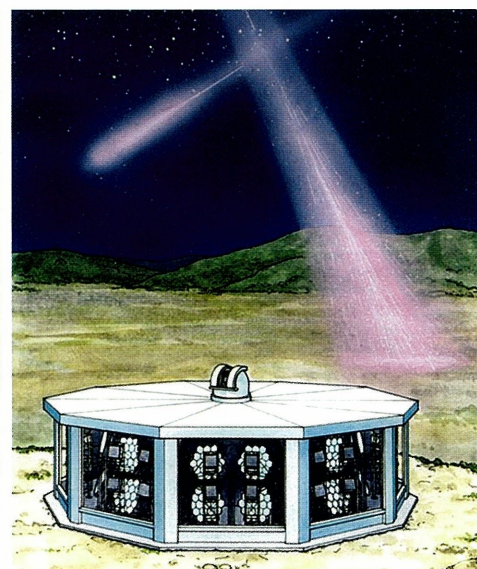
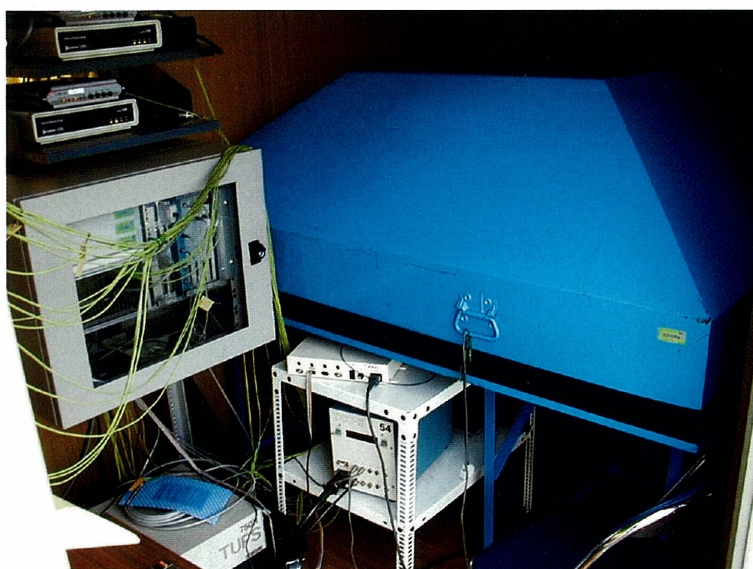




〜 宇宙のエネルギーフロンティアを行く 〜

明野広域空気シャワー観測装置(AGASA) から  
宇宙線望遠鏡 (TA) 実験へ



東京大学 宇宙線研究所 明野観測所



## ◎ 目的

宇宙線とは、宇宙を高速で飛び交う高エネルギーの素粒子・原子核です。太陽フレアの際に放出される粒子は、宇宙線のエネルギーとしては最も低いエネルギー領域に相当し、このような粒子よりも100億倍以上ものエネルギーを持つ宇宙線が観測されています。**明野観測所**では創設以来  $3 \times 10^{14}$ eV 以上の宇宙線を系統的に観測しており、その結果は標準スペクトルとして世界的に参照されています。1987年に建設を開始した **AGASA (明野広域空気シャワー観測装置)** では、最も高いエネルギー領域である  $10^{18}$ eV 以上の宇宙線の研究が目的です。このような超高エネルギー宇宙線の観測を通して、それらが何処でどのようにして生成され、地球までどのようにして伝播してきたかを調べ、宇宙で最も活動的な現象について研究するためです。

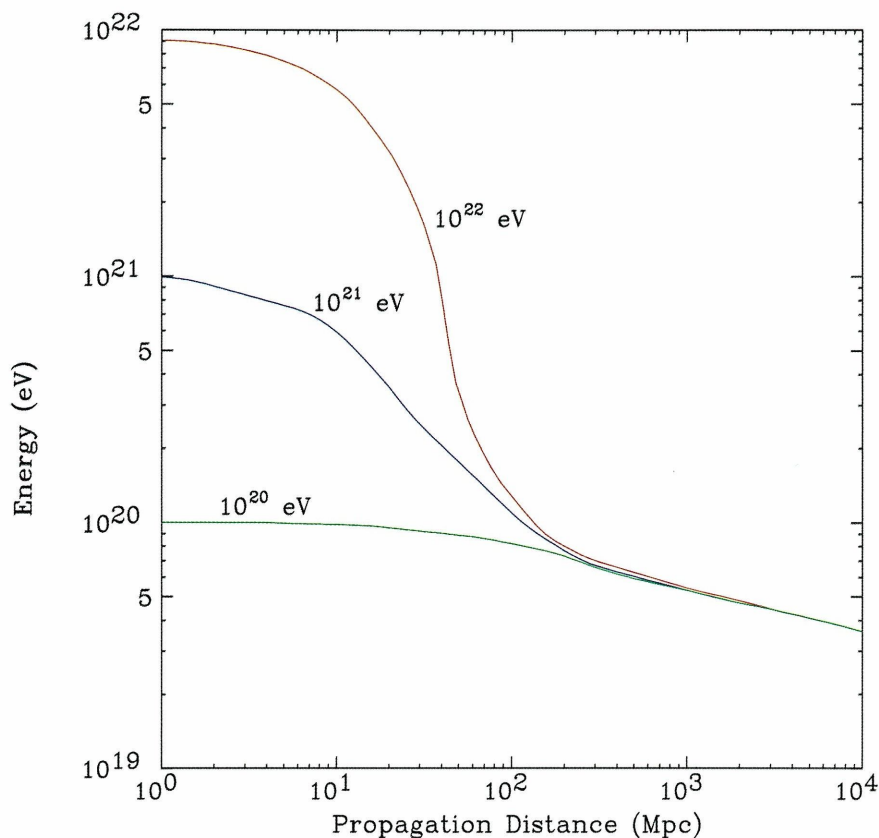


図1：GZK 効果。宇宙線陽子は2.7K背景輻射との衝突により、伝播中に徐々にエネルギーを失い  $4 \times 10^{19}$ eV あたりにおちつく。

宇宙にはビッグバンのなごりである2.7Kの宇宙背景輻射と呼ばれる光が満ちています。この光と超高エネルギー宇宙線が衝突すると壊れてしまうのです。仮に、宇宙のどこかで  $10^{20}$ eV を超えるエネルギーを持つ宇宙線が作られたとしても、100Mpc (3.26億光年) も伝播すると衝突を繰り返すことによって  $4 \times 10^{19}$ eV あたりのエネルギーになってしまいます (図1)。このようなエネルギー損失による効果を、提唱者の名前から **GZK (グライセン、ザツェッピン、クズミン) 効果** と呼びます。このような予測を超えたエネルギーの宇宙線が存在するか？ あるいは上限が存在せずに伸び続けているのか？ この謎を解明することが **AGASA** の目的です。

## ◎ どのようにして観測するか？

$10^{20}$ eV を超える最高エネルギー宇宙線の頻度は極めて低く、 $100\text{km}^2$  あたり一年に一度しかありません。大きさが砂粒の一兆分の一程度の宇宙線をどうやって捕らえるのでしょうか。**AGASA** では、地球大気そのものを検出器の一部として利用する方法を用いています。

