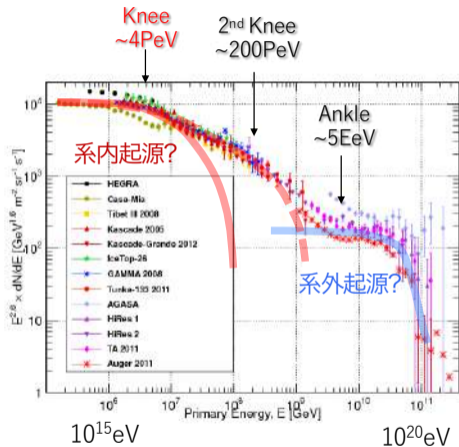


チベット実験・アルパカ実験 グループガイダンス

塔さこ 隆志

- 銀河宇宙線の謎
- 最高エネルギーガンマ線天文学～宇宙最高エネルギーの光子～
- 空気シャワーの観測
- チベット実験
- アルパカ実験
- 大学院生の生活・研究テーマ
- 研究室の紹介

銀河宇宙線起源の謎



Gaisser et al. Front.Phys.(Beijing) 8 (2013) 748

- 宇宙線 = 宇宙を飛び交う高エネルギーの放射線
- 主成分 = 原子核 (陽子を含む)
- 起源 = 不明: 天体周りの衝撃波が有力候補

- 超新星残骸?
- 中性子星?
- 星生成領域?
- ブラックホール?
- 未知の粒子 (暗黒物質) の対消滅や崩壊?

実験室では再現できない
極限物理現象

キーワードは PeV

- 定説:
 - 銀河系内では陽子は $4 \times 10^{15} \text{eV}$ (PeV) まで加速
 - 原子核はZ倍なので鉄原子核は 10^{17}eV
 - それより上は銀河系外起源?
 - 宇宙の限界は 10^{20}eV

ここはテレスコープアレイ実験

- 我々がやるべきこと・やりたいこと:
 - 銀河系内の陽子加速の限界は?
 - 限界加速はどこで起きているのか?
 - 高エネルギーで原子核種はどう変化するのか?
 - 新物理の証拠を探す (ダークマター、原始BH? ...)

TeV=10¹²eV, PeV=10¹⁵eV, EeV=10¹⁸eV

荷電粒子観測 (陽子、原子核)

- 銀河最高エネルギー粒子

最高エネルギー宇宙線観測
(テレスコープアレイ)

高エネルギー宇宙線観測
(Tibet, ALPACA)

- 宇宙最高エネルギー粒子
- 銀河系外
- 超レア

Energy

TeV PeV EeV

- 高精度観測
- 超巨大実験
- 銀河系内外

高エネルギーガンマ線観測
(MAGIC, CTA)

最高エネルギーガンマ線観測
(Tibet, ALPACA)

