

# UHECR観測

## －エネルギースペクトル, 質量組成－

ICRR, D3, 藤末 紘三

# 目次

- エネルギースペクトル, 質量組成の観測結果 (TA/Auger)
- エネルギースペクトル, 質量組成の物理的解釈 (by Auger Collab.)
- 空気シャワーの観測/シミュレーション比較 (by Auger Collab.)

A. Abdul Halim et. al., JCAP **05**, 024 (2023)

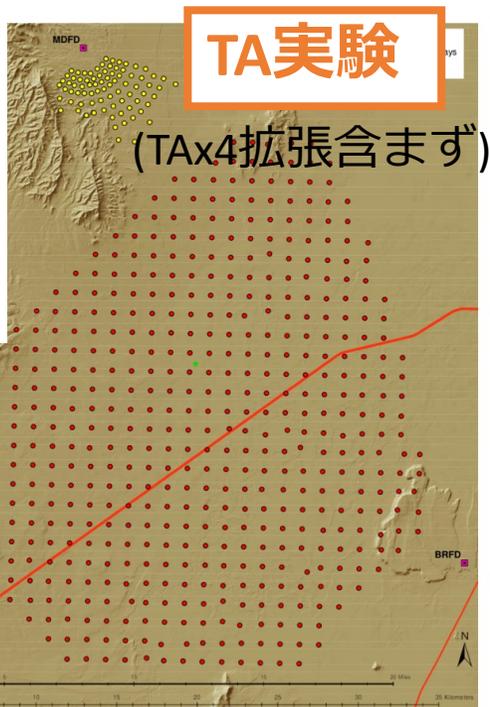
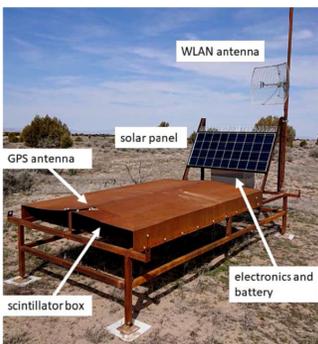
A. Abdul Halim et. al., arXiv:2401.10740v2 (2024)

わかっていること: ○ (青色)

わかっていないこと: × (橙色)

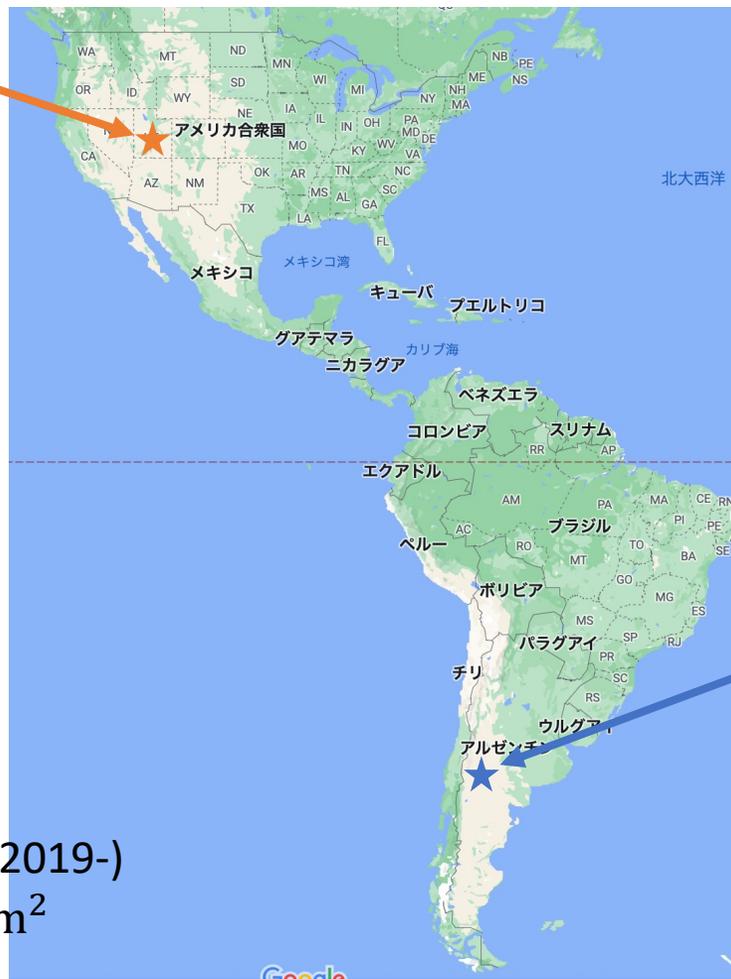
# TA実験とAuger実験

- 2つの実験で全天をカバーしている
- 両実験ともにFD, SDのハイブリッド観測

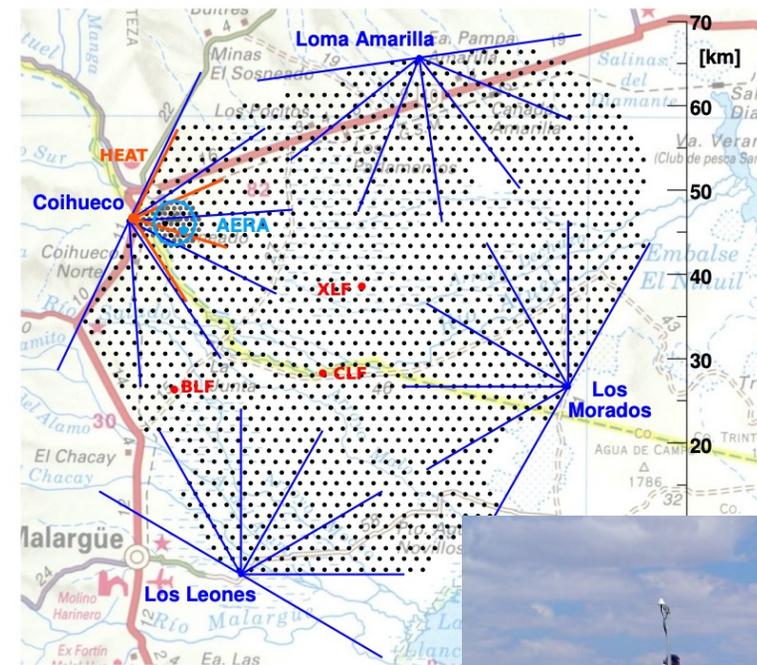


- SD : プラスチックシンチレーター (507台, 1.2 km間隔)
- 3 FDステーション
- 観測面積 ~ 700 km<sup>2</sup>
- 2008年より観測開始

TAx4実験(2019-)  
+ ~1000 km<sup>2</sup>



空気シャワー勉強会2024@ICRR, 26th – 27th Mar.



## Pierre Auger実験

- SD : 水タンク (1660台, 1.5 km間隔)
- 4 FDステーション
- 観測面積 ~ 3000 km<sup>2</sup>
- 2003年より観測開始



# UHECRの加速から観測までの流れ

## Astrophysics

起源天体分布



加速機構



(sourceでの)質量組成



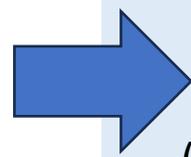
伝搬



空気シャワー生成

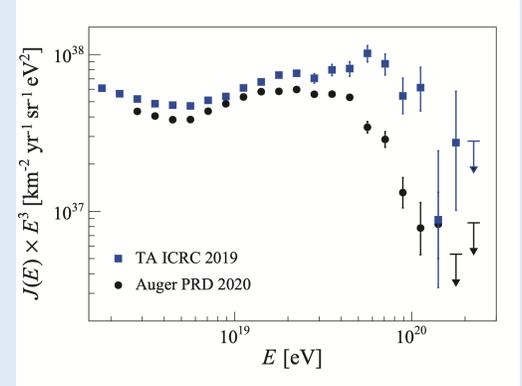


検出器, 解析の効果

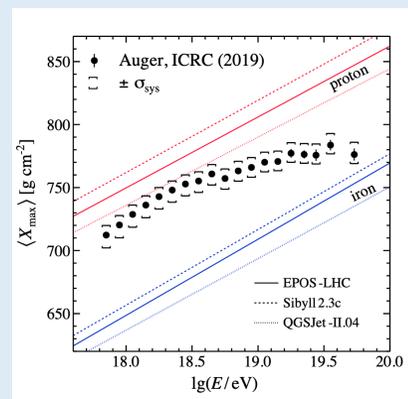


(UHECRの) 観測値

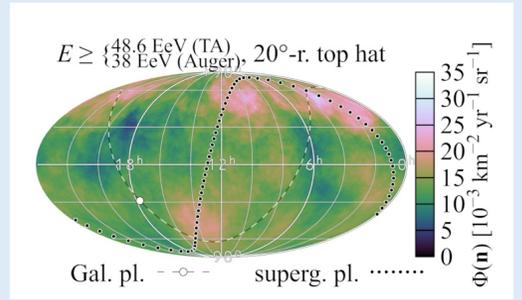
エネルギースペクトル



(地球での)質量組成



到来方向



# UHECRの加速から観測までの流れ

本講演では、UHECRのエネルギースペクトルと質量組成の観測から

- ・何がわかっているか
- ・何がわかっていないかをまとめる

到来方向を中心とした議論は樋口さんの講演を参照

## Astrophysics

奥行き方向の起源天体分布

(source evolution)



加速機構



空気シャワー生成



検出器, 解析の効果

(sourceでの) 質量組成

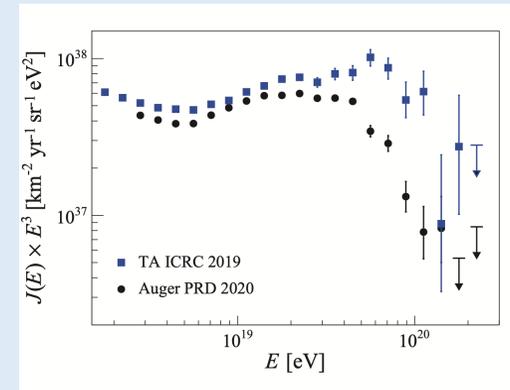


伝搬

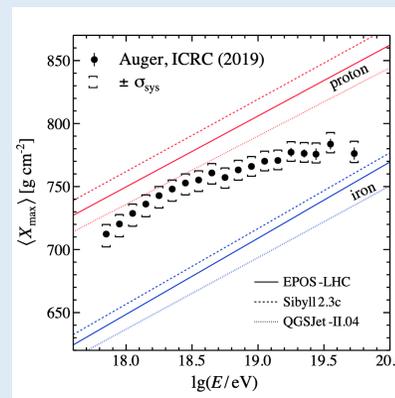
(磁場の効果を除く)

(UHECRの) 観測値

エネルギースペクトル



(地球での) 質量組成

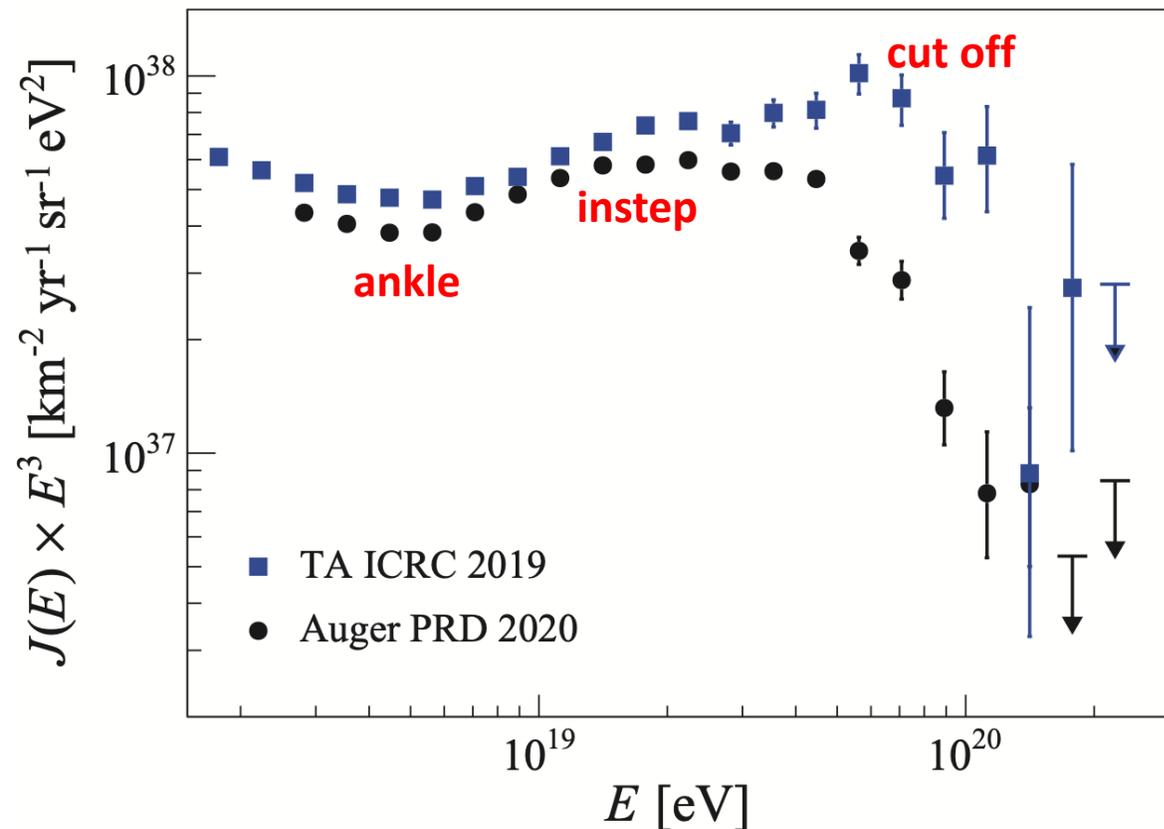


到来方向



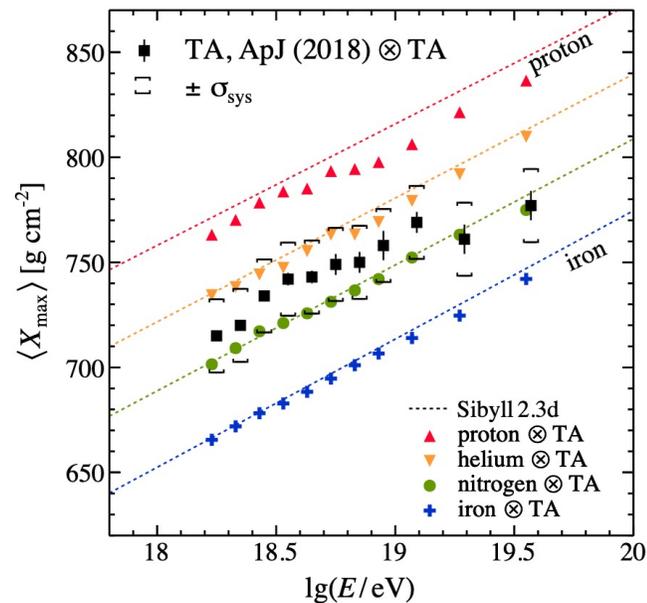
# 観測結果: エネルギースペクトルと質量組成

D. Bergman et. al., *EPJ Web Conf.* **283**, 02003 (2023)

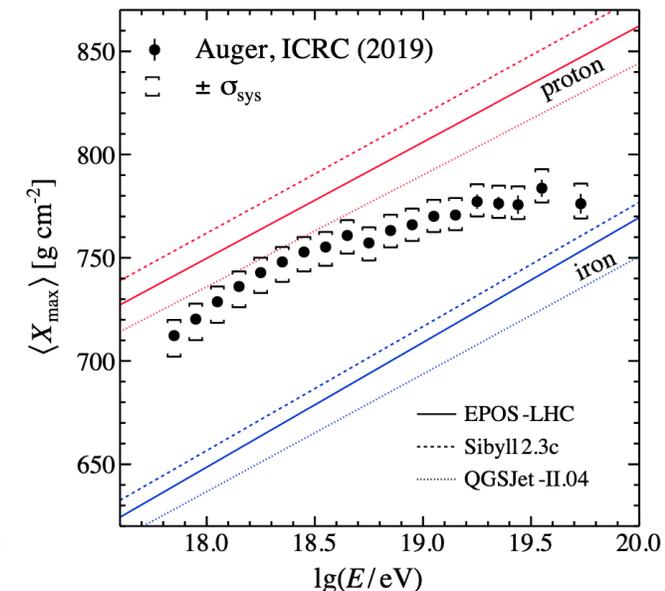


- 北天(TA), 南天(Auger)ともにスペクトルの構造 **ankle, instep, cutoff** の存在を確認
- 北天(TA), 南天(Auger)でinstep以降でスペクトルの形が違う

TA



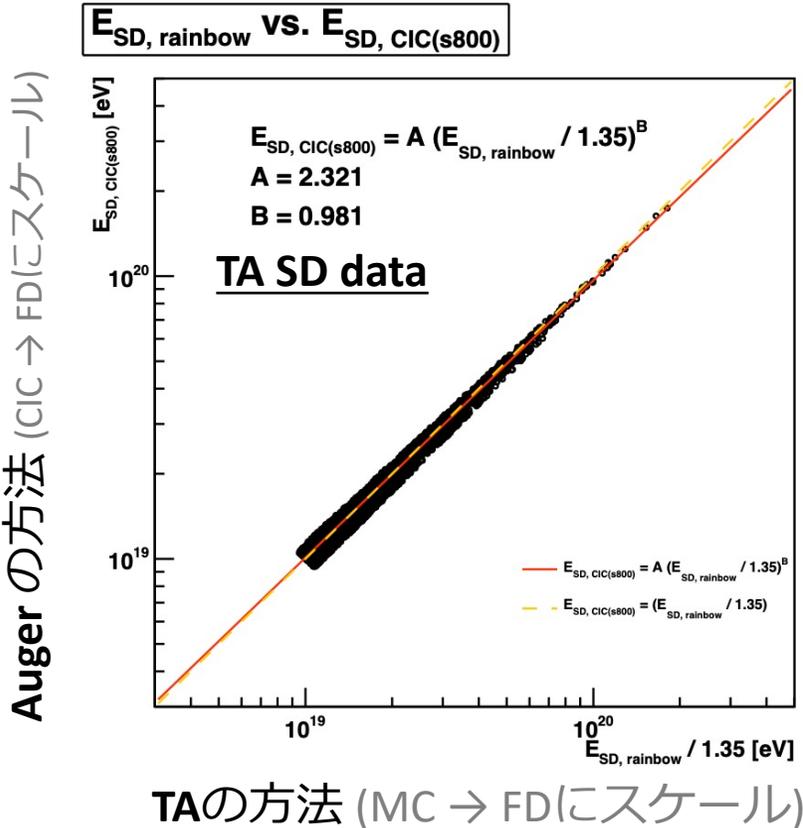
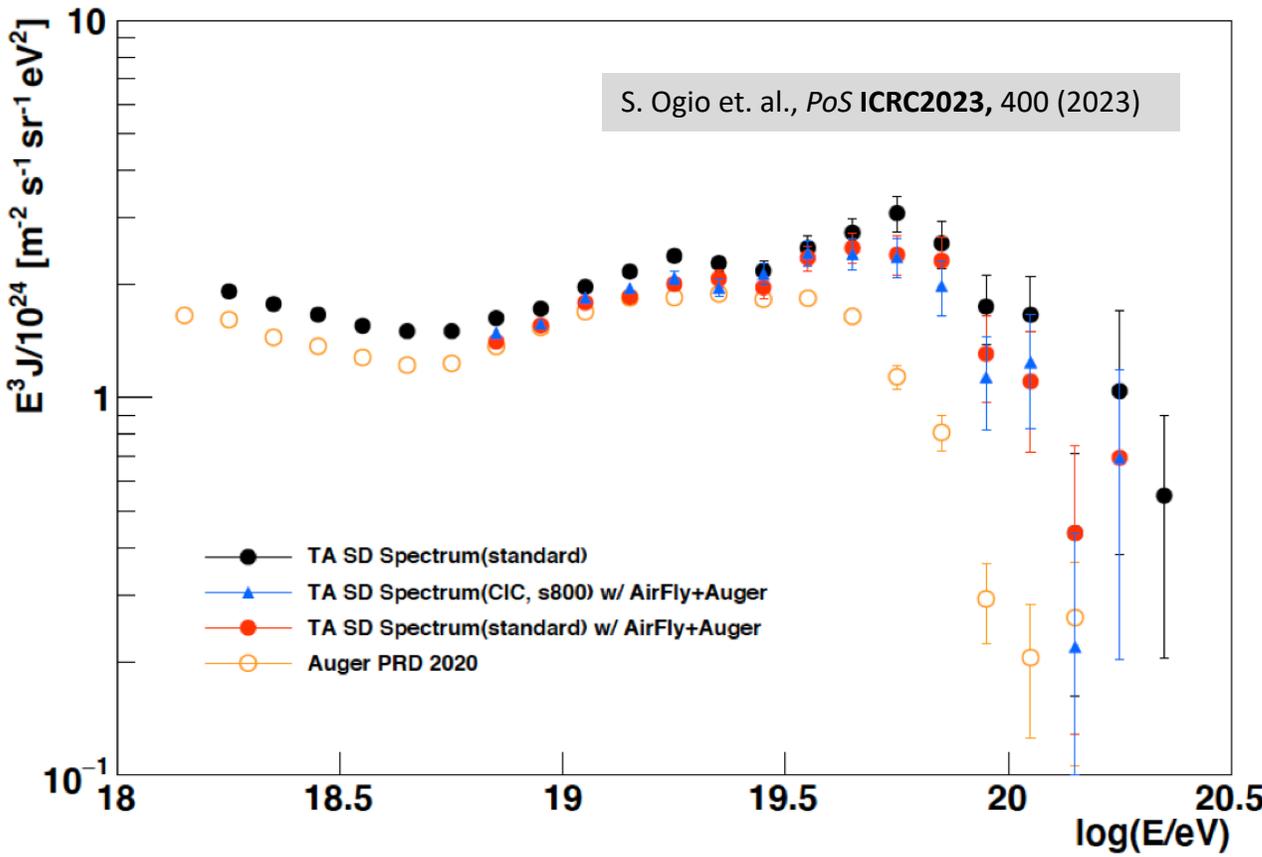
Auger



A. Yushkov et. al., *PoS ICRC2023*, 249 (2023)

- Auger は ankle 手前で最も質量組成平均が軽くなり、エネルギーが大きくなるほど重くなる観測結果
- ×  $E \gtrsim 10^{19.5}$  eVの最高エネルギー領域ではFDによる  $X_{max}$  直接観測の統計が十分ではない

# 観測結果: エネルギースペクトル, TA/Augerの比較



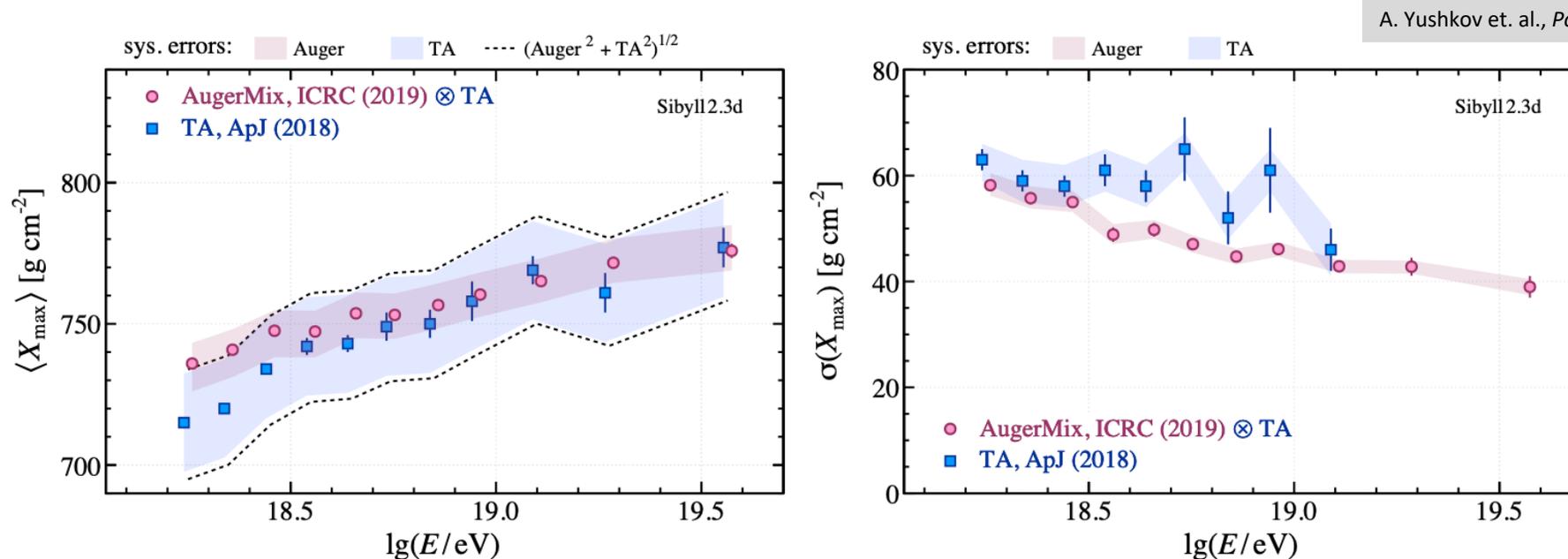
○ TA/Auger のエネルギースケールの全体の違い (~9%)は  
大気蛍光モデル + missing energy モデル  
を揃えることで ~1%になる

×  $E > 10^{19.5}$  eV の違いの原因は不明

○ TA hotspot を除いても違いが存在  
(TA hotspot のみでは違いを説明できない)

○ TA/Auger のエネルギー推定手法間に  
energy-dependentな違いを生む  
systematic bias はない

# 観測結果: 質量組成, TA/Augerの比較



TAの $X_{\max}$ 測定: 検出器の効果を含む (観測 $X_{\max}$  vs. Sim. ⊗ 検出器効果  $X_{\max}$ )

Augerの $X_{\max}$ 測定: 検出器の効果を含まない (観測 $X_{\max}$  (fiducial volume cut) vs. Sim.  $X_{\max}$ )

