



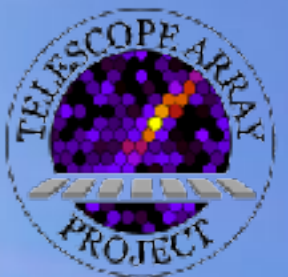
宇宙線望遠鏡による 極高エネルギー宇宙線の研究

荻尾 彰一（東大・宇宙線研）

for the Telescope Array collaboration

Contents:

- Introduction
- 地表検出器アレイによる観測
- FDとSDによるハイブリッド観測結果
- TALE infill : knee領域へ
- その他の研究成果
- Summary



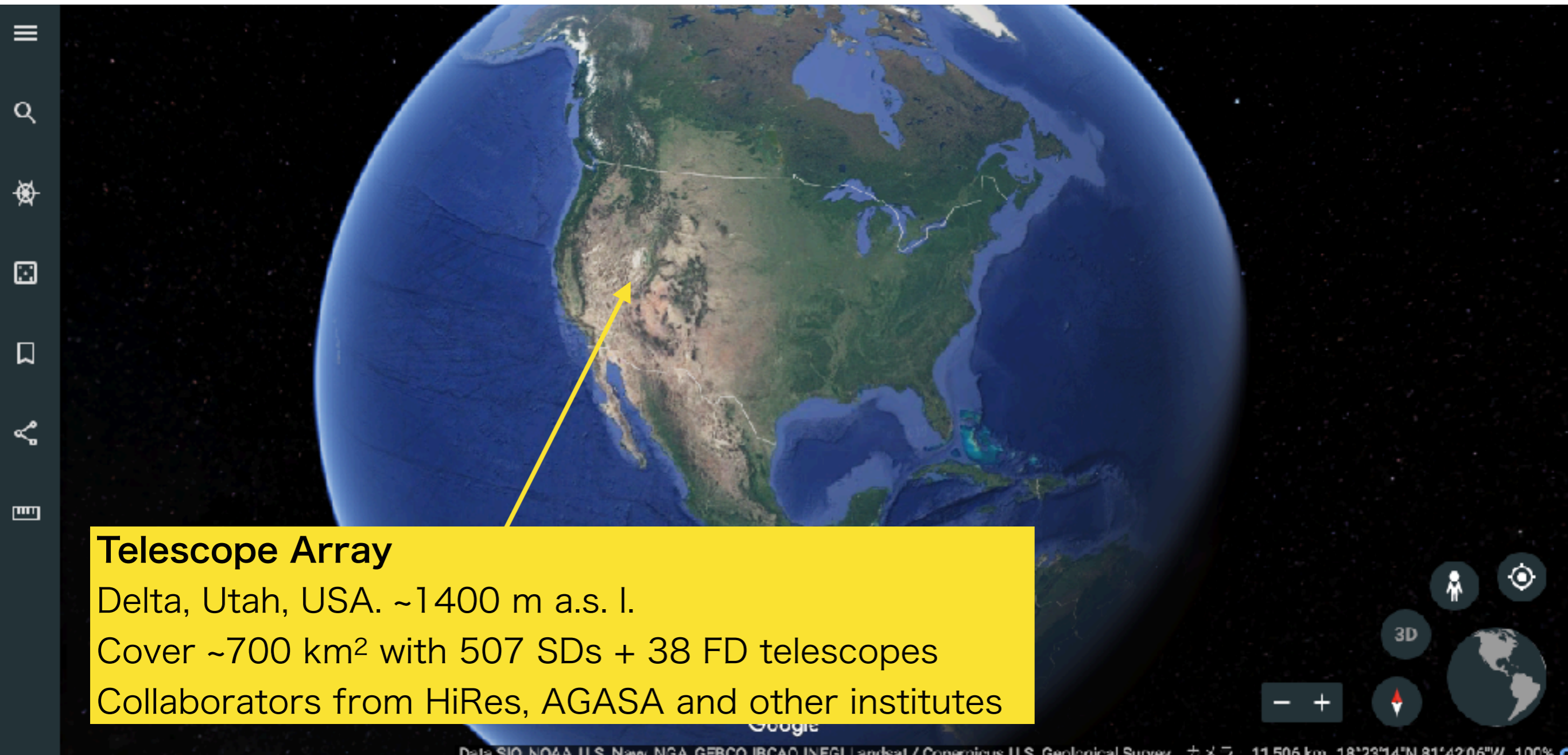
Telescope Array collaboration

150 collaborators from 33 institutes in 9 countries and regions

R.U. Abbasi(1), Y. Abe(2), T. Abu-Zayyad(1,3), M. Allen(3), Y. Arai(4), R. Arimura(4), E. Barcikowski(3), J.W. Belz(3), D.R. Bergman(3), S.A. Blake(3), I. Buckland(3), B.G. Cheon(5), M. Chikawaz(6), A. Fedynitch(6,7), T. Fujii(4,8), K. Fujisue(6), K. Fujita(6), R. Fujiwara(4), M. Fukushima(6), G. Furlich(3), Z. Gerber(3), N. Globus(9), W. Hanlon(3), N. Hayashida(10), H. He(9), R. Hibi(2), K. Hibino(10), R. Higuchi(9), K. Honda(11), D. Ikeda(10), N. Inoue(12), T. Ishii(11), H. Ito(9), D. Ivanov(3), A. Iwasaki(4), H.M. Jeong(13), S. Jeong(13), C.C.H. Jui(3), K. Kadota(14), F. Kakimoto(10), O. Kalashev(15), K. Kasahara(16), S. Kasami(17), Y. Kawachi(4), S. Kawakami(4), K. Kawata(6), I. Kharuk(15), E. Kido(9), H.B. Kim(5), J.H. Kim(3), J.H. Kim(3), S.W. Kim(13), Y. Kimura(4), I. Komae(4), K. Komori(17), Y. Kusumori(17), M. Kuznetsov(15,18), Y.J. Kwon(19), K.H. Lee(5), M.J. Lee(13), B. Lubsandorzhiev(15), J.P. Lundquist(3,20), T. Matsuyama(4), J.A. Matthews(3), J.N. Matthews(3), R. Mayta(4), K. Miyashita(2), K. Mizuno(2), M. Mori(17), M. Murakami(17), I. Myers(3), S. Nagataki(9), M. Nakahara(4), K. Nakai(4), T. Nakamura(21), E. Nishio(17), T. Nonaka(6), S. Ogio(6), H. Ohoka(6), N. Okazaki(6), Y. Oku(17), T. Okuda(22), Y. Omura(4), M. Onishi(6), M. Ono(9), A. Oshima(23), H. Oshima(6), S. Ozawa(24), I.H. Park(13), K.Y. Park(5), M. Potts(3), M. Przybylak(25), M.S. Pshirkov(15,26), J. Remington(3), D.C. Rodriguez(3), C. Rott(3,13), G.I. Rubtsov(15), D. Ryu(27), H. Sagawa(6), R. Saito(2), N. Sakaki(6), T. Sako(6), N. Sakurai(4), D. Sato(2), K. Sato(4), S. Sato(17), K. Sekino(6), P.D. Shah(3), N. Shibata(17), T. Shibata(6), J. Shikita(4), H. Shimodaira(6), B.K. Shin(27), H.S. Shin(4,8), K. Shinozaki(25), D. Shinto(17), J.D. Smith(3), P. Sokolsky(3), B.T. Stokes(3), T.A. Stroman(3), Y. Takagi(17), K. Takahashi(6), M. Takamura(28), M. Takeda(6), R. Takeishi(6), A. Taketa(29), M. Takita(6), Y. Tameda(17), K. Tanaka(30), M. Tanaka(31), S.B. Thomas(3), G.B. Thomson(3), P. Tinyakov(15,18), I. Tkachev(15), H. Tokuno(32), T. Tomida(2), S. Troitsky(15), R. Tsuda(4), Y. Tsunesada(4,8), S. Udo(10), F. Urban(33), I.A. Vaiman(15), M. Vrabel(25), D. Warren(9), T. Wong(3), K. Yamazaki(23), K. Yashiro(28), F. Yoshida(17), Y. Zhezher(6,15), and Z. Zundel(3)

(1)Department of Physics, Loyola University Chicago, Chicago, Illinois 60660, USA, (2)Academic Assembly School of Science and Technology Institute of Engineering, Shinshu University, Nagano, Nagano 380-8554, Japan, (3)High Energy Astrophysics Institute and Department of Physics and Astronomy, University of Utah, Salt Lake City, Utah 84112-0830, USA, (4)Graduate School of Science, Osaka Metropolitan University, Sugimoto, Sumiyoshi, Osaka 558-8585, Japan, (5)Department of Physics and The Research Institute of Natural Science, Hanyang University, Seongdong-gu, Seoul 426-791, Korea, (6)Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan, (7)Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei City 115201, Taiwan, (8)Nambu Yoichiro Institute of Theoretical and Experimental Physics, Osaka Metropolitan University, Sugimoto, Sumiyoshi, Osaka 558-8585, Japan, (9)Astrophysical Big Bang Laboratory, RIKEN, Wako, Saitama 351-0198, Japan, (10)Faculty of Engineering, Kanagawa University, Yokohama, Kanagawa 221-8686, Japan, (11)Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, University of Yamanashi, Kofu, Yamanashi 400-8511, Japan, (12)The Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, Saitama, Saitama 338-8570, Japan, (13)Department of Physics, SungKyunKwan University, Jang-an-gu, Suwon 16419, Korea, (14)Department of Physics, Tokyo City University, Setagaya-ku, Tokyo 158-8557, Japan, (15)Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow 117312, Russia, (16)Faculty of Systems Engineering and Science, Shibaura Institute of Technology, Minato-ku, Tokyo 337-8570, Japan, (17)Graduate School of Engineering, Osaka Electro-Communication University, Neyagawa-shi, Osaka 572-8530, Japan, (18)Service de Physique Th´eorique, Universit´e Libre de Bruxelles, Brussels 1050, Belgium, (19)Department of Physics, Yonsei University, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea, (20)Center for Astrophysics and Cosmology, University of Nova Gorica, Nova Gorica 5297, Slovenia, (21)Faculty of Science, Kochi University, Kochi, Kochi 780-8520, Japan, (22)Department of Physical Sciences, Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan, (23)College of Science and Engineering, Chubu University, Kasugai, Aichi 487-8501, Japan, (24)Quantum ICT Advanced Development Center, National Institute for Information and Communications Technology, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan, (25)Astrophysics Division, National Centre for Nuclear Research, Warsaw 02-093, Poland, (26)Sternberg Astronomical Institute, Moscow M.V. Lomonosov State University, Moscow 119991, Russia, (27)Department of Physics, School of Natural Sciences, Ulsan National Institute of Science and Technology, UNIST-gil, Ulsan 689-798, Korea, (28)Department of Physics, Tokyo University of Science, Noda, Chiba 162-8601, Japan, (29)Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 277-8582, Japan, (30)Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University, Hiroshima, Hiroshima 731-3194, Japan, (31)Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan, (32)Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Meguro, Tokyo 152-8550, Japan, (33)CEICO, Institute of Physics, Czech Academy of Sciences, Prague 182 21, Czech Republic

Telescope Array: The largest cosmic ray observatory in the northern hemisphere



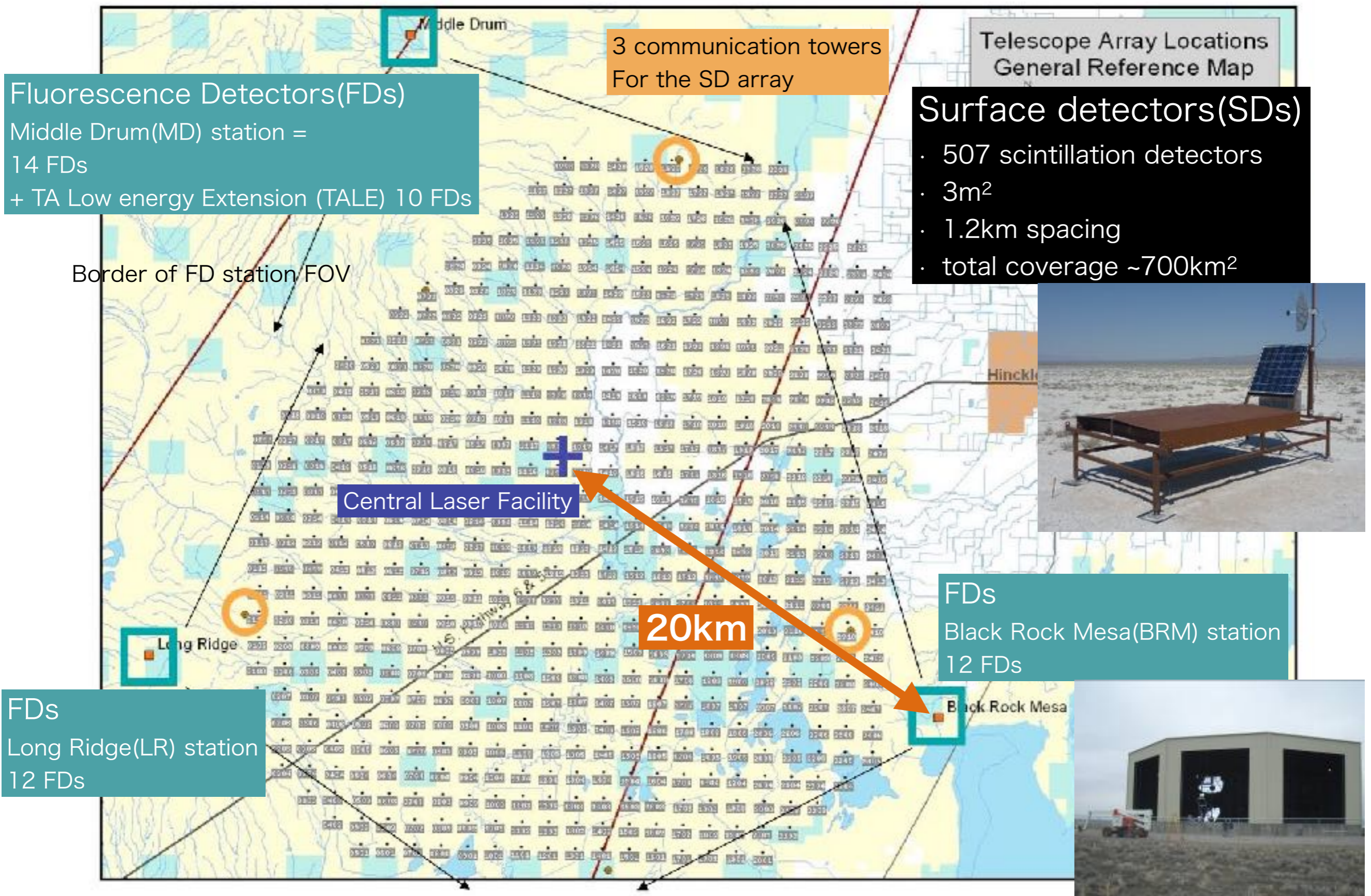
Telescope Array

Delta, Utah, USA. ~1400 m a.s. l.

Cover ~700 km² with 507 SDs + 38 FD telescopes

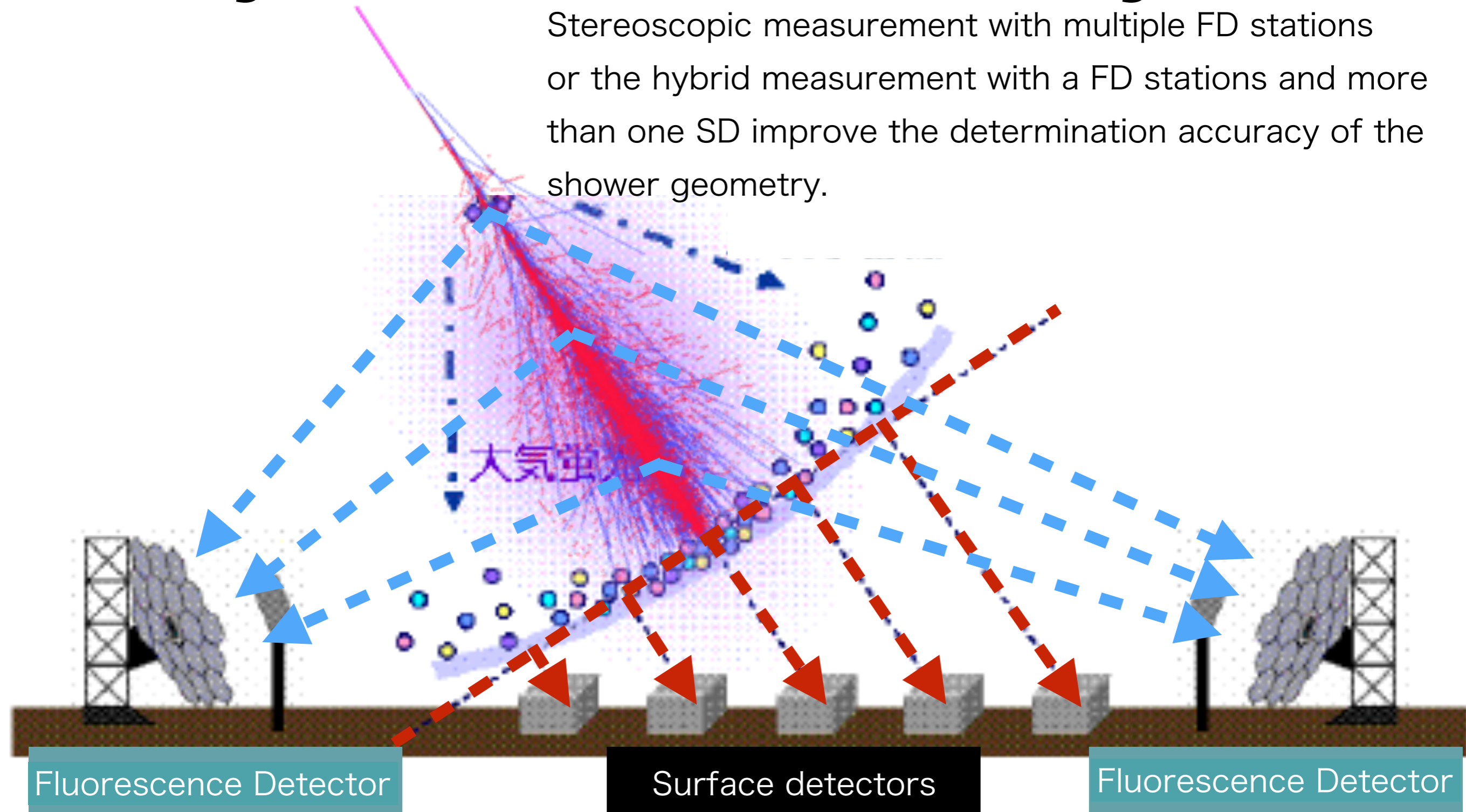
Collaborators from HiRes, AGASA and other institutes

Map of the original TA



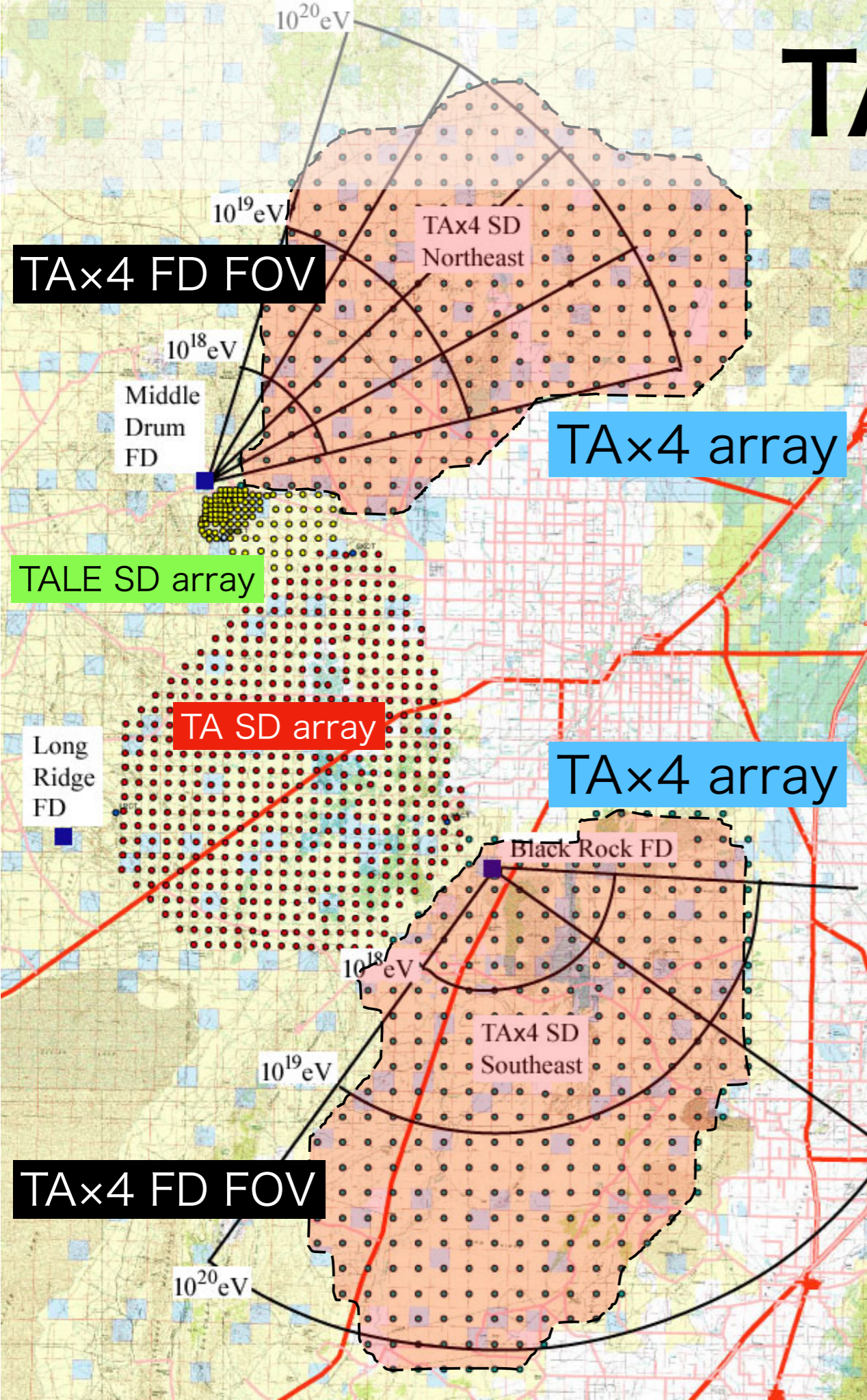
Key feature: Stereo-Hybrid

Stereoscopic measurement with multiple FD stations or the hybrid measurement with a FD stations and more than one SD improve the determination accuracy of the shower geometry.



The determination accuracy on the primary energy and the depth of maximum shower development are also improved.

