

TA hybrid trigger modeによるUHECRの質量組成の測定

For 宇宙線空気シャワー観測によるマルチメッセンジャー天文学の推進研究会

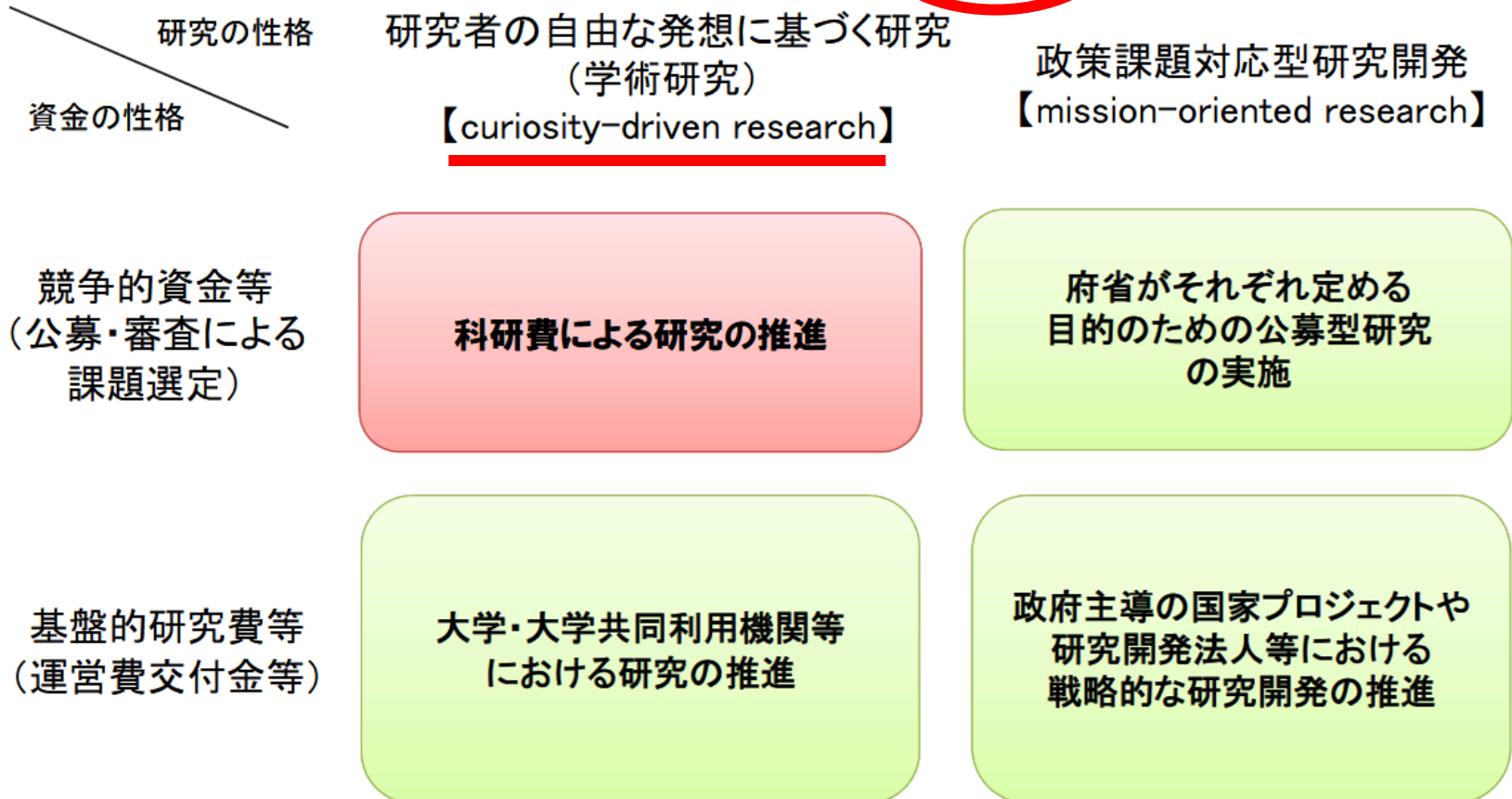
HEUNGSU SHIN

OSAKA METROPOLITAN UNIVERSITY

2025-03-26

科研費の位置付け

○科研費は、研究者の自由な発想に基づく研究を支援する我が国唯一の競争的研究費。



As a researcher, what I find curious is…?