- 宇宙最高エネルギー光子
- 銀河系内
- 2019年に観測確立

ガンマ線観測

高エネルギー宇宙線・ガンマ線の観測

宇宙磁場

宇宙線の伝播

宇宙線原子核

宇宙線の起源

超PeV宇宙線



高エネルギー宇宙線・ガンマ線の観測

宇宙磁場

宇宙線の伝播

宇宙線原子核

宇宙線の起源

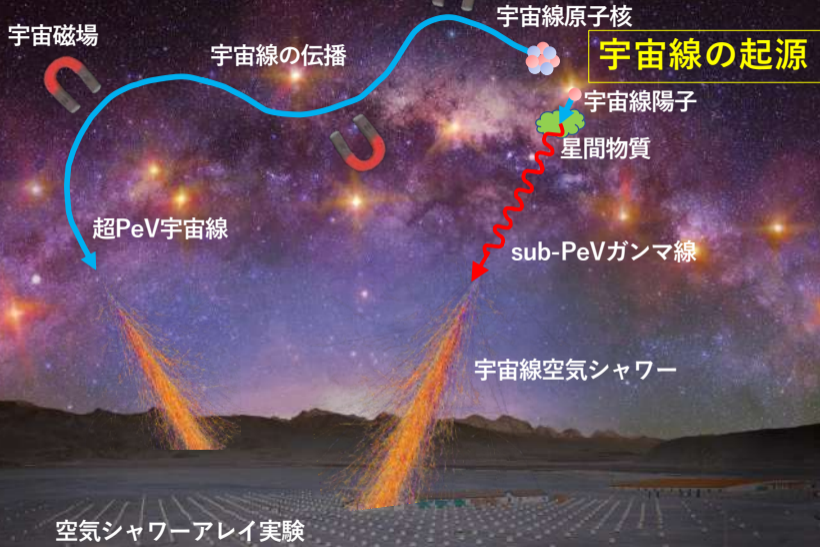
宇宙線陽子

星間物質

超PeV宇宙線

sub-PeVガンマ線

高エネルギー宇宙線・ガンマ線の観測



チベット空気シャワー観測装置

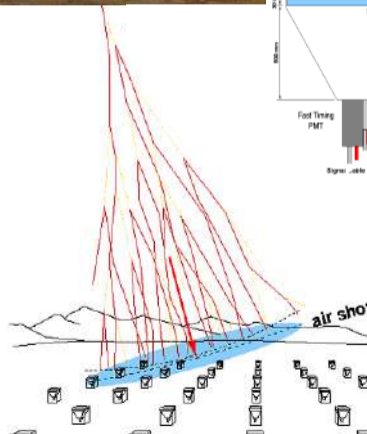
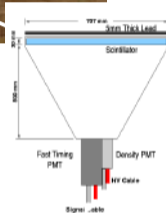


□ チベット (90.522°E, 30.102°N) 標高4300 m

現行スペック

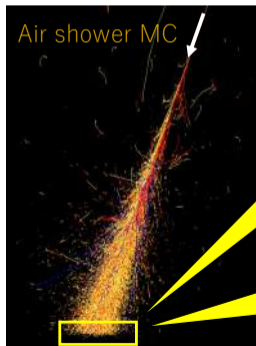
- シンチレーション検出器数 0.5 m² x 597
- 空気シャワー有効面積 ~65,700 m²
- 観測エネルギー >TeV
- 角度分解能 ~0.5°@10TeV γ
~0.2°@100TeV γ
- エネルギー分解能 ~40%@10TeV γ
~20%@100TeV γ
- 視野 ~2 sr

→空気シャワー中の二次粒子(主に e^{\pm}, γ)を観測し
一次宇宙線エネルギー、方向を決定

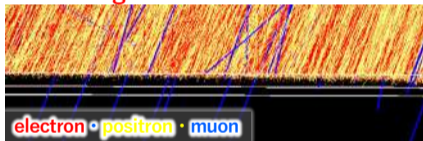


宇宙線シャワーとガンマ線シャワーの区別

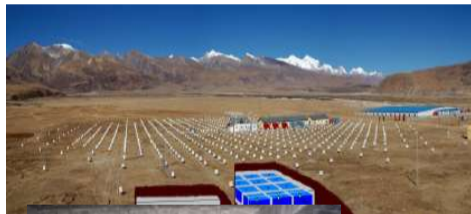
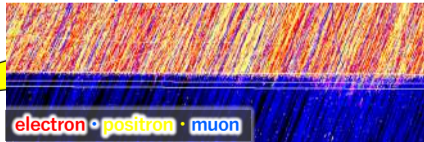
- 宇宙線シャワーの頻度 \gg ガンマ線シャワーの頻度
- 宇宙線シャワーにはミュー粒子が多い。ミュー粒子は地下2mまで到達
- 地下のミュー粒子検出器で宇宙線イベントを排除！



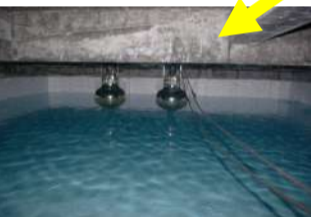
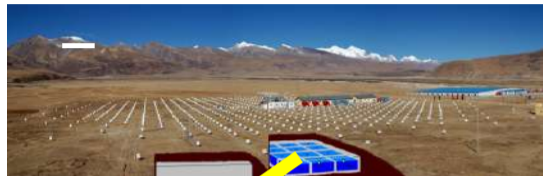
200TeV gamma shower