TA×4



最高エネルギー領域での統計量増が喫緊の課題

- エネルギースペクトル異方性
- 到来方向異方性（大規模、中規模）
- 化学組成測定（FDも必要！）



TA実験：700 km² → TA×4実験：3,000 km²

SDアレイの拡張

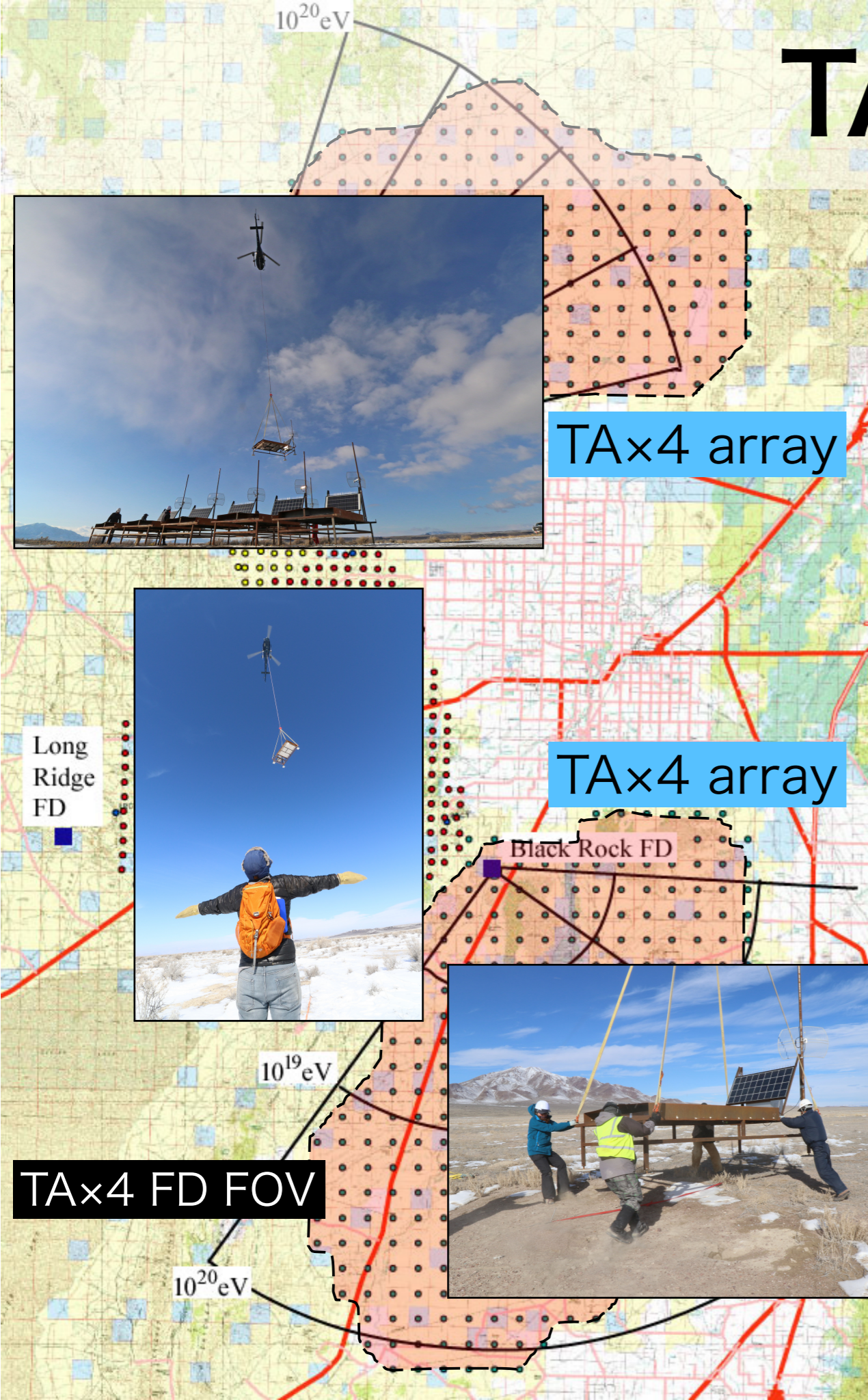
2 km間隔で500台追加設置

FDによるハイブリッド観測

北サイト：4台

南サイト：8台

TAx4



TAx4 north
130 SDs



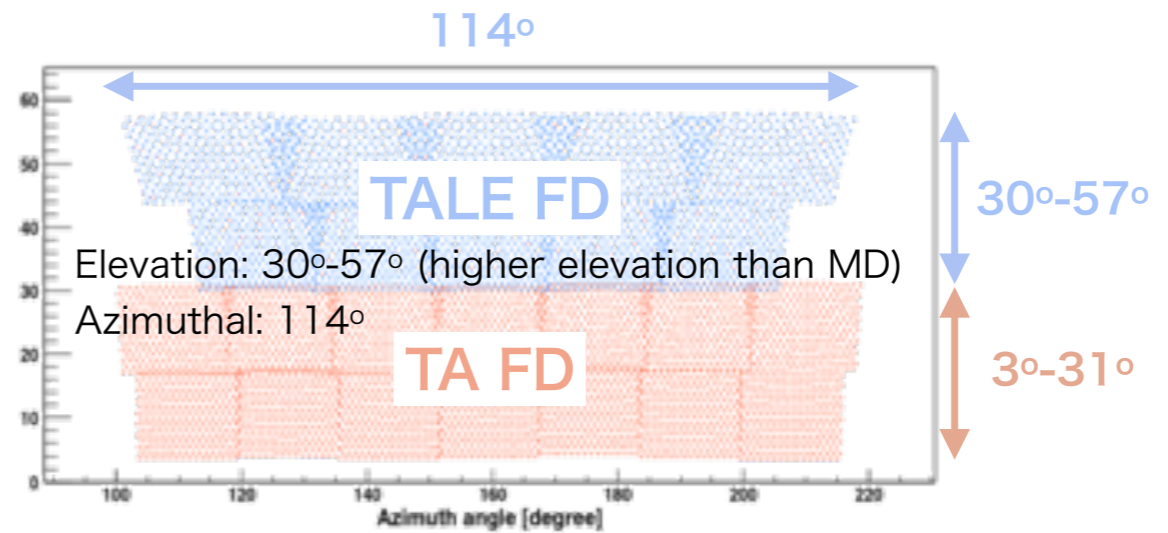
2019年に
SD : 257台 + FD : 12台
が設置完了、運用開始

TAx4 south
127 SDs

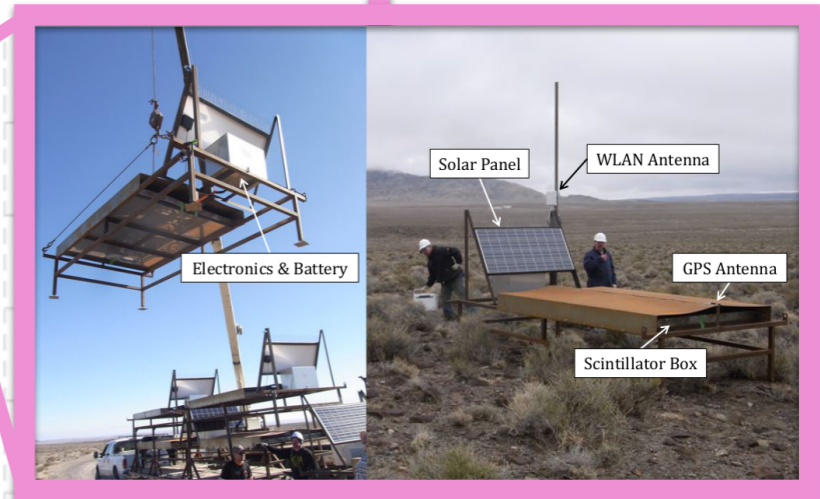
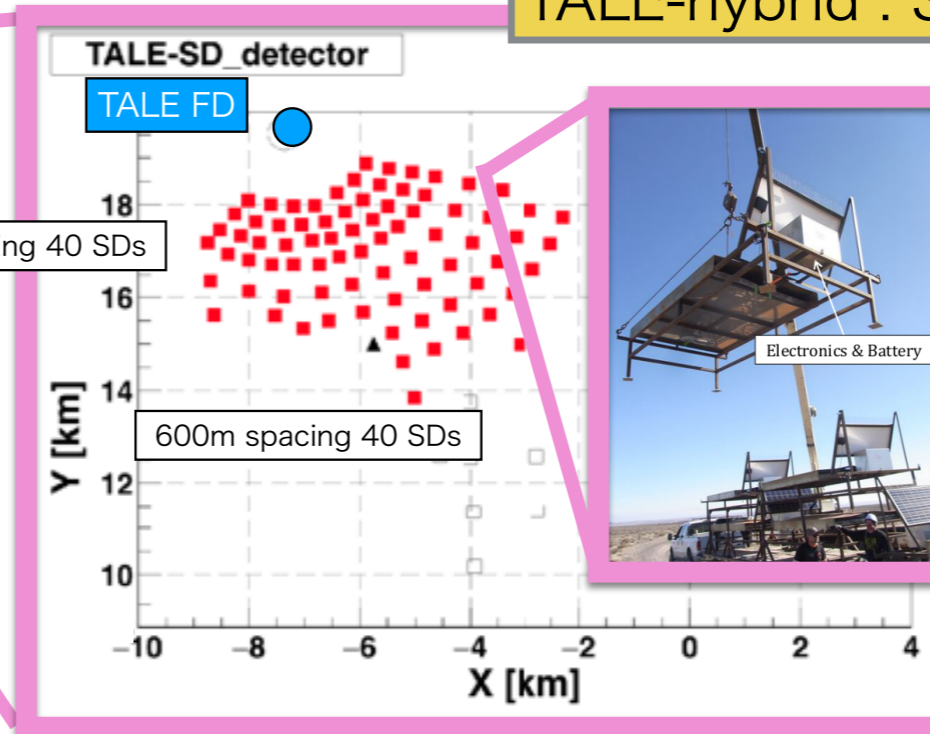
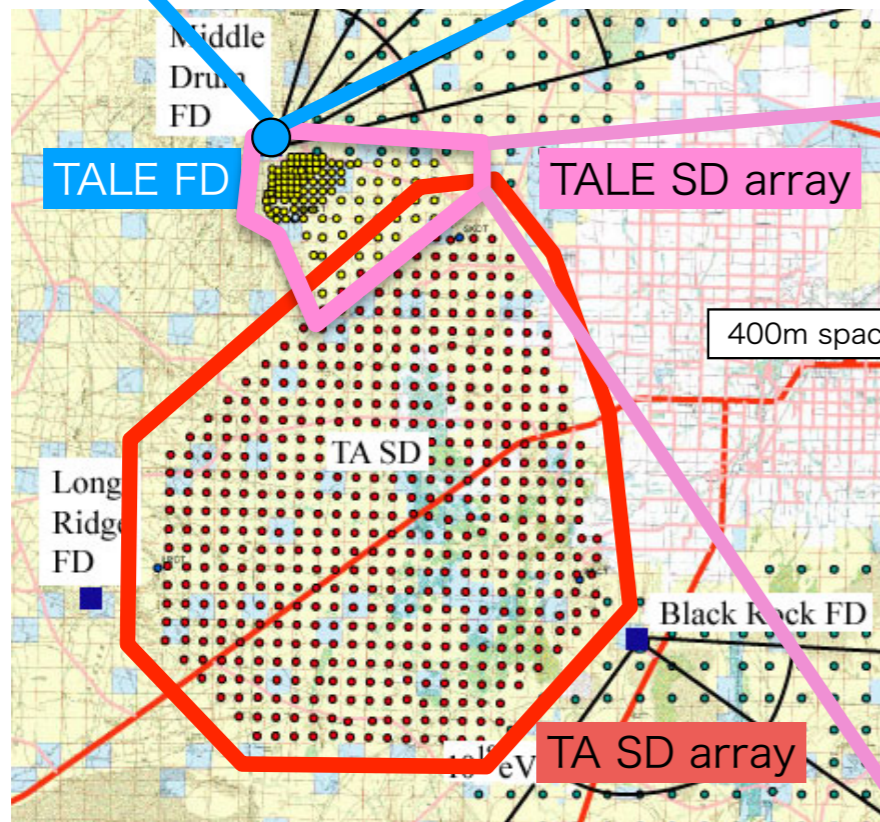


TAx4 FD FOV

TA Low energy Extension (TALE)



TALE-FD : Sep. 2013 ~
 TALE-SD array : Feb. 2018 ~
 TALE-hybrid : Sep. 2018 ~



TA実験関連 共同利用費まとめ

代表者	金額	課題名	
C2野中敏幸 (ICRR)	290,000	TA実験サイトでの超高エネルギー宇宙線観測のための多チャンネル粒子弁別測定システムの開発	
F1荻尾彰一 (ICRR)	1,500,000	宇宙線望遠鏡による超高エネルギー宇宙線の研究+新任500,000円	
F2有働慈治 (神奈川大)	300,000	TA実験サイトにおける大気透明度測定法の研究・開発	
F03荻尾彰一 (ICRR)	450,000	TALEハイブリッド実験による10の17乗eV領域宇宙線の研究	
F04富田孝幸 (信州大)	200,000	ドローンに搭載された標準光源による大気蛍光望遠鏡の光学特性の評価	
F5山崎勝也 (中部大)	300,000	大気蛍光望遠鏡の自動観測を目指した夜間雲量測定用CCDカメラの開発と解析	
F6藤井俊博 (大阪公大)	700,000	TA実験サイトでの新型大気蛍光望遠鏡による超高エネルギー宇宙線観測+新任500,000円	別講演
F7多米田裕一郎 (大阪電通大)	500,000	次世代の超高エネルギー宇宙線観測のためのフレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡の開発研究	
F25富田孝幸 (信州大)	0	「コズミック・レイ」を一般語にしよう計画 (ヴァーチャルリアリティー技術の応用)	
F26木戸英治 (理研)	300,000	TAx4実験用地表検出器拡張のためのデータ収集システムの開発	
F30樋口諒 (理研)	40,000	銀河磁場モデル・質量組成モデルに基づく最高エネルギー宇宙線起源探査	別講演
合計	4,580,000	(新任承継教員2名分1,000,000円含む)	

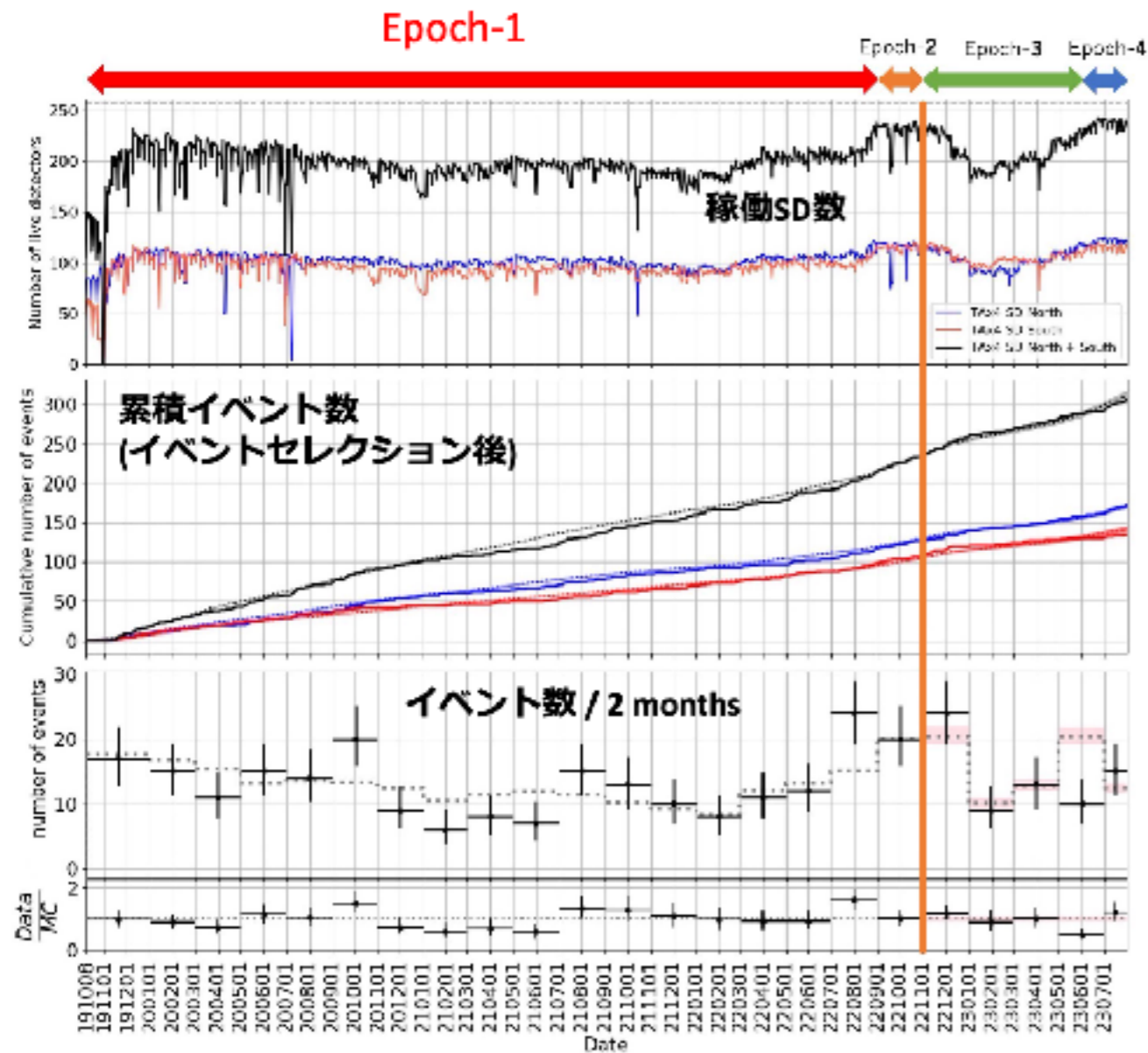
国際共同利用についてはJ. N. Matthews氏が発表

地表検出器アレイによる観測

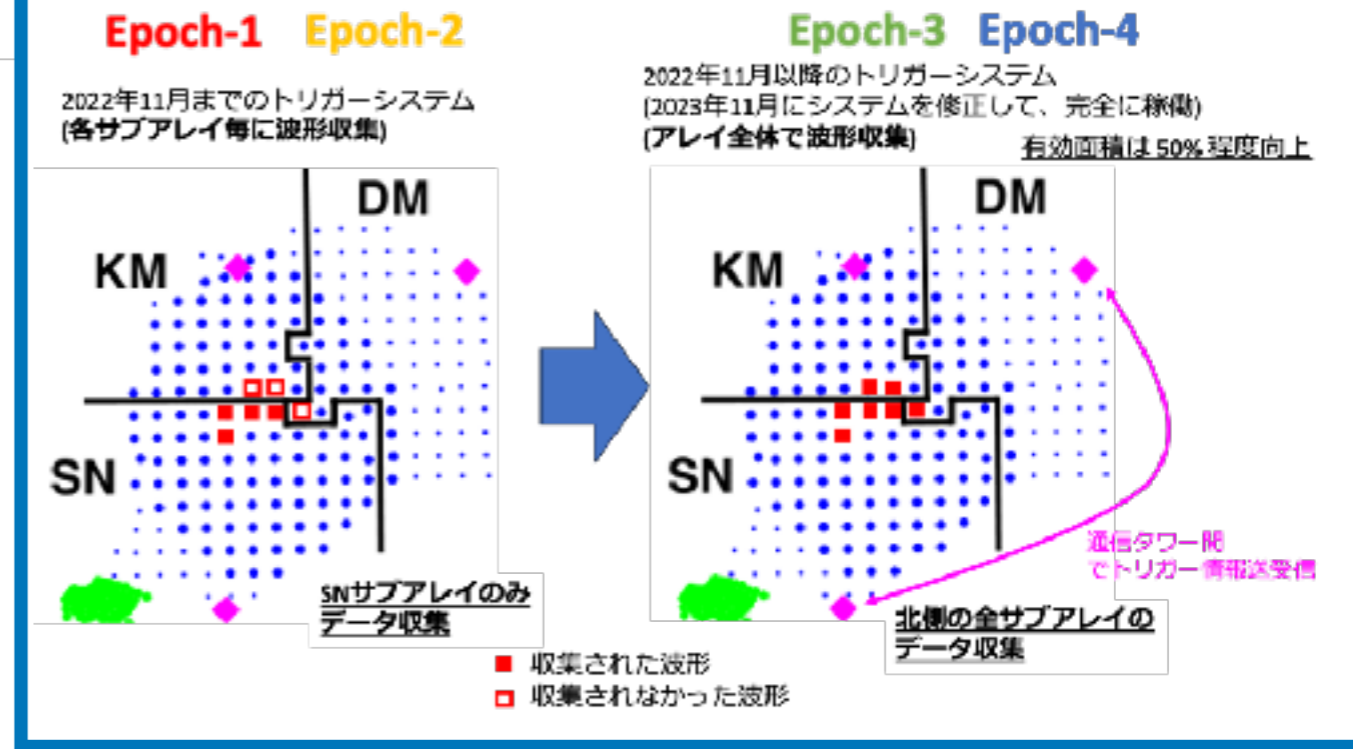


TA×4 SD エネルギースペクトル

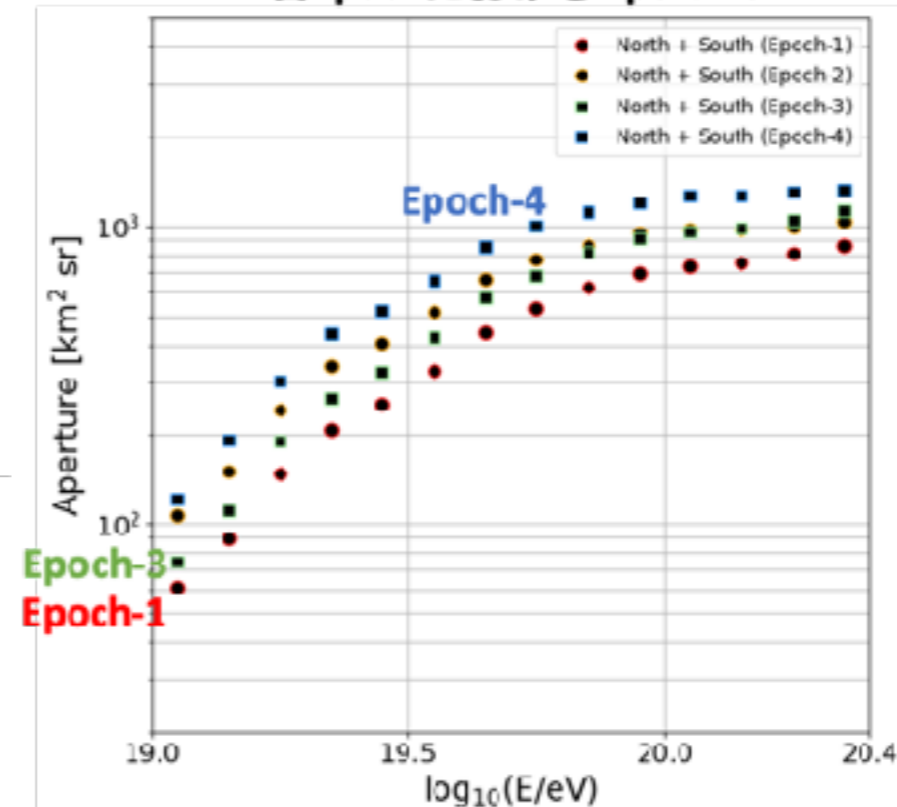
2019年10月より定常観測を継続
2022年8月に大規模改修



2022年11月にトリガー系を改良

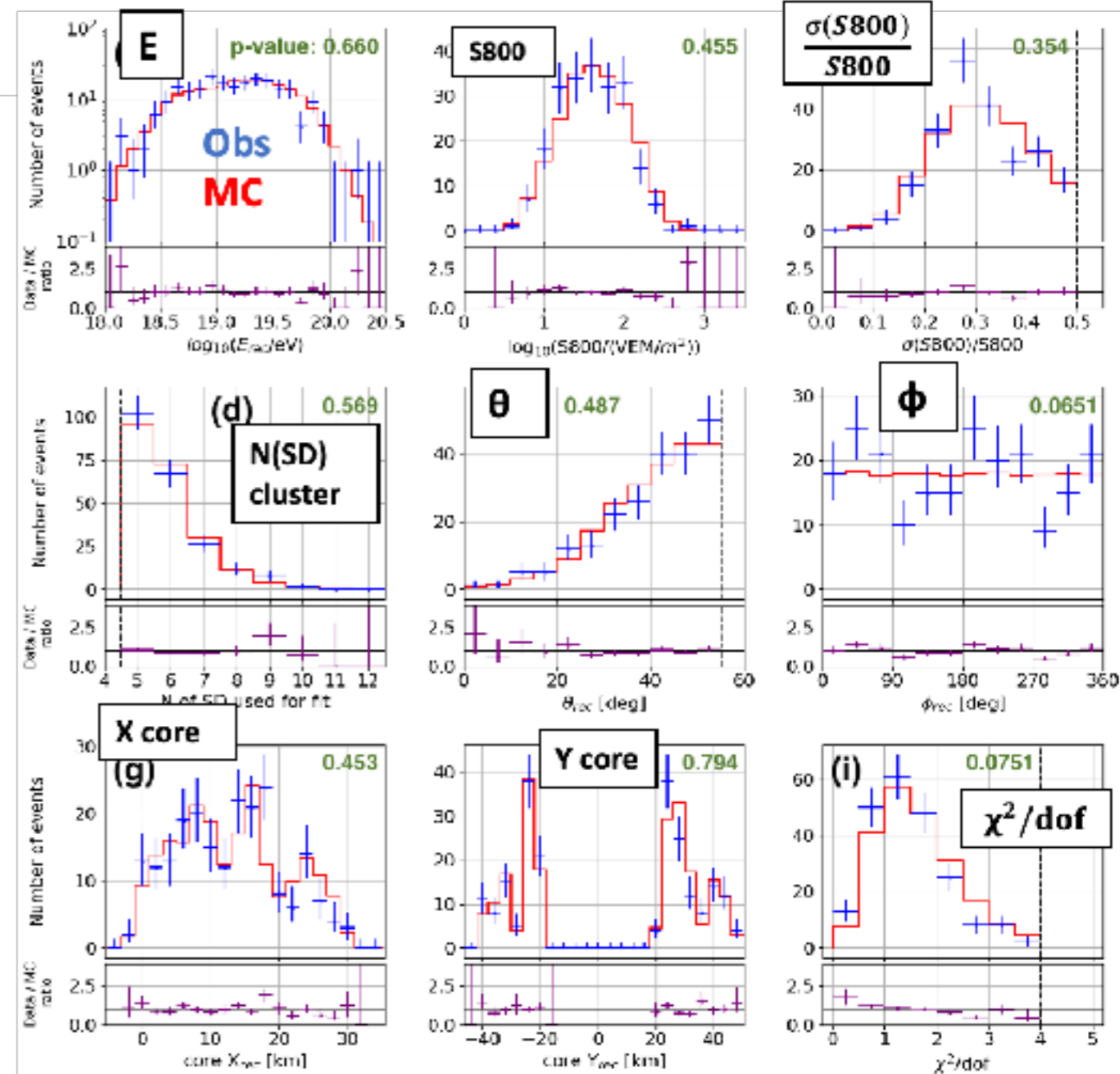
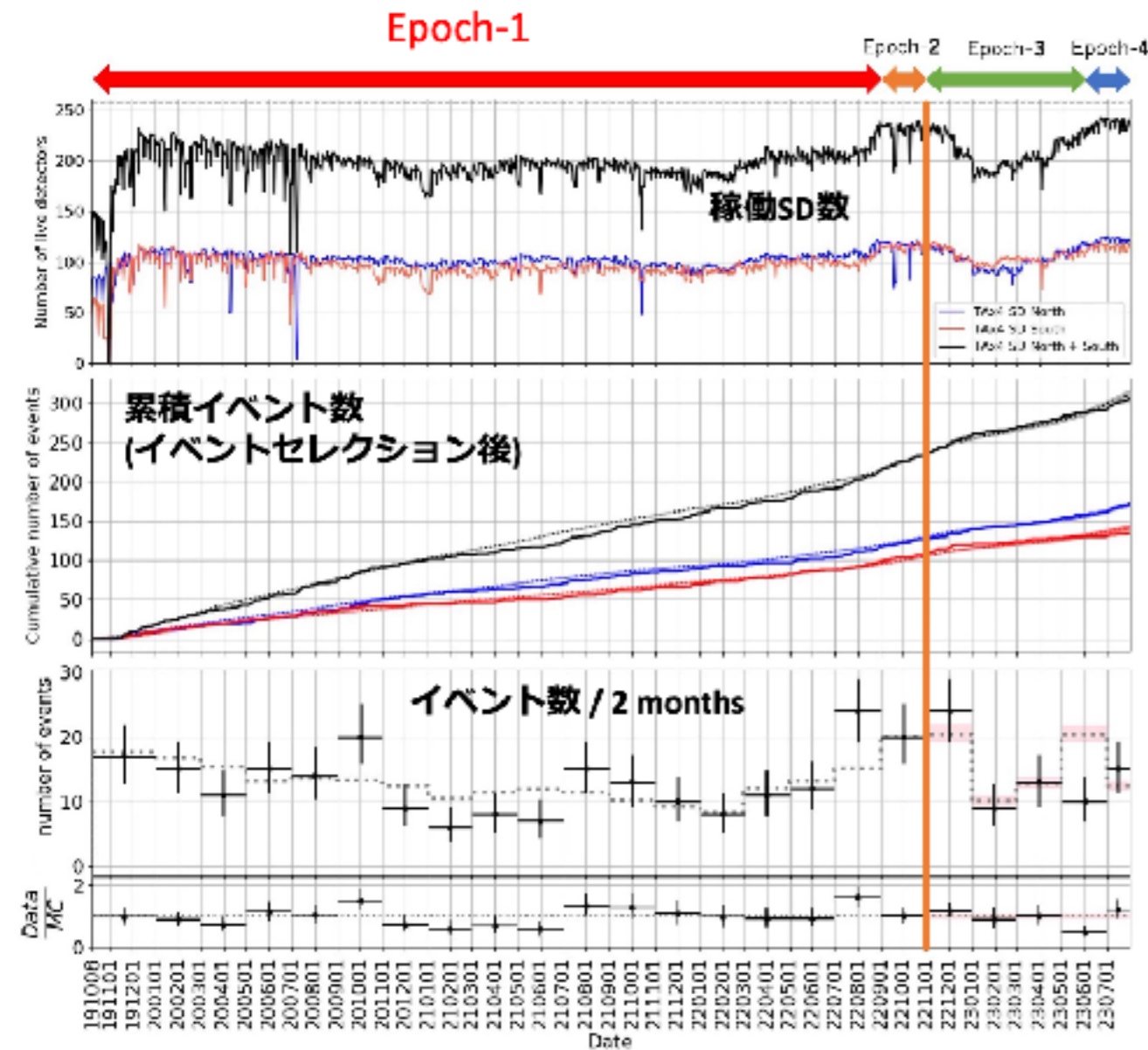


