

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



宇宙線ってなに？

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

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

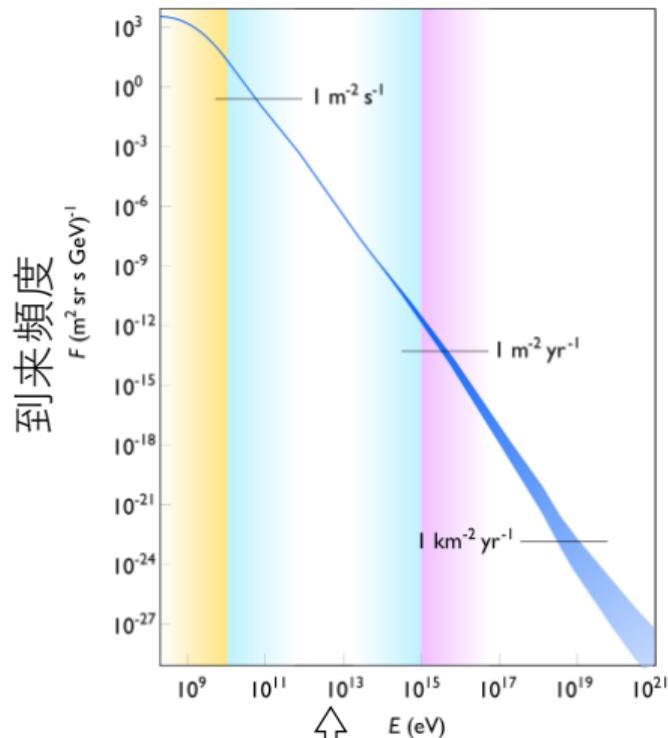
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 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)



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
- 電磁波以外 (ガンマ線を除く)

ANDじゃなくてOR

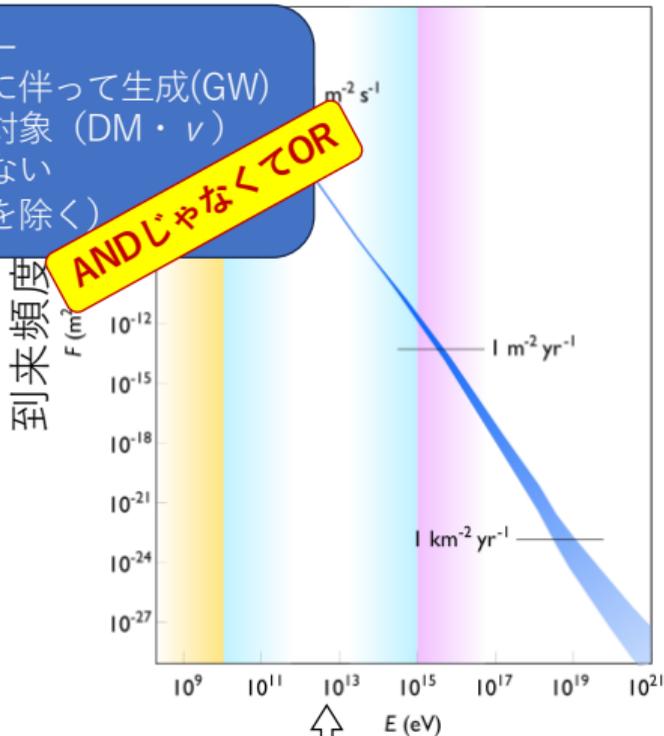
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 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)

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”

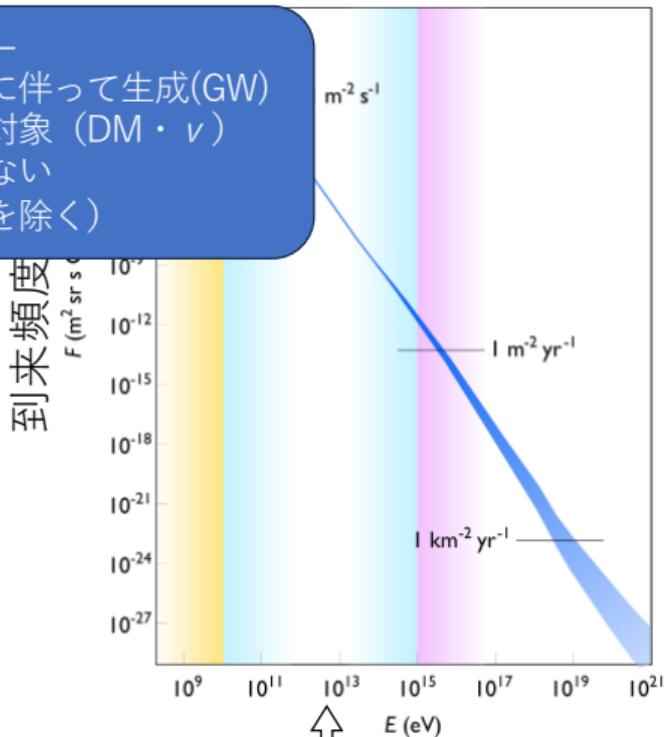
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 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



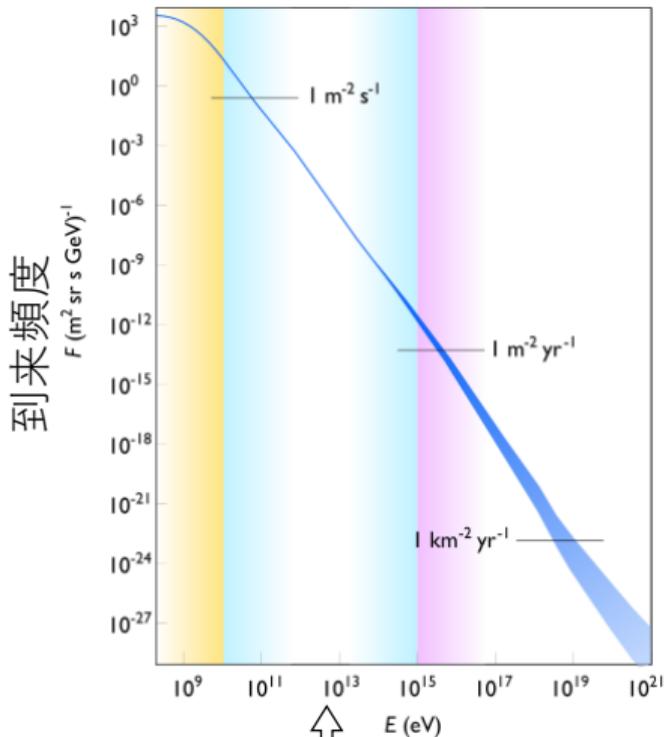
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 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

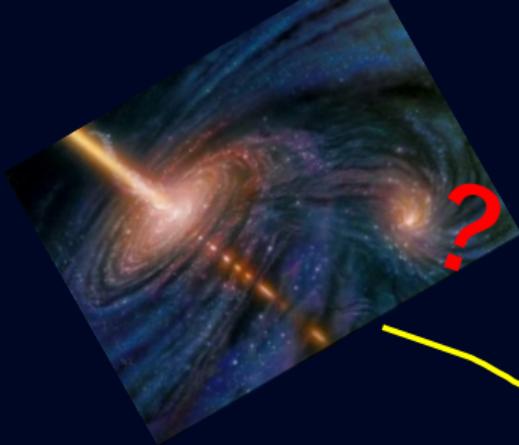
宇宙加速器はどこにある？

- 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)

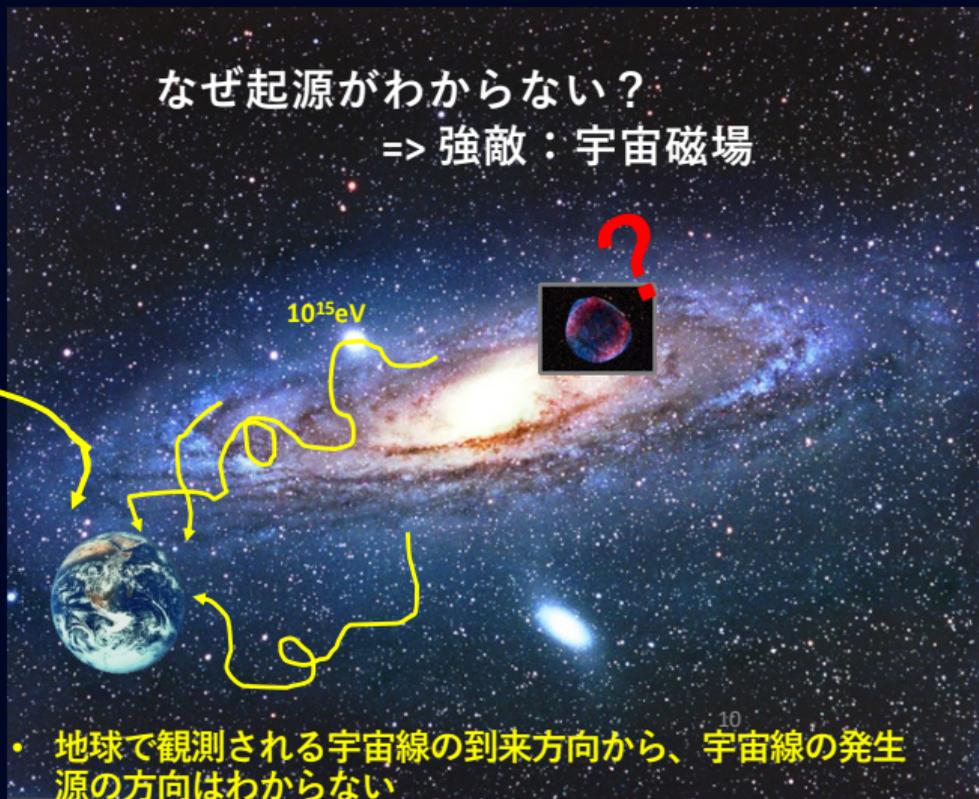


なぜ起源がわからない？

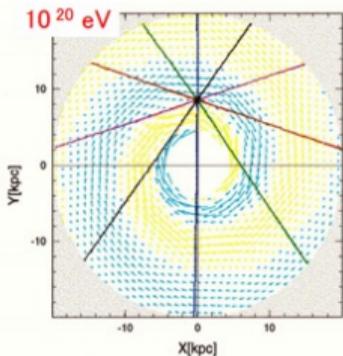
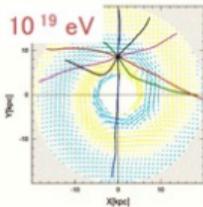
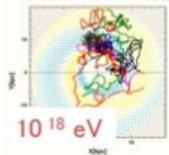
=> 強敵：宇宙磁場

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？

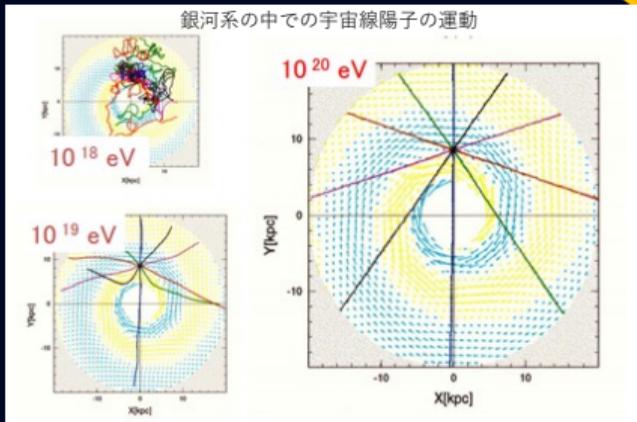
=> 強敵：宇宙磁場

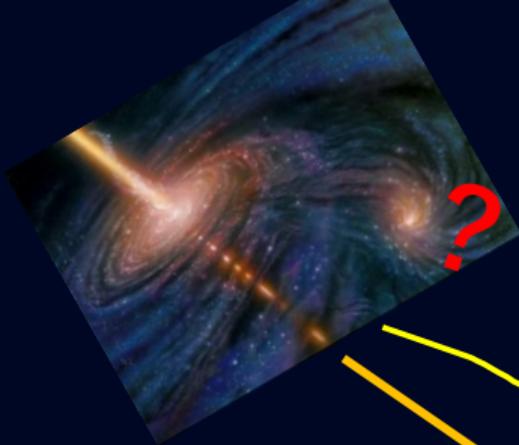
戦略1：最高エネルギーを狙う！

10^{19}eV

10^{20}eV

10^{15}eV





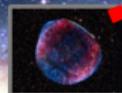
10^{20}eV

10^{19}eV

なぜ起源がわからない？

=> 強敵：宇宙磁場

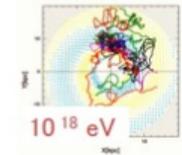
10^{15}eV



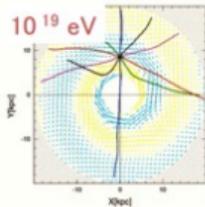
戦略2：銀河宇宙線の精密測定

「高エネルギー宇宙線」
銀河系内宇宙線の加速限界

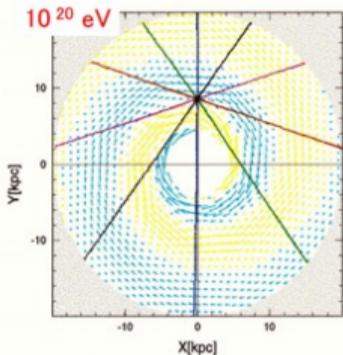
銀河系の中での宇宙線陽子の運動



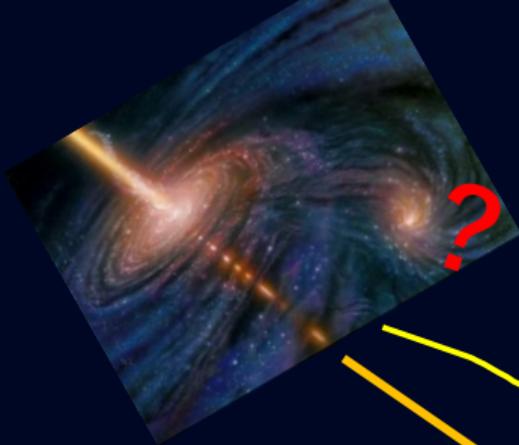
10^{18}eV



10^{19}eV



10^{20}eV



なぜ起源がわからない？

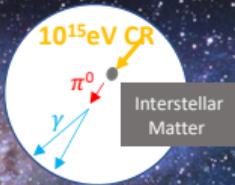
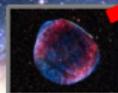
=> 強敵：宇宙磁場

10^{20}eV

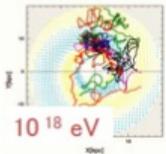
10^{19}eV

10^{15}eV

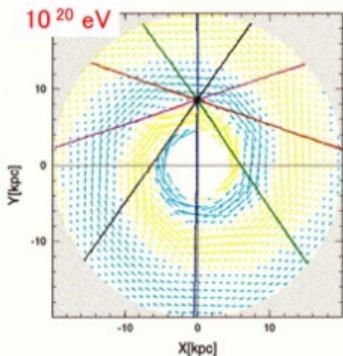
10^{15}eV CR



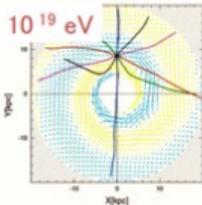
銀河系の中での宇宙線陽子の運動



10^{18}eV



10^{20}eV



10^{19}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

戦略3：ガンマ線を狙う！

「高エネルギーガンマ線天文学」

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)

戦略2

戦略1

- ・ 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

戦略3

戦略3

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

高エネルギーガンマ線観測
(MAGIC, CTA)

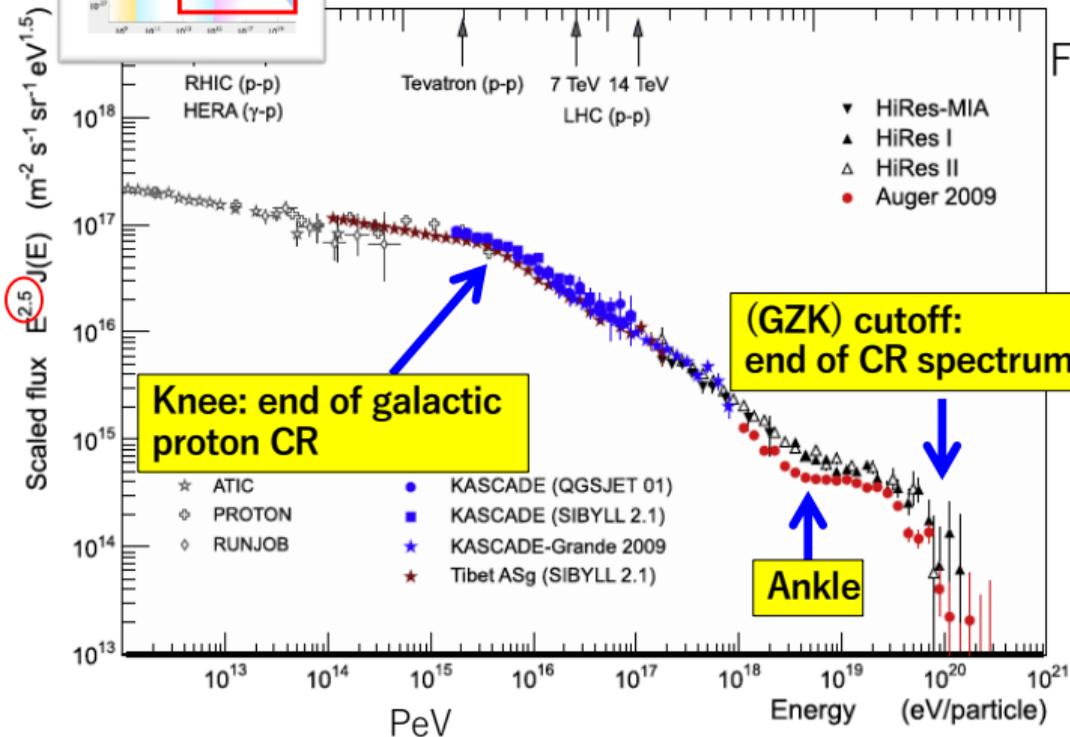
ガンマ線観測

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

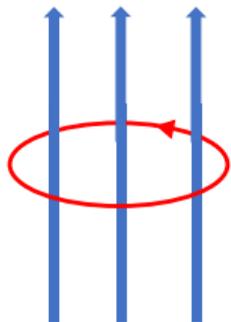
- $J \propto E^{-2.7}$ (below knee)
- $J \propto E^{-3.1}$ (above knee)
- $J \propto E^{-2.7}$ (above ankle)
- $J \propto E^{-5}$ (above cutoff)

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

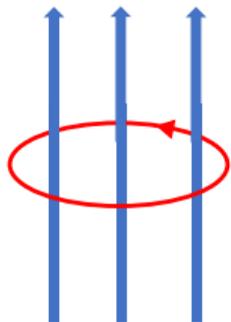
=> 粒子加速天体を探せ!

