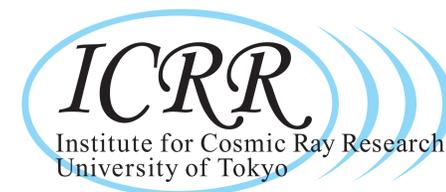
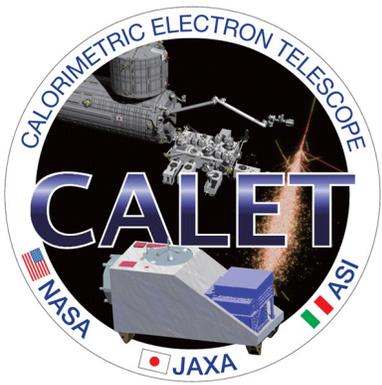


空気シャワー観測による原子核種測定

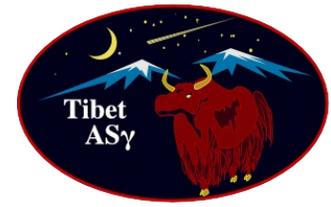
藤田 慧太郎
東京大学 宇宙線研究所



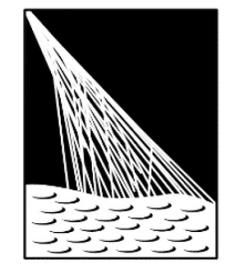
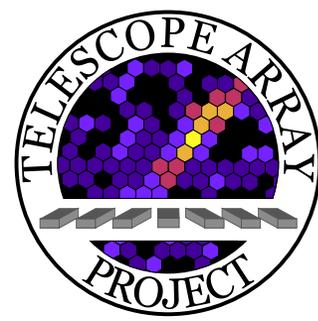
Direct



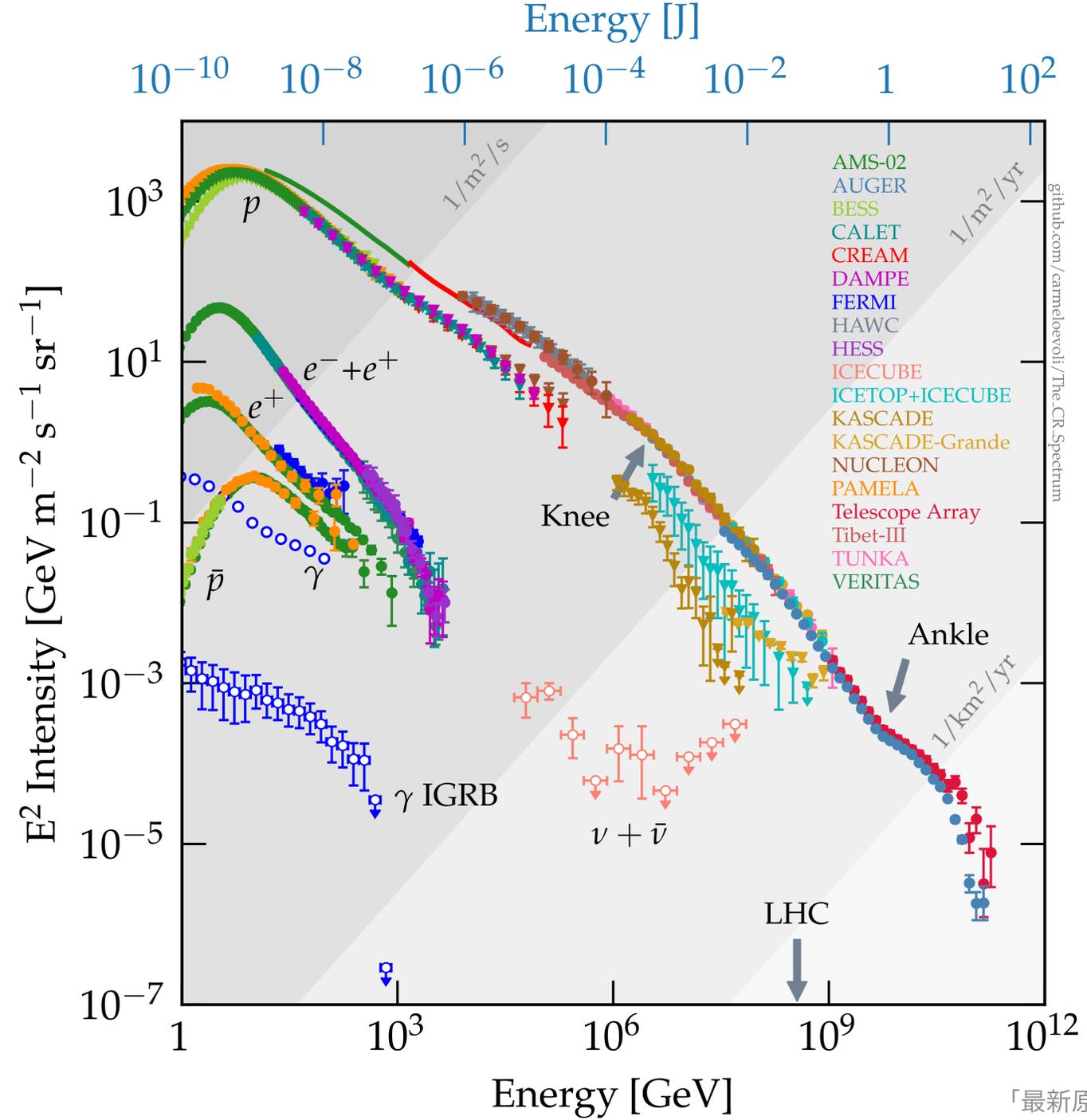
Indirect



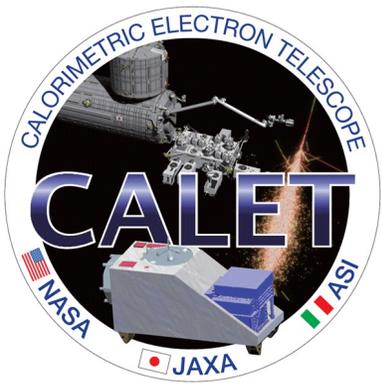
ICECUBE



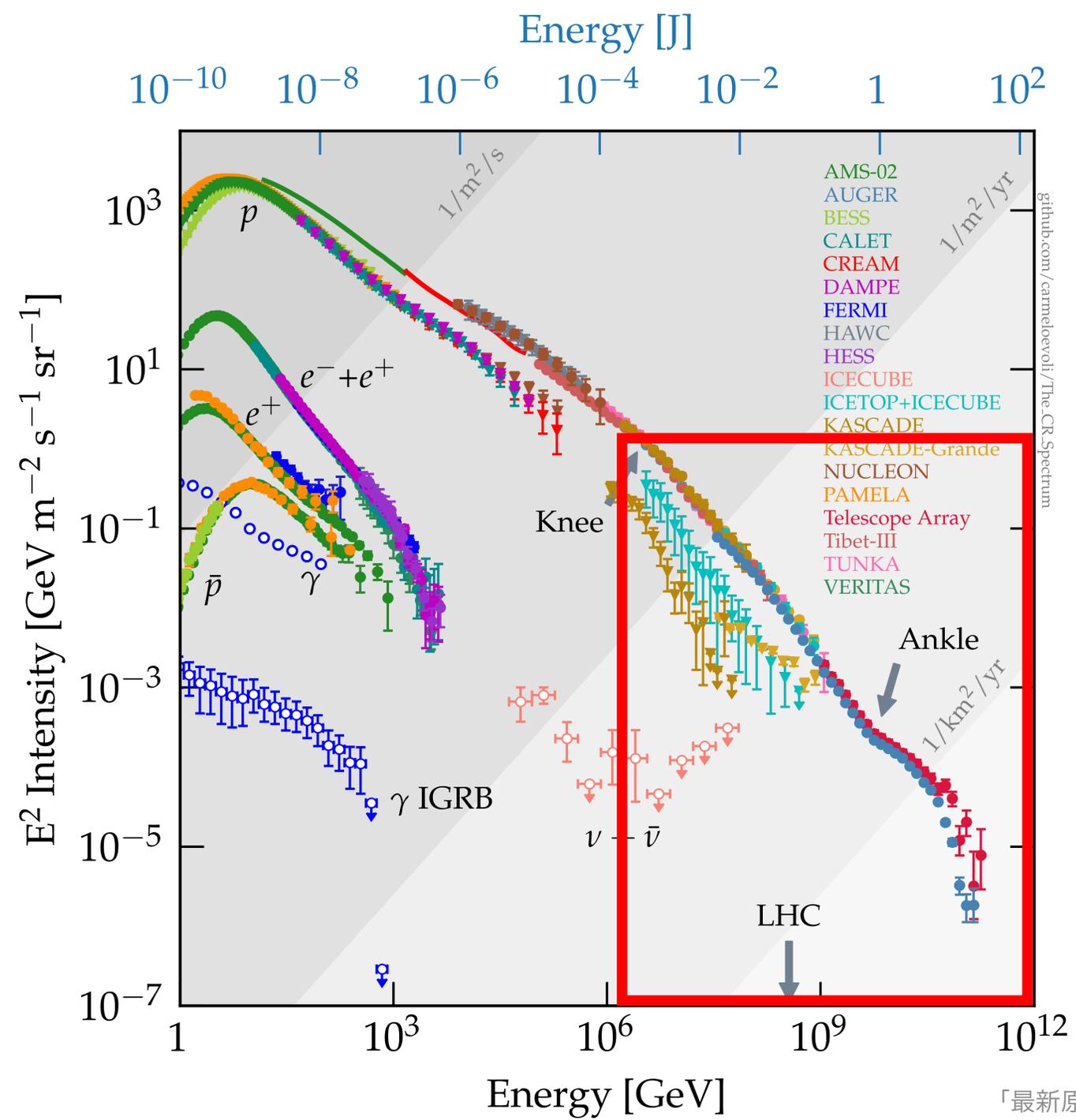
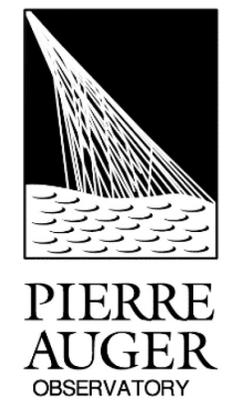
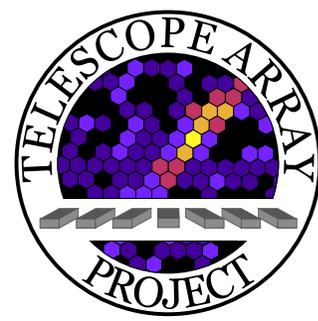
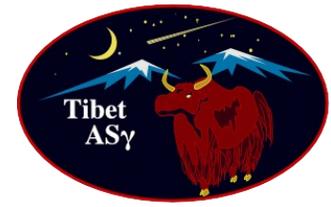
PIERRE AUGER OBSERVATORY



