



*Image by NASA*

## SESSION 2

# 最高エネルギー宇宙線

名古屋大学 CR研 牧野 友耶

1. 宇宙線研 武石さん

- 「TA実験地表検出器アレイによる極高エネルギー宇宙線空気シャワー中のミュオン数の解析」

2. 大阪市大 岸上さん

- 「TALE実験の概要と今後の展望」

3. 名古屋大 牧野

- 「LHCf実験の概要とこれまでの測定結果」

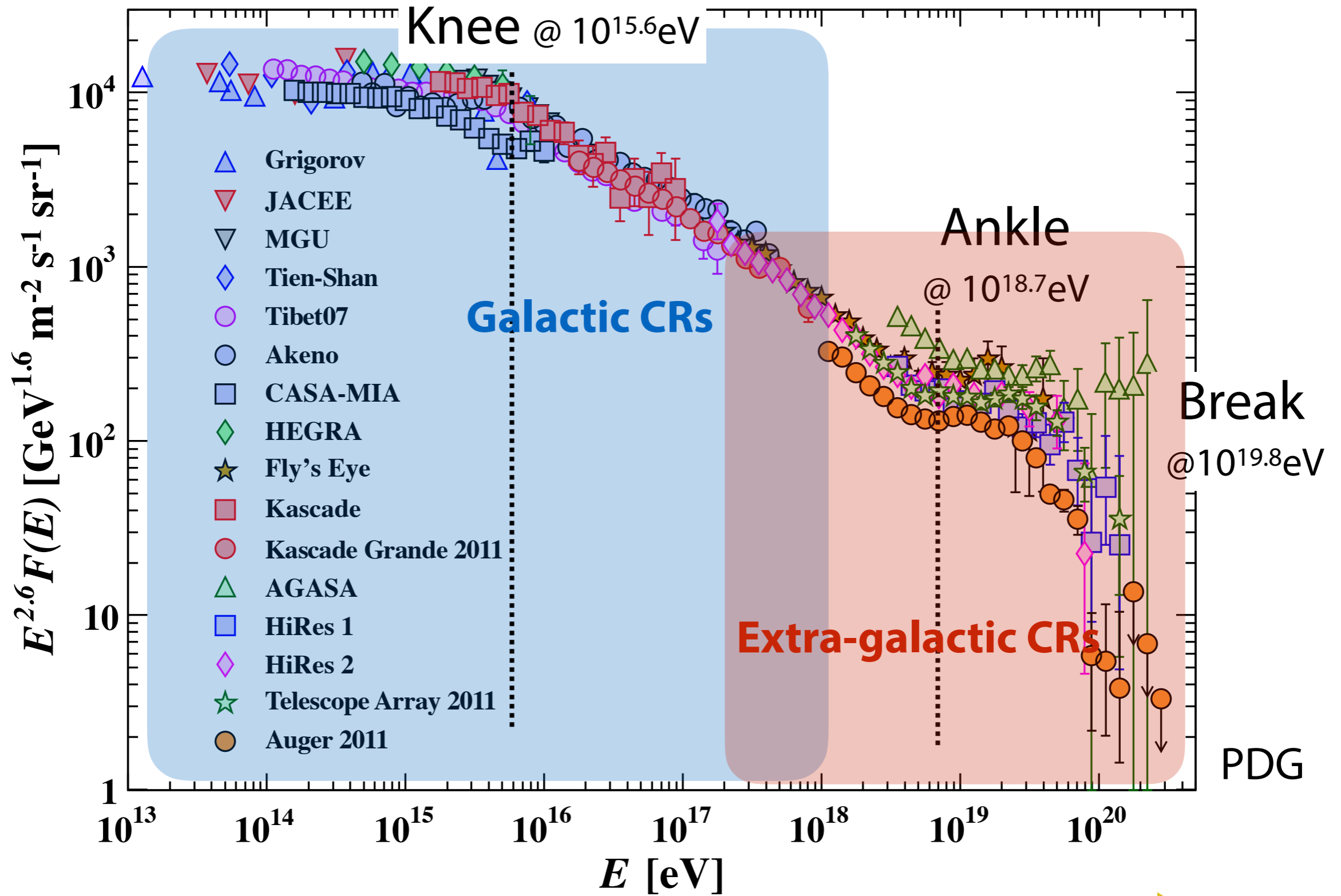
*Image by NASA*

## SESSION 2

# 最高エネルギー宇宙線

名古屋大学 CR研 牧野 友耶

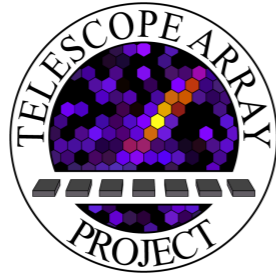
# Cosmic-ray spectrum at high energy region



直接観測不可 => 空気シャワー実験

# Existing UHECRs (and related) detectors

## Telescope Array

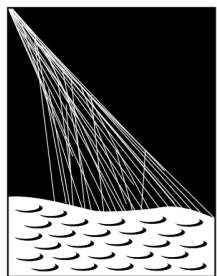


- Utah, USA
- 507 surface detectors covering 680 km<sup>2</sup>
- 36 fluorescence detectors



## Pierre Auger Observatory

- Pampa, Argentina
- 1660 surface detectors covering 3000 km<sup>2</sup>
- 27 fluorescence detectors