Search for the End of the Cosmic Ray Energy Spectrum

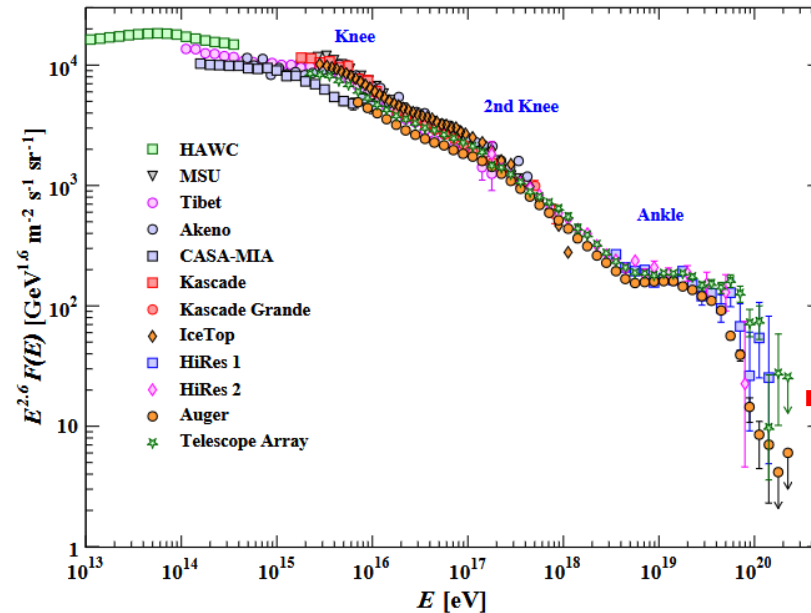
John Linsley

AIP Conference Proceedings 433, 1 (1998)

Search for the end of the energy spectrum of primary cosmic rays

M Nagano

New J. Phys. 11 065012 (2009)



この「先」はどうか？
Is this really the “end”?



これが研究者として究極的に知りたいと思うもの(内の1つ)

Moving beyond existing technologies, it is inspiring to note that some 5 million UHECRs with energies above about 5.5×10^{10} GeV strike the Earth's atmosphere each year, from which we currently collect only about 50 or so with present observatories. In this sense, there exists some 5 orders of magnitude room for improvement!

Luis A. Anchordoqui, Physics Reports Volume 801, 13 April 2019, Pages 1-93

全地球大気に1年に入射する55 EeV以上のCRは
500万もあるということは…



ウルトラマンになり
一人でAS観測施設を建設
15年くらい観測する
身長：40 m
体重：35 kt
年齢：2万歳



陰で世界を支配する闇の権力者となり
全世界にAS検出器をじっくり置かせる

同じ好奇心を持つ仲間を集めて研究に取り組み一歩一歩進む
力を合わせて1-2 order increase観測の実現に向けて努力し
技術と検出器開発で後学のための道も作り次世代に繋げて行く

友情・努力・勝利?

現行実験でも観測され続ける $>100 \text{ EeV CR}$

IOP Institute of Physics Φ DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT

