



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) からでも御覧になれます。

スーパーカミオカンデ実験10周年！…塩澤真人	1	高エネルギー γ 線……………	11
SK 見学 ……………伊藤英男	2	高エネルギー電子、 γ 線 ……………	14
CRC 主催 宇宙線将来計画シンポジウム報告		高エネルギーニュートリノ……………	17
……………川上三郎	4	ICRR-Seminar/Report ……………	24
最高エネルギー領域の宇宙線研究……………	5		

スーパーカミオカンデ実験10周年！

宇宙線研究所 塩 澤 真 人

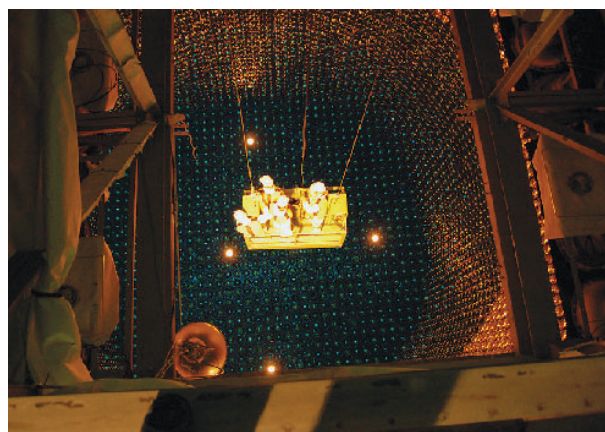
ご存じのように、スーパーカミオカンデ実験（以下 SK）が96年4月1日に実験を開始してから10年が経つ。その間、大気・太陽ニュートリノ観測によるニュートリノの質量の発見をはじめとする重要な成果をあげてきた。大気ニュートリノ振動は、その後加速器ニュートリノを用いた K2K 実験で確認されたが、SK はこの実験の遠距離検出器としても活躍した。これらと時期を重ねて、大量の光電子増倍管 (PMT) の破損事故、残骸撤去と約5,000本の PMT を再配置した部分再建、11,000本を配置した完全再建が行われた。完全再建がこの4月にほぼ終了し、6月末までの給水と入り口の48本の PMT 取り付け作業を残すのみとなっている。

去る5月14日（日）に「スーパーカミオカンデ再建完了及び観測10周年」を祝う SK 見学会、記念シンポジウム、記念祝賀会が行われた。見学会では午前、午後合わせて87名、シンポジウムに154名、祝賀会に171名という多くの参加者に集まっていた。見学会ではゴンドラを使って給水中の SK 水槽の中にゴンドラを使って進入し、当初の PMT 数に復活した SK 検出器を見てもらった。鈴木所長をはじめ神岡のスタッフがゴンドラを運転し、見学者

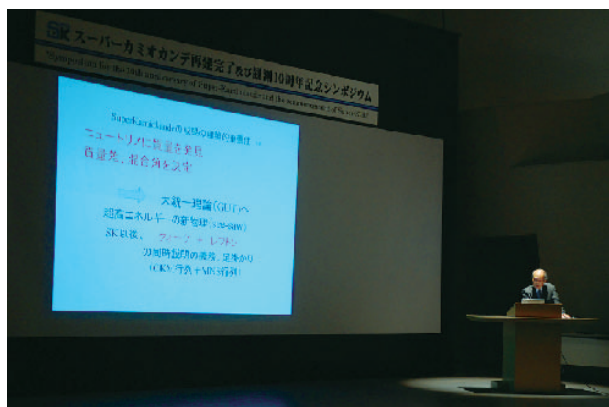
の案内を行った。

その後行われたシンポジウムでは、SK 実験の成果や、成果の意義、SK と施設の将来計画等が議論された。荒船次郎元宇宙線研究所長が、「SK は素粒子の基礎理論と宇宙創生理論の双方に必要不可欠な実験であること、また更なる成果を今後も期待する」と述べられた。

約2時間のプログラムを以下に載せる。またこのシンポジウムの発表資料は以下の WEB に掲載されているので、参照してください。



SK 水槽内部を見学する参加者（水槽上から撮影）



記念シンポジウムで講演する荒船次郎元宇宙線研究所長



祝賀会で挨拶する小柴昌俊東京大学特別名誉教授

「スーパーカミオカンデ再建完了及び観測10周年記念シンポジウム」

2006年5月14日 16:30～18:30

@富山市民プラザ

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/SK10th/>

- Results of Super-Kamiokande
スーパーカミオカンデ実験の結果
Henry W. Sobel (カリフォルニア大学アーバイン校)
- The K2K and the T2K experiments
K2K 実験と T2K 実験
西川公一郎 (高エネルギー加速器研究機構)
- Future of Super-Kamiokande
スーパーカミオカンデ実験の将来
中畑雅行 (神岡宇宙素粒子研究施設)
- Theoretical importance of the Super-Kamiokande results
理論からみたスーパーカミオカンデ実験の意義
荒船次郎 (大学評価・学位授与機構)
- Success of the international collaboration
国際共同実験の成功
James Stone (ボストン大学)

● Future of the Kamioka Observatory

神岡施設の将来

鈴木洋一郎 (神岡宇宙素粒子研究施設)

当日はシンポジウムと祝賀会において、清水潔文部科学省研究振興局長をはじめに古田肇岐阜県知事(代理)、岡村定矩東京大学理事・副学長、金子一義衆議院議員(代読)、船坂勝美飛騨市長、鈴木厚人高エネルギー加速器研究機構長のお祝いの言葉があった。また前実験代表者である戸塚洋二東京大学特別名誉教授の叱咤激励の言葉(代読)があり、小柴昌俊東京大学特別名誉教授が祝賀会の乾杯の音頭をとられた。この実験が非常に多くの方々の支援と理解、努力のおかげで実現でき、すばらしい成果をあげられたこと、また破損事故から復活できたことを改めて認識させられた。今後、更なる実験の発展、新しい成果を出さなければならないという大きな責任を感じた。

最後になりますが、今回のお祝い当日や準備期間に、宇宙線研究所事務、神岡施設事務の方々大勢が裏方として走り回ってくれました。この場を借りてお礼を申し上げます。

SK 見学

宇宙線研究所広報担当 伊藤 英 男

宇宙線研究所の皆様初めまして、5月から広報担当として着任致しました伊藤と言います。これからよろしくお願い致します。着任以前は高エネルギー加速器研究機構の理論部にて素粒子の現象論を研究しておりました。また、茨城大学教育学部で広報活

動も行っておりました。先日5月14日に神岡で行われたSK見学会に参加させて頂きましたので、その報告を皆様への挨拶と代えさせて頂こうかと思います。

広報としては是非見学しておいた方が良いとの所長

である鈴木先生の取り計らいにより、初めて神岡の大地を踏ませて頂きました。兼ねてから機会があれば是非見学してみたいと思っていたこともあり、非常に期待に胸を膨らませつつ富山空港の到着ロビーへと降り立ちました。迷子にならないかと不安な気持ちが始まり、沸き起こることもないほどスムーズに見学会に参加される皆様と合流出来、SK 行きのバスに乗り込みました。余談ですが、お昼に食べた鰯寿司は美味しかったです。

バスに揺られること約1時間、バスは小さな街並みを抜け、綺麗な川が流れる山間を走り岐阜県飛騨市神岡町の東茂住へと入りました。僕はSKを全面に押し出して町興しをしているような所を想像していたのですが、神岡鉱山に向かう途中の道沿いにあった大きな看板にSKを掲げている以外非常にひっそりとしていて少し寂しげな印象を受けました。特に研究棟と電子計算機棟は周りの風景からは切り離されたような建物ではあるものの、言われなければそれがSKと関係のある建物であることに気付くことはなかったと思います。

研究棟を過ぎて程無くバスはSKが鎮座する神岡鉱山入口へと着きました。入口からは大量の水が流れ出ており、まるで川の流れのようになっていました。話によると、今年は昨年度の大量積雪により雪解け水が異常に多いためだそうです。

バスが内部へと入っていくと、より一層大量の水が溜まっていました。まるで洪水です。その洪水を抜けついにSKへと辿り着く頃には支給されたヘルメットを被り準備万端です。見学者の人数が多いため、我々はいくつかの組に分けられ、順番に見学します。僕はF組でしたので、最初にSKの解析を行っている部屋に入って説明を受けました。その部屋には大量のコンピュータと小さなディスプレイ、そして非常に大きなディスプレイが設置されています。当日SKは注水中のため画面には説明に使用するための画像が出されていましたが、稼働しているときはその画面に信号が映し出されるのかと思うと感慨深い気持ちになりました。

説明を受け終わると次はSKの紹介ビデオを見ました。このビデオは一般の方向けに作られておりましたが、非常に分かりやすく綺麗な作りでした。

説明とビデオにより気持ちを高揚させたところで、お目当てのSK内部へのゴンドラによる見学です。今考えれば順番的に最高だったのでは、と思います。

ゴンドラは説明してくださる方を含め4人しか乗れないため、こちらも順番待ちで僕は最後の組でした。しかし、この最後の組というのは内部に降りて行くまでに内部を色々写真に撮ったりと中々有意義に過ごせたため、これまた良い順番だったと思います。

最終組の順番が回ってくると、いよいよゴンドラに乗り込みます。安全のため命綱をゴンドラに全員が付けると、ゴンドラがクレーンによって吊られます。遊園地の絶叫マシン系に弱い僕は揺れるゴンドラに少々不安を覚えながらもゆっくりと降りていくゴンドラからSK内部を見下ろしました。月並みですが、圧巻、というのが一番しっくりくる表現でしょうか。まるでガラスで出来た城のようです。もちろん今光電子増倍管はアクリル板で包まれているわけですが、言われなければアクリル板の存在に気付かないほどです。約15メートル程度まで注水されていた水はもはや青い海のような色を呈していて、周りの光電子増倍管との色の対比が絶妙な美しさを醸し出していました。

一通り説明を受けながら一生懸命写真を撮った後、ゴンドラはゆっくりと上昇していき見学が終了しました。平成13年に起きた事故による光電子増倍管の破損から5年経ち、今年から本来あるべき11,146本全てによる観測が再び始まります。一度でも内部を見学した人ならば、ニュートリノに関する様々な情報を我々に届けてくれたこの巨大な装置スーパーカミオカンデが、今後我々に更なる未知の情報を与えてくれるであろうことに科学者ならずとも期待せずにはいられない、そんな気持ちにさせられるのではないかと強く感じました。

今後この非常に興味深い観測結果がどのようなものになるのか、それを楽しみにしつつ見学を終えた僕は神岡鉱山を後にしました。このような非常に貴重で興味深い見学会に参加させて頂きましたこと、鈴木先生をはじめ関係者の皆様に厚く御礼を申し上げます。本当にありがとうございました。若輩者ですがこの経験を基にして、これからの広報活動に頑張っていきますので、どうか皆様のご助力、ご指導をよろしくお願い致します。

あまりまとまりのない文章になってしまいました。今後のSKによる科学の躍進を祈りつつSK見学会コラムの結びとさせて頂きます。本当にありがとうございました。

CRC 主催 宇宙線将来計画シンポジウム報告

大阪市立大学（CRC 実行委員長） 川 上 三 郎

宇宙線研究者会議（CRC）では、日本における宇宙線将来計画について研究者コミュニティの意見を調査、検討するため、平成15年度と16年度の2年にわたり宇宙線将来計画シンポジウムを開催した（口頭発表数は平成15年度19テーマ、平成16年度12テーマ）。この成果をもとに、平成17年度では「通常の科学研究費補助金の範囲では実現が極めて困難な大型予算を必要とする計画」に内容を絞って、それら大型研究の現状と早期実現の方法を探るため、宇宙線将来計画シンポジウムを企画した。テーマの選択は主としてこれまでの発表テーマの中から、今回の趣旨に沿った方向で各研究計画からの応募を頂き、研究内容、研究組織、準備状況などの観点を考慮して、CRC 実行委員会において選定を行った。

今回のシンポジウムでの発表の方式は、これまでの2回のシンポジウムの結果を踏まえて、まず、選択したテーマに関連した分野についての国際的なレビューを、実行委員会から依頼したレビューアーが行い、その後研究テーマの発表を行っていただくこ

ととした。

計画内容の検討やその実現性などについて十分な議論を行う方針で、最終的にこの報告で紹介されている6テーマに絞って2日間にわたり時間をかけて、各々の発表、議論を行っていただいた。シンポジウムには若手研究者を中心に50名以上の参加者があり、熱心な議論がなされた。最後に全体に関する討議と、今後の計画の進め方などの議論を行った。

本報告は基本的には各分野についてのレビューと各計画の発表内容を、担当者の責任でまとめたものである。これまでの宇宙線将来計画は宇宙線研究所を中心に実現されてきたが、独立行政法人化以降の大学付置の全国共同利用研究所という立場で、宇宙線研究所が果たす役割は必ずしも容易ではないと考えられる。このような状況下で、宇宙線コミュニティが、重力波、TA 計画以降の大型研究の早期実現をどのようにして図るのかということを考える上でも、今回のシンポジウムが少しでも役に立つことができれば幸いである。