200TeV proton shower



チベット空気シャワーアレイと地下ミュオン検出器

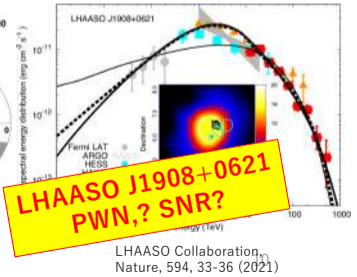
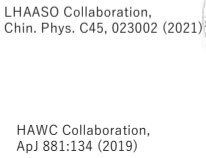
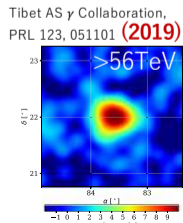
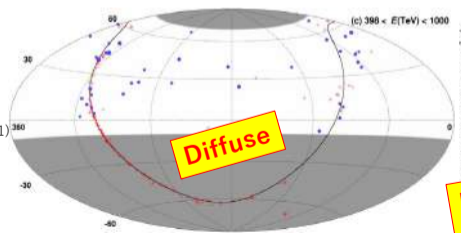
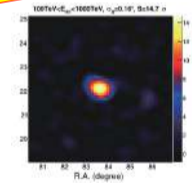
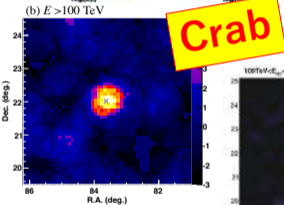
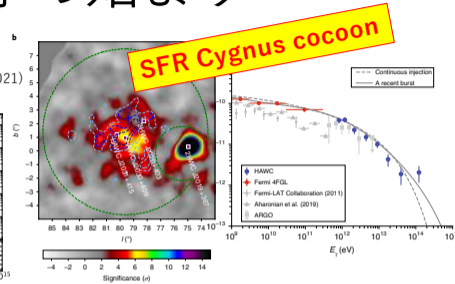
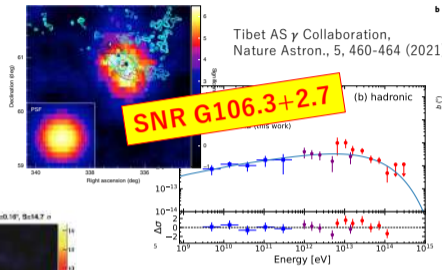
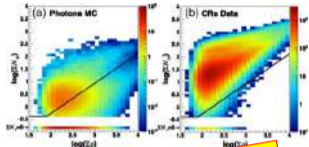


MD construction scene

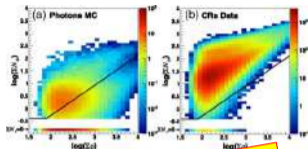
羊八井高原,
中国, チベット

海拔4300 m . = 606 g/cm²

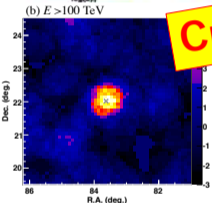
sub-PeVガンマ線天文学の始まり



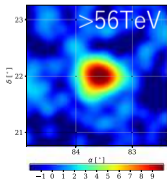
sub-PeVガンマ線天文学の始まり



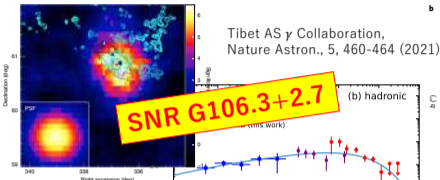
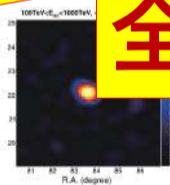
Crab



Tibet AS γ Collaboration, PRL 123, 051101 (2019)



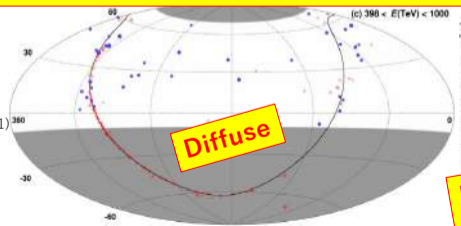
LHAASO Collaboration, Chin. Phys. C45, 023002 (2021)