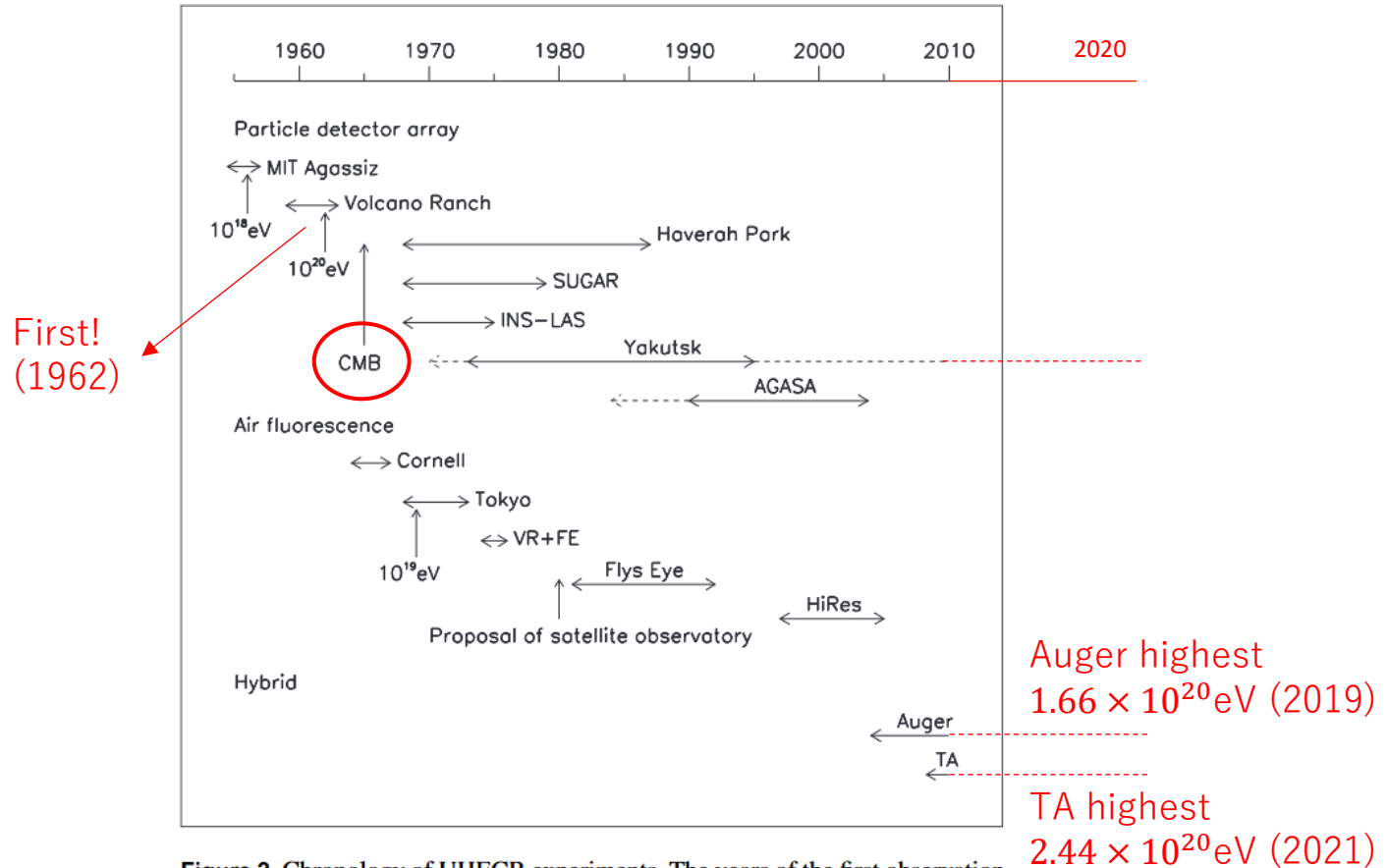


Figure 2. Chronology of UHECR experiments. The years of the first observation of 10^{18} and 10^{20} eV candidates are shown by arrows. The first observation of clear fluorescent light from EAS is also indicated by an arrow marked 10^{19} eV.

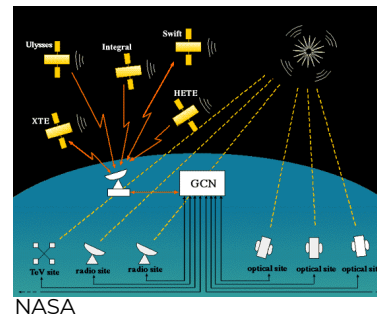
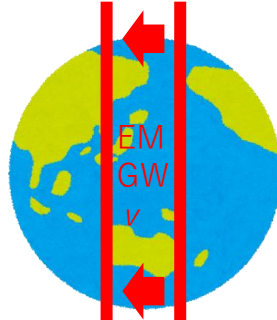
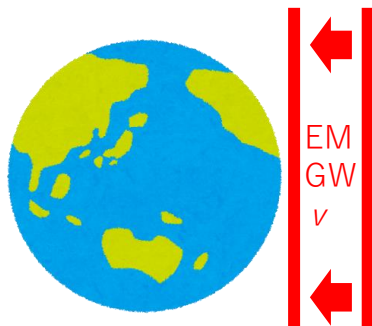
Multi-messenger Astronomy

