

## Ashra による超高エネルギー素粒子天文学の創生

東京大学 宇宙線研究所

佐々木 真人

2004年8月8日

ハワイ本島の山の中腹に宇宙を睨む新たな「眼」が設置されようとしている。その「眼」は、これまでの天体観測と違い、光や電磁波を検知する望遠鏡ではなく、非常に高いエネルギーを持つ粒子が残す飛跡像を捉える。しかも、人の視力 1.0 に相当する 1 分角の解像度で全天を一度に見渡すことが出来る画期的な「眼」である。その「眼」、すなわち全天高精度素粒子望遠鏡 (All-sky Survey High Resolution Air-shower detector; Ashra) によって、地殻や山を標的とした高エネルギーニュートリノの初検出、空気シャワー発光を利用した核子やガンマ線などの超高エネルギー素粒子を用いた本格的な天体観測の創生を狙う。それが Ashra 計画である。Ashra 共同研究者を代表して、この計画について紹介する。

### Ashra は何をを目指すのか？

ガリレオが約 400 年前に凸と凹のレンズを組み合わせた単純な光学望遠鏡によって木星の衛星を探索して以来、光や電磁波をプローブに用いた天体観測は、大型化と多波長化の技術的發展を経て目覚ましい進歩を遂げてきた。しかし、素粒子物理の観点からは、電磁波の発生源は動き回る電子であり、電磁波による天体観測は天体近傍の電子の動きを通して天体を間接的に知る手法であったと言える。ならば、出来るだけ波長の短い電磁波を用いれば、きっと天体における電子の素粒子的な振る舞いが見えてくると考えるのは至極当然で、実際、波長の短い電磁波 - ガンマ線により、“非熱的”な天体像が明らかになりつつある。つまりは、長波長の電磁波では見えていなかった、天体近傍における素粒子的な反応の示唆である。自然界の基本力には電磁力だけではなく、弱い相互作用や強い相互作用もあることが知られている。電磁力以外の力が活躍する超高エネルギー素粒子現象が宇宙には数多あるに違いないが、われわれには未だ深いベールに包まれている。幸い、素粒子の性質は、この半世紀の加速器実験によって、ほぼ精密に分かっている。その素粒子物理の知識を応用し、今まで見たこともない天体や宇宙を見てやろう。それが、素粒子物理学と天文

学の融合による天体の探索 超高エネルギー素粒子天文学であり、今まさに創生の期を迎えているのである。

では、超高エネルギー素粒子を放出する天体は具体的にどんなものか？と聞かれると、実はまだ誰も答えられない。ただ、陽子が現在の加速器で得られるより千万倍以上も高いエネルギーまで天体近傍で加速されていれば、図 1 に示したような反応が起きるかも知れないと予測されている。電磁波と比較して素粒子反応の特異な点は、核子、電子、ガンマ線、およびニュートリノといった多種の粒子を放出することである。それらを複合して同時に捉えることが出来れば、根元で起きている素粒子反応をより確実に把握できるだろう。磁場に影響されない中性粒子を捉えれば、電磁波による天文学と比肩する本格的な位置同定も可能となるだろう。

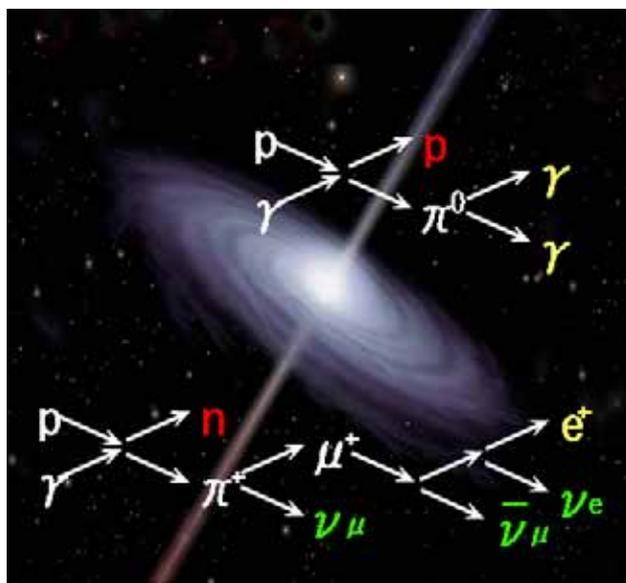


図 1：活動銀河核の周りで起こる光メソン反応

さらに、このような予測など吹き飛ばしてくれる新たな天体現象の発見的観測も期待できるのではないだろうか？これまで宇宙は新たなプローブに対してその都度、初期の使用目的を裏切る“驚異的な発見”をもたらしてくれたで