PIERRE  
AUGER  
OBSERVATORY



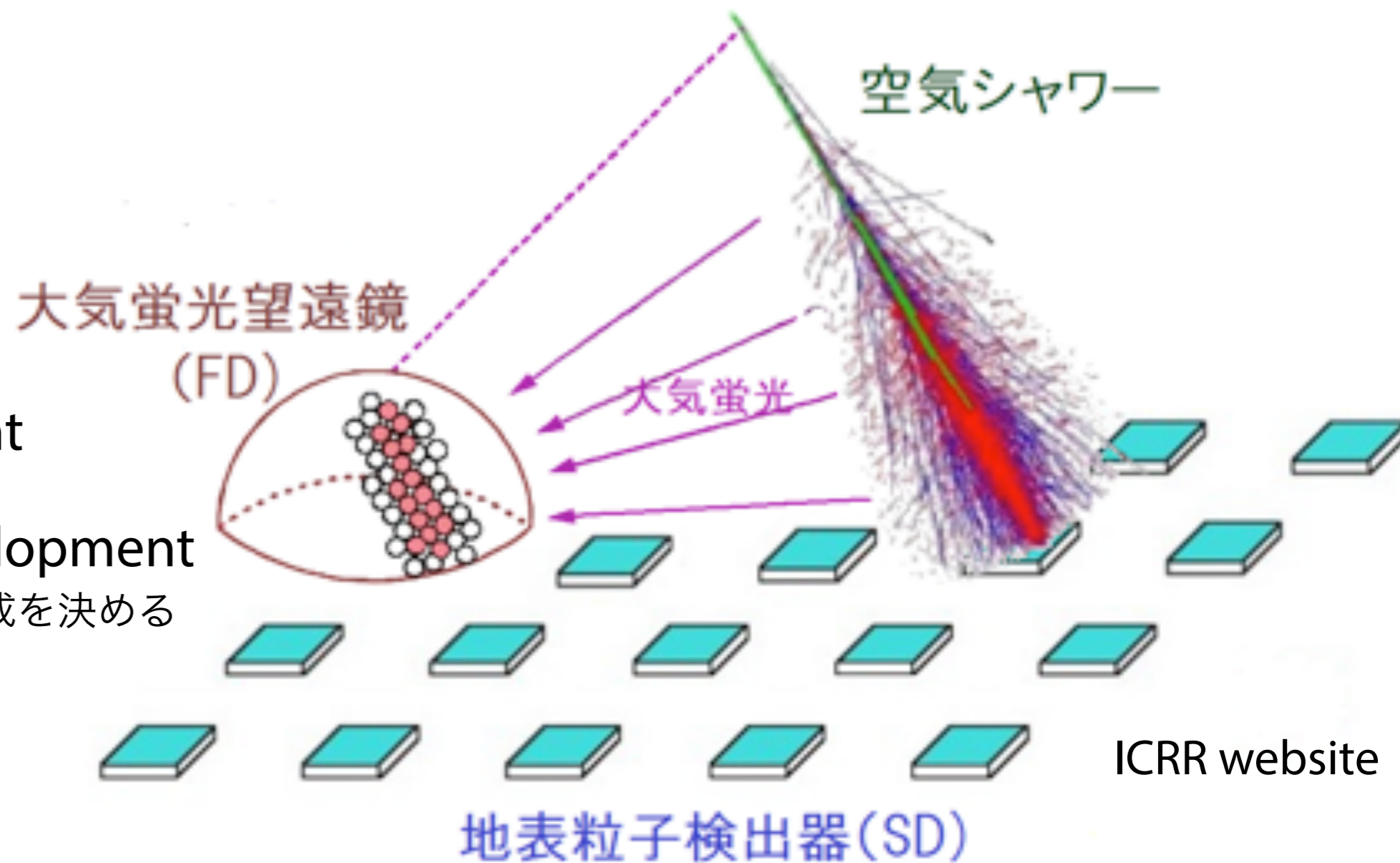
ICECUBE

## (IceCube neutrino telescope)

- South pole
- 1km<sup>3</sup> w/ 5160 optical sensors
- UHE neutrinos are relevant to UHECRs

# Air shower experiment : Hybrid measurement

- Shower development
  - Energy
  - longitudinal development  
=>  $\langle X_{max} \rangle$  (化学組成を決めるパラメータ)



- Timing info, lateral distribution of SDs
  - Arrival direction
  - Energy

# 空気シャワー検出器 : SD, FD, and RD

Hybrid detection (SD+FD) が現在の空気シャワー実験の主流

## Surface Detector



- 安価
- Duty cycle ~100 %
- エネルギー測定 : ○
- 到来方向測定 : ◎
- 化学組成測定 : △

## Fluorescence Detector



- 高価
- Duty cycle 10-20 %
- エネルギー測定 : ◎
- 到来方向測定 : △?
- 化学組成測定 : ○
- 簡易版とアレイ化?

