

2023年度学変A申請
「高エネ原子核宇宙」勉強会

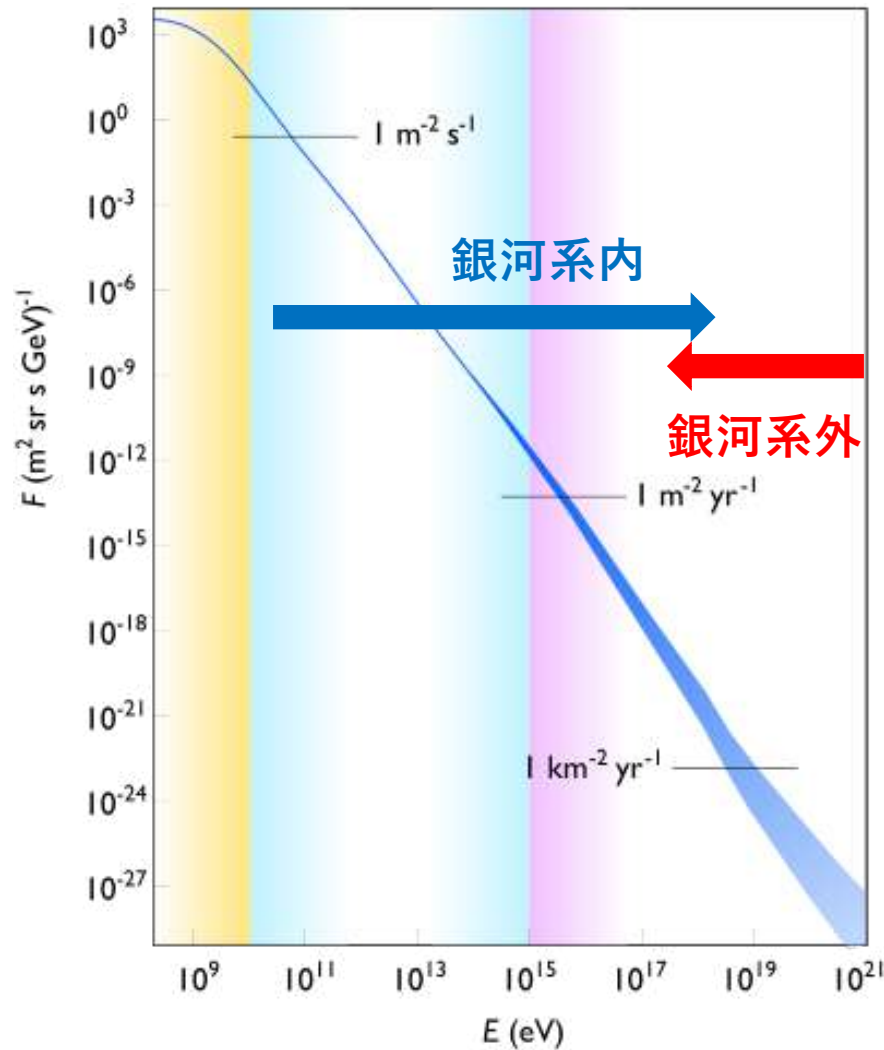
C01:最先端空気シャワー観測による
銀河系内宇宙線起源と分布の解明

研究代表者：さこ 隆志 (東大ICRR)

研究分担者：大嶋晃敏 (中部大)、片寄祐作 (横国大)、小井辰巳 (中部大)

南北半球での空気シャワー観測 (ALPACA, GRAPES-3)

実験の詳細は次の講演



銀河系内宇宙線 ($E < 10^{17}$ eV) の起源・分布・加速限界を理解する

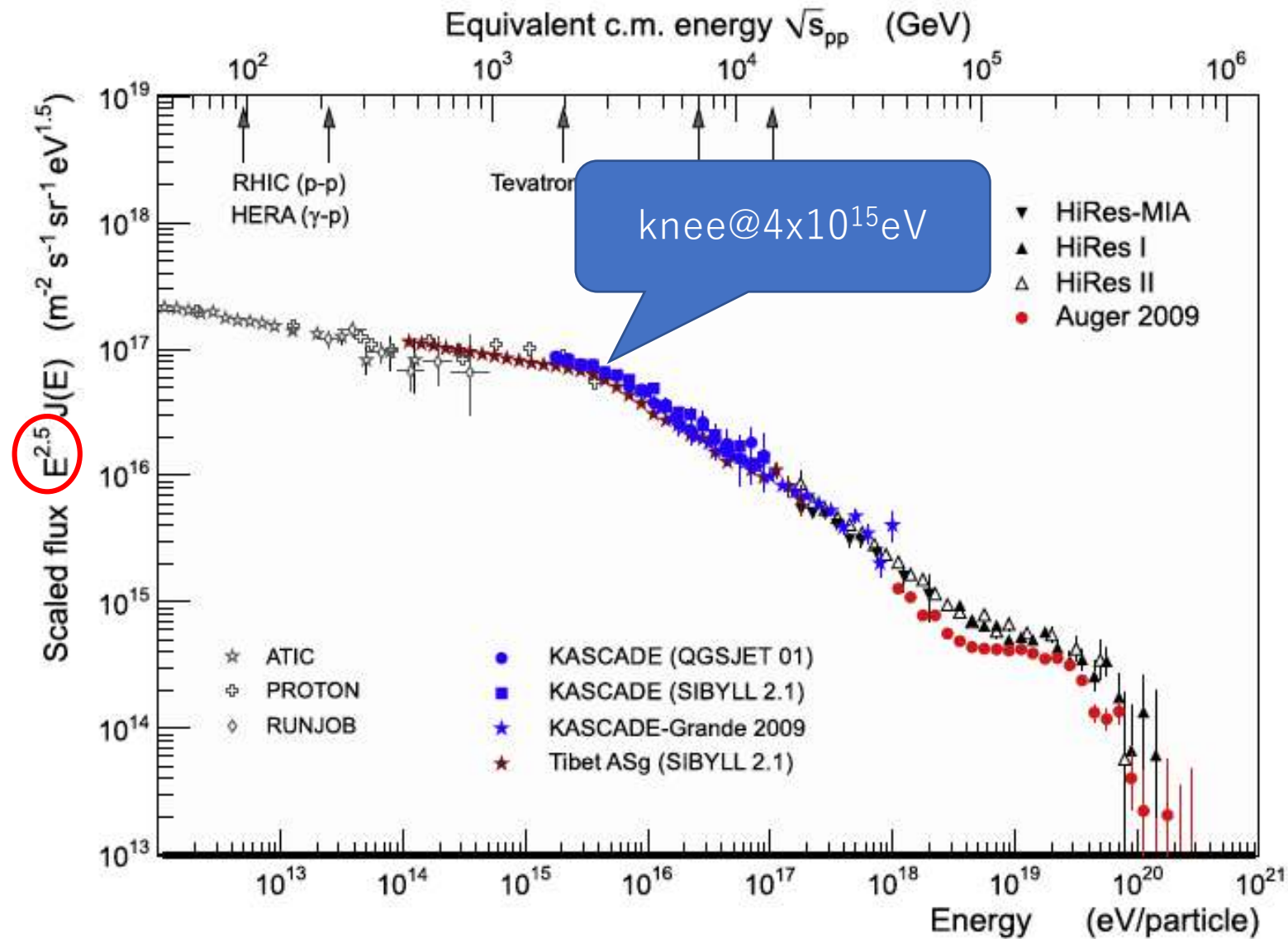
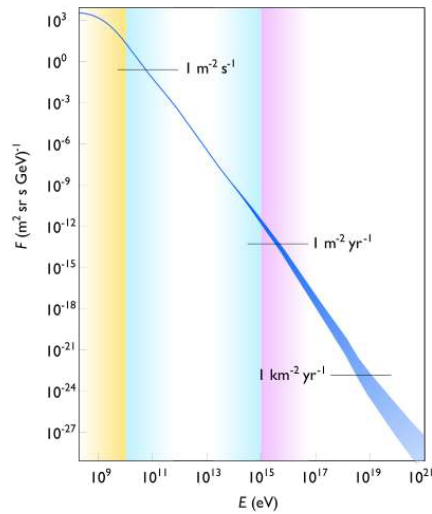
1) 現在観測可能な最大エネルギー sub-PeVからPeV(10^{14} - 10^{15} eV)のガンマ線観測

- なぜ、 10^{17} eVを知るための観測が 10^{14} eVでいいの？

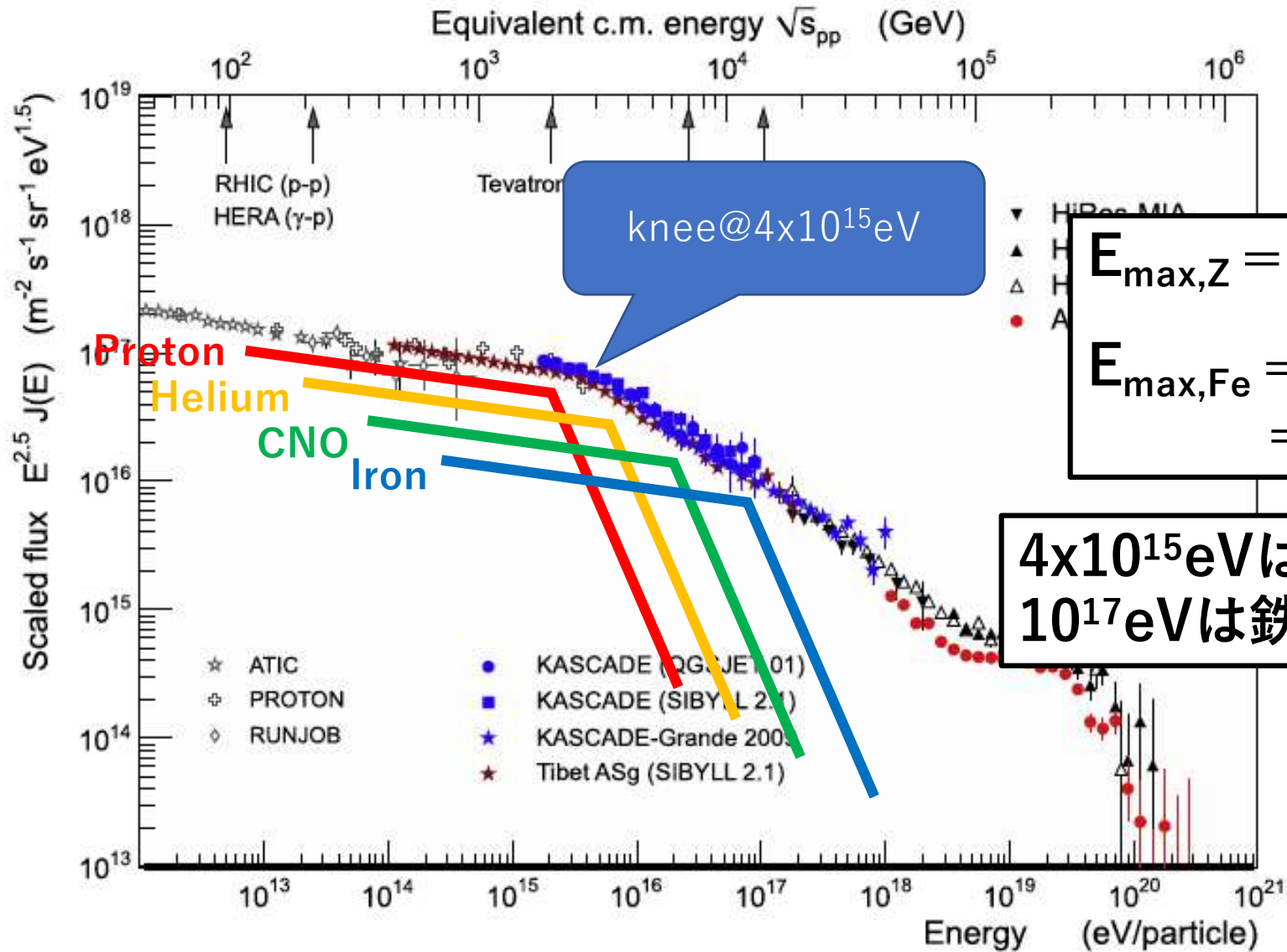
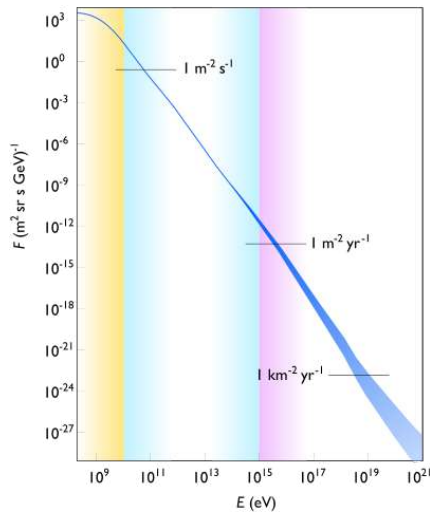
2) 大面積・高純度ミュオン検出器を利用した宇宙線原子核種決定

