

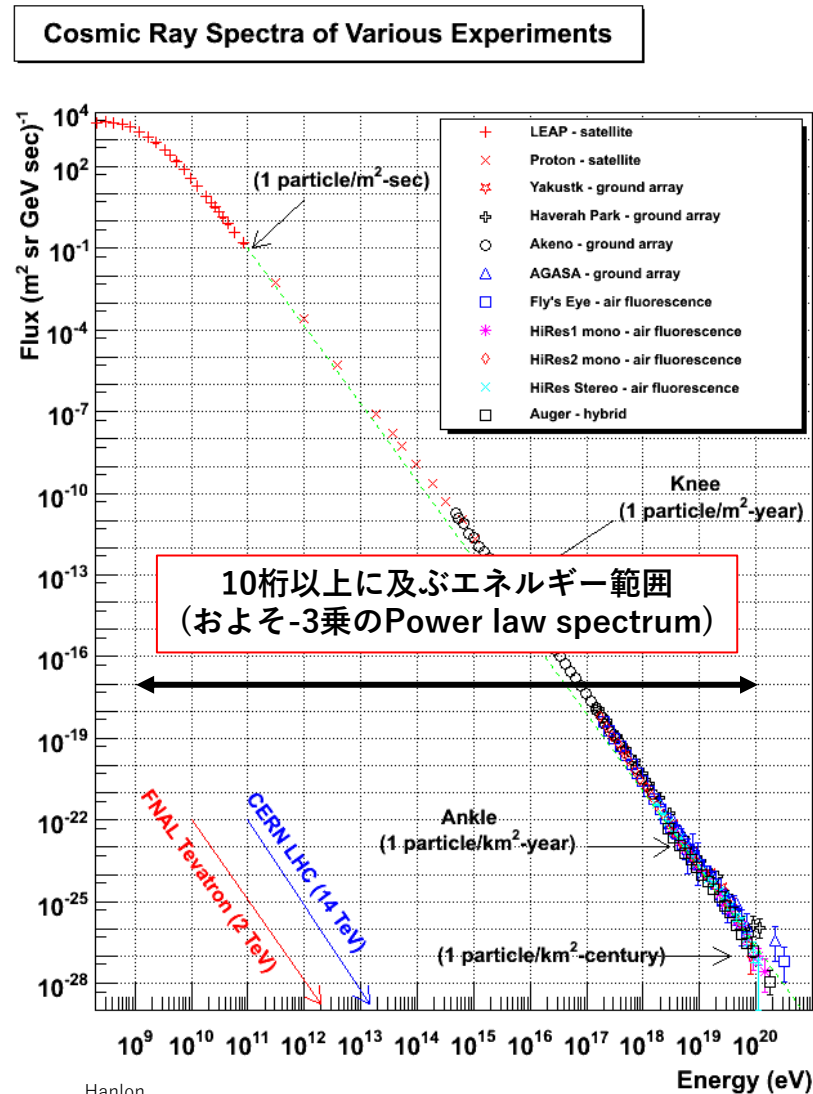
The Measurement of the Energy Spectrum
and Depth of Maximum Shower Development of
Ultra-High-Energy Cosmic Rays Collected by
the Telescope Array with the Hybrid Trigger Mode

HEUNGSU SHIN
OSAKA METROPOLITAN UNIVERSITY

CRC TOWN MEETING
2025-03-11

イントロダクション

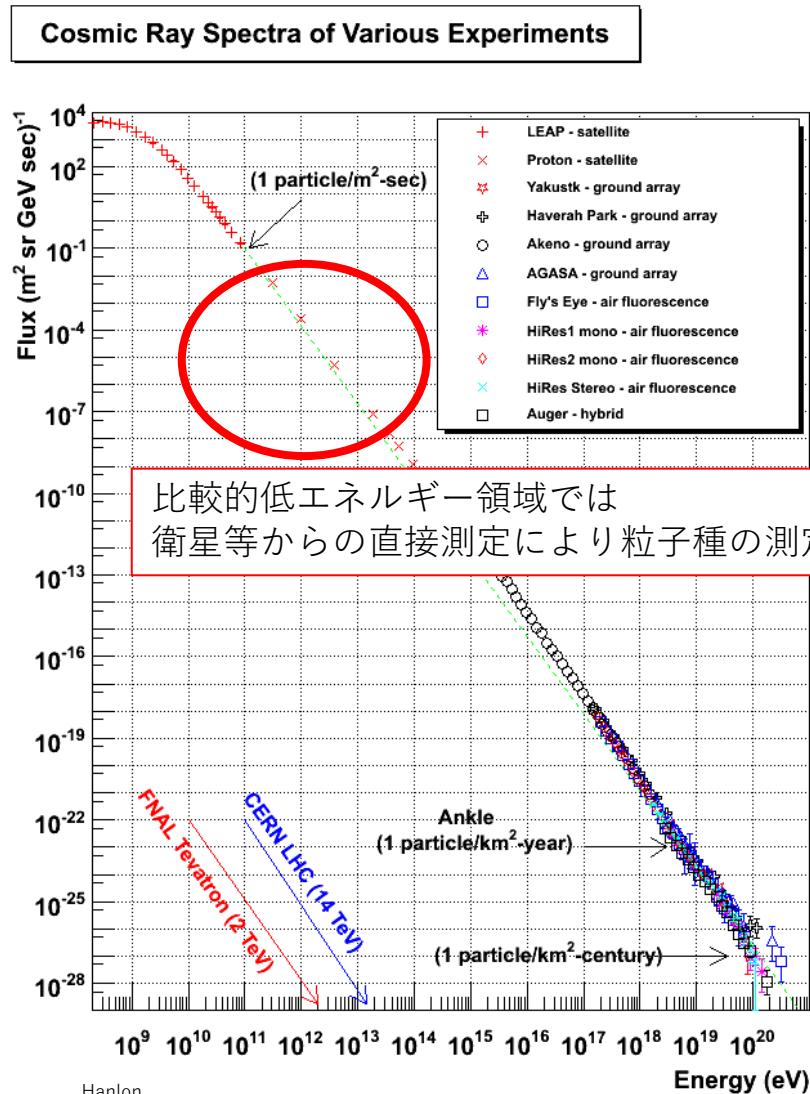
全粒子Flux



Hanlon
<https://web.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum.html>

イントロダクション

全粒子Flux

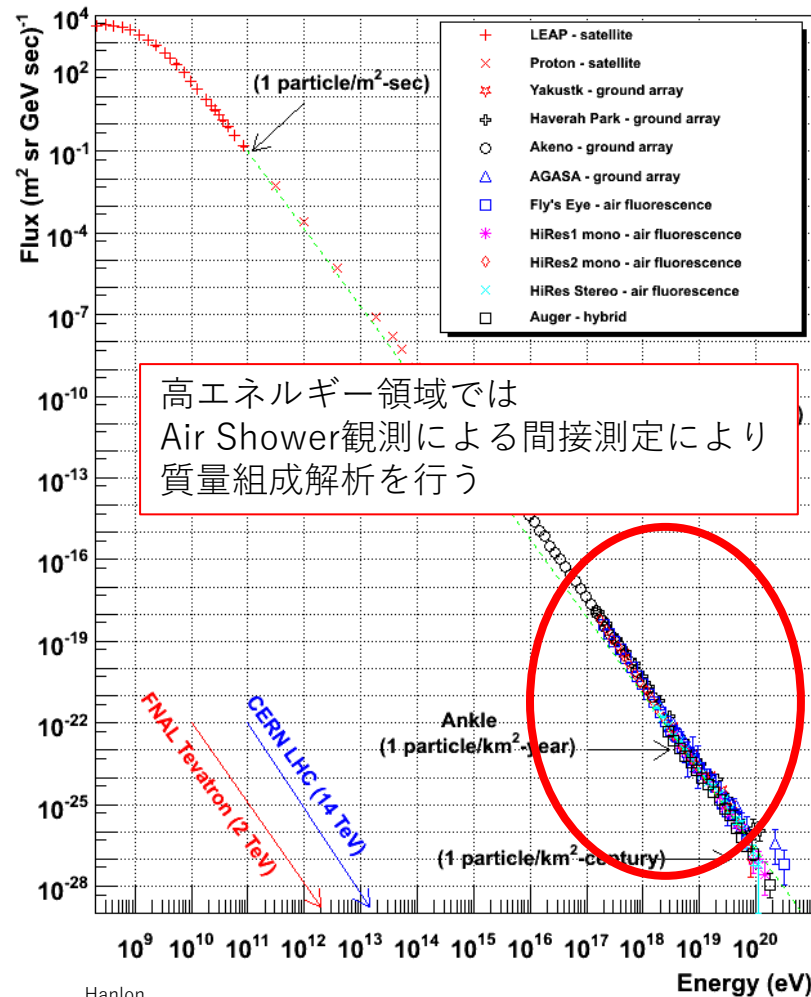


比較的低エネルギー領域では
衛星等からの直接測定により粒子種の測定が可能

イントロダクション

全粒子Flux

Cosmic Ray Spectra of Various Experiments

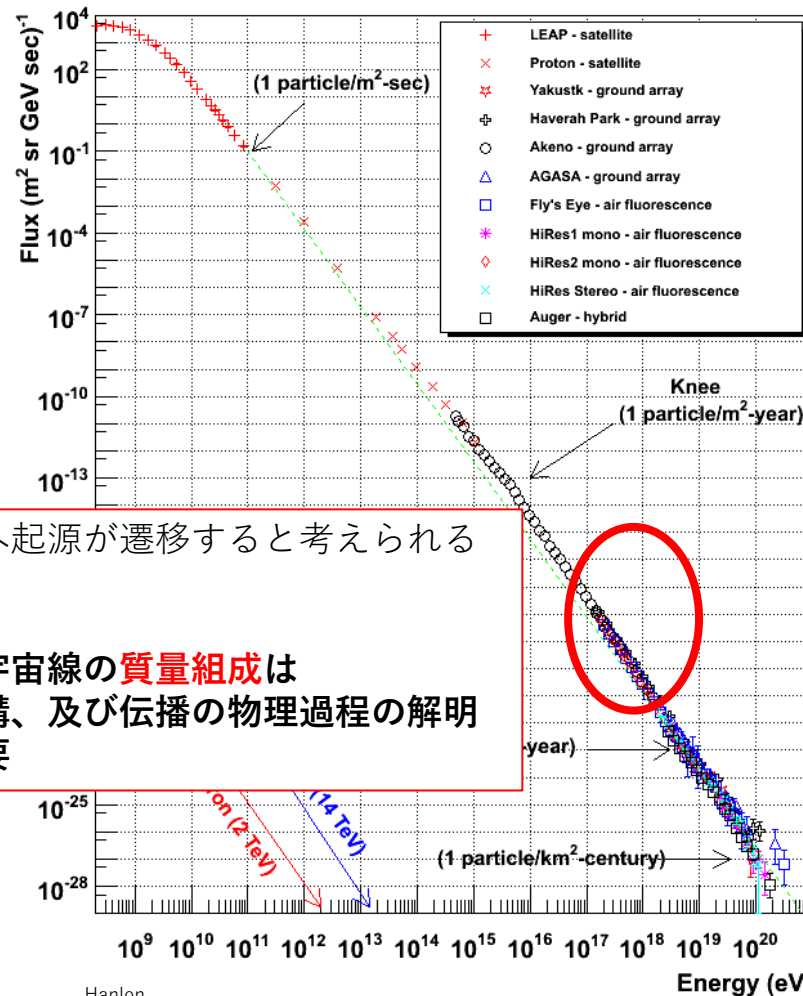


Hanlon
<https://web.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum.html>

