

ガンマ線・宇宙線物理

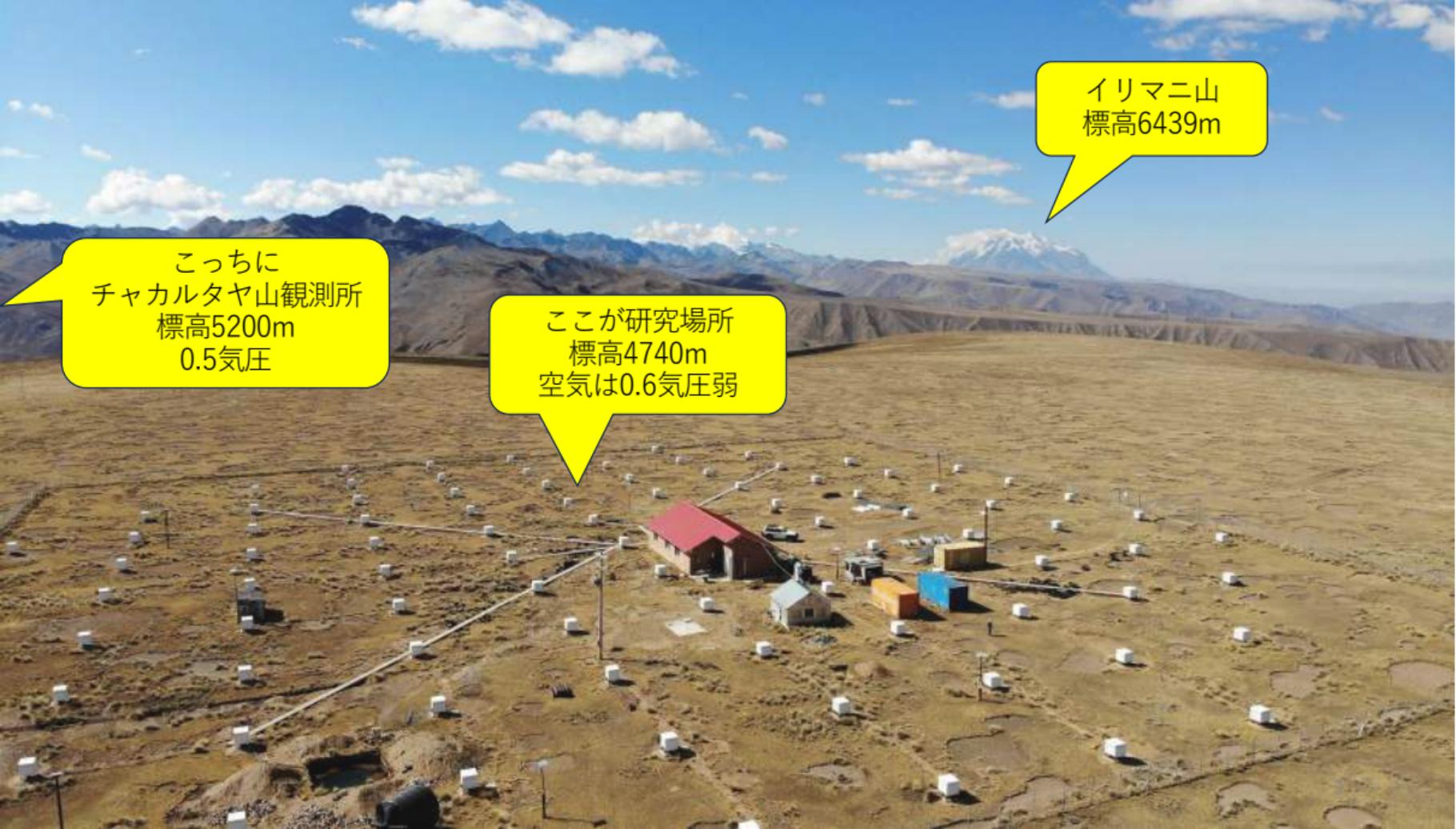
塔さこ 隆志

ガンマ線・宇宙線物理

~"The 宇宙線"研究~

100年の謎、銀河系宇宙線の起源に迫れ！

塔さこ 隆志



イリマニ山
標高6439m

こっちに
チャカルタヤ山観測所
標高5200m
0.5気圧

ここが研究場所
標高4740m
空気は0.6気圧弱

宇宙線ってなに？

TeVガンマ線
連星中性子星合体
反粒子
超新星残骸
ハドロン・レプトン
素粒子標準模型
PeVガンマ線
最高エネルギー宇宙線
PeVatron
原始ブラックホール
高エネルギー電子
ニュートリノ
WIMP
相対論的ジェット
初期宇宙
重力波
ダークマター
二次宇宙線
宇宙磁場
ガンマ線バースト
銀河進化
銀河宇宙線
空気シャワー
ニュートリノ
ミュー粒子
パイ中間子
CP対称性のやぶれ
アクシオン

で、結局宇宙線ってなに？

1ページで学ぶ「宇宙線とは？」

[狭義]宇宙から降り注ぐ高エネルギー原子核

- 陽子、ヘリウム原子核、… 鉄原子核、…

[広義]

- 電子、陽電子、ガンマ線、ニュートリノ
- ダークマター、重力波

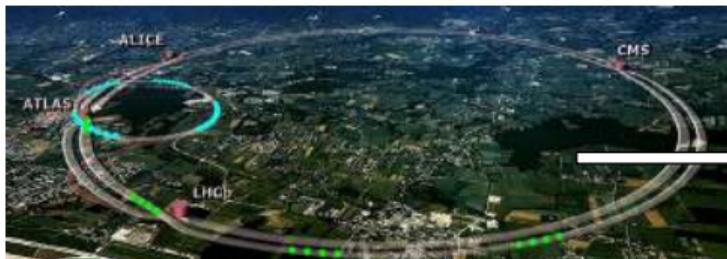
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 大体1秒間に1cm² (指先) に1個到来 [大気の外]
- 大体1分間に1cm² 1個到来(1個/秒/手のひら)[地上(0m)]
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- 10²⁰eVの宇宙線が来ている(100km²に年に一個)
- 人工加速器の最高エネルギーは 7x10¹²eV

宇宙加速器はどこにある？

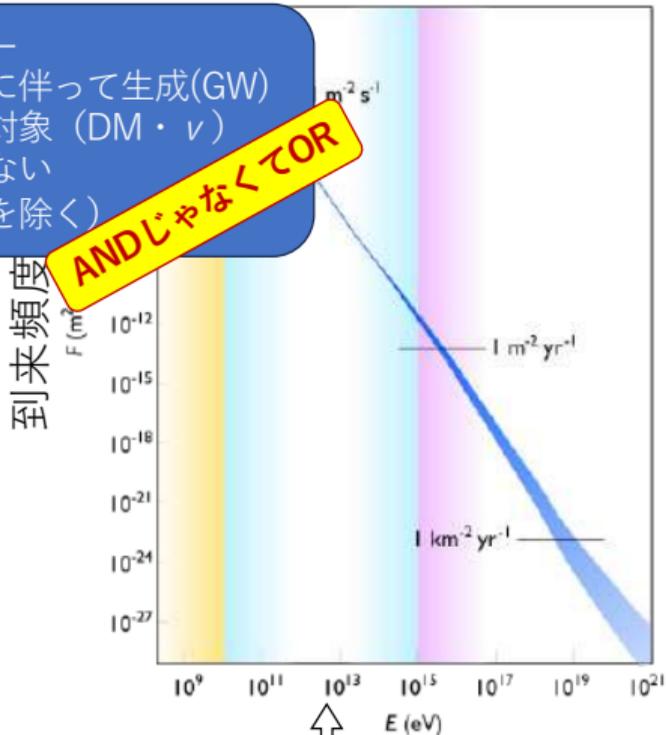
- 宇宙の極限天体・現象に関わるはず
- 謎??

世界最大の粒子加速器 LHC
(CERN, スイス, フランス国境)



- 粒子自身が高エネルギー
- 高エネルギー天体現象に伴って生成(GW)
- 高エネルギー物理学の対象 (DM・ν)
- 伝統的な天文学が扱わない
- 電磁波以外 (ガンマ線を除く)

ANDじゃなくてOR



横軸の単位はeV (エレクトロンボルト)
1eV = 電子を1Vで加速した場合のエネルギー
= 1.6x10⁻¹⁹ J (ジュール)

1ページで学ぶ「宇宙線とは？」

[狭義]宇宙から降り注ぐ高エネルギー原子核

- 陽子、ヘリウム原子核、… 鉄原子核 …

[広義]

- 電子、陽電子、ガンマ線、ニュートリノ
- ダークマター、重力波

- 粒子自身が高エネルギー
 - 高エネルギー天体現象に伴って生成(GW)
 - 高エネルギー物理学の対象 (DM・ ν)
- 伝統的な天文学が扱わない
(ガンマ線を除く)

本講義のテーマ
“The 宇宙線”

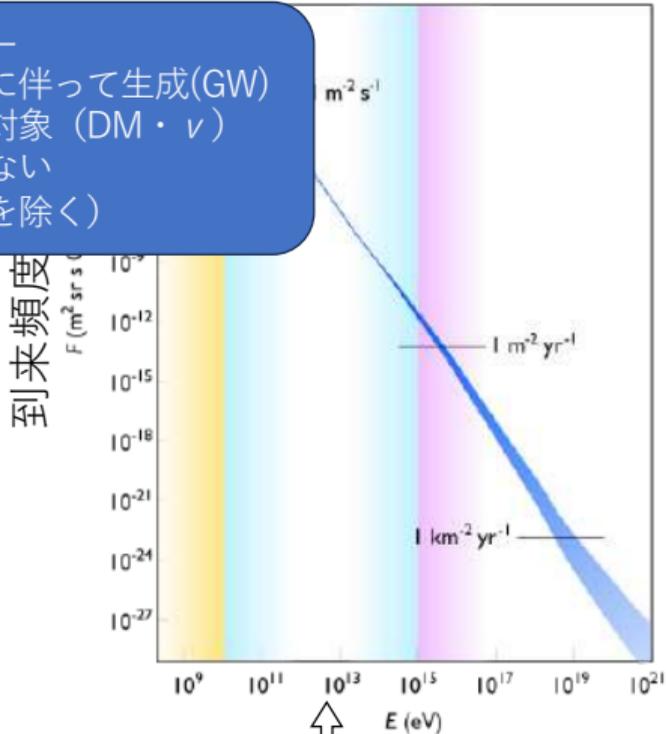
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 大体1秒間に1cm² (指先) に1個到来 [大気]
- 大体1分間に1cm² 1個到来(1個/秒/手のひら)
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- 10²⁰eVの宇宙線が来ている(100km²に年に一個)
- 人工加速器の最高エネルギーは 7x10¹²eV

宇宙加速器はどこにある？

- 宇宙の極限天体・現象に関わるはず
- 謎??

世界最大の粒子加速器 LHC
(CERN, スイス, フランス国境)



横軸の単位はeV (エレクトロンボルト)
1eV = 電子を1Vで加速した場合のエネルギー
= 1.6x10⁻¹⁹ J (ジュール)

1ページで学ぶ「宇宙線とは？」

[狭義]宇宙から降り注ぐ高エネルギー原子核

- 陽子、ヘリウム原子核、… 鉄原子核、…

[広義]

- 電子、陽電子、ガンマ線、ニュートリノ
- ダークマター、重力波

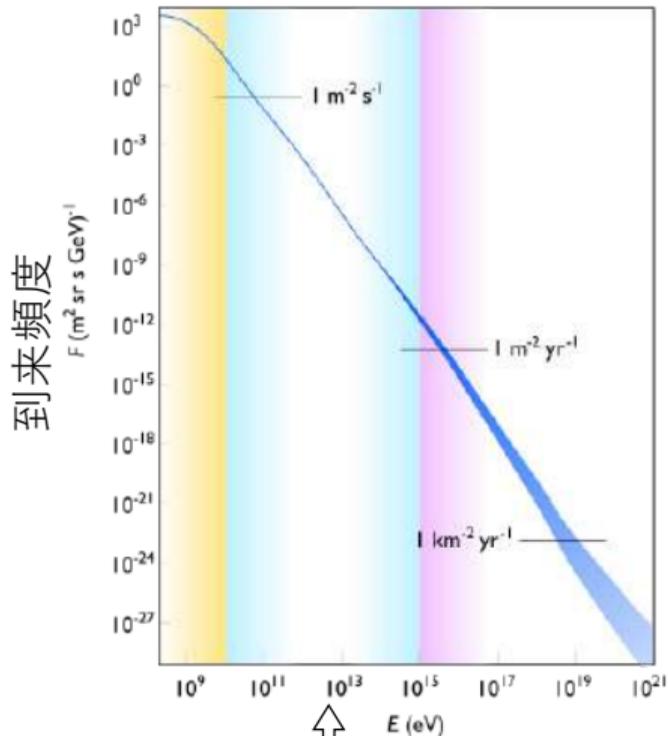
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 大体1秒間に1cm² (指先) に1個到来 [大気の外]
- 大体1分間に1cm² 1個到来(1個/秒/手のひら)[地上(0m)]
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- 10²⁰eVの宇宙線が来ている(100km²に年に一個)
- 人工加速器の最高エネルギーは 7x10¹²eV

宇宙加速器はどこにある？

- 宇宙の極限天体・現象に関わるはず
- 謎??