- なぜ核種を測りたい？
- なぜ、ミュオンを測ると核種がわかる？

宇宙線エネルギースペクトルの標準モデル



宇宙線エネルギースペクトルの標準モデル

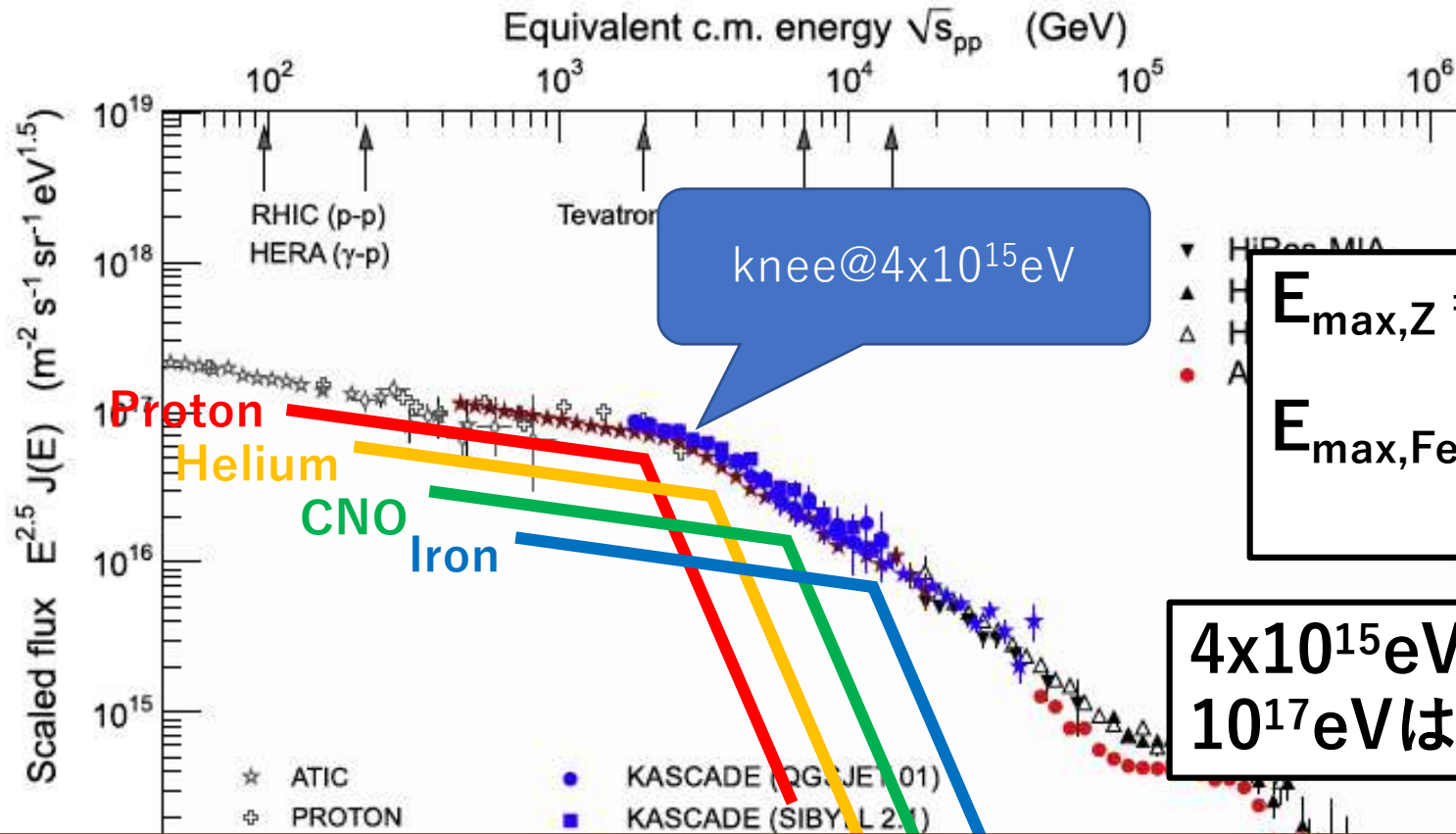
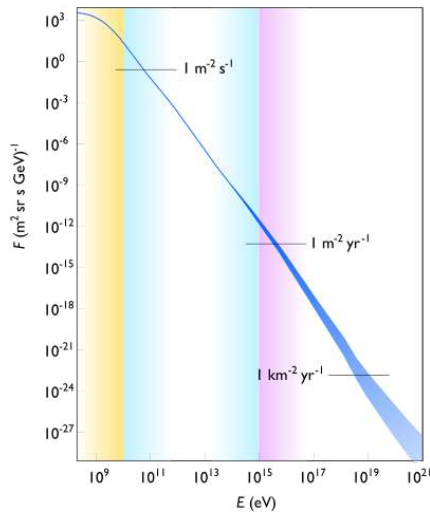


$$E_{\text{max},Z} = Z \times E_{\text{max},p}$$

$$E_{\text{max},\text{Fe}} = 26 \times 4 \times 10^{15} \text{ eV} = 10^{17} \text{ eV}$$

$4 \times 10^{15} \text{ eV}$ は proton knee
 10^{17} eV は鉄knee

宇宙線エネルギースペクトルの標準モデル



$$E_{\max,Z} = Z \times E_{\max,p}$$

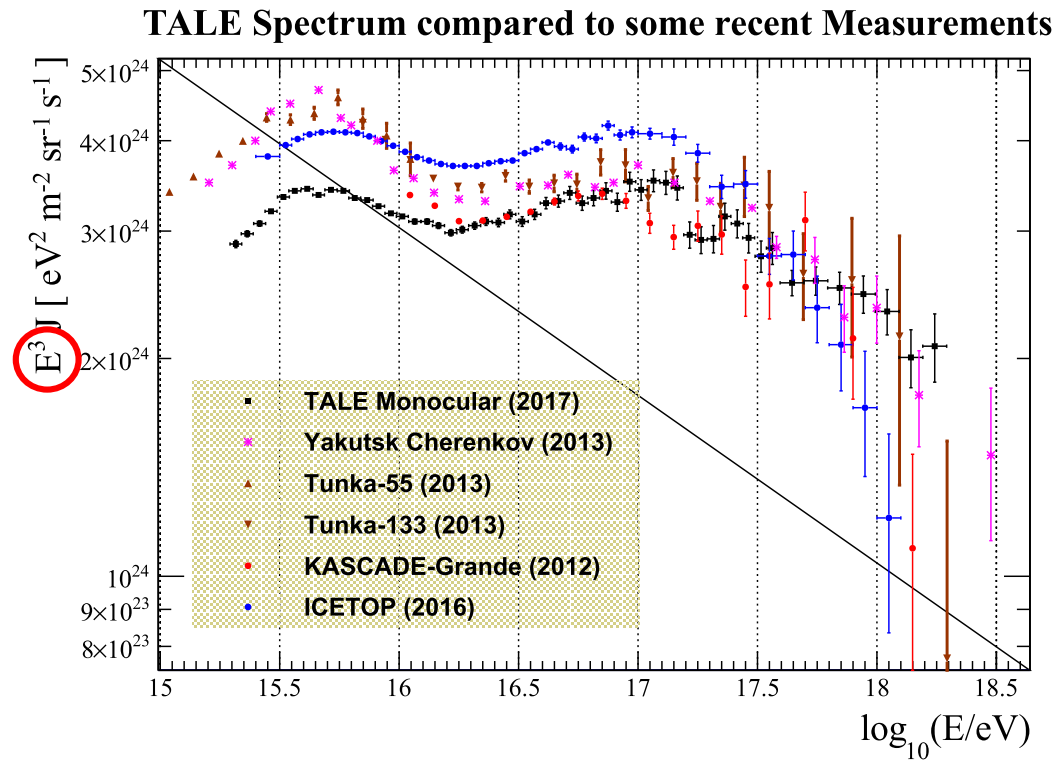
$$E_{\max,Fe} = 26 \times 4 \times 10^{15} \text{ eV} = 10^{17} \text{ eV}$$

$4 \times 10^{15} \text{ eV}$ は proton knee
 10^{17} eV は鉄knee

調べること：

1. 10^{17} eV に kneeがあるのか？
2. $>10^{15} \text{ eV}$ で質量組成が変化しているか？
3. 核子あたりの最大エネルギー $E_{\max,Z}/A = (Z/A)E_{\max,p} = 2 \times 10^{15} \text{ eV}$ なので、ガンマ線はPeVで打ち止め

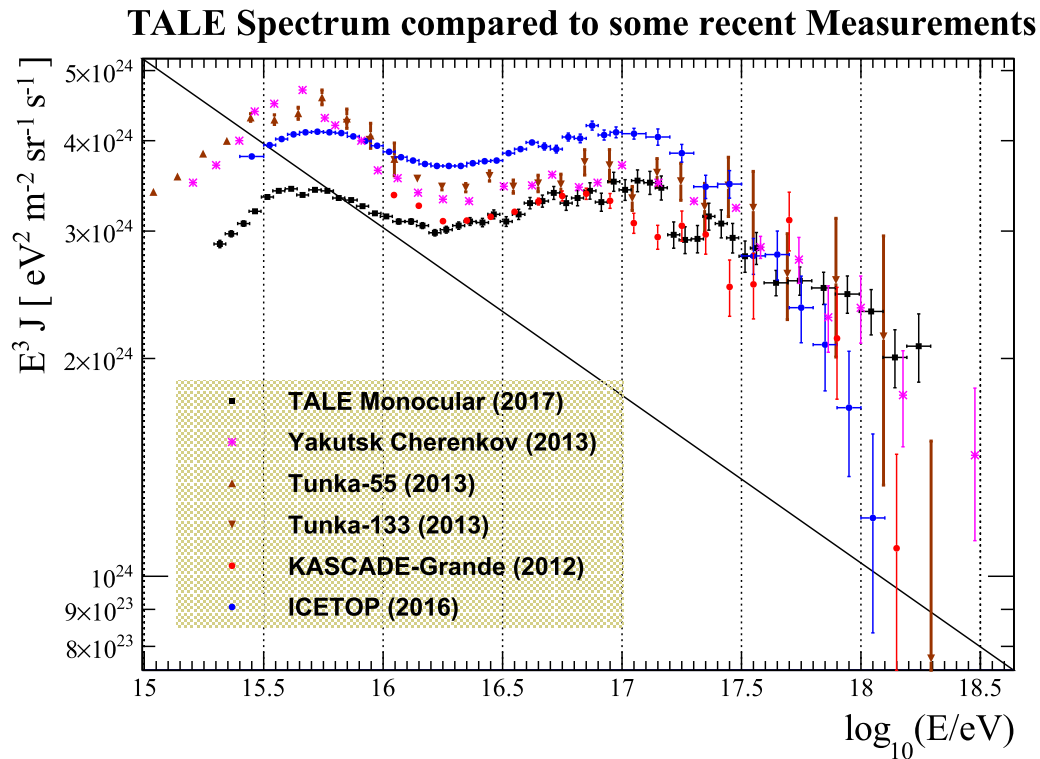
標準モデルの証拠？



TA, ApJ. 865:74 (2018)
(TA Low Energy Extension)

確かに、 10^{17}eV に折れ曲がり！

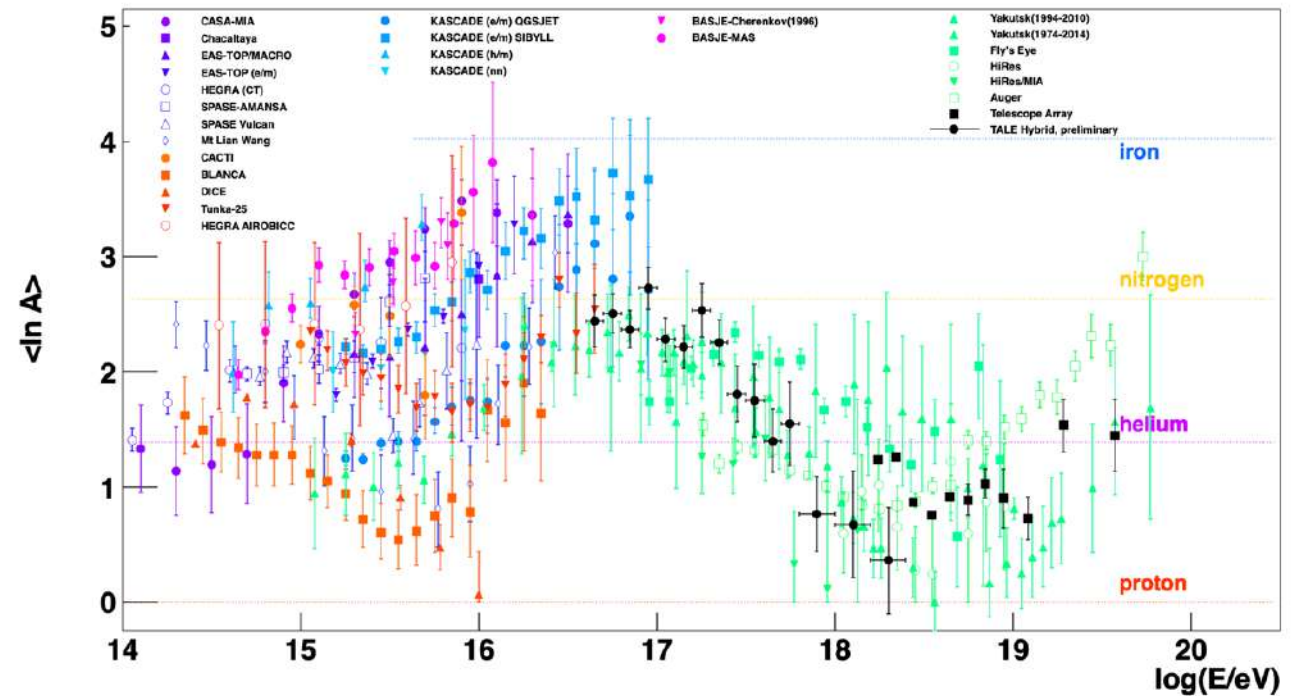
標準モデルの証拠？



TA, ApJ. 865:74 (2018)
(TA Low Energy Extension)

確かに、 $10^{17}eV$ に折れ曲がり！

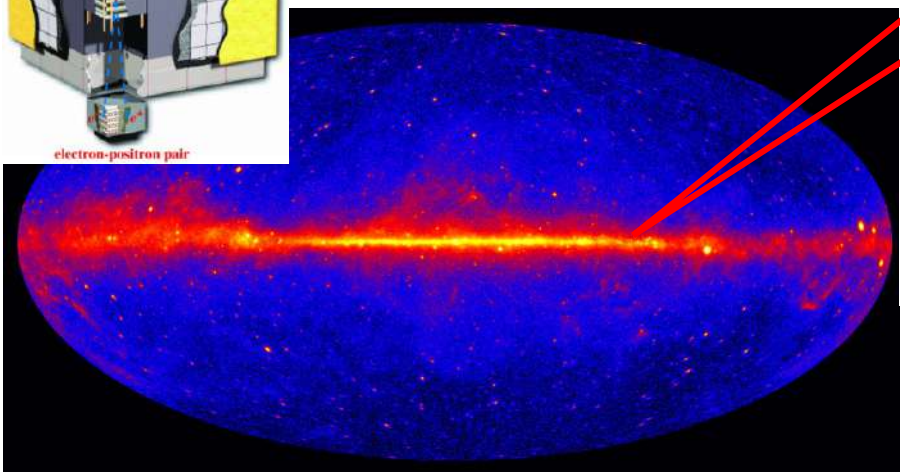
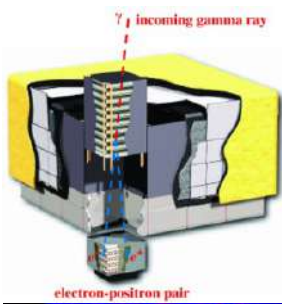
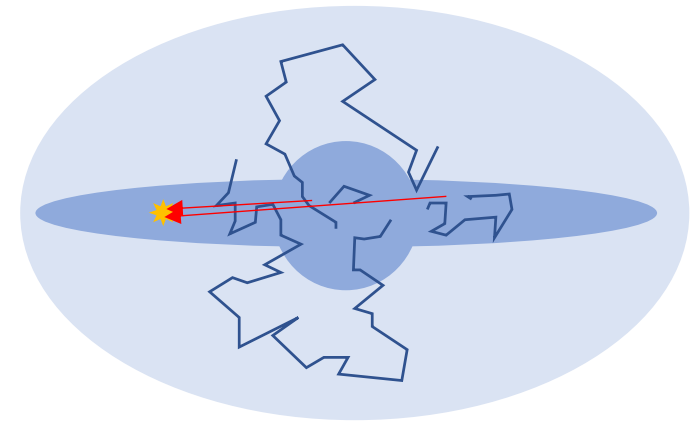
<ln A> vs log E



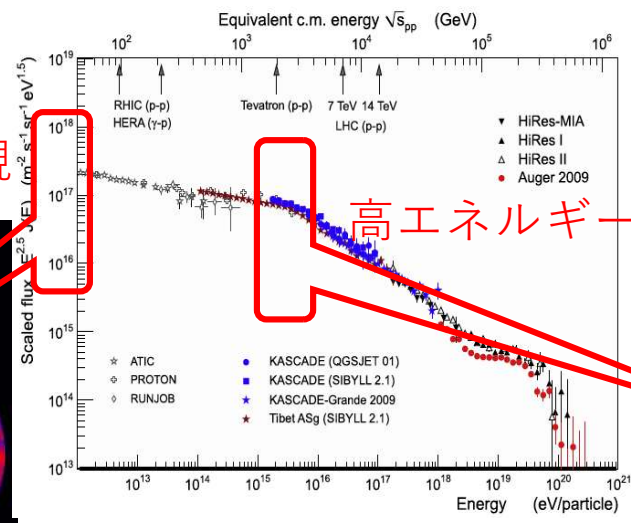
Compiled by K. Fujita (ICRR)

