

# 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

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  
ニュートリノ振動  
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  
ミュオン粒子  
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

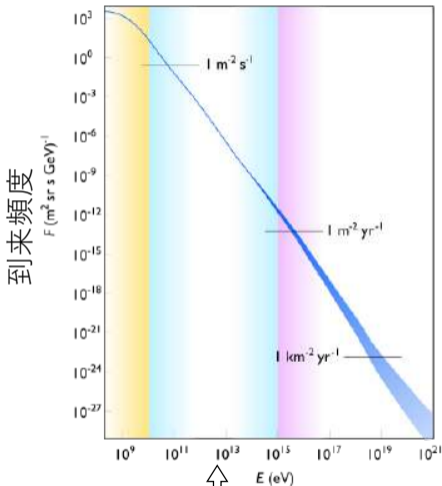
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 大体 1秒間に指先(1cm<sup>2</sup>)を1個到来 [注：大気の外]
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- 10<sup>20</sup>eVの宇宙線が来ている(100km<sup>2</sup>に年に一個)
- 人工加速器の最高エネルギーは 7x10<sup>12</sup>eV

宇宙加速器はどこにある？

- 謎??
- 宇宙の極限天体・現象に関わるはず

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<sup>-19</sup> 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・ $\nu$ )
- 伝統的な天文学が扱わない
- 電磁波以外 (ガンマ線を除く)

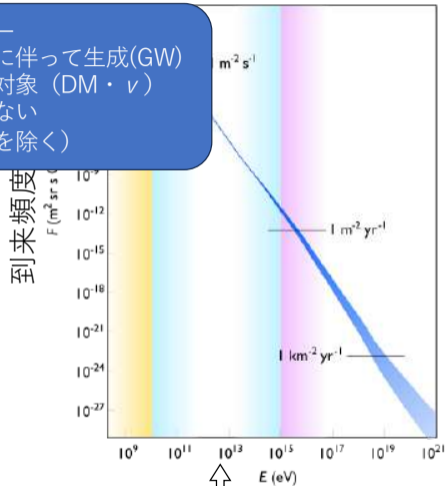
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 大体 1秒間に指先(1cm<sup>2</sup>)を1個到来 [注: 大気の外]
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- 10<sup>20</sup>eVの宇宙線が来ている(100km<sup>2</sup>に年に一個)
- 人工加速器の最高エネルギーは 7x10<sup>12</sup>eV

宇宙加速器はどこにある？

- 謎??
- 宇宙の極限天体・現象に関わるはず

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<sup>-19</sup> 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

- 高エネルギー
- 高エネルギー物理学・高エネルギー天体現象に伴って生成
- 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”

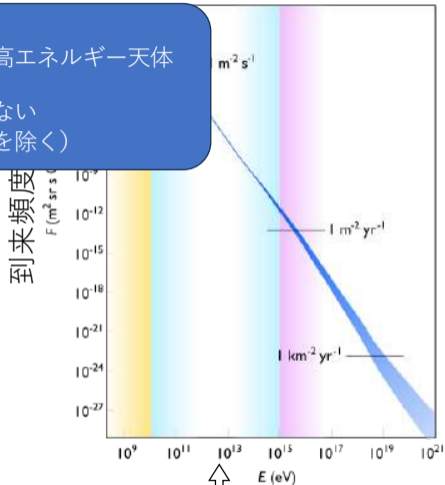
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 大体 1秒間に指先(1cm<sup>2</sup>)を1個到来 [注：大]
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/10
- 10<sup>20</sup>eVの宇宙線が来ている(100km<sup>2</sup>に年に一個)
- 人工加速器の最高エネルギーは 7x10<sup>12</sup>eV

宇宙加速器はどこにある？

- 謎??
- 宇宙の極限天体・現象に関わるはず

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<sup>-19</sup> 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

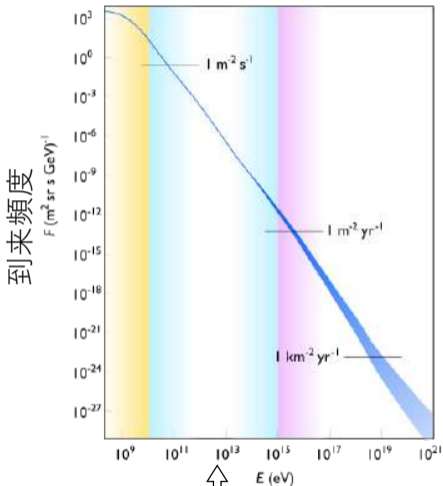
様々なエネルギーの宇宙線がやってくる

- 大体 1秒間に指先(1cm<sup>2</sup>)を1個到来 [注：大気の外]
- エネルギーが一桁増えると、頻度は約 1/1000
- 10<sup>20</sup>eVの宇宙線が来ている(100km<sup>2</sup>に年に一個)
- 人工加速器の最高エネルギーは 7x10<sup>12</sup>eV

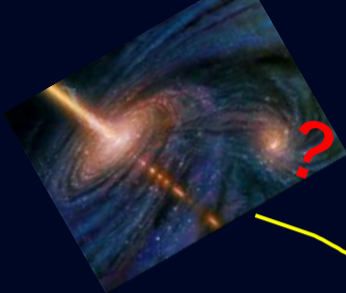
宇宙加速器はどこにある？

- 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<sup>-19</sup> J (ジュール)



なぜ起源がわからない？

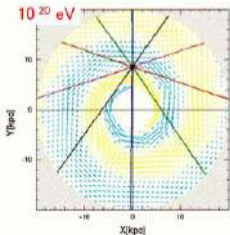
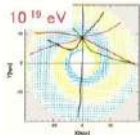
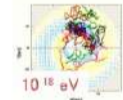
=> 強敵：宇宙磁場

$10^{19}$ 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

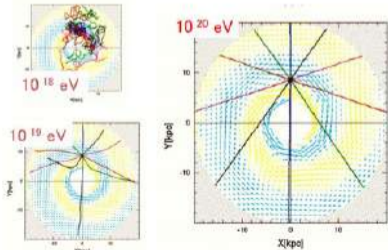
戦略1：最高エネルギーを狙う！

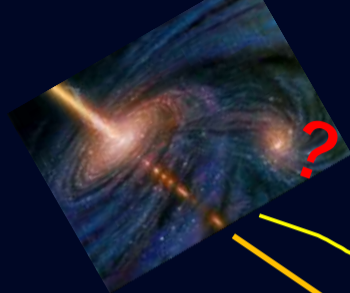
$10^{20}\text{eV}$

$10^{19}\text{eV}$

$10^{15}\text{eV}$

銀河系の中での宇宙線陽子の運動





$10^{20}\text{eV}$

$10^{19}\text{eV}$

なぜ起源がわからない？

=> 強敵：宇宙磁場

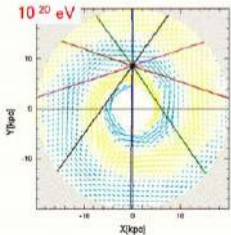
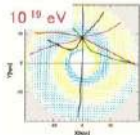
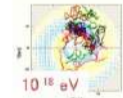
$10^{15}\text{eV}$

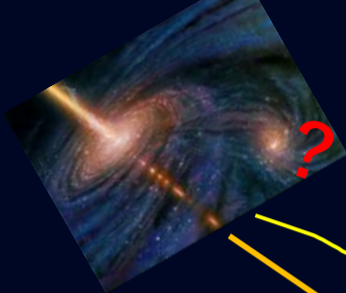


戦略2：銀河宇宙線の精密測定

「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



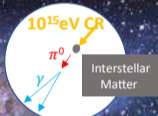


$10^{20}\text{eV}$

$10^{19}\text{eV}$

なぜ起源がわからない？

=> 強敵：宇宙磁場



$10^{15}\text{eV}$

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

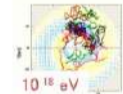
戦略2：銀河宇宙線の精密測定

「高エネルギー宇宙線」  
銀河系内宇宙線の加速限界

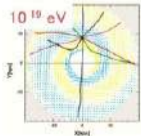
戦略3：ガンマ線を狙う！

「高エネルギーガンマ線天文学」

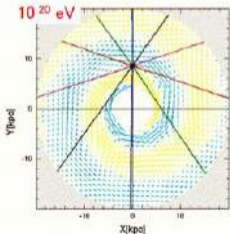
銀河系の中での宇宙線陽子の運動



$10^{18}\text{ eV}$



$10^{19}\text{ eV}$



$10^{20}\text{ eV}$

TeV=10<sup>12</sup>eV, PeV=10<sup>15</sup>eV, EeV=10<sup>18</sup>eV

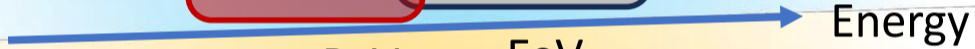
# 荷電粒子観測 (陽子、原子核)