各EpochにおけるAperture



TA×4 SD エネルギースペクトル

稼働率、トリガーシステム毎に比較: Epoch-1

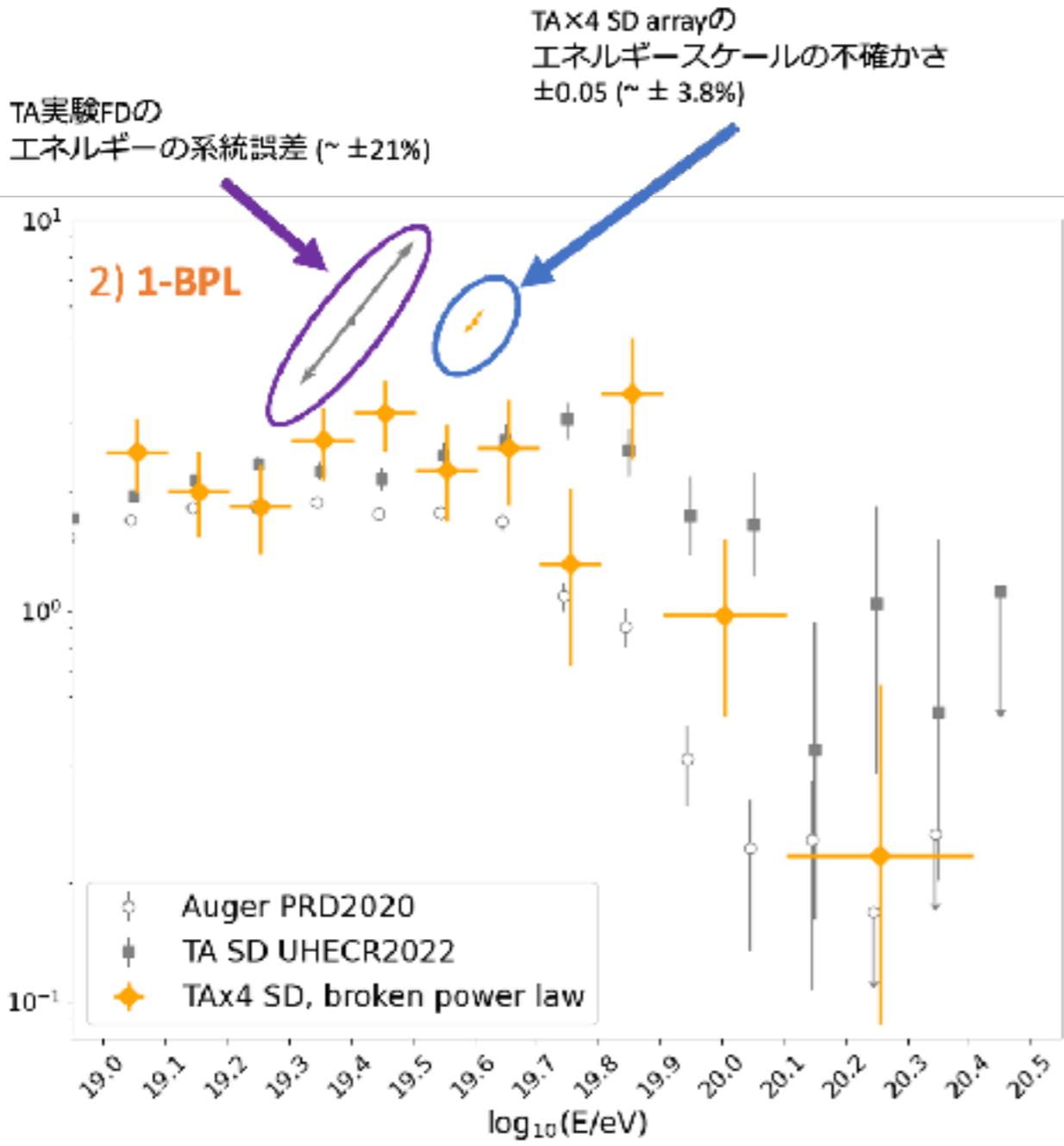


エネルギースケール決定, および以降の解析で用いるイベント選択条件

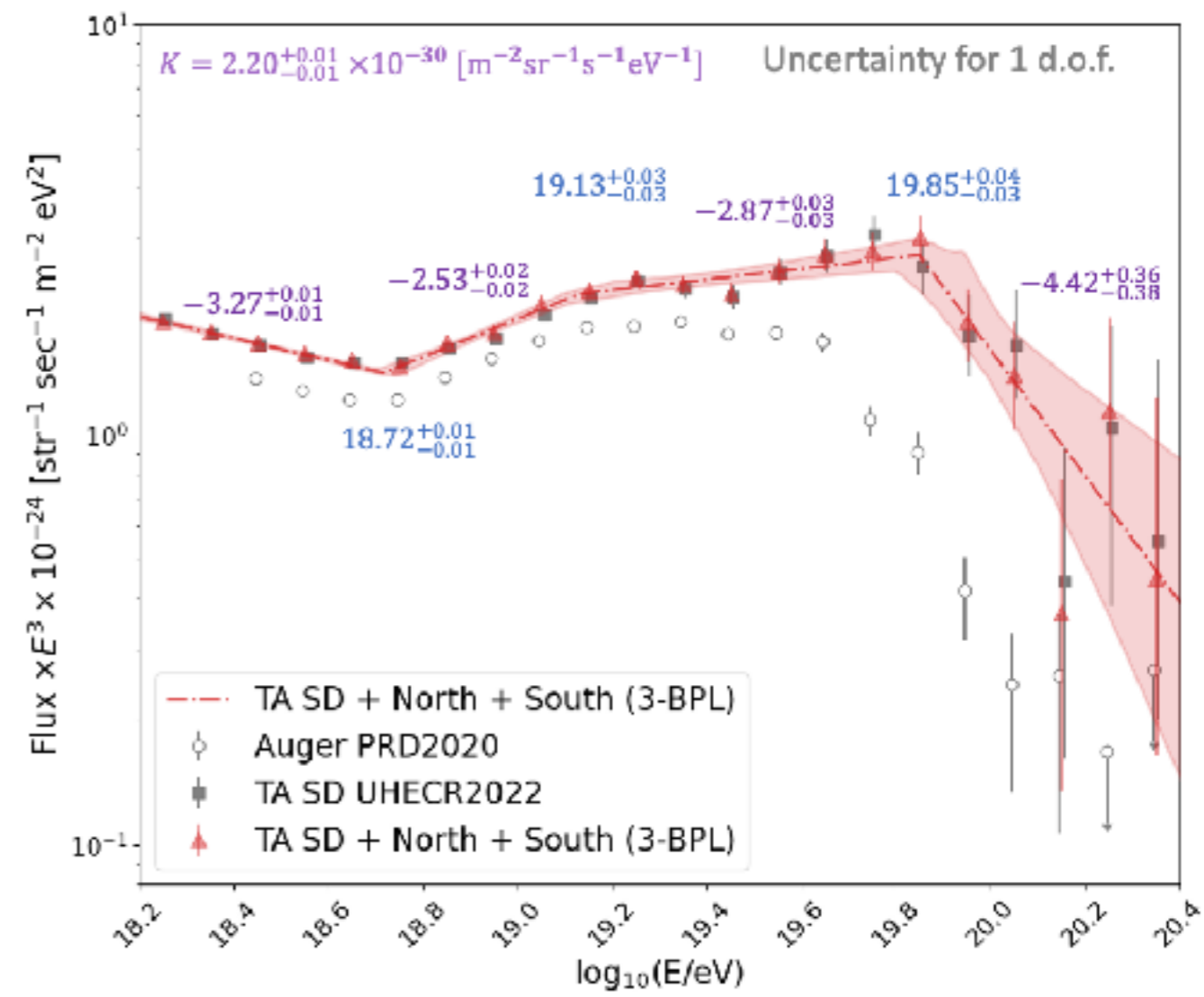
- N_{SD} (フィットに使われたSD数) ≥ 5
- 再構成フィットの $\chi^2/ndof \leq 4$
- σ_{dir} (到来方向の不確かさ) $\leq 6^\circ$
- $\sigma_{s800}/S800 \leq 0.5$
- D_{border} (アレイの端からの距離) ≥ 400 m
- 天頂角 $\theta \leq 55^\circ$

TA×4 SD エネルギースペクトル

2019年10月から2022年10月までの
3年間のデータ (Epoch-1, 2)

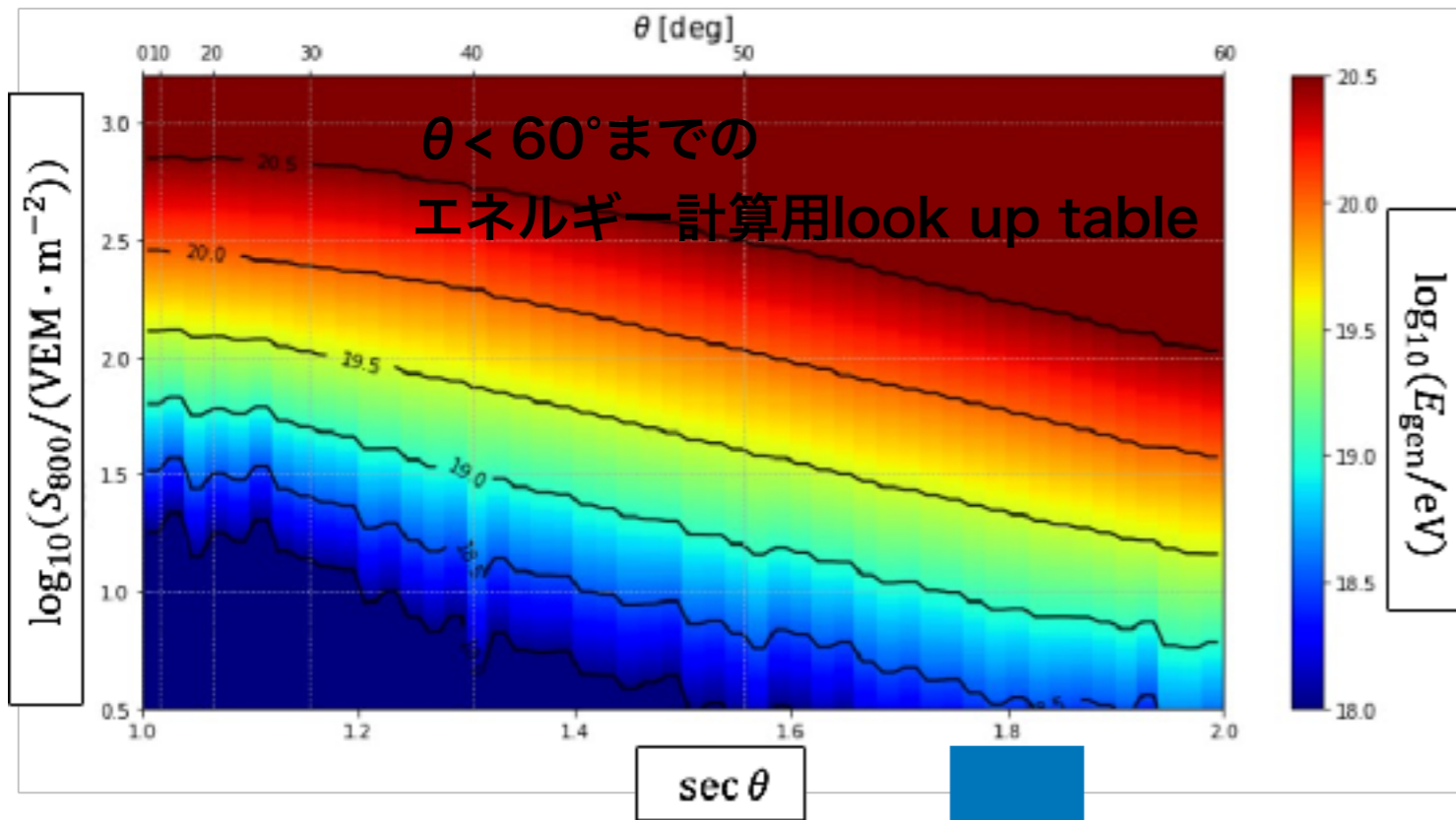


TA×4 SD (3yrs) Epoch-1 + Epoch-2



TA×4 SD (3yrs) + TA SD (14 yrs)

TA×4 SD 大天頂角事象再構成

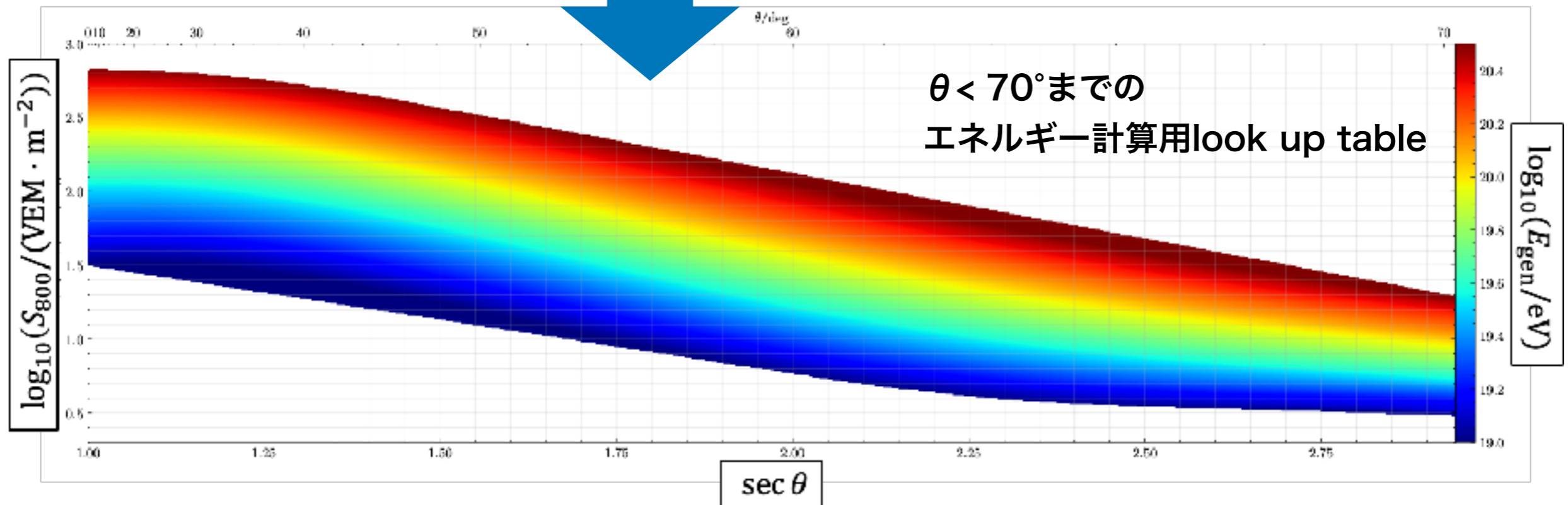


現在のイベント選別条件： $\theta < 55^\circ$



解析可能範囲を大天頂角に拡大し、

- 統計量を増やす
- Augerとの共通視野領域を増やす



TA×4 SD 大天頂角事象再構成

Data

- Period : Oct. 2019 – Oct. 2023

MC dataset

- Primary : pure **proton**
- Interaction model : QGSJETII-04
- Thrown zenith angle : $0^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$

Selection criteria

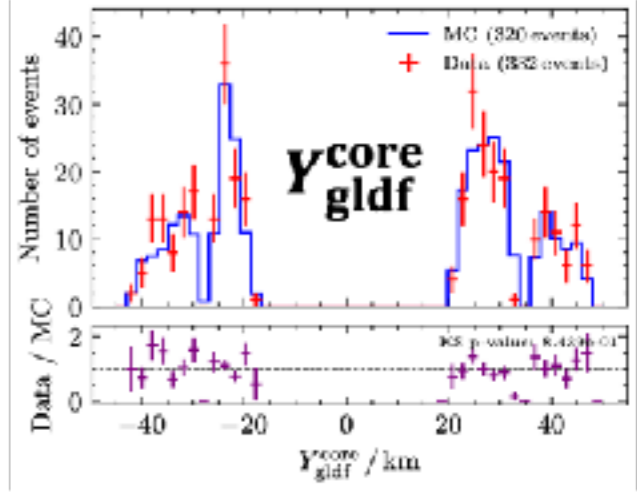
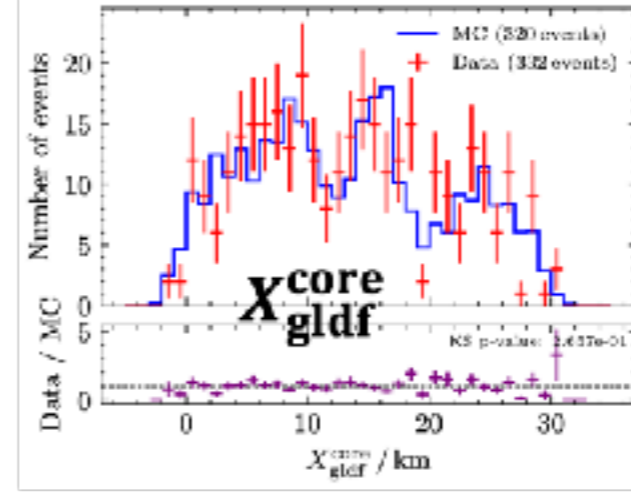
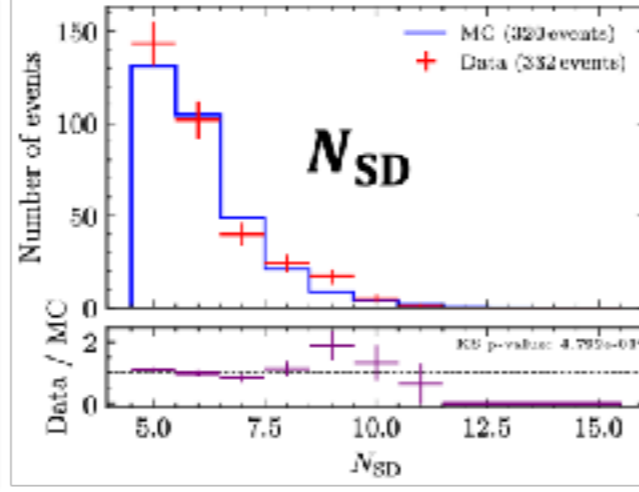
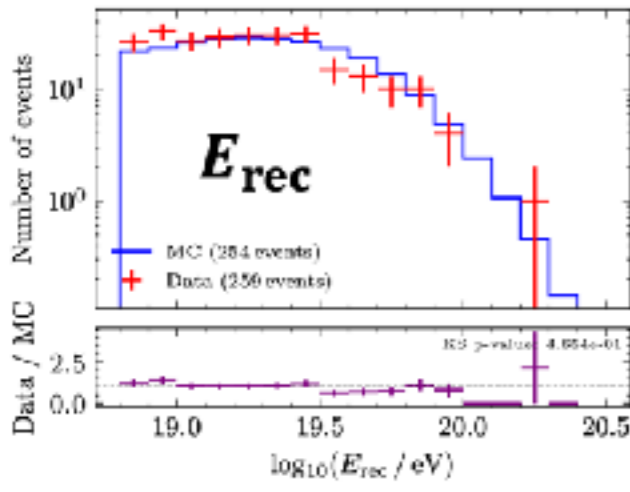
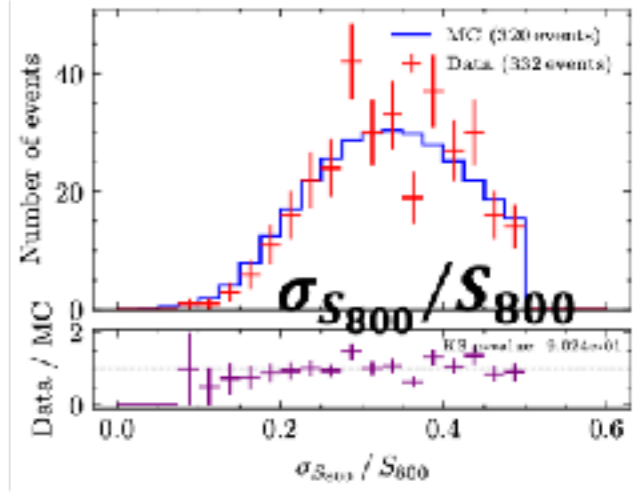
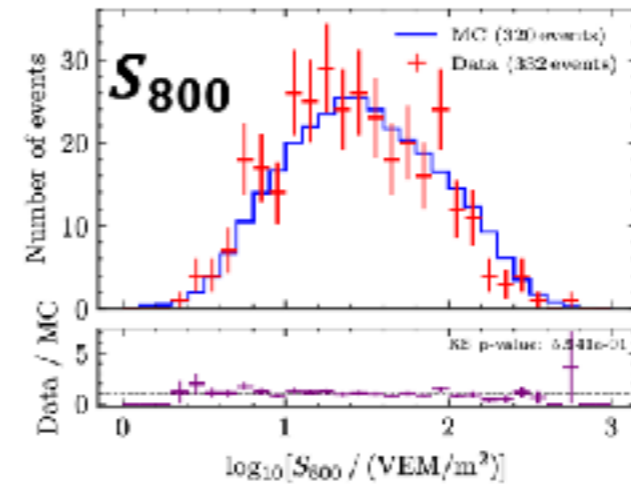
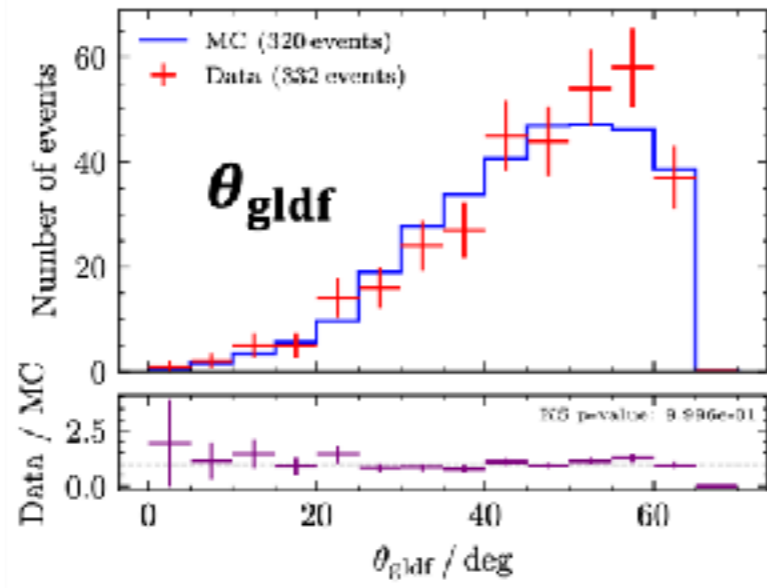
- $N_{SD} \geq 5$
- $0^\circ \leq \theta \leq 65^\circ$
- reduced $\chi^2 \leq 4$
- $\sigma_{S800} / S_{800} \leq 0.5$
- $\sigma_{\text{point direc.}} \leq 6^\circ$
- $D_{\text{border}} \geq 400 \text{ m}$

現在のイベント選別条件 : $\theta < 55^\circ$



解析可能範囲を大天頂角に拡大し、

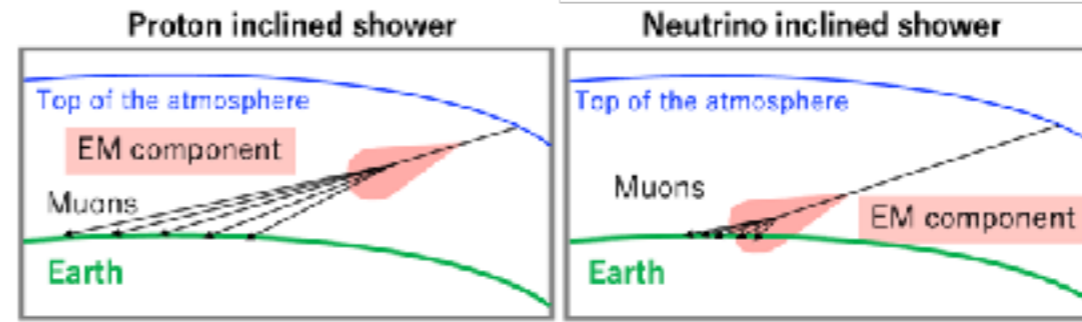
- 統計量を増やす
- Augerとの共通視野領域を増やす



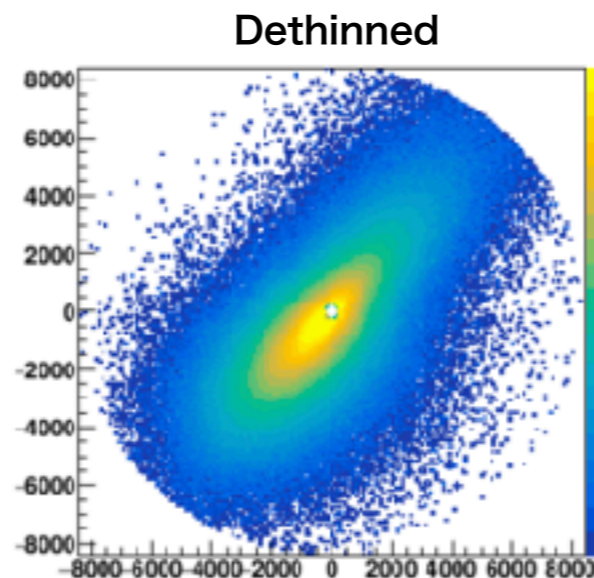
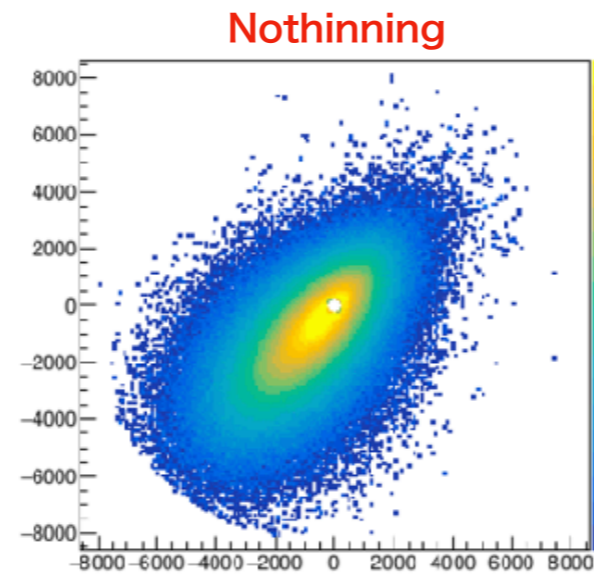
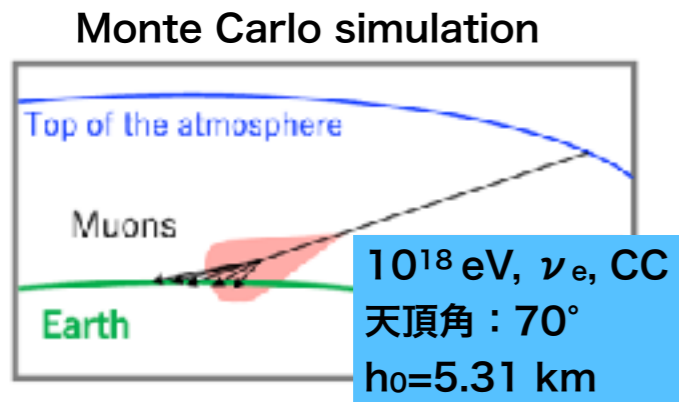
TA SD 大天頂角ニュートリノ事象

ニュートリノ事象

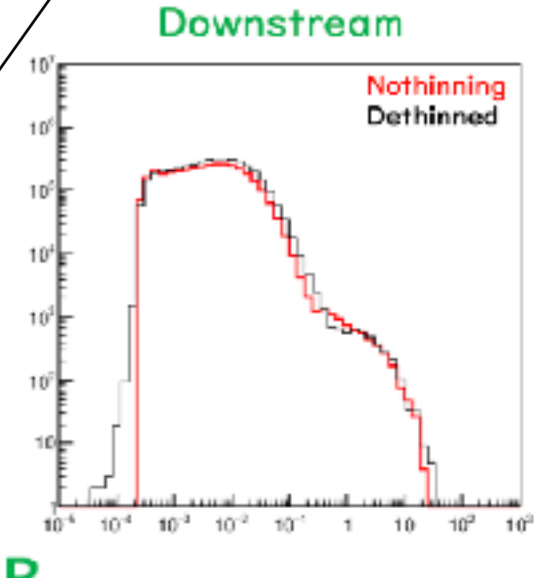
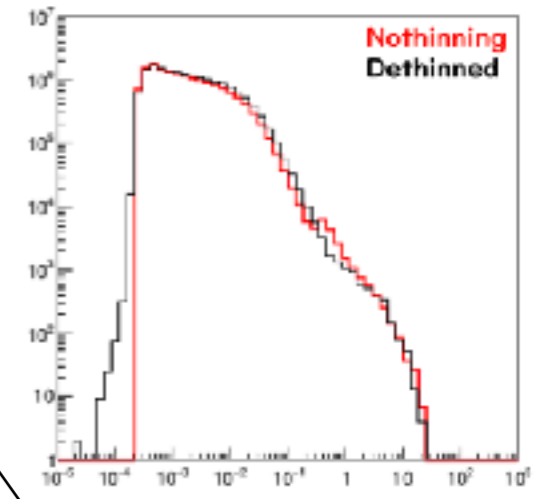
=大天頂角で電磁カスケードを伴うシャワー



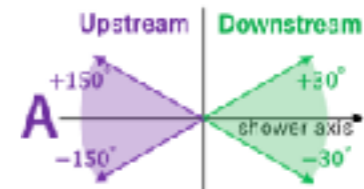
TA実験のためのMonte Carloシミュレーションで使われている
CORSIKA+thinning+dethinningの手法を大天頂角に拡張