軽 => 重 => 軽 => 重? はよさそう
でも...

sub-PeVガンマ線観測 ～PeV/核子宇宙線の証拠～

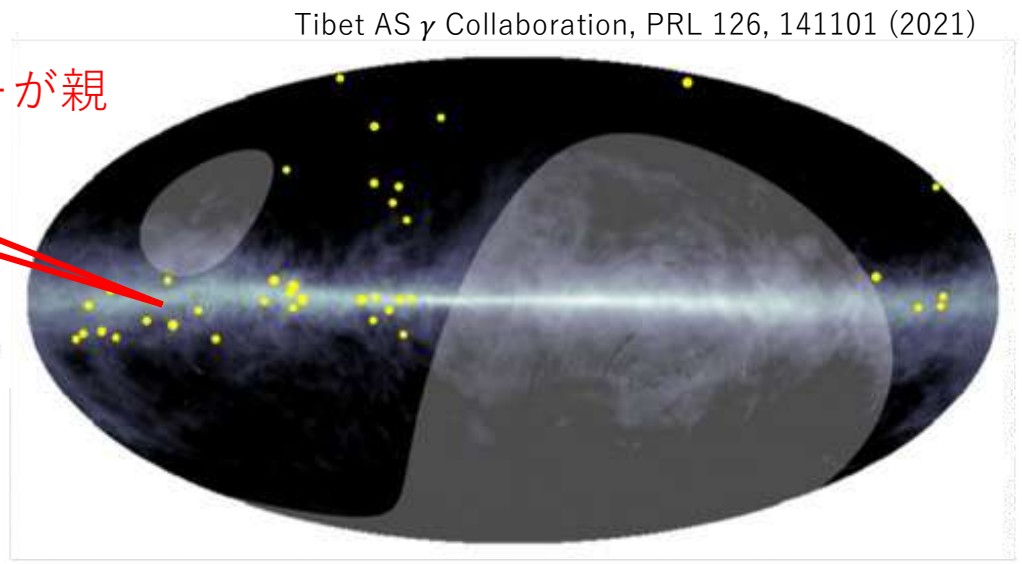


Fermi LAT, ~GeV



低エネルギーが親

高エネルギーが親



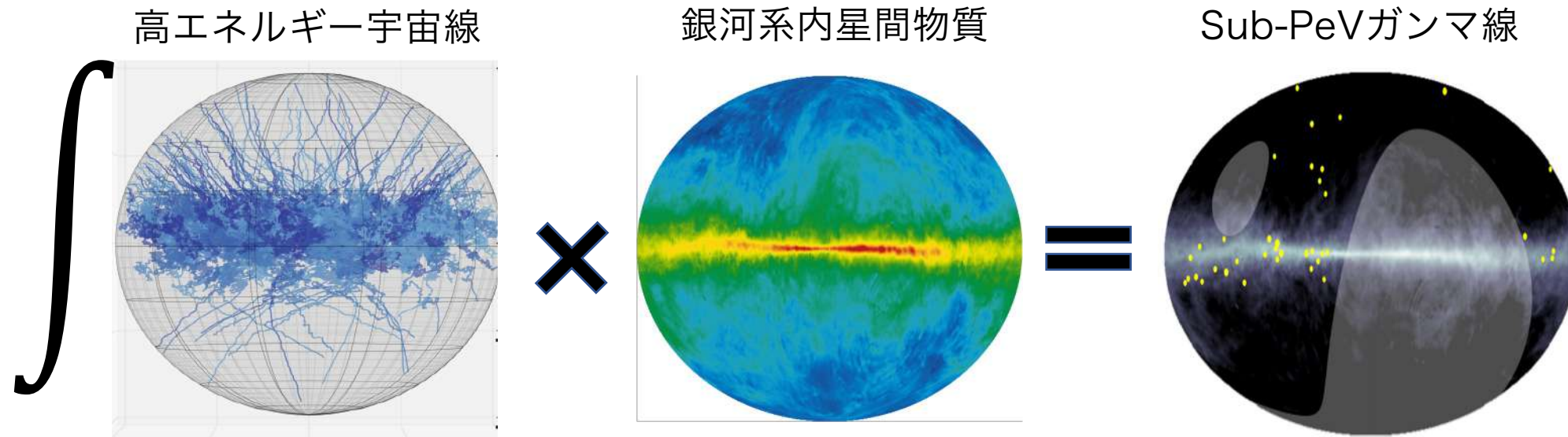
Tibet ASγ Collaboration, PRL 126, 141101 (2021)

Tibet ASγ experiment, >400TeV

- 宇宙線は本当に銀河系の中に「閉じ込め」られている (confinement)
- ガンマ線の強度は $\int \frac{I_{CR} \times \rho_{ISM}}{4\pi r^2} ds$ に比例
- ガンマ線による銀河空間のリモートセンシング

銀河面からのsub-PeVガンマ線の解釈

$$N_{\gamma}(E_{\gamma}, \theta) = \sum_i \int^{\Omega} \int^{E_{CR}} \frac{\sigma_{CR \rightarrow \gamma}(E_{\gamma}, E) \rho N_i(E, \vec{x})}{4\pi r^2} dE ds$$



高エネルギー宇宙線が作る宇宙線プール
Figure from slide presented by A. Kääpä (Bergische Universität Wuppertal) at CRA2019 workshop

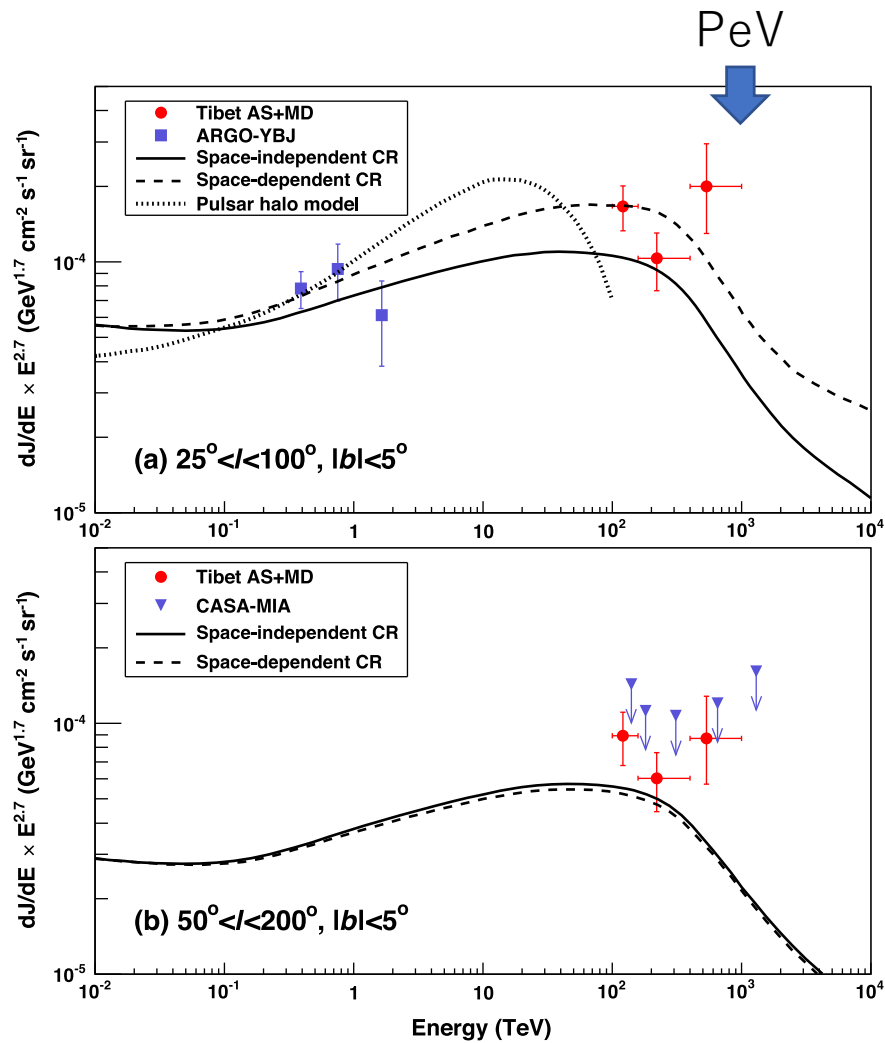
電波(21cm) で見た水素原子の分布
Hartmann et al. (1997)
Dickey & Lockman (1990)

Tibet実験の観測結果



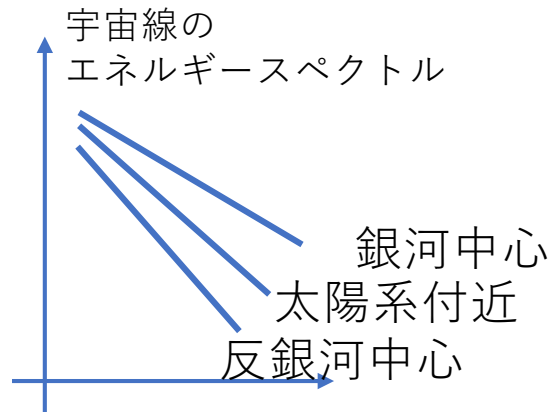
- 宇宙線の伝播 ~低エネルギーとの比較によるエネルギー依存性、銀河磁場構造
- 星間物質の空間分布 ~電波天文学との連携
- 宇宙線と星間物質の衝突による π^0 生成断面積 ~LHCエネルギーでのハドロン反応

宇宙線のリモートセンシング

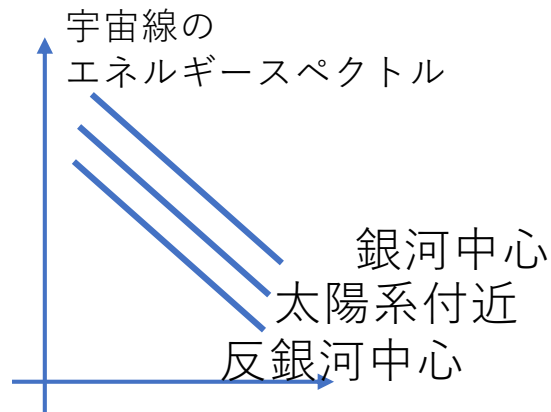


Tibet AS γ Collaboration, PRL 126, 141101 (2021)

Lipari and Vernetto, PRD 98, 043003 (2018)の予想と比較

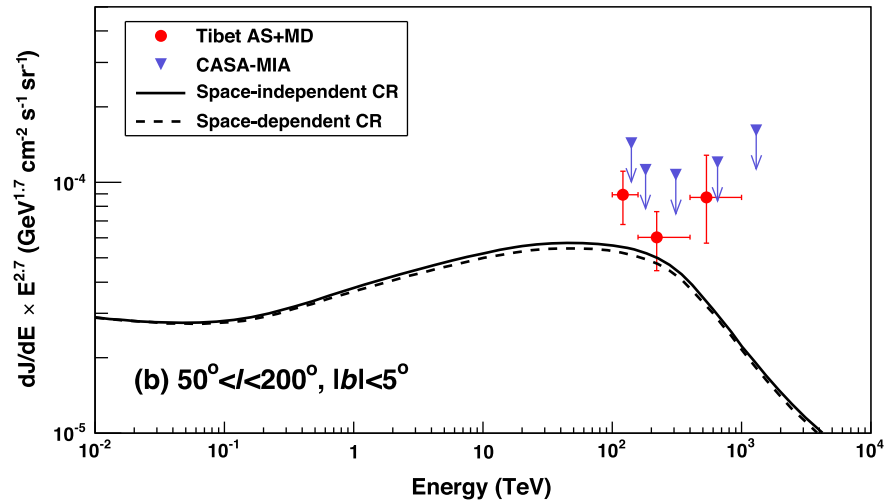
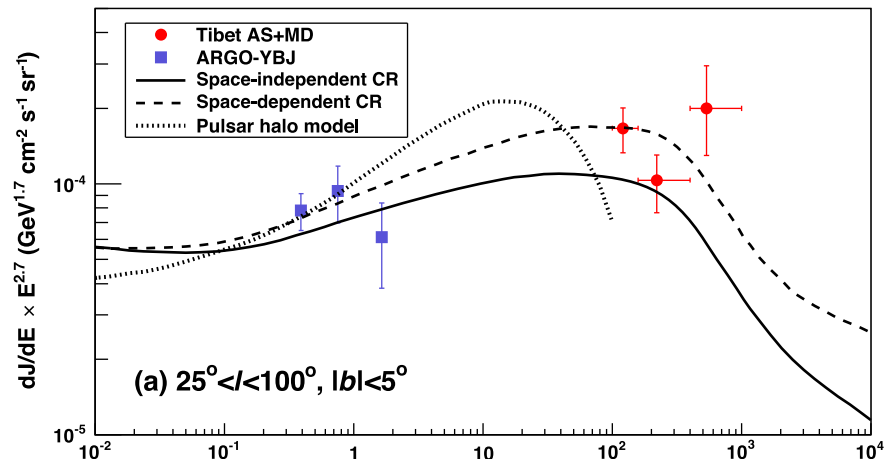


Space dependent
(non-factorized)



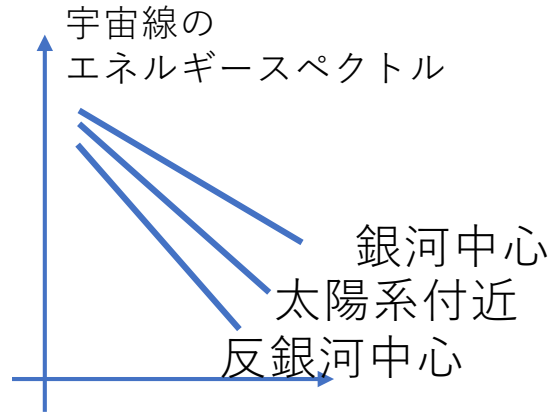
Space independent
factorized)

宇宙線のリモートセンシング

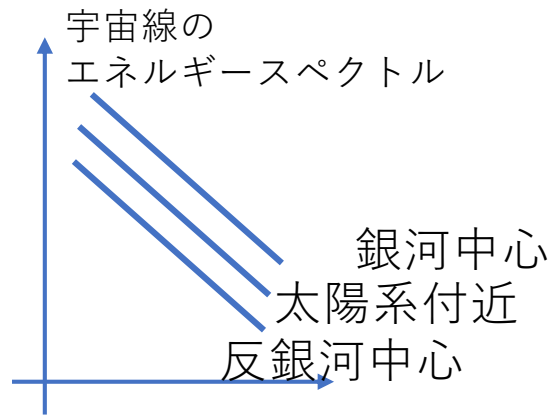


Tibet AS γ Collaboration, PRL 126, 141101 (2021)