- 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)

- 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)



TeV

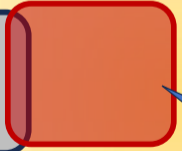
PeV

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

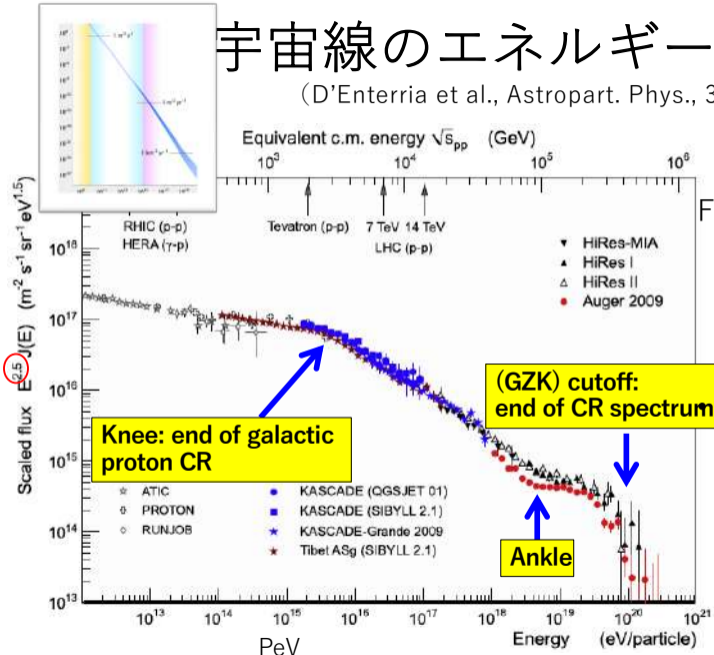
# ガンマ線観測

# 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)

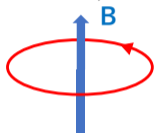
マクスウェル分布ではなくべき (power law) 型

- 「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!

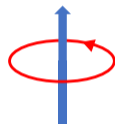
# エネルギー、運動量と rigidity (剛度)

- 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

$$E_p = E_{He} \text{の時}$$



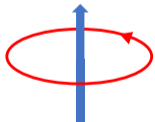
陽子 ( $q=e$ )



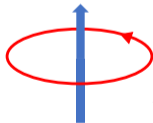
ヘリウム ( $q=2e$ )

- $\frac{d\vec{R}}{dt} = \frac{d(\vec{p}/q)}{dt} = \vec{v} \times \vec{B} + \vec{E}$  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 ( $q=e$ )

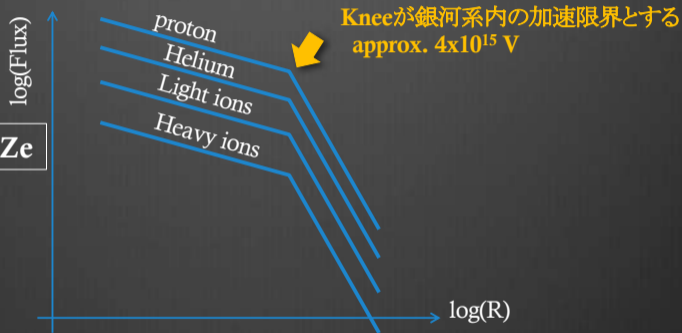


ヘリウム ( $q=e$ )

- 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

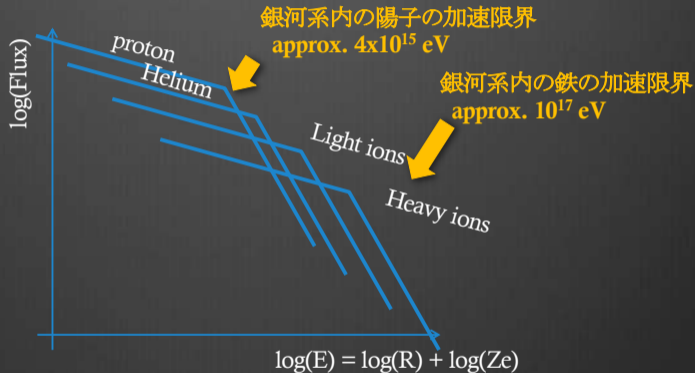


Rigidity :  $R = pc/Ze \sim E/Ze$

- ✓ 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

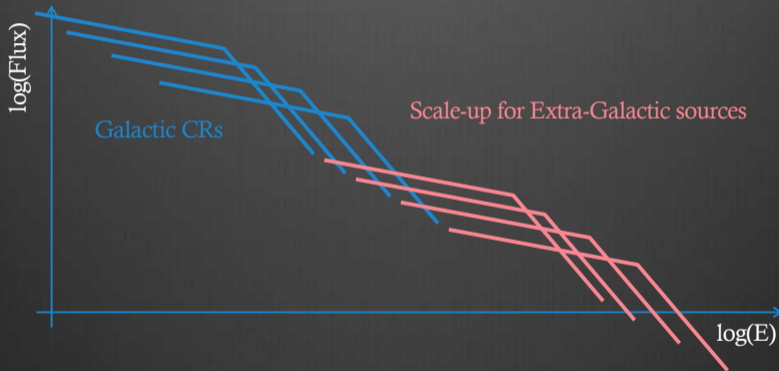
# Standard Scenario of Cosmic-Ray Spectrum

Energy :  $E = R \times Ze$



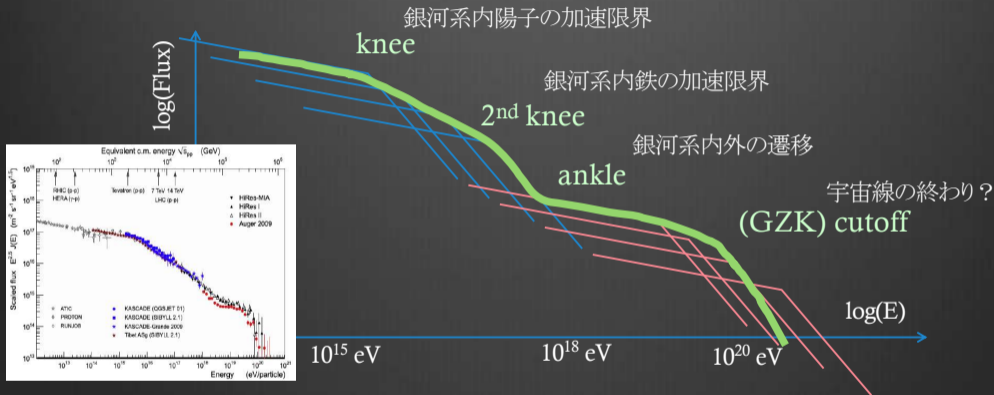
- ✓ 「エネルギー」スペクトルにすると、原子番号Z倍だけ右にシフト
- ✓ 鉄 ( $Z=26$ ) の加速限界エネルギーは  $26 \times 4 \times 10^{15} \sim 10^{17} \text{eV}$

# Standard Scenario of Cosmic-Ray Spectrum



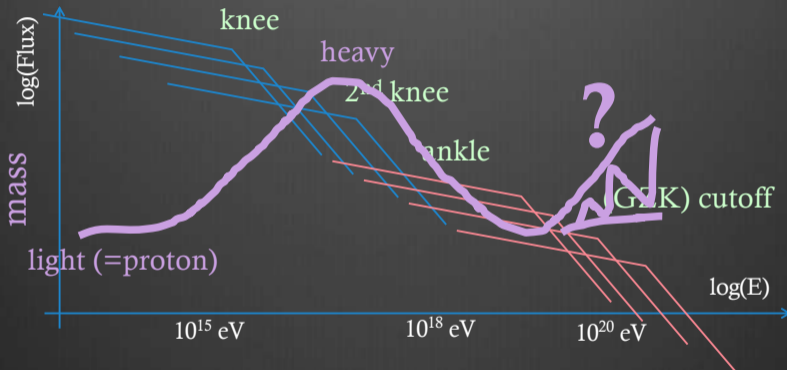
- ✓ 銀河系内の限界とこえると、銀河系外からの宇宙線が支配的になる
- ✓ 銀河系外には多分、我々の銀河より強力な加速天体があるだろう

