



THE TELESCOPE ARRAY EXPERIMENT

～最高エネルギー宇宙線の起源を求めて～



2008 年 8 月

テレスコープアレイ実験グループ



◎ 超高エネルギー宇宙線

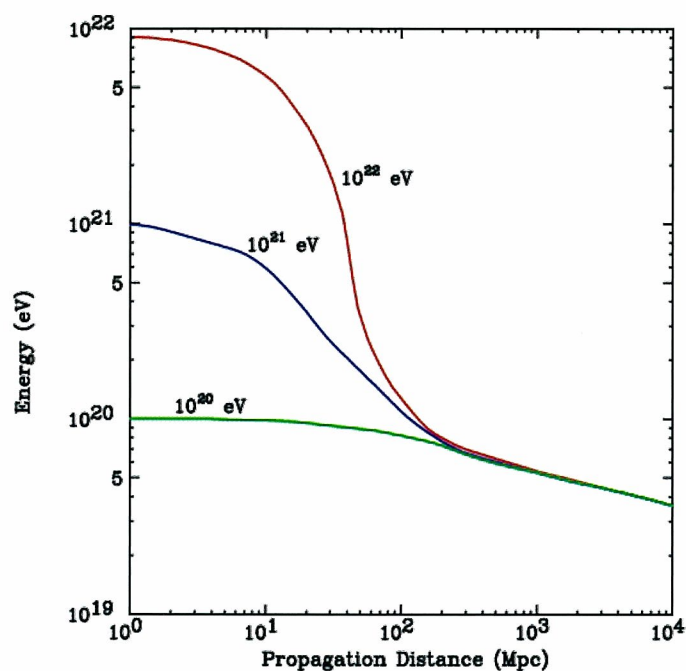
宇宙線とは、宇宙を高速で飛び交う高エネルギーの素粒子・原子核のことです。太陽フレアの際に放出される粒子は、宇宙線のエネルギーとしては最も低いエネルギー領域に相当します。このような粒子より100億倍以上ものエネルギーをもつ宇宙線が観測されていますが、どこでどのようにして生成され、地球までどのようにして伝播してきたか未だに解明されていません。宇宙線望遠鏡実験グループ（TAグループ）では、このような超高エネルギー宇宙線を精度よく観測することで、これらの謎に迫ろうとしています。

超高エネルギー宇宙線には、より低いエネルギーの宇宙線に比べて以下の2つの特徴的な現象が予想されます。

○ 宇宙線のエネルギー

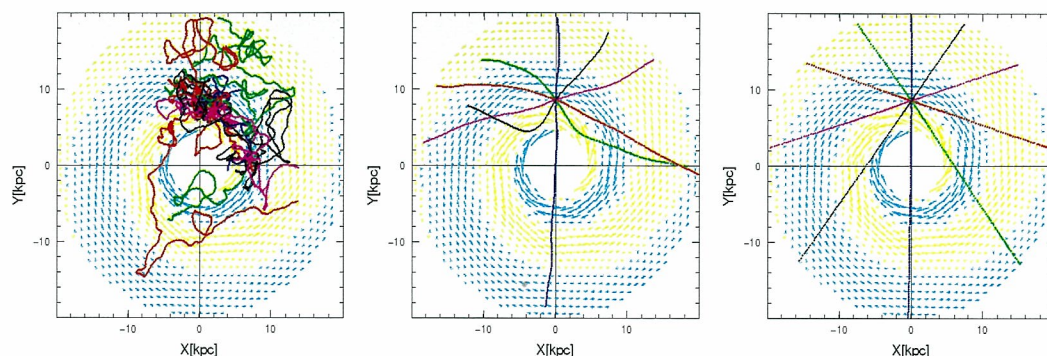
ひとつは、ビッグバンの名残りである宇宙背景放射の光子と衝突してエネルギーを失い、 10^{20} eVを超えるエネルギーをもつ宇宙線が作られたとしても、100Mpc（3.26億光年）も伝播を繰り返すと 4×10^{19} eV程度のエネルギーになってしまいます。この効果を提唱者の名前からGZK（グライゼン、ザツェッピン、クズミン）効果といいます。

※ eVはエネルギーの単位



○ 宇宙線の到来方向

もうひとつは、宇宙磁場中でも曲げられることなくほぼ直進するということです。地球に到達する宇宙線陽子の銀河系磁場での軌跡（下図、左から 10^{18} eV、 10^{19} eV、 10^{20} eV）はエネルギーが高くなるほど直線とみなすことができます。



これら2つの特徴から超高エネルギー宇宙線の起源の研究を進めていきます。

◎ 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が地球に飛来する頻度は極めて低く、 100km^2 あたり一年に一度しかありません。そのように低い頻度にも関わらず、大きさが砂粒の一兆分の一程度の宇宙線をどうやって捉えるのでしょうか。TAグループでは、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。