Lipari and Vernetto, PRD 98, 043003 (2018)の予想と比較

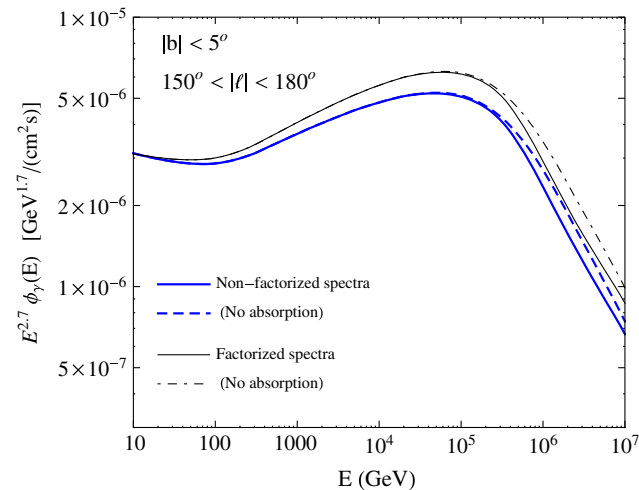
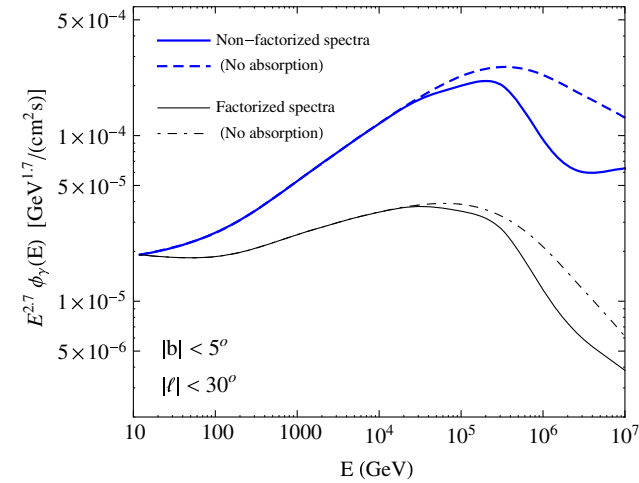


Space dependent
(non-factorized)



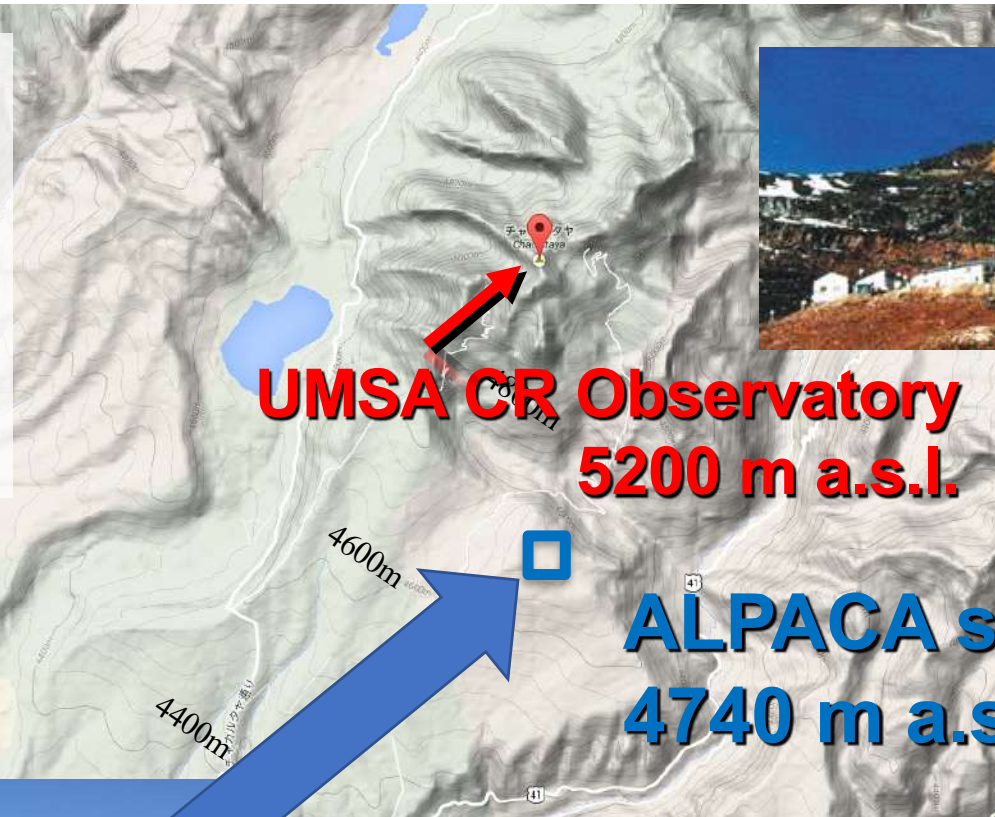
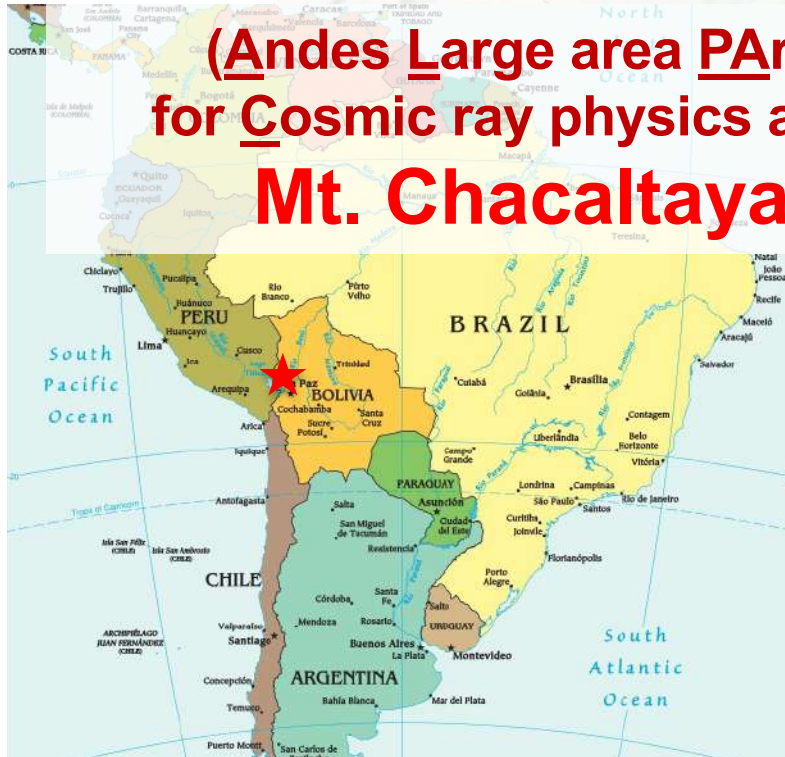
Space independent
factorized)

Lipari and Vernetto, PRD 98, 043003 (2018)



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)**

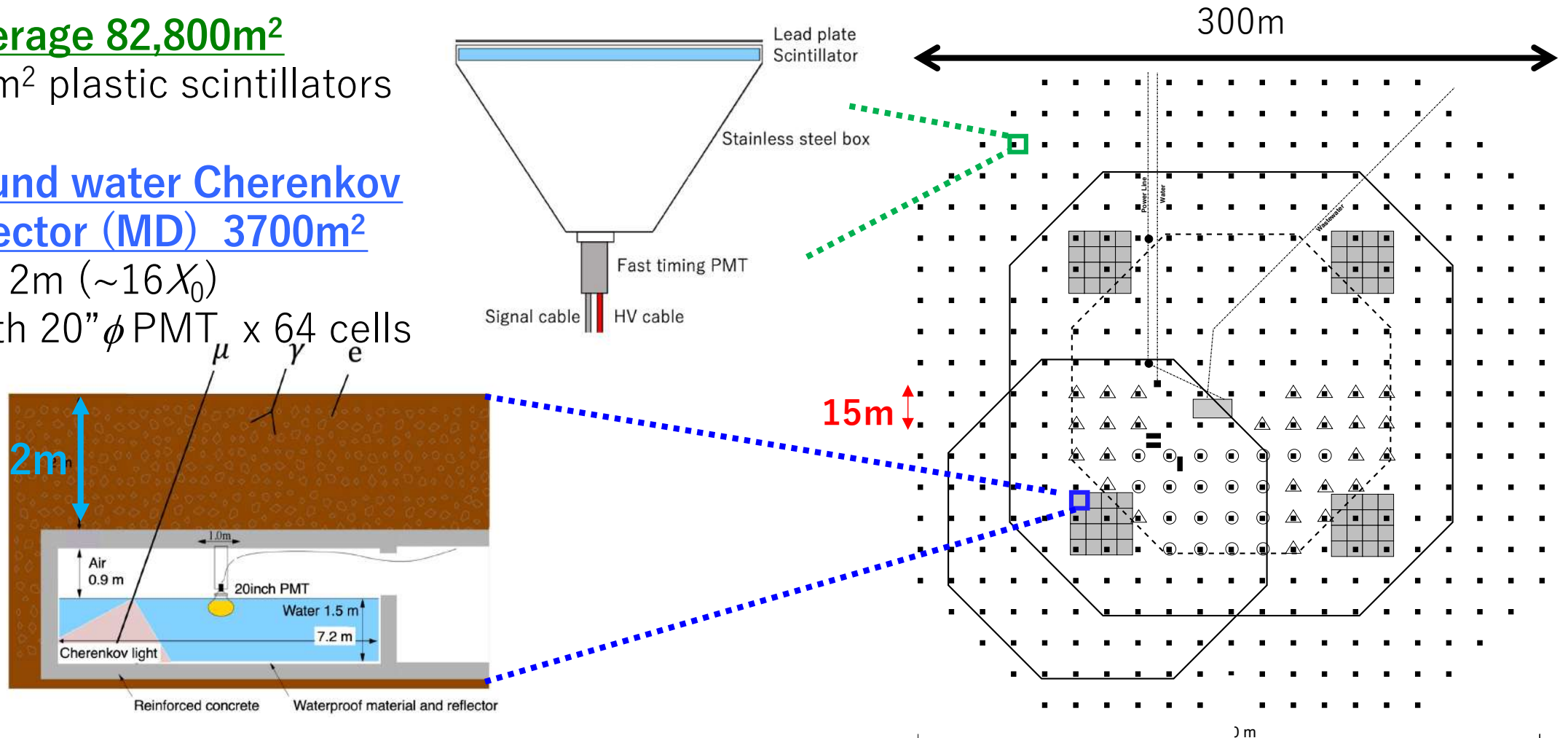


La Paz

ALPACA Array

1. Array coverage 82,800m²
 = 401 x 1m² plastic scintillators

2. Underground water Cherenkov muon detector (MD) 3700m²
 Soil over 2m (~16X₀)
 = 58m² with 20" ϕ PMT x 64 cells



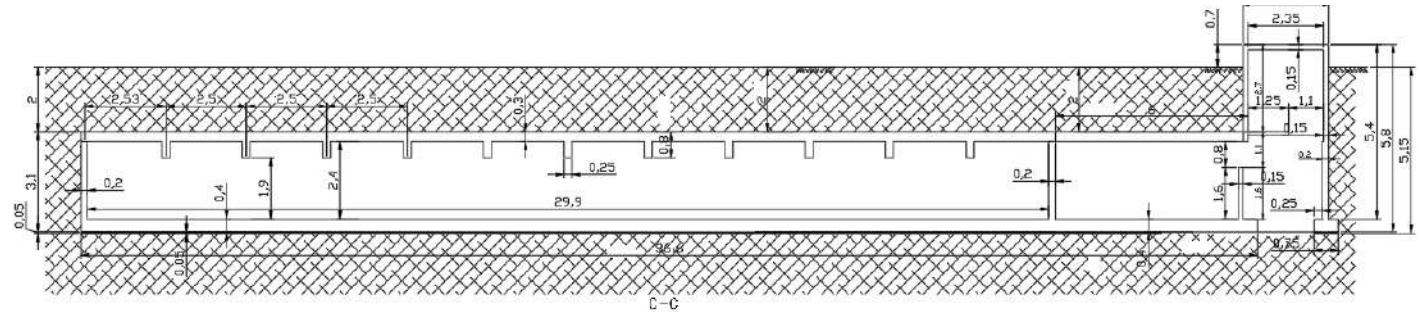
- ✓ Cosmic-ray BG rejection power >99.9% @100TeV.
- ✓ Angular resolution ~0.2° @100TeV, Energy resolution ~20%@100TeV
- ✓ 100% duty cycle, FOV $\theta_{zen} < 40^\circ$ (well studied), $\theta_{zen} < 60^\circ$ (in study)

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

Underground Muon Detector (MD)



Site photo + CG image of MD by design company



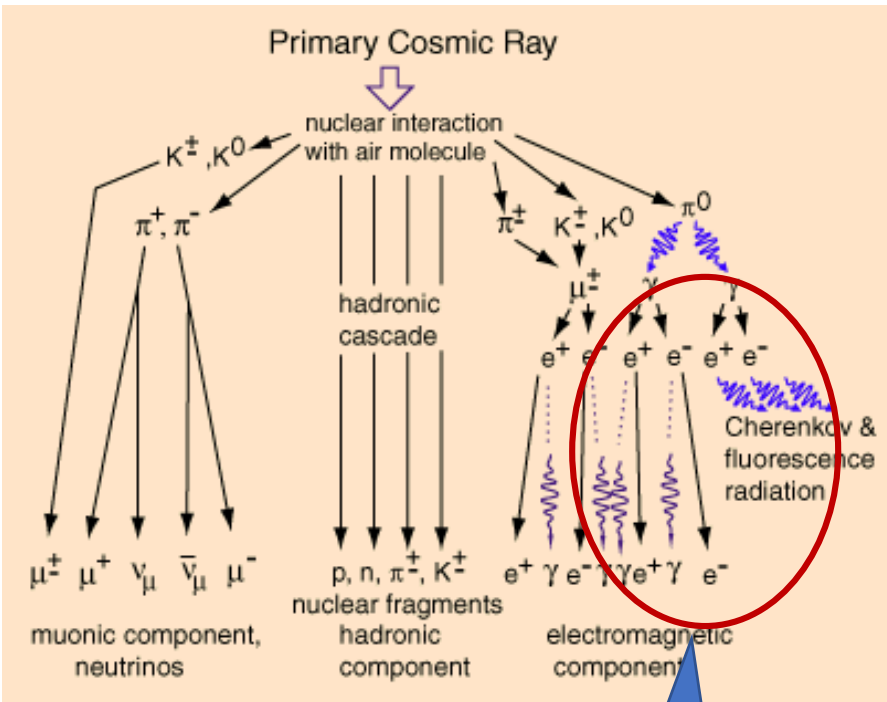
- Total 4 units, each composes of 16 cells of 7.5m x 7.5m.
- 2m soil overburden allows $>1\text{GeV}$ muon penetration.
- Design finalizing with Bolivian construction design company.
- Construction of first MD in this fiscal year.



