒子がビームサイクロトロン不安定性を通じて励起したアルフェン波の振幅  $\delta B$  であり、衝撃波面の直前 (09:00頃) で  $\delta B/B_1 \sim 1$  程度までの増大が見られている。この例では衝撃波のアルフェンマッハ数は5.8であったが、最近、Bell [11] はマッハ数が数十～数百の天体衝撃波では磁場増幅  $\delta B/B_1 \gg 1$  が起りうると提案して議論を呼んだ。定量的な議論は未完成だが、この機構の存在を認める理論家が多く、

Bell 機構と呼ばれている。

惑星間空間と違って直接探査のできない遠くの天体における加速領域での磁場強度の推定には、シンクロトロン放射スペクトル（強度、最大周波数）の観測が使われるが、それらは磁場強度ばかりではなく、放射にかかわる電子のエネルギーの関数でもあって、なかなか一意的な決定は難しい。それでも、超新星残骸内の磁場が恒星間空間の平均磁場強度である  $3\mu\text{G}$  ( $0.3\text{nT}$ ) の数十倍以上であるとする推定が沢山 [12] あり、Bell 機構の存在を示唆するものと考えられている。

この稿の最初に、銀河宇宙線の起源は超新星衝撃波による加速が有力と述べたが、実は、超新星衝撃波の時間発展を考慮して標準理論を厳密に適用すると、到達エネルギーは  $10^{14}\text{eV}$  どまりで、1-2桁足りないことが指摘されていた [13]。到達エネルギーは加速領域の磁場強度に比例するので、Bell 機構はこの「エネルギー危機」を解消する「救世主」として待ち望まれていた感がある。

### 衝撃波以外の加速機構？

超音速の太陽風は、やがて星間空間のガスと磁場との相互作用により減速され亜音速流となるが、その減速は太陽風終端衝撃波でなされる。最近、Voyager 1、2 探査機が相次いでこの終端衝撃波を横切り、その性質についての詳しい情報をもたらした。その中で、意外な結果として注目されたのは宇宙線異常成分 (Anomalous Cosmic Ray = ACR) のふるまいについてである。この成分は1970年代初めに He、N、O について発見されたもので、核子あたり数十~百数十 MeV のエネルギー領域では He フラックスが陽子フラックスを越える異常性を示すこと、また、N、O の存在量が平均的宇宙組成よりずっと多いことから「異常成分」の名が付けられた [14]。ACR の起源について、Fisk ら [15] は、「太陽風内に侵入した星間ガス中の中性成分は、太陽紫外線の光電離あるいは太陽風イオンとの荷電交換によるイオン化後、太陽風により終端衝撃波まで輸送されそこで加速を受けて ACR となる」、とのシナリオを提唱した。もしこの考えが正しければ、これらの ACR 粒子は一価イオンでなければならぬが、SAMPEX 衛星の地磁気カットオフを利用した観測でそのことが示され Fisk モデルの半分が証明された。モデルの残り半分、終端衝撃波による加速の考え方が正しければ、ACR 成分の強度は、図 5 のように、終端衝撃波に向かって増え続けたあと、衝撃波下流の heliosheath 領域では一定値に達するであ

ろう。このような観測が Voyager 1、2 探査機によりなされると期待されていたのである。しかるに、ACR 成分は Voyager 1、2 探査機が終端衝撃波を横切ったあとも増え続けており [16]、上の単純な期待は裏切られた。観測を説明するため、Voyager 1、2 探査機が横切った付近の終端衝撃波は磁力線の幾何学的条件により加速が不活発であり、ACR を加速しているのは終端衝撃波の別の領域であるとする修正案 [17] が唱えられているが、衝撃波統計加速以外の過程に求める考え方もある。一つは、heliosheath 領域における磁力線リコネクションに伴う加速を考えるモデル [18] であり、もう一つは heliosheath 領域における乱流による 2 次統計加速を考えるモデル [19] である。Voyager 1、2 探査機は現在 heliosheath 内を飛行中で、電池寿命の尽きる前に heliopause を横切って真の星間空間へ脱出すると期待されている。ACR 起源の決着について、その間の Voyager のデータ蓄積に期待がもたれている。

天体における粒子加速機構について、衝撃波加速モデル一辺倒への反省も起きている。例えば、GRB や AGN から放出された相対論的ジェットを作る衝撃波の下流側には、亜相対論的乱流領域が形成される。このような乱流領域では 2 次オーダーの統計加速過程の効率が高いことが指摘されており、衝撃波・乱流の全てを考慮した総合的な加速モデルの構築が急務である [20]。

### おわりに

はじめに述べたように宇宙線起源の問題は旧くて新しいテーマであり、その時期の最新の天文学的知見の水準に応じて、内容を発展させてきた。そして、研究の推進にとって、今後の数年間は理想的な期間であるといえる。極高エネルギー宇宙線に関しては、北天のテレスコープアレー観測と南天のオージェ観測のデータが蓄積され統計精度の高い議論が可能になるであろうし、南極氷内に埋めこまれた IceCube により高エネルギーニュートリノ観測が実現するかもしれない。銀河宇宙線のエネルギー領域に目を向ければ、Fermi 衛星、HESS、CTA、チベット地上 array による GeV~数十 TeV 領域の  $\gamma$  線観測、国際宇宙ステーション搭載の CALET による 10TeV までの電子観測、ASTRO-H 衛星による初めての硬 X 線領域での撮像観測など、さまざまな発展が期待される。筆者の所属する高エネルギー宇宙線研究部門・高エネルギー天体グループは、昨年12月に設立されたばかりの理論・データ解析を主な手段とする小グループだが、こうした状況に対応し、研究に微力を

尽くしたいと考えている。

## 参考文献

- [1] Baade, W., and F. Zwicky, Proc. National Academy of Sci., 20, 259-263, 1934.
- [2] 代表的文献として、Blandford, R. D., and J.P. Ostriker, Astrophys. J., 221, L29-L32, 1978; Bell, A.R., Mon. Not. R. astr. Soc., 182, 147-156, 1978.
- [3] Nagano, M., and A.A. Watson, Rev. Mod. Phys., 72, 689-732, 2000.
- [4] VERITAS collaboration; モデル計算として、del Pozo, E.C. et al., Astrophys. J., 698, 1054-1060, 2009.
- [5] Lyne, A., and F. Graham-Smith, Pulsar Astronomy, Cambridge Univ. Press, pp. 309, 2006.
- [6] Atoyan, A.M., and F.A. Aharonian, Mon. Not. R. Astron. Soc., 278, 525-541, 1996; Aharonian, F., et al., Astrophys. J., 614, 897-913, 2004.
- [7] Shimada, N., et al., Astrophys. Space Sci., 264, 481-488, 1999; Treumann, R.A., and T. Terasawa, Space Sci. Rev., 99, 135-150, 2001.
- [8] Drury, L. O'C., and H.J. Völk, Astrophys. J., 248, 344-351, 1981; Malkov, M.A., and L. O'C. Drury, Rep. Prog. Phys., 64, 429-481, 2001.
- [9] Reviewとして、Terasawa, T., Shocks in the heliosphere, in *The Sun, the solar wind, and the heliosphere*, ed. by M.-P. Miralles, in press, 2010.
- [10] Terasawa, T., et al., Adv. Space Res., 37, 1408-1412, 2006.
- [11] Bell, A.R., Mon. Not. R. Astron. Soc., 353, 550-558, 2004.
- [12] 例えば Bamba, A., et al., Astron. Astrophys., 416, 595-602, 2004; Uchiyama, Y., et al., Nature, 449, 576-578, 2007.
- [13] Lagage, P.O., and C.J. Cesarsky, Astron. Astrophys., 125, 249-257, 1983.
- [14] Reviewとして、Kleckler, B., Adv. Space Res., 23, 521-530, 1999.
- [15] Fisk, L.A., B. Kozlovsky, and R. Ramaty, Astrophys. J., 190, L35-38, 1974.
- [16] Stone, E. C., et al., Science, 309, 2017-2020, 2005; Stone, E.C., et al., Nature, 454, 71-74, 2008.
- [17] McComas, D.J., and N.A. Schwadron, Geophys. Res. Lett., 33, L04102.1-5, 2006.
- [18] Drake, J.F., et al., Astrophys. J., 709, 963-974, 2010.
- [19] Fisk, L.A., and G. Gloeckler, Adv. Space Res., 43, 1471-1478, 2009.
- [20] 例 えば、Virtanen, J.J.P., and R. Vainio, Astrophys. J., 621, 313-323, 2005; GRB の場合に 2 次統計加速を考える試みとして、Asano, K., and T. Terasawa, Astrophys. J., 705, 1714-1720, 2009.