○ 空気シャワー現象

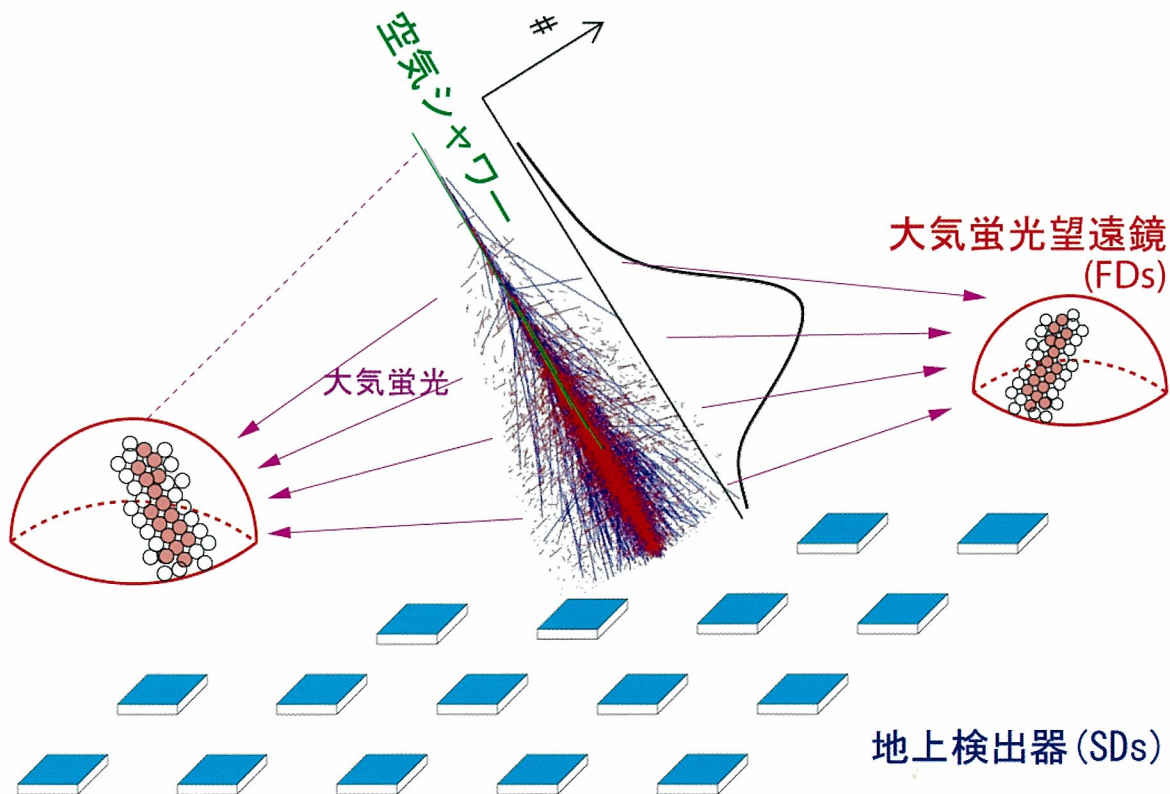
超高エネルギー宇宙線が大気中に入射すると、下図に示すように空気中の原子核と衝突して多数の二次粒子を生成します。これらの二次粒子は空気中の原子核との衝突を繰り返して、鼠算式に粒子数が増えて行きます。このような現象を空気シャワー現象と呼びます。その過程で個々の粒子のエネルギーは低くなって、やがて空気シャワーは減衰します。親粒子のエネルギーが高いほど、空気シャワー粒子は大気深くまで入ってきます。例えば 10^{20} eV 以上の最高エネルギー宇宙線の場合には、ほぼ地上付近で粒子数が最大となり、1,000 億個を超える粒子群がパンケーキ状に降り注ぎます。

○ 大気蛍光望遠鏡と地上検出器

これらの粒子群が大気中を高速に進む時に、窒素原子を励起して蛍光紫外線を発します。**大気蛍光望遠鏡**ではこの紫外線を集光して100ナノ秒ごとに撮像することにより、空気シャワーの縦方向発達を観測します。

一方、粒子群は横方向にも5~6kmの広がりをもつので、約1.2km間隔に配置した**地上検出器**により、空気シャワーの横方向の広がりを観測します。


大気蛍光望遠鏡と地上検出器は互いに補い合って、最初の親粒子のエネルギー・到来方向・粒子の種類を高い精度で求めることが可能となります。



◎ 宇宙線望遠鏡実験 (The Telescope Array Experiment)