宇宙線加速と磁場と原子核

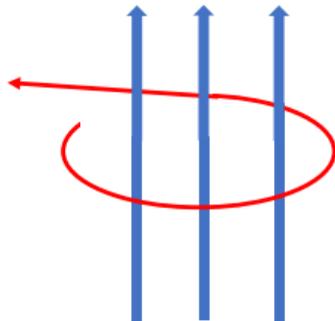


宇宙線陽子は天体の磁場に捉えられながら少しずつエネルギーを獲得

宇宙線加速と磁場と原子核



宇宙線陽子は天体の磁場に捉えられながら少しずつエネルギーを獲得



エネルギーが増える=ラーモア半径が大きくなると、天体から脱出する

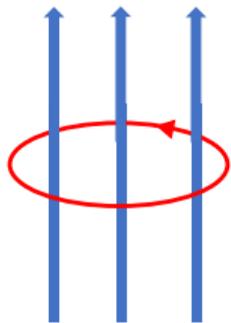
$$E_{max}^p = CBL$$

B: 天体の磁場の強さ

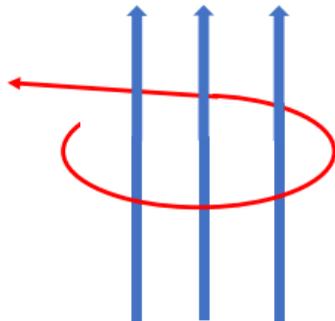
L: 天体のサイズ

C: 比例係数

宇宙線加速と磁場と原子核



宇宙線陽子は天体の磁場に捉えられながら少しずつエネルギーを獲得



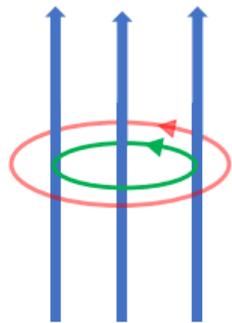
エネルギーが増える=ラーモア半径が大きくなると、天体から脱出する

$$E_{max}^p = CBL$$

B: 天体の磁場の強さ

L: 天体のサイズ

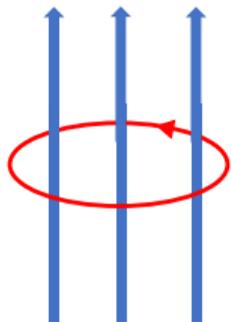
C: 比例係数



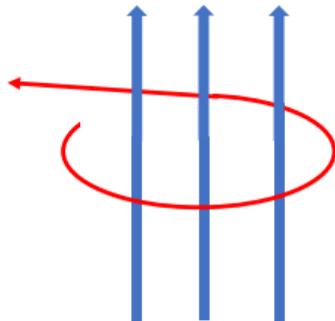
宇宙線原子核（電荷Z）は陽子よりもZ倍強いLorentz力で閉じ込められる
ラーモア半径rは

$$r \propto pc / Ze \sim E / Ze$$

宇宙線加速と磁場と原子核



宇宙線陽子は天体の磁場に捉えられながら少しずつエネルギーを獲得



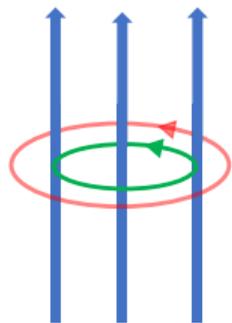
エネルギーが増える=ラーモア半径が大きくなると、天体から脱出する

$$E_{max}^p = CBL$$

B: 天体の磁場の強さ

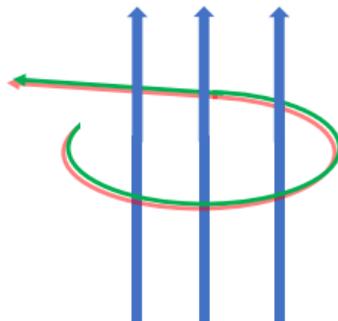
L: 天体のサイズ

C: 比例係数



宇宙線原子核 (電荷Z) は陽子よりもZ倍強いLorentz力で閉じ込められる
ラーモア半径rは

$$r \propto pc / Ze \sim E / Ze$$

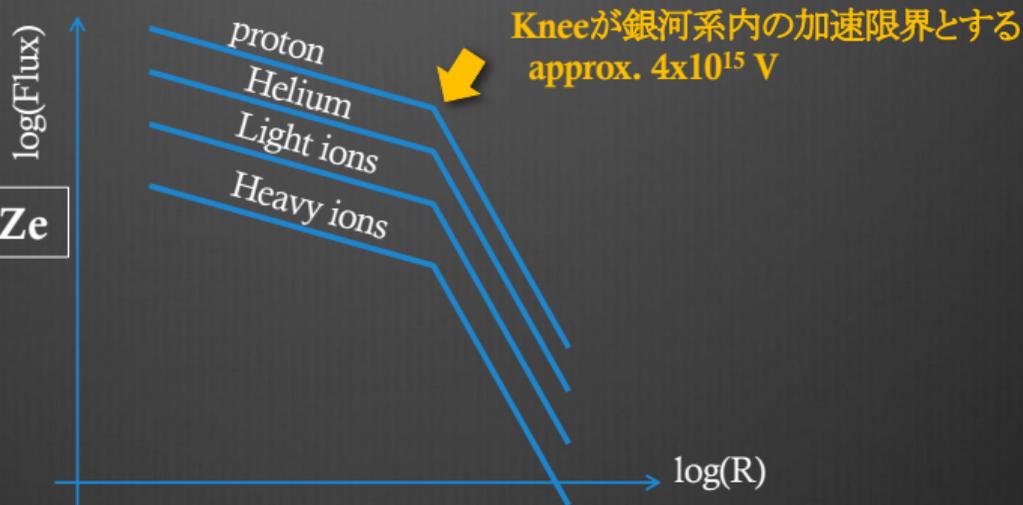


天体から脱出するエネルギー
= 最大加速エネルギー

$$E_{max}^Z = ZE_{max}^p$$

原子核の方が陽子よりもZ倍高エネルギーになるはず！！

Standard Scenario of Cosmic-Ray Spectrum

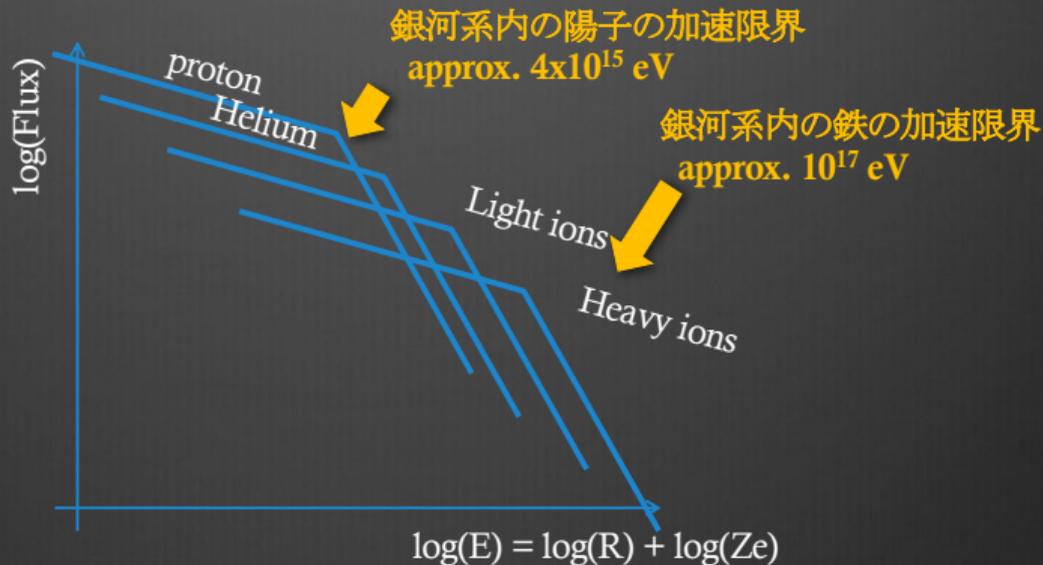


Rigidity : $R = pc/Ze \sim E/Ze$

- ✓ 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

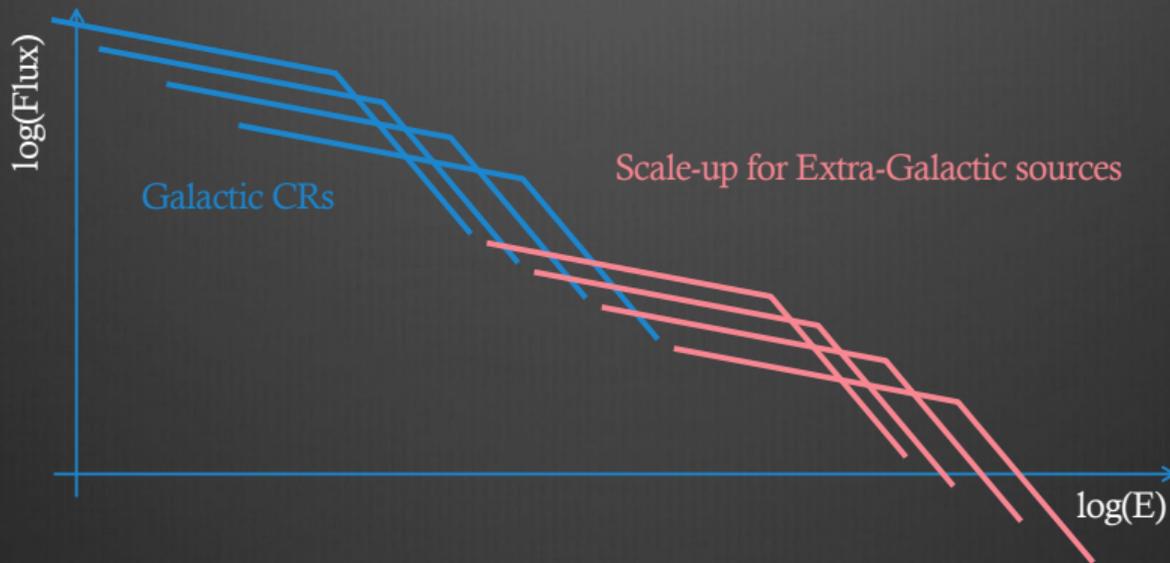
Standard Scenario of Cosmic-Ray Spectrum

$$\text{Energy : } E = R \times Ze$$



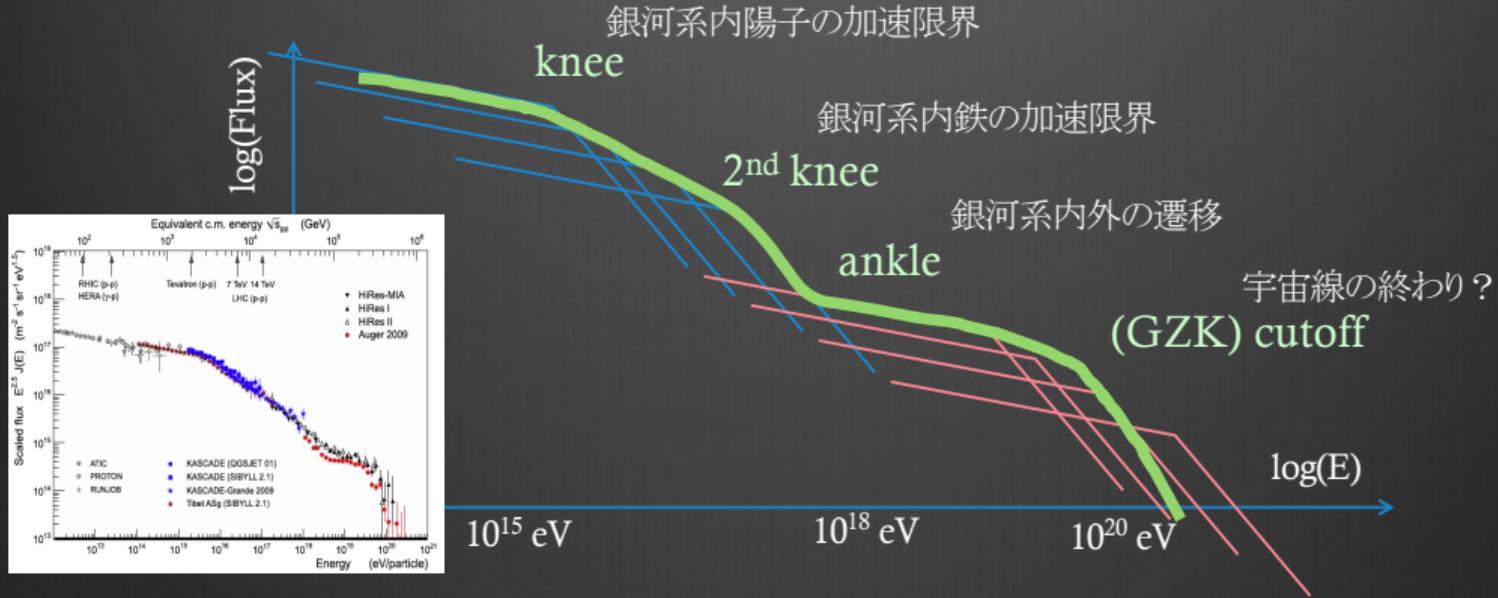
- ✓ 「エネルギー」スペクトルにすると、原子番号Z倍だけ右にシフト
- ✓ 鉄 ($Z=26$) の加速限界エネルギーは $26 \times 4 \times 10^{15} \sim 10^{17}$ eV

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

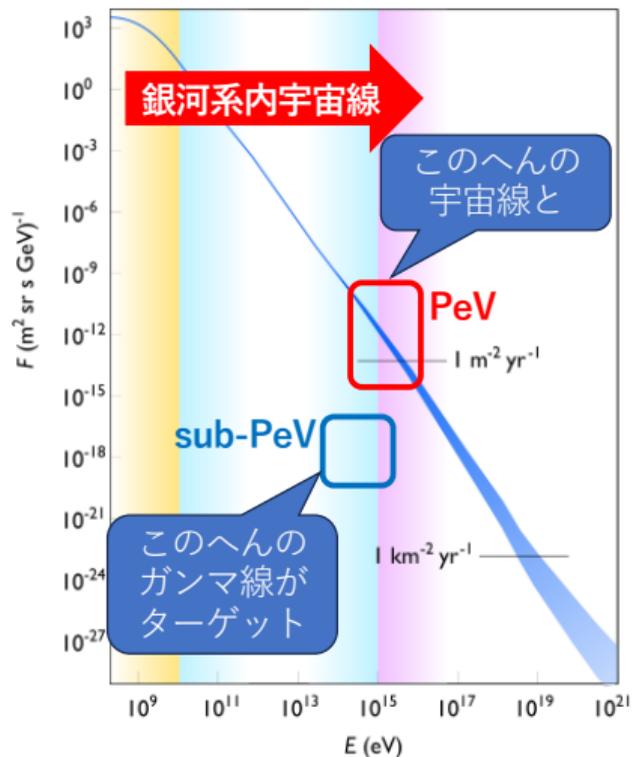
- 宇宙線標準モデルの実証
- 「どこで」「どのように」発生？
- 加速限界はrigidityは？ Knee ($4 \times 10^{15} \text{eV} = 4 \text{PeV}$)は陽子の加速限界？
 - ✓宇宙線原子核種別エネルギースペクトル測定
- sub-PeVガンマ線観測で数PeV陽子の存在を証明
 - ✓加速天体周辺でのガンマ線生成
 - ✓銀河系空間でのガンマ線生成
 - ✓南半球での観測

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/ 1m^2 /年”
- >100TeVのガンマ線は明るい天体で”~1個/ 1m^2 /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、
空気の分子と衝突して
大量の粒子を生成

