

超高エネルギー宇宙線の 質量組成異方性探索に必要な統計量の見積もり

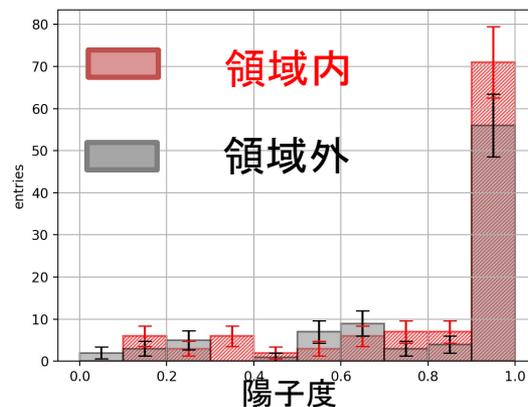
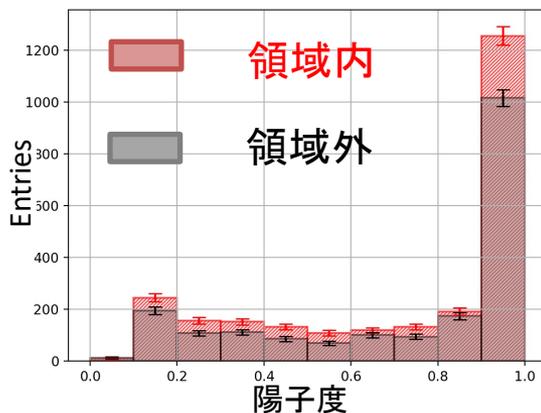
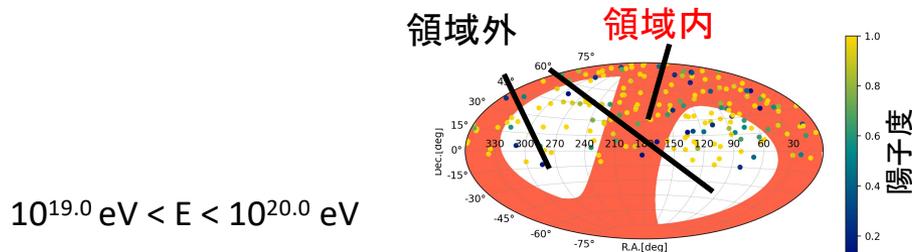
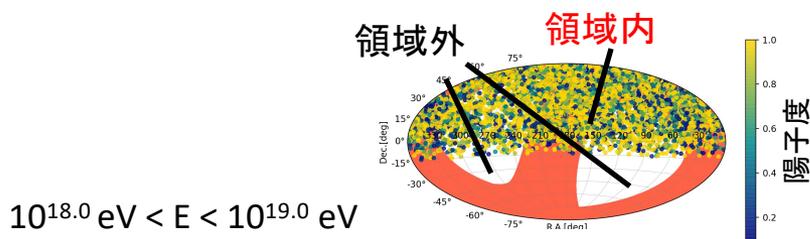
信州大学 修士1年

齊藤亮介

<目次>

- これまでの研究
- 研究背景と目的
- 本研究の手法(シミュレーションと評価)
- 超銀河面解析
- HotSpot解析

超高エネルギー宇宙線の到来方向毎の質量組成解析



| | 中央値 ⁺ 分布幅(1σ) -分布幅(1σ) | イベント数 |
|-----|---|-------|
| 領域内 | 0.898 ^{+0.101} _{-0.625} | 2513 |
| 領域外 | 0.911 ^{+0.088} _{-0.639} | 1974 |

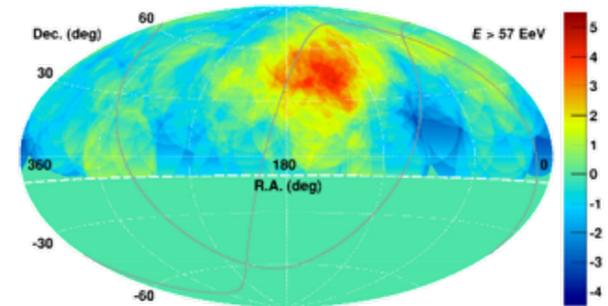
| | 中央値 ⁺ 分布幅(1σ) -分布幅(1σ) | イベント数 |
|-----|---|-------|
| 領域内 | 0.989 ^{+0.011} _{-0.431} | 111 |
| 領域外 | 0.952 ^{+0.047} _{-0.360} | 90 |

結果今ある実データでは領域毎の組成に有意と言える差は見れなかった

エネルギー

- これまで行われた実験によりHotSpotや超銀河面付近に異方性の兆候が見つかっている

TA実験11年間のデータにより測定された
 $E > 57 \text{ EeV}$ の宇宙線のHotSpot

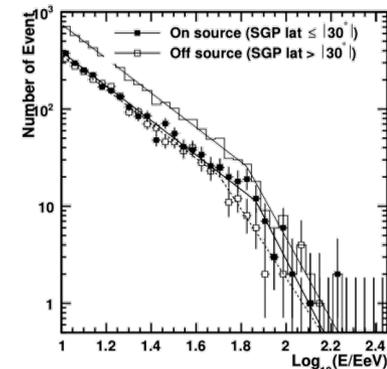


R.U. Abbasi+2014, ApJL

質量組成

- 空気シャワーの最大発達深さ(X_{max})を用いて推定
- 現行の実験では統計量が不足しているため、 X_{max} の異方性は見つかっていない
→どのくらい貯めれば何がわかるのか

エネルギースペクトルと
Broken power law fit



Energy distribution of observed shower event
- T.Nonaka ICRC 2021

シミュレーションを用いて

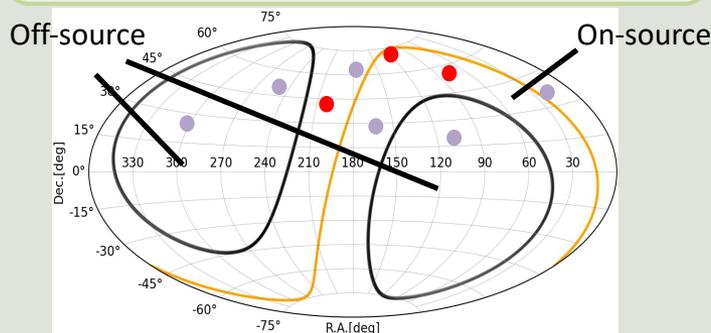
X_{max} 異方性が見つかるまでに必要な統計量を見積もる

エネルギー、粒子種ごとにXmaxのデータベースを作成する

エネルギースペクトル、混合比を仮定する

イベントの取得(超銀河面)

On-Source vs Off-Source



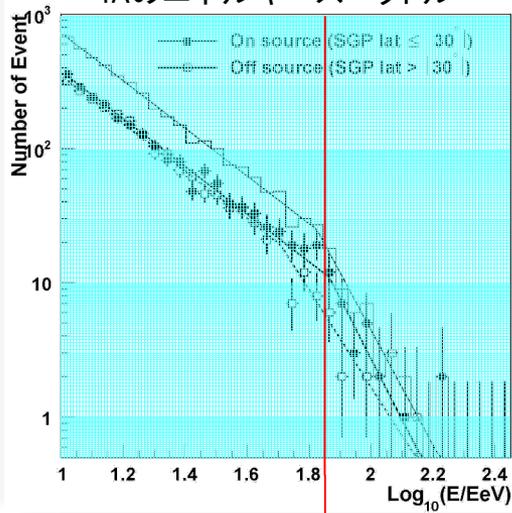
全天に等方的 (Mixed composition) + On-sourceに過剰に到来 (proton)

2つの領域のXmax分布を比較する

両分布の統計量と有意差の関係を見る

エネルギースペクトル

TAのエネルギースペクトル



各エネルギー毎の割合計算

$$\frac{N(on(E))}{N(on)} \quad \frac{N(off(E))}{N(off)}$$

$N(on)$: On-sourceのイベント数
 $N(off)$: Off-sourceのイベント数

グラフからイベント数を読み取る

Off-source 6 On-source 12

| | Off-source イベント数(割合) | On-source イベント数(割合) |
|--------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| $10^{19.7} \sim 10^{19.8} \text{eV}$ | 13 (0.60) | 17(0.50) |
| $10^{19.8} \sim 10^{19.9} \text{eV}$ | 6 (0.28) | 12(0.36) |
| $10^{19.9} \sim 10^{20.0} \text{eV}$ | 2.6(0.12) | 4.6(0.14) |

粒子の混合比

- バックグラウンドの組成比 **proton** : **iron** = 7:3
 - 7:3はTA実験のXmax分布を仮定したもの
- On-sourceの過剰分は proton**

On-source組成の計算

proton

$$p_p \frac{N(off)}{N(on)} + \frac{N(on) - N(off)}{N(on)}$$

iron

$$p_i \frac{N(off)}{N(on)}$$

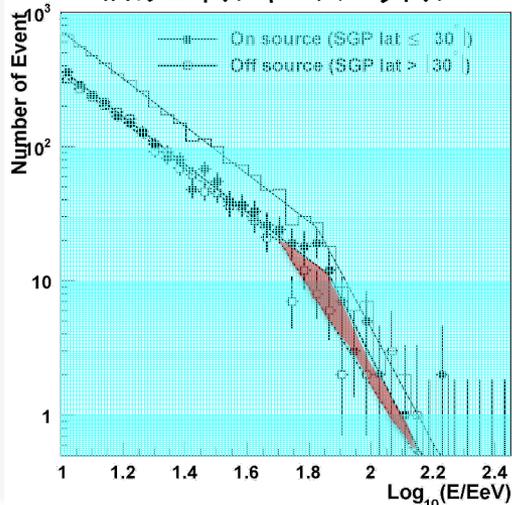
$N(on)$: On-sourceのイベント数
 $N(off)$: Off-sourceのイベント数
 p_i : ironの割合
 p_p : protonの割合

| | Off-source proton:iron | On-source proton:iron |
|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| $10^{19.7} \sim 10^{19.8} \text{eV}$ | 7 : 3 | 7.7 : 2.3 |
| $10^{19.8} \sim 10^{19.9} \text{eV}$ | 7 : 3 | 8.5 : 1.5 |
| $10^{19.9} \sim 10^{20.0} \text{eV}$ | 7 : 3 | 8.3 : 1.7 |

仮定に従ってランダムにイベントを取得する

エネルギースペクトル

TAのエネルギースペクトル



各エネルギー毎の割合計算

$$\frac{N(on(E))}{N(on)} \quad \frac{N(off(E))}{N(off)}$$

$N(on)$: On-sourceのイベント数
 $N(off)$: Off-sourceのイベント数

グラフからイベント数を読み取る

Off-source On-source
 6 12

| | Off-source イベント数(割合) | On-source イベント数(割合) |
|--------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| $10^{19.7} \sim 10^{19.8} \text{eV}$ | 13 (0.60) | 17(0.50) |
| $10^{19.8} \sim 10^{19.9} \text{eV}$ | 6 (0.28) | 12(0.36) |
| $10^{19.9} \sim 10^{20.0} \text{eV}$ | 2.6(0.12) | 4.6(0.14) |

粒子の混合比

- バックグラウンドの組成比 **proton** : **iron** = 7:3
 - 7:3はTA実験のXmax分布を仮定したもの
- **On-sourceの過剰分は proton**