宇宙から降り注ぐ高エネルギー宇宙線が大気中に入射すると、図2に示すように空気中の原子核と衝突して多数の二次粒子を生成します。これらの二次粒子はまだエネルギーが高いので空気中の原子核との衝突を繰り返して、三次、四次の粒子を次々と生成しながら大気中を進み、その過程で個々の粒子のエネルギーは低くなります。このような現象を**空気シャワー現象**と呼びます。また、親粒子のエネルギーが高ければ高いほど、空気シャワー粒子は大気深くまで入ってきます。例えば $10^{20}$ eV 以上の最高エネルギー宇宙線の場合には、ほぼ地上付近で粒子数が最大となり、1,000億個を超える粒子群がパンケーキ状に降り注ぐこととなります。また横方向にも5～6kmの広がりを持つことになるので、約1km間隔に配置した検出器により空気シャワー現象を捕えることができます。粒子密度は中心ほど多く、中心から離れるほど減少します。この粒子数分布から、最初の親粒子のエネルギーが推定できます。また、それぞれの検出器に空気シャワー粒子が到着した時間差から、親粒子の到来方向が分かります。

超高エネルギー宇宙線による空気シャワーを観測するために地表に検出器を配置したものを**空気シャワーアレイ**と呼びます。私達の**AGASA (Akeno Giant Air Shower Array)** を日本語では**明野広域空気シャワー観測装置**と呼んでいます。

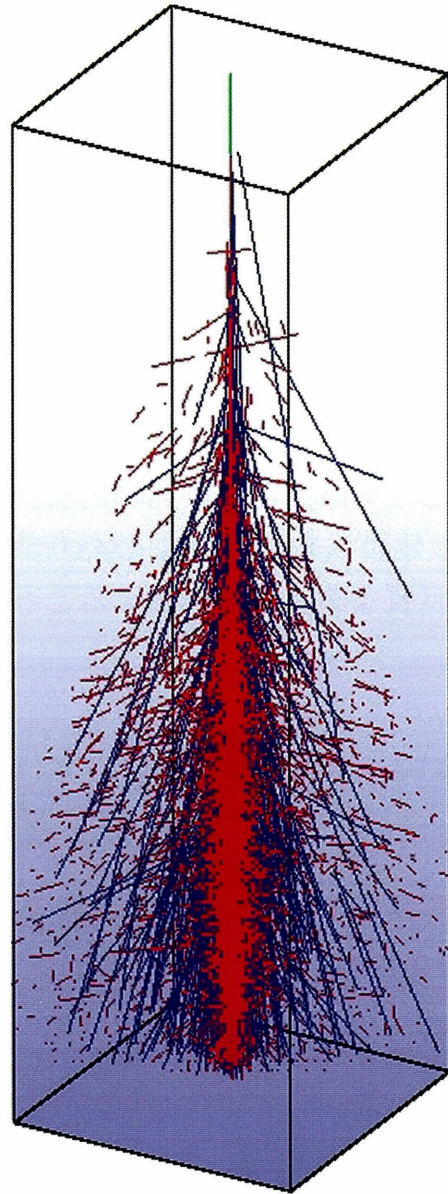


図2：空気シャワー現象（計算機シミュレーション）。最初一つであった宇宙線粒子が大気上層部に入ってきたときに、大気原子核と衝突し多くの粒子が生み出されている様子を示しています。 $10^{20}$ eV 以上の最高エネルギー宇宙線の場合には、地上に到達したときには約1,000億個の粒子群となり、横方向にも5～6kmの広がりを持ちます。

## ◎ 明野広域空気シャワー観測装置

AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) は、111台の2.2m<sup>2</sup>シンチレーション検出器が約1 km間隔で設置された、総面積100km<sup>2</sup>に相当する世界最大級の宇宙線観測システムです。各検出器は光ファイバー網により明野観測所と接続されています。捕らえられた宇宙線の信号は全て、検出器に搭載されたインテリジェントモジュールにより数値化され、光ファイバーケーブルを通して観測所に伝送され記録されます。1980年代にデザイン・建設されましたが、データ収集システムは当時としては最先端の光ファイバーとマイクロプロセッサ技術を駆使しています。この先進的な技術のおかげで、建設以来13年間にわたり非常に安定して良質なデータを収集することができました。



図3：AGASA (Akeno Giant Air Shower Array)。

## ◎ 最高エネルギーイベント

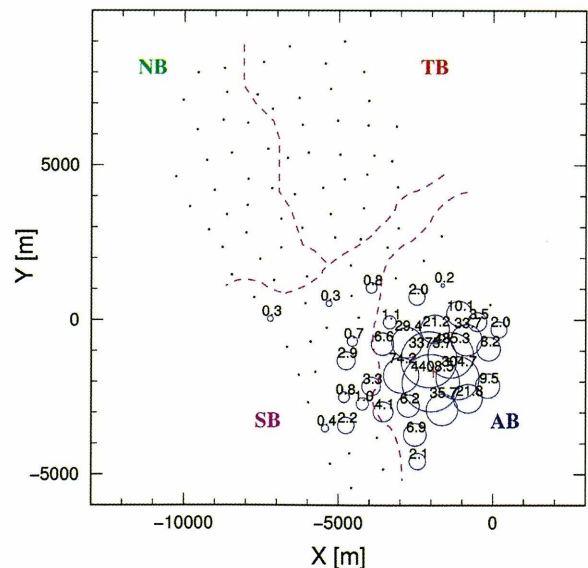
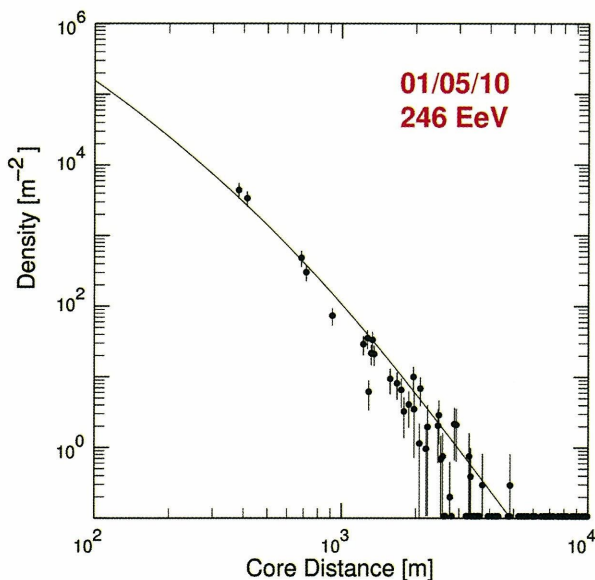


図4：AGASAで観測された最高エネルギーイベント。左図は、中心からの距離に対する粒子密度の分布を示しています。右図は、各検出器での粒子密度を円の大きさと表しています。

## ◎ 装置

図5は、AGASAの構成要素である検出器を収納しているプレハブ小屋の外観です。内部には、シンチレーター用の暗箱（青色）と、信号をデジタル化し明野観測所との通信などを行うコントロール・ユニットを収納しています。

このような装置が、明野村、韮崎市、須玉町、長坂町、高根町、大泉村にまたがって111カ所に設置されています。



図5：シンチレーション検出器のプレハブ小屋。



図6：暗箱内のプラスチック・シンチレーター。

空気シャワー中の電子などの荷電粒子は、図6のプラスチック・シンチレーターを通過すると薄く青い光を発します。この光を電気信号に変換するのが光電子増倍管（図7）です。この電気信号は、各検出器にあるコントロール・ユニット（図8）によりデジタル化され、明野観測所まで転送・処理されています。電柱に共架された光ファイバーケーブルによる観測網は、韮崎市から大泉村までの北巨摩一帯に張り巡らされています。