# 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

# 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
- 磁場で曲がる宇宙線で「宇宙磁場」の研究ができる？
  - ✓ 太陽磁場変動の研究
- 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

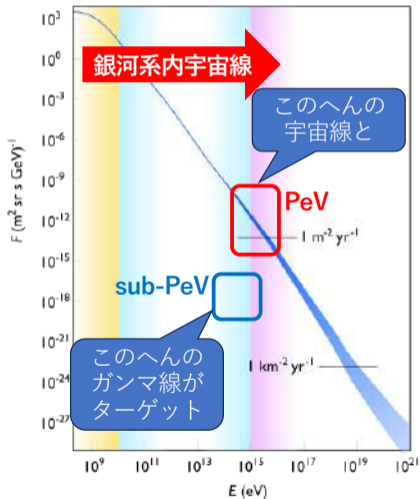
どのように

宇宙線の応用

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/ $1\text{m}^2$ /年”
- >100TeVのガンマ線は明るい天体で“~1個/ $1\text{m}^2$ /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

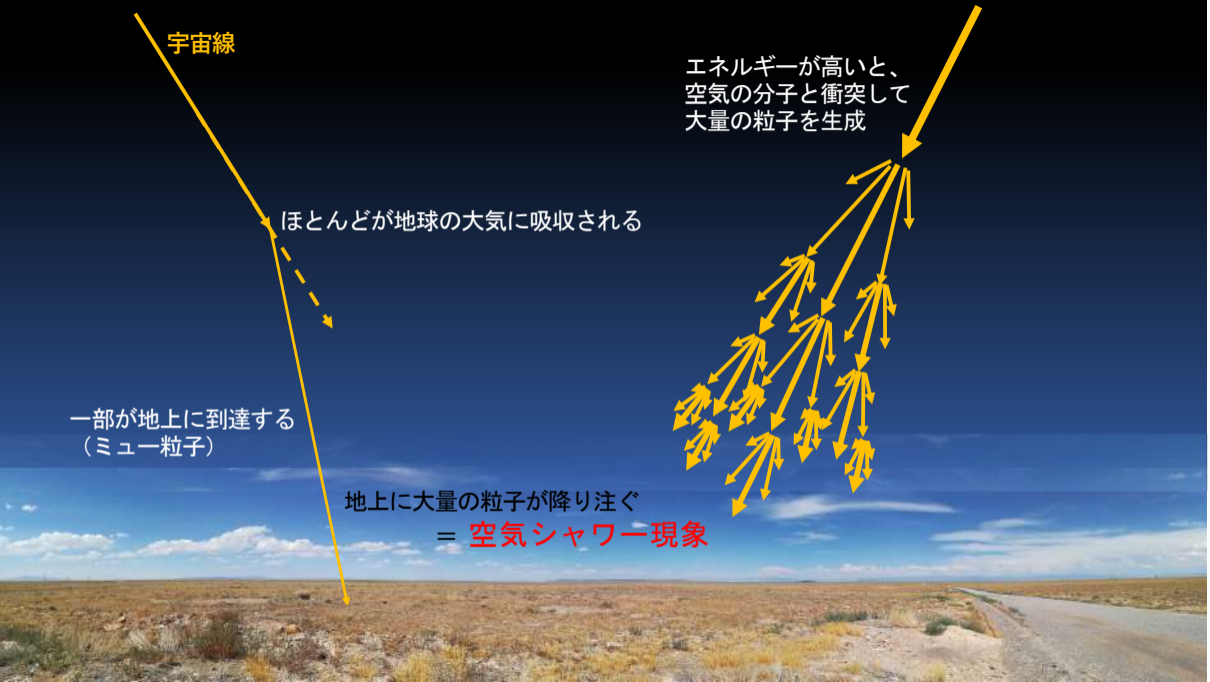
宇宙線

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

一部が地上に到達する  
(ミュー粒子)

地上に大量の粒子が降り注ぐ  
= 空気シャワー現象





宇宙線

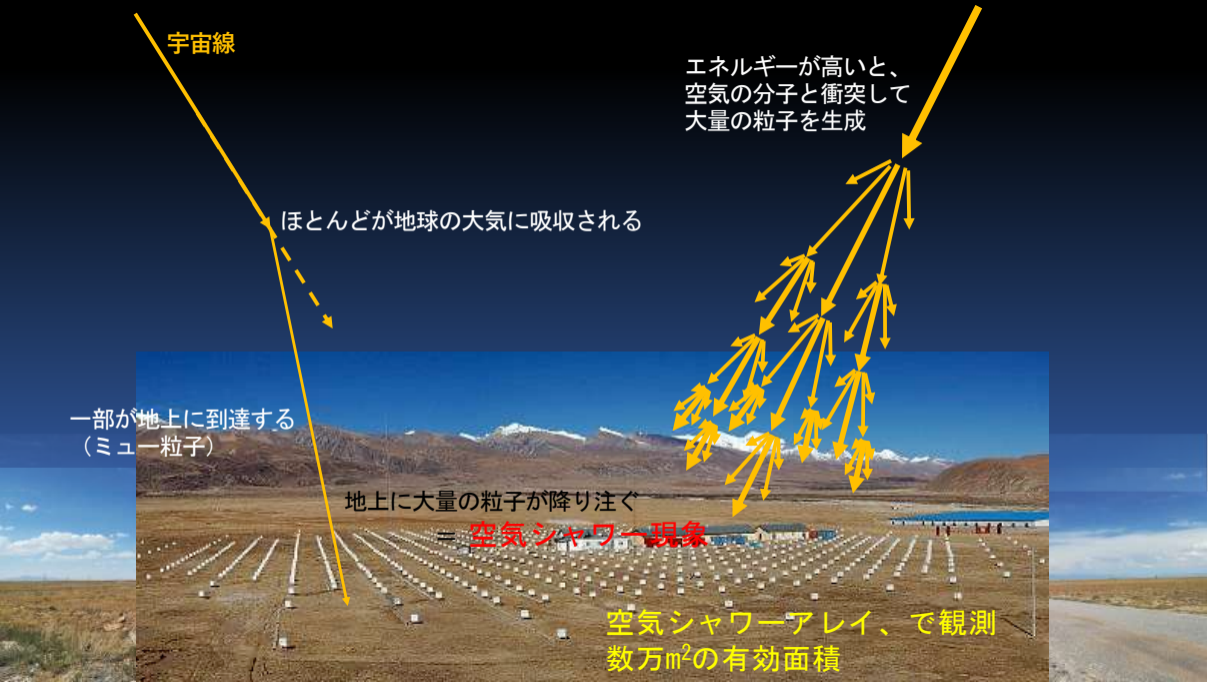
エネルギーが高いと、  
空気の分子と衝突して  
大量の粒子を生成

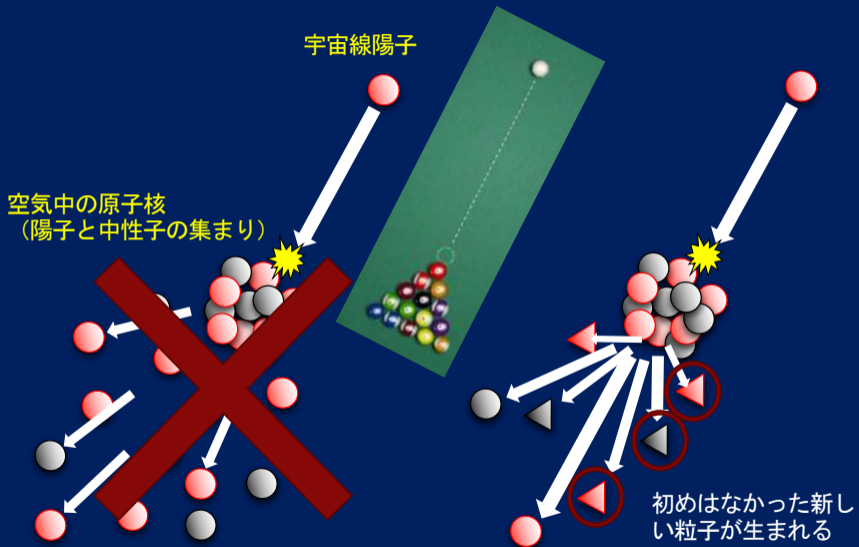
ほとんどが地球の大気に吸収される

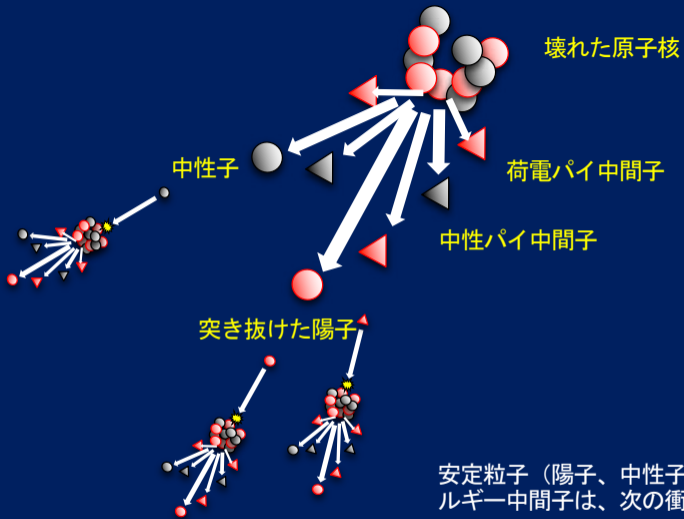
一部が地上に到達する  
(ミュー粒子)