## 研究紹介

# テレスコープアレイ (TA) 実験の研究紹介

佐川 宏 行

【宇宙線研究所】

## 1. はじめに

テレスコープアレイ (TA) [1] は、AGASA タイプのプラスチックシンチレータ地表粒子検出器 (SD) と HiRes タイプの大気蛍光望遠鏡 (FD) からなる最高エネルギー宇宙線観測装置である (図 1)。前回私が TA 実験の現状報告を ICRR ニュースに書いたのは、2007年11月であった (ICRR ニュース63号)。ちょうど TA 装置の建設が終了し、TA 装置全体として観測が始まろうとしていた頃であった。今回の記事では、TA 装置の現状といくつかの TA 実験の結果を紹介する。

## 2. TA 実験

米国ユタ州ソルトレークシティ南方約200kmの標高1400mに TA の観測装置を有する。2007年11月に大気蛍光望遠鏡の3ステーションすべてが稼働を開始した。2007年2月に地表粒子検出器の主な設置が終わり、2008年2月から全アレイが稼働した。これにより、ハイブリッド観測が始まった。TA の建設は主に科学研究費補助金・特定領域研究「最高エネルギー宇宙線の起源」(平成15年度~20年度)と米国科学財団 (NSF) 予算で行われた。現在日本側は、科学研究費補助金・特別推進研究「最高エネル

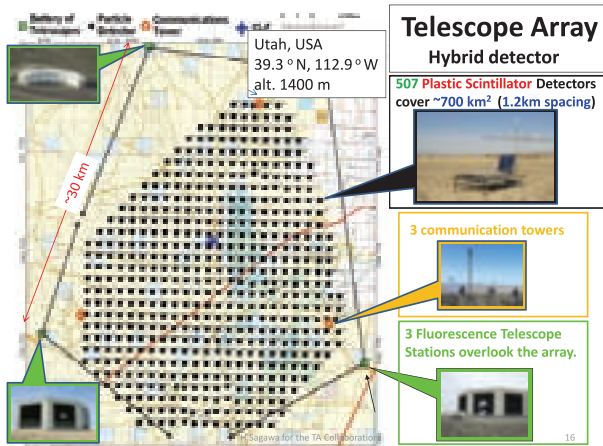


図1：テレスコープアレイ観測装置。507台の地表粒子検出器（■）アレイ、3大気蛍光望遠鏡ステーション（■）、アレイの端に3通信塔（○）、アレイの中央に中央レーザー施設（+）が配置されている。



図2：小型電子線形加速器ユニットが収納された40フィートの白色のコンテナ。BRM サイトの大気蛍光望遠鏡ステーションの100m 前方に設置した。左上に、コンテナ内にある加速器の写真を示した（電子銃付近から撮影）。

「ジー宇宙線で探る宇宙極高現象」（平成21年度～25年度）で運用している。

1台の地表粒子検出器は面積が3 m<sup>2</sup>で厚さが1.2cmのプラスチックシンチレータ2層からなる。現在、507台の地表粒子検出器が1.2kmの間隔で約680km<sup>2</sup>の領域に設置されている。

3箇所の大気蛍光望遠鏡ステーションのうち、南東（Black Rock Mesa: BRM）と南西（Long Ridge: LR）のサイトには新規望遠鏡を建設した。望遠鏡がそれぞれ12台あり、方位角方向に108度、仰角方向に3-33度の視野をもつ。北側のサイト（Middle Drum: MD）には、米国側がHiRes望遠鏡を移設した。望遠鏡が14台あり、方位角方向に114度、仰角方向に3-31度の視野をもつ。

大気モニターとして、TAサイトの中央に中央レーザー装置（Central Laser Facility: CLF）を設置した。CLFは、3つの大気蛍光望遠鏡から等距離（21 km）の場所にあり、標準光源としてレーザーを垂直射出して、側方散乱を大気蛍光望遠鏡で観測して大気モニターを行う。

BRMサイトには、大気透明度測定用のLIDARおよび雲モニター用のIRカメラを設置した。また、大気蛍光望遠鏡のend-to-endのエネルギー絶対較正のために、高エネルギー加速器研究機構（KEK）と共同で小型電子線形加速器の設計・製作を行った。この加速器で40MeVのエネルギーをもつ電子を10<sup>9</sup>個1μ秒幅で空気中に垂直射出する。全エネルギー（4×10<sup>16</sup>eV）が知れたビームによって生成された疑似空気シャワーを大気蛍光望遠鏡で観測し、望遠鏡の一括較正を行う。KEKでのビーム性能試験により、5%程度の系統的誤差で射出電子エネルギー

を抑えられることが分かった。2009年3月に小型電子線形加速器を日本から輸送して、BRMサイトの大気蛍光望遠鏡ステーションの100m前方に設置した（図2）。現地での電源設備の設置、放射線関連の手続きを済ませ、2010年6月初め（この記事執筆中）に加速器の立ち上げを開始した。

### 3. TAの観測状況

2008年5月から2010年6月までの地表粒子検出器の稼働率を図3に示す。メンテナンスおよび天候不良による不具合などで稼働率が落ちている時期もあるが、最近では平均99%の高稼働率を維持している。

BRMサイトとLRサイトの大気蛍光望遠鏡の稼働状況に関しては、2007年11月から2010年4月までの観測時間を図4に示した。大気蛍光望遠鏡の場合は、月のない夜の観測であり、冬の観測時間が長く、夏の観測時間が短い。2009年5月からLRサイトの観測はBRMサイトから遠隔操作で行っている。