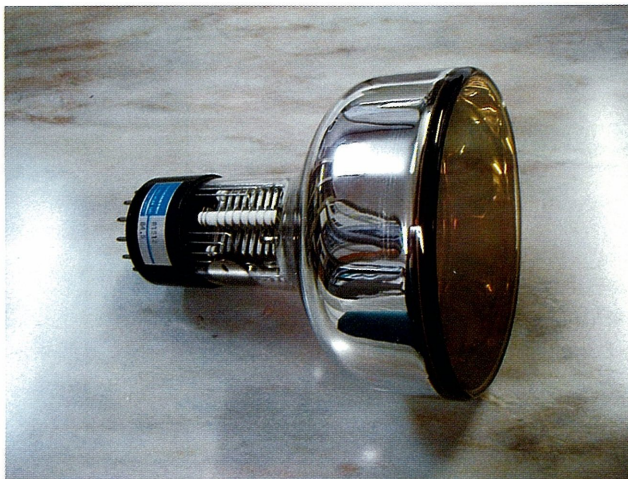


図7：浜松ホトニクス社製光電子増倍管 R1512。

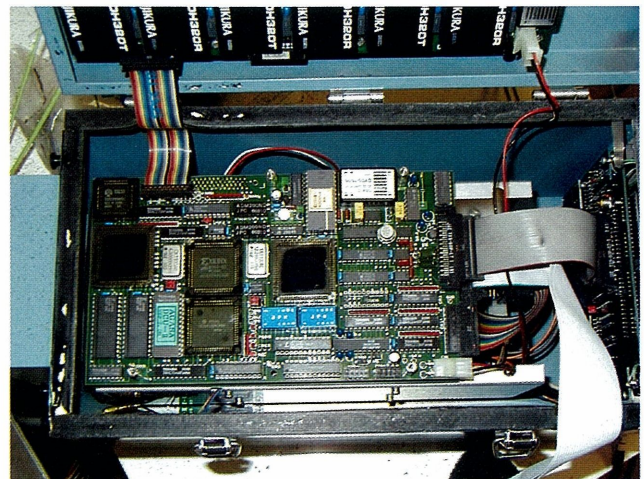


図8：検出器制御装置（Detector Control Unit）。

## ◎ 研究成果

### 宇宙線のエネルギースペクトル

宇宙線のエネルギースペクトル（エネルギー分布）は、図9に示すように10桁以上のエネルギー領域にわたっています。**明野観測所**では創設以来  $3 \times 10^{14}$ eV 以上の宇宙線を系統的に観測し、**AGASA** の結果を含めて6桁にわたるエネルギー領域のスペクトルを決定しました。このような広範囲の測定は他に例がなく、信頼できる標準スペクトルとして世界的に参照されています。特に **AGASA** で観測した  $10^{20}$ eV というエネルギーは、人工の加速器によって到達した最高エネルギーよりも、さらに一億倍以上も高いエネルギーに相当します。

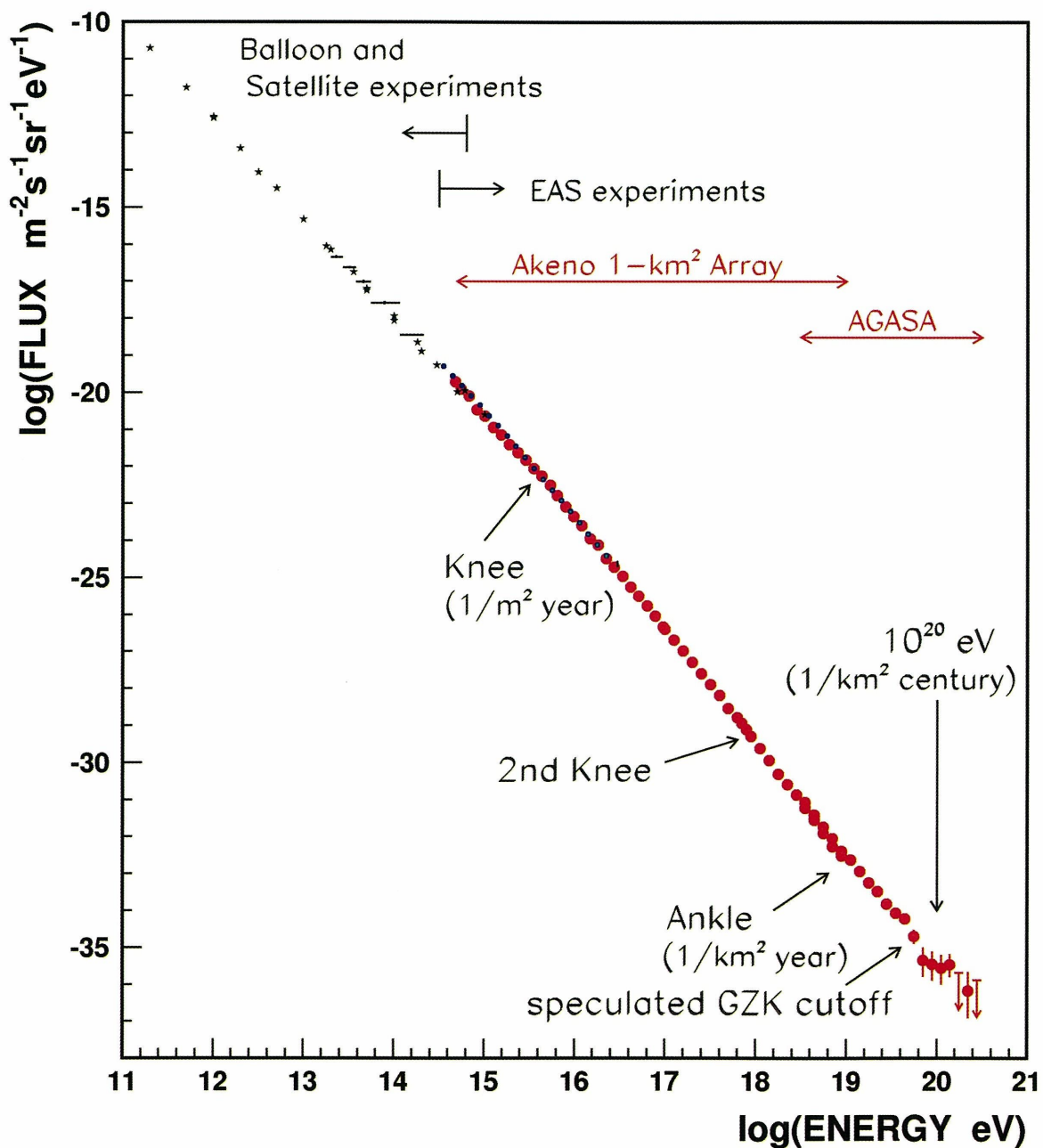


図9：宇宙線のエネルギースペクトル（エネルギー分布）。10桁以上のエネルギー領域において観測されており、そのうち6桁（赤色のデータ）を明野観測所で観測しています。

## 予測を超えた高いエネルギーの宇宙線の観測

AGASA によって得られた成果のうち最も重要なものは、図 9 の右下部分  $10^{19}$  eV 以上の超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトルです。図 10 では、スペクトルの形状を強調するために、縦軸は強度に  $E^3$  (エネルギーの 3 乗) をかけています。

青色の破線は、宇宙空間に一様に宇宙線源が存在して、それらから  $E^{-2.5}$  のべきスペクトルで宇宙線が生成されると仮定したときに、地球で観測されると予測されたエネルギースペクトルです。これに対して AGASA では  $10^{20}$  eV 以上を 11 事象観測しており、予測を超えた高いエネルギーの宇宙線がつかまっていることが分かります。また、これらの到来方向には GZK 効果による距離制限のもとでは有力な活動的天体の候補は見つかっていません。

このような観測結果を通常の理論の枠組で説明することは非常に困難です。以下のようなエキゾチックなモデルによって説明することはできますが、いずれにせよ物理学において非常に大きな変革を迫ることになります。

- (1) 宇宙初期の場の対称性の破れによって形成されたとされる真空の位相欠損 (モノポールやコズミックストリング) の崩壊により生成されるとする説。
- (2) 宇宙初期にできた準安定な超重量粒子が現代まで銀河のハローに暗黒物質の一部として生き残り、それが崩壊して生成されるとする説。
- (3) 相対性理論が破れているとする説。相対論がこのような極限的なエネルギー領域でわずかに破れていれば、GZK 効果によるエネルギー損失を回避できます。