SNR G106.3+2.7

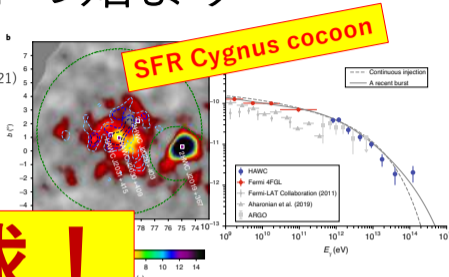
Tibet AS γ Collaboration, Nature Astron., 5, 460-464 (2021)

全て北半球！



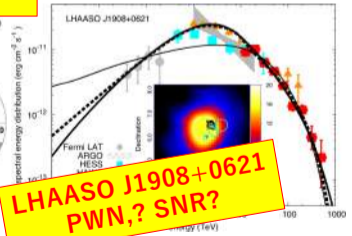
Diffuse

Tibet AS γ Collaboration, PRL 126, 141101 (2021)



SFR Cygnus cocoon

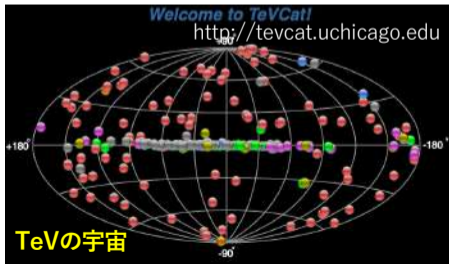
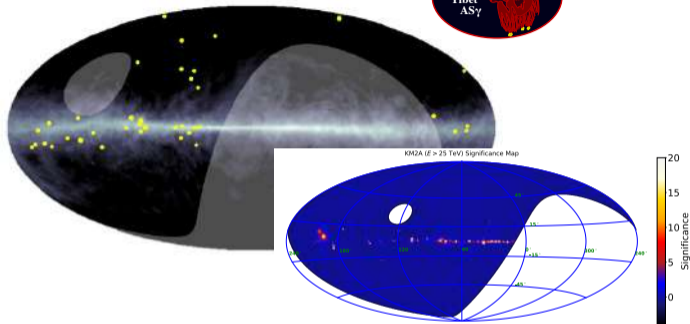
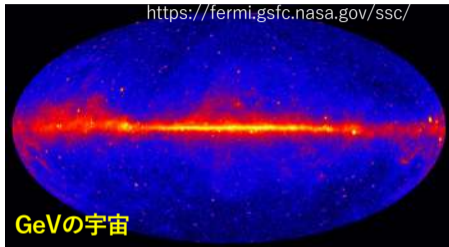
Tibet AS γ Collaboration, Nature Astron., 5, 465-471 (2021)



LHAASO J1908+0621 PWN, ? SNR?

LHAASO Collaboration, Nature, 594, 33-36 (2021)

ガンマ線で見た宇宙



Sub PeVの宇宙

- チベット実験・LHAASO実験による地上からの観測
- チベット・輝く天の川銀河 (注: 既知天体の寄与は除いた図)
- LHAASO・天の川に沿って多くの天体
- **銀河系の中心方向はどうなってるの? GeVもTeVの華やか!**

ALPACA

(Andes Large area PArticle detector
for Cosmic ray physics and Astronomy)
Mt. Chacaltaya, Bolivia



**UMSA CR Observatory
5200 m a.s.l.**

**ALPACA site
4740 m a.s.l.**

4,740 m above sea level
(16° 23' S, 68° 08' W)