→ TA/Augerの $X_{\max}$ は直接比較できない

→ AugerのMix composition best fit ⊗ TAの検出器をTAの結果と比較

○ TA/AugerでMass compositionに有意な差はなし

# Auger の spectrum + Xmax combined fit

## Astrophysics

起源天体分布

⊗

加速機構

⊗

(sourceでの)質量組成

⊗

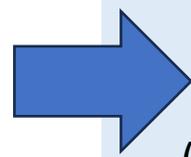
伝搬中のエネルギー損失

⊗

空気シャワー生成

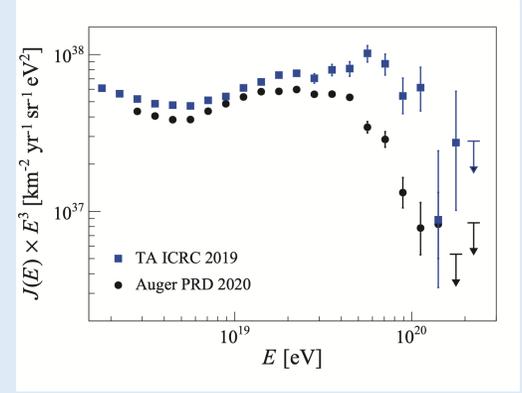
⊗

検出器, 解析の効果

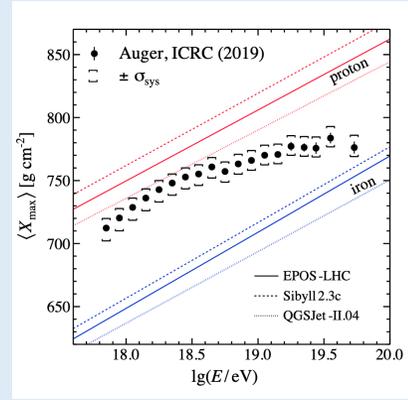


(UHECRの) 観測値

エネルギースペクトル



(地球での)質量組成



Auger

Free parameters  
(3種類の contribution)

1) Extragalactic,  
mixed component

2) Extragalactic,  
pure proton

3) Galactic,  
pure N

$\mathcal{L}_0 / (10^{44} \text{ erg Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1})$   
 $\gamma$   
 $\log_{10}(R_{\text{cut}}/V)$   
 $I_{\text{H}} (\%)$   
 $I_{\text{He}} (\%)$   
 $I_{\text{N}} (\%)$   
 $I_{\text{Si}} (\%)$   
 $I_{\text{Fe}} (\%)$

$\mathcal{L}_0 / (10^{44} \text{ erg Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1})$   
 $\gamma$   
 $\log_{10}(R_{\text{cut}}/V)$   
 $I_{\text{H}} (\%)$

$J_0^{\text{Gal}} / (\text{eV}^{-1} \text{ km}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ yr}^{-1})$   
 $\log_{10}(R_{\text{cut}}^{\text{Gal}}/V)$

# Astrophysics

起源天体分布

⊗

加速機構

(Sourceから出た時のスペクトル)

⊗

(sourceでの)質量組成

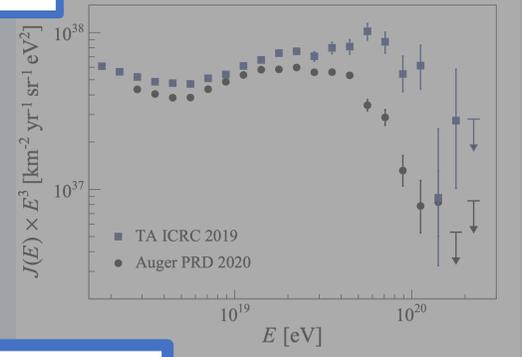
⊗

伝搬中のエネルギー損失

空気

検出器, 解析

## エネルギースペクトル



$$\tilde{Q}_A(E) = \tilde{Q}_{0A} \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma} \begin{cases} 1, & E \leq Z_A R_{\text{cut}} \\ \exp\left(1 - \frac{E}{Z_A R_{\text{cut}}}\right), & E > Z_A R_{\text{cut}} \end{cases}$$

Sourceでのenergy spectrumは全て同一, rigidity dependent (Peters cycle)

伝搬シミュレーション: SimProp  
 空気シャワーシミュレーション: CONEX

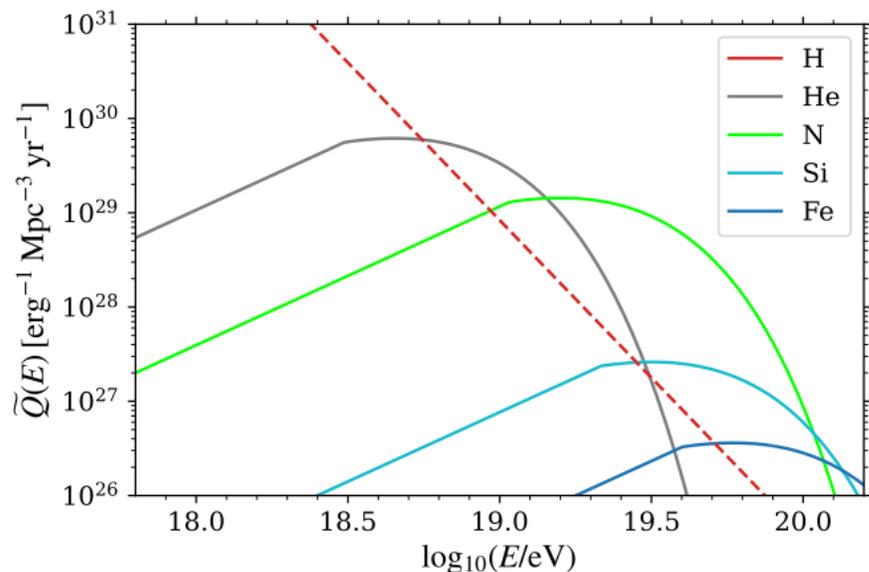
# Auger の spectrum + Xmax combined fit

A. Abdul Halim et. al., JCAP **05**, 024 (2023)

Pure-N Galactic + pure-proton extragalactic (low E) + mixed extragalactic (high E)

Source は一様分布

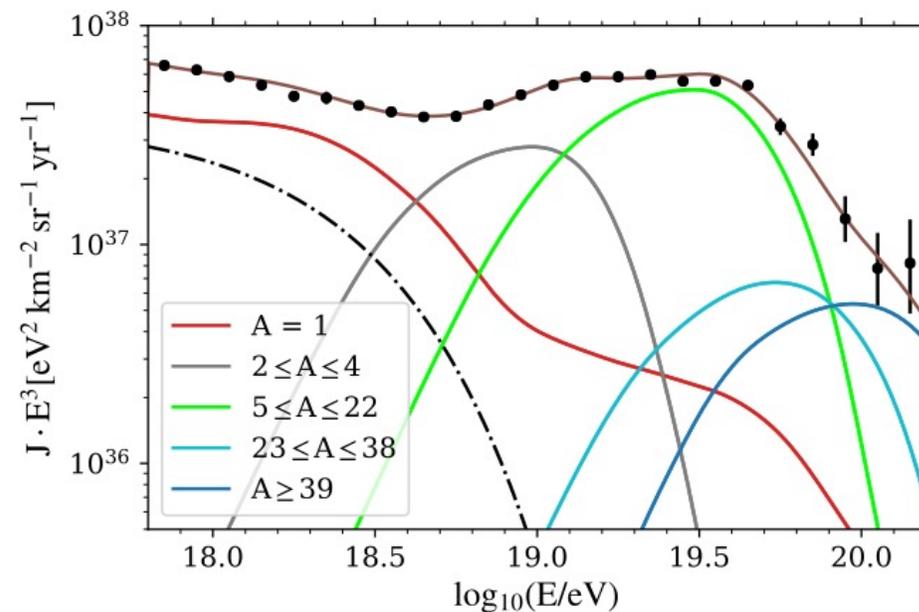
EPOS-LHC



Low E proton:  $E^{-3.34}$

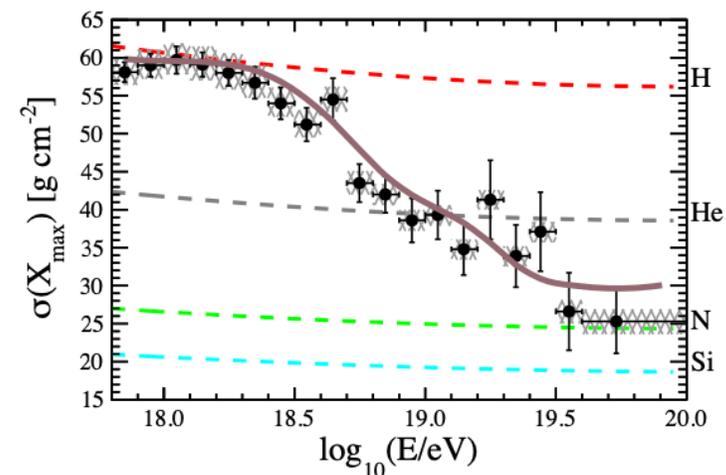
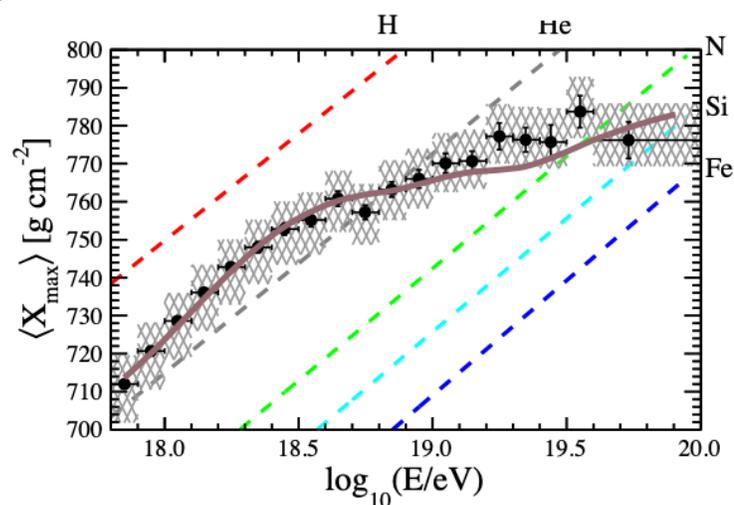
High E :  $E^{1.47}$

$$R_{\text{cut}} = 10^{18.19} \text{ V}$$



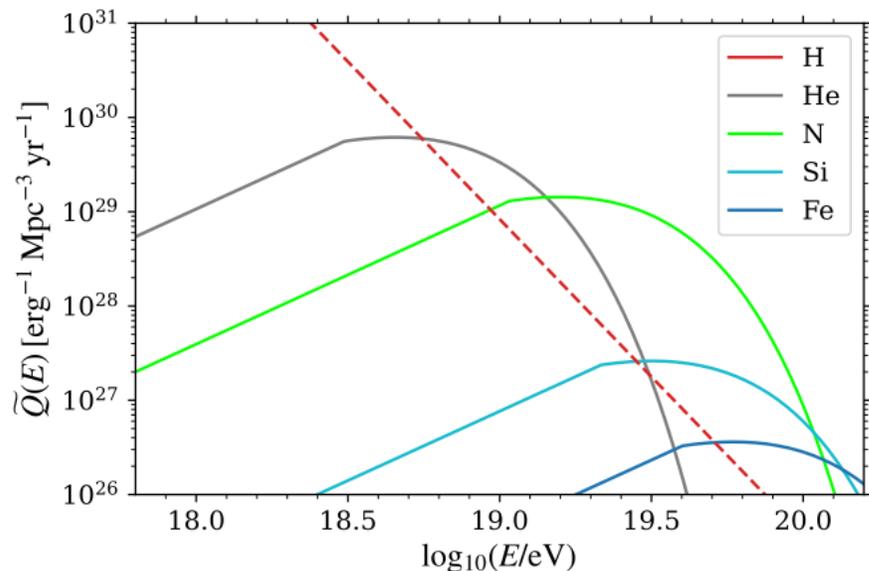
extragalactic source (から脱出したとき) の  
エネルギースペクトル

- ankle: Galactic + Extra-galacticの  
low-energy proton成分
- instep: He ~ CNO の 最大加速peak  
& photodisintegration
- cutoff: 最大加速rigidity ( $R_{\text{max}} \sim 1.5$  EV)  
& photodisintegration



# Auger の spectrum + Xmax combined fit

A. Abdul Halim et. al., JCAP **05**, 024 (2023)



Low E proton:  $E^{-3.34}$

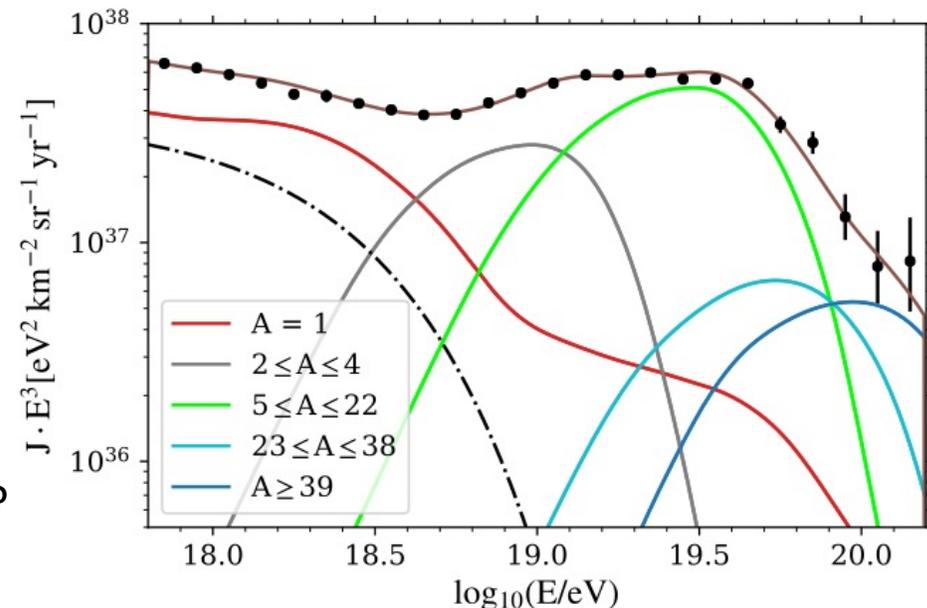
High E :  $E^{1.47}$

$$R_{\text{cut}} = 10^{18.19} \text{ V}$$

$$E = 10^{18.2 \sim 18.7 - \log_{10} 2} \text{ eV}$$

$$= 10^{17.9 \sim 18.4} \text{ eV}$$

付近にdisintegrationで  
出来たprotonが溜まってる?



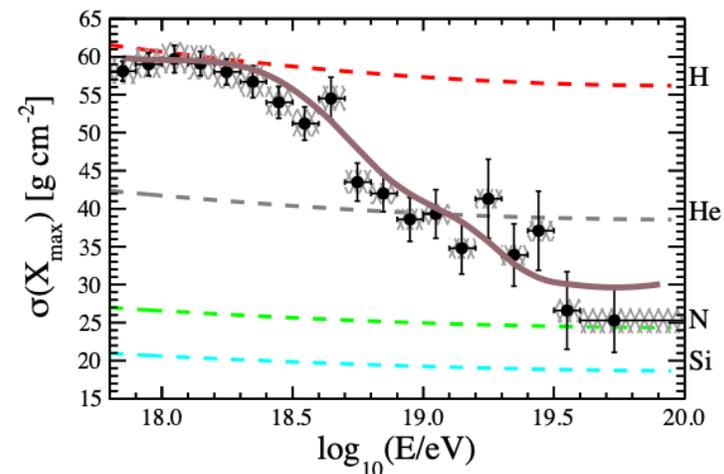
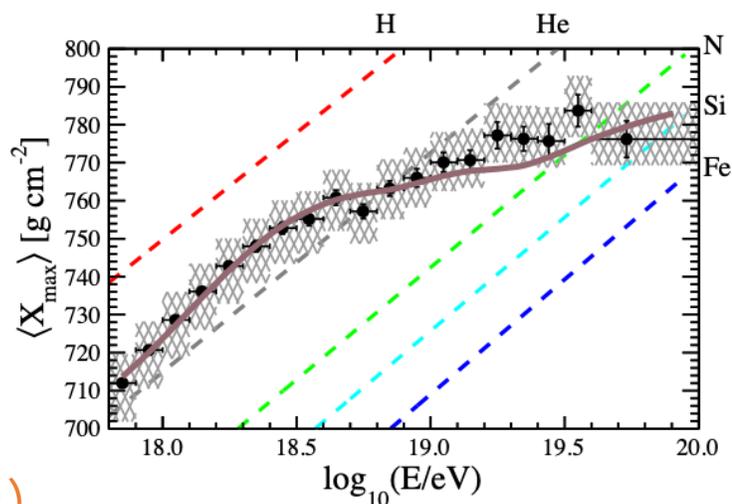
## ankle

○ proton の pair productionによる  
dipではない

× Galactic 成分の寄与の大きさ

ankleまでがほぼGalactic, ではなさそう

しかし、ほぼ全部extragalacticとも言えない

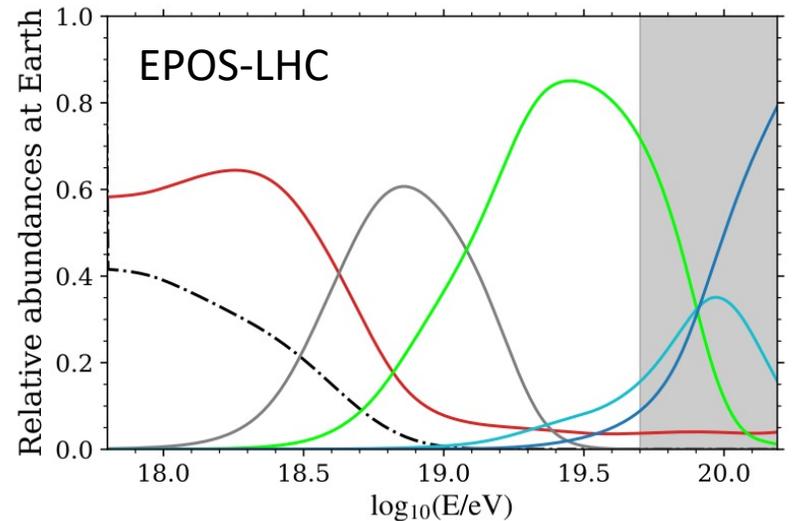
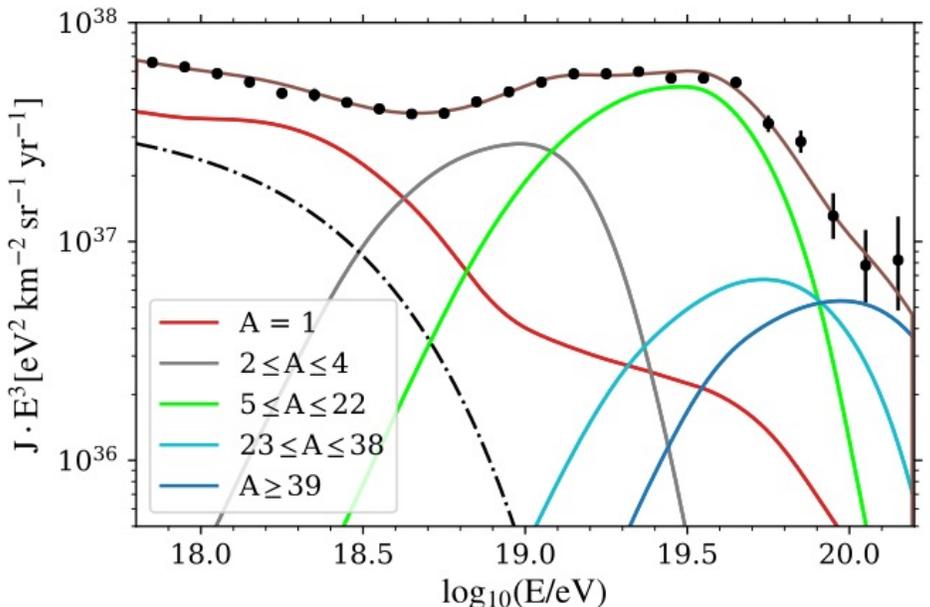
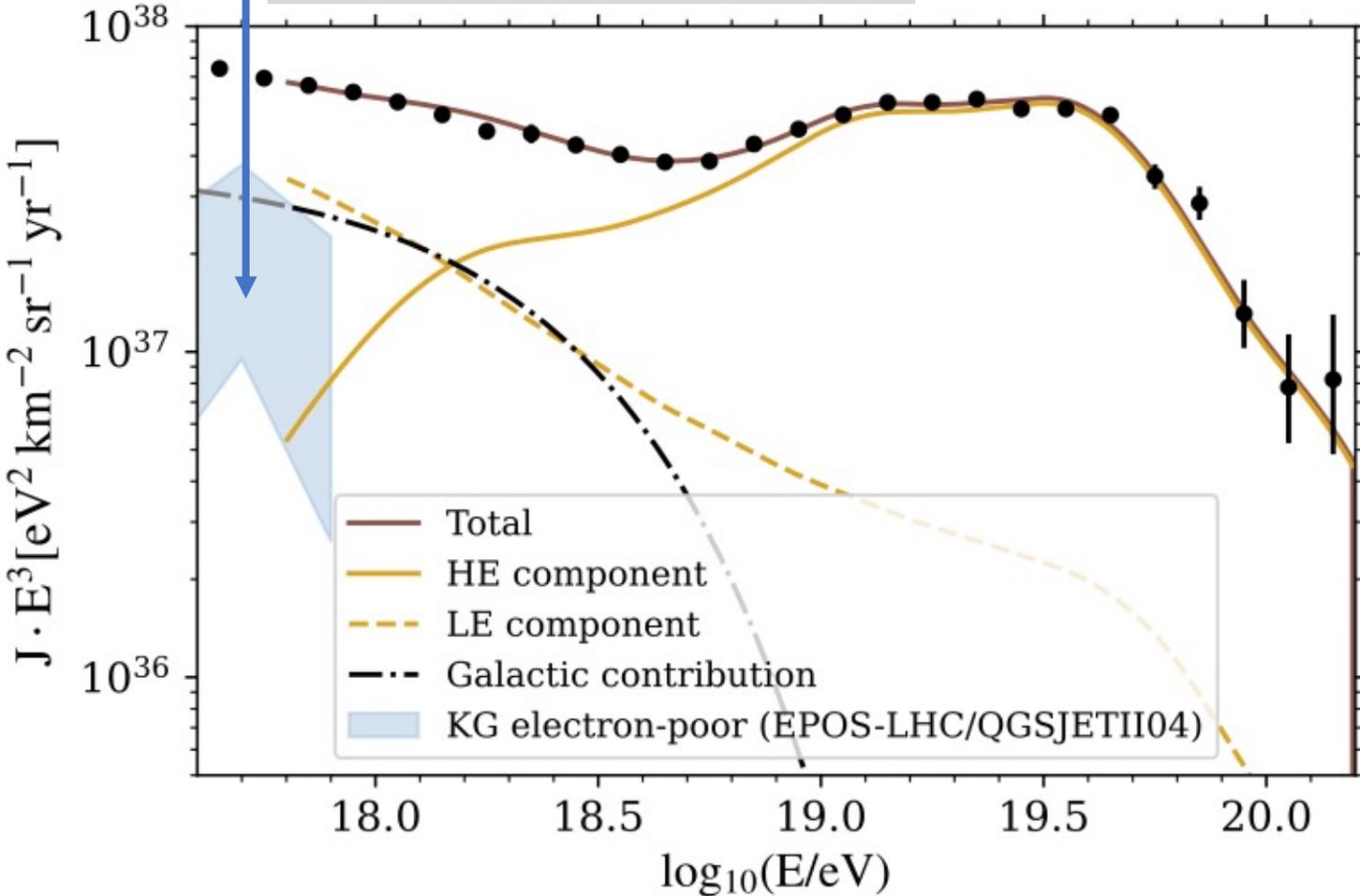