イントロダクション

全粒子Flux

Cosmic Ray Spectra of Various Experiments

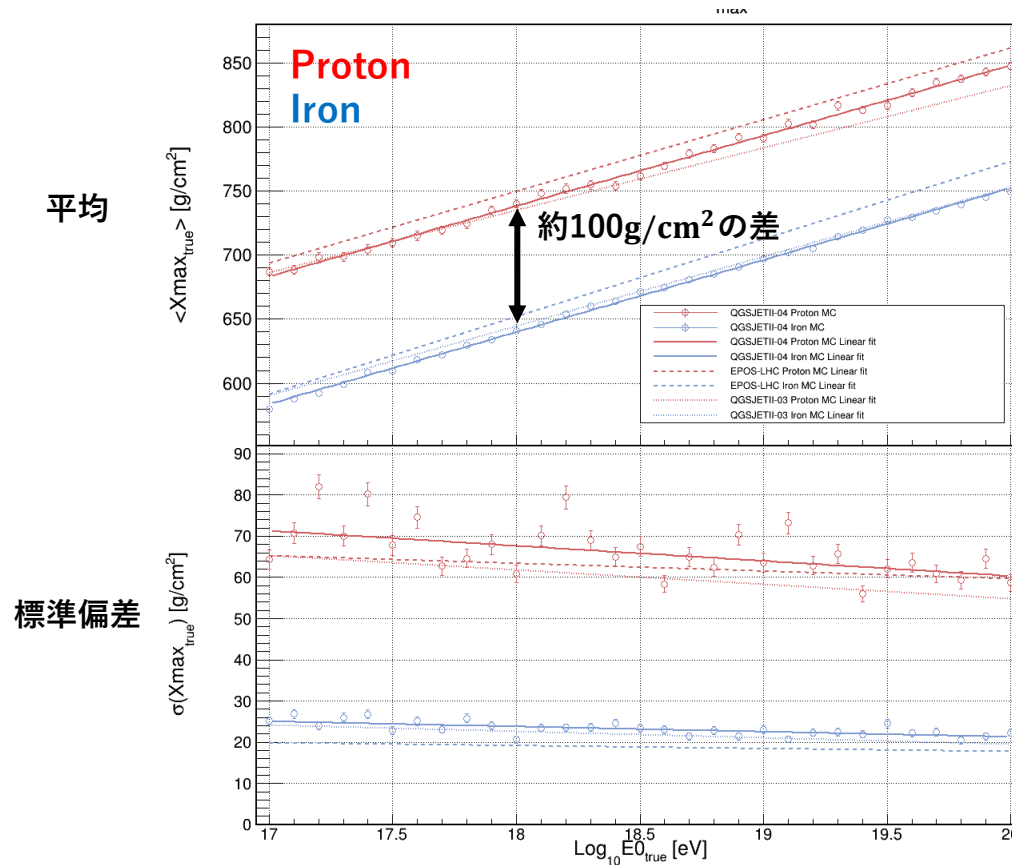


銀河系内から系外へ起源が遷移すると考えられるエネルギー領域

この領域における宇宙線の質量組成はその起源、加速機構、及び伝播の物理過程の解明において極めて重要

イントロダクション

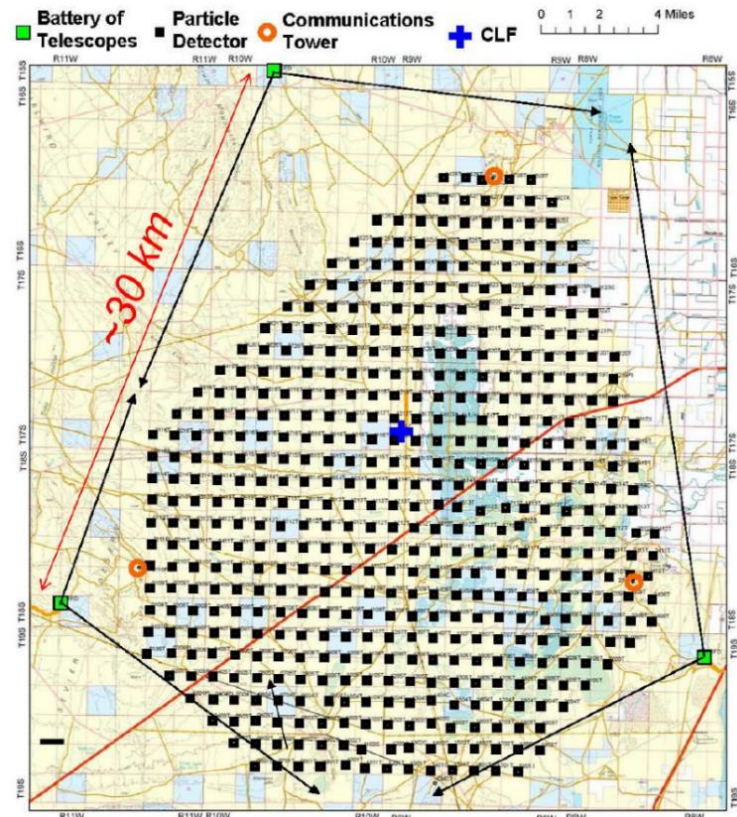
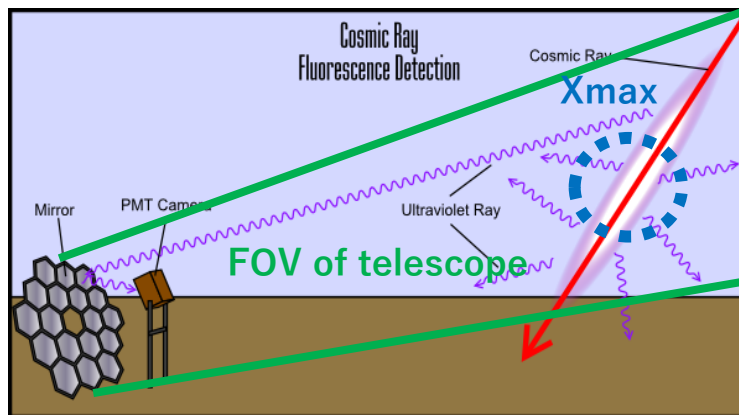
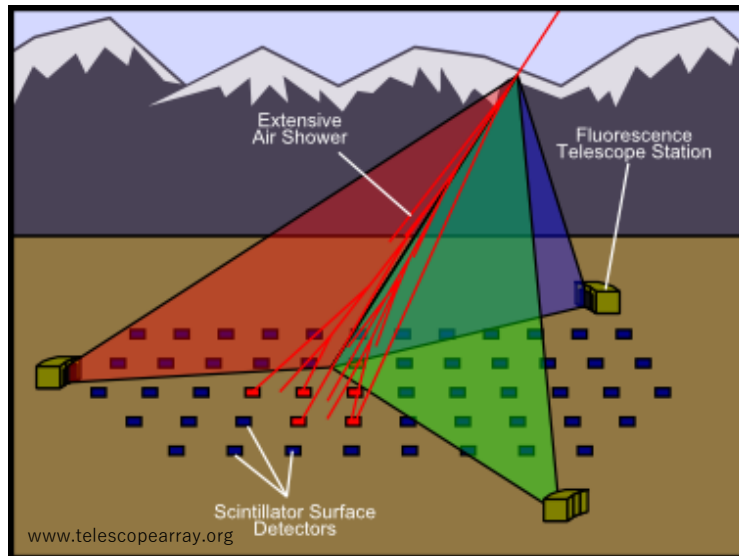
CORSIKA MC simulated air showersのXmax分布の平均、標準偏差



Air showerを観測する間接測定では、
質量組成にsensitiveなobservableを測定することで質量組成の解析が行われている

→本解析では質量組成にsensitiveなobservableとしてXmax(Air Showerの最大発達点)を採用

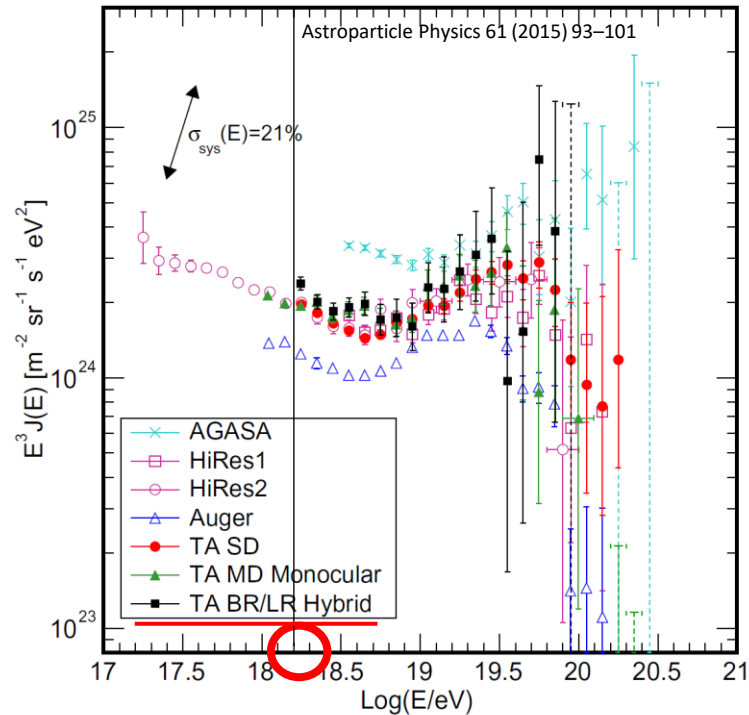
イントロダクション



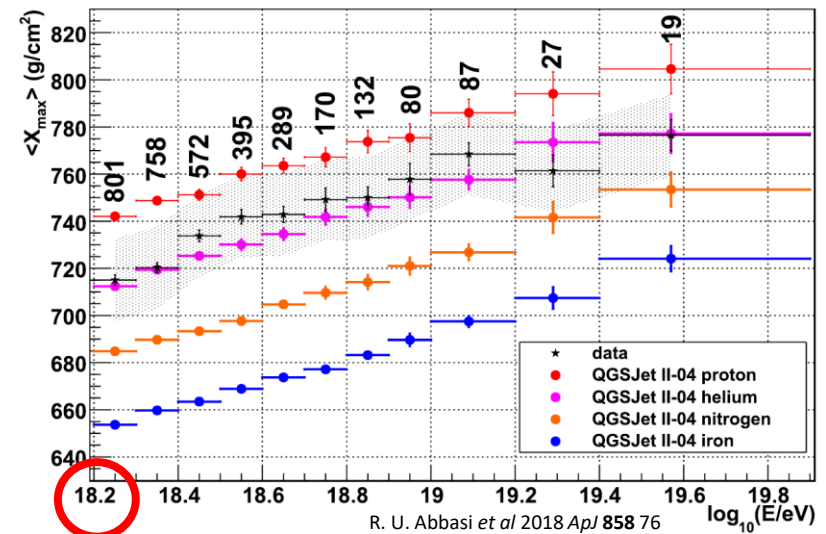
TA実験は大気蛍光望遠鏡(FD)並びに地表検出器(SD)のレイも運用している
そのゆえ同一Air showerをFDとSDの両方で観測するHybrid観測が可能
(FDのみの観測より良いResolutionでAir showerの X_{max} を測定できる)
TALE、TAの低エネルギー側拡張実験も同様のHybrid観測が可能)

イントロダクション

先行のTA Hybrid解析により得られた
エネルギースペクトル



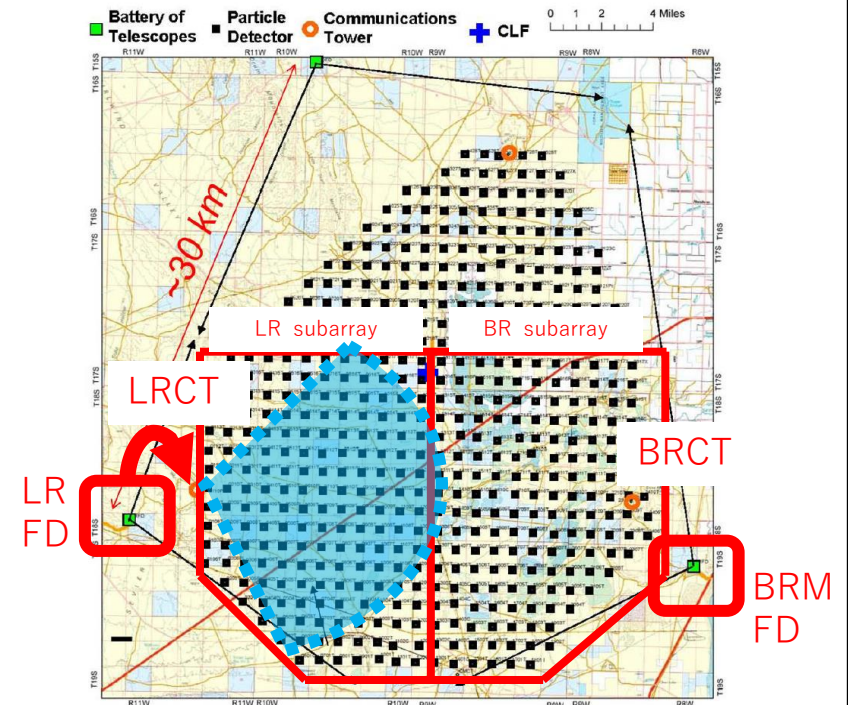
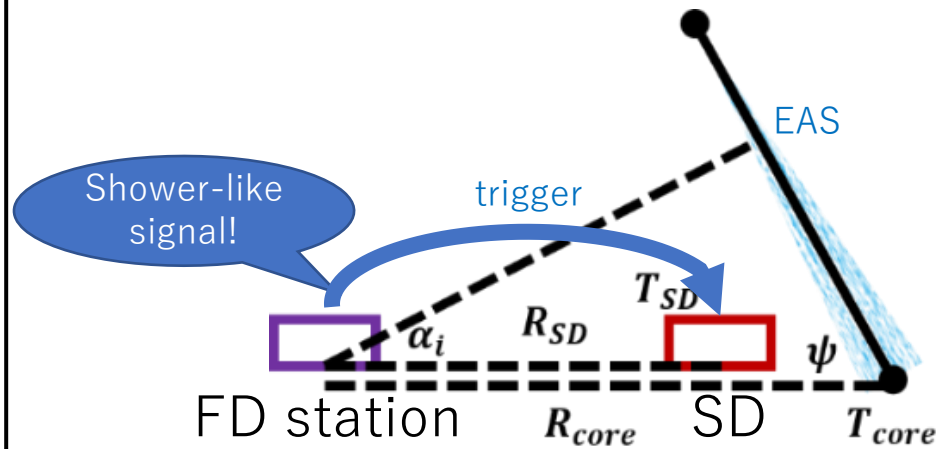
先行のTA Hybrid解析により得られた
Xmax elongation rate