地上に大量の粒子が降り注ぐ  
= 空気シャワー現象

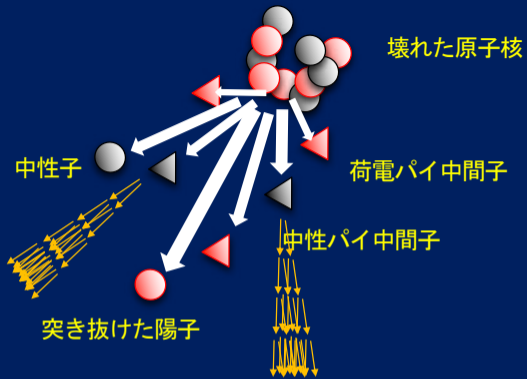
空気シャワーアレイ、で観測  
数万 $m^2$ の有効面積



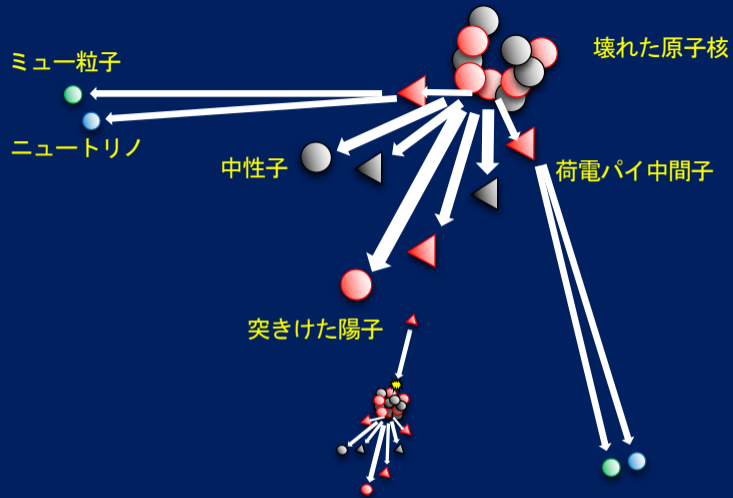




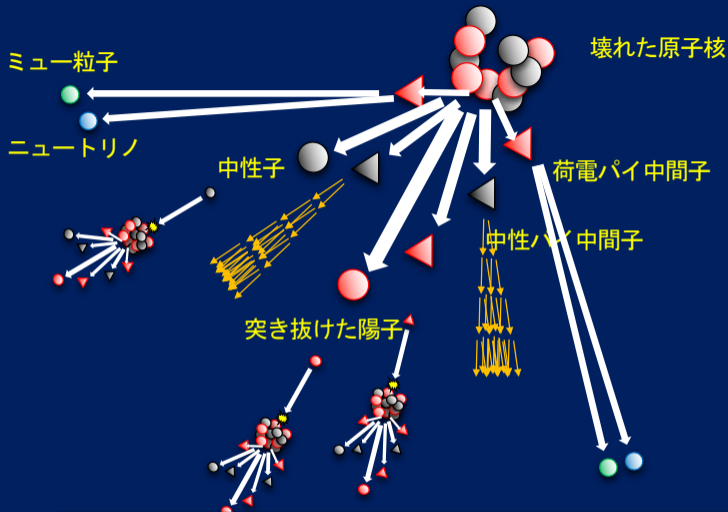
安定粒子（陽子、中性子）と高エネルギー中間子は、次の衝突をする



中性パイ中間子は、ガンマ線に崩壊。  
ガンマ線 ⇒ 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。

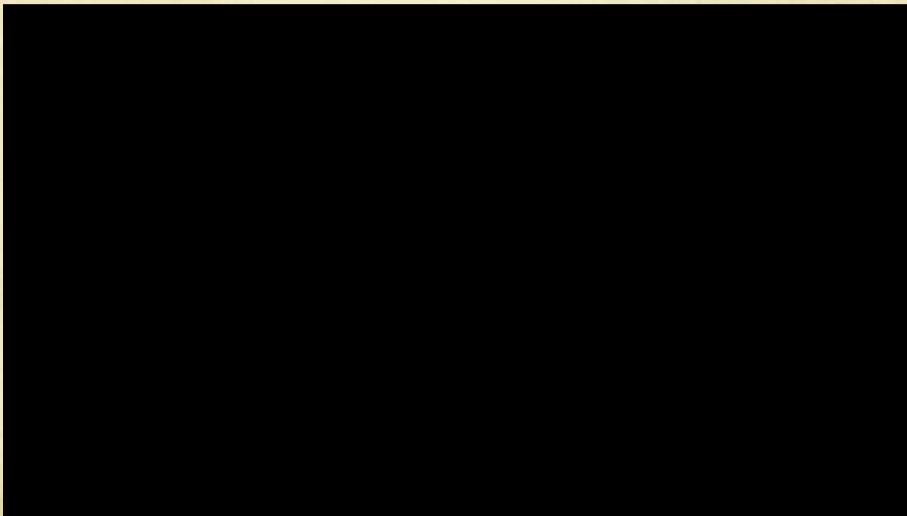


荷電パイ中間子は、  
エネルギーが高いと、次の衝突を起こす  
エネルギーが低いと、ミュオン粒子とニュートリノに崩壊  
ミュオン粒子とニュートリノはほとんど反応しないで地上（地中）に到達



- 地球大気の中では常に、高エネルギー素粒子反応が起きている
- 生成粒子の種類、エネルギーによって、次の反応が全く違う
- 地上には様々な素粒子が降り注いでいる（空気シャワー）  
=> 最終的にはミュー粒子、電子・陽電子、ガンマ線が主成分

# チベット空気シャワー実験の動画



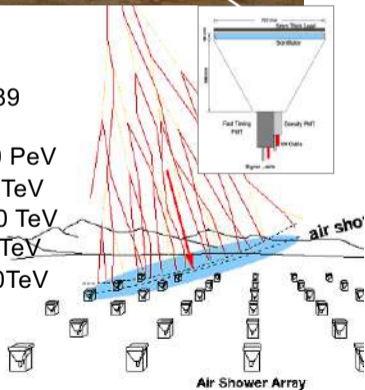
# Tibet-III Air Shower (AS) Array



4,300 m a.s.l. (606 g/cm<sup>2</sup>)

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

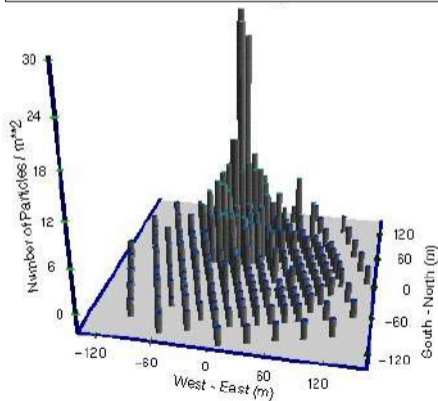
0.5 m<sup>2</sup> x 789  
~37,000 m<sup>2</sup>  
~3TeV - 100 PeV  
~0.4° @10 TeV  
~0.2° @100 TeV  
~50% @10 TeV  
~20% @100TeV  
~2 sr  
1.7 KHz