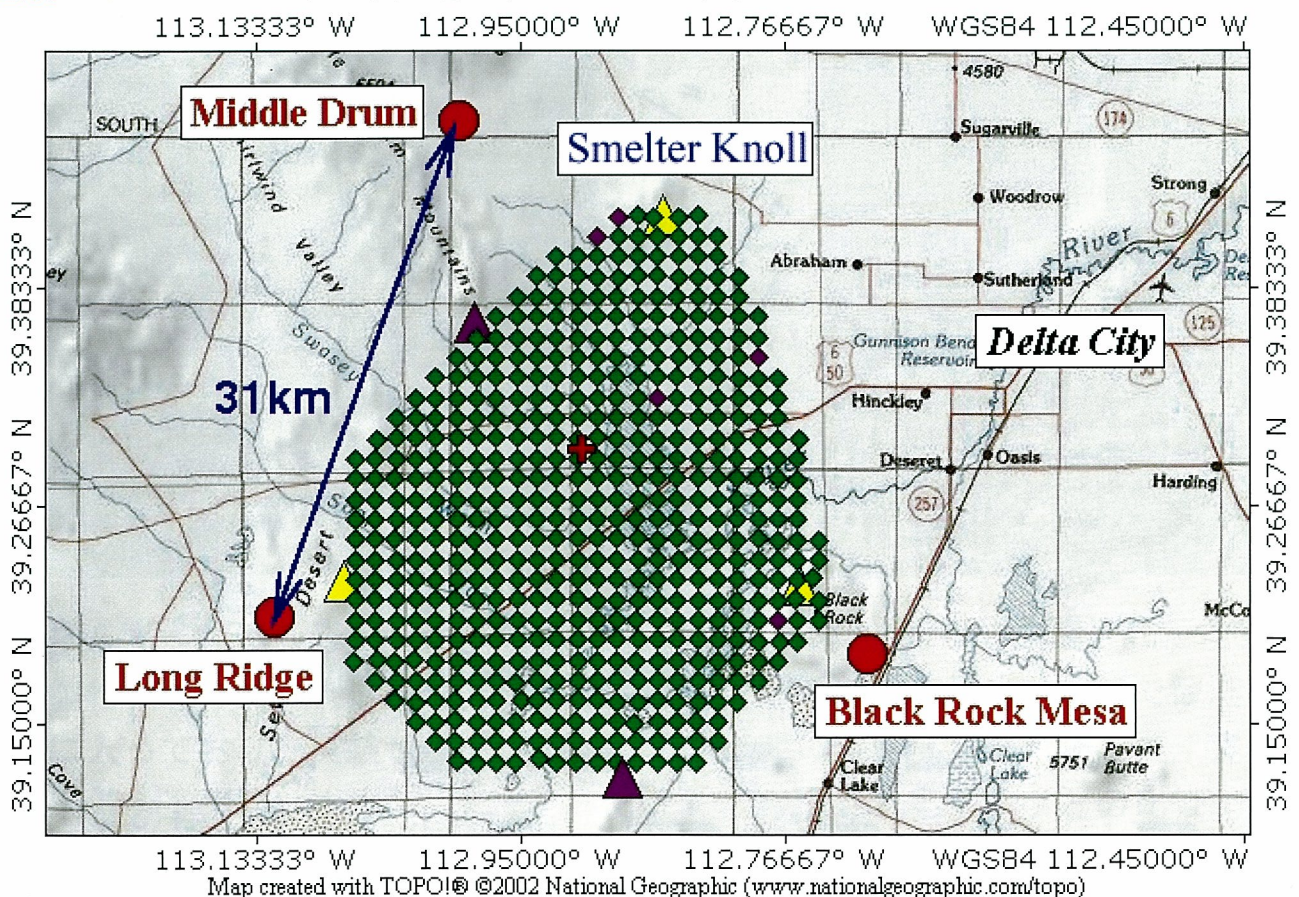
○ TA グループ

TA グループは、大気蛍光望遠鏡システムを開発・改良してきたアメリカの HiRes グループと地上検出器アレイで成果をあげてきた日本の AGASA グループをはじめ、4 カ国 28 大学・機関 119 人の研究者からなる国際共同実験グループです。

| | | |
|--|--|---|
| <p>日本</p> <p>アメリカ</p> <p>韓国</p> <p>ロシア</p> | <p>東京大学宇宙線研究所、千葉大学、愛媛大学、広島市立大学、高エネルギー加速器研究機構、神奈川大学、近畿大学、高知大学、武蔵工業大学、放射線医学研究所、大阪市立大学、埼玉大学、東京工業大学、東京理科大学、山梨大学、早稲田大学</p> <p>Univ. of Utah, LANL, Rutgers Univ., Univ. of Denver, Univ. of New Mexico, Utah State Univ.</p> <p>忠南大学、梨花女子大学、漢陽大学、釜山大学、延世大学</p> <p>INR</p> |  |
|--|--|---|

○ TA 実験サイト

TA 実験サイトは、アメリカ ユタ州ミラード郡デルタ市の郊外に広がる荒野（西経 112 度 54 分、北緯 39 度 17 分）にあります。下図のように地上検出器（◆印）は約 680km² におよぶ面積を覆っています。さらにこの領域を取り囲む 3 箇所に大気蛍光望遠鏡ステーション（●印）を配置しています。



◎ TA 装置の建設と保守

検出器を配置する広大な地域は比較的平坦で街灯りは少なく、高い晴天率と乾燥した大気という宇宙線観測に非常に適した土地といえます。しかし、自然が多く残る土地だけに野生動植物の保護は重要な課題であり、数度にわたる現地調査を行い、動物の繁殖期である3月から8月末までは系統立てた大量アクセスは禁止されています。さらに地上検出器の設置の際には植生を痛めないようにヘリコプターを使用したり、保守作業時にも徒歩や馬でアクセスするなど環境保護に配慮した実験となっています。

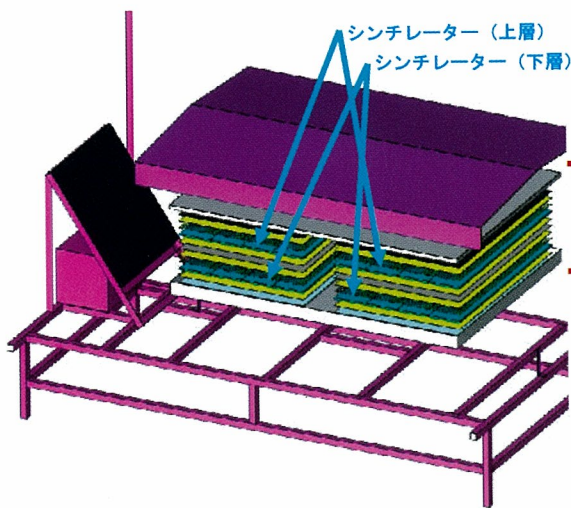
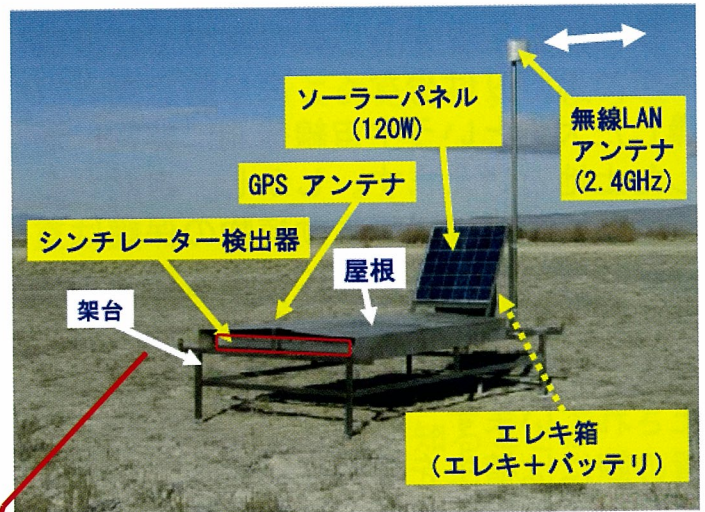