Sofia Z. Sheikh et al 2025 AJ 169 118 **Table 1**
 A Rough Timeline through the Development of Human Technologies across
 Wavelength Ranges and Multimessenger Approaches

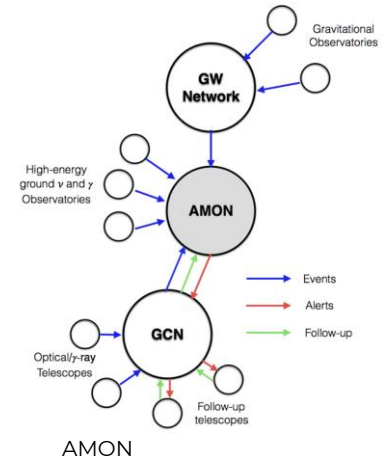
Signal Type	Humans Create Tele- scopes/Detectors	Humans Create Transmitters
Radio	1932	1895
Infrared	1950s	1979
Optical	1609	1880
Ultraviolet	1946	1930s
X-ray	1949	2019
Gamma ray	1961	...
Neutrino	1967	2012
Gravitational wave	2014	...

EM
 New
 Messengers

Note. While the exact “firsts” of certain technologies can be difficult to define, we attempt here to roughly outline two key milestones. The middle column shows when humans first created a transmitter for communication of information via a given signal type. The leftmost column shows when humans first created telescopes or detectors capable of detecting each signal type from space.



NASA



Multi-messenger approaches in UHECR science

昨日の樋口さんの発表にもあった通りUHECRの起源探索においては、以前から γ と ν の観測によるモデルの確認も重要とされて来ていた。(UHECRの起源におけるTop-downモデルの検証等)

直近の例

IceCube ν 観測によるUHECR proton fractionのConstraint

We present a search for the diffuse extremely-high-energy neutrino flux using 12.6 years of IceCube data. The non-observation of neutrinos with energies well above 10 PeV constrains the all-flavor neutrino flux at 10^{18} eV to a level of $E^2 \Phi_{\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau} \simeq 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, the most stringent limit to date. Using this data, we constrain the proton fraction of ultra-high-energy cosmic rays (UHECRs) above $\simeq 30$ EeV to be $\lesssim 70\%$ (at 90% CL) if the cosmological evolution of the sources is comparable to or stronger than the star formation rate. This result complements direct air-shower measurements by being insensitive to uncertainties associated with hadronic interaction models. It is the first such result to disfavor the “proton-only” hypothesis for UHECRs using neutrino data.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.01963>

逆に宇宙線AS観測でMM Astronomyに貢献できないかな？

How to contribute to “Astronomy”?

研究者の方々から色々な実験上のアプローチが提案されていて、その一つに：
「Event-by-eventでrigidityが高いproton UHECRだけを選別し起源に迫る」

→そのためにはAS観測において特に精密な質量組成測定が必要になる

現行のAS観測において質量組成にSensitiveなObservableとして使われているのは…

Xmax (TAとAuger)

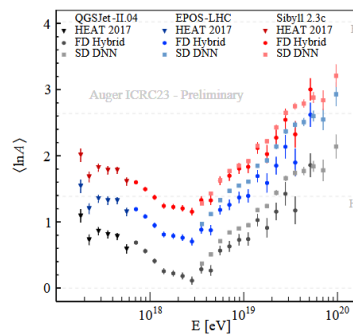
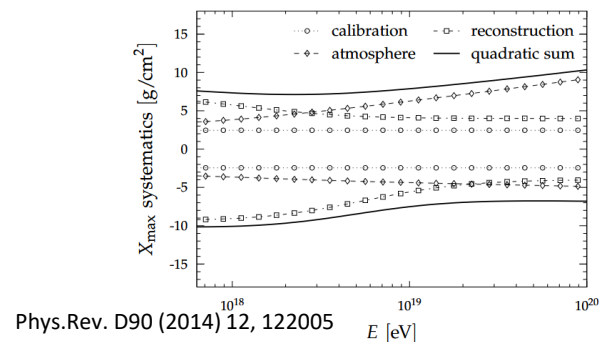
N μ (Auger) → (TAでも研究者たちがこれを見るため現在取り組んでいます)
(そして今後機械学習による新しい“observable”の発見にも期待)