ガンマ線の選別

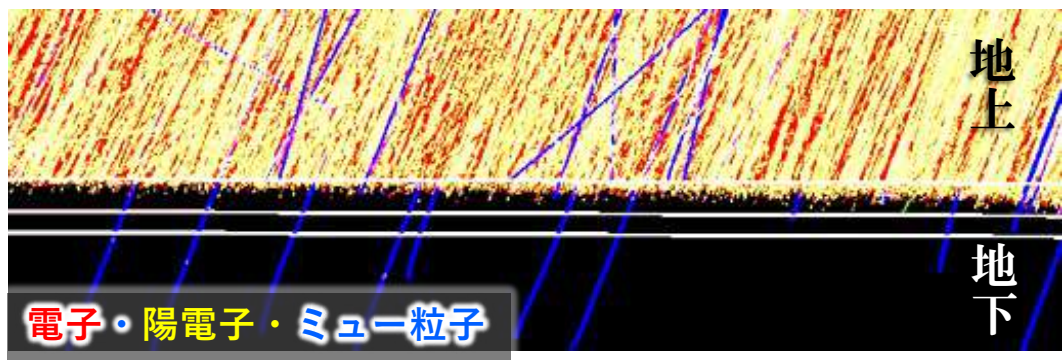
ガンマ線 → 少ない **ミュー粒子**

高い透過力 → 地下に侵入

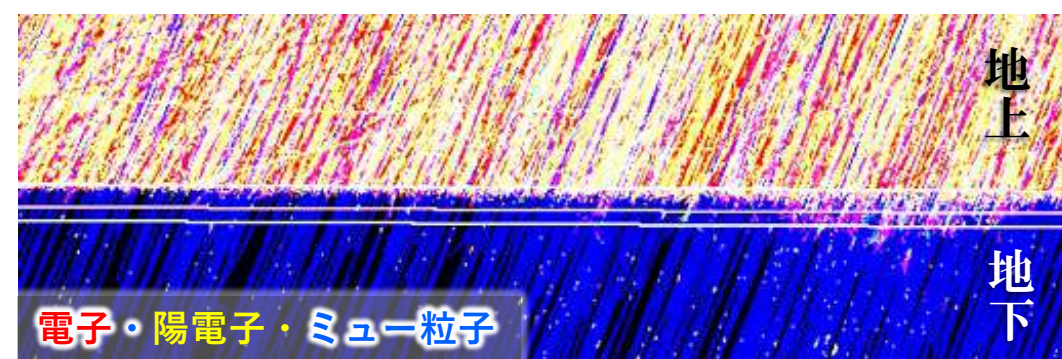


ガンマ線シャワーはこれだけ

200TeVガンマ線起源の場合

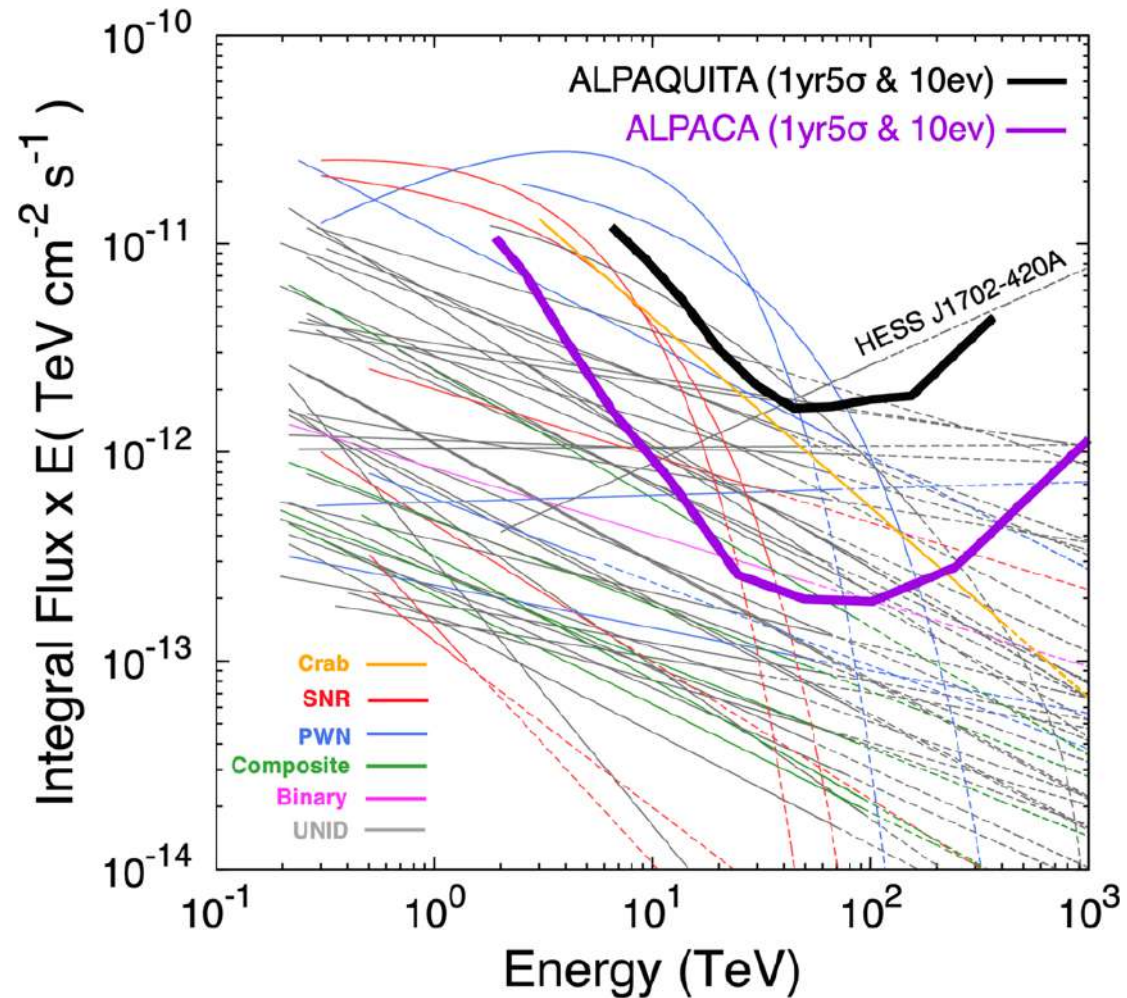


200TeV宇宙線(雑音)起源の場合



地面付近を拡大

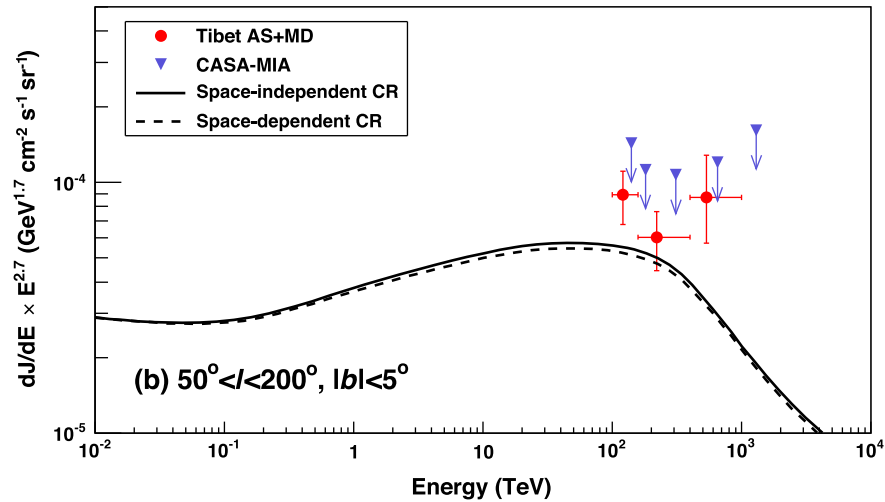
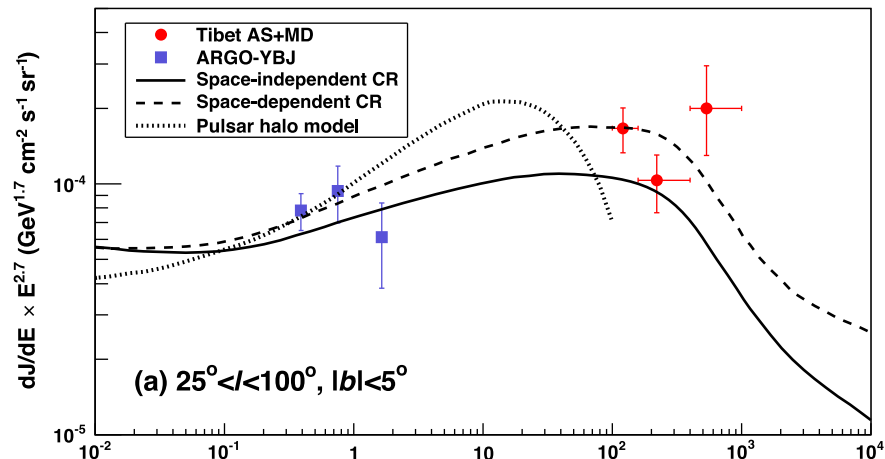
ALPACAの天体検出感度



- S.Kato et al., Experimental Astronomy (2021) 52:85-107
- TeVで既知の多くの天体を sub-Pev-PeVで検出可能

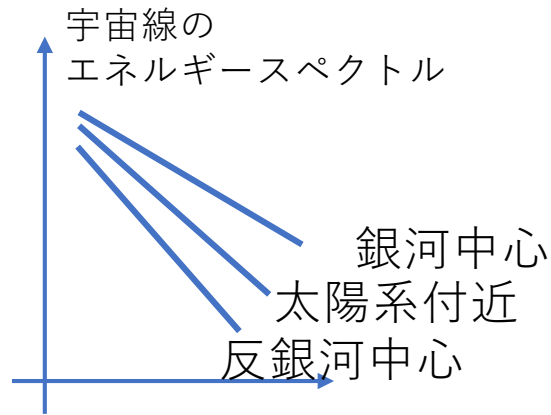
- ¼ ALPACA = ALPAQUITAの地上検出器稼働開始
- 今年度内に地下MD1号機建設開始
- Full ALPACAに順次拡張 (特推)

宇宙線のリモートセンシング

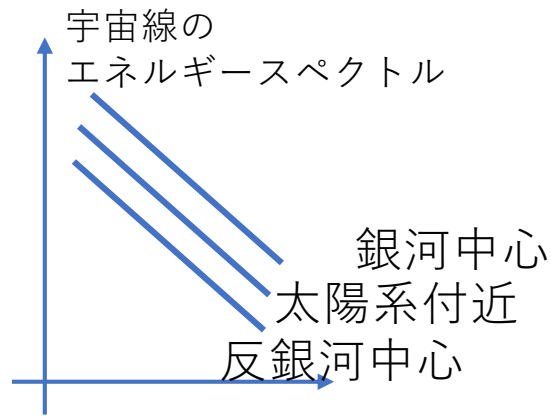


Tibet AS γ Collaboration, PRL 126, 141101 (2021)

Lipari and Vernetto, PRD 98, 043003 (2018)の予想と比較

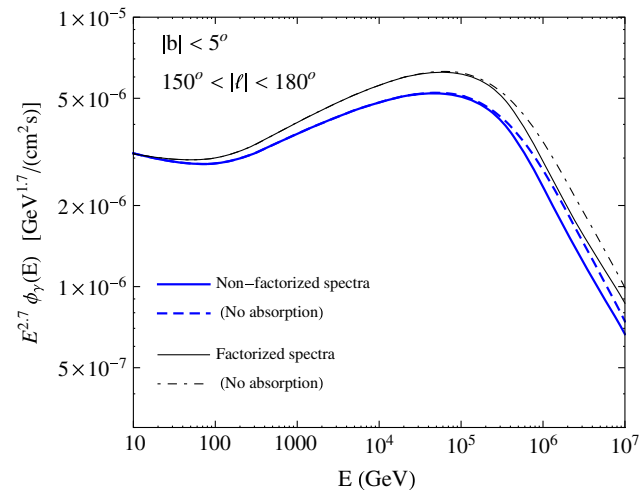
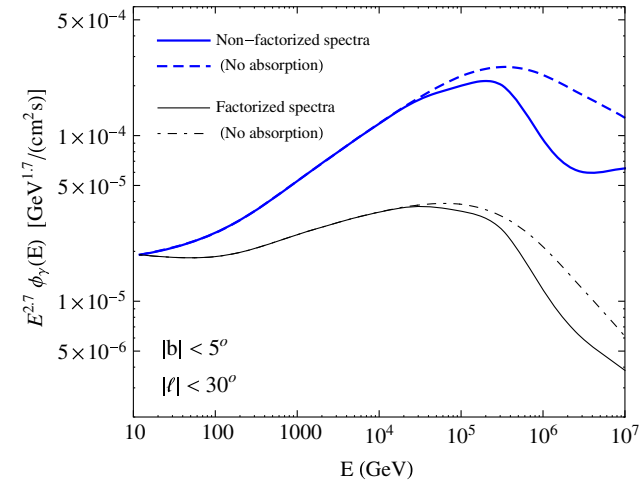


Space dependent
(non-factorized)



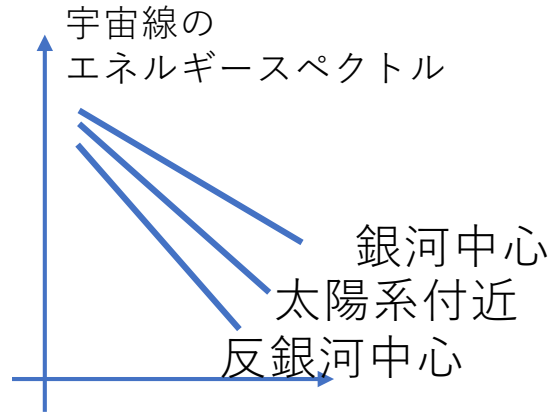
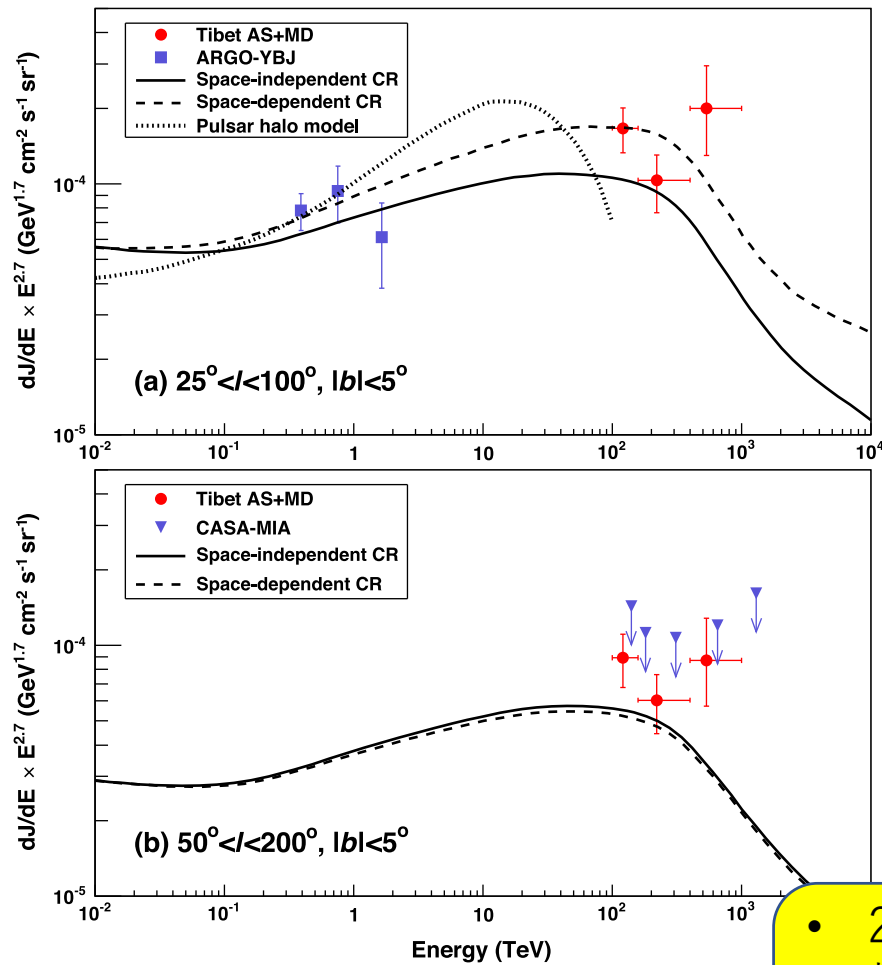
Space independent
factorized)