＜CRC 宇宙線将来計画シンポジウム＞

○日時 2005年12月5日(月)、6日(火)

○場所 宇宙線研究所 大会議室（6階）

○プログラム（案）

12月5日(月)

(I) 13:30—15:30（座長：梶野文義）

0. はじめに 川上三郎（大阪市立大）

1. 最高エネルギー領域の宇宙線研究

（レビュー） 鳥居祥二（早稲田）

2. 宇宙線望遠鏡(TA) 福島正己（宇宙線研）

3. EUSO (Extreme Universe Space Observatory)

戎崎俊一（理研）

討論

-----15:30—16:00（休憩）-----

(II) 16:00—17:30（座長：垣本史雄）

4. 高エネルギー γ 線（レビュー）

吉田 滋（千葉大）

5. Super CANGAROO 計画

吉越貴紀（宇宙線研）

討論

18:00—（懇親会）

12月6日(火)

(III) 10:30—12:00（座長：松原 豊）

1. 高エネルギー電子、 γ 線（レビュー）

森 正樹（宇宙線研）

2. 高エネルギー電子、 γ 線観測計画 (CALET)

鳥居祥二（神奈川大）

討論

-----12:00—13:00（昼休み）-----

(IV) 13:00—15:30（座長：瀧田正人）

3. 高エネルギーニュートリノ（レビュー）

西嶋恭司（東海大）

4. 全天高精度素粒子望遠鏡 (Ashra) 計画

佐々木真人（宇宙線研）

5. IceCube 実験： 吉田 滋（千葉大）

討論

-----15:30—16:00（休憩）-----

(V) 16:00—17:00（座長：川上三郎）

6. 全体討論

1) 宇宙線将来計画の推進に関する全体討論

最高エネルギー領域の宇宙線研究（レビュー）

早稲田大学 理工総研 鳥居 祥二

1. 最高エネルギー観測でわかること

10^{20} eV 超えるエネルギーの宇宙線が AGASA によって観測されたことにより、それまでの「宇宙論や素粒子論の根幹にかかわる問題は宇宙線研究とは無関係である」という論調が一変し、加速器実験や他の宇宙観測では解決できない課題を解明する重要な観測と位置づけられるようになった。

最高エネルギー領域の宇宙線は、銀河磁場に曲げられることなくほぼ直進することができるため、その到来方向から加速源を同定できるという、「天文学」としての要素を持っている。電荷 Z の粒子の磁場中での軌道半径は、 $R_{\text{gyro}} = 3.7 \text{ kpc } E_{19} / Z B_{3\mu\text{G}}$ (E_{19} : 10^{19} eV を単位とするエネルギー、 $B_{3\mu\text{G}}$: $3 \mu\text{G}$ を単位とする磁場) であらわされるが、銀河面の厚さは約 1 kpc であるので、 10^{19} eV を越すエネルギーの陽子は、銀河系外の成分が寄与することになる。そして、宇宙背景放射 (2.7K) との相互作用により、スペクトルの変化 (GZK カットオフ) が観測されるはずである。しかし AGASA では、 10^{20} eV 以上の領域で 11 イベントが観測され、 4σ の有意性で GZK カットオフの存在を否定する結果が得られている。

このため、宇宙背景放射の存在と矛盾せずに AGASA の観測を説明するために、以下のような説が提案されている。1) 宇宙線源が M87、CenA など銀河系外の比較的近いところにある (到来方向は非一様になる)。2) 若い中性子星など銀河系内に宇宙線源がある (重原子核成分で、銀河ハローの磁場がかなり強い)。さらに、粒子種別を仮定した場合に、次のような様々な可能性も示唆されている。3) ガンマ線であれば、宇宙初期の位相欠陥や超重粒子暗黒物質からの生成、4) 陽子であれば、ローレンツ変換の破れ、または 5) 非常にハードなスペクトルをもつ近傍ソースの存在、さらに 6) 重原子核成分の場合の銀河系内外のソースの存在、などである。AGASA による観測では、粒子種別が難しい上に、到来方向の分布についてもまだ十分な統計が得られているわけではなく、全天を覆う観測でもな

い。このため、以上の可能性のいずれかを決めるためには、粒子識別が可能で、全天をカバーするより大規模な観測が不可欠で、Auger、TA などの計画がスタートしている。

2. 観測の現状

AGASA の結果は、地表検出器によるシャワー粒子数の観測から得られたものであるが、ユタ大学の Fly's Eye (HiRes) グループは大気中の蛍光観測によりエネルギーを求めている。その結果は、GZK カットオフの存在と矛盾しないもので、AGASA の結果とは有意に不一致が見られている (図 1)。その不一致は、観測の手法に起因するエネルギー測定誤差によるものと考えられる。たとえば AGASA のエネルギースケールを 25% 減少させると、まだ 10^{20} eV 以上の領域での 2σ 程度の差は残るものの、両者の結果はほぼ一致する (図 2)¹。勿論、いずれの観測手法 (あるいは両方とも) に問題があるのかは、この 2 つの観測だけでは決着をつけることはできない。このため、Auger 計画では南半球のアルゼンチンに $3,000 \text{ km}^2$ の面積を覆う、AGASA の 45 倍のスケールの地表検出器と大気蛍光検出を建設している。この計画の特徴は、スケールが大きいだけでなく、AGASA と HiRes に見られる系統的な誤差を避けるために、地表検出器と大気蛍光観測装置による同時 (ハイブリッド) 観測を行う点にある。

地表検出器による粒子数測定の方法では、宇宙線核種や相互作用モデルによりシミュレーション計算から得られるエネルギーが変化するという問題があるのに対して、大気蛍光観測では大気が「全吸収型カロリメータ」となり、それらに対する依存性がほとんど無いという利点がある。一方、大気中での光の減衰を正確に補正する必要があり、発光量の推定が難しいだけでなく、有効面積の計算にも誤差が生じる。このため、Auger ではレーザによる正確なモニタリングを行い、モデルフリーなエネルギーを求めることを目標にしている。そして、地表検出器とのハイブリッドイベントを用いて、有効面積の算出、エネルギー較正を行うことにより、両者の測定方法の利点を生かした観測を実現する。これまでに稼動

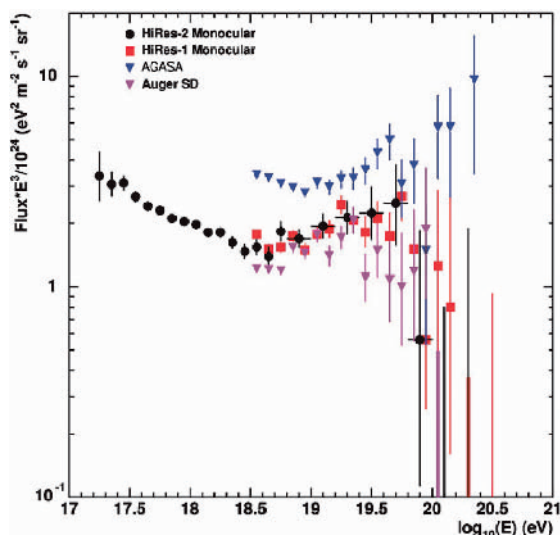


図 1：AGASA、HiRes、Auger のエネルギースペクトルの比較。差を強調するため flux に E^3 をかけて表示。

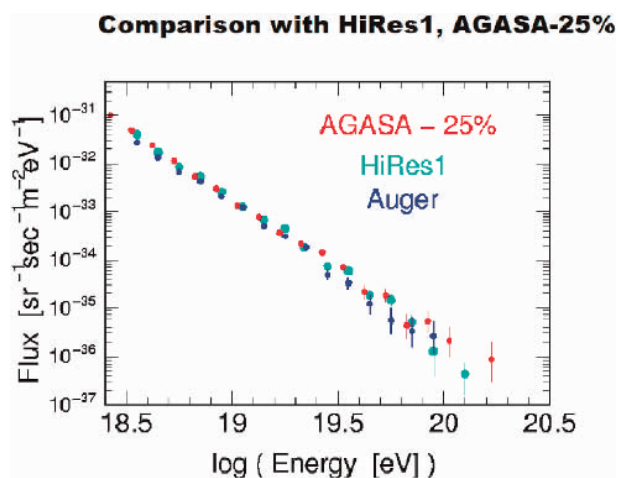


図 2：AGASA のエネルギースケールを25%下げた場合の HiRes、Auger との比較。

している検出器により、すでに AGASA の観測量に匹敵する（ $\times 1.07$ ）統計のデータが得られており、図 1、2 に示すような結果が報告されている。エネ

ルギー分解能は、現時点では30%@ 3×10^{18} eV、50% @ 10^{20} eV (ICRC2005)であるが、今後に改善される予定であり、数年のうちに GZK カットオフの有無が議論可能になるであろう。

3. 今後10年間でわかること (Auger、TA、EUSO ?)

今後の計画としては、建設が進んでいる TA と提案中の EUSO がある。TA は、Auger 同様に地表検出器と蛍光検出器によるハイブリッド観測を、AGASA の 9 倍のスケールで行う。Auger の地表検出器が水チェレンコフ光によりミューオンを検出するのに対して、TA では AGASA と同様にプラスチックシンチレータによって電磁成分を測定する。ミューオンは、相互作用や宇宙線核種の影響を強く受けるのに対して、電磁成分は相互作用の前方領域の様子に依存するので、比較的に誤差が少ない²。特に、現在計画が進行中の CERN-LHC を用いた実験室系で 10^{17} eV の陽子-陽子相互作用の前方散乱実験 (LHCf) のデータが得られれば、かなり正確なエネルギー較正が可能となる。また、北半球における測定であるので、ソースの存在が非一様であった場合に Auger とは相補的な観測となる。(Auger には北半球で南半球と同じ規模の観測を行う Auger North 計画もある。) EUSO は、ISS から大気中の蛍光観測を行うという計画である。半径200km 程度の領域を観測できるが、装置開発に加えて、雲、雷の影響などの正確な評価が観測実現の必須条件となる。表 1 には、各プロジェクトについて、測定装置とスケジュール、観測量についてまとめる。2007年の宇宙線国際会議では、Auger からは AGASA の 7 倍、TA からは AGASA に匹敵するスケールの実験結果に基づく、GZK カットオフについての報告が予定されており非常に興味深い。

表 1：各プロジェクトの装置規模、性能、観測量の比較

Project	Acceptance ($\text{km}^2 \text{sr}$)	Assumed Operation	Total Exposure till 2016	
			($\text{km}^2 \text{syear}$)	(in AGASA unit)
AGASA	160	Completed	1.8×10^3	1
HiRes@ 10^{19} eV	3,000 (d.c.~10%)	~2006	5×10^3 (Mono)	2.8
			$2.5 \times 10^3 (\times 1.7)$ (Stereo)	2.4
TA	1,400	2007~	1.5×10^4	8.3
Auger (Auger North)	7,800 (7,800)	2006~ (2009~)	8.6×10^4 (+ 6.2×10^4)	48 (+ 34)
EUSO @ 10^{20} eV	600,000 (d.c.~10%)	2012 (?) ~	3.0×10^5	167

4. GZK パズルが解決したら？

今後の観測で、精密なエネルギースペクトルの測定が進んで、GZK カットオフの存在の有無が明らかになることは間違いないと思われるが、その後も重要な課題がいくつか残されている。GZK カットオフがない場合には、いくつかの可能性を検証するために正確な粒子選別が可能で、より高統計な異方性の観測が必要である。また、本シンポジウムのテーマである、EeV 領域でのガンマ線、ニュートリノの観測は、宇宙背景放射との相互作用が存在する場合に、加速源の同定などが可能な重要な観測と

なる。いずれにしても、まだ未開拓な最高エネルギー領域宇宙線の観測は、今後ますます重要な意味をもつことになる。

- ¹ AGASA におけるエネルギー測定 of 統計誤差は $\pm 25\%$ で、主として粒子種や相互作用モデルによる系統誤差は $\pm 18\%$ である。
- ² TA の統計は主として地表検出器で得られるので、統計誤差は AGASA とほぼ同じで $\pm 25\%$ 、系統誤差は蛍光観測による校正で 10% を目標としている。

宇宙線望遠鏡 (TA)

東京大学宇宙線研究所 福島正己

テレスコープアレイ第1期検出器 (phase-1 TA) は、2003年度の科研費・特定領域研究で建設が始まった。特定領域では、最初の4年で建設、その後の2年で観測を行うことが認められており、2007年4月の観測開始を目指して建設が進んでいる。グループは日米の大学・研究所の連合であり、日本では、宇宙線研・東工大・大阪市大・千葉大・芝浦工大・近畿大・山梨大・埼玉大・KEK などが参加しており、米国からは、ユタ大・ルトガス大・ロスアラモス研などが参加している。

phase-1 TA の検出器配置を図1に示す。中央に576台のシンチレータアレイを置き、その周り3ヶ所の望遠鏡で大気蛍光を観測する。建設地は、米国ユタ州ソルトレーク市の南方200km、標高約1400m の砂漠地帯である。