Direct

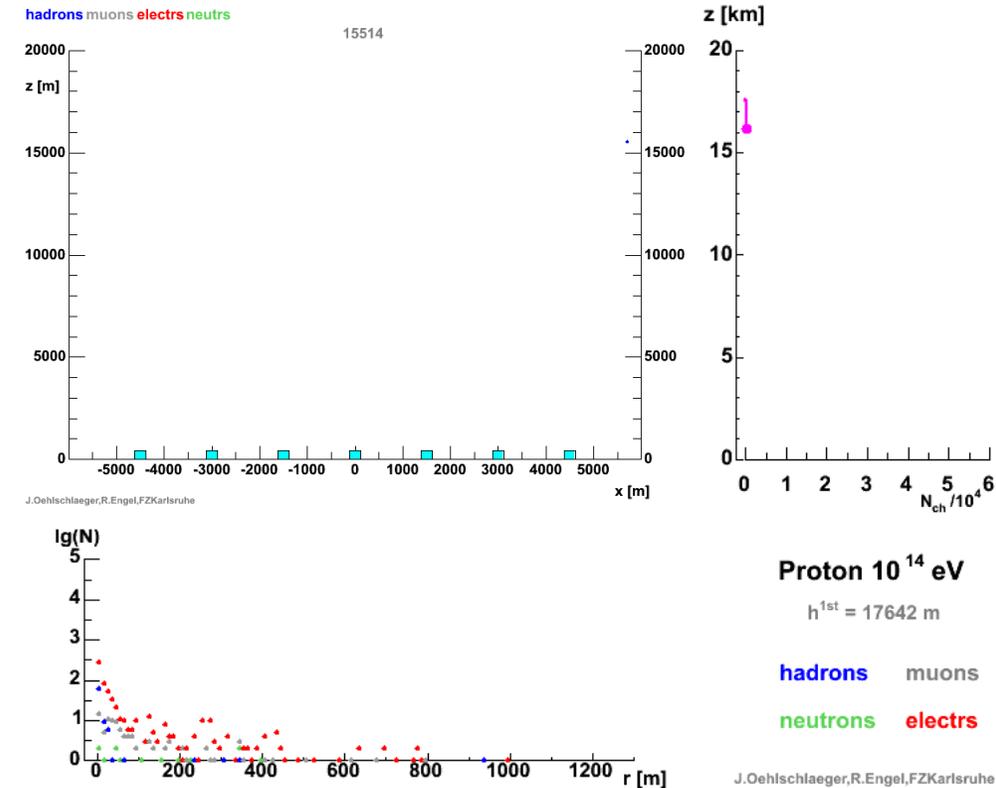


Indirect



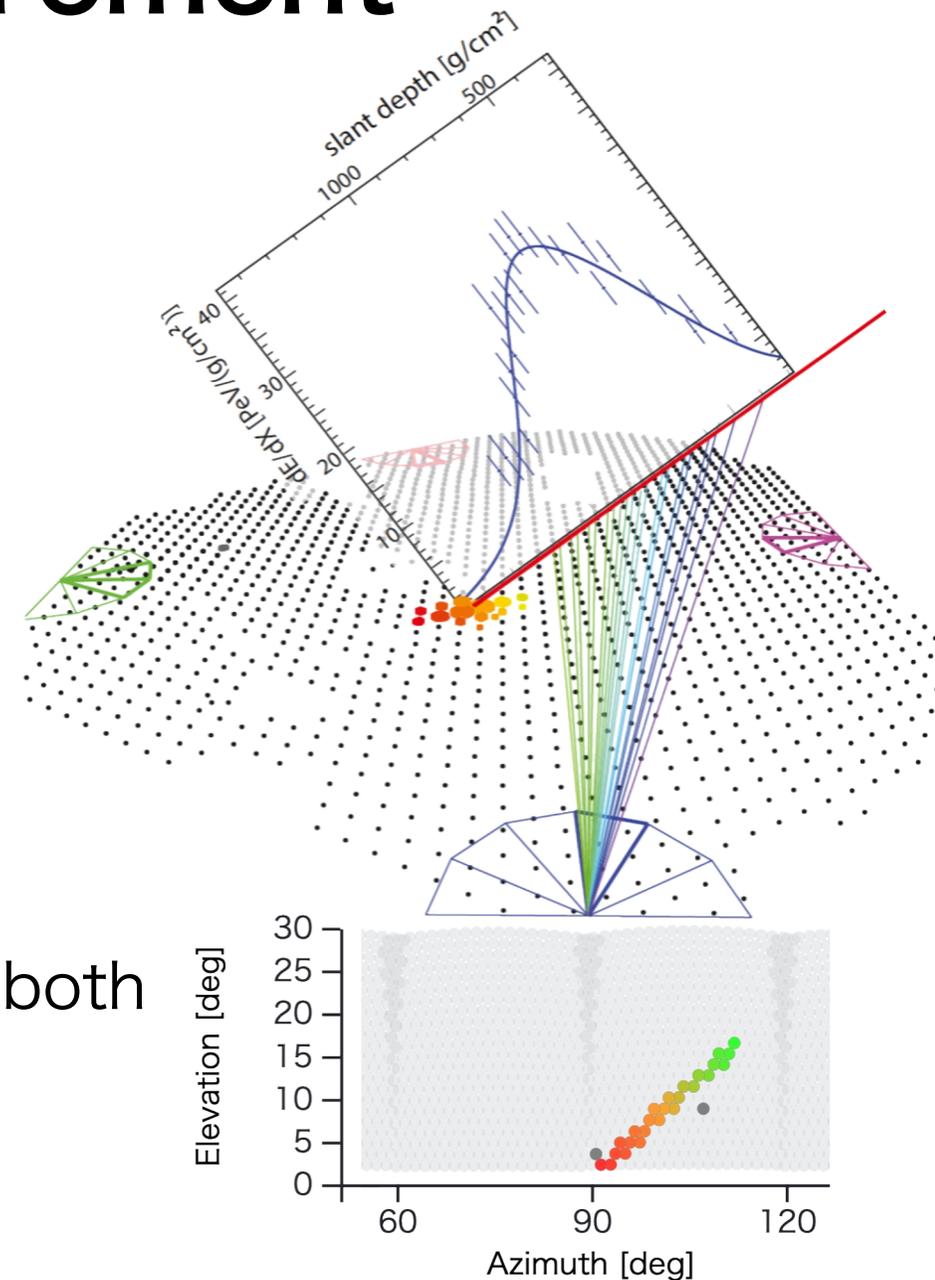
Indirect Cosmic Ray Measurement

- 空気シャワー現象を捉える
- 地表粒子検出器(SD), 24時間365日稼働
 - 水チェレンコフ型
 - シンチレータ型 → 粒子群をサンプリング
 - ミューオン検出器
- 光学望遠鏡, 月のない晴天夜のみ
 - チェレンコフ望遠鏡 → シャワー発達を撮像
 - 大気蛍光望遠鏡(FD)
- $E \sim 10^{12}$ eV: 地表粒子検出器, チェレンコフ望遠鏡
- $E \sim 10^{15}$ eV: 地表粒子検出器, チェレンコフ望遠鏡 or both
- $E \sim 10^{18}$ eV: 地表粒子検出器, FD, or both