Lipari and Vernetto, PRD 98, 043003 (2018)

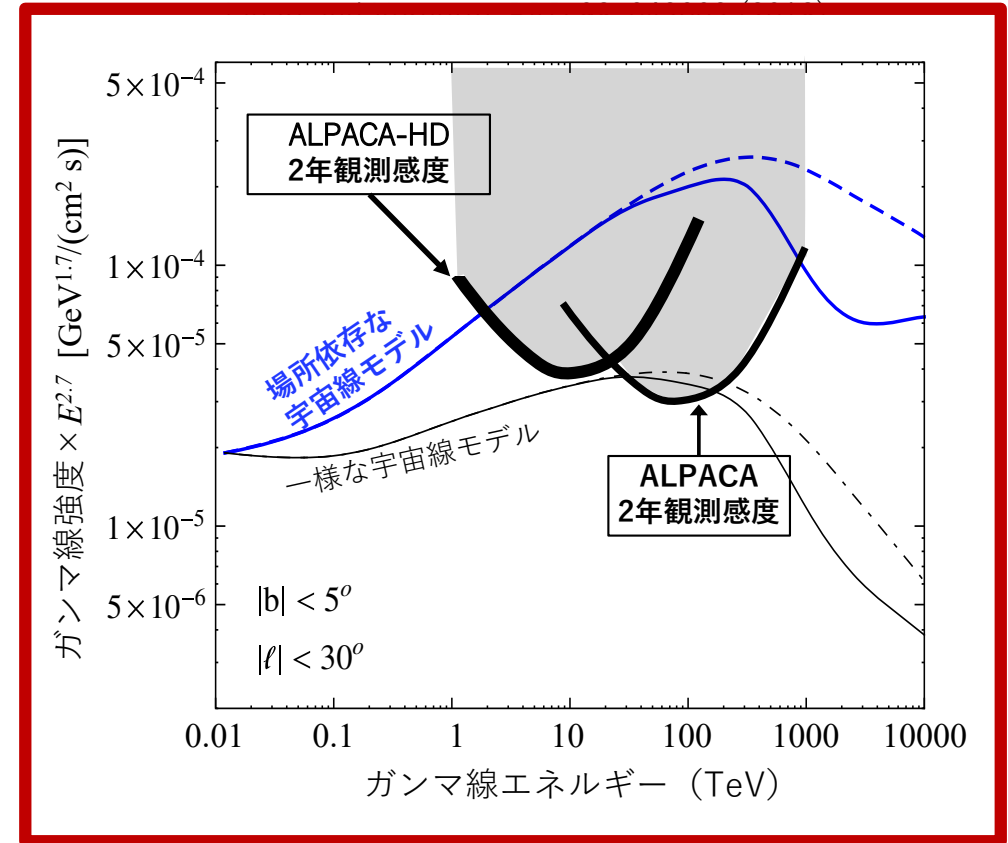
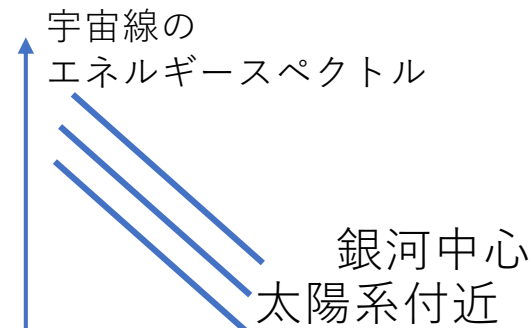


宇宙線のリモートセンシング

ALPACAの拡散ガンマ線感度



Space dependent (non-factorized)



- 2年の観測で銀河系内の宇宙線伝播モデルを検証可能
- 核破砕で探る低エネルギー伝播モデルとの比較
=> 銀河宇宙線の全体像解明
- 光光吸収 (実線) = PeVスケール量子電磁力学の検証

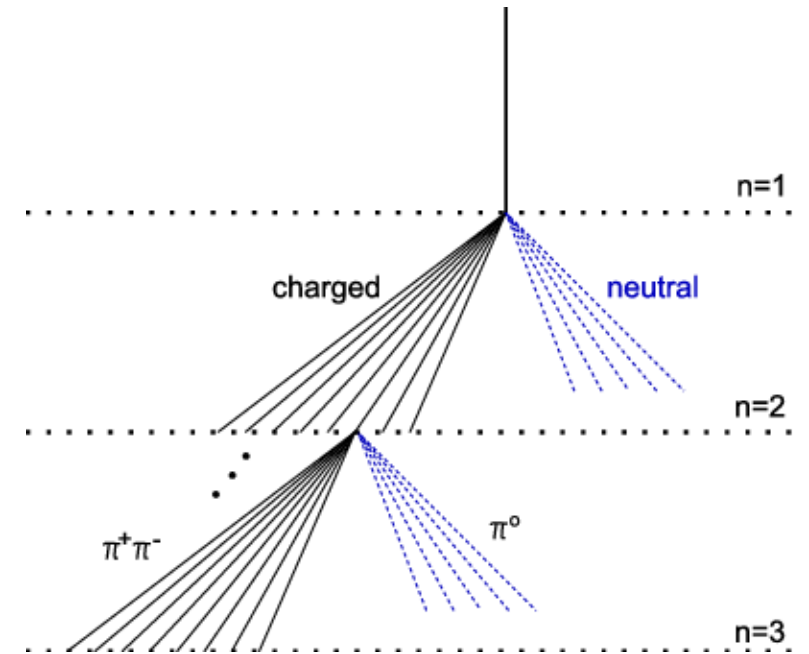
Tibet AS γ Collaboration, PRL 126, 141101 (2021)

Lipari and Vernetto, PRD 98, 043003 (2018)の予想と比較

空気シャワー中ミューオン測定による核種決定

～Heitler-Matthews model～

- 1回の反応で n_{tot} 個の π が出るとする (多重度)
- $2/3$ が荷電 π (π^\pm)、 $1/3$ が中性 π (π^0) とする
- π^0 はすぐに 2γ に崩壊して電磁シャワーになる
- n 回衝突後に
 - π^\pm が持つ全エネルギー : $E_{had} = E_0 (2/3)^n$
 - 電磁シャワーが持つ全エネルギー : $E_{em} = E_0 [1 - (2/3)^n]$
- π^\pm はいつまで生成されるのか? π の decay と interaction が釣り合う時
 - Interaction length : $\lambda \sim 100 \text{ g/cm}^2 = 830 \text{ m}$ (1気圧)
 - Decay length : $d = 7.8\gamma \text{ m}$ (γ : Lorentz factor = E/mc^2)
 - $\lambda = d$ is satisfied when $\gamma \sim 100$, $E_{dec} \sim 10 \text{ GeV}$
 - Number of interaction n is $E_0 / (n_{tot})^n = E_{dec} \Rightarrow n = \frac{1}{\log(n_{tot})} \log\left(\frac{E_0}{E_{dec}}\right)$
 - If a π^\pm of $E = E_{dec}$ immediately decays into μ ,



$$N_\mu = \left(\frac{2}{3} n_{tot}\right)^n = \left(\frac{E_0}{E_{dec}}\right)^\alpha \quad \alpha = \frac{\log\left(\frac{2}{3} n_{tot}\right)}{\log(n_{tot})} = 0.8 \sim 0.9 \text{ for } n_{tot} = 10 \sim 1000$$

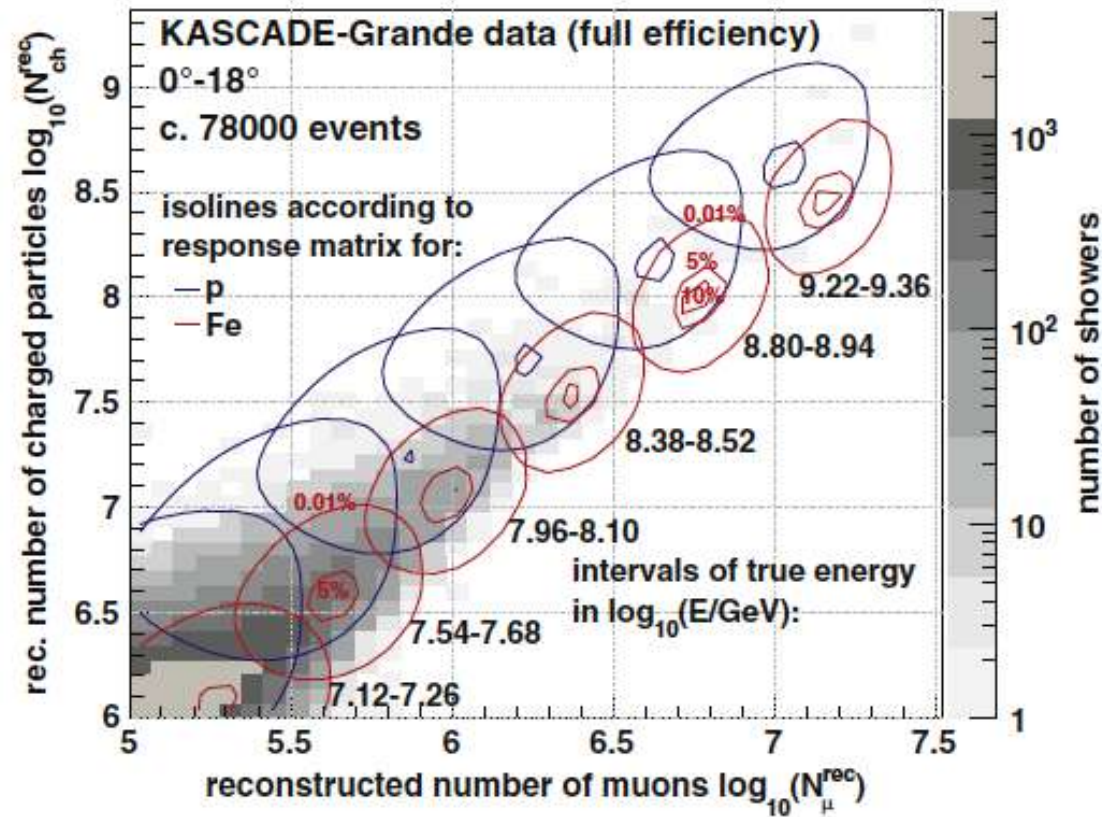
質量数が A の原子核シャワーはエネルギー E_0/A の陽子シャワー A 個の重ね合わせである。

ビミョ～な A 依存

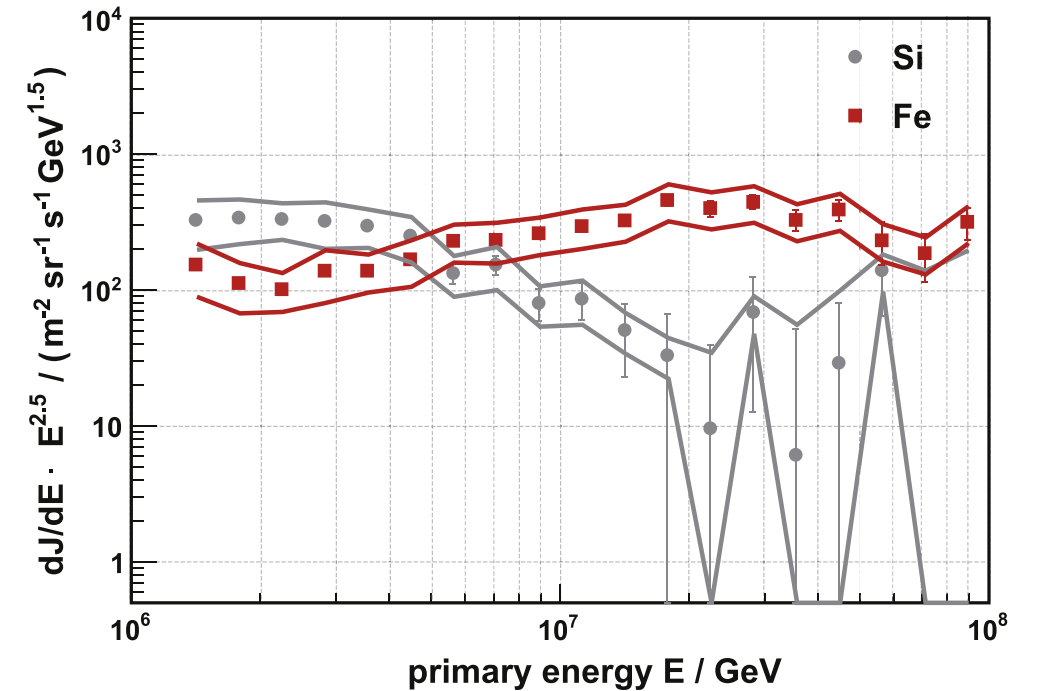
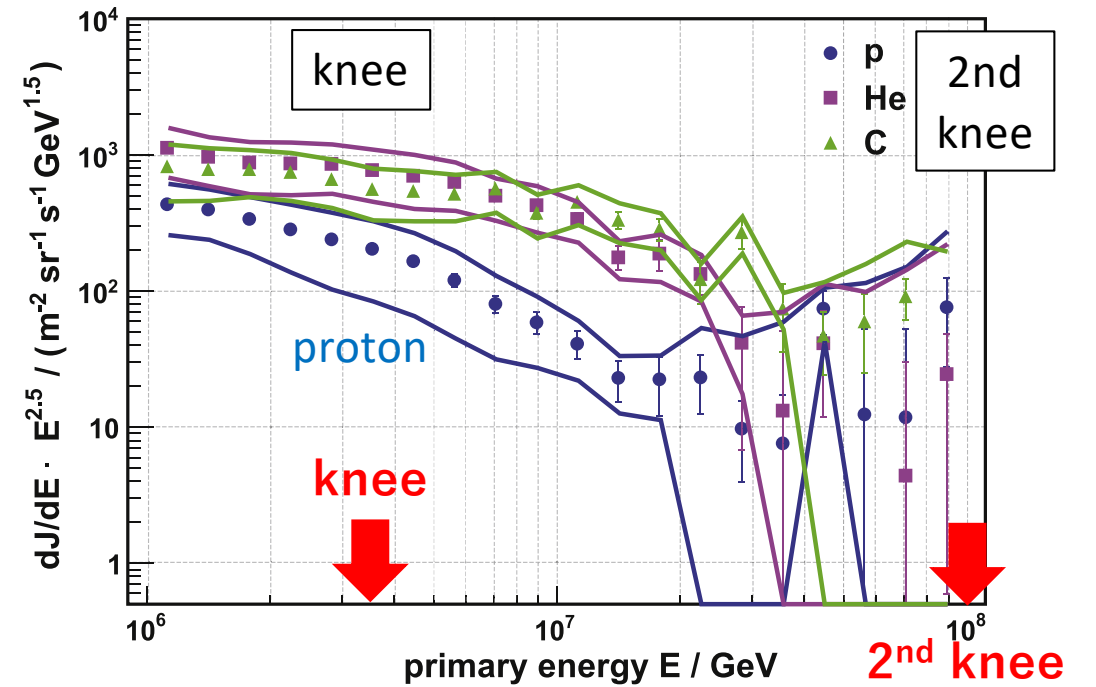
$$N_{\mu, A} = A \times \left(\frac{E_0/A}{E_{dec}}\right)^\alpha = A^{1-\alpha} N_{\mu, p} \quad (\alpha = 0.8 \sim 0.9)$$