On-source組成の計算

proton

$$p_p \frac{N(off)}{N(on)} + \frac{N(on) - N(off)}{N(on)}$$

iron

$$p_i \frac{N(off)}{N(on)}$$

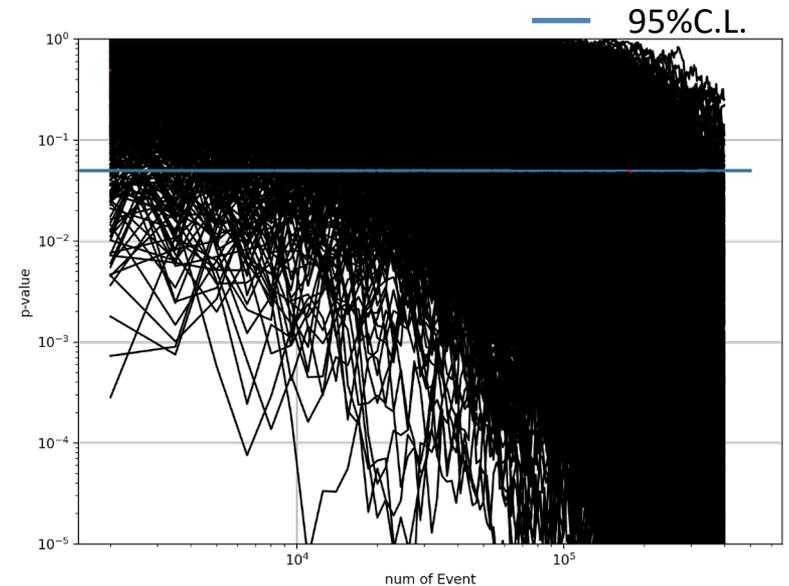
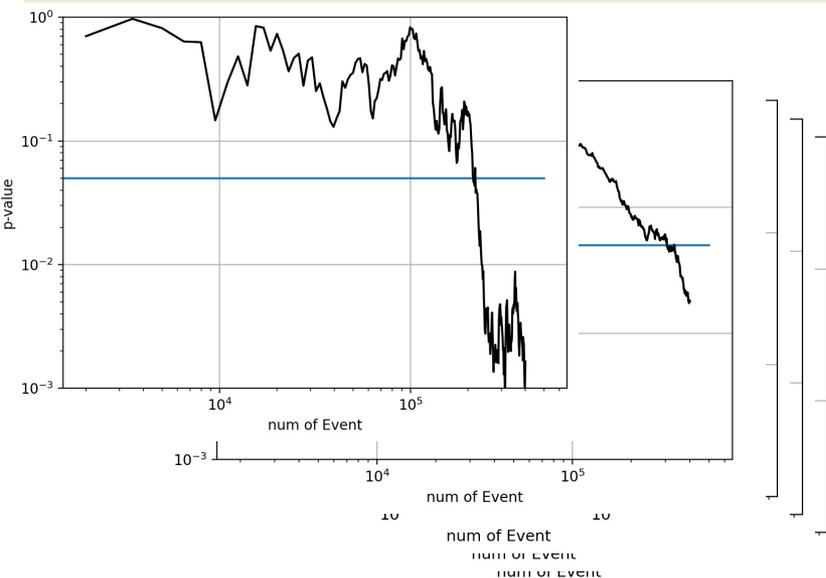
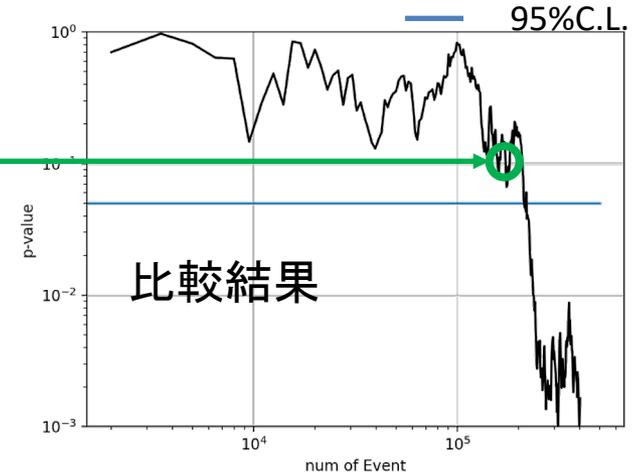
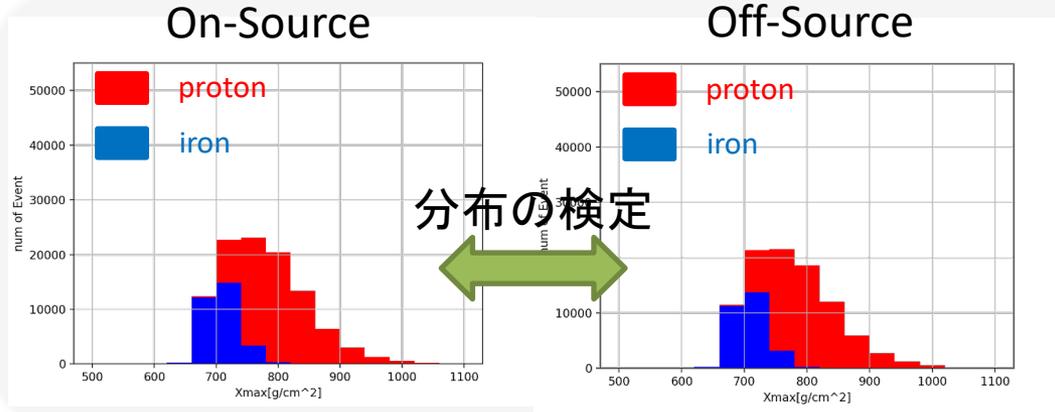
$N(on)$: On-sourceのイベント数
 $N(off)$: Off-sourceのイベント数
 p_i : ironの割合
 p_p : protonの割合

| | Off-source proton:iron | On-source proton:iron |
|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| $10^{19.7} \sim 10^{19.8} \text{eV}$ | 7 : 3 | 7.7 : 2.3 |
| $10^{19.8} \sim 10^{19.9} \text{eV}$ | 7 : 3 | 8.5 : 1.5 |
| $10^{19.9} \sim 10^{20.0} \text{eV}$ | 7 : 3 | 8.3 : 1.7 |

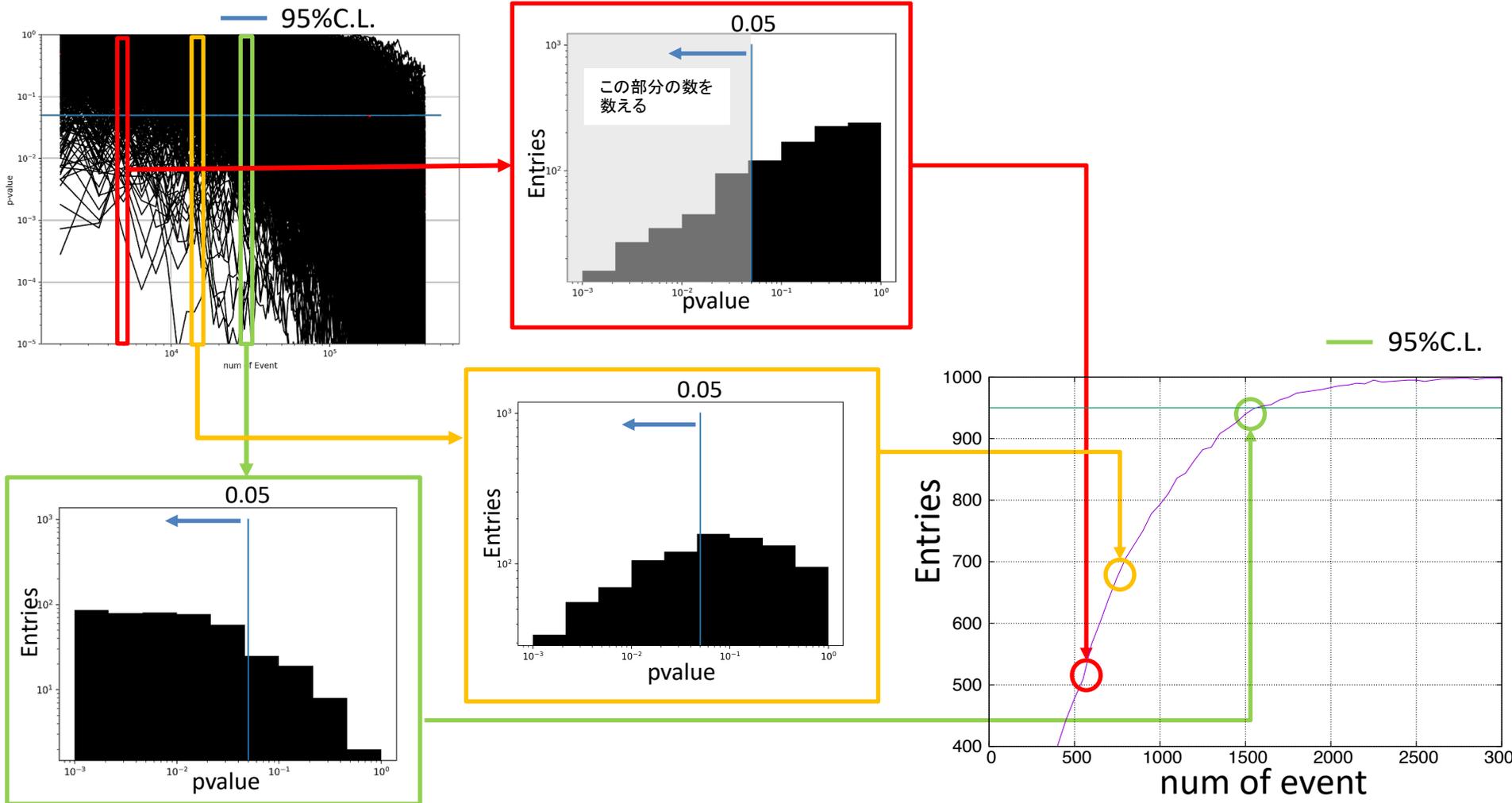
仮定に従ってランダムにイベントを取得する

On-sourceとOff-sourceのXmax分布の比較

- 50イベント増加するたびに分布を比較



pvalueが0.05より小さい事象を数える



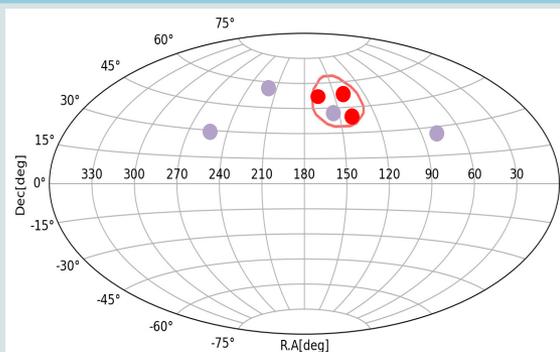
超銀河面近傍とそれ以外の領域において、
2領域における統計量とXmax分布の有意差の関係が得られた

エネルギー、粒子種ごとにXmaxのデータベースを作成する

エネルギースペクトル、混合比を仮定する

イベントの取得(HotSpot)

HotSpot vs それ以外の領域



全天に等方的
(Mixed composition)

+

HotSpotに過剰に到来
(proton)