TAにおける先行のHybrid解析はFDとSDで別々に取得したデータを使っていたため、Hybrid解析のEnergy thresholdは $10^{18.2} \text{eV}$ となっていた
(SD arrayのSelf-trigger efficiencyによる制限)

イントロダクション

Hybrid trigger systemの模式図



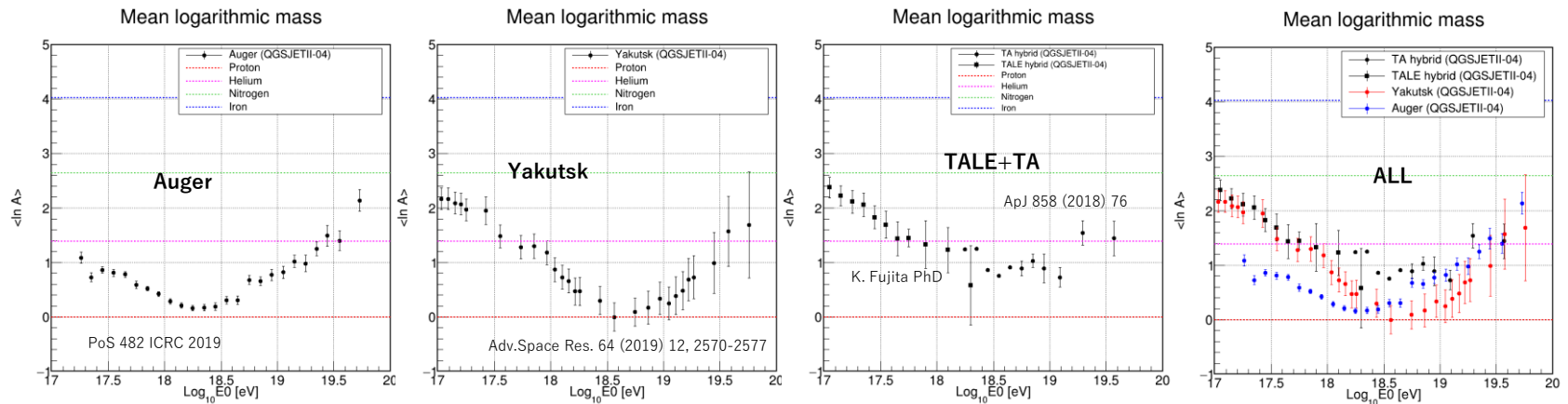
SD self-trigger条件に満たないイベントでもFDからSDアレイをtriggerする、
Hybrid triggerの開発、実装によりHybrid解析のEnergy thresholdを下げる事ができた
Hybrid trigger modeは2010年10月8日から定常稼働中である

ではHybrid解析のEnergy thresholdを下げると何が面白い？

イントロダクション

$$\langle \ln A \rangle = \frac{X_{\max}^{\text{obs}} - X_{\max}^{\text{proton}}}{X_{\max}^{\text{iron}} - X_{\max}^{\text{proton}}} \cdot \ln A_{\text{iron}}$$

複数の現行超高エネルギー宇宙線観測所による
質量組成測定結果 in $\langle \ln A \rangle$



Auger及びYakutsk実験は 10^{17} eV以上で重い組成から軽い組成への遷移を報告し、 $10^{18.3 \sim 18.5}$ eV付近で最高エネルギー宇宙線の質量組成が最も軽くなる結果

TALEとTAもそれと指示する結果を報告しているが、 $10^{18.3 \sim 18.5}$ eVはTALEとTAの両解析の解析可能エネルギーの端であるため、大きい統計かつ一貫したInstrumentを使った質量組成の測定が難しかった

→ $10^{18.3 \sim 18.5}$ eV領域はもちろん、出来るだけ広いエネルギー範囲かつ同一Instrumentを用いて $10^{18.2}$ eVより低いエネルギーからの質量組成遷移を測定することがHybrid trigger modeを使った本解析のモチベーション

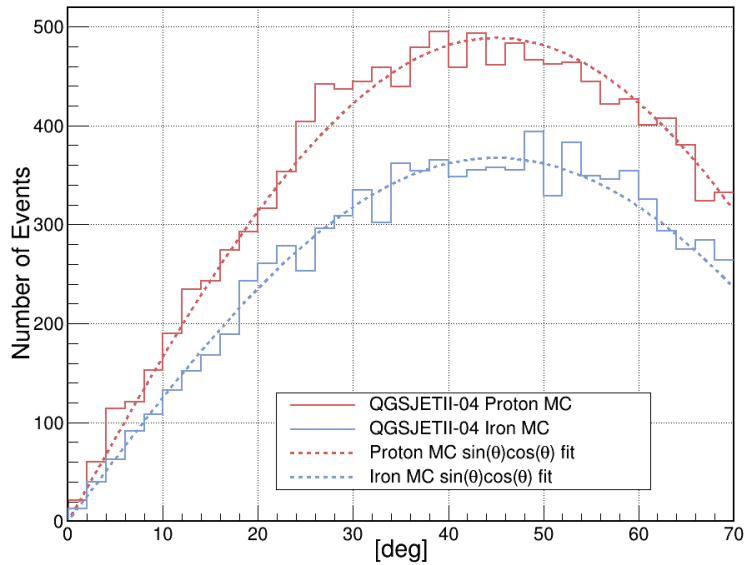
解析

Generation condition	Parameters
Composition	Proton, Iron
Energy range in logE [eV]	17.0 - 20.0 (0.1 decade bin)
Zenith θ [deg]	0 - 70
# of CORSIKA simulated EAS per energy bin	Proton: ~400 Iron: ~301
Hadronic interaction model	QGSJET-II-04
Period	~8.5 years
Atmospheric model	GDAS
Shower core position	Inner 25 km radius from CLF && Distance limit from FD

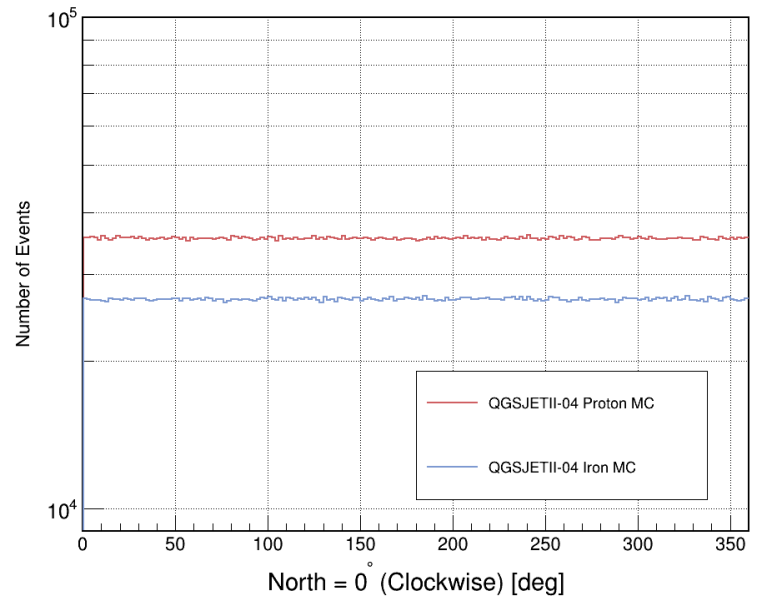
上記の表の条件で、Hybrid TriggerのためのDetector response MC setを作成した

解析

CORSIKA generated EAS θ distribution



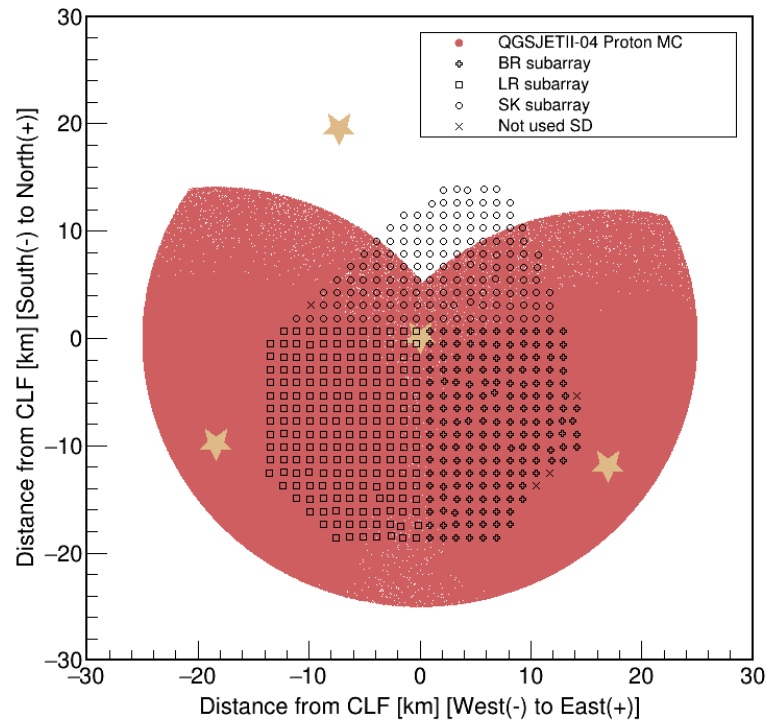
Hybrid Trigger MC thrown ϕ distribution



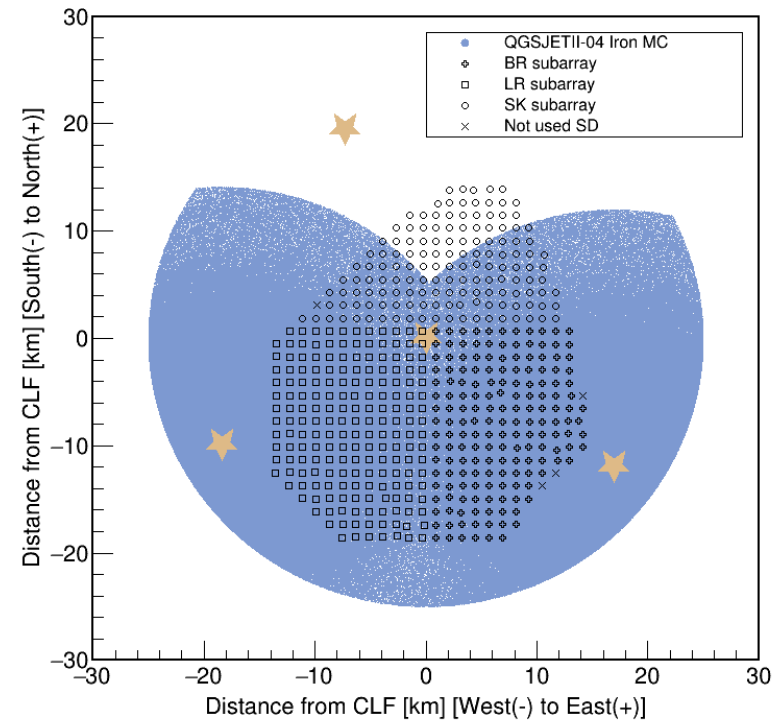
CORSIKA simulated EASのZenith分布、及びDetector MC setのAzimuth分布