○ 建設・運用の概略

| | |
|-------------------|--------------------------------|
| 2004年12月 | 地上検出器開発版18台を試験設置 |
| 2005年10月 | Black Rock Mesa ステーション建屋が完成 |
| 2006年 1月～2006年 2月 | Black Rock Mesa 望遠鏡架台を設置 |
| 2006年 4月 | Long Ridge ステーション建屋が完成 |
| 2006年 9月 | 通信塔3箇所を建設 |
| 2006年10月～2007年3月 | ヘリコプターによる地上検出器（約95%）の設置 |
| 2006年12月 | Long Ridge 望遠鏡架台を設置 |
| 2007年 3月～ | Black Rock Mesa ステーションで試験観測を開始 |
| 2007年 4月～ | 地上検出器の調整、その後部分的に観測開始 |
| 2007年10月 | 地上検出器の一斉調整 |
| 2007年11月～ | 大気蛍光望遠鏡ステーション3箇所すべてにおいて本格観測を開始 |
| 2008年 3月～ | 地上検出器の定常観測開始 |

◎ 地上検出器 (Surface Detector)

地上検出器では、太陽電池パネル・バッテリーによる電力供給、GPSによる時間と位置情報の取得、無線LANによる通信を行っています。これらの技術によって、従来の実験で必須であった中央装置とのケーブル配線をなくした独立稼働可能なシステムを実現しています。



地上検出器は3.0m²の大きさと12mm厚のシンチレーター2層からなり、空気シャワー中の電子などの荷電粒子を検出します。環境放射線によるノイズの混入は独立したシステムでは大きな問題となりますが、上下2層の同時入射という条件を課すことによって“信号”を選択的に取得してこの問題をクリアしています。信号処理や検出器の制御を行うエレクトロニクスは、太陽電池パネルの日陰にバッテリーと一緒に収納されています。

◎ 通信塔

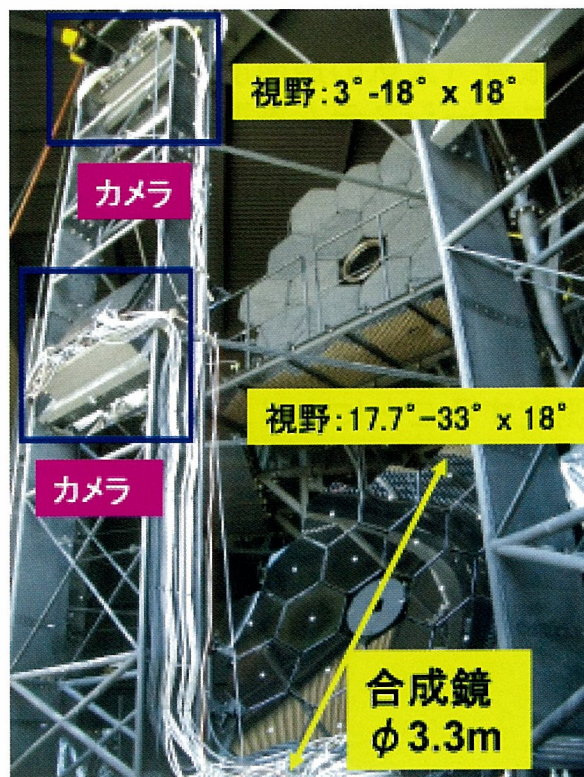
地上検出器503台を、約680km²という広大な領域に約1.2km間隔の碁盤目状に配置しています。これらは3つの領域に分割されていて、各領域ごとにイベント判定を行う中央制御装置を有する通信塔を設置しています。各領域でのシャワートリガー頻度は0.003Hz程度で、ノイズによる誤判定はほとんど除去できています。さらに各通信等間をつなぐネットワークも構築されており、全域を単一のシステムとして運用する準備を進めています。



一ヶ月のデータ量は全域で約10GBとなっており、宇宙線研究所とユタ大学に持ち帰って共同研究者に提供され、本格的な解析を進めています。

◎ 大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector)

大気蛍光望遠鏡ステーションは、地上検出器アレイを取り囲むように3箇所に配置されています。南側の Black Rock Mesa と Long Ridge の2箇所のステーションには、上下2段構成の大気蛍光望遠鏡6基を扇状に隣接して設置しています。集光部分は18枚の分割鏡を用いて焦点距離3.0m、直径3.3mの球面鏡を形成しています。また、撮像カメラは、256本の光電子増倍管から構成されています。カメラ1台あたりの視野は方位角方向18°、仰角方向15.6°となり、1ステーション全体としては扇型に方位角方向108°、仰角方向3°から33°までの空を覆っています。



各ステーションには、データ収集用のエレクトロニクスを設置した回路室があります。ここでは、光電子増倍管3,072本からの信号をデジタル情報へ変換し、FPGA回路を駆使して高速で安定したイベント判定を行っています。また、光電子増倍管に印加する高電圧を制御したり、各種較正用装置の制御や環境データ取得をしています。各観測期間（月のない晴天夜）に取得されるデータ量は約1TBに達し、宇宙線研究所とユタ大学に持ち帰っています。

一方、北側の Middle Drum ステーションには先行実験であった HiRes 実験から14台の望遠鏡が移設されました。各望遠鏡は四つ葉のクローバー状に配置された4m²鏡と256本の光電子増倍管の撮像カメラから構成されています。