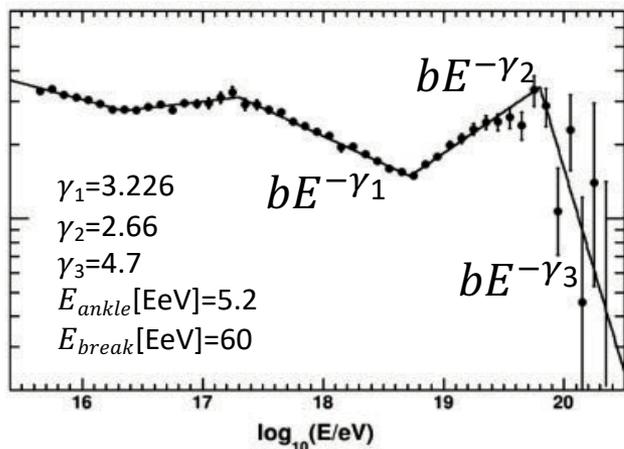
超銀河面の解析から変更した点

- 仮定する混合組成比
proton、iron 以外にCNO,Siも使用
- 仮定するエネルギースペクトル

2つの領域のXmax分布を比較する

分布に有意差が生じる統計量を求める

エネルギースペクトル



実際の到来数 期待される到来数 過剰分の到来数

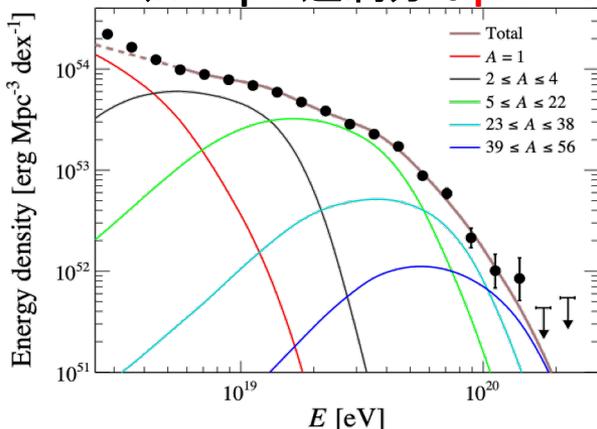
19 4.49 14.41

Background HotSpot

| | 割合 | 割合 |
|--------------------------------------|------|------|
| $10^{19.7} \sim 10^{19.8} \text{eV}$ | 0.65 | 0.65 |
| $10^{19.8} \sim 10^{19.9} \text{eV}$ | 0.26 | 0.26 |
| $10^{19.9} \sim 10^{20.0} \text{eV}$ | 0.09 | 0.09 |

Valerio Verzi1,*, Dmitri Ivanov2,*, and Yoshiki Tsunesada PTEP 2017, 12A103

組成の混合比 (HotSpot過剰分はproton)



proton
 $\frac{N(on) - N(off)}{N(on)}$

CNO
 $\frac{N(off)}{N(on)}$

Si
 $p_{si} \frac{N(off)}{N(on)}$

iron
 $p_i \frac{N(off)}{N(on)}$

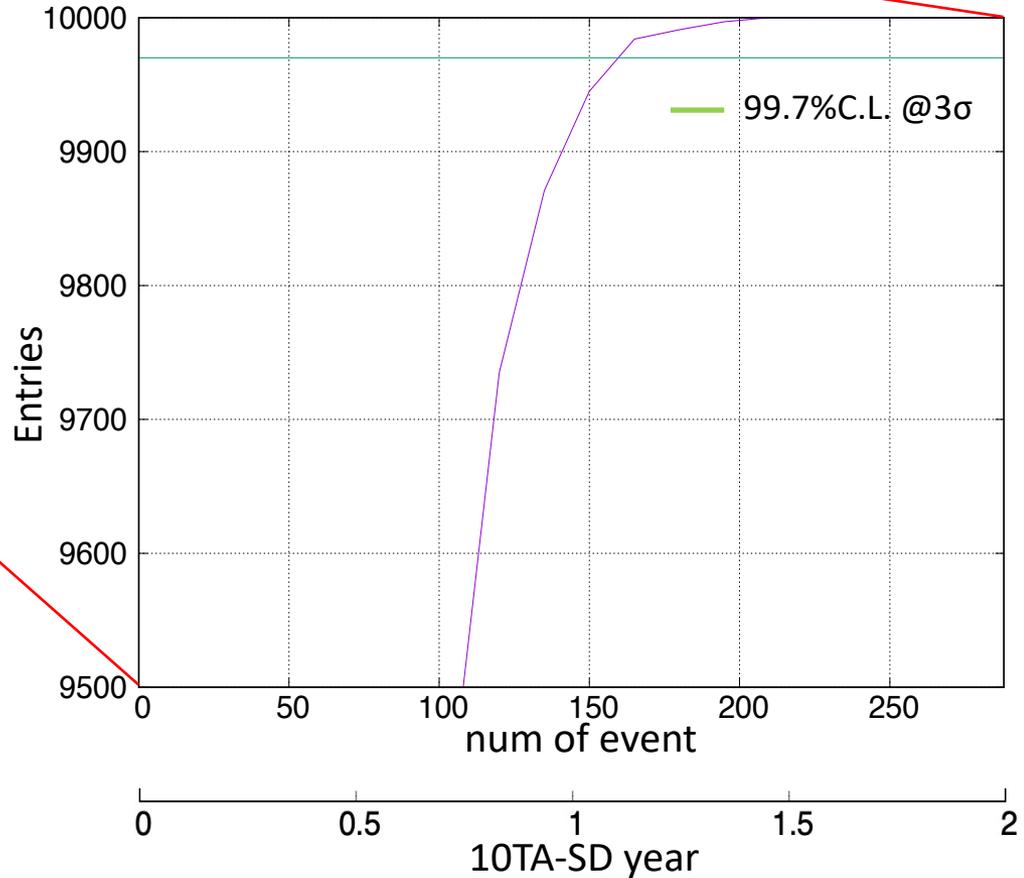
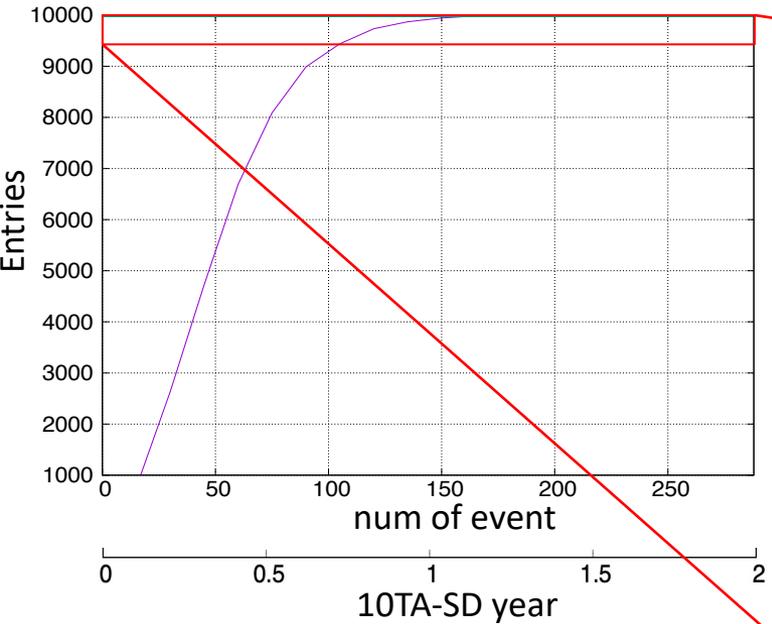
p_i : Feの割合
 p_{cno} : CNOの割合
 p_{si} : Siの割合
 $N(on)$: 実際のイベント数
 $N(off)$: 期待されるイベント数

Background HotSpot

| | proton : CNO : Si : iron | proton : CNO : Si : iron |
|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $10^{19.7} \sim 10^{19.8} \text{eV}$ | 0.0 : 4.4 : 4.4 : 1.2 | 7.6 : 1.1 : 1.1 : 0.2 |
| $10^{19.8} \sim 10^{19.9} \text{eV}$ | 0.0 : 2.6 : 5.4 : 2.0 | 7.6 : 0.6 : 1.3 : 0.5 |
| $10^{19.9} \sim 10^{20.0} \text{eV}$ | 0.0 : 1.6 : 5.2 : 3.2 | 7.6 : 0.4 : 1.2 : 0.8 |

Auger, PHYSICAL REVIEW LETTERS 125, 121106 (2020)