アレイは1.2km のメッシュに配置し、カバーする面積は760km²で、AGASA の約9倍のアクセプタンスを持つ。大気蛍光測定 of 目的は、アレイ of 測定したシャワー総エネルギーを、カロリメトリックな手法で確認することにある。逆に、アレイは地表におけるシャワー中心位置を精度良く測定できる為、アレイによって望遠鏡のシャワー再構成精度 (特にシャワーまでの距離) を確認することができる。望

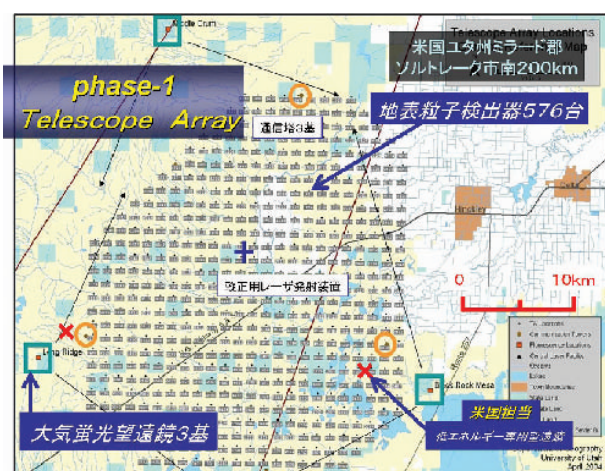


図1：phase-1 TA の検出器配置。地表アレイのコントロールとデータ収集は、アレイ周辺に建てた高さ30m の通信塔から、無線 LAN を用いて行う。望遠鏡ステーション3ヶ所とアレイ中心1ヶ所に、大気透明度測定用のレーザー装置を設置する。



写真1：建設基地周辺で、砂漠への設置を待つ地表検出器 (2006年3月)。TA 建設と運用の基地を、近隣のデルタ町 (検出器配置図の右端) に設けた。



写真2：試験設置した地表検出器（2004年12月）。検出器は、アレイ内の十数か所に設けた中間集積点までトレーラで運び、そこから環境負荷の少ないヘリコプターを使って設置することが、連邦土地管理局（BLM）から要請されている。この他にも、無線LAN・GPS タイムスタンプ・ソーラーパネルなどの使用によって、環境に最大限の配慮をした自立型検出器としている。



写真3：大気蛍光望遠鏡の第2ステーション（2006年3月）。第3ステーションには、HiRes-1望遠鏡を移設することが決まった。この為のNSF予算案が内定し、2007年春の移設完了を目指して準備が始まっている。

遠鏡にとって重要な、大気透明度や雲・気象状態のモニターについても、phase-1 で十分な運用経験を積むことができると期待している。

phase-1 TA の目的は、アレイと望遠鏡の同時観測によって、AGASA の見出した super-GZK 宇宙線とそのクラスター状の発生源の存在を、十分な信

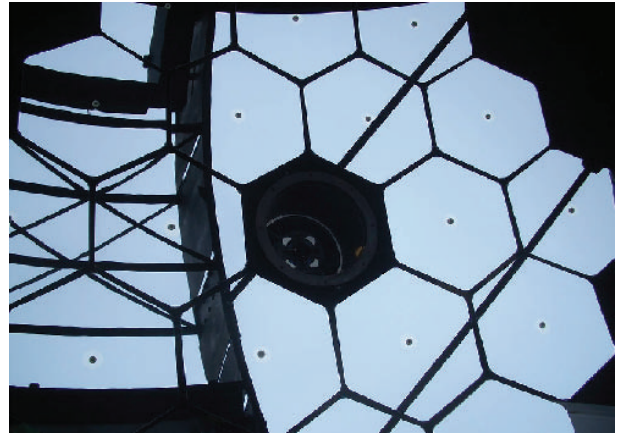


写真4：大気蛍光望遠鏡の口径3 m 反射鏡（2005年2月）。18枚の球面単位鏡からなる。各望遠鏡ステーションの内部には12基の望遠鏡を設置し、方位角108度、仰角3-34度の夜空を連続監視する。

頼度で確認することにある。その為には、地表アレイと大気蛍光望遠鏡の相互較正が必要であり、同時に、このステップを経過することで、最高エネルギー宇宙線の観測手法を確立することができると考えている。

super-GZK event やその点源の観測的確立は、第1歩である。我々の目的は、super-GZK やその点源の背後にある物理現象の解明であるが、それを達成する為には、phase-1 TA のデータは、内容の点でも規模の点でも不十分かもしれない。phase-1 後の一步としては、地表アレイあるいは望遠鏡の10倍（=AGASA の100倍）以上の単純拡張が選択肢の一つである。一方、ガンマ線同定（ μ 粒子検出）やニュートリノ検出の能力増強を目指した地表アレイの改善、到来方向精度や粒子同定能力（shower profile 測定）の増強を目指した、大気蛍光望遠鏡分解能の改善などが必要となるかもしれない。

観測開始から3年後の2010年ころまでには、phase-1 の成果が明らかになり、進むべき方向が判明するであろう。並行して phase-1 検出器の理解が進み、その精度と限界、建設と運用に必要な予算的・人的コストも明らかになるであろう。現在のTAは、既に日本と米国の緊密な共同の上に成り立っているが、将来は、Auger や EUSO 他のグループを交えた、全世界的な共同実験となることが考えられる。

JEM-EUSO 計画

戎崎俊一、上原嘉宏、大森整、川崎賀也、佐藤光輝、滝澤慶之、Mario E. Bertaina (理化学研究所)、高橋義幸 (理化学研究所、アラバマ大学)、梶野文義、沢辺俊之、井上覚太、坂田通徳、山本嘉昭 (甲南大学)、永野元彦 (福井工業大学)、柴田徹、榊直人 (青山学院大学)、井上直也 (埼玉大学)、内堀幸夫 (放射線医学研究所)、高橋幸弘 (東北大学)、新井康夫 (高エネルギー加速器研究機構)、吉田滋 (千葉大学)、水本好彦、井上進、浅野勝晃、杉山直 (国立天文台)、池田博一 (宇宙航空研究開発機構)、村上敏夫、米徳大輔 (金沢大学)、伊藤好孝 (名古屋大学太陽地球環境研究所)、長滝重博 (京都大学基礎物理学研究所)、永田真 (神戸大学)、James H. Adams (Marshall Space Flight Center, NASA)

JEM-EUSO Collaboration

概要

JEM-EUSO 計画は国際宇宙ステーションの JEM 船外実験プラットフォームに大口径超広角望遠鏡をとりつけ 10^{20} eV を超えるような極限エネルギー宇宙線が地球大気に入射したときに発生する微弱な蛍光やチェレンコフ光を捉え、その起源を探る計画である。本観測手法では、夜の地球大気をモニターする事になるため、大気中での各種発光現象の観測も行えるため、積極的に観測を行い、地球大気科学への貢献も目指す予定である。

Key words; Space Utilization, Space Station, Ultra High Energy Cosmic Ray

はじめに

Greisen、Zatsepin、Kuzmin の 3 人は 1966 年に宇宙線のエネルギーは 10^{20} eV あたりに「上限」(GZK 限界)があると理論的に予測した。1990 年代前半になって、極限エネルギー領域での宇宙線の研究は、日本の AGASA グループが山梨県明野で空気シャワーアレイによる定常的な観測を行ってきた。しかしながら、この検出器の有効検出面積が 100km^2 程度に過ぎなかった。一方で、大気蛍光法を用いた観測方法によって、HiRes グループが米国ユタで観測を行ってきた。しかし、どちらも有効検出面積が少なすぎて GZK 限界を超える宇宙線が存在するかどうかという問題に対して確定的な結論にまで至っていない。

この状況を克服するため、Auger 計画と Telescope Array 計画が進行している。Auger 計画はアルゼンチンの平原に幅 50km 長さ 70km の面積に水タンク検出器と大気蛍光望遠鏡を置く。また、Telescope Array 計画では、半径約 20km の領域にシンチレータ検出器と大気蛍光望遠鏡を置く。これらの実験は、どちらも、従来からある地表粒子検出器アレイと大気蛍光法の両方を用いたハイブリッド検出器である。それぞれの検出結果をお互いに較正し合いながら、より正確な結果を期待されている。しかし、これらの有効面積では、 10^{20} eV を超える宇宙線を年間数十例程度しか検出することができず、その起源を議論するに十分な統計精度が得られるまでにはいたらない。

JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory on the Japan Experiment module) ミッションは、宇宙から地球大気に入射した極限エネルギー宇宙線を

観測することにより、飛躍的 (AGASA の 700 倍) に大きな有効面積を実現する。3 から 5 年間のミッションにおいて飛躍的に高い統計精度をえて、極限エネルギー宇宙線の起源を解き明かすとともに、大気中での各種発光現象の謎を解明する。

JEM-EUSO 計画とその目的

JEM-EUSO 計画の前身である EUSO 計画は日・欧・米の 3 極の協力によって研究が進められてきた。これまでに日本グループは EUSO の観測主体である焦点面検出装置の開発研究、観測シミュレーションとデータ解析の準備等に貢献をしてきた。しかし米国や欧州での宇宙政策の変化によって、宇宙ステーションの欧州コロンバスに取り付ける EUSO 計画は、停滞することになった。そこで、2005 年終わりに日・米が協力して推進する JEM-EUSO 計画を新しく提案することとした。

JEM-EUSO は 2012 年頃に国際宇宙ステーションの日本実験棟 (JEM) 船外実験プラットフォーム外部観測パレットに装着される予定である。

JEM-EUSO は EUSO の研究成果を受け継ぎながら、さらに、大きな発展を目指して計画の検討を進めている。

JEM-EUSO は約 60 度の視野を持つ大口径・超広視野望遠鏡で、高度約 400km の軌道上の国際宇宙ステーションから、 10^{20} 電子ボルト (eV) を超える極限エネルギー宇宙線を観測する (図 1)。

宇宙から到来する宇宙線は、地球の大気の原子核と衝突して主に電子・陽電子からなる巨大な空気シャワーを形成する。JEM-EUSO はこの中で励起された窒素分子から放射される蛍光紫外線を 2.5μ

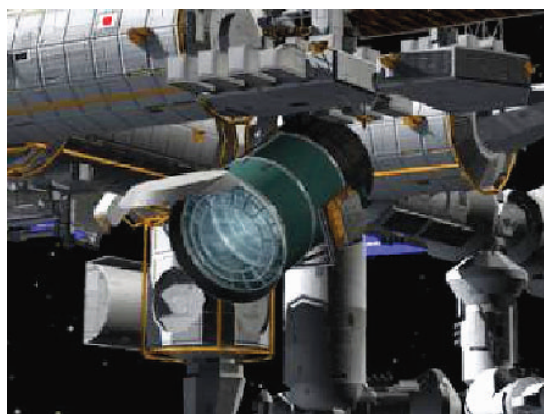


図1：国際宇宙ステーションに取り付けられたJEM-EUSO 望遠鏡（想像図）

sec の時間間隔で撮像し、空気シャワーの発達を三次元的に再構築する。その到来方向を0.2度から数度の角度分解能で決定する。半径約220kmの領域の地球大気を一度に観測する（図2）。

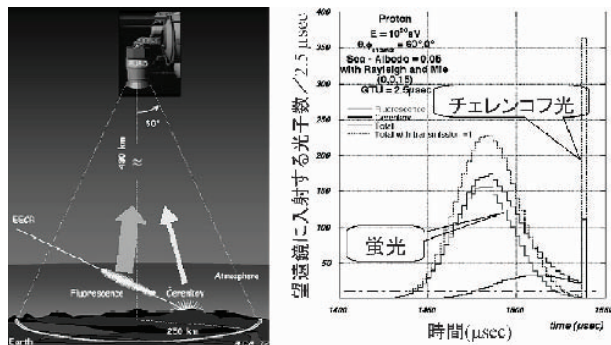


図2：JEM-EUSO の観測原理（左）と空気シャワーから放射される光の時間分布（右）

観測は夜間に限られること、大気中の雲の状態に影響を受けることなどを考慮してもアルゼンチンに建設中の Auger の十倍の感度を有し、3年間の観測で約2,000個の極限エネルギー宇宙線を検出する見込みである。有史以来、人類が観測した極限エネルギー宇宙線は20個に満たず、現在建設中の新規な地上観測装置でえられると予想されるイベント数では1年あたり100個を超えない。JEM-EUSO は極限エネルギー宇宙線研究に対して多大なインパクトを与える。