(今のところTAで解析が確立している)Xmax測定の不定性を減らすには…

Statistics：次期計画で観測数を増やす

Systematics：これが難しい

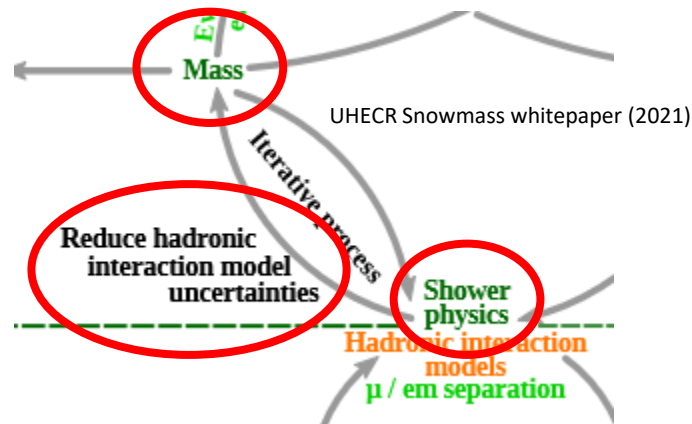
>10 EeV以上の現行観測でXmaxのSystematicsに最も大きい要因となるのは？
Xmax単体では大気、組成解析まで行けばHadron相互作用モデル間の差



<https://pos.sissa.it/444/365/pdf>

How to contribute to “Astronomy”?

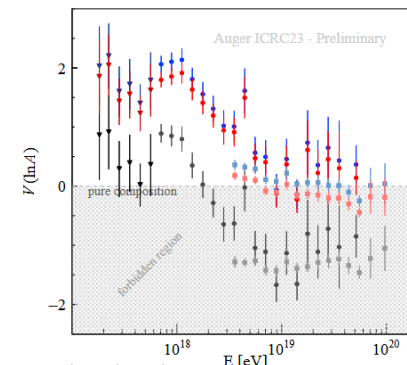
現行の加速器の衝突エネルギーではまだまだ外挿を使うしかないこのエネルギー領域では、Approachの一つとして観測データとハドロン相互作用モデルでFeedbackさせるのがあり、昨日の大橋さんの講演でもこれに関する面白い結果が発表されている。AugerではXmaxとN μ 両方でこのような解析に取り組んでいる。



その結果の一つとして、「2 EeV以上でQGSJET-II-04はAugerのデータを説明できない」と言うのをAugerで発表した。

AugerはICRC2023のProceedingsの中で、「このような欠陥のため、このツールを利用するのは、シャワーの発達予測が不正確でも、研究に悪影響を及ぼさないような状況に限定することが推奨される。」とClaimしている。