# Auger の spectrum + Xmax combined fit

A. Abdul Halim et. al., JCAP 05, 024 (2023)

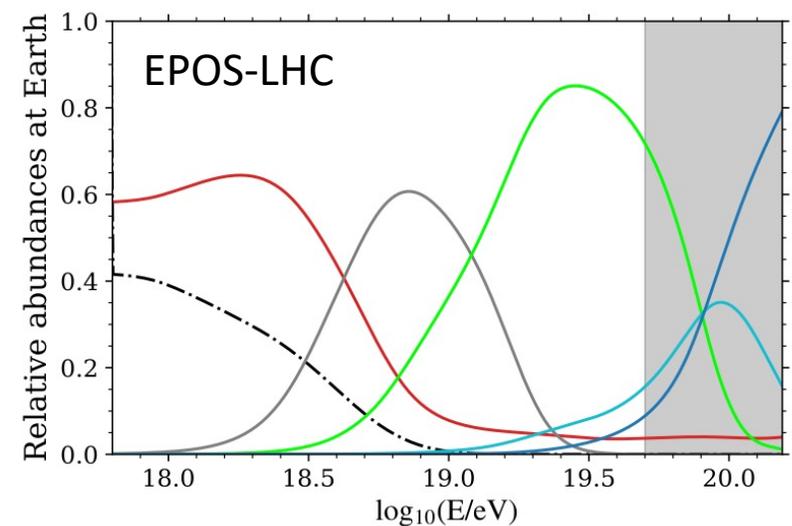
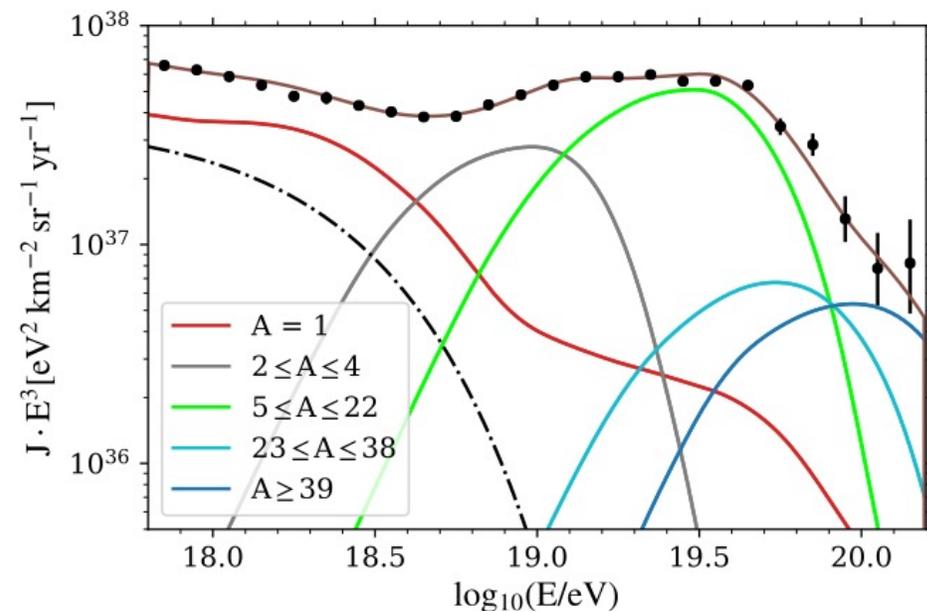
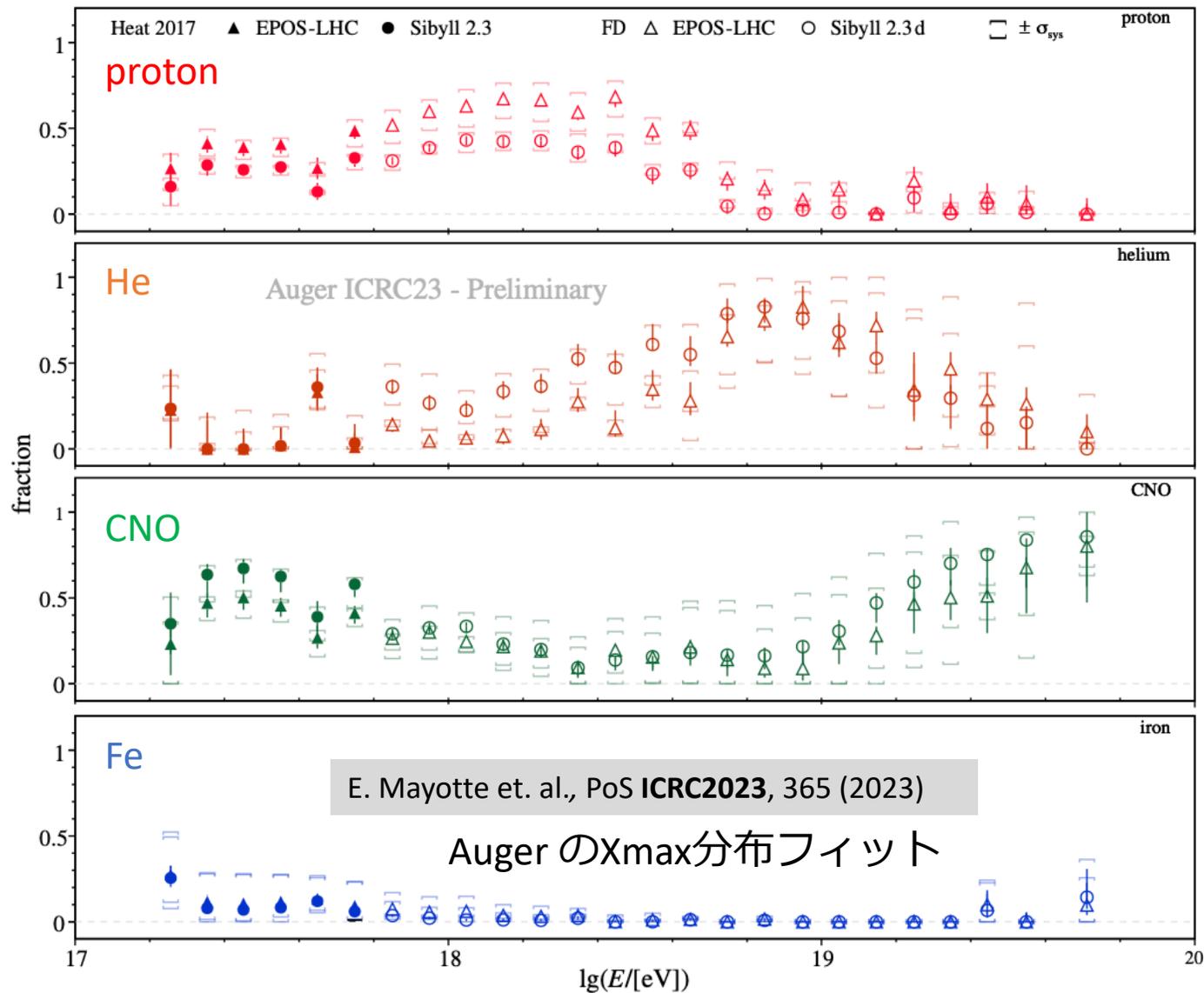
KASCADE-Grande の electron-poor (heavy) 成分のスペクトルと無矛盾

D. Kang et al., Sci. Post. Phys. Proc. 13, 036 (2022)



# Auger の spectrum + Xmax combined fit

A. Abdul Halim et. al., JCAP **05**, 024 (2023)



# Auger $\mathcal{D}$ spectrum + Xmax combined fit

Extragalactic sourceに2種類あるとすれば  
Galactic成分なしでもankleを説明できる

## Scenario 1:

Galactic (pure N)

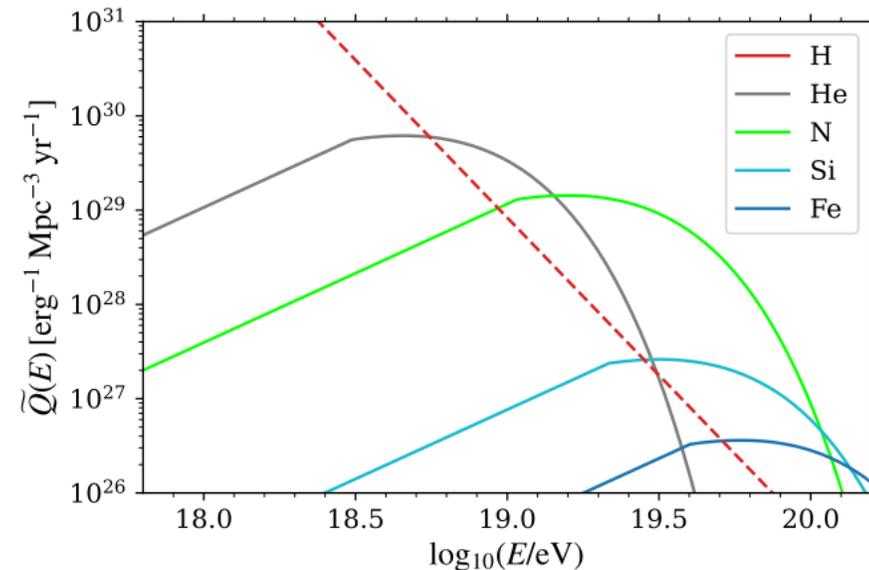
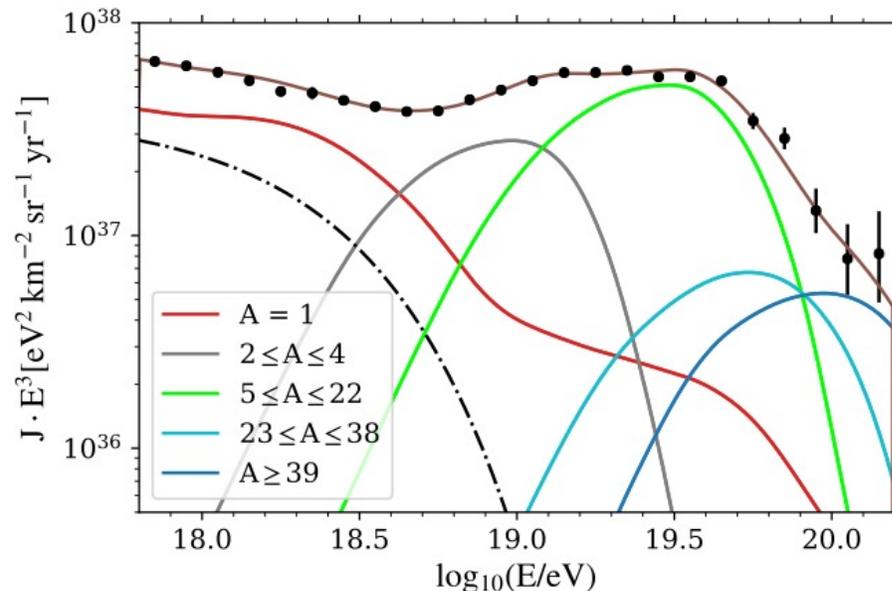
+ extragalactic LE (pure p)

+ extragalactic HE (mixed)

Low E proton:  $E^{-3.34}$

High E :  $E^{1.47}$

$$R_{\text{cut}} = 10^{18.19} \text{ V}$$



## Scenario 2:

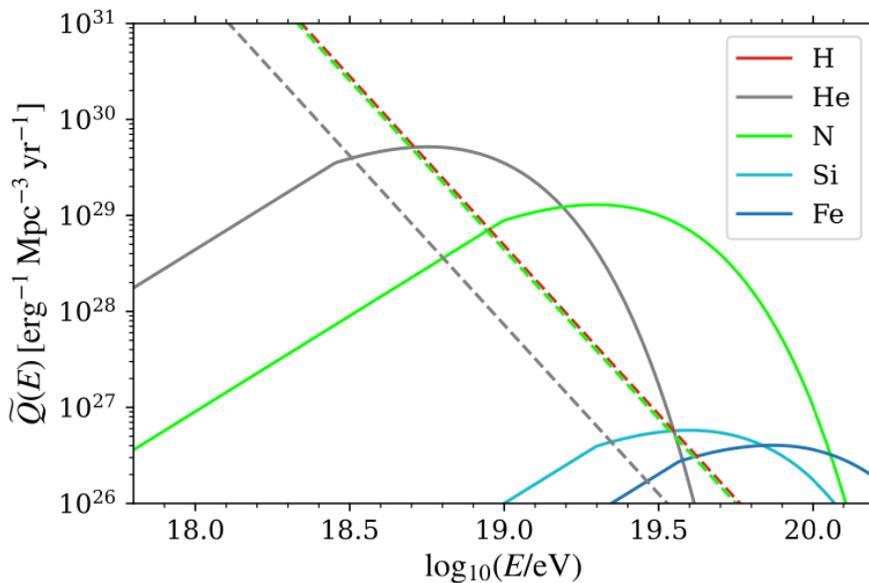
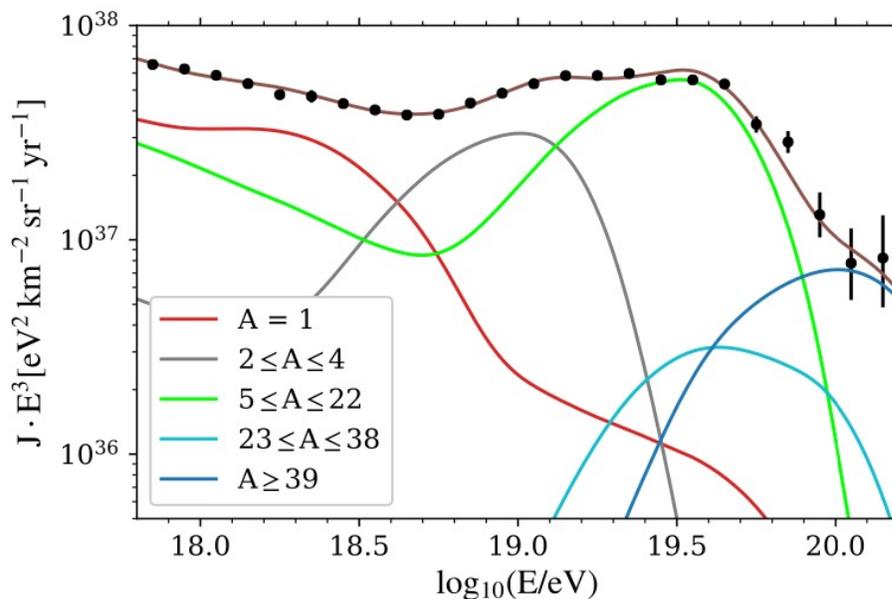
extragalactic LE (mixed)

+ extragalactic HE (mixed)

Low E proton:  $E^{-3.52}$

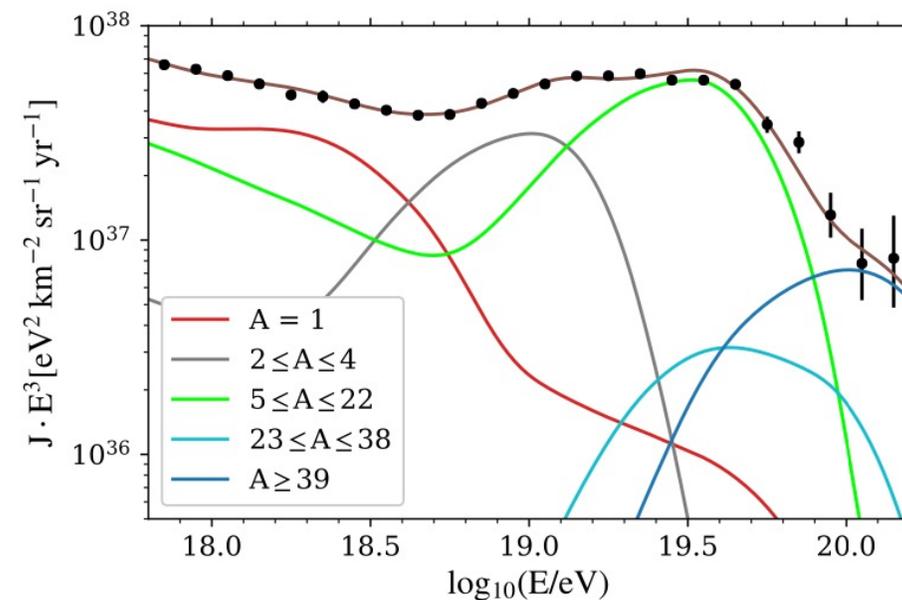
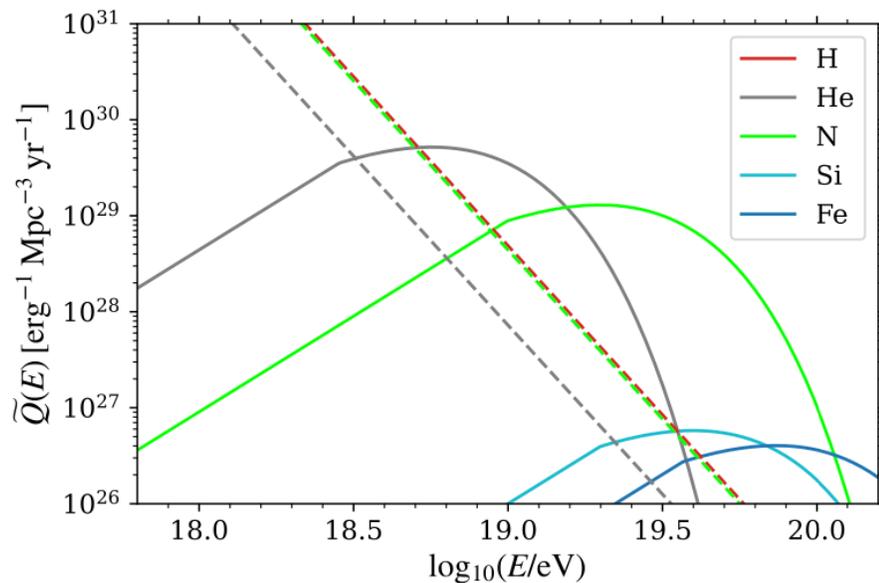
High E :  $E^{1.99}$

$$R_{\text{cut}} = 10^{18.15} \text{ V}$$



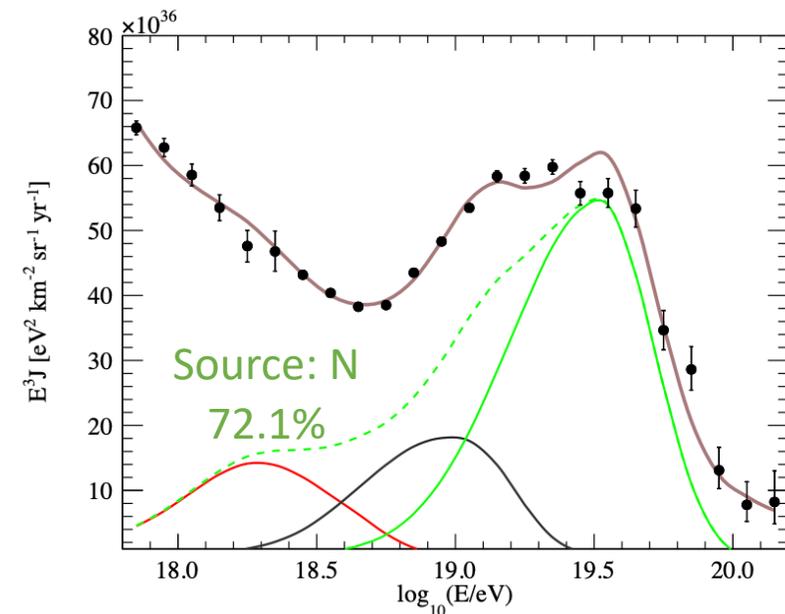
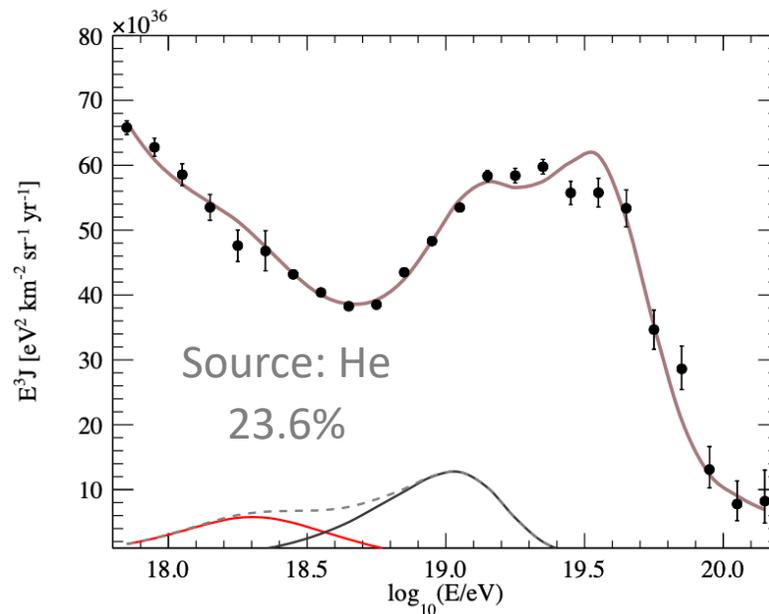
# Auger の spectrum + Xmax combined fit

A. Abdul Halim et. al., JCAP **05**, 024 (2023)



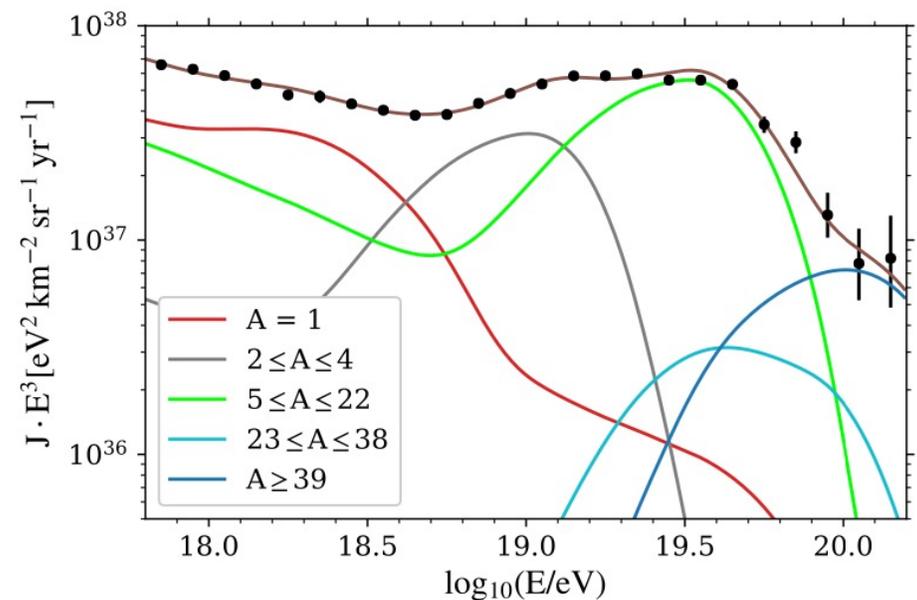
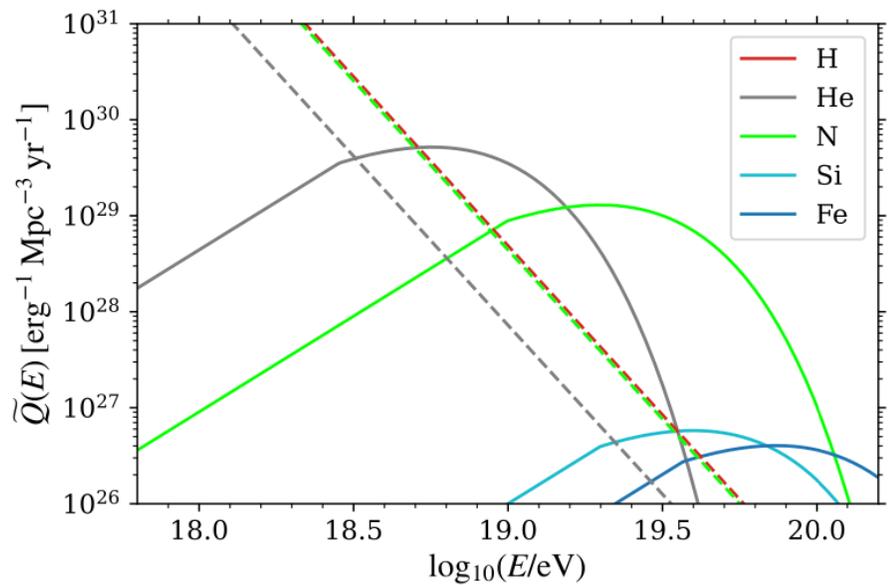
**instep**

Auger の見解: He と CNO の  
最大加速 peak  
& photodisintegration



# Auger $\mathcal{D}$ spectrum + Xmax combined fit

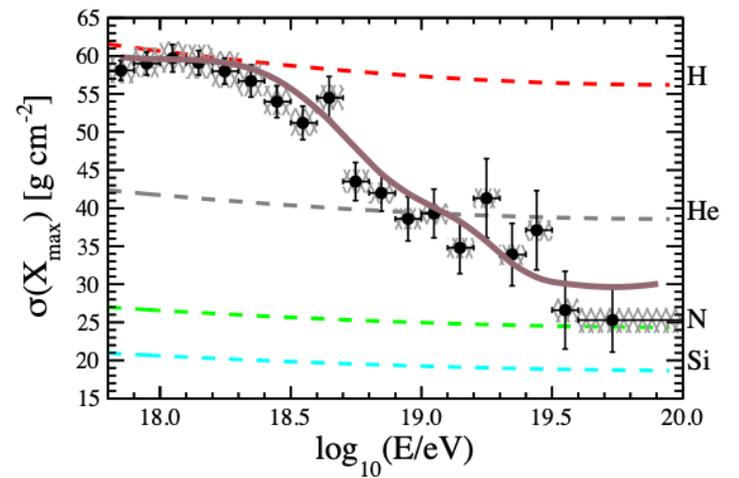
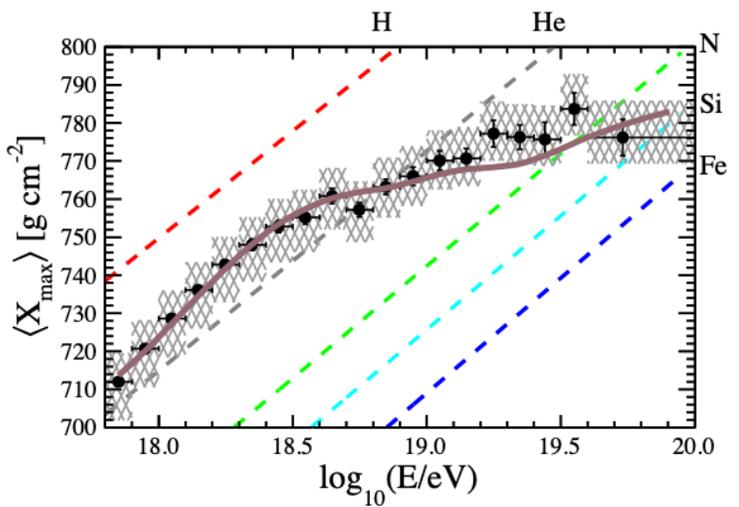
A. Abdul Halim et. al., JCAP **05**, 024 (2023)



## cutoff

Auger の見解:

最大加速 rigidity ( $R_{\text{cut}} \sim 10^{18.2} \text{ V}$ )  
& photodisintegration



	SCENARIO 1		SCENARIO 2	
Galactic contribution (at Earth)	pure N		—	
$J_0^{\text{Gal}} / (\text{eV}^{-1} \text{ km}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ yr}^{-1})$	$(1.06 \pm 0.04) \times 10^{-13}$		—	
$\log_{10}(R_{\text{cut}}^{\text{Gal}}/V)$	$17.48 \pm 0.02$		—	
EG components (at the escape)	LE	HE	LE	HE
$\mathcal{L}_0 / (10^{44} \text{ erg Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1})$ *	$6.54 \pm 0.36$	$5.00 \pm 0.35$	$11.35 \pm 0.15$	$5.07 \pm 0.06$
$\gamma$	$3.34 \pm 0.07$	$-1.47 \pm 0.13$	$3.52 \pm 0.03$	$-1.99 \pm 0.11$
$\log_{10}(R_{\text{cut}}/V)$	$>19.3$	$18.19 \pm 0.02$	$>19.4$	$18.15 \pm 0.01$
$I_{\text{H}}$ (%)	100 (fixed)	$0.0 \pm 0.0$	$48.7 \pm 0.3$	$0.0 \pm 0.0$
$I_{\text{He}}$ (%)	—	$24.5 \pm 3.0$	$7.3 \pm 0.4$	$23.6 \pm 1.6$
$I_{\text{N}}$ (%)	—	$68.1 \pm 5.0$	$44.0 \pm 0.4$	$72.1 \pm 3.3$
$I_{\text{Si}}$ (%)	—	$4.9 \pm 3.9$	$0.0 \pm 0.0$	$1.3 \pm 1.3$
$I_{\text{Fe}}$ (%)	—	$2.5 \pm 0.2$	$0.0 \pm 0.0$	$3.1 \pm 1.3$
$D_J$ ( $N_J$ )	48.6 (24)		56.6 (24)	
$D_{X_{\text{max}}}$ ( $N_{X_{\text{max}}}$ )	537.4 (329)		516.5 (329)	
$D$ ( $N$ )	586.0 (353)		573.1 (353)	

\* from  $E_{\text{min}} = 10^{17.8} \text{ eV}$ .

$$D/\text{ndof} = 573.1/(353-16) \rightarrow \text{p-value} = 1.7 \times 10^{-14} (7.6\sigma)$$

このシンプルなモデルが観測をよく再現しているとは言えない?