解析

Hybrid Trigger MC thrown core position



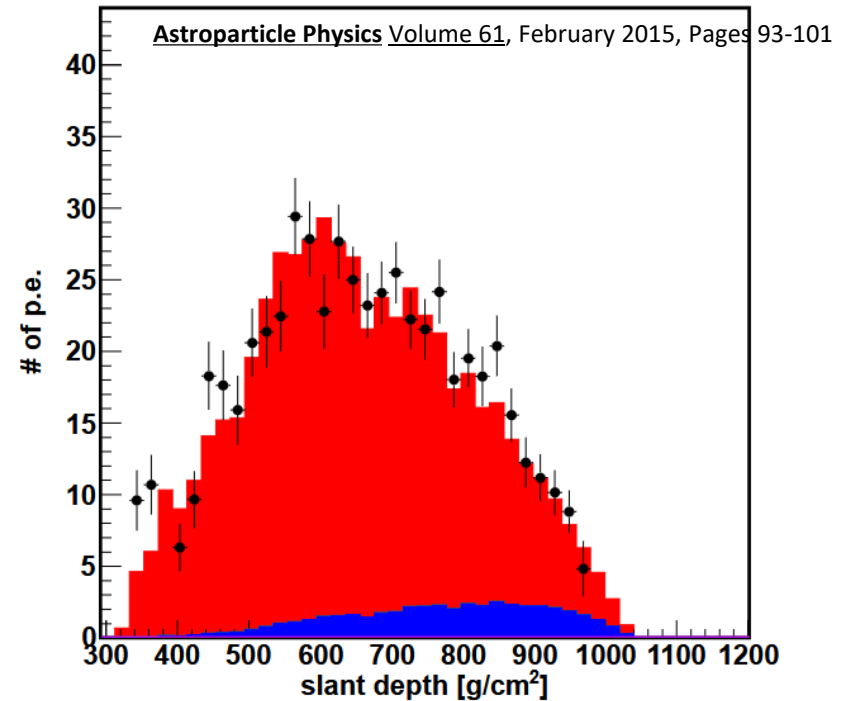
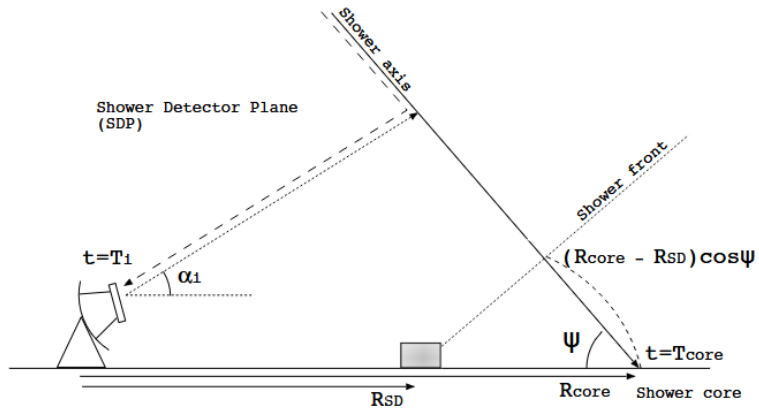
Hybrid Trigger MC thrown core position



Detector MC setのCore position分布

解析

Astroparticle Physics Volume 61, February 2015, Pages 93-101

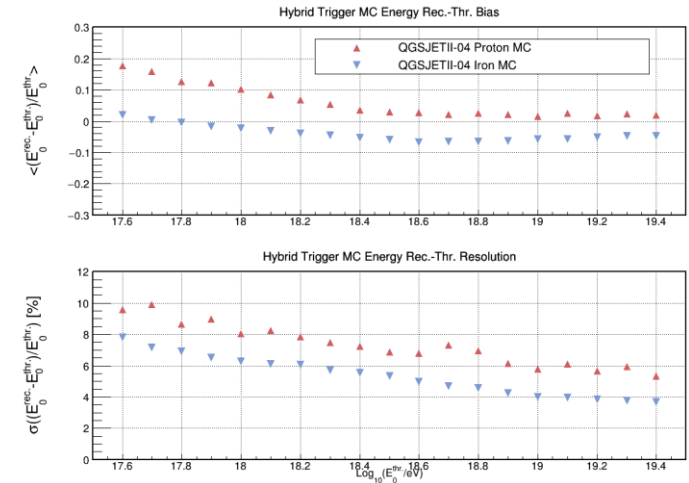
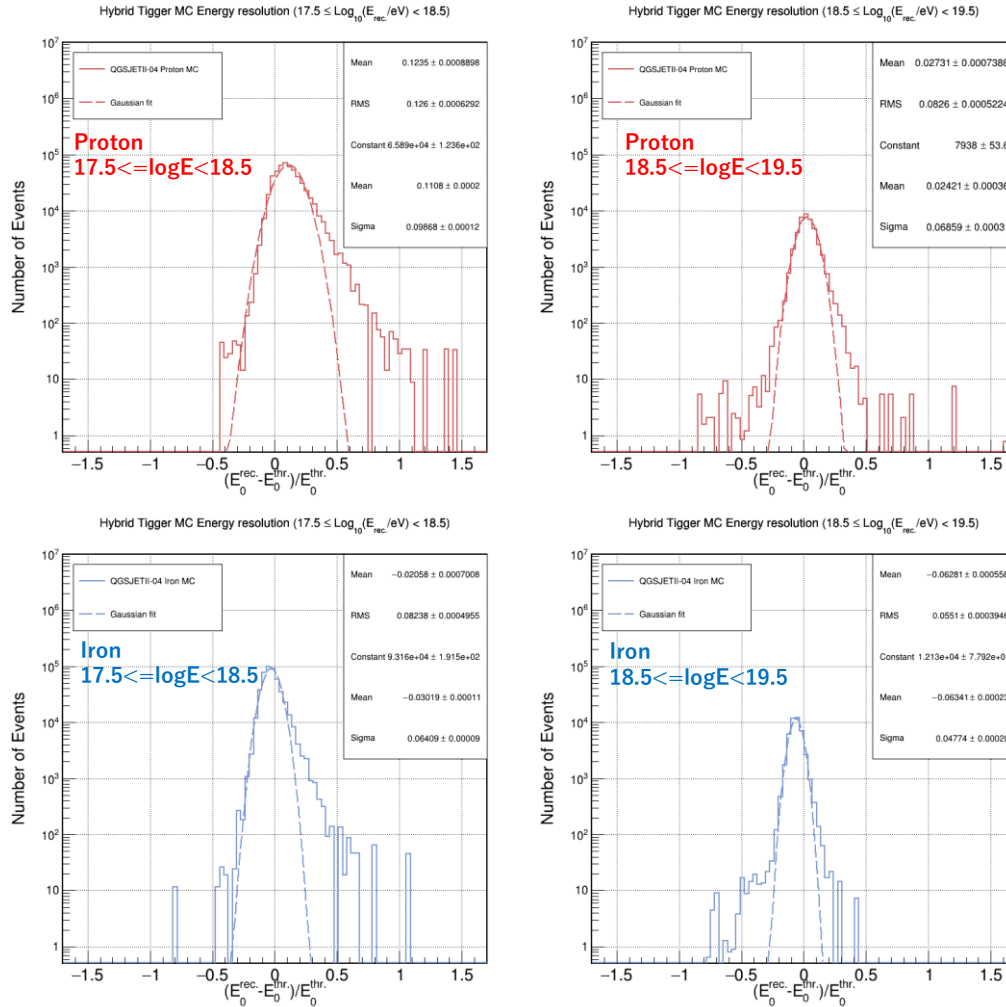


Geometry determination using SD information

Profile determination using IMC

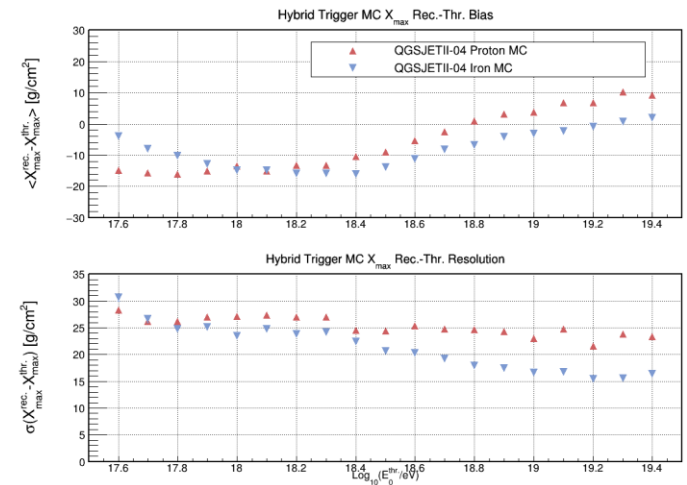
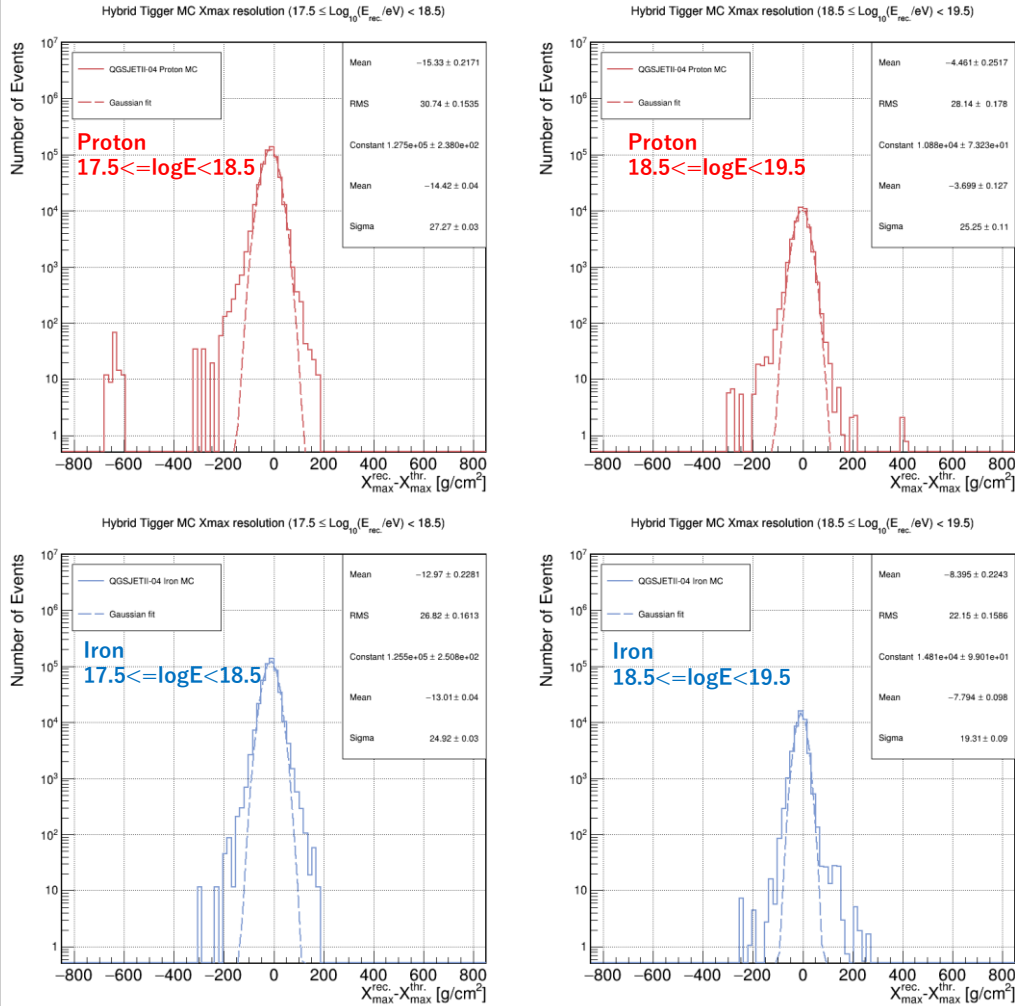
ShowerのGeometry及びProfile再構成は先行研究で開発されたものを踏襲、
再構成パラメーターのみ調整