はないか。超高エネルギー素粒子という新たなプローブで観る未知の宇宙が、われわれに伝えてくれるのではないだろうか？

### 超高エネルギー素粒子の検出法

超高エネルギー素粒子は、地球の地殻や大気原子核を“標的”として衝突・破碎を繰り返し、鼠算式に粒子数が増加する“空気シャワー”現象を発生する。超高エネルギー素粒子を検出するには、その二次粒子群である空気シャワーを検出する方法以外ない。長い間、空気シャワー二次粒子のほんの一部の割合だけを地表で採取する地上アレイが使われてきたが、二次生成粒子群が空気分子と反応して放出する蛍光とチェレンコフ光の二種の発光現象を利用する方法も存在する。大気発光現象で空気シャワーを検出する最大の利点は、その二次生成粒子の空気中の発達伝播を連続的に撮像できるということにある。図2は、計算機シミュレーションの結果として、同じエネルギーで同じ方向に飛来した陽子から生じた空気シャワー中の二次生成粒子の数を、通過した大気の深さの関数として示している。超高エネルギー素粒子が大気と初めて衝突する大気の深さと発達の様子が事例ごとにより異なるのが分かる。地表で二次生成粒子数を採取する方式では、この事象ごとのふらつきは取り除くことは出来ず、エネルギーや到来粒子同定に影響を与える。大気発光を用いて事例ごとの空気シャワー像を撮影できれば、そのような事象ごとのふらつきの影響を原理的には蒙らずに到来粒子の物理量を定めることが可能になる。

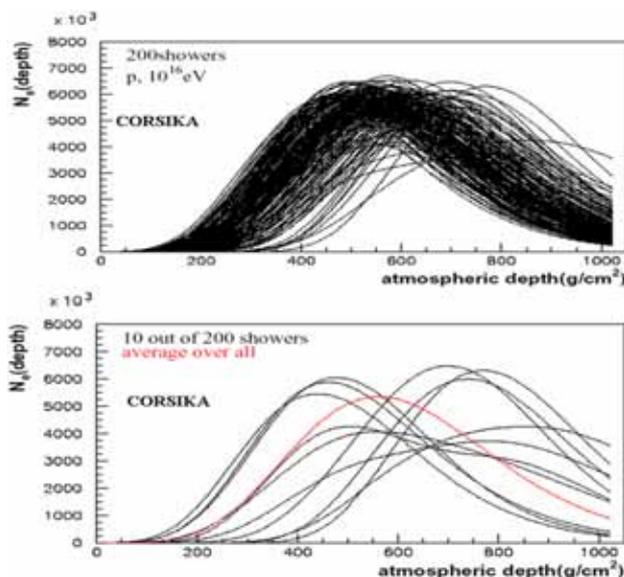


図2:  $10^{16}$  eV の陽子の空気シャワー縦発達シミュレーション 上は 200 事例。下はその 200 例から抽出した、ふらつきの激しい 10 例(細線)と平均した縦発達(中央の太線)。

Ashra では、超高エネルギー素粒子からの空気シャワーの検出原理として、事例ごとに空気シャワー発達を測定できる大気発光現象を用いることにした。それを全天隈なく、しかも精度よく観たい。図3は、1個の超高エネルギー素粒子によって生成される空気シャワーの発達を撮像した場合を計算機でシミュレートした例である。その撮像解像度を1度角と1分角の場合で比較している。見て分かる通り、空気シャワー現象というのは非常にシャープな飛跡であり、検出器の解像度がよければ親の超高エネルギー素粒子の到来方向を十分精度よく辿ることが出来る。われわれは本格的な天文学に比肩しようと、1分角の解像度を狙っている。しかも、その精度を保ったまま、全天を監視したい。それにより、指向性を持つチェレンコフ光も天体を追尾せずに観察できる。その上、時間変動の激しい天体現象の発見・解明のチャンスを格段に向上させることができる。高解像度と全天監視というのは互いに矛盾し、少し考えただけでは不可能に見える。それをどのように解決したものか？われわれの解答は、光電子増倍管を単純な光学系の焦点面に並べる従来の大気チェレンコフ望遠鏡や大気蛍光望遠鏡の方法を止め、広角高精度の光学系と光電撮像パイプラインによって広視野の像を高精度のまま、最近デジカメに盛んに搭載されている CMOS 固体撮像素子の上まで運ぶという構想であった。これで、光電子増倍管と波形処理回路による画素単位のコストを圧倒的に削減し、全天を細かい網目で覆ってもコスト的に問題がないようにした。