Indirect Cosmic Ray Measurement

- 空気シャワー現象を捉える
- 地表粒子検出器(SD), 24時間365日稼働
 - 水チェレンコフ型
 - シンチレータ型 → 粒子群をサンプリング
 - ミューオン検出器
- 光学望遠鏡, 月のない晴天夜のみ
 - チェレンコフ望遠鏡 → シャワー発達を撮像
 - 大気蛍光望遠鏡(FD)
- $E \sim 10^{12}$ eV: 地表粒子検出器, チェレンコフ望遠鏡
- $E \sim 10^{15}$ eV: 地表粒子検出器, チェレンコフ望遠鏡 or both
- $E \sim 10^{18}$ eV: 地表粒子検出器, FD, or both



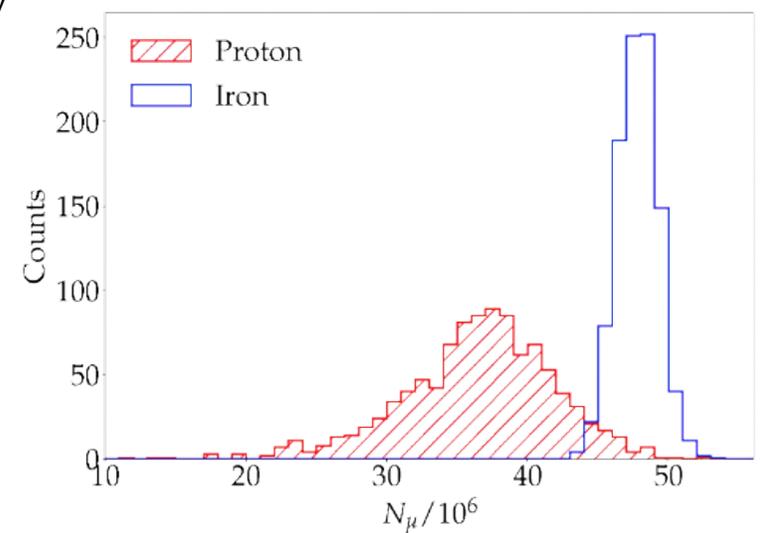
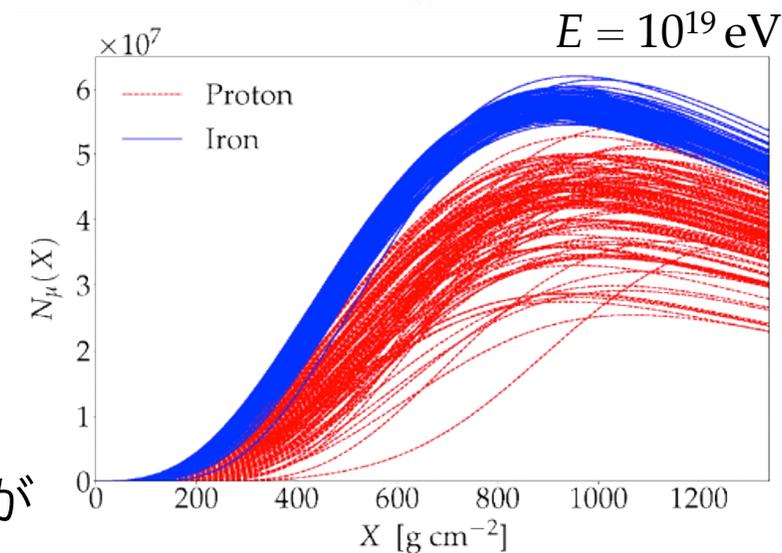
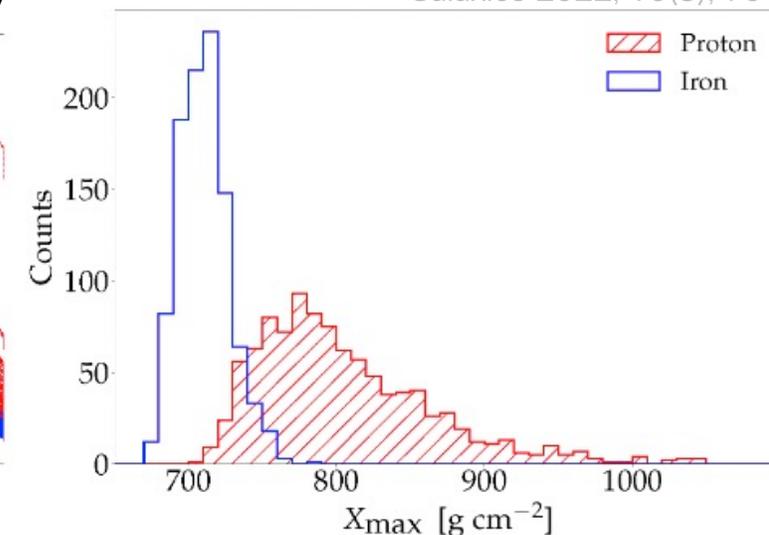
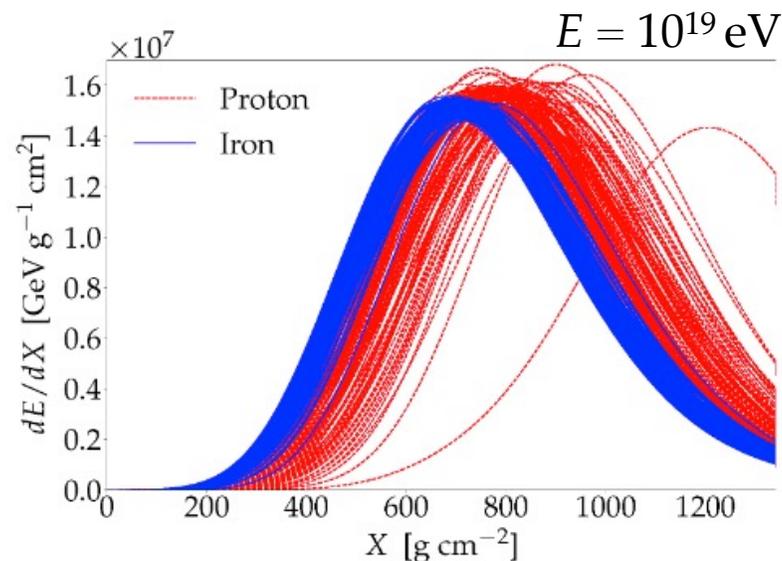
原子核種測定

- シャワー最大発達深さ, X_{\max}
 - 望遠鏡で撮像可能

- 空気シャワー中の μ 成分

- とともに proton/iron では
顕著な違いがみえる

- ただし, 実際は中間質量の宇宙線もいるので event by event で mass を特定するのは難しい
- 平均的な mass を求めることが第一目標
- 空気シャワーシミュレーションとの比較から推定することになるが相互作用モデル依存性が存在する



CR Observatories

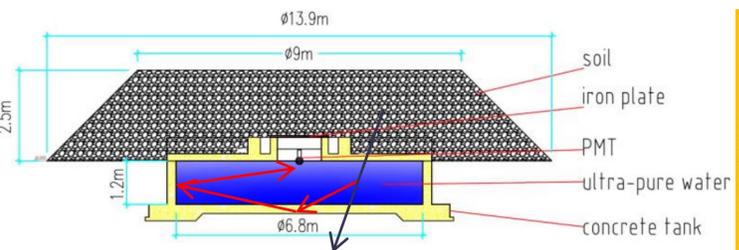
Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO):



2019年 ~
@中国
~4400 m a.s.l.