仮定に従ってランダムにイベントを取得しXmax分布を比較

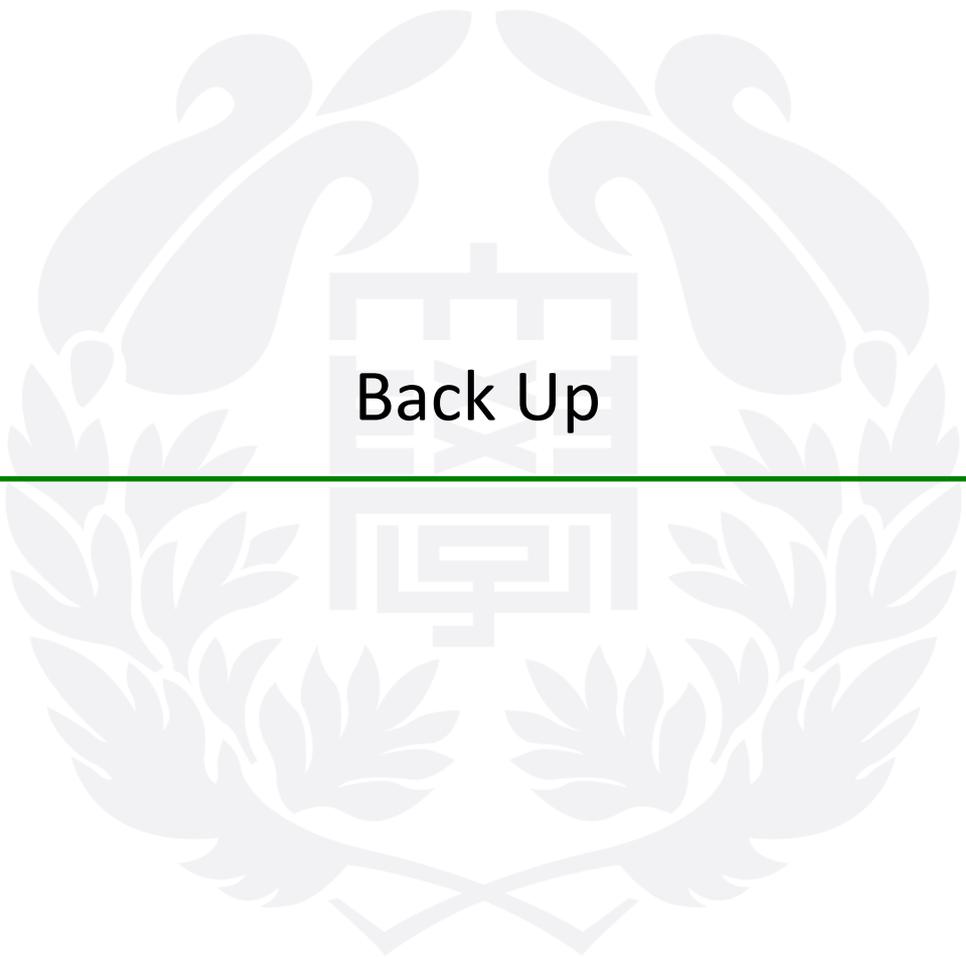


160イベント程度で分布が分かれる

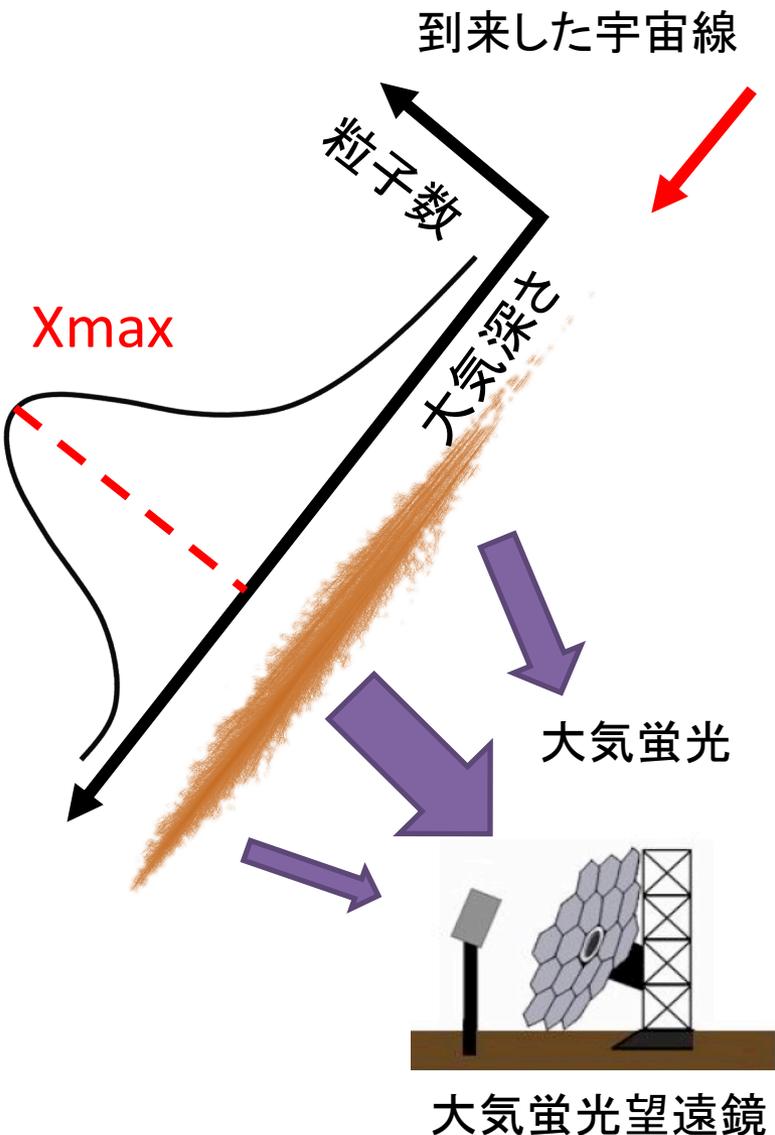
- 現行の実験では統計量不足のため X_{\max} 異方性が見つかっていない
- これまでの実験により得られた様々なパラメータを用い、シミュレーションを行い X_{\max} 異方性が見つかるまでの統計量を見積もった
- TAサイトで観測した場合のイベント期待値は
 - 超銀河面 約1500イベント(粒子種はproton,iron)
 - HotSpot 約 160イベント(粒子種はproton,iron,CNO,Si)
 - 10TA-SD換算で約1年強で X_{\max} 分布が有意に分かれる

今後の展望

- 様々な仮定に対して本解析を行い、次世代実験の規模を見積もる

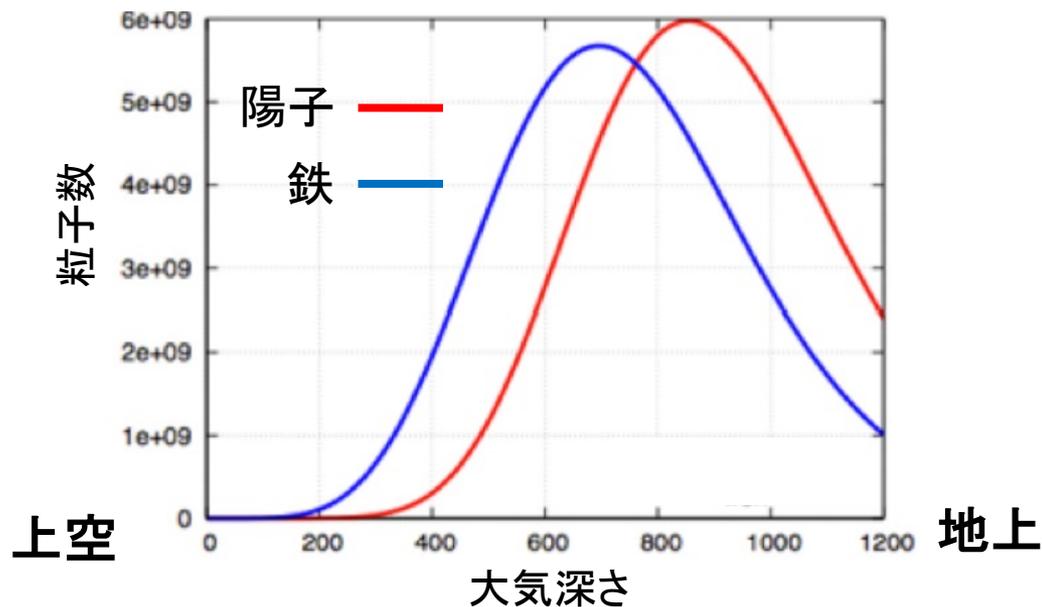


Back Up



Xmax : 宇宙線空気シャワーの最大発達深さ
宇宙線の質量組成に強く依存する

大気蛍光望遠鏡(FD)では、大気蛍光の光量を測定することによって空気シャワーにおける縦方向の発達を観測することができる



シミュレーションによる空気シャワーの縦方向発達

生成した粒子種

Proton, iron, CNO, Si

空気シャワーシミュレーション条件

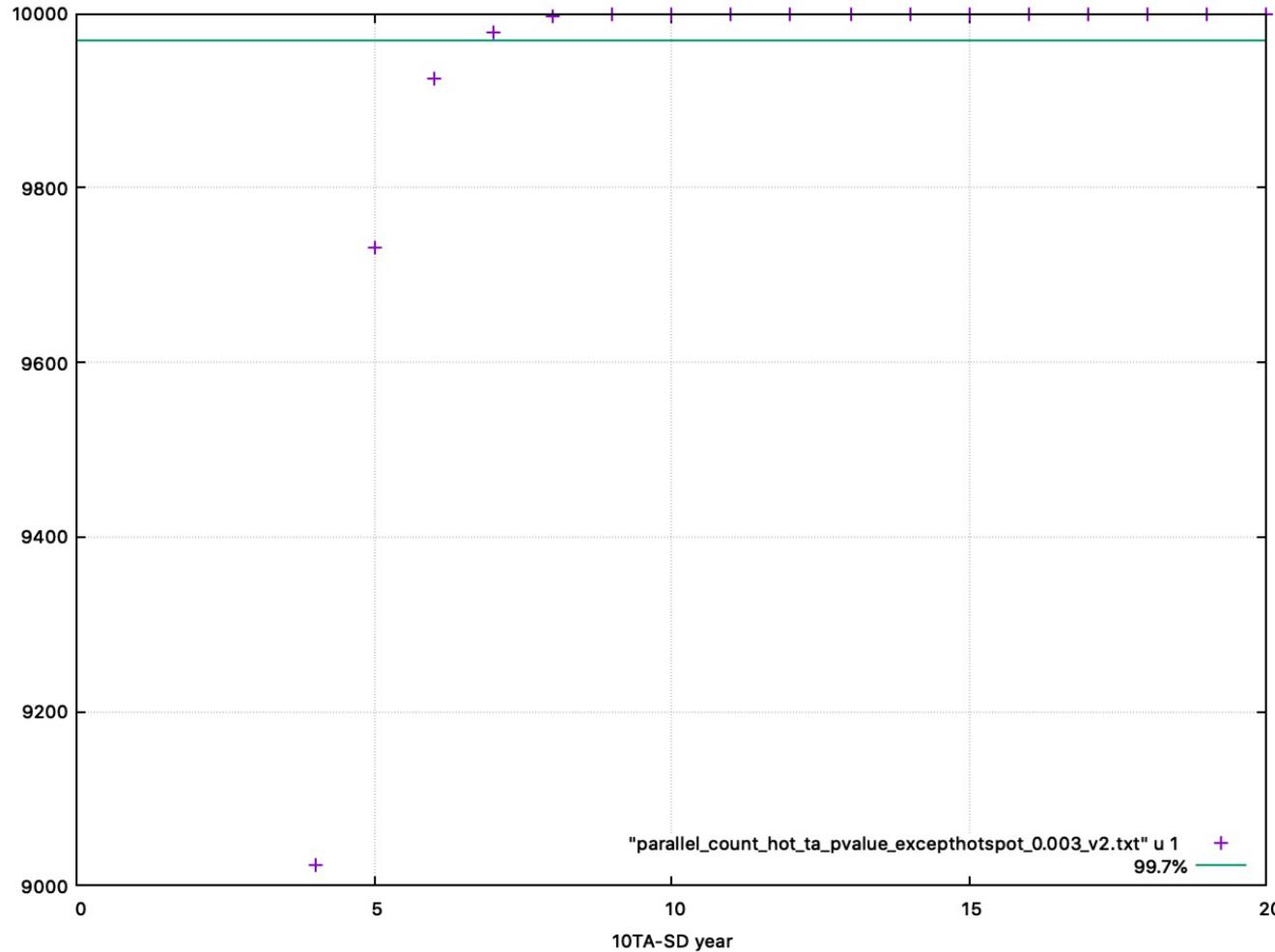
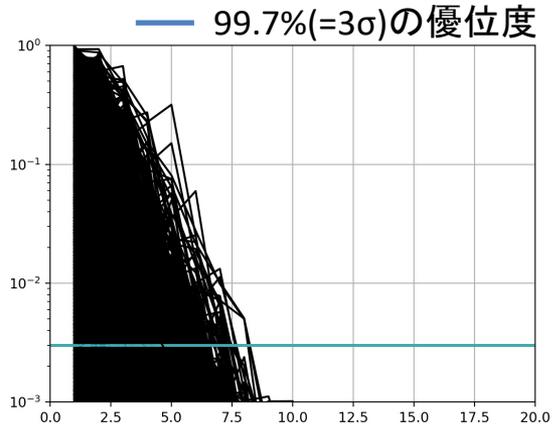
energy : $10^{19.7}$ eV \sim $10^{20.0}$ eV

dLogE = 0.1

thinning factor = -4

slope = -2

各エネルギーごとに1500イベント生成



1. ironとprotonからなる合成確率密度分布 f を求める
2. f を N 倍したものと、実データに対してKStestを行う
3. 1~2をiron:proton = 1:0 \rightarrow iron:proton = 0:1まで混合比を0.01ずつ変化させ、pvalueを計算
4. 全てのエネルギーに対して行う

合成確率密度分布 : f
 実データのイベント数 : N

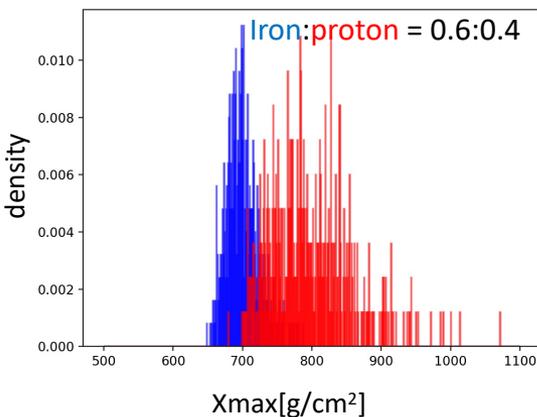
合成確率密度分布
 $f = i_{raito} + p_{raito}$

i_{raito} : ironの確率密度分布
 p_{raito} : protonの確率密度分布 $i_{raito} + p_{raito} = 1$

この2群についてKStestを行う

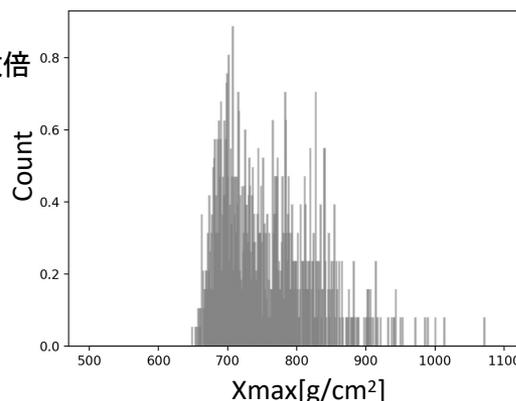
10^{19.0}~10^{19.1} eV \longleftrightarrow 10^{19.0}~10^{19.1} eV