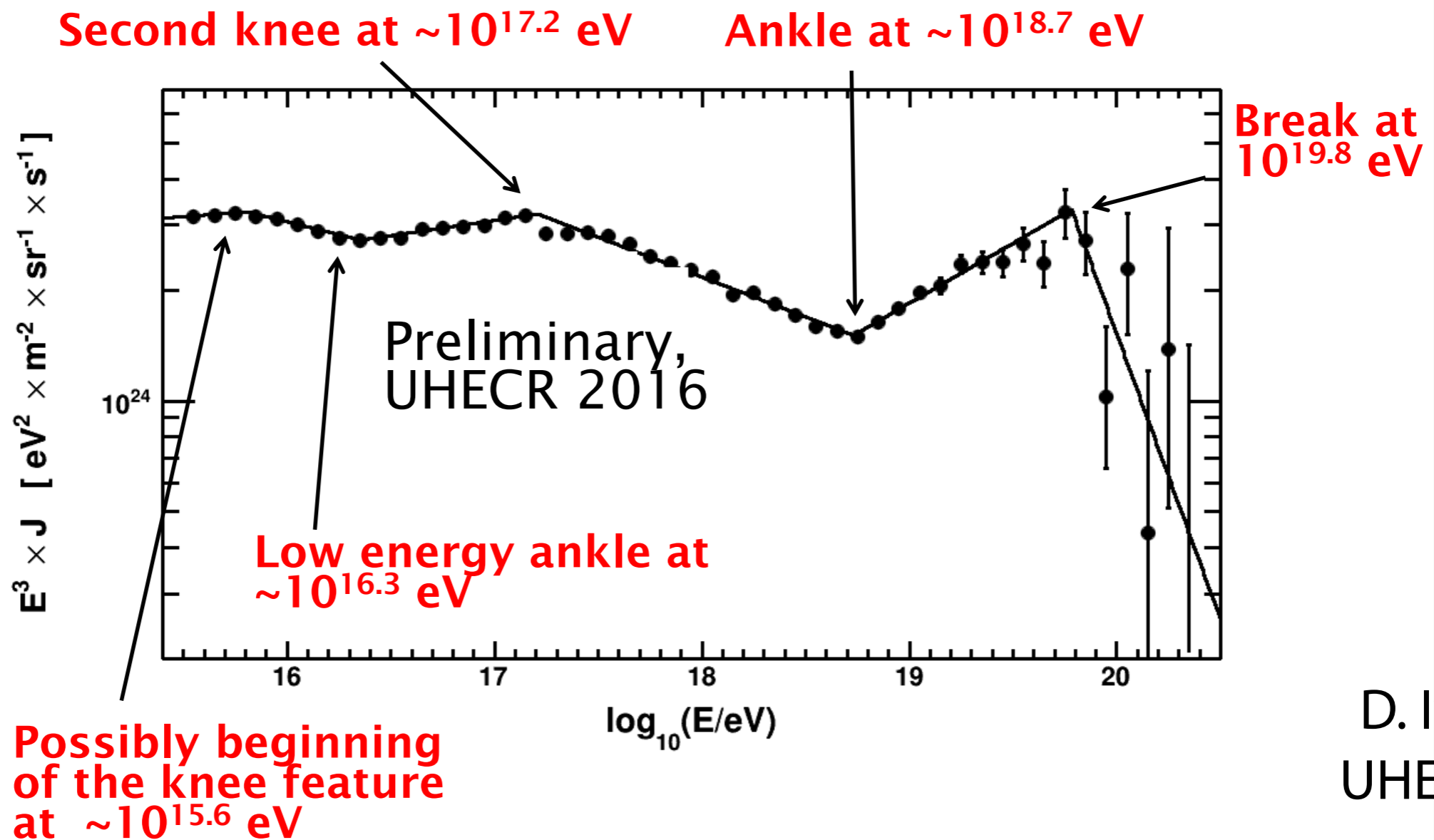
## Radio Detector



- 安価
- Duty cycle ~100 %
- エネルギー測定 : ○?
- 到来方向測定 : ○?
- 化学組成測定 : ○?
- "Xmax measurement 100% duty cycle"