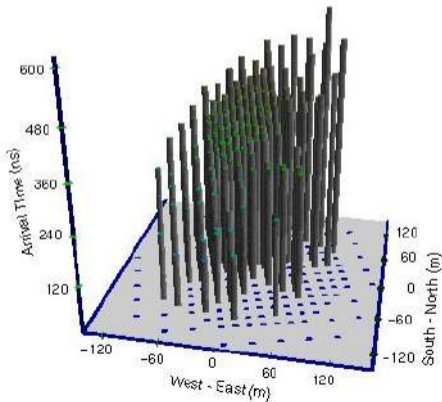


# 空気シャワーの観測例

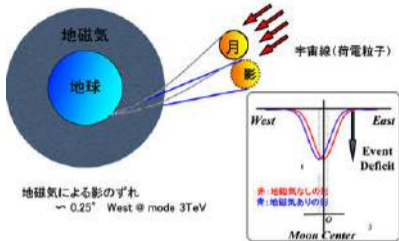
粒子数密度分布  
=> 入射粒子のエネルギー



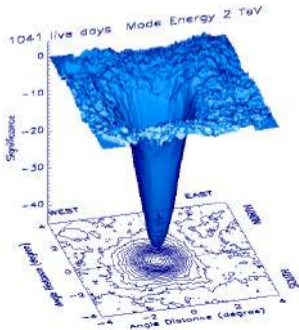
粒子到来タイミング分布  
=> 入射粒子の到来方向



# 「月の影」による装置性能の実証

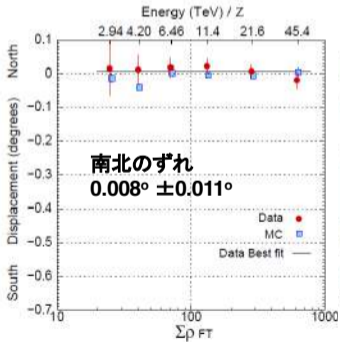


地磁気による影のずれ  
~ 0.25° West @ mode 3TeV

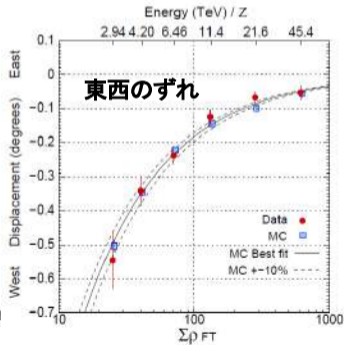


- エネルギーの絶対値
- 角度・方向分解能

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

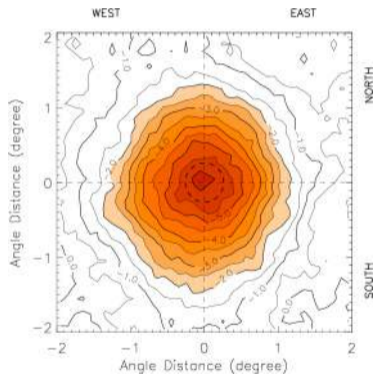


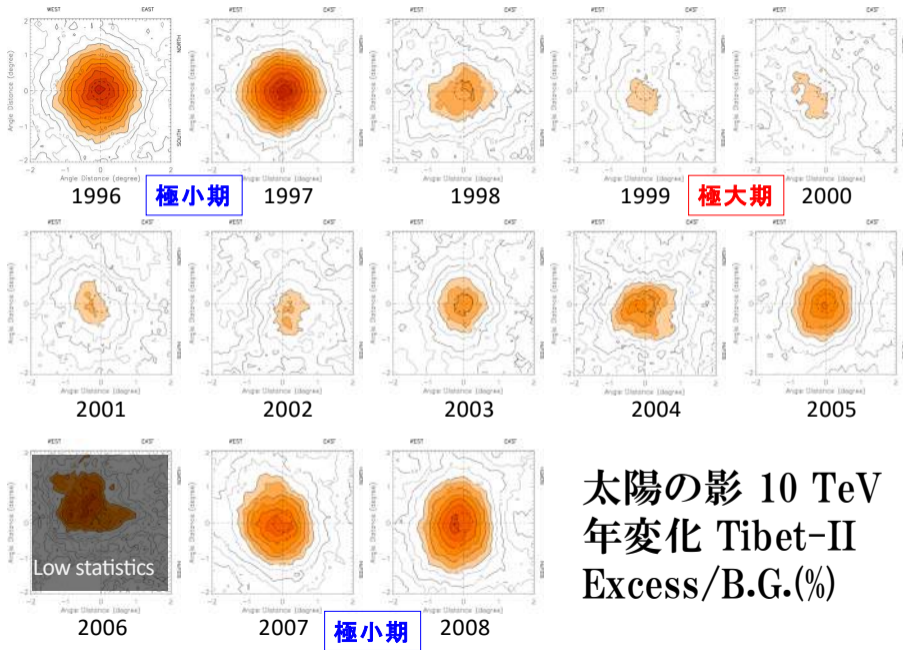
Pointing Error  
< 0.011°



Absolute Energy Scale Error < 12%  
+4.5%(±8.6stat.±6.7syst.)%<sup>35</sup>

# 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)

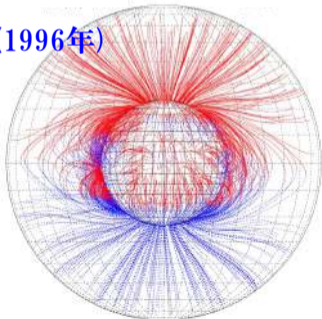
Kitt Peak の太陽表面磁場の観測から推測する  
太陽の1自転周期(~27日)ごとの平均モデル

惑星間磁場 → パーカー・スパイラルモデル

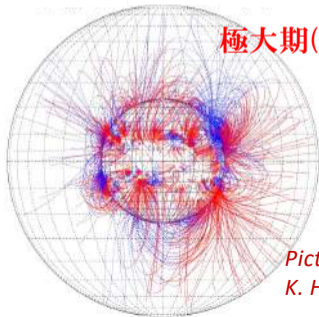
太陽風速度は名大IPS観測の緯度依存を考慮

地磁気 → 双極子磁場モデル

極小期(1996年)  
PFSS



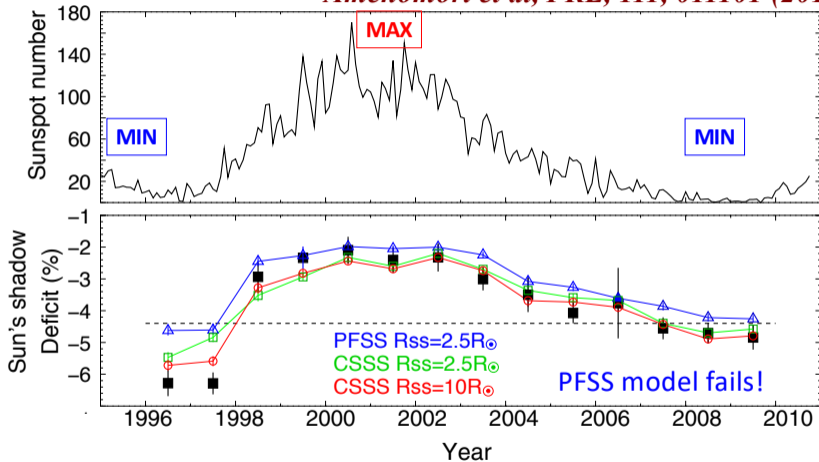
極大期(2000年)  
PFSS



*Pictures from  
K. Hakamada*

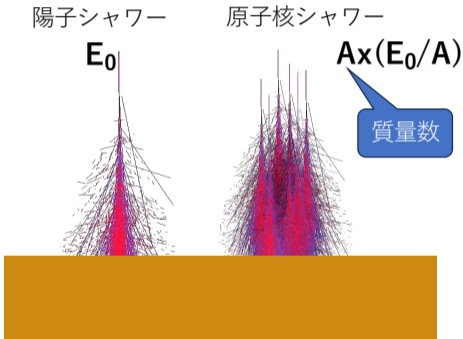
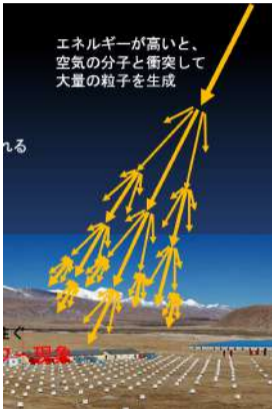
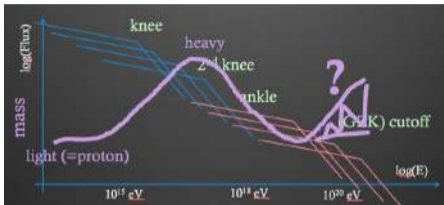
# Past Results (Tibet-II >10TeV)