解析



CORSIKAを使ったEAS MC simulations及びDetector simulationを行い、
Hybrid trigger解析における再構成Resolutionを見積もった
Energy再構成Resolution < 10%

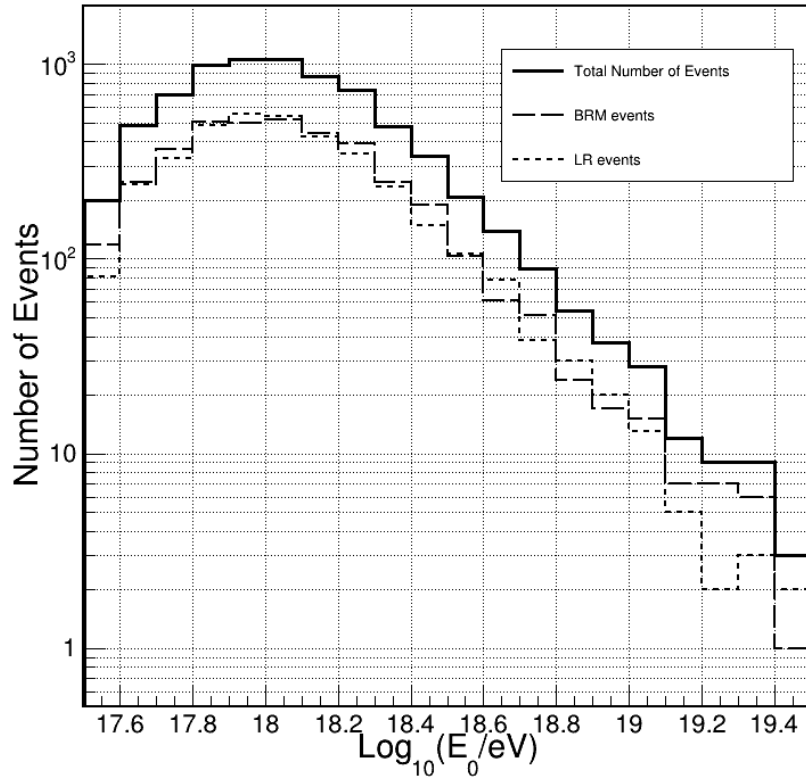
解析



CORSIKAを使ったEAS MC simulations及びDetector simulationを行い、
Hybrid trigger解析における再構成Resolutionを見積もった
Xmax再構成Resolution < 27 g/cm²

解析

Hybrid Trigger 8.5 yrs obs. Energy Distribution

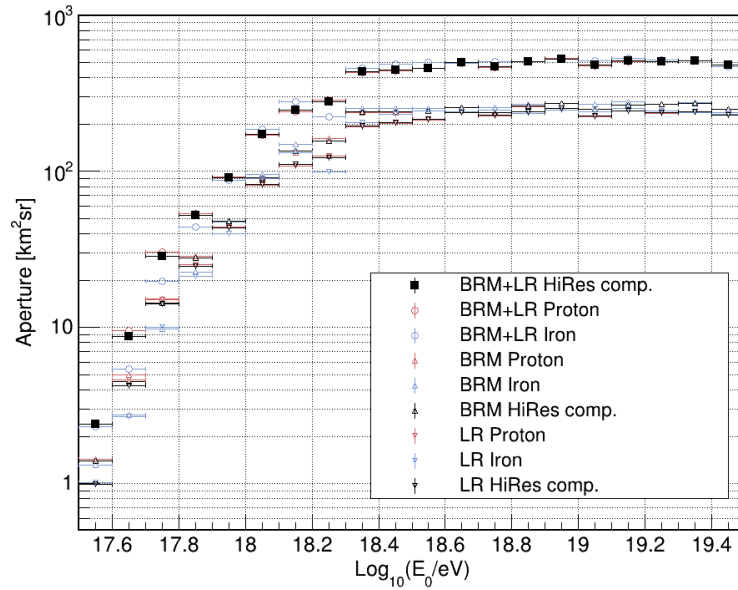


Criterion	Number[BRM]	Ratio[BRM]	Number[LR]	Ratio[LR]
Total triggered	42419	100 %	48008	100 %
Geometry recon.	14265	34 %	12622	26 %
Profile recon.	13823	33 %	12219	25 %
PMT number cut	13119	31 %	11401	24 %
Track length cut	12694	30 %	11036	23 %
θ cut	11467	27 %	9817	20 %
MVA cut	9297	22 %	8103	17 %
$X_{\max}$ bracketing	7090	17 %	6915	14 %
Fiducial volume cut	4678	11 %	4656	10 %
Energy cut	4568	11 %	4526	9 %
Boundary cut	3787	9 %	3647	8 %

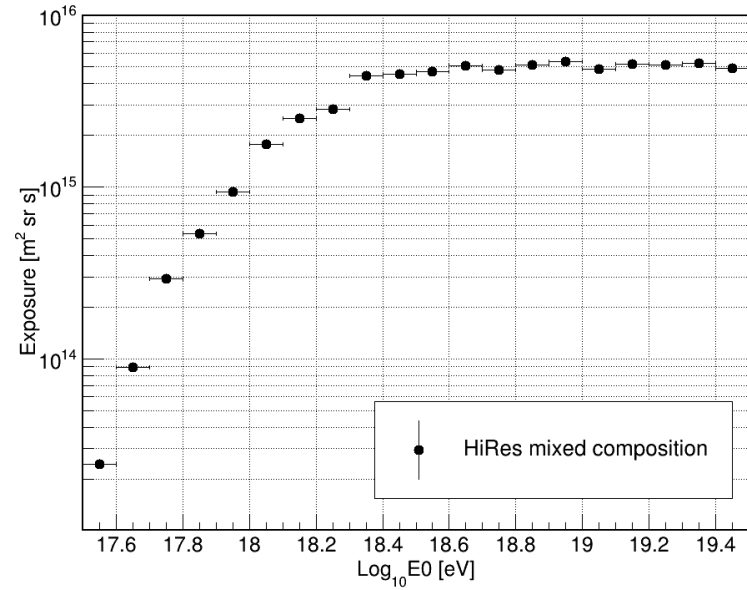
Hybrid trigger systemの8.5年分の運用で $10^{17.5 \sim 19.5}$ eV領域で7434 eventsを観測した
 $10^{17.5 \sim 18.5}$ eV領域の全てのEnergy binで>100 eventsとなる

解析

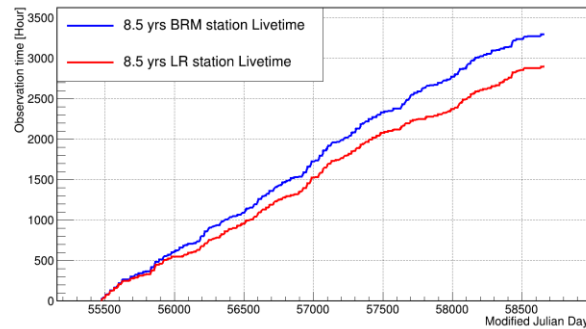
Hybrid Trigger Aperture



Hybrid Trigger 8.5 years Combined Exposure



Hybrid trigger 8.5 yrs Observation Cumulative Livetime

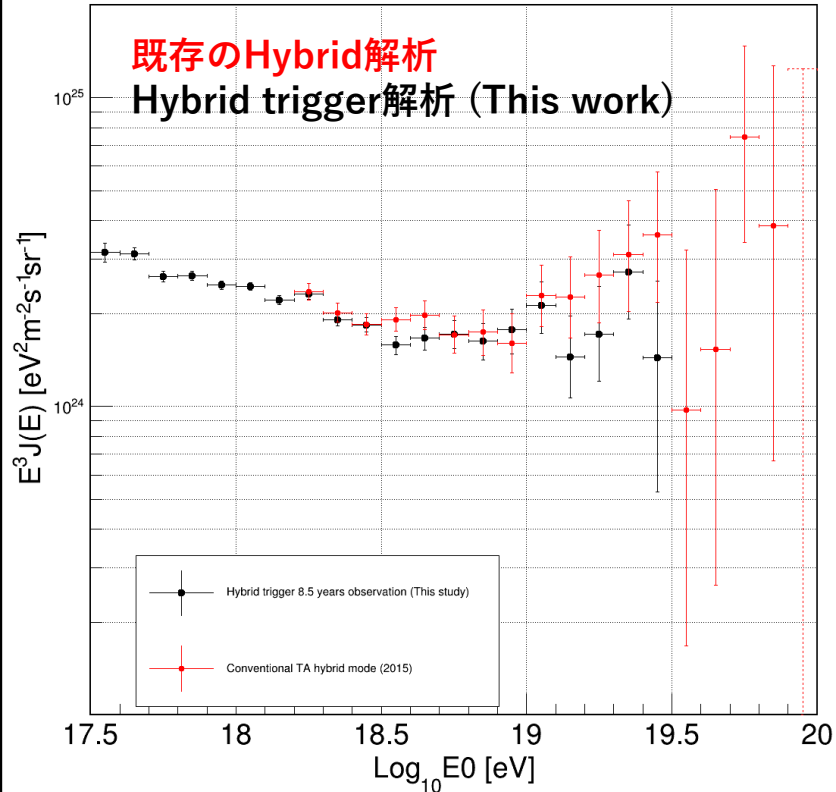


~3300 hours
~2900 hours

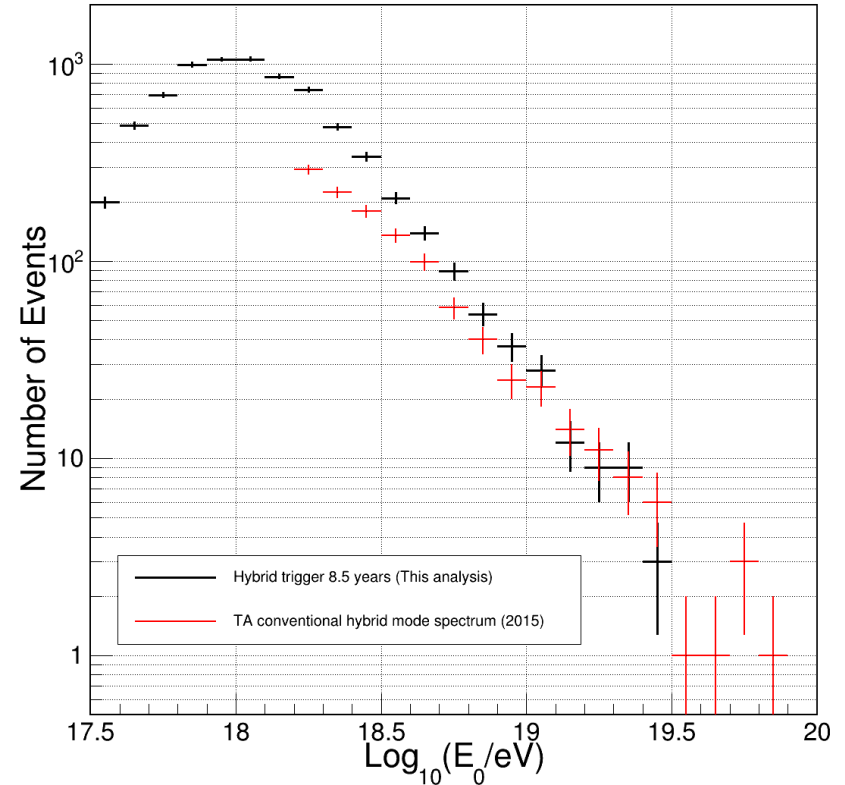
作成したMC setからApertureを計算し、算出したHybrid trigger modeのLive timeからExposureを計算した
質量組成はHiRes実験が測定したcomposition fractionを使った