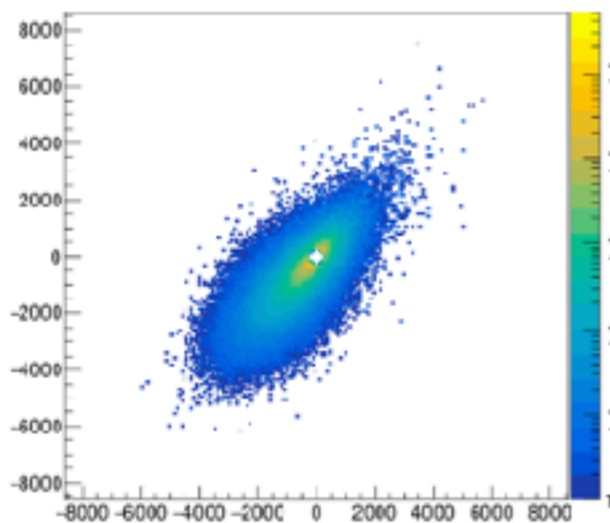
地表における2次粒子
エネルギースペクトル



Dethinningによる
再現性をチェック



Thinned



FDとSDによるハイブリッド観測結果



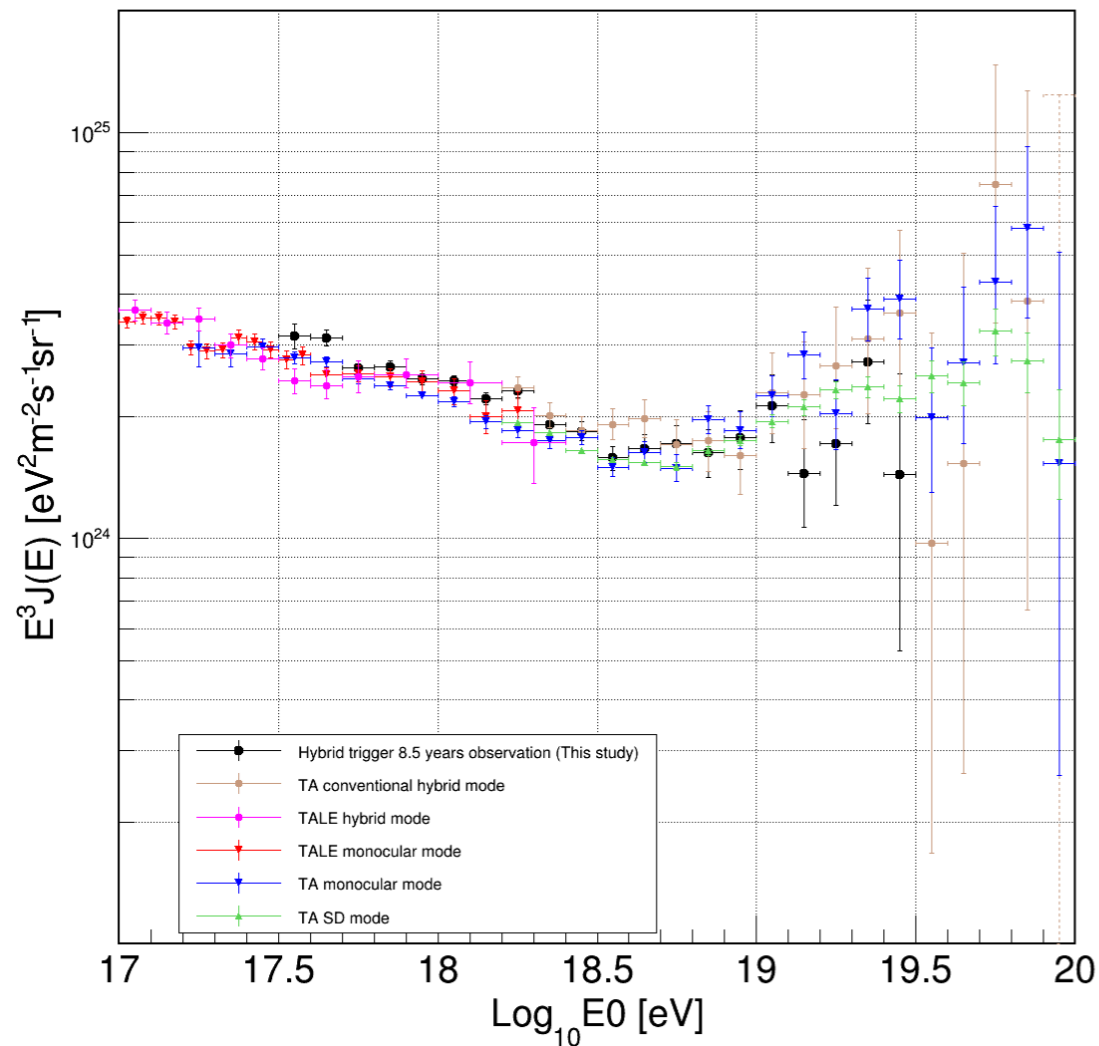
TA Hybrid エネルギースペクトル

Data: TA hybrid 8.5 years (Oct. 8, 2010 - Jun. 30, 2019)

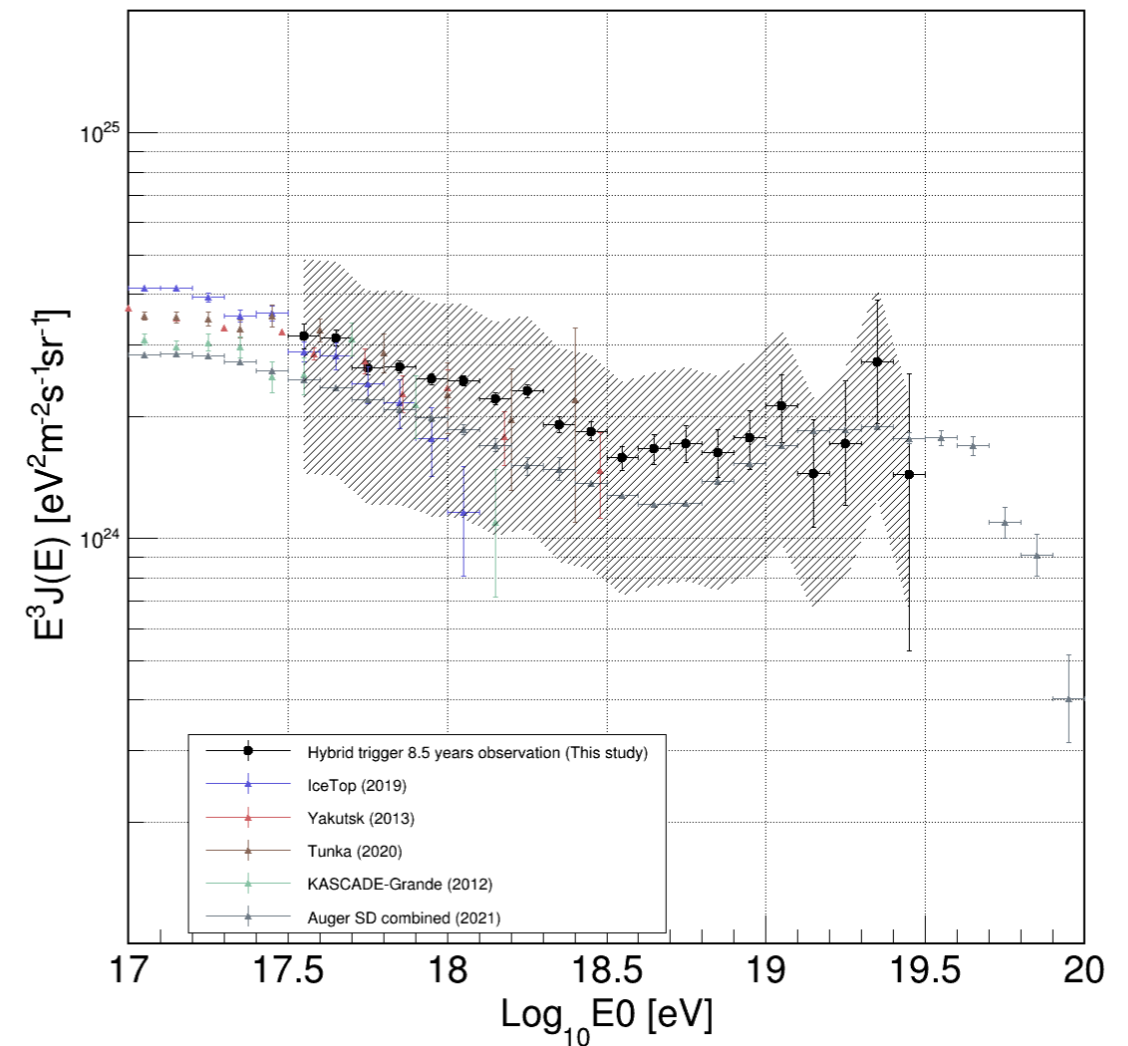
SDアレイよりもより低エネルギーまでをカバー
($\log E = 18.0 \rightarrow 17.5$)

Table 4.6: Conditions for the quality cut and criteria for each element.

Condition	Criterion
Number of selected PMTs	> 20 PMTs
Spatial length of track	> 15°
θ (Zenith)	< 55°
Minimum viewing angle	> 20°
X_{\max} bracketing	$X_{\text{start}} < X_{\max} < X_{\text{end}}$
Fiducial volume	$X_{\text{start}} < 550 \text{ g/cm}^2$ and $X_{\text{end}} > 850 \text{ g/cm}^2$
Reconstructed energy	$17.5 \leq \text{Log}_{10}(E_{\text{rec.}}/\text{eV}) < 19.5$
Core position 1	Inside the corresponding sub-array
Core position 2	> 100 m separation from the array border

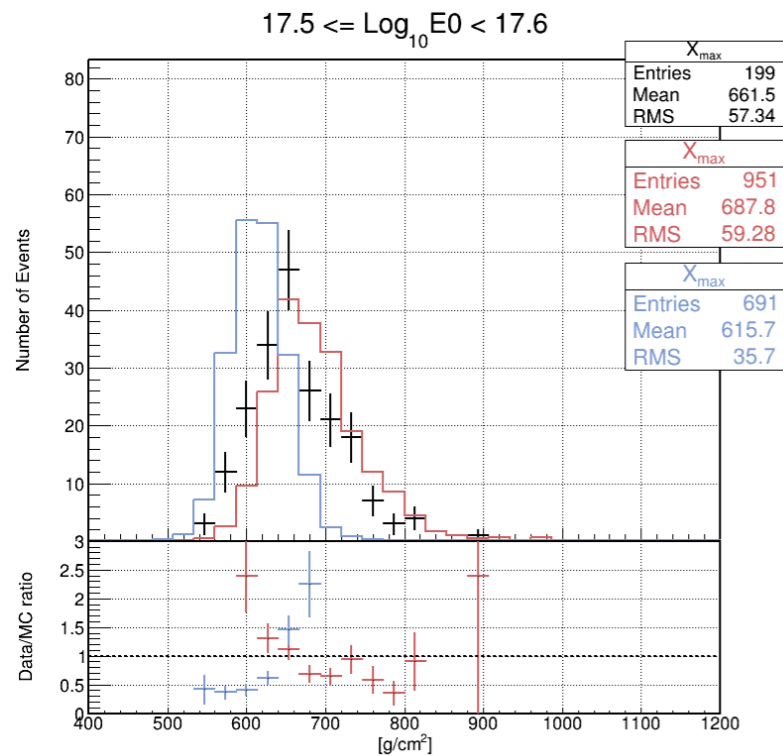


(a) Comparison with the TA results

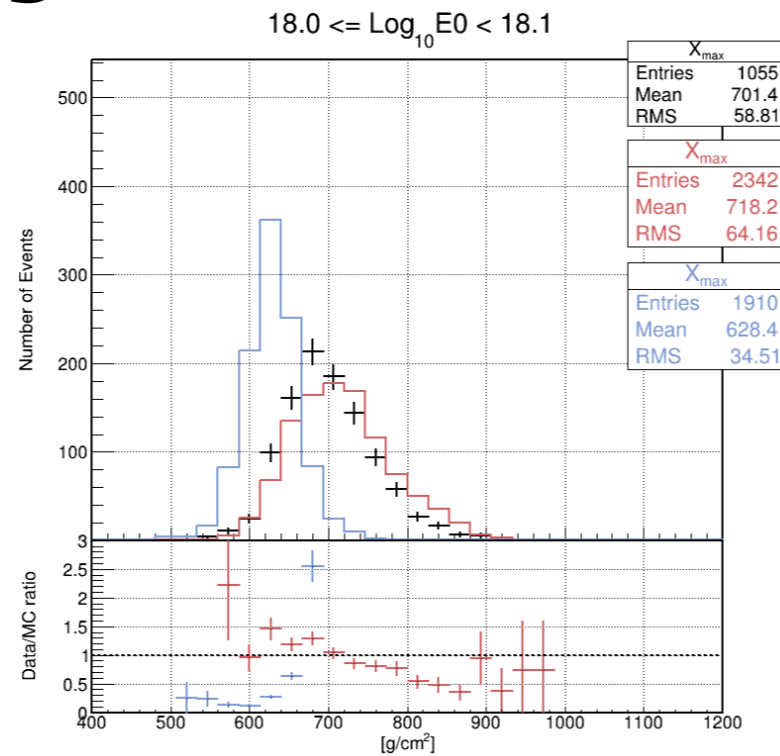


(b) Comparison with the other experiments

TA Hybrid Xmax分布



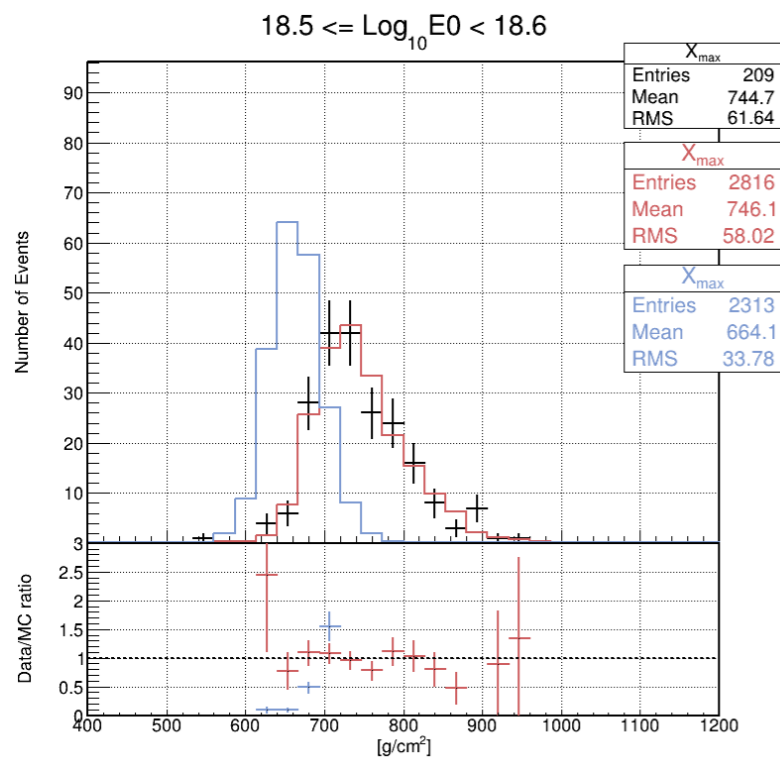
(a) 17.5 \leq Log₁₀(E₀/eV) < 17.6



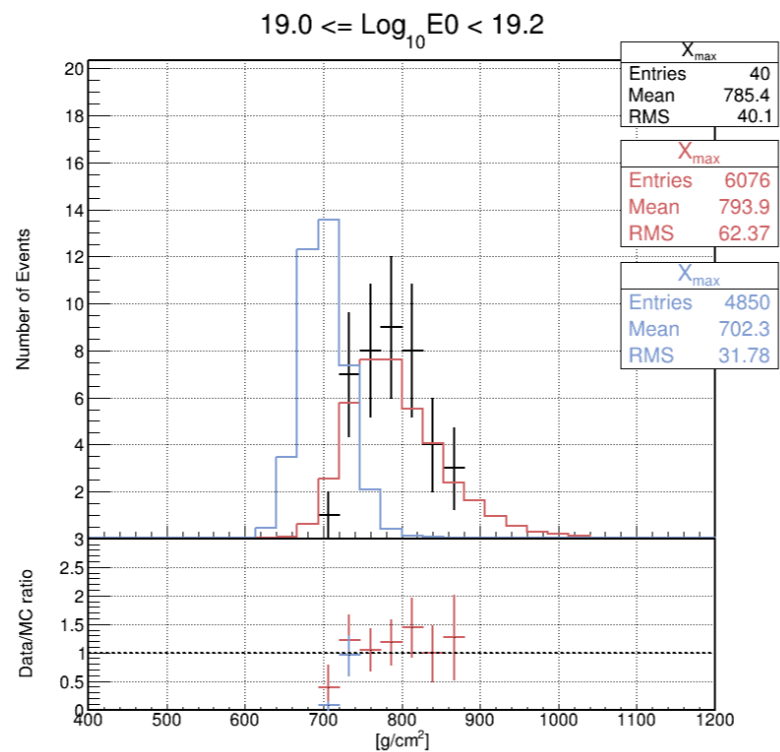
(f) 18.0 \leq Log₁₀(E₀/eV) < 18.1

全エネルギー範囲で
鉄原子核よりも陽子に近い

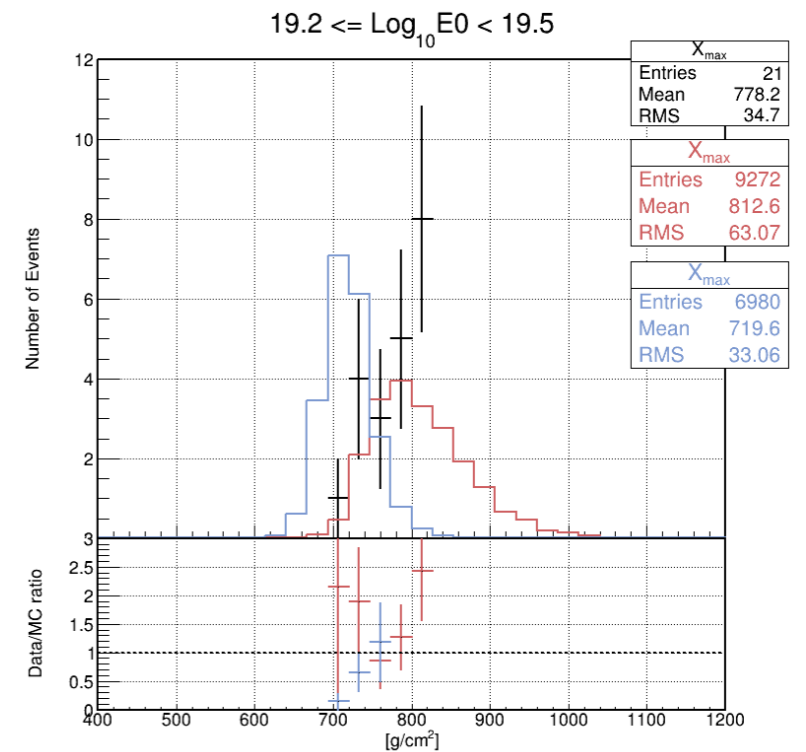
(最高エネルギー端は統計不足)