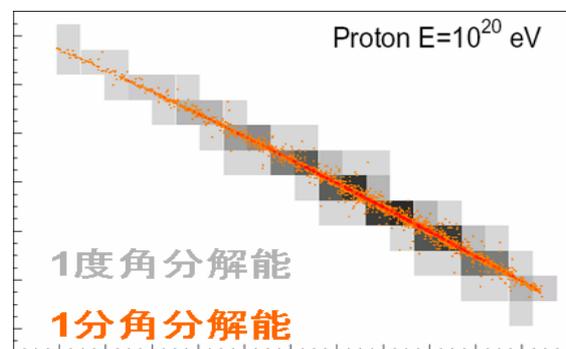


図3: 空気シャワー飛跡を1分角の解像度で検出した場合のシミュレーション 升目は1度角の視野を示す。

上述の目標を達成するため、われわれは「Baker-Nunn 広角光学系」を素粒子望遠鏡として最適化し、全視野が  $50^\circ \times 50^\circ$  で結像精度を1分角に保つ F/0.74 の光学系を新たに設計した(図4)。その光学系の瞳孔部には、アクリル板を直接切削した3枚の補正レンズを置き、部分鏡7枚で構成された球面鏡によって焦点を結ぶ。その焦点球面は大口径のイメージンテンシファイア(II)の光電陰極から成り、そのII背面の出力部から高利得で応答の速い蛍光材によって光像となり出力される。さらに、この直後に、リ

レーンズ系、ハーフミラー、近接型 II を組み合わせた光電撮像パイプラインが直結する（図 5）。大口径 II 出力像の精度を落とさずに増幅した後、CMOS 固体撮像素子に導入する。この光電撮像パイプラインは、二種の大気発光現象であるチェレンコフ光と蛍光による飛跡像としてコントラストよく撮像するため、光量の増幅と共に「電子シャッター」に相当するトリガーの機能を持つ独自の撮像装置となっている。これらの光学・光電撮像要素により、超高エネルギー素粒子による空気シャワーからの大気発光を集光・撮像する望遠鏡検出器 12 台で 1 基の観測基地を構成し、全天監視、1 分角解像度、チェレンコフ光と蛍光の同時観測の機能をもつ Ashra 検出器の基本設計が完成した。

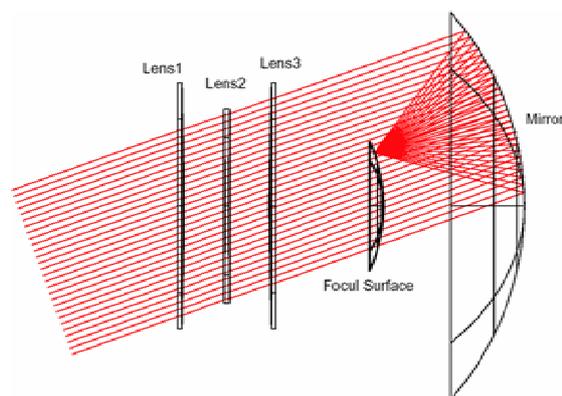


図 4：修正 Baker-Nunn 広角光学系の概念図

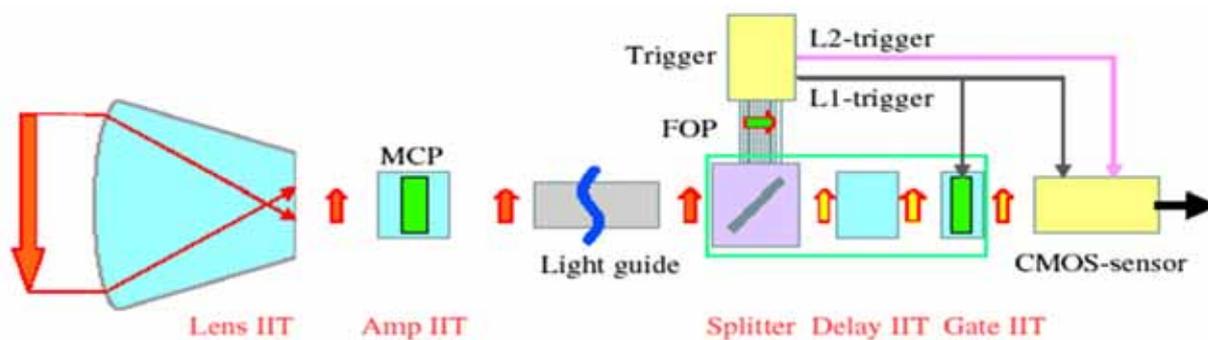


図 5：光電撮像パイプラインの概念図（上）と実機の写真（下）

## プロトタイプ試験

われわれは、光学要素の開発および光学系調整方法の確立、そして超広視野高精度光学系の実現を目指して、2/3スケールのプロトタイプ望遠鏡を製作した。本望遠鏡は国立天文台の天文機器開発実験センターに設置され、同センターの協力の下、光学要素のマウントと光学系調整方法のR&Dを行った。図6に完成したプロトタイプ望遠鏡の写真を示す。4枚の分割鏡、3枚のアクリル補正レンズ、そして焦点面イメージンシファイアがそれぞれ調整機構を介して望遠鏡架台に取付けられている。

