

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

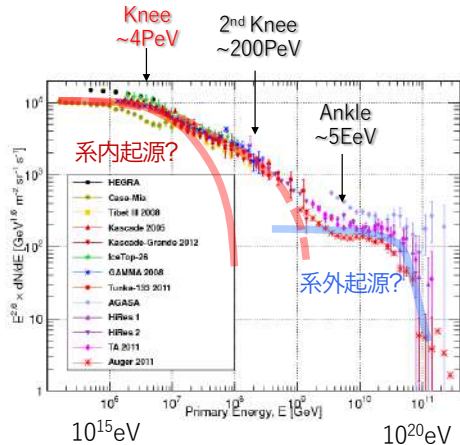
- 研究室の紹介
- 銀河宇宙線の謎
- 最高エネルギーガンマ線天文学～宇宙最高エネルギーの光子～
- 空気シャワーの観測
- チベット実験
- アルパカ実験
- 大学院生の生活・研究テーマ

研究室・研究グループの体制

- 教授：瀧田正人（新規修士学生の受け入れなし）
 - 准教授：埴_{さこ}隆志（修士学生の受け入れ可）
 - 助教：大西宗博、川田和正
 - PD：Marcos Anzorena、加藤勢、藤田慧太郎、Rocio Garicia Ginez
 - 大学院生：横江、川島、水野、今和泉、杉本
 - 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、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

銀河宇宙線起源の謎

- 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？



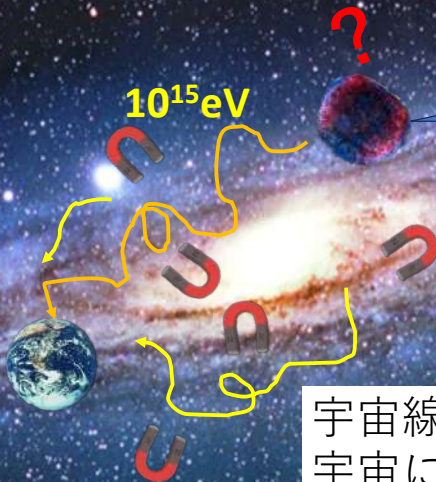
キーワードは PeV

- 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か？
 - 新物理の証拠を探す（ダークマター、原始BH₃ ...）

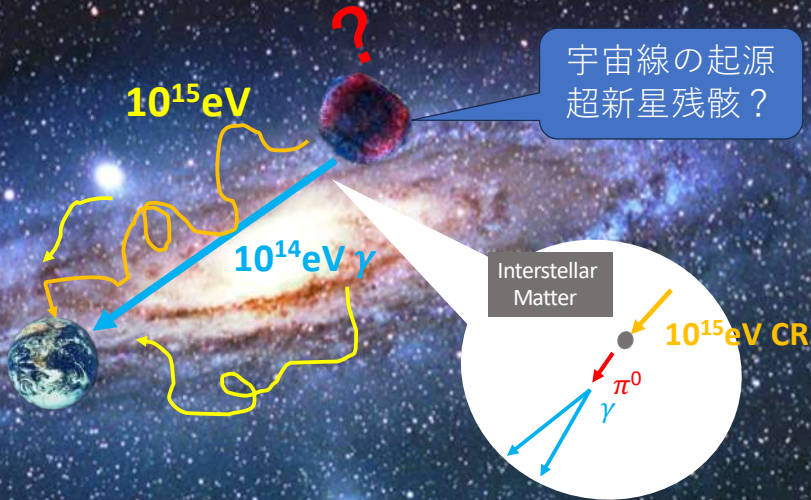
何が問題？



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



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



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

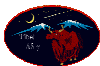
星間物質

超PeV宇宙線

sub-PeVガンマ線

宇宙線空気シャワー

空気シャワーアレイ実験



Yangbajing Cosmic Ray Observatory

1.5 hours drive from Lhasa
Yangbajing



$90^{\circ}522\text{E}$, $30^{\circ}102\text{N}$, 4,300 m a.s.l. ($606\text{g}/\text{cm}^2$)

チベット空気シャワー観測装置

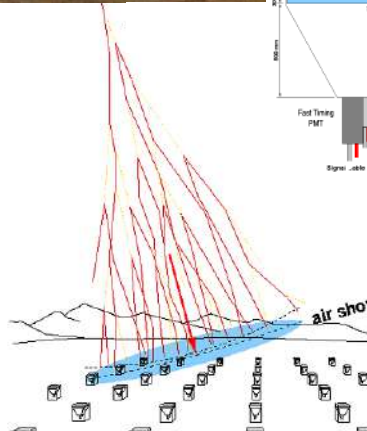
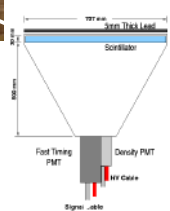