*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

# 原子核種の決定 (標準モデルの検証)



## 標準モデル

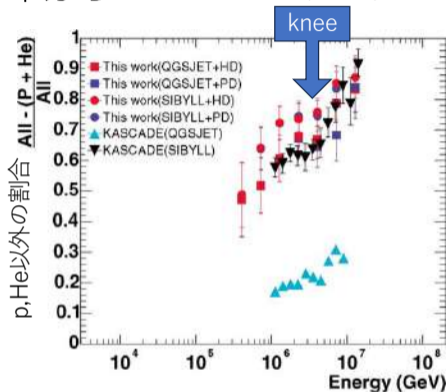
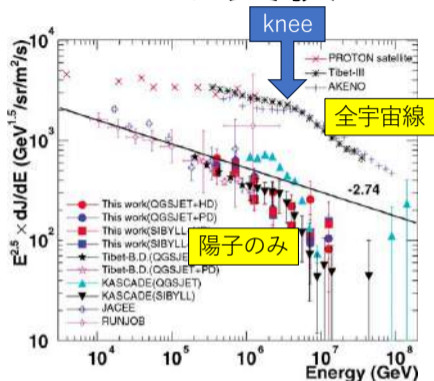
- Kneeまでは軽くて (陽子中心)
- Knee以上はだんだん重くなる
- 2nd kneeで一番重い

はず

観測するのは粒子増殖の成れの果て  
どうやって入射粒子の種類を判別？

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  
陽子 (軽い原子核) のシャワーは発達中  
重い原子核のシャワーは発達末期<sup>40</sup>

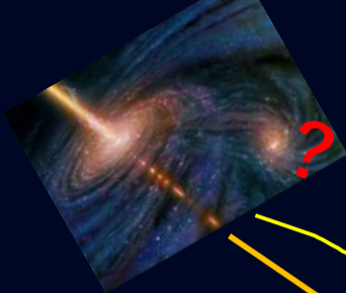
# チベット実験による陽子のスペクトル



- 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・新世代実験によるミュオンの高精度測定





$10^{20}\text{eV}$

$10^{19}\text{eV}$

なぜ起源がわからない？

=> 強敵：宇宙磁場



$10^{15}\text{eV CR}$

$\pi^0$

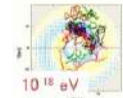
Interstellar Matter

$10^{15}\text{eV}$

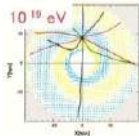
$10^{14}\text{eV } \gamma$

戦略3：ガンマ線を狙う！

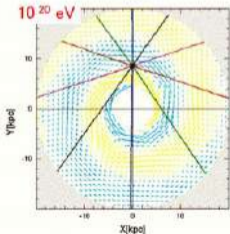
銀河系の中での宇宙線陽子の運動



$10^{18}\text{ eV}$



$10^{19}\text{ eV}$



$10^{20}\text{ eV}$

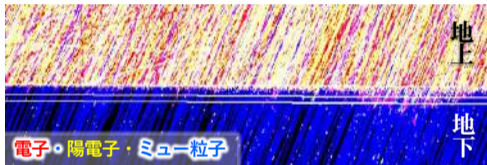
「高エネルギーガンマ線天文学」

# ガンマ線シャワーの選別

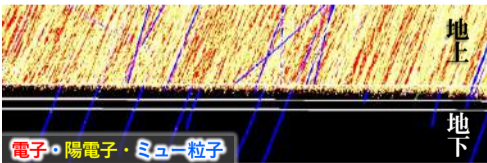
ガンマ線 → 少ない **ミュー粒子**

高い透過力 → 地下に侵入

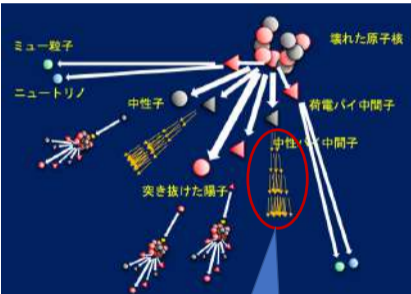
200TeV宇宙線(雑音)起源の場合



200TeVガンマ線起源の場合



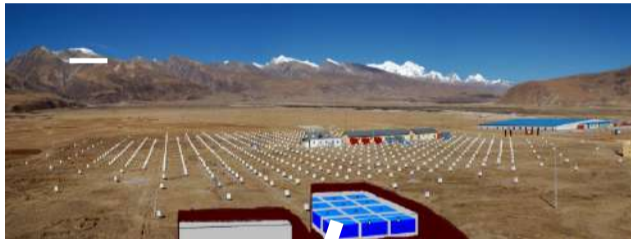
地面付近を拡大



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/cm<sup>2</sup>



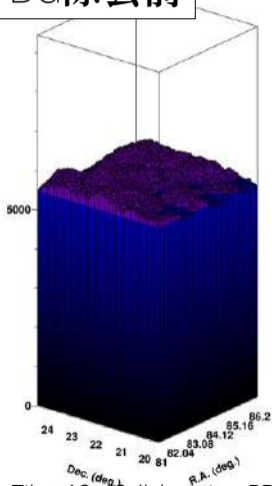


MD construction scene



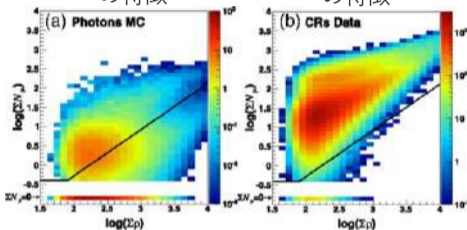
# チベットAS $\gamma$ 実験による 最高エネルギーガンマ線の発見

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

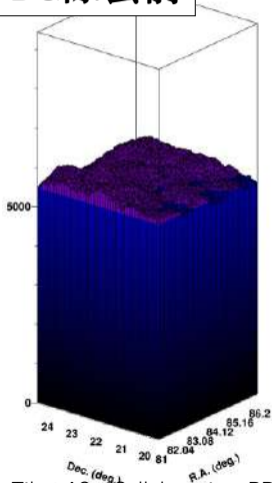


かに星雲からの100TeV超  
ガンマ線の検出に成功

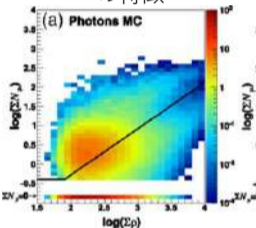


# チベットAS $\gamma$ 実験による 最高エネルギーガンマ線の発見

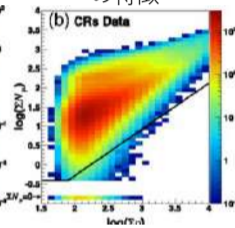
BG除去前



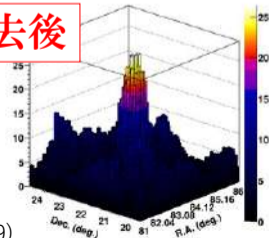
ガンマ線シャワー  
の特徴



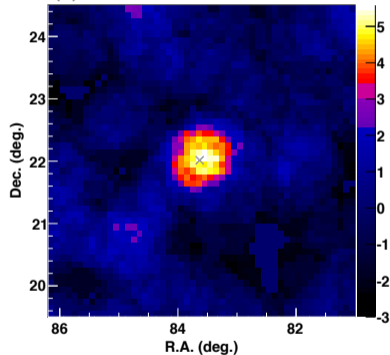
荷電宇宙線シャワー  
の特徴



BG除去後



(b)  $E > 100$  TeV



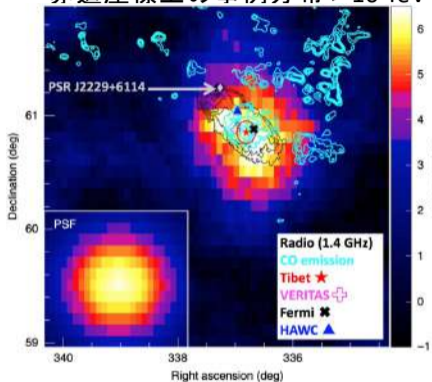
かに星雲からの100TeV超  
ガンマ線の検出に成功



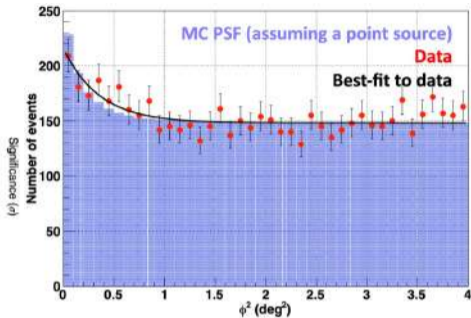
# SNR G106.3+2.7 (Tibet ASy実験による観測)