地表粒子検出器および大気蛍光望遠鏡ともに順調にデータが増えている。

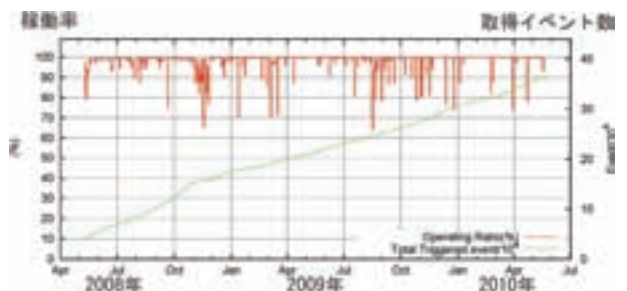


図3：地表粒子検出器の全稼働率（赤線）および空気シャワーイベントの積算取得数（緑線）。

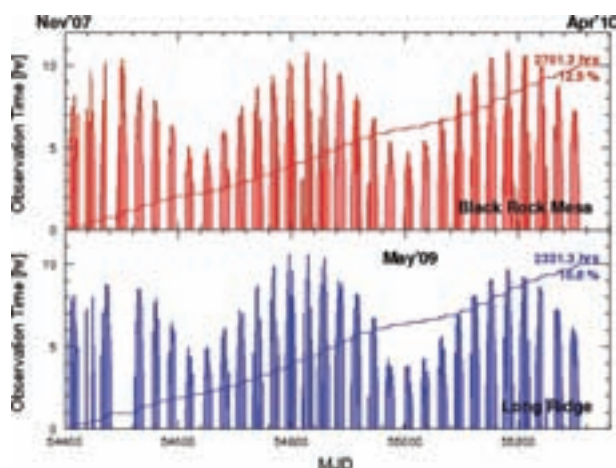


図4：大気蛍光望遠鏡の1日あたりの観測時間と積算観測時間。上図がBRMサイトの観測時間で、下図がLRサイトの観測時間を示す。横軸は修正ユリウス日(MJD)である。

#### 4. TAの最近の結果

TAの最初の結果は2009年7月にポーランドで開かれた第31回宇宙線国際会議[2]で発表された(TAのハイライトトークを含めた12の口頭発表と12のポスター発表)。内容としては、初めの半年間あるいは1年間の取得データを用いて、宇宙線の到来方向に関して発表3、空気シャワーの再構成・エネルギースペクトルに関して発表4、質量組成に関して発表1、超高エネルギーガンマ線探索に関して発表1で、その他、モンテカルロシミュレーションに関して発表3、装置関連で11の発表を行った。その中で、HiRes望遠鏡を移設したMDサイトの大気蛍光望遠鏡の単眼解析によるエネルギースペクトルの測定結果を発表した。

2010年3月の日本物理学会で、大気蛍光望遠鏡の解析に地表粒子検出器の情報を加えたハイブリッド解析によるエネルギースペクトルの測定および空気シャワーの最大発達深さ(Xmax)の解析による質量組成の測定に関して新しい結果を発表し、超高エネルギーガンマ線の探索に関して更新した結果を発表した。最初の2つの結果は、TAグループの初めての博士論文となった。

2010年7月の第35回高エネルギー物理学国際会議(ICHEP2010)[3]において、地表粒子検出器によって観測された宇宙線のエネルギースペクトルおよびその到来方向のAGNとの相関を発表した。以上の結果について以下に紹介する。

#### 4.1 ハイブリッド解析によるエネルギースペクトルの測定

大気蛍光望遠鏡単眼解析による空気シャワーの再構成の際に、空気シャワーの横広がり的情報を有する地表粒子検出器のデータ(今回の解析ではシャワーコア付近の1台の地表粒子検出器の時間情報)を加えると空気シャワーの再構成が改善する。この解析をハイブリッド解析という。また、大気蛍光望遠鏡のデータだけではaperture(観測面積×立体角)が宇宙線のエネルギーに依存するが、ハイブリッド解析の場合にはapertureが(TAの場合約 $10^{19}$ eV以上で)地表粒子検出器アレイの大きさで一定に抑えられて、apertureの系統的な誤差が小さくなるというメリットがある。2008年5月から2009年9月までの約1年半の期間に取得したBRMサイトとLRサイトの大気蛍光望遠鏡のデータに対してこの解析方法を適用し、 $10^{18.7}$ eVから $10^{19.8}$ eVのエネルギー領域でエネルギースペクトルを測定した(図5)。TAのハイブリッド解析によるエネルギースペクトルはHiResのエネルギースペクトルと一致するという結果を得た。

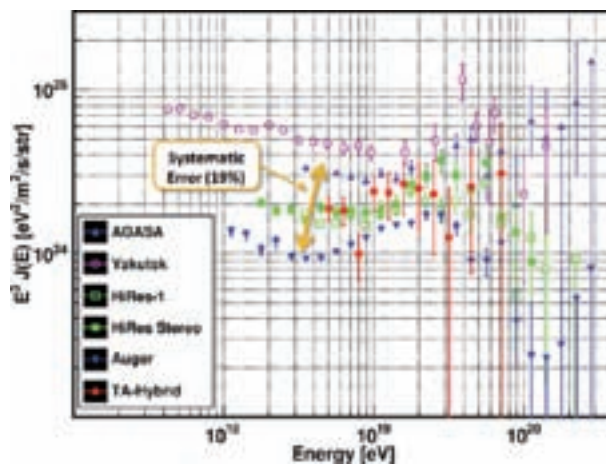


図5：いくつかの実験のエネルギースペクトル。赤印がハイブリッド解析で求めたTAのpreliminaryなエネルギースペクトルを示す。その他にAGASA(青色の上向き三角印)、Yakutsk(桃色印)、HiRes(緑色印)、Auger(青色の下向き三角印)の結果を示した。

#### 4.2 空気シャワーの最大発達深さ(Xmax)の解析による質量組成の測定

超高エネルギー宇宙線の質量組成およびそのエネルギー依存性を測定することは、超高エネルギー宇宙線の起源および伝播の解明に重要である。宇宙線が大気原子核と相互作用する断面積は入射宇宙線の種類によって違うので、空気シャワーの縦方向発達に核種依存性がある。BRMサイトとLRサイト



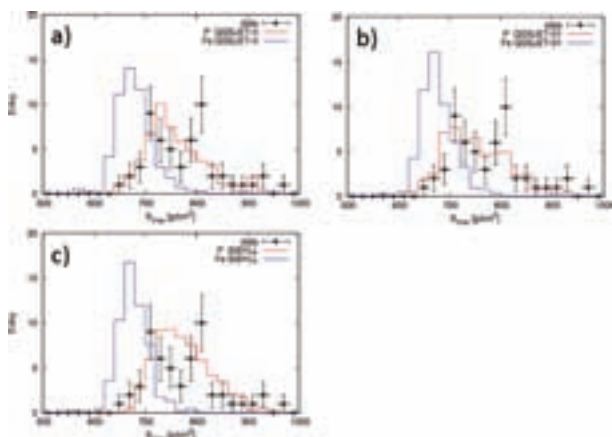


図6：TAで得られた空気シャワーの最大発達深さ  $X_{max}$  の分布。黒丸が preliminary な TA データで、青色、赤色のヒストグラムが、それぞれ陽子および鉄の場合に期待される  $X_{max}$  分布である。a) QGSJET-01、b) QGSJET-02、c) SIBYLL のハドロニック相互作用モデルに対応する。