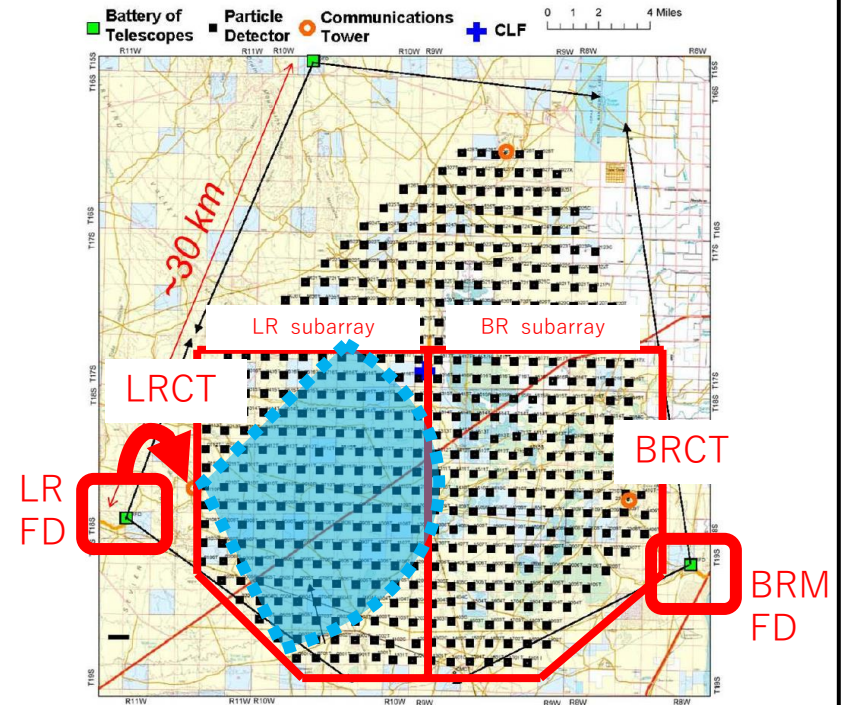
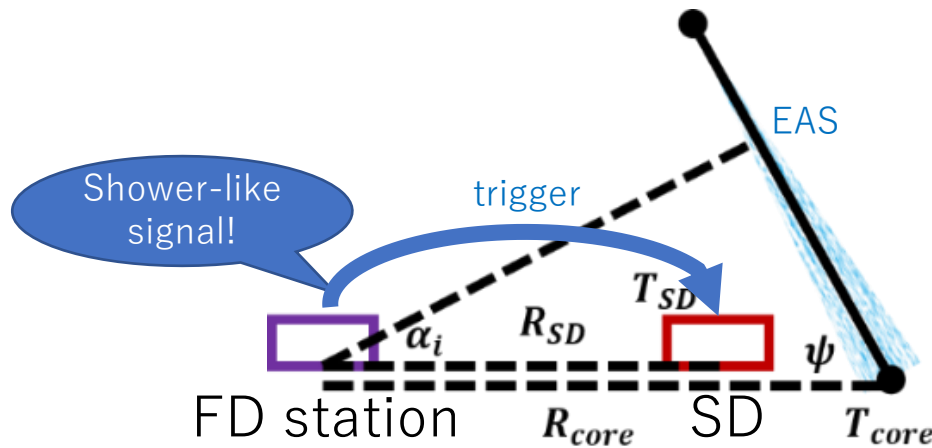
→これをTAでも検証したい！



<https://pos.sissa.it/444/365/pdf>

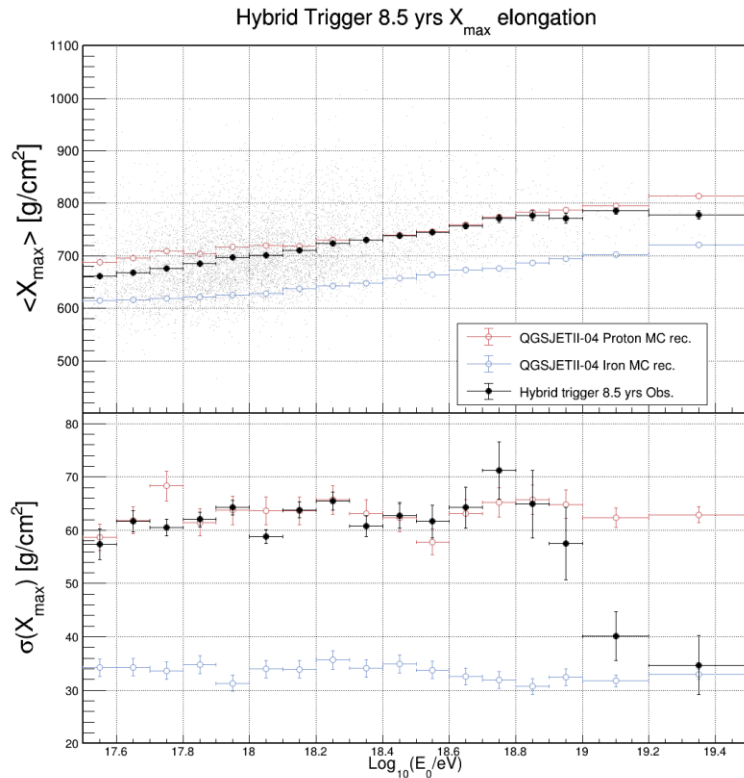
TA hybrid trigger mode mass composition study