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



- 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!**

- 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.)<sup>8</sup>



# sub-PeV銀河面拡散ガンマ線

銀河系PeV宇宙線プール

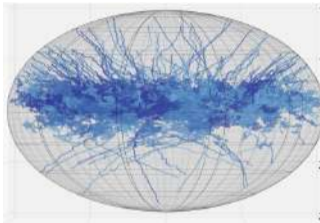
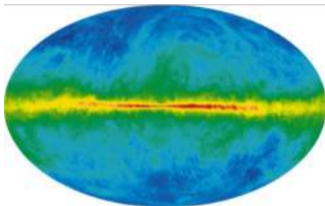


Figure from slide presented by A. Kääpä (Bergische Universität Wuppertal) at CRA2019 workshop

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

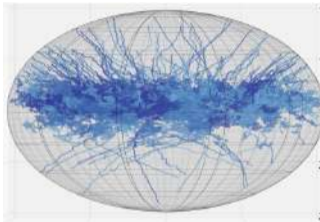
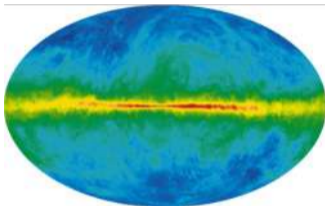


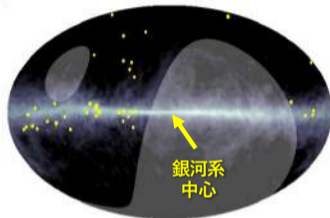
Figure from slide presented by A. Kääpä (Bergische Universität Wuppertal) at CRA2019 workshop

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)

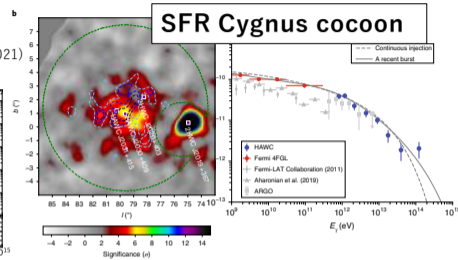
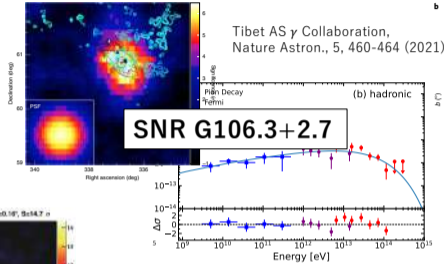
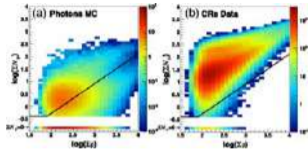


**Tibet ASy 実験**

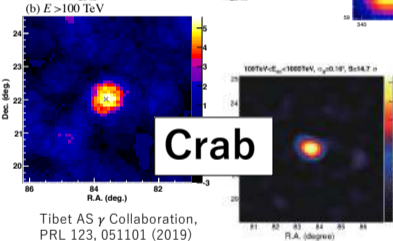
Amenomori+, PRL **126**, 141101 (2021)

- ✓ 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

# sub-PeVガンマ線天文学の夜明け

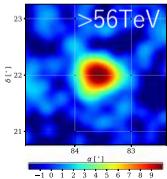


HAWC Collaboration, Nature Astron., 5, 465-471 (2021)



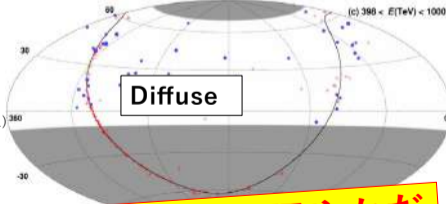
Tibet AS  $\gamma$  Collaboration, PRL 123, 051101 (2019)

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

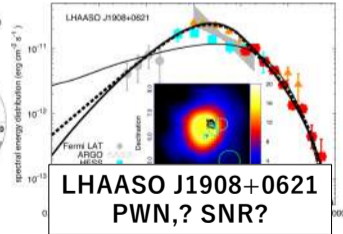


HAWC Collaboration, ApJ 881:134 (2019)

Tibet AS  $\gamma$  Collaboration, PRL 126, 141101 (2021)

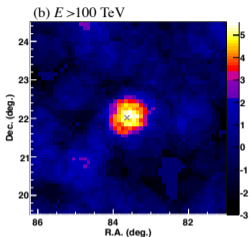


**Sub-PeVの空は賑やかだ**

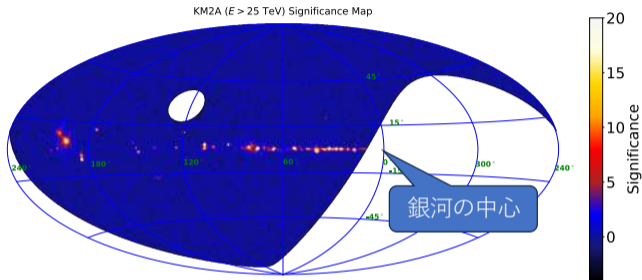


LHAASO Collaboration, Nature, 594, 33-36 (2021)

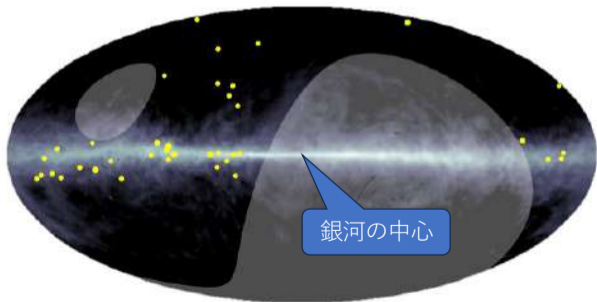
# Sub-PeVガンマ線天文学、次のステップ



Tibet AS  $\gamma$  Collaboration,  
PRL 123, 051101 (2019)



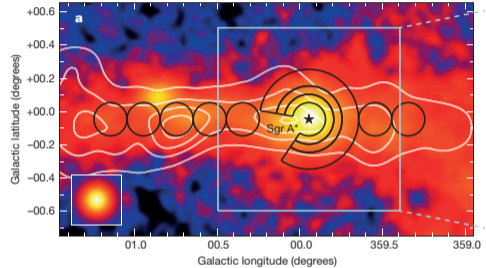
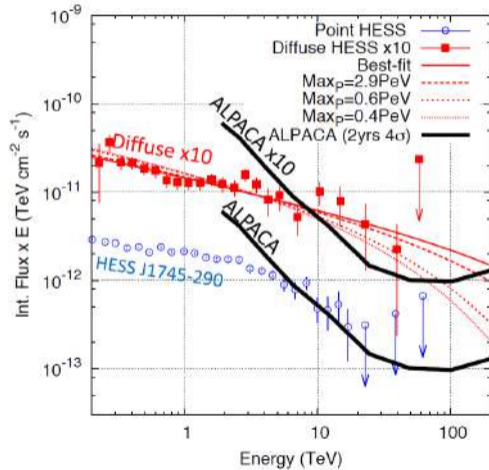
LHAASO Collaboration, arXiv:2305.1703v1 (2023)



Tibet AS  $\gamma$  Collaboration, PRL 126, 141101 (2021)

**Sub-PeVの空は賑やかだ  
次は南半球、銀河の本命！！**

# 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

# ALPACA

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

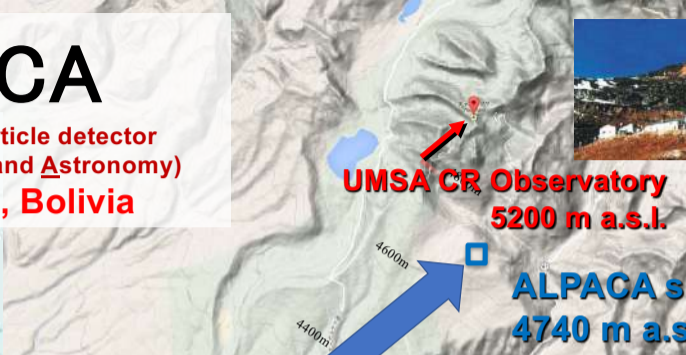


**UMSA CR Observatory  
5200 m a.s.l.**

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

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

**La Paz**



Google

54

# ALPACA空気シャワー実験

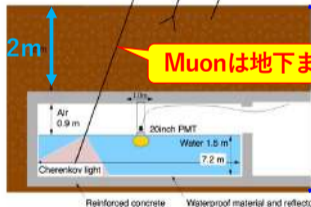
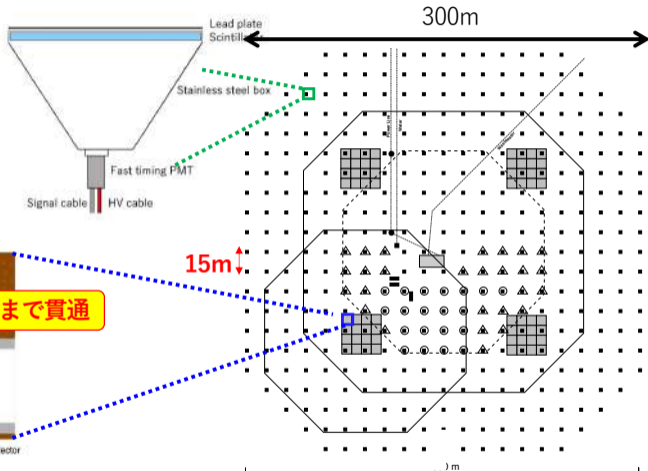
## 1. Array coverage 82,800m<sup>2</sup>