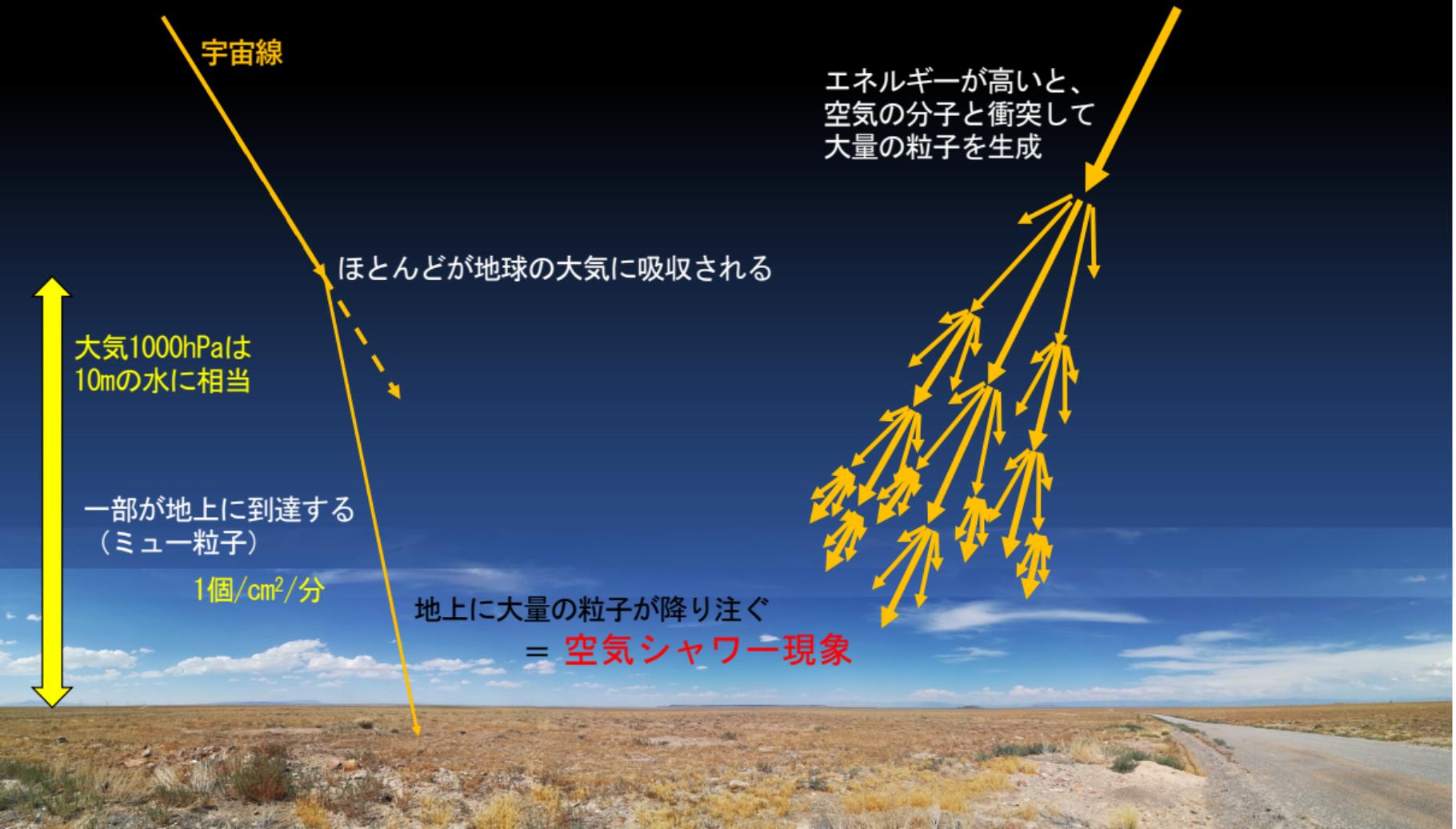
ほとんどが地球の大気に吸収される

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

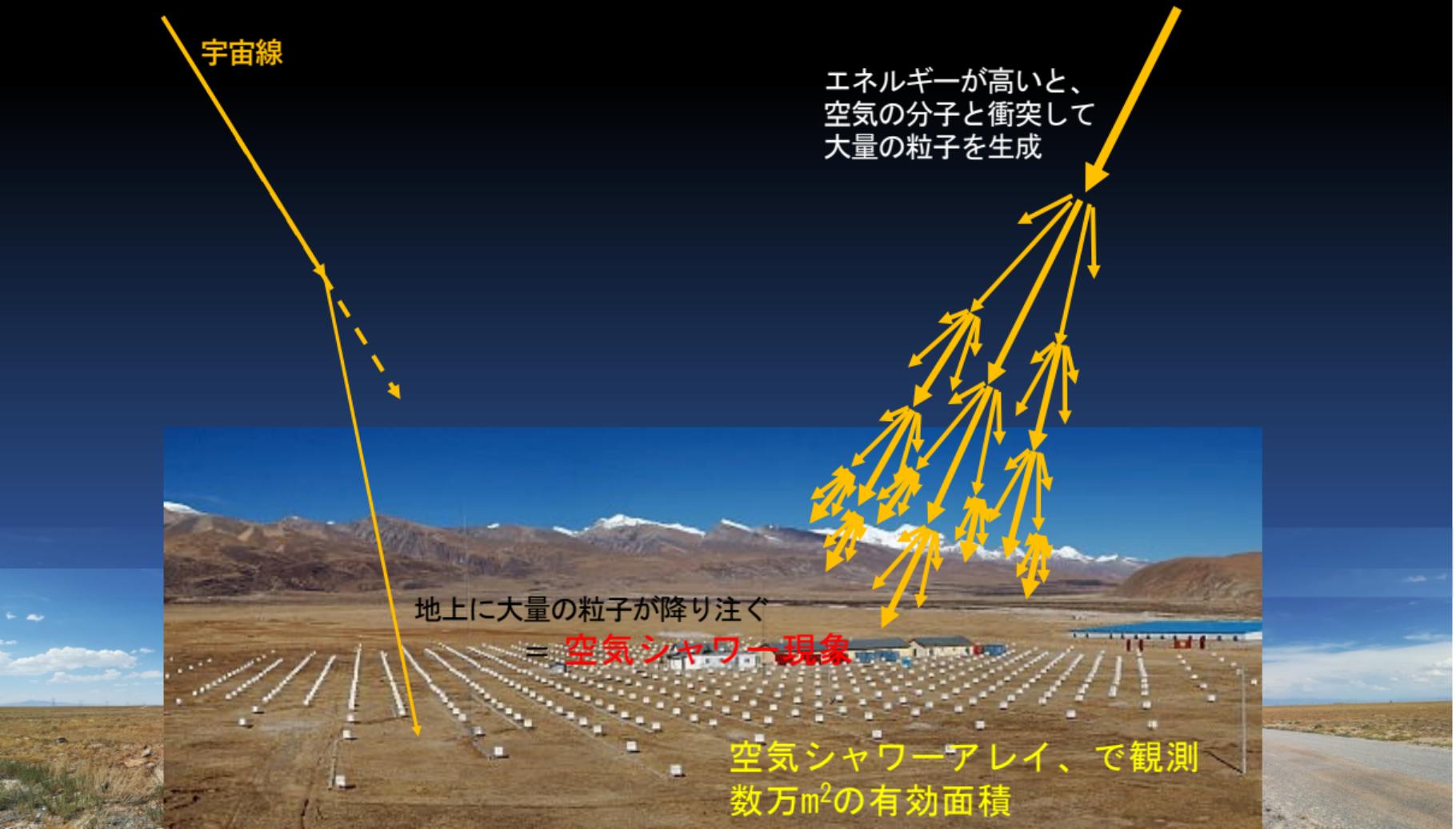


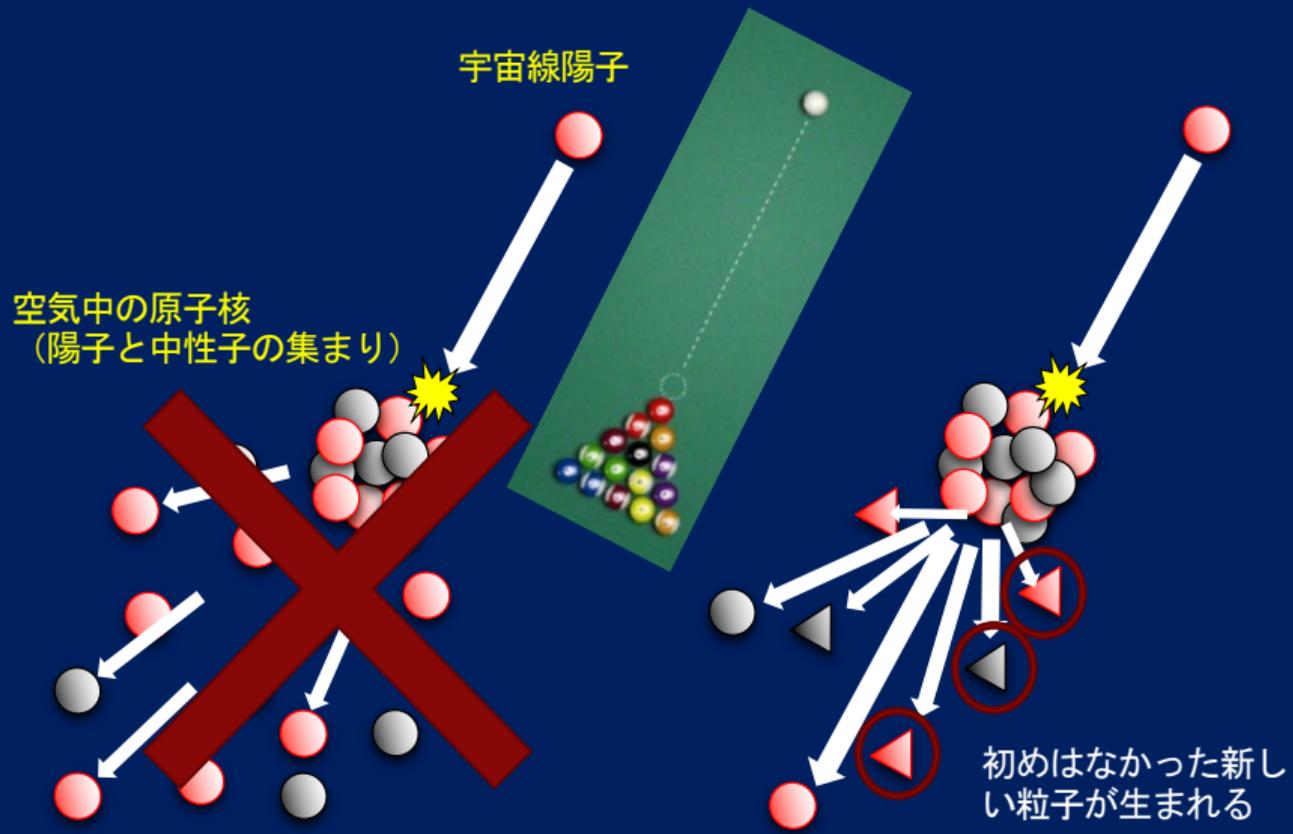
宇宙線

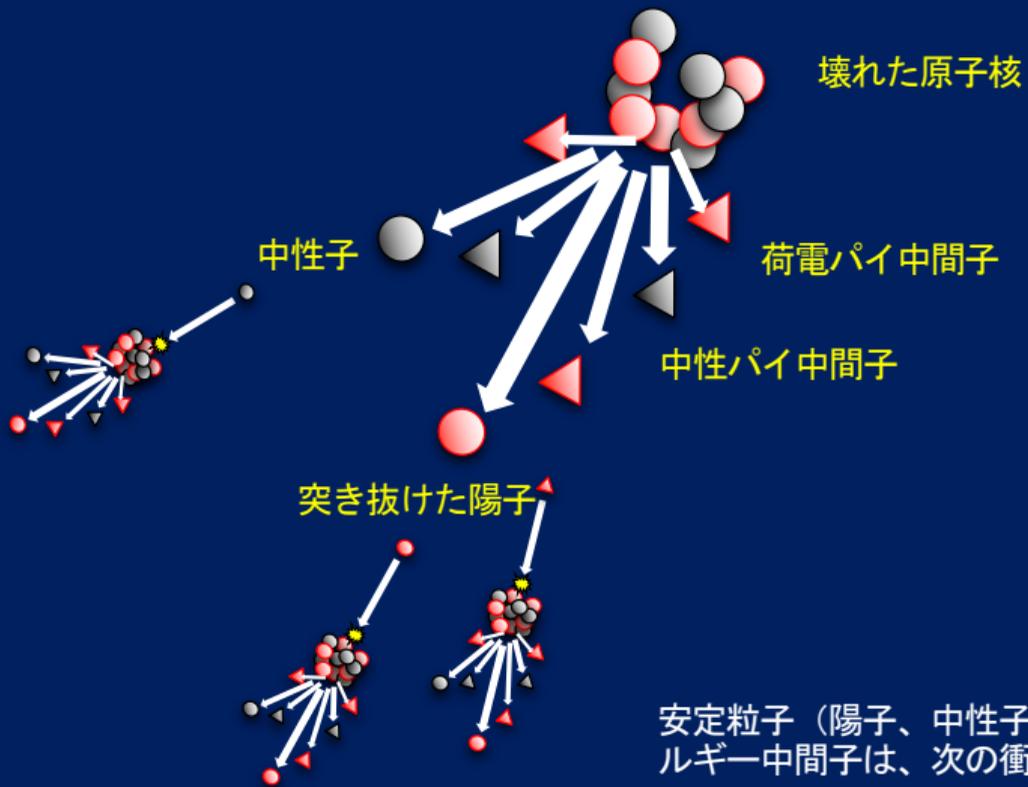
エネルギーが高いと、
空気分子と衝突して
大量の粒子を生成

地上に大量の粒子が降り注ぐ
= 空気シャワー現象

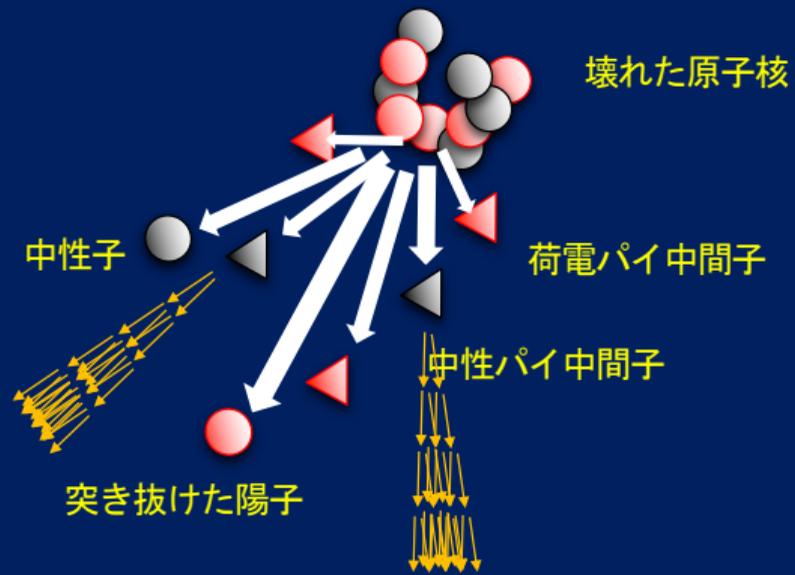
空気シャワーアレイ、で観測
数万 m^2 の有効面積



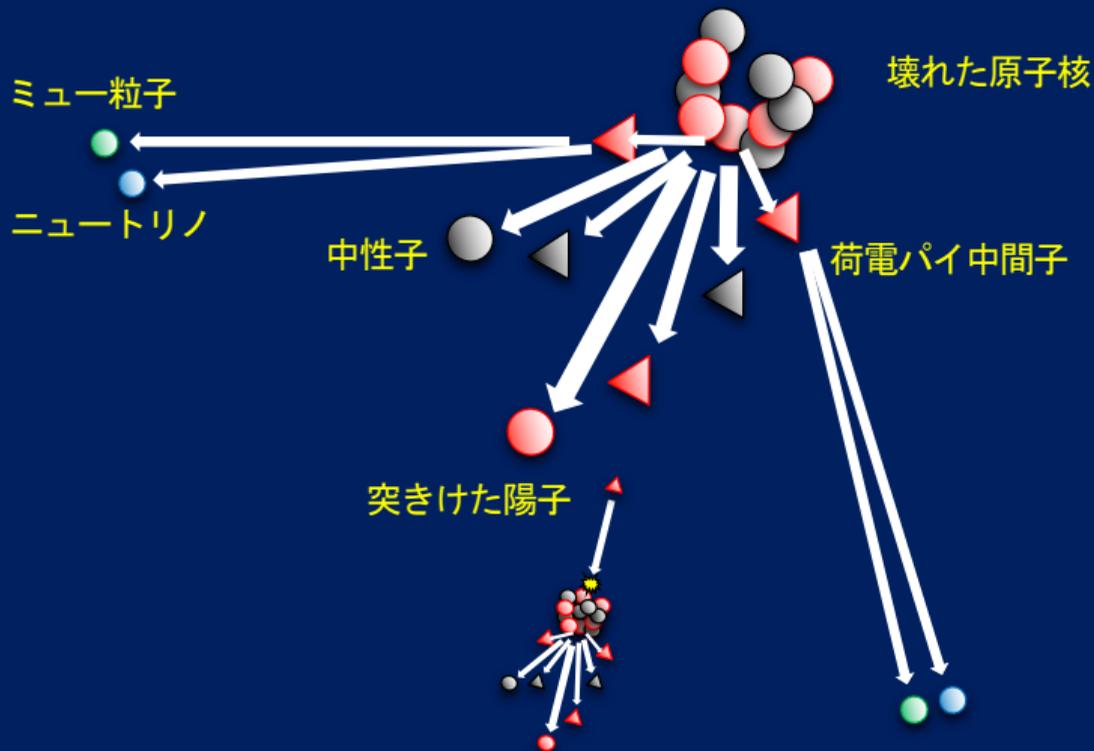




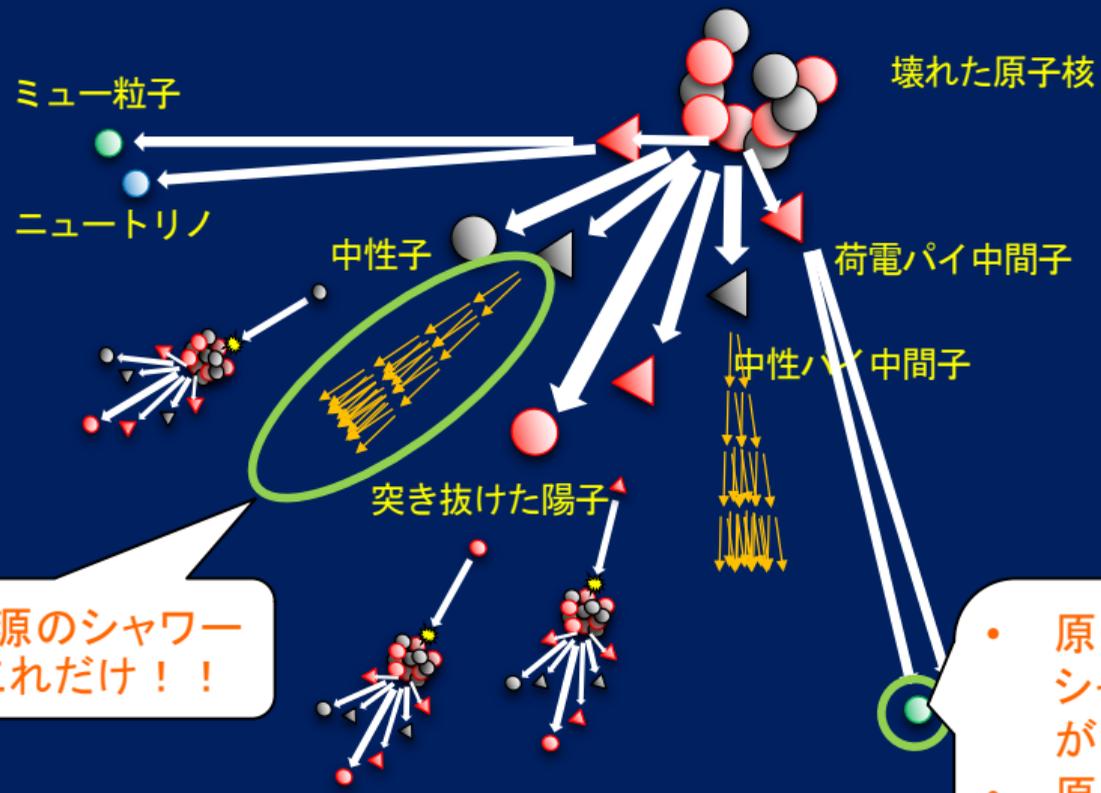
安定粒子（陽子、中性子）と高エネルギー中間子は、次の衝突をする



中性パイ中間子は、ガンマ線に崩壊。
 ガンマ線 \Rightarrow 電子・陽電子（電子対生成）
 電子・陽電子 \Rightarrow 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。



