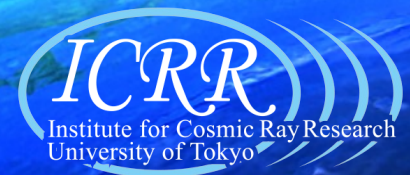


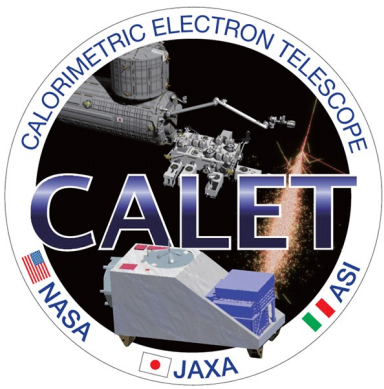
最高エネルギー宇宙線でみる宇宙

藤田 慧太郎
東京大学 宇宙線研究所

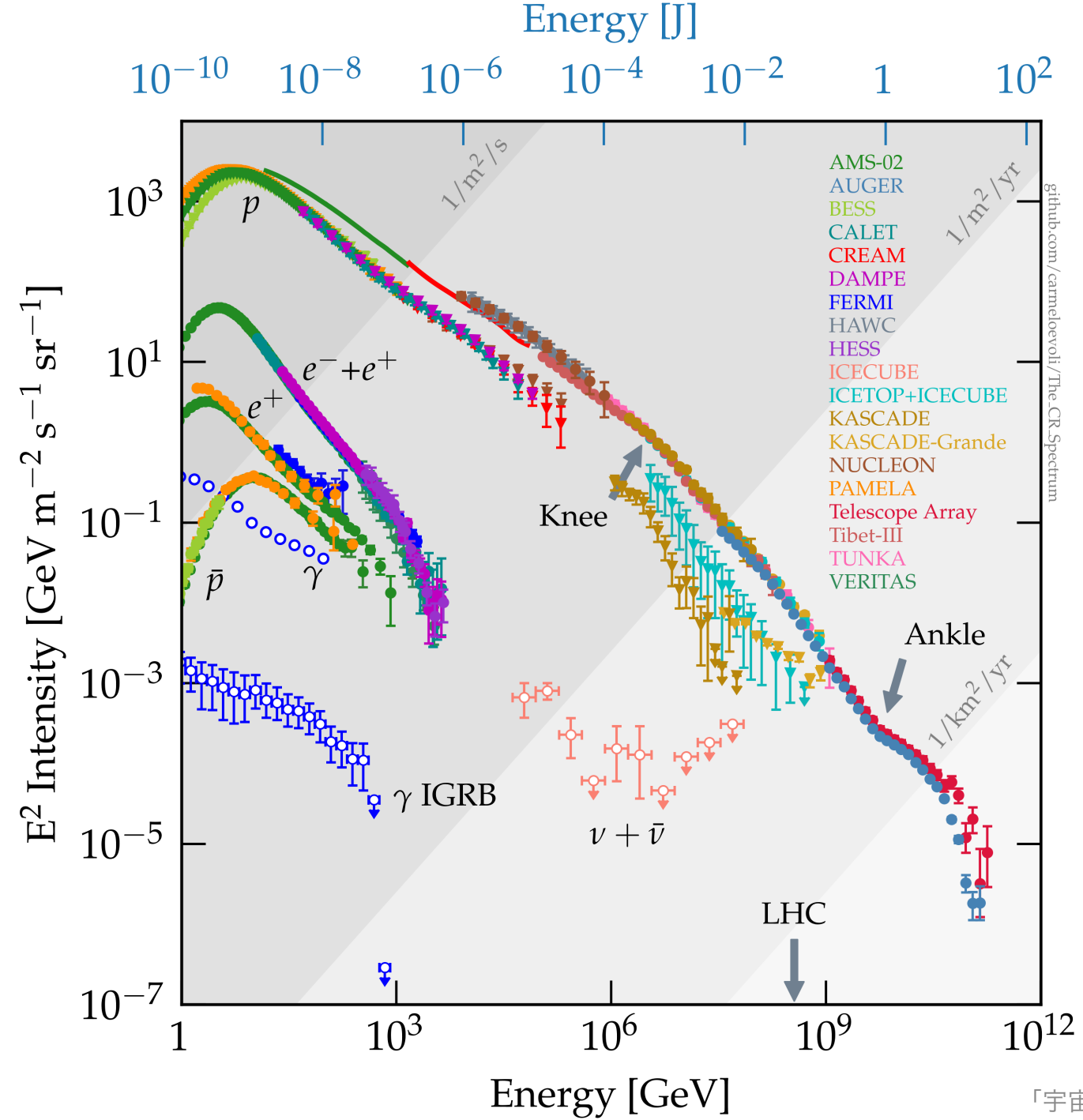
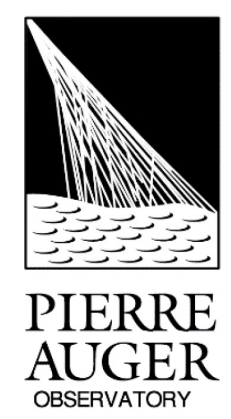
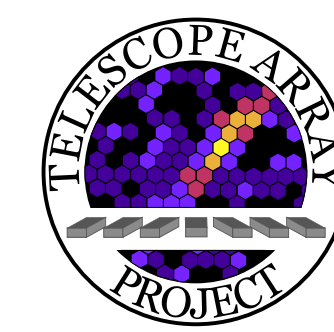