解析

Energy spectrum



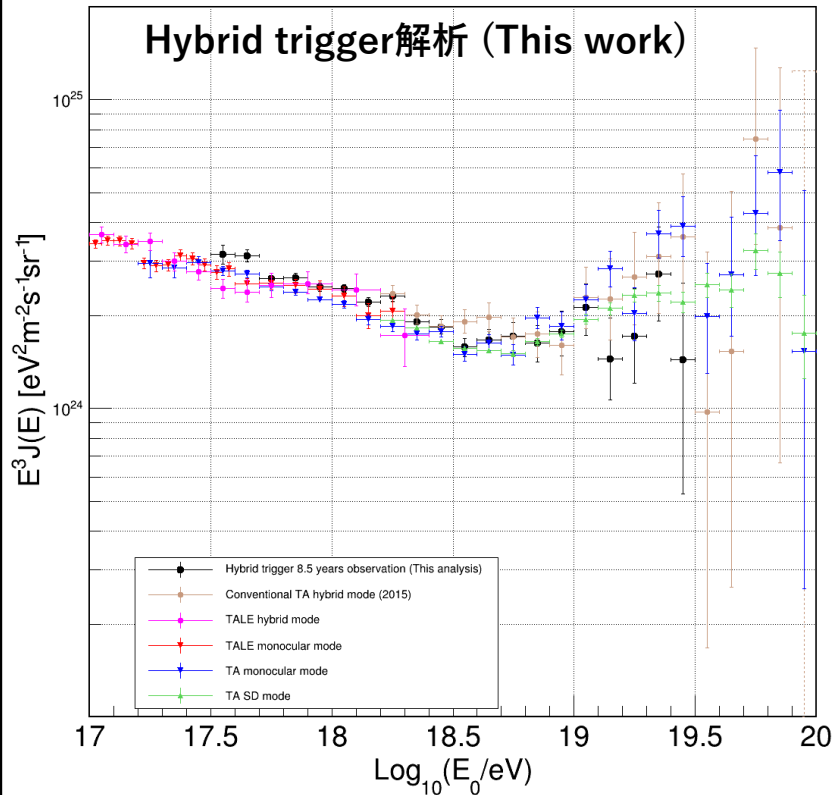
Energy Distribution comparison



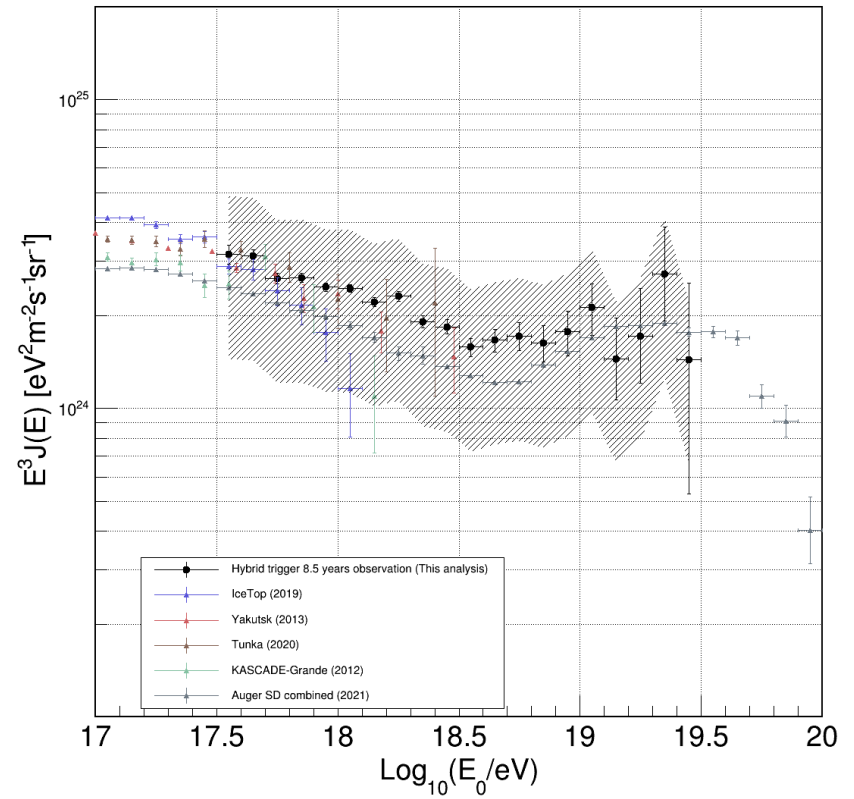
先行のHybrid解析よりも大きいobservation data setを使用、
かつ $10^{17.5} \text{eV}$ までHybrid解析で得られたエネルギースペクトルを拡張した
本解析結果は既存の解析結果とConsistentである

解析

TA実験の別の観測Modeとの比較
Energy spectrum

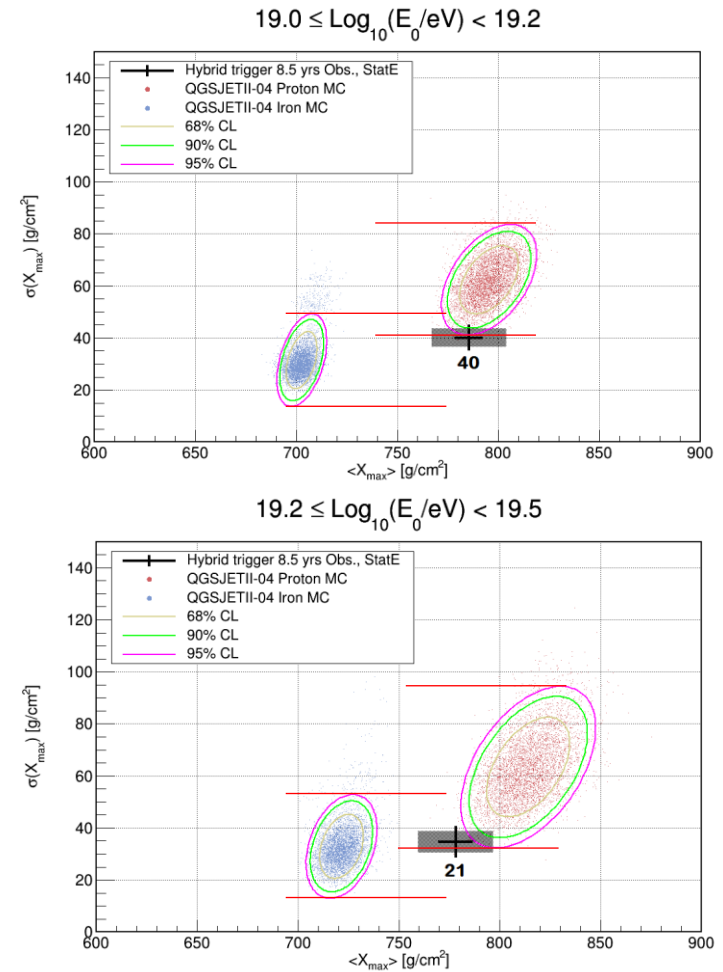
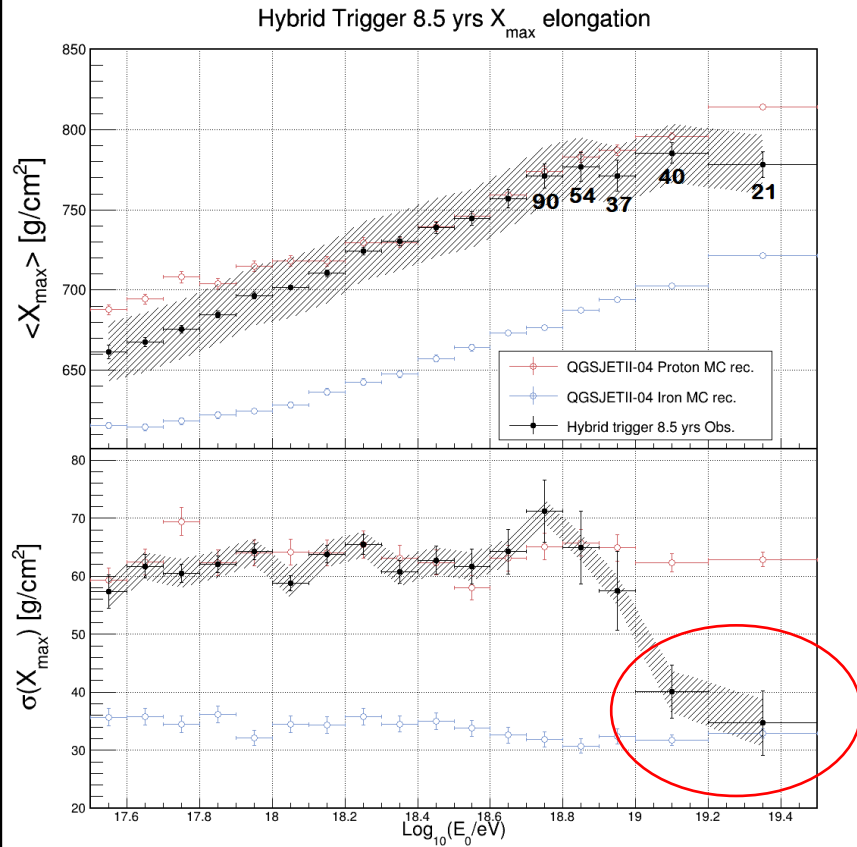


他の実験との比較
Energy spectrum



本解析結果はTAの別の観測Modeを用いた結果と **Consistent** だった
また、本解析の全エネルギー範囲をカバーするAuger実験の結果との比較結果は、
TA-Augur working groupにより報告されている **Energy scale** の差が確認できる

解析

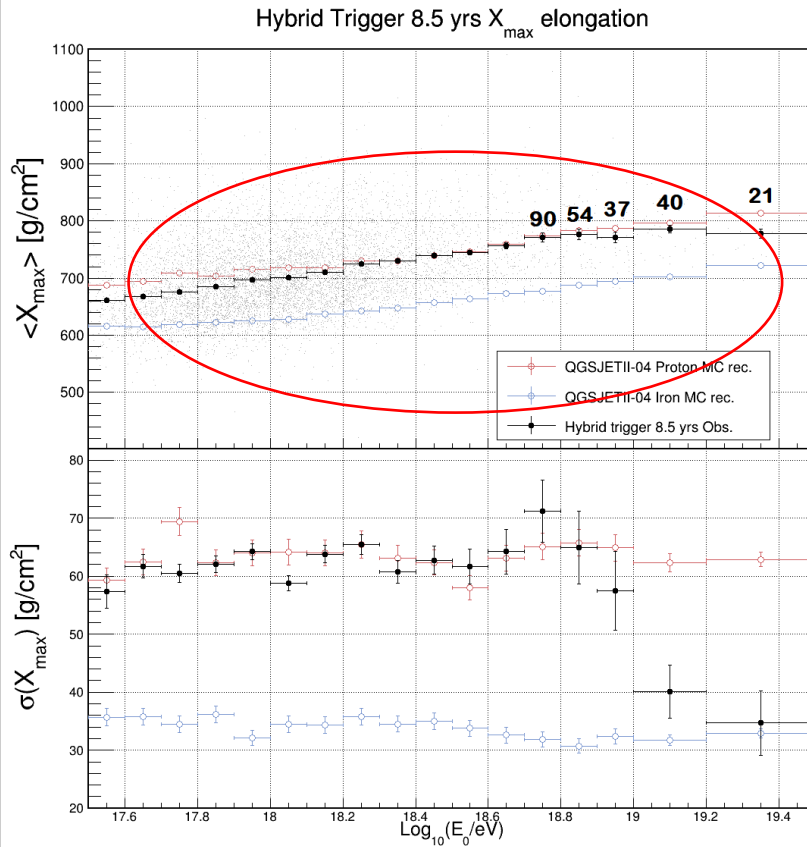


本解析により得られた $\langle X_{\max} \rangle$ では、
 $10^{17.5 \sim 18.4}$ eV領域で重い質量組成から軽い質量組成への遷移が確認できる
 $\sigma(X_{\max})$ では 10^{19} eV以上の領域で鉄のような結果を示しているが、
 Event統計を考慮した2変数解析の結果、今のEvent統計ではProtonから有意に離れたとは言えなかった