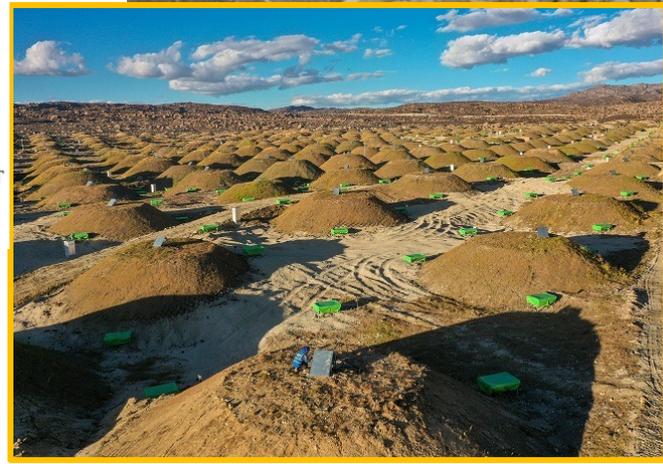


- 水チェレンコフ検出器(中央)
- ~78000 m²
- 5195 シンチレータ型SD(■)
- 1188 地中ミュオン検出器(■)



- ~1.36 km²

- 18 チェレンコフ望遠鏡





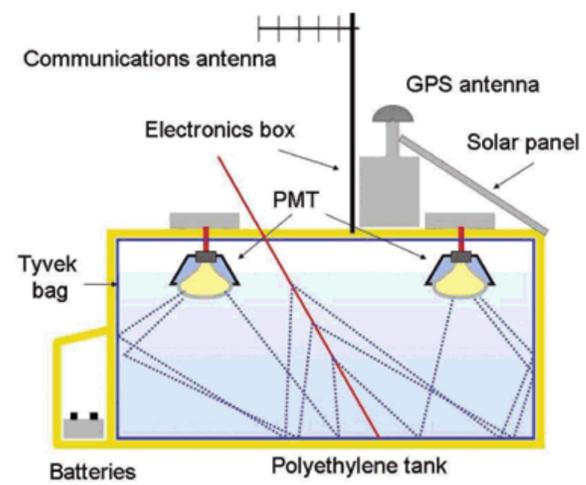
CR Observatories

Pierre Auger Observatory (Auger):



2005年 ~
@アルゼンチン
~1400 m a.s.l.

- 1660 水タンク型SD (●)
- ~3000 km²



- 24+3 大気蛍光望遠鏡

Radio antenna array
(153 antennas, 17 km²)

Sub-array of 750 m
(63 stations, 23.4 km²)

LIDARs and laser facilities

Underground muon detectors (24+)

High elevation telescopes (3)

4 fluorescence detectors
(24 telescopes up to 30°)

1665 surface detectors:
water-Cherenkov tanks
(grid of 1.5 km, 3000 km²)

Central Campus



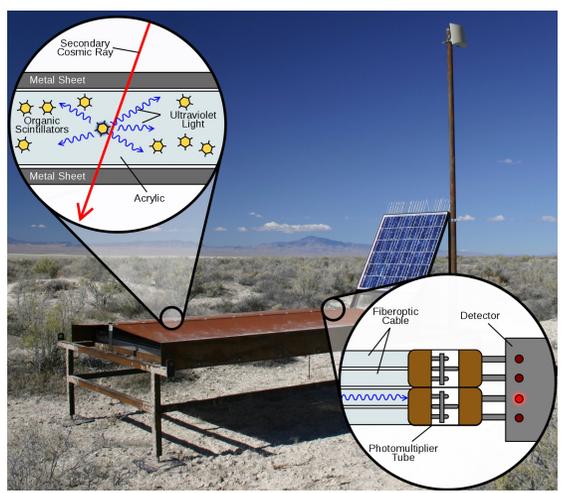
CR Observatories

Telescope Array (TA):



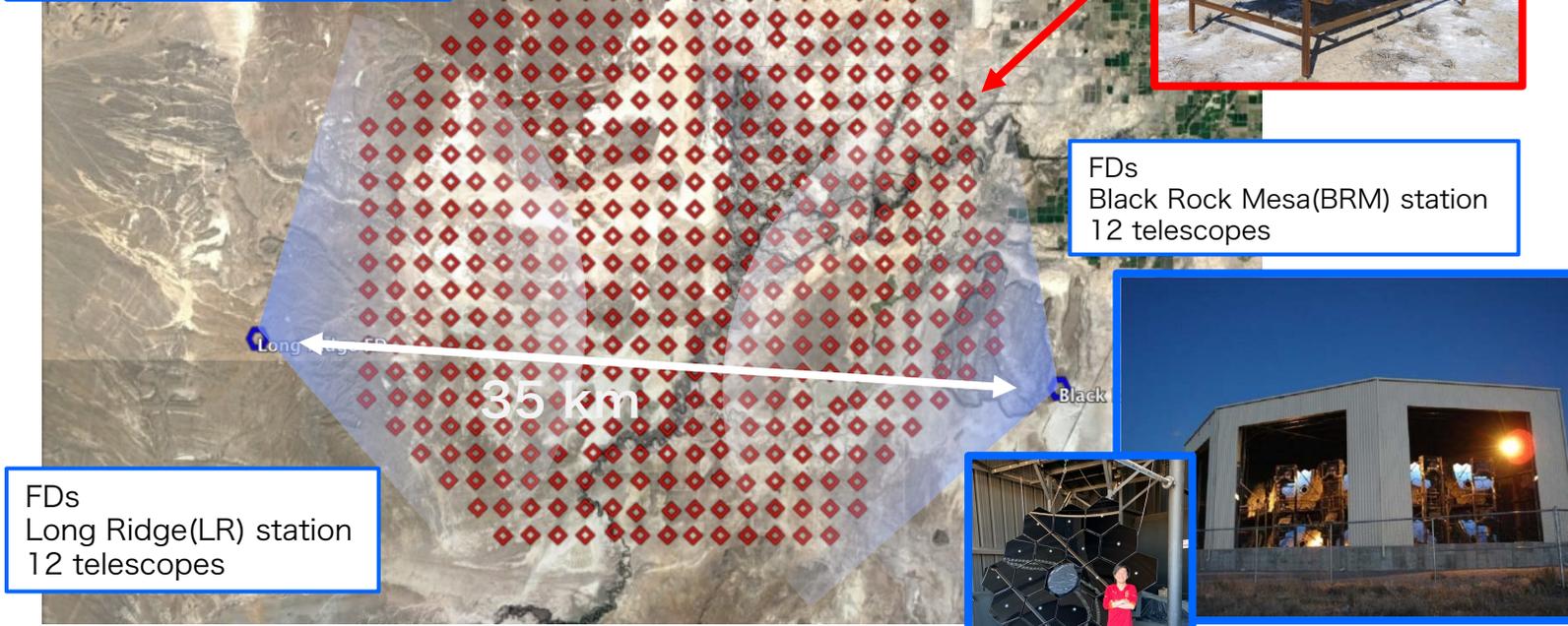
2008年 ~
@アメリカ
~1400 m a.s.l.

- 507 シンチレータ型SD(◇)
- ~700 km²



- 38+10 大気蛍光望遠鏡

Fluorescence Detectors(FDs)
Middle Drum(MD) station
14 telescopes
+ TA Low energy Extension (TALE) 10 telescopes



Surface Detector(SD) array
507 scintillation detectors
each 3m², 1.2 km spacing
total coverage ~ 700km²



FDs
Black Rock Mesa(BRM) station
12 telescopes



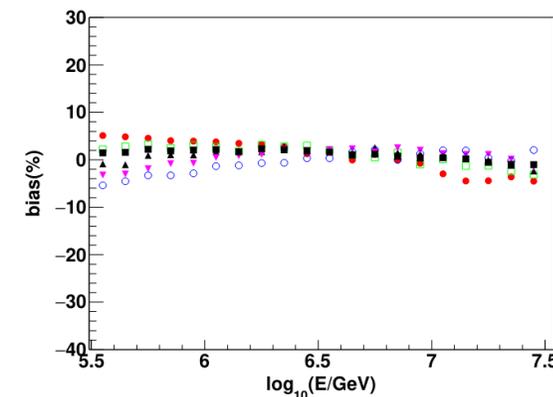
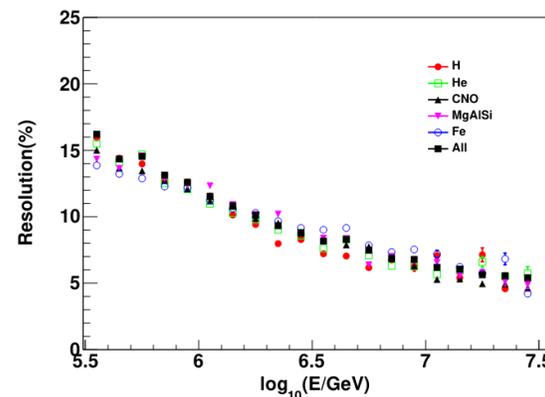
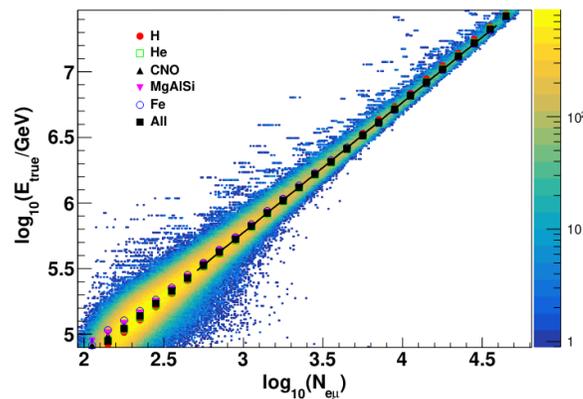
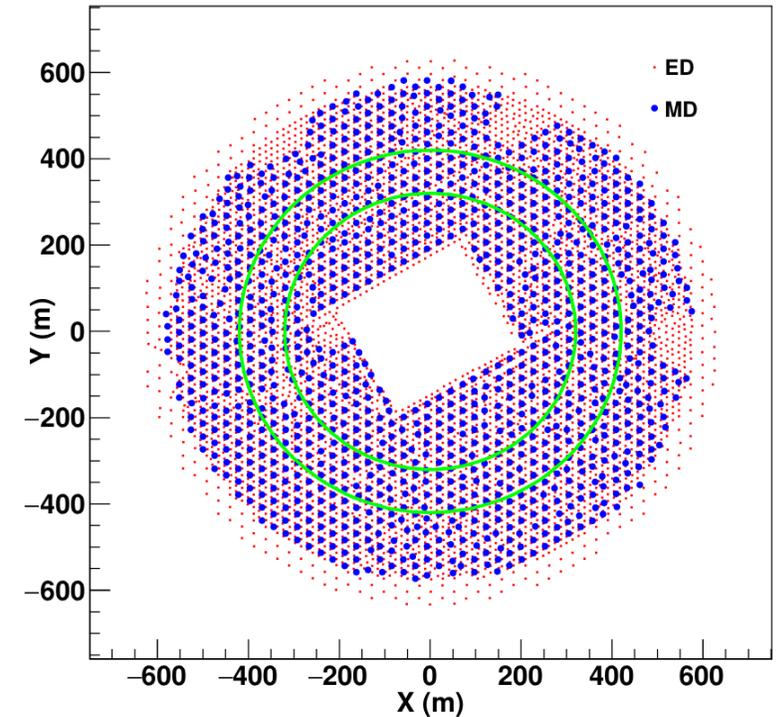
FDs
Long Ridge(LR) station
12 telescopes