「宇宙線で繋ぐ文明・地球環境・太陽系・銀河」

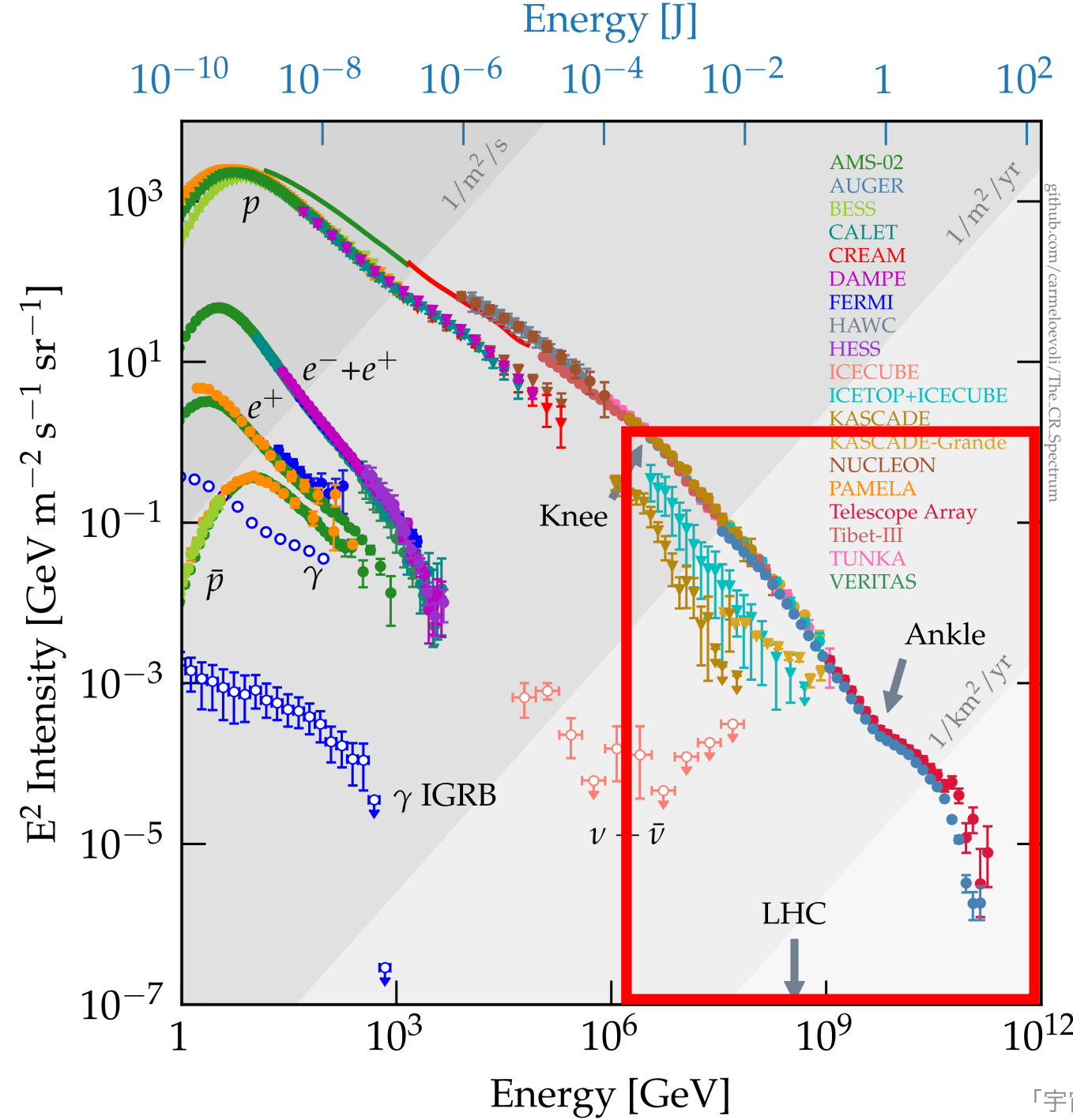
Direct



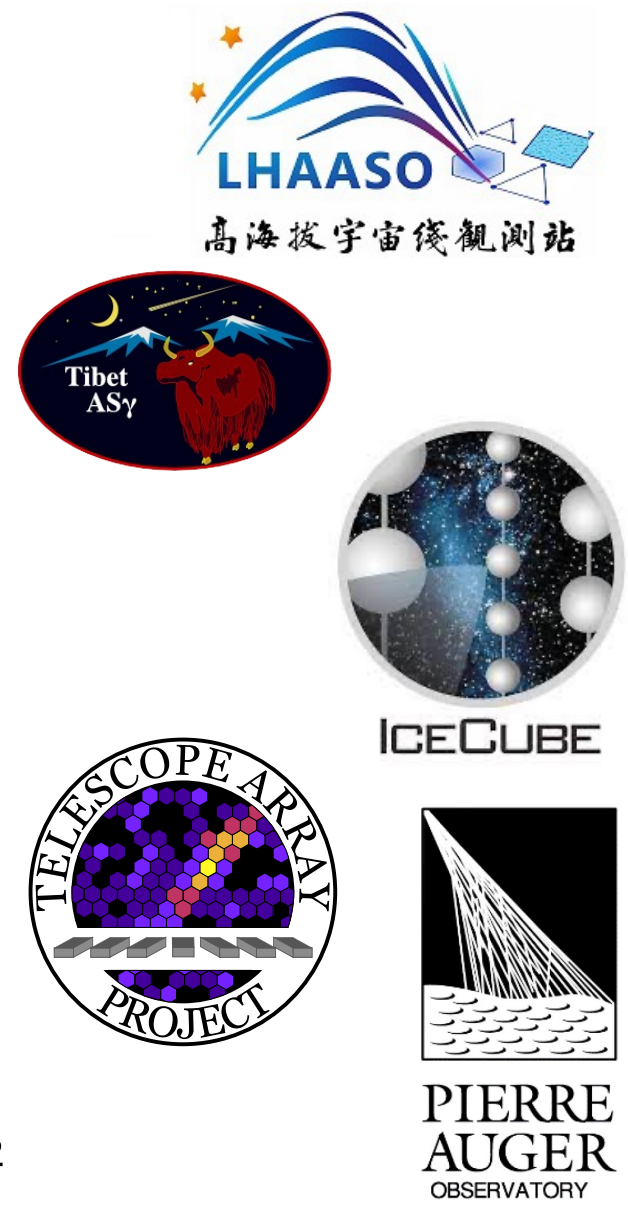
Indirect



Direct

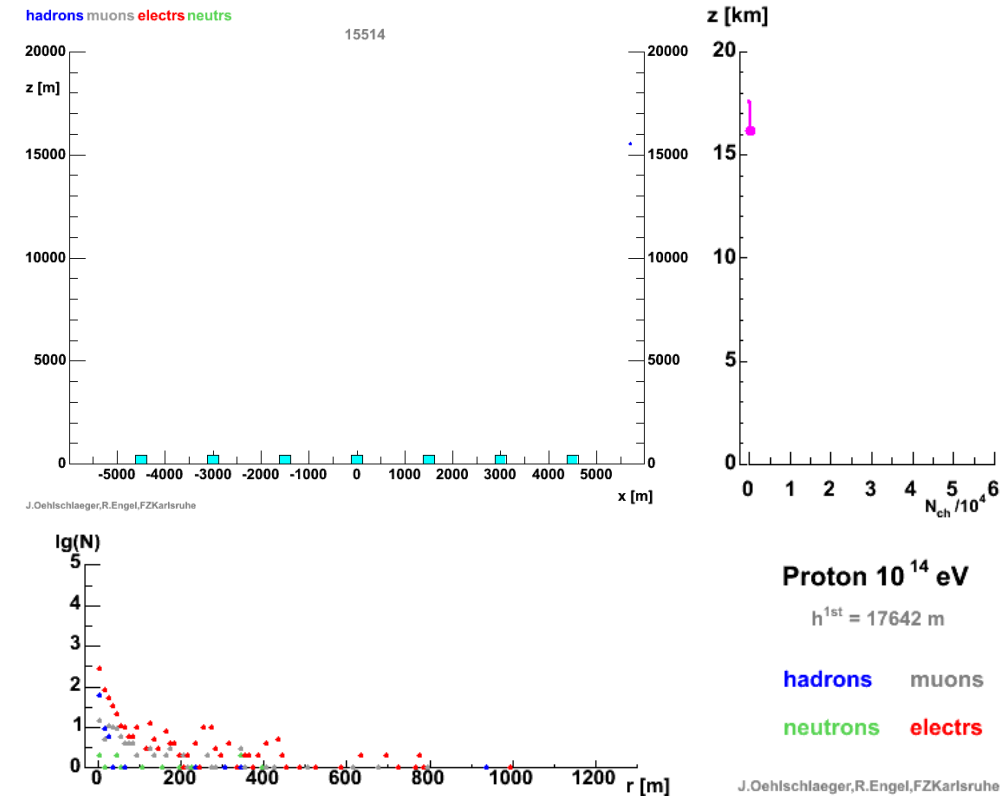


Indirect



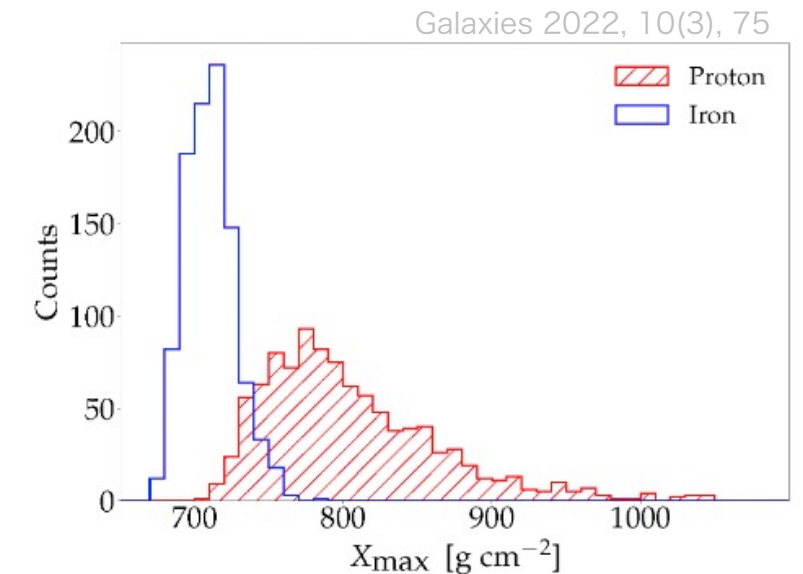
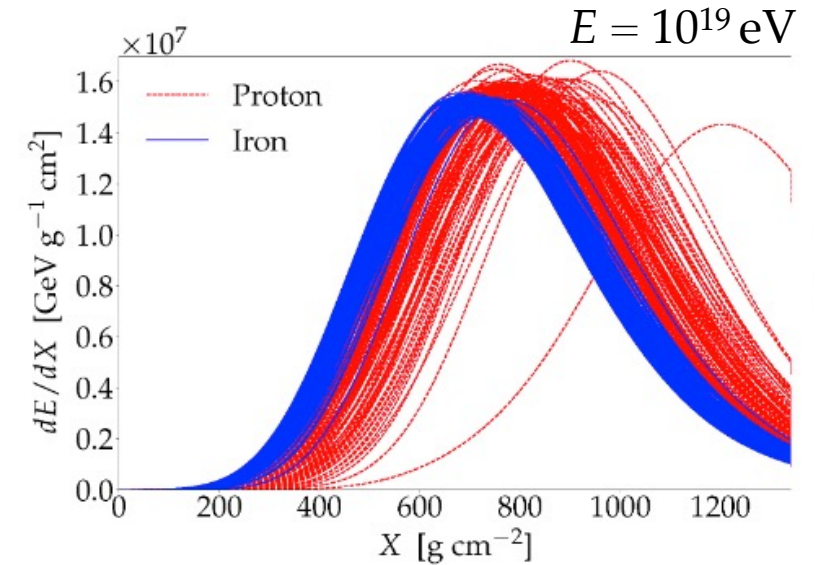
Indirect Cosmic Ray Measurement

- 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
 - 大気蛍光望遠鏡(FD) → シャワー発達を撮像
- 電波検出器
- $E \sim 10^{12}$ 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, 電波
- $E \sim 10^{18}$ 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
 - 大気蛍光望遠鏡(FD) → シャワー発達を撮像
- 電波検出器
- $E \sim 10^{12}$ 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, 電波
- $E \sim 10^{18}$ eV: 地表粒子検出器, FD, or both