JEM-EUSO は、直径2.5mの大型曲面プラスチックフレネルレンズ2枚（軽量かつ高い耐衝撃性を達成）を用い超広角（±30度）を実現し、広大な面積に降る宇宙線空気シャワーの軌跡を時間分解能2.5 μsec と空間分解能約1km×1km（角度分解能0.1°）の三次元で撮像記録できる。宇宙観測用大型広視野高速光学望遠鏡として新しい可能性を開くものである（図3）。EUSO の焦点面（約4.9m²）には、

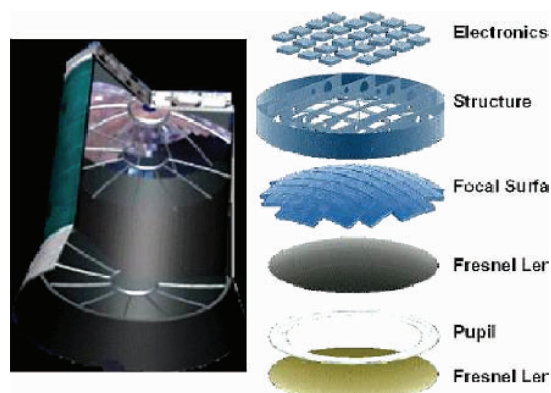


図3：JEM-EUSO 望遠鏡とその構造

約6,000本のマルチアノード光電子増倍管で構成し、その総画素数は20万ピクセルである。

JEM-EUSO の科学的目標

JEM-EUSO の科学的目標は、以下の3つである。

1. 極限エネルギー宇宙線の起源やその伝播の謎を解明する

JEM-EUSO は極限エネルギー宇宙線のエネルギー分布と到来方向分布を高い精度で測定できる。観測効率を考慮した有効面積は、建設中の Telescope Array の30倍、Auger の10倍であり、事象数を向上させる（3年間で2,000個以上）。また JEM-EUSO では全天をほぼ一様に観測でき、宇宙線の到来方向分布を精度よく決定できる。さらに、極限エネルギー宇宙線が宇宙初期に作られた重い粒子の崩壊によるものの場合、ガンマ線が多数を占めることになる。超高エネルギーガンマ線は、地球磁場と相互作用をするので、地磁気緯度によるシャワー発達の違いとしてそれを認識できる。

2. 極限エネルギーニュートリノ天文学を創始する

JEM-EUSO は空気シャワーの最大発達の大气深さを使って一次粒子の識別ができる。ニュートリノは大気中に深く突っ込んだシャワーや大気中を横向きに長距離にわたり発達するシャワー（JEM-EUSO によってのみ検出可能）として観測される。また、ニュートリノ振動によって作られたτ型ニュートリノが作る上向きシャワーも検出できる可能性がある。

3. 大気内発光現象の網羅的な研究を行う

JEM-EUSO は、地球物理学において重要な研究対象である夜間大気光、雷放電、流星などの大気発光現象をも網羅的に調べる能力を有している。

日本における2005年度の活動

1. 国内 JEM-EUSO WG の組織と運営

JEM-EUSO に関する研究活動を推進するため、

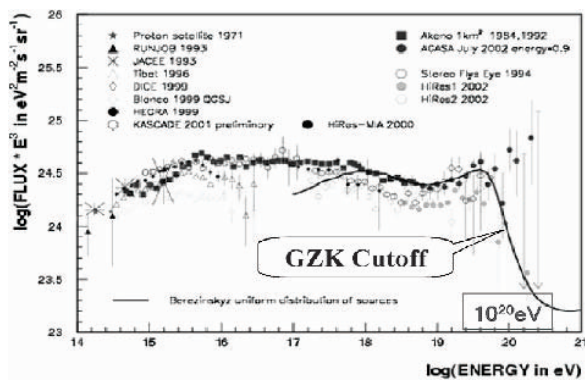


図4：宇宙線のエネルギースペクトルのデータとGZK限界が存在するときの予想スペクトル

日本国内にWGを組織し、宇宙理学委員会での承認をお願いしている。JEM-EUSO PIの戎崎が所属する理化学研究所が取りまとめ役となり、甲南大学、青山学院大学、埼玉大学などのメンバーが参加し、分担して研究を推進している。

また、新たに日本の責任となった、信号処理エレクトロニクス、望遠鏡の構造、JEM-EFへの取付に関する諸検討などの詳細な検討を実施している。

だいたい一月に一回の割合で、研究連絡会議を実施し、各グループ間の調整を行っている。

2. End-to-End シミュレータ開発

鉄、陽子、ガンマ線による空気シャワー生成プログラムの開発と、望遠鏡光学系のレイ・トレーシングおよび焦点面での光子検出の再現シミュレータの開発を行った(図7)。現在は、さらに、ニュートリノに対応する作業を続けている。

【埼玉大・理研】

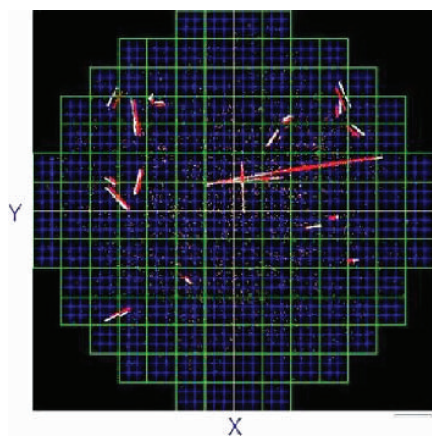


図7：シミュレータに作成した 10^{20} eVのイベントの焦点面での像を20個重ね書きしたもの

3. 気球実験

地球大気の夜光強度は月齢や雲量により大きく異なる。この値の変動幅を定量的に推定しておくことは、JEM-EUSOにとって重要である。このため、気球に光電子増倍管を搭載し実際にバックグランド光測定を行う実験を行った。2005年8月29日、18時に、宇宙科学研究所の三陸大気球観測所より放球し、月のあるなし、雲のあるなしの条件を含む夜光データを取得することに成功した(図8)。

【青山学院大・理研・甲南大】

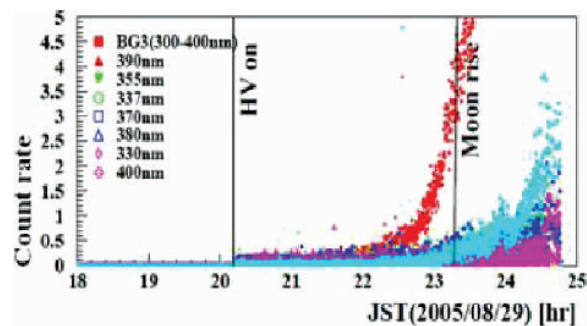


図8：気球によって測定した夜光

まとめ

JEM-EUSO ミッションは、宇宙から地球大気を観測することにより、極限エネルギー宇宙線の観測に対して飛躍的(AGASAの700倍)に大きな有効面積を実現する。その3年間のミッション中、約2,000個の極限エネルギー宇宙線事象を観測する。この飛躍的に高い統計精度は、永年の謎である極限エネルギー宇宙線の起源を解き明かすために大きな役割を果たすであろう。また、極限エネルギーニュートリノについては、これまで全ての実験グループが上限値を与えてきただけであるが、JEM-EUSOは極限エネルギーニュートリノ望遠鏡としての能力も有しているので観測が期待される。JEM-EUSOは、その巨大な検出面積により定量的な検出が可能なので、今後の極限エネルギー宇宙線観測の標準的手法になると考えられる。また、観測期間終了後に観測装置を自由衛星化してさらに高い軌道へ投入することや、大気を斜めに観ることにより有効面積の更なる拡大など、新たな展開の可能性も検討している。

高エネルギーγ線 (レビュー)

未提出 千葉大学 吉田 滋

地上ガンマ線観測の将来計画

東京大学宇宙線研究所 吉 越 貴 紀

TeV 領域のガンマ線天体物理学は、約15年前に
かに星雲からのガンマ線信号が発見されて以来急速
な発展を遂げ、現在では天体数が30を超えた。これ
らについて多波長のエネルギースペクトルを作成し、
超新星残骸や活動銀河核からの非熱的放射のメカニ
ズムを知ることが出来たことは、宇宙線起源の謎に
迫る大きな前進である。多波長スペクトルですぐ隣
の領域 (GeV) を担う GLAST 衛星の打ち上げを2
年後に控え、今後 TeV 領域をどのような方向に発
展させるか？ まだ途中段階であるが、この課題に
ついて検討を行なった結果を報告する。

1 将来の4つの方向性

10m 口径解像型大気チェレンコフ望遠鏡4基か
らなる CANGAROO-III 望遠鏡システムが完成し、
2004年3月から稼働を開始した。同様のコンセプト
を持つ計画として H.E.S.S.、MAGIC、VERITAS が
既に稼働または建設中であり、これらの望遠鏡でガ
ンマ線検出感度は%Crab レベルに到達した(図1)。
しかし、解像型チェレンコフ望遠鏡が発明されてか
らまだ約15年しか経っておらず、その有効利用の余
地は十分にある。また、ガンマ線衛星と上記地上ガ
ンマ線望遠鏡の観測可能エネルギー領域の間には依
然未観測領域(unopened window)が存在する。このよ
うな状況を考慮すると、次世代の地上ガンマ線望遠
鏡が発展すべき方向は以下の4つであろう^[2]。

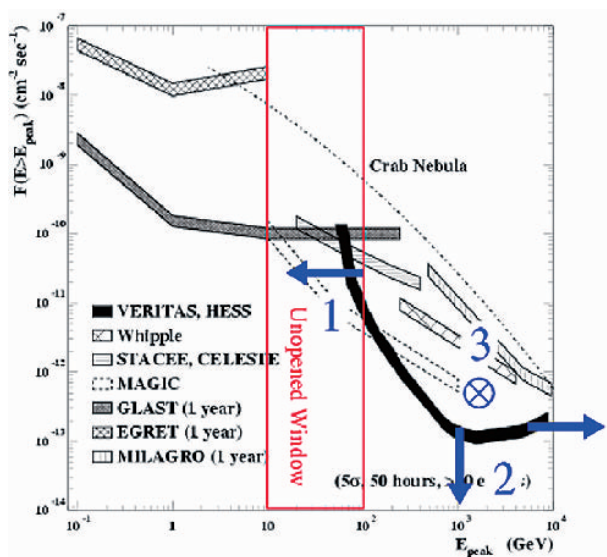


図1. ガンマ線観測実験の検出感度^[1]。⊗は時間軸を意味する。

表1. 将来の4つの方向性に有利な観測天体または物理。

天体／物理	大口径／ 高地観測	大有効面積	広視野	高角分解能
AGN and EBL	○	○	○	○
パルサー	○			
EGRET Source	○			
Dark Matter	○	○		
宇宙線起源	○	○		○
GRB			○	
Unknown Source		○	○	○

1. 大口径化または高地観測（低エネルギー側への感度の拡張）
2. 大有効検出面積（感度の改善または高エネルギー側への拡張）
3. 広視野（トランジェント天体のモニター）
4. 高角分解能

それぞれの方向性において有利な観測天体または物理の中で、主なものを表1にまとめる。MeV～GeV 領域のガンマ線源 (EGRET sources) が既に300近く存在することから、TeV 領域の天体数を増やすには低エネルギー側への拡張が有利である。TeV ガンマ線は銀河系外背景光 (EBL) により吸収されるが、その断面積はエネルギーと共に増大するため、AGN 等の遠方のガンマ線源を調べるにも低エネルギー化が有効だ。銀河系内宇宙線の起源はシェル型超新星残骸の詳細なエネルギースペクトルと形態が測定されるようになったことから^[3]、今後急速に理解が進むと予想される。しかし、knee 領域まで超新星残骸起源であることを確かめるには10TeV 以上の高エネルギー側のスペクトルを調べる必要がある。

主にシステムデザインの側面から各方向性を検討した結果を以下にまとめる。

1.1 大口径望遠鏡／高地観測

Unopened window におけるガンマ線観測を実現するには、大気チェレンコフ光の集光率を上げるために望遠鏡の大口径化または高地における観測が必要である。しかし、望遠鏡のコストは口径の2.7乗に比例して上昇するという経験則があり^[4]、コストを抑えるための工夫が大口径化においては本質的であ

る。反射回数の増加によって集光率が減少するためこれまで TeV 領域では採用されなかったカセグレン型望遠鏡について、大気チェレンコフ望遠鏡の光学性能を落さずに軽量化する方法をレイトレースシミュレーションで調べた。その結果、現在の大気チェレンコフ望遠鏡と同程度の集光精度（スポットサイズ）を得ると同時に望遠鏡の支持機構を軽量化出来る解があることがわかった^[5]。しかし、集光率とコストのトレードオフに関しては更なる調査が必要である。