(e) 18.5 \leq Log₁₀(E₀/eV) < 18.6

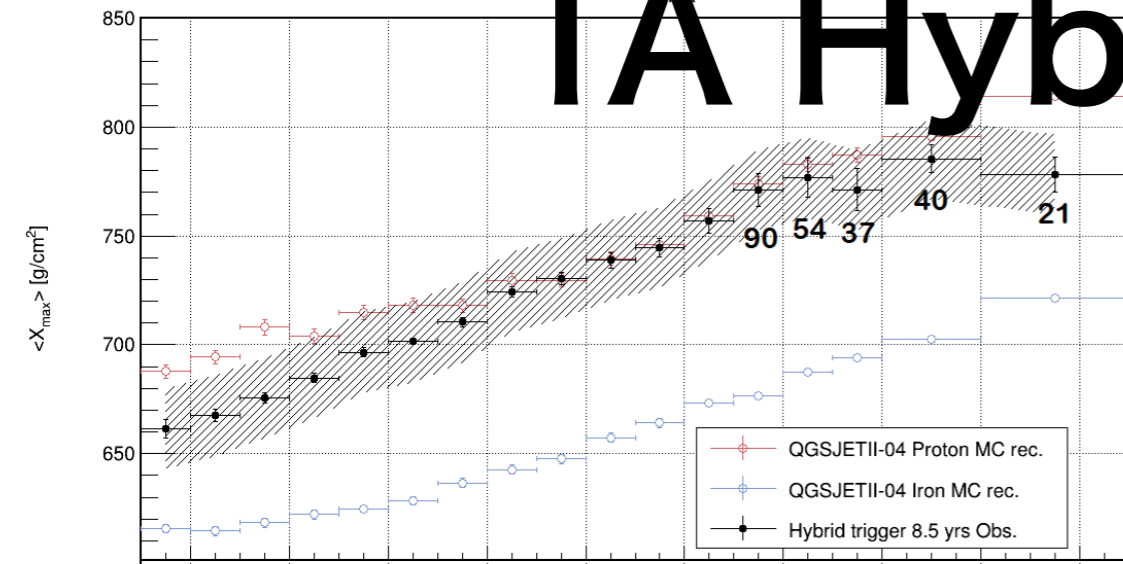


(d) 19.0 \leq Log₁₀(E₀/eV) < 19.2

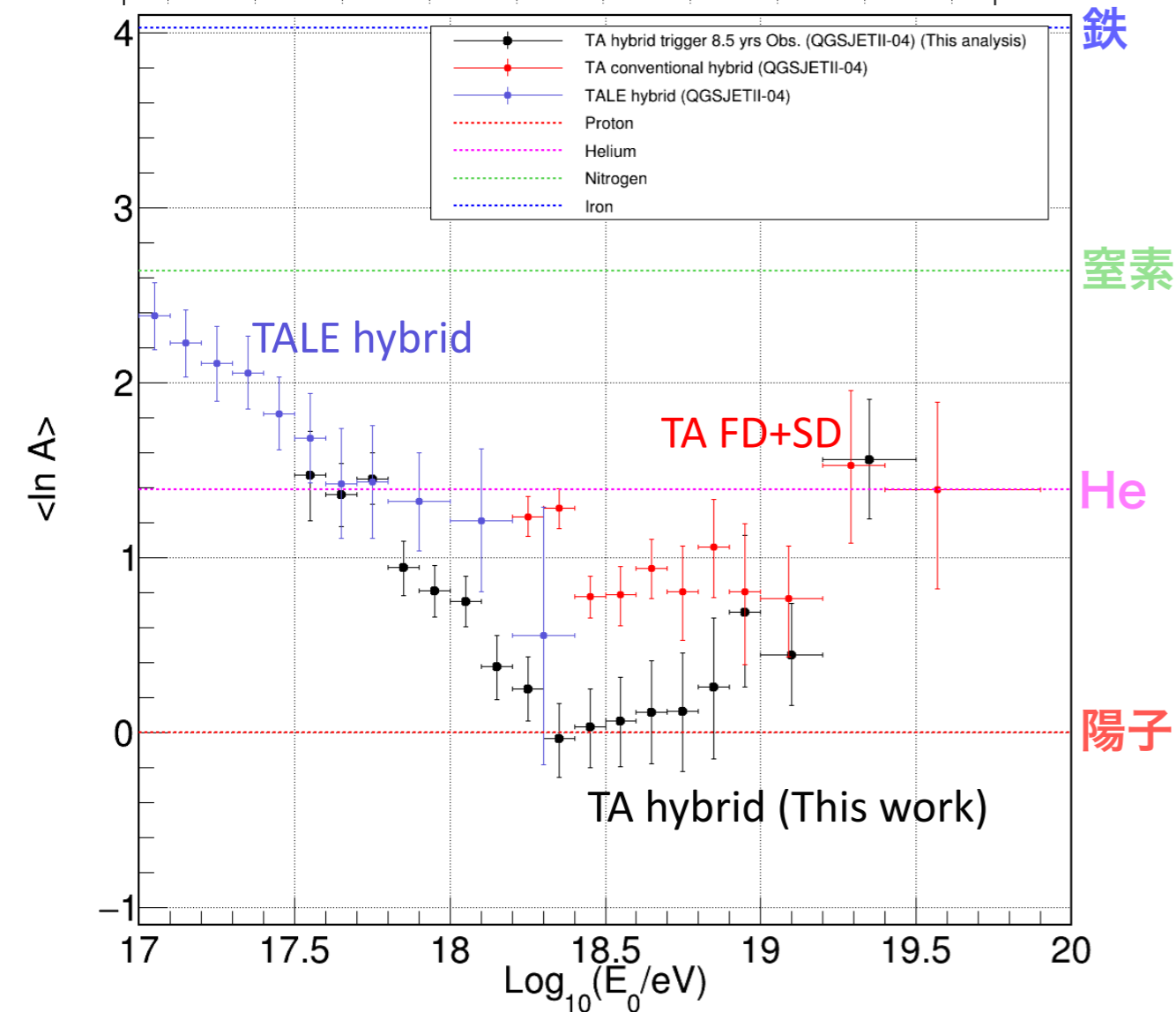


(e) 19.2 \leq Log₁₀(E₀/eV) < 19.5

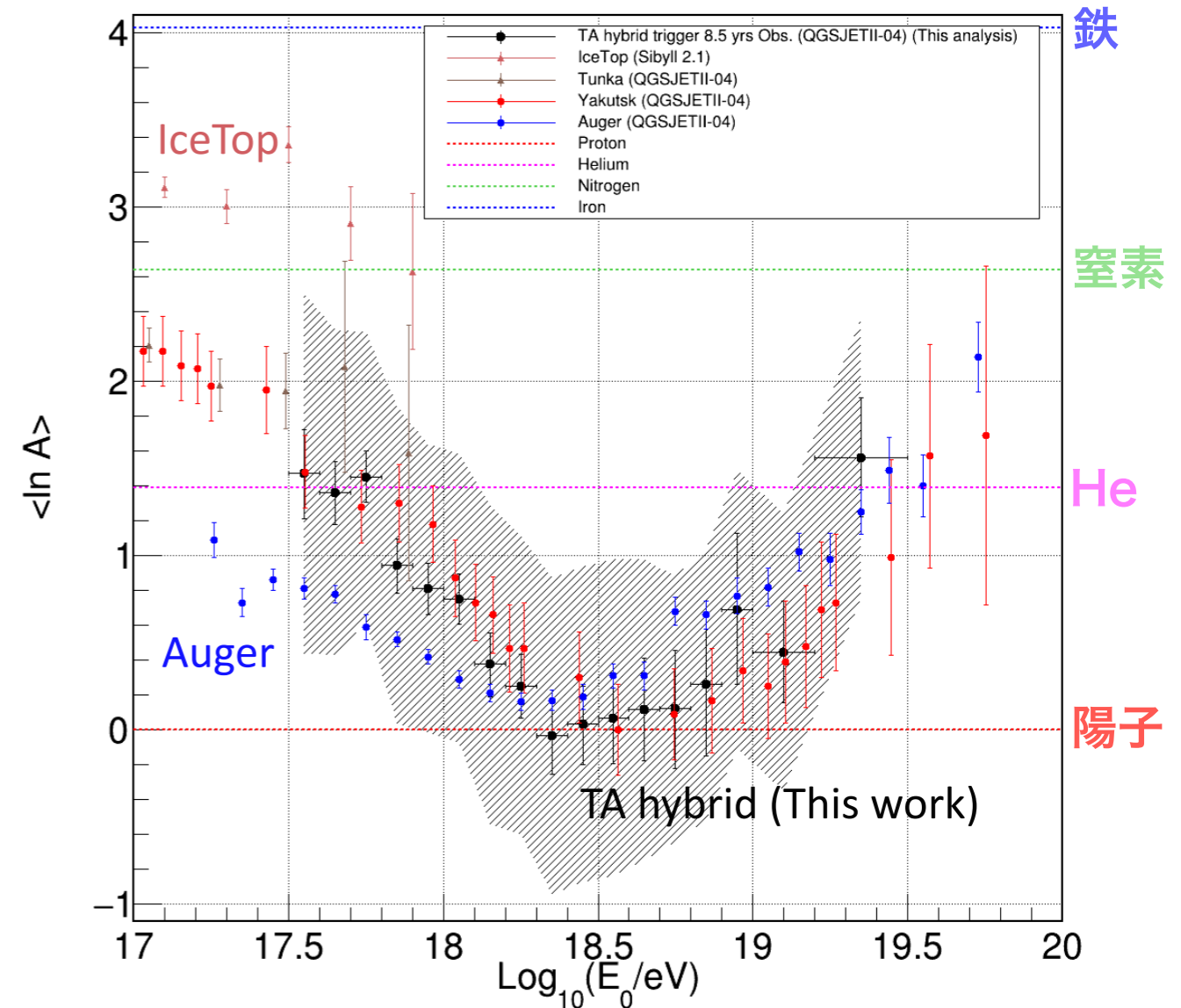
TA Hybrid 原子核組成



エネルギーごとの平均Xmaxから
平均質量数を求めた



(a) Comparison with the TA results

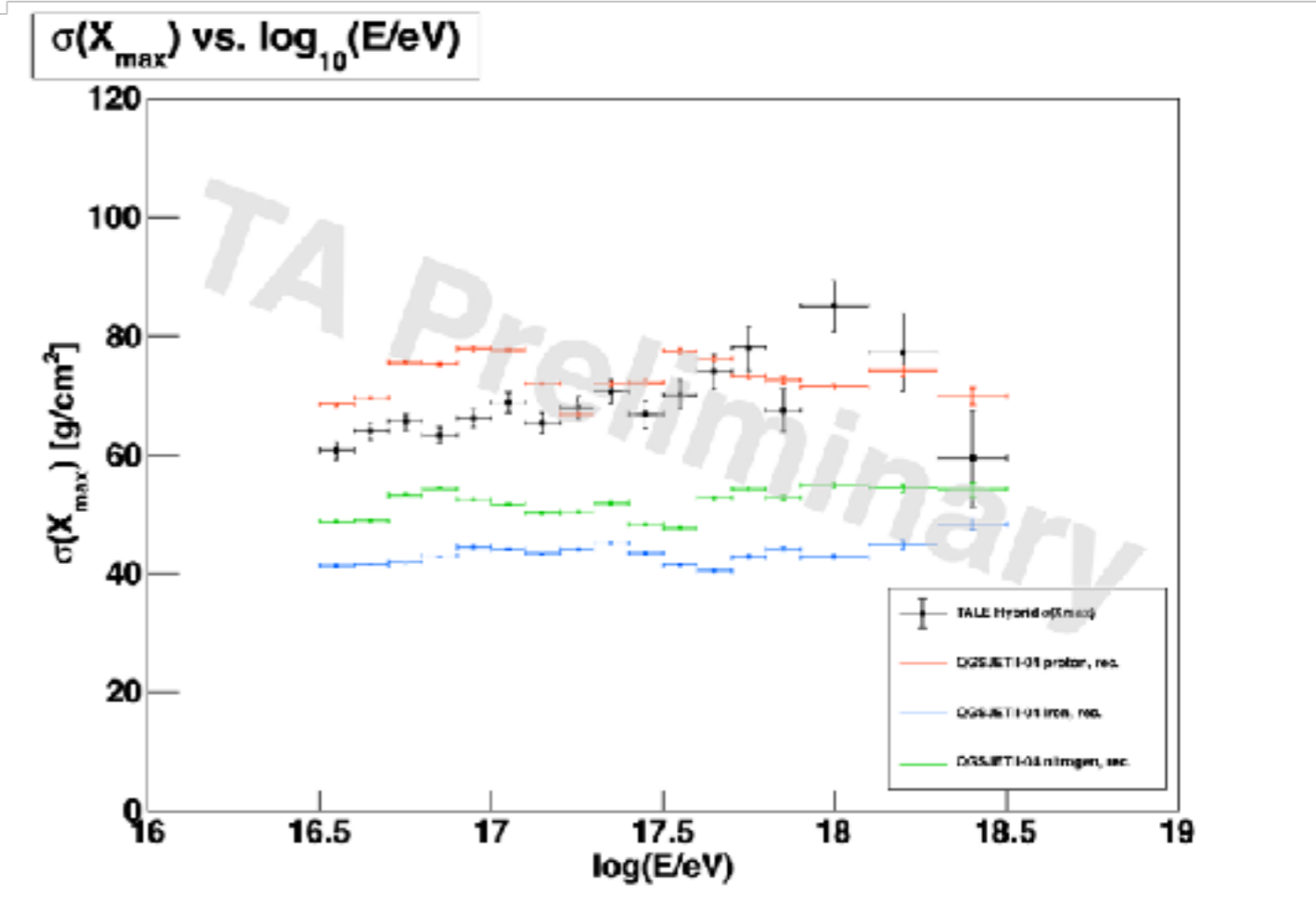
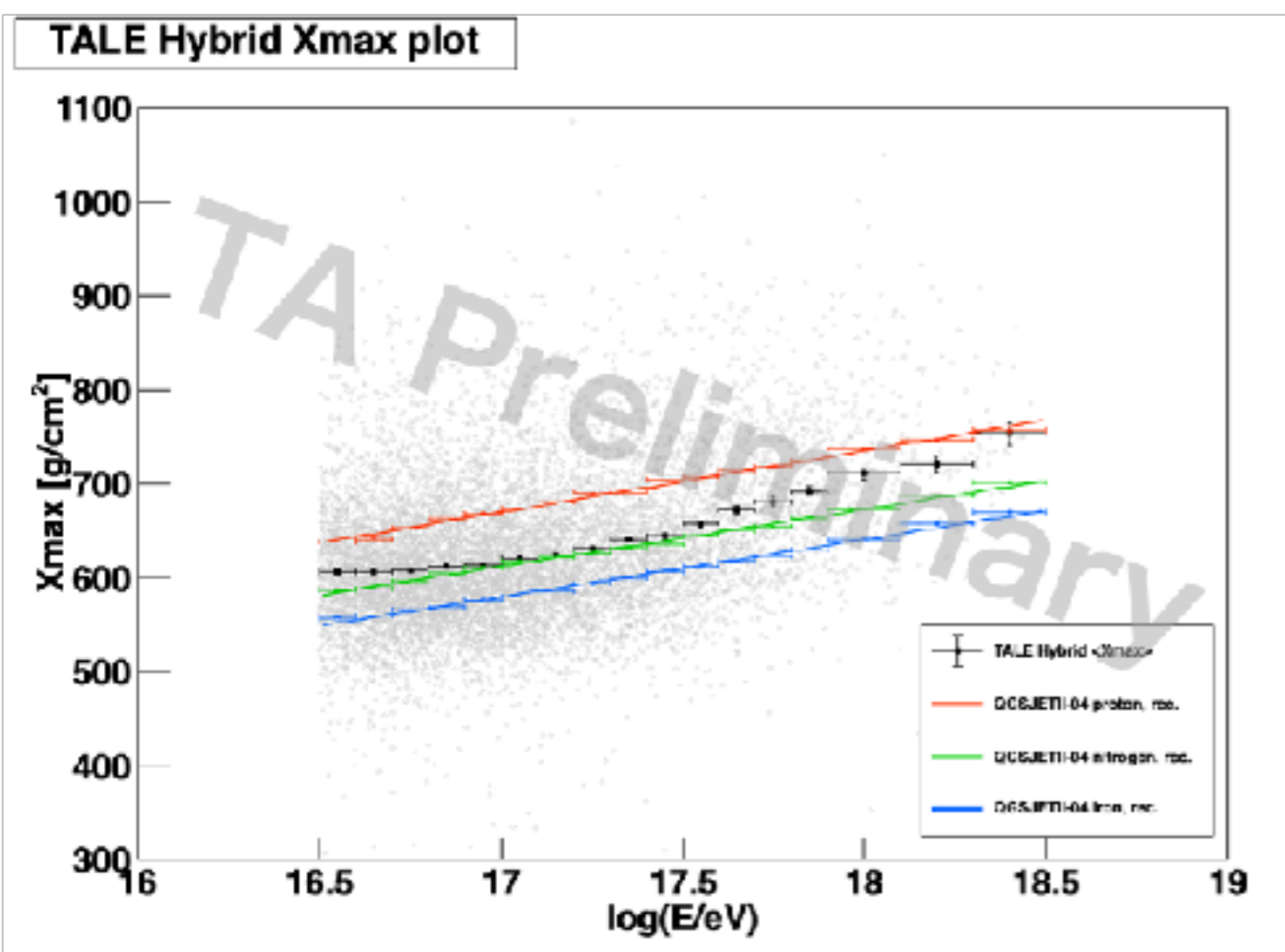


(b) Comparison with the other experiments

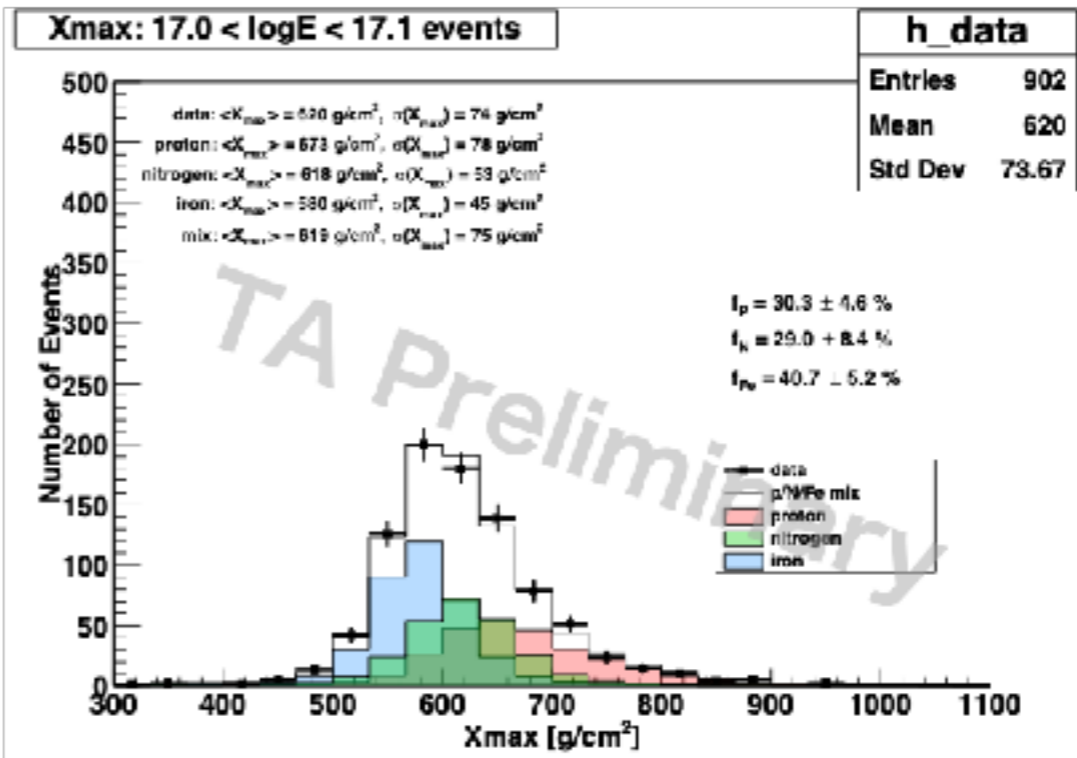
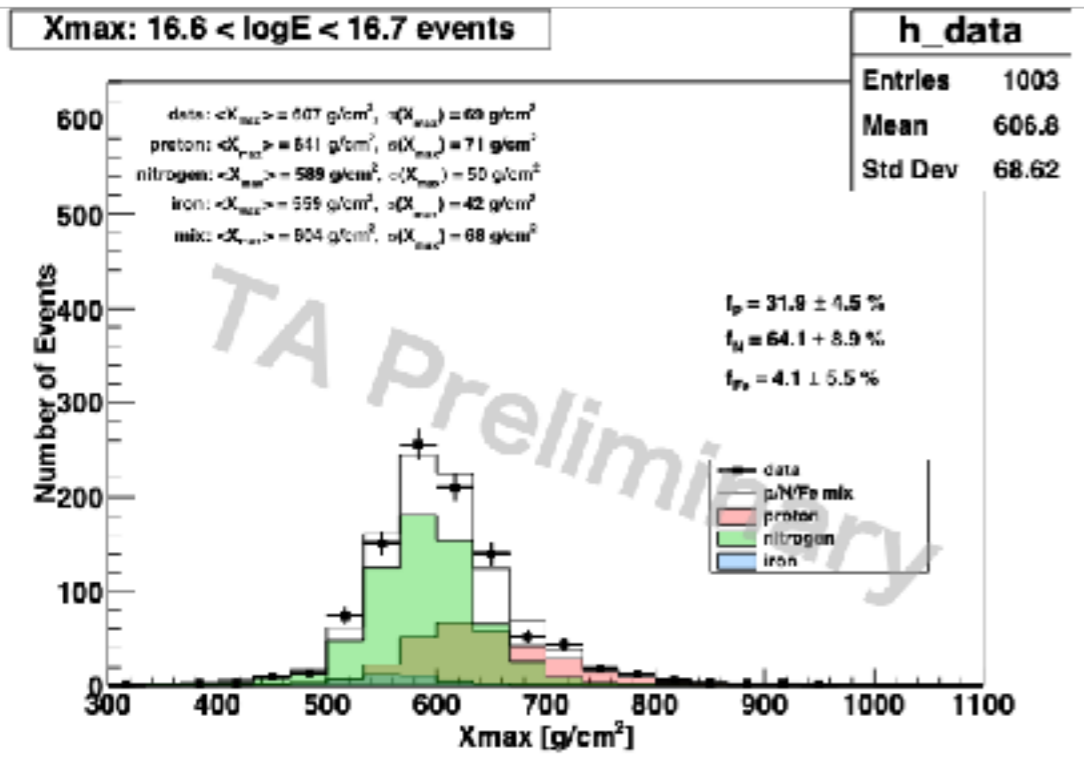
TALE Hybrid 原子核組成

Data: TALE hybrid 5.3 years (Nov. 2017 - Mar. 2023)

Variable	CL	FL
No saturated PMTs in FD		applied
X_{\max} bracketing cut		applied
Angular track-length [deg]	$> 6.5^\circ$	-
Event duration [ns]	> 100 ns	-
# of PMTs	> 10	-
# of Photo-electrons	> 1000	> 2000



TALE Hybrid 原子核組成

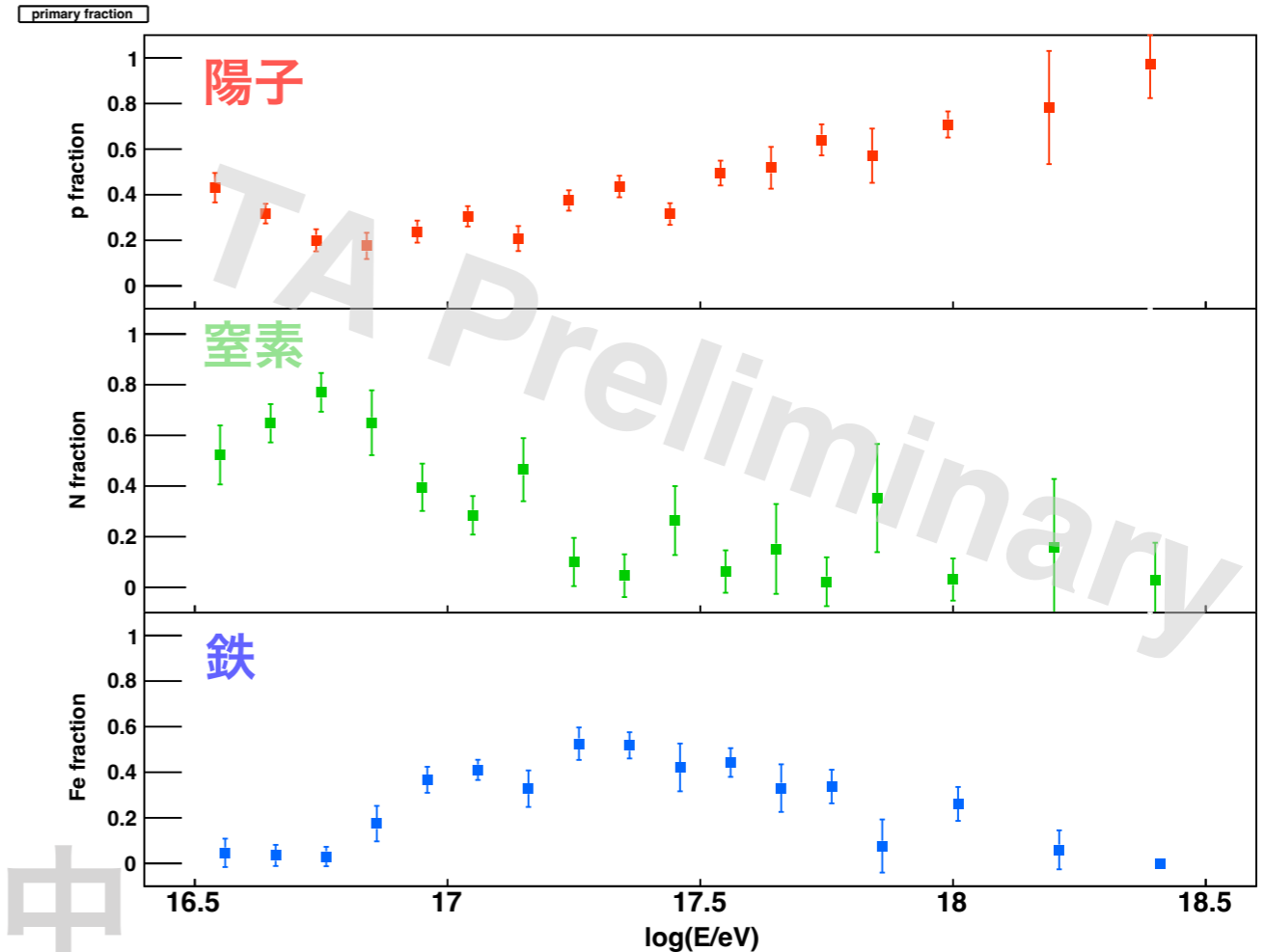


Xmax分布をMCで生成した3つの成分
 (陽子、窒素、鉄) の分布の重ね合わせ
 としてフィット
 → 3成分の成分比を求める

ピーク位置

窒素 : $\sim 10^{16.8} \text{ eV} = 63 \text{ PeV}$

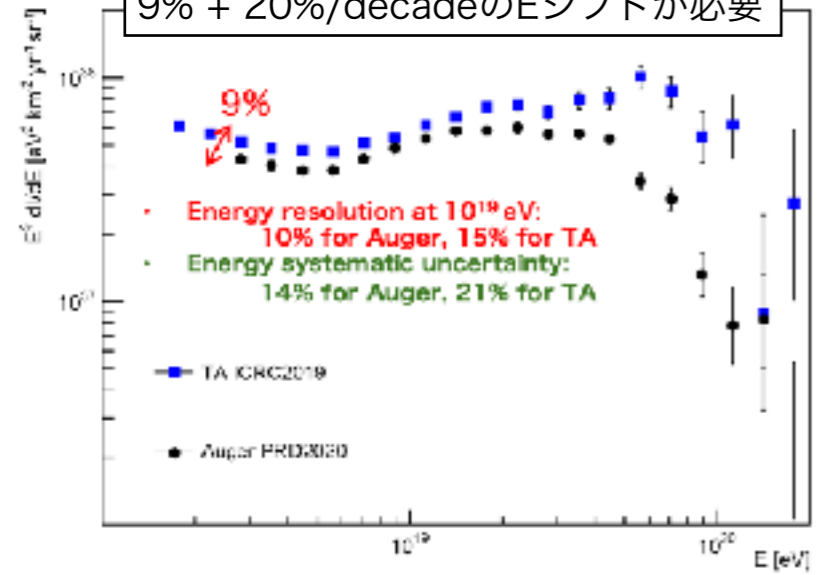
鉄 : $\sim 10^{17.3} \text{ eV} = 200 \text{ PeV}$



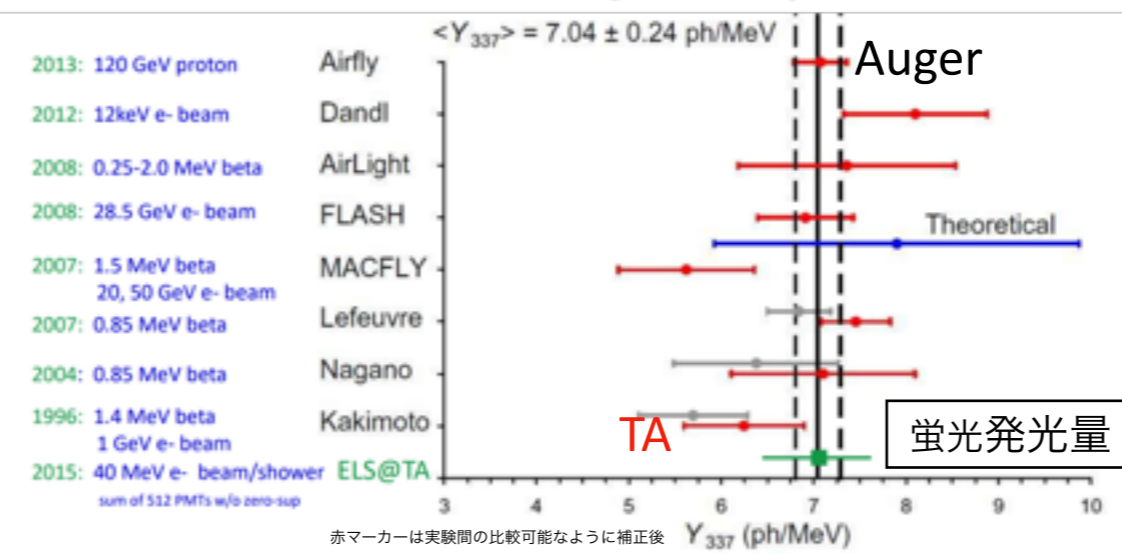
論文執筆中

TA SD エネルギースケール

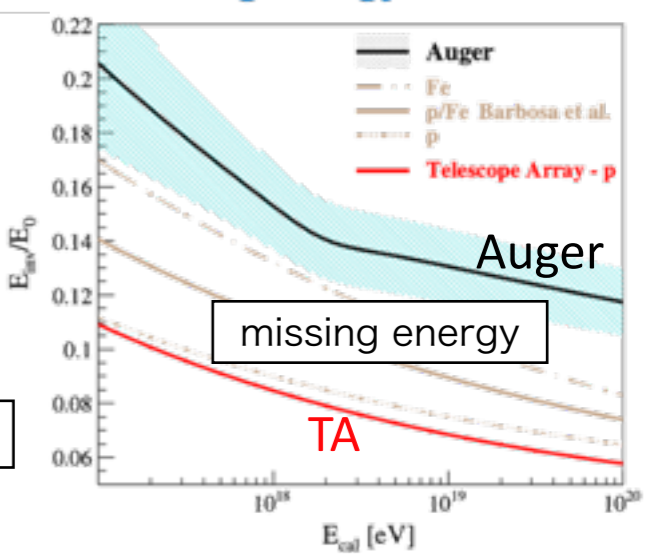
TAとAugerの違いを無くすには
9% + 20%/decadeのEシフトが必要



Air fluorescence yield comparison

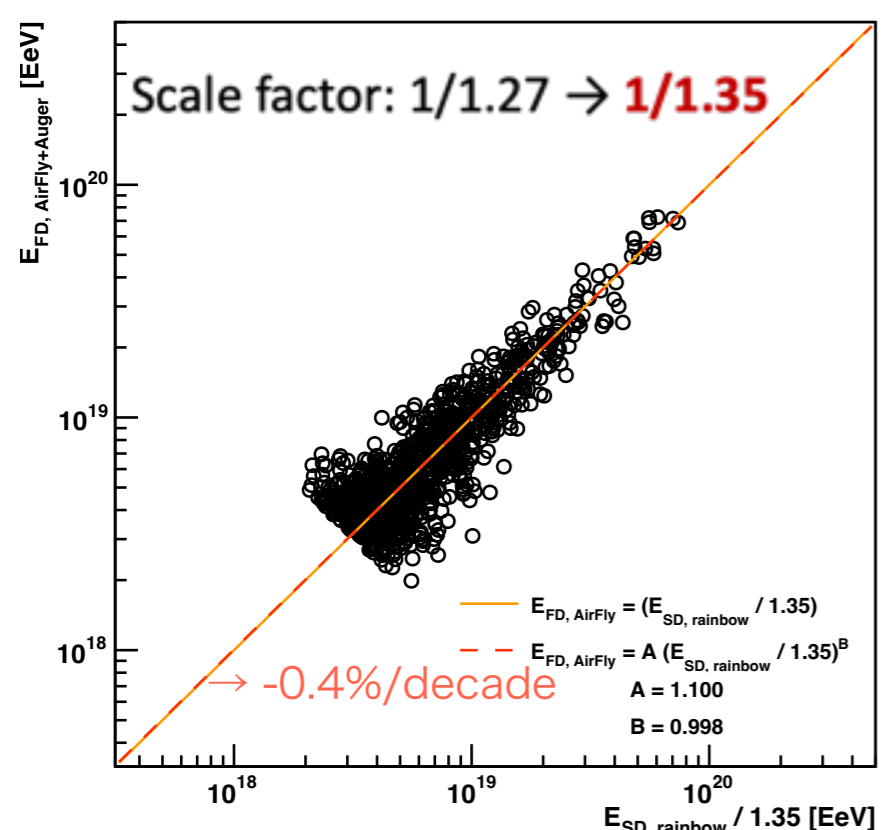


Missing energy model

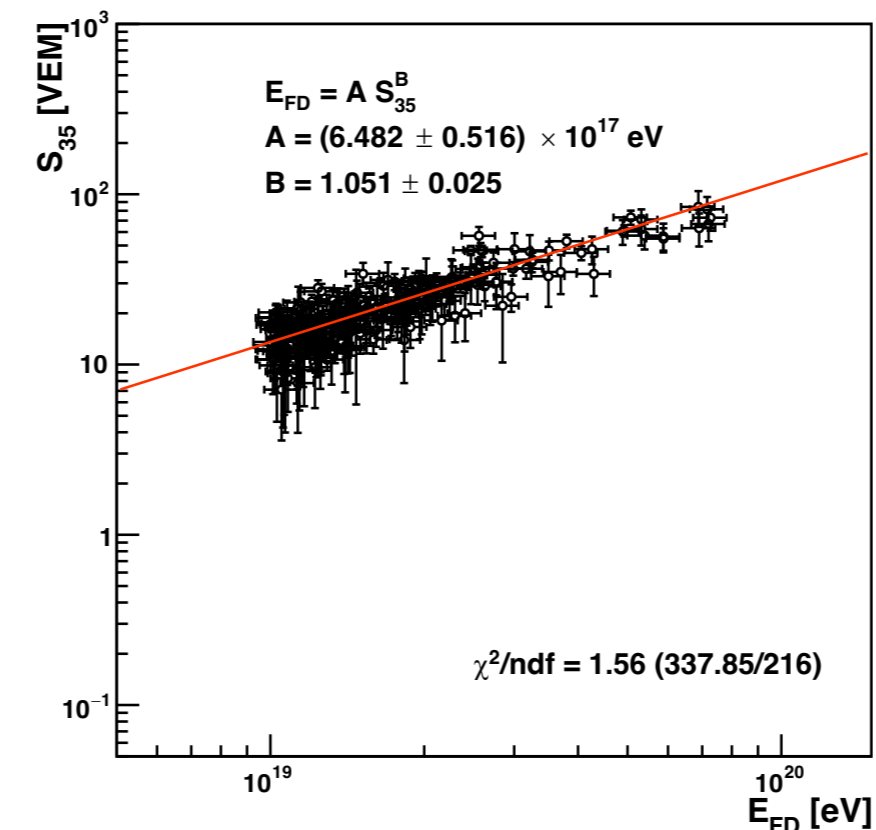


蛍光発光量・スペクトルとmissing energyはAugerと共通化した上で…
TA実験スタンダード方式 等頻度法 (Augerと共通化)