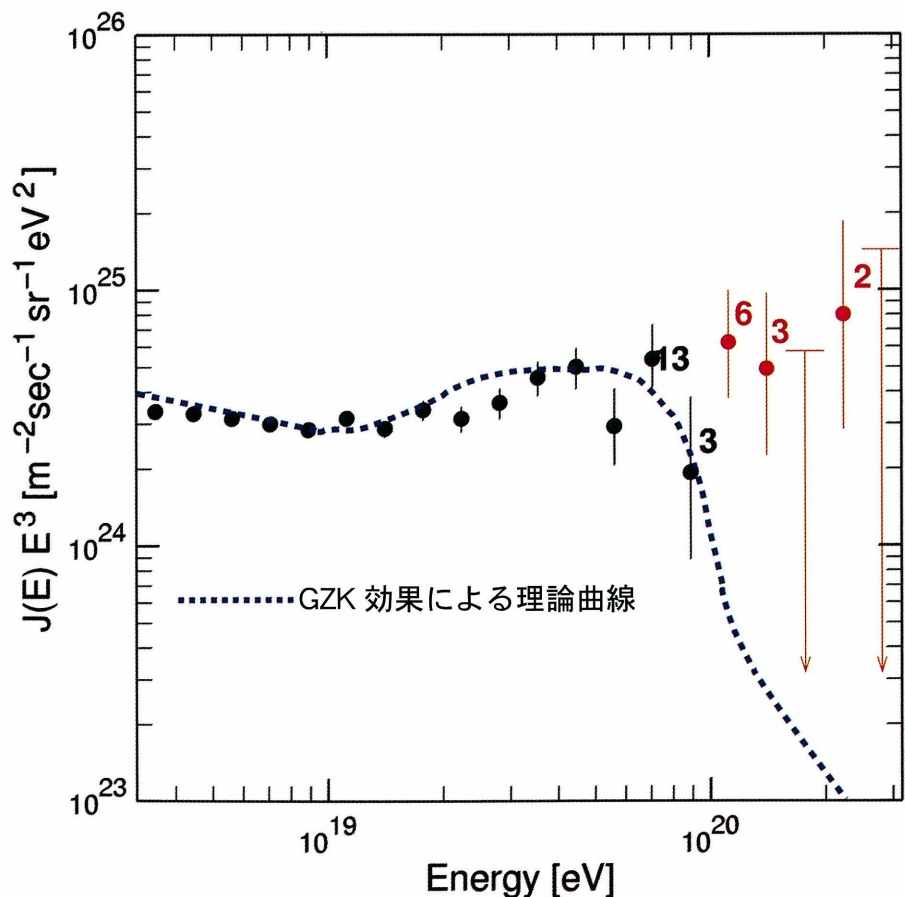


図10：AGASA により観測されたエネルギースペクトル。図 9 の右下部分を強調するために、縦軸は強度に  $E^3$  (エネルギーの 3 乗) をかけています。青色の破線は、GZK 効果によって  $10^{20}$  eV 以上の宇宙線強度が落ちるとする理論予測を示しています。

## 最高エネルギー領域宇宙線の候補点源の観測

AGASA によって得られたもう一つの興味深い結果は、超高エネルギー宇宙線の到来方向分布です。図11は、**GZK 効果**が働き始めると予測される  $4 \times 10^{19} \text{eV}$  以上の宇宙線の到来方向分布を示しています。**GZK 効果**の理論によれば、これらの宇宙線の源は地球から100Mpc (3.26億光年) 以内と、宇宙全体の大きさに比べると極めて近傍です。そのため源を同定できると期待されていましたが、観測データは大局的には全く一様ランダムな分布を示しています。この事実は、これらの最高エネルギー宇宙線が私達の銀河系(天の川銀河)や近傍の銀河に起源を持つのではないことを示しています。

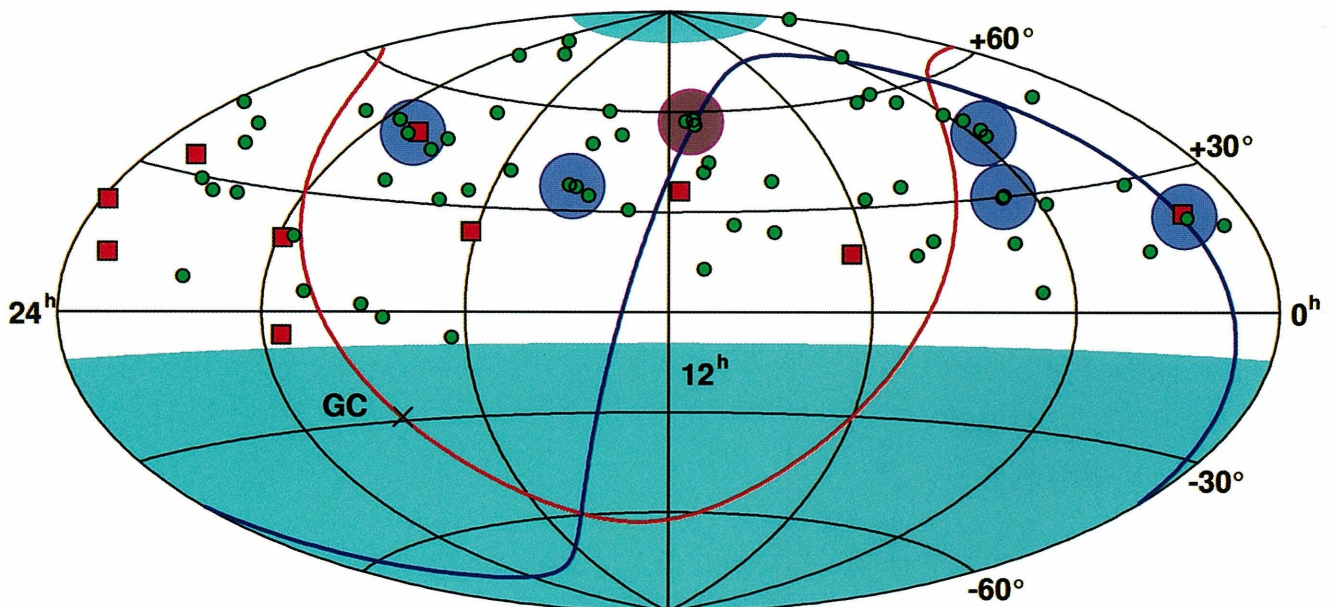


図11：  $4 \times 10^{19} \text{eV}$  以上の超高エネルギー宇宙線事象の到来方向分布（赤道座標）。■が  $10^{20} \text{eV}$  以上の事象、●が  $4 \times 10^{19} \text{eV}$  から  $10^{20} \text{eV}$  の事象を表しています。上下の水色の領域は、天頂角が大きく解析に使用しないところを示しています。また赤線が銀河面、青線が超銀河面（近傍の銀河の集まっている領域）を示しています。

一方この分布を詳細に見ると、大きな円で囲まれている領域に、2個もしくは3個の事象が重なるように観測されていることが分かります。このような事象の集中が偶然起こり得るのかテストしたものが図12です。この図は、全事象から任意の二つの事象を抽出し、それらの事象間の角距離を求めた分布を示しています。図中の実線は、宇宙線が等方的に観測されると仮定した場合に期待される分布です。またヒストグラムは実際に観測された分布で、角距離3度以下の領域で明らかなピークが得られています。つまり、このような事象の集中を偶然と呼ぶのは難しく、最高エネルギー宇宙線がコンパクトな源（天体）から来ている可能性を強く示唆しています。