チベットの成功を南半球で！

La Paz

13

ALPACA空気シャワー実験

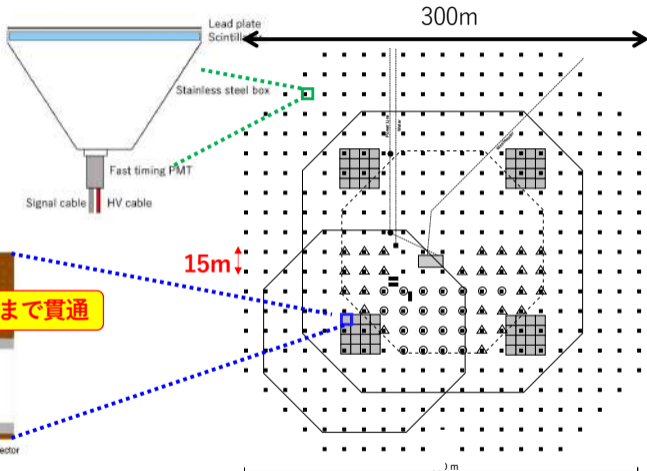
1. Array coverage 82,800m²

401 x 1m² プラスチックシンチレータ
方向とエネルギーの測定

2. Underground water Cherenkov muon detector (MD) 3600m²

地下 2m (~16X₀) に設置

58m² with 20"φ PMT x 64 cells



Muonの多い
ハドロンシャワー
をMDで判定

Muonは地下まで貫通

✓ 荷電宇宙線シャワーの除去効率 >99.9% @100TeV.

✓ 角度分解能 ~0.2° @100TeV, エネルギー分解能 ~20%@100TeV

✓ 100% duty cycle, FOV $\theta_{zen} < 40^\circ$ (well studied), $\theta_{zen} < 60^\circ$ (in study)

● 1 m² AS Detector x (97+304) (82,800 m²)
■ 58 m² Muon Detector x (16+48) (3,700 m²)

97 detectors

ALPAQUITA 空気シャワー実験

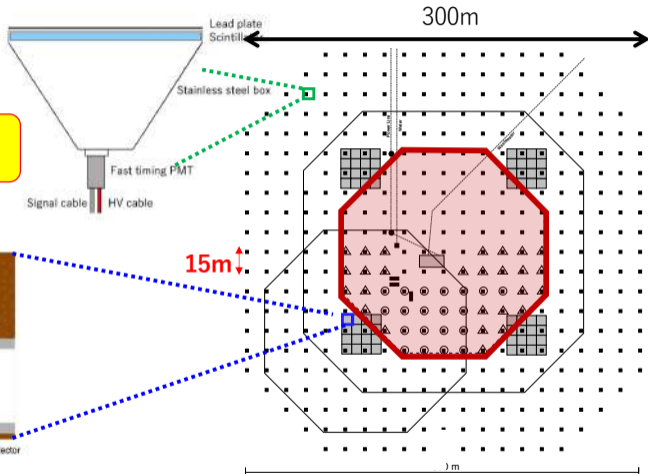
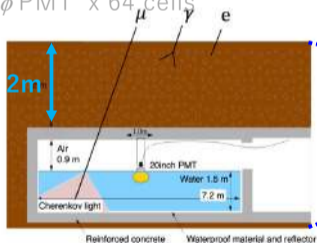
1. Arra coverage 82,800m²

401 x 1m² プラスチックシンチレータ
方向とエネルギーの測定

2. Underground water Cherenkov detector (MD) 3600m²

地下 2m (~16X₀) に設置
58m² with 20" ϕ PMT x 64 cells

16 cells
(1 MD unit)



✓ 荷電宇宙線シャワーの除去効率 >99.9% @100TeV.

✓ 角度分解能 ~0.2° @100TeV, エネルギー分解能 ~20% @100TeV

✓ 100% duty cycle, FOV $\theta_{zen} < 40^\circ$ (well studied), $\theta_{zen} < 60^\circ$ (in study)

● 1 m² AS Detector x (97+304) (82,800 m²)
■ 58 m² Muon Detector x (16+48) (3,700 m²)

ALPAQUITA construction in June 2022



- 2022年6月から建設再開（コロナ中断）
- 97台の地上検出器設置完了
- 2023年4月にデータ収集開始



Real air shower events!!