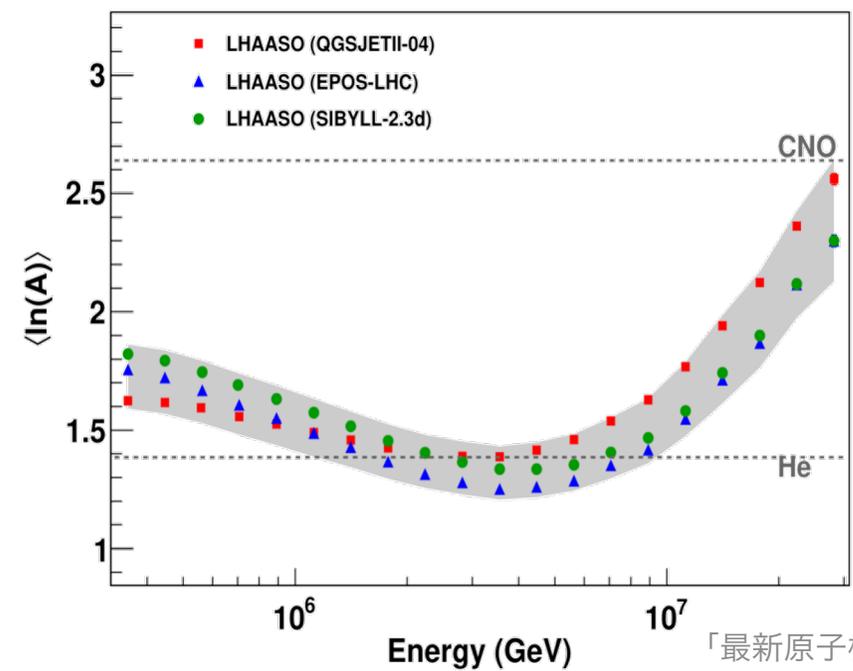
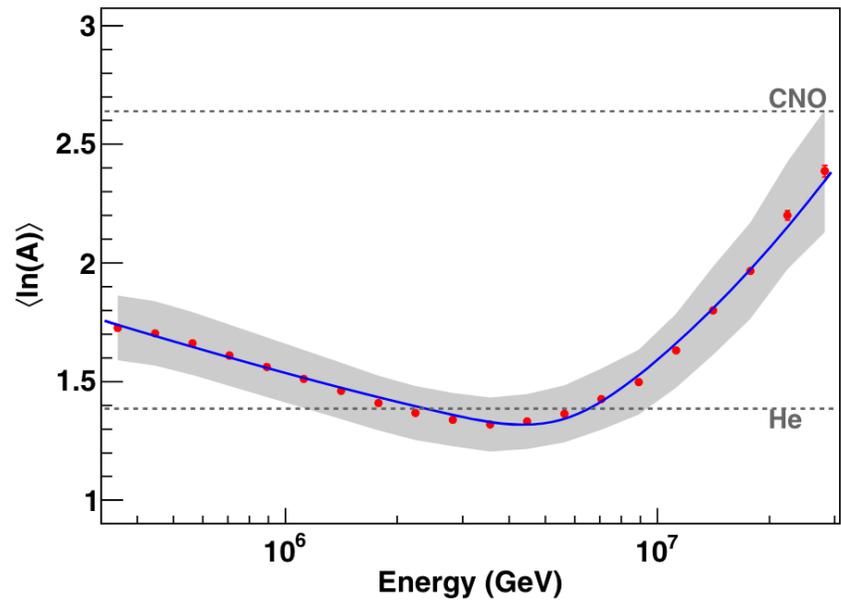
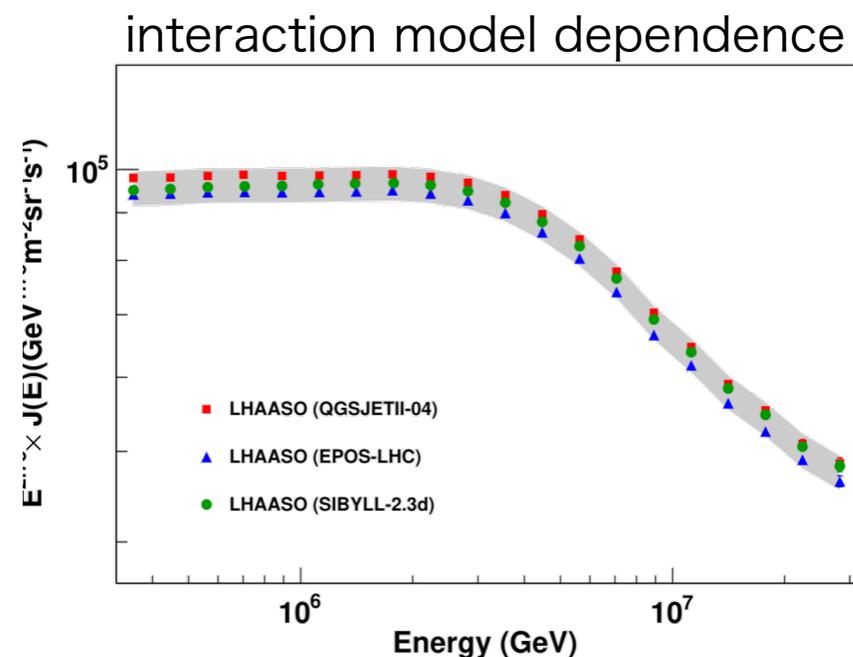
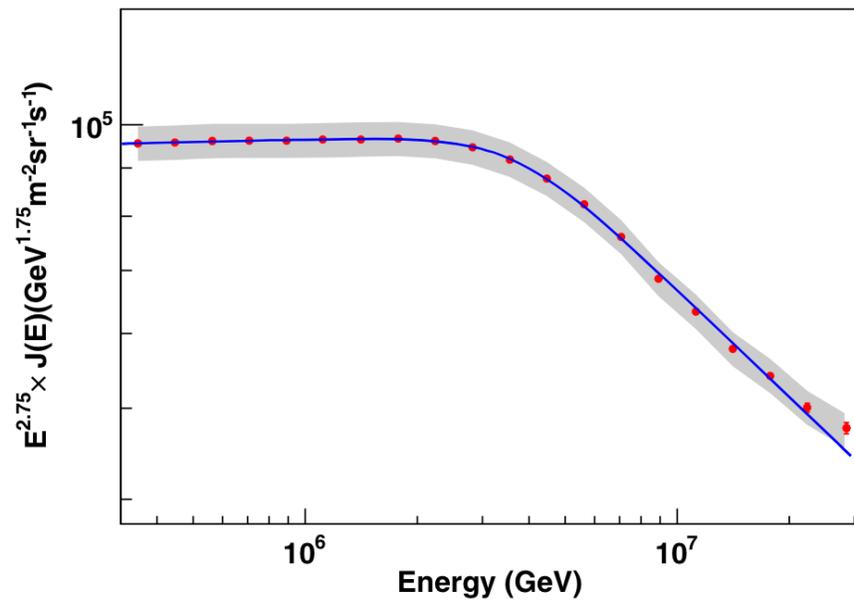