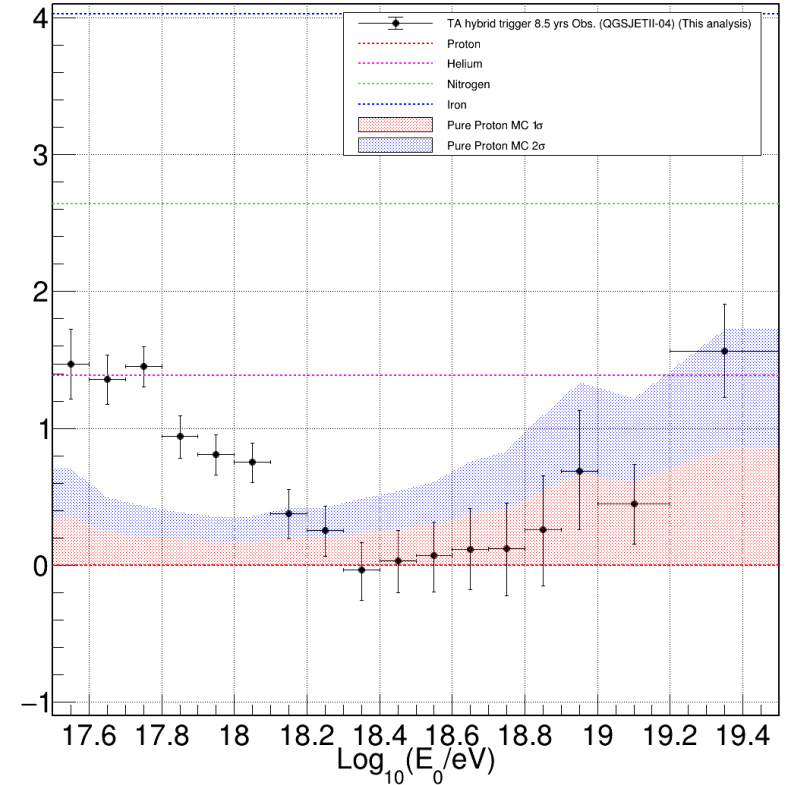
解析

$$\langle \ln A \rangle = \frac{X_{\max}^{\text{obs}} - X_{\max}^{\text{proton}}}{X_{\max}^{\text{iron}} - X_{\max}^{\text{proton}}} \cdot \ln A_{\text{iron}}$$

Hybrid Trigger 8.5 yrs Mean logarithmic mass

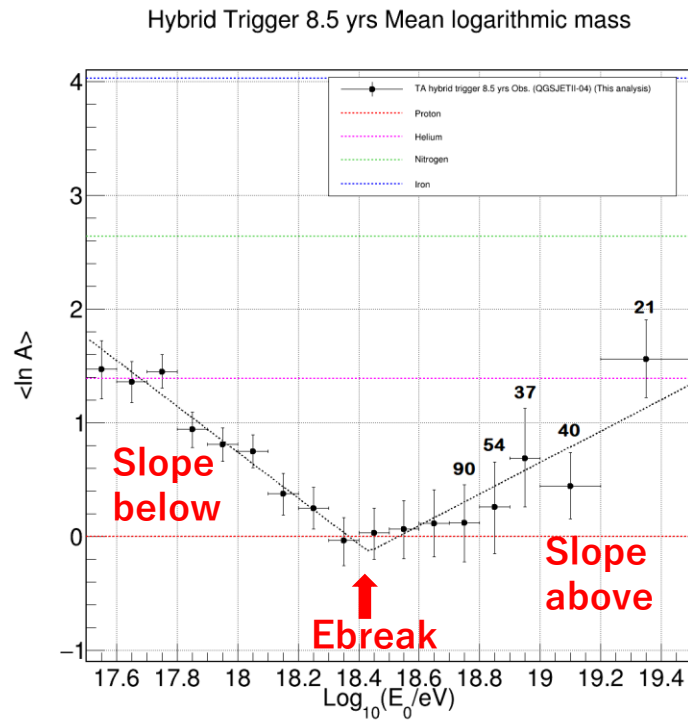


$\langle \ln A \rangle$



本解析により得られた $\langle X_{\max} \rangle$ を使い以上の数式で $\langle \ln A \rangle$ を計算した
 $10^{17.5 \sim 18.0}$ eVではProton MC simulation結果から2 σ 以上離れていることが分かった
 ただし $10^{18.1}$ eV以上、先行のHybrid解析のエネルギー範囲ではProton MCから2 σ 以内だった

解析



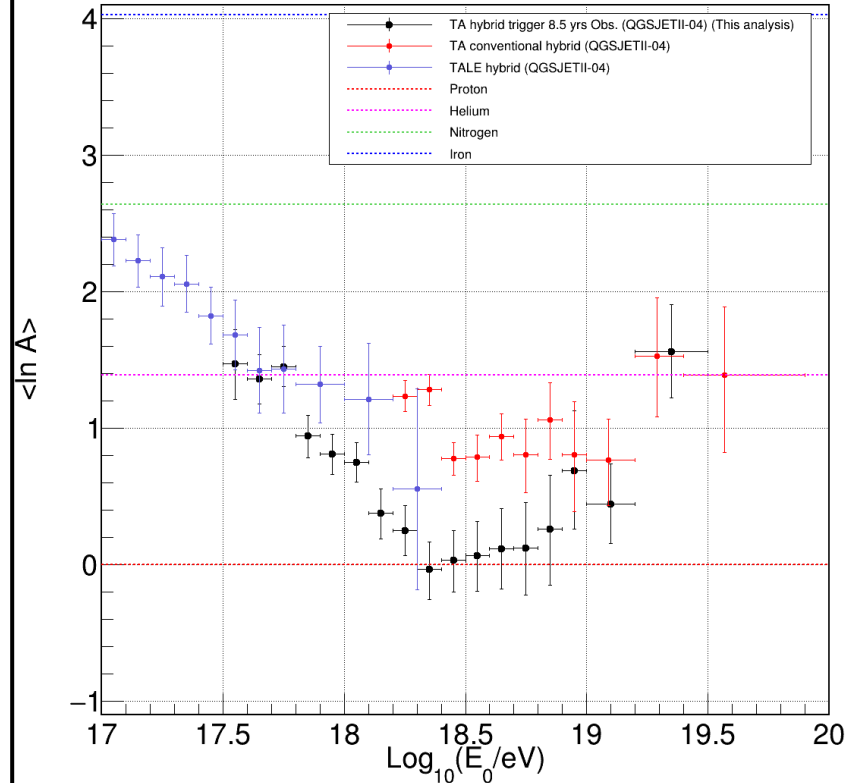
Broken line fit結果

Slope below	$-2.0 \pm 0.25 <\ln A>/\text{decade}$
Break energy	$10^{18.43 \pm 0.06} \text{ eV}$
Slope above	$1.38 \pm 0.37 <\ln A>/\text{decade}$

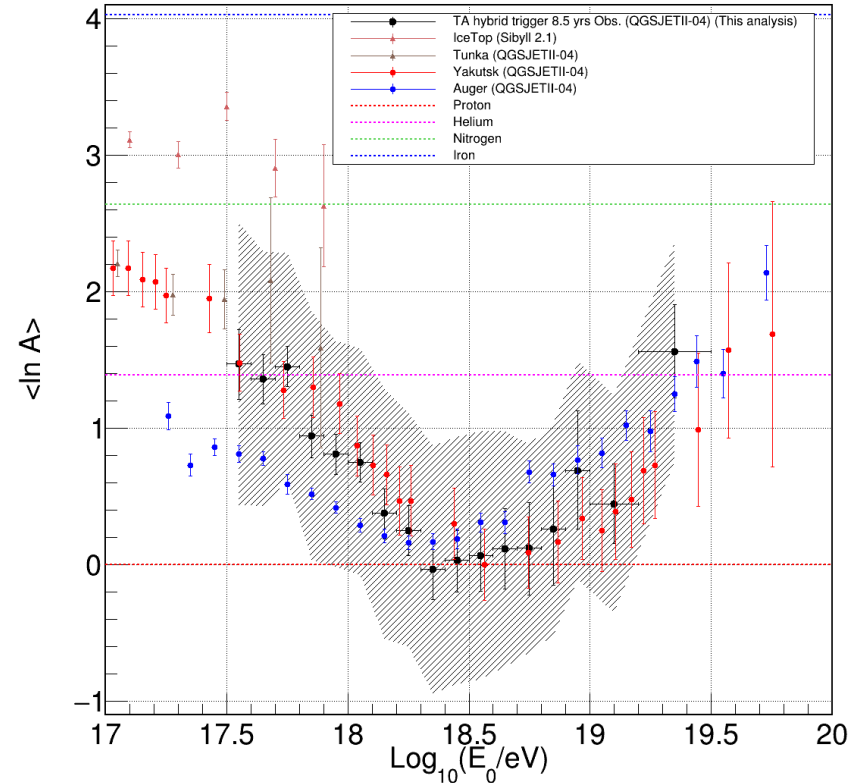
本解析により得られた $10^{17.5 \sim 19.5} \text{ eV}$ 範囲の $<\ln A>$ の結果にBroken line fittingを行い、Breakpointを $10^{18.43 \pm 0.06} \text{ eV}$ と決定した

解析

TA実験の別の観測モードとの比較
Mean logarithmic mass



他の実験との比較
Mean logarithmic mass



本解析により得られた $\langle \ln A \rangle$ の結果を他のTA解析の結果及び、別の実験の結果と比較した結果、同一Hadron interaction modelを使って得られた結果についてはSystematicsの範囲で一致した
Augerは $\langle \ln A \rangle$ のBreakpointを $10^{18.32 \pm 0.03} \text{ eV}$ と決定し、
Yakutskは $10^{18.5} \text{ eV}$ 付近で質量組成が最も軽くなると報告している

まとめ

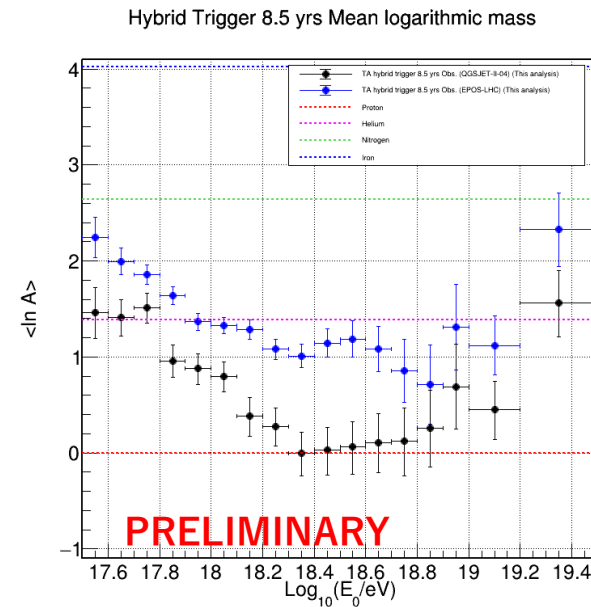
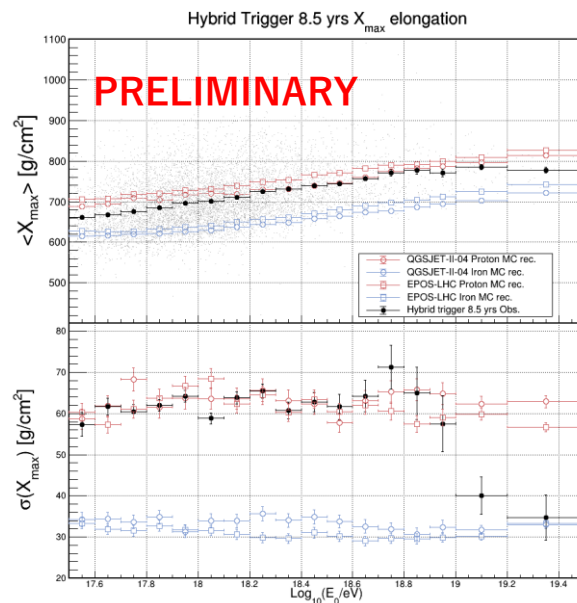
今後の展望

1. TA実験ではHybrid解析のエネルギー閾値を下げられるHybrid trigger 観測モードを実装し、8.5年分の観測を行っている
2. エネルギースペクトルの測定結果、先行のHybrid解析及びTAの別の観測Modeの結果とConsistentな結果を得た
3. TA実験において $10^{17.5}$ eVから $10^{19.5}$ eVまでの質量組成、 $\langle \ln A \rangle$ を測定し、先行のHybrid解析結果と比較した
その結果 $10^{18.1}$ eV以上ではProtonとConsistentで、先行解析と一致する結果を得た
しかし $10^{18.1}$ eV以下ではProtonとズレがあり組成の遷移が見られる

まとめ 今後の展望

Auger実験はQGSJET-II-04モデルに対し、
InAが負の分散を持つとしてAugerの観測結果とは合わないとClaim
2 EeV以上では質量組成解析に使わないことを推奨している