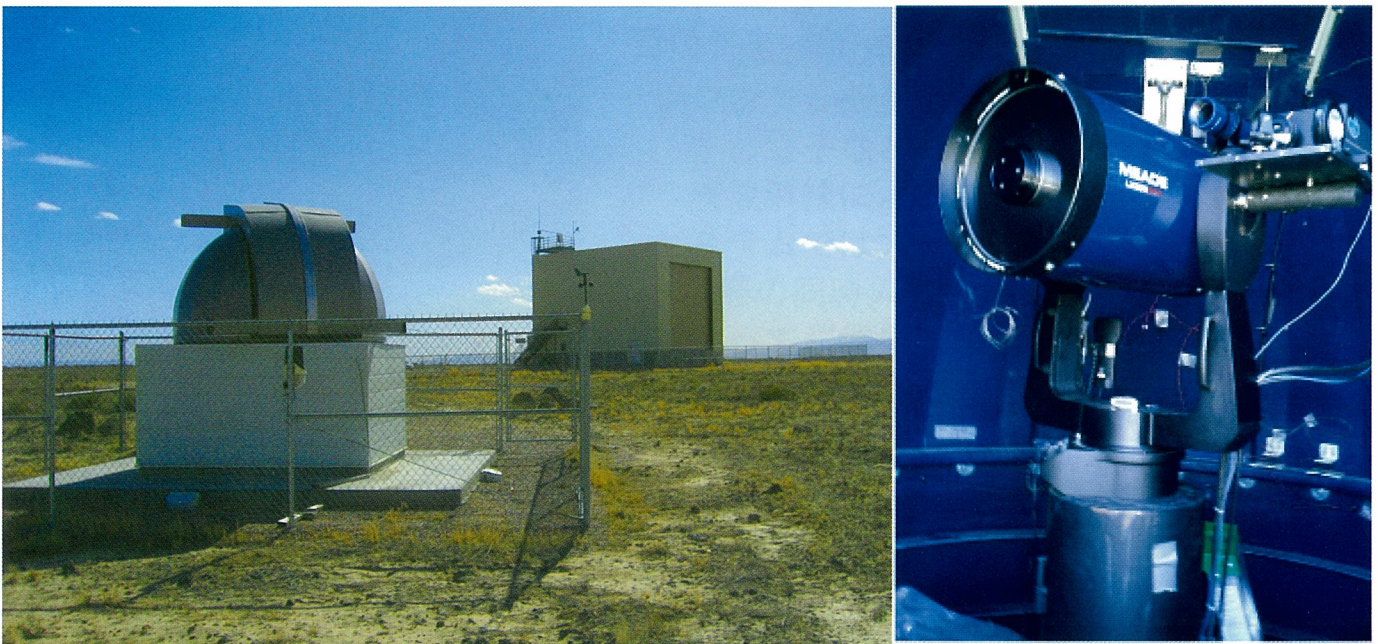


◎ 大気モニターシステム

大気蛍光望遠鏡では、遠方の空気シャワーを観測する時に大気の状態や大気中での減衰（大気の透明度）を正確に把握する必要があります。このために次のようなモニターシステムを運用しています。

○ LIDAR システム

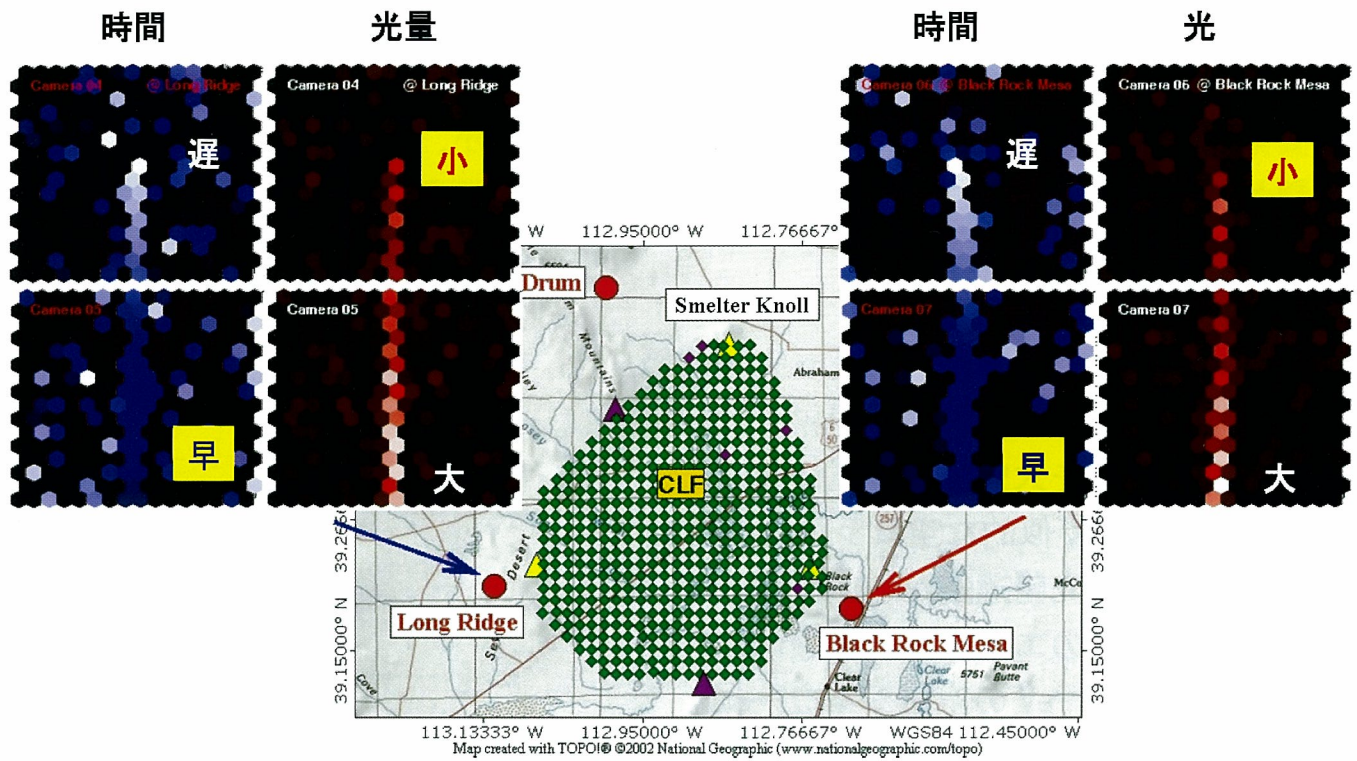
大気蛍光望遠鏡ステーションから 100m 離れた天体ドームに射出方向を制御できる Nd:YAG レーザー（355nm）と、レーザー光線の後方散乱光を測定する専用の望遠鏡と受光装置を設置しています。後方散乱光の強度の時間分布を測定することにより、レーザー光線の奥行き方向の大気の透明度を知ることができます。