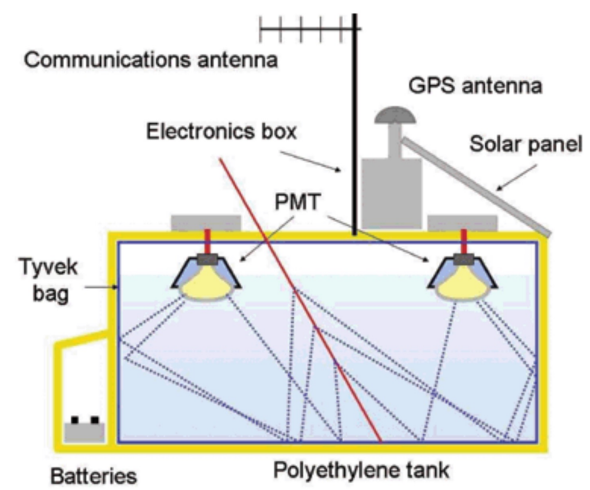
UHECR Observatories

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

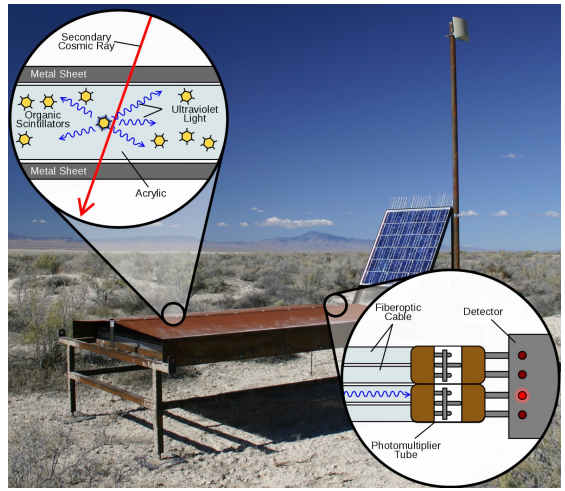
UHECR Observatories

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

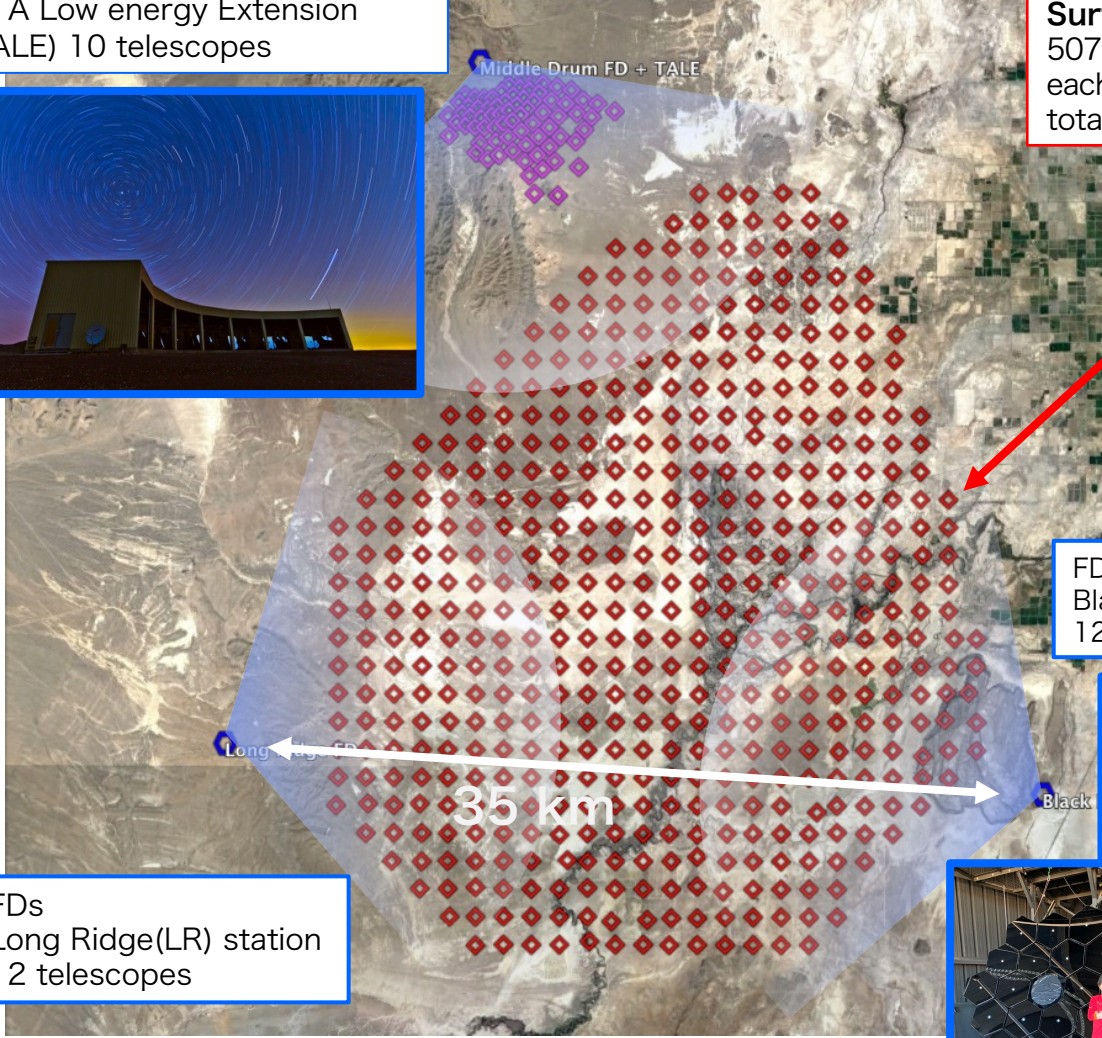


- 38+10 大気蛍光望遠鏡

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



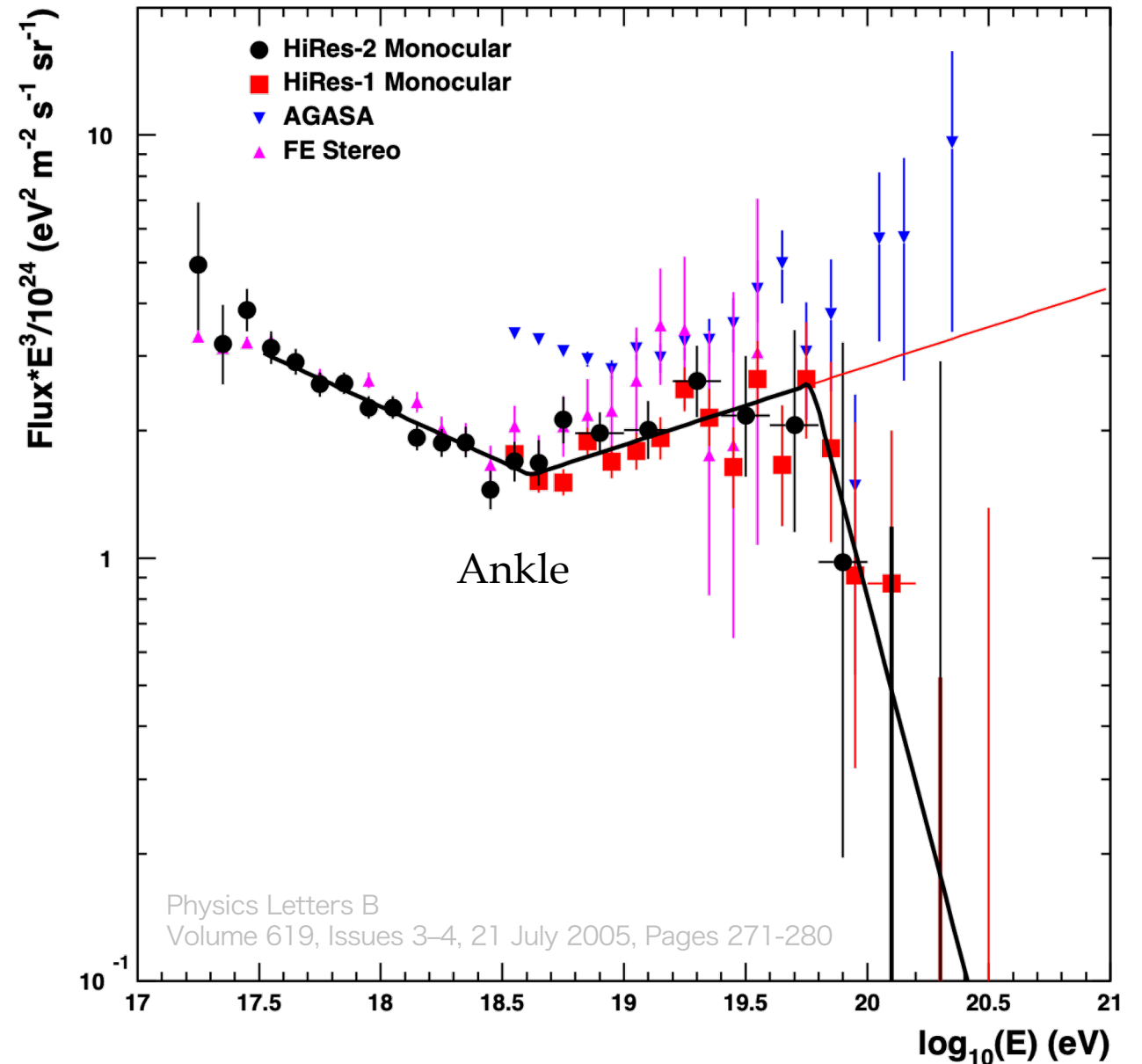
FDs
Black Rock Mesa(BRM) station
12 telescopes

FDs
Long Ridge(LR) station
12 telescopes

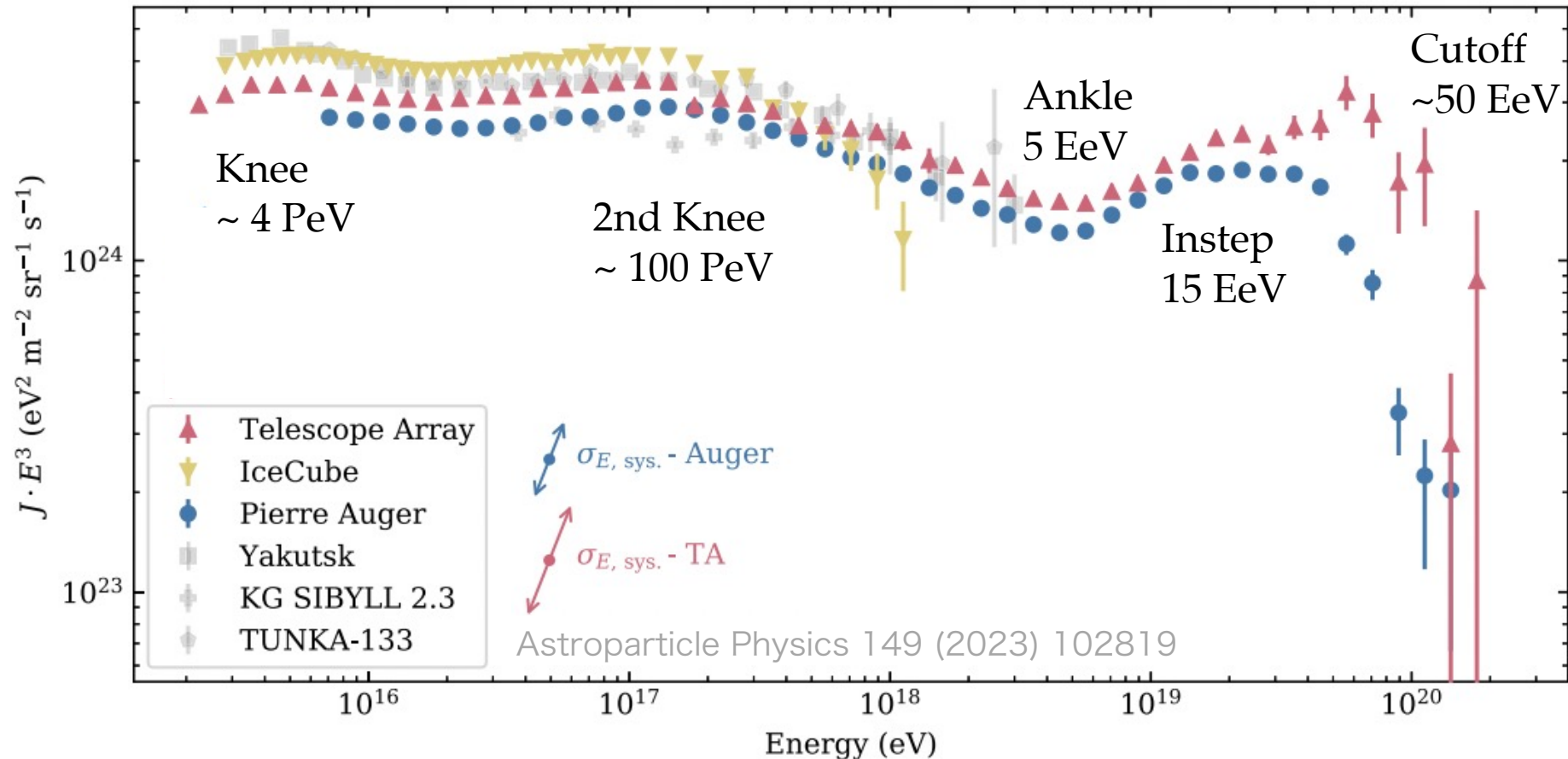


Before Auger/TA Era

- AGASA/HiRes
 - ~20年前(6さい)
- AGASA(▼)
 - エネルギースペクトルは続く
- HiRes(●■)
 - カットオフを示唆
 - 最高エネルギー宇宙線は proton?
 - 構造がシンプルに説明できる



Open Questions of UHECRs



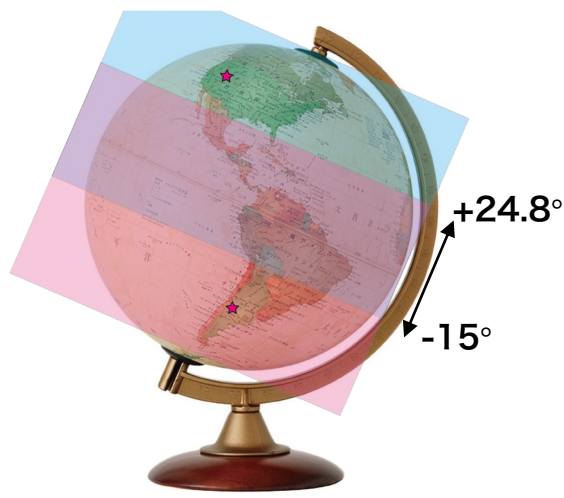
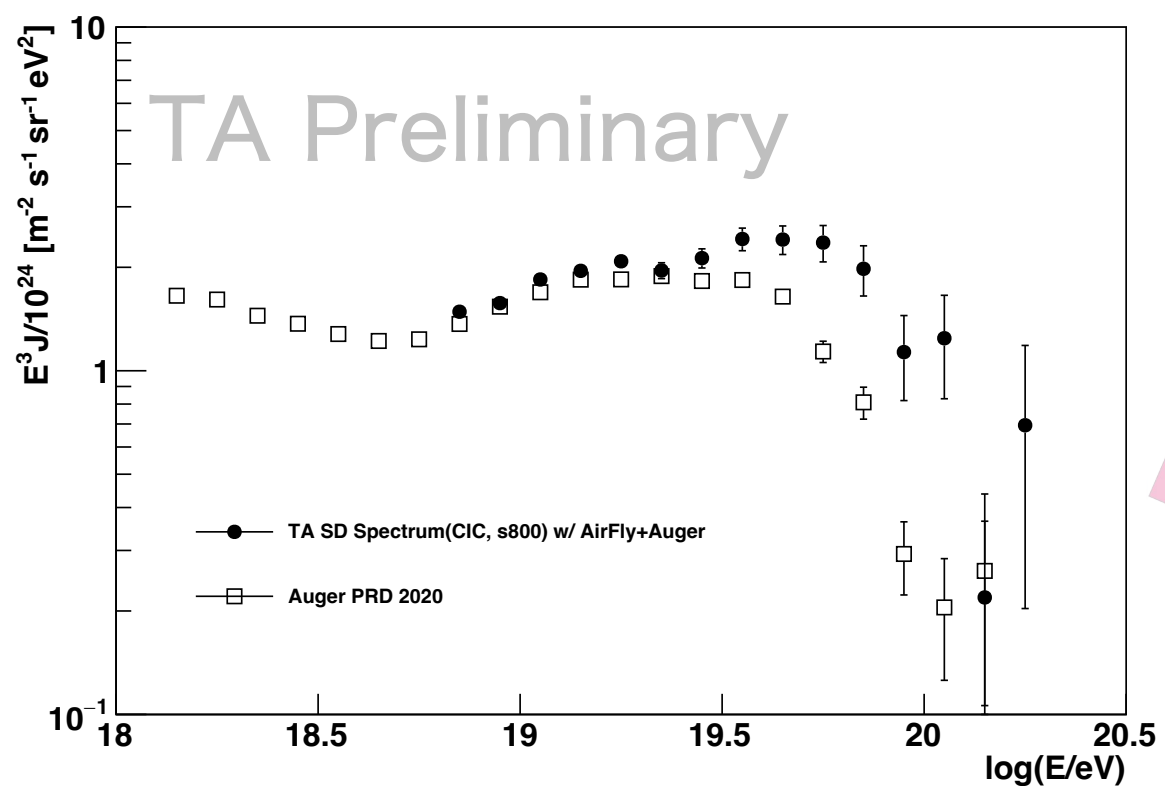
- 最高エネルギー宇宙線源は？ その加速メカニズムは？
- Cutoff の起源は？ まだ先は続くのか？
 - それ以外の構造は？
- 銀河系内/系外宇宙線の移り変わりはどこなのか？ etc.