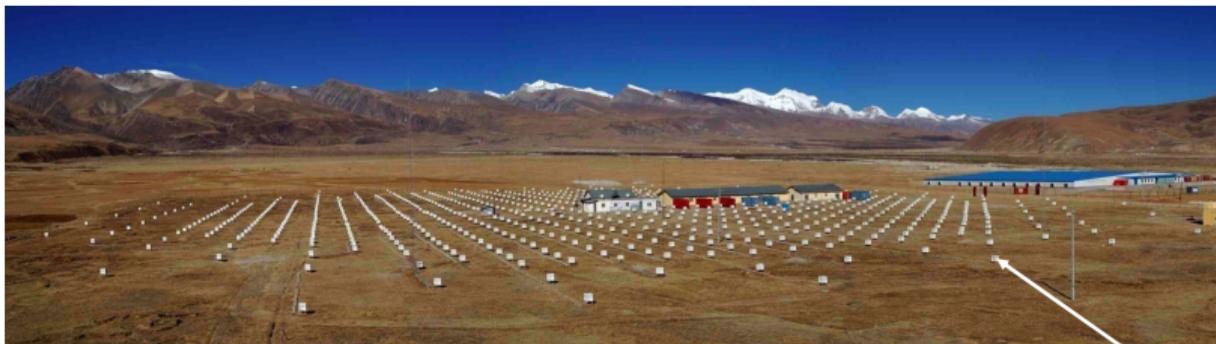
荷電パイ中間子は、
 エネルギーが高いと、次の衝突を起こす（相対論的寿命の伸び）
 エネルギーが低いと、ミュー粒子とニュートリノに崩壊
 ミュー粒子とニュートリノはほとんど反応しないで地上（地中）に到達



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

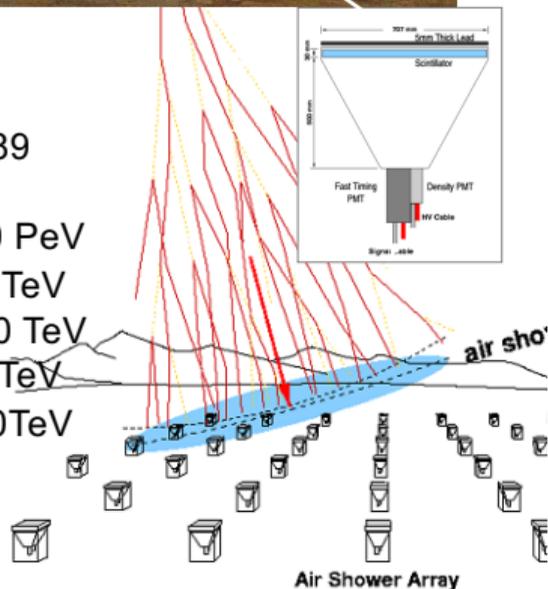
Tibet-III Air Shower (AS) Array



4,300 m a.s.l. (606 g/cm²)

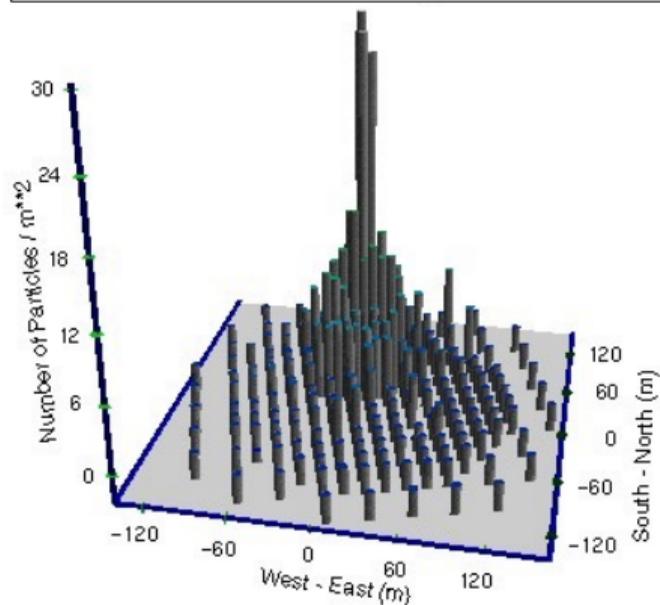
- ❑ Number of Scinti. Det.
- ❑ Effective Area for AS
- ❑ Energy region
- ❑ Angular Resolution
(Gamma rays)
- ❑ Energy Resolution
(Gamma rays)
- ❑ F.O.V.
- ❑ Trigger Rate

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

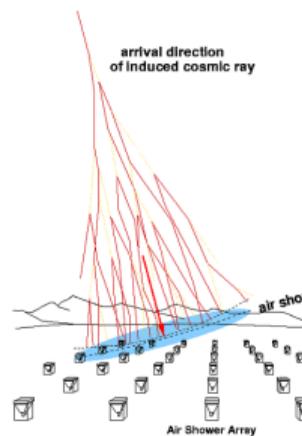
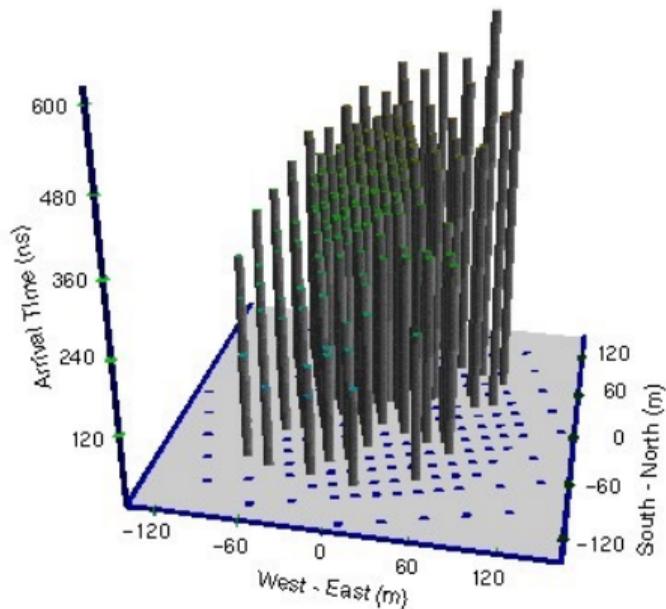


空気シャワーの観測例

粒子数密度分布
=> 入射粒子のエネルギー

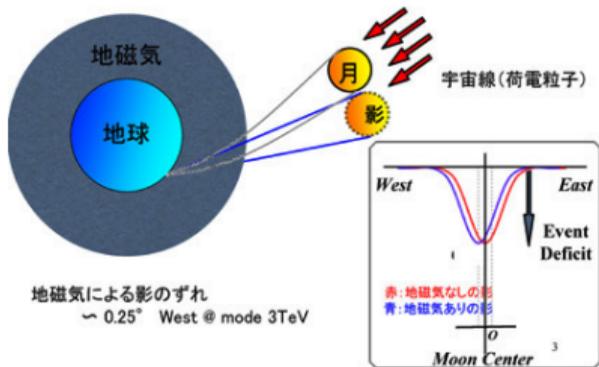


粒子到来タイミング分布
=> 入射粒子の到来方向

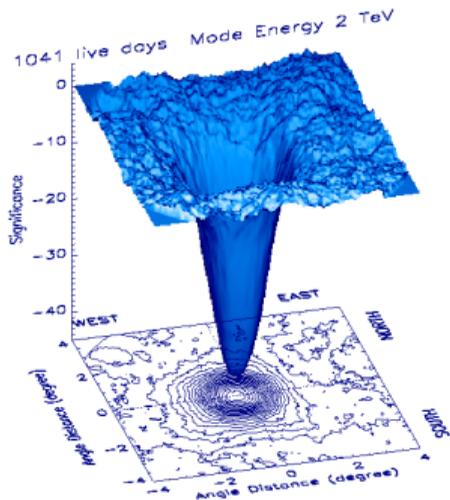


「シャワー面」は
光速で到来

「月の影」による装置性能の実証

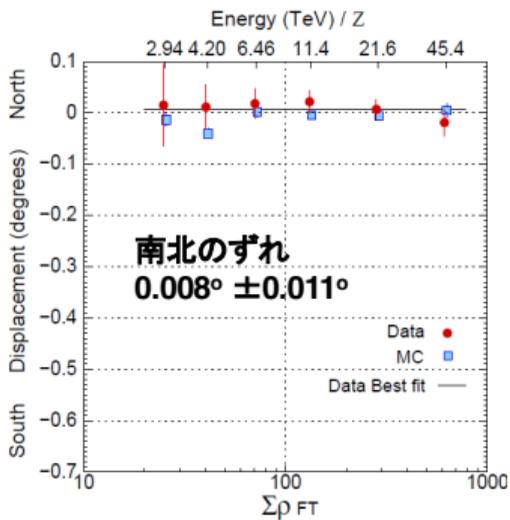


地磁気による影のずれ
~ 0.25° West @ mode 3TeV

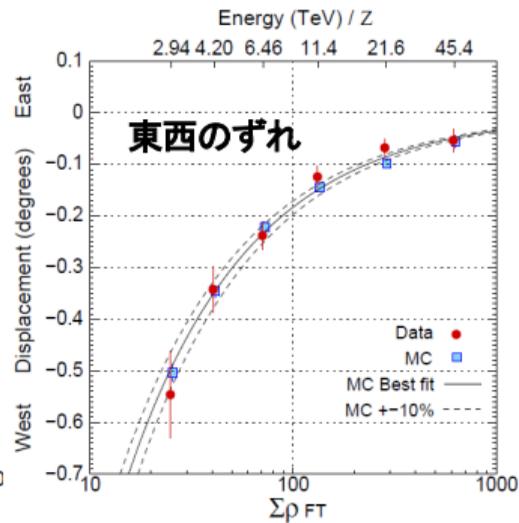


- エネルギーの絶対値
- 角度・方向分解能

The Astrophysical Journal, 692, 61-72(2009)

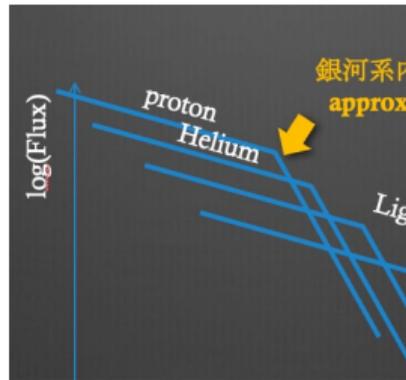


Pointing Error
< 0.011°

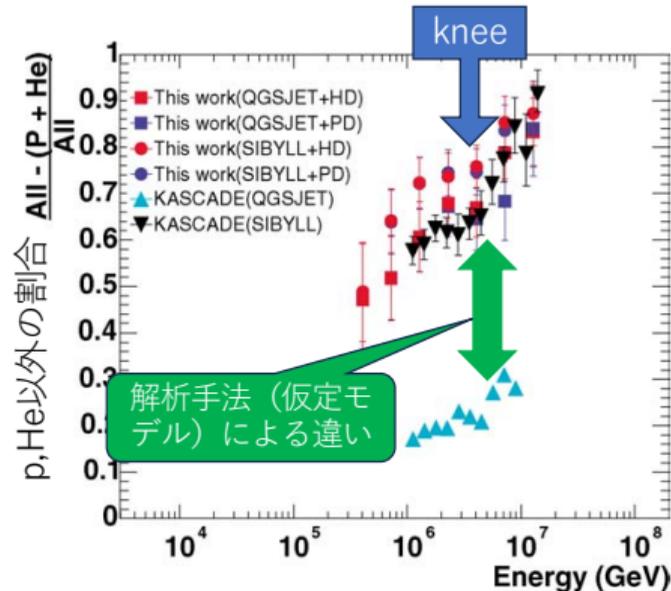
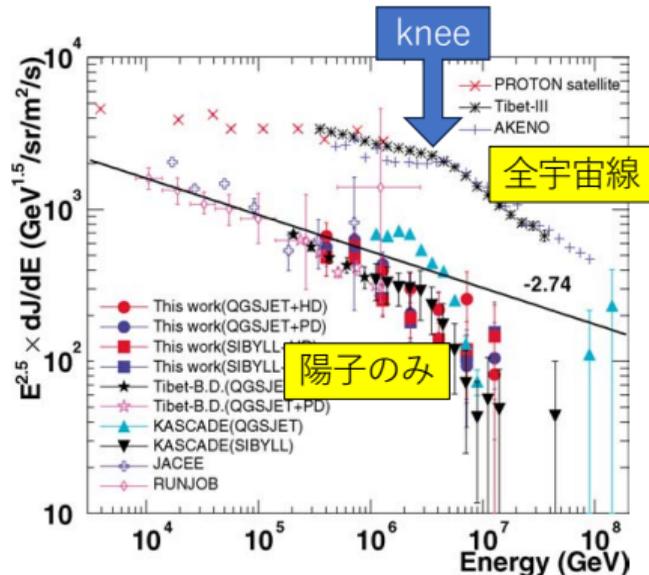


Absolute Energy Scale Error < 12%
+4.5%(±8.6stat.±6.7syst.)%

チベット実験による陽子のスペクトル

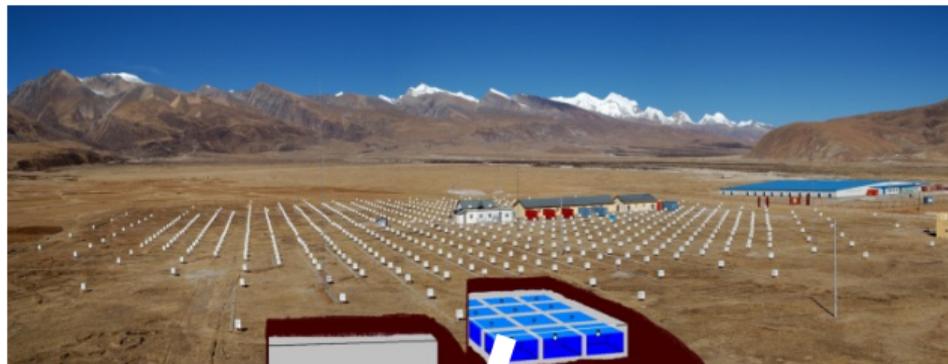


標準モデル予想
kneeでは軽い原子核



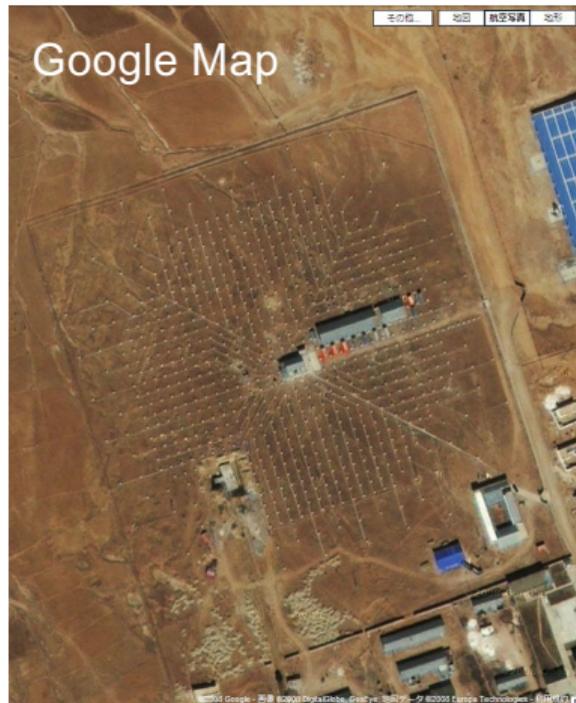
- kneeで陽子はすでに主成分ではない
- 陽子の加速限界はkneeのあたり？
- knee前後で宇宙線の平均質量が次第に重くなっていく
- 他実験と一致・不一致あり（絶対値、カットオフ）
- 他実験は解析に使う相互作用モデル依存が強い
- 標準モデルほど単純ではない？
=> LHCによる相互作用モデルの改良・ミュー粒子を使った高精度測定