ガンマ線/宇宙線

大気分子と衝突

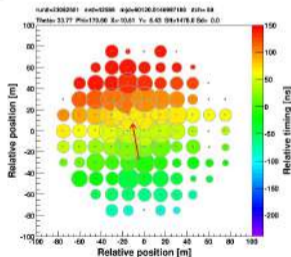
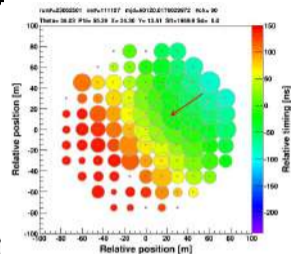
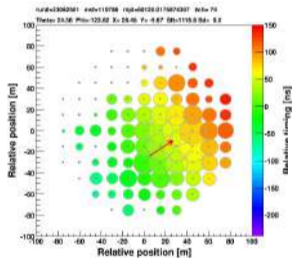
二次粒子群: 空気シャワー

1. 相対的な粒子到着時間
(カラースケール)
 2. 粒子数に比例した電荷量
(円のサイズ)
- 方向・エネルギーを推定

地上粒子検出器

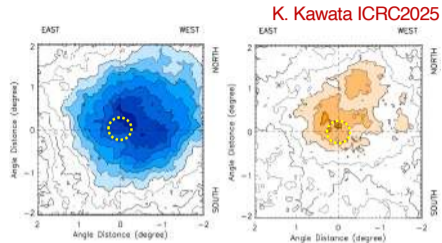
Air Shower Array

空気シャワーの観測原理

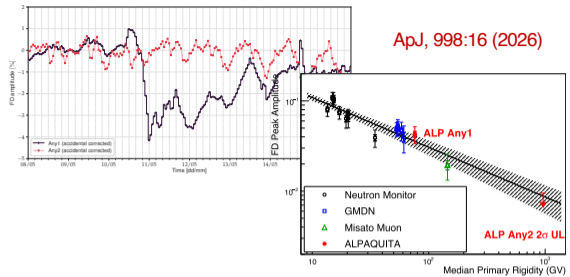


(>100TeV荷電宇宙線による空気シャワー)

ALPAQUITA宇宙線観測の成果

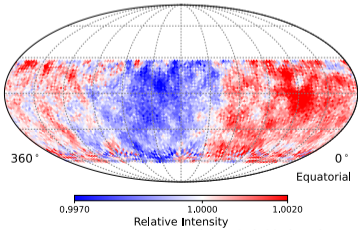


月の影に加えて太陽の影も確認。太陽活動極大期のため、予想通り月の影よりも弱い信号となる。

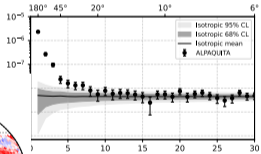


2024年5月の太陽活動に伴うフォーブッシュ減少を観測。高エネルギーチャンネルの上限値で単純な冪乗則によるTVまでの減少を制限。

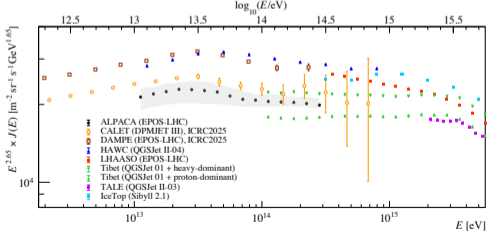
T. Kawashima
2025年度学位論文



南半球中緯度で初の宇宙線異方性地図を作成



藤田 2026年春の物理学会, 投稿準備中



10-300TeVの全宇宙線エネルギースペクトルを測定。30TeVでの軟化を確認。70TeVの硬化の可能性。

最初の地下ミュオン検出器



- (北半球の) 夏に1台目の建設完了。内部と周囲の装置を設置の後、今年中にガンマ線観測開始
- 残り3台の建設と周辺装置の設置を来年完了予定

これから数年の研究の状況

• チベット実験

- データ収集の継続・解析
- 過去のデータの新しい解析（機械学習の導入等）

• ALPACA実験（修士では新しい装置の建設や立ち上げを学んでもらう）

- 地上検出器の97台が稼働中。これで初期性能確認。
- 地下ミュオン粒子検出器1号機の建設（2025年11月開始）
- 地下ミュオン粒子検出器1台＋地上100台でのガンマ線天文学開始（2026年末-）
- 地下ミュオン検出器2-4号機の建設（2027年）
- フルスケール（地上400台＋地下4台）での運転（2027年末-）