エネルギースペクトル
到来方向分布
化学組成
に反映されるはず

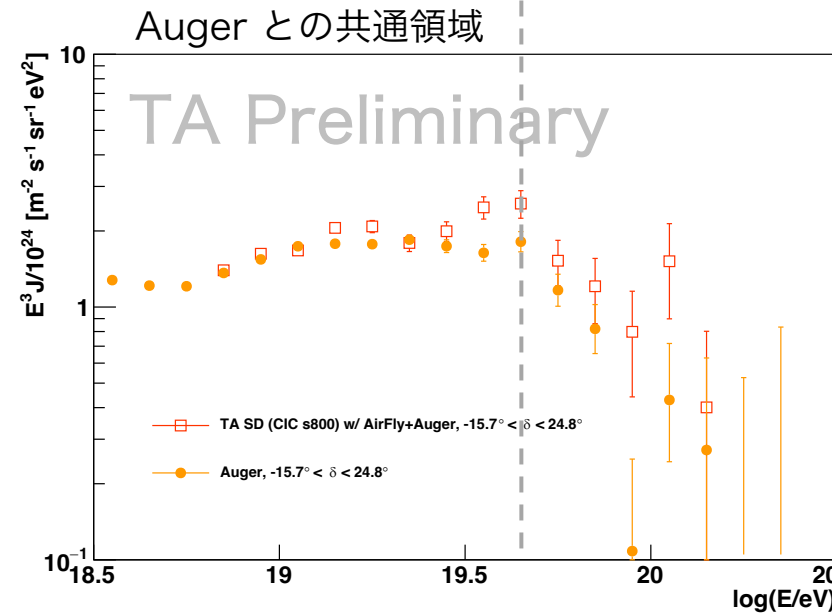
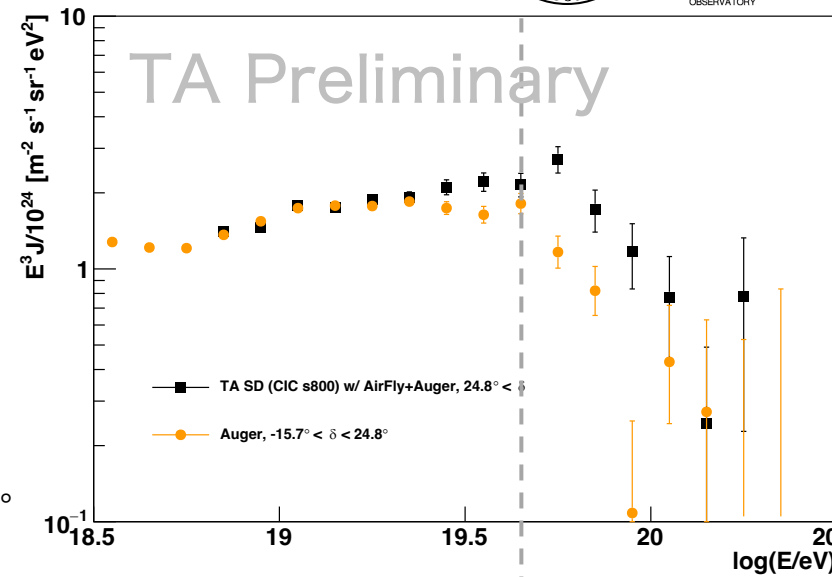
Spectrum at highest energy



- TA スペクトルを Auger 解析にそらえて再解析



Auger: 35° S
- θ up to 60°
TA: 39° N
- θ up to 55°

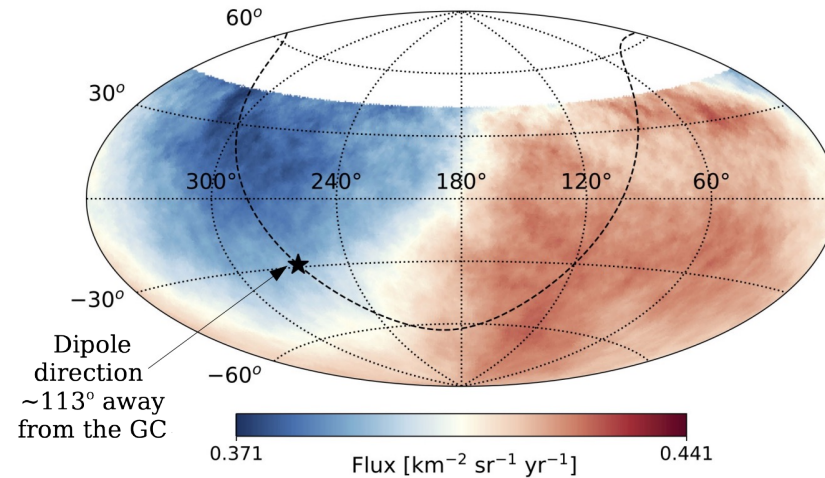


- $E < 10^{19.5}$ eV: Nice agreement
- TAスペクトルを南北に分割
 - Auger との共通領域 → agreement
- 南北でスペクトルが異なる？

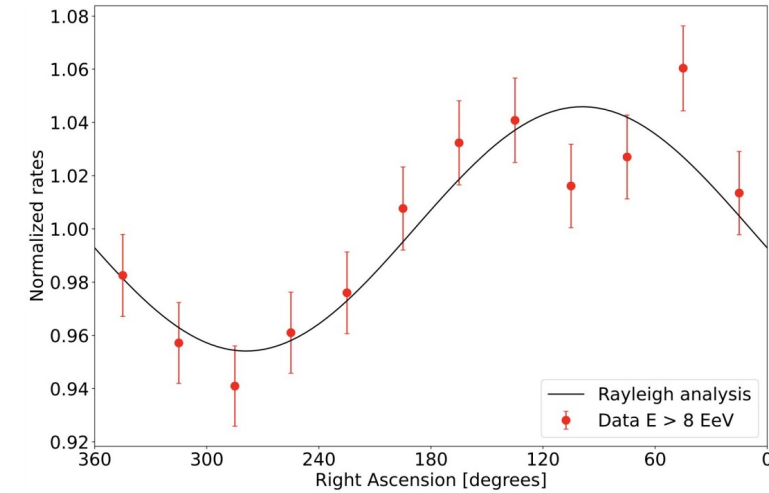
Anisotropy

宇宙線の到来方向異方性探査, Auger

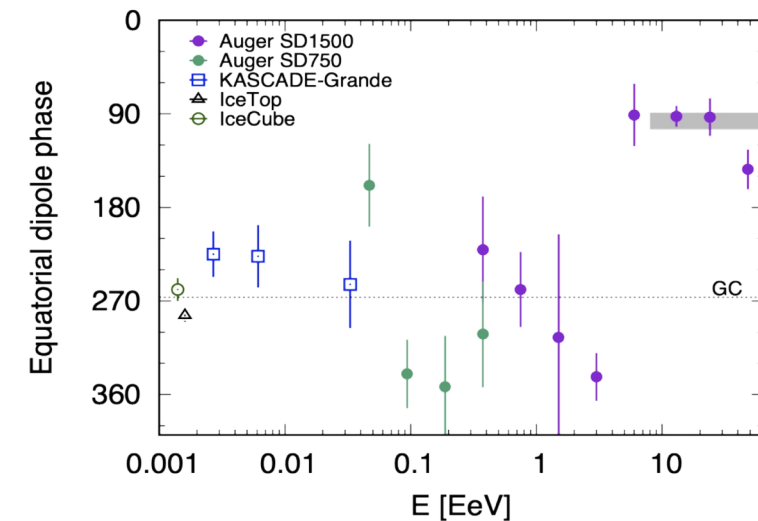
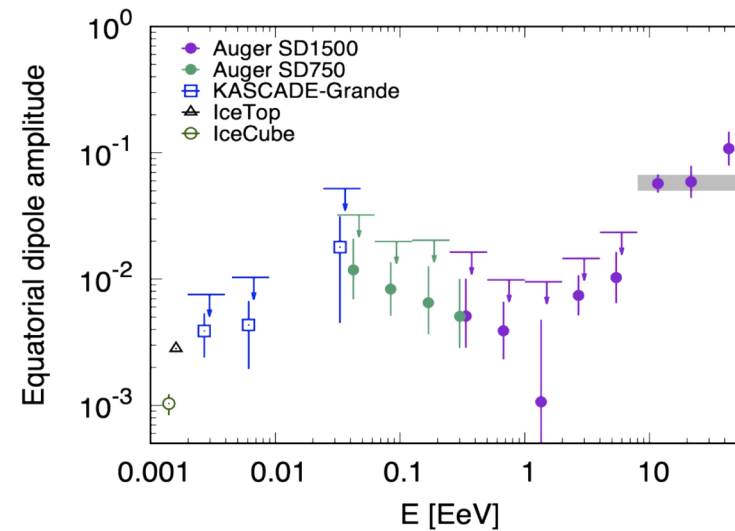
- $E > 8 \text{ EeV}$
 - 6.9σ level
- 8-16 EeV
 - 5.7σ level
- 超過の方向は銀河中心から
~113° 離れた方向
→ 起源は銀河系外



Equatorial coordinates, smoothed by a top-hat window of 45°.



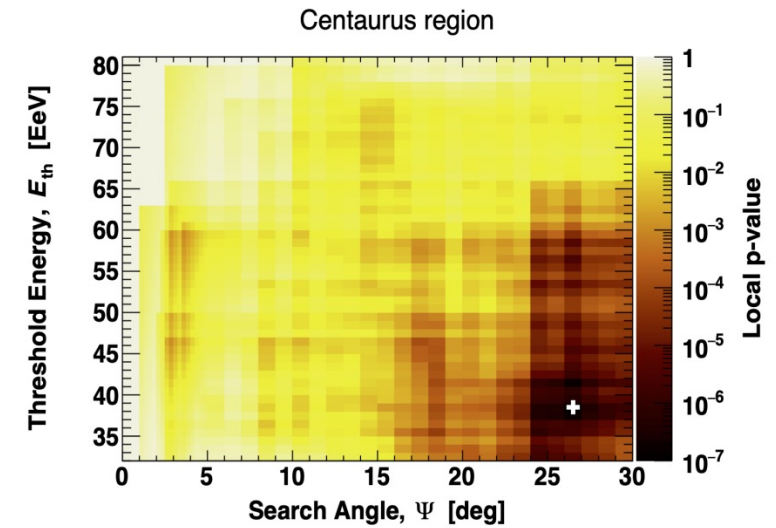
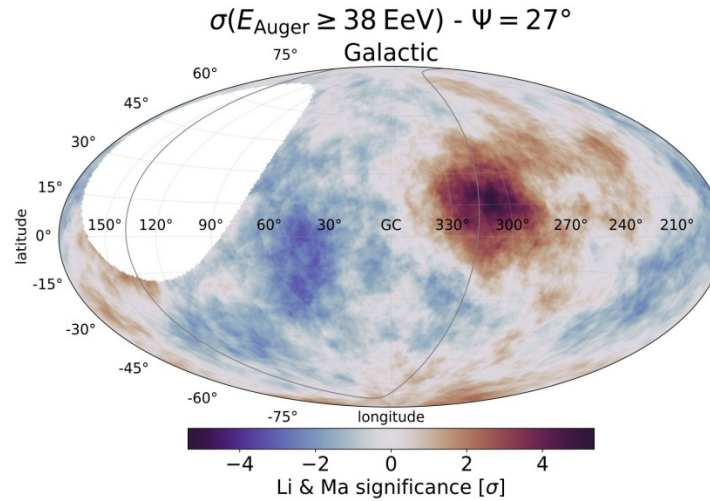
- 異方性の大きさは
エネルギーとともに増加
- 宇宙線起源の銀河系内から
系外への遷移がみえている?