LHAASO result

- energy reconstruction
 - $\log_{10}(E/\text{GeV}) = p_0 + p_1 \cdot \log_{10}(N_{e\mu})$
 - $N_{e\mu} = N_e + 2.8N_\mu$
 - N_e, N_μ : sum of e/μ within 40–200 m from the shower
- mean logarithmic mass
 - $\langle \ln(N_\mu) \rangle = x_0 + x_1 \cdot \langle \ln(A) \rangle$
- event selection
 - $10^\circ < \theta < 30^\circ$
 - core position should be inside of green donut



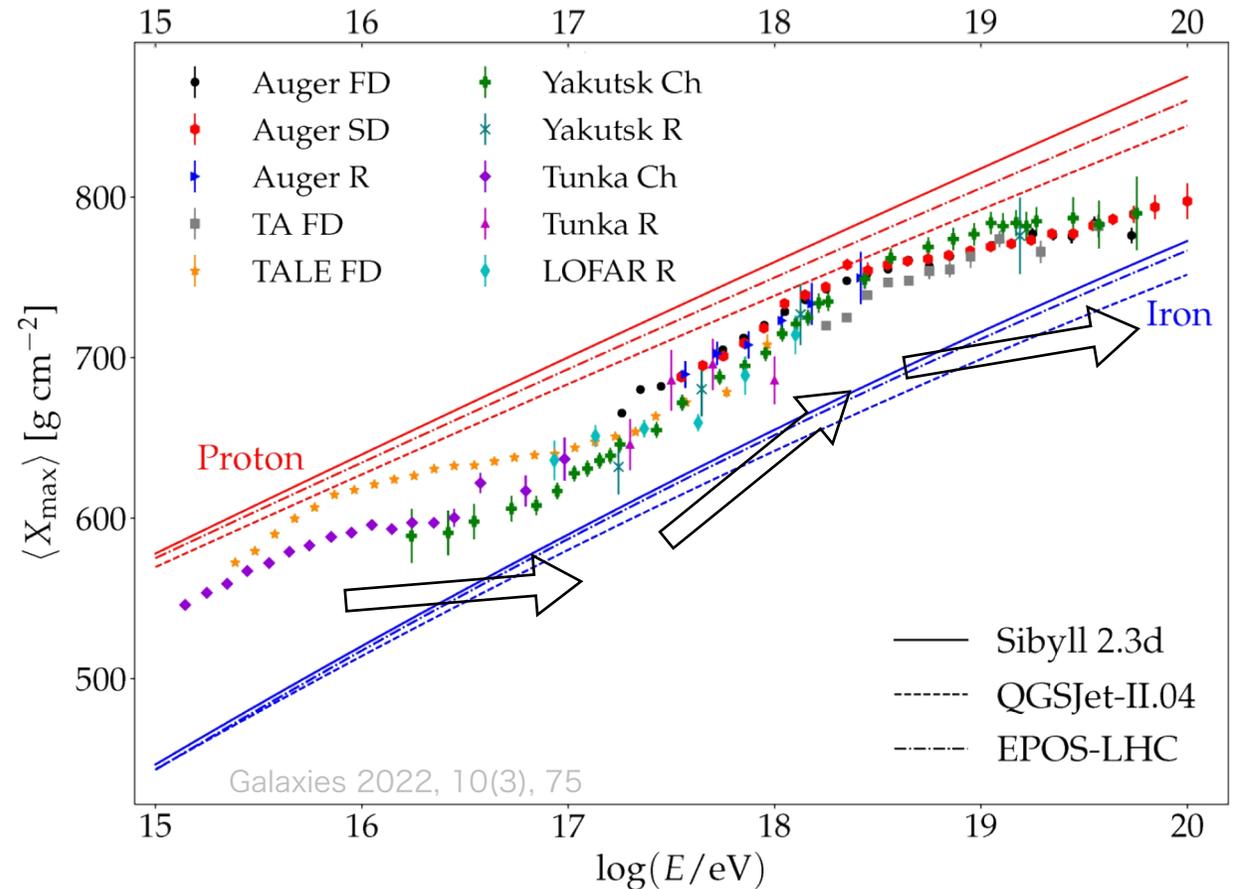
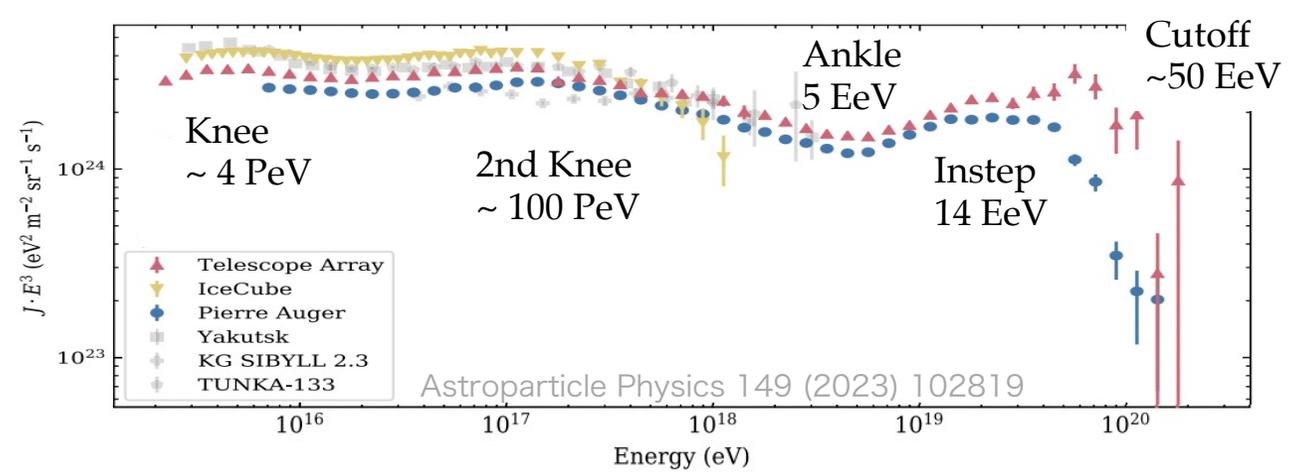
LHAASO result



Xmax 測定

mean mass of UHECR

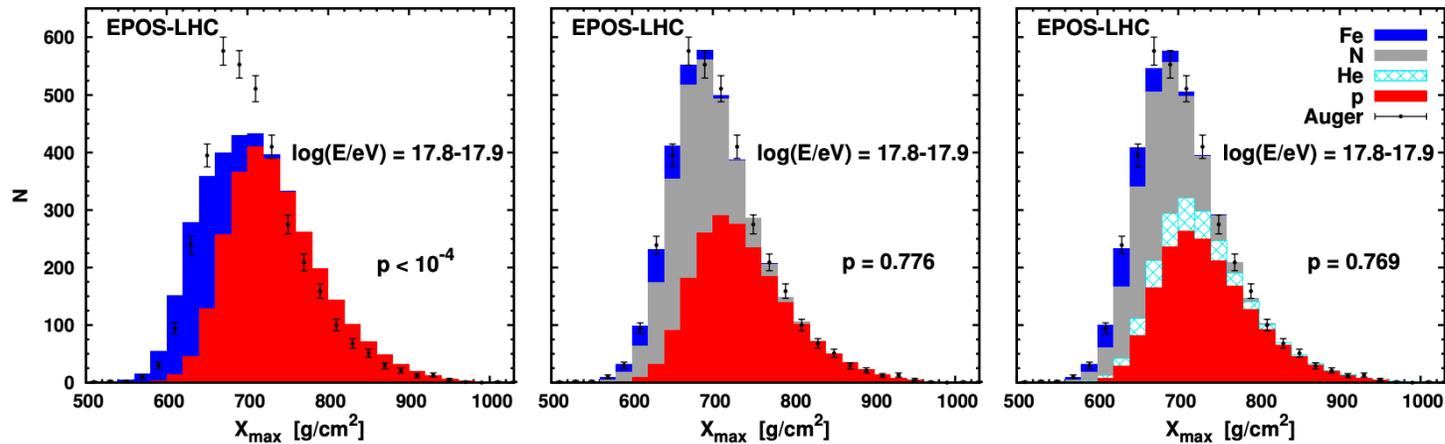
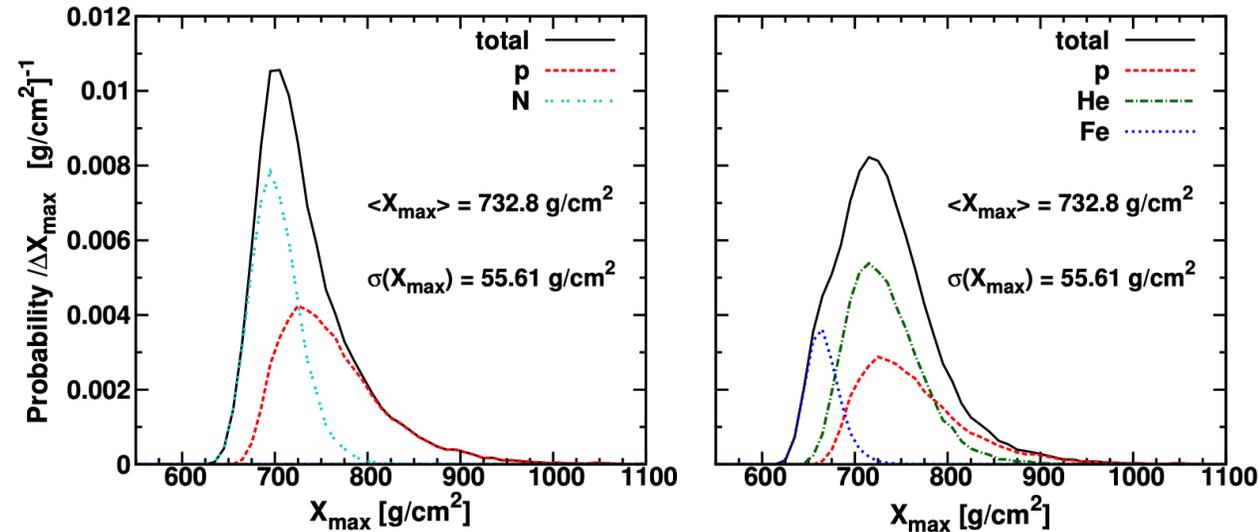
- $E < 10^{17}$ eV
 - become heavy
- 10^{17} eV to 10^{18} eV
 - heavy to lighter
- 10^{18} to 10^{19} eV
 - lightest mass at $2-3 \times 10^{18}$ eV
- $E > 10^{19}$ eV
 - become heavy with energy