■ チベット (90.522°E, 30.102°N) 標高4300 m

現行スペック

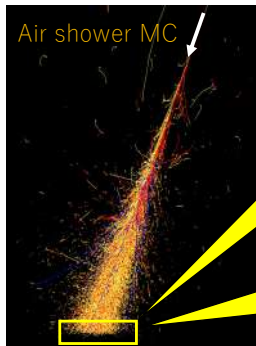
- シンチレーション検出器数 $0.5 \text{ m}^2 \times 597$
- 空気シャワー有効面積 $\sim 65,700 \text{ m}^2$
- 観測エネルギー $> \text{TeV}$
- 角度分解能 $\sim 0.5^\circ @ 10 \text{ TeV } \gamma$
 $\sim 0.2^\circ @ 100 \text{ TeV } \gamma$
- エネルギー分解能 $\sim 40\% @ 10 \text{ TeV } \gamma$
 $\sim 20\% @ 100 \text{ TeV } \gamma$
- 視野 $\sim 2 \text{ sr}$

→ 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



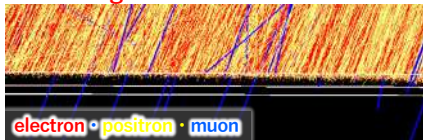
宇宙線シャワーとガンマ線シャワーの区別

- 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！

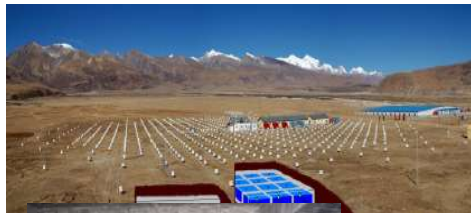
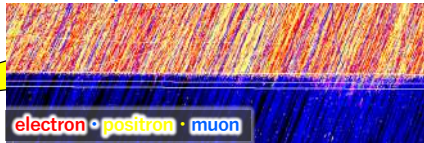


Ground surface

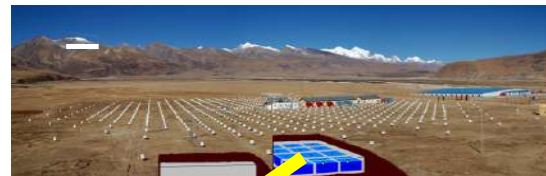
200TeV gamma shower



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



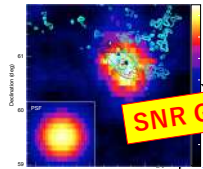
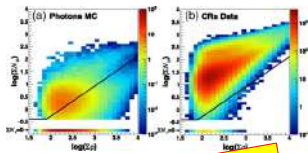
羊八井高原,
中国, チベット

海拔4300 m . = 606 g/cm²



MD construction scene

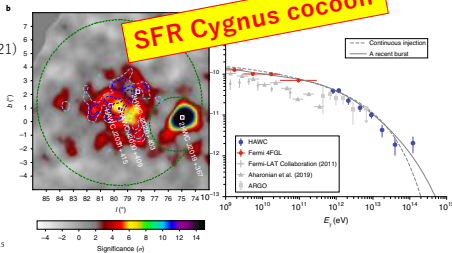
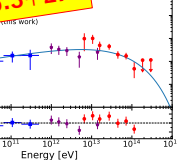
sub-PeVガンマ線天文学の始まり



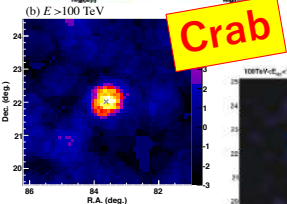
Tibet AS γ Collaboration,
Nature Astron., 5, 460-464 (2021)

SNR G106.3+2.7

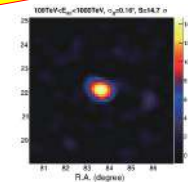
(b) hadronic



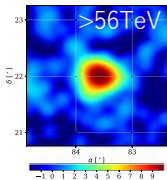
HAWC Collaboration, Nature Astron., 5, 465-471 (2021)



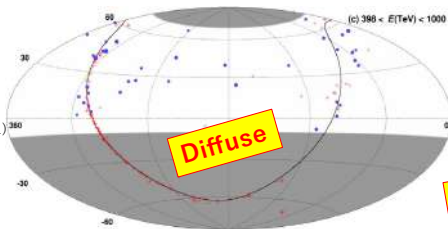
Tibet AS γ Collaboration,
PRL 123, 051101 (2019)



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

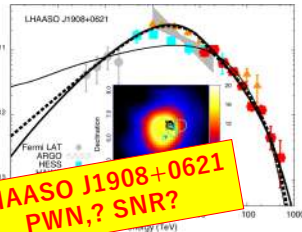


HAWC Collaboration,
ApJ 881:134 (2019)



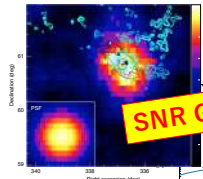
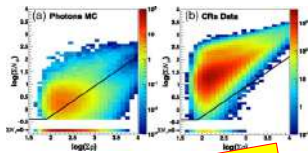
Tibet AS γ Collaboration, PRL 126, 141101 (2021)

LHAASO J1908+0621
PWN, ? SNR?