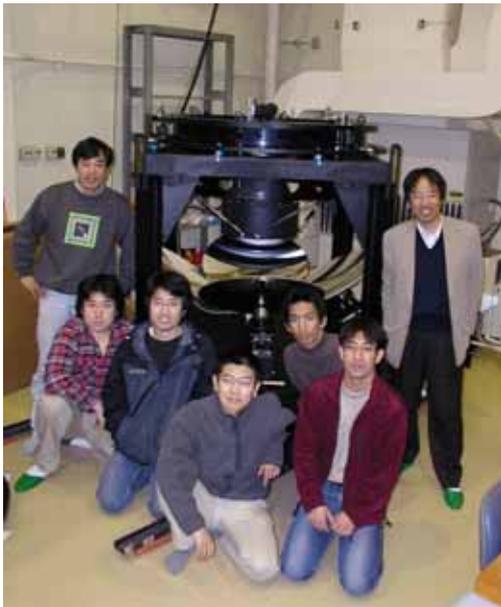


図6：ファーストライトに成功した Ashra 望遠鏡プロトタイプ 国立天文台天文機器開発研究センターにて。

図7(左)に完成した分割鏡の写真を示す。望遠鏡として1分角の結像精度を実現するためには、各部分鏡のスポットサイズと曲率半径の値に厳しい要求が課される。これらを満たすため、われわれは詳細に工程を検証した。工場での打合せ、製作工程の確認や測定結果のフィードバックによって、目標スペックを満たす製法を確立することができた。図7(右)には、3枚のアクリル補正レンズの写真を示す。これらはそれぞれ形状の異なる3枚の非球面レンズ



図7：望遠鏡光学要素  
(左)分割鏡、(右)3枚のアクリル補正レンズ。

(片面は平面)である。表面の散乱を極限まで抑えるため、非球面形状を変化させずに研磨を行っている。本レンズを製作した企業では、 $\phi 1m$ を超える Ashra 実験第1フェーズ仕様の補正レンズ製作も可能である。

焦点面を形成する UV 用イメージンシファイア (UVII) は、像の輝度増幅と共に焦点面の像を精度よく固体撮像素子のサイズまで縮小する役割を担っている。PMTアレイを用いた他の競合実験に比して、Ashra 実験が抜群のピクセルコストを実現する要因であるといえる。われわれは、商業ベースで最大口径の  $\phi 400mm$  X線 II を、UV入射用に改造するという方針のもと、 $\phi 400mm$  の UVII の開発を行った。主な開発項目は、X線 II から変更になる入出力面と、電子レンズ系である。どの項目も一筋縄ではいかず苦勞を強いられたが、有限要素法によるシミュレーションや、担当技術者の尽力、関連企業の協力により、すべての開発を完了することができた。図8(上)に完成した試作16インチイメージンシファイアに光電撮像パイプラインが装着された写真を示す。また、Ashra 実験のロゴを影絵として撮影した出力面像を図8(左下)に示す。図8(右下)のような解像度チャートの像を顕微鏡によって観察し、入力側で  $3Lp/mm$  以上の解像度 (1mm の幅の中に黒白の線対を3対描いても目視で区別可能な解像度) を有することが判明している。これは焦点面において、光学系の解像度である1分角に相当する値である。現在、さ

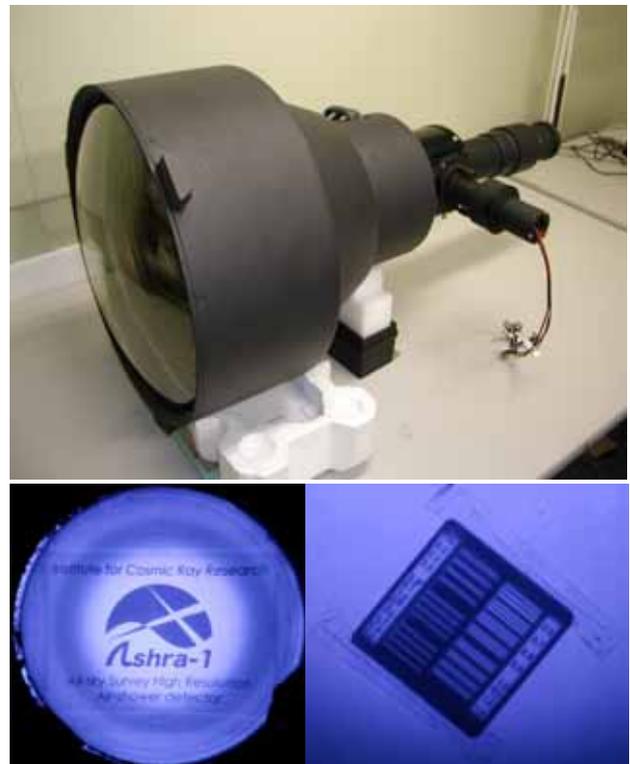


図8：望遠鏡焦点面を形成する  $\phi 400mm$  UV 用イメージンシファイアを含む光電撮像パイプライン下は焦点面イメージンシファイアの出力像：Ashra ロゴ(左)、解像度チャート(右)