401 x 1m<sup>2</sup> 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) 3600m<sup>2</sup>

地下 2m (~16X<sub>0</sub>)に設置

58m<sup>2</sup> 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)

● 1 m<sup>2</sup> AS Detector x (97+304) (82,800 m<sup>2</sup>)  
■ 58 m<sup>2</sup> Muon Detector x (16+48) (3,700 m<sup>2</sup>)

97 detectors

# ALPAQUITA 空気シャワー実験

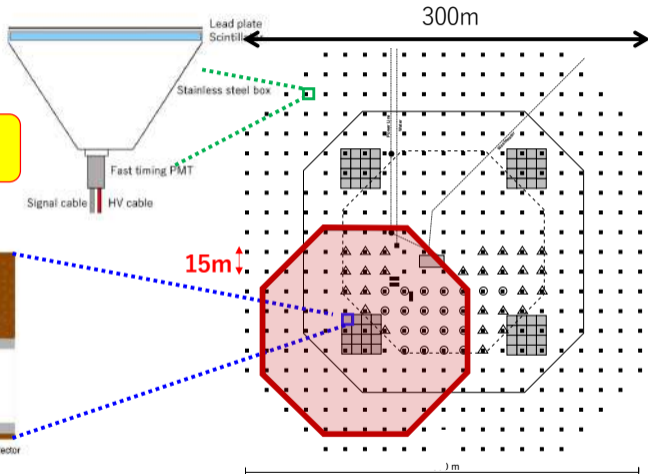
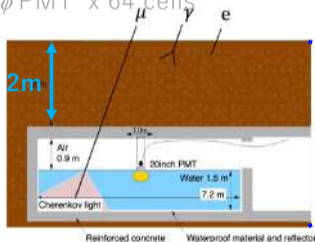
## 1. Arra coverage 82,800m<sup>2</sup>

401 x 1m<sup>2</sup> 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) 3600m<sup>2</sup>

地下 2m (~16X<sub>0</sub>) に設置  
58m<sup>2</sup> with 20"  $\phi$  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 m<sup>2</sup> AS Detector x (97+304) (82,800 m<sup>2</sup>)  
■ 58 m<sup>2</sup> Muon Detector x (16+48) (3,700 m<sup>2</sup>)

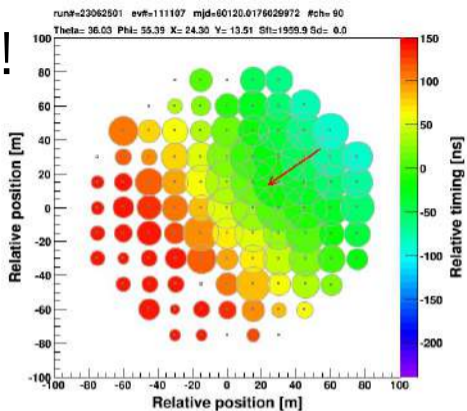
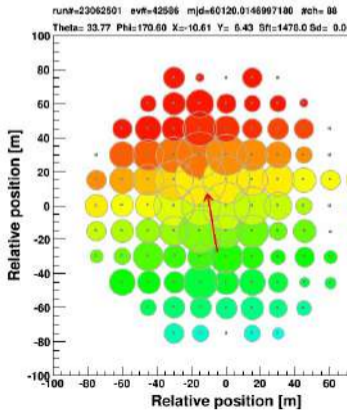
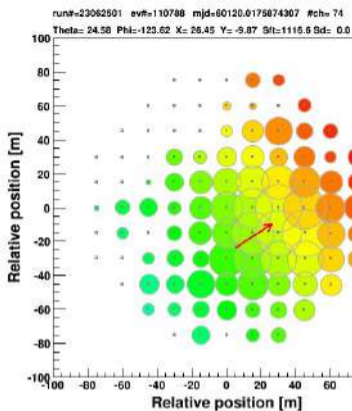
# ALPAQUITA construction in June 2022



- 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



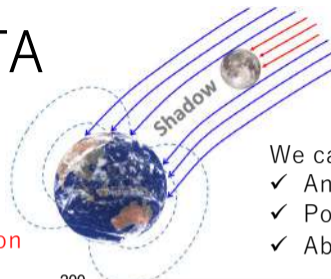
# Big Events!



$E > 100$  TeV  
(mostly hadronic CRs)

# 月の影 by ALPAQUITA

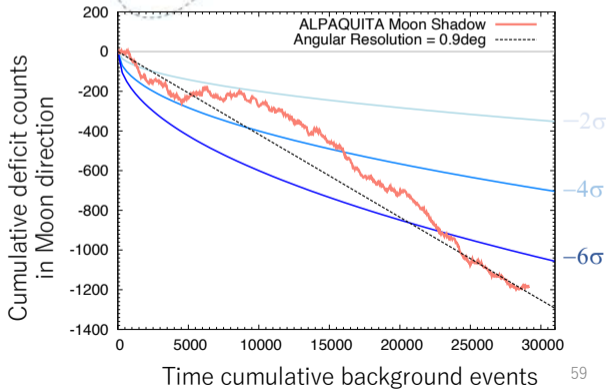
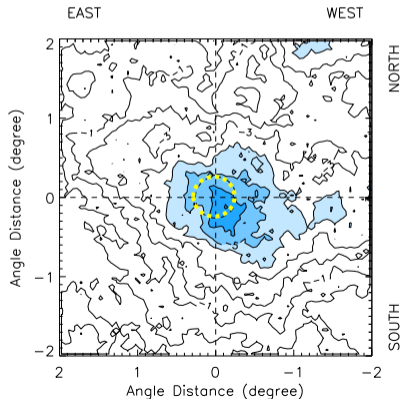
- April 7, 2023 – July 16, 2023 (83 days)
- With cable length correction
  - Successfully detected at  $6.7\sigma$
  - Westward shift  $\sim 0.2^\circ$  as expected
  - Moon shadow verified  $\sim 0.9^\circ$  resolution



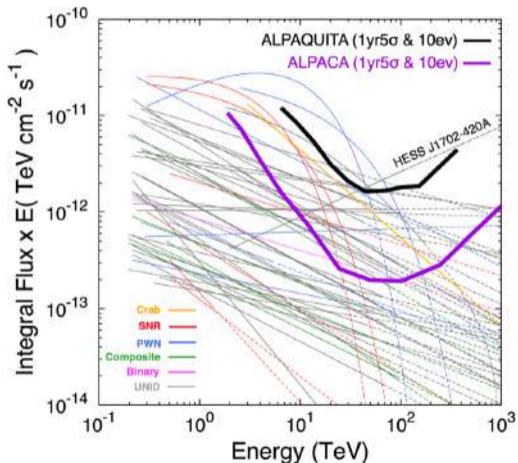
Displacement  
by geomagnetic field

$$\Delta\theta \sim \frac{1.6^\circ}{E[\text{TeV}]}$$

- We can check
- ✓ Angular resolution
  - ✓ Pointing accuracy
  - ✓ Absolute energy scale



# ALPAQUITAの感度



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

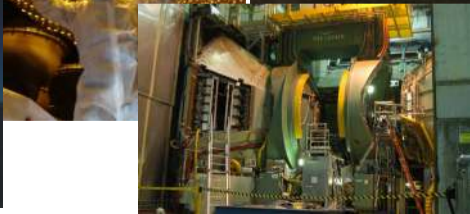


Site photo + CG image of MD by design company

- 2024年に地下ミュオン検出器（1台目）を完成
- 2025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

**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



# まとめ

- 「**銀河宇宙線の起源**」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（陽子スペクトル）**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