殊に、AGASA の角度分解能が 2.5度であることを考えれば、源は点状であることとなります。

### 銀河系外宇宙線の等方性

図10において折れ曲がりが見える  $10^{19}$ eV というエネルギーは、宇宙線の源が銀河系内から銀河系外へと遷移しているエネルギーと考えられています。このエネルギー領域においても、実験結果は「大局的な等方性」と「小規模の事象の集中」を示しており、このような事象の集中は宇宙線による天文学のきっかけとなる可能性を秘めています。

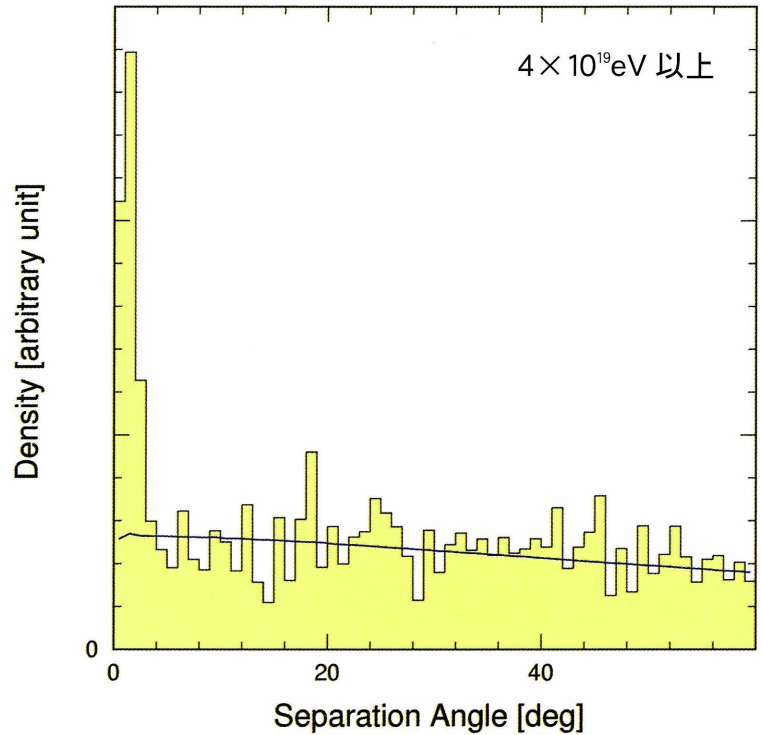


図12：天球上での事象間角距離の分布。ヒストグラムが観測された分布、実線が宇宙線が等方的に観測されると仮定した場合に期待される分布を示しています。

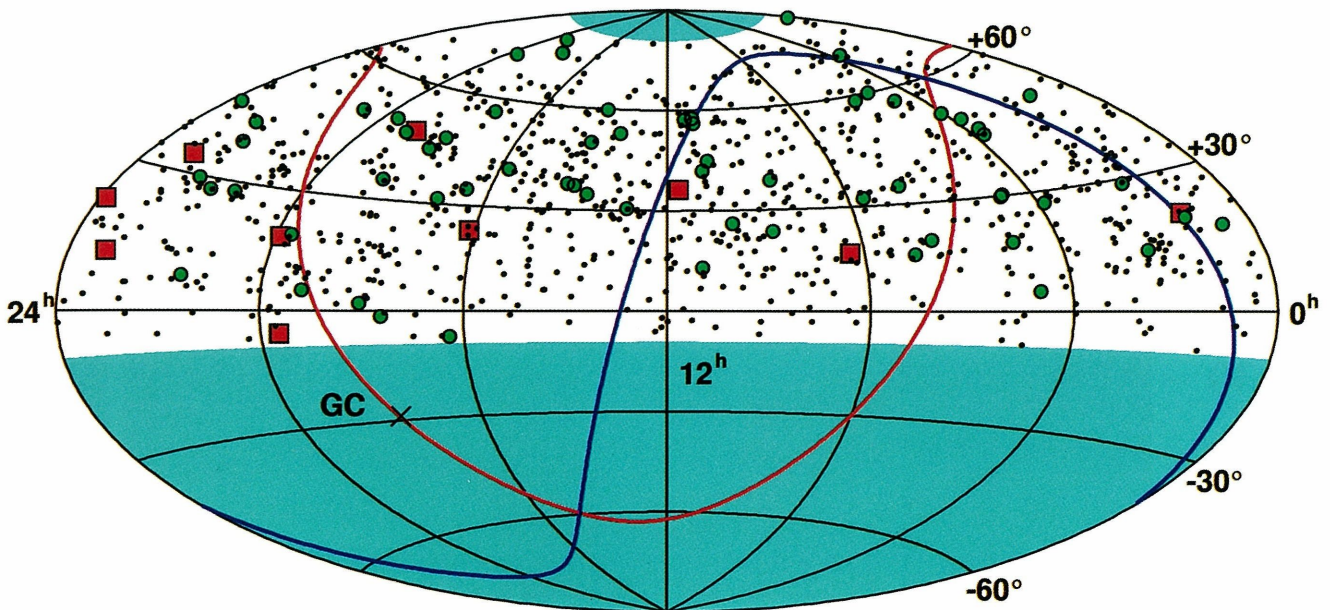


図13： $10^{19}$ eV 以上の超高エネルギー宇宙線事象の到来方向分布（赤道座標）。■が  $10^{20}$ eV 以上の事象、●が  $4 \times 10^{19}$ eV から  $10^{20}$ eV の事象、・が  $10^{19}$ eV から  $4 \times 10^{19}$ eV の事象を表しています。ここで■と●は図11と同じ。

## 10<sup>18</sup>eV 付近の宇宙線の異方性

さらにエネルギーが下がった10<sup>18</sup>eV から 3 × 10<sup>18</sup>eV の領域では、宇宙線の到来方向分布が銀河系の構造と強く関連していると思われる異方性を示しました。これは大局的な異方性で、図14に一様等方な分布からのズレを等高線で表しています。銀河系の中心方向 (G.C.) に近い領域で銀河面に沿って頻度が高い領域 (赤い領域) が存在し、逆に銀河系の外へと向かう反銀河中心方向 (anti G.C.) に頻度の少ない領域 (青い領域) が存在しています。このエネルギースケールは、銀河系外宇宙線へと遷移する直前のエネルギー領域に対応しています。このような宇宙線が陽子ならば、銀河系内宇宙線としては最も高い rigidity (荷電粒子の磁場中での曲がりにくさ) を持つ成分となります。あるいは中性子ならば、10<sup>18</sup>eV では相対論の効果により10kpc 程度伝播することができるので、銀河中心からの中性子の可能性も考えられます。このような銀河系内宇宙線の実験的証拠を **AGASA** は世界に先駆けて発表しました。