KASCADE Grande 10^{15} - 10^{17} eV

KASCADE-Grande, Astropart. Phys. 47, 54-66 (2013)

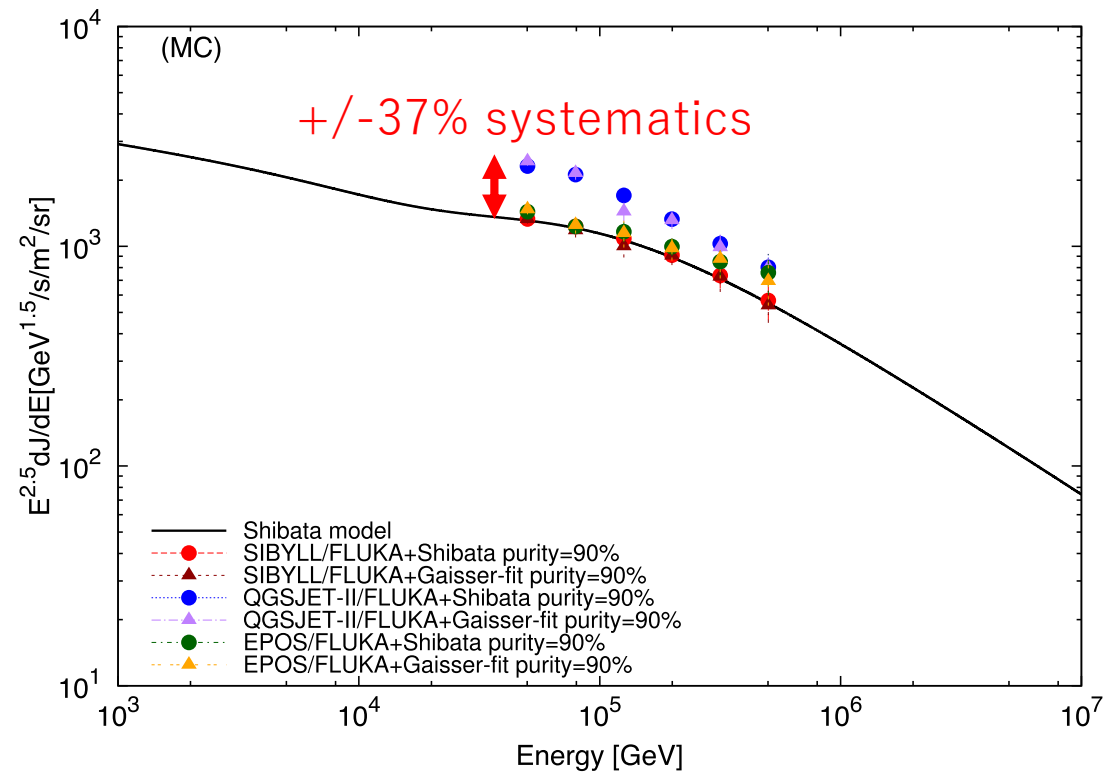
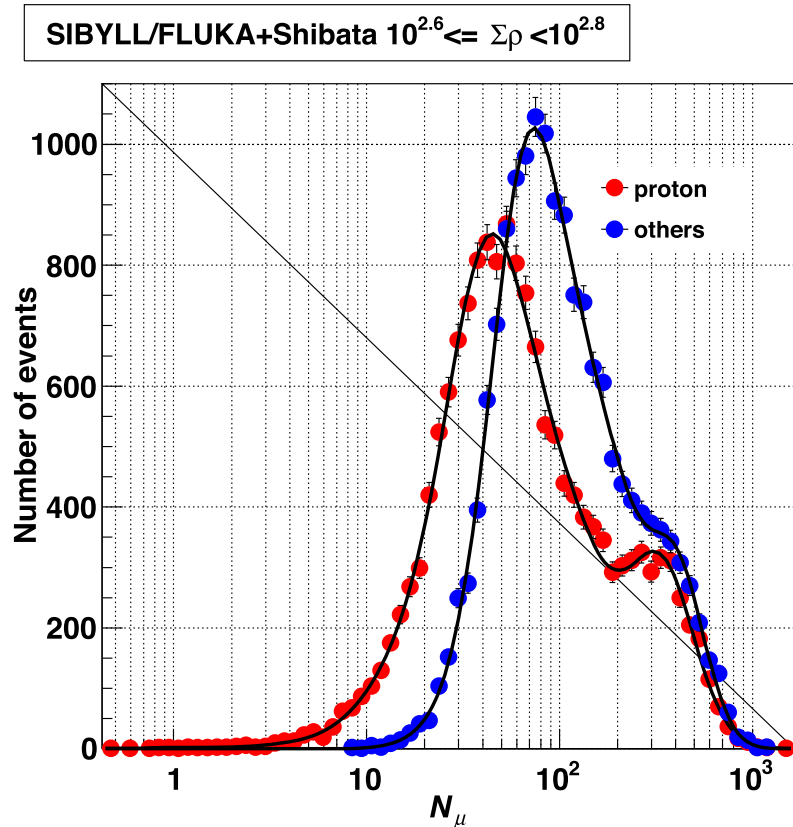


- 地表検出器で荷電粒子数 N_{ch} とミュー粒子数 N_{mu} を測定
- MCシミュレーションと比較して energy と質量に換算
- 2nd knee (10^8 GeV) で重い組成、標準理論通り



Tibet As γ 実験 (ALPACAとほぼ同じデザイン) の MDで測定されるミュオン数分布 (MD)

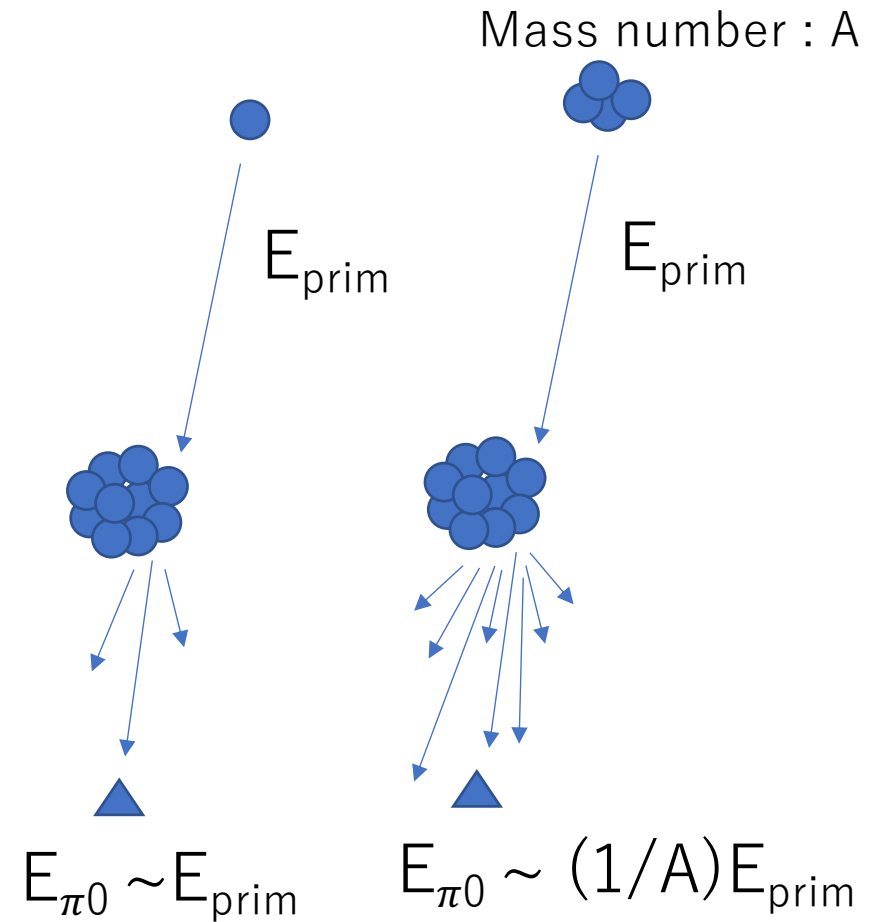
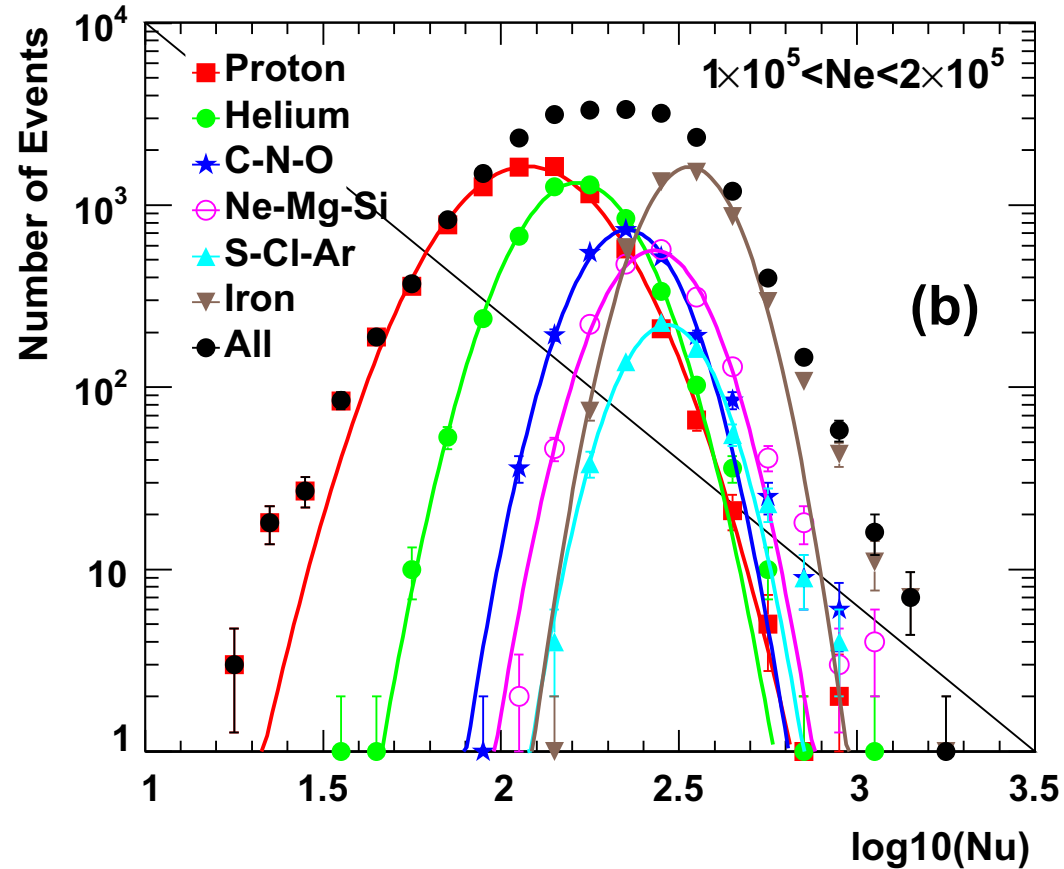
Kurashige et al. PTEP, 2022, 093F01



- 「ミュオンが少ない」陽子シャワーを他原子核から分離可能
- 簡単な「カット」による解析 => template fittingで改善の余地
- 主に interaction modelの違いにより、 $\pm 37\%$ の再構成系統誤差

なぜミューオンが少ない陽子シャワーがあるか？

J.Huang, et al., Astropart. Phys., 66 (2015) 18-30

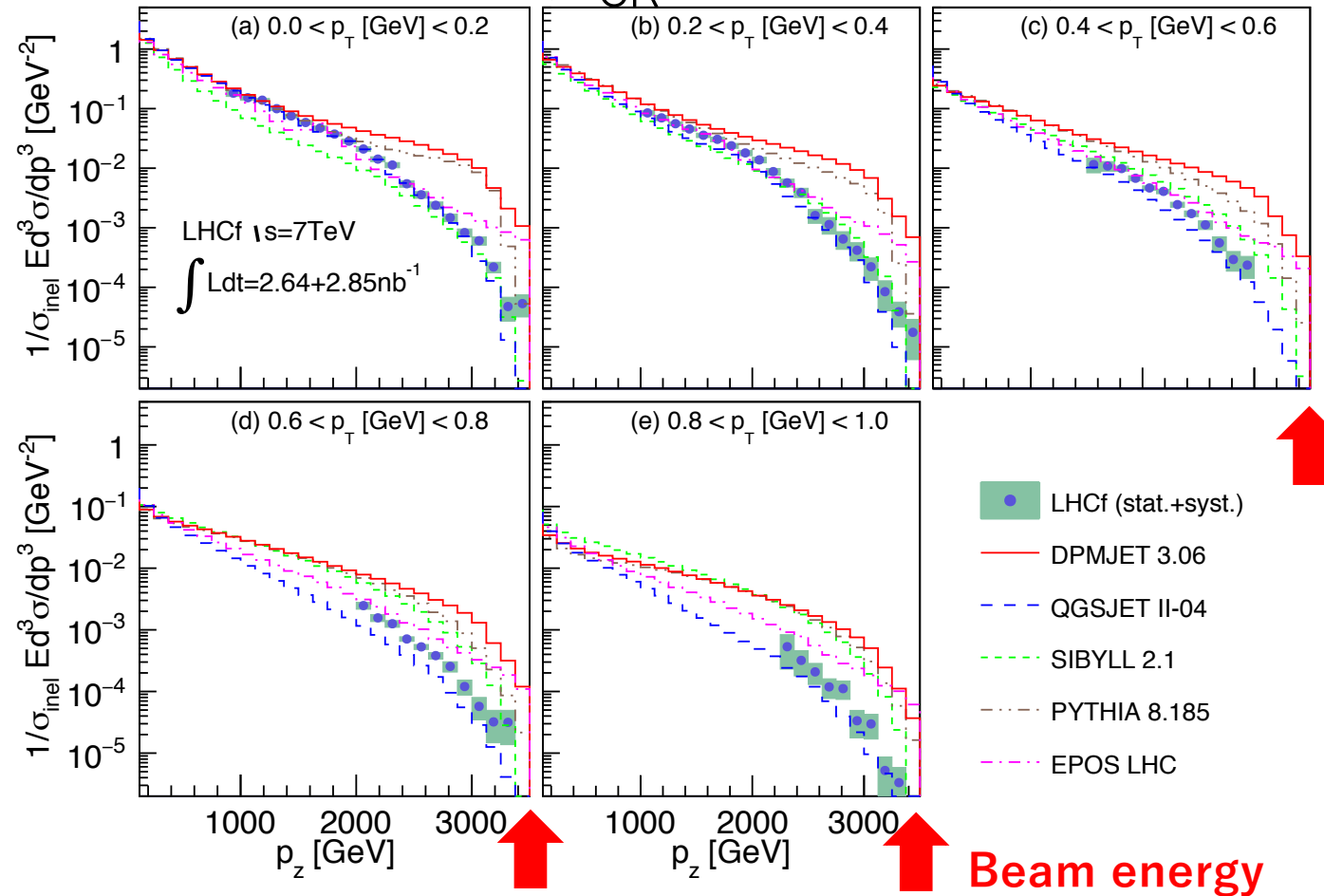


- $N_{\mu} \propto A^{1-\alpha}$ 以上の差
- 陽子だけ極端な分布

- First interactionで「ほとんど電磁シャワー」になってしまうのは陽子だけ

p-p衝突 π^0 生成断面積@LHC ($E_{CR}=2.5 \times 10^{16}$ eV)