1.2 大有効検出面積望遠鏡

ガンマ線起源の大気チェレンコフ光は、半径約150 m の範囲に広がって地上に降り注ぐ。この半径程度かそれ以上の間隔で望遠鏡を多数配置することにより、ガンマ線観測の有効面積を上げることが出来る。しかし、検出感度を改善するためにはステレオ観測で宇宙線原子核またはミューオン起源のバックグラウンドを除去することが不可欠であり、配置間隔には上限がつく。大気チェレンコフ光の密度は遠方に行くに従い冪関数的に減少するため、口径の大きい望遠鏡を採用することにより配置間隔を広げ、望遠鏡の基数を減らすことが出来る。従って、有効検出面積（または感度）は望遠鏡の口径と配置間隔の関数として決まる。

大気チェレンコフ望遠鏡アレイのコスト当りの有効検出面積を最大にする解を、単純な光学系を用いたモンテカルロシミュレーションで調べた。その結果、 $\text{コスト} \propto D^{2.7}$ (D は口径) を仮定した場合、口径と配置間隔を共に小さく抑えた方が性能対コスト比を上げられることがわかった^[2]。高エネルギー側へ感度を拡張する場合、上記の結果から口径は5 m で十分である。CANGAROO-III の10m 口径望遠鏡が1基当り約3億円であることから、5 m 口径望遠鏡1基のコストは3億円 $\times (5\text{ m}/10\text{ m})^{2.7} \sim 5$ 千万円と非常に粗く見積もることが出来る。ガンマ線検出感度を一桁改善するには100基規模のアレイが必要であり、この場合実験の総額は数十億円程になる。

1.3 広視野望遠鏡

現在の大気チェレンコフ望遠鏡は視野が4°程度であり、光学望遠鏡、電波望遠鏡よりかなり広いものの、GRB等のトランジェント天体を観測するには不向きである。広視野望遠鏡はこれを補う唯一の方向性であり、同時に全天サーベイを効率良く行なえるという利点を持つ。例えば視野60°程度の望遠

鏡を考える場合、反射光学系では死角が大きくなり過ぎるため屈折光学系を採用する必要がある、EUSO型の光学系を採用することが自然な解となる。

上記の広視野望遠鏡の長所を生かすためには、同時にガンマ線検出感度が現状より良い必要がある。従って、望遠鏡のアレイ化およびステレオ観測は、この方向性の場合にも必須である。

1.4 高角分解能望遠鏡

高角分解能の望遠鏡を作ることは天文学の本流であり、同時に検出感度も改善することから、表1の全ての天体／物理について興味深い結果をもたらすことが期待出来る。TeV 領域で大気チェレンコフ望遠鏡を用いる場合、角分解能を改善するには望遠鏡単体当りの集光率を上げつつ、半径約150m の範囲内に多数の望遠鏡を並べる必要がある。HEGRAグループがモンテカルロシミュレーションで調べた結果によると^[6]、望遠鏡の基数の平方根に比例して角分解能は改善される。従って、角分解能を一桁改善するには100基規模の大気チェレンコフ望遠鏡アレイが必要である。

2 まとめ

大気チェレンコフ望遠鏡を用いた次世代地上ガンマ線観測実験について、可能性のある4つの方向性を検討した。まだ検討は途中段階であり、引続き調査を進めていく。また、H.E.S.S.、MAGIC、VERITASの各グループも既に次期計画に向けて検討を開始しており、大規模な国際協力の可能性も同時に検討していく必要がある。

参考文献

- [1] T.C. Weekes *et al.*, *Astropart. Phys.*, 17, 221 (2002).
- [2] T. Yoshikoshi, *Proc. of Towards a Network of Atmospheric Cherenkov Detectors VII* (Palaiseau), 359 (2005).
- [3] F. Aharonian *et al.*, *Astron. Astrophys.*, 449, 223 (2006).
- [4] *Enabling a Giant Segmented Mirror Telescope for the Astronomical Community*, <http://www.aura-nio.noao.edu/book/> (2002).
- [5] 湯川洋平, 修士論文(東京大学) (2006).
- [6] W. Hofmann *et al.*, *Astropart. Phys.*, 12, 135 (1999).

高エネルギー電子、ガンマ線（レビュー）

東京大学宇宙線研究所 森 正 樹

国内には宇宙線電子観測の長い伝統があり、ECC、BETS や最近の南極周回気球実験（PPB-BETS）による10GeV から TeV 領域の観測で世界をリードしてきている。さらに、国際宇宙ステーションでは CALET による10TeV までの観測が計画されている。これらについては鳥居氏の発表を参照されたい。この稿では、飛翔体を用いた宇宙電子・ガンマ線の観測について最近の国外の状況を紹介する。

1. 高エネルギー電子

宇宙線の起源・加速に関する研究には、銀河磁場によって曲げられるため、到来方向からソースを同定できないという困難がある。高エネルギー電子の場合は特に、エネルギー損失と発生してから地球に到達するまでの伝播を考慮に入れなければならないが^[1]、以下のような特徴を利用して、方向性を用いるガンマ線観測とは異なる方法でソースの同定が可能である。

- 1) 高エネルギー電子は、シンクロトロン放射と逆コンプトン散乱によりエネルギーを失うので、エネルギー損失の割合がエネルギーの2乗に比例する。その結果、高エネルギー電子ほど寿命が短く、拡散過程で伝わる距離が短くなる。その結果、TeV 領域ではソース候補が限られ、エネルギースペクトルに特徴的な構造が現れ、その形状によりソースの同定が可能になる。
- 2) 遠方のソースによる寄与は、各ソースの和として観測される。このため、個々のソースの情報を得ることはできないが、加速に関する平均的情報がえられる。特に、近傍ソースの寄与がない場合には、エネルギースペクトルにカットオフがあらわれるので、距離や加速エネルギー上限に対する制限がつけられる。
- 3) 地上で加速器ビームによる較正を行えるため、信頼度の高い測定器の製作が可能である。
- 4) 欠点としては、高エネルギー側でエネルギースペクトルが急になるため、陽子などのバックグラウンドが増大するほか、フラックスそのものが減少することにより統計が集まりにくいことが挙げられる。このため、1 TeV を超えるところまでの観測を十分な精度で行うには、ASPEN のワークショップ “Below the Knee” (2005)^[2] でも報告されているように、 $1.5\text{m}^2\text{sr yr}$ 以上の

観測量が必要となる。

ATIC^[3] Louisiana State U. などのグループが Silicon 電荷検出器・プラスチックシンチレータ飛跡検出器・BGO カロリメータを組み合わせた $0.24\text{m}^2\text{sr}$ の装置を用い、南極周回気球で軽元素を主目的として観測している。2000年と2001年の観測から1 TeV までの電子のスペクトルが得られ、600–800GeV 付近の feature が示唆されている。

PAMELA^[4] Roma U. などのグループにより TRD・0.48T 永久磁石・飛跡検出器・解像型カロリメータを組み合わせた $20.5\text{cm}^2\text{sr}$ の装置が、ロシア Resurs-DK1 ロケットで2005年12月に打ち上げられるとされていた。（その後2006年6月とされている。）3年間のフライトにより2 TeV までの電子のスペクトルを精度よく測るとしている。

AMS-2^[5] S. Ting などのグループは、0.865T 超伝導磁石を擁する Silicon 飛跡検出器と、TRD・RICH・カロリメータを組み合わせた $0.5\text{m}^2\text{sr}$ の大型の装置を国際宇宙ステーション（ISS）に設置し、3年間以上運用しようとして準備を進めてきたが、米国のスペースシャトル計画の変更による打ち上げ回数削減に伴い、打ち上げの見通しは立っていない。

CREST^[6] Michigan U. などのグループは、Stephens らが20年以上前に提案した、高エネルギー電子が地球磁場中で発する複数のシンクロトロン X 線を同時に検出して電子を測定する方法を実現する装置により、気球で試験観測を行っている。

2. 高エネルギーガンマ線

（TeV 領域は別に議論されるため、ここでは話を GeV 領域に限る。）ガンマ線の到達距離は宇宙論的に大きく、寿命は無限大で、電荷を持たないため磁場を感じず直進する。このエネルギー領域では標的+飛跡検出器と、電子陽電子対のエネルギーを測るカロリメータからなる Pair Compton Telescope が1960年代より用いられてきた。この場合、ガンマ線の到来方向は、電子・陽電子の運動量ベクトルの和の方向として定まるが、その決定精度は1) 対生成の粒子放出角度の不定性、2) 飛跡の決定精度及び、3) 飛跡検出器中のクーロン多重散乱によって制限される^[7]。エネルギー分解能はカロリメータでほぼ決まる。1991年から2000年まで Compton ガンマ線

天文台衛星の EGRET 検出器により271個のガンマ線天体が報告され^[8]、このエネルギー領域の研究が一気に進んだ。

AGILE^[9] イタリア独自の小型天文衛星ミッションとして企画され、Silicon 飛跡検出器を用いてコンパクトながらも EGRET を超える性能が期待されている。打ち上げは当初より遅れ、2006年1月とされていた。

GLAST^[10] Stanford U. などにより開発された Silicon 飛跡検出器を用いた NASA の大型ガンマ線ミッションで、 $140^\circ \times 140^\circ$ の広い視野と 2 m^2 の面積を持ち、全天走査型の観測を行って数千個のガンマ線源をとらえようという計画である。打ち上げは2007年8月とされている。

参考文献

- [1] For an example: Reinhard Schlickeiser, “Cosmic Ray Astrophysics”, Springer (2002)
- [2] <http://www.cosmic-ray.org/conf/index.html>
- [3] <http://atic.phys.lsu.edu/aticweb/>
- [4] <http://wizard.roma2.infn.it/pamela/>
- [5] <http://hpl3tri1.cern.ch/>
- [6] <http://pandora.physics.lsa.umich.edu/crest/>
- [7] Carl E. Fichtel and Jacob I. Trombka, “Gamma-Ray Astrophysics”, NASA Reference Publication 1386 (1987)
- [8] R.C. Hartman et al., Astrophys. J. Suppl. 123, 79 (1999)
- [9] <http://agile.mi.iasf.cnr.it/Homepage/index.shtml>
- [10] <http://glast.gsfc.nasa.gov/>

高エネルギー電子、ガンマ線観測計画 (CALET)

早稲田大学理工総研 鳥居 祥二

1. 計画の目的

宇宙の構造や個々の天体現象の総合的理解のためには、電磁波（可視光、赤外、X線など）の観測に加えて、宇宙線や γ 線の観測による、非熱的なプロセスの解明が不可欠である。しかしながら、これらの高エネルギー領域での観測は、フラックスが少ないことに起因する測定の高難しさもあって、その起源すら未解決なものが大半である。特に100GeV以上の電子や γ 線は観測量が少なく、今後飛躍的な発展が期待されている。我々が提案する、国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験モジュール曝露部 (JEM/EF) における CALET (CALorimetric Electron Telescope) 計画では、高エネルギー電子、 γ 線に加えて、陽子、原子核成分や太陽変調を受けた電子の観測も合わせて実施する。これらの宇宙線諸成分の観測により、未解決な重要課題である宇宙線源の同定と加速機構及び伝播機構の解明、各種の γ 線放射源における生成過程の研究、暗黒物質の探索、太陽磁気圏に関する研究を包括的に実施し、高エネルギー宇宙の未知な姿を明らかにすることを目指す。

2. 観測計画

2.1 電子観測 (1 GeV~10TeV)

高エネルギーの電子成分は、陽子や原子核成分と異なり純粋に電磁的過程（シンクロトロン放射と逆コンプトン散乱）のみでエネルギーを失う。これらの過程では、エネルギー損失の割合がエネルギーの2乗に比例するため、1 TeV 以上の電子は寿命が10万年以下になり、この間に拡散過程で伝播できる距離は2—3 kpc 以下に限られる。その結果、CALET が観測を目指す TeV 領域の電子には、近傍ソースの影響がエネルギースペクトルに明確に現れる。また、到来方向に20%程度の異方性が生じることにより、加速源の同定が確実になる。さらに、CALET は、暗黒物質の探索が数10GeV から数 TeV の領域で、優れたエネルギー分解能によって可能であり、図1に示すように、例えば Kaluza-Klein 暗黒物質が生成する電子（+陽電子）の検出が十分に期待できる。

10GeV から数 TeV の領域では、観測データの高精度化（数%以内のフラックス誤差）により、衝撃波加速モデルや伝播機構のパラメータの決定に必要なエネルギースペクトルを確定する。現在、超新星爆発における電子加速のパラメータ（加速時間、上

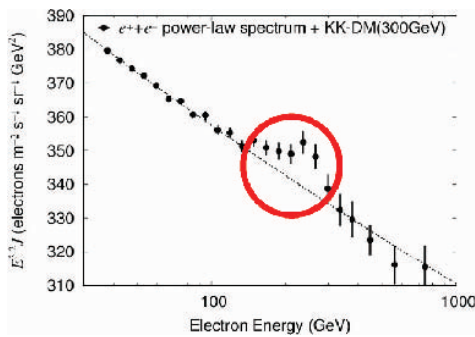


図1：Kaluza-Klein (KK) 暗黒物質で生成される陽電子 (Cheng et al., PRL, 2002) により、CALET で期待される電子+陽電子スペクトル。