# Spectrum

4 to 5 features, over nearly 5 orders of magnitude in energy



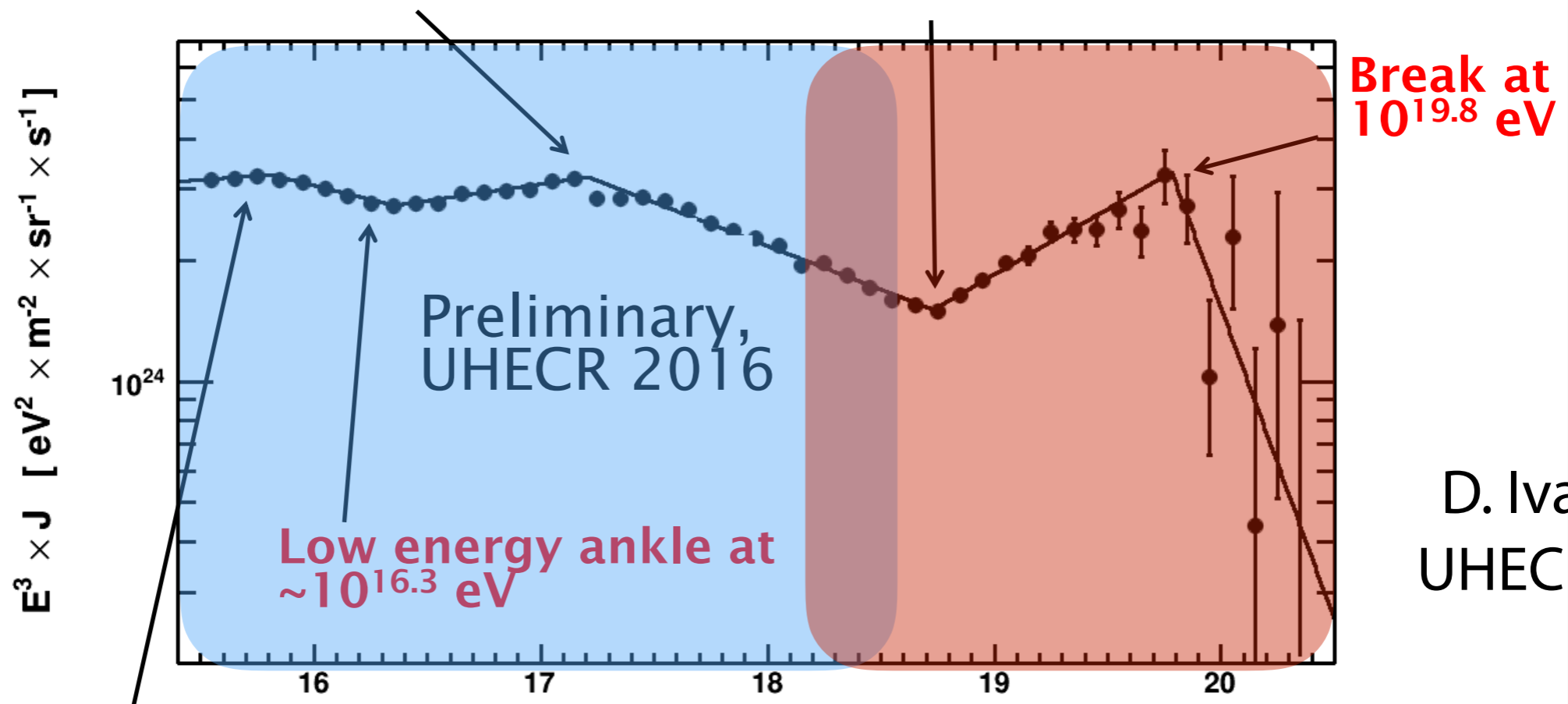
D. Ivanov,  
UHECR2016

# Spectrum

4 to 5 features, over nearly 5 orders of magnitude in energy

Second knee at  $\sim 10^{17.2}$  eV

Ankle at  $\sim 10^{18.7}$  eV



D. Ivanov,  
UHECR2016

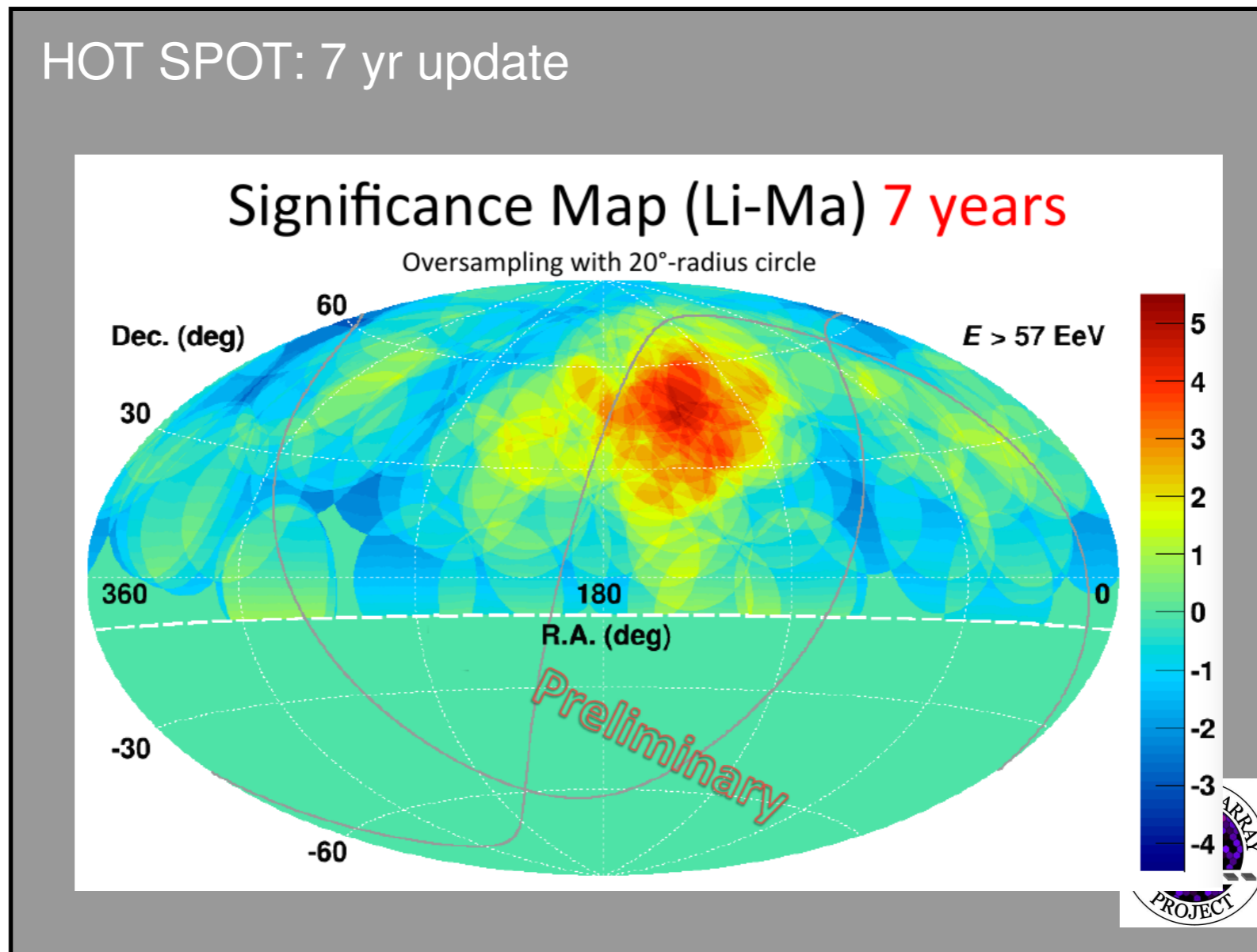
## TA Low energy Extension (TALE)

- Transition region (galactic  $\rightarrow$  extra galactic)
- With hybrid technique established by TA
- Overlap with TA

=> 岸上さん講演



# Anisotropy search : TA hot spot!



P. Tinyakov, et al.,  
UHECR2016

- 109 events above 57EeV in 7 yr
- Observed : 24 events, Isotropy: 6.88 events  $\Rightarrow 5.1\sigma$
- Chance probability to exceed  $5.1\sigma$  : 0.037%