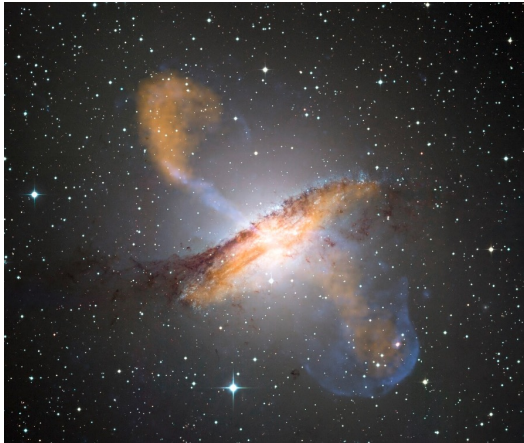
Anisotropy

• 宇宙線の到来方向異方性探査, Auger

- $E > 32 \text{ EeV}$
- 天体カタログとの相関解析
 - E_{th} , 広がり, 寄与をスキャン
 - スターバースト銀河
 - ただし, $\sim 10\%$



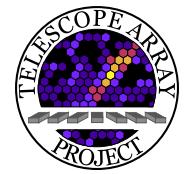
- Cen. A との相関解析



<https://www.eso.org/public/images/eso0903a/>

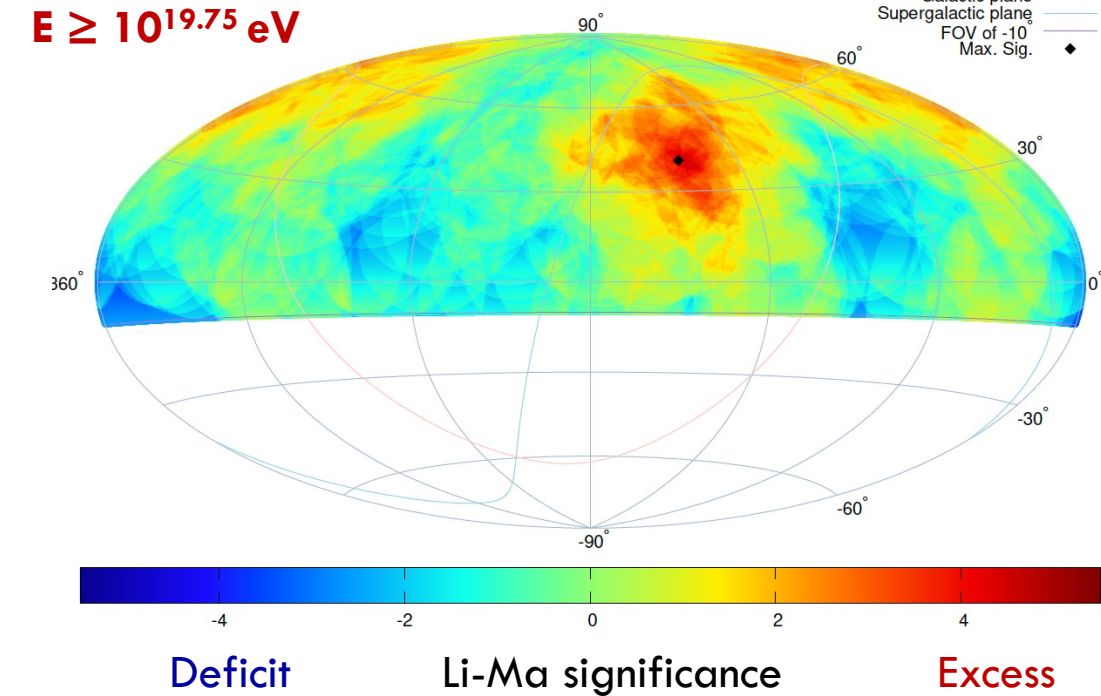
Catalog	E_{th} [EeV]	Ψ [°]	α [%]	TS	Post-trial p -value
All galaxies (IR)	38	24^{+15}_{-8}	14^{+8}_{-6}	18.5	6.3×10^{-4} → 3.2σ
Starbursts (radio)	38	25^{+13}_{-7}	9^{+7}_{-4}	23.4	6.6×10^{-5} → 3.8σ
All AGNs (X-rays)	38	25^{+12}_{-7}	7^{+4}_{-3}	20.5	2.5×10^{-4} → 3.5σ
Jetted AGNs (γ -rays)	38	23^{+8}_{-7}	6^{+3}_{-3}	19.2	4.6×10^{-4} → 3.3σ

Analysis	E_{th} [EeV]	Ψ [°]	N_{obs}	N_{exp}	Local p -value	Post-trial p -value
Cen A	38	27	237	169.0	1.1×10^{-7}	3.0×10^{-5} → 4.0σ



Anisotropy

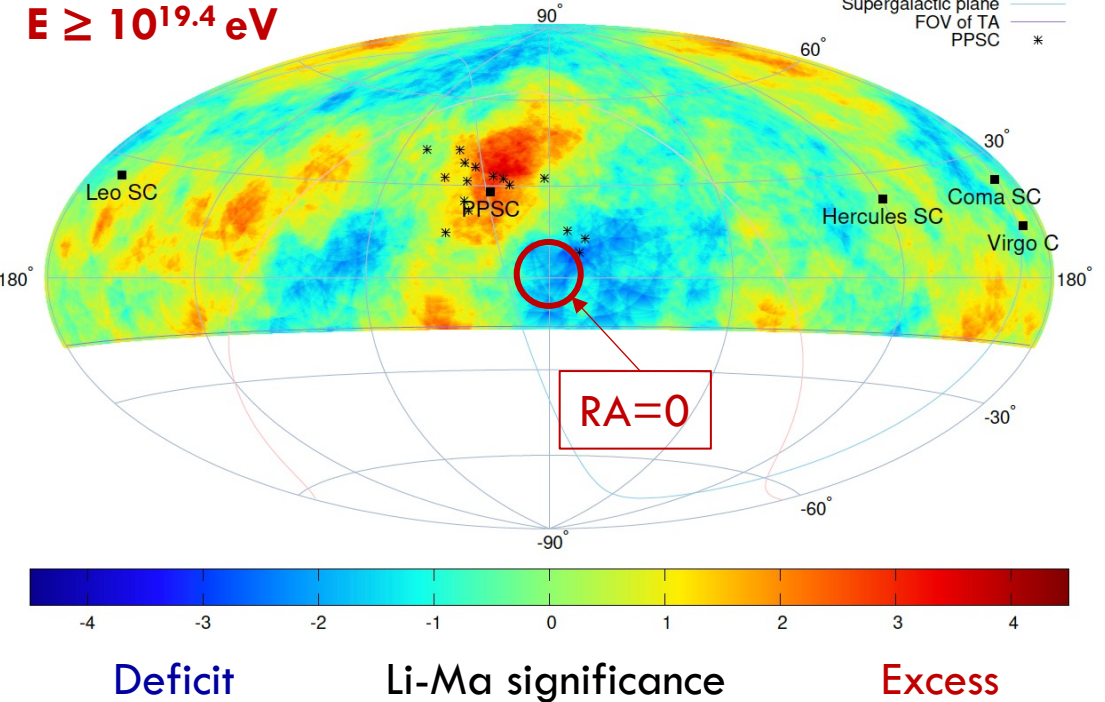
- 宇宙線の到来方向異方性探査, TA
25°-radius oversampling



- 216 events (15-year TA SD data)
- Max local sig.: 4.8σ at $(144.0^\circ, 40.5^\circ)$
Obs.: 44 events
 N_{bg} : 18.0 events
- Post-trial probability:
 $P(S_{\text{MC}} > 4.8\sigma) = 2.7 \times 10^{-3} \rightarrow 2.8\sigma$

- ペルセウス座・うお座超銀河団
の方向と相関？

20°-radius oversampling

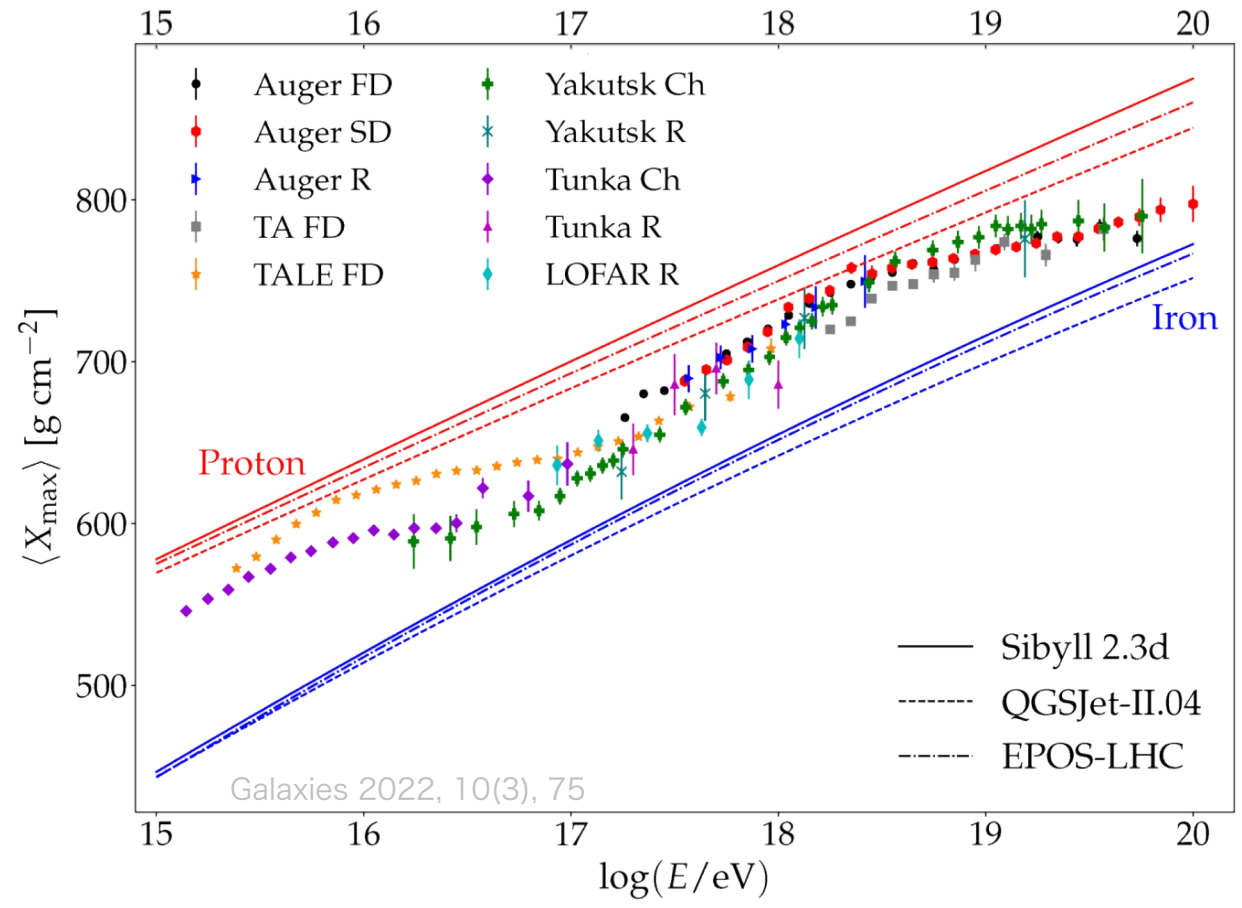
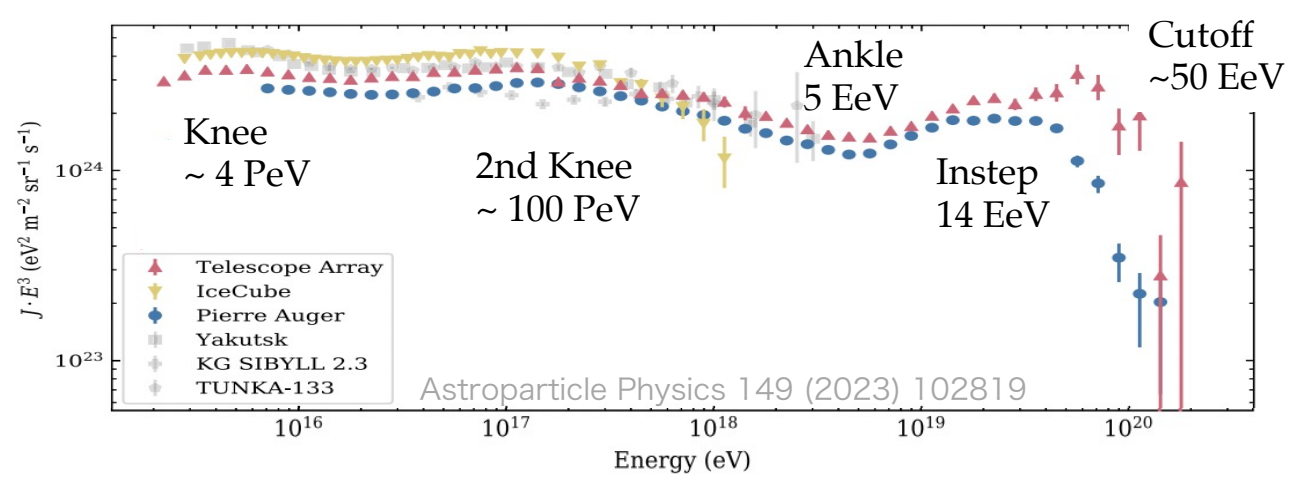