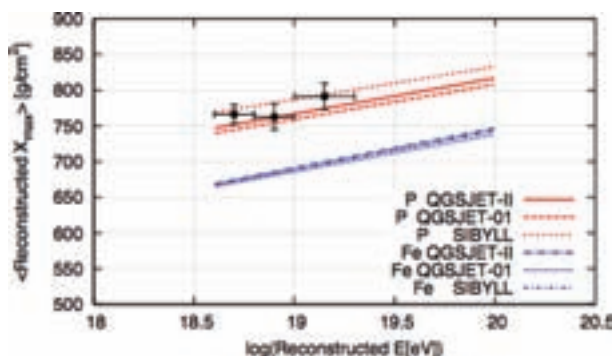


図7：平均の  $X_{max}$  と宇宙線のエネルギーの関係。黒丸が preliminary な TA データである。3つのハドロニック相互作用モデルに対して陽子の場合に期待される関係を赤線で、鉄の場合に期待される関係を青線で示した。

の大気蛍光望遠鏡で同時観測して再構成したデータ（ステレオイベント）に対して、 $X_{max}$  の分布を求めた。ステレオイベントでは宇宙線の到来方向が精度良く決まるので、宇宙線の縦方向発達を詳しく調べることができる。2007年11月から2009年10月までの約2年間に取得した  $10^{18.6}$  eV から  $10^{19.3}$  eV のエネルギー領域のステレオイベントに対する  $X_{max}$  分布を示した（図6）。赤色と青色のヒストグラムはそれぞれ陽子と鉄の場合に期待される分布である。図6a、図6b、図6c はそれぞれ異なったハドロニック相互作用モデル（QGSJET-01、QGSJET-02、SIBYLL）に対応する。図7に平均の  $X_{max}$  と宇宙線のエネルギーの関係を示した。TA で測定した  $X_{max}$

分布は超高エネルギー宇宙線が陽子であるとした場合の  $X_{max}$  分布と一致するという結果を得た。

### 4.3 MD サイトの大気蛍光望遠鏡の単眼解析によるエネルギースペクトルの測定

TA の MD サイトには HiRes で使用した大気蛍光望遠鏡を移設し、HiRes で使用したエレキを再利用している。HiRes の解析プログラムに対して、大気蛍光望遠鏡の配置やトリガーの条件の違いなど、最小限の変更を加えて解析を行った。MD サイトのデータの解析により TA と HiRes のエネルギースケールおよびスペクトルの直接の比較ができる。図8に2007年12月から2008年12月までに取得したデータを使って測定したエネルギースペクトルを示した。TA の MD サイトのエネルギースペクトルは HiRes のエネルギースペクトルと一致するという結果を得た。

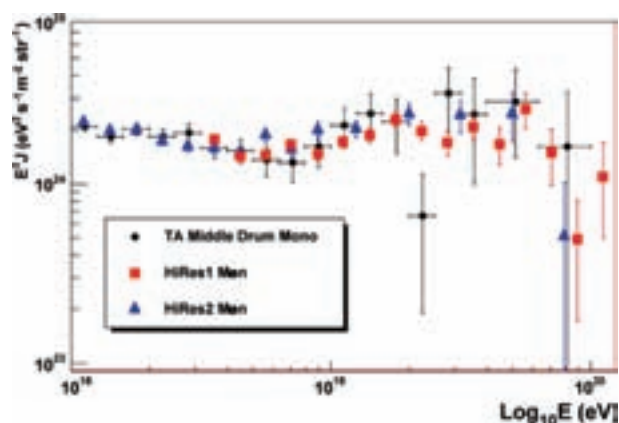


図8：大気蛍光望遠鏡単眼解析で求めたエネルギースペクトル。黒丸は HiRes 望遠鏡を移設した TA の MD サイトのデータによる preliminary なエネルギースペクトル。赤印と青印はそれぞれ HiRes-1 と HiRes-2 の単眼解析によるエネルギースペクトル。

### 4.4 超高エネルギーガンマ線の探索

最高エネルギー宇宙線の起源の解釈として、いくつかのモデルが提唱されている。活動銀河核（AGN）などの非常に活動的な領域で生成・加速され（ボトムアップモデル）、GZK 過程<sup>1</sup>を通して地球において観測される可能性がある。  $10^{19}$  eV 程度の超高エネルギーガンマ線は、GZK 過程で  $\pi^0$  崩壊から生成される可能性がある。また、未知の超重粒子の崩壊などによるトップダウンモデルでも大量のガンマ線の生成が予測される。  $10^{19}$  eV を超える超高エネルギー

<sup>1</sup> Greisen, Zatsepin と Kuz'min が  $5 \times 10^{19}$  eV を超えるエネルギーをもつ宇宙線は宇宙背景放射光子と衝突して  $\pi$  中間子を生成する反応を起こし、エネルギーを急速に失うことを予言した。この過程は3人の頭文字を取って GZK 過程と呼ばれる [4][5]。

ガンマ線は、超高エネルギーハドロンと比較すると、大気中により深く入り込んで反応を起こすと期待される。ガンマ線が入射粒子の場合に地表付近での空気シャワーフロントの曲率はハドロンの場合の曲率より大きいと予想される。2008年5月から2009年10月までの約1年半に取得した地表粒子検出器のデータに対して、空気シャワーフロントの曲率（図9）を用いて、 $10^{19}$ eV以上のエネルギーのガンマ線の流量の制限を求めた（図10）。

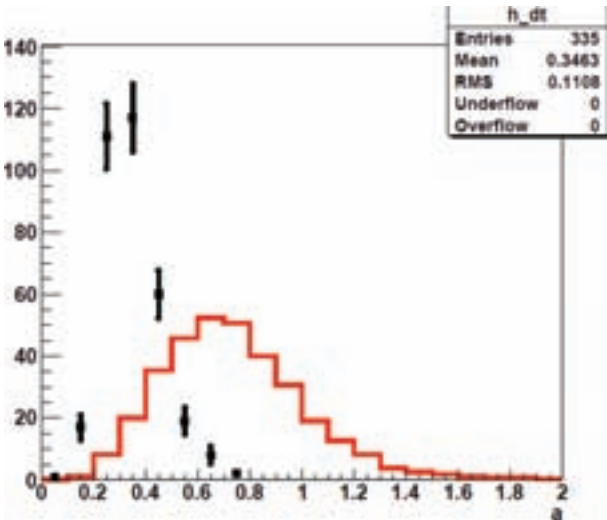


図9：天頂角が45度から60度までの超高エネルギー宇宙線のシャワーフロントの曲率（Linsley curvature parameter）分布。黒印がTAデータのpreliminaryな曲率分布で、ヒストグラムが、E-2の傾きのスペクトルで生成されたガンマ線の場合に期待される曲率分布である

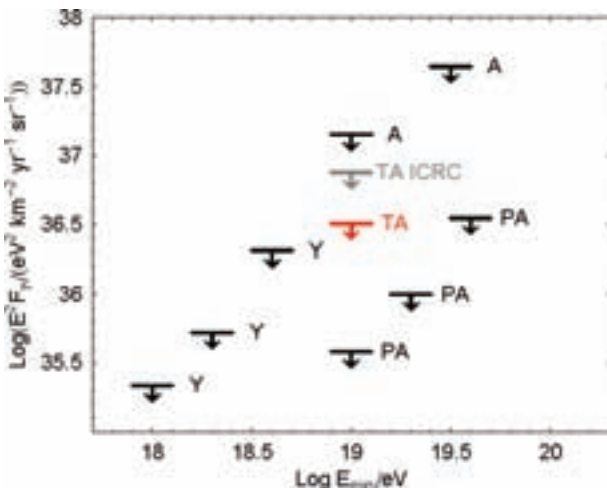


図10：超高エネルギーガンマ線の流量の上限と最小エネルギーの関係。赤印がTAデータのpreliminaryな上限。YはYakutsk、AはAGASA、PAはAugerの上限。