Xmax 測定

Fraction of UHECR primaries

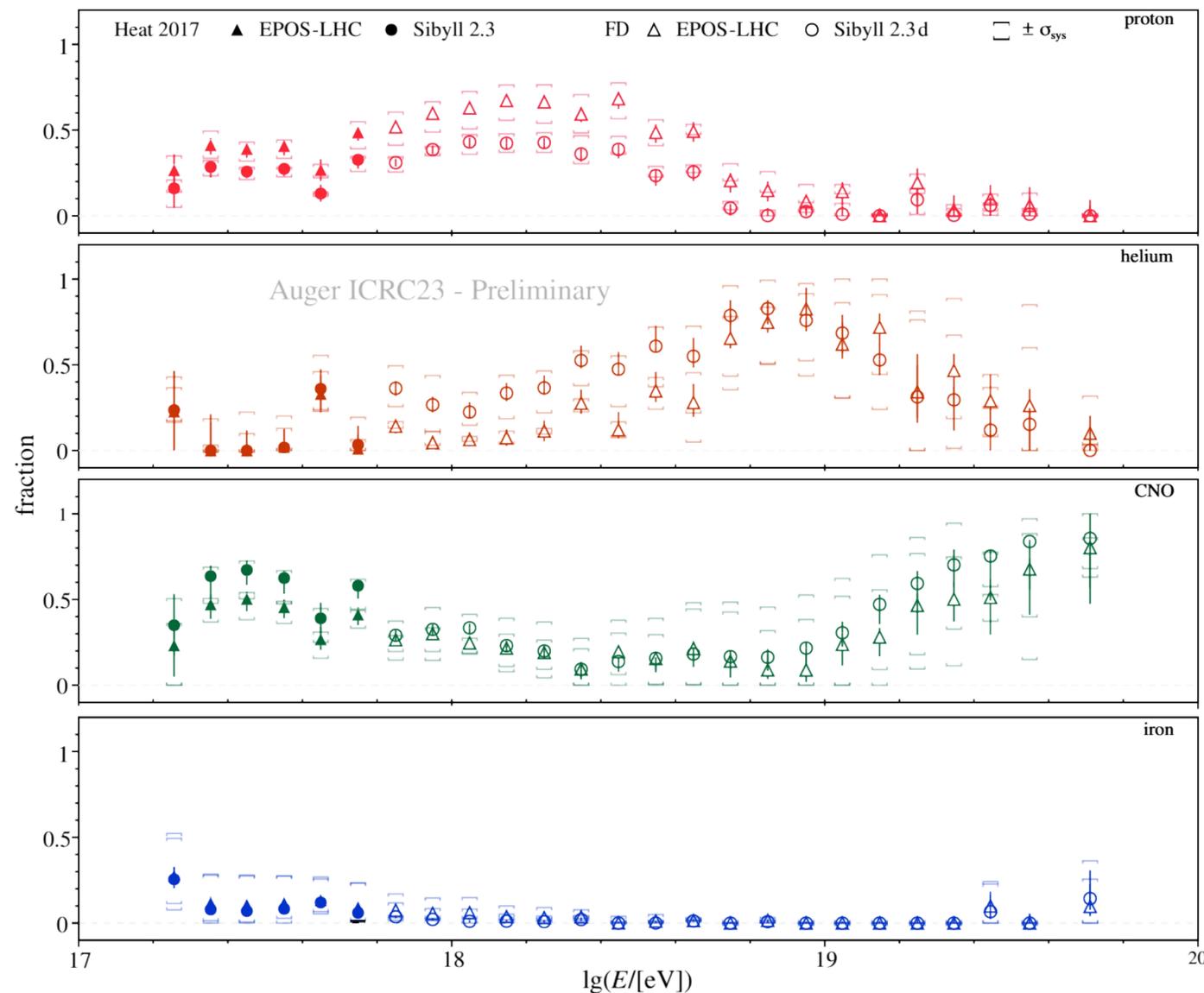
- Xmax 分布から1次宇宙線の混ざり具合を推定する



Xmax 測定

Fraction of UHECR primaries

- proton
 - peak around 2-3 EeV
 - low fraction at highest
- helium
 - peak at ~ 8 EeV
 - roughly $\sim 4x$ higher energy than proton
- CNO
 - continue to climb up to ~ 50 EeV
- iron
 - small fraction in full energy range