- 1125 events (15-year TA SD data)
- Li-Ma sig.: 4.0σ at $(17.9^\circ, 35.2^\circ)$
Obs.: 101 events
 N_{bg} : 64.7 events
- Chance probability of having equal or higher
excess on top of the PPSC $\rightarrow 3.3\sigma$

Composition

mean mass of UHECR

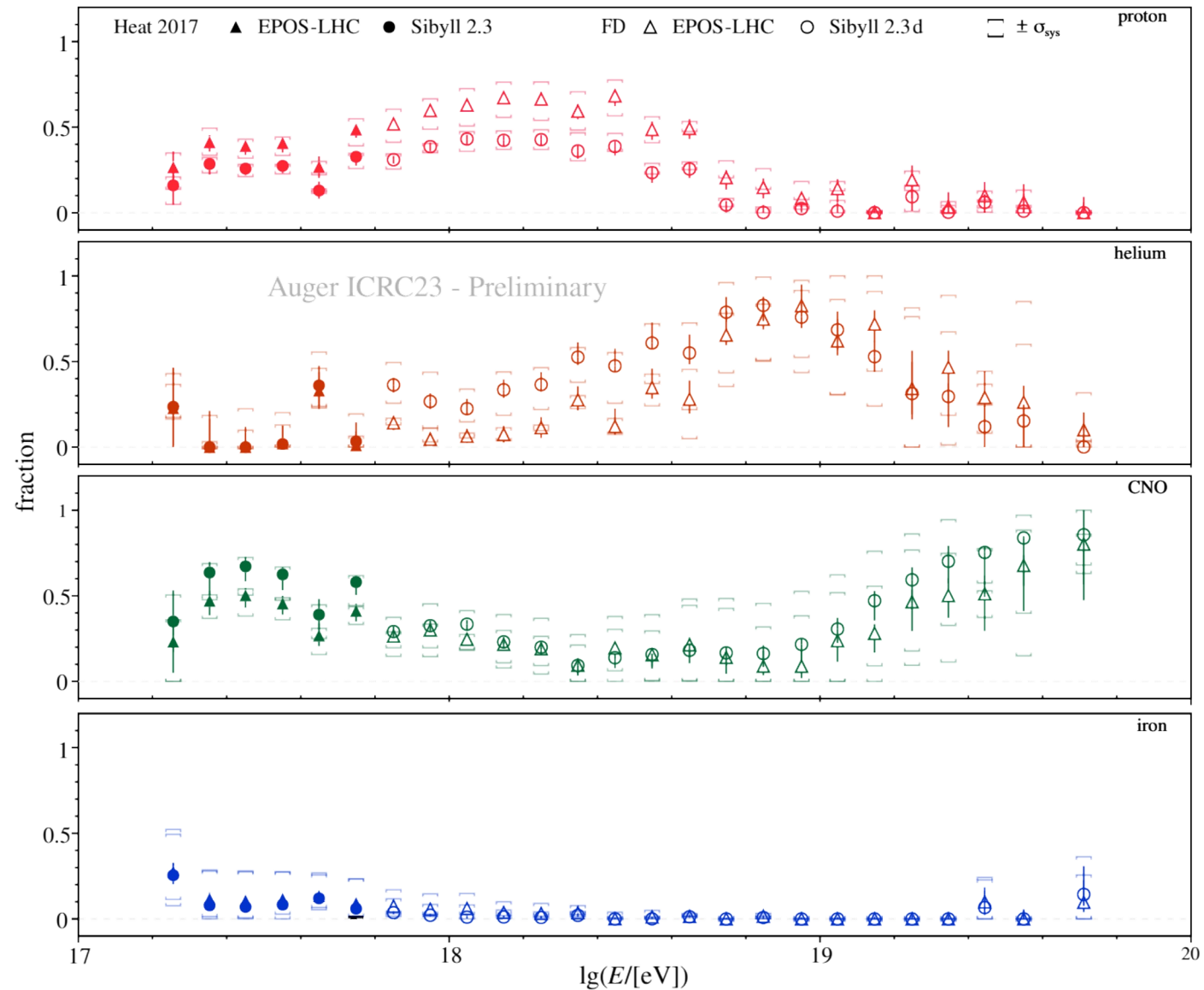
- $E < 10^{17}$ eV
 - become heavy
- 10^{17} eV to 10^{18} eV
 - heavy to lighter
- 10^{18} to 10^{19} eV
 - lightest mass at $2-3 \times 10^{18}$ eV
- $E > 10^{19}$ eV
 - become heavy with energy



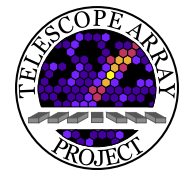
Composition

Fraction of UHECR primaries

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

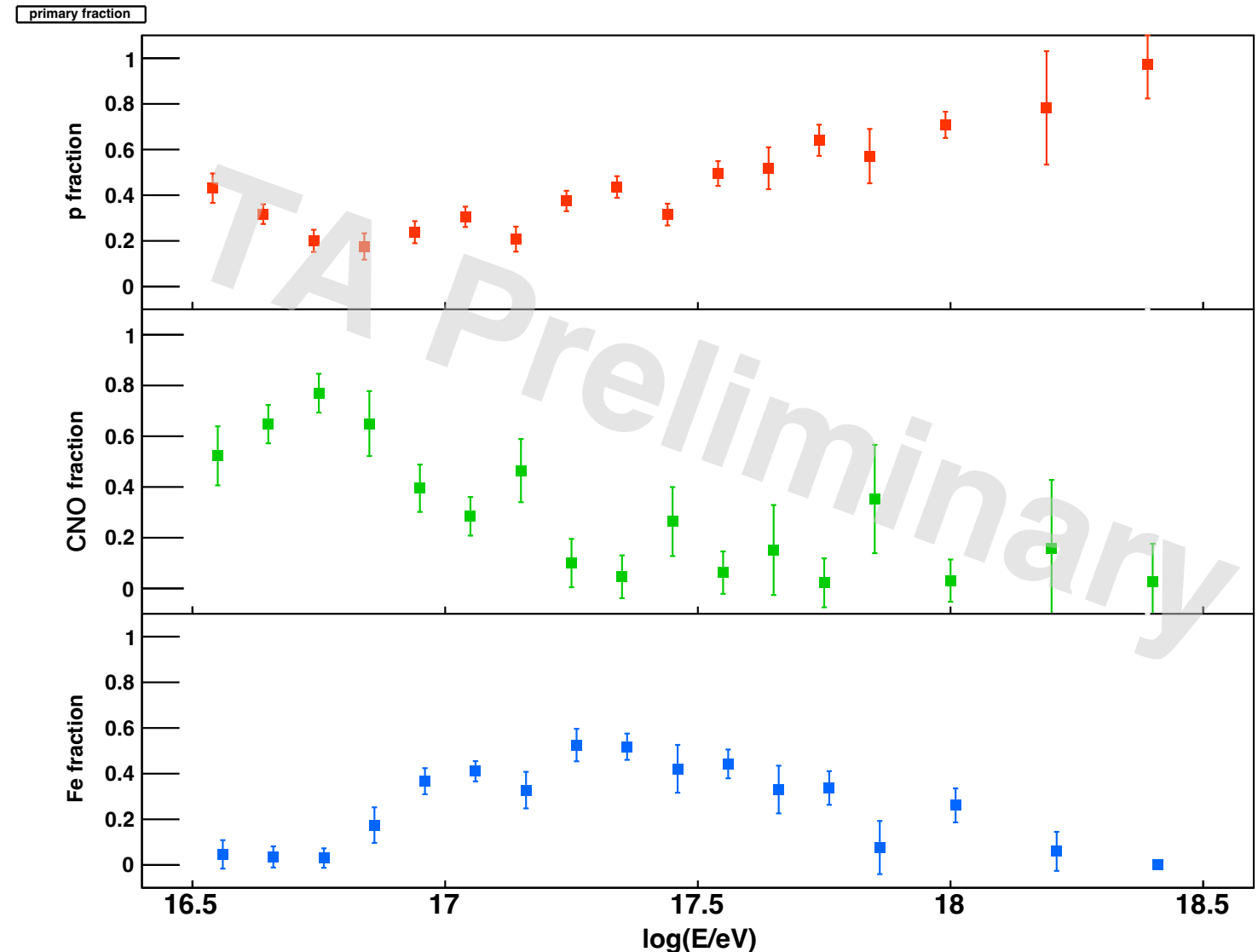


Composition



Fraction of UHECR primaries

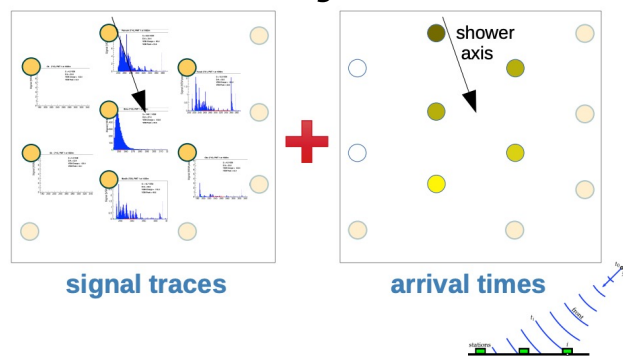
- proton
 - lowest fraction ~ 100 PeV
 - continue climb up to 3 EeV
- CNO
 - peak at ~ 50 PeV
 - low contribution in $E > 1$ EeV
- iron
 - peak at ~ 150 PeV ~ 2nd knee
 - roughly 26/7x higher energy than CNO