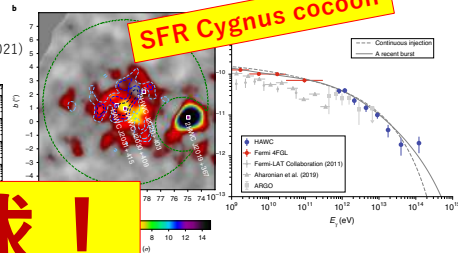


LHAASO Collaboration,
Nature, 594, 33-36 (2021)

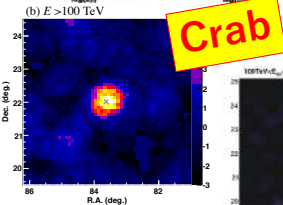
sub-PeVガンマ線天文学の始まり



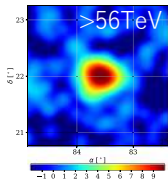
Tibet AS γ Collaboration,
Nature Astron., 5, 460-464 (2021)



ation, Nature Astron., 5, 465-471 (2021)



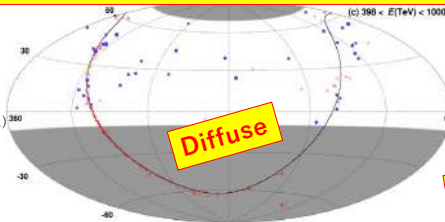
Tibet AS γ Collaboration,
PRL 123, 051101 (2019)



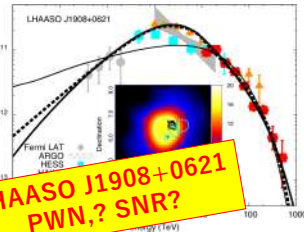
LHAASO Collaboration,
Chin. Phys. C45, 023002 (2021)

HAWC Collaboration,
ApJ 881:134 (2019)

全て北半球！



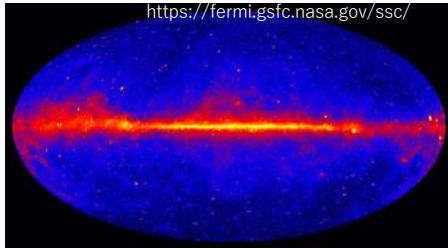
Tibet AS γ Collaboration, PRL 126, 141101 (2021)



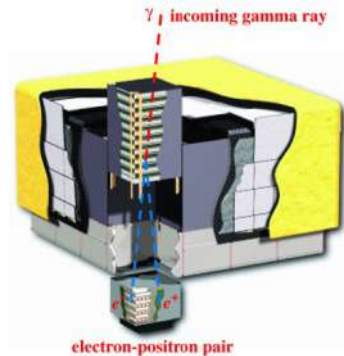
LHAASO J1908+0621
PWN, ? SNR?

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

ガンマ線で見た宇宙



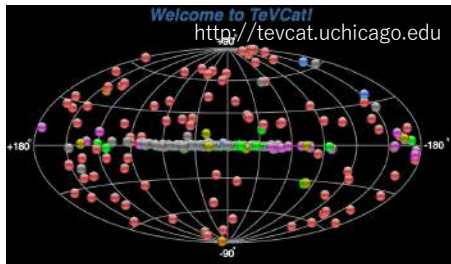
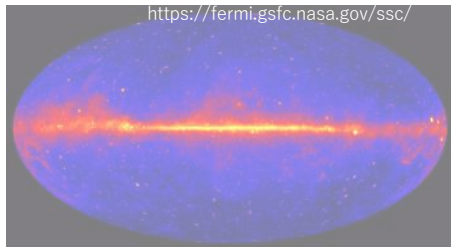
GeVの宇宙