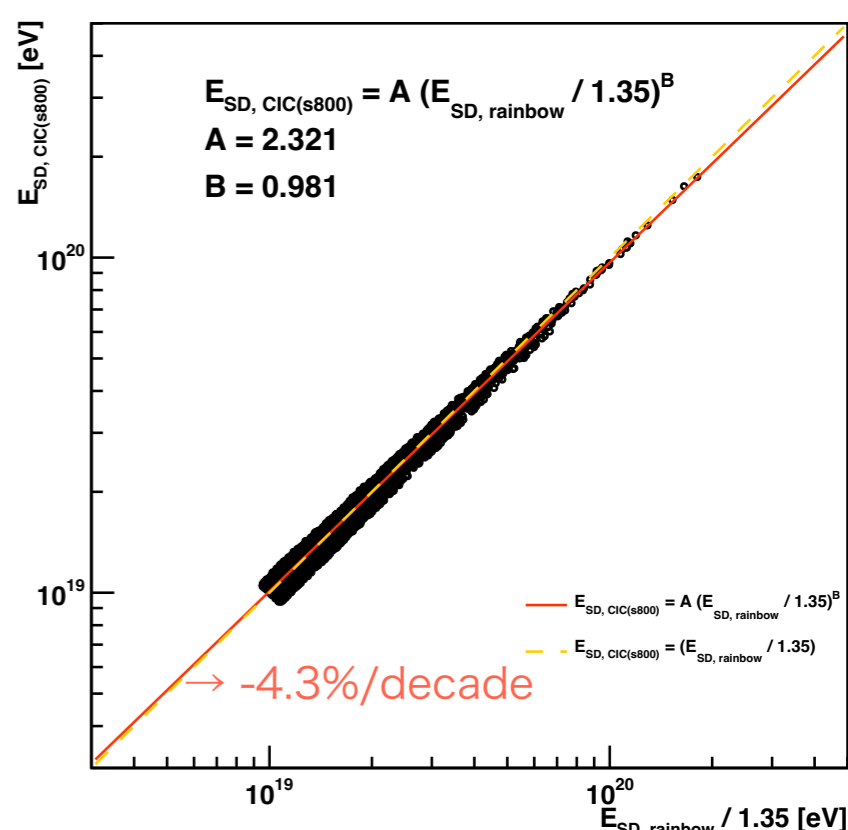
$E_{SD, rainbow}$ vs. $E_{FD, AirFly+Auger}$



energy calibration



$E_{SD, rainbow}$ vs. $E_{SD, CIC(s800)}$

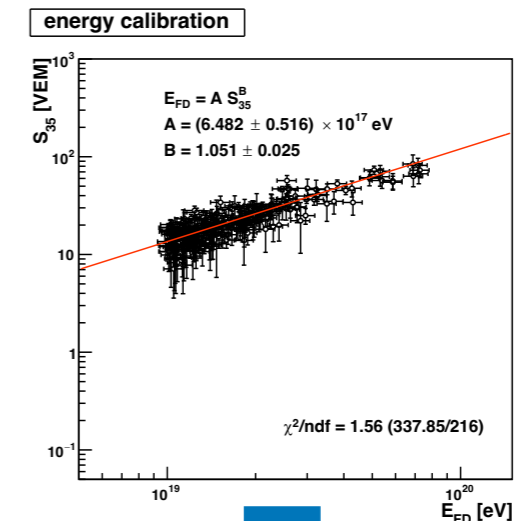
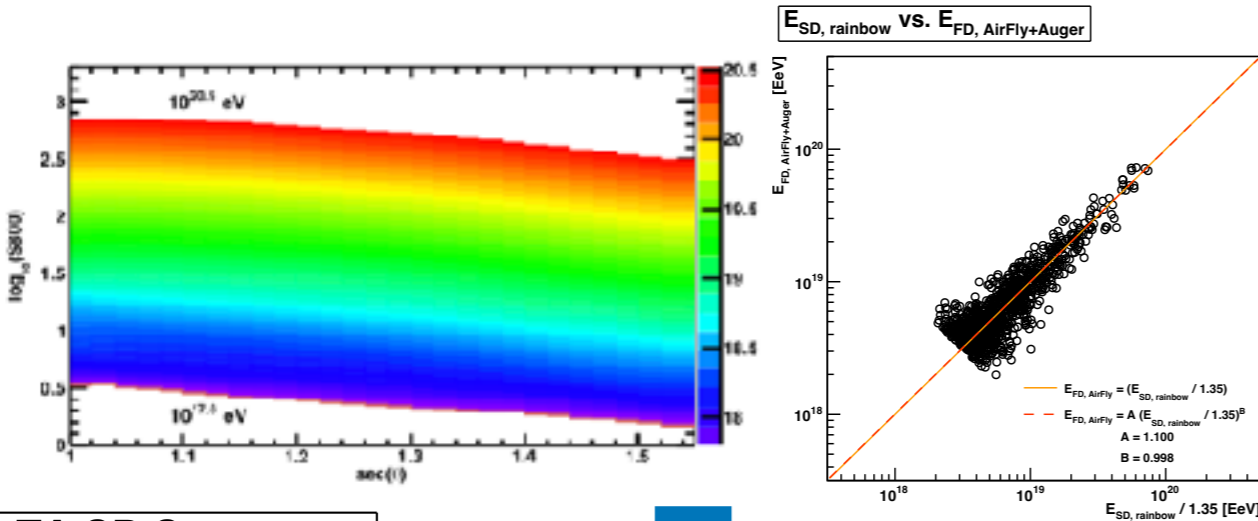


TA SD エネルギースケール

蛍光発光量・スペクトルとmissing energyはAugerと共通化した上で…

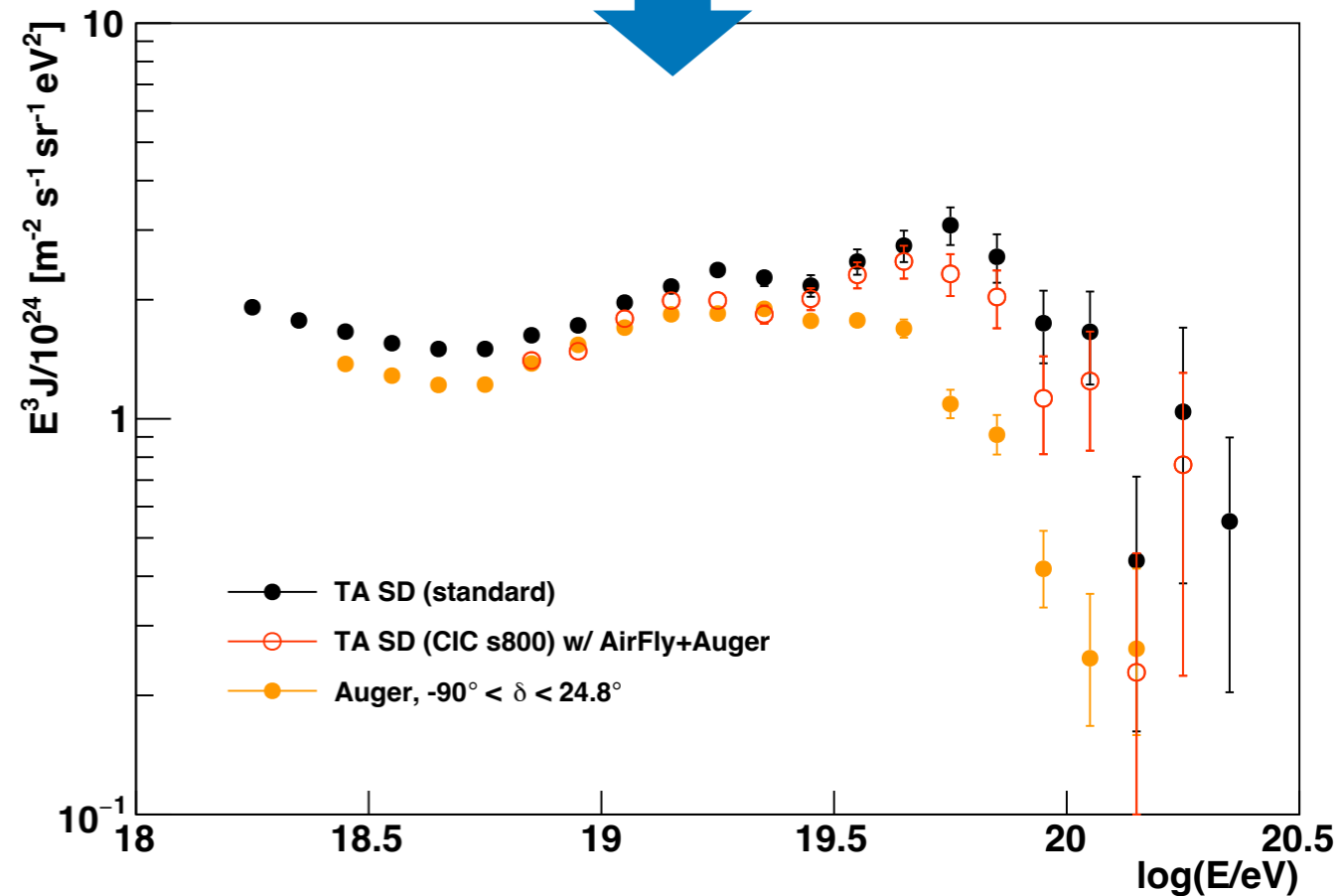
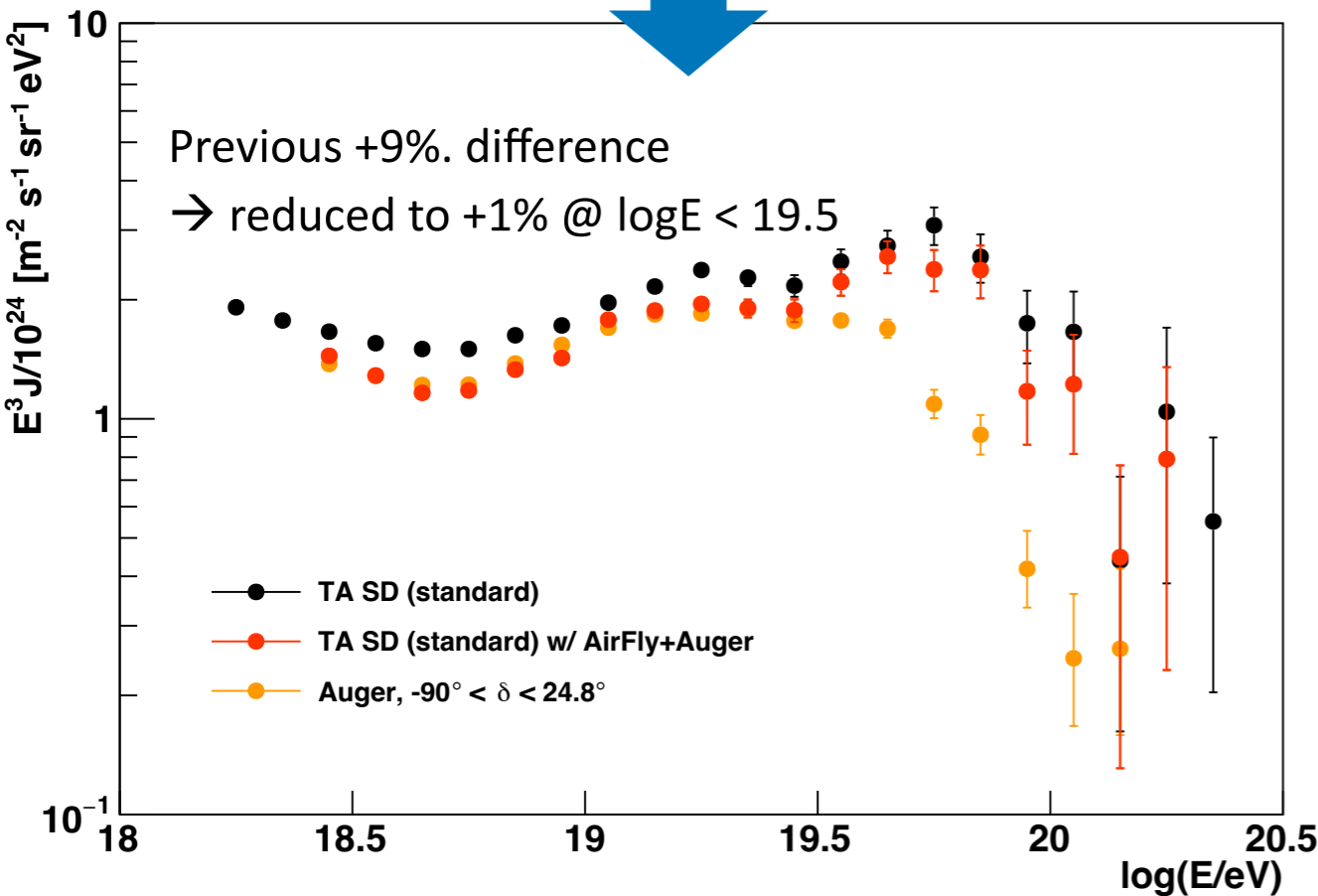
TA実験スタンダード方式

等頻度法 (Augerと共通化)



TA SD Spectrum

TA SD Spectrum



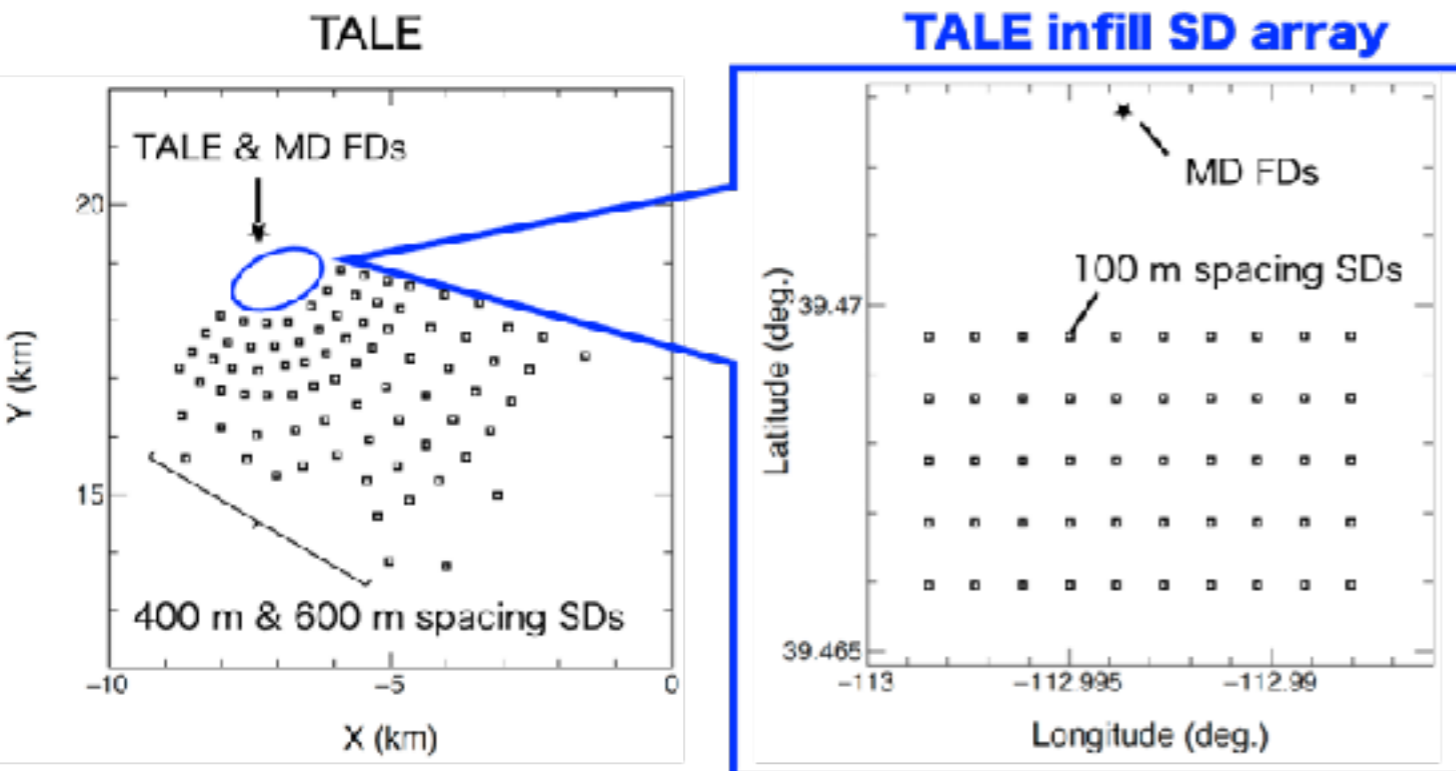
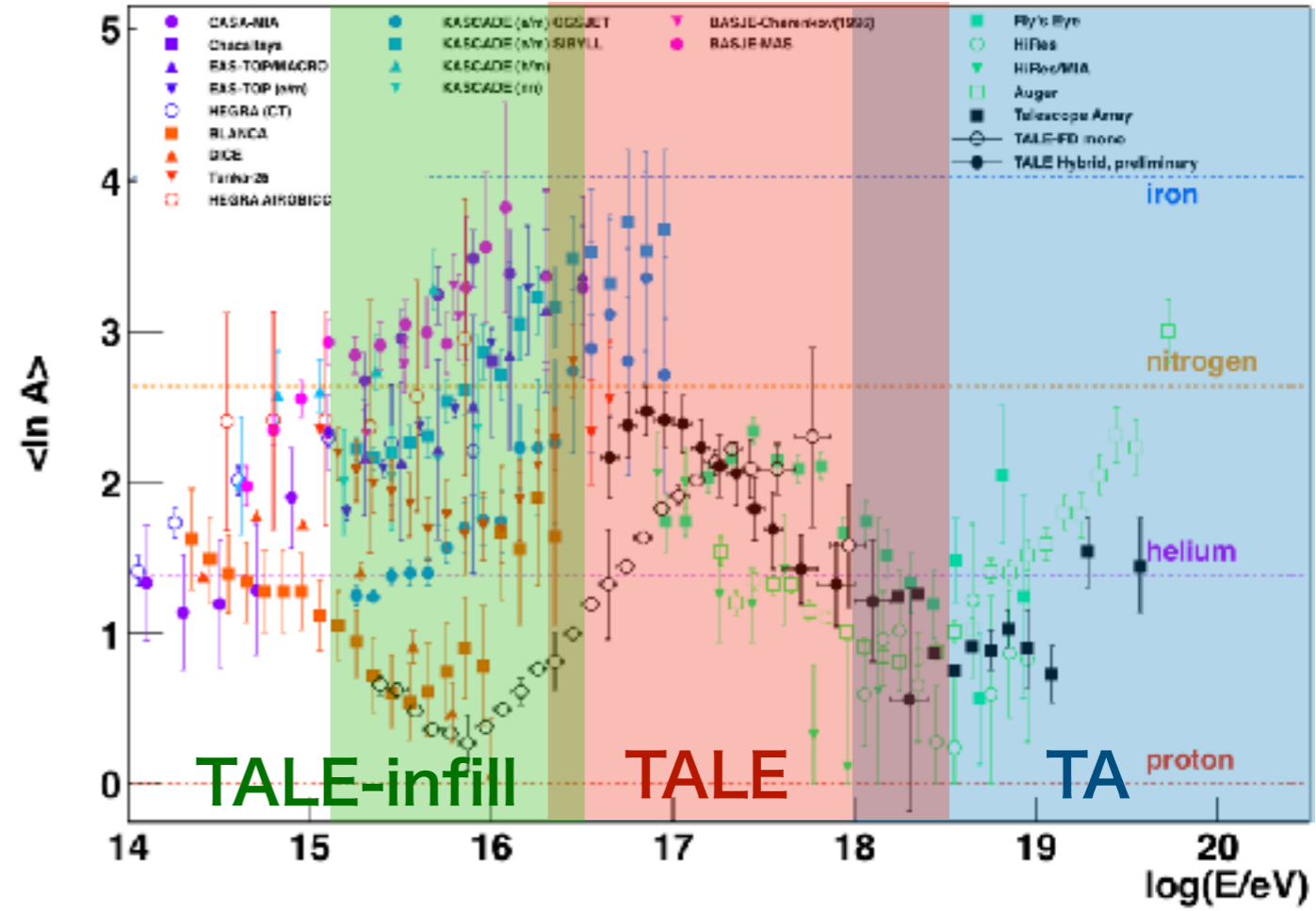
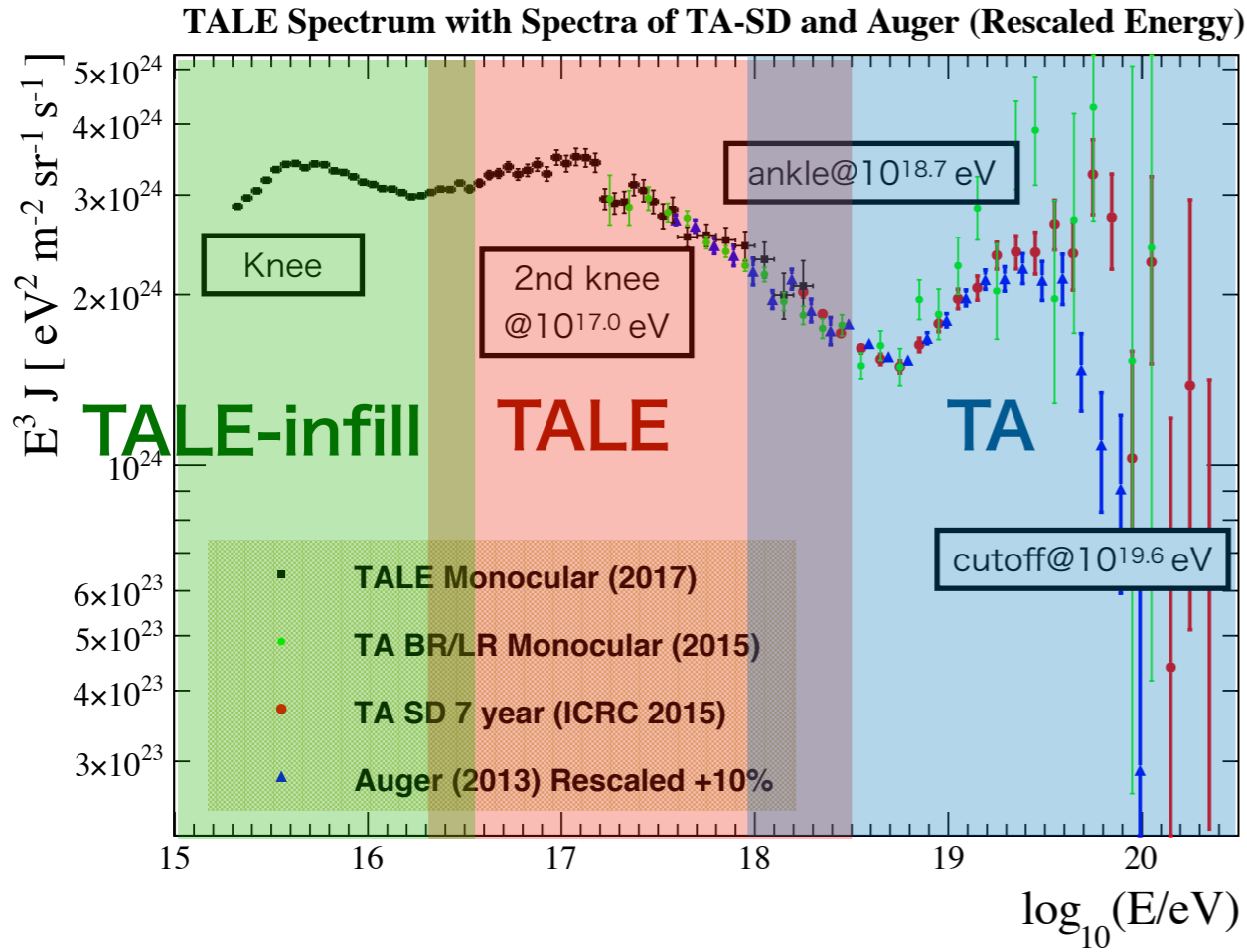
論文執筆中