Hybrid trigger systemの模式図

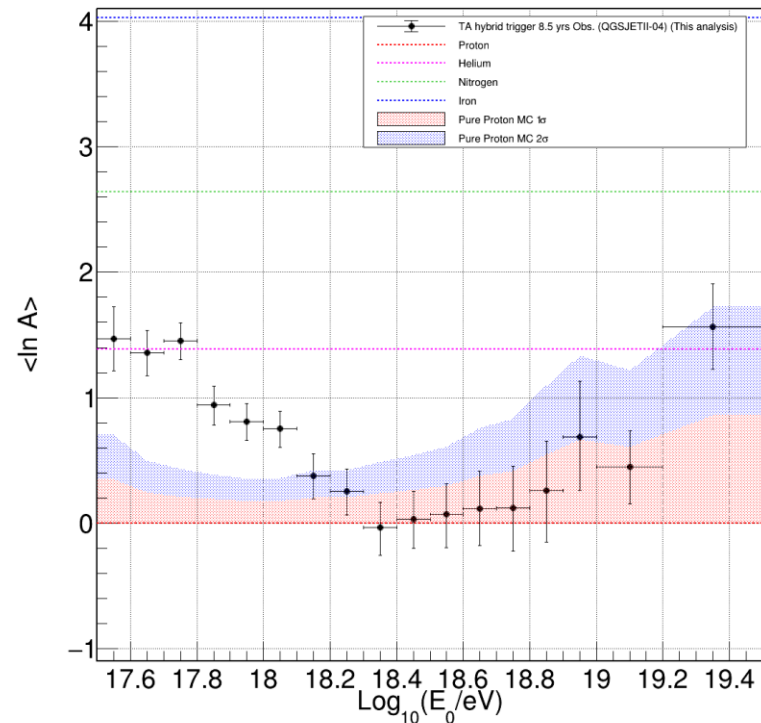


SD self-trigger条件に満たないイベントでもFDからSDアレイをtriggerする、Hybrid triggerの開発、実装によりHybrid解析のEnergy thresholdを下げる事ができたHybrid trigger modeは2010年10月8日から定常稼働中である

TA hybrid trigger mode mass composition study



Hybrid Trigger 8.5 yrs Mean logarithmic mass



My previous BRM/LR hybrid mass composition analysis for 0.3EeV-30EeV only showed the results with the MC set using QGSJET-II-04 hadronic interaction model