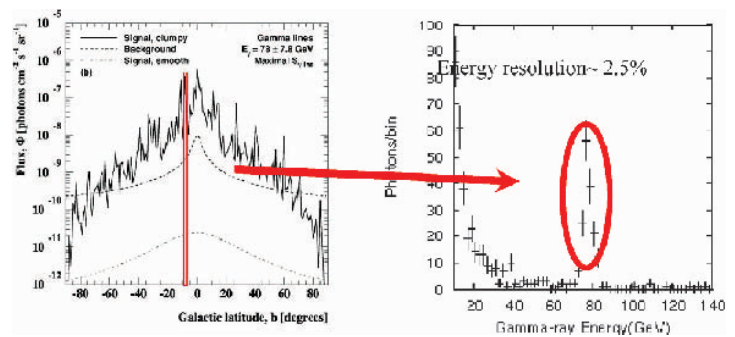


図2：SUSY Dark Matter の対消滅で生成されるライン γ 線 (Bergstrom et al., PRD, 2001) に対する CALET での観測予測。

限エネルギー、スペクトルの冪など)と銀河内伝播のパラメータ (拡散係数、ハローの厚さなど)を仮定した理論計算との比較により、宇宙線加速機構の統計的な解明が可能となる。

2.2 ガンマ線観測 (20MeV～数 TeV)

高エネルギー γ 線は、電子による逆コンプトン散乱や陽子の核反応で生成されるので、加速源での電子、陽子の様子を反映する。このため、 γ 線観測との比較により加速源と伝播後の電子について時間進化を含む総合的理解が可能となる。また電子起源と陽子起源の γ 線の分離により、電子と陽子の加速源を見分けることも可能である。CALET は天頂から約45度の視野 (FOV) と1.0m²の有効面積を持つので、姿勢制御なしにISS軌道上での1年間の観測で、ほぼ全天のソースについて約50日間の観測が可能である。検出感度の点ではGLASTに劣るが、数10GeVを超える高エネルギー領域でエネルギー分解能が格段に優れているので、エネルギースペクトルの折れ曲がりやライン γ 線の検出性能は優れている。この結果、数10GeVからTeV領域での有力な暗黒物質候補である、SUSY粒子の対消滅で発生するライン γ 線の検出が、図2に示すように、理論的予測の範囲内で十分に可能である。CALETは2012年頃からの観測を想定しており、GLASTとの同時観測やその後の変動天体の観測で相補的な役割を担う。

2.3 陽子、原子核観測 (数10GeV～1,000TeV)

陽子、原子核成分の数10GeV～1,000TeV領域での観測により、特に超新星における衝撃波加速モデルの検証に有効な、核種の電荷に依存したエネルギースペクトルの折れ曲がりの有無を検証する。さらに、2次核と1次核の比 (B/Cなど)のエネルギー依存性を、これまで衛星実験でのデータがほとんどない数10GeV～10TeVの領域で測定して、宇宙

線の銀河内伝播モデル (Leaky Box Model など)について確定的な答えを求める。100GeVを越えるような高エネルギー領域では、宇宙線が伝播する総物質質量が数g/cm²になるため、このような2次核の観測は、大気によるバックグラウンドの影響が深刻になり、気球実験では長時間の観測が実現しても非常に難しい。

3. 観測装置

JEM曝露部に搭載を計画しているCALETは、これまでの気球実験で成果を挙げている宇宙線シャワー解像型検出器 (BETS) と同じ原理の、シンチファイバーと鉛からなるシャワー可視化型カロリメータ (IMC) と、無機シンチレータ (BGO: bismuth germanate) を用いた全吸収型カロリメータ (TASC) から構成される。気球実験では、エネルギー領域が1TeV以下に限られおり、IMCのみによる電子、 γ 線選別とエネルギー測定で十分であったが、1TeV以上の領域で電子の観測を正確に行うためには、バックグラウンドとなる陽子の相互作用による擬似イベントの除去を $\sim 10^6$ 倍の精度で行う必要がある。これは、TASCの付加により陽子除去性能をさらに向上させ、エネルギー分解能を高めることによって達成できる。このため、大型化と装置重量の増大が避けられないが、CALETの総重量は2,500kg以下であり、曝露部大型ペイロード用取り付け点への搭載およびH-II補給機 (HTV) での輸送のいずれについても、インタフェース適合性を持つ。CALETの構造と各部の構成要素は、気球実験の経験、加速器 (CERN-SPS) によるビームテストとシミュレーション計算によって最適化されている。なお、ミッション期間は、3年間以上を想定している。図3に、JEM/EFに設置されたCALETの予想図をしめす。

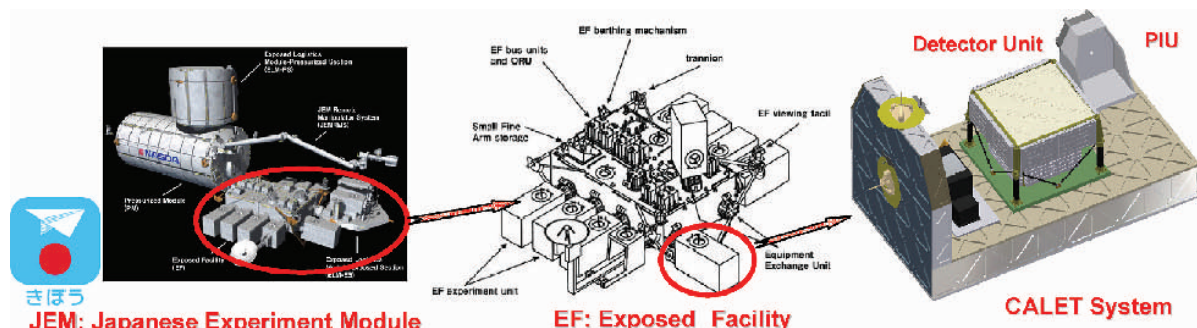


図 3：JEM/EF と CALET の概念図。検出器は専用パレットに搭載され PIU で曝露パレットと結合する。

4. 開発体制

開発チームはこれまでの国内のメンバーに、国外からの参加者を加えて有機的に構成する。国内のチームは、三陸における BETS 実験や南極周回気球実験（PPB-BETS）に参加し、気球観測に豊富な経験を持つ JAXA/ISAS、早稲田大学、神奈川大学など研究所、大学を中心とするメンバーと参加企業の研究者により構成する。これらメンバーは、これまでに気球実験だけでなく CALET の装置要素開発や JEM 曝露部とのシステムインターフェース設計を実施し、日本宇宙フォーラムの地上研究により、十分な成果と実績をあげている。ISS に特有の開発要素を検討するために、曝露部の初期利用ミッションである MAXI の開発経験を持つ研究者も参加し、メーカーとの共同開発を実施している。国内の開発チームは、基本的にこの体制を継承し、JAXA プロジェクトとして承認された後には、ISAS にプロジェクトチームを設置する。現在までに、国外から CALET へ参加を表明しているチームは、米、伊、中の 3 カ国から 7 機関であり、NASA/Goddard、Firenze University をはじめ、いずれも衛星実験に豊富な経験と知識を持つ国際的にも評価の高いチーム

である。各国のチームは、日本側で AO の発動があれば、担当する開発経費について自国の宇宙機関への申請を行う予定である。

5. 開発スケジュール

CALET プロジェクトは、JAXA のプロジェクトとして認定され、初期開発予算を受けて開発を始めることを目指しており、外国チームの各国での予算獲得（科研費などの競争的資金の獲得も検討）により、総額で 30 億円程度（JAXA 予算約 20 億円、国外約 10 億円程度）の経費で装置製作を行う予定である。打ち上げ時期としては、MAXI、SMILES が終了する 2012 年頃を想定しているため、2006 年度に開発をスタートできれば、6 年間の開発で搭載機器の製作が十分に可能である。ミッション部以外のバス部とパレット部に関する経費は、曝露部および HTV とのインターフェースに関わる部分であるため、ISS 利用促進に関わる経費（補助金）から支弁されることを期待している。CALET は、AMS の実現が実質上困難となったため、ISS における唯一の宇宙線観測計画であり、その科学的評価を含めて、宇宙線コミュニティからのサポートと、できるだけ多くの研究者の参加を強く期待している。

高エネルギーニュートリノ（レビュー）

東海大学理学部 西 嶋 恭 司

1. なぜ高エネルギーニュートリノか？

これまでの宇宙の観測は、電波から X 線に至る幅広い波長領域での電磁波による観測、特に熱的放射の観測を主に発展してきた。一方で宇宙線や高エネルギーガンマ線などの観測が近年急速に進歩し、

宇宙の高エネルギー非熱的現象に新しい知見が得られつつある。しかしながら、良く知られているように、宇宙は TeV 以上の超高エネルギーガンマ線に対して透明ではない。また宇宙線は電荷を持っているため磁場によりその経路が曲げられ、源を特定できない。

これらに対してニュートリノは、経路を曲げられることもなければ吸収されることもなく、宇宙空間を飛んでくる。したがって、ニュートリノをプローブとすることは、非常に遠くの初期宇宙の探索が可能であること、密度の高い環境の中の不透明な、あるいは隠れた源を見ることができること、という他に類を見ない利点がある。もちろんそれらの源をポイントバックすることが可能である。ニュートリノはまた、自然の加速器によって加速された高エネルギーの陽子などが、周りのガスや光子と衝突することによって引き起こされるハドロニック過程によって生成される。したがって、電磁過程で作られる場合もあるガンマ線と違って、その検出は宇宙線加速の明白な証拠を与える。また、GZK ニュートリノ、Z-burst、トポロジカル欠陥をはじめとするトップダウンニュートリノ、WIMP の対消滅や磁気単極子からのニュートリノなど、様々な高エネルギーニュートリノ検出の予言がなされている。以上のように、高エネルギー宇宙ニュートリノの観測は、宇宙物理学や素粒子物理学に多大な新しい知見を与え得る可能性を持つ。

2. 高エネルギーニュートリノ検出実験の世界の情勢

高エネルギーニュートリノ検出のテクニックとして代表的なものは、海底の水や南極の氷を用いたチェレンコフ望遠鏡である。地球の裏側からやってきたニュートリノが検出器の下で反応し、作られたミューオンが検出器内を走るときに発するチェレンコフ光を光電子増倍管で捕らえる。パイオニアとしてのBAIKAL 実験に続き、AMANDA は、19ストリング677本の光電子増倍管を深さ1,500m から2,000m の氷に直径約400m の同心円状に埋め、拡散ニュートリノの上限値として 10^5 GeV で $2.6 \times 10^{-7} \text{ EeV}^{-2} \text{ GeV sr}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ を得た他、WIMPs からのミューオンフラックスの上限値、点源からのミューオンフラックスの上限値など、着実に実績を積み上げている。

現在計画中あるいは建設中の新しいプロジェクトとして、IceCube、ANTARES、NESTOR、NEMO などがある。ANTARES は、3本の光電子増倍管からなる層を約15m 間隔で25層持つ長さ450m のストリングを、深さ2,500m の海底におよそ60—75m 間隔で12本沈める計画で、2007年完成を目標に建設が始まっている。NESTOR は直径32m のフロアを30m 間隔で12フロア、計144本の光電子増倍管からなるタワーを3,800m の海底に沈める計画を持っており、2003年に1フロアのテスト行った。NEMO は長さ20

m のアームを40m 間隔で16アーム、計64本の光電子増倍管からなるタワーを多数3,340m の深さの海底に沈める案を持っており、フェイズ1として2006年までに2,000m の深さにタワー1本を沈める予定である。一方彼らは、それぞれのプロジェクトとは別に、後で紹介するIceCubeに対抗すべく1km³ ニュートリノ望遠鏡建設のためのコンソーシアムを構成し、2010年からの観測開始を目指して動き始めている。

チェレンコフ望遠鏡以外では、例えばニュートリノが引き起こす電磁カスケードシャワーに伴って放出される電波を検出する試みが計画されている。ANITA プロジェクトは氷の中で発生した0.2—1.2 GHz の電波を上空のバルーンで検出しようとするもので、30日間のフライトで 10 EeV で $10^{-7} \text{ EeV}^{-2} \text{ GeV sr}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ の感度を目指し、1年後の放球を予定している。また、電磁カスケードに伴う約20kHz の音波を検出する方法も検討されており、ANTARES やIceCube に受信機を併設する計画がある。超高エネルギーニュートリノが作り出す空気シャワーは、最高エネルギー宇宙線観測用に作られた装置で検出することが可能である。Auger プロジェクトは3,000 km² 超の水タンクアレーに大気シンチレーション望遠鏡を加えたハイブリッドタイプの空気シャワー観測装置で、1—100EeV の水平空気シャワーに対して $10^{-8} \text{ EeV}^{-2} \text{ GeV sr}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ の感度がある。他にTA、EUSO、Ashra（後述）などが空気シャワーを捕らえるタイプの検出器である。