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

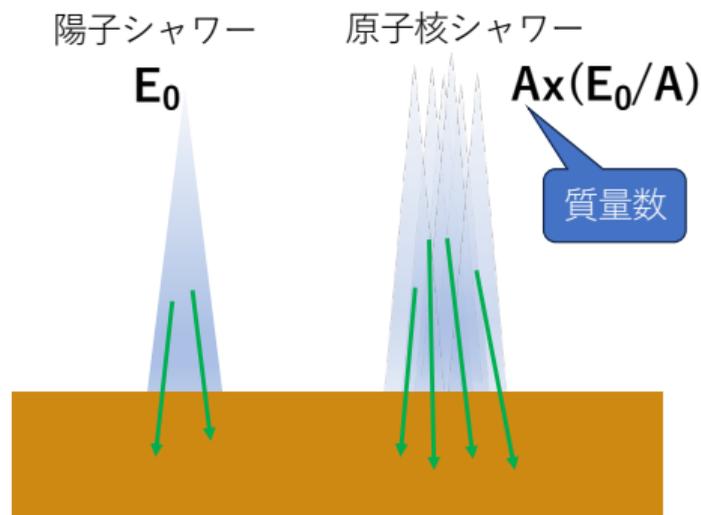
海拔4300 m . = 606 g/cm²





MD construction scene

原子核種の決定（ミュー粒子数の測定）



- 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

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

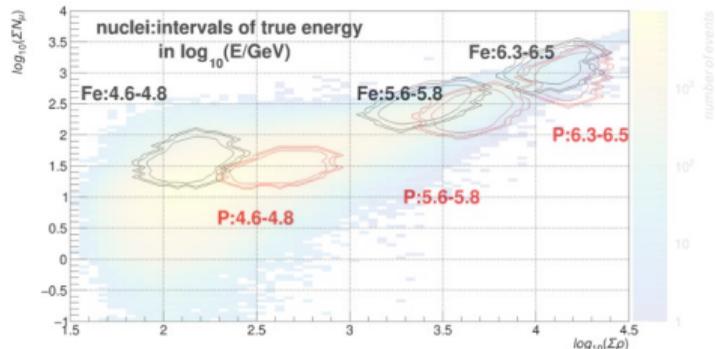
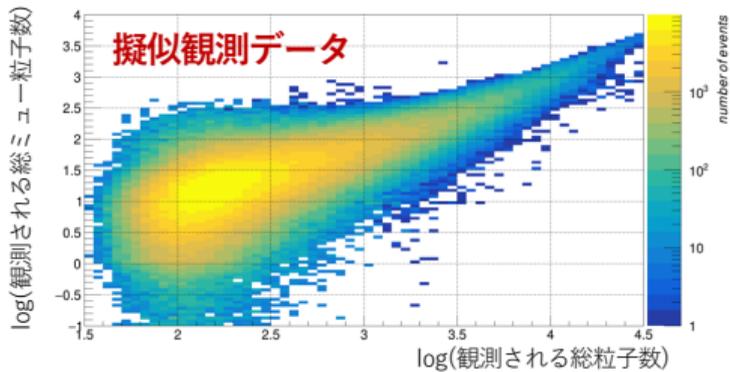
$\alpha = 0.8 \sim 0.9$ なので、ちょっとだけエネルギーに比例しない。

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

ミュー粒子数とベイズ推定を使った 原子核種測定方法開発



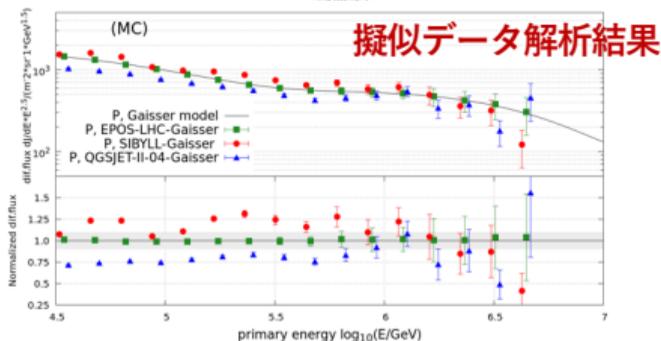
核種k・エネルギーjの宇宙線が
どう観測されるかの応答関数
右上の等高線

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

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



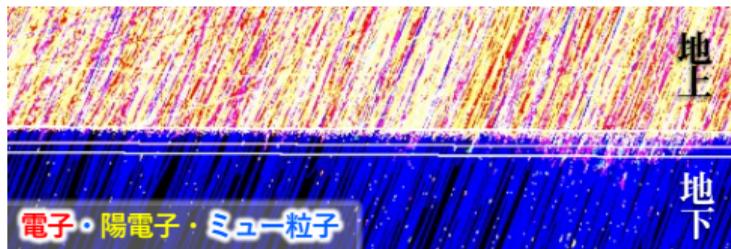
解析手法完成 => 実際のデータに適用する

ガンマ線シャワーの選別

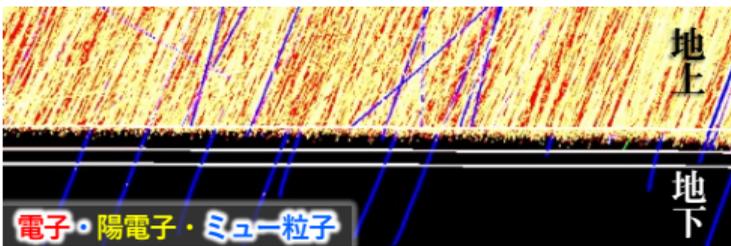
ガンマ線 → 少ない **ミュー粒子**

高い透過力 → 地下に侵入

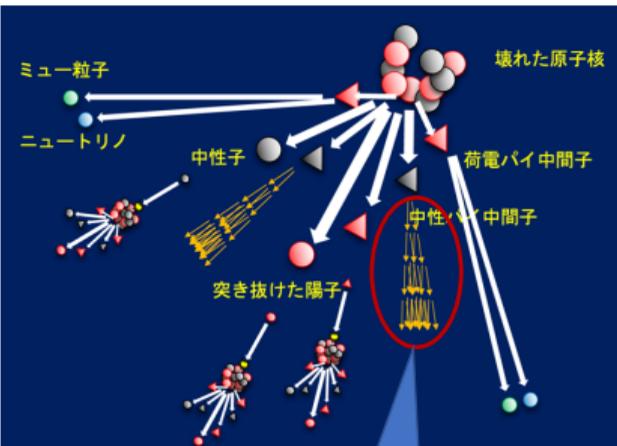
200TeV宇宙線(雑音)起源の場合



200TeVガンマ線起源の場合



地面付近を拡大



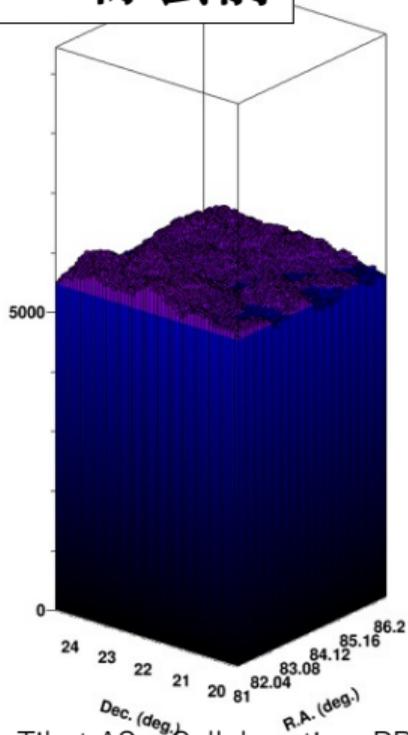
ガンマ線シャワーはこれだけ

地下ミュー粒子の有無で選別可能！！

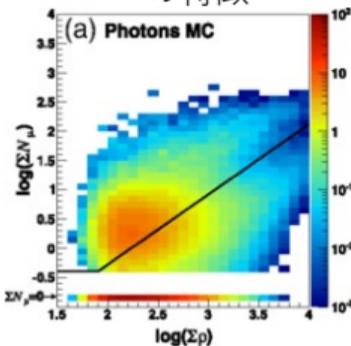


チベットAS γ 実験による 最高エネルギーガンマ線の発見

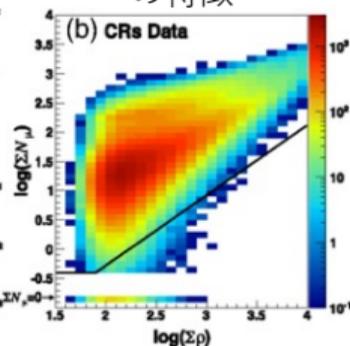
BG除去前



ガンマ線シャワー
の特徴



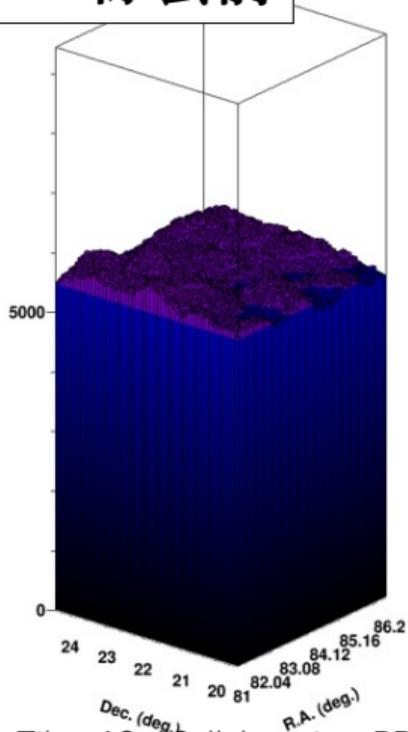
荷電宇宙線シャワー
の特徴



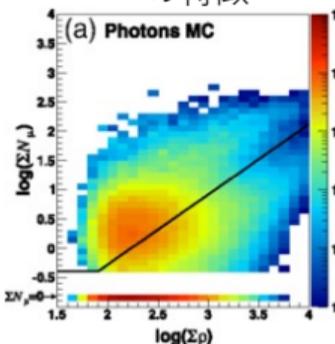


チベットAS γ 実験による 最高エネルギーガンマ線の発見

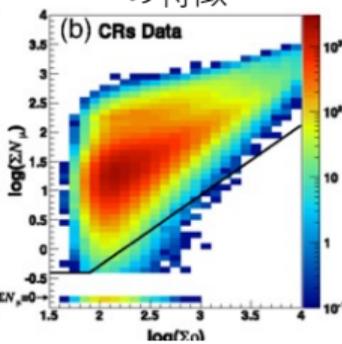
BG除去前



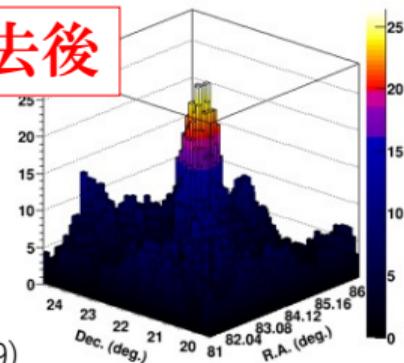
ガンマ線シャワー
の特徴



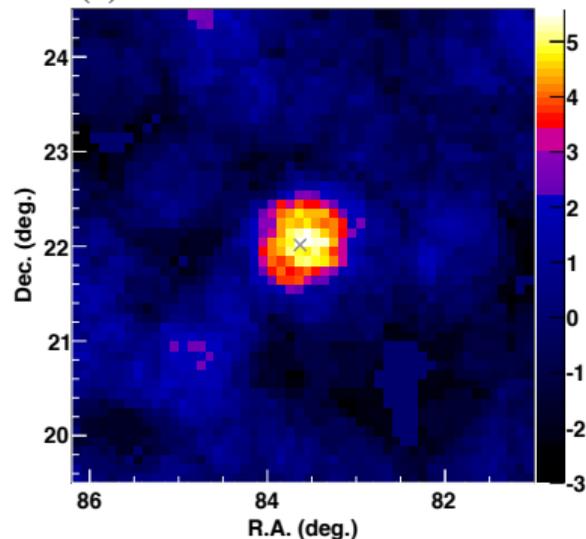
荷電宇宙線シャワー
の特徴



BG除去後



(b) $E > 100$ TeV



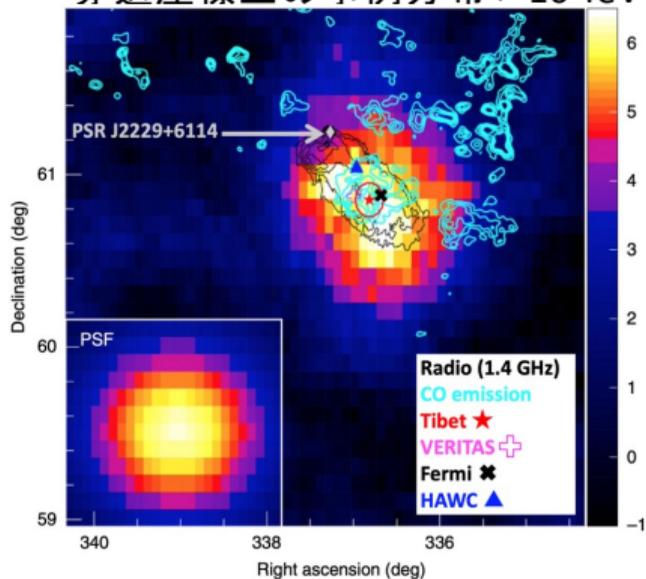
かに星雲からの100TeV
超ガンマ線の検出に成功



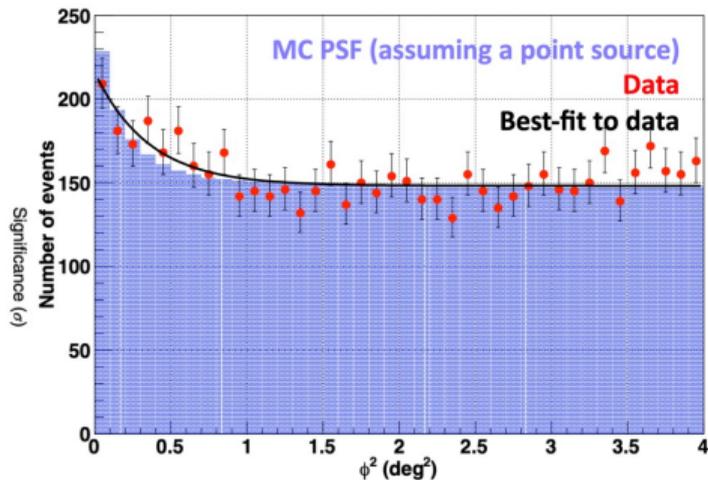
SNR G106.3+2.7 (Tibet ASy実験による観測)

M. Amenomori et al., Nature Astronomy Letters (2021) <https://doi.org/10.1038/s41550-020-01294-9>

赤道座標上の事例分布 > 10 TeV



源からの角度分布 > 10 TeV



➤ Fit given assuming Gaussian

$$A \exp\left(-\frac{\phi^2}{2(\sigma_{\text{PSF}}^2 + \sigma_{\text{EXT}}^2)}\right)$$

$\sigma_{\text{PSF}} = 0.35^\circ$ from MC simulation

➔ $\sigma_{\text{EXT}} = 0.24^\circ \pm 0.10^\circ$

※ 過去の他の実験結果と無矛盾

VERITAS: $\sigma_1 = 0.27^\circ \pm 0.05^\circ$, $\sigma_2 = 0.18^\circ \pm 0.03^\circ$

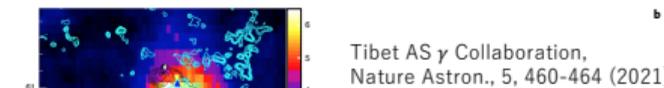
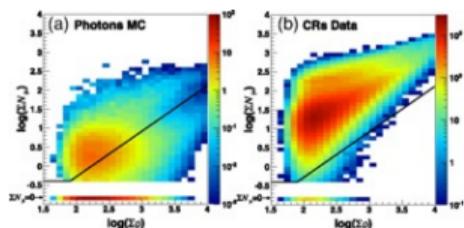
Fermi: 0.25°-radius disk

HAWC: $< 0.23^\circ$ (90% C.L.)⁴

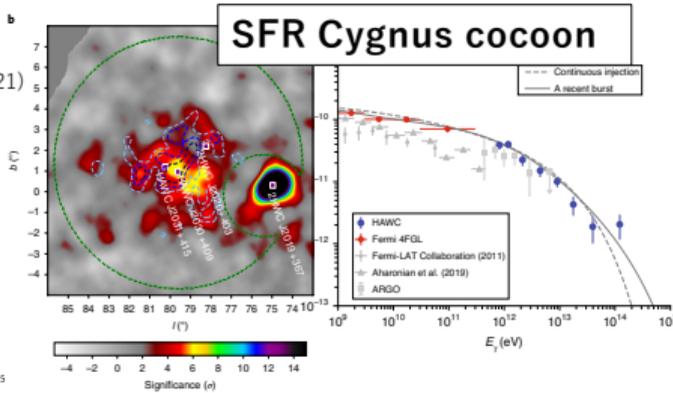
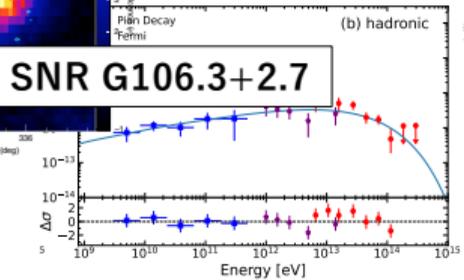
➤ Tibet source position: R.A. = $336.82^\circ \pm 0.16^\circ$
Dec = $60.85^\circ \pm 0.10^\circ$