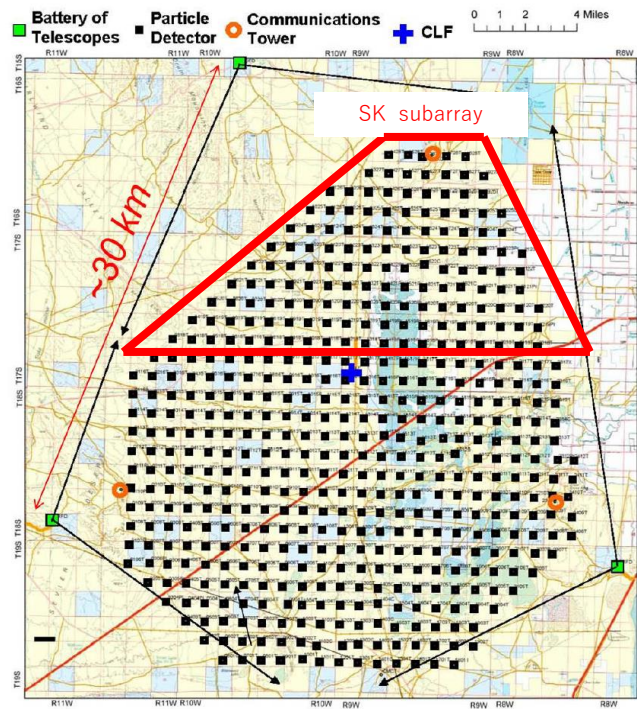
→EPOS-LHCモデルを使ったMC setで解析



まとめ 今後の展望

使うSD subarrayの拡大

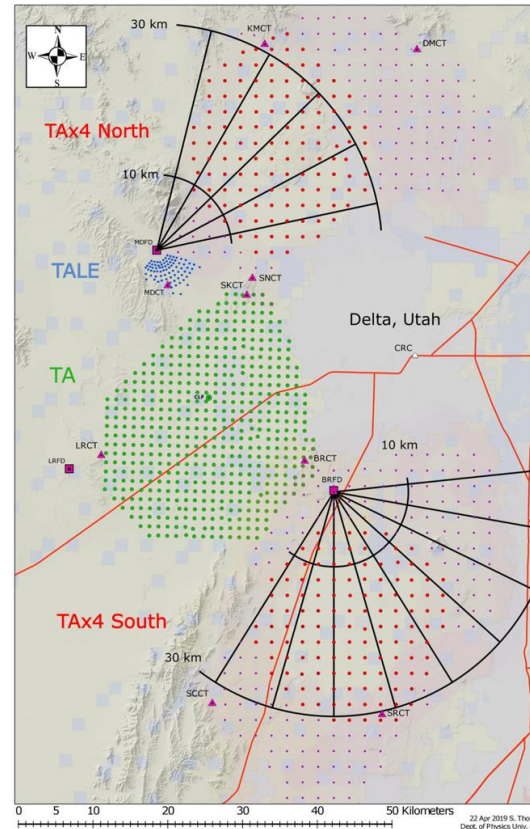
今の解析では使われていないSKアレイを入れることで $10^{19.0}$ eV以上のEventの統計を増やす



まとめ 今後の展望

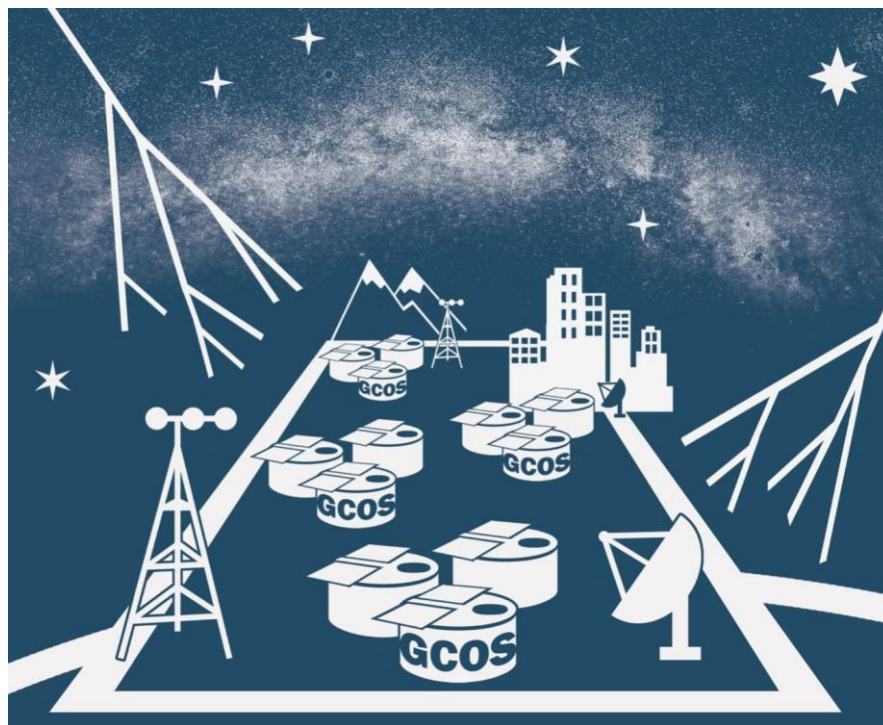
TAx4とのCombined解析

TAの拡張計画であるTAx4とのCombined観測により $10^{19.0}$ eV以上のEventの統計がさらに増える見込み



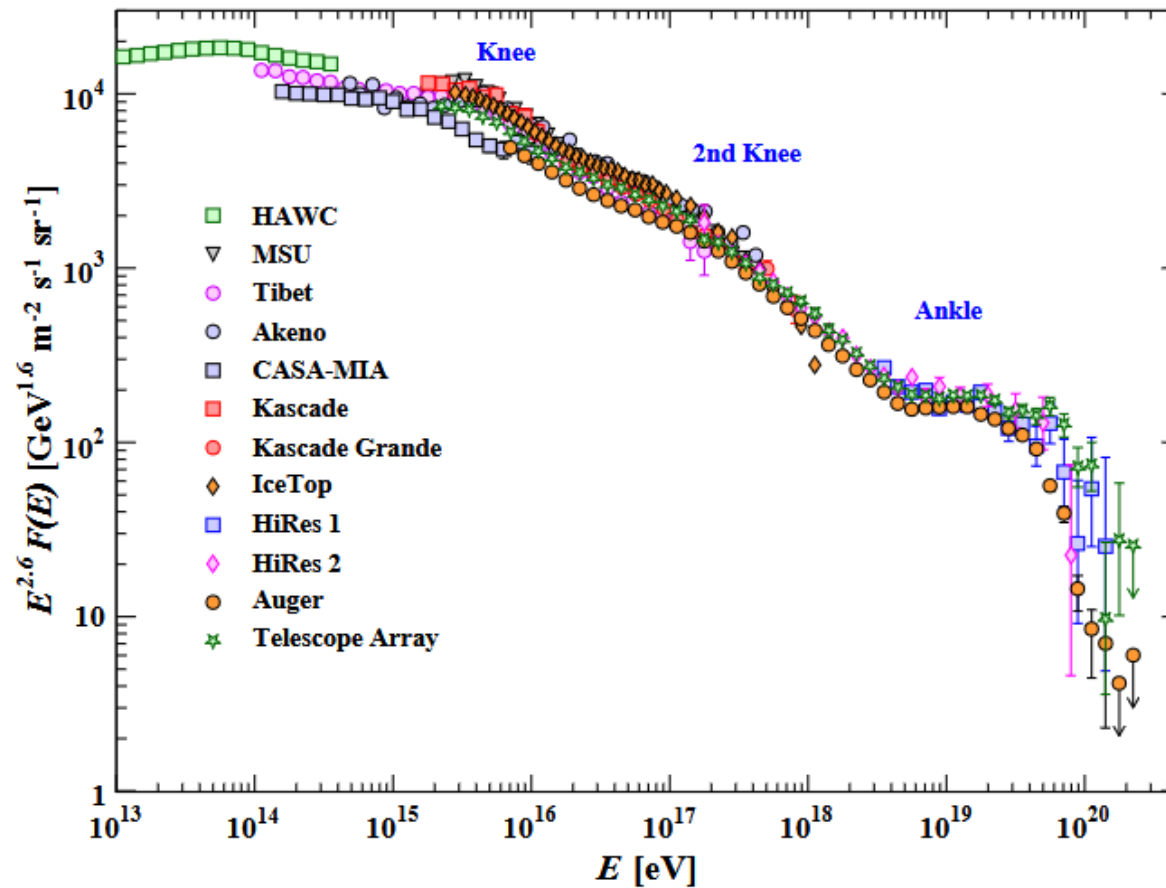
将来計画について

GCOS



将来計画について

GCOS



この「先」はある？



将来計画について

GCOS

これらの
Highest energy CRの起源は？
質量組成は？

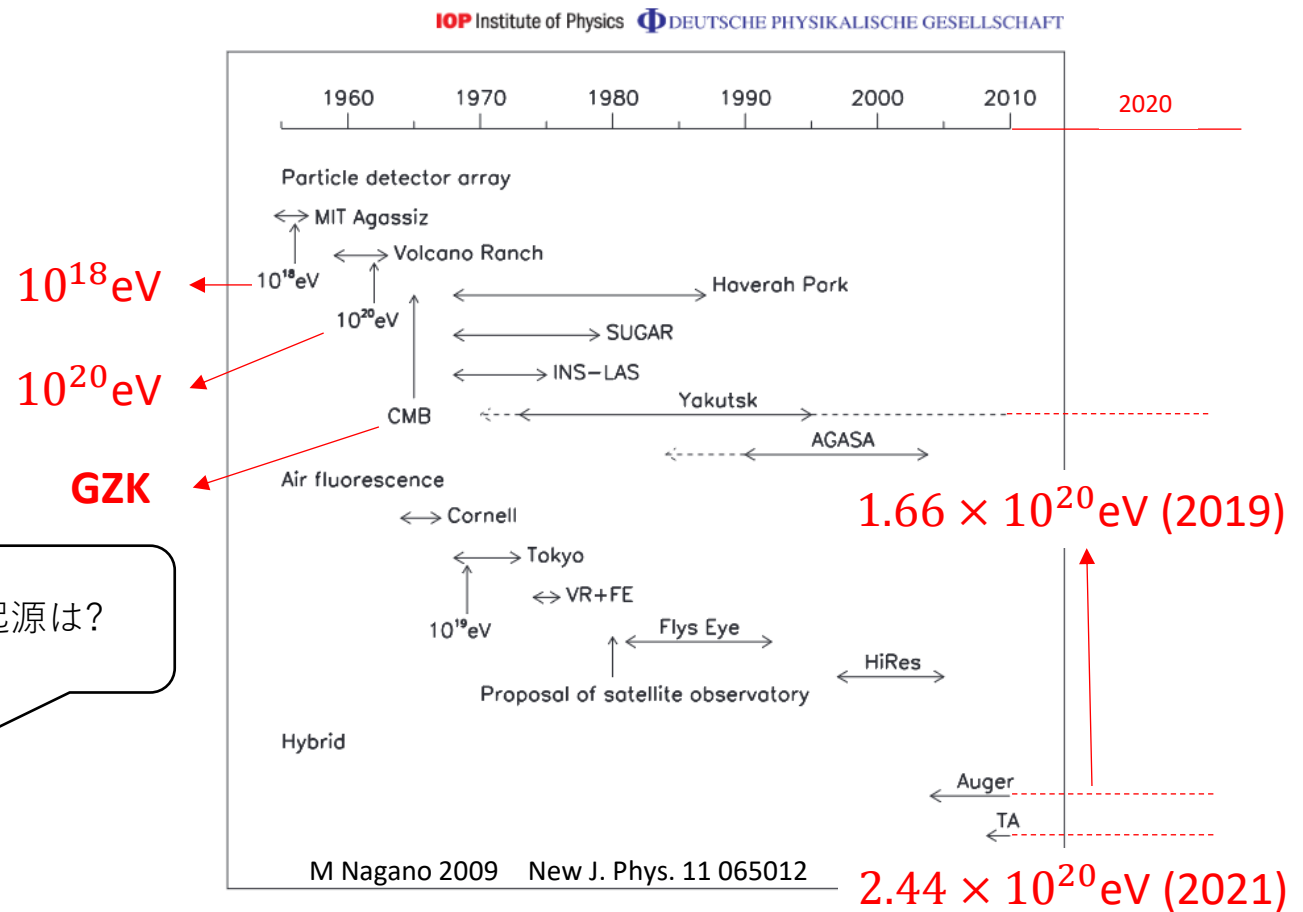


Figure 2. Chronology of UHECR experiments. The years of the first observation of 10^{18} and 10^{20} eV candidates are shown by arrows. The first observation of clear fluorescent light from EAS is also indicated by an arrow marked 10^{19} eV.