世界最大の粒子加速器 LHC
(CERN, スイス, フランス国境)



横軸の単位はeV (エレクトロンボルト)
1eV = 電子を1Vで加速した場合のエネルギー
= 1.6x10⁻¹⁹ J (ジュール)



なぜ起源がわからない？

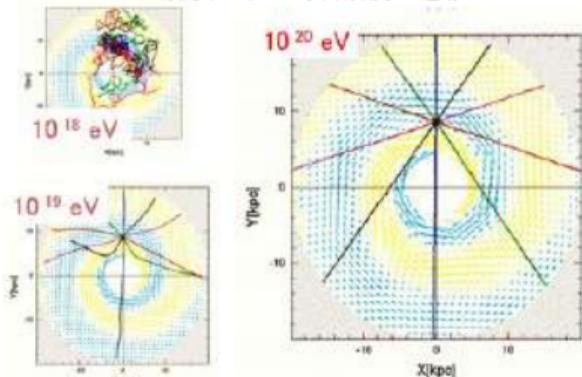
=> 強敵：宇宙磁場

10^{19} eV

10^{15} eV



銀河系の中での宇宙線陽子の運動



- 地球で観測される宇宙線の到来方向から、宇宙線の発生源の方向はわからない
- 銀河系内の天体は>数 10^{15} eVの陽子は閉じ込められない、つまり銀河系内天体の陽子加速限界は数 10^{15} eV(数PeV)

「最高エネルギー宇宙線」 銀河系外宇宙線の起源

なぜ起源がわからない？

=> 強敵：宇宙磁場

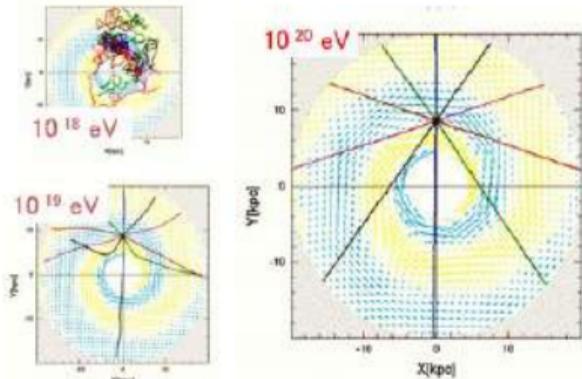
戦略1：最高エネルギーを狙う！

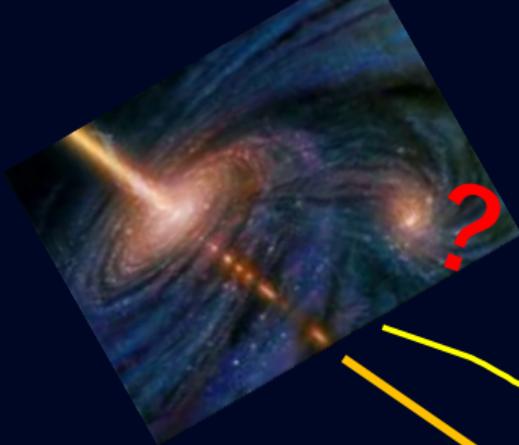
10^{20}eV

10^{19}eV

10^{15}eV

銀河系の中での宇宙線陽子の運動



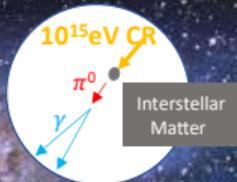


10^{20}eV

10^{19}eV

なぜ起源がわからない？

=> 強敵：宇宙磁場



10^{15}eV

戦略2：銀河宇宙線の精密測定

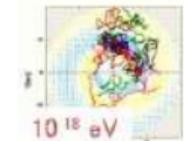
「高エネルギー宇宙線」
銀河系内宇宙線の加速限界

$10^{14}\text{eV } \gamma$

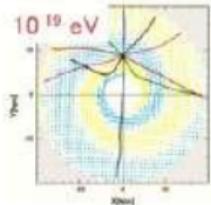
戦略3：ガンマ線を狙う！

「高エネルギーガンマ線天文学」

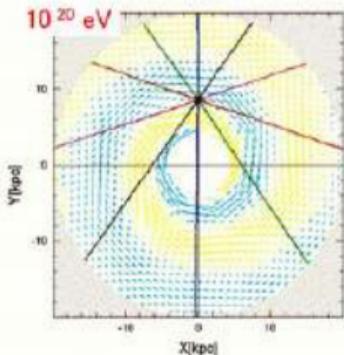
銀河系の中での宇宙線陽子の運動



10^{18} eV



10^{19} eV



10^{20} eV

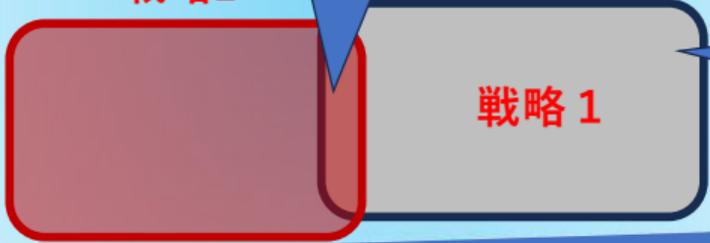
TeV=10¹²eV, PeV=10¹⁵eV, EeV=10¹⁸eV

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)

さこチーム
荻尾講義



• 宇宙最高エネルギー粒子
• 銀河系外
• 超レア

高エネルギー宇宙線観測
(Tibet, ALPACA)

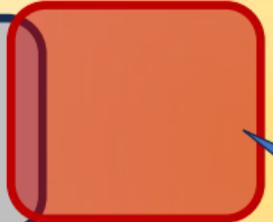
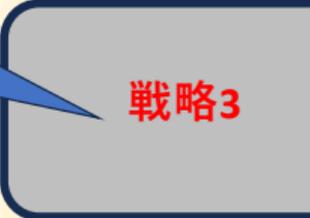
Energy

TeV

PeV

EeV

• 高精度観測
• 超巨大実験
• 銀河系内外



最高エネルギーガンマ線観測
(Tibet, ALPACA)

理論 (全体)
浅野講義

• 宇宙最高エネルギー光子
• 銀河系内
• 2019年に観測確立

野崎チーム
吉越講義

高エネルギーガンマ線観測
(MAGIC, CTA)

川田チーム
さこ講義

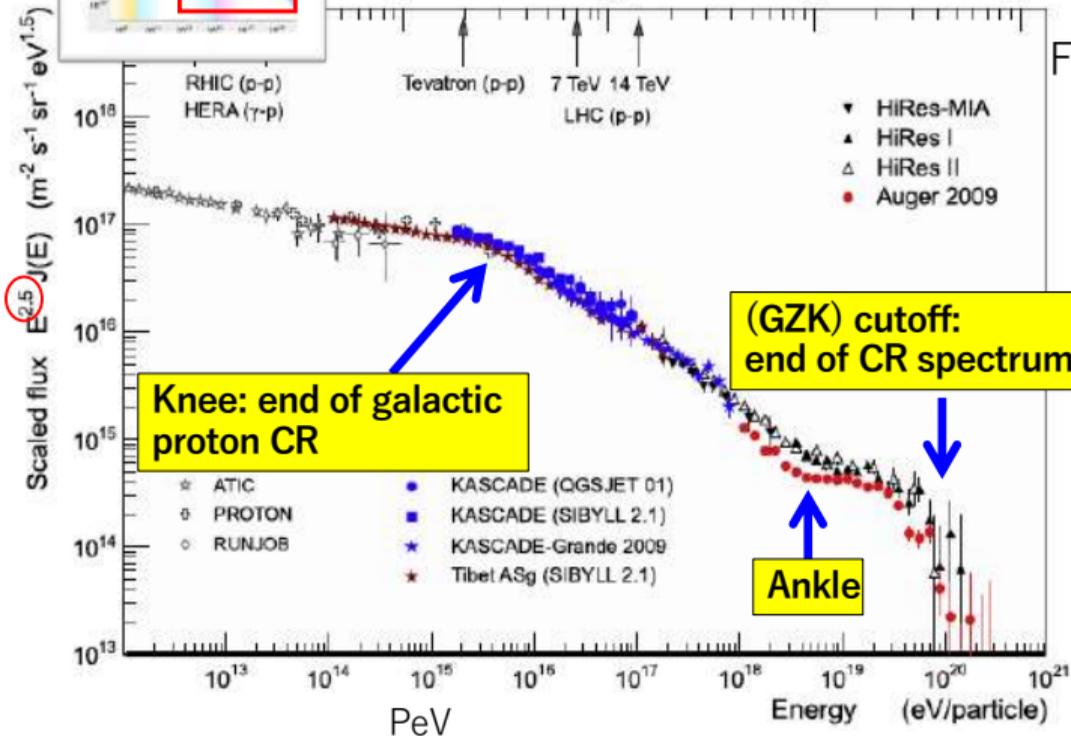
ガンマ線観測

宇宙線のエネルギースペクトル

(D'Enterria et al., Astropart. Phys., 35,98-113, 2011)

$$y=b+ax$$

- $J = J_0 E^\alpha \Rightarrow \log J = \log J_0 + \alpha \log E$
- $\log(E^{2.5} J) = \log J_0 + (\alpha + 2.5) \log E$



Flux

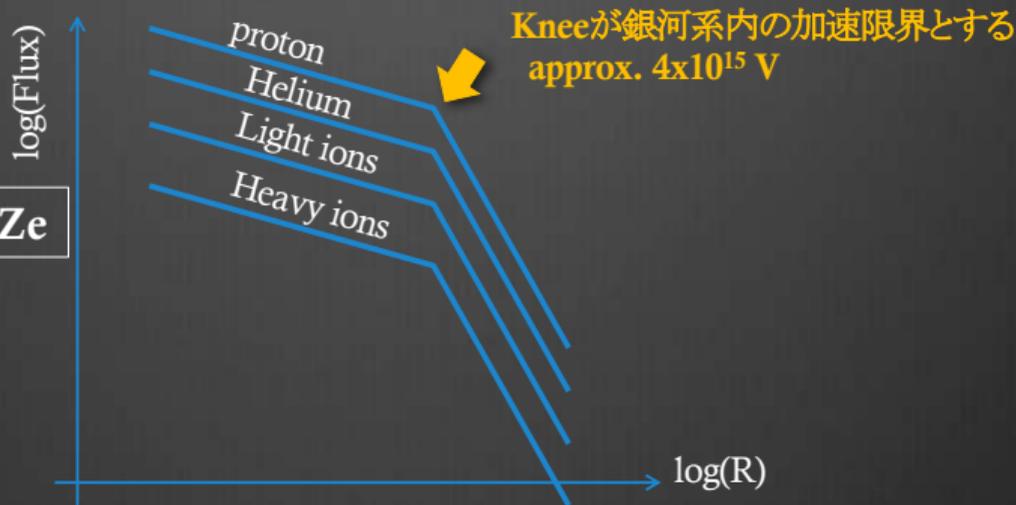
- $J \propto E^{-2.7}$ (below knee)
- $J \propto E^{-3.1}$ (above knee)
- $J \propto E^{-2.7}$ (above ankle)
- $J \propto E^{-5}$ (above cutoff)

マクスウェル分布ではなくべき (power law) 型

- 「熱いガス」ではない
- 熱的(thermal)ではないエネルギー付与, **粒子加速 (particle acceleration)** が起きている

=> 粒子加速天体を探せ!

Standard Scenario of Cosmic-Ray Spectrum

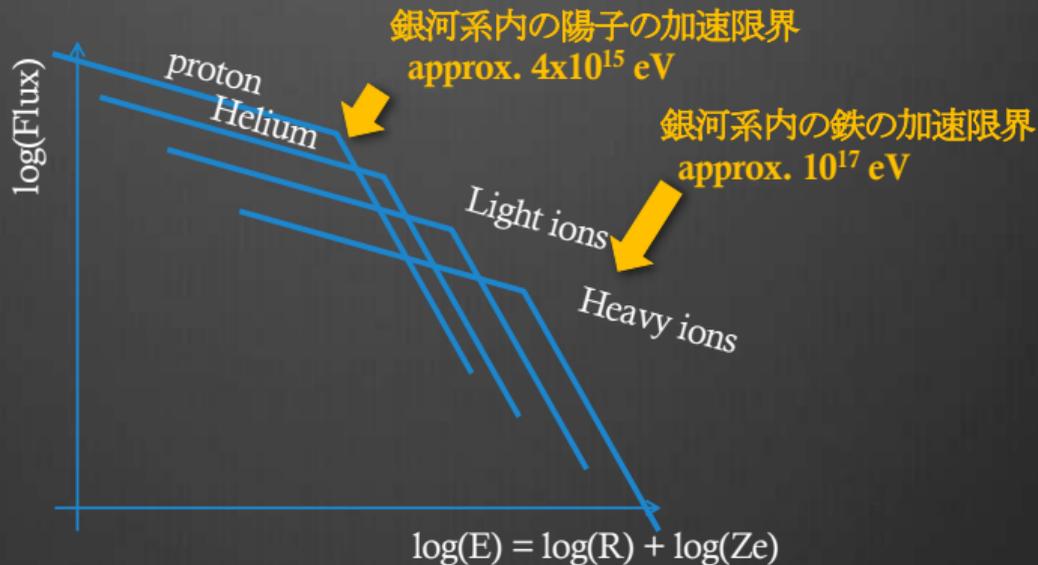


$$\text{Rigidity : } R = pc/Ze \sim E/Ze$$

- ✓ 同じrigidityの粒子は電磁場中で同じ軌道で運動
=> Rigidityスペクトルはどの原子核でも同じ
- ✓ 宇宙線加速器は有限のサイズと磁場強度もつ
=> 加速限界rigidityはどの原子核でも同じ

