

## 令和 5 年度 (2023) 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名 和文：Ashra 観測 英文：Observation with Ashra	
研究代表者 東京大学宇宙線研究所・准教授・佐々木真人 参加研究者 東京大学宇宙線研究所・准教授・佐々木真人、名誉教授・木舟正、技術補佐・青木利文、東邦大学理学部・教授・小川了、KEK・田中真伸、岡山大学・吉村浩司、ハワイ大学・教授・T. Browder, 教授・P. Binder, 教授・J. Learned, 助教・Danny Marfatia、INFN・教授・R. Mussa、台湾中央院・灰野 禎一他	
研究成果概要： <p style="margin-top: 10px;">PeV (<math>10^{15}</math>eV) 以上の宇宙線の起源天体は未決の謎であるが、そこで加速された陽子は周囲の原子核や光子と衝突し <math>\pi</math> を生成し崩壊後 <math>\nu</math> と <math>\gamma</math> 線が放出される。本研究では PeV 領域の <math>\nu</math>、<math>\gamma</math> 線および原子核を空気シャワー (AS) による大気チェレンコフ光と大気蛍光 (大気発光) を通じて初めて複合的に高精度撮像観測し宇宙線起源の謎を解明する (図 1)。</p> <p>地殻や山と衝突した宇宙タウ <math>\nu</math> (<math>\nu_\tau</math>) は <math>\tau</math> に変換して山斜面や地表に出現して崩壊し AS 生成し大気発光する。地面や山の方から来た AS の親粒子は明確に <math>\nu_\tau</math> と分かる。上空から来る AS の親粒子の殆ど核子だが、電荷がなく磁場で曲げられない <math>\gamma</math> 線なら点源に集中する、もしくは AS 発達形態から識別が可能である。</p> <p>地球上で体積が最大の山であるハワイ島マウナロア山上の高度 3000m~3500m の地点に、マウナロア山斜面上空の大気を 2 重に視野に含めるように広視野高精度の大気発光撮像検出器を配置し、そこで生じる AS からの大気チェレンコフ光と大気蛍光を高精度にて双眼撮像観測する。</p> <p>① HESS などの TeV <math>\gamma</math> 線撮像大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) と同等の解像度 (<math>&lt; 0.1^\circ</math>) でありながら、単位検出器 1 台で <math>30^\circ</math> の広視野撮像検出が出来ること、および、② 大気チェレンコフ光による AS 横発達と大気蛍光による AS 縦発達の時定数が全く異なる事象を複合的に同時撮像できることが、本検出器の独自の特徴である。これらの特徴により、天球上の広大な検出視野範囲を確保しつつ、<math>0.1^\circ</math> 以下の鋭い方向決定と親粒子種識別を伴う複合観測が行え、PeV 宇宙素粒子の起源天体の明確な位置と物理機構の同定を狙える。また、視野内に地球かす</p>	<p style="text-align: center;">South North</p> <p>図 1：AS 複合的銀河バルジ連動撮像観測の原理</p> <p style="text-align: center;">2019年6月23日0時@Ashra マウナロア観測</p> <p style="text-align: center;">所南方向</p> <p style="text-align: center;">6基の集光器による銀河バルジの監視観測</p> <p>図 2：6 基の集光器による銀河バルジの監視観測</p> <p style="text-align: center;">マウナロア</p> <p style="text-align: center;">主ステーション</p> <p style="text-align: center;">マウナロア向き集光器</p> <p style="text-align: center;">副ステーション</p> <p style="text-align: center;">30° 集光器</p> <p style="text-align: center;">トリガーヘッド</p> <p>図 3：Ashra-1 マウナロア観測所</p>

リ $\nu$ や $\gamma$ によるAS発光を捉えれば、PeV-EeV領域において最大級の有効検出感度を有する(図4)。また高精度分解能撮像による超高エネルギー $\gamma$ 線・ニュートリノ同時観測は銀河中心由来の超重暗黒物質探査としても有用である。