- 分子雲と超新星残骸の重なる領域からのガンマ線
- パルサーの位置から来ていない → **ハドロン起源を示唆!**

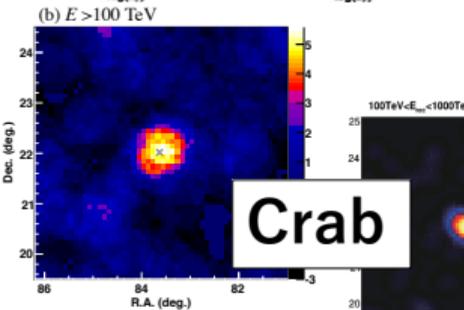
sub-PeVガンマ線天文学の夜明け



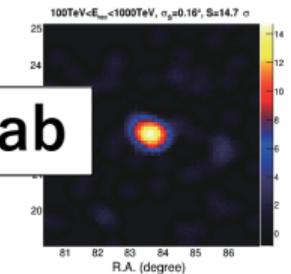
SNR G106.3+2.7



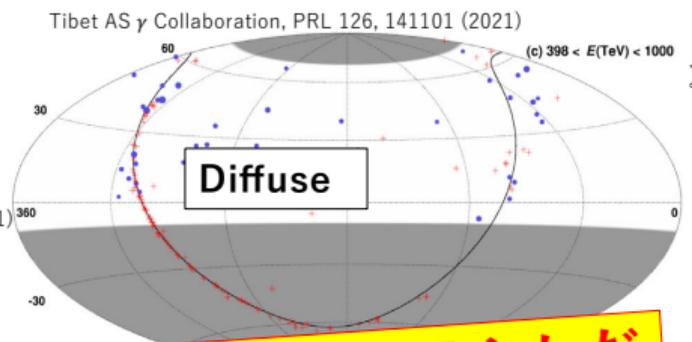
HAWC Collaboration, Nature Astron., 5, 465-471 (2021)



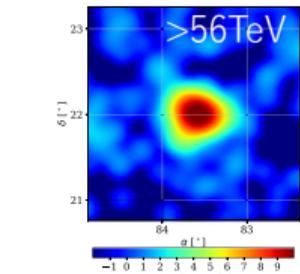
Tibet AS γ Collaboration,
PRL 123, 051101 (2019)



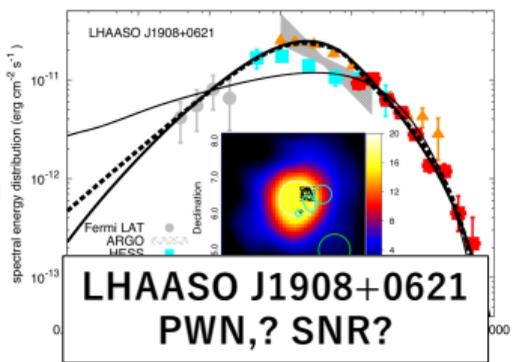
LHAASO Collaboration,
Chin. Phys. C45, 023002 (2021)



Sub-PeVの空は賑やかだ

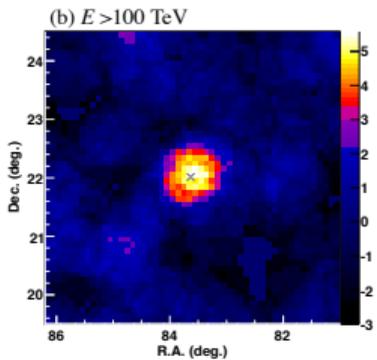


HAWC Collaboration,
ApJ 881:134 (2019)

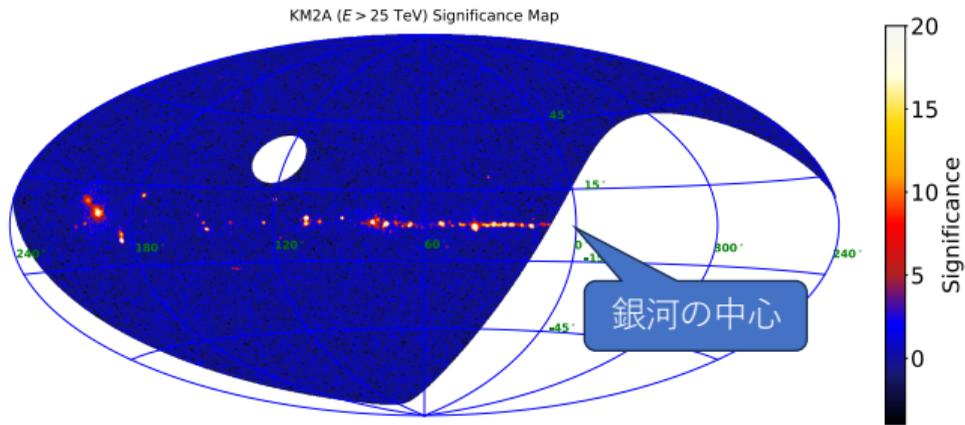


LHAASO Collaboration,
Nature, 594, 33-36 (2021)

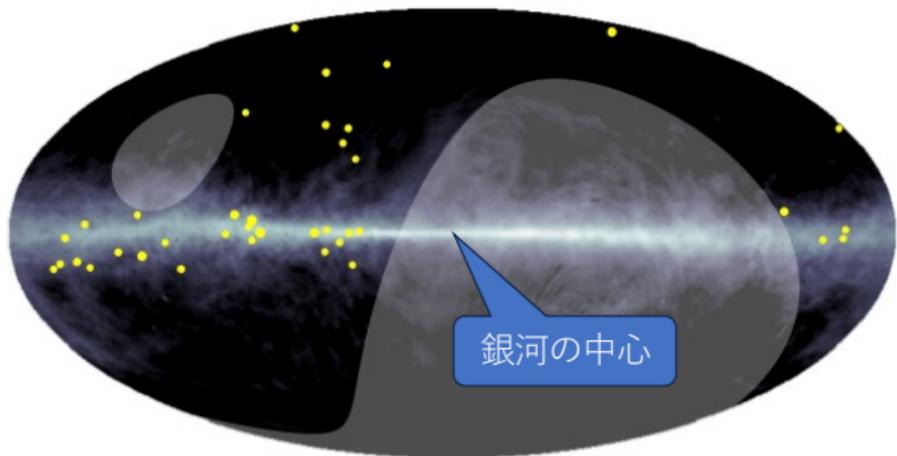
Sub-PeVガンマ線天文学、次のステップ



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



LHAASO Collaboration, arXiv:2305.1703v1 (2023)



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

**Sub-PeVの空は賑やかだ
次は南半球、銀河の本命！！**

ALPACA

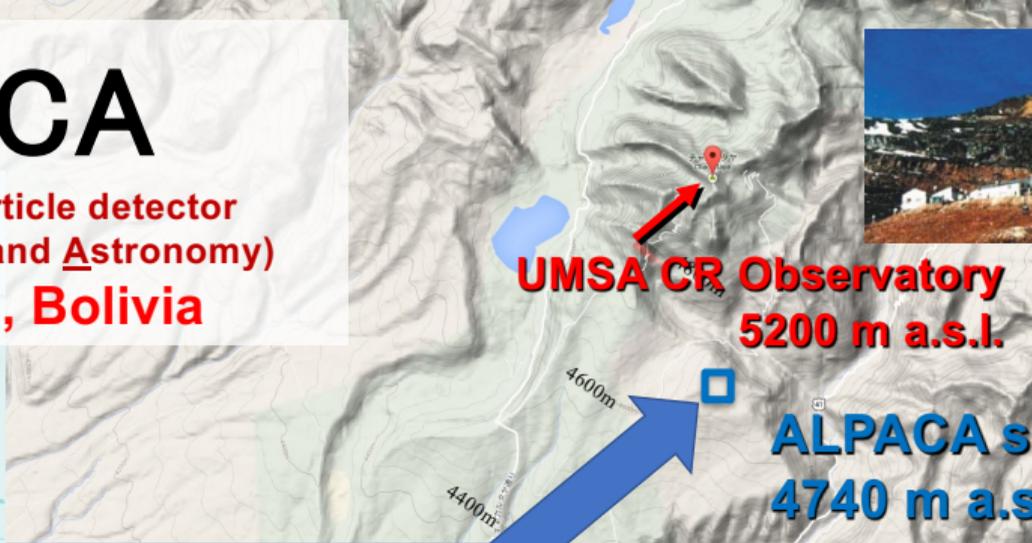
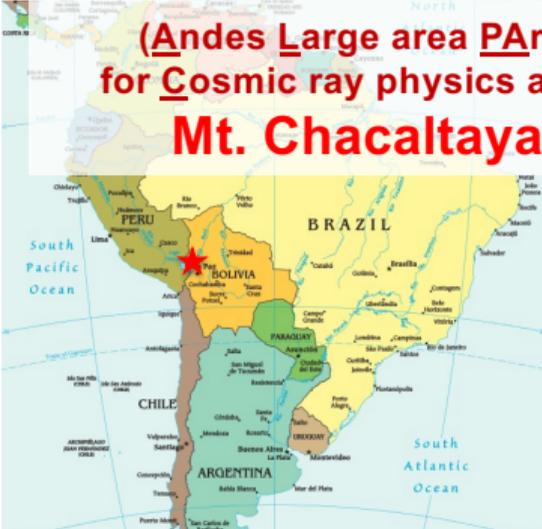
(Andes Large area Particle detector
for Cosmic ray physics and Astronomy)
Mt. Chacaltaya, Bolivia



**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)



ALPACA空気シャワー実験

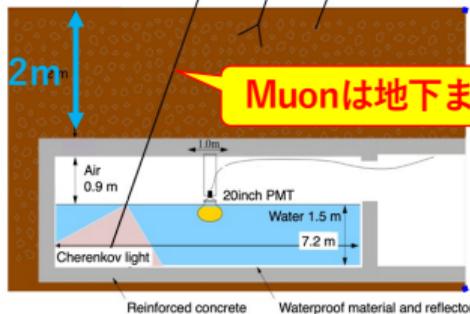
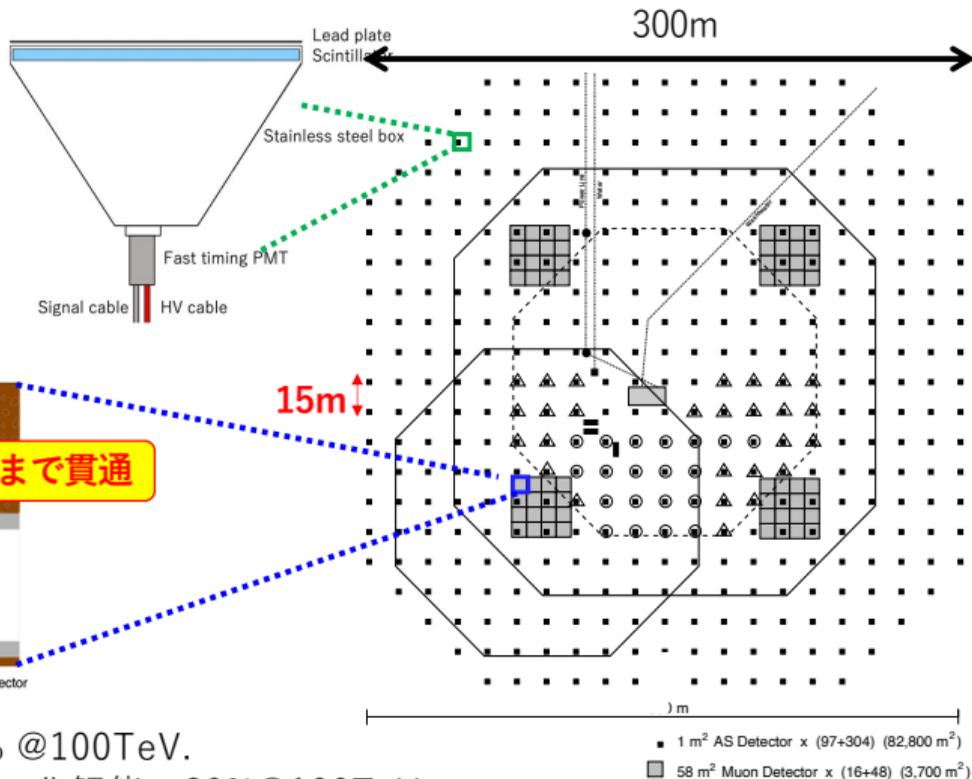
1. Array coverage 82,800m²

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

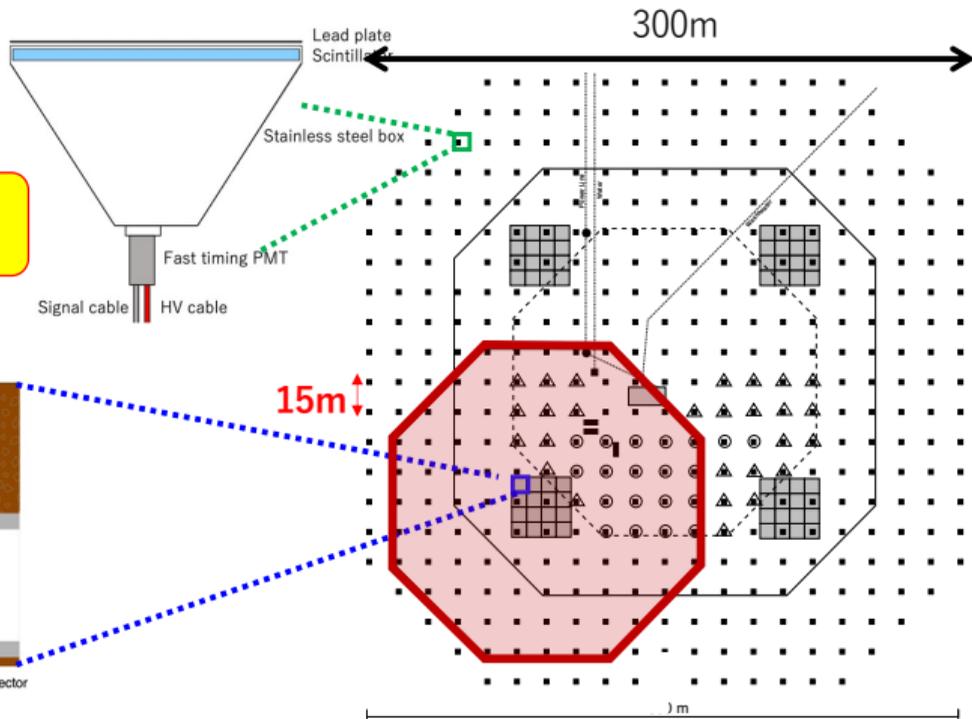
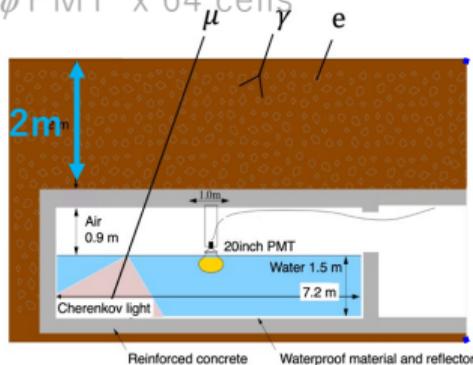
1. Array coverage 82,800m²

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 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)

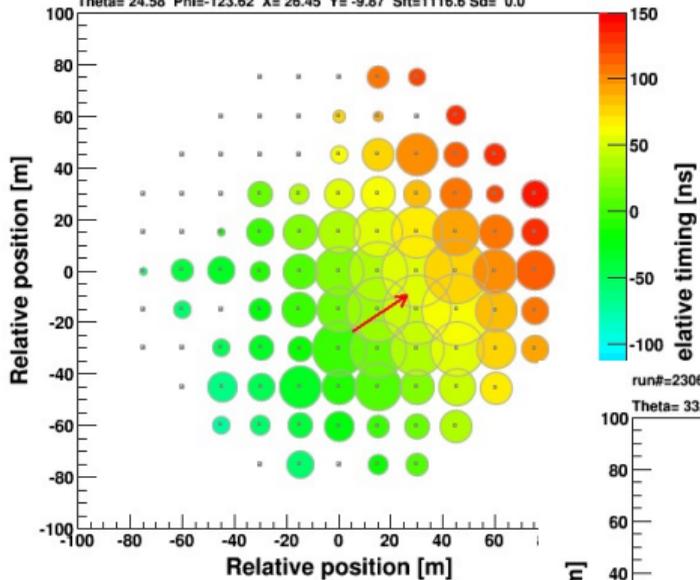
ALPAQUITA construction in June 2022



- 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
- 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