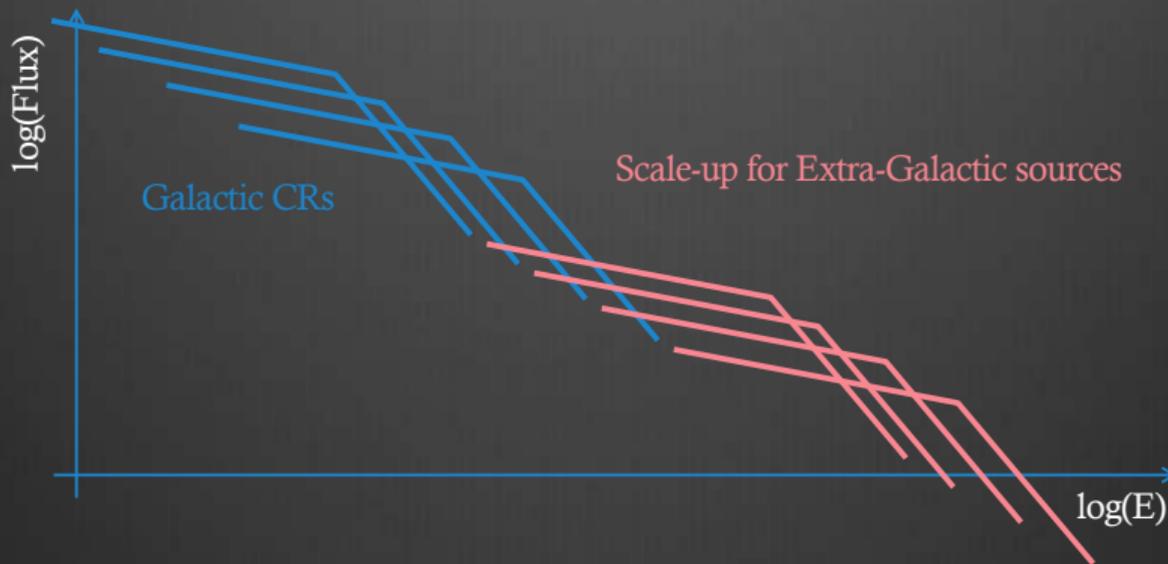
Standard Scenario of Cosmic-Ray Spectrum

Energy : $E = R \times Ze$



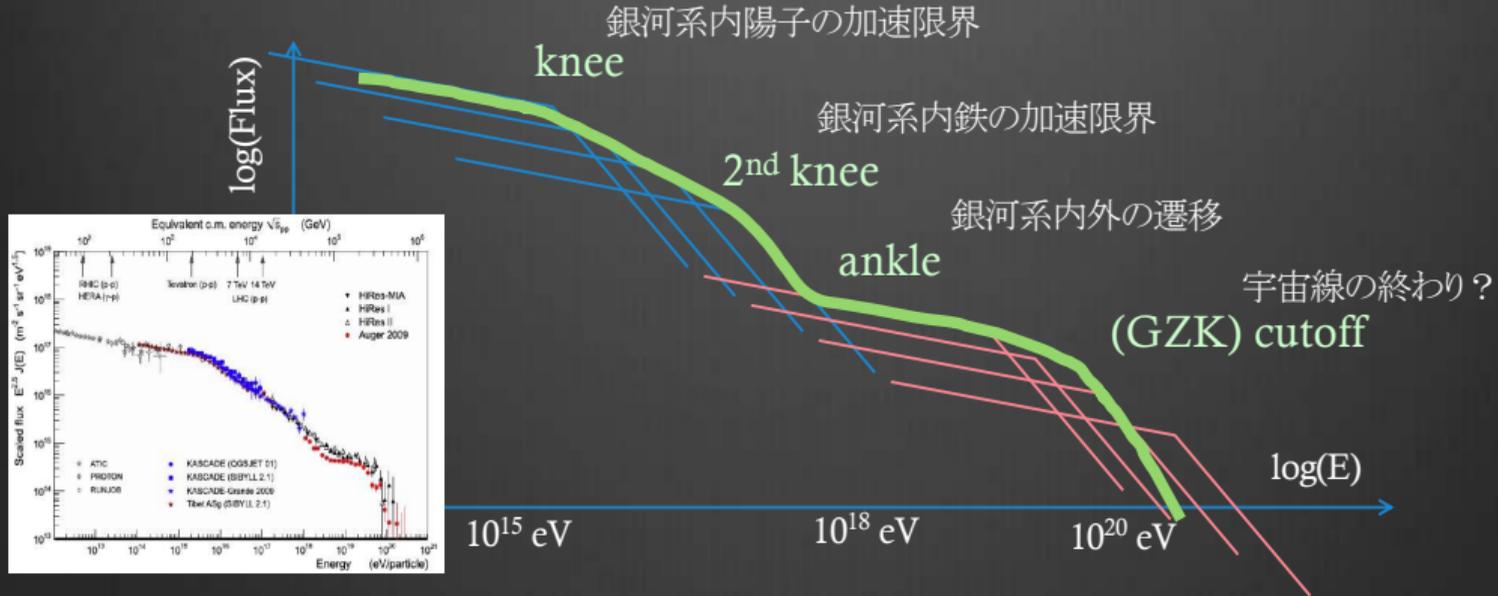
- ✓ 「エネルギー」スペクトルにすると、原子番号Z倍だけ右にシフト
- ✓ 鉄 (Z=26) の加速限界エネルギーは $26 \times 4 \times 10^{15} \sim 10^{17}$ eV

Standard Scenario of Cosmic-Ray Spectrum



- ✓ 銀河系内の限界とこえると、銀河系外からの宇宙線が支配的になる
- ✓ 銀河系外には多分、我々の銀河より強力な加速天体があるだろう

Standard Scenario of Cosmic-Ray Spectrum



✓ エネルギースペクトルの構造を説明可能

✓ 粒子種(原子核種、質量)のエネルギー依存があるはず

高エネルギー宇宙線の課題

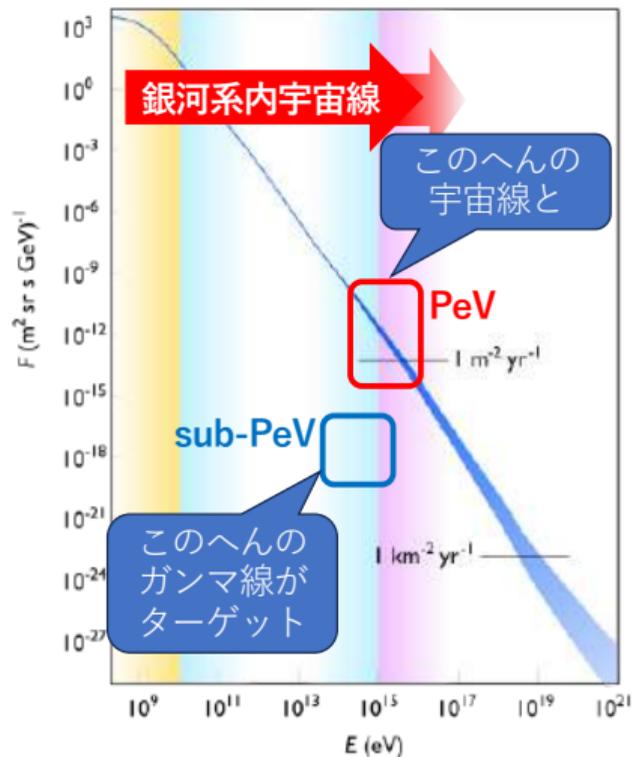
- 宇宙線標準モデルの実証
- 「どこで」「どのように」発生？
- 加速限界rigidityは？Knee ($4 \times 10^{15} \text{eV} = 4 \text{PeV}$)は陽子の加速限界？
 - ✓宇宙線原子核種別エネルギースペクトル測定
- sub-PeVガンマ線観測で数PeV陽子の存在を証明
 - ✓加速天体周辺でのガンマ線生成
 - ✓銀河系空間でのガンマ線生成
 - ✓南半球での観測

戦略2：どのように

戦略3：どこで

TeV= 10^{12} eV, PeV= 10^{15} eV, EeV= 10^{18} eV

高エネルギー宇宙線・ガンマ線観測の方法 ～空気シャワー～



- >数PeVの宇宙線は“1個/1m²/年”
- >100TeVのガンマ線は明るい天体で“~1個/1m²/1000年”
- PeVのエネルギーを吸収するには巨大な検出器が必要

宇宙での観測は無理！

地球大気を検出器として利用する
「空気シャワー」実験

宇宙線

エネルギーが高いと、
空気分子と衝突して
大量の粒子を生成

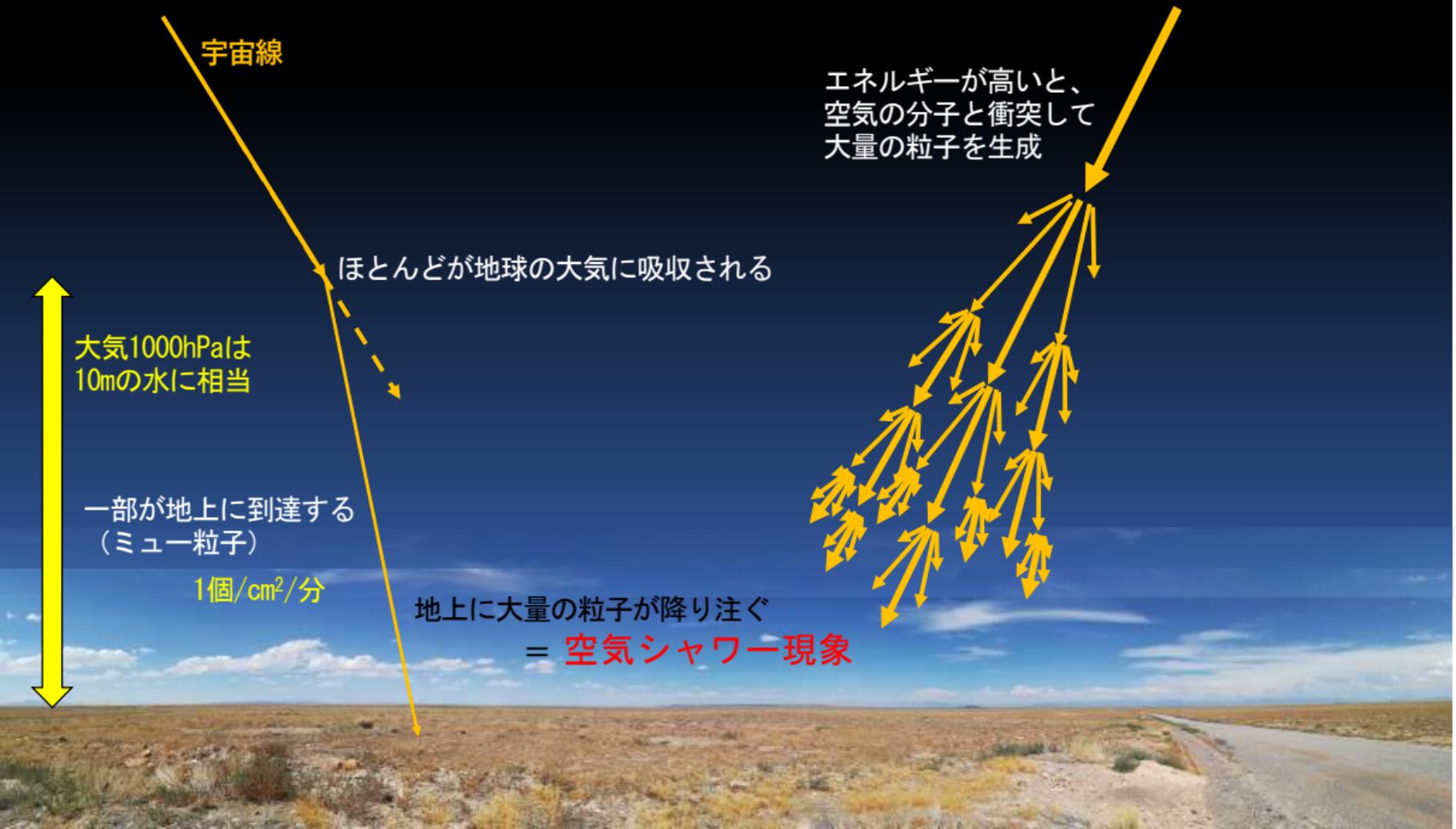
ほとんどが地球の大気に吸収される

大気1000hPaは
10mの水に相当

一部が地上に到達する
(ミュー粒子)