#### 4.5 地表粒子検出器解析によるエネルギースペクトルの決定

超高エネルギー宇宙線が大気中に入射して空気シャワーを起こす過程において、空気シャワーは横方向に広がりをもつ。地表に配置したプラスチックシンチレータ粒子検出器群を用いて、地表に到達した粒子を観測する。空気シャワーの再構成方法としては、AGASAで使われた横方向分布関数[6]を使って、粒子数の横方向分布をフィットし、シャワーコアから800mの距離における粒子数 $S(800)$ を求める。図11にフィットの例を示した。一方、空気シャワーシミュレーションと地表粒子検出器シミュレーションを用いて、シャワーコアから800m離れた距離における粒子数と一次宇宙線のエネルギーとの関係を求める。測定した $S(800)$ の値とシミュレーションで求めたエネルギーへの変換関係により、一次宇宙線のエネルギーを決定する。

まず、地表粒子検出器および大気蛍光望遠鏡両方の検出器で観測されたハイブリッドイベントに対して、地表粒子検出器を用いたエネルギー( $E_{SD}$ )を求め、ハイブリッドイベントに対して求めたFDスケールのエネルギー( $E_{FD}$ )と比較を行った（図12）。エネルギースペクトルを求める際には、FDエネルギーにスケールしたSDエネルギーを用いた。2008年5月から2010年2月までに取得した地表粒子検出器のデータを用いて空気シャワーを再構成した。求めた一次宇宙線のエネルギーをFDエネルギーにスケールし、 $10^{18.3}$ eV以上に対してエネルギースペクトルを求めた（図13）。TAの地表粒子検出器によるエネルギースペクトルはHiResのエネルギースペクトルと一致している。スペクトルの形に関しては、 $10^{18.71}$ eVと $10^{19.75}$ eVの2つのエネルギー点で折れ曲がりが見られた。 $10^{19.75}$ eV以上で観測さ

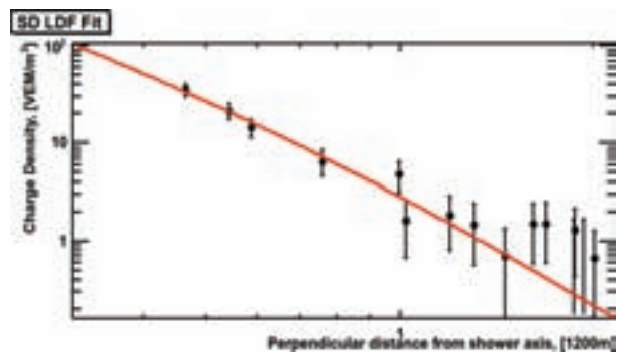


図11：地表粒子検出器を使って観測した粒子数の横方向分布のフィットの例。縦軸が単位面積あたりの粒子数を表し、横軸がシャワー軸からの距離を表す。横軸の1ユニットは1200mである。

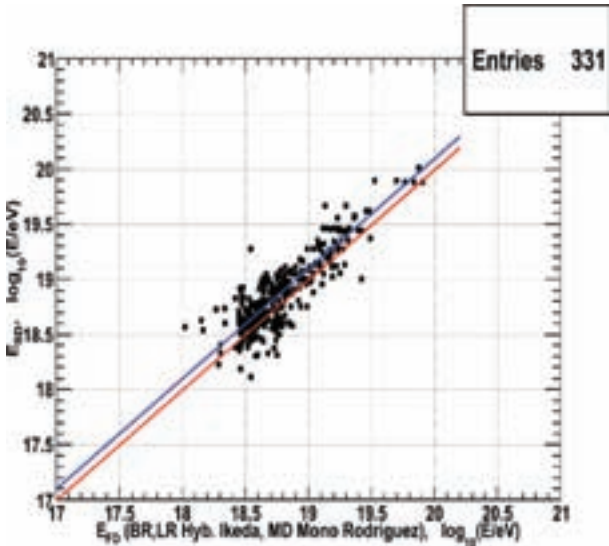


図12：ハイブリッドイベントに対して、地表粒子検出器で求めたエネルギー $E_{SD}$ の対数（縦軸）と大気蛍光望遠鏡で求めたエネルギー $E_{FD}$ の対数（横軸）の preliminary な関係。赤線が $E_{SD}$ と $E_{FD}$ が同じ場合で、best fitを青線で示した。

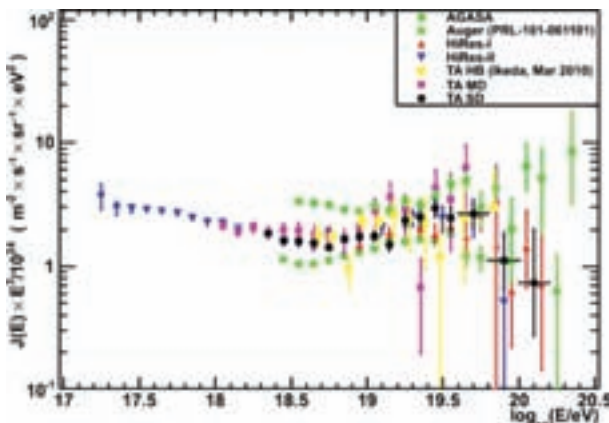


図13：TAのいくつかの preliminary なエネルギースペクトルと他の実験のエネルギースペクトル。黒色の丸印がTAの地表粒子検出器によるエネルギースペクトル。桃色の四角印がTAのMDの単眼解析で、黄色の四角印がTAのハイブリッド解析で求めたエネルギースペクトル。赤色の上向き三角印と青色の下向き三角印はHiResの単眼解析で、緑色の四角印がAuger、緑色の丸印がAGASAのエネルギースペクトル。

れたイベント数は5であるのに対して、 $10^{19.75}$ eVで折れ曲がりがなく連続的にスペクトルが続く場合に期待されるイベント数は18.4であった。3.5 $\sigma$ の significance で flux suppression が見られた。

#### 4.6 超高エネルギー宇宙線の到来方向とAGNの位置との相関

超高エネルギー宇宙線の起源を探索することは宇宙素粒子物理学における重要な課題の一つである。

GZK suppression が存在する場合には、対応する一次宇宙線の銀河系外起源を示唆する。この場合には $10^{20}$ eV付近の宇宙線は100Mpc以下の近傍の点源から到来すると期待される。Augerグループは最高エネルギー宇宙線の到来方向と近傍のAGNの位置との相関があると報告した [7]。

Veron 2006のカタログにあるAGN、QSO、BL Lacの活動銀河で、赤方偏移が $z < 0.018$  ( $\sim 75$ Mpc)のものをサンプルとして、TAで観測した宇宙線の到来方向と比較した。使用したデータは、2008年5月から2010年2月までに取得した地表粒子検出器のデータで、エネルギーが56EeV以上の宇宙線の到来方向との相関を調べた。AGNと宇宙線の到来方向の分離角度が $3.1^\circ$ 以内の宇宙線の数と観測した宇宙線の数の関係を時間系列に図14に示した。分離角度 $3.1^\circ$ 以内の宇宙線の数はバックグラウンドの数と一致しているという結果であった。