TALE infill : knee領域へ



TALE-infill : knee領域へ

Ap. J., 865, 74(2018), arXiv: 1803.01288



100m間隔、50台、0.36 km²
2022年10月に設置作業



TALE infill 運用開始

2023年9月25日から中央通信塔、データ収集PCなどを設置@TALE FDサイト



Antenna+AP

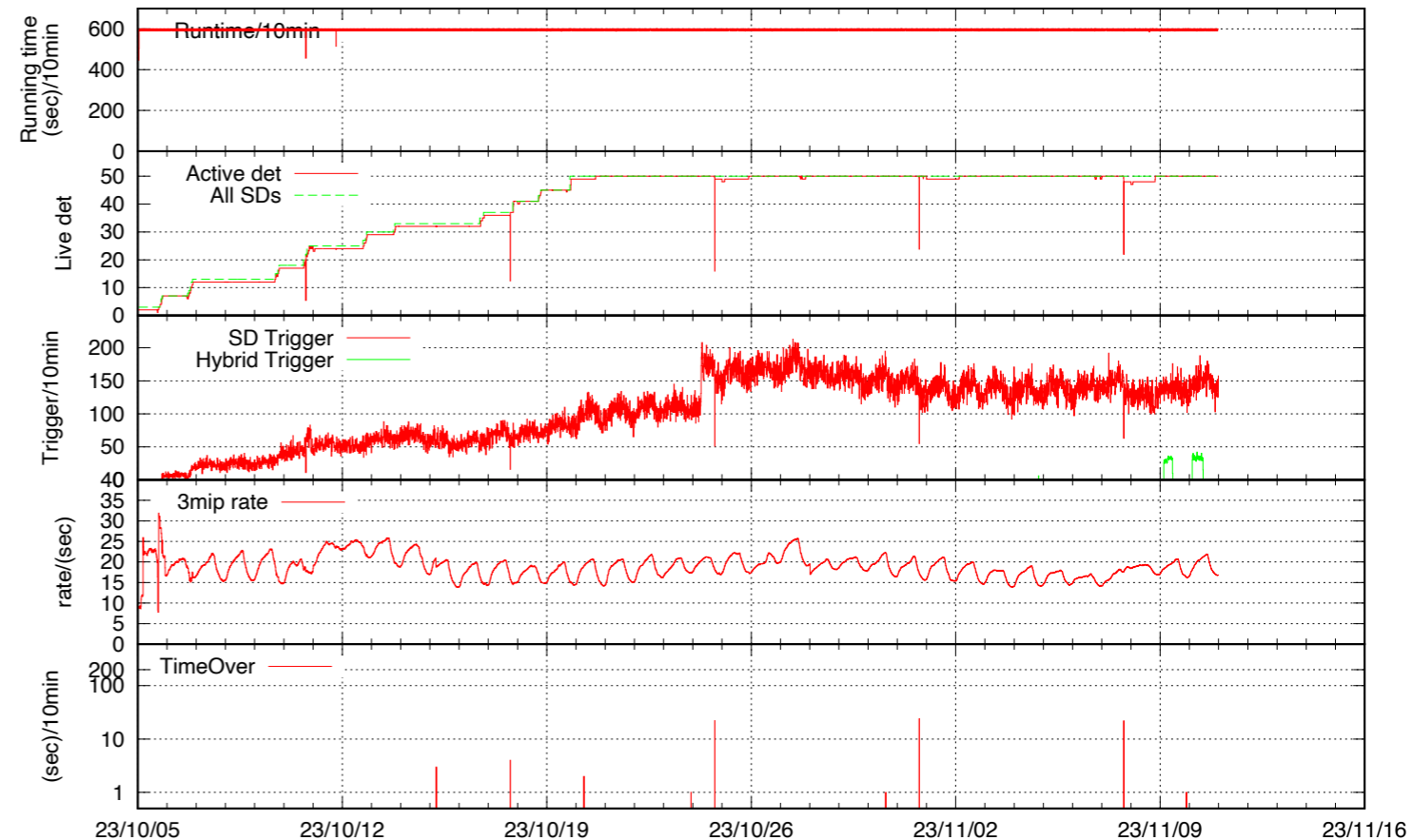


DAQ equipment

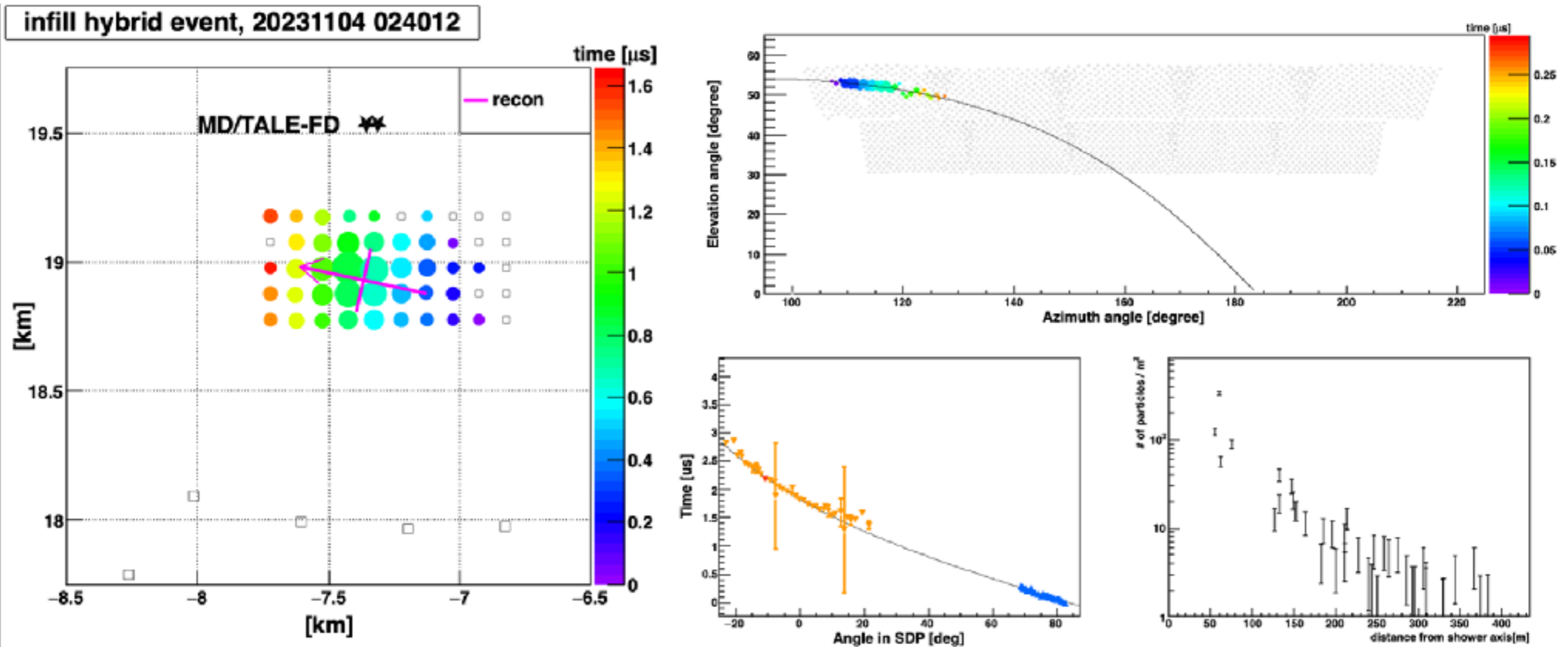
2023年10月4日からDAQ電子回路などをインストール



DAQ summary at infillCT

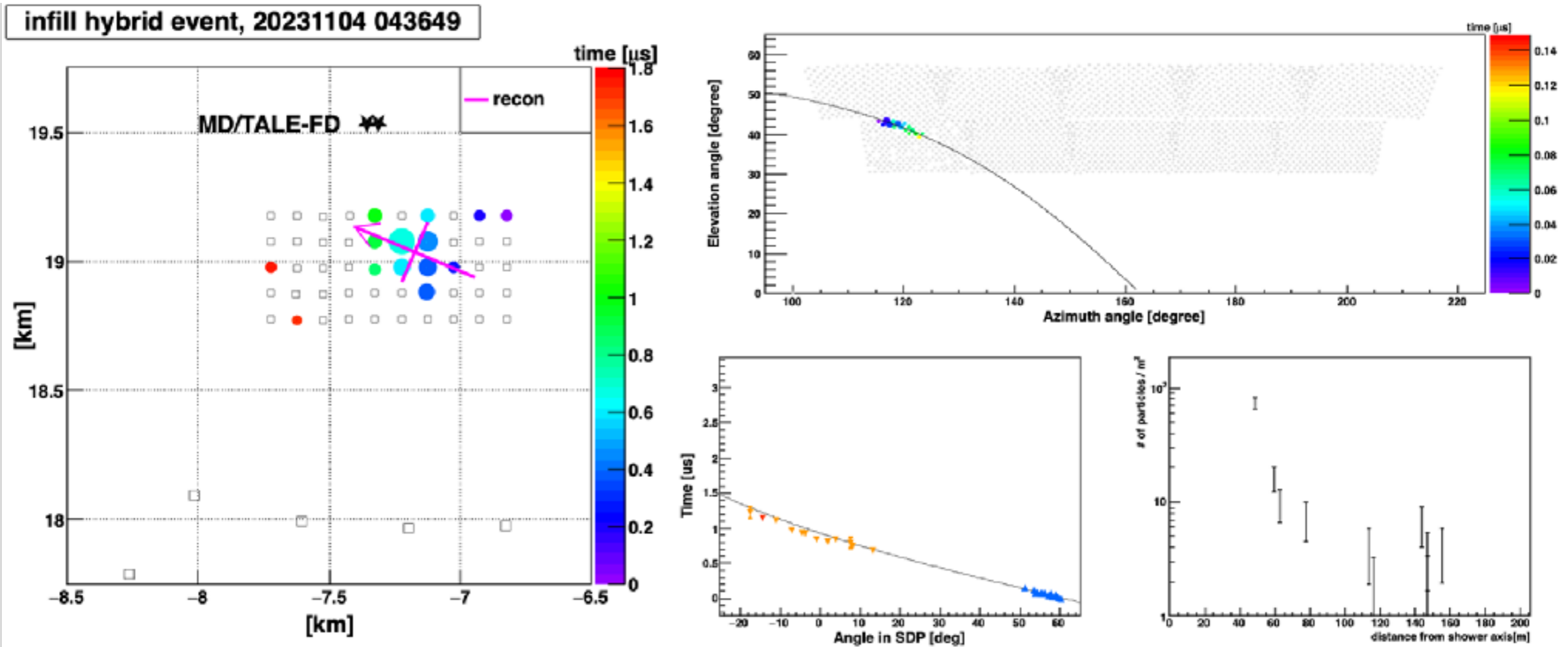


TALE infill Hybrid event例



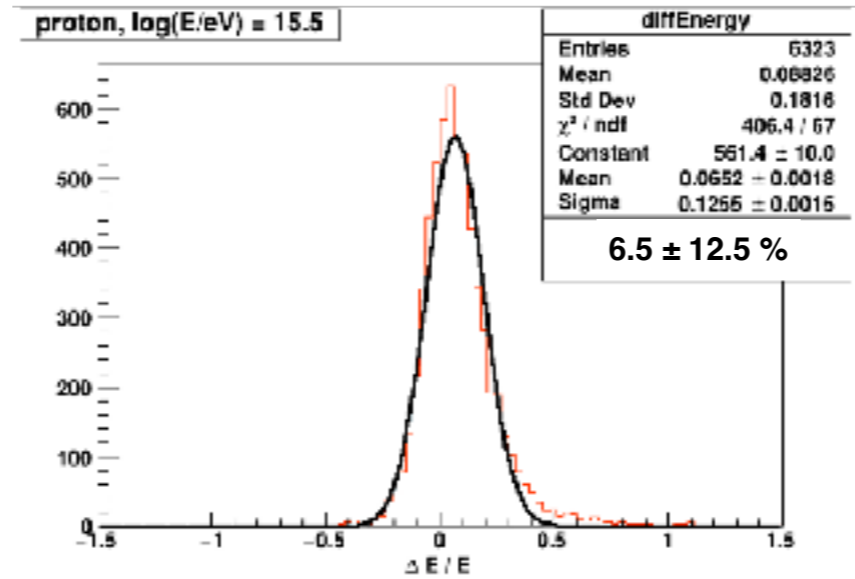
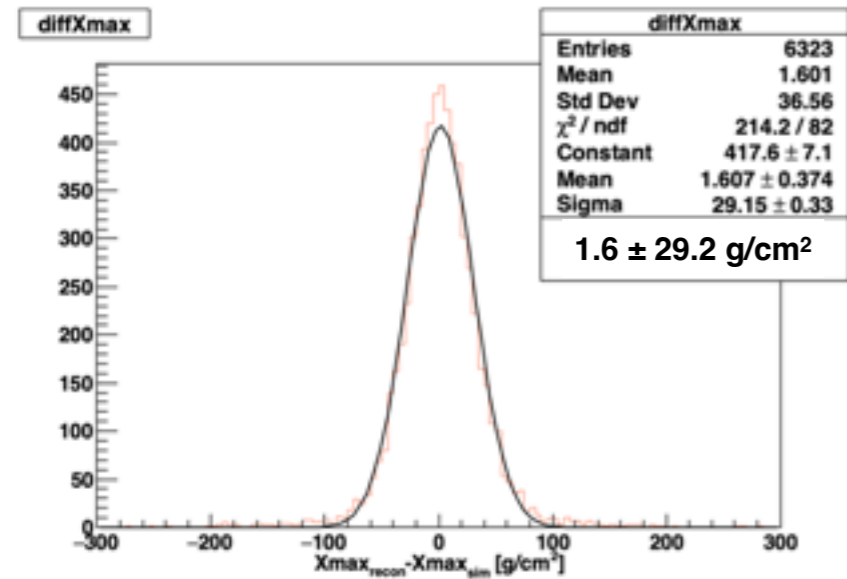
Result.	θ [deg]	ϕ [deg]	Rp[km]	ψ [deg]	coreX[km]	coreY[km]	X_{max} [g/cm ²]	log(E/eV)
infill	36.1	102.4	0.61	95.0	-7.49	18.96	746	16.01

TALE infill Hybrid event例

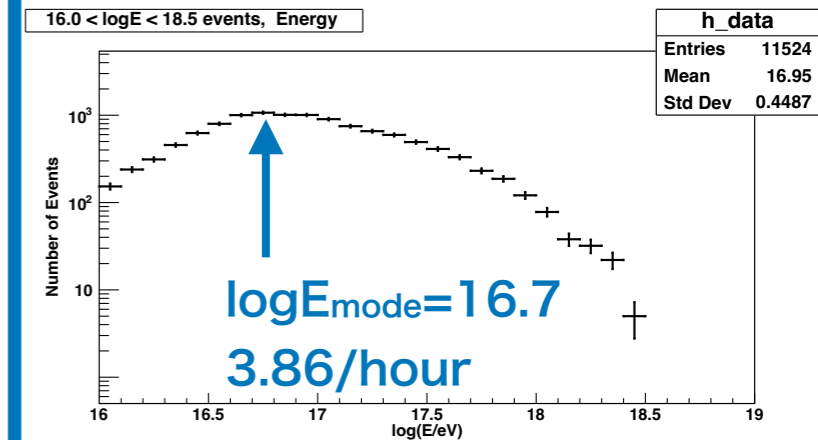
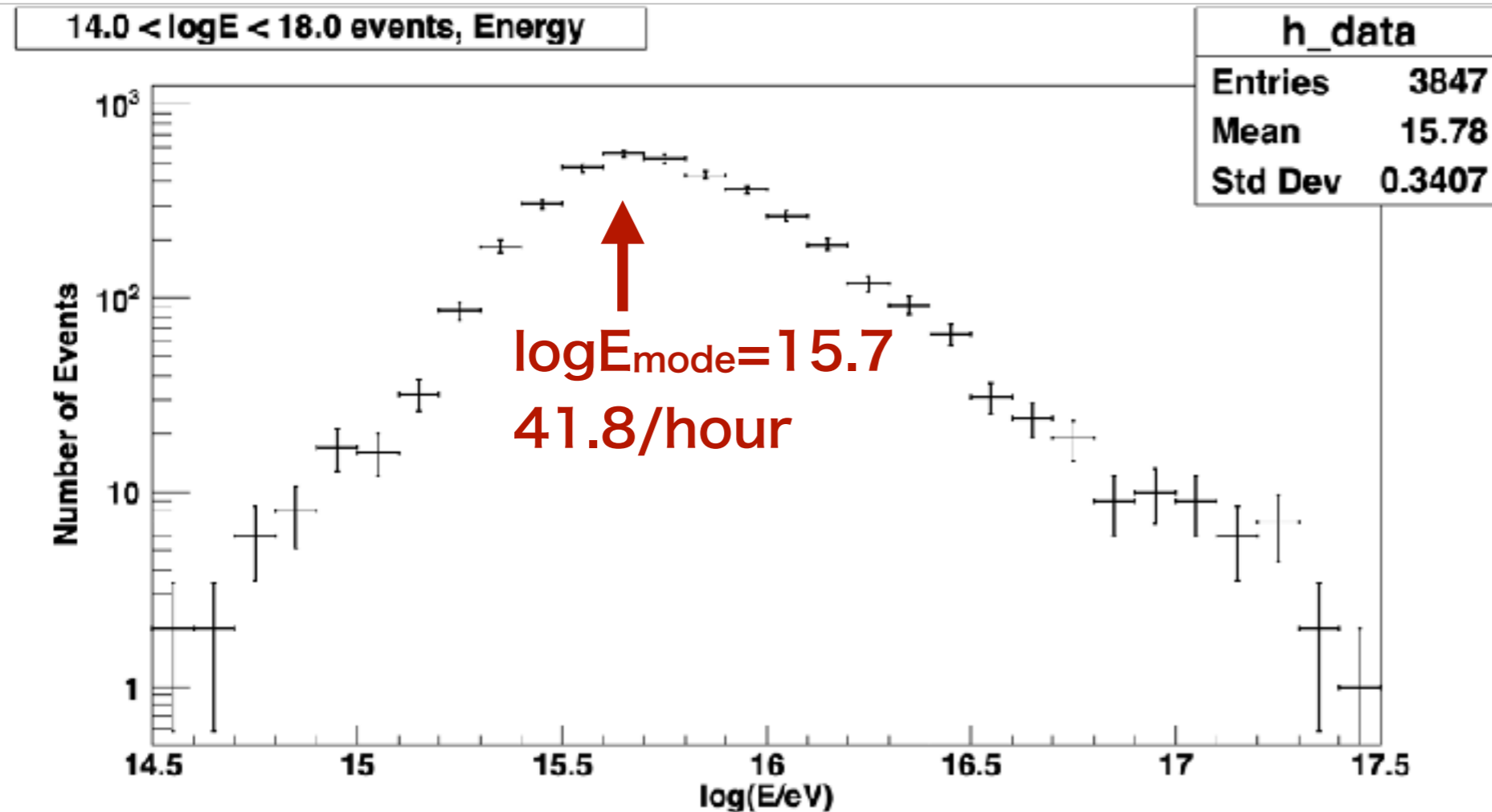
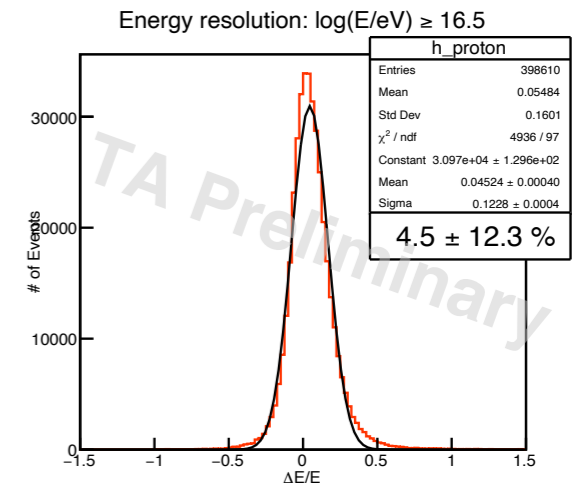
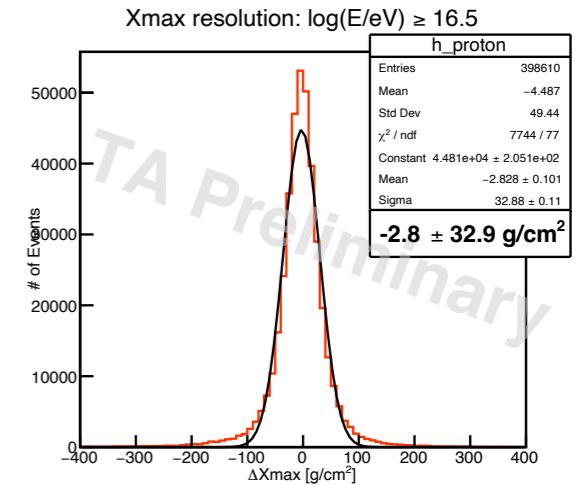


Result.	θ [deg]	ϕ [deg]	Rp[km]	ψ [deg]	coreX[km]	coreY[km]	X_{max} [g/cm ²]	log(E/eV)
infill	45.0	113.2	0.47	117.5	-7.33	19.10	650	15.12

TALE infill Hybrid 期待される性能



TALE hybrid

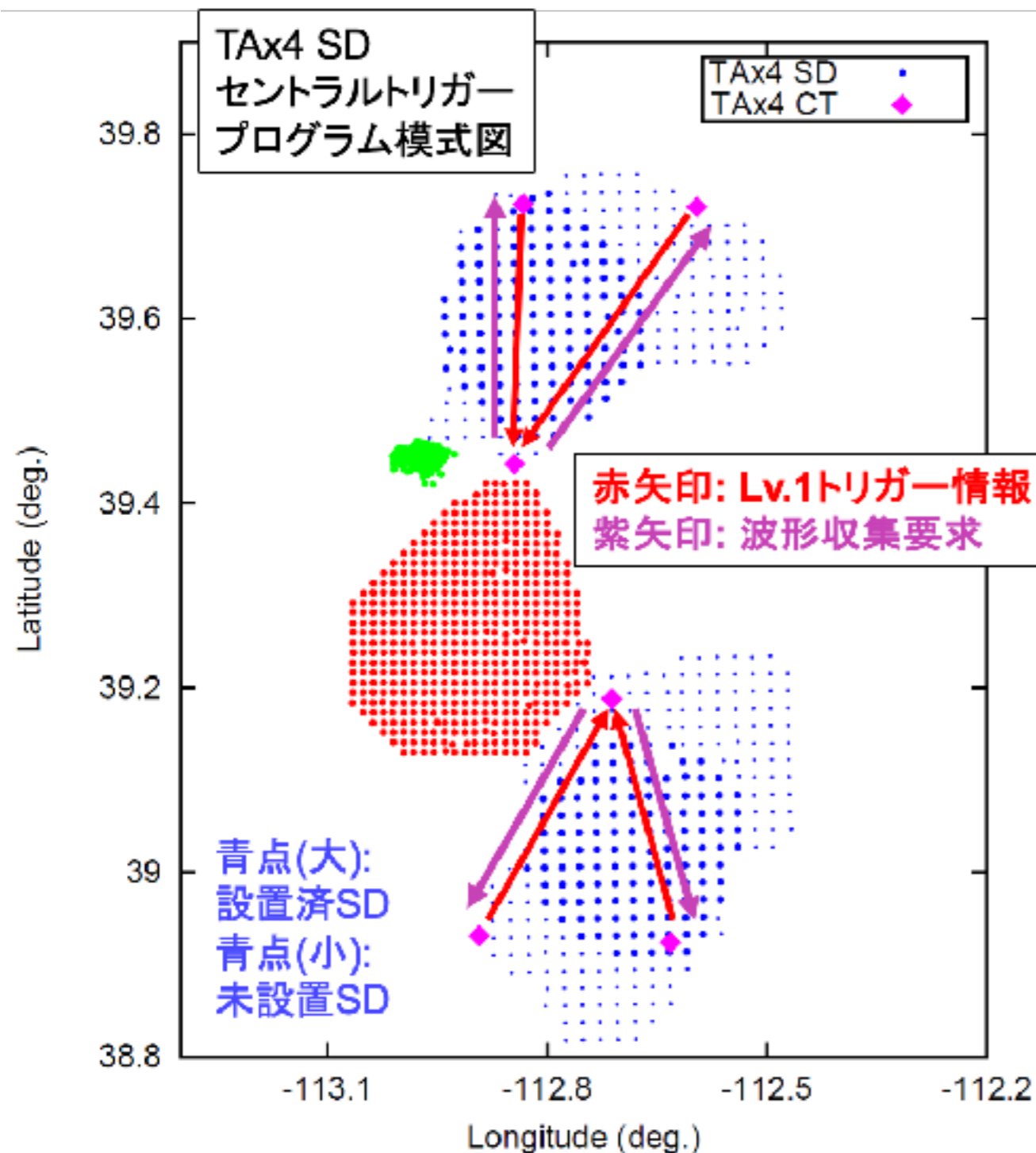


TA実験関連 共同利用費まとめ

代表者	金額	課題名	
C2野中敏幸 (ICRR)	290,000	TA実験サイトでの超高エネルギー宇宙線観測のための多チャンネル粒子弁別測定システムの開発	
F1荻尾彰一 (ICRR)	1,500,000	宇宙線望遠鏡による超高エネルギー宇宙線の研究+新任500,000円	
F2有働慈治 (神奈川大)	300,000	TA実験サイトにおける大気透明度測定法の研究・開発	
F03荻尾彰一 (ICRR)	450,000	TALEハイブリッド実験による10の17乗eV領域宇宙線の研究	
F04富田孝幸 (信州大)	200,000	ドローンに搭載された標準光源による大気蛍光望遠鏡の光学特性の評価	
F5山崎勝也 (中部大)	300,000	大気蛍光望遠鏡の自動観測を目指した夜間雲量測定用CCDカメラの開発と解析	
F6藤井俊博 (大阪公大)	700,000	TA実験サイトでの新型大気蛍光望遠鏡による超高エネルギー宇宙線観測+新任500,000円	別講演
F7多米田裕一郎 (大阪電通大)	500,000	次世代の超高エネルギー宇宙線観測のためのフレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡の開発研究	
F25富田孝幸 (信州大)	0	「コズミック・レイ」を一般語にしよう計画 (ヴァーチャルリアリティー技術の応用)	
F26木戸英治 (理研)	300,000	TAx4実験用地表検出器拡張のためのデータ収集システムの開発	
F30樋口諒 (理研)	40,000	銀河磁場モデル・質量組成モデルに基づく最高エネルギー宇宙線起源探査	別講演
合計	4,580,000	(新任承継教員2名分1,000,000円含む)	

国際共同利用についてはJ. N. Matthews氏が発表

F26木戸英治（理研） TAx4実験用地表検出器拡張のためのデータ収集システムの開発



TAx4実験用地表検出器(SD)拡張のためのデータ収集システムの開発

- 最もSDの多い(69 SD)サブアレイでは、現状データ収集システムの限界のためにSDを追加できない。
- 全てのデータをセントラルタワーに集めてトリガー判定をする、**セントラルトリガープログラム**を開発。2022年11月から安定稼働。2023年11月に詳細を一部修正。
- これまでに問題のあったLv.1トリガーのタイミングは、2022年11月 - 2023年7月の期間
 - TAx4 SD北アレイ~0.5%
 - TAx4 SD南アレイ~0.2%
 で、ほとんどはSDのGPS故障が原因。
 - **十分に小さいデータ損失**を実現
 - 今後未設置SDを設置してSDを拡張する際は、新たなサブアレイを追加し、サブアレイ間でセントラルトリガープログラムを走らせ、全体として十分損失が小さいデータ収集システムを実現する。

F04富田孝幸（信州大） ドローンに搭載された標準光源による大気蛍光望遠鏡の光学特性の評価

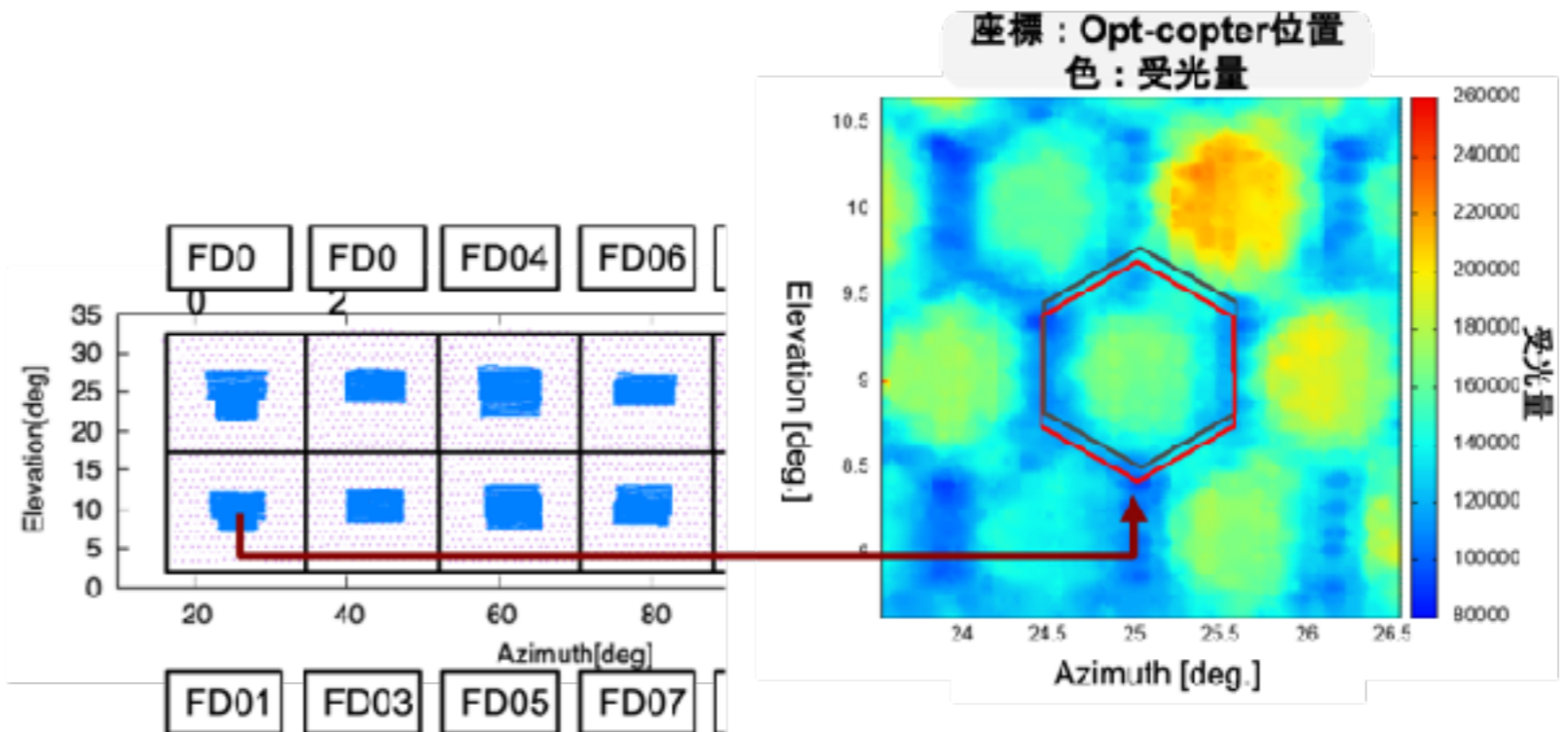
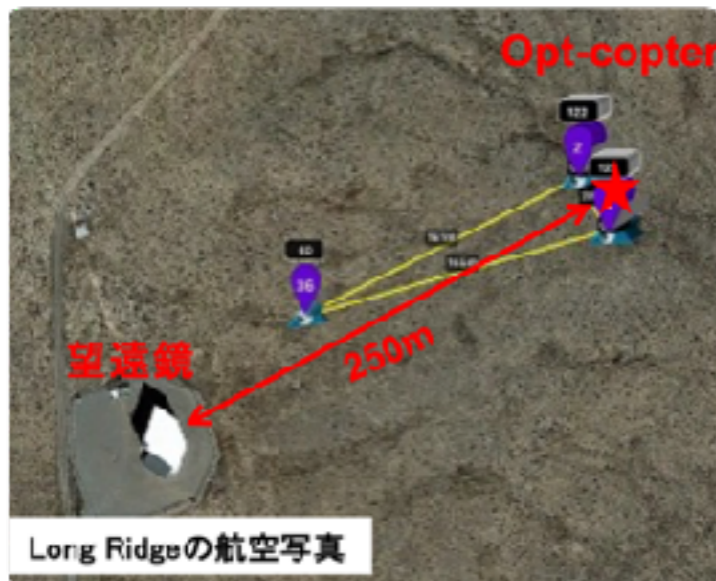