1個/cm²/分

地上に大量の粒子が降り注ぐ
= **空気シャワー現象**

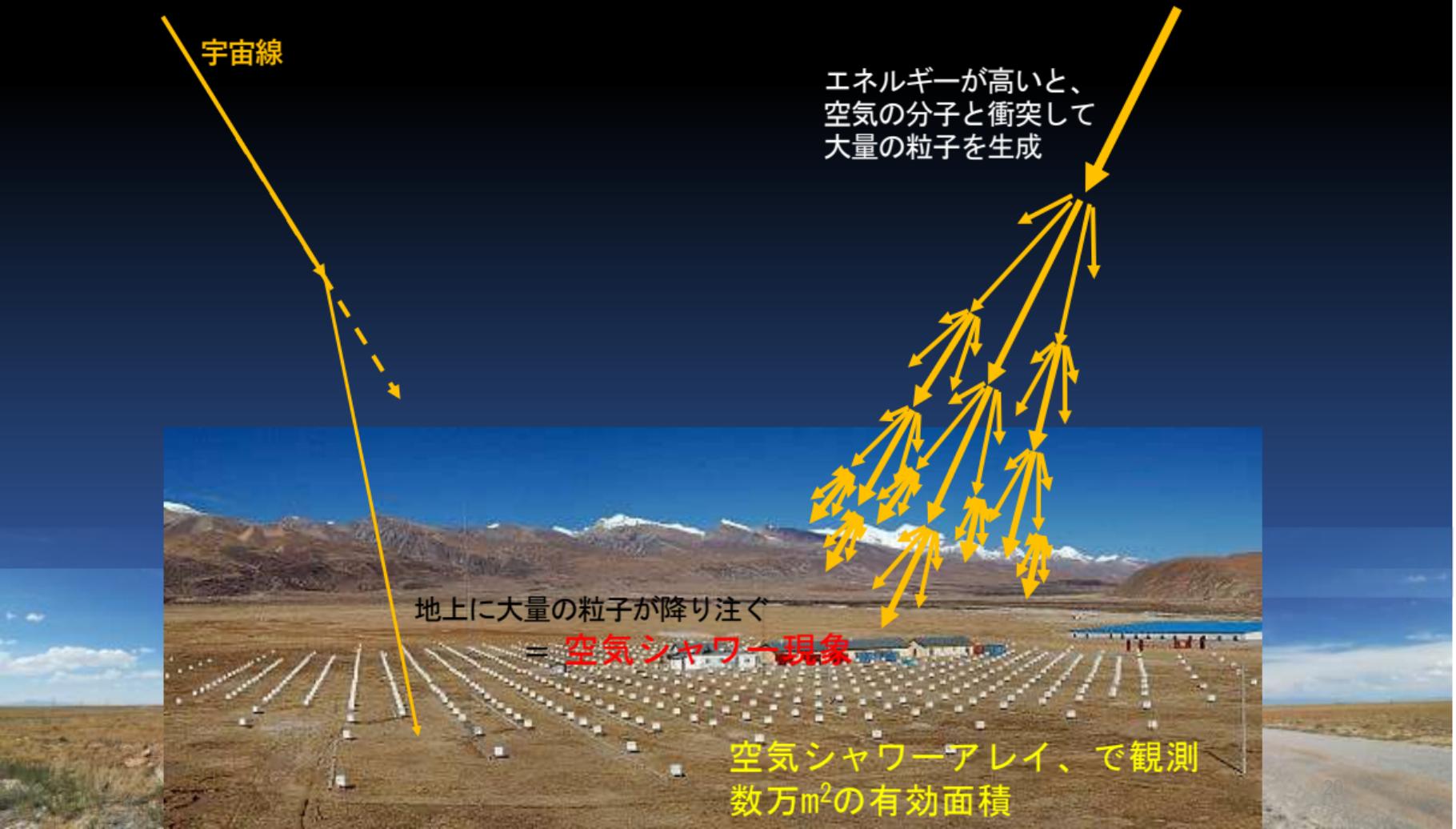


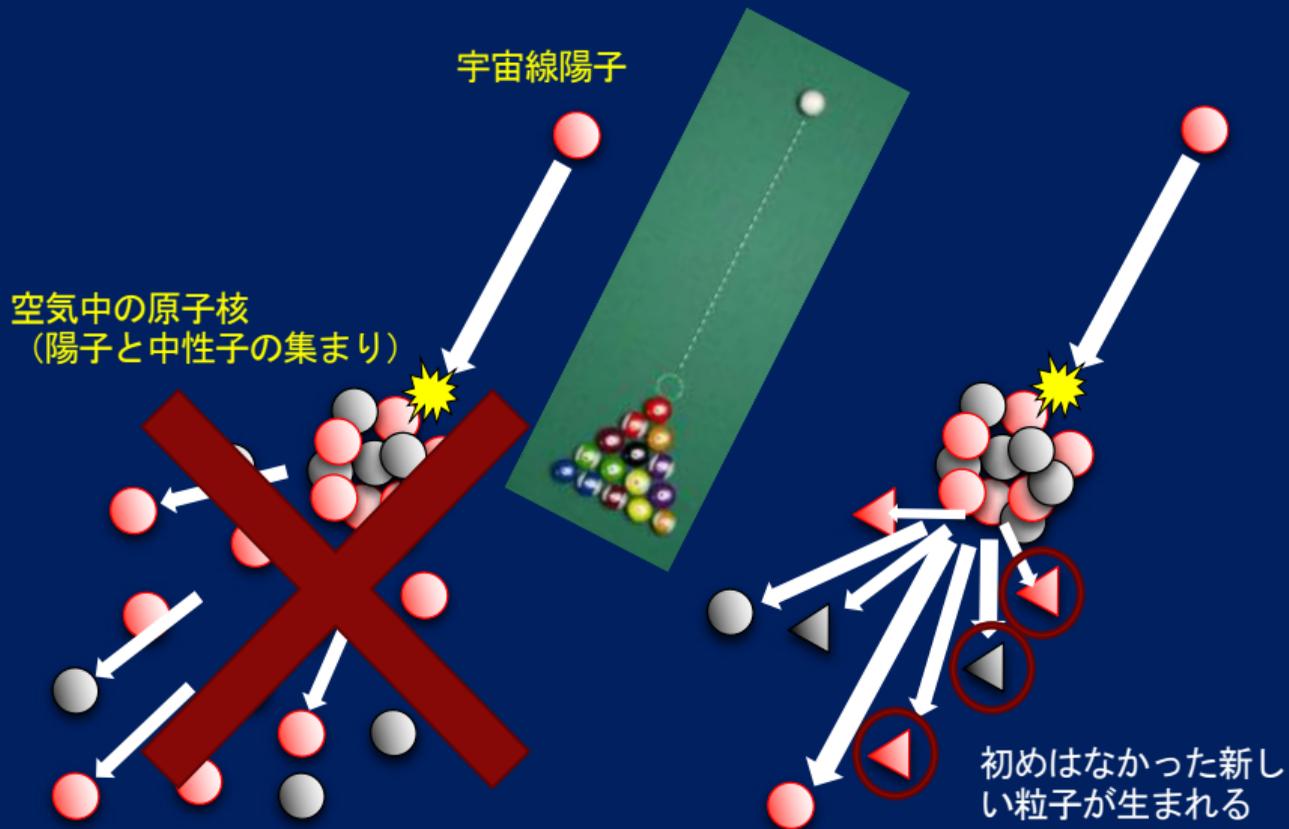
宇宙線

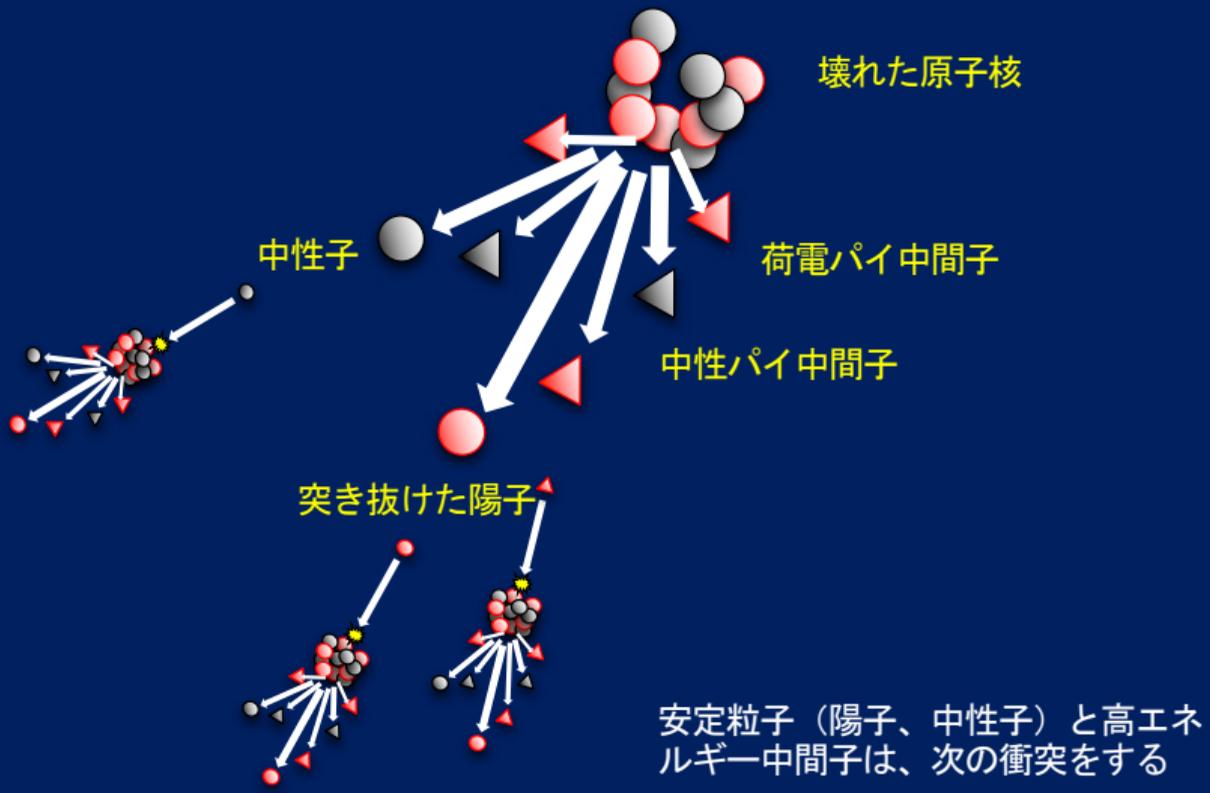
エネルギーが高いと、
空気分子と衝突して
大量の粒子を生成

地上に大量の粒子が降り注ぐ
= 空気シャワー現象

空気シャワーアレイ、で観測
数万 m^2 の有効面積







中性子

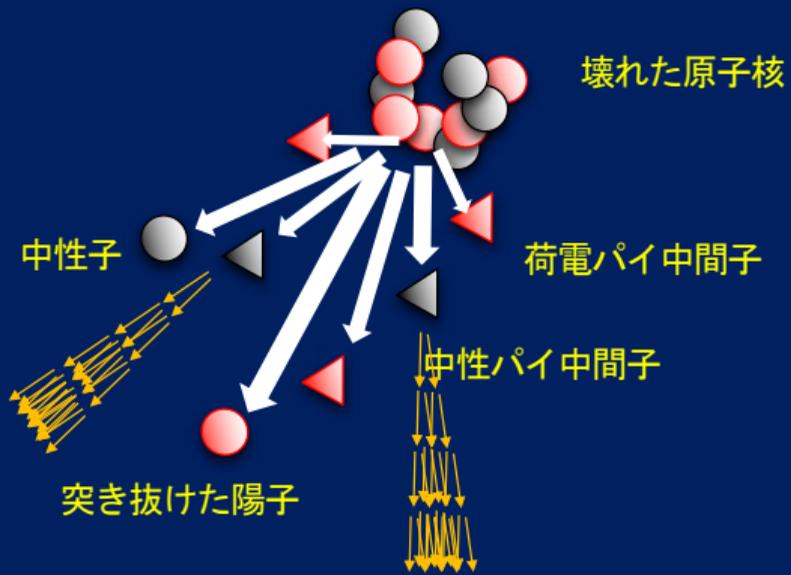
壊れた原子核

荷電パイ中間子

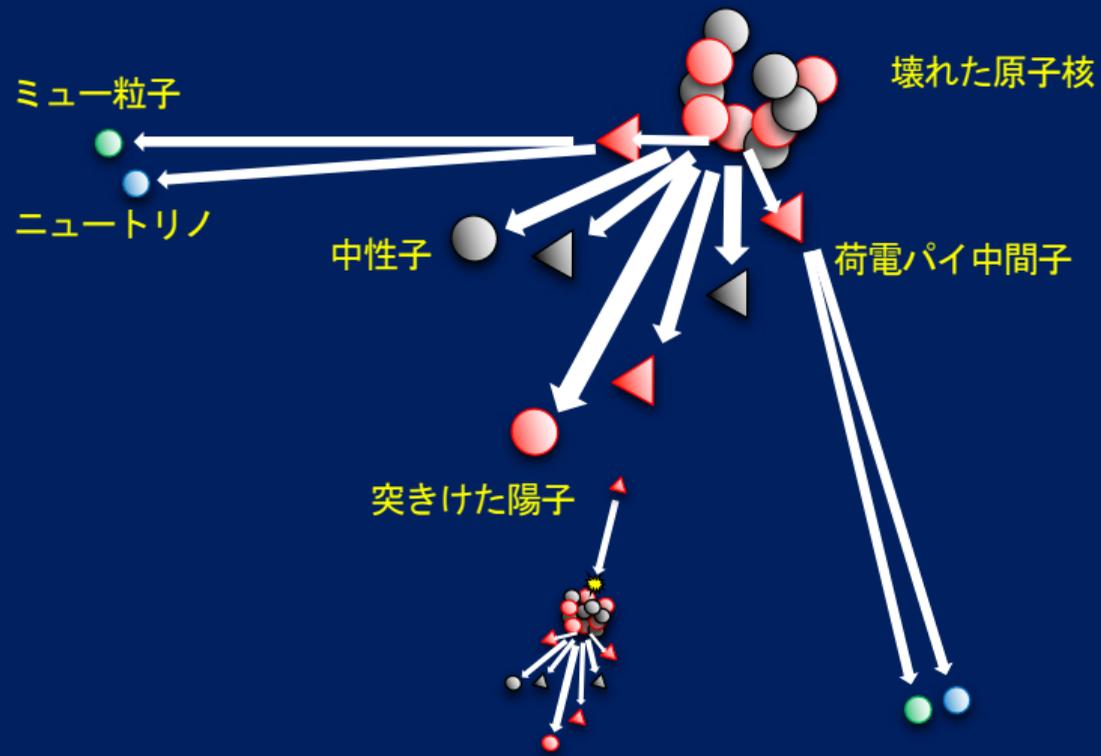
中性パイ中間子

突き抜けた陽子

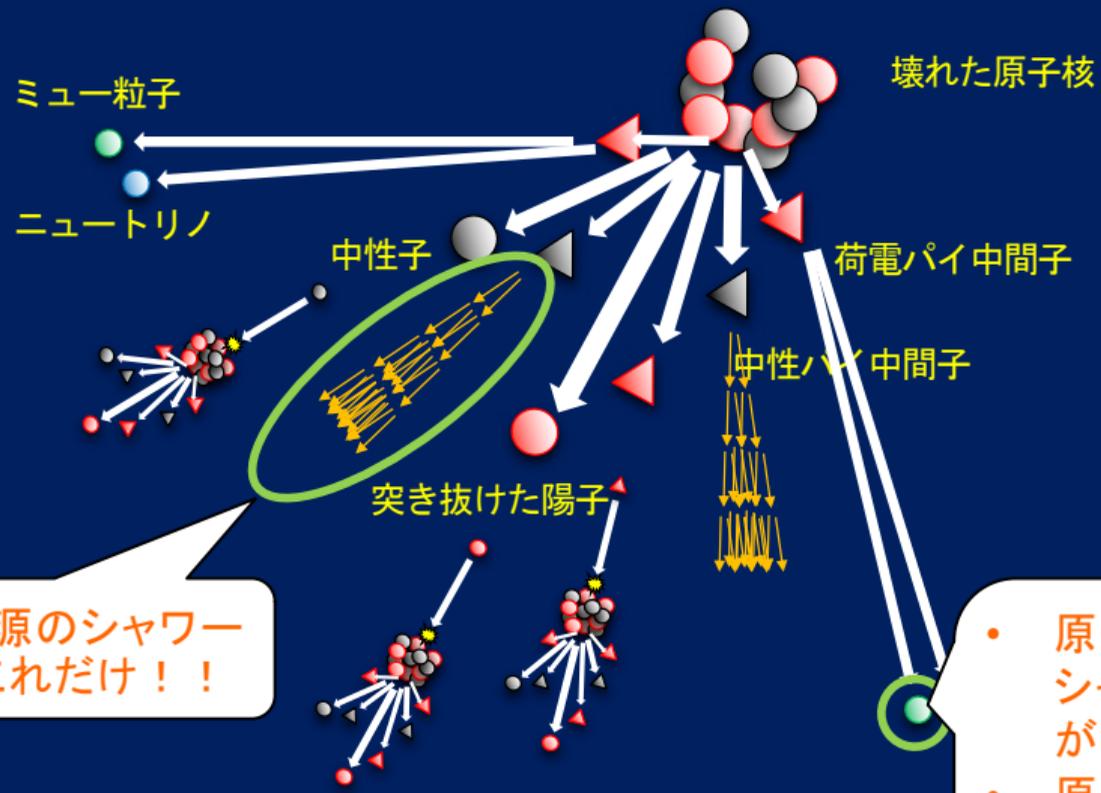
安定粒子 (陽子、中性子) と高エネルギー中間子は、次の衝突をする



中性パイ中間子は、ガンマ線に崩壊。
ガンマ線 ⇒ 電子・陽電子（電子対生成）
電子・陽電子 ⇒ ガンマ線（制動放射）
の粒子増殖を繰り返す電磁カスケードシャワーを形成。