# より複雑なシナリオ (1)

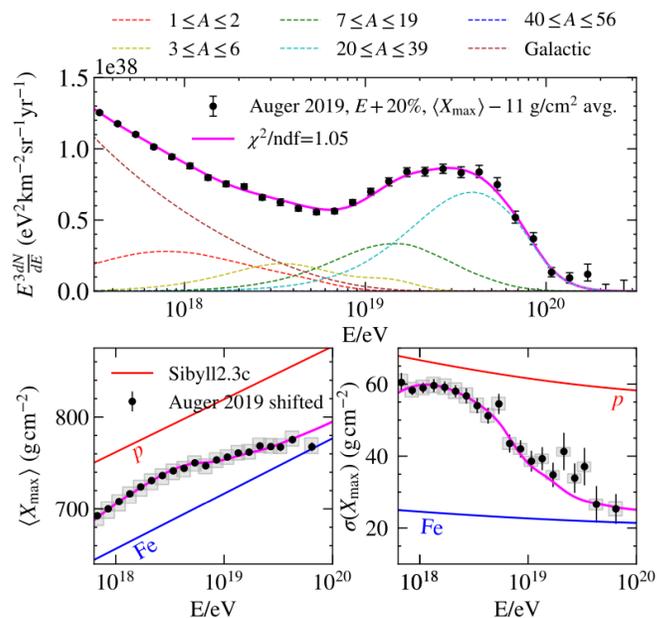
Q. Luce et. al., ApJ **936**, 62 (2022)

## Source 内の interaction & sourceからの脱出もモデル化

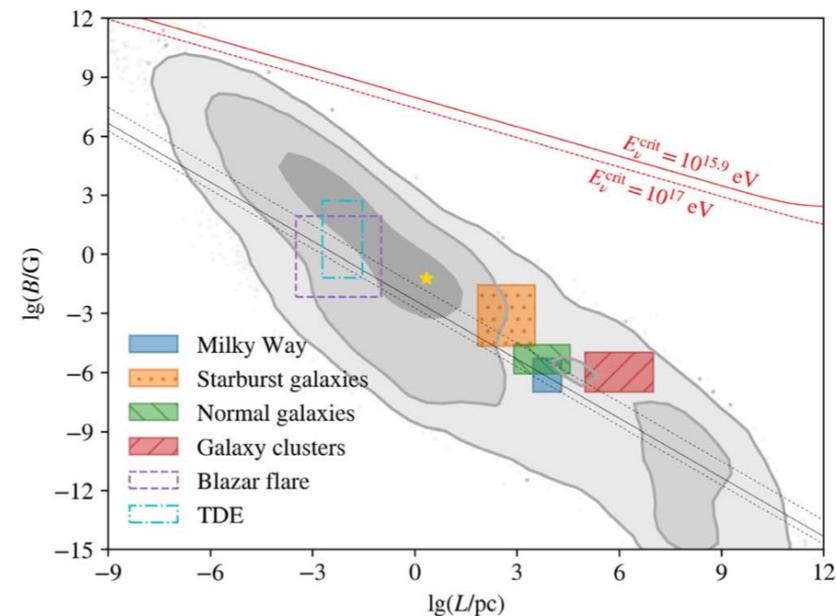
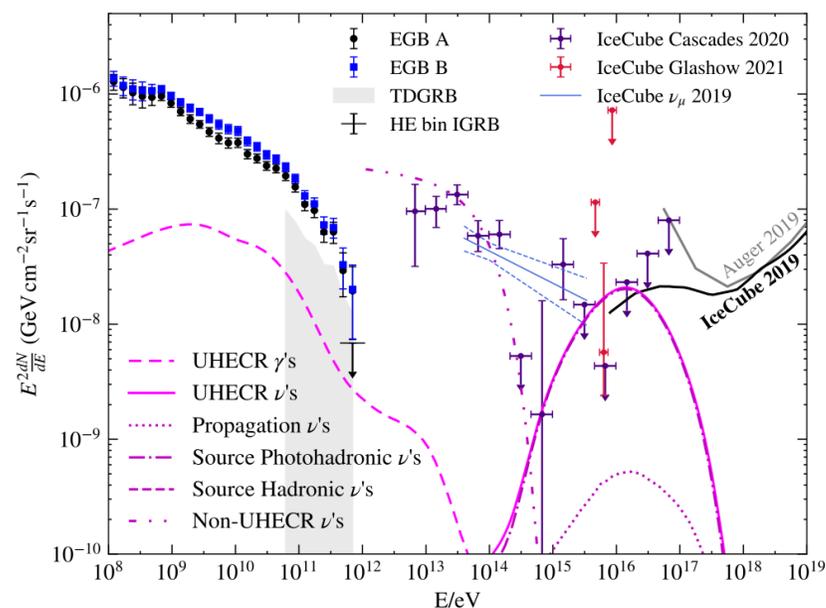
M. Unger et. al., PRD **92**, 123001 (2015)

- 衝撃波加速 ( $\propto E^{-2}$ )でも source脱出時のhardなspectrumを説明できる (magnetic horizon effectも寄与の可能性)
- injectionとして pure component ( $\sim Si$ )でも説明できる
- sourceの環境 (磁場, サイズ, 温度, etc) への制限

J. Gonzalez et. al., PoS ICRC2023, 288 (2023)



M. Muzio et. al., PRD **105**, 023022 (2022)

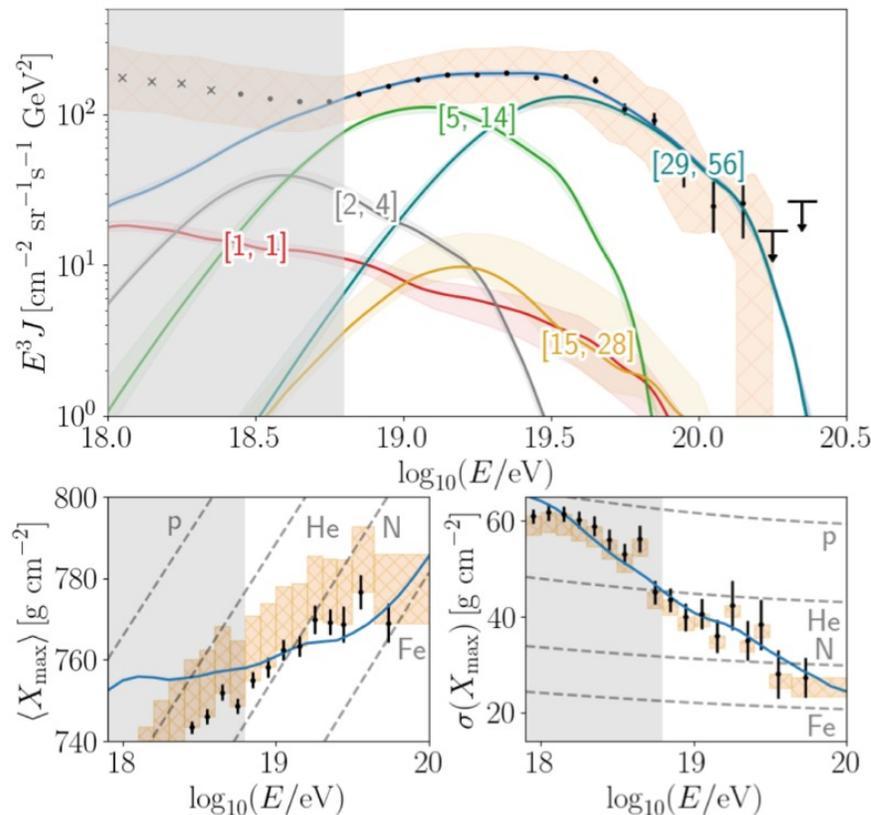
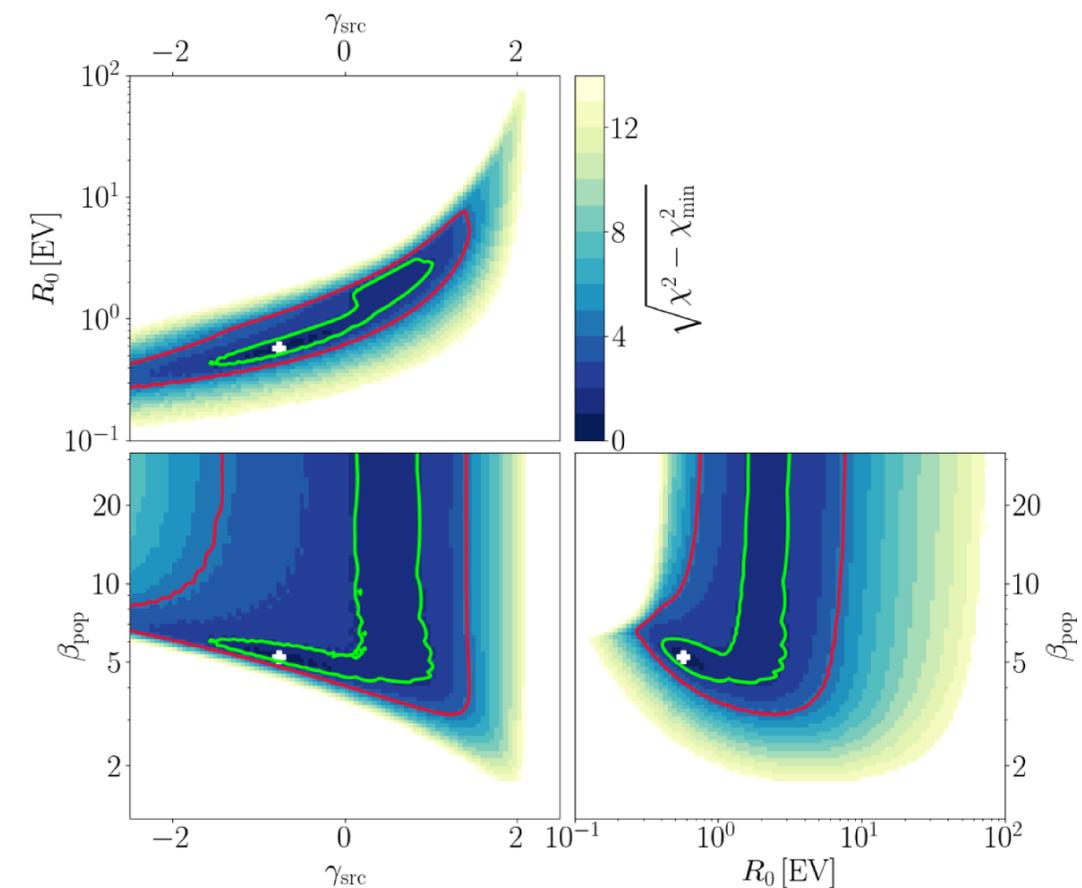


M. Muzio et. al., ApJL **942**, L39 (2023)

# より複雑なシナリオ (2)

Source が異なる max rigidity ( $R_{\max}$ ) を持つか？

$$\frac{dN}{dR} \propto R^{-\gamma_{\text{src}}} \quad p(R_{\max}) = \begin{cases} 0 & R_{\max} < R_0 \\ \frac{\beta_{\text{pop}}^{-1}}{R_0} \left(\frac{R_{\max}}{R_0}\right)^{-\beta_{\text{pop}}} & \text{otherwise,} \end{cases}$$

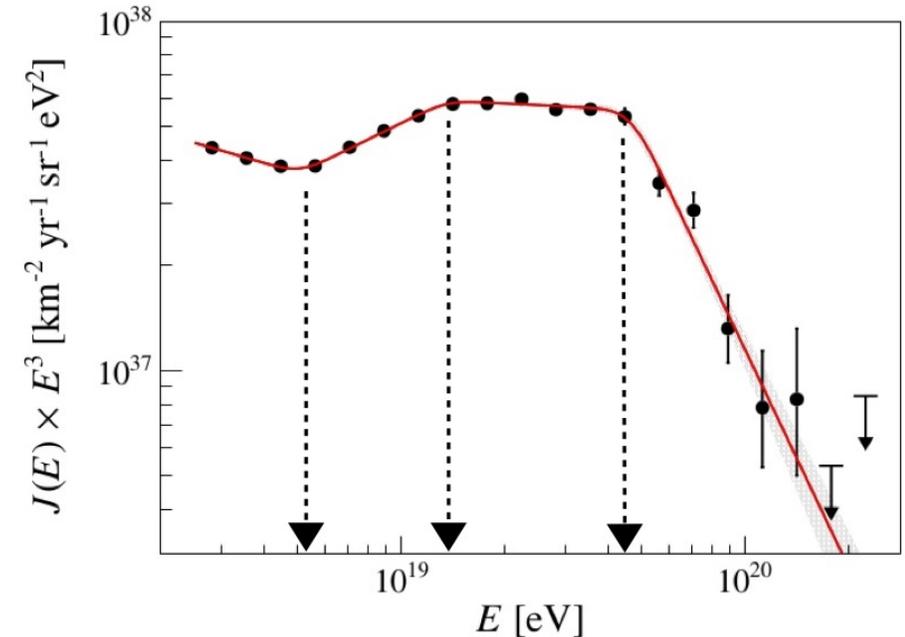
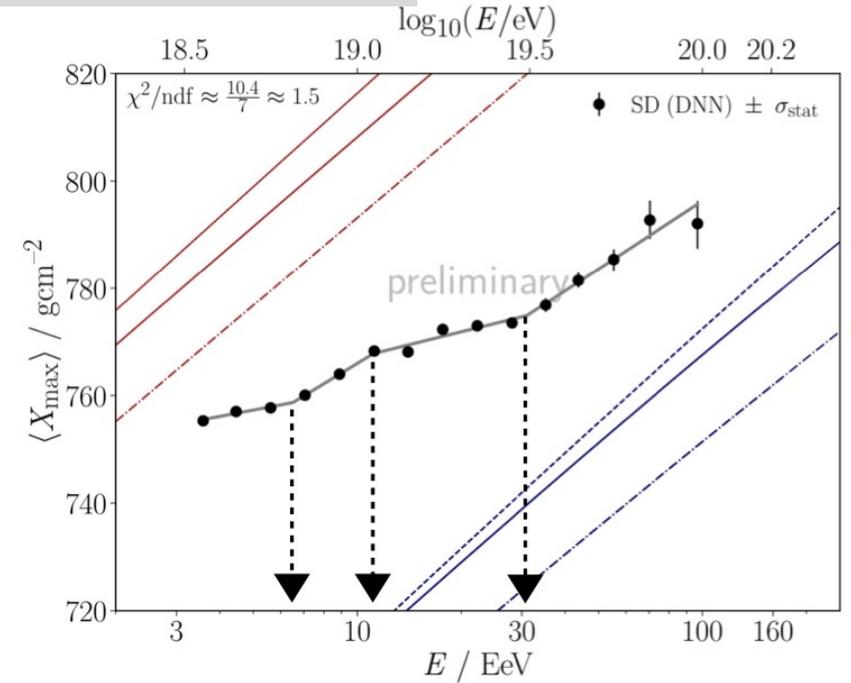
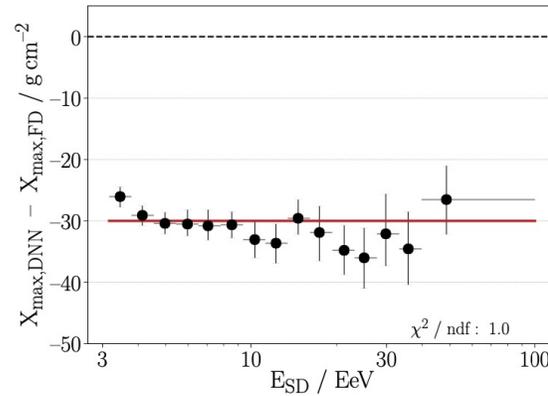
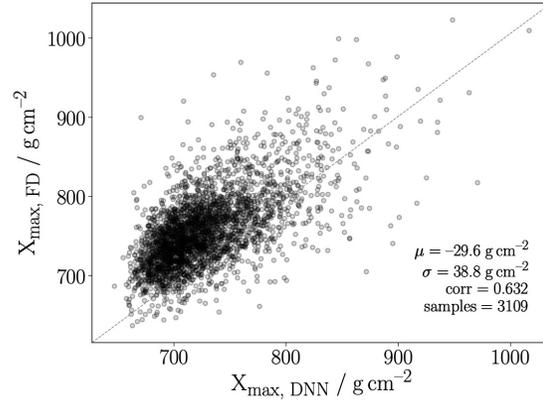
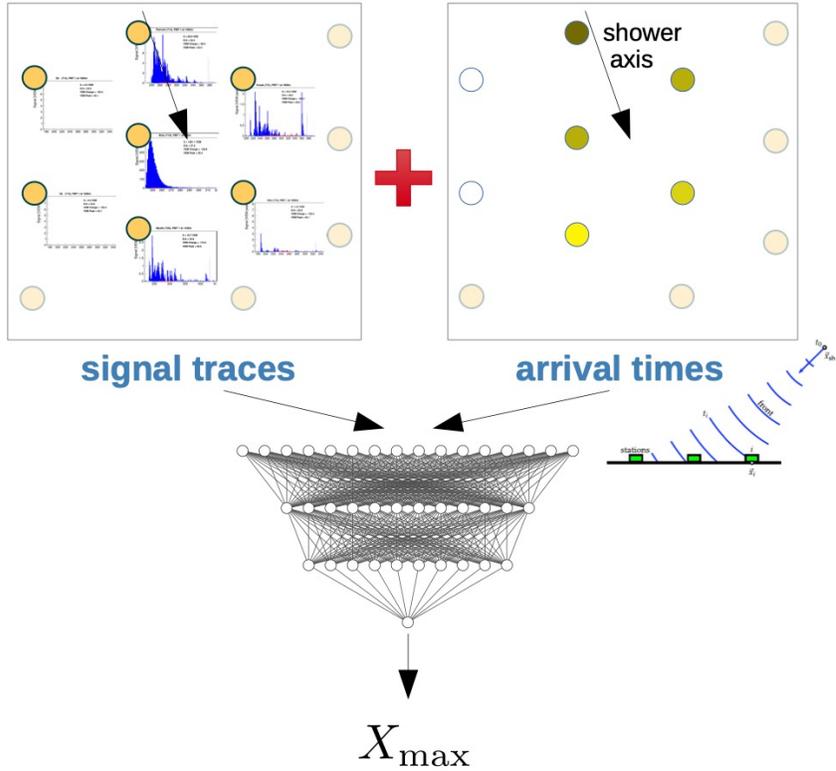


Model	Sibyll2.3c (no shifts)	Sibyll2.3c (fiducial shifts)
$R_0$ [EV]	$1.73^{+0.20}_{-0.18}$	$0.57^{+1.88}_{-0.11}$
$\beta_{\text{pop}}$	$29.9^{+1.7*}_{-18.1}$	$5.2^{+26.4*}_{-0.5}$
$\gamma_{\text{src}}$	$-0.23^{+0.18}_{-0.26}$	$-0.8^{+1.4}_{-0.5}$
$f_A^R$ [%]	$0^{+0}_{-0}$	$0^{+36.4}_{-0}$
	$58.1^{+0.4}_{-1.9}$	$0^{+51.3}_{-0}$
	$35.0^{+1.6}_{-0.2}$	$93.7^{+0.5}_{-53.5}$
	$5.7^{+0.5}_{-0.6}$	$0.3^{+7.7}_{-0.3}$
	$1.16^{+0.12}_{-0.11}$	$6.0^{+0.2}_{-3.8}$
$R_{\max}^{0.90}$ [ $R_0$ ]	$1.083^{+0.155}_{-0.005}$	$1.72^{+0.13}_{-0.64}$
$\chi^2/\text{d.o.f.}$	45.0/26	40.4/26

D. Ehlert et. al., PRD **107**, 103045 (2023)

- $R_{\max}$  はほぼ一定 (source はほぼ identical)
- $R_0 < R_{\max} < 1.083 R_0$  に 90%
- $R_{\max}$  がばらつく方向に  $\langle X_{\max} \rangle$  と  $\sigma(X_{\max})$  をシフトしても  $R_0 < R_{\max} < 1.72 R_0$  に 90%

# 機械学習を用いた $X_{\max}$ 再構成



- 単調 (two-break) elongation rate は $4\sigma$  ( $2.6\sigma$ )で棄却  
 → SDの高統計でスペクトル構造に対応する構造が見えてきている？
- FDの観測とは $\Delta X_{\max} \sim 30 \text{ g/cm}^2$ の系統的バイアス
  - 空気シャワーの観測/シミュレーションの違い起因？  
 (e.g. muon puzzle)
- $X_{\max}$  Resolution  $\sim 20$  ( $40$ )  $\text{g/cm}^2$  @ ICRC2023 (2021 paper)

# ハドロン相互作用モデルの systematic bias

## Astrophysics

起源天体分布

⊗

加速機構

⊗

(sourceでの)質量組成

⊗

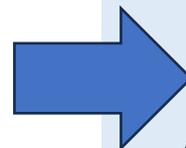
伝搬中のエネルギー損失

⊗

空気シャワー生成

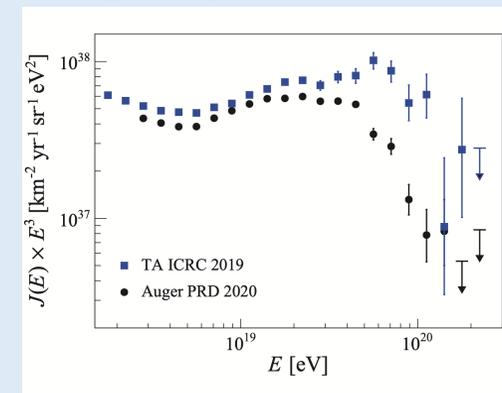
⊗

検出器, 解析の効果

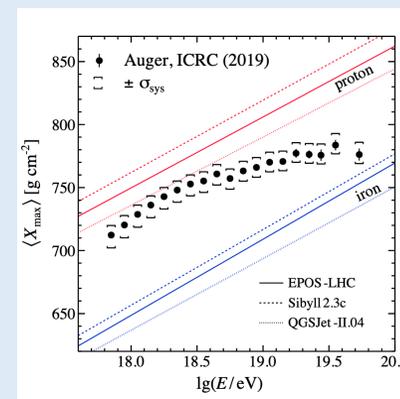


(UHECRの)  
観測値

エネルギースペクトル



(地球での)質量組成



# 空気シャワーの観測/シミュレーション比較

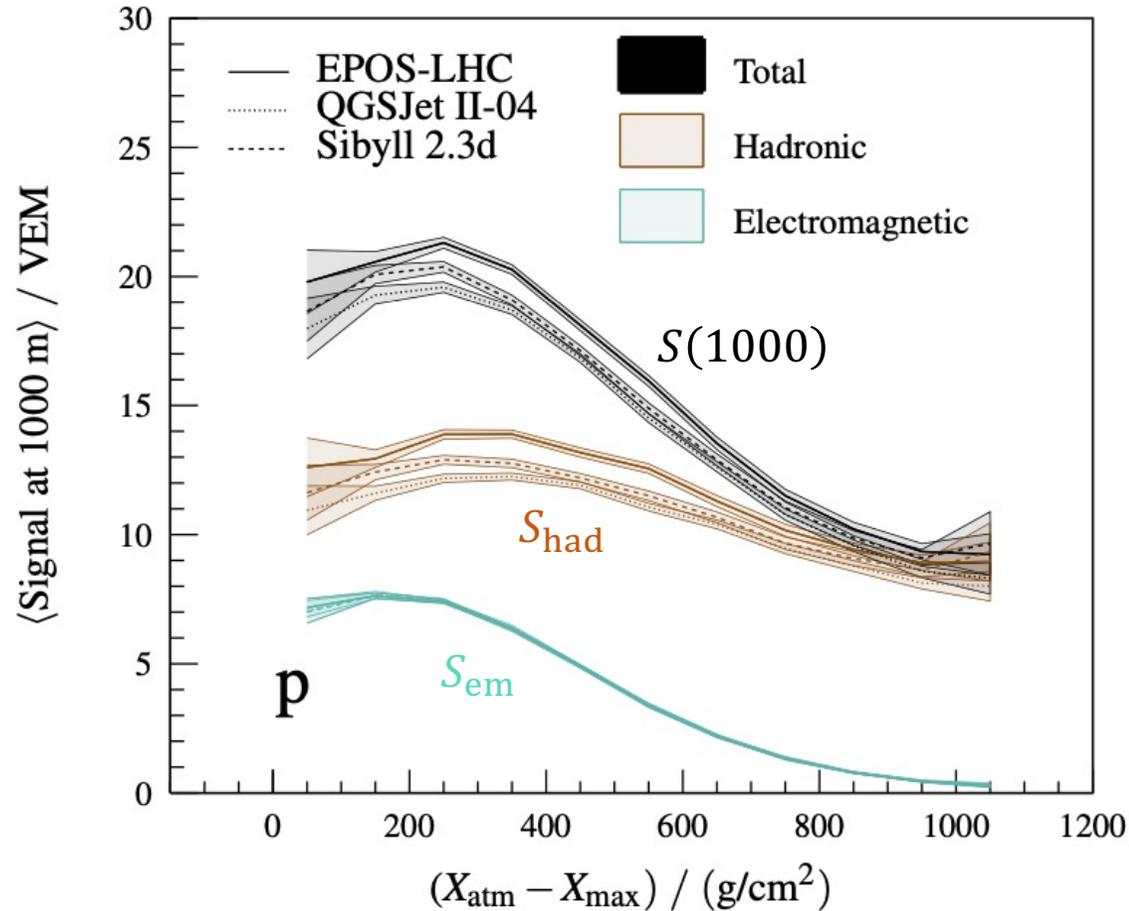
A. Abdul Halim et. al.,  
arXiv:2401.10740v2 (2024)

## Augerのこれまでのハドロン相互作用モデルの検証結果

test	energy/EeV	$\theta/^\circ$	EPOS-LHC	QGSJET-II-04	SIBYLL 2.3d
$X_{\max}$ moments [8–11]	~3 to 50	0 to 80	no tension <span style="color: green;">■</span>	tension <span style="color: red;">■</span>	no tension (2.3c) <span style="color: green;">■</span>
$X_{\max}:S(1000)$ correlation [11, 12]	3 to 10	0 to 60	no tension <span style="color: green;">■</span>	tension <span style="color: red;">■</span>	no tension (2.3c) <span style="color: green;">■</span>
mean muon number [13, 14]	~10	~67	tension <span style="color: red;">■</span>	tension <span style="color: red;">■</span>	tension <span style="color: red;">■</span>
mean muon number [15]	0.2 to 2	0 to 45	tension <span style="color: red;">■</span>	tension <span style="color: red;">■</span>	—
fluctuation of muon number [14]	4 to 40	~67	no tension <span style="color: green;">■</span>	no tension <span style="color: green;">■</span>	no tension <span style="color: green;">■</span>
muon production depth [16]	20 to 70	~60	tension <span style="color: red;">■</span>	no tension <span style="color: green;">■</span>	—
$S(1000)$ [17]	~10	0 to 60	tension <span style="color: red;">■</span>	tension <span style="color: red;">■</span>	—