以上の preliminary なTAの結果とHiResおよびAugerのいくつかの結果を表1にまとめた。

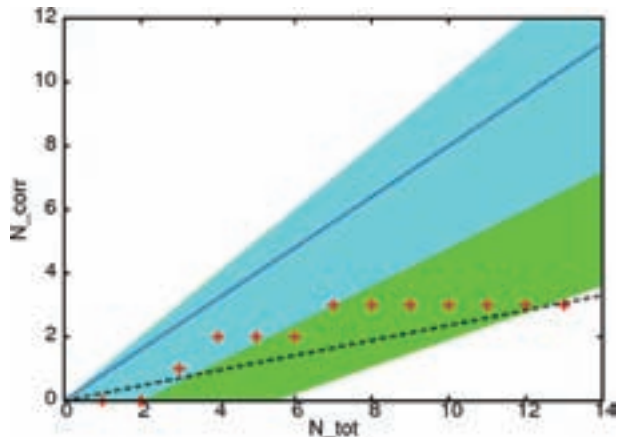


図14：到来方向がAGNの位置と $3.1^\circ$ 以内の相関がある宇宙線の数。横軸に観測した宇宙線の数を、縦軸にAGNと相関があった宇宙線の数を表し、TAの preliminary な実験結果を赤十字印を用いて時間系列に示した。黒い破線はバックグラウンドから期待される線で、青色の点線はAugerの結果 [7] から期待されるAGNとの相関数を示す。水色の領域が $1\sigma$ の領域を、緑色の領域が $2\sigma$ の領域を示す。

## 5. 展望

小型電子加速器を用いた大気蛍光望遠鏡の end-to-end のエネルギー較正を行うことによって、10%程度の全系統的誤差で空気シャワーエネルギーを測定し、超高エネルギー宇宙線のスペクトルを決定することを目指す。 $10^{18.5}$ eV付近のankleの解釈としては、銀河宇宙線から銀河系外宇宙線への遷移ある

表 1 : Auger, HiRes, TA (preliminary) のスペクトル、異方性、質量組成の結果の比較。

	Auger	HiRes	TA (preliminary)	
			FD	SD
スペクトル フラックス flux suppression	エネルギーに換算して 20%程度 HiRes より低い 有 ( $>20\sigma$ ) [9]	有 ( $5\sigma$ ) [8]	HiRes と一致 ?	HiRes と一致 (FD エネルギーにスケール) 有 ( $3.5\sigma$ )
AGN との相関	有 [7]	無 [10]		無
質量組成 ( $E > 10^{19}\text{eV}$ )	鉄? [11]	陽子 [12]	陽子	
	南天観測	北天観測	北天観測	

いは陽子宇宙線と宇宙背景放射光子との反応による電子陽電子対生成の可能性があり、これを解明するためには、質量組成を測定することが重要である。スペクトルの折れ曲がりの起源の解明および折れ曲がり位置のエネルギーの決定は、超高エネルギー宇宙線のエネルギーのキャリブレーションということでも重要である。

今後更にデータ量を増やし、超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル、粒子組成、大規模構造、AGN 以外のカタログ、auto-correlation を含めた到来方向の異方性を融合的に詳細に解析して、超高エネルギー宇宙線の起源、宇宙極高現象を解明していく。

## 6. まとめ

TA は、北半球最大の最高エネルギー宇宙線観測装置である。観測装置は順調に稼働している。これまでに以下のような preliminary な結果を得た。ハイブリッド解析、HiRes 望遠鏡を移設した MD サイトの単眼解析、地表粒子検出器の解析 (FD エネルギーにエネルギーをスケール) で、超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトルを求め、HiRes のスペクトルと一致した結果を得た。地表粒子検出器によるエネルギースペクトルでは、 $10^{19.8}\text{eV}$  以上で flux suppression がある結果を得た。空気シャワーの最大発達深さをを用いた粒子組成の解析においては、 $10^{18.6}\text{eV}$  以上の一次宇宙線の組成が陽子と一致する

という結果を得た。また、空気シャワーフロントの曲率を用いて  $10^{19}\text{eV}$  以上のエネルギーのガンマ線の流量に対する制限を得た。超高エネルギー宇宙線の到来方向と AGN の位置に関しては、相関は見られないという結果であった。これと並行して新たな結果の公表に向けての解析も進めている。

## 参考文献

- [ 1 ] <http://www.telescopearray.org/>
- [ 2 ] <http://icrc2009.uni.lodz.pl/>
- [ 3 ] <http://www.ichep2010.fr/>
- [ 4 ] K.Greisen, Phys. Rev. Lett. 16 (1966) 748.
- [ 5 ] G.T.Zatsepin and V.A.Kuz'min, JETP Lett. 4 (1966) 78 [Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 4 (1966) 114].
- [ 6 ] M.Takeda et al., Astropart. Phys. 19 (2003) 447.
- [ 7 ] J.Abraham et al., Science 318 (2007) 938  
J.Abraham et al., Astropart. Phys. 29 (2008) 188.
- [ 8 ] R.U.Abbasi et al., Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 101101.
- [ 9 ] J.Abraham et al., Phys. Lett. B685 (2010) 239.
- [ 10 ] R.U.Abbasi et al., Astropart. Phys. 30 (2008) 175.
- [ 11 ] J.Abraham et al., Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 091101.
- [ 12 ] R.U.Abbasi et al., Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 161101.

## 研究紹介

## Ashra によるガンマ線バースト光学閃光観測

太田 一陽

【宇宙線研究所】

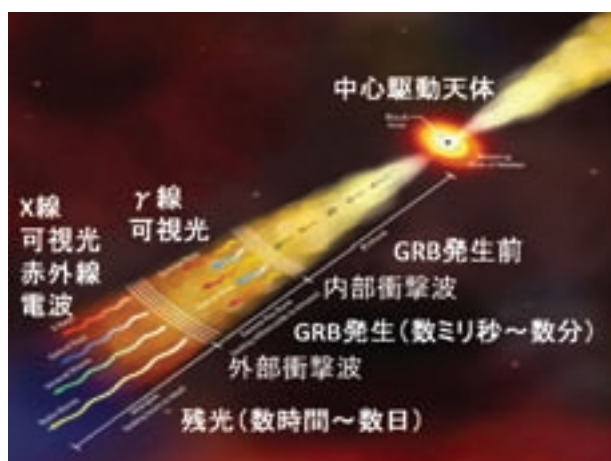
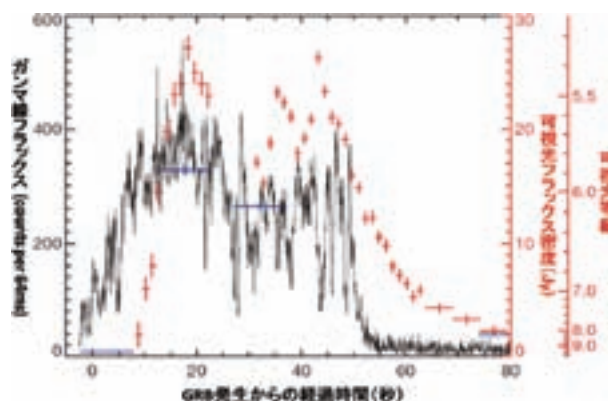
## 1. 科学的背景