荷電パイ中間子は、
エネルギーが高いと、次の衝突を起こす（相対論的寿命の伸び）
エネルギーが低いと、ミュー粒子とニュートリノに崩壊
ミュー粒子とニュートリノはほとんど反応しないで地上（地中）に到達

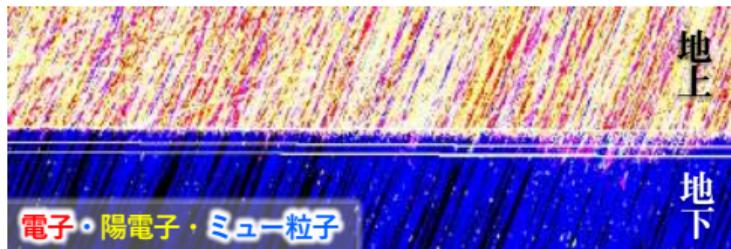


ガンマ線起源のシャワーは(ほぼ)これだけ!!

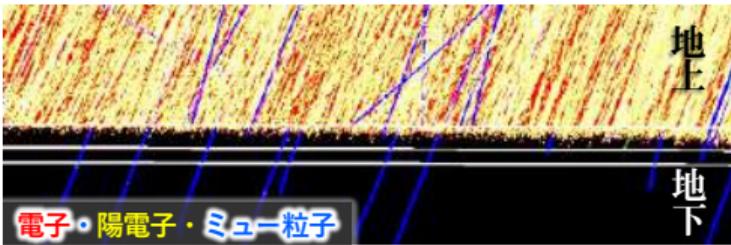
- 原子核宇宙線起源のシャワーにはミュー粒子がいる
- 原子核種によって(ちょっとだけ)ミュー粒子の数が違う

ミュー粒子の測定

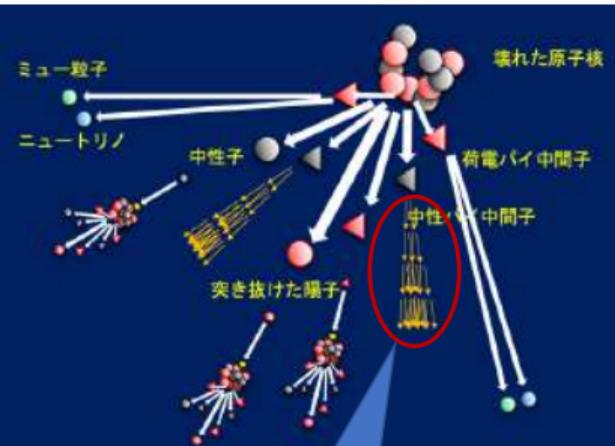
200TeV原子核宇宙線の場合



200TeVガンマ線の場合



地面付近を拡大



ガンマ線シャワー
はこれだけ

電子・陽電子成分 => 地上では主成分、地面ですぐに吸収
ミュー粒子 => 地上では少数成分、地下まで貫通

地下に浸透する荷電粒子の観測で選別可能！⁶！

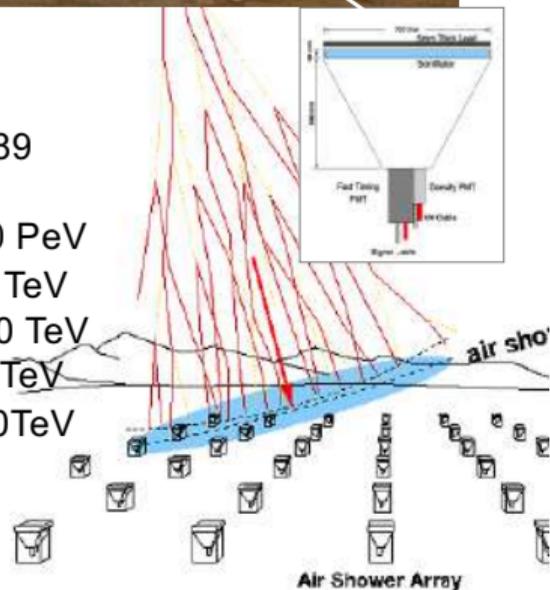
Tibet-III Air Shower (AS) Array



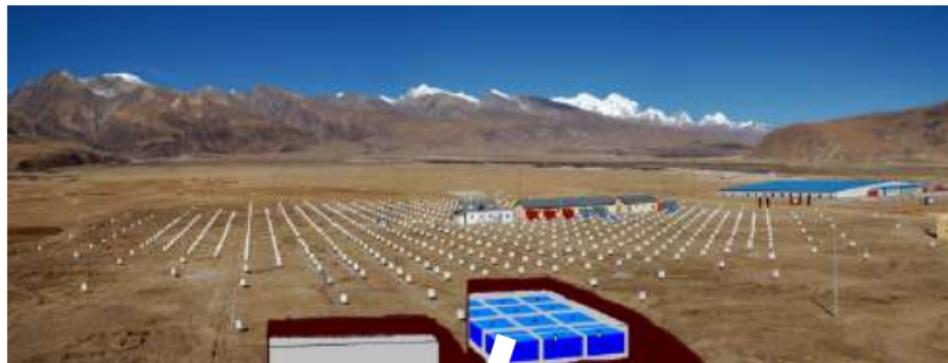
4,300 m a.s.l. (606 g/cm²)

- ❑ Number of Scinti. Det.
- ❑ Effective Area for AS
- ❑ Energy region
- ❑ Angular Resolution
(Gamma rays)
- ❑ Energy Resolution
(Gamma rays)
- ❑ F.O.V.
- ❑ Trigger Rate

0.5 m² x 789
~37,000 m²
~3TeV - 100 PeV
~0.4° @10 TeV
~0.2° @100 TeV
~50% @10 TeV
~20% @100TeV
~2 sr
1.7 KHz

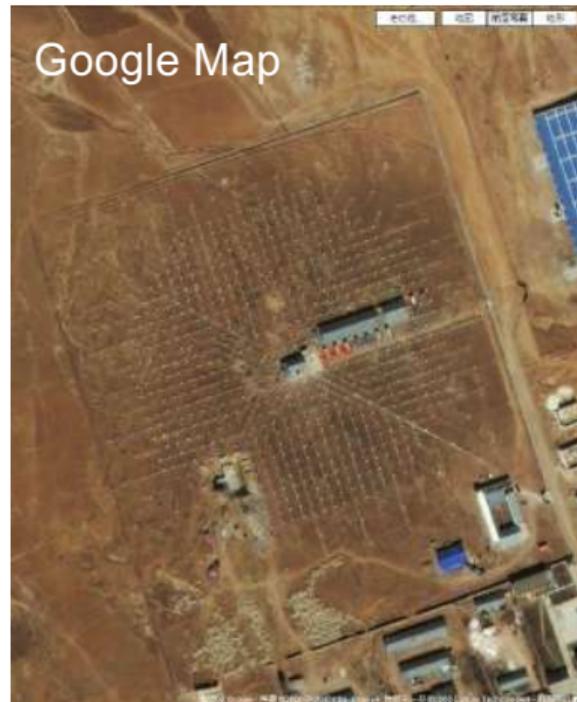


チベット空気シャワーアレイと 地下ミュー粒子検出器



羊八井高原,
中国, チベット

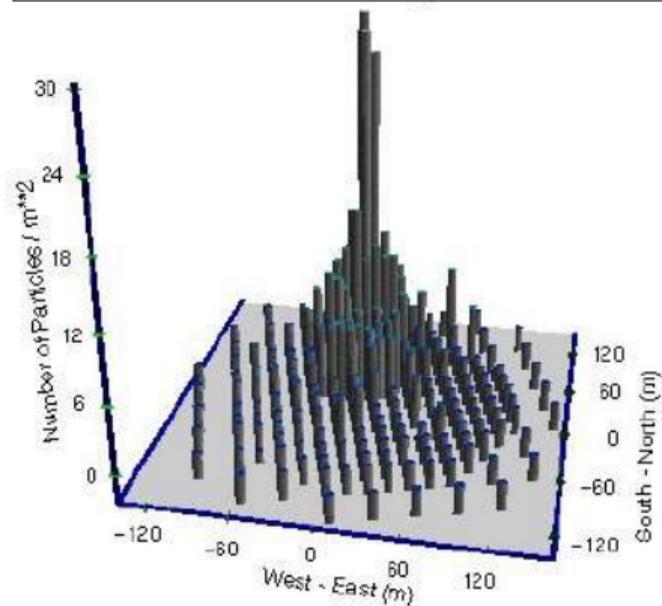
海拔4300 m . = 606 g/cm²



空気シャワーの観測例

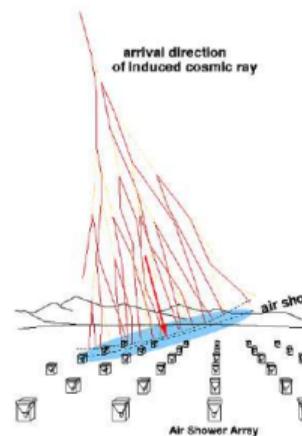
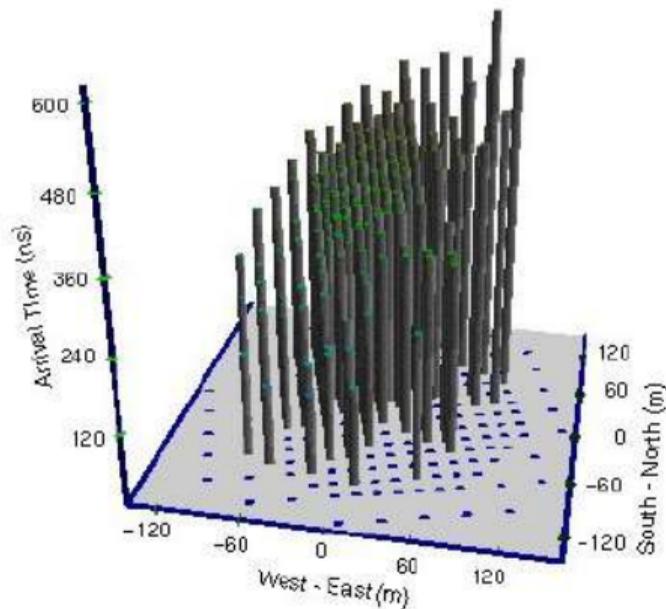
粒子数密度分布

=> 入射粒子のエネルギー



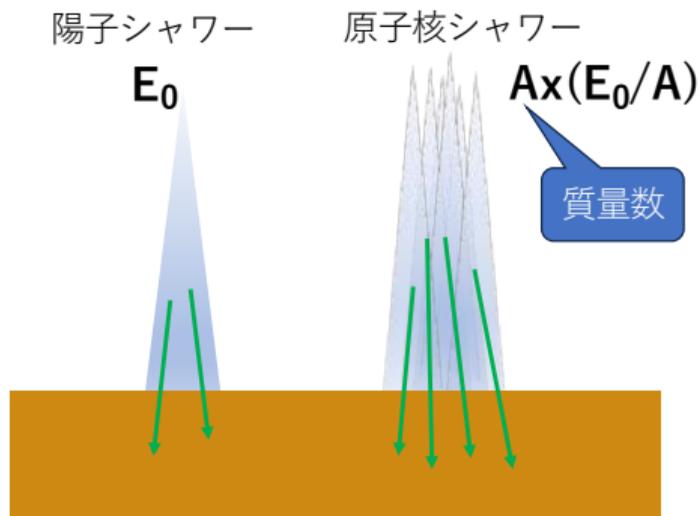
粒子到来タイミング分布

=> 入射粒子の到来方向



「シャワー面」は
光速で到来

原子核種の決定 (ミュー粒子数の測定)



- 高エネルギー反応で見ると陽子と中性子は同じ
- 原子核のシャワーは低エネルギー陽子シャワーの重ね合わせ
- 地上のミュー粒子数は原子核種に依存
- ミュー粒子は地下数mでも透過する
- 地表は電子・陽電子だらけ

陽子シャワーの地上ミュー粒子数

$$N_{\mu,p} = \left(\frac{2}{3}n_{tot}\right)^n = \left(\frac{E_0}{E_{dec}}\right)^\alpha$$