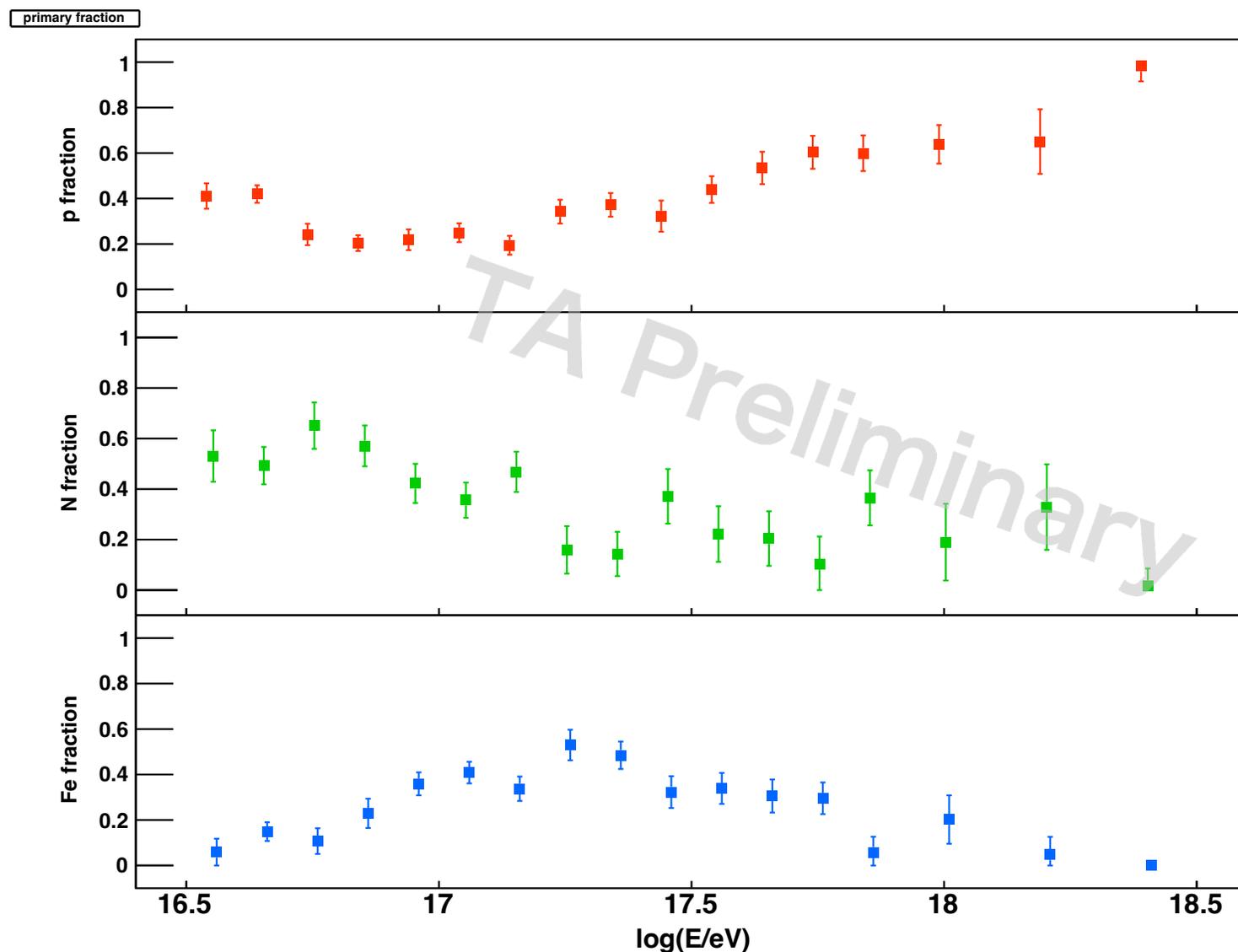


Xmax 測定



Fraction of UHECR primaries

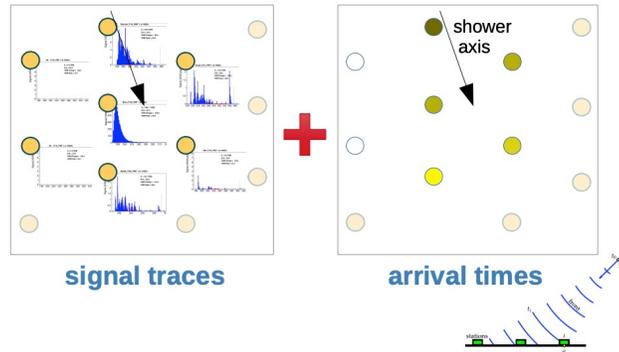
- proton
 - lowest fraction ~ 100 PeV
 - continue climb up to 3 EeV
- CNO
 - peak at ~ 50 PeV
 - low contribution in $E > 1$ EeV
- iron
 - peak at ~ 150 PeV ~ 2nd knee
 - roughly 26/7x higher energy than CNO



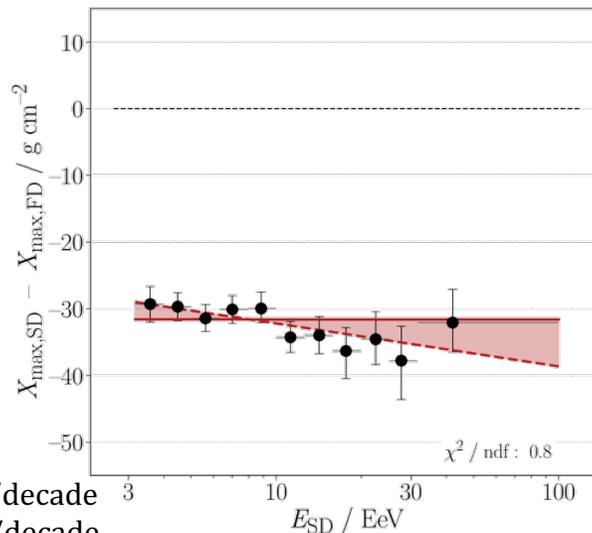
Xmax 測定

• Deep learning-based composition study

- SD データで X_{\max} 再構成
 - 入力には各 SD で記録された波形信号, 到来時刻



- FDで測定された X_{\max} で較正
 - $X_{\max}(\text{SD}) - X_{\max}(\text{FD}) \sim -30 \text{ g/cm}^2$
 - ミューオン量の不一致が原因の一つだと思われる

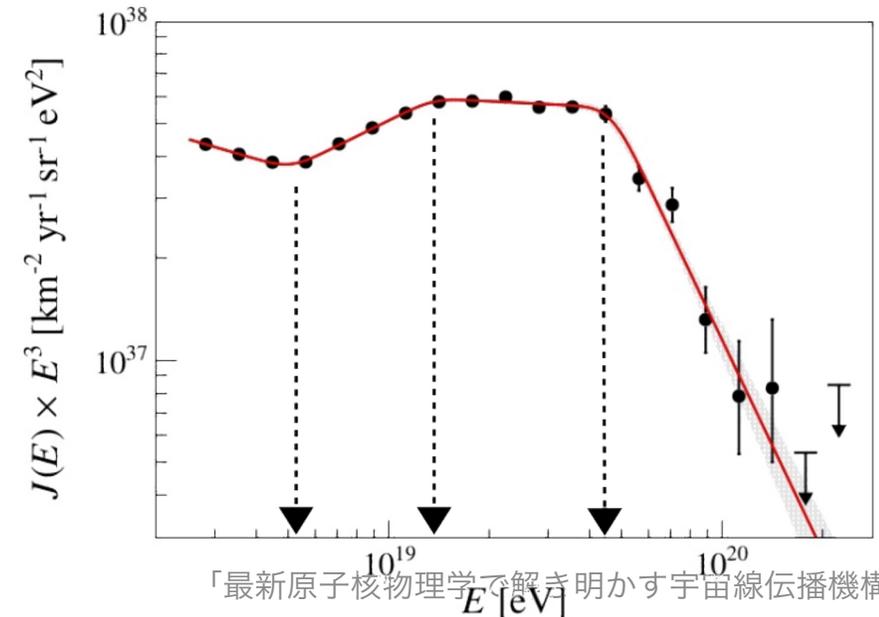
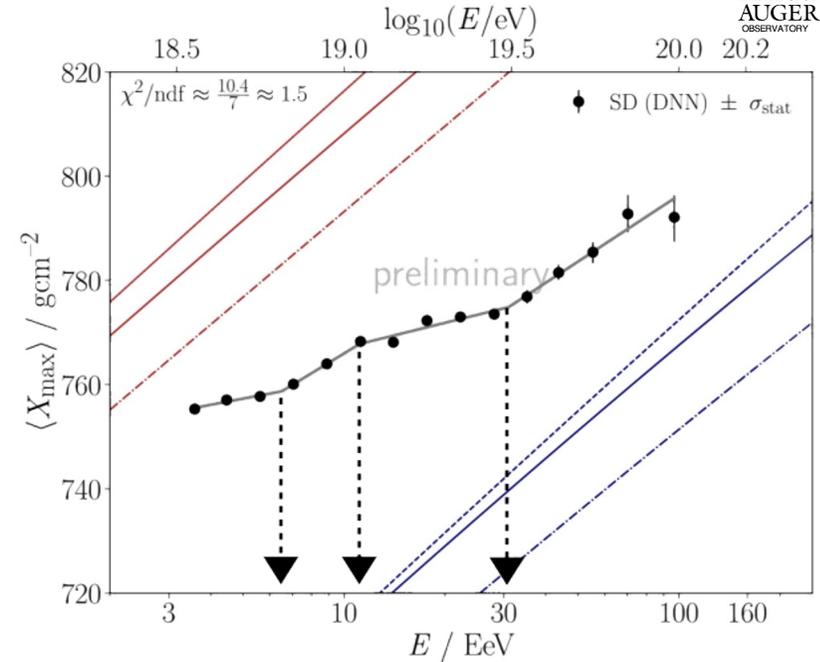


- 高統計での X_{\max} 測定を実現

- X_{\max} の変化は単調ではない

$E_0 = 6.5 \pm 0.6(\text{stat}) \pm 1(\text{sys}) \text{ EeV}$	$D_0 = 12 \pm 5(\text{stat}) \pm 6(\text{sys}) \text{ g/cm}^2/\text{decade}$
$E_1 = 11 \pm 2(\text{stat}) \pm 1(\text{sys}) \text{ EeV}$	$D_1 = 39 \pm 9(\text{stat}) \pm 14(\text{sys}) \text{ g/cm}^2/\text{decade}$
$E_2 = 31 \pm 5(\text{stat}) \pm 3(\text{sys}) \text{ EeV}$	$D_2 = 16 \pm 3(\text{stat}) \pm 6(\text{sys}) \text{ g/cm}^2/\text{decade}$
	$D_3 = 42 \pm 9(\text{stat}) \pm 12(\text{sys}) \text{ g/cm}^2/\text{decade}$

- 単調な変化は $\sim 4\sigma$ で否定
- スペクトルの折れ曲がり構造に連動している可能性を示唆



今後結果が出てくる測定

- LHAASOから proton/helium spectrum
 - チェレンコフ望遠鏡 + 地表アレイ
- Tibet AS γ から proton spectrum
- ALPACA から宇宙線測定
- TAから $<10\text{PeV}$ X_{max} 観測
- Auger から $<100\text{PeV}$ X_{max} 観測?

まとめ

確認しておきたいこと

- どのエネルギー範囲まで？
 - 最高エネルギー領域の現状は木戸さんのトーク？
 - IceCube, GRAPES, HAWC に触れてないけどいれますか？
 - IceCube は 機械学習での composition 結果
 - GRAPES は最近 proton spectrum を発表している
 - HAWC は proton+helium spectrum を発表している
- スペクトルとの関連性は話す？
- ミューオン問題のことをこのトークでも触れる？触れない？
- 原子核との関係が？ なトークに現状なっているかも

} 間接測定とのつながり？

backup