10^{19.0}~10^{19.1} eV

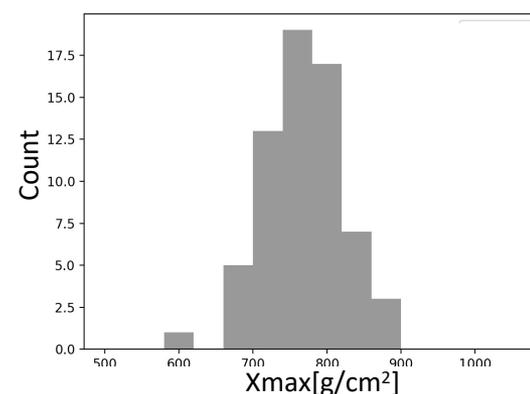


シミュレーションデータでの
 ironとprotonの確率密度分布

実データのイベント数倍

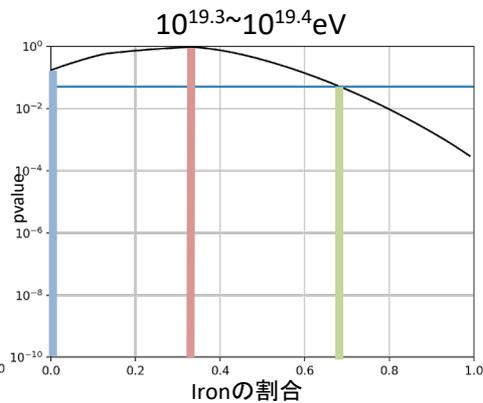
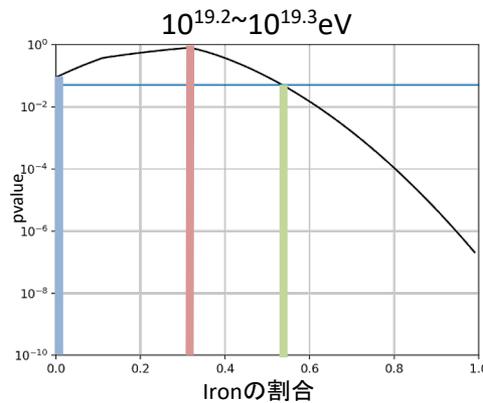
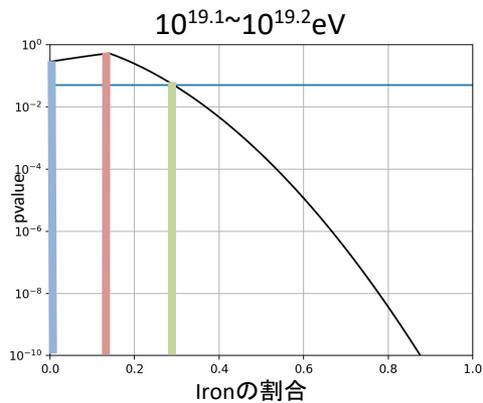
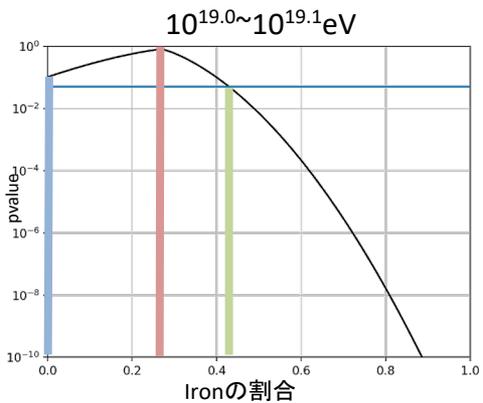


期待されるXmax分布



TAの実データXmax分布

iron : proton

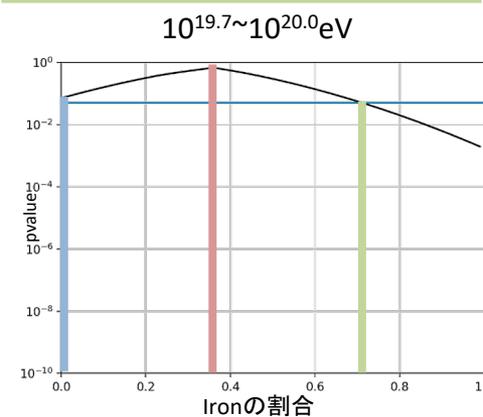
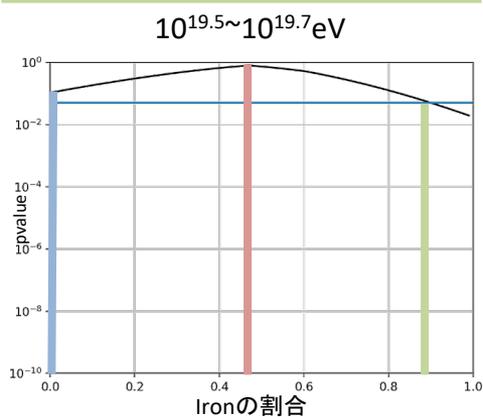
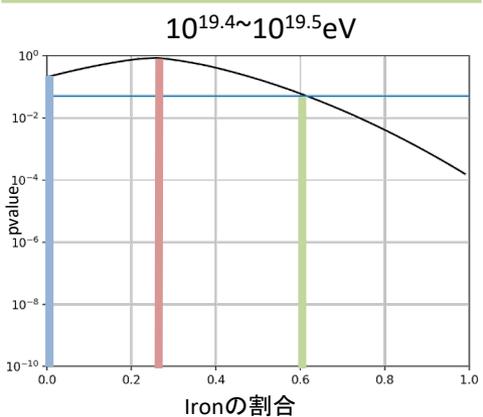


| |
|-------------|
| 0.00 : 1.00 |
| 0.27 : 0.73 |
| 0.42 : 0.58 |

| |
|-------------|
| 0.00 : 1.00 |
| 0.14 : 0.86 |
| 0.29 : 0.71 |

| |
|-------------|
| 0.00 : 1.00 |
| 0.31 : 0.69 |
| 0.53 : 0.47 |

| |
|-------------|
| 0.00 : 1.00 |
| 0.33 : 0.67 |
| 0.68 : 0.32 |



| |
|-------------|
| 0.00 : 1.00 |
| 0.26 : 0.74 |
| 0.61 : 0.39 |

| |
|-------------|
| 0.00 : 1.00 |
| 0.47 : 0.53 |
| 0.90 : 0.10 |

| |
|-------------|
| 0.00 : 1.00 |
| 0.36 : 0.64 |
| 0.71 : 0.29 |

K-S(コルモゴロフ=スミルノフ)検定

2つの標本についてそれぞれの母集団の確率分布が一致しているのかどうかのノンパラメトリック検定

仮説

標本X x_1, x_2, \dots, x_n

標本Y y_1, y_2, \dots, y_m

がある時、標本Xと標本Yが同一の確率分布から生成されている

累積確率分布の差の最大を求める

$$D = \max |S_n(x) - S_m(x)|$$

n、m、Dの値を用いて以下を計算

$$K = D \sqrt{\frac{nm}{n+m}}$$



n = 標本Xのデータ数

m = 標本Yのデータ数

$S_n(x)$ = 標本Xの累積確率分布

$S_m(x)$ = 標本Yの累積確率分布

Kの値からpvalueを求める

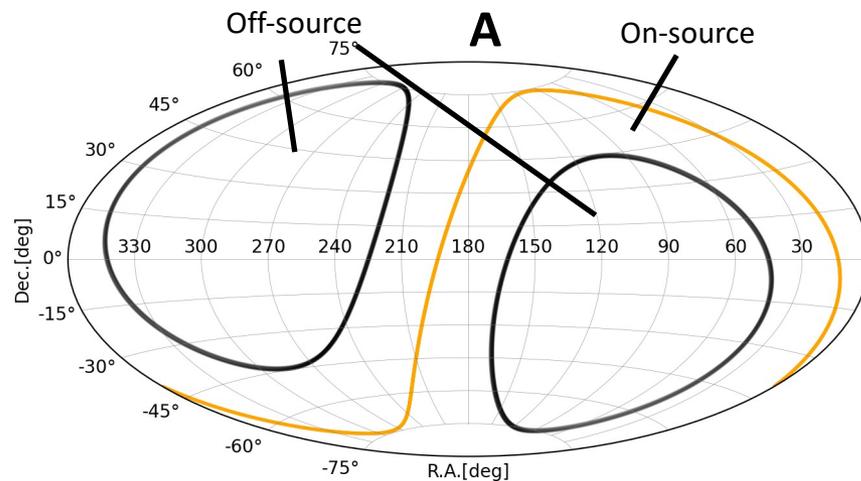
(Kの値が1.36 → pvalueが0.05)

2021年の論文にOn-sourceとOff-sourceのexposure ratio について記載されていた

2. Experiment and analysis

The Telescope Array(TA) experiment [2] is a hybrid detector which observe cosmic rays have energy $E > 10^{18}$ eV using fluorescence telescopes and surface detector. The surface detector of TA consists of 507 scintillation counters deployed in 1.2km covering about 700 km². [1]. The energies of observed cosmic ray are calibrated against fluorescence detectors viewing the sky above the surface detector array. The TA surface detector started observation in 2008. Observation efficiency exceeded 95% for every year of operation since the start. Now the accumulated exposure for UHECR is the largest in the northern hemisphere In this analysis, cosmic ray events with energies $E > 10^{19.0}$ eV observed in the period May 2008 to May 2020 are included in a search for anisotropy in cosmic ray energy spectrum. For this analysis, the reconstruction resolution is about 20% for energy and about 2° for arrival direction [2, 6]. From Monte Carlo simulation, we find the detection efficiency to reach 100% for events above $E > 10^{19}$ eV for the shower zenith angle $< 55^\circ$. The zenith angle distribution of observed shower at zenith angle $< 55^\circ$ is plotted in Fig 1. In this analysis, we divide the sky covered by our exposure into just 2 parts. One is the area which contain nearby objects. Another is the area which does not contain close objects. In this paper, we note the former area as "On source" sky. another area as "Off source" sky. We performed analysis defining On and Off source area as follow. First the Super Galactic Plane (SGP) is a plane contains nearby galaxies of our Local Group [4]. Here we divide the TA exposure equally between the "on source" band with in $\pm 30^\circ$ about and "Off source" area outside that region. The fraction of TA exposure for each area is 52% and 48%. The zenith angle distribution for observing the On source and Off source area are plotted together in Fig.2. These distributions show no significant difference and indicate that that the two sets of events cover similar local angles on the ground.