らに大型の 24 インチ口径イメージンシファイアの開発、量子効率や出力面利得の測定、受光面に装備する多層膜光学フィルターの開発などを進めている。

光学系調整は、人工の光源や測距を用いた粗調整と、理想的な平行光源である恒星を用いた微調整の二段階で行う。粗調整の目的は、微調整が必要な箇所や範囲を可能な限り減らすことと、恒星の観測が可能なレベルまで光学系を調整することである。望遠鏡の F 値が小さく、焦点深度が浅いので、粗調整が重要となる。このため、反射鏡の調整、レンズ系の調整、焦点面位置の調整用にそれぞれ光学モジュールを設計・製作し、粗調整を行った。その後、望遠鏡を屋外に移動して試験的に恒星の観測を行い、恒星の像を捉えることに成功、粗調整の方法が機能していることを確認した。観測の度に望遠鏡を屋外へ移動しなければならず、毎回時間に追われるため微調整を完全につくすことはできなかったが、現時点で得られている最善の星像を図 9 に示す。イメージンシファイアを焦点面とし、50° の広視野と高解像度を有する望遠鏡を実現することに成功した。図 9 のインセットには、視野中心付近の恒星の強度分布の一例を示した。約 2 分角の解像度が達成されている。今後は望遠鏡をハワイに移設して 1 分角の解像度達成とテスト観測を目指す予定である。

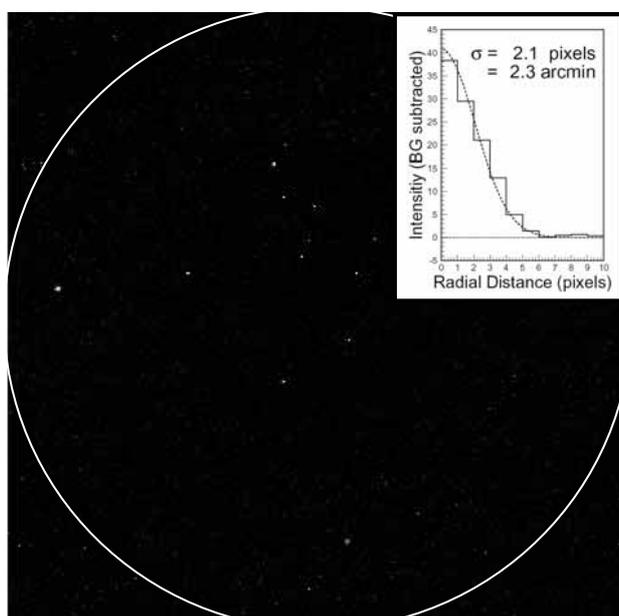


図 9：プロトタイプ望遠鏡による観測で得られた 50° 視野での星像 インセットは恒星の強度分布例。

光電撮像パイプラインには焦点面に搭載される大イメージンシファイアからの 1 分角度の出力解像度を落とさずに、精細な CMOS 撮像素子に像を運ぶと同時に、100 ナノ秒以下の時間内で粗像の認識、判定から素早い露光制御と読み出し制御のためのトリガーを生成するという難し

い技術的課題を克服しなければならない。仮設計と試験の試行錯誤の末、漸く、低コストながら満足いく性能のものが開発された（図 8 の装置の後段部）。その光電撮像パイプラインを図 10 に示す追尾型 TeV ガンマ線観測用の光学系に搭載し、今年の夏から実際の TeV ガンマ線の観測を行う予定である。この試験観測データは、特にトリガーの最終設計に役立てる。

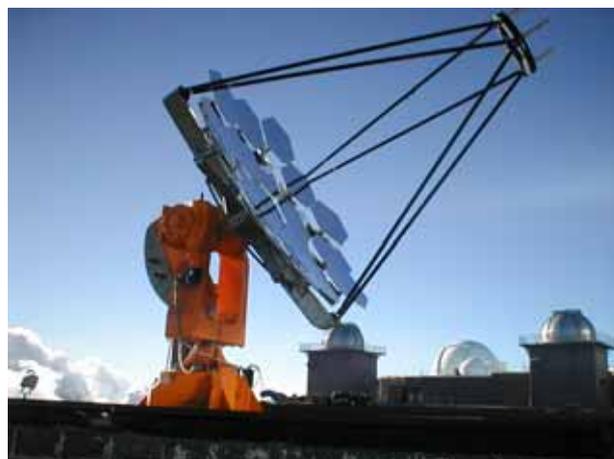


図 10：試験観測地のマウイ島ハレアカラ山頂（高度 3031m）に設置された 3m 径反射経緯台望遠鏡

図 6 にある Ashra 光電撮像パイプラインを装着し、試験観測を行う。

## Ashra 計画

2004 年度末には、第一の本番観測地であるマウナロア山中腹の見晴らしのよい土地に安価で丈夫な冷凍用輸送コンテナを改造した検出器格納庫に図 11 のように Ashra 望遠鏡を装着し、試験観測を開始する予定である。その結果を元に設計を最終化し、フェーズ 1 では、2005 年度までに、日本で合計 16 台の光学系を製作し、ハワイ島のマウナロアとフアラライの大小 2 個の観測基地へ配備し、観測を開始する。2006 年度から建設予定のフェーズ 2 では、マウナケア