LHCf, PRD, 94 (2016) 032007



- 入射粒子と同程度のエネルギーを持つ π^0 は生成されている
- 反応モデルは強く制限されている
- LHC陽子酸素、酸素酸素衝突で、より空気シャワーに近い条件が制限される

まとめ

- 「**高精度でミュオンを測れる空気シャワー実験**」がみぞ
 - 南半球（ボリビア）のALPACAと北半球（インド）のGRAPES-3
- 宇宙線BGを排除して **sub-PeVからPeVのガンマ線観測**が実現
 - PeV/核子加速天体を解明
 - 拡散ガンマ線観測で宇宙線の伝播機構を制限
 - 低エネルギー側との連携で銀河宇宙線の全体像解明
- **原子核種（特に陽子）の決定**が可能
 - 宇宙線標準モデルの検証
 - 加速限界が本当に 4×10^{15} eV/核子か？変なものが見えてこないか？
 - LHCで裏付けられたハドロン反応モデルを使用

ガンマ線放射と伝播の限界

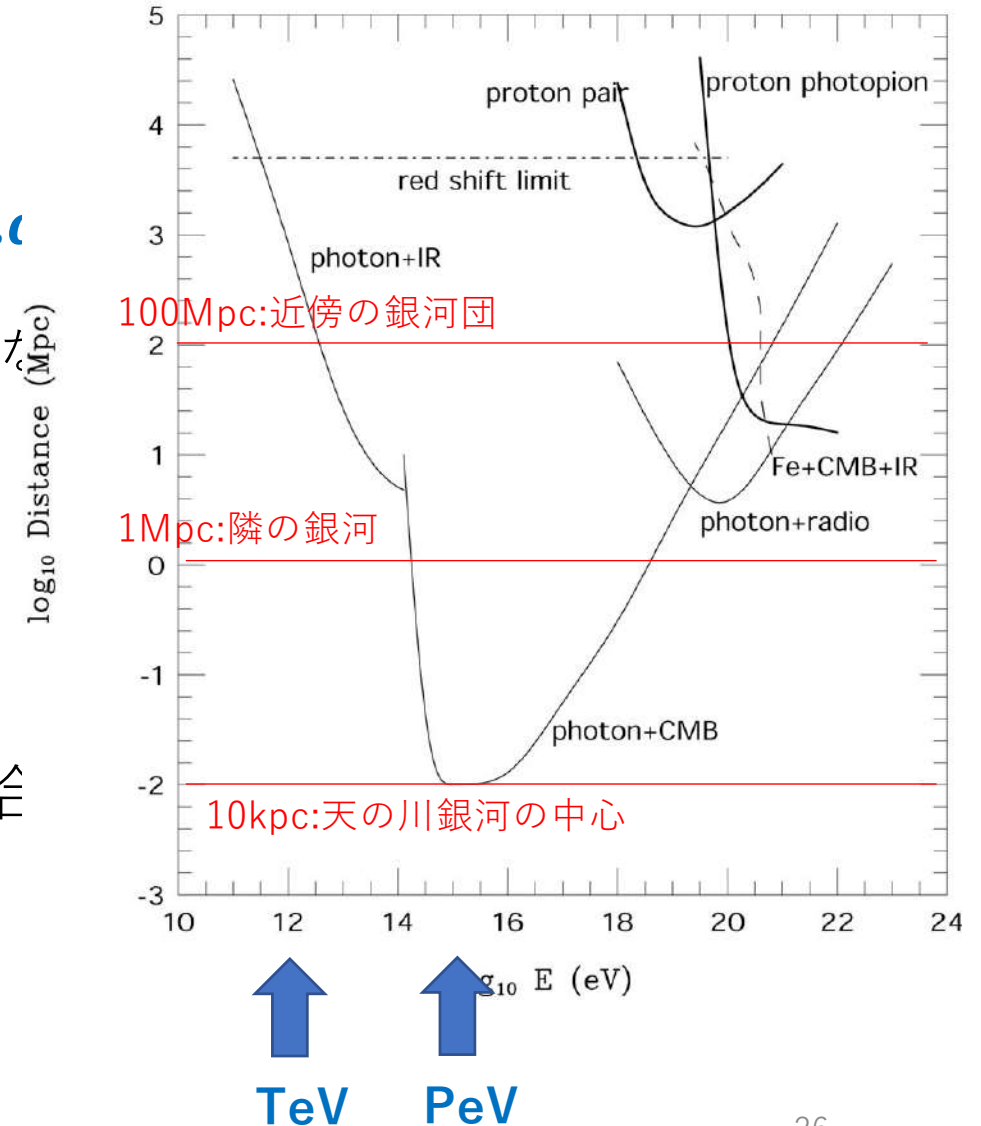
https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March04/Torres/Torres1_4

- ガンマ線の伝播限界

- 光子光子散乱による電子対生成

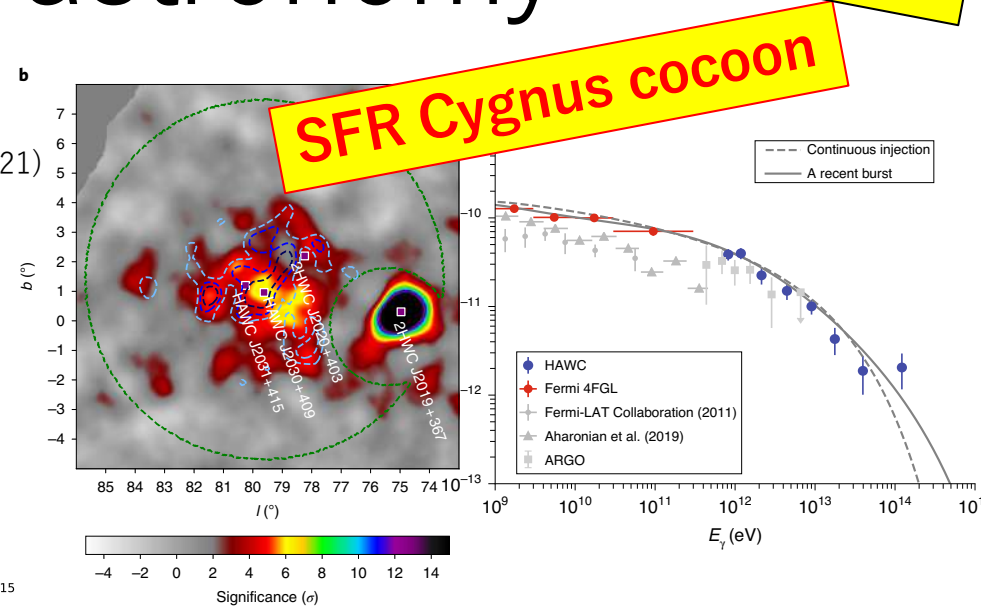
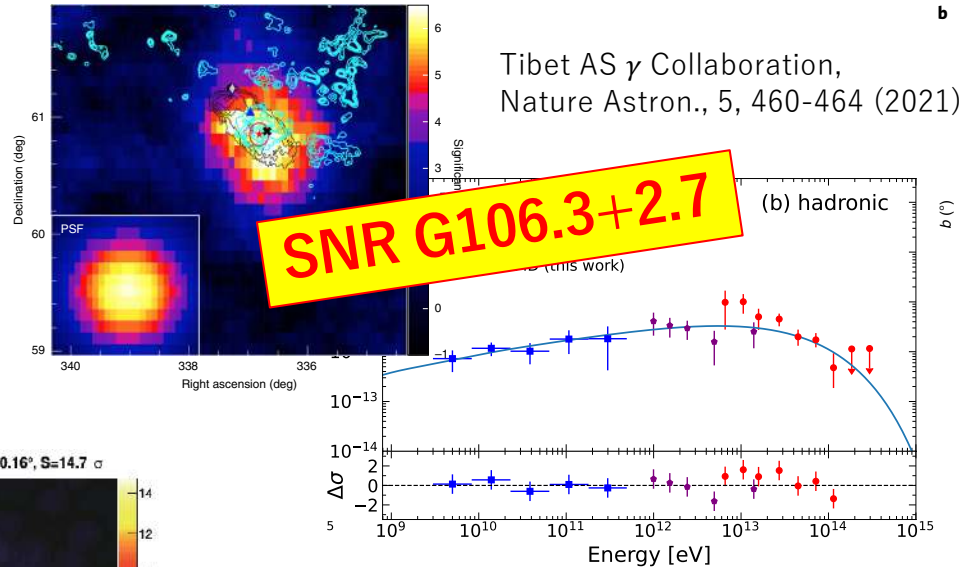
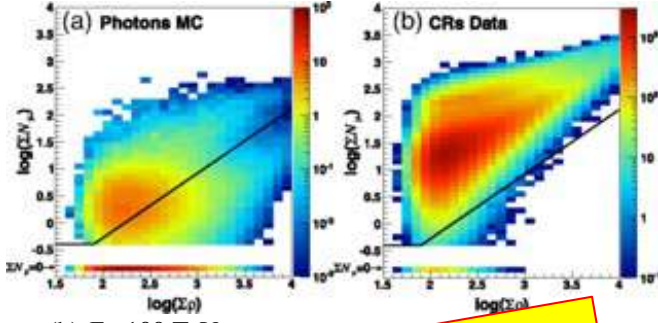
$$\sqrt{s} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (p_1c - p_2c)^2} = 2\sqrt{E_1E_2} > 2m_e c^2$$

- \sqrt{s} : 衝突の重心系エネルギー
- E_1, p_1 : 光子1のエネルギーと運動量。光子（質量ゼロ）なので、 $E_1 = p_1c$
- 2も同様
- $m_e c^2$: 電子の質量エネルギー (511keV ~ 0.5MeV)
- $E_1 = 1 \text{ eV}$ (可視光・星の光とぶつかる) の場合
 - $E_2 > (m_e c^2)^2 / E_1 =$
- $E_1 = 2.4 \times 10^{-4} \text{ eV}$ (宇宙背景放射とぶつかる) の場合
 - $E_2 > (m_e c^2)^2 / E_1 =$
 - 星の光と背景放射は宇宙全体にある
 - ガンマ線が届く距離の限界 (horizon) の存在

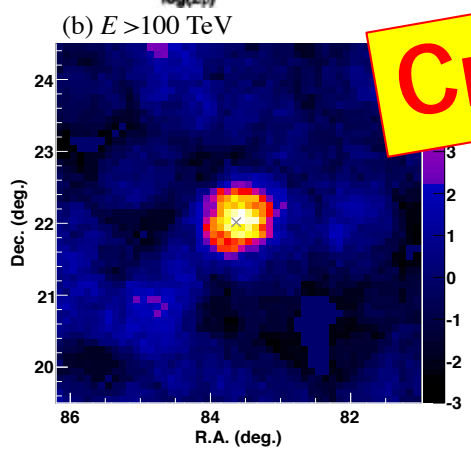


Dawn of sub-PeV gamma-ray astronomy

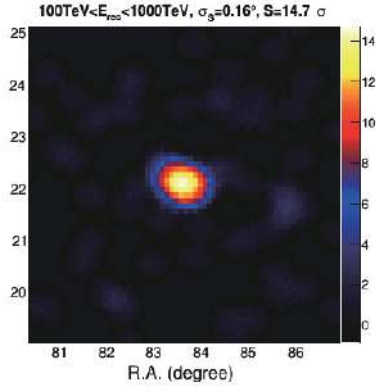
Sub-PeVの空は賑やかだ



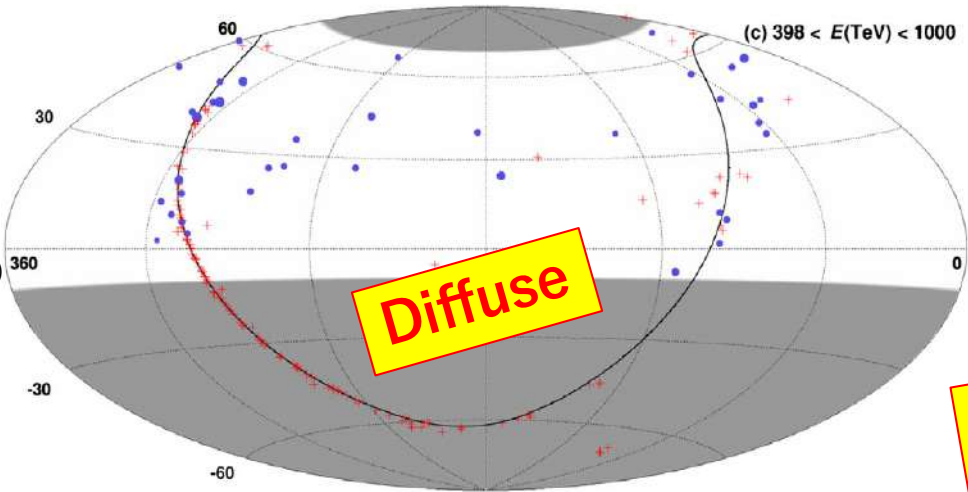
HAWC Collaboration, Nature Astron., 5, 465-471 (2021)



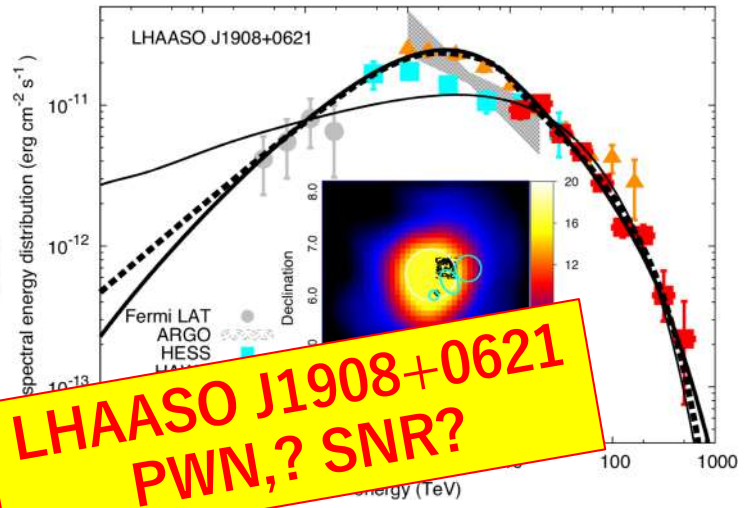
Tibet AS γ Collaboration, PRL 123, 051101 (2019)



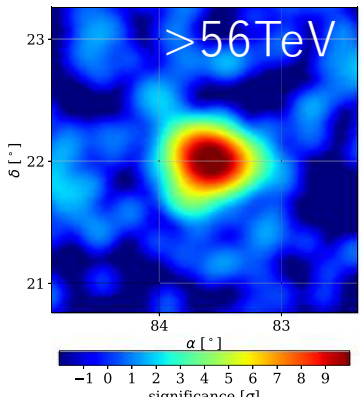
LHAASO Collaboration, Chin. Phys. C45, 023002 (2021)



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



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



HAWC Collaboration, ApJ 881:134 (2019)