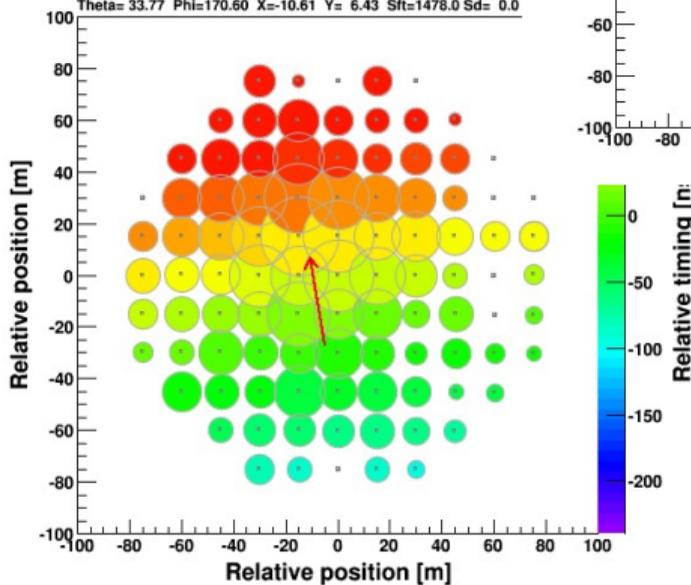
run#=23062501 ev#=110788 mjd=60120.0175874307 #ch= 74

Theta= 24.58 Phi=-123.62 X= 26.45 Y= -9.87 Sft=1116.6 Sd= 0.0



run#=23062501 ev#=42586 mjd=60120.0146997180 #ch= 88

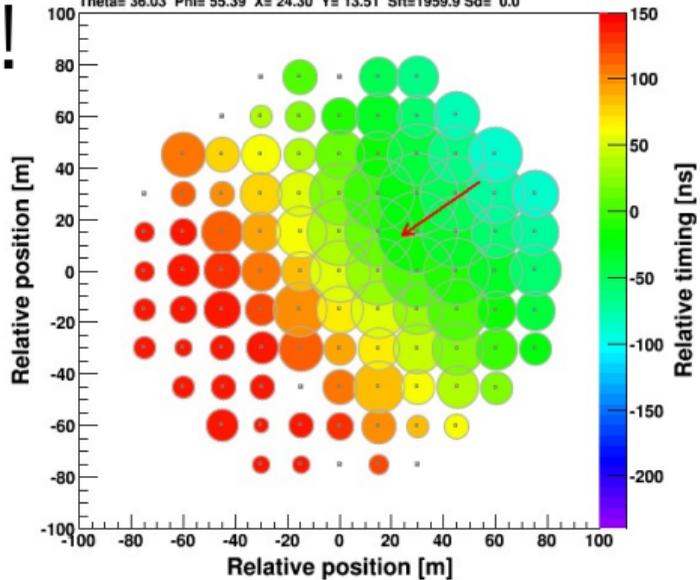
Theta= 33.77 Phi=170.60 X=-10.61 Y= 6.43 Sft=1478.0 Sd= 0.0



Big Events!

run#=23062501 ev#=111107 mjd=60120.0176029972 #ch= 90

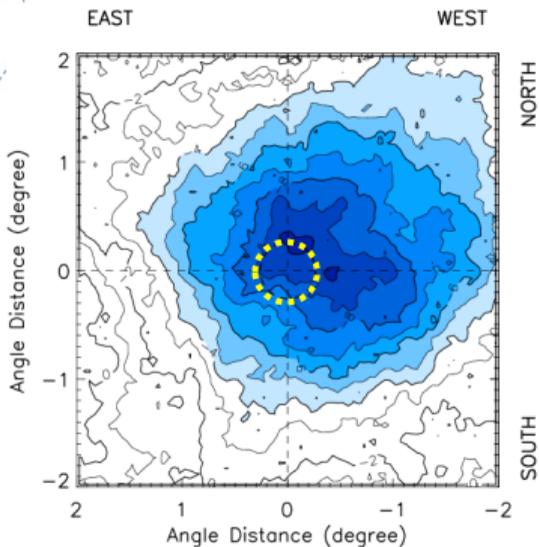
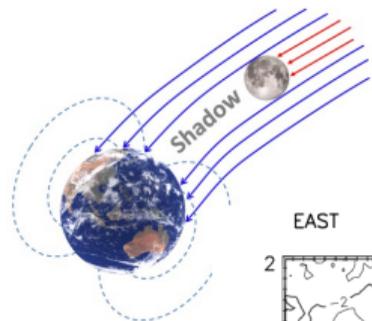
Theta= 36.03 Phi= 55.39 X= 24.30 Y= 13.51 Sft=1959.9 Sd= 0.0



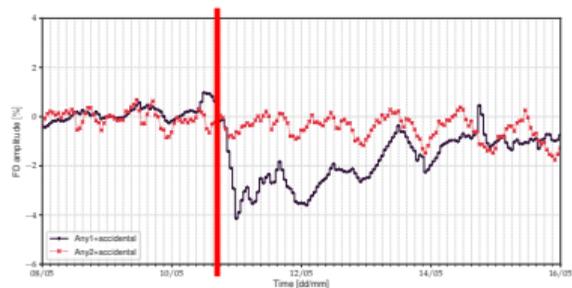
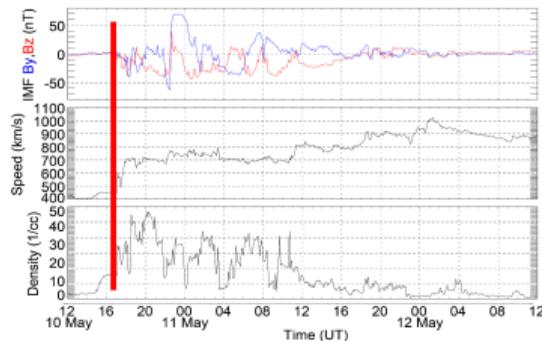
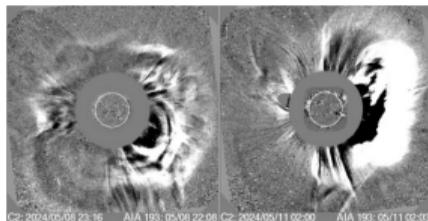
$E > 100$ TeV
(mostly hadronic CRs)

ALPAQUITAによる初期観測結果

月の影の検出

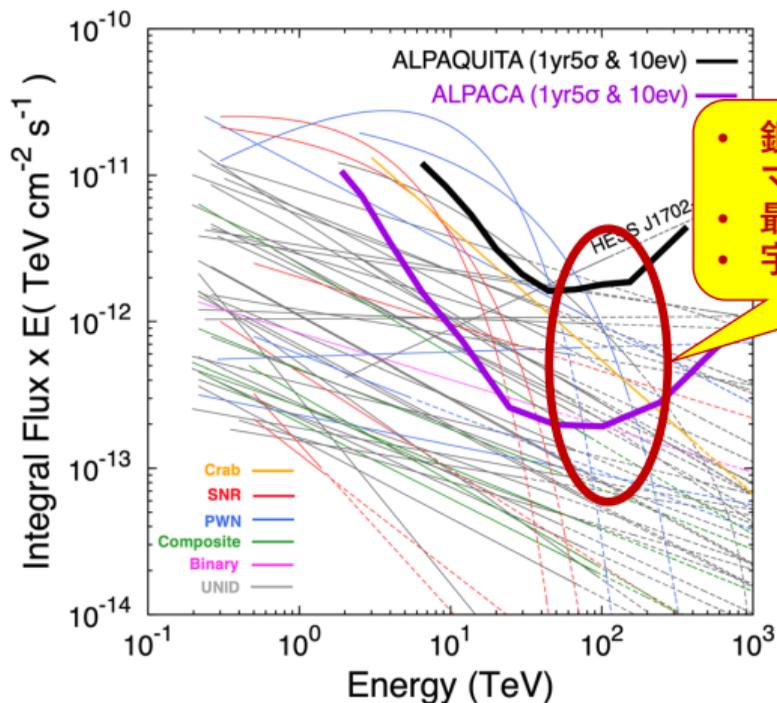


太陽フレアに伴う宇宙線減 (Forbush decrease)

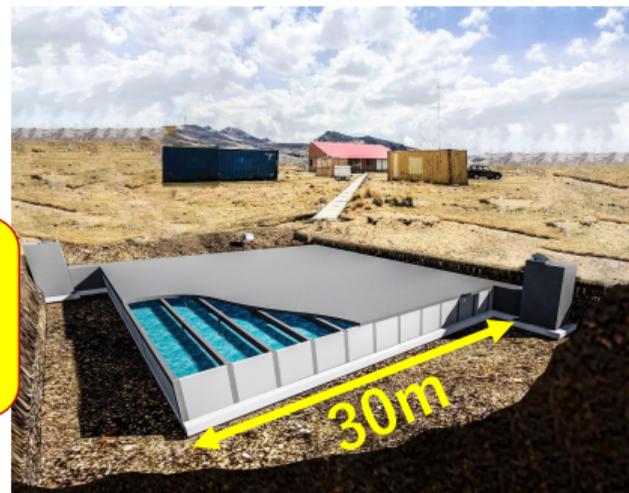


太陽から放出された高速プラズマ塊 (CME) が一時的に宇宙線を追い出す

ALPAQUITAの感度



- 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？



Site photo + CG image of MD by design company

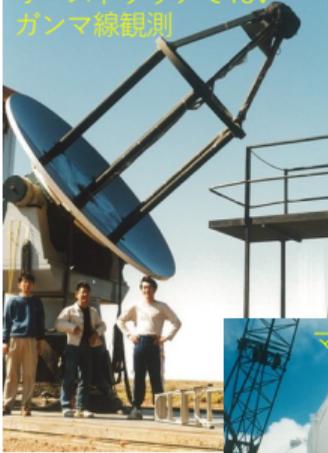
- 2025年に地下ミュオン検出器（1台目）を完成
- 2026年にALPACA全体を完成
- ALPAQUITA 1年の観測で、数個の既知のTeV天体から>100TeV (sub-PeV)ガンマ線を検出可能
- ALPACA 1年の観測で、既知のTeV天体半分を>100TeVで検証可能

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

これから数年が一番面白い「発見の時代」！！

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



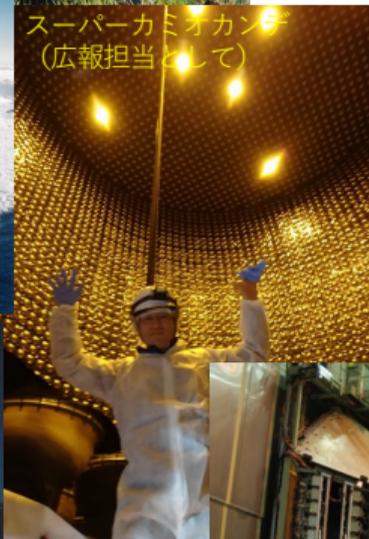
乗鞍観測所冬季シフト (2700m)



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



まとめ

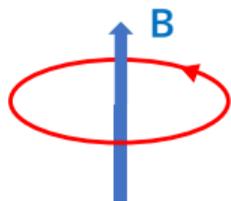
- 「**銀河宇宙線(The 宇宙線)の起源**」は古くて新しい重要なテーマ
- 宇宙線の精密測定 + LHCからの知見、によって**宇宙線の加速限界(原子核種別エネルギースペクトル)**の解析が進展
- **sub-PeVガンマ線**観測技術が確立
 - 北半球では複数の実験が多く、天体を発見
 - 拡散ガンマ線は、銀河系内の宇宙線の分布を測定
 - **南半球の新しい実験ALPACA**が最先端 => **銀河宇宙線の起源**解明
- 「**宇宙線の起源**」**以外**のテーマも
 - 太陽磁場の検証、宇宙天気予報
 - ダークマター等、新物理の探索
 - 空気シャワーによる高エネルギー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

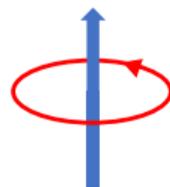
エネルギー、運動量と rigidity (剛度)

- 電磁場中での運動方程式： $\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B} + q\vec{E}$
- 高エネルギー（相対論的）なので E （エネルギー） = pc （運動量 $\times c$ ）、 $v=c$ とする

$$E_p = E_{He} \text{の時}$$



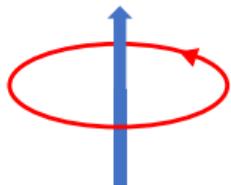
陽子 ($q=e$)



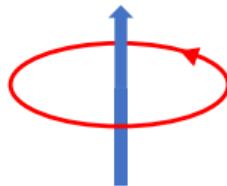
ヘリウム ($q=2e$)

- $\frac{d\vec{R}}{dt} = \frac{d(\vec{p}/q)}{dt} = \vec{v} \times \vec{B} + \vec{E}$ と、rigidity R を定義すると、粒子軌道は電荷に依存しない

$$R_p = R_{He} \text{の時}$$



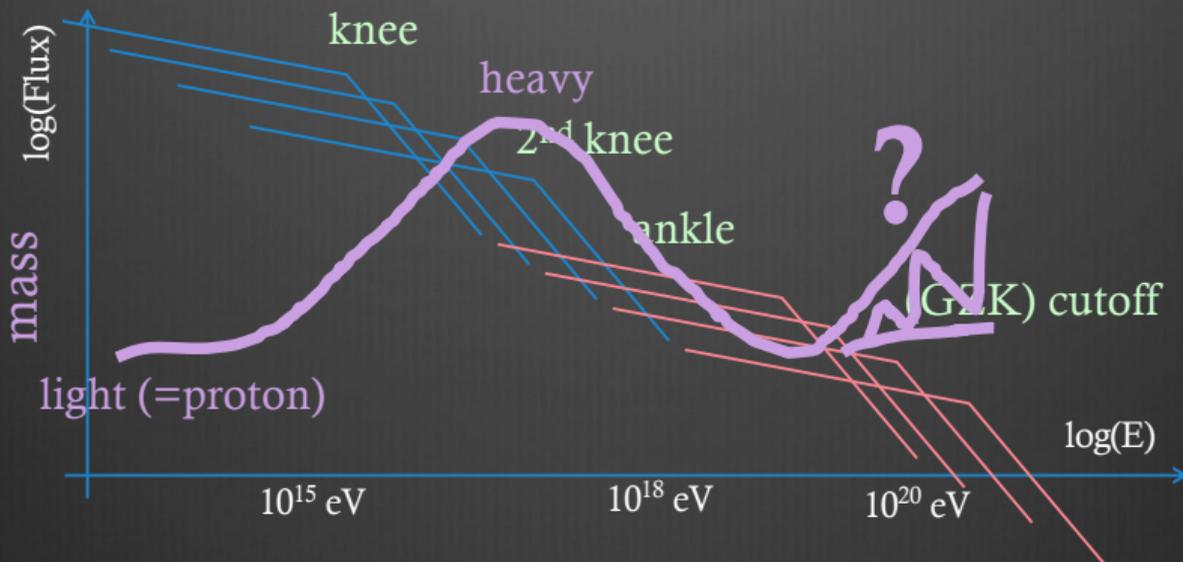
陽子 ($q=e$)



ヘリウム ($q=e$)

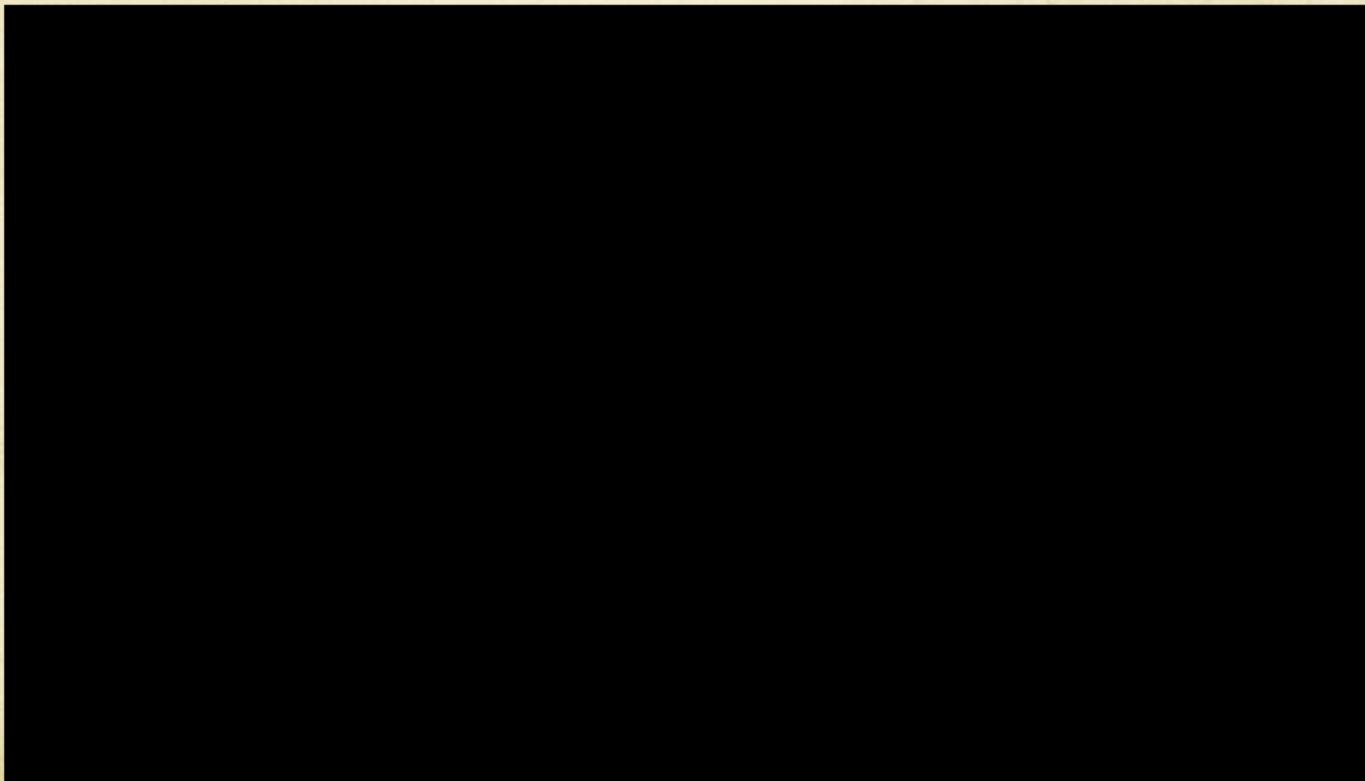
- 回転半径 > 天体のサイズで加速限界が決まる
- 加速限界 rigidity は原子核種によらない