以上の計画が進行すれば、数年～10年以内に、拡散ニュートリノの感度は、EeV 領域でいわゆるWaxman-Bahcall の上限値より一桁以上小さいフラックスまで到達し、点源に対するニュートリノ起源のミューオンフラックスの感度は、 $10^{-17} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ に達することが期待される。

3. Ashra 計画と IceCube 計画

ここで検討される高エネルギーニュートリノ望遠鏡計画は標記の2計画であるが、それぞれのプロジェクトの詳細は別項に譲るとして、ここでは簡単な記述に留める。Ashra は、広視野と高角度分解能の両方を兼ね添え、TeV 領域ガンマ線、PeV 領域ニュートリノ、EeV 領域宇宙線を同時に観測しようという多目的な望遠鏡計画である。イメージインテンシファイアにCMOS センサーを組み合わせ、イメージ遅延と移動電子シャッターを導入した野心的な設計になっている。ただ、ニュートリノシャワーを明確に同定することは容易では無いと思われる。

る。一方 IceCube は、AMANDA の経験と実績を基に、125m 間隔で80本のストリング、計4,800本の光電子増倍管を深さ1,450m から2,450m の南極の水の中に埋め込み、1 km³ (1 Gton) の体積を持つニュートリノ望遠鏡を作る計画で、10⁷eV から10²⁰eV のすべてのフレーバーのニュートリノを検出できるようデザインされている。Waxman-Bahcall の上限値より2桁下までの感度があり、EHE ニュートリノに対しては、GZK ニュートリノの予想フラックスと同程度の感度を持っている。

4. まとめとコメント

高エネルギーニュートリノの検出は非常に重要で

あり、より強力に推進すべきであると考え。世界の現状は、プロトタイプ検出器モジュールが運転され、次世代 km³スケールあるいはそれ以上の検出器のための R & D と建設が進行しつつある。そんな中、Ashra は非常にチャレンジングな技術開発を伴いそれ自体は大いに進めてもらいたい、フルサイズの計画実現のためには、ニュートリノ望遠鏡として本当に機能し得るかどうかさらなる研究が要求される。一方 IceCube は、克服すべき技術開発はあるものの、その実現性が着実に確認されつつあり、最初の km³ ニュートリノ望遠鏡として既に建設が始まっている。でき得るならば、日本のさらなる貢献が望まれる。

Ashra プロジェクト

東京大学宇宙線研究所 佐々木 真人

Ashra が目指すのは、特にガンマ線バースト (GRB) などの突発天体を含む超高エネルギー (VHE) 宇宙線起源の同定である。Ashra は検出器群を集中配備したステーションを有し、ほぼ全天で大気発光をトリガー同期して精細撮像を行う。これにより、指向性を持つチェレンコフ光と等方に拡散する蛍光の双方の大気発光現象を通じ、空気シャワー (AS) の精細像を互いの効率を犠牲にすることなく撮像できる。また、撮像部における配光を工夫し、AS 像のバックグラウンドとなるべき星光も数秒の露光を繰り返すことによって、光学天文望遠鏡のように撮像する。Ashra は、ほぼ全天で起こった突発的な VHE 粒子と光の放射を待ち構え、“現行犯”として発見する監視型検出器である。

Ashra は“個眼”である42度の視野直径を持つ単位検出器を複数台集中配置して、“複眼”であるステーションを図1のように形成する。限られた資源を最大限活かしつつ、Ashra の革新的な検出方法を実証するため、Ashra 第1計画では3種類のステーション：全天の80%を覆う視野を持つ主ステーション (Main)、天頂から42度下までを主ステーションと80m の距離でステレオ監視する高高度視野の副ステーション (SubH)、さらに、水平から上42度までを主ステーションと32km の距離でステレオ監視する低高度視野の副ステーション (SubL) を配備する (図1、図2)。ハワイ島マウナロア中腹、高度

3300m の場所の使用許可をハワイ州政府から2005年7月1日より取得し、本格的に主ステーションを

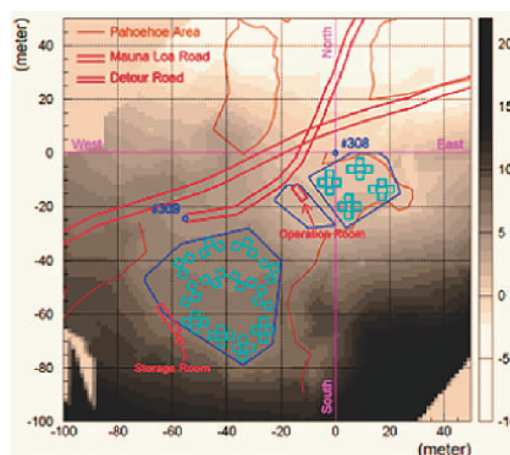


図1：マウナロア観測地における単位検出器配置



図2：ハワイ島における Ashra 第1計画の主ステーションと副ステーション配置

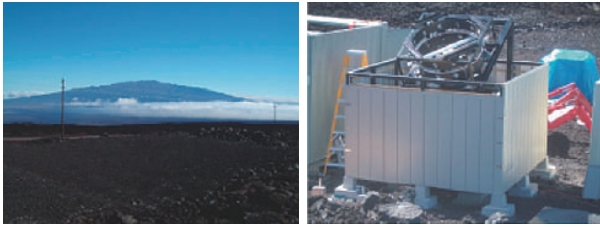


図3：マウナロア観測地から見たマウナケア(左)と建設中の Ashra 集光器と格納庫(右)

建設・調整中である(図3)。Ashra 第2計画では、主ステーションと高高度視野の副ステーションを組にし、その3組を30kmの三角形頂点をなす3箇所のサイトに配置する。これにより、VHEガンマ、ニュートリノ、核子のステレオ観測事例の統計において世界と競合できるようになる。

Ashra 第1計画における単位検出器は、同視野を監視する高(低)高度視野4(3)台の集光器からなる。集光器で集光撮像された画像を重ね合わせて感度を向上させる。集光器にはベーカー・ナン光学系の補正レンズを独自に非球面化した光学系を採用した。その構成としては：①3枚アクリル板を直接切削後、研磨した補正レンズ(1.0~1.2m径)、②曲げガラス板を研削研磨しアルミ蒸着した後、増光膜処理した部分鏡7枚を調整台に載せた球面鏡(2.2m径)、③光学系の焦点球面を光電面とする光電レンズ撮像管(0.5m径)を支持する6軸制御によるスチュアートプラットフォーム機構、④現場での組み立てを容易にするため、チャンネル鋼材をネジ止めした架台機構からなる(図4)。大気発光や星光の発光スペクトラムに拠らずRMS解像度0.8分角が全視野42度に渡り安定に得られることが光線追跡により、分かっている。また、マウイ島ハレアカラにて10ヶ月

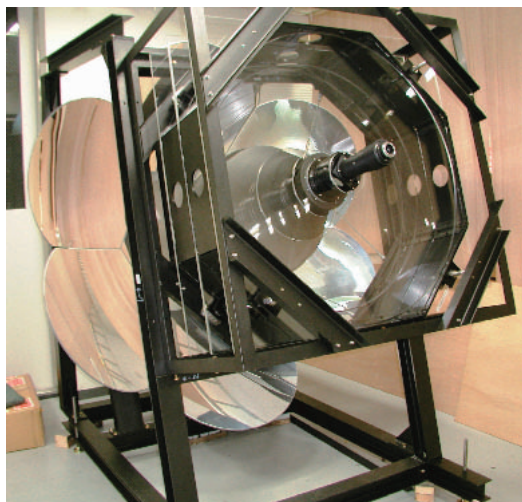


図4：Ashra 集光器

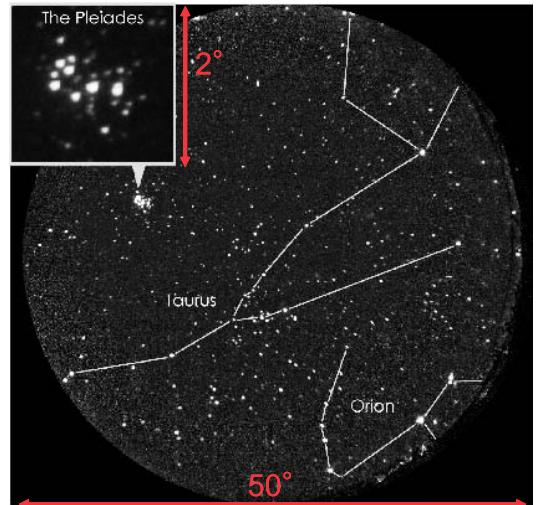


図5：2/3スケールで撮像した星像。おうし座やスバルが見える。50度の視野と分角精度が実現されている。

にわたり、2/3スケールの小型集光器を用いた試験観測を行い、50度視野で分角精度の光学性能(図5)に加え、耐久性や稼動効率も問題ないことが確認された。特に、GRB041211など4例のGRBに対して光学閃光のクロス観測を行い、Ashraによる広視野監視の優位性を実証した。建設進行中のマウナロア観測地では、部分鏡の設置調整後、平行光線に対して0.4分角のRMSスポット精度が確認された。アクリル補正レンズ他、集光器全体を調整後、土星など明るい星を用いた撮像RMSスポットは1.2分角である。空調によって集光器格納庫は温度を±1度程度に保ち、光学性能を安定に保持することも確認した。これらにより、Ashraの広角高精度光学系の概念は現地で十分示された。さらに、マウナロア観測地における夜光バックグラウンドもAshra集光器を用いて測定し、H.E.S.S.グループによるナミビアとラパルマにおける結果とよく一致している(図6)。Ashra集光器の焦点面に置かれる

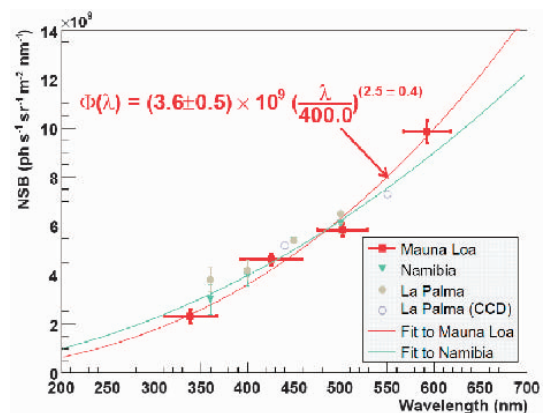


図6：マウナロア観測地における夜光バックグラウンド波長特性。

光電レンズ撮像管(20インチ径)も製造中であり、420ナノメートル以上の長波長成分を除去できる多層膜UV透過光学フィルターを入力ガラス面に塗布する開発も良好な結果を得ている。この Ashra 集光器 1 台の感度限界等級は、4 秒露光で14等、30秒露光で15～16等と見積もられ、これまでの GRB 残光観測から、集光器 1 台あたり年 1 GRB 以上の頻度で衛星とのクロス観測が期待できる。その発展として、既知天体との照合を計算機制御にて高速に行い、Ashra が光学閃光を衛星とは独立に観測し、アラートの配信も行う予定である。これにより、孤児 GRB の発見や中大型光学望遠鏡との共同による突発天体の物理機構解明など興味深い観測研究が可能となる。

Ashra では、新規に開発された光電撮像パイプライン(PIP)と呼ばれる装置(図7)によって、継続時間がナノ秒、マイクロ秒、秒のオーダーである大気チェレンコフ光、大気蛍光、光学閃光を独立に高感度・高精細撮像することが可能となる。PIP は、リレーレンズ、近接型光電撮像管、および光スプリッターから成る。解像度を落とさず、光電レンズ撮像管の出力像を高精細撮像の半導体センサーまで伝送すると共に、内蔵された近接型光電撮像管によって、輝度増倍と出力蛍光の残光による光遅延を行い、トリガー判定に足る輝度と時間の確保を実現している。光電レンズ撮像管の出力粗像をリレーレンズと光学ファイバー束(FOP)を経由してトリガー装置まで伝送する。トリガー装置はチェレンコフ光と蛍光の2種のトリガー系が装備され、集光器に装着された PIP から FOP にて伝送されてきた複数の粗画像を光結合分岐器によって1粗画像に重ね合わせ、さら