このデータでM論

みなさんはこのデータでD論を書く

世界初の南半球sub-PeVガンマ線天文学

大学院生の研究テーマ

素粒子物理

ラテン
アメリカ

データ解析

シミュレーション

機械学習

宇宙物理

マルチメッセンジャー
天文学

地球大気・雷

宇宙天気

- ALPACA初期データによる装置性能の検証
- 月・太陽による宇宙線の影－装置の性能＋太陽磁場変動の研究
- ガンマ線天体の探索
- ガンマ線突発天体の探索
- 宇宙線の原子核種弁別
- 暗黒物質・原始ブラックホール等からのガンマ線の探索
- ミュー粒子を用いた宇宙線原子核組成の研究
- 空気シャワーの新しい解析方法の研究（機械学習）
- 雷電場の空気シャワーへの影響
- 高エネルギー太陽フレア粒子の研究
- ALPACA低エネルギー拡張の研究
- 将来計画Mega-ALPACAの研究

装置の設置

装置の較正

フィールド
ワーク

新しい装置で新しいデータ（世界初）
BGの宇宙線も貴重なデータ
宇宙天気や地球大気も関係

大学院生の生活

- M1前期：本郷の授業を優先して単位を取得
- 授業のない日に柏で輪講ゼミ、論文紹介ゼミ（TAグループと合同）
- 週に一回柏（+オンライン）で研究進捗報告会
- ニヶ月に一度、国内グループ会議
- 隔週：海外共同研究者とオンライン会議（主にスタッフのみ）
- 観測サイト出張は1回/年程度、一ヶ月（南米・4,700mなので応相談）
- M1後半：国内学会デビュー
- M2：国内の国際会議デビュー
- D：海外の国際会議デビュー、投稿論文執筆

研究室・研究グループの体制

- 教授：塔きこ隆志（修士博士学生の受け入れ可）
 - 准教授：川田和正（修士博士学生の受け入れ可・TAグループと兼任）
 - 准教授：奥村暁（学生受け入れはないが一緒に研究・ニュートリノ観測の将来研究）
 - 助教：大西宗博、大石理子（CTAグループと兼任）
 - シニアフェロー（名誉教授）：瀧田正人
 - 研究員：Marcos Anzorena、樋口諒
 - 大学院生：（博士）横江、水野、今和泉、杉本、（修士）山中、玉置、足助
 - 技術職員：粟井
 - 秘書：白神
-
- 国内共同研究者：横浜国立大学、信州大学、神奈川大学、日本大学、大阪公立大学、宇都宮大学、大阪電気通信大学、中部大学、京都大学、他
 - 国外共同研究者：中国国家天文台（中国）、サンアンドレス大学（ボリビア）、グアダラハラ大学（メキシコ）、他

銀河宇宙線・ガンマ線

- 宇宙線の起源、Pevatronを探せ！
 - PeVatronからのsub-PeV領域ガンマ線の検出！

小規模だけど世界が注目するグループです。自分が主役になって、実験装置、解析、シミュレーションを自分の手を動かして理解しながら研究をしたい方、歓迎です。

- 午後の個別説明会は宇宙線研建物の412室です
- テレスコープアレイグループ（414室）と合わせてどうぞ
- オンラインや個別の訪問・説明も歓迎です。sako@icrr.u-tokyo.ac.jpに気楽に連絡ください。



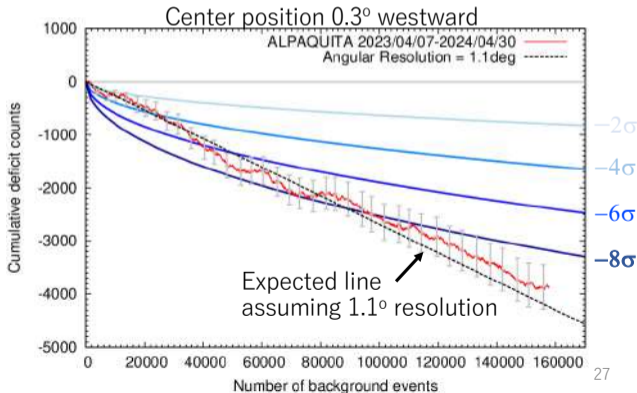
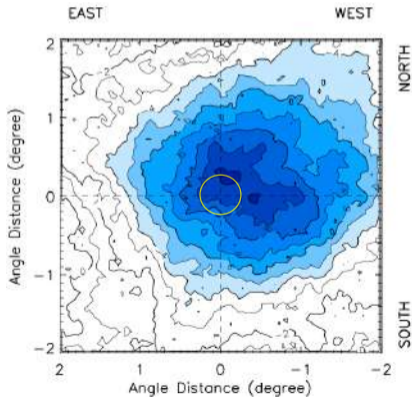
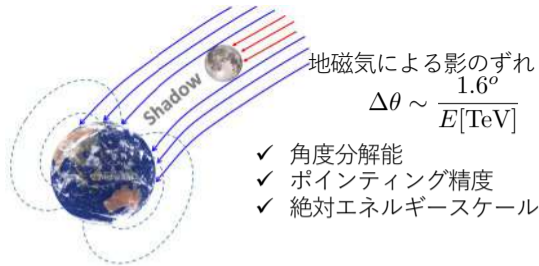
塔(A8)