$\alpha = 0.8 \sim 0.9$ なので、ちょっとだけエネルギーに比例しない。

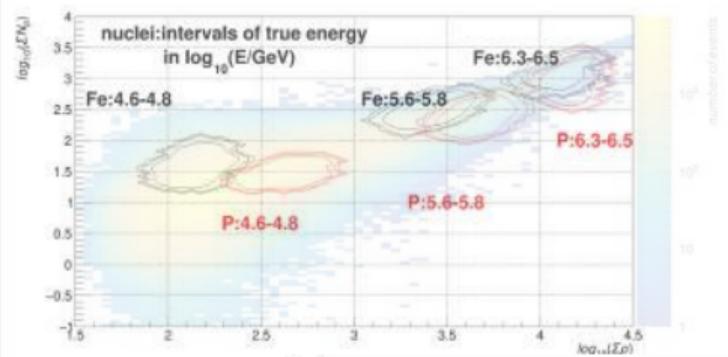
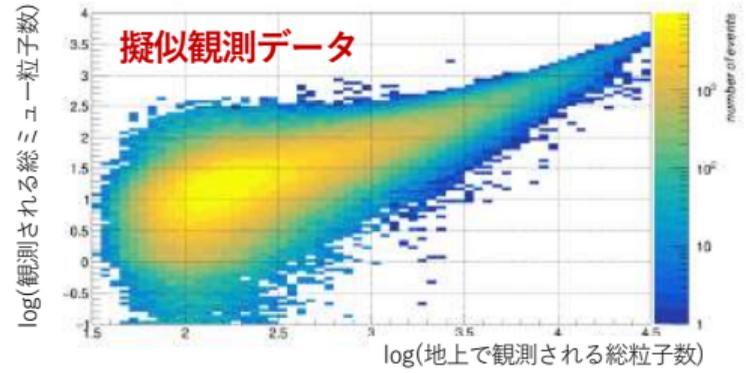
エネルギーが同じで質量数Aの原子核シャワーの場合

$$N_{\mu,A} = A \times \left(\frac{E_0/A}{E_{dec}}\right)^\alpha = A^{1-\alpha} N_{\mu,p} \quad (\alpha = 0.8 \sim 0.9)$$

ちょっとだけ($A^{1-\alpha}$ 倍)、陽子よりもミュー粒子数が多い

ミュオン粒子測定の良いこと1

ミュオン粒子数とベイズ推定を使った原子核種測定方法開発



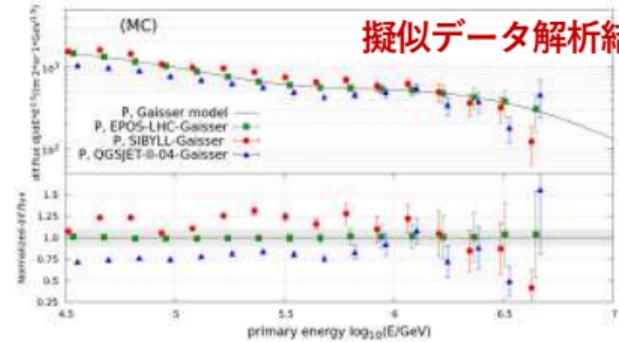
核種k・エネルギーjの宇宙線がどう観測されるかの応答関数
右上の等高線

$$N_i(\Sigma\rho, \Sigma N_\mu) = T \sum_{k=1}^{N_{\text{nucl}}} \sum_{j=1}^{N_s} R_{ij}^k A_j^k x_j^k$$

実際に観測される分布
左上の図

検出効率

核種k・エネルギーjの宇宙線の到来頻度=知りたい値

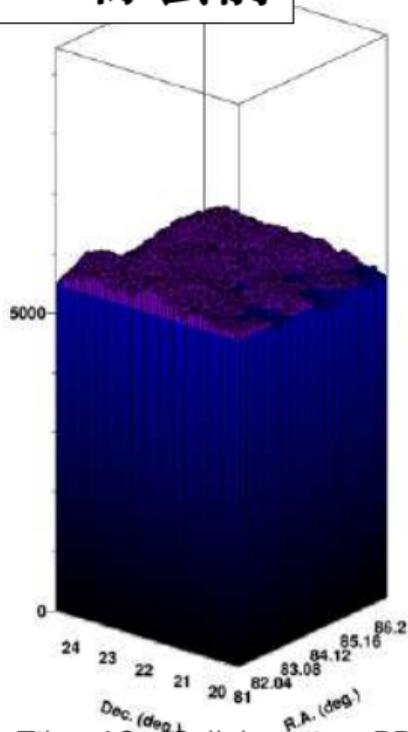


解析手法完成 => 実際のデータに適用する

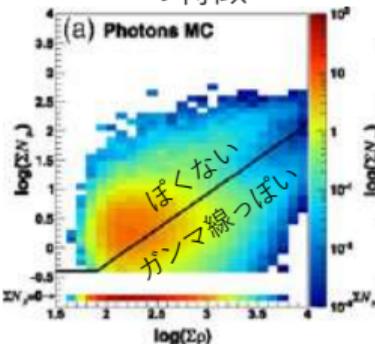


チベットAS γ 実験による 最高エネルギーガンマ線の発見

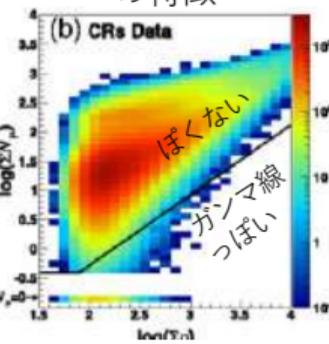
BG除去前



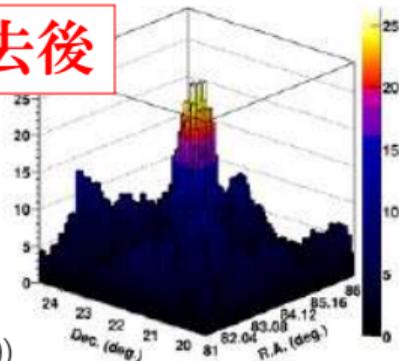
ガンマ線シャワー
の特徴



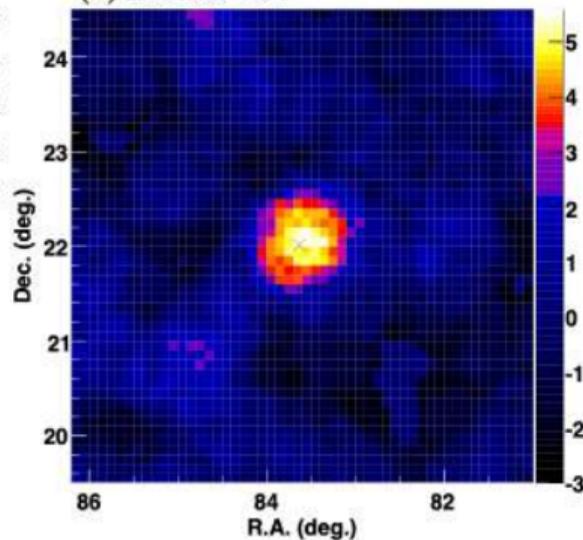
荷電宇宙線シャワー
の特徴



BG除去後

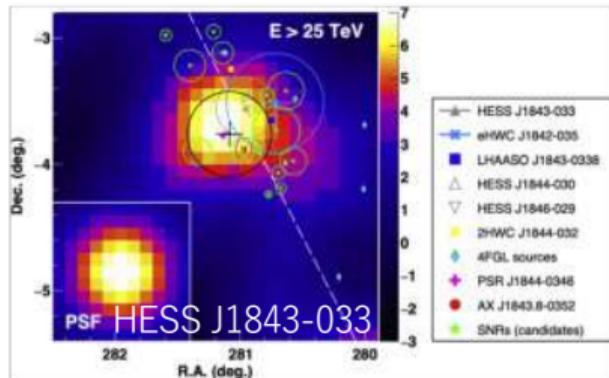
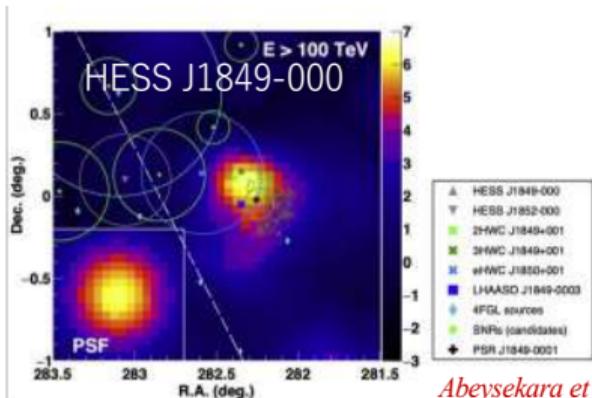
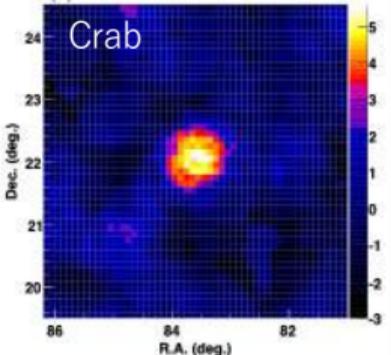


(b) $E > 100$ TeV



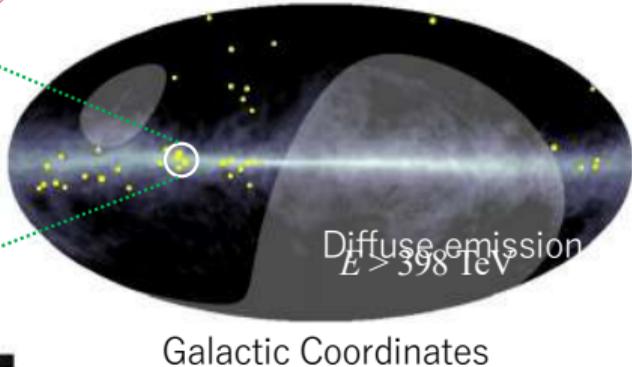
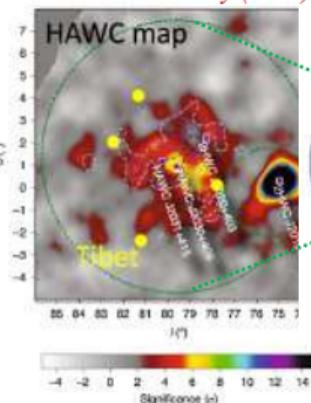
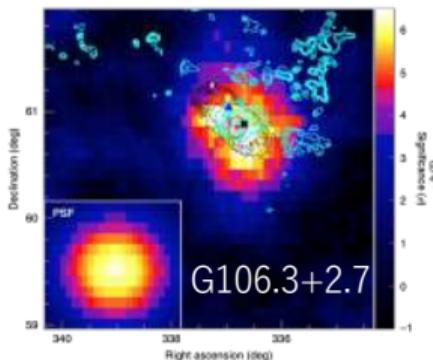
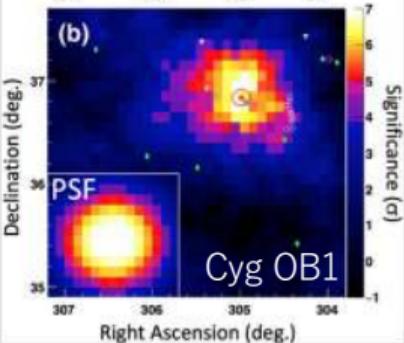
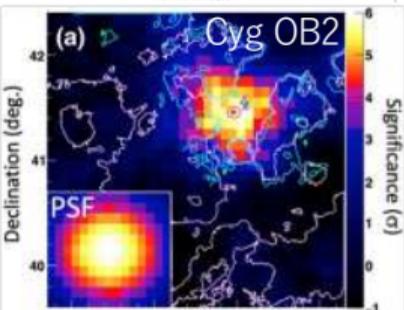
かに星雲からの100TeV超
ガンマ線の検出に成功

>100TeV detection by Tibet



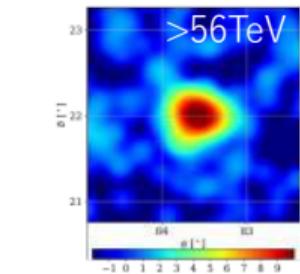
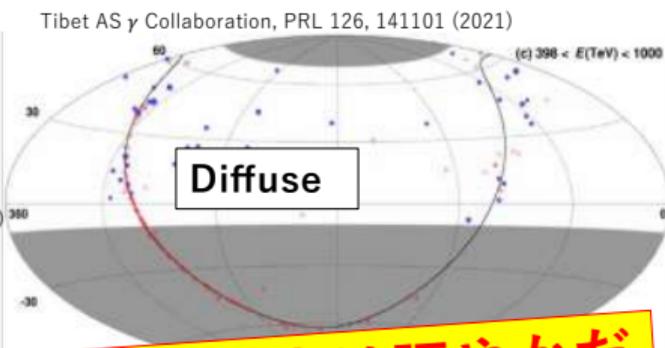
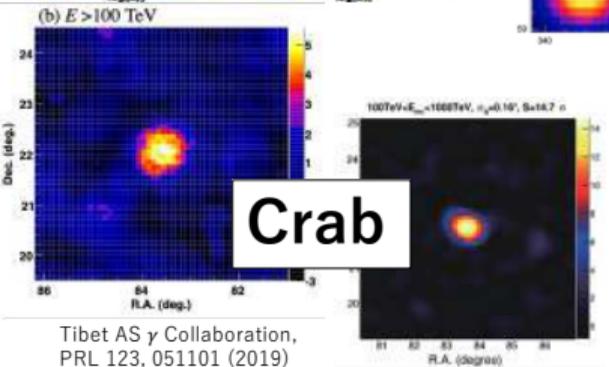
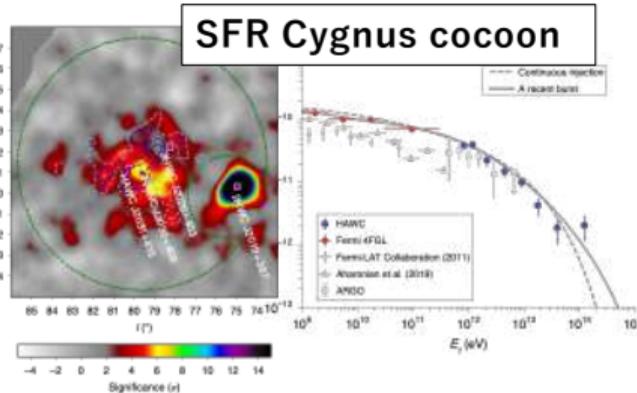
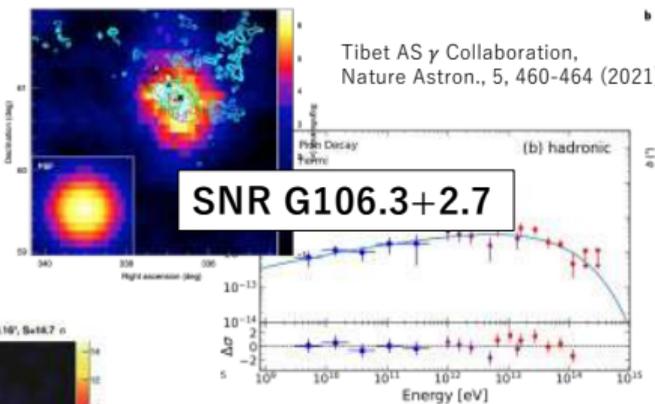
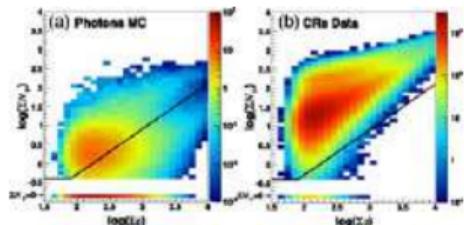
*Abeyssekara et al.,
Nature Astronomy (2021)*