× 観測に無矛盾なハドロン相互作用モデルはない  
(高エネルギーハドロン相互作用はうまくモデル化できていない)

- これまではSD信号や $X_{\max}$ を用いたモデル検証は独立にされてきた  
• しかし、それらは独立でない
- Augerの最近の論文 (arXiv:2401.10740v2、 submitted to PRD)では、  
FD-SDハイブリッド観測イベントを用いて、  
 $X_{\max}$  分布と粒子数密度 $S(1000)$ を同時に観測/モデル比較



XmaxからSDアレイまでの大気厚さ

$$S(1000) = S_{em} + S_{had}$$

- 電磁成分( $S_{em}$ )はモデル間の違いほぼなし
- ハドロン成分( $S_{had}$ )は違いあり

$X_{max}$  と  $S_{had}$  のみスケール (ad-hoc)

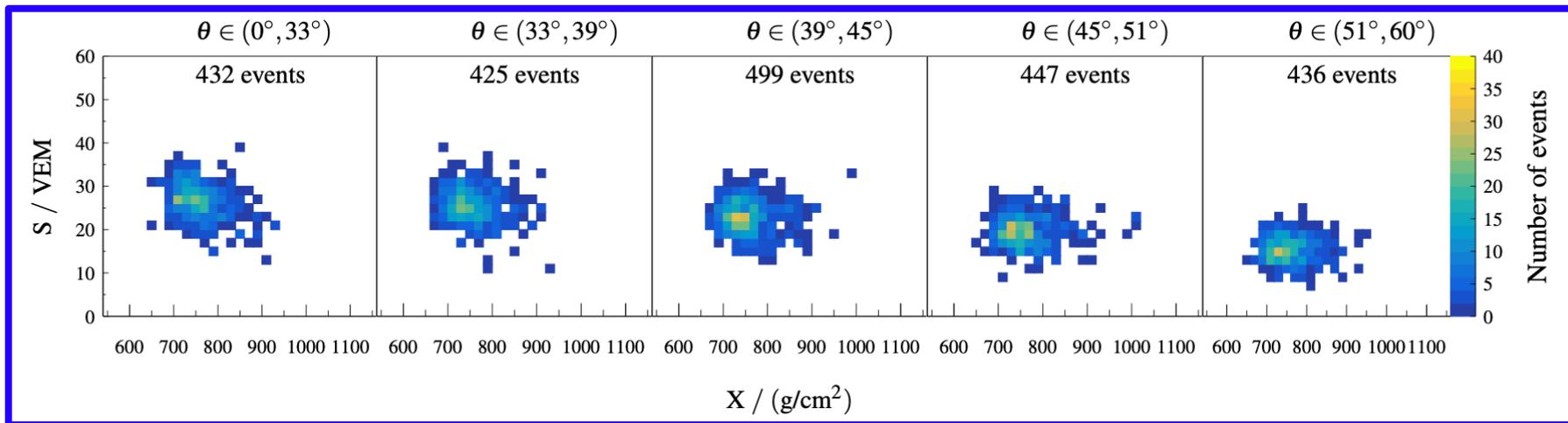
$$X_{max} \rightarrow X_{max} + \Delta X_{max}$$

$$S_{had}(\theta) \rightarrow S_{had}(\theta) \times R_{had}(\theta)$$

- Energy や primary particleによらずスケール
- $R_{had}(\theta)$  は 2つのフリーパラメーター  $R_{had}(\theta_{max})$ ,  $R_{had}(\theta_{min})$  の関数

# 空気シャワーの観測/シミュレーション比較

## 観測



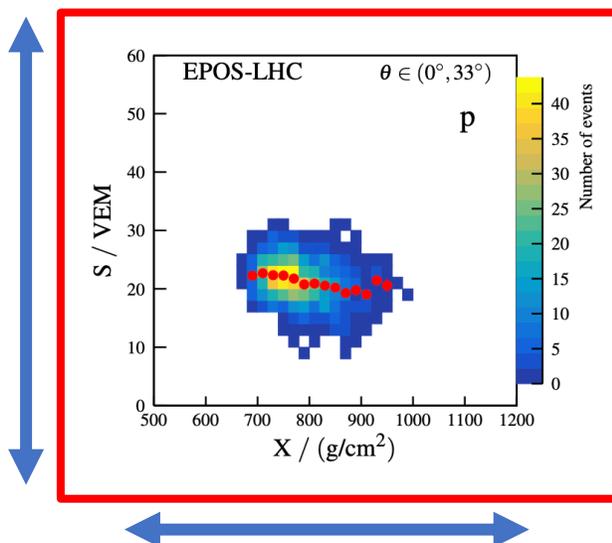
$10^{18.5} \text{ eV} < E < 10^{19.0} \text{ eV}$

$$S = S(1000) \left( \frac{E^{\text{ref}}}{E_{\text{FD}}} \right)^{1/1.031}$$

$$X = X_{\text{max}} + 58 \log \left( \frac{E^{\text{ref}}}{E_{\text{FD}}} \right)$$

$(E^{\text{ref}} = 10^{18.7} \text{ eV})$

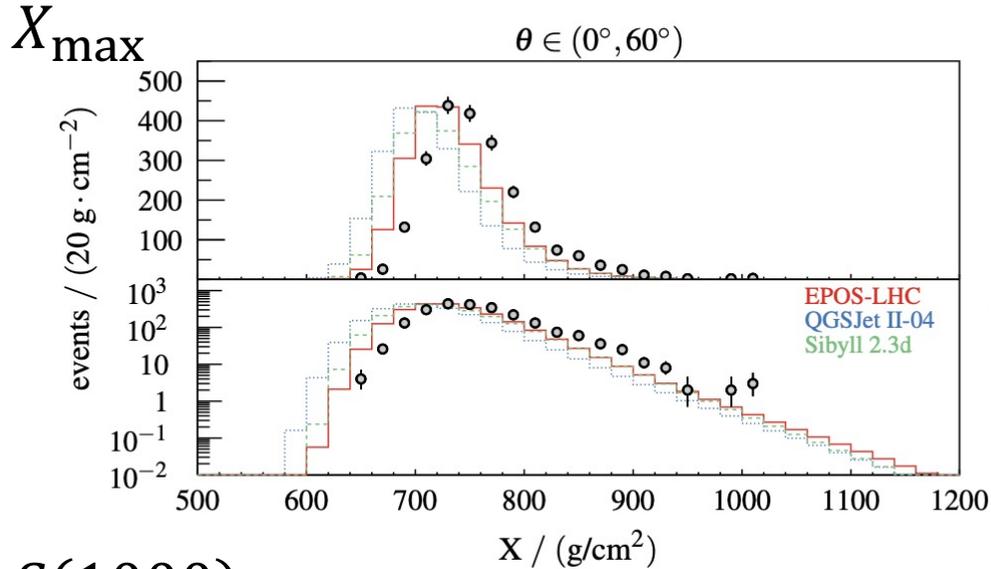
## MC



$$\ln \mathcal{L} = \sum_k \sum_j \left( C_{jk} - c_{jk} + n_{jk} \ln \frac{n_{jk}}{C_{jk}} \right)$$

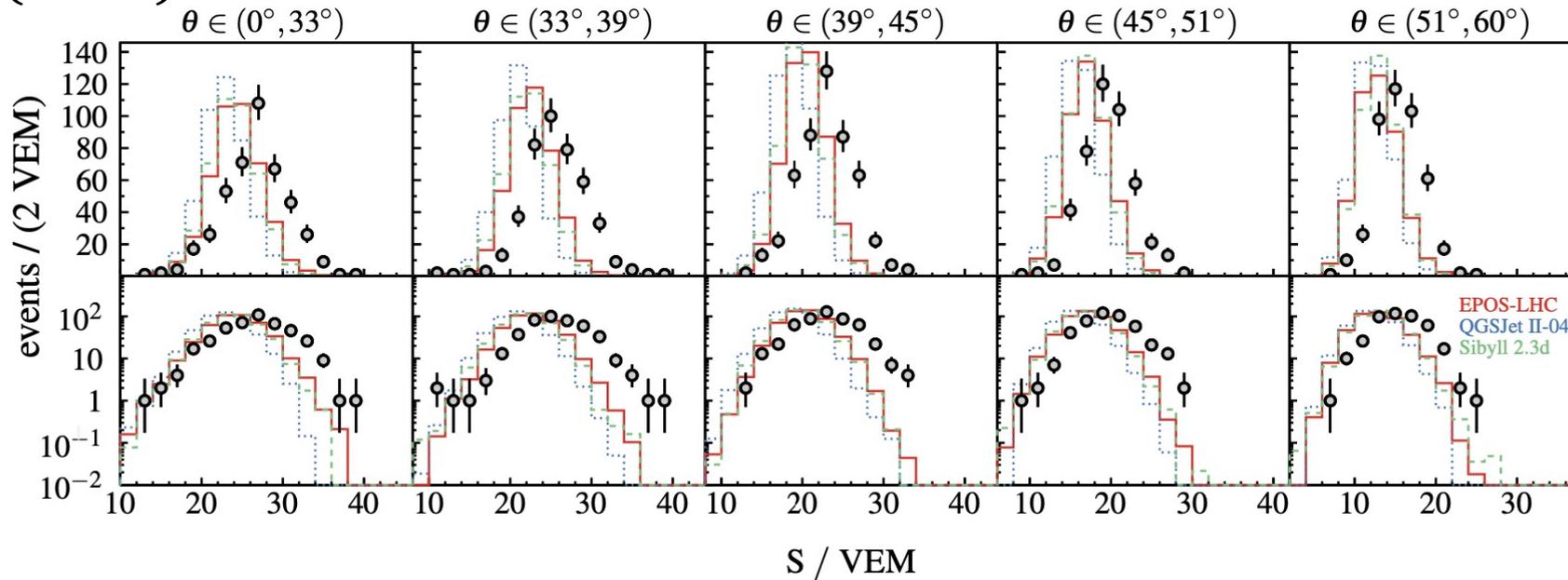
空気シャワーパラメーター **3つ** ( $\Delta X_{\text{max}}, R_{\text{had}}(\theta_{\text{max}}), R_{\text{had}}(\theta_{\text{min}})$ )と  
質量組成比 ( $f_p, f_{\text{He}}, f_{\text{O}}, f_{\text{Fe}}$ ) を変えて、**観測**を**MCテンプレート**でフィット

# 空気シャワーの観測/シミュレーション比較



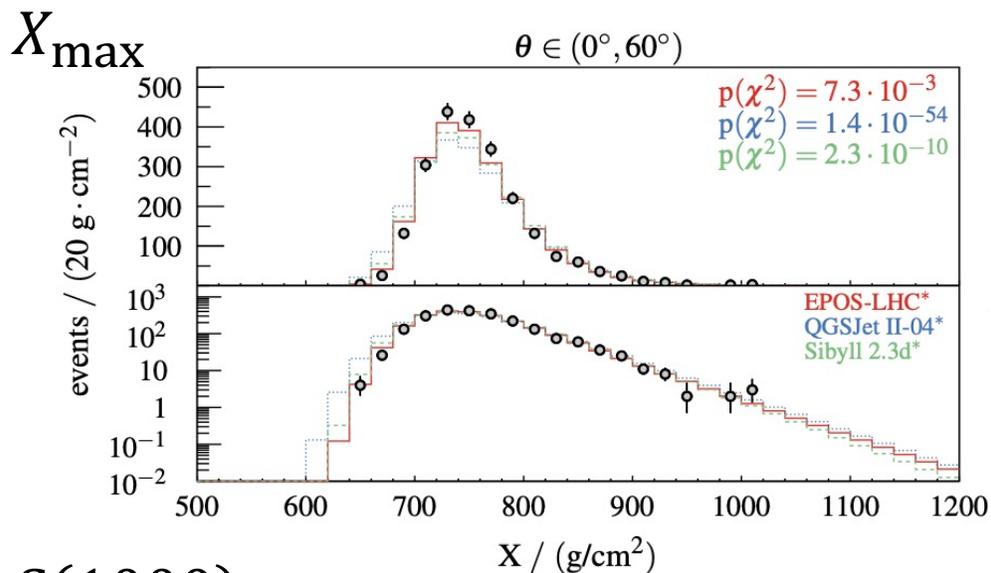
$\ln \mathcal{L}_{\min}$	EPOS-LHC	QGSJET-II-04	SIBYLL 2.3d
none	2022.9	4508.0	2496.5
$\Delta X_{\max}$	738.6	1674.8	1015.7
$R_{\text{had}} = \text{const.}$	489.2	684.4	521.6
$R_{\text{had}}(\theta)$	489.2	673.9	517.6
$R_{\text{had}} = \text{const. and } \Delta X_{\max}$	452.2	486.7	454.2
$R_{\text{had}}(\theta) \text{ and } \Delta X_{\max}$	451.9	476.3	451.6

## $S(1000)$



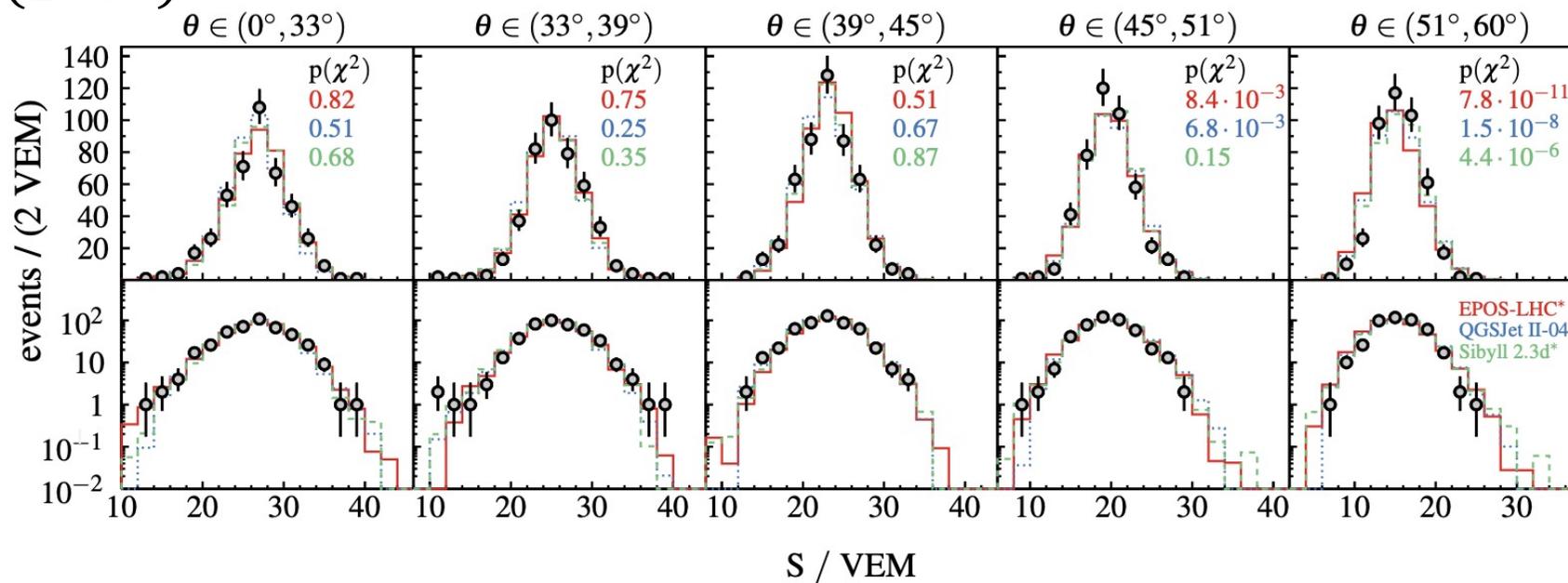
$X_{\max}$  や  $S_{\text{had}}$  スケールなし

# 空気シャワーの観測/シミュレーション比較



$\ln \mathcal{L}_{\min}$	EPOS-LHC	QGSJET-II-04	SIBYLL 2.3d
none	2022.9	4508.0	2496.5
$\Delta X_{\max}$	738.6	1674.8	1015.7
$R_{\text{had}} = \text{const.}$	489.2	684.4	521.6
$R_{\text{had}}(\theta)$	489.2	673.9	517.6
$R_{\text{had}} = \text{const. and } \Delta X_{\max}$	452.2	486.7	454.2
$R_{\text{had}}(\theta) \text{ and } \Delta X_{\max}$	451.9	476.3	451.6

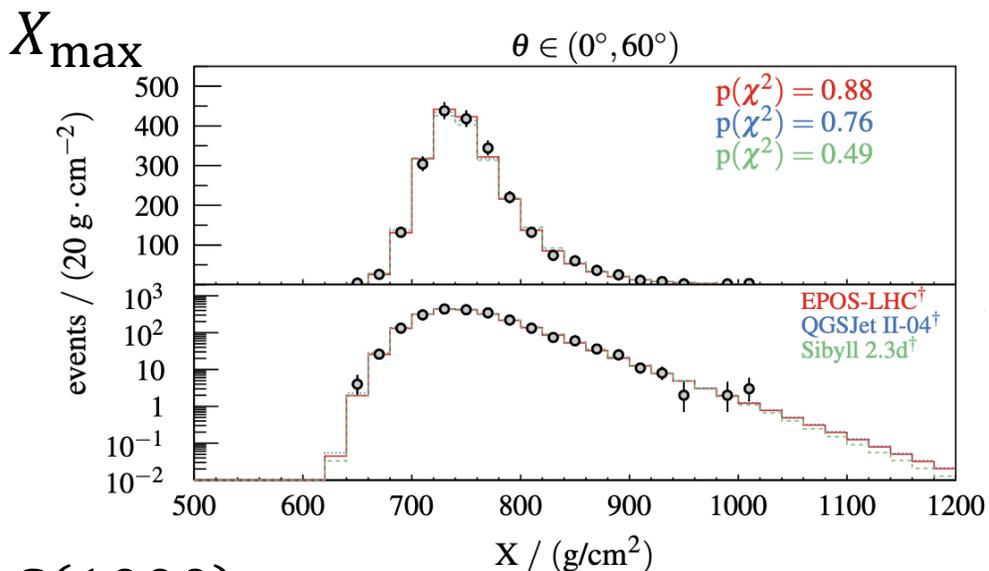
## S(1000)



$S_{\text{had}}$  のみスケール

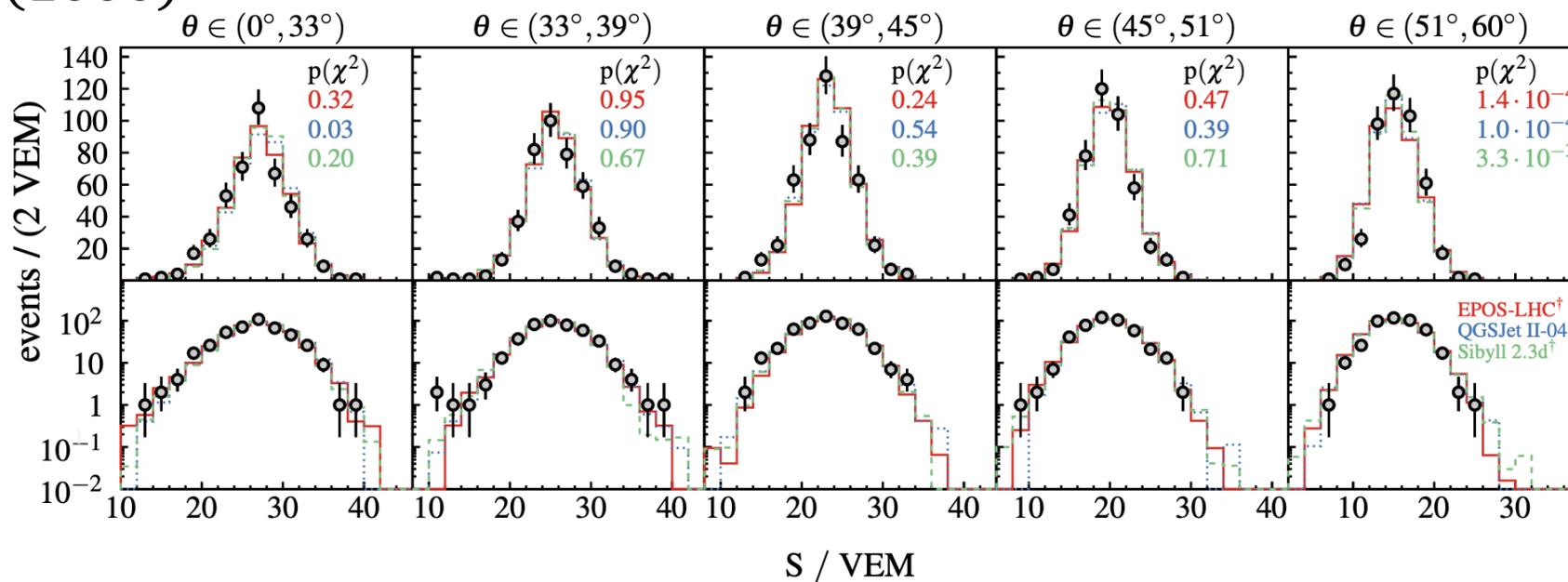
# 空気シャワーの観測/シミュレーション比較

A. Abdul Halim et. al.,  
arXiv:2401.10740v2 (2024)



$\ln \mathcal{L}_{\min}$	EPOS-LHC	QGSJET-II-04	SIBYLL 2.3d
none	2022.9	4508.0	2496.5
$\Delta X_{\max}$	738.6	1674.8	1015.7
$R_{\text{had}} = \text{const.}$	489.2	684.4	521.6
$R_{\text{had}}(\theta)$	489.2	673.9	517.6
$R_{\text{had}} = \text{const. and } \Delta X_{\max}$	452.2	486.7	454.2
$R_{\text{had}}(\theta)$ and $\Delta X_{\max}$	451.9	476.3	451.6

## S(1000)



$X_{\max}$  &  $S_{\text{had}}$  スケール

実験のsystematicsを考慮しても

$X_{\max}$ のみスケール or

$S_{\text{had}}$ のみスケール と比べて

5 $\sigma$ 以上の改善

# 空気シャワーの観測/シミュレーション比較

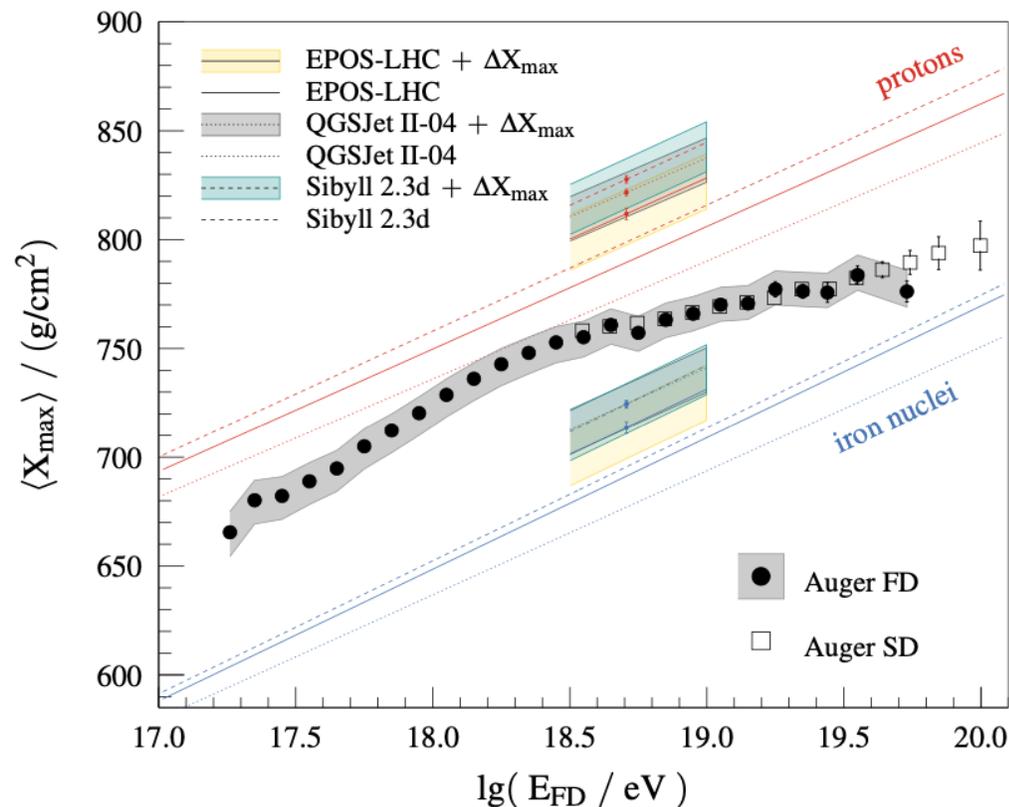
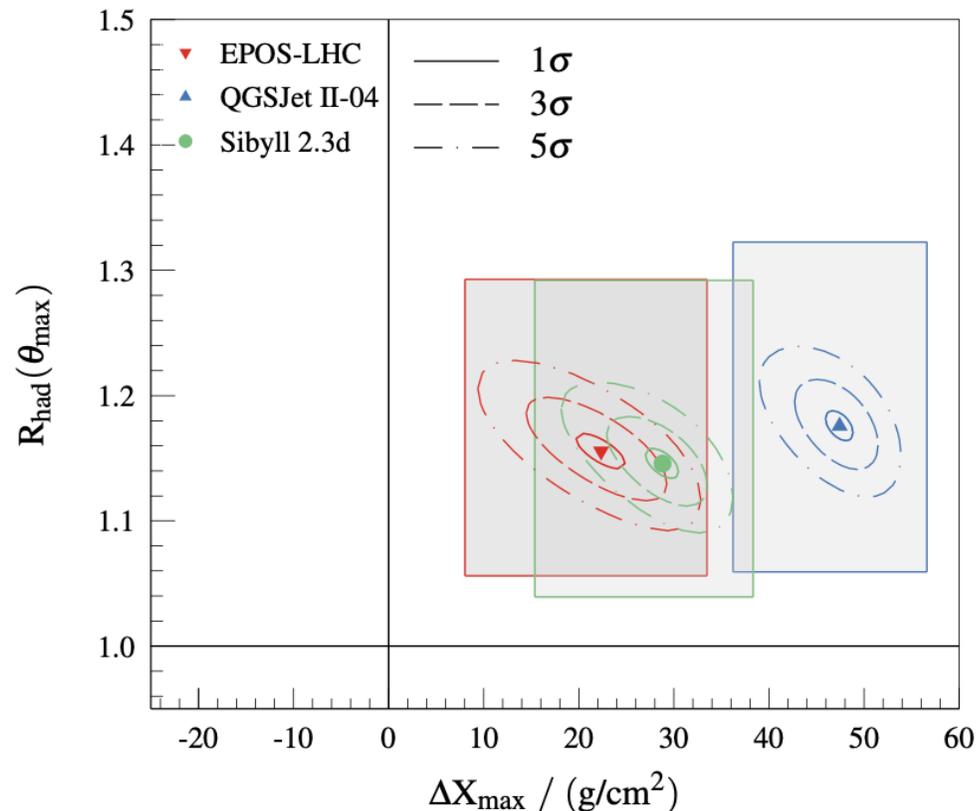
A. Abdul Halim et. al.,  
arXiv:2401.10740v2 (2024)