望遠鏡用 飛行型校正光源



2023年度の測定@LRサイト

- ・ コロナ後の初測定！
- ・ 新規望遠鏡サイトの測定に着手



1

次世代の超高エネルギー宇宙線観測のための フレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡の開発研究



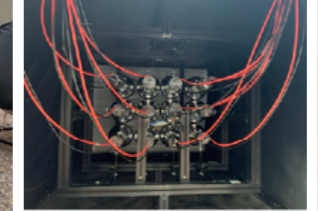
- ・ CRAFFTプロジェクト：大規模展開を想定した低コスト大気蛍光望遠鏡の開発
- ・ 望遠鏡構成のアップデート
 - ・ 望遠鏡受光部をマルチピクセル化
 - ・ 1台あたりの視野を拡張（CRAFFT1台でおおよそTAFD2台）
 - ・ 電動シャッターの導入(完全自動化の準備)
- ・ 試験観測を実施：2023年8月
 - ・ 宇宙線空気シャワー事象の取得成功

2023年8月の作業の様子

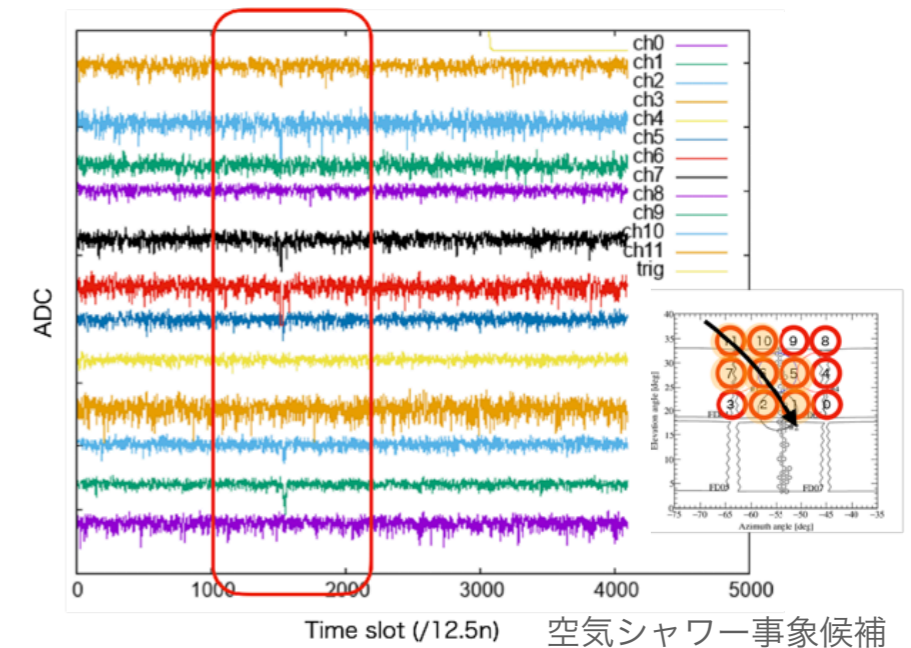
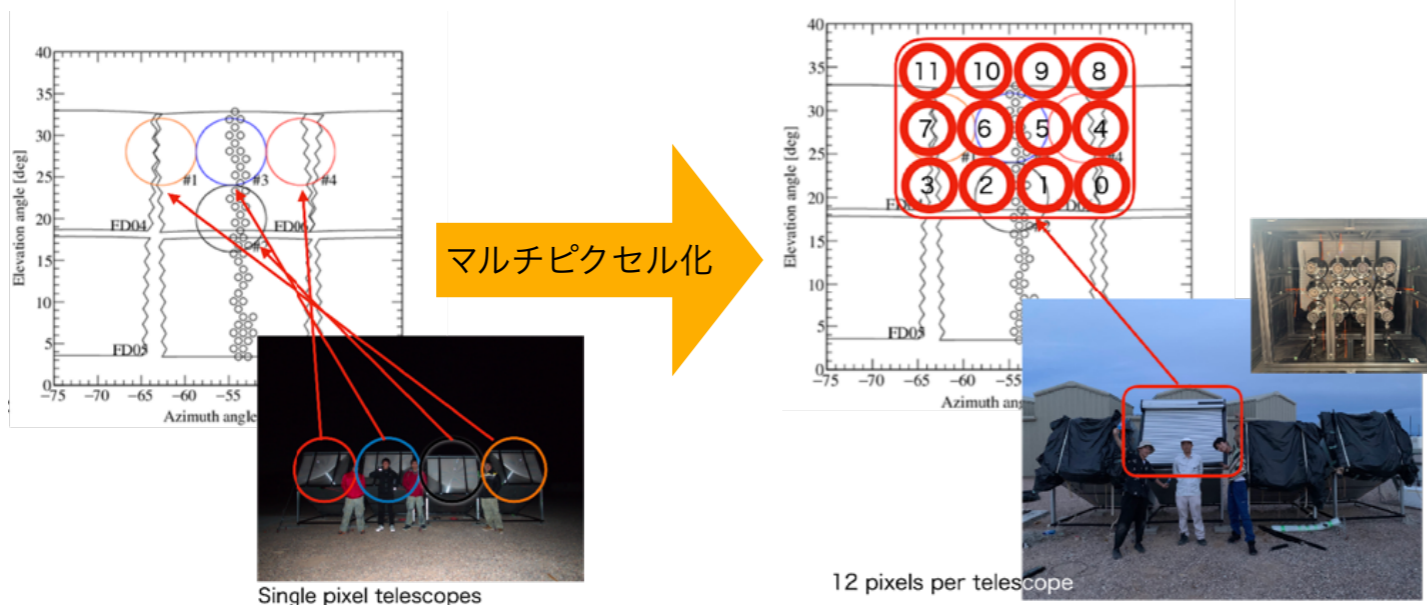
電動シャッター取付作業



マルチピクセル化した受光部



観測中のCRAFFT

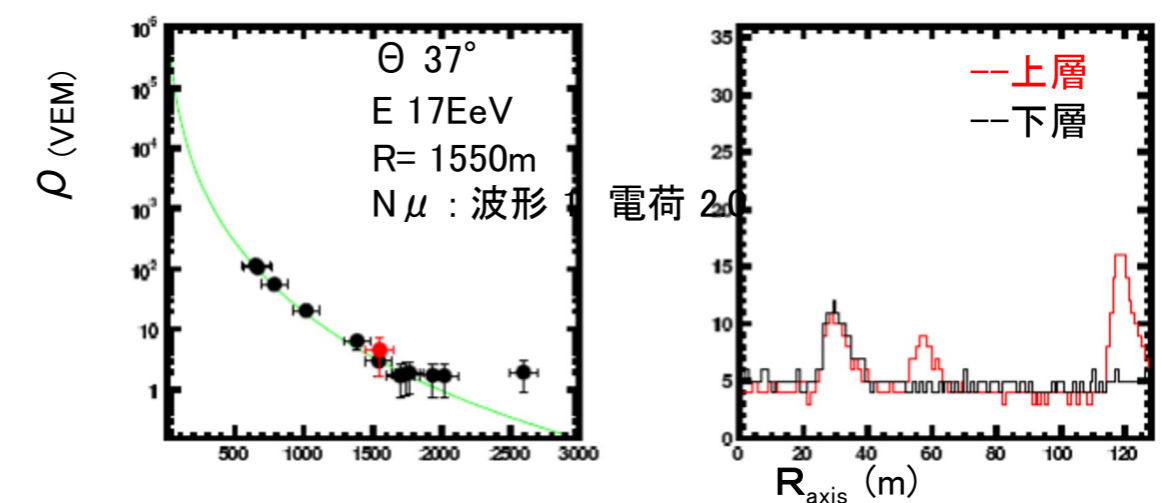
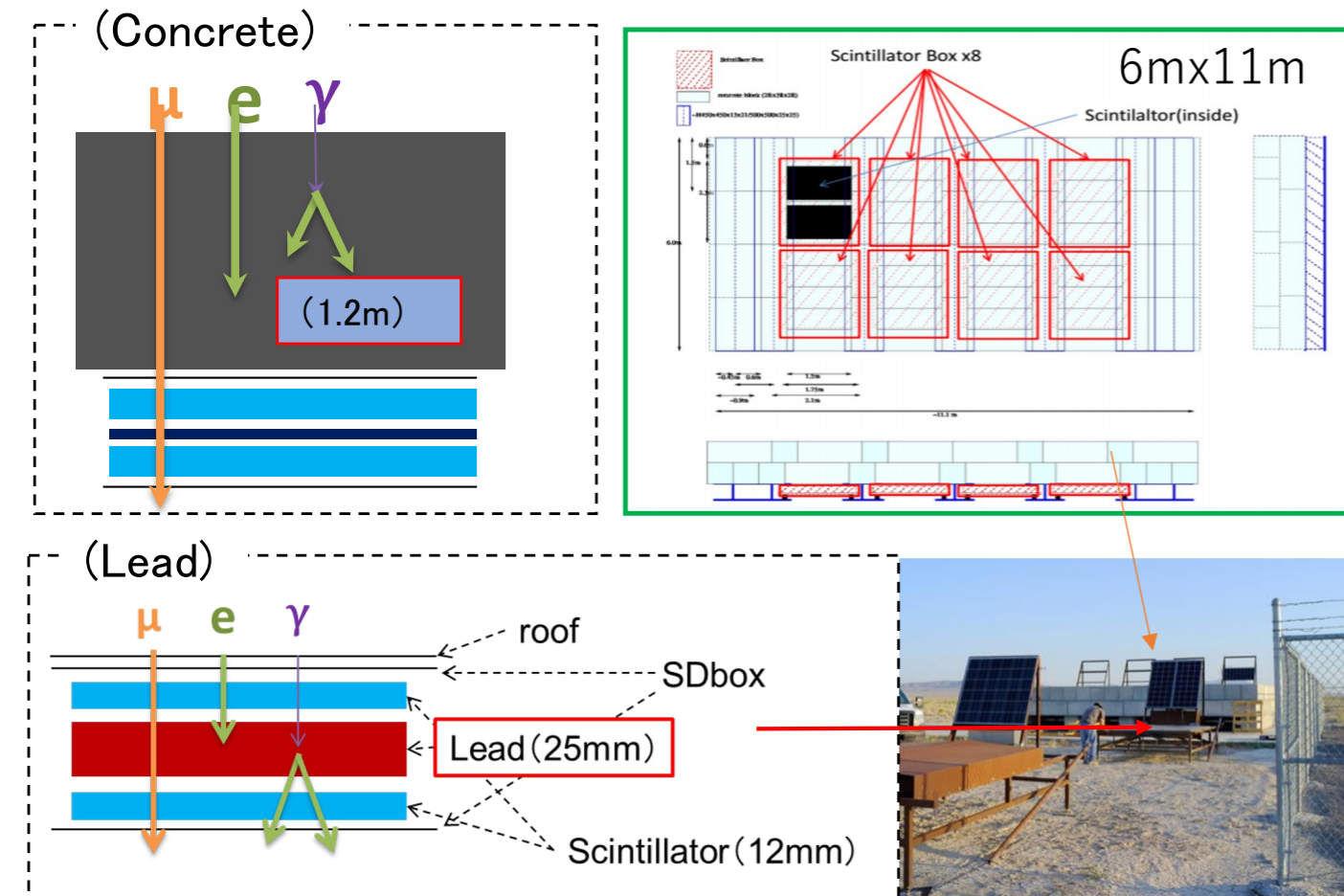


C02野中敏幸 (ICRR) TA実験サイトでの超高エネルギー宇宙線観測のための多チャンネル粒子弁別測定システムの開発

TA実験サイトでの超高エネルギー宇宙線観測のための新型検出器の開発

空気シャワー中の μ 粒子の弁別測定の可能な検出器のR&D

Real shower signal from Lead SD

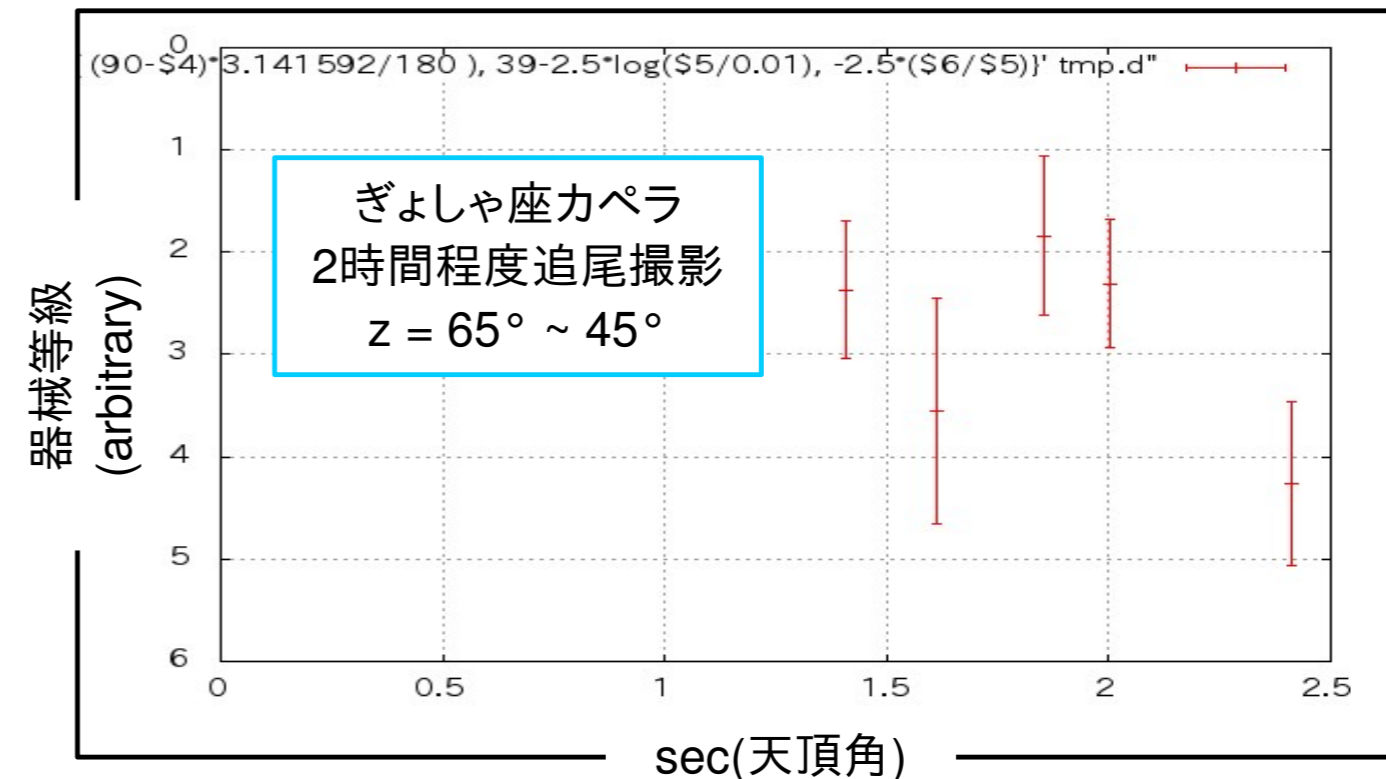
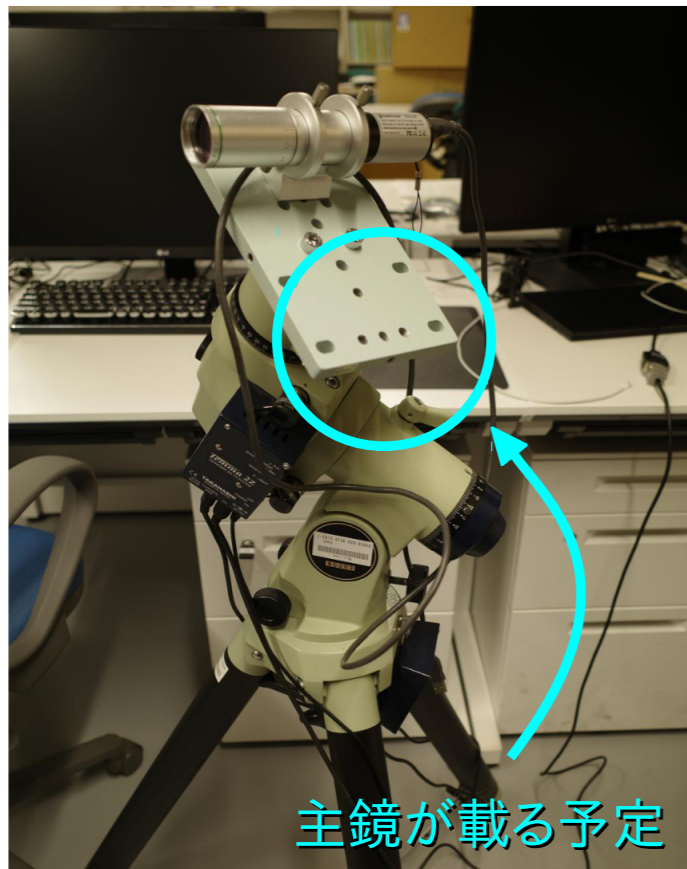
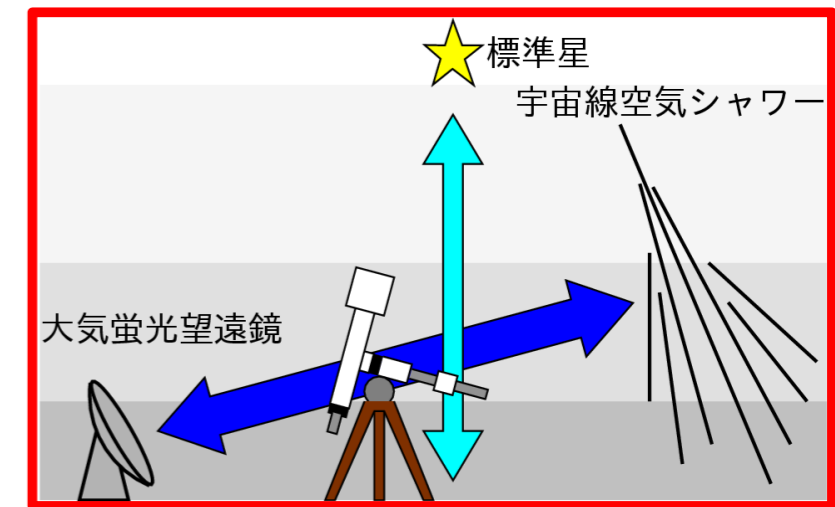


- カウント精度のシミュレーションでの見積もり (2013年度)
- 検出器製作 (2014年) → 初期観測
TAアレイとの接続、トリガー分配 (2015年)
- AugerSDへのトリガー配信 同時観測
- Auger-TA間での相互比較
- 2022年度にAuger検出器の一部がCLFサイトからTAアレイ内に移動
シャワーの同時観測が始まった。
- 現在はTAアレイとの同時観測は行われていない。今年度復旧を行う予定。コンクリート遮蔽の下のシンチレーターの動作確認を7月～8月に行った。

	E_{th}	**
Concrete(1.2m)	600MeV	~100% mu
Lead (25mm)	(70MeV)	Sensitive to EM, μ
Auger SD	(~300MeV)	Sensitive to μ (Em)

TA実験サイトにおける大気透明度測定法の研究・開発 (F-002)

- 恒星光度の追尾測定による大気状態変化の測定
 - 冷却CCDで撮影、光度の時間変化を追う
 - 画像データ → 器械等級を計算
 - 天頂角依存性
 - 副鏡による恒星の自動導入を開発中
 - 導入のずれを再帰的に修正



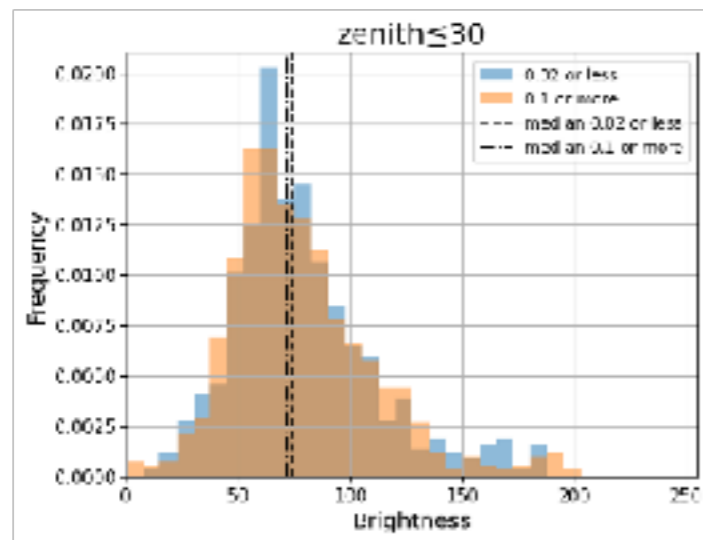
大気蛍光望遠鏡の自動観測を目指した 夜間雲量測定用CCDカメラの開発と解析(2023d-F-005)

□ 夜天画像に映る星の明るさと大気透明度

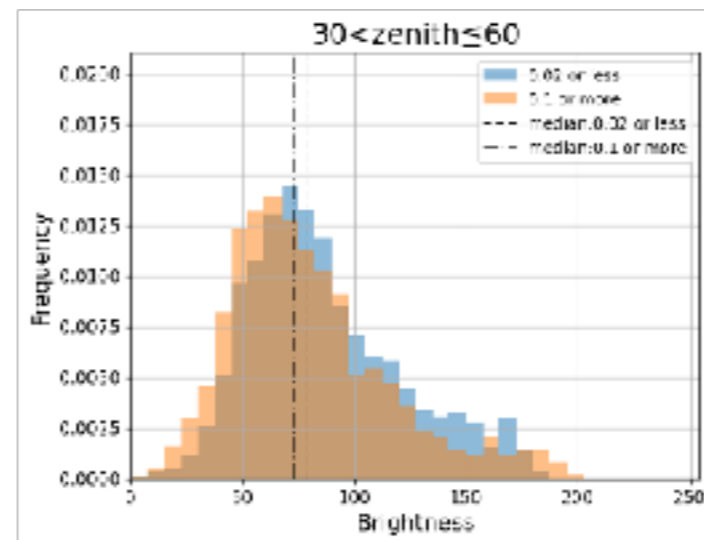
・ 夜天画像に映る星の明るさと天頂角
の相関

- VAOD < **0.02 (非常に綺麗)**
- VAOD > **0.1 (非常に汚い)**
- を比較して傾向を調査
- 相関が確認できた

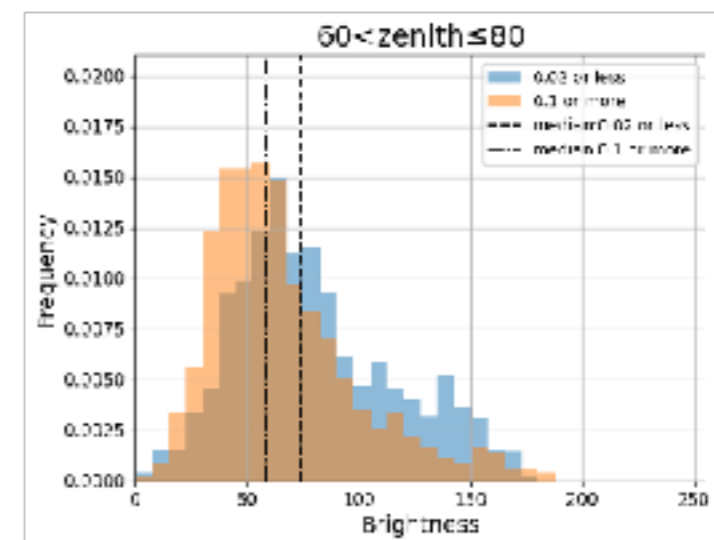
光が大気を通る距離：



中央値：**74.0 71.9**



79.7 73.2



73.7 58.6

	0~30°	30~60°	60~80°
輝度中央値の差	2.8%(2.1)	8.5%(6.5)	22.8%(15.1)
期待される差	8%(5.8)	10%(7.6)	20%(13.2)

F25 富田孝幸 (信州大) 「コズミック・レイ」を一般語にしよう計画 (ヴァーチャルリアリティ技術の応用)

🪐 コズミックレイの可視化



VRアプリ使用の様子



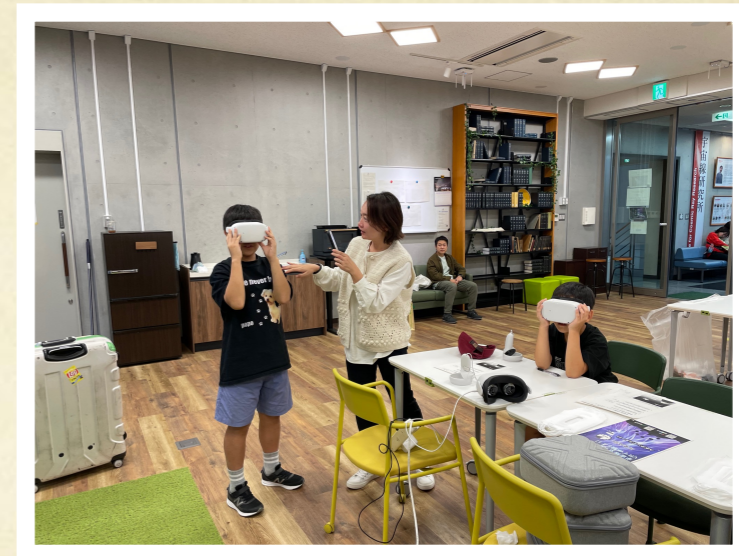
タブレットアプリ使用の様子



F25 富田孝幸（信州大）「コズミック・レイ」を一般語にしよう計画 （ヴァーチャルリアリティ技術の応用）

コンテンツの使用実績

- ・ 大阪市立科学館“ヴァーチャルリアリティ技術（VR）で見えない宇宙線の3D体験をしよう”，2023年3月11日，2023年10月29日
- ・ 長野工業高校特別講義，2023年11月7日
- ・ 東京大学 教養学部，惑星地球科学実習，2023年6月
- ・ 岡山県立津川高等学校 SSH，2023年7月
- ・ 東京大学宇宙線研究所 一般公開，2023年10月27日
- ・ 神奈川大学 オープンキャンパス，2023年8月18日
- ・ 名古屋大学 学祭，2023年6月10日
- ・ STEAMサミットin信州2023，2024年2月10日
- ・ 青山学院横浜英和小学校 特別授業，2024年3月1日
- ・ 佐久こども未来館でイベント展示，2024年5月～



ICRR一般公開



大阪市立科学館の講演イベント

Summary

地表検出器アレイによる観測

- TA×4実験SDアレイによる最高エネルギー領域スペクトル
- 大天頂角事象の解析→統計量増大、ニュートリノ事象探査

FDとSDによるハイブリッド観測結果

- $10^{16.5}$ eVから $10^{19.5}$ eVまでのFD+SD観測による原子核組成
- TA-Augerの系統的違いの理解をすすめた→ $10^{19.5}$ eVではよく一致

TALE infill : knee領域へ

- 2023年10月より定常ハイブリッド観測を継続、順調にデータ蓄積
- TALEハイブリッドとおなじ観測精度を $10^{15.5}$ eV=kneeまで維持

その他の研究成果

- TA×4SDアレイのトリガー系の改良
- TA FDの較正
- 次世代観測装置の開発研究のプラットフォーム
 - CRAFFT、粒子弁別SD、FASTなど
 - 大気状態のモニター装置（大気透明度、雲量）
- アウトリーチのためのコンテンツ開発、実践