ガンマ線バースト (GRB) は、近傍から遠方の宇宙で起こる大規模な爆発現象であり、数ミリ秒～数分という非常に僅かな時間に数 MeV にも達する莫大なエネルギーの  $\gamma$  線を放射する (図 1 参照)。そのエネルギーは大きい時で数 TeV にも及ぶことがある。 $\gamma$  線の放射に伴い、X 線、可視光、電波など多波長に渡る電磁波も放射することがある。爆発後、数時間から数日間に渡り可視や X 線の残光が観測され、次第に減光していき見えなくなる。GRB の起源は、候補として中性子星やブラックホールの連星の合体が考えられていたり、これまでの観測から、大質量星 (太陽質量の数十倍以上) が寿命を終えた時に起きる超新星爆発であるらしいことも分かっている。しかし、その膨大なエネルギーを生み出すメカニズムや中心駆動天体の正体は確実には解明されていない。

GRB の爆発・放射機構に関しては、科学者の間で様々なモデルが提唱されてはいるものの、未だ決定的な結論は出ていない。例えば、GRB 発生時の莫大なエネルギーと残光の時間変化を定量的に説明できる標準的なモデルとして火の玉モデルがある (図 1 参照)。これによると、GRB の放射機構は、超相対論的な高速運動をしている放射領域 (ジェッ

ト) での内部衝撃波であり、ここで  $\gamma$  線や可視光の閃光が发せられる。また、残光は相対論的な速度で飛び出した物質が周囲の星間物質と衝突して生じる外部衝撃波で加速された電子のシンクロトロン放射であると考えられている。形成された外部衝撃波は徐々に減速し、次第に減光すると同時に典型的放射波長が長くなっていき、可視光や赤外線、電波等で観測される。<sup>2)</sup>

このようなモデルを検証するには、GRB 発生時から残光まで、多波長で高い時間分解能を有する観測が必要である。その最も良い実験台となったのが、2008年3月19日に発生した GRB 080319B である。GRB は爆発時にかなり明るくなるため、非常に遠方の宇宙に出現しても、小～中口径の望遠鏡で検出できる。しかも GRB 080319B は、観測史上最も明るい GRB であり、輝度のピーク時には可視光で約 5 等級にも達し、肉眼でも見えるくらい明るくなった。この GRB は、発生直前・直後から残光が見えなくなるまでの間、世界中の宇宙・地上の望遠鏡で  $\gamma$  線、X 線、紫外線、可視、赤外、電波で観測されている。特に、 $\gamma$  線と可視で GRB 発生直後の光度の時間変化の仕方 (光度曲線) が類似しており、両者が同じ物理領域から異なる放射メカニズムで発せられた可能性が示唆された (図 2 参照)<sup>3)</sup>。また、その後の残光では、可視光度曲線で時系列に更に 2

図 1 : GRB 発生・放射機構の模式図<sup>1)</sup>図 2 : GRB080319B 発生時の  $\gamma$  線 (黒線)、可視光 (赤・青のシンボル) の光度曲線。両光度曲線が非常に良く似た形をしていた。<sup>3)</sup>

つの異なる成分が検出され、それぞれ、星間物質と衝突して生じた、爆発とは逆向きへ向かう外部衝撃波、外へ向かう外部衝撃波に相当するのでは無いかと推測された。しかし、研究者の間で、内部・外部衝撃波の有無や、衝撃波での放射過程がシンクロトロンではなく、逆コンプトン散乱、或いはシンクロトロン自己コンプトン散乱ではないかという、全く異なる解釈が同じデータに対してなされており、統一的な見解が得られていない。これらのモデル解釈に制限を与え、爆発・放射機構を解明するには、更に多くの GRB を発生直前から残光消失まで  $\gamma$  線と可視光で同時観測し、光度曲線を比較する必要がある。我々が現在遂行している Ashra プロジェクトの目的の1つはまさにこの様な観測を行うことである。

## 2. Ashra による GRB 光学観測

我々は、ハワイ島マウナロア山中腹3300m 地点で広視野高精度素粒子望遠鏡 Ashra (All-sky Survey High Resolution Air-shower detector) を運用し、夜空を常時観測することで、宇宙から来る高エネルギー素粒子の飛跡をとらえようとしている (図3参照)。この望遠鏡は、瞳径が約 1 m、視野が42°あり、人の視力に匹敵する分角の解像度で空の広い領域を観測できる。一晩中、2秒毎に4秒露出の撮像を繰り返し行っており、常に夜空を監視するため、発生した GRB が視野内に入っていれば、その直前直後の可視の閃光・残光も高い時間分解能で観測できる。また、マウナロアは年間を通し気象条件が安定しており、晴天率が高く観測には最適である。

GRB の観測は通常、発生時に Swift や Fermi などの  $\gamma$  線観測衛星によって即時にとらえられ、NASA の GCN (The Gamma-ray bursts Coordinates Network) を通しアラートが発せられる。それを受け、世界中の宇宙・地上の望遠鏡・観測施設などが多波長で同時・追観測を行う。発生前からアラート衛星と同じ方向を向き、GRB 発生前の閃光観測を目指している望遠鏡もある。我々の Ashra も2008年から今年にかけて、Swift、Fermi 衛星でアラートが出た GRB を約70個観測した (図4参照)。Swift、Fermi 衛星が GRB をとらえた時、GCN のアラートメールが我々のハワイの観測チームの PC と日本でシフトを組んでいるチームの携帯電話に届く。もし GRB の座標が Ashra の視野内に既に入っていたり、数時間後に入る場合は、日本からハワイへ連絡し、観測チームに注意を促している。Ashra の観測は満月の日以外に行われ、この満月から満月の間の約1カ月間を1シーズンと定めている。各シーズンの観測終



図3：ハワイ島マウナロア山3300m 山腹にある Ashra 望遠鏡

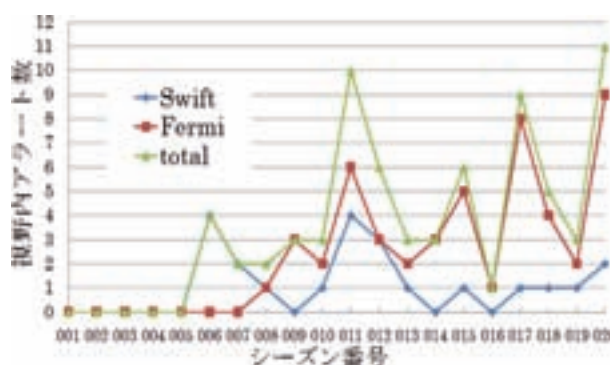


図4：これまでに Ashra がとらえた GRB の個数。

了後には毎回、データがハードディスクに保存され、宇宙線研究所の我々の研究室に届けられる。そして、別のハードディスクと計算機の2か所にコピーし永久保存される。

Ashra の視野に入る GRB のアラートが出る毎に、データがどんどん蓄積されていく。これらの大量データを処理・整約し、GRB の情報だけを抽出するため、現在解析用ソフトウェアの開発を進めている。具体的には、全ての4秒撮像画像から GRB を同定して抜き出し、その光度を測定するというものである。GRB の可視閃光が弱く、画像中に検出されていない場合は、GRB があるべき位置での光度を測ることで、可視閃光の強さの上限値を求められる。全ての4秒撮像画像で光度や光度上限値を計算し、GRB 発生時からの経過時間に対してプロットすることで、可視の光度曲線を得られる。最終的には、生データから整約済み画像作成、GRB の可視の光度曲線作成までを全自動で行えるものを目指している。