29

$X_{\max}$  &  $S(1000)$ スケール

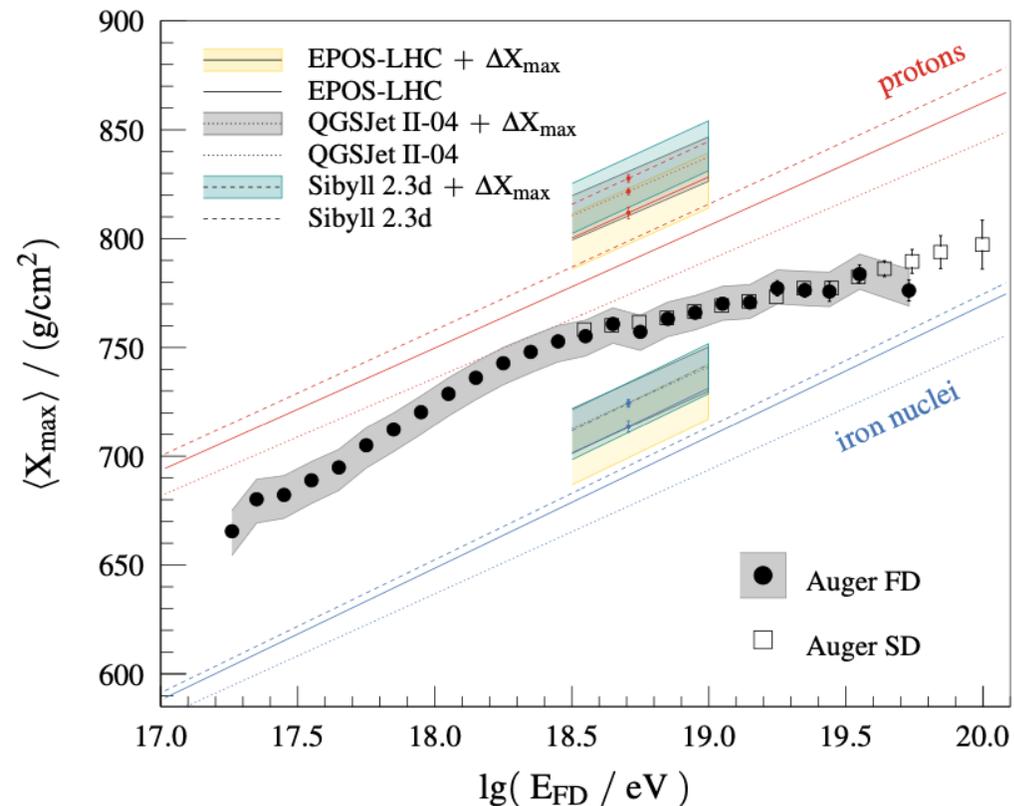
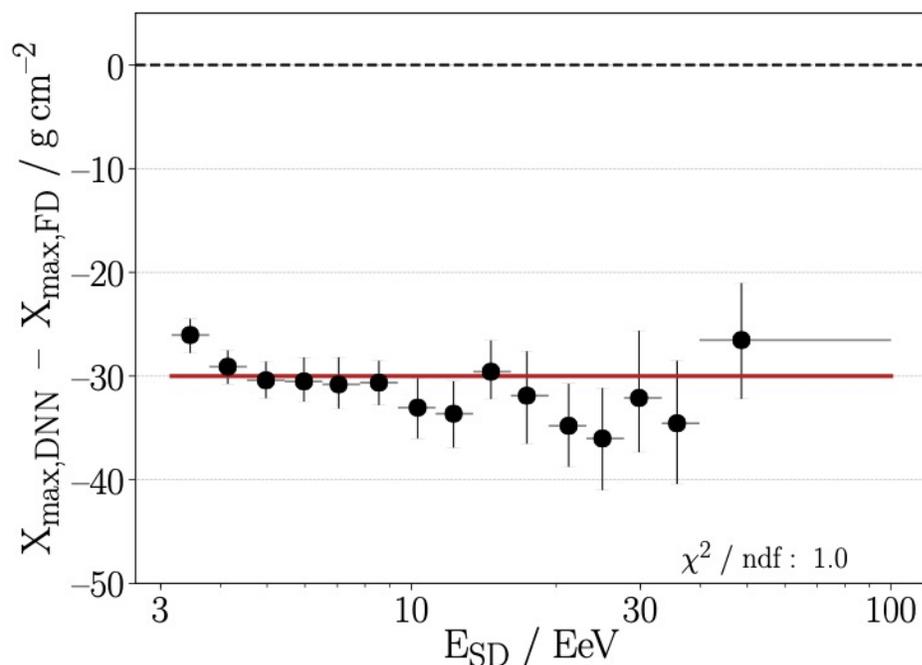
$R_{\text{had}} \sim 1.2$

$\Delta X_{\max} = +20 \sim 50 \text{ g/cm}^2$



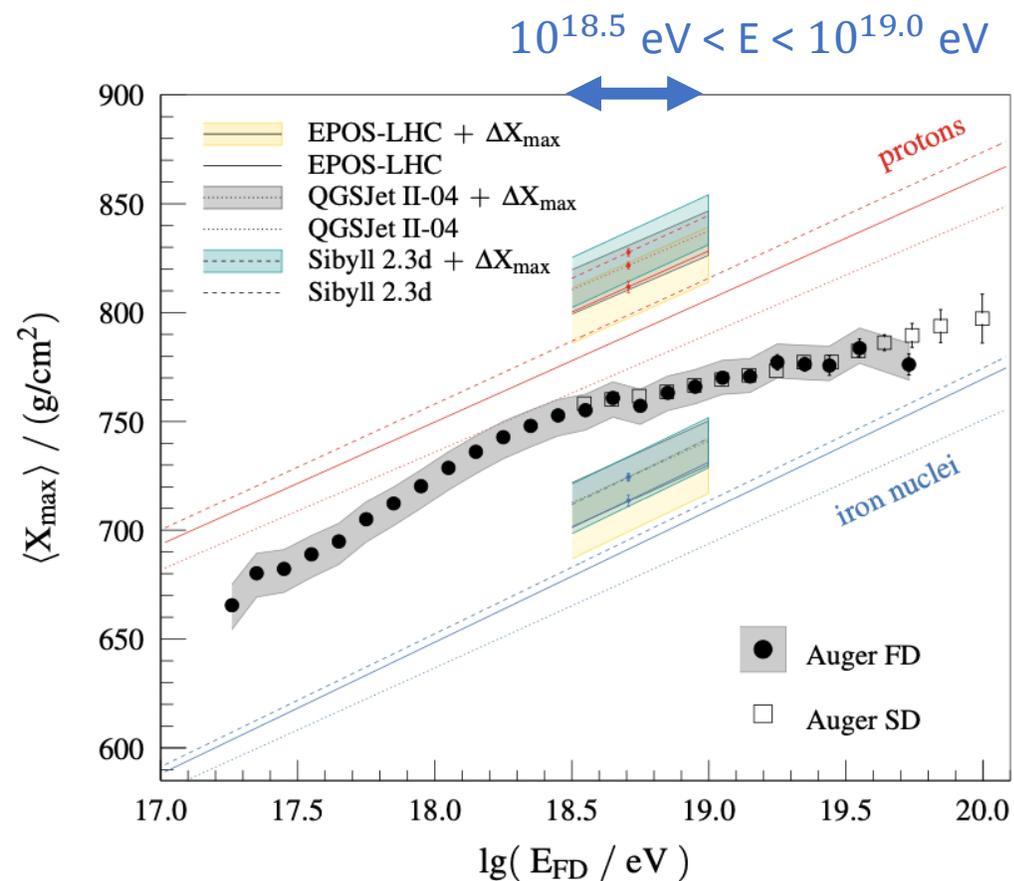
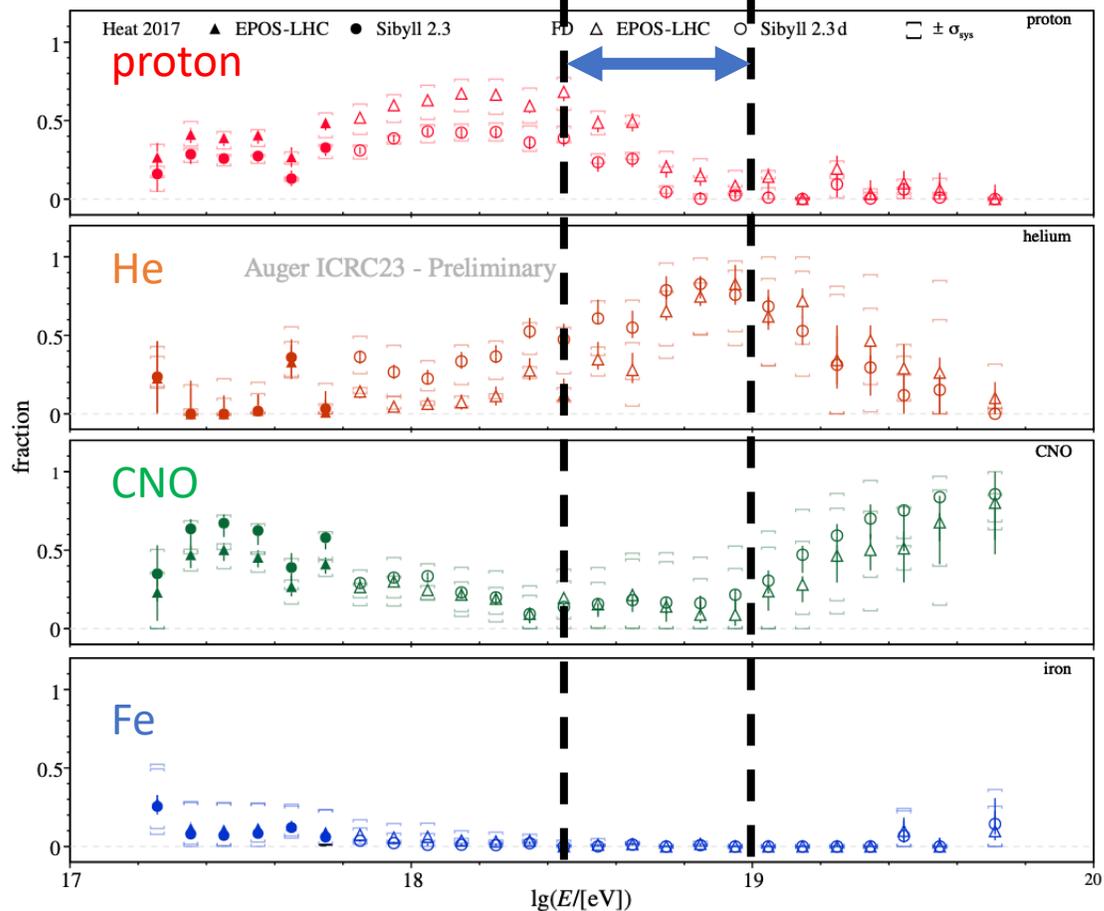
	$R_{\text{had}}(\theta_{\min})$	$R_{\text{had}}(\theta_{\max})$	$\Delta X_{\max}/(\text{g/cm}^2)$	$f_p$ (%)	$f_{\text{He}}$ (%)	$f_{\text{O}}$ (%)	$f_{\text{Fe}}$ (%)	$p$ -value (%)
EPOS-LHC	$1.15 \pm 0.01$	$1.16 \pm 0.01$	$22 \pm 3$	$21 \pm 3$	$20 \pm 4$	$44 \pm 5$	$15 \pm 4$	10.6
QGSJET-II-04	$1.24 \pm 0.01$	$1.18 \pm 0.01$	$47^{+2}_{-1}$	$16 \pm 2$	$11 \pm 4$	$36 \pm 5$	$37 \pm 5$	19.8
SIBYLL 2.3d	$1.18 \pm 0.01$	$1.15 \pm 0.01$	$29 \pm 2$	$13 \pm 2$	$15 \pm 4$	$40 \pm 5$	$32 \pm 5$	32.6

- $\Delta X_{\max} = +20 \sim 50 \text{ g/cm}^2$   
→ これまでの想定より  
平均質量組成は重いかもしれない
- スケール後の方が  
モデル間の  $\langle X_{\max} \rangle$  の違いは小さい
- DNNのバイアス ( $30 \text{ g/cm}^2$ ) と  
同程度のスケール



# 空気シャワーの観測/シミュレーション比較

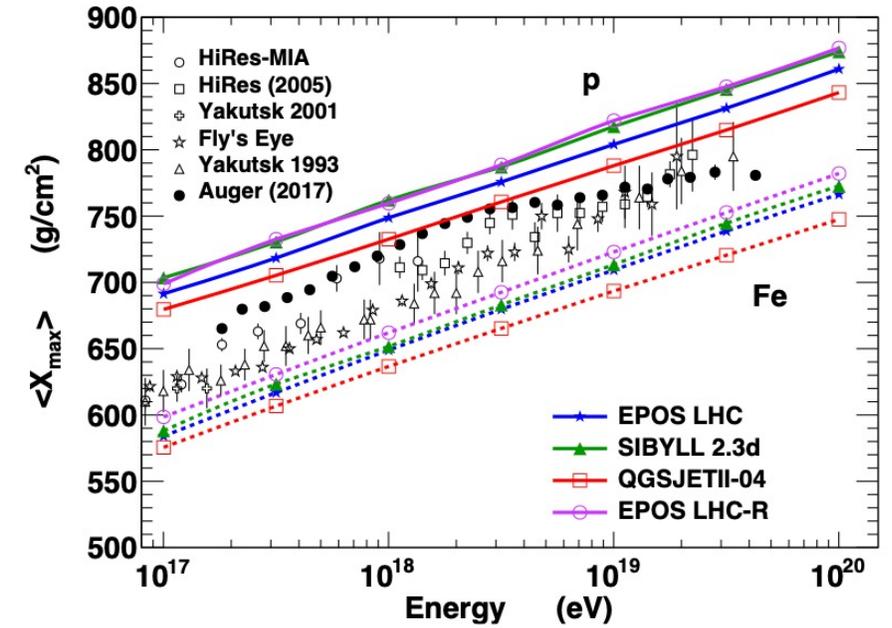
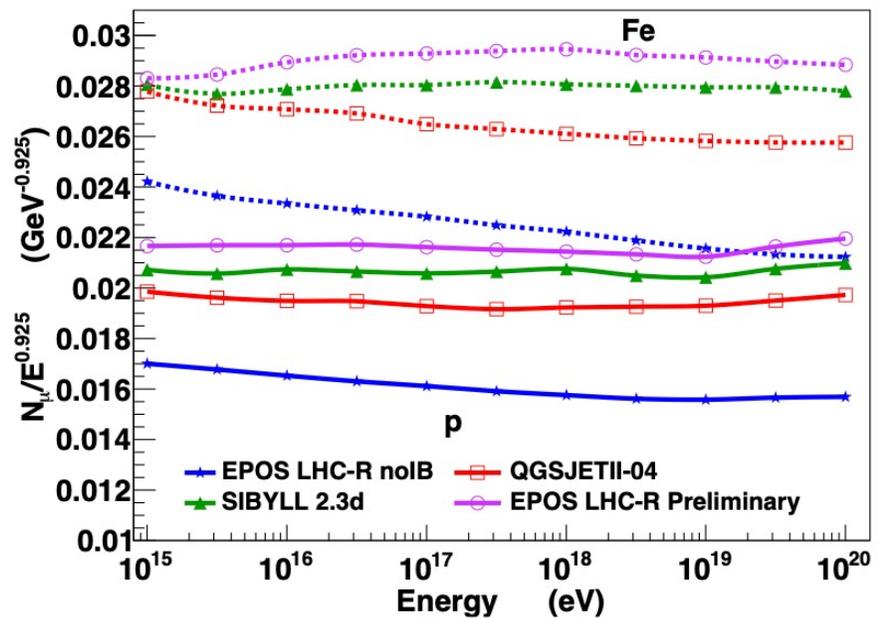
A. Abdul Halim et. al.,  
arXiv:2401.10740v2 (2024)



	$R_{had}(\theta_{min})$	$R_{had}(\theta_{max})$	$\Delta X_{max}/(\text{g/cm}^2)$	$f_p$ (%)	$f_{He}$ (%)	$f_O$ (%)	$f_{Fe}$ (%)	$p$ -value (%)
EPOS-LHC	$1.15 \pm 0.01$ $^{+0.20}_{-0.16}$	$1.16 \pm 0.01$ $^{+0.14}_{-0.10}$	$22 \pm 3$ $^{+11}_{-14}$	$21 \pm 3$ $^{+14}_{-11}$	$20 \pm 4$ $^{+15}_{-6}$	$44 \pm 5$ $^{+15}_{-6}$	$15 \pm 4$ $^{+7}_{-15}$	10.6
QGSJET-II-04	$1.24 \pm 0.01$ $^{+0.22}_{-0.19}$	$1.18 \pm 0.01$ $^{+0.15}_{-0.12}$	$47^{+2}_{-1}$ $^{+9}_{-11}$	$16 \pm 2$ $^{+8}_{-10}$	$11 \pm 4$ $^{+20}_{-7}$	$36 \pm 5$ $^{+21}_{-5}$	$37 \pm 5$ $^{+6}_{-22}$	19.8
SIBYLL 2.3d	$1.18 \pm 0.01$ $^{+0.21}_{-0.17}$	$1.15 \pm 0.01$ $^{+0.15}_{-0.11}$	$29 \pm 2$ $^{+10}_{-13}$	$13 \pm 2$ $^{+18}_{-5}$	$15 \pm 4$ $^{+15}_{-12}$	$40 \pm 5$ $^{+22}_{-5}$	$32 \pm 5$ $^{+3}_{-25}$	32.6

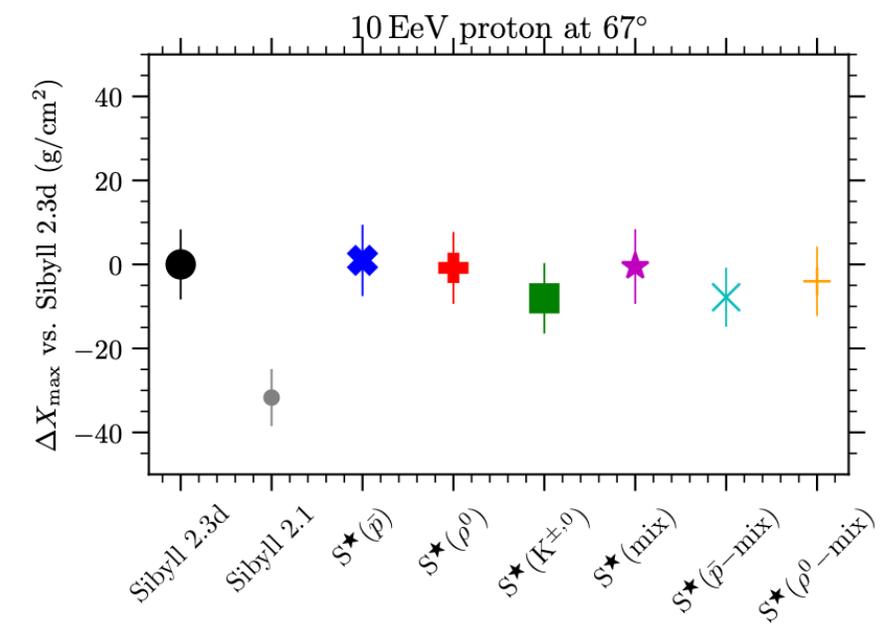
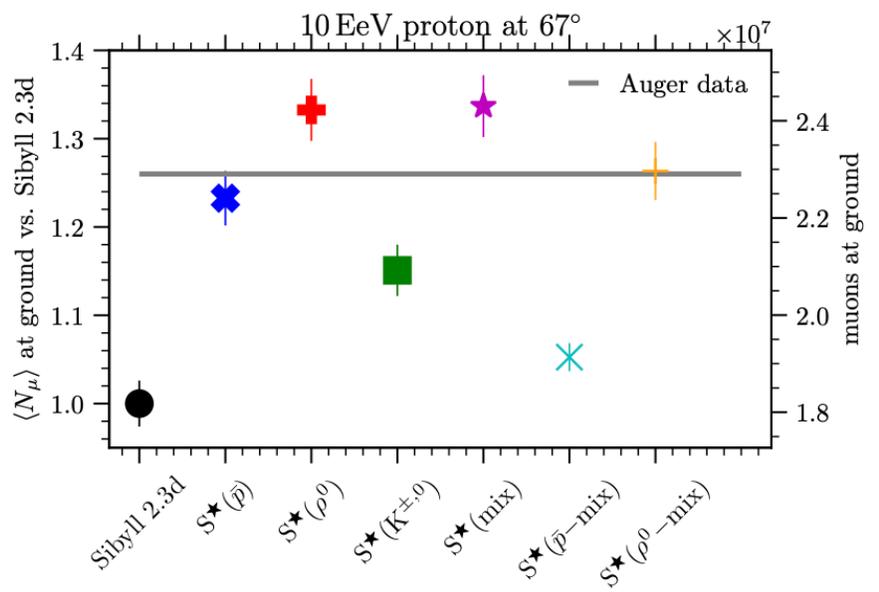
# EPOS-LHC-R

T. Pierog and K. Werner,  
PoS ICRC2023, 230 (2023)



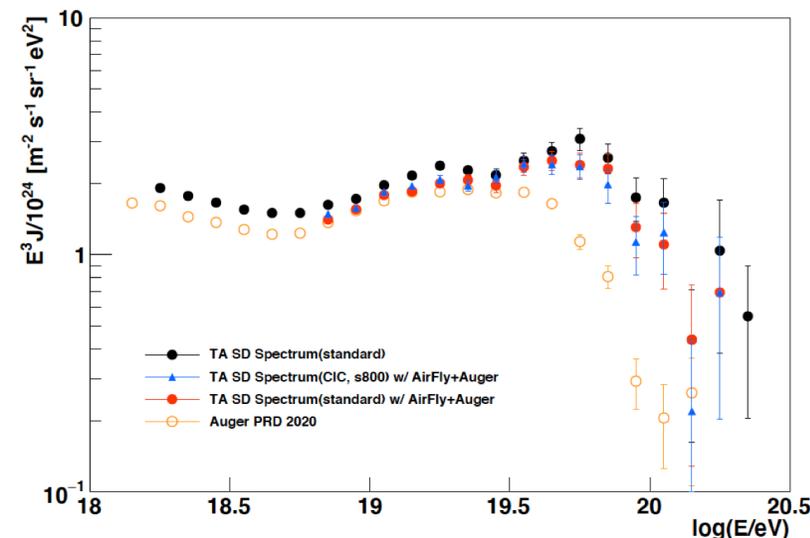
# Sibyll\*

F. Riehn et al.,  
PoS ICRC2023, 429 (2023)



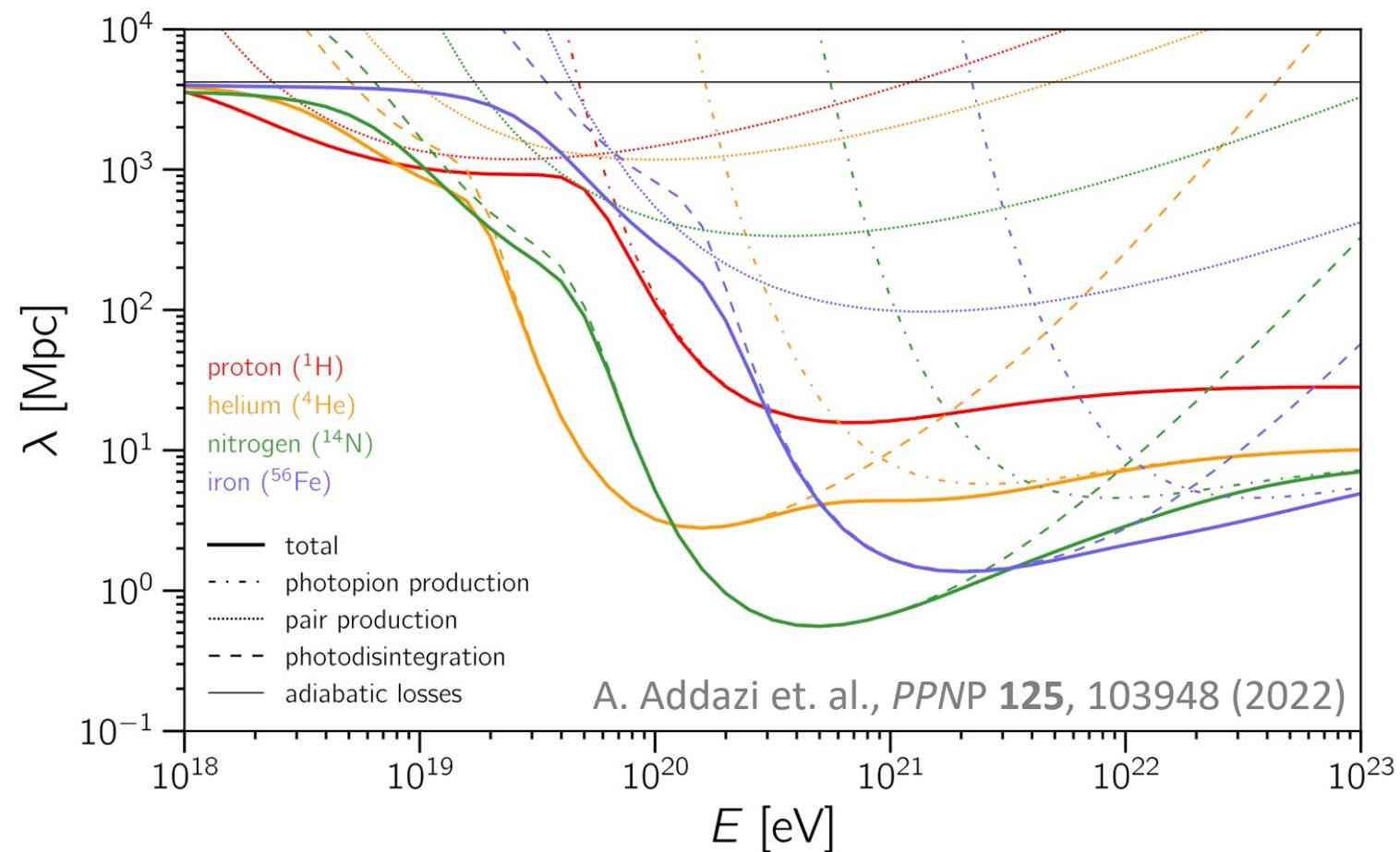
# UHECR観測のエネルギースペクトル, 質量組成のまとめ

- ankle, instep, cutoff といったスペクトル構造が北天/南天で見えた
  - Auger解析では Peters cycle (rigidity-dependent加速) でankle手前までざっくりと形は説明できる
    - low max rigidity ( $R \sim 10^{18.2}$  V) & hard source spectrum ( $\propto E^{1.5}$ ) (source脱出時)
    - ankle: 2つの異なるextragalactic成分の重ね合わせ or photodisintegrationによるproton + Galactic成分  
Galacticの成分がどこまで伸びているか不明 ( $E \sim 10^{16.5} - 10^{18.5}$  eVあたり? TALE infill + TALE + TA !!)
    - instep: He と CNO のpeakの重ね合わせ
    - cutoff: 最大加速 + photodisintegration
- TAの測定したエネルギースペクトルは  $E > 10^{19.5}$  eV でAugerと異なる
  - Energy 推定手法の違いによるバイアスはない
  - TA hotspotのみの寄与ではない (違いの理解はまだ)
- Auger の SD + DNNによる Xmax測定
  - 高統計で新たな構造が見えてきた?
  - FD観測とのバイアスあり
- 空気シャワーの観測とシミュレーションは不一致
  - (ad-hocには) シミュレーションは hadron成分が少ない、Xmaxは浅い  $\rightarrow$  質量組成はもっと重いかももしれない
  - 新たなハドロン相互作用モデル: EPOS-LHC-R, Sibyll<sup>\*</sup>, QGSJET-III