川田(A8)

「月の影」の観測

- 宇宙線は全方位から等方的にやってくる
- 宇宙線が月に遮蔽されることで月の方向だけ宇宙線の頻度が下がる
- 「月の影」は空気シャワー実験性能の良い検証



何が問題？

10^{15}eV (PeV)



宇宙線の起源
超新星残骸？



宇宙線は荷電粒子
宇宙には磁場がある
=まっすぐ飛んでこない

ガンマ線で探る宇宙線の起源

10^{15}eV (PeV)

?

宇宙線の起源
超新星残骸？

10^{14}eV γ
(sub PeV)

Interstellar
Matter

10^{15}eV CR

π^0
 γ



高エネルギーガンマ線の観測

宇宙磁場

宇宙線の伝播

宇宙線原子核

宇宙線の起源

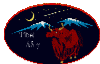
宇宙線陽子

星間物質

超PeV宇宙線

sub-PeVガンマ線





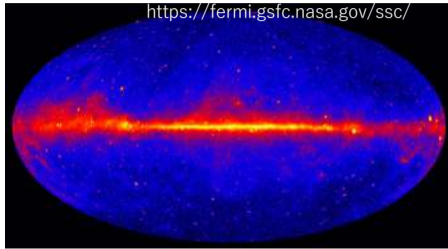
Yangbajing Cosmic Ray Observatory



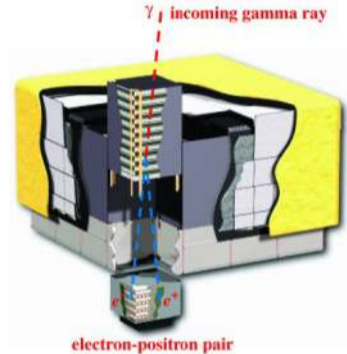
1.5 hours drive from Lhasa
Yangbajing

$90^{\circ}522E$, $30^{\circ}102N$, 4,300 m a.s.l. (606g/cm²)

ガンマ線で見た宇宙

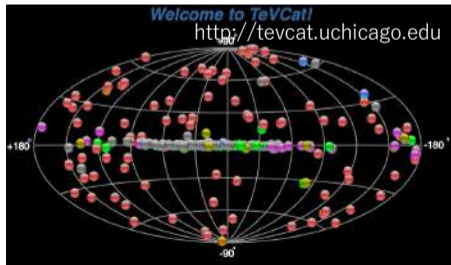
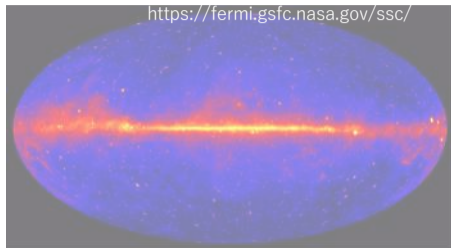


GeVの宇宙



- 人工衛星を利用
- 輝く天の川（宇宙線と星間物質の反応）
- 銀河系内外の多様な天体

ガンマ線で見た宇宙



TeVの宇宙



<http://magic.scphys.kyoto-u.ac.jp/Science/science.html>

- チェレンコフ望遠鏡による地上からの観測
- 銀河系内外の多様な天体
- 個々の天体を詳しく観測するが「地図」が描けない