- 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

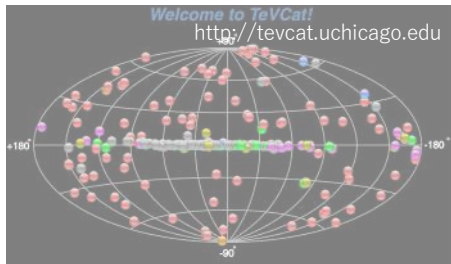
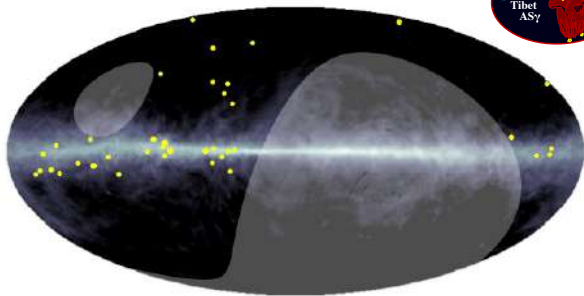
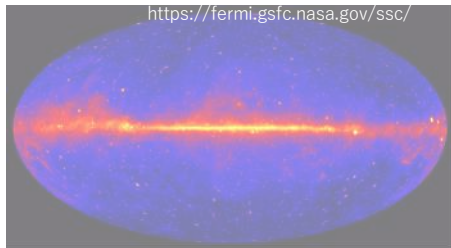
TeVの宇宙



<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

ガンマ線で見た宇宙



Sub PeVの宇宙

- チベット実験による地上からの観測
- 輝く天の川銀河（注：既知天体の寄与は除いた図）
- 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



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
- 2022年9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

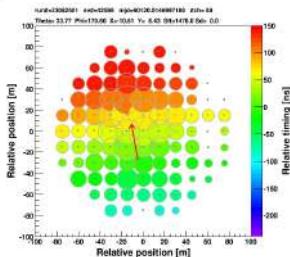
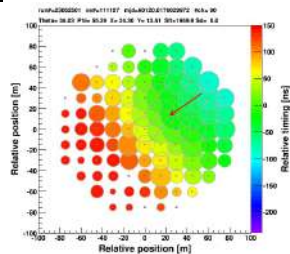
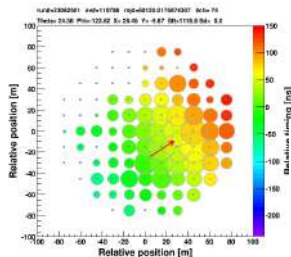
二次粒子群: 空気シャワー

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

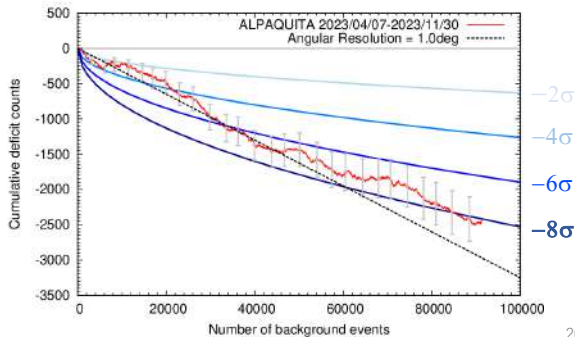
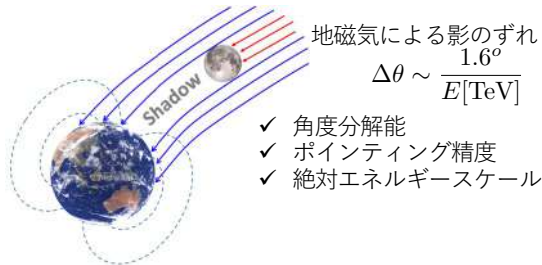
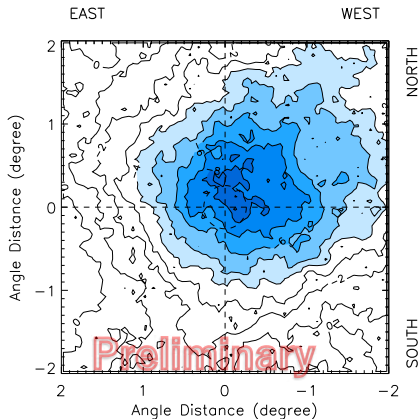
空気シャワーの観測原理



(>100 TeV荷電宇宙線による空気シャワー)

「月の影」の観測

- 2023年4月～2023年11月（225日間）
→ $>8\sigma$ 角度分解能 $\sim 1.0^\circ$



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。
- 地下ミュー粒子検出器1号機の建設（2024年）
- 地下ミュー粒子検出器1台＋地上100台でのガンマ線天文学開始（2024年末-）
- 地下ミューオン検出器2-4号機の建設（2025年）
- フルスケール（地上400台＋地下4台）での運転(2025 or 2026年-)

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

ラテン
アメリカ

大学院生の研究テーマ

素粒子物理

データ解析

シミュレーション

機械学習

宇宙物理

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
- 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

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

装置の設置

装置の校正

フィールド
ワーク

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後半から国内学会デビュー
- 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

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！

世界が注目する小規模なグループです。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



谷(A8)



瀧田(A8)

(新規受け入れはなし)