○ CLF（中央レーザー施設）

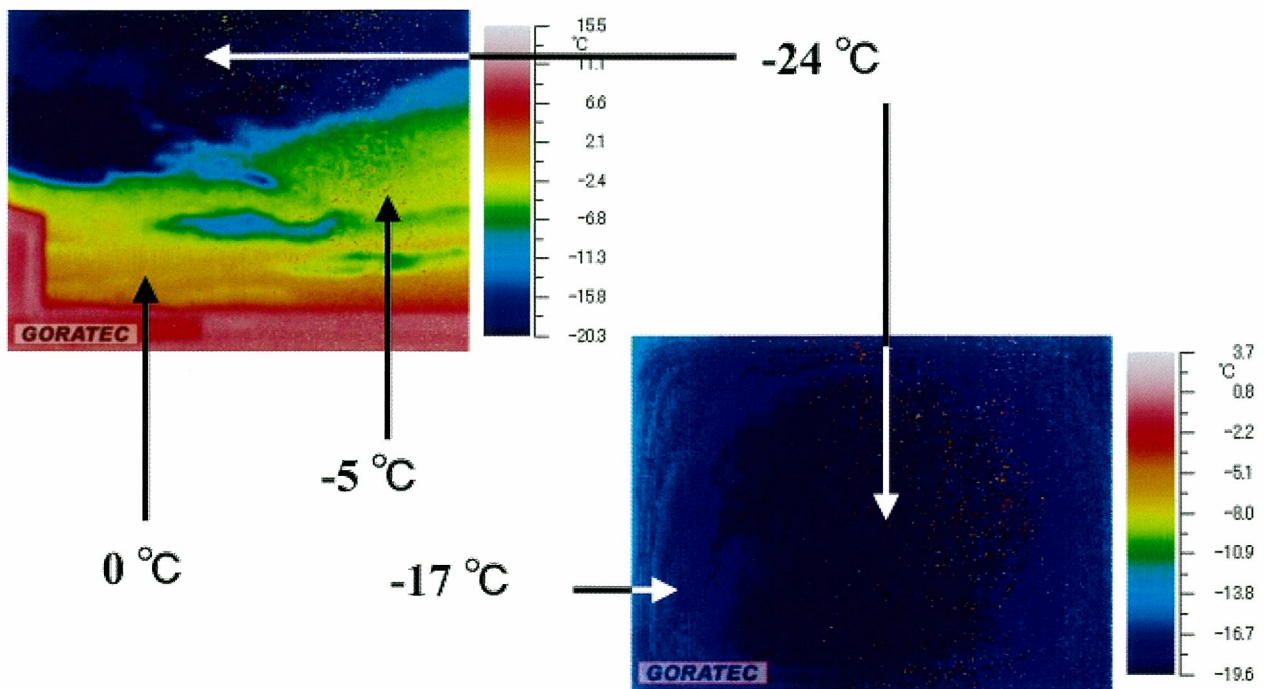
ND:YAG レーザーを用いてレーザー光線の側方散乱光を大気蛍光望遠鏡で観測する CLF システムがあります。側方散乱においてはレーザー光線の偏光によって散乱強度が異なるため、偏光を調整する仕組みが組み込まれています。この施設は、実験サイトのほぼ中央に、3 箇所の大気蛍光望遠鏡ステーションから等距離となる位置に配置され、すべてのステーションの標準光源として活用されます。

下図は CLF システムから射出したレーザー光線の側方散乱光を Long Ridge (左) と Black Rock Mesa (右) の大気蛍光望遠鏡ステーションで観測したイベントの例を示しています。



○ 雲モニター

雲が存在すると観測効率が低下するので、定常的な雲モニターは欠かせません。赤外線カメラを用いて夜空との温度差から雲の存在を判定しています。



ステーションと地面が赤く、雲が黄色く写っている。

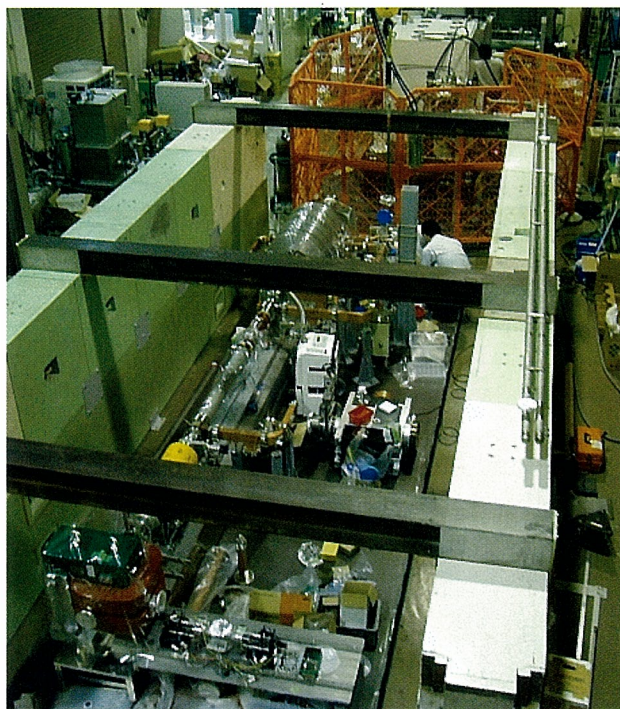
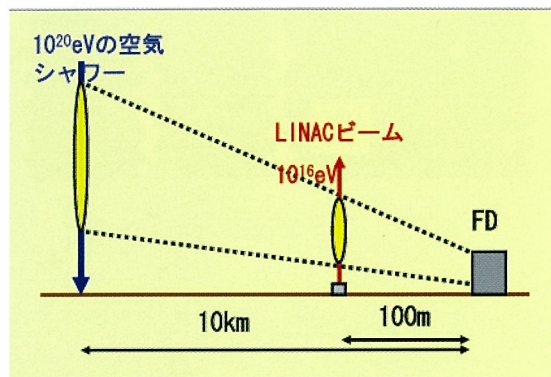
天頂方向の画像で、雲の無い状態。