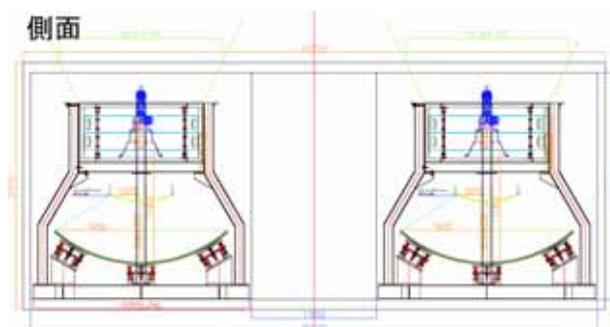


図 11：Ashra サブ望遠鏡 2 台を冷凍コンテナに格納する配置図  
間の空間にはトリガー装置などが配置される。

も含め、3 山に置かれた同規模の 3 つの観測基地から上空大気を覗むことになる。図 12 に観測基地の配置を示す。一方、トリガー用および読み出し用のセンサーには高度の大型集積回路が使用され、カスタム IC の開発には 1 年間に要する。現在、上記の光学系設置完了時には搭載を間に合わせるよう奮闘中である。



図 12：ハワイ本島の地図 Phase-1 と示された位置がマウナロア山中腹の実験サイト予定地である。

通常の高度に設置された大気発光検出器では、比較的良好な場所でも、太陽光がない、月光が少ない、天候がよいという割合を掛け算して大雑把に 10% 程度の稼働率しか見込めない。ハワイ本島での大気の逆転層は 2500m 程度の高度にあるので、Ashra では海拔 3300m のマウナロア山中腹などに検出器を置くことにより、稼働率の向上が期待される。図 13 はマウナロアの本番観測地からマウナケアの方向を見渡した写真である。雲の上にマウナケア山が見渡せる。

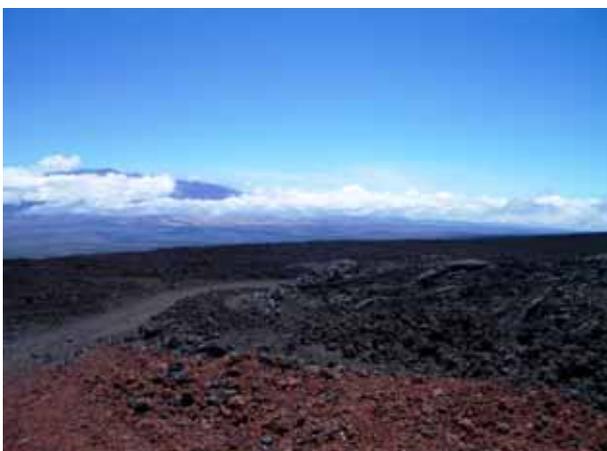


図 13：マウナロア山中腹の Ashra-1 実験サイト（高度約 3300m）からマウナケアを臨む

現在、ホスト機関であるハワイ大学マノア校以外に、その近隣のハワイパシフィック大学、観測地に近いハワイ大学ヒロ校およびハワイ大学天文研究所の研究者も Ashra 計画に参加している。彼らには、現地の土地交渉やインフラ整備の他、トリガーセンサー開発にも協力してもらい、ハワイは Ashra 計画にとって非常に重要な共同研究拠点になっている。米国以外には、国立台湾大学などの台湾の研究者も参画し、ハレアカラでの試験観測をはじめ、トリガー論理回路やソフトウェアの共同開発を促進している。2006 年度からの第 2 フェーズで 3 基地に展開するまでに、より強固なパートナーシップが築けるように組織化に努めている。

### 競争力

全天監視と高解像度といった光学的性能と共に、チェレンコフ光と蛍光の同時観測という独自性は世界に比類がない。従来の検出器では、核子、ニュートリノ、ガンマ線といったわれわれにとって“メッセンジャー”である超高エネルギー粒子自体によって手法が分かれ、本来の研究対象である素粒子起源天体を総合的に議論することが困難であったが、Ashra ではそれが可能となる。