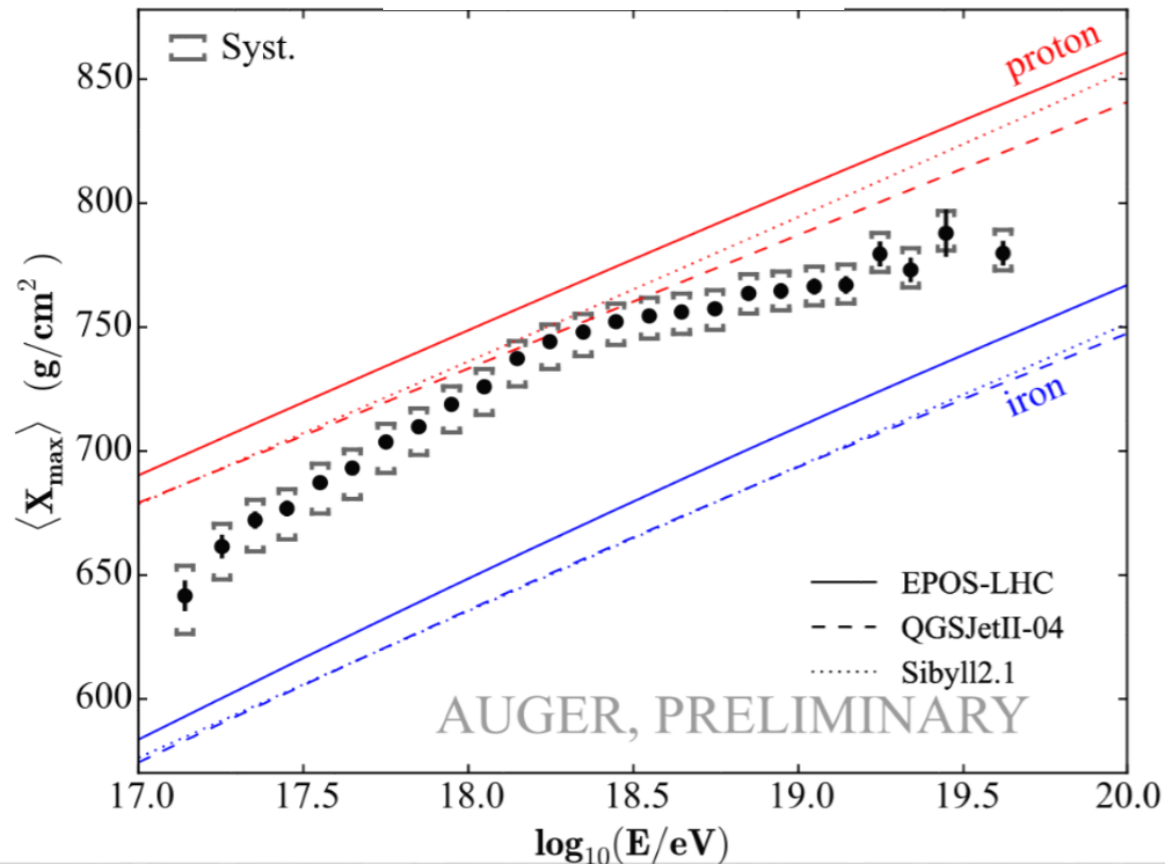
Auger : events above 40EeV analyzed, but no significant excess was found <sup>9</sup>

# Mass composition

UHECRの化学組成決定は起源の解明に向けて重要だが...