◎ LINAC システム

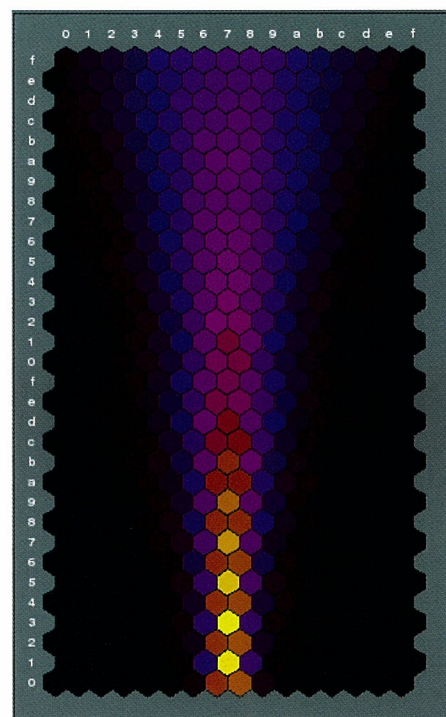
大気蛍光による空気シャワーの観測には、大気蛍光の発光効率・大気中での減衰・鏡の反射率・フィルターの透過率・光電子増倍管の量子効率・信号の増幅率など、様々な較正項目があります。

各要素の較正は実験室レベルで測定を行っていますが、電子線形加速器（LINAC）を実験サイトへ導入して、システム全体として較正を行うという画期的な計画を進めています。

この LINAC システムでは、加速器実験で培われた技術をもとにエネルギーが精密に制御された電子ビームを大気中に垂直に射出し、 10^{16}eV に相当する擬似的な空気シャワーを生成します。大気蛍光望遠鏡から 100m 離れた地点での電子ビームのエネルギー損失は、10km 離れた地点での 10^{20}eV の空気シャワーによるエネルギー損失に相当し、まさに TA 実験で観測しているエネルギー領域で、大気蛍光望遠鏡のシステム全体の較正が可能となります。