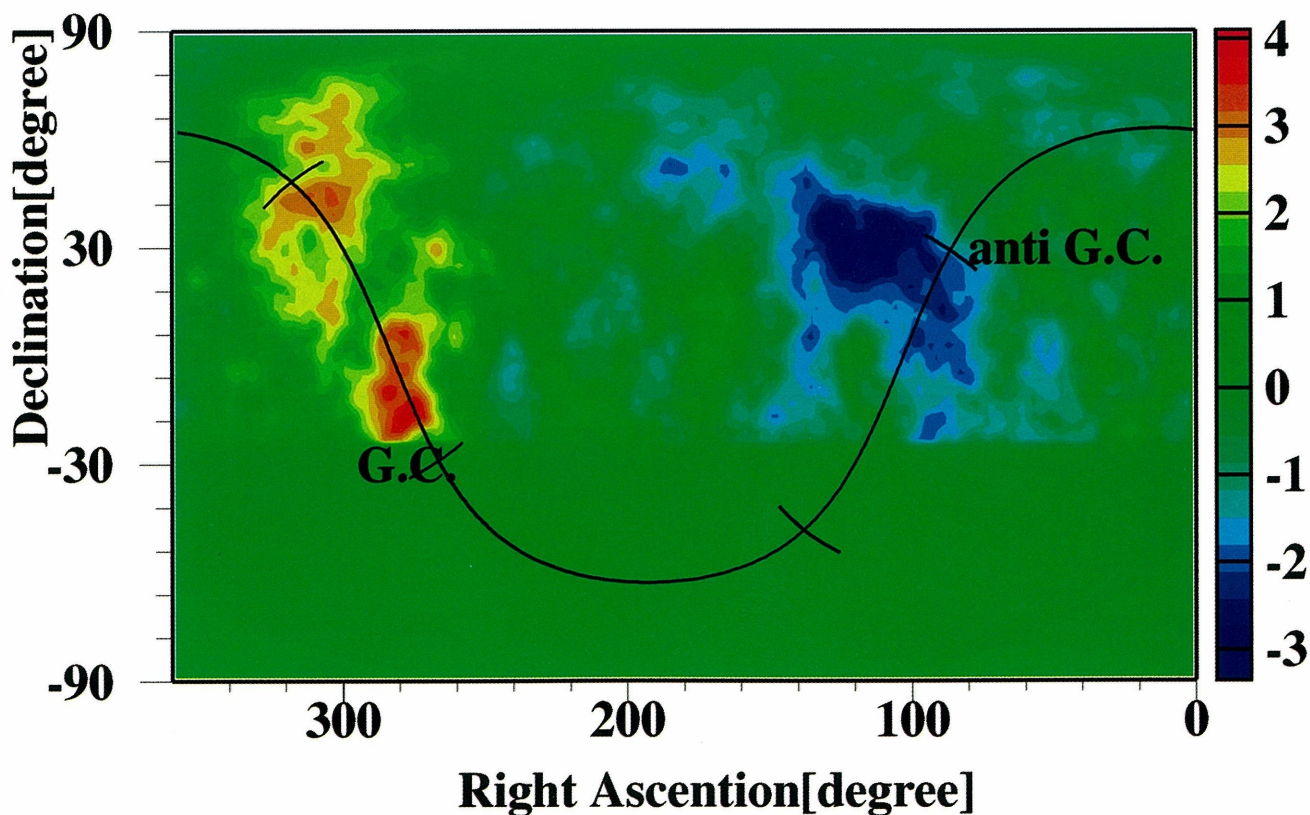


図14：10<sup>18</sup>eV から 3 × 10<sup>18</sup>eV の宇宙線の到来方向頻度分布 (赤道座標)。カラーコードの違いは、一様等方な分布からのズレを表しており、赤いところほど頻度が高く、青いところは頻度が少なくなっています。但し、赤緯 (Declination) -25度以下は、天頂角が大きき解析には使用していません。

## 天体起源以外の宇宙線の探索

もし $10^{20}$ eV を超える宇宙線が天体起源でなく、宇宙初期などに関連したエキゾチックなモデルに基づくものなら、その成分はガンマ線である可能性があります。ガンマ線を陽子や他の原子核から判別する測定量の一つが、空気シャワー中に含まれるミュオン密度です。AGASA では111台の検出器のうち27台にはミュオン検出器も併設しており、電子密度と同時にミュオン密度も測定できます。

図15は、 $10^{19}$ eV 以上の宇宙線事象に対するミュオン密度をプロットしています。空気シャワーシミュレーション (AIRES QGSJET モデル) との比較から、一次宇宙線がどの程度陽子

(Proton)、鉄 (Iron) あるいはガンマ線 ( $\gamma$ -ray) らしいかを検定できます。赤色の領域は、一次宇宙線が陽子や鉄などの原子核成分に比べて、ミュオン密度が低くガンマ線の可能性が高い領域と言えます。 $10^{19}$ eV 以上の宇宙線に対してガンマ線成分の割合は上限値28%と推定され、今のところエキゾチックなモデルに基づく起源 (宇宙初期の位相欠損の崩壊モデル、ニュートリノ伝播によるZ-バーストモデル、準安定な超重量粒子の崩壊モデル、など) の証拠は得られていません。しかし、ミュオンが全く観測されていない特異な宇宙線事象も観測されており、さらに多くの宇宙線事象の観測が待たれています。

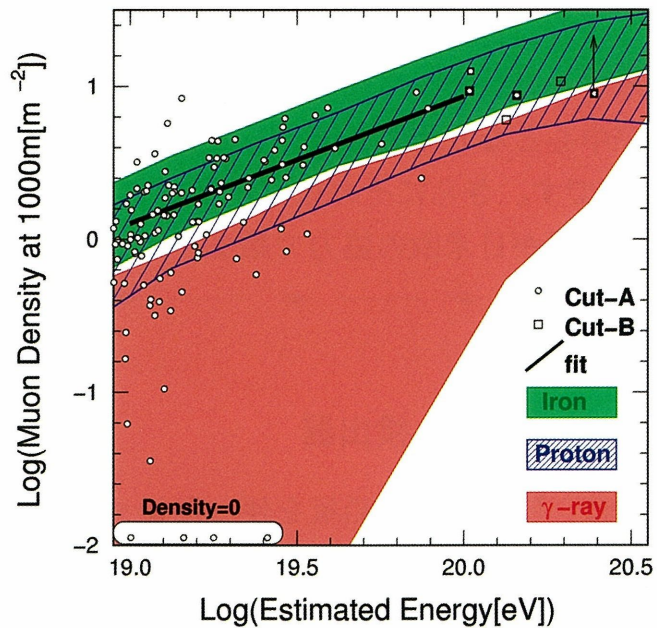


図15: 空気シャワー事象に伴うミュオン密度の分布。一次宇宙線が陽子 (Proton)、鉄 (Iron)、ガンマ線 ( $\gamma$ -ray) の場合に期待されるシミュレーション (AIRES QGSJET モデル) との比較。

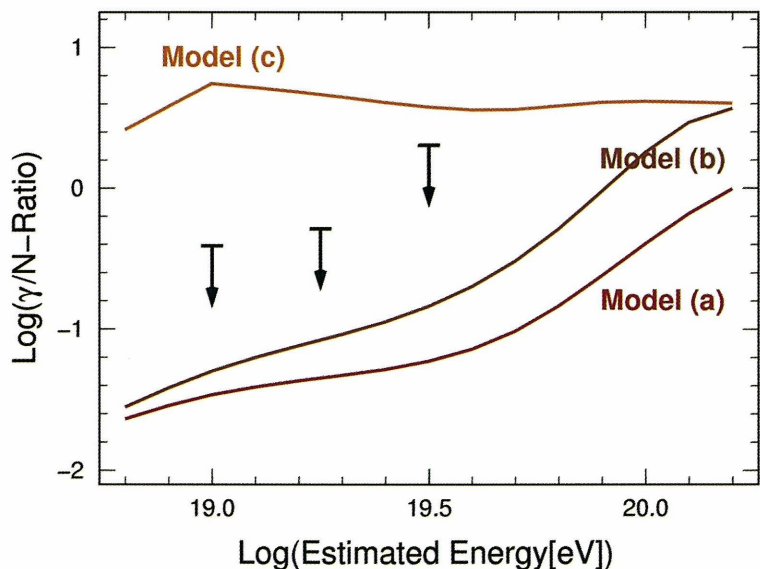



図16: ガンマ線 ( $\gamma$ -ray、光子) 頻度の上限值。(a)位相欠損の崩壊モデル、(b) ニュートリノ伝播によるZ-バーストモデル、(c) 準安定な超重量粒子の崩壊モデル。