もちろん、検出器の性能としては、探索対象の多様さや独自性だけではなく、その検出感度が重要だろう。Ashra と同時期、超高エネルギー核子成分について最高の感度を持つと思われる Auger 検出器と比較して、Ashra 第 1 フェーズの高精度の複眼観測だと約 1/3 の検出率、第 2 フェーズ複眼観測で対等になると見積もっている。検出エネルギー範囲は、Auger が  $10^{18}$ eV 以上なのに比べ、Ashra は単眼観測で  $10^{16}$ eV 以下まで狙える。2 桁以上も広い。

さらに、ニュートリノ観測においては、地球地殻と山を標的として空気シャワーをチェレンコフ光と蛍光の両方で捉えるため、検出面積と検出エネルギー範囲が、従来の水チェレンコフ検出器に比べ圧倒的に優れている。両者ともに、超高エネルギーニュートリノが地球上の原子核によって変換されたミューやタウからの信号を捉える。最近のガンマ線バーストや宇宙核子と宇宙背景放射光子との衝突による超高エネルギーニュートリノ生成のモデル計算では、有為な検出のために  $100\text{km}^2$  の検出面積を要求する。天体起源のニュートリノが宇宙空間でフレーパー間を振動することを利用して、図 14 のように地殻や山から吹き出るタウ粒子の空気シャワーが発生するチェレンコフ光および蛍光を捉える Ashra ならば、その要求に応えることができる。しかも、その精細な空気シャワー像から、地殻や山から吹き出たタウニュートリノ起源の飛跡であることは一目瞭然であろう。

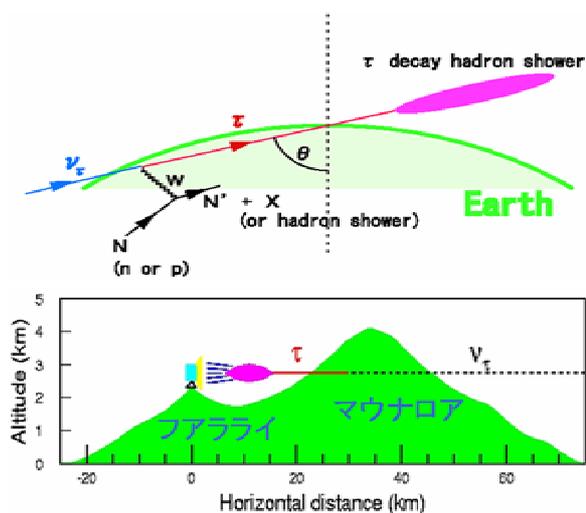


図 14：地殻および山を標的とした超高エネルギーニュートリノ検出方法 タウの空気シャワーを撮像する。

## 波及効果

千葉大学環境リモートセンシングセンターの久世氏のグループと共同して、Ashra 検出器の環境科学への応用も研究している。時々刻々、精細な画像をもって大気からのレーザー反射光を捉えると、大気の汚れをリアルタイムで監視できる。“イメージングライダー (Imaging Lidar)” と呼ばれる手法である。催しなどで夜空にレーザーを用いてディスプレイすることがあるが、同様にレーザー射出を制御すれば、全天高速撮像のできる Ashra ステーション 1 基で、東京都のほぼ全域の大気汚染濃度の 3 次元分布をリアルタイムで監視することも夢ではない。低出力ながら射出頻度の高い、安全基準を満たす“目に優しい”レーザーも既に開発している。三宅島で再度火山爆発があり、火山ガスが襲ったとしても瞬時に警告を発するというような Ashra 検出器の応用も提案されている。現在、千葉大学の工学系総合研究棟屋上からのイメージングライダーの試験観測を目指して、準備が着々と進んでいる (図 15)。



図 15：千葉大学工学系総合研究棟の屋上に新たに建設された Ashra 望遠鏡によるイメージングライダー観測室

## 結語

阿修羅は古代インド神話に「真理の神」として登場する。「権力の神」である梵天との永遠の戦いが有名な“修羅場”である。われわれの Ashra も、地上のあらゆる制限と戦いながら、宇宙の未踏の真理を、できる限り広く正確に勝ち取るうとしている。さらにその先には、そこに携わる科学者の自己満足に留まらない、普遍的で一般の人々の心にも響く、基礎科学の本質的な進歩の姿があるだろう。それは“古きもの”を乗り越えてゆく“新しき人々”の志と弛まざる努力にかかっているに違いない。その基礎科学の本質的な進歩を信じて、われわれは奮闘してゆきたい。

Ashra の特徴をまとめると以下ようになる。

- 天文と素粒子の融合領域を開拓する
- 広角高精度光学 + 光電パイプラインによる
  - 全天監視と 1 分角度分解能の両立
  - 大気蛍光とチェレンコフ光検出の両立
- 強力な国際共同による着実な開発
- 圧倒的な同定力と感度
- 環境・災害科学への波及効果