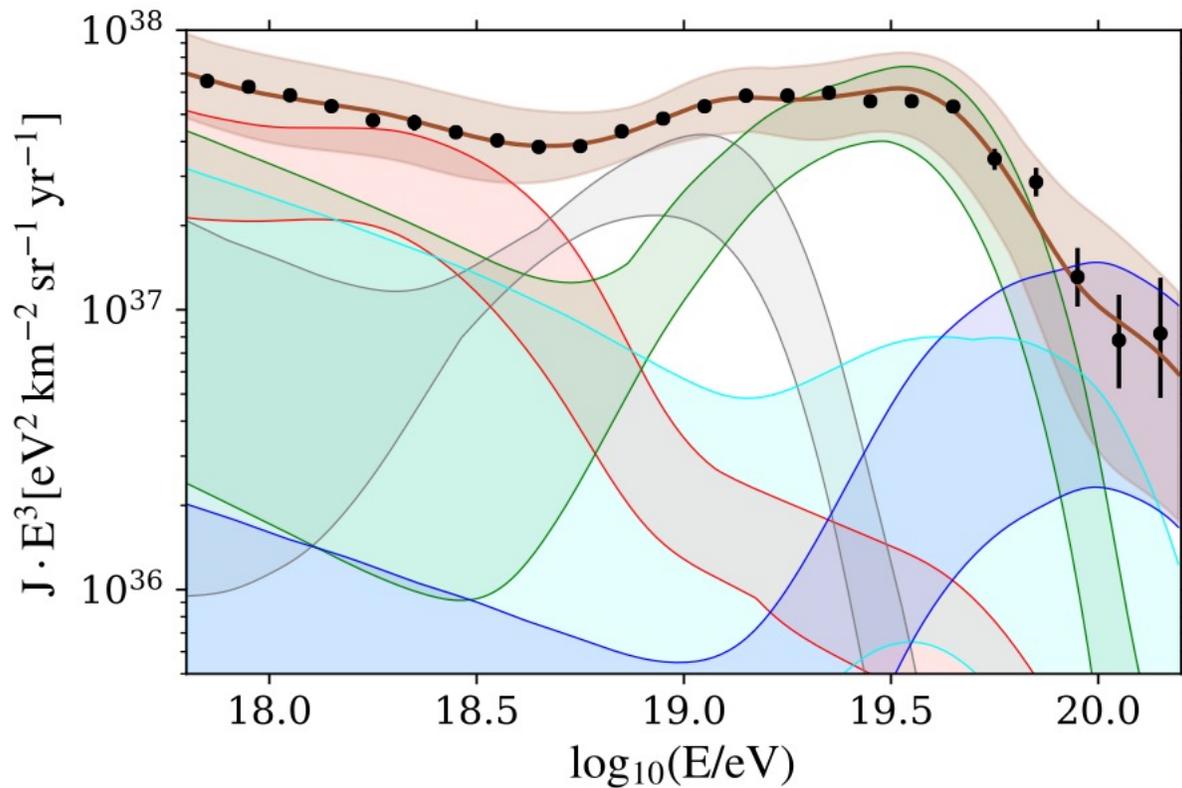


# Backup

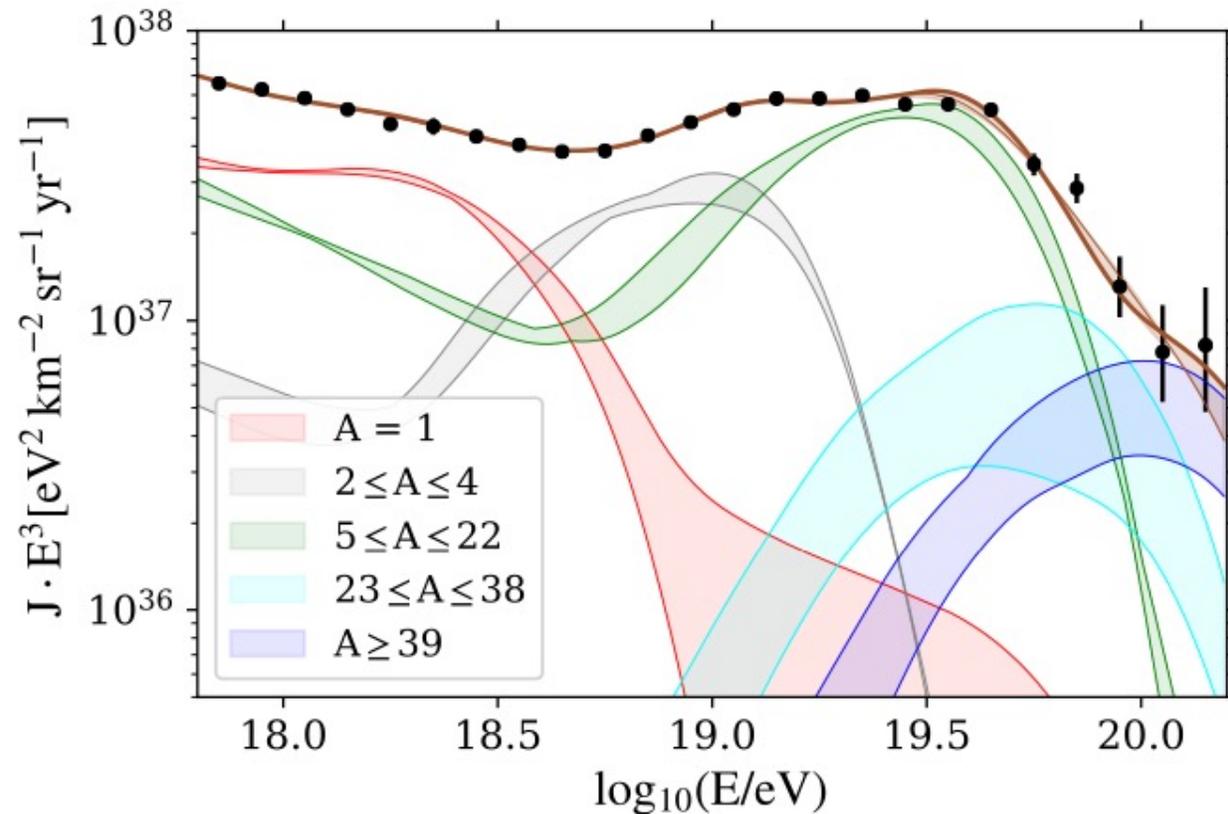
# 伝搬中のエネルギー損失



- proton:  
宇宙マイクロ波背景放射(CMB)との  
GZK反応 ( $p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^+ + n / \pi^0 + p$ ) により  
 $E > \sim 10^{19.8} \text{ eV}$  で強く suppress
- 原子核:  
CMBとの光分解反応 ( $N + \gamma \rightarrow N' + n/p + \gamma$ )  
により  
 $E > \sim A \times 4 \times 10^{18} \text{ eV}$  で強く suppress



実験の不確かさ

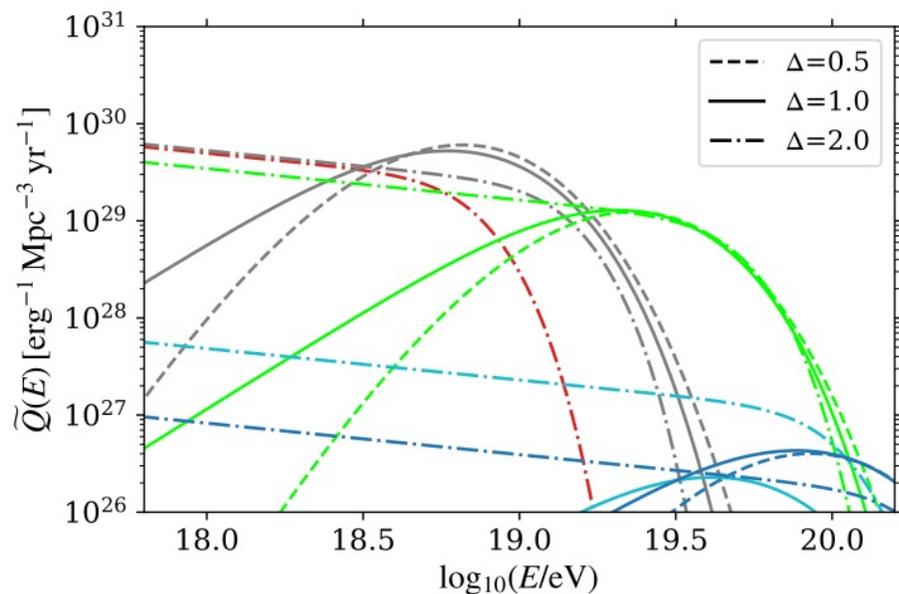
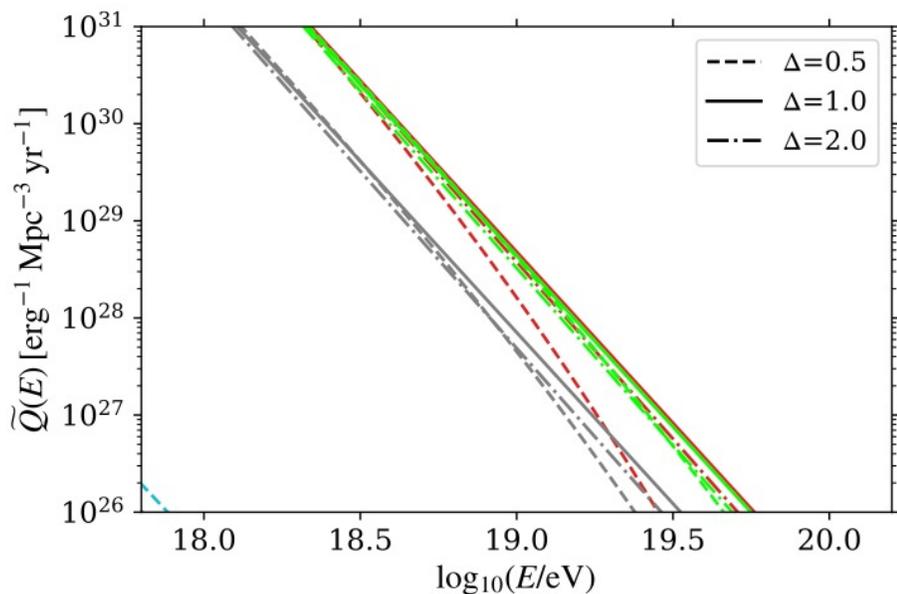


Propagation model  
+ Xmaxに関するHadronic interaction model  
に関する不確かさ

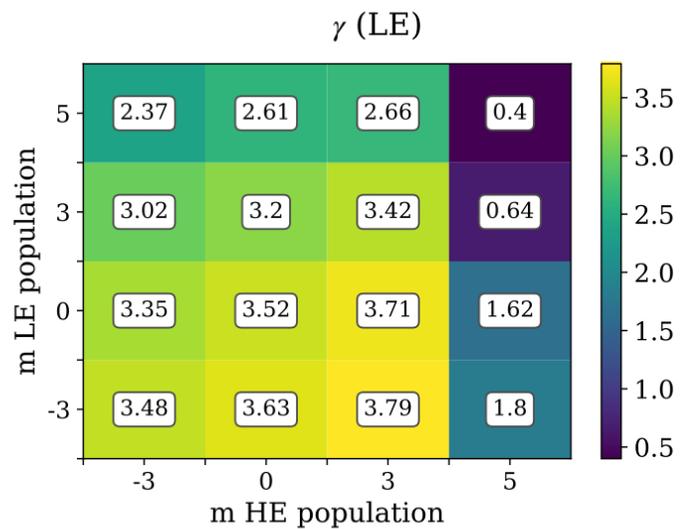
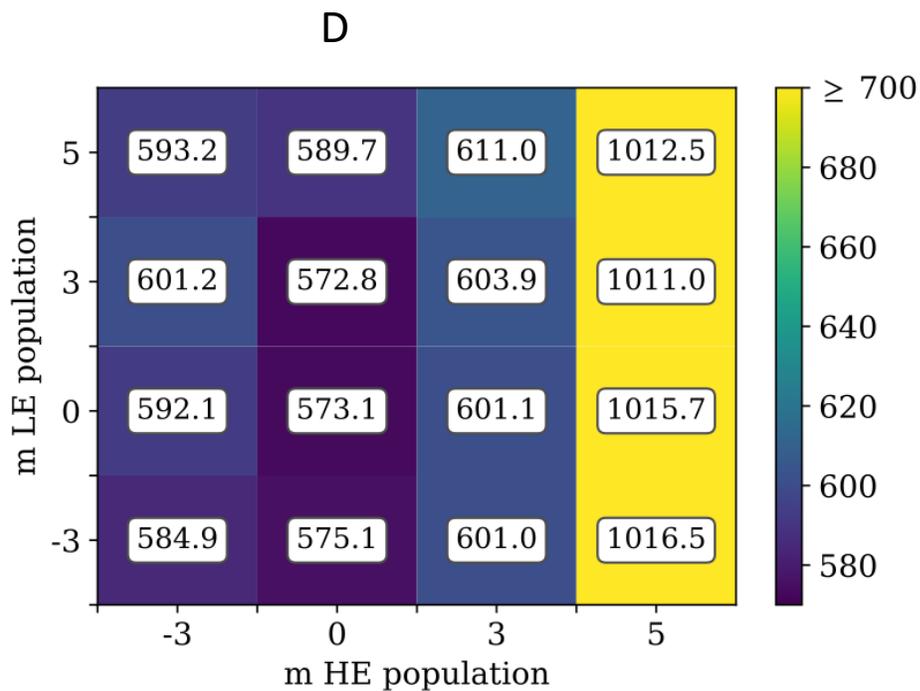
$$J(E) = \sum_A J_{0A} \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma} \exp \left( -\frac{E}{Z_A R_{\text{cut}}} \right)$$

$$J(E) = \sum_A J_{0A} \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma} \text{sech} \left[ \left( \frac{E}{Z_A R_{\text{cut}}} \right)^\Delta \right]$$

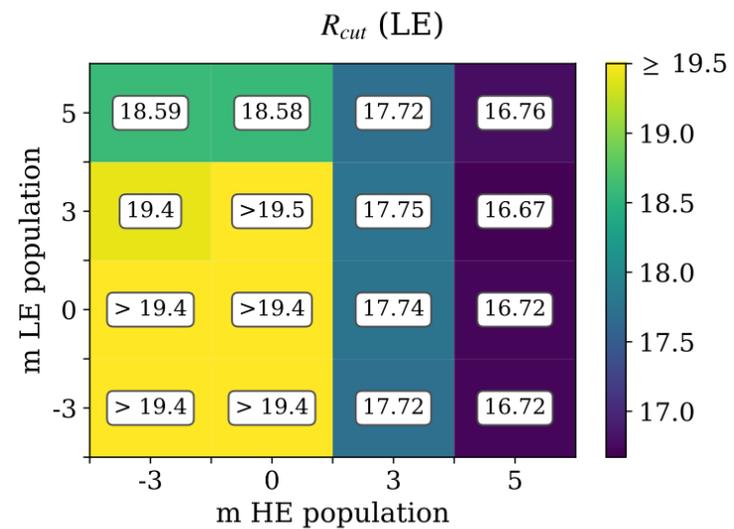
Energy cutoff		$\gamma$	$\log_{10}(R_{\text{cut}}/\text{V})$	$D$	$D_J$	$D_{X_{\text{max}}}$
Broken exponential	LE	$3.52 \pm 0.03$	$> 19.4$	573.1	56.6	516.5
	HE	$-1.99 \pm 0.11$	$18.15 \pm 0.01$			
Exponential	LE	$3.53 \pm 0.03$	$> 20.2$	575.2	58.9	516.2
	HE	$-2.06 \pm 0.10$	$18.15 \pm 0.01$			
Hyperbolic secant $\Delta = 0.5$	LE	$3.41 \pm 0.07$	$18.29 \pm 0.25$	595.9	70.0	525.9
	HE	$-6.23 \pm 0.18$	$16.33 \pm 0.02$			
Hyperbolic secant $\Delta = 1.0$	LE	$3.53 \pm 0.03$	$> 19.7$	575.3	59.3	516.0
	HE	$-2.02 \pm 0.10$	$18.15 \pm 0.01$			
Hyperbolic secant $\Delta = 2.0$	LE	$3.65 \pm 0.03$	$> 19.7$	618.6	83.3	535.3
	HE	$0.32 \pm 0.05$	$18.78 \pm 0.01$			



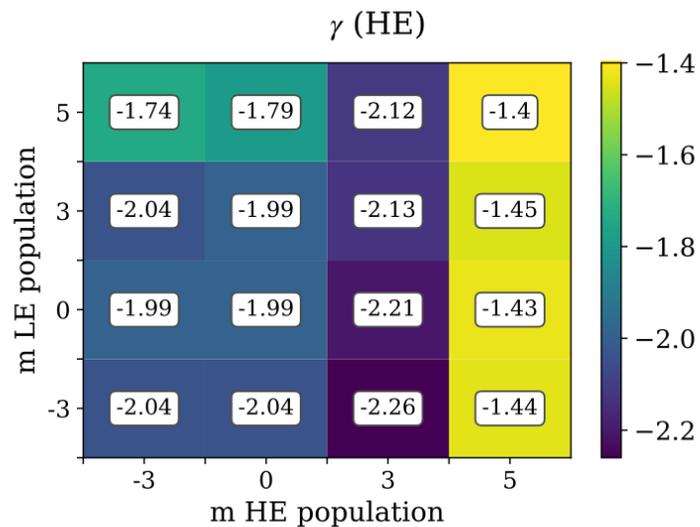
Source evolution  $\propto (1+z)^m$



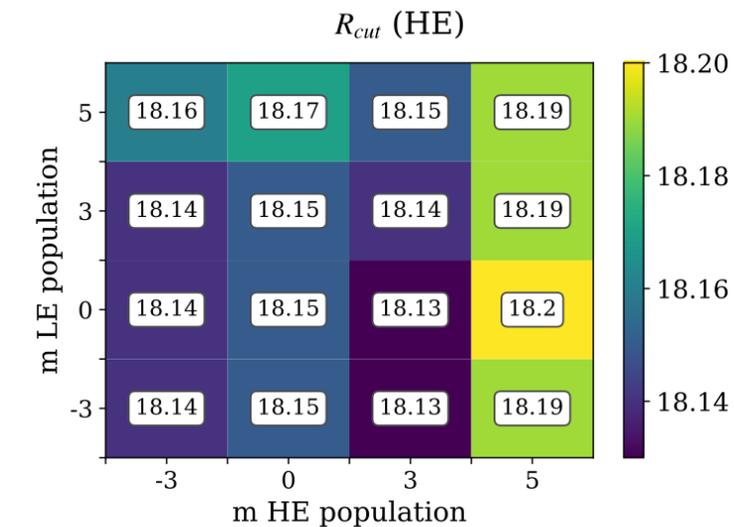
(a)



(b)



(c)



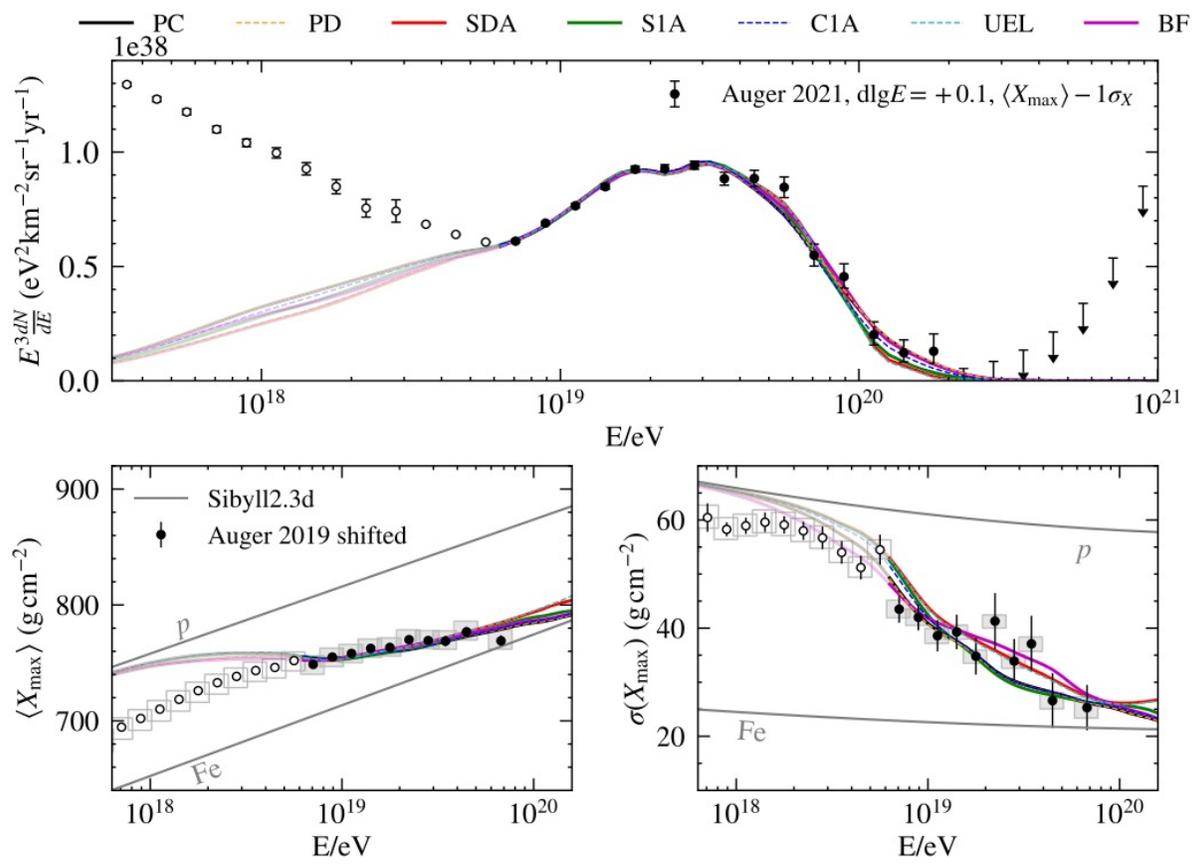
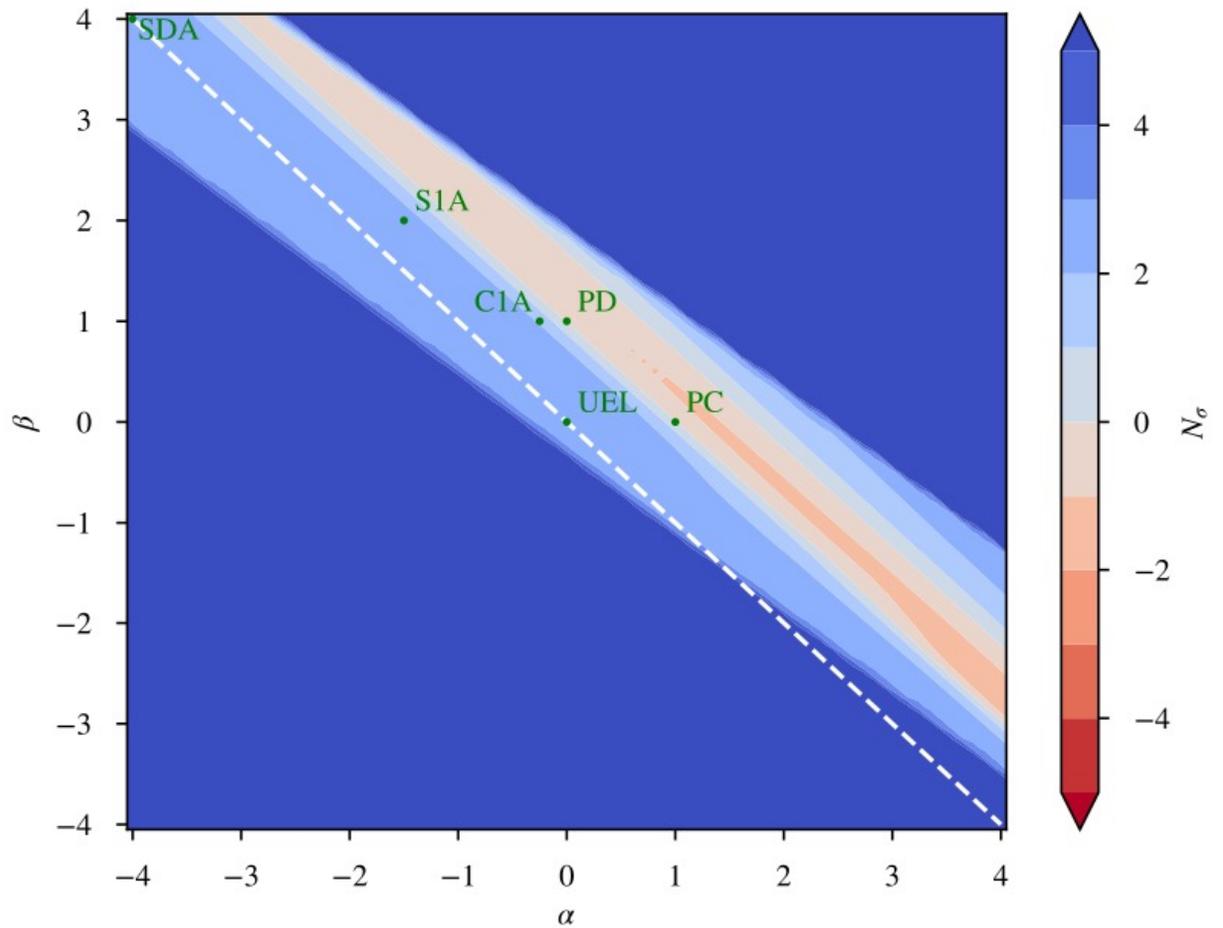
(d)