Standard Scenario of Cosmic-Ray Spectrum

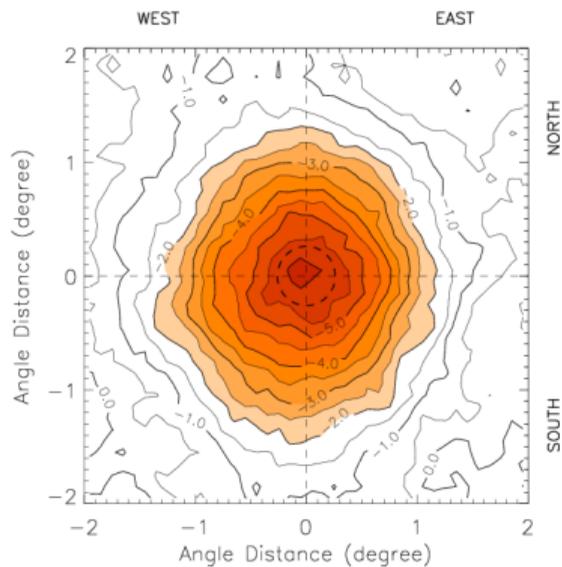


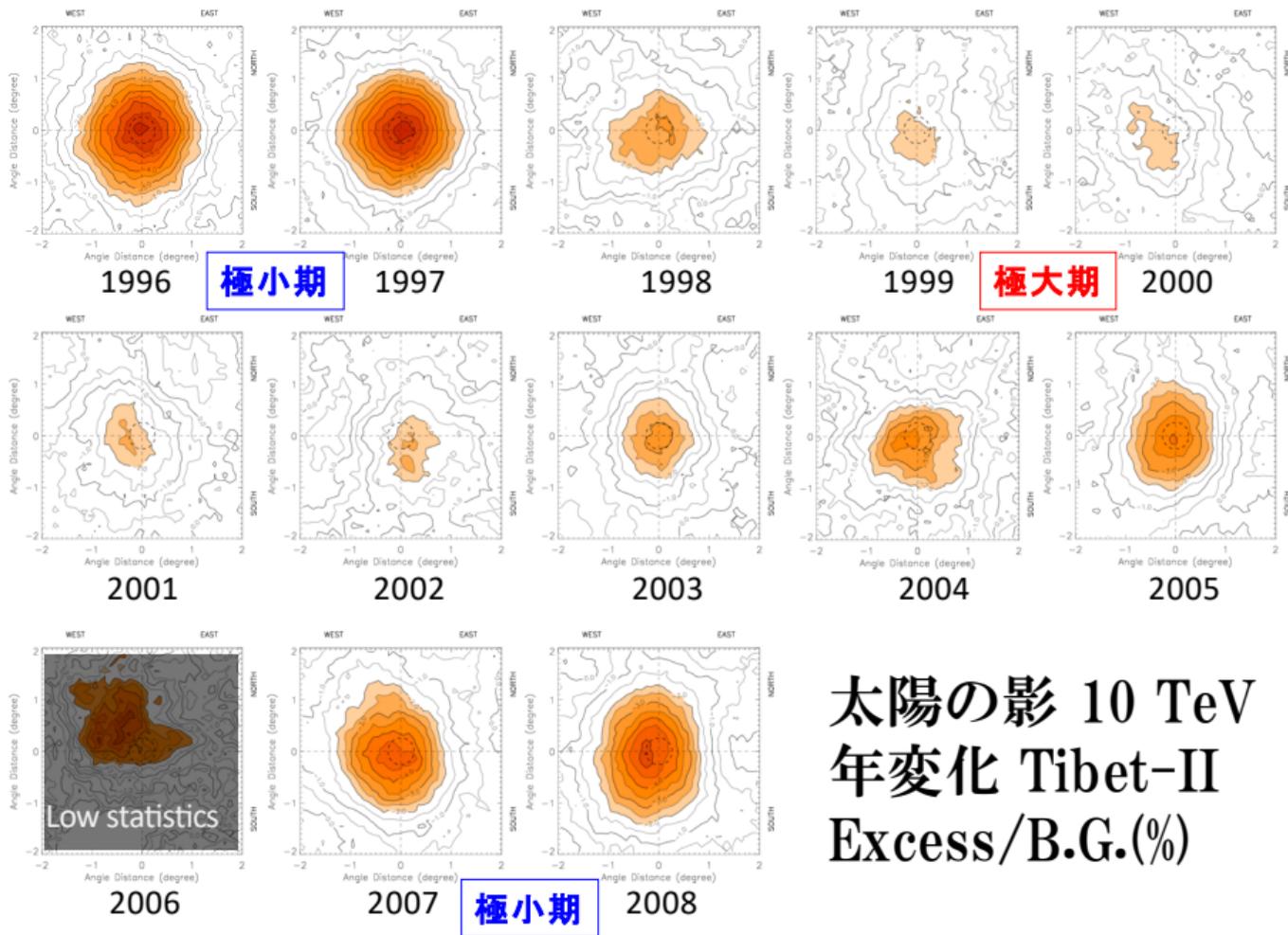
- ✓ エネルギースペクトルの構造を説明可能
- ✓ 粒子種(原子核種、質量)のエネルギー依存があるはず

チベット空気シャワー実験の動画



だったら太陽の影も





太陽の影 10 TeV
 年変化 Tibet-II
 Excess/B.G.(%)

仮定する太陽圏の磁場

コロナ磁場 → 2つのSource Surface モデル (PFSS / CSSS)

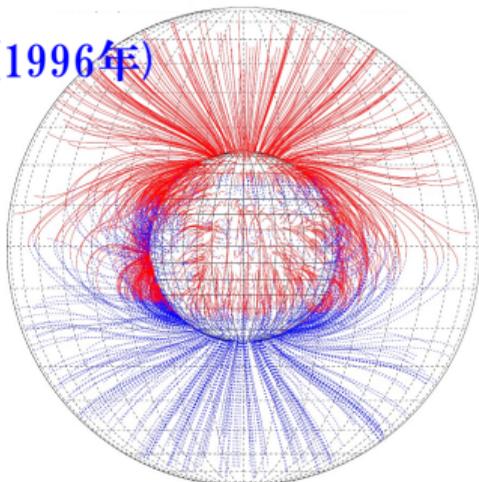
Kitt Peak の太陽表面磁場の観測から推測する
太陽の1自転周期(~27日)ごとの平均モデル

惑星間磁場 → パーカー・スパイラルモデル

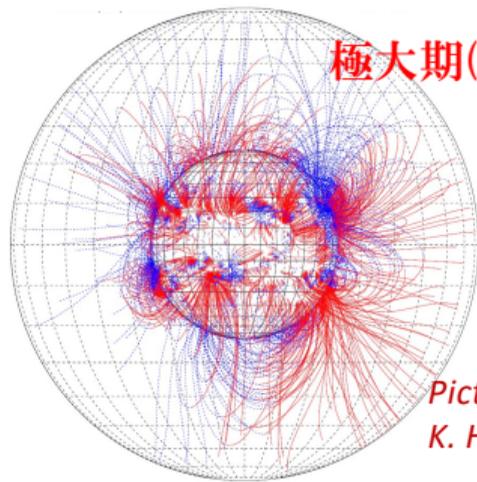
太陽風速度は名大IPS観測の緯度依存を考慮

地磁気 → 双極子磁場モデル

極小期(1996年)
PFSS



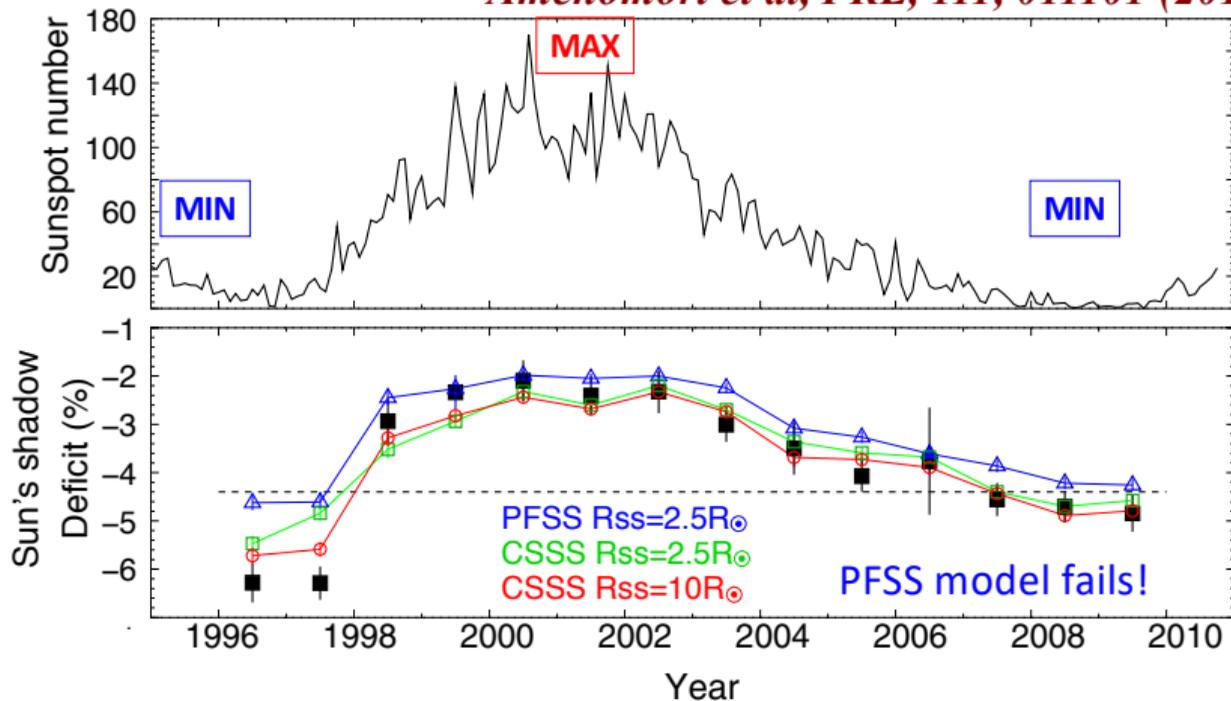
極大期(2000年)
PFSS



*Pictures from
K. Hakamada*

Past Results (Tibet-II >10TeV)

Amenomori et al, PRL, 111, 011101 (2013)



- ✓ 太陽活動と太陽の影の深さの相関
- ✓ 太陽近傍磁場構造の間接測定



sub-PeV銀河面拡散ガンマ線

銀河系PeV宇宙線プール

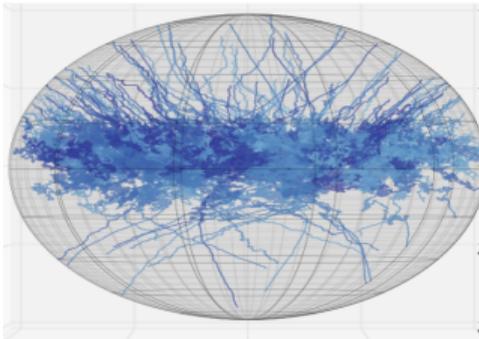
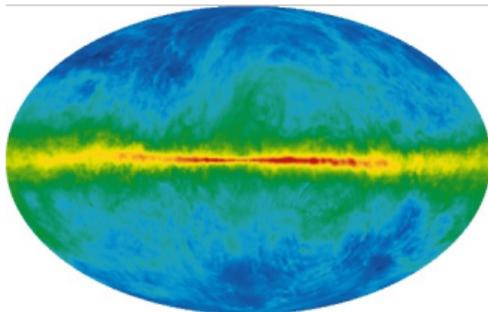


Figure from slide presented by A. Kääpä (Bergische Universität Wuppertal) at CRA2019 workshop

銀河系星間物質 (陽子)



Radio (21cm) HI Map
Hartmann et al. (1997)
Dickey & Lockman (1990)

sub-PeVガンマ線
(0.4 – 1 PeV)

×

=



sub-PeV銀河面拡散ガンマ線

銀河系PeV宇宙線プール

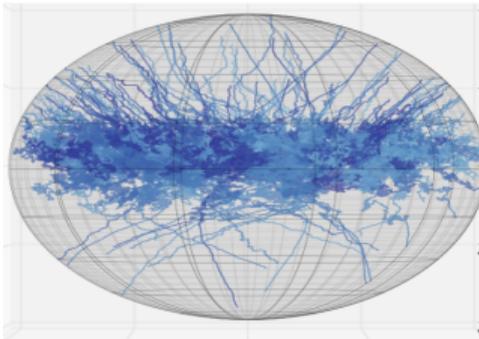
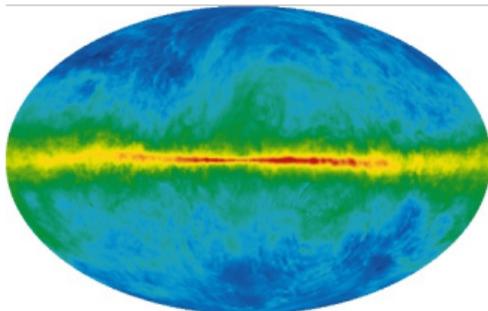


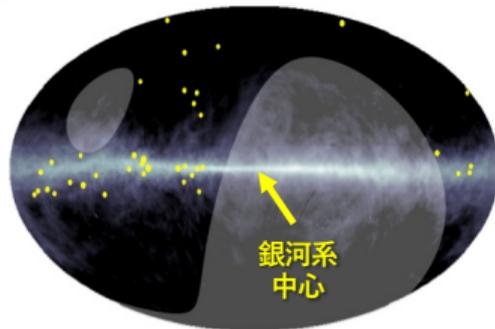
Figure from slide presented by A. Kääpä (Bergische Universität Wuppertal) at CRA2019 workshop

銀河系星間物質 (陽子)



Radio (21cm) HI Map
Hartmann et al. (1997)
Dickey & Lockman (1990)

sub-PeVガンマ線
(0.4 – 1 PeV)

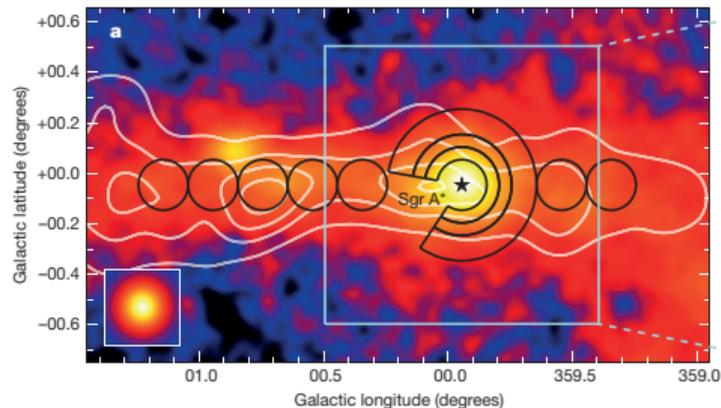
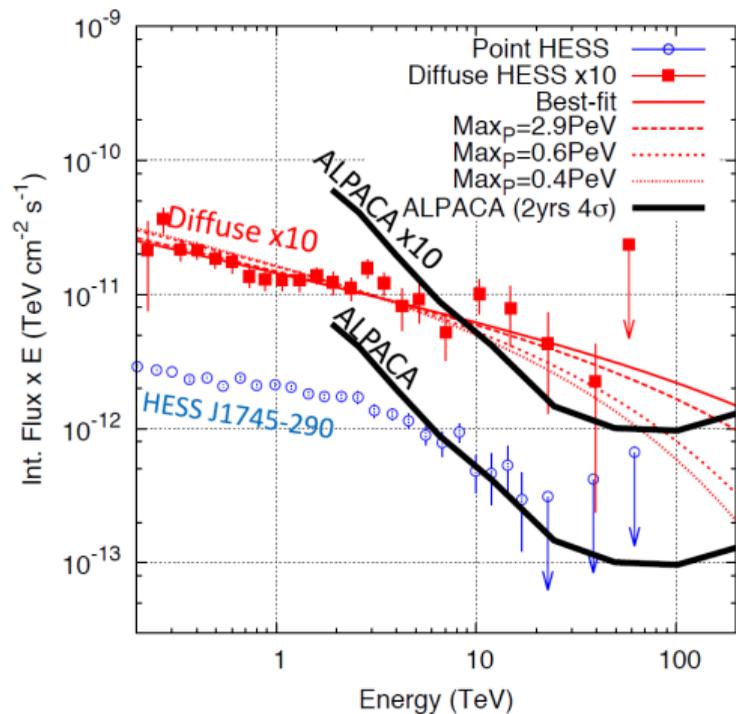


Tibet ASy 実験

Amenomori+, PRL **126**, 141101 (2021)

- ✓ 銀河面からのPeV宇宙線起源のsub-PeV拡散ガンマ線を世界初観測
- ✓ 銀河系内にPeV宇宙線加速天体が存在することを実験的に証明
- ✓ 最高ガンマ線エネルギー ~ 1 PeV

銀河中心ブラックホールはPeV加速天体？



Abramowski, et al, Nature (2016)

- ✓ ナミビアのTeV望遠鏡 H.E.S.S.の観測
- ✓ 40TeVまでカットオフなし
- ✓ 銀河中心の周りに広がった放射
- ✓ 100TeVまで伸びていればALPACAで検出可能
- ✓ PeV加速天体の有力候補