Auger  $\langle X_{\max} \rangle$

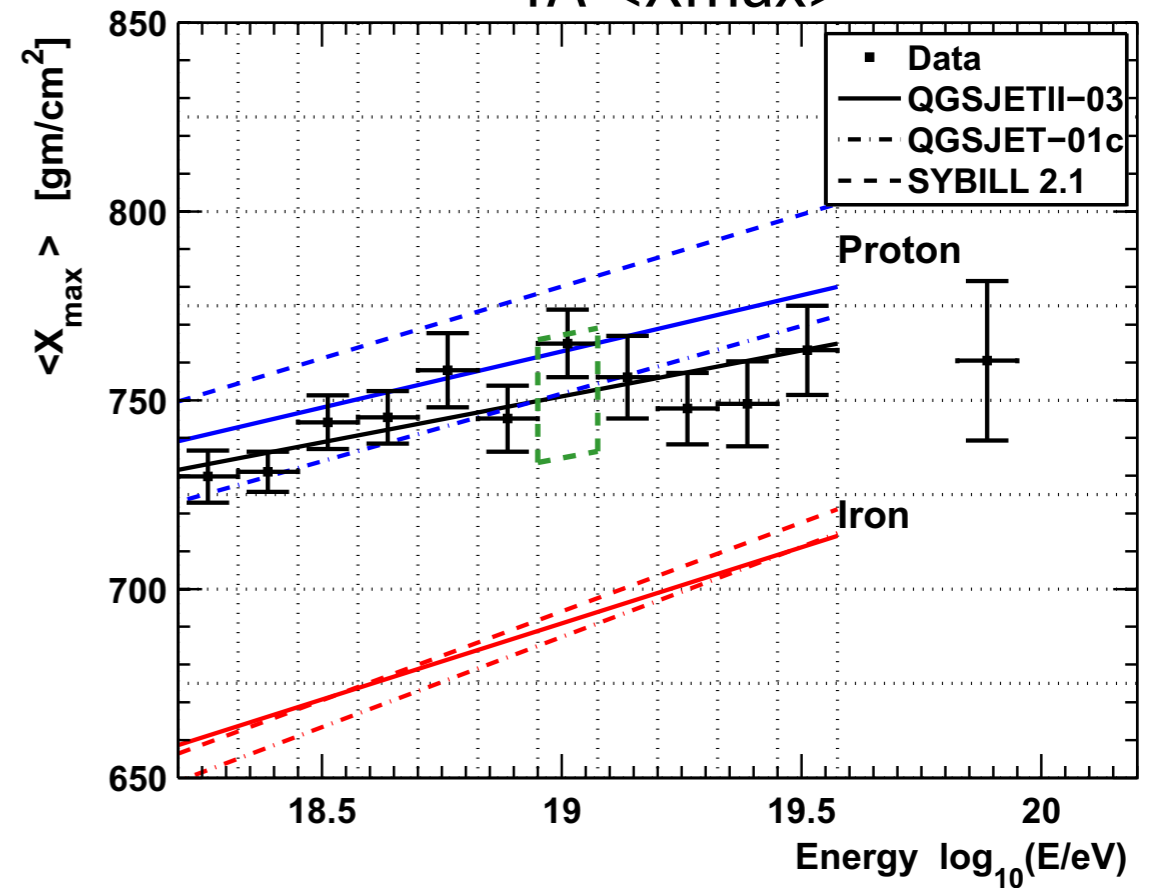
シャワー最大発達深さ ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )



M. Plum for the Auger collaboration  
UHECR2016

"... the flux of cosmic rays is composed of predominantly light nuclei at around  $10^{18.3}\text{eV}$  and that the fraction of heavy nuclei is increasing up to energies of  $10^{19.6}\text{eV}$ .", Physical Review D 90 (2015)

TA  $\langle X_{\max} \rangle$



R. Abbasi et al., Astroparticle Physics 64 (2015)

"... remark that a light, nearly protonic, composition is in good agreement with data"

議論を難しくしている理由のひとつは、データの解釈が相互作用モデルに依存するため。

LHCで相互作用モデルを検証、改善していく必要がある。-> LHCf

# まとめ

- TAやAugerが観測を順調に続けてきて...
  - スペクトル： $10^{19.5-8?}$ eVでのsuppressionの確認
  - 異方性探査：Hot spotの発見
  - 化学組成：少なくともheavy compositionの可能性は棄却？
- 空気シャワー実験の今後
  - UHECRでの統計数の増加：TAX4, Auger
  - Low energy extension：TALE, HEAT
  - Multi messenger? UHE neutrinos...
- 依然として空気シャワーシミュレーションの結果は、ハドロン相互作用モデル起因の不定性の問題を抱えている
  - “Muon問題” => 武石さん講演
  - 加速器実験からの貢献が重要 => 牧野講演