### ○ 銀河バルジPeV $\gamma$ 線& $\nu$ 同時走査試験観測計画

宇宙素粒子の複合的撮像観測で優位なAshra-1(図3)を4サイトの観測システムへと展開するAshra NTA計画を国際共同も含め入念に議論した。山上3000m-3500m高度のアレイ配置によって山周囲の大気中のAS発光を最大効率で検出でき、PeV周辺の出検感度を増強できる。IceCubeにより確認された宇宙 $\nu$ 過剰をNTA複合的撮像観測によってPeVで同等感度にて確認でき、30PeV以上ではIceCubeの10-100倍の感度で探査可能である。NTA検出器はAshra-1集光器を基礎に量産可能だが山上アレイに展開する時点で①自動運転と②電源の確保に対する実証のため、Ashra-1集光器4台を図1のように山斜面を望むように北向きに再調整して配置し太陽電源と自動運転によるパイロット観測を計画した。サイト調査を兼ねて天候条件や夜光の長期変動も調査し具体的な国際共同の策定を行ってきた。

### ○ NTAによる超高エネルギー物理天文

上記の目的とAshra-NTA観測に向け、トリガー判定のさらなる改良とシミュレーショントリガー撮像試験を行ってきた。安定かつ順調なトリガー論理判定が可能であることが確認された。成果に基づき、NTAによる超高エネルギー物理(VHEP)及び超高エネルギー天文(VHEA)の可能性を検討した。

NTAは、加速器によるHEPと相補的に宇宙観測からエネルギーフロンティア探査するVHEPを展開できる。図5は、NTAによる地球かすりタウレプトンを探針としたVHEPの一例として、暗黒物質粒子(DM)候補 $\chi$ からのタウニュートリノ崩壊探査の感度を他実験と比較している。PeV以上のVHEではDMの主たる探査モードは $b \rightarrow \tau$ となる。NTAタウAS発光監視は強力である。10PeV-100PeVでは最高感度で探査できる。更に、NTAは超高エネルギー天文(VHEA)も推進する。NTAによる $\gamma$ 線VHEAの一例として、NTAは銀河バルジ10TeV-1EeVの $\gamma$ 線によるAS発光の夜天常時監視が可能である。H.E.S.S. 銀河中心TeV $\gamma$ 線観測 $\rightarrow$ VHE粒子加速源の可能性を示唆した。図6に示すように、位置天文および測光天文を最高の感度にて遂行できる。

### ○ Ashra1第3観測期の物理解析(図7)

Ashra-1 地球かすりチェレンコフ・タウニュートリノ初探査を第3観測期( $\nu$ 露光<186時間)に拡張した解析を進め、IceCube 飛跡10事例や $\gamma$ カタログ12天体等と流束の比較を行い制限を与えた。広角光学探査(光学探査露光<1347時間)で、プリカーサ領域カバーする独自性ある流束制限を与えた。

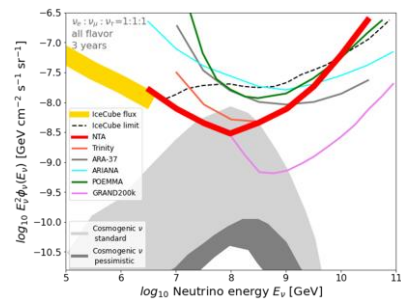


図4: NTA ニュートリノ感度の比較

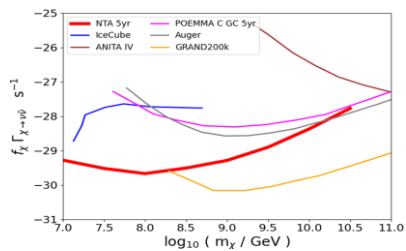


図5: 暗黒物質粒子 $\chi_\tau$ 感度比較

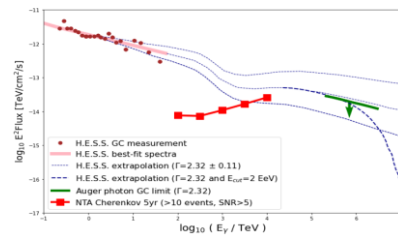


図6: 銀河中心 $\gamma$ 線感度比較

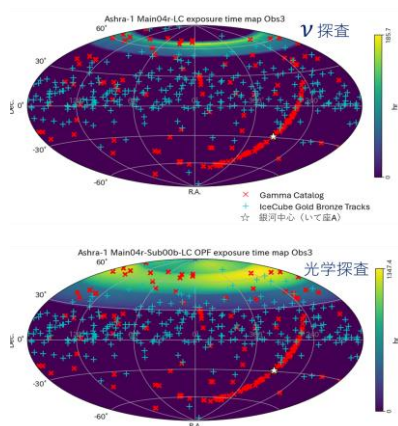


図7: Ashra-1  $\nu$ 及び光学閃光探査露光時間マップ。 $\gamma$ カタログ天体(赤丸)、IceCube 飛跡事例(青+)も示す。