Aenomori et al., PRL 126, 141101 (2021)

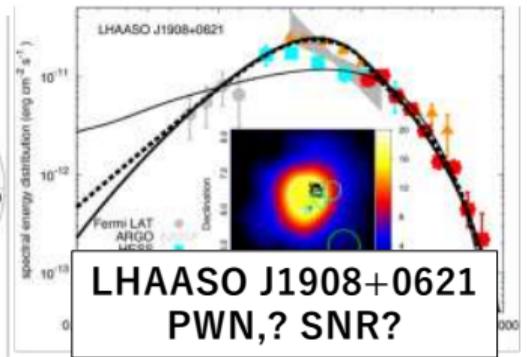


- 他波長データと比較して起源天体、起源粒子（陽子？電子？）、加速メカニズムを議論するマルチメッセンジャー天文学

sub-PeVガンマ線天文学の夜明け

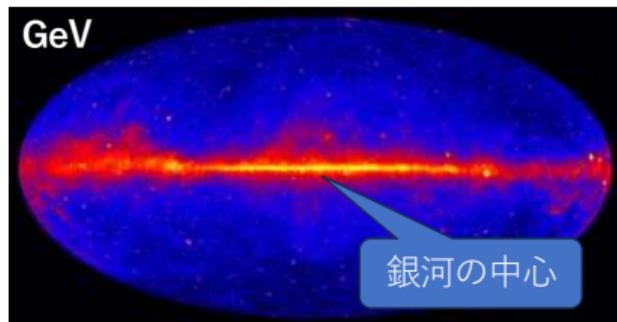


LHAASO Collaboration,
Chin. Phys. C45, 023002 (2021)

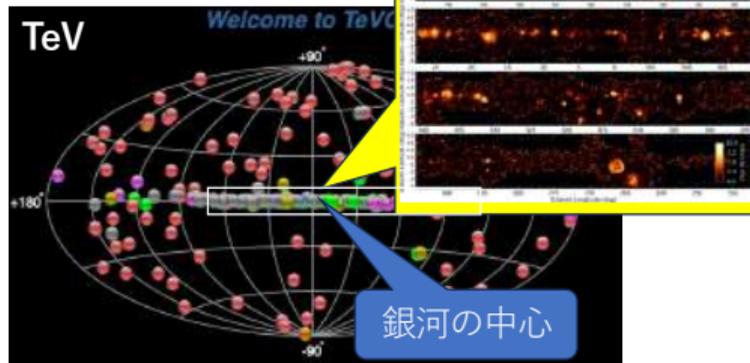


Sub-PeVの空は賑やかだ

Sub-PeVガンマ線天文学、次のステップ

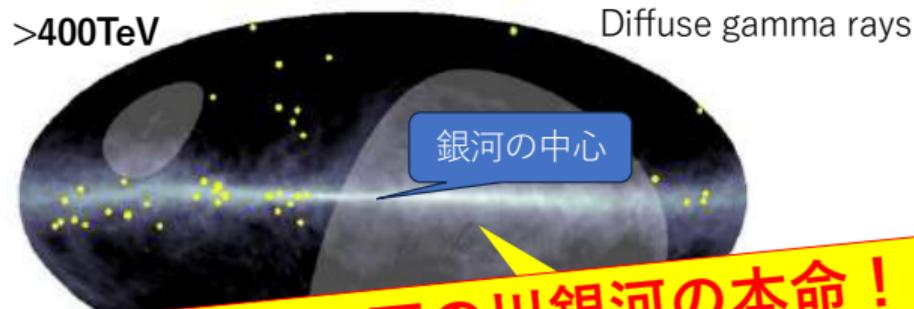


<https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/>

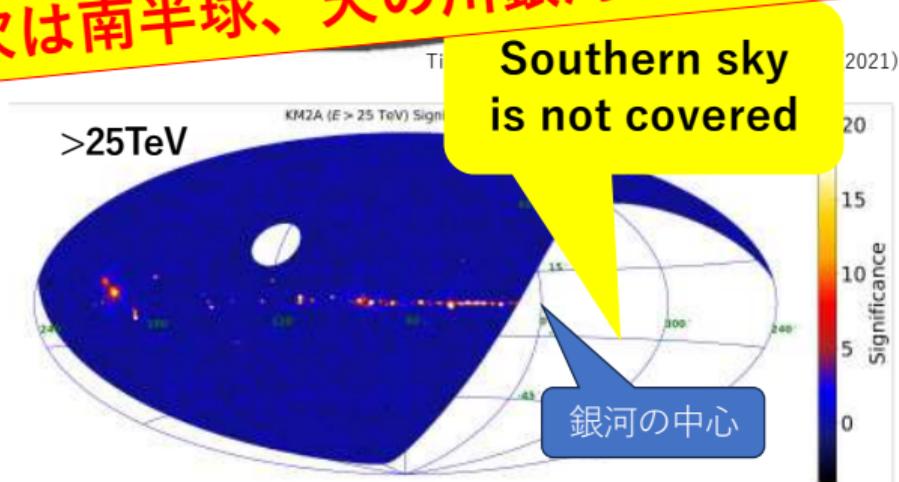


<http://tevcat.uchicago.edu>

HESS: A&A 612, A1 (2018)



次は南半球、天の川銀河の本命！！

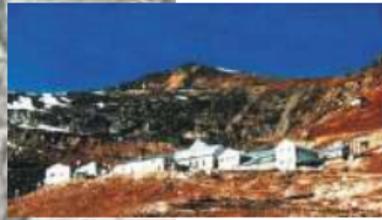


Gamma-ray sources

LHAASO Collaboration, arXiv:2305.1703v1 (2023)

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)**

La Paz

ALPACA空気シャワー実験

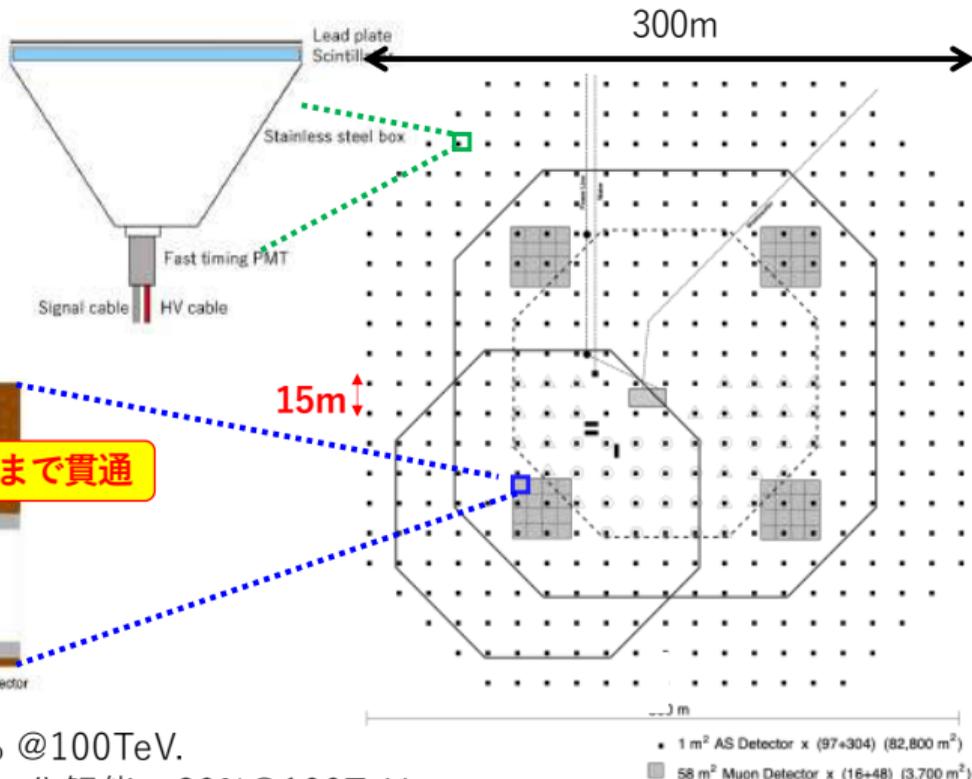
1. Array coverage 82,800m²

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

✓ 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)

97 detectors

ALPAQUITA 空気シャワー実験

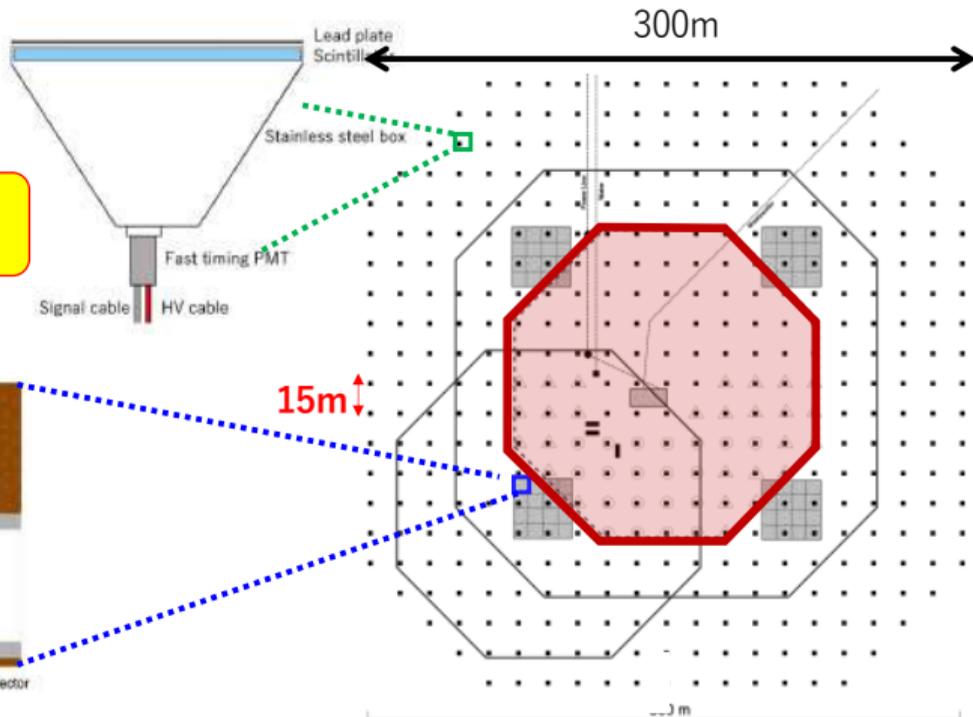
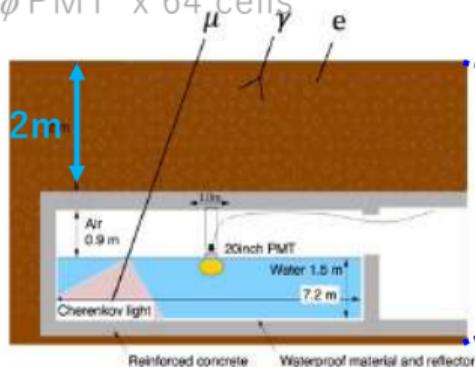
1. Arra coverage 82,800m²

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)