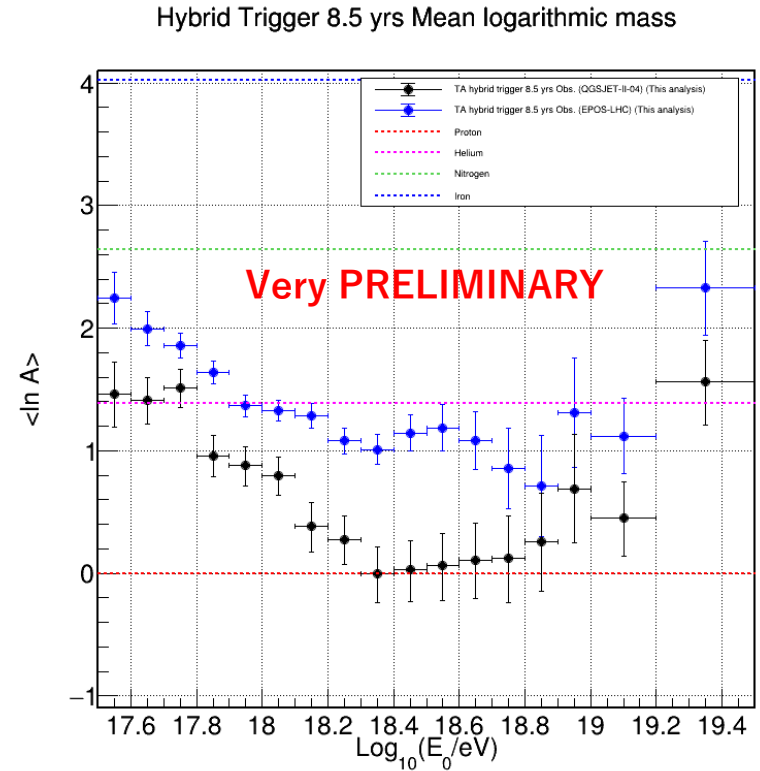
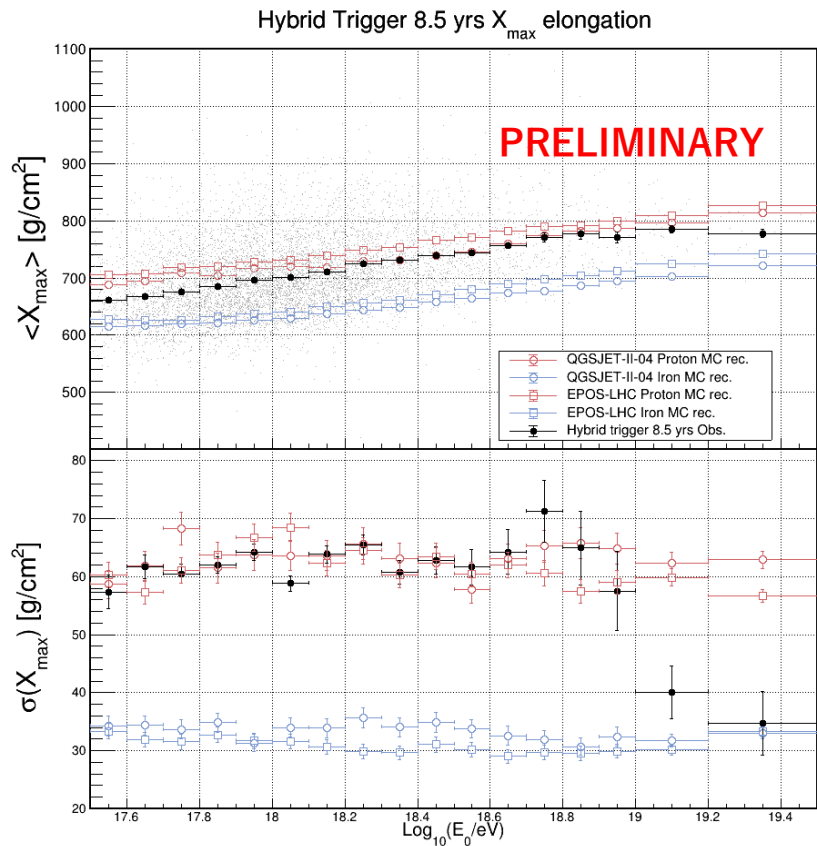
→ I generated a MC set using EPOS-LHC hadronic interaction model to see its impact on the mass composition analysis result

TA hybrid trigger mode mass composition study

Details of MC simulation
(The same conditions as before except the hadronic interaction model)

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

TA hybrid trigger mode mass composition study



Summary

1. 私は極高エネルギー宇宙線のスペクトルのその向こうが知りたい！
(どんどん高エネルギー側に行きたい)
2. 深宇宙からの ν やGW観測によるMulti-messenger AstronomyによるAstrophysicsの新展開が期待されている。
3. MM Astronomyの推進につき、宇宙線AS観測が貢献する一つの方法としては、p UHECRを選別することがあり、このためには質量組成測定の精度を上げるのが要になる。
4. 色んな研究者が測定における系統誤差のスタディーをやっていて、このスタディーには現行UHECR観測結果からのFeedbackも重要
5. TA hybrid trigger解析を追加のHadron相互作用モデルに拡張した結果はComing soon…(次の学会には必ず)