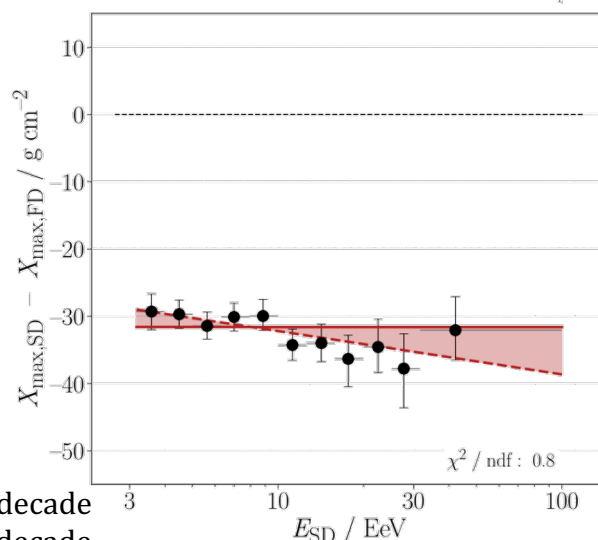
Composition

• 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

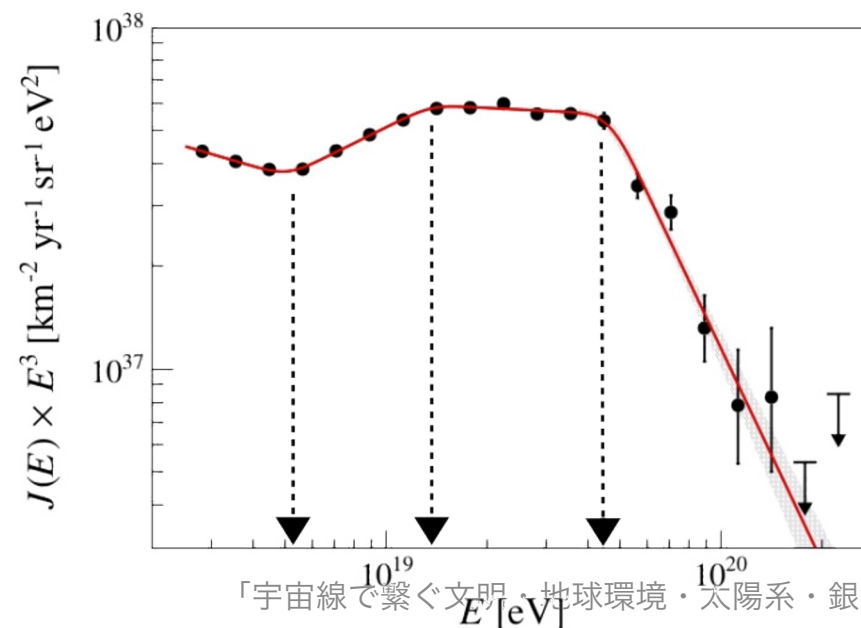
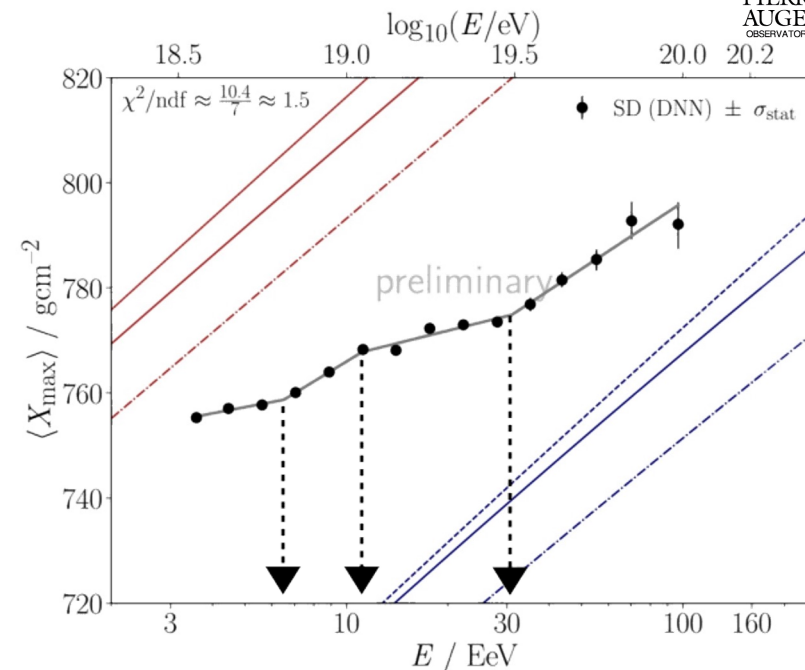


- FDで測定された X_{\max} で較正
 - $X_{\max}(\text{SD}) - X_{\max}(\text{FD}) \sim -30 \text{ g/cm}^2$
 - ミューオン量の不一致が原因の一つだと思われる

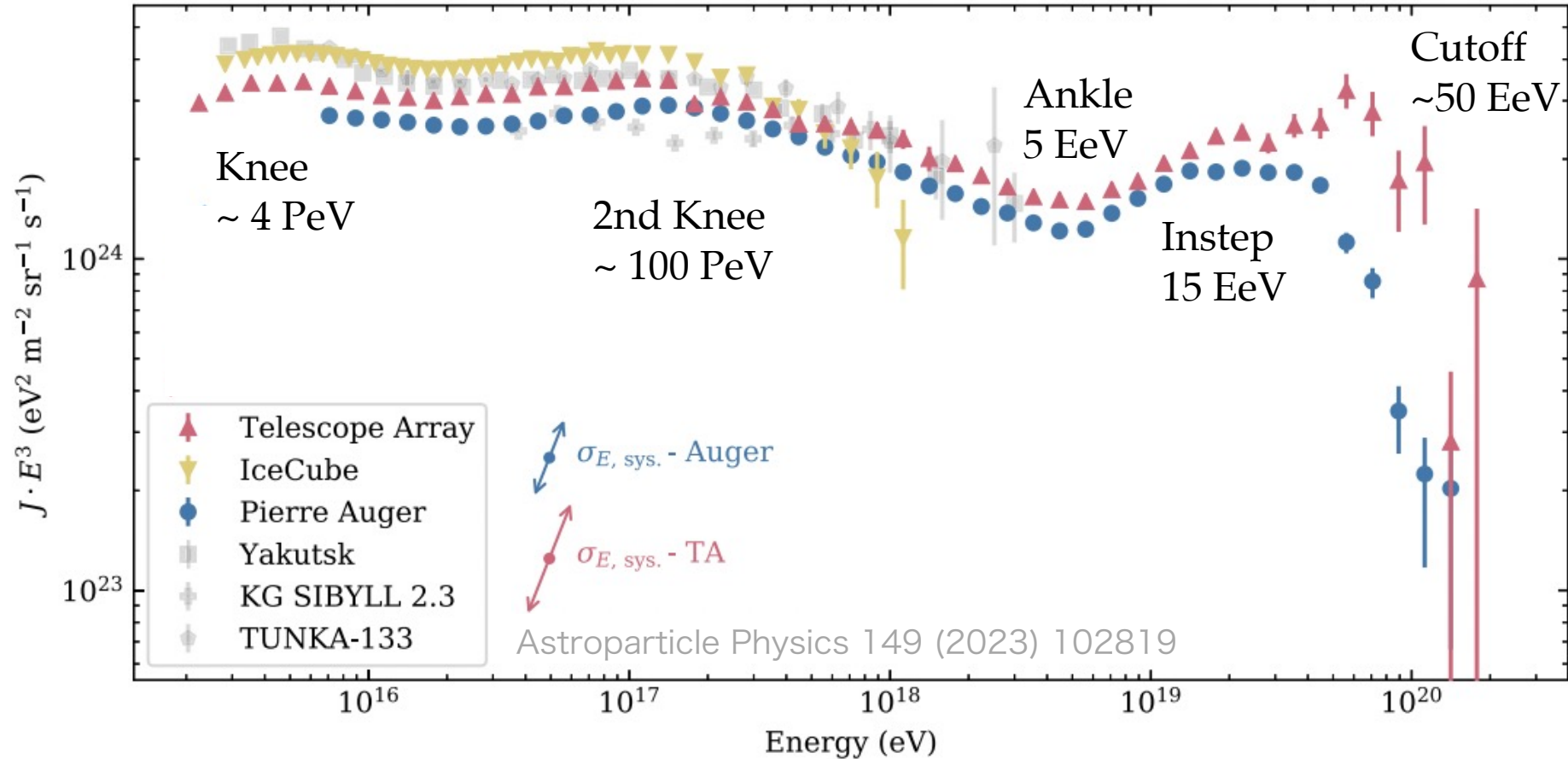


$E_0 = 6.5 \pm 0.5(\text{stat}) \pm 1(\text{sys}) \text{ EeV}$	$D_0 = 12 \pm 5(\text{stat}) \pm 2(\text{sys}) \text{ g/cm}^2/\text{decade}$
$E_1 = 11 \pm 2(\text{stat}) \pm 2(\text{sys}) \text{ EeV}$	$D_1 = 39 \pm 9(\text{stat}) \pm 3(\text{sys}) \text{ g/cm}^2/\text{decade}$
$E_2 = 31 \pm 5(\text{stat}) \pm 4(\text{sys}) \text{ EeV}$	$D_2 = 16 \pm 3(\text{stat}) \pm 2(\text{sys}) \text{ g/cm}^2/\text{decade}$
	$D_3 = 42 \pm 9(\text{stat}) \pm 5(\text{sys}) \text{ g/cm}^2/\text{decade}$