それらが実現する日は近い。皆様に今後とも、さらなるご支援とご協力を賜りたい。

## 謝辞 (敬称略)

ここに記載した成果すべては Ashra 共同研究によるものです。日夜、私と共に多くの苦難を乗り越えながらも Ashra 計画の開発を強力に推進してくれている、青木利文、浅岡陽一、眞子直弘、上橋雅志、奥村暁、会田勇一、安田雅弘、宇佐美博一、野田浩司、長南勉の諸君に大変感謝しています。また、他の Ashra 共同研究者、特に、新井康夫、小川了、久世宏明、杉山直、渡邊靖志、深川俊介、S. Dye, J. Learned, J. Hamilton, G. Guillian, W. S. Hou, Y. B. Hsiung の諸氏に感謝しています。岡山県工業技術センターの横溝精一、勝田智宣、国立天文台天文機器開発実験センターの小林行泰、大坪政司の諸氏の技術的支援を感謝いたします。最後に、故・折戸周治先生の物理を第一とする指導に感謝しています。

Ashra フェーズ 1 計画は文部科学省振興調整費「先導的研究等の推進」プログラムにより全面的に資金援助されている。また、文部科学省科学研究費補助金・基盤研究 B(海外学術調査)、文部科学省都市エリア産学官連携促進事業、KEK 共同開発研究、東京大学宇宙線研究所共同利用研究の助成により Ashra の装置開発が部分的に支援されている。

p144 の補遺に最新のデータを紹介します。

## Ashra による超高エネルギー素粒子天文学の創生（補遺）

（本文 p69 に続く）

本原稿を投稿直後、ハワイ・ハレアカラ山頂での試験観測が開始された。図 16 は、Ashra2/3 スケールモデル光学系を用いた、天頂方向 50 度視野の無数の星像である。詳しく

解析はこれからだが、Ashra 光学系が実観測の環境にて設置と調整をほぼ終え、期待通り動き出したので、ひと安心である。

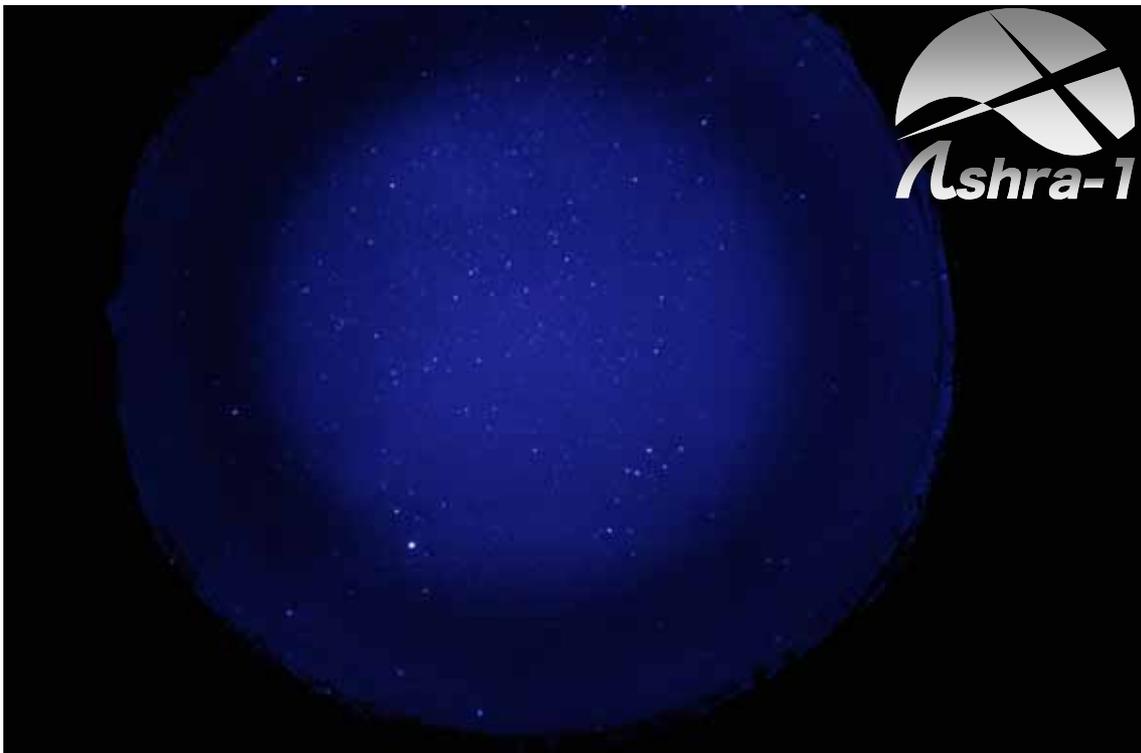


図 16：ハワイのハレアカラ山頂で Ashra2/3 スケールプロトタイプで撮影した天頂周辺 50 度の視野による星像

同装置で撮像した三鷹の夜空（図 9）に比べ、圧倒的に多数の星が観測されている。