In Fig.3 and Fig.4 compare the energy distributions of observed air shower events from these On and Off source areas. The shape of distributions are evaluated by a likelihood fit to piece-wise

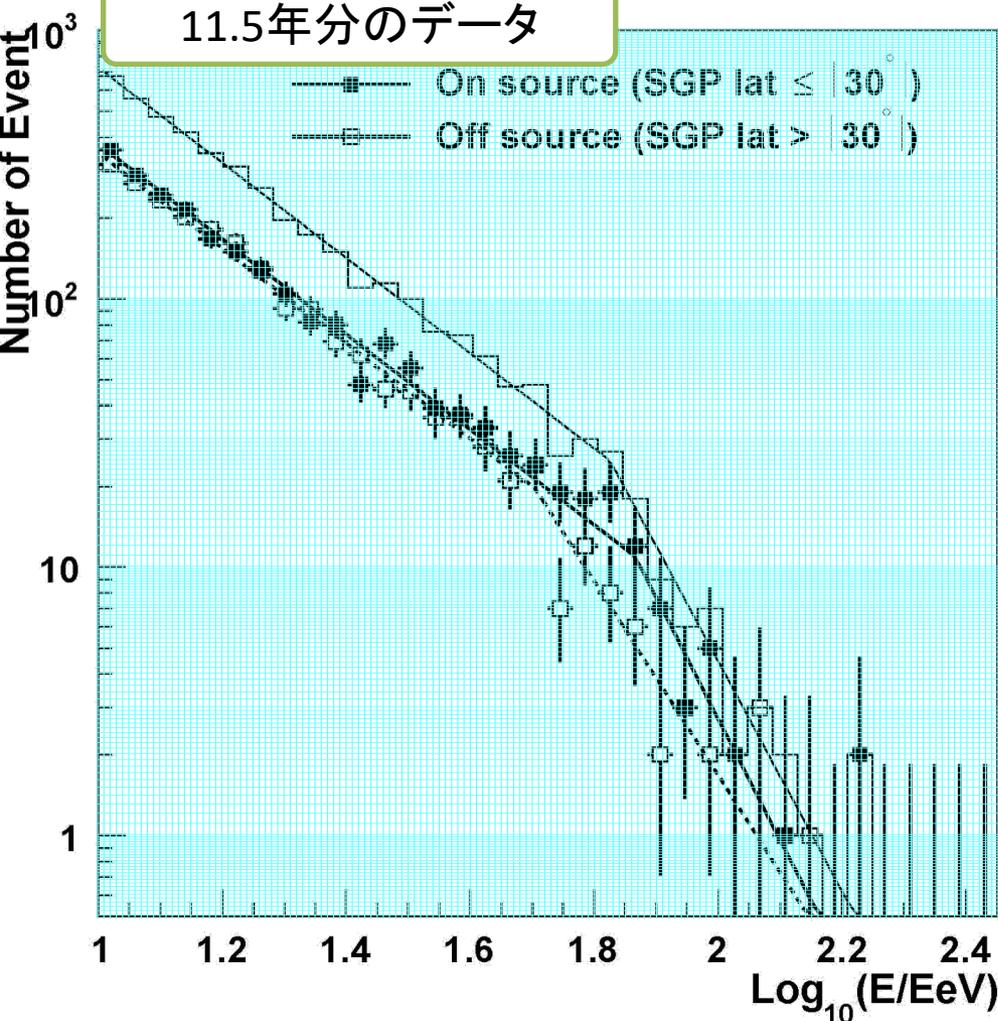


On-source : Off-source
52% : 48%

上記の確率でイベントを取得する

- T.Nonaka ICRC 2021 2

Anisotropy search in the Ultra High Energy Cosmic Ray Spectrum in the Northern Hemisphere using latest data obtained with Telescope Array surface detector



各エネルギー毎の確率

$N(on, off)$: ある領域での総イベント数

$N(on(E), off(E))$: ある領域、エネルギーでのイベント数

On-source

$$\frac{N(on(E))}{N(on)}$$

Off-source

$$\frac{N(off(E))}{N(off)}$$

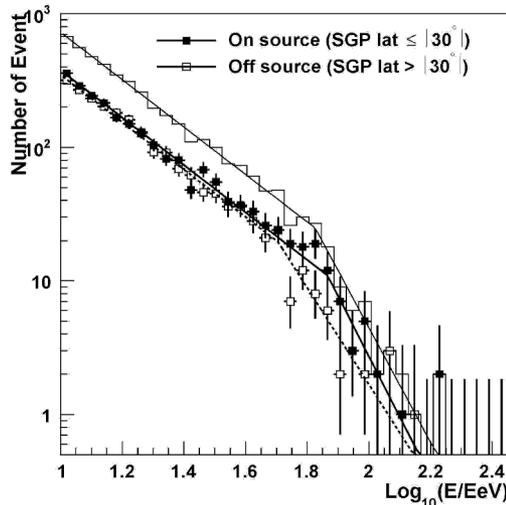
On-source

Off-source

| | On-source 確率(イベント数) | Off-source 確率(イベント数) |
|--------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| $10^{19.0} \sim 10^{19.1} \text{eV}$ | 0.347(310) | 0.345(280) |
| $10^{19.1} \sim 10^{19.2} \text{eV}$ | 0.224(224) | 0.234(190) |
| $10^{19.2} \sim 10^{19.3} \text{eV}$ | 0.151(135) | 0.154(125) |
| $10^{19.3} \sim 10^{19.4} \text{eV}$ | 0.101(90) | 0.103(84) |
| $10^{19.4} \sim 10^{19.5} \text{eV}$ | 0.067(60) | 0.066(54) |
| $10^{19.5} \sim 10^{19.6} \text{eV}$ | 0.045(40) | 0.042(36) |
| $10^{19.6} \sim 10^{19.7} \text{eV}$ | 0.029(26) | 0.030(24) |
| $10^{19.7} \sim 10^{19.8} \text{eV}$ | 0.018(17) | 0.016(13) |
| $10^{19.8} \sim 10^{19.9} \text{eV}$ | 0.013(12) | 0.007(6) |
| $10^{19.9} \sim 10^{20.0} \text{eV}$ | 0.005(4.6) | 0.003(2.6) |

各エネルギーでの組成比は過去に求めた表の値を採用する

➤ $10^{19.7}$ 以降のOn-sourceはprotonを増やした時の値



各エネルギーでの組成比

On-source Off-source

| | iron:proton | iron:proton |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| $10^{19.0} \sim 10^{19.1}$ eV | 3 : 7 | 3 : 7 |
| $10^{19.1} \sim 10^{19.2}$ eV | 3 : 7 | 3 : 7 |
| $10^{19.2} \sim 10^{19.3}$ eV | 3 : 7 | 3 : 7 |
| $10^{19.3} \sim 10^{19.4}$ eV | 3 : 7 | 3 : 7 |
| $10^{19.4} \sim 10^{19.5}$ eV | 3 : 7 | 3 : 7 |
| $10^{19.5} \sim 10^{19.6}$ eV | 3 : 7 | 3 : 7 |
| $10^{19.6} \sim 10^{19.7}$ eV | 3 : 7 | 3 : 7 |
| $10^{19.7} \sim 10^{19.8}$ eV | 2.3 : 7.7 | 3 : 7 |
| $10^{19.8} \sim 10^{19.9}$ eV | 1.5 : 8.5 | 3 : 7 |
| $10^{19.9} \sim 10^{20.0}$ eV | 1.7 : 8.3 | 3 : 7 |

i : ironの比 p : protonの比

$i^{19.7}$: $10^{19.7}$ 以降でのironの比

$p^{19.7}$: $10^{19.7}$ 以降でのprotonの比

$N(on)$: オンソースのイベント数

$N(off)$: オフソースのイベント数

iron

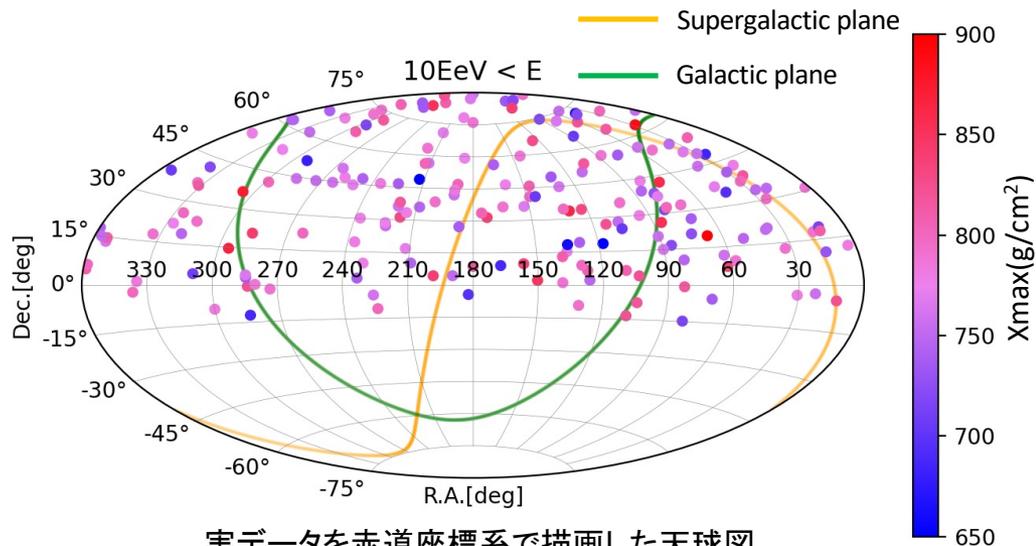
$$i \frac{N(off)}{N(on)} + i^{19.7} \frac{N(on) - N(off)}{N(on)}$$

proton

$$p \frac{N(off)}{N(on)} + p^{19.7} \frac{N(on) - N(off)}{N(on)}$$

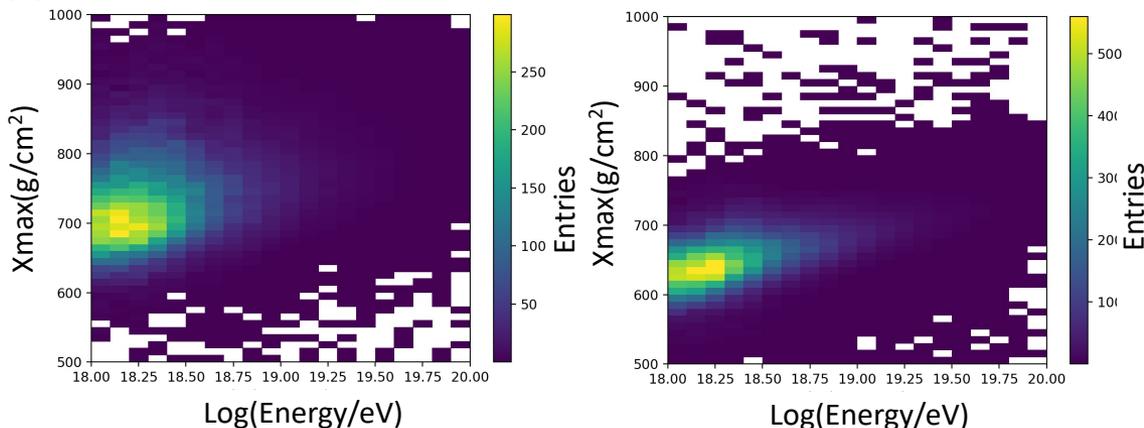
● 実データ

- データ数 : 4866
- データ種類 : Hybridデータ
- 観測期間 : 2008/5/27~2016/5/4



● MCデータ

- 相互作用モデル : QGSJET-II-03
- 粒子種 : 陽子、鉄
- log(E/eV) : 18.0 - 20.0
- 到来方向 : 天頂角 0 - 60°
方位角 0 - 360°