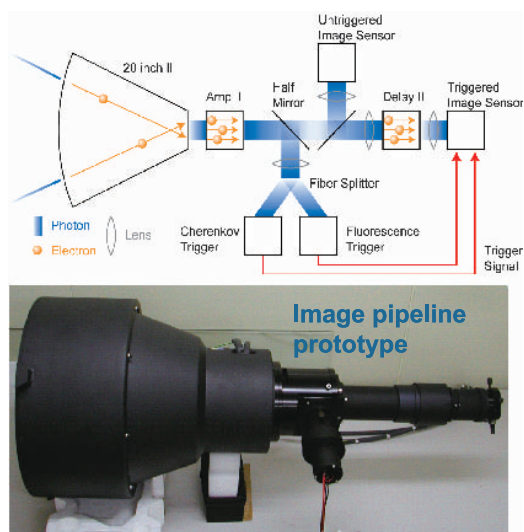


図7：Ashra 光電撮像パイプライン概念図（上）と試験機（下）

Annual Possible Obs. Time for VHE γ sources

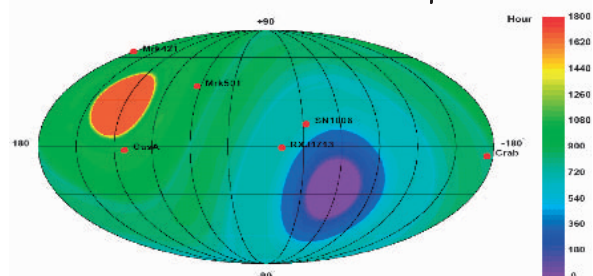


図8：Ashra による年間観測可能時間の分布

に2系統のトリガーセンサーに分岐され伝送される。これによって、コスト効率の良い人間サイズの集光器を複数用いて実効的な光収集効率を上げることが出来る。ハレアカラで、PIP の試験機が 3 m 径撮像型大気チェレンコフ経緯台望遠鏡に搭載され、かに星雲や Mkn501 などの天体からの TeV ガンマ線の追尾観測を行った。PMT アレイではなく、撮像管と半導体センサーの組み合わせと自律的トリガーによって、AS 大気チェレンコフ像を撮像することに初めて成功した。

ガンマ線による大気チェレンコフ光を Ashra でトリガーした場合、エネルギー閾値は 2 TeV 程度となる。そのエネルギー領域でのバックグラウンドは約 3 倍エネルギーが高い陽子による AS が優勢である。Ashra で全天監視を行うと、試験観測で得られた稼働効率を考慮しても、北天の大きな領域で 2 年間で 1000 時間以上の観測が行える(図8)。TeV ガンマ線に対する感度は、ガンマ線と陽子の流量比から、感度は $0.2 \text{Crab} (S/N) (E_\gamma / \text{TeV})^{0.76} (d\theta / 0.1 \text{deg}) (t / \text{hr})^{-1/2}$ と表され、選択基準である S/N を要請すれば、ガンマ線に対する閾値エネルギー E_γ 、陽子バックグラウンドを除去する起源天体となす角度に対するカット $d\theta$ 、および、観測時間 t によって決まる。ただし、ここではガンマ線をバイアスするシャワー形状カットを無視している。現実的な Ashra 検出器におけるパラメタ $(S/N) = 5$, $E_\gamma = 2 \text{TeV}$, $d\theta = 0.1 \text{deg}$, $t = 1000 \text{hr}$ の場合、2 年間の観測によって北天の多くの領域で到達感度は 5 %Crab となる。

VHE ニュートリノは天体現象の深部から直進して到来し、陽子加速の直接的証拠でもある。他の荷電レプトンに比べ、VHE タウ粒子だけが地殻中 10 km 以上の飛程を持ち、ニュートリノ反応における標的質量を稼ぐことが可能である。唯の 1 例でも、明確に地殻や山から出現する AS 像を撮像すれば、それは天体起源の VHE ニュートリノの発見に違いない。しかも、超長基線のニュートリノ振動によって“変身”したタウニュートリノである確率が非常

に高い。ただし、30km 離れて見る山はせいぜい数度の高さであり、計算機シミュレーションによると、地殻から出現するタウの傾きは平均2度で殆どが8度以下となる。つまり、地殻や山から出現する AS の明確な同定には到来方向に対する高分解能が要求される。Ashra の分角精度の角度分解能は、この要求に十分応える。また、分解能の良さは、より遠方の微弱な AS への感度を増すことにもつながる。Ashra 第2計画では、安価ながら、その分解能と広視野のおかげで、PeV 以下に良い感度を持つ次世代水チェレンコフ検出器 IceCube にも十分競合するニュートリノ検出感度を有することになる。しかも、PeV 以上のエネルギーでは大気ニュートリノも混入せず、本質的なバックグラウンド事例はほぼゼロである。GZK 機構により銀河外宇宙線の伝播過程で生成されるニュートリノ (GZK ニュートリノ) の流量は宇宙線流量から不定性少なく算出できる。それによると、稼動効率を10%として、例えば、100PeV

から 1 EeV のレンジで地殻から出現するタウによる AS を年間 1 例観測するために必要な有効検出面積立体角は $120\text{km}^2\text{sr}$ と見積もられ、Ashra 第1計画でも十分狙えるはずである。また、大気チェレンコフ光にて主に山から出現するタウ、大気蛍光にて主に地殻から出現するタウを観測することにより、100TeV から EeV にいたる広大なエネルギーレンジにて VHE ニュートリノ探索を行うことができる。これらは、Ashra の大きな利点である。

2006年度には、Ashra 第1計画における光学系を設置調整し、光学閃光観測を開始する。その後、順次、チェレンコフ光トリガーを実装してゆき、TeV ガンマ線監視観測、および、山からの出現タウ探索を開始する予定である。2007年度には、大気蛍光を用いた地殻かすり出現タウ探索を開始する予定である。

IceCube project *Pioneering high-energy neutrino astrophysics*

千葉大学理 吉 田 滋

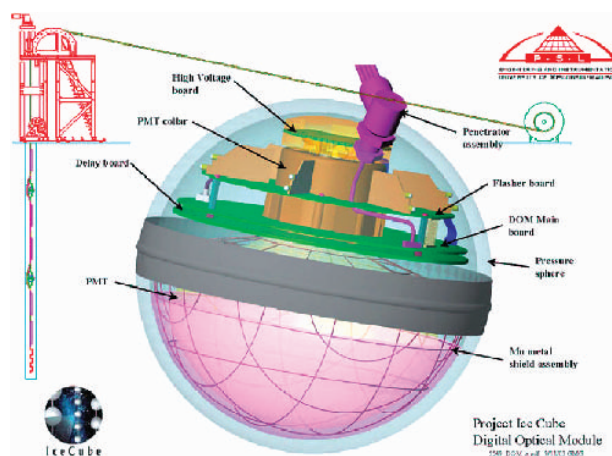
1. ハードウェア開発

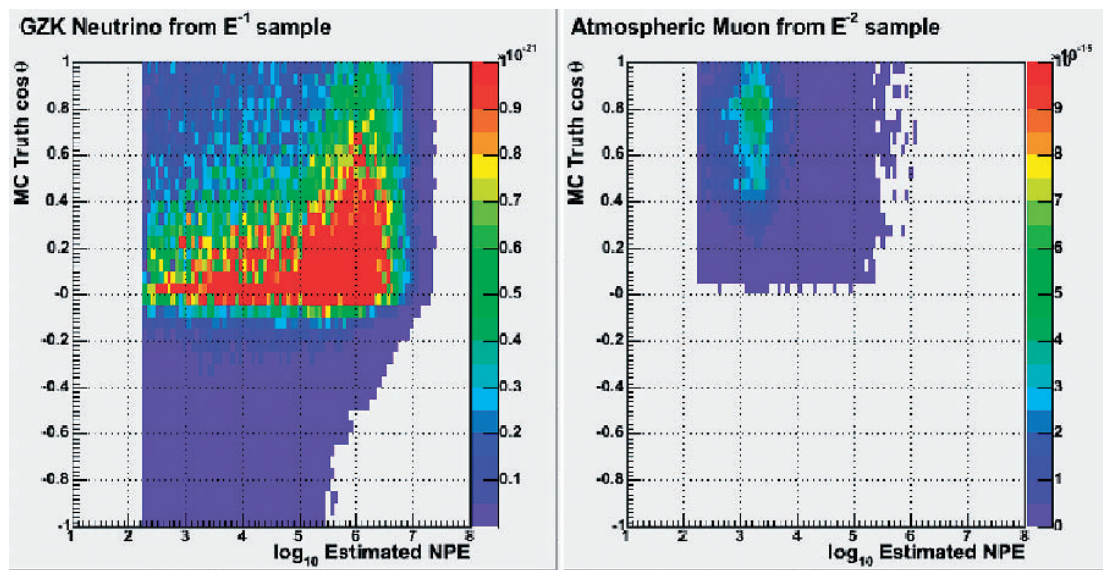
IceCube 日本グループは、IceCube 光検出器 (DOM—Digital Optical Module) の標準校正化に取り組んだ。前年度までに確立した PMT 校正装置・プログラムを DOM 本体に拡張、運用したものである。DOM は右図に示すように、10インチ PMT と読み出し電子回路、高電圧電源、校正用 LED ボードなどを、耐圧ガラス球内に封印したモジュールである。アメリカ、ウイスコンシン大学と共同で、全検出器の reference となる基準検出器—“Golden” DOM—を製作し校正を行った。校正項目は

- PMT uniformity 測定 (室温、千葉大)
- PMT noise rate, charge resolution, gain, waveform 測定 (零下、千葉大)
- PMT 絶対校正 (室温、千葉大)
- DOM 組み立て (室温、ウイスコンシン大)
- DOM ストレステスト (室温、零下、ウイスコンシン大)
- DOM uniformity 測定 (室温、千葉大)

● DOM 絶対校正 (室温、千葉大)

絶対校正を施された検出器は Golden DOM 以外にはないので、極めて重要である。我々は、N2 レーザーを絶対光源に使い、レーザース散乱をビームダンプ機構として使うことで、SPE ベースの校正を実現した。校正結果は5%以下の系統誤差で押さえられている。今年度は計5本の Golden DOM を製





作し、南極現地の string-39に埋設した。現在順調にデータを取得中である。

2. ソフトウェア開発

千葉大グループでは、PMT モンテカルロ “Romeo” と超高エネルギーニュートリノ・レプトン伝播シミュレーター “Juliet” の開発を行ってきた。開発はほぼ終了し、超高エネルギーニュートリノ探索の filtering アルゴリズム開発、およびエネルギー推定アルゴリズムの開発に供するため、20万イベントを生成した。一部の結果については次節で触れる。

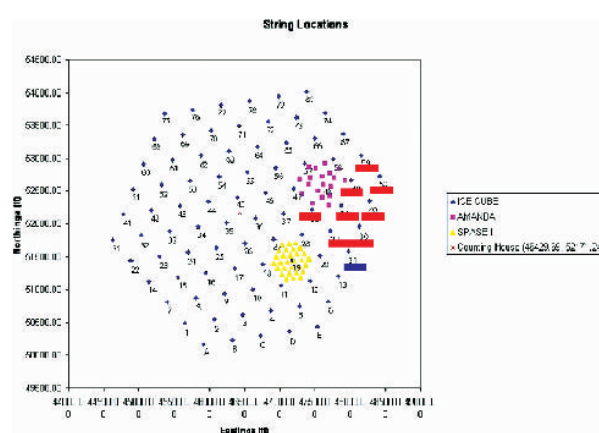
3. EHE ニュートリノ探索

日本グループは今年度より、IceCube で観測可能なエネルギーレンジのうち、最もエネルギーの高い領域のニュートリノ探索のワーキンググループを組織し、日米共同で活動を始めた。3月には千葉大でワークショップも開催し、解析プログラム開発を加速している。このエネルギー領域では、大半の事象が上から下へと貫通する下向きのミュオンであるため大気 μ との識別がキーとなる。上図に示したものは、最も単純な観測量である、チェレンコフ光量のイベントサム (energy に相当) と天頂角の平面において、GZK ニュートリノ起源のミュオン(右) と大気ミュオン (左) がどのように分布するかを

示したものである。双方の分布は明白に異なる。より光量の大きな、かつ水平方向に事象を取り出すようにカットをいれば、信号を取り出せる見通しが立っている。

4. 建設

2005年度は計8本のストリング、480本のDOMが埋設された。前年の80DOMs と併せて全体の一角が建設・稼動を開始した。左図で赤線で示した場所が本年度の建設が終了した場所である。日本グループも DOM 較正に関わった大学院生を南極現地に派遣し、Golden DOM をはじめとする埋設検出器の試験及び、埋設作業に従事した。



ICRR-Seminar 2005年度

3月10日(金) Dr. Martti Raidal 氏 (NICPB, Tallinn)

“Aspects of Leptogenesis”

ICRR-Seminar 2006年度

5月9日(火) 有坂勝史氏 (UCLA)

“Current Status and Future Prospect of Pierre-Auger”

5月11日(火) 井上 進氏 (国立天文台)

“銀河団からの超高エネルギー宇宙線とガンマ線”

5月25日(木) 浅野勝晃氏 (国立天文台)

“ガンマ線バーストからの高エネルギー宇宙線、ニュートリノ、光子”

ICRR-Report 2005年度

ICRR-Report-524-2005-7 (March 2006)

“Abundance of Cosmological Relics in Low-Temperature Scenarios”

Manuel Drees, Hoernisa Iminniyaz, Mitsuru Kakizaki

No.60

2006年5月31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) 7136-5121又は0578-5-9663(神岡)

編集委員 佐川宏行 関谷洋之