- 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

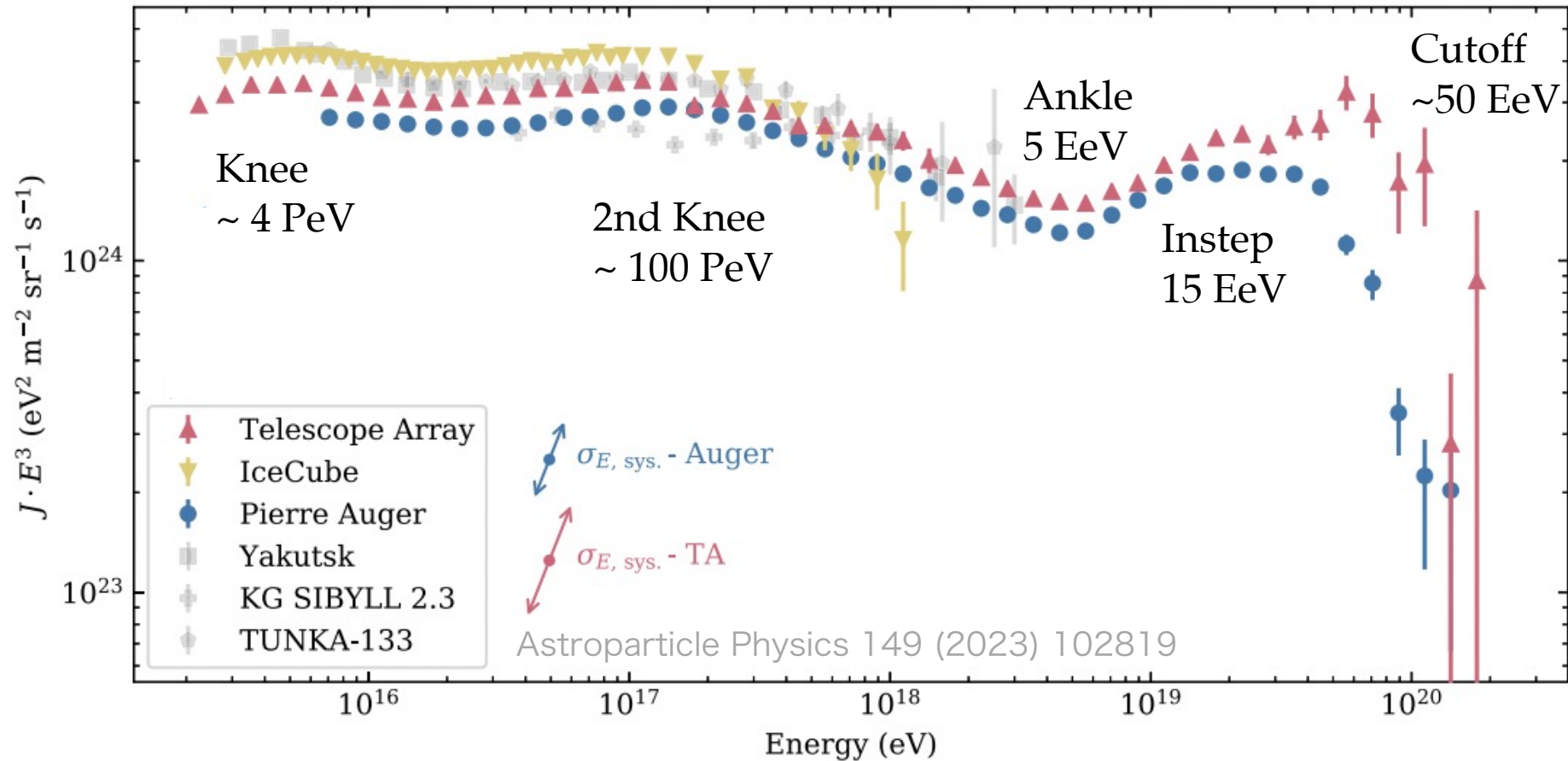


Open Questions of UHECRs



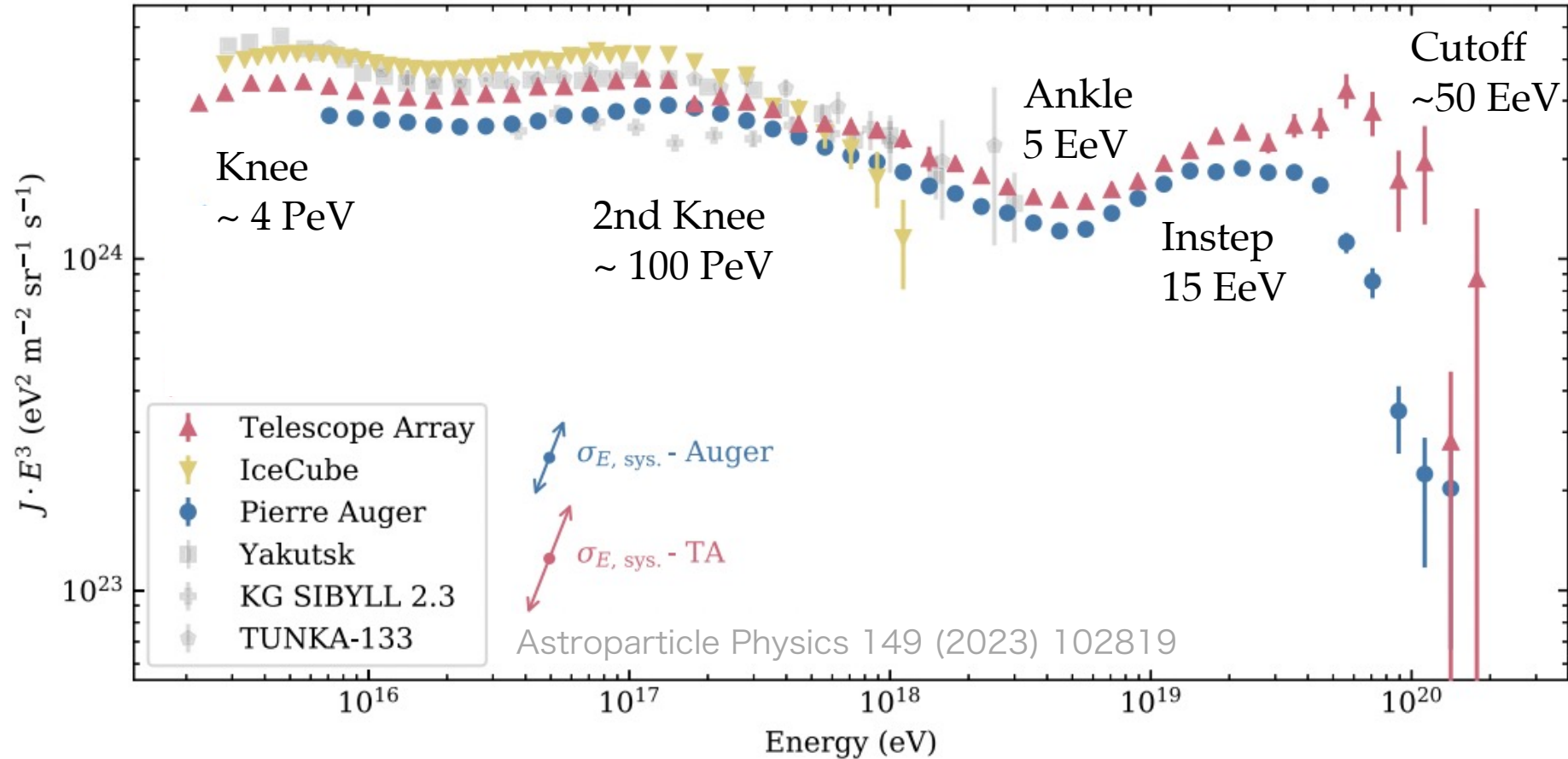
- 最高エネルギー宇宙線源は？ その加速メカニズムは？
- Cutoff の起源は？ まだ先は続くのか？
 - それ以外の構造は？
- 銀河系内/系外宇宙線の移り変わりはどこなのか？ etc.

Open Questions of UHECRs



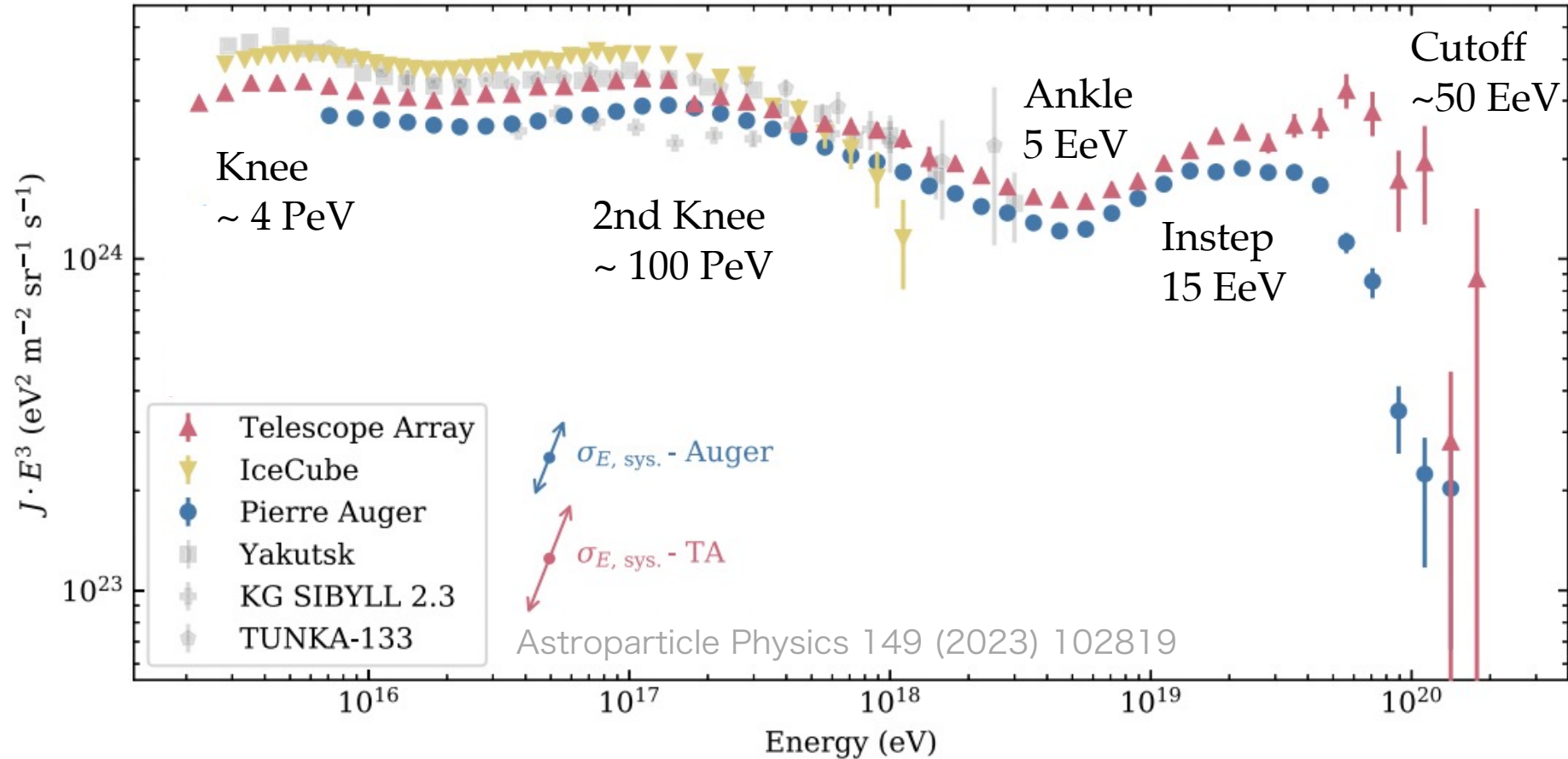
- 最高エネルギー宇宙線源は？ その加速メカニズムは？ → 候補はあるが、まだわからない
- Cutoff の起源は？ まだ先は続くのか？
- それ以外の構造は？ primary がわからないので
磁場の影響を取り除けない
- 銀河系内/系外宇宙線の移り変わりはどこなのか？ etc.

Open Questions of UHECRs



- 最高エネルギー宇宙線源は？ その加速メカニズムは？
- Cutoff の起源は？ まだ先は続くのか？ → photodisintegration? or 加速限界？
- それ以外の構造は？
少なくとも陽子による GZK 限界ではない by Auger
- 銀河系内/系外宇宙線の移り変わりはどこなのか？ etc.

Open Questions of UHECRs



- 最高エネルギー宇宙線源は？ その加速メカニズムは？
- Cutoff の起源は？ まだ先は続くのか？
 - それ以外の構造は？
- 銀河系内/系外宇宙線の移り変わりはどこなのか？ etc. → 決定打はまだ...

100 PeV - 1 EeV の間

決定打はまだ...

まとめると

- 最高エネルギー宇宙線源は？
 - $10^{18.5}$ eV以上は銀河系外起源
 - 候補(群)はいくつか(Cen. A, ペルセウス座・うお座超銀河団)
 - 北天にだけなにか energetic な天体？ @ highest energy
- 最高エネルギー宇宙線は proton だけではない
 - Peter's cycle $\propto E/Z$ or photodisintegration $\propto E/A$?
- 検証のため,
 - TA実験は面積を4倍へ拡張中, $\sim 3000\text{km}^2$
 - mass sensitive な検出器へアップグレード \rightarrow AugerPrime
- 銀河系内/系外宇宙線の移り変わり
 - 2nd knee: iron の終端が見え始めている
 - proton の終端を探るべく, TA実験は低エネルギー側へも拡張中
- 次世代実験は宇宙線事象ごとに mass がわかること, $E > 10 \text{ EeV}$ 以上での高統計が必須
 - 日本人研究者たち(特に若者)が精力的に R&D を継続中, 起源解明にむけて邁進中

AugerPrime
検出器