TAで観測される、Xmax vs エネルギーのヒストグラム
左:陽子のみ 右:鉄のみ

陽子度

宇宙線の質量組成が陽子、鉄のどちら寄りかを示したパラメータ

陽子度が高い→組成が陽子に近い

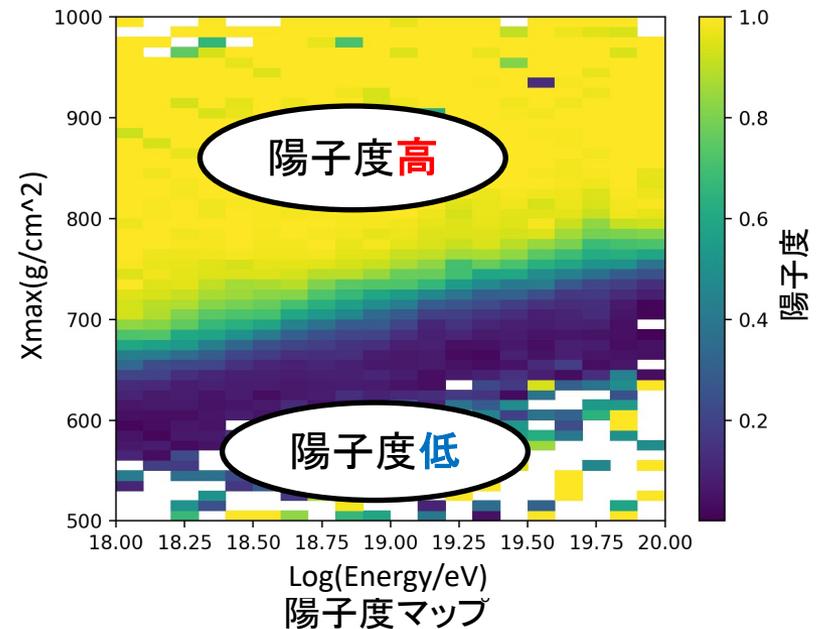
陽子度が低い→組成が鉄に近い

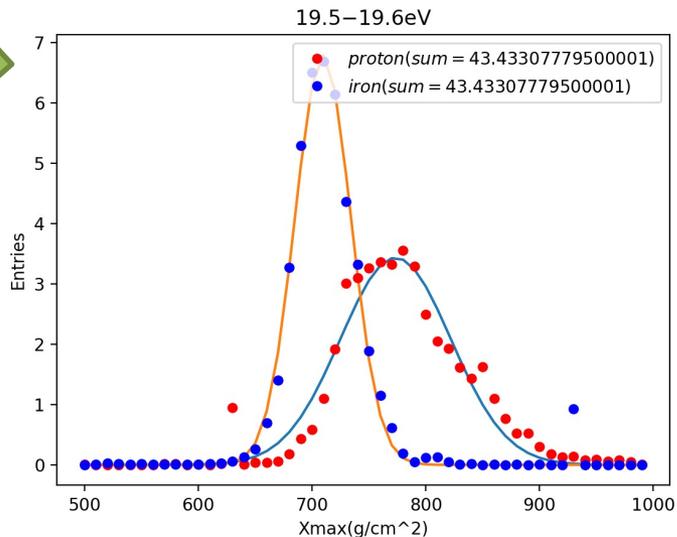
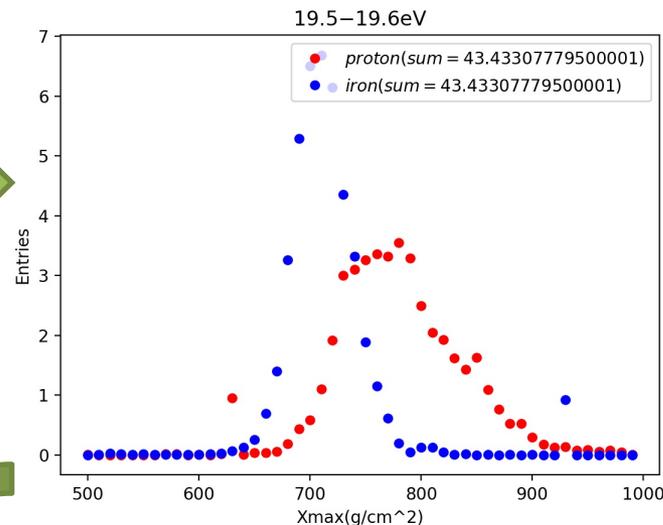
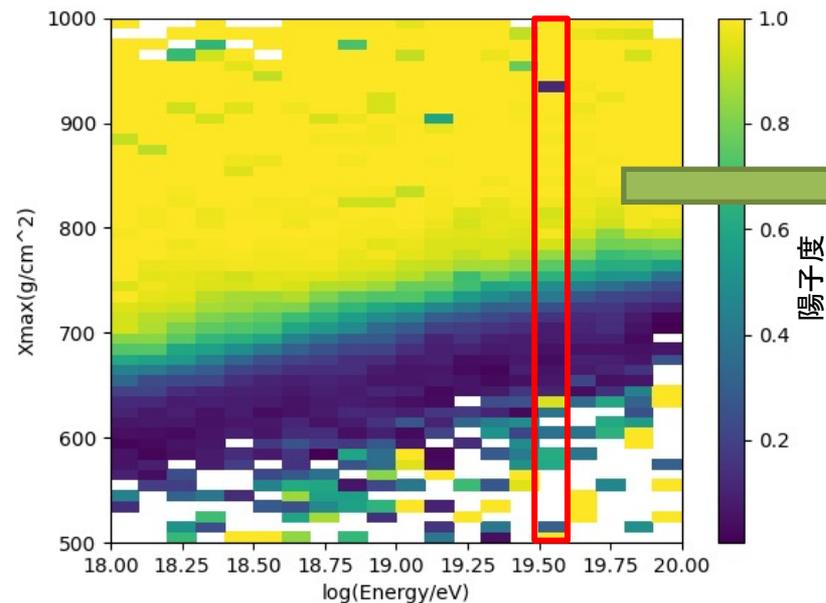
計算式

$$\frac{N_p}{N_{all}} = \frac{N_p}{N_p + NF_e}$$

N_p : 格子内の陽子の数

N_{Fe} : 格子内の鉄の数

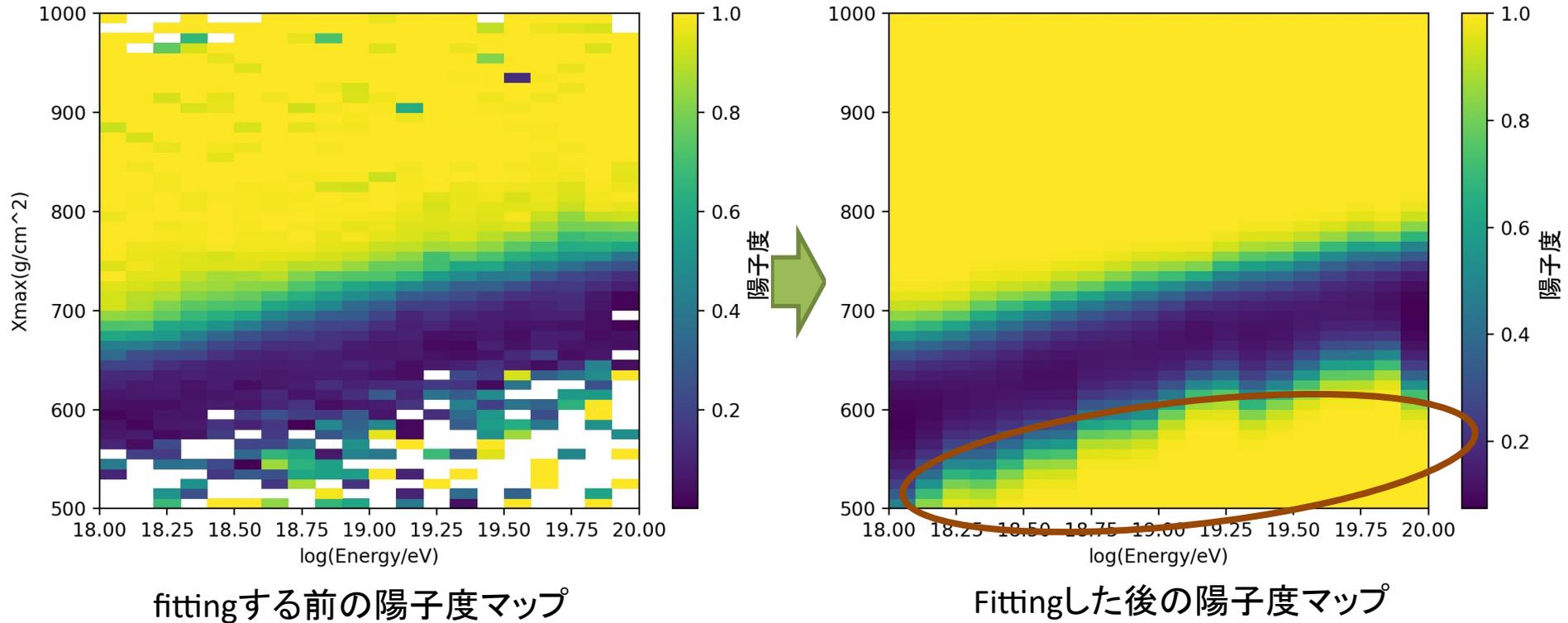




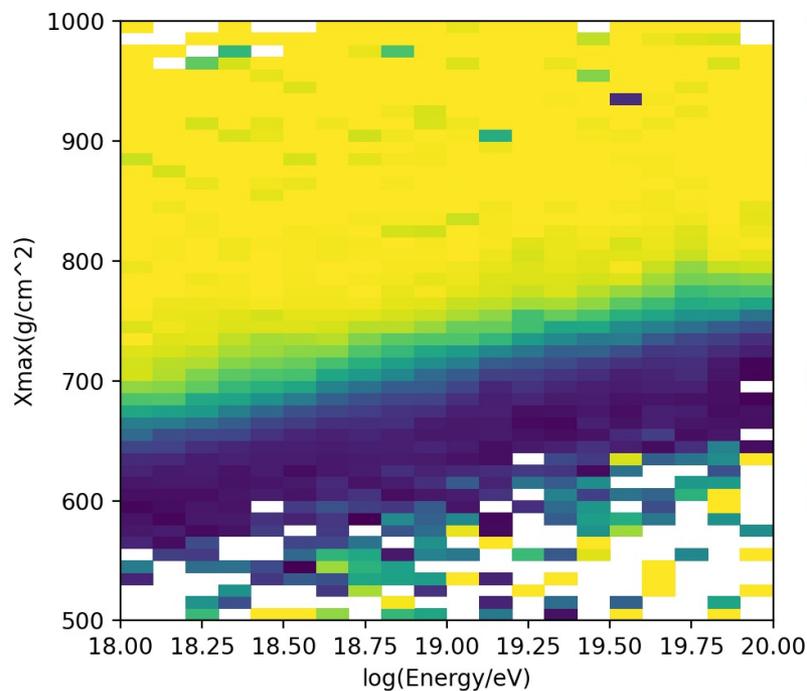
- 陽子と鉄のエントリーに対してfit
- Fitting関数としてガウス関数を使用