## ◎ AGASA の発展研究

AGASA により観測された予測を超えた高いエネルギーの宇宙線の正体を解明するには、多くの宇宙線を集めなければなりません。しかしそのような高いエネルギーを持つ宇宙線は、100km<sup>2</sup>あたり一年に一個しか降ってきません。この予期しなかった観測結果を確かめ発展させるために、現在2つの大観測装置の建設が始まっています。その一つが、1980年にノーベル賞を受賞したJ.W.クローニン氏が提唱し、2000年から南米アルゼンチンに建設が始まった**ピエール・オージェ観測装置**です。もう一つが、日本が中心となり米国と協力して2003年から米国ユタ州に建設が始まった**宇宙線望遠鏡(TA)**です。さらにその先を目指して、宇宙から空気シャワー現象を観測する**EUSO計画**の準備が日米欧の協力で始まっています。 

### ● レッドバーガー検出器

図17は、厚さ1cmの鉛板を使ったレッドバーガー（面積12m<sup>2</sup>）です。他に、周辺観測室に面積12m<sup>2</sup>、明野ブランチセンター(明野中学校)に面積6m<sup>2</sup>のレッドバーガー



図17：レッドバーガー実験装置（中央実験棟、12m<sup>2</sup>）。空気シャワーの元となった一次宇宙線の組成を調べるために、空気シャワー中の電子成分、ガンマ線成分、ミューオン成分を分離して測定します。

検出器があります。数値シミュレーションにより、鉛板の上層下層両方の検出器に信号が現れるものはミューオンに相当し、上層の検出器のみに信号が現れるものは電子、下層の検出器のみに信号が現れるものはガンマ線に相当することが示されており、各成分の分離が可能となります。さらにこれらの粒子の到着時間分布も記録することにより、それらの粒子がどの高度でつくられたか推定されます。山梨大学グループが中心になり、これらの情報を使って空気シャワーの元となった一次宇宙線の組成について研究を行っています。



明野では、1995年頃よりこれらの AGASA の次世代計画のための準備研究が盛んにおこなわれました。ピエール・オージェ観測装置の基本検出器としては、鉛板の上下をシンチレーション検出器でサンドイッチ状に挟んだ検出器（ハンバーガと構成が似ているのでレッドバーガー検出器と呼ばれます）と、大きな水タンクを利用した水チェレンコフ検出器が候補としてあがり、その選択を決定するために AGASA と連動して以下二つの実験がおこなわれました。この研究結果をもとに、検出器として水チェレンコフ検出器が選ばれました。日本はピエール・オージェ観測装置に参加していませんが、その準備に大いに貢献しました。

※ ピエール・オージェ実験 <http://www.auger.org/>

## ● 水チェレンコフ検出器

空気シャワー中のミュオンや電子などの荷電粒子が水中を高速で走ると、チェレンコフ光という青い光を発することから水チェレンコフ検出器と呼ばれます。この検出器（面積10m<sup>2</sup>、深さ1.2mの水タンク）2台を明野観測所と周辺観測室に設置し、シカゴ大学、フェルミ研究所、ハイデルベルク大学からの研究者も参加し、AGASA との連動実験を実施しました。これにより、超高エネルギー宇宙線による空気シャワーの中心から遠方での特性を調べるのにふさわしいことがわかりました。他の条件も考慮しこの水チェレンコフ検出器の改良型がピエール・オージェ観測装置の基本検出器として選ばれ、現在南米アルゼンチンで設置されつつあります。



図18：水チェレンコフ検出器（中央実験棟、面積10m<sup>2</sup>深さ1.2mの水タンク）。

前述の **AGASA** や **ピエール・オージェ実験** のような空気シャワーアレイによる観測とは別に、宇宙線の観測方法には、空気シャワー現象に伴う発光現象を捕える方法があります。この発光現象には、空気シャワー中の電子が大気中での光速（真空中での光速より遅い）より速く走るときに放射される **チェレンコフ光** と、空気シャワー中の電子によって励起された窒素分子や窒素イオンが発する微弱な紫外光（**大気蛍光**）とがあります。日本では **AGASA** の後継として、**大気蛍光法** を用いた **宇宙線望遠鏡 (TA) 計画** を推進し、その準備研究として **7 素子の望遠鏡** を用いた **チェレンコフ光観測法** による高エネルギーガンマ線観測を明野観測所と米国ユタ州で行いました。さらに、地球に向けた望遠鏡を国際宇宙ステーションに搭載することにより **大気蛍光** をより広範囲で捕えようとする **EUSO 計画** への発展を目指しています。



## ● 7 素子宇宙線望遠鏡実験

**TA 計画** の初期においては、特定の天体からの  $10^{12}\text{eV}$  近辺の高エネルギーガンマ線の検出も研究目的となっていました。特定の天体の方向に望遠鏡を向け、その天体からやってくるガンマ線によって生じた空気シャワーに伴う **チェレンコフ光** を集光して撮像します。この観測装置は、超新星残骸のカニ星雲や、活動的銀河核 Mkn421、Mkn501、1ES1959 からの高エネルギーガンマ線を検出しました。特に、活動的銀河核 1ES1959 は、この装置により初めて高エネルギーガンマ線天体として同定された天体で、その 5 年後に米国やヨーロッパにある同様の望遠鏡により追認されました。



図19：7 素子宇宙線望遠鏡の 1 素子。TA 計画の試作機として経緯台付きで開発されました。

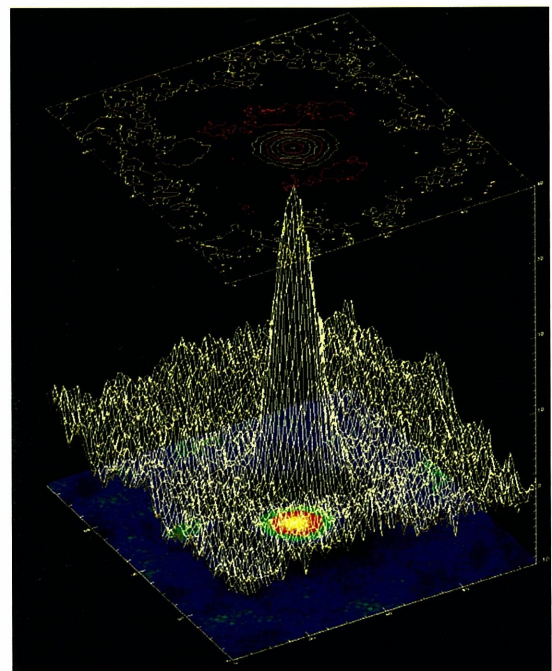


図20：活動的銀河核 Mkn501 からの高エネルギーガンマ線（中央のピーク部分）を検出しました。

## ● 宇宙線望遠鏡(TA)実験

最高エネルギー宇宙線の光学的な測定方法としては、前述のガンマ線を観測するためのチェレンコフ光観測法よりも、はるかに優れた大気蛍光法という観測方法があります。大気蛍光は全ての方向に一様に放射されるので、空気シャワーの縦方向発達（図2参照）を遠く横方向から観測することができ、飛躍的に観測エリアを広げることが可能となります。大気蛍光の発光量から一次宇宙線のエネルギーを精度良く推定することができ、縦方向発達の形状から親粒子の組成を判定することができます。さらに、空気シャワーの軌跡から到来方向を決めることもできます。この新しい方法により、格段に高い宇宙線の検出効率を実現し、そして新たな情報を得ることが可能となります。私達は、AGASAの結果の確認さらに新たな発見のために、より詳細で精度の高い測定を目指します。