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

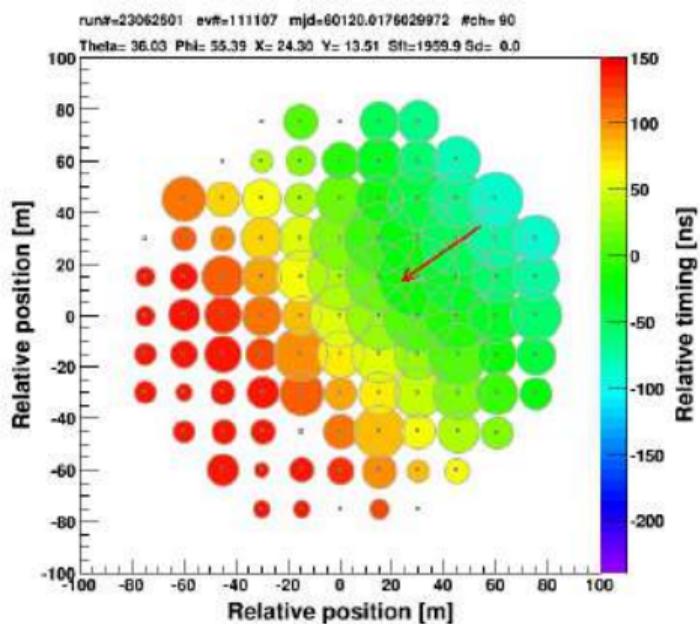
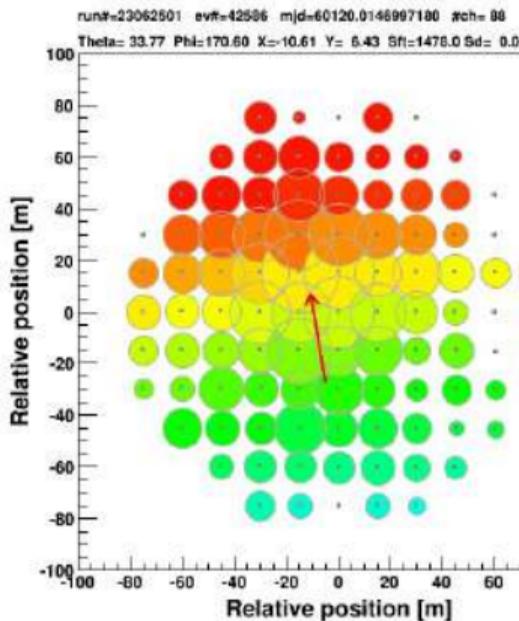
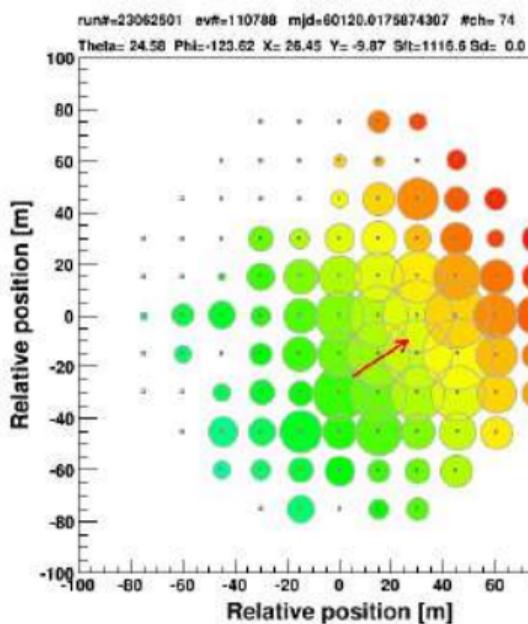
- ✓ 荷電宇宙線シャワーの除去効率 >99.9% @100TeV.
- ✓ 角度分解能 ~0.2° @100TeV, エネルギー分解能 ~20%@100TeV
- ✓ 100% duty cycle, FOV $\theta_{zen} < 40^\circ$ (well studied), $\theta_{zen} < 60^\circ$ (in study)

ALPAQUITA construction in June 2022



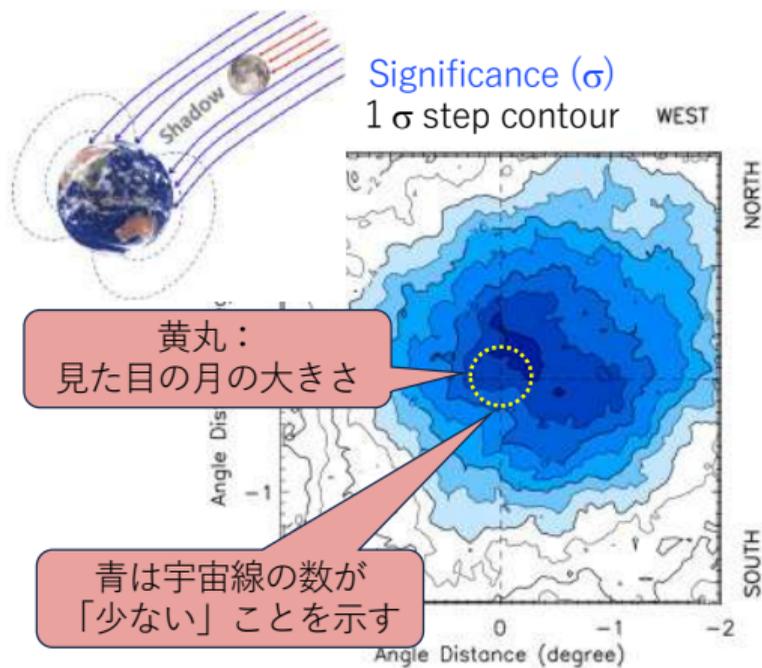
- 2022年6月から建設再開（コロナ中断）
- 97台の地上検出器設置完了
- 2022年9月にテスト運用開始
- 2023年4月からデータ収集継続

Big Events!



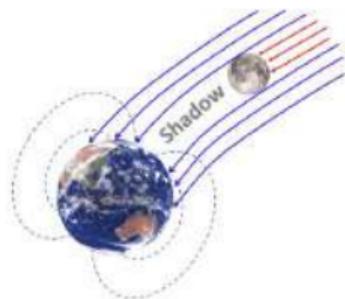
$E \sim 1$ PeV
(mostly hadronic CRs)

Moon Shadow



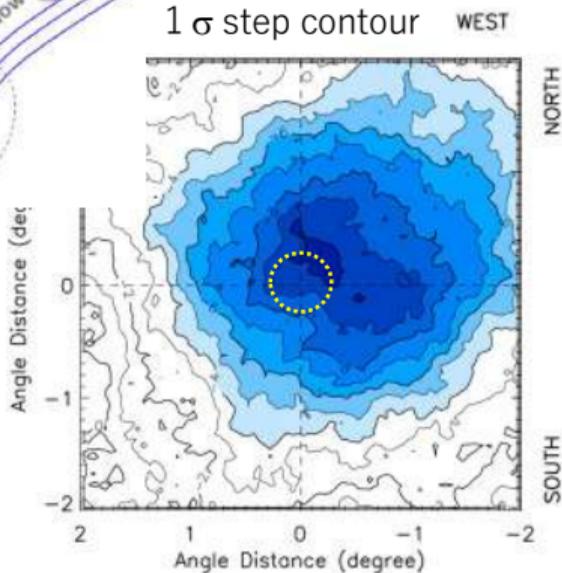
✓ Moon shadow with $\sim 10\sigma$ is consistent with the angular resolution

Moon Shadow and Sun Shadow



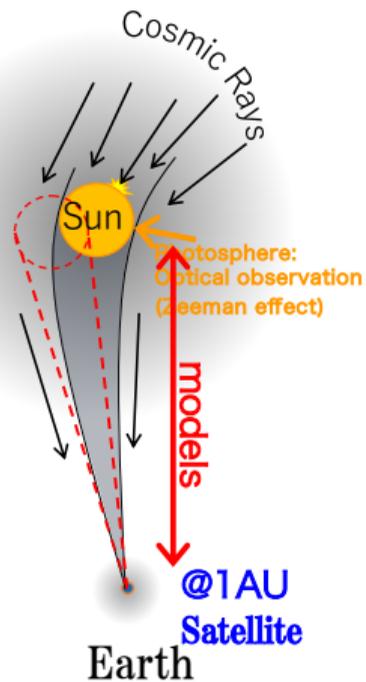
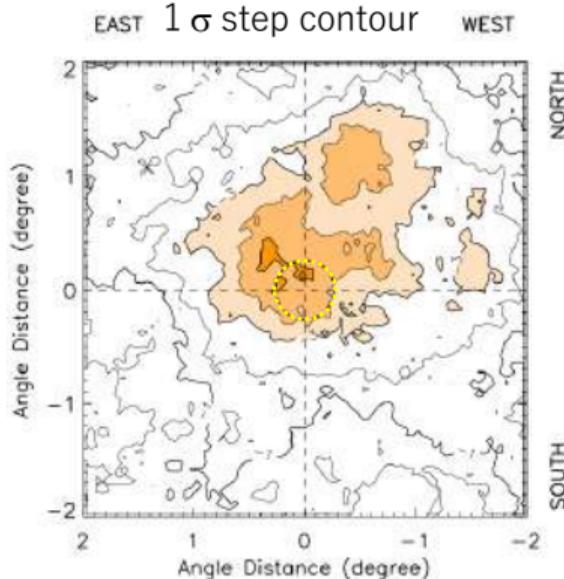
Significance (σ)

1 σ step contour



Significance (σ)

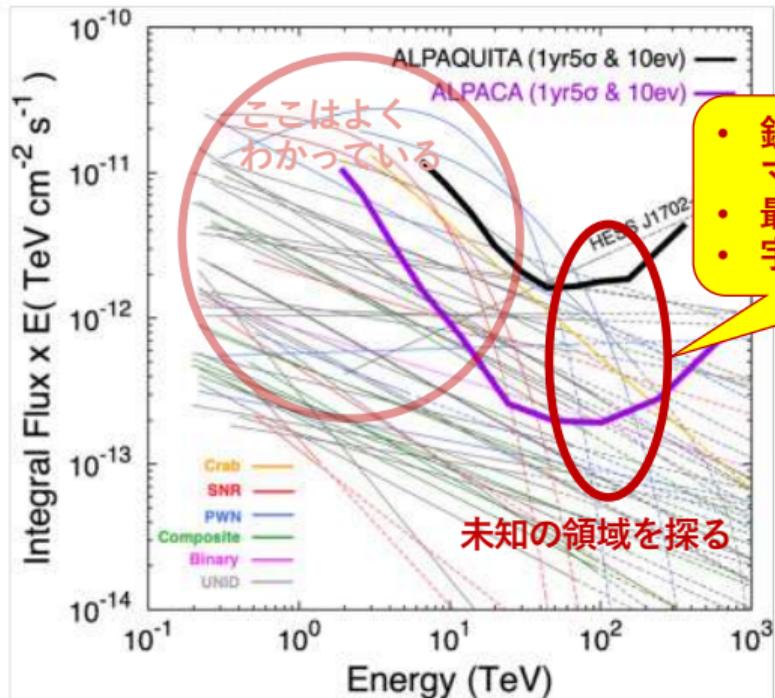
1 σ step contour



Temporal variation of Shadow's position, depth, and shape

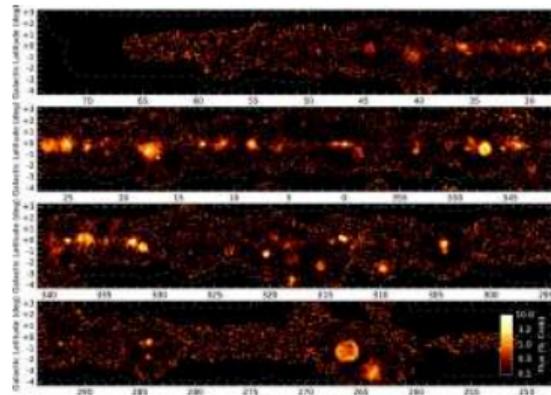
- ✓ Moon shadow with $\sim 10\sigma$ is consistent with the angular resolution
- ✓ Sun shadow with $\sim 5\sigma$ is a clear evidence of turbulent solar and interplanetary magnetic field during active solar period

ALPAQUITAのガンマ線天体発見感度



S.Kato et al., Experimental Astronomy (2021) 52:85-107

- 銀河系で一番強いガンマ線放射天体は？
- 最高エネルギーは？
- 宇宙線加速の起源は？

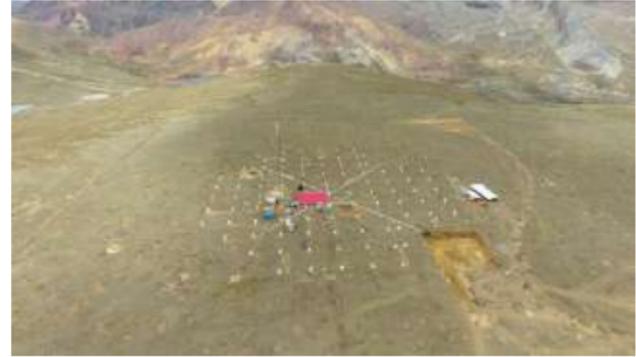


H.E.S.S.実験のTeV銀河面探索結果

- TeVでは南半球でたくさんの天体が知られている
- >10TeVのエネルギースペクトルはほとんど未知 (外挿)
- ALPAQUITA+ミュー粒子検出器で数個/年のガンマ線天体発見が可能
- ALPACA+ミュー粒子検出器で20-30天体/年のガンマ線天体発見が可能
- 銀河系で一番高エネルギーの天体は？に答える

これから数年が一番面白い「発見の時代」！！

Construction of MD started in November



- Excavation of the first MD started in November 2025
- Excavation of the other MDs continues in parallel to the first MD construction
- Deployment of the surface detectors around the 1st MD will start from June 2026
- Gamma-ray sensitive observations will start!!

まとめ

- 「**銀河宇宙線(The 宇宙線)の起源**」は古くて新しい重要なテーマ
- 宇宙線の精密測定 + LHCからの知見、によって**宇宙線の加速限界(原子核種別エネルギースペクトル)**の解析が進展
- **sub-PeVガンマ線**天文学が熱い！！
 - 北半球では複数の実験が多く、天体を発見
 - 拡散ガンマ線は、銀河系内の宇宙線の分布を測定
 - **南半球の新しい実験ALPACA**が最先端 => **銀河宇宙線の起源解明**
- 「**宇宙線の起源**」以外のテーマも
 - 太陽磁場の検証、宇宙天気予報
 - ダークマター等、新物理の探索
 - 空気シャワーによる高エネルギーハドロン反応の研究

話せなかったので興味があれば質問してください。

ALPAQUITAミュー粒子検出器が完成する2026年から、世界が注目する**南半球初**のsub-PeV天文学が始まる

宇宙線研究者の生活

オーストラリアでTeV
ガンマ線観測



ポリビアの世界最高標
高スキー場 (5200m)



メキシコ高山で太陽宇宙線観測



メキシコ高山で太陽宇宙線観測



乗鞍観測所冬季シフト (2700m)



マウナケアで太陽宇宙線観測



スーパーカミオカンデ
(広報担当として)



Fermi Labのニュートリノ
装置を宇宙線観測に



LHC加速器で空気シャワー反応の研究



ニュージーランドで天体観測



RHIC加速器で空気シャワー反応の研究