# より複雑なシナリオ (3)

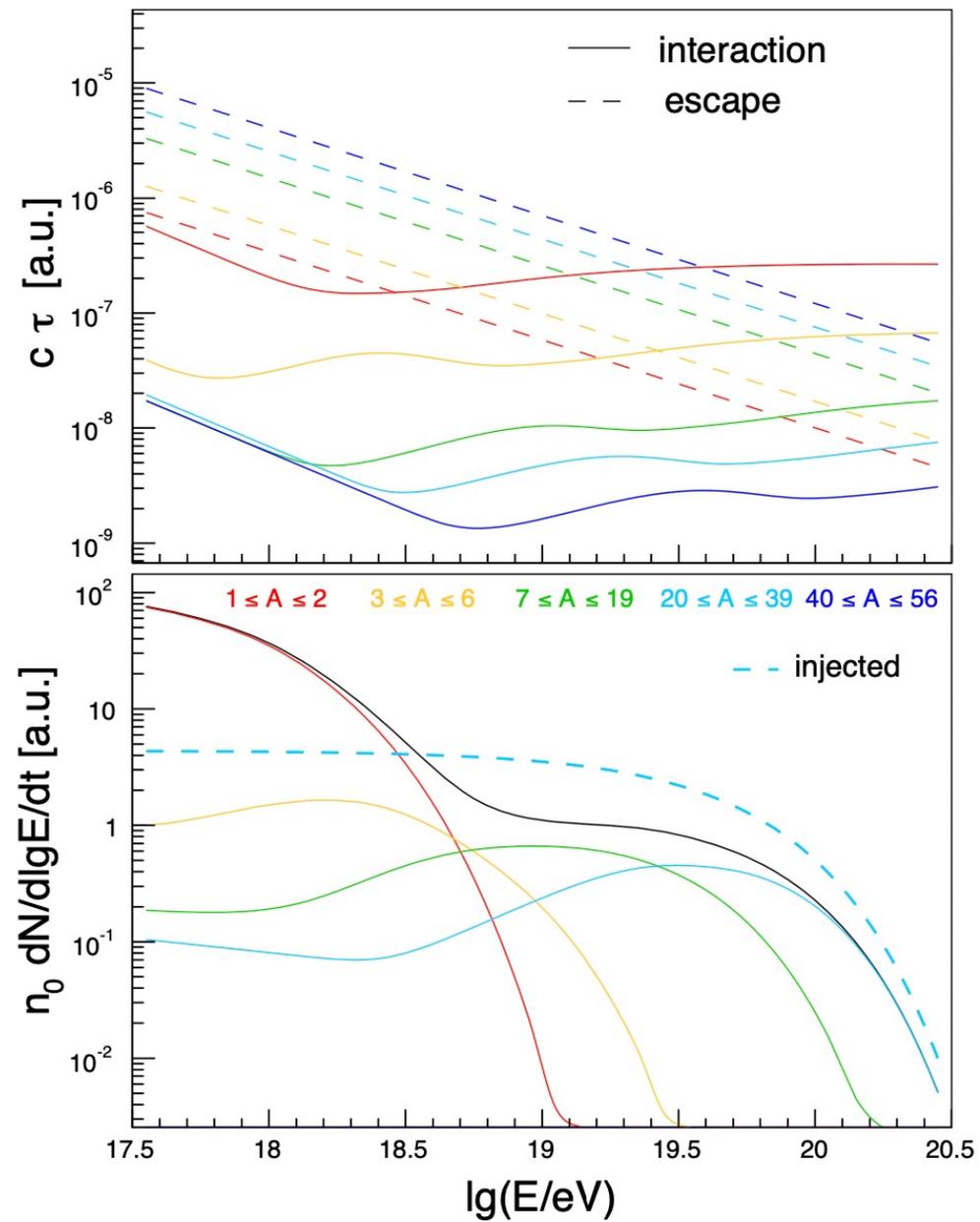
M. Muzio et. al., PRD **109**, 023006 (2024)

Peters cycle に従わない加速はありえるか？

$$\frac{dN(A)}{dE} \propto E^{-\gamma} e^{-E/E_{\max}^A} \quad E_{\max}^A = E_0 Z^\alpha A^\beta$$

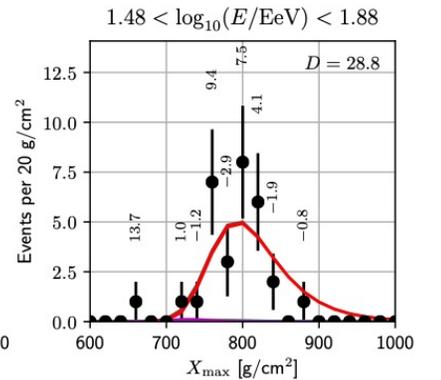
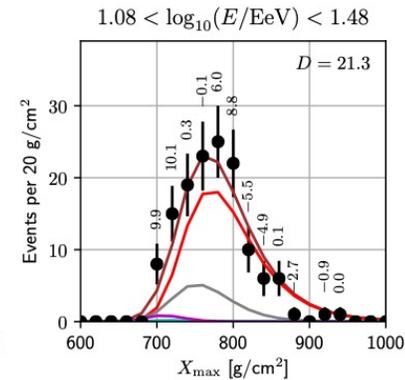
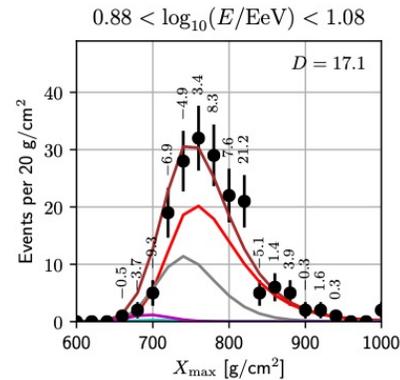
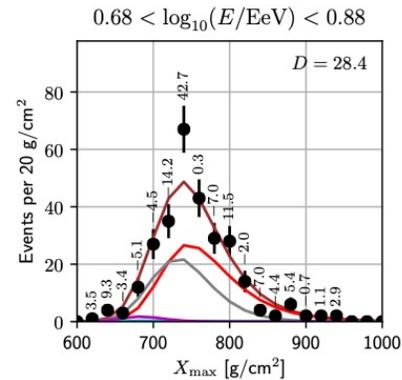
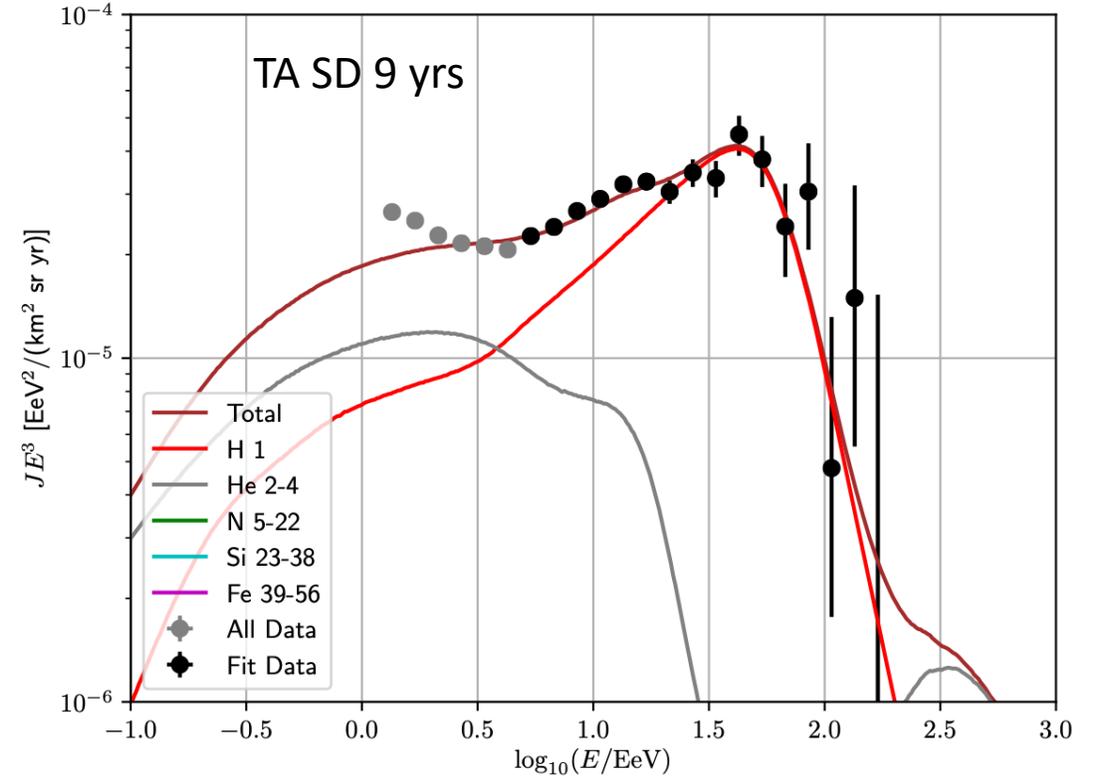
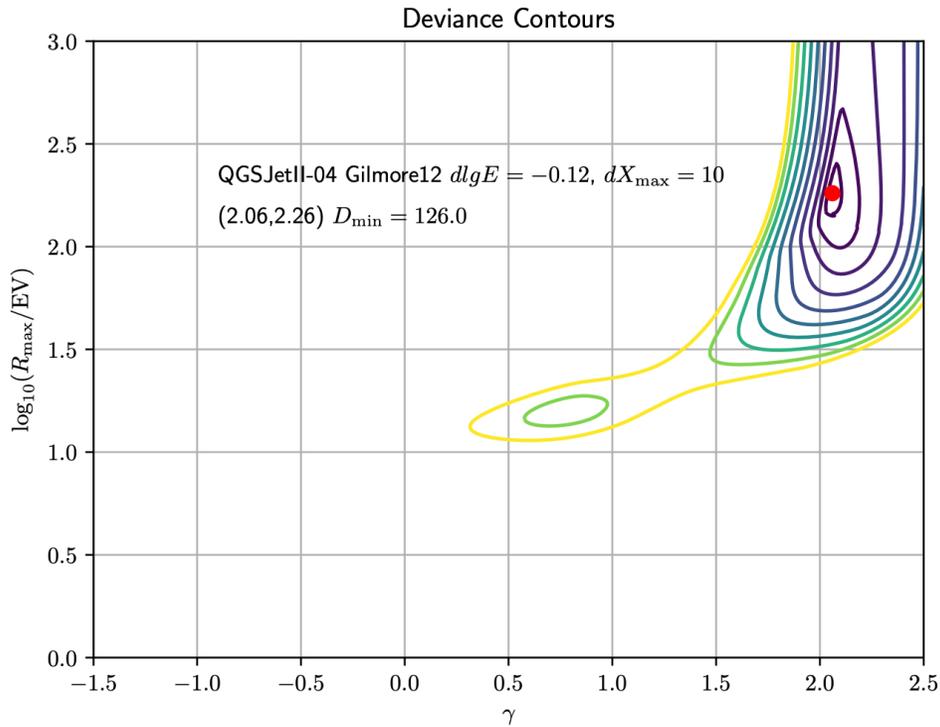


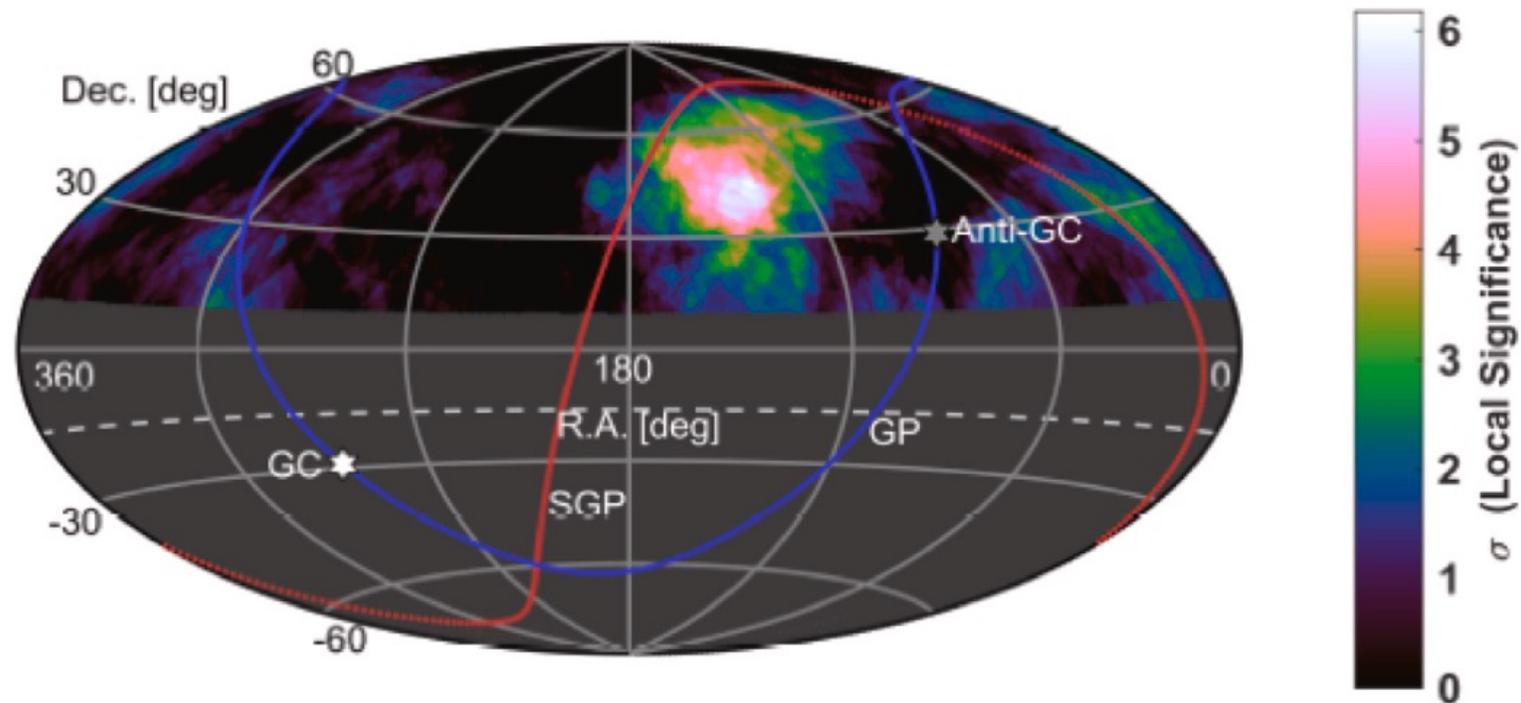
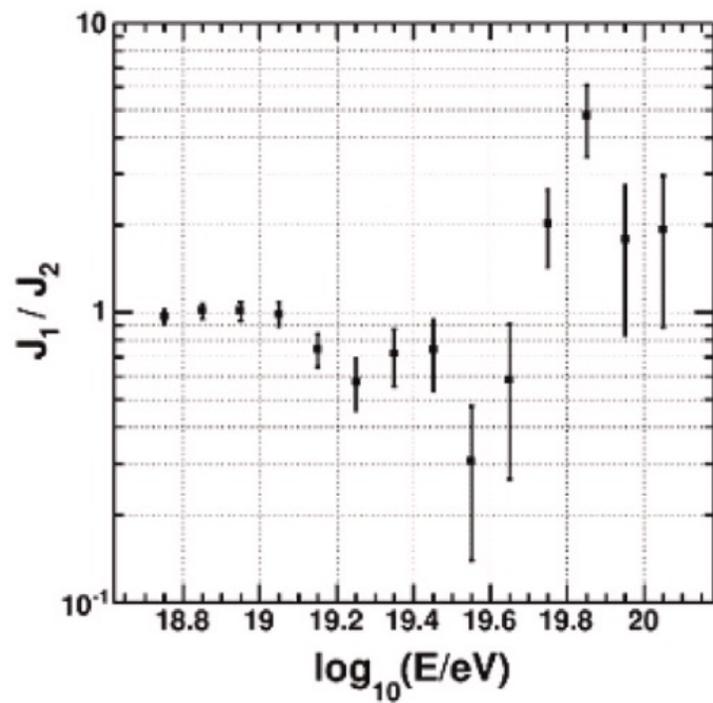
• 現状、Peters cycle と他のモデルを区別できない



# Combined fit of energy spectrum & Xmax

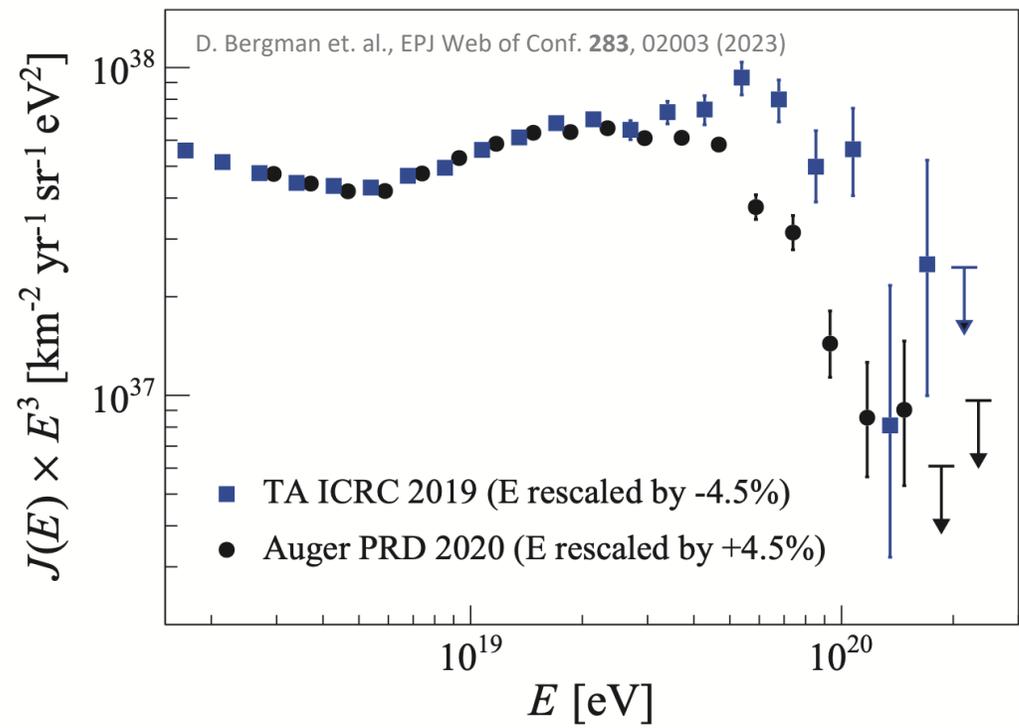
D. Bergman *et al*, PoS ICRC2021, 338 (2021)



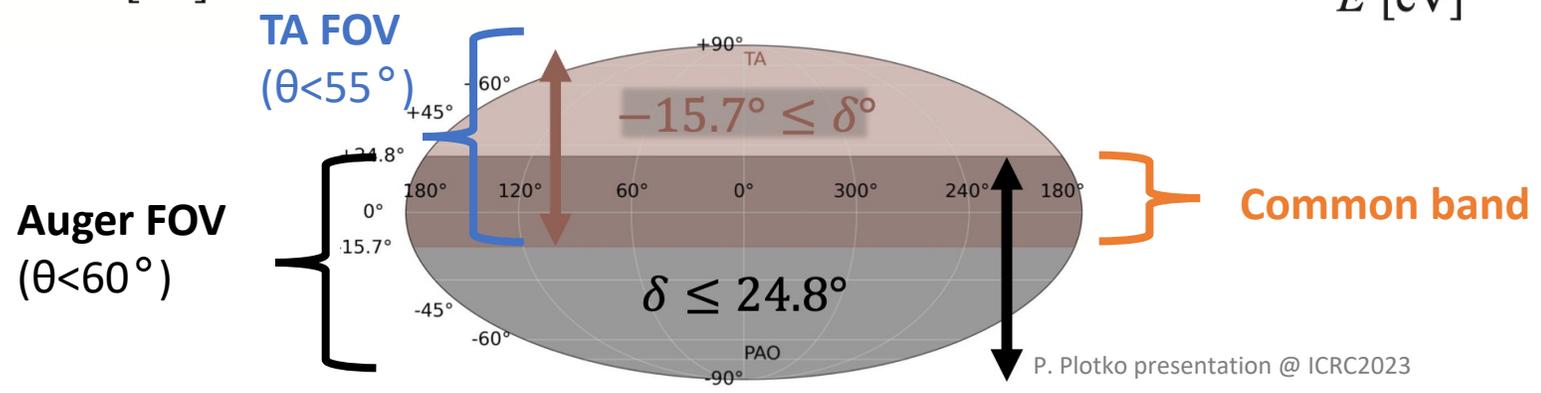
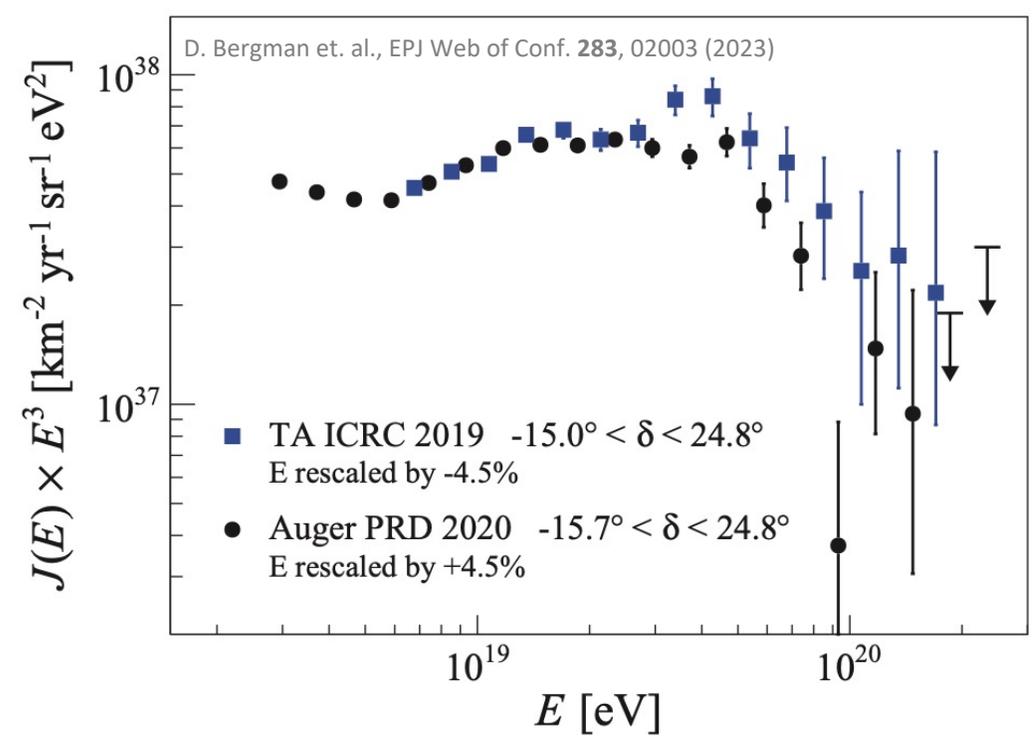


R. U. Abbasi et. al., ApJ 862, 91 (2018)

それぞれの実験の全視野領域



共通視野領域 (common band)



## Energy-independent Shift

No Local Source (1)      With Local Source (2)

## Cosmological Source Distribution

$\gamma_{\text{cosmo}}$	$1.60^{+0.05}_{-0.05}$	$1.60^{+0.05}_{-0.05}$
$R_{\text{cosmo}}^{\text{max}}$ (GV)	$5.0^{+0.3}_{-0.3} \times 10^9$	$5.0^{+0.3}_{-0.3} \times 10^9$
$m_{\text{cosmo}}$	$< -5.4$	$< -5.8$
$I_A^9$ (%)		
H	$0.0^{+17.1}_{-0.0}$	$0.0^{+12.6}_{-0.0}$
He	$6.5^{+9.2}_{-4.0}$	$0.0^{+99.6}_{-0.0}$
N	$75.9^{+1.2}_{-1.2}$	$85.1^{+0.4}_{-0.4}$
Si	$16.8^{+2.5}_{-2.3}$	$14.1^{+2.8}_{-2.4}$
Fe	$0.8^{+1.1}_{-0.5}$	$0.8^{+1.5}_{-0.5}$

## Local Source

silicon-28

$\gamma_{\text{local}}$	$< -1.0$
$R_{\text{local}}^{\text{max}}$ (GV)	$1.3^{+0.2}_{-0.1} \times 10^9$
$L_{\text{local}}^{\text{CR}}$ (erg s <sup>-1</sup> )	$< 3.7 \times 10^{42}$
$D_{\text{local}}$ (Mpc)	$< 25.6$

## Systematics

$\delta_E^{\text{PAO}}$ (%)	$-11.92^{+2.95}_{-0.05}$	$-13.04^{+0.01}_{-0.02}$
$\delta_E^{\text{TA}}$ (%)	$-21.00^{+2.58}_{-0.00}$	$-21.00^{+0.02}_{-0.00}$
$\delta_{(X_{\text{max}})}^{\text{PAO}}$ (%)	$-58^{+15}_{-10}$	$-58^{+14}_{-1}$
$\delta_{(X_{\text{max}})}^{\text{TA}}$ (%)	$3^{+7}_{-5}$	$4^{+7}_{-1}$
$\delta_{\sigma(X_{\text{max}})}^{\text{PAO}}$ (%)	$100^{+0}_{-17}$	$100^{+0}_{-1}$
$\delta_{\sigma(X_{\text{max}})}^{\text{TA}}$ (%)	$-33^{+4}_{-7}$	$-72^{+6}_{-1}$

 $\chi^2/\text{d.o.f.}$       110.6/54      67.8/50 $\Delta \text{AIC}_c$       28.9Favored vis-à-vis null hypothesis (1)       $5.0\sigma$  $(\chi_{\text{spectrum}}^{\text{PAO}})^2$       18.8      15.7 $(\chi_{\text{spectrum}}^{\text{TA}})^2$       55.2      13.4

## Local source of silicon-28 in the Northern Hemisphere, energy-independent shift