そこでAGASAの次期計画として考案された**宇宙線望遠鏡(TA)実験**では、大気蛍光法と空気シャワーアレイそれぞれの長所を組み合わせた観測装置を建設します。大気蛍光の観測には暗くて澄んだ夜空が必要となるので、建設地として米国ユタ州デルタ郊外の砂漠を選びました。**宇宙線望遠鏡(TA)実験**ではAGASAの10倍を越える感度を持つこととなります。

これからの明野観測所は、**宇宙線望遠鏡(TA)実験**の国内開発基地として活用していきます。



図21：米国ユタ州デルタ郊外の砂漠。大気蛍光望遠鏡の建設予定地の丘から、地表検出器サイトを望む。

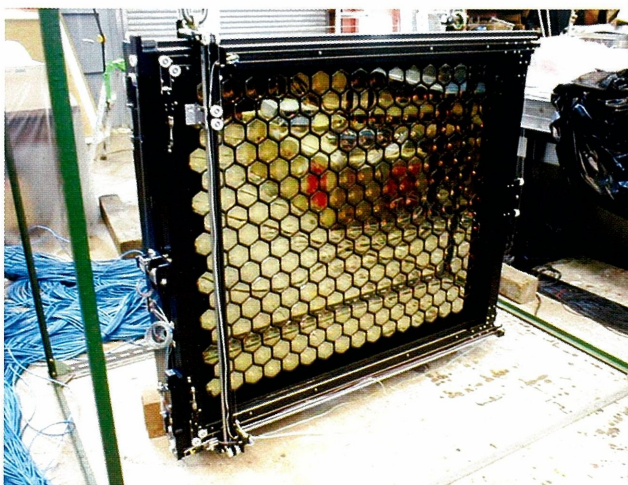


図22：大気蛍光望遠鏡の撮像カメラの試作機。

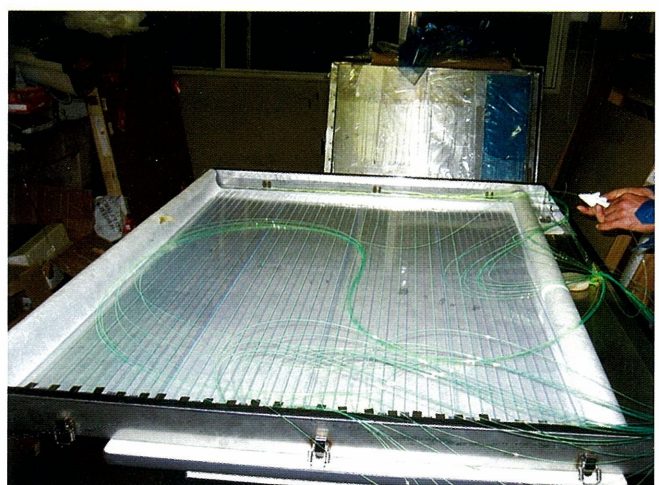
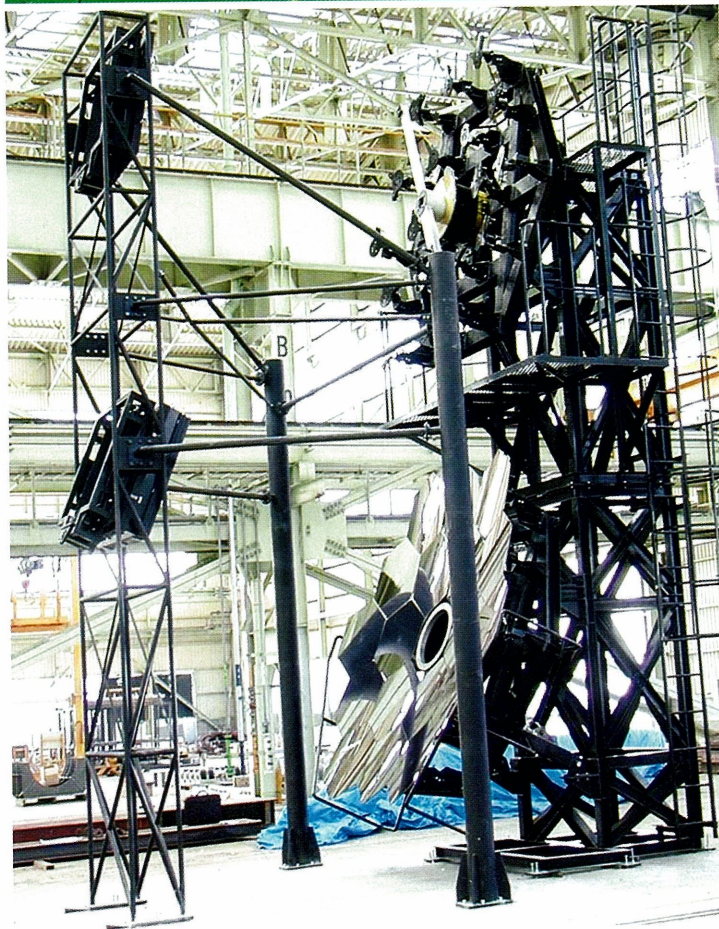
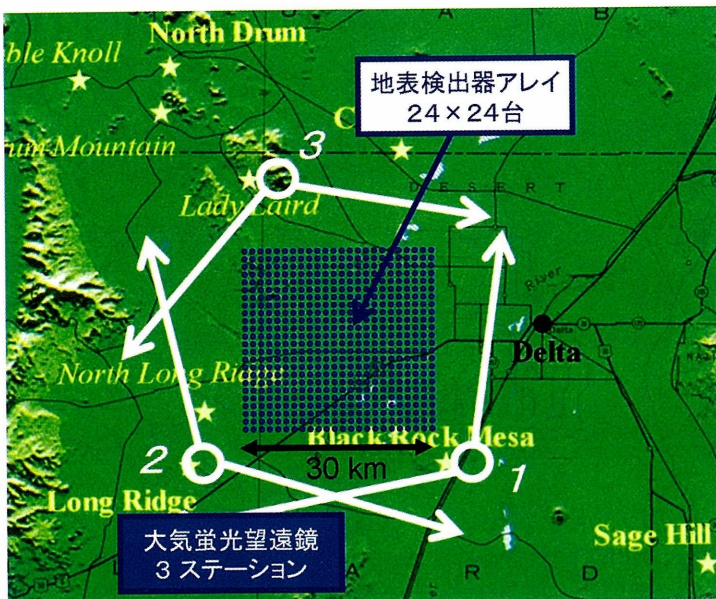


図23：地表検出器の試作機。

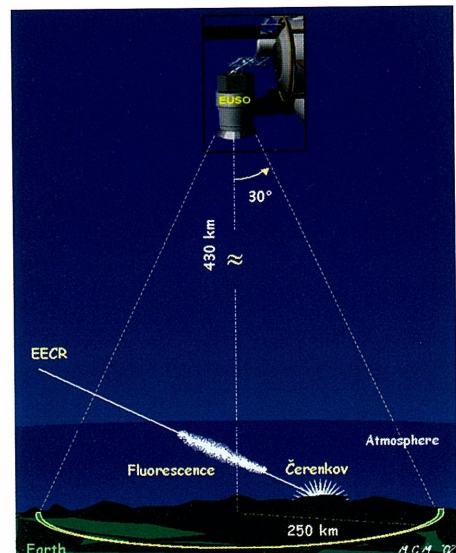
● 宇宙線望遠鏡 (TA) 実験



● ピエール・オージェ実験



● EUSO 計画



東京大学 宇宙線研究所 明野観測所 AGASA 実験グループ

<http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>

〒407-0201 山梨県北杜市明野町浅尾5259  
Tel.0551(25)2301 FAX.0551(25)2303

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉5-1-5  
Tel.04(7136)5117,5130 FAX.04(7136)3147

2005年3月