## 3. まとめ・今後の展望

Swift、Fermi 衛星の GRB 情報と Ashra の広視野、常時観測という条件を組み合わせることで、多くの GRB について発生直前直後の可視光データを得ることができ、その解析手順も確立しつつある。この Ashra データから得られる情報は、各 GRB の可視の光度曲線 (時間分解能 4 秒) である。Fermi、

Swift 衛星がとらえた  $\gamma$  線、X 線などの光度曲線、世界のその他の望遠鏡で得られた電波や赤外線との比較により、放射機構の解明、モデルへの制限が得られるであろう。更に、4 秒撮像の画像で GRB が検出されていない場合に対しても、取得した全ての GRB の画像を足し合わせることで信号/ノイズ比を向上させ、可視閃光のシグナルを検出でき、観測した全 GRB の平均的な光度曲線を描ける可能性がある。 $\gamma$  線データに対しても同様な方法で光度曲線を求めて比較すれば、GRB の平均的な物理的性質を調べられる。これは、Ashra で大量に得た GRB のデータを使ってできるユニークな解析方法である。今後更に GRB のデータが撮り足さ

れ、GRB080319B の様な非常に明るい GRB のデータも貯まっていけば、統計的に高い精度で GRB の発生起源・物理機構に関して新たな知見が得られるであろう。

#### 参考文献

- 1) Los Alamos National Laboratory  
<http://www.lanl.gov/news/index.php/fuseaction/1663.article/d/20081/id/12334>
- 2) 理科年表オフィシャルサイト  
[http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/tenmon\\_022.html](http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/tenmon_022.html)
- 3) J. L. Racusin et al. 2008, Nature, 455, 183

## 人 事 異 動

発令日	氏名	異動内容	職
H22. 3. 31	上松 義昭	定年退職	技術専門職員
H22. 3. 31	平松 尚志	任期満了退職	特任研究員
H22. 3. 31	矢吹 正教	任期満了退職	特任研究員
H22. 3. 31	清水 雄輝	任期満了退職	特任研究員
H22. 3. 31	谷本 奈穂	任期満了退職	特任研究員
H22. 4. 1	関口 豊和	新規採用	特任研究員
H22. 4. 1	黒柳 幸子	新規採用	特任研究員
H22. 4. 1	池田 大輔	新規採用	特任研究員
H22. 4. 1	多米田 裕一郎	新規採用	特任研究員
H22. 4. 1	太田 一陽	新規採用	特任研究員
H22. 4. 1	中谷 一郎	再委嘱	客員教授

発令日	氏名	異動内容	職
H22. 4. 1	手嶋 政廣	再委嘱	客員教授
H22. 4. 1	大橋 英雄	再委嘱	客員教授
H22. 4. 15	竹内 康雄	辞職	准教授
H22. 4. 16	竹内 康雄	委嘱	客員教授
H22. 4. 26	TANNER David Burnham	新規採用	特任教授
H22. 4. 30	櫻井 信之	辞職	特任助教
H22. 5. 7	RUBTSOV Grigory	任期満了退職	特任准教授
H22. 5. 28	金行 健治	死亡退職	准教授
H22. 5. 31	久野 純治	辞職	准教授
H22. 6. 9	TANNER David Burnham	任期満了退職	特任教授
H22. 7. 23	大内 正己	新規採用	准教授

### ICRR-Seminar 2010年度

- 7月16日(金) 松原 英雄 (JAXA 宇宙研)  
 「あかり」から SPICA へ：スペース赤外線天文学の現状と将来”
- 6月25日(金) 宗像 一起 (信州大)  
 “銀河宇宙線異方性：Tibet+IceCube による両半球観測の最新結果”
- 6月4日(金) 牧島 一夫 (東京大)  
 “「すぎく」による超強磁場天体マグネターの観測”
- 5月28日(金) Enrico Barausse (University of Maryland)  
 “Hamiltonian of a spinning test-particle in curved spacetime”
- 5月21日(金) 村瀬 孔大 (東京工業大学)  
 “Gamma-Ray Signals from Ultrahigh-Energy Cosmic-Ray Sources and Implications of Ultrahigh-Energy Nuclei Production in the Sources”
- 5月14日(金) 宮沢 弘成 (東京大学名誉教授)  
 “仁科芳雄研究室のミュオン研究”
- 5月12日(水) David Tanner (University of Florida)  
 “Seeking the unseen: gravitational waves with LIGO and axion dark matter with ADMX”
- 4月16日(金) 宇川 彰 (筑波大)  
 “格子 QCD の現状と将来”
- 4月15日(木) 横谷 馨 (KEK)  
 “リニアコライダーの技術の進展状況”
- 4月1日(木) 外村 彰 (日立製作所)  
 “電子顕微鏡で拓く物理”
- 3月26日(金) 清水 裕彦 (KEK)  
 “J-PARC における中性子基礎物理”
- 3月18日(木) 高橋 智 (佐賀大学)  
 “Probing the physics of the early Universe with non-Gaussianity”

### ICRR-Report 2009年度

- ICRR-Report-560-2009-22  
 “Full three flavor oscillation analysis of atmospheric neutrino data observed in Super-Kamiokande”  
 Chizue Ishihara
- ICRR-Report-561-2009-23  
 “Effects of Light Fields During Inflation”  
 Takeshi Kobayashi and Shinji Mukohyama
- ICRR-Report-562-2009-24

“A new idea to search for charged lepton flavor violation using a muonic atom”

Masafumi Koike, Yoshitaka Kuno, Joe Sato and Masato Yamanaka  
 ICRR-Report-563-2009-25

“Precise Measurement of Solar Neutrinos with Super-Kamiokande III”

Motoyasu Ikeda  
 ICRR-Report-564-2009-26

“Search for Supernova Relic Neutrino at Super-Kamiokande”  
 Takashi Iida

ICRR-Report-565-2009-27

“Numerical study of Q-ball formation in gravity mediation”  
 Takashi Hiramatsu, Masahiro Kawasaki and Fuminobu Takahashi

ICRR-Report-566-2009-28

“WIMP dark matter in gauge-mediated SUSY breaking models and its phenomenology”

Junji Hisano, Kazunori Nakayama, Shohei Sugiyama, Tomohiro Takesako and Masato Yamanaka

### ICRR-Report 2010年度

ICRR-Report-568-2010-1

“A complete calculation for direct detection of Wino dark matter”

Junji Hisano, Koji Ishiwata and Natsumi Nagata

ICRR-Report-569-2010-2

“Reevaluation of Higgs-Mediated  $\mu$ -e Transition in the MSSM”

Junji Hisano, Shohei Sugiyama, Masato Yamanaka and Masaki Jung Soo Yang

No.73

2010年9月30日

東京大学宇宙線研究所

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉5-1-5  
 TEL (04)7136-3143又は04-7136-5148  
 編集委員 佐々木真人 伊藤英男