高エネルギー加速器研究機構（KEK）での製作状況です。現在最終的な調整段階に入っており、実験サイトへの輸送の準備も進めています。

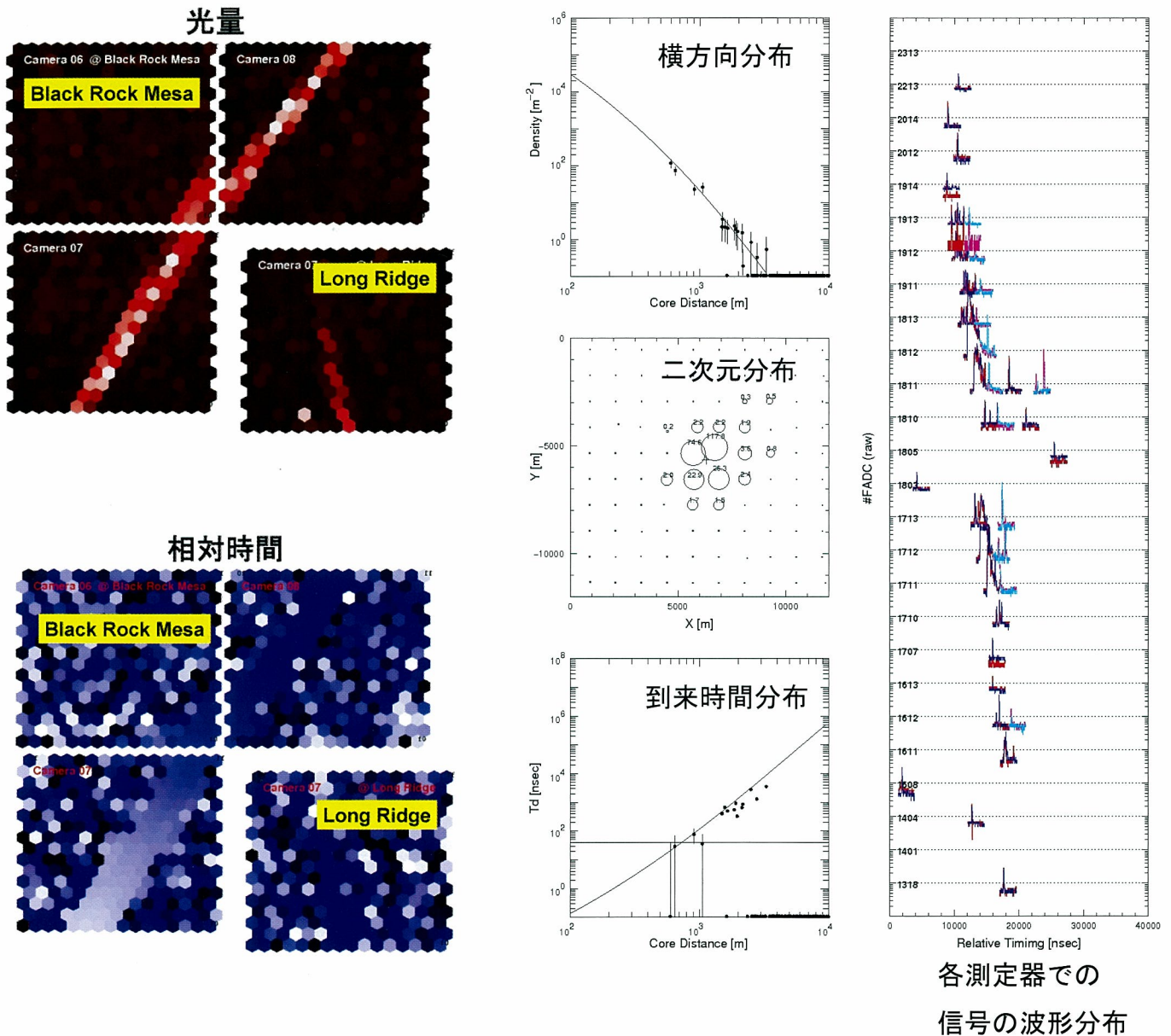


LINACによって生成された空気シャワーを大気蛍光望遠鏡で観測した時のシミュレーションで、実際に観測されるデータとの比較から装置を較正することができます。

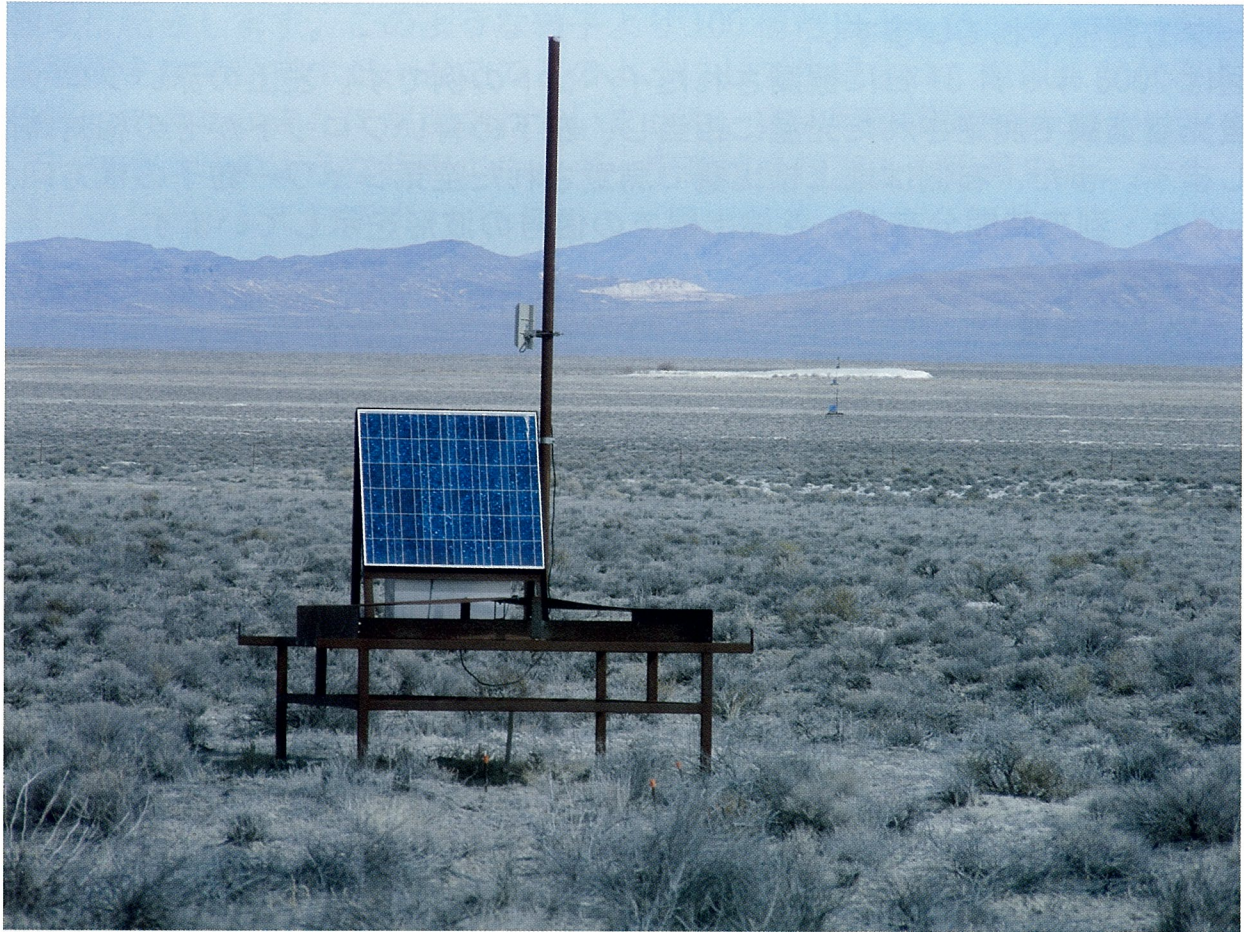
◎ ハイブリッド ステレオ イベント

2008年3月からTA実験全体の定常的な観測が始まりました。地上検出器、およびBlack Rok MesaとLong Ridgeの両方の大気蛍光望遠鏡ステーションで観測されたデータも蓄積されています。

下図は2008年5月31日に観測されたイベントの例です。左上の赤いプロットが大気蛍光望遠鏡で測定された光量に相当し、左下の青いプロットがその相対時間に相当します。また、右側は地上検出器で測定された空気シャワー粒子の横方向分布・2次元分布・到来時間分布と、各検出器での信号の波形を示しています。



このようなイベントをエネルギーの低いところから大量に収集することによって、より高い精度で空気シャワー現象を理解していくとともに、超高エネルギー宇宙線の起源解明にむけた研究を進めています。



東京大学宇宙線研究所 TA グループ

<http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
<http://www.telescopearray.org/>

東京大学宇宙線研究所
〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5
Tel./FAX 0471-36-3176

Milard County Cosmic Ray Center
648W Main, Delta, Utah 84624, USA
Tel./FAX +1-435-864-1800