Fitting関数

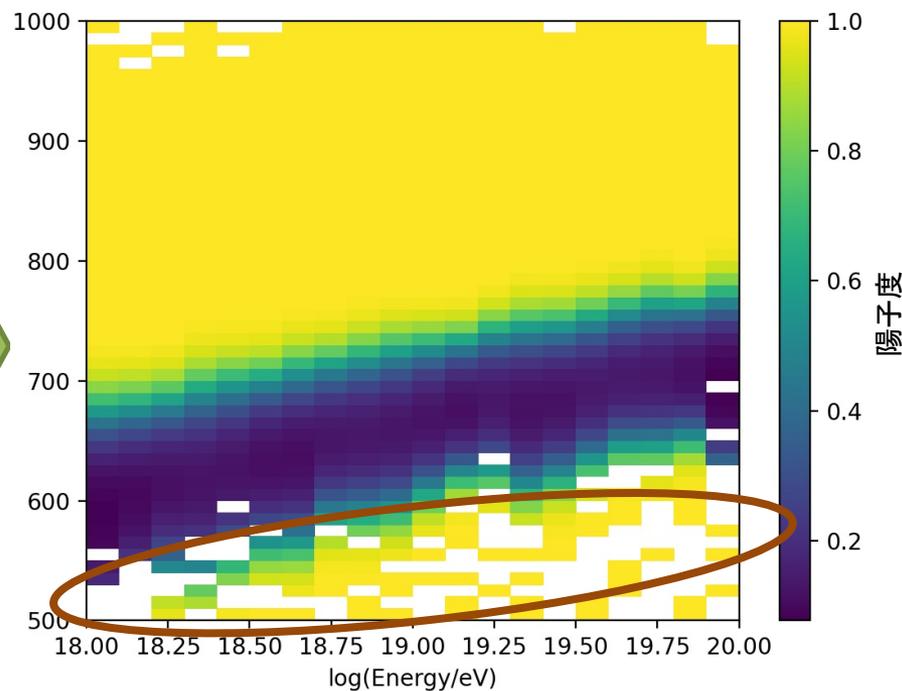
$$a * \exp\left\{-\frac{(x - b)^2}{2c^2}\right\}$$



茶色く囲まれた領域の陽子度が高くなるのは不自然



fittingする前の陽子度マップ



Fittingした後の陽子度マップ

茶色く囲まれた領域の陽子度が高くなるのは不自然

茶色く囲まれた領域は正しく評価できていないため今回は陽子度を0として扱う

陽子度

宇宙線の質量組成が陽子、鉄のどちら寄りの重さなのかを表したパラメータ

陽子度が高い→組成が陽子に近い

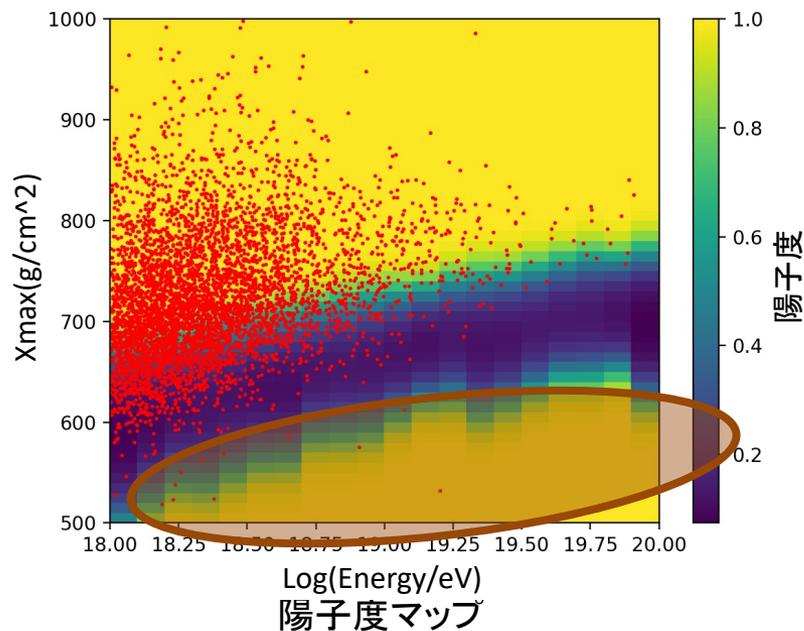
陽子度が低い→組成が鉄に近い

計算式

$$\frac{N_p}{N_{all}} = \frac{N_p}{N_p + NF_e}$$

N_p : 格子内の陽子の数

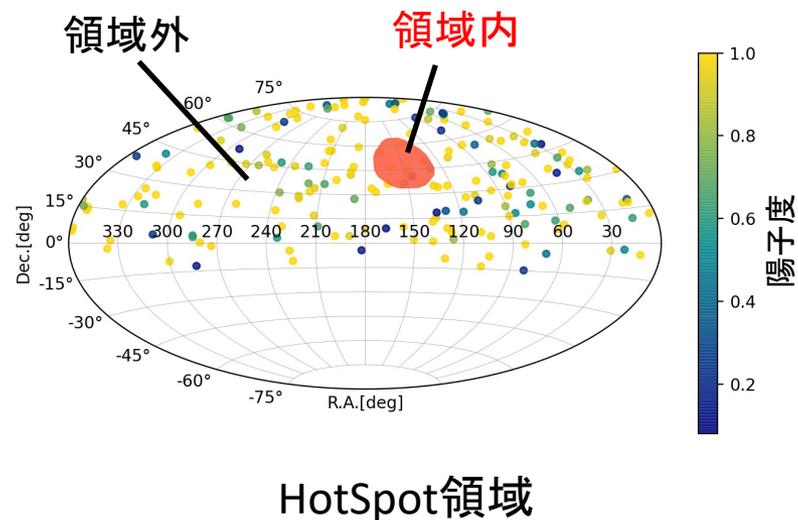
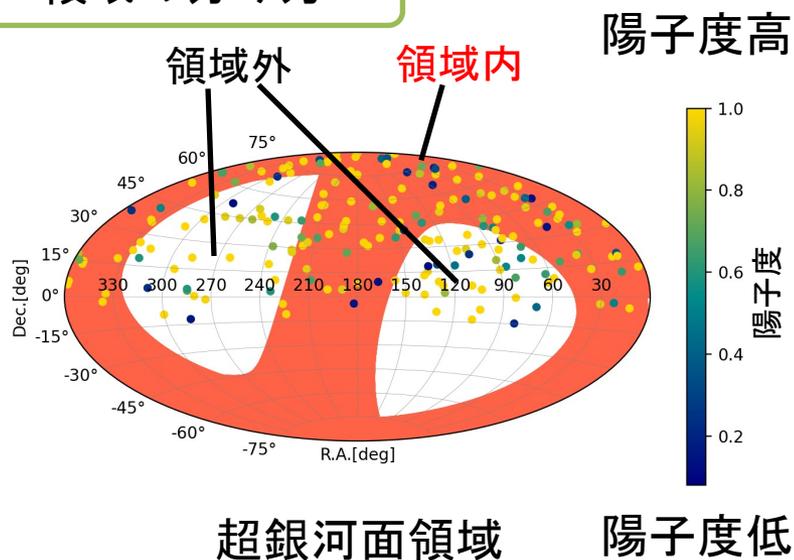
N_{Fe} : 格子内の鉄の数



実データのXmaxとエネルギーから陽子度を判定

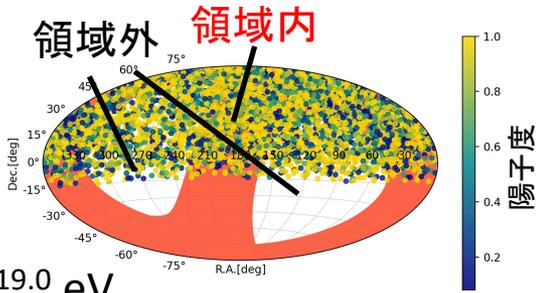
実データの陽子度を判定した後、
天球を2領域に分割し、各領域に到来した宇宙線の陽子度を比較

領域の分け方

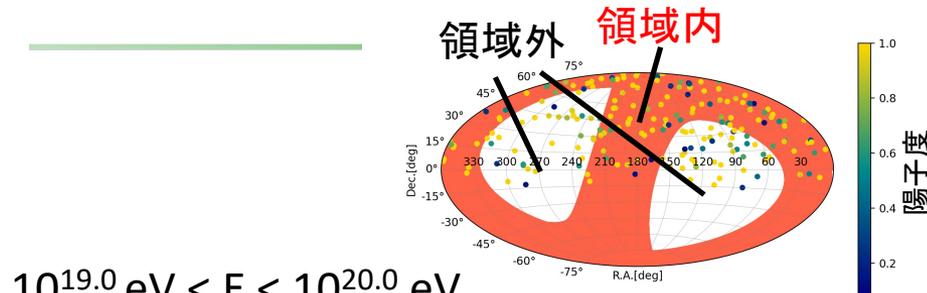


到来した宇宙線を赤い領域とそれ以外の領域で分類

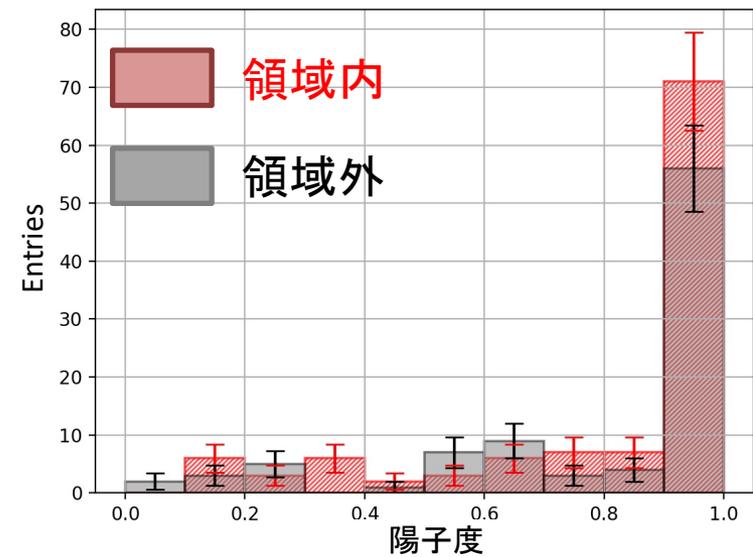
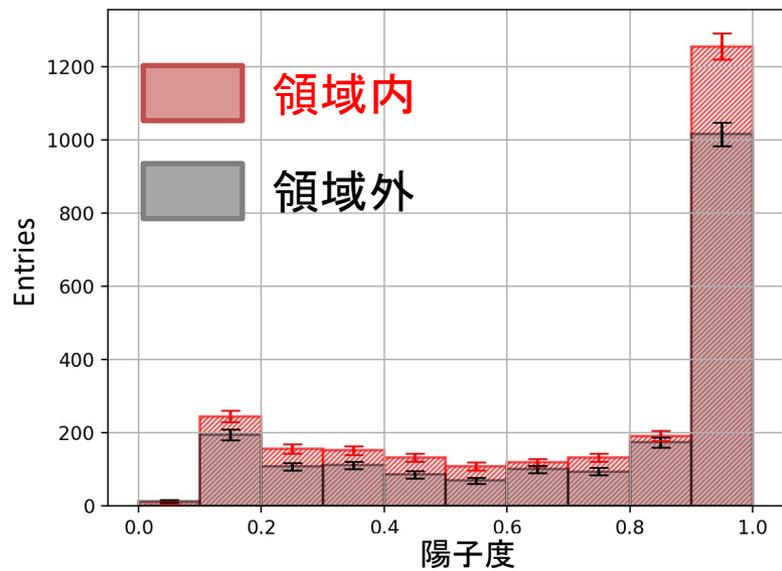
➡ 領域別に陽子度を比較



$10^{18.0} \text{ eV} < E < 10^{19.0} \text{ eV}$



$10^{19.0} \text{ eV} < E < 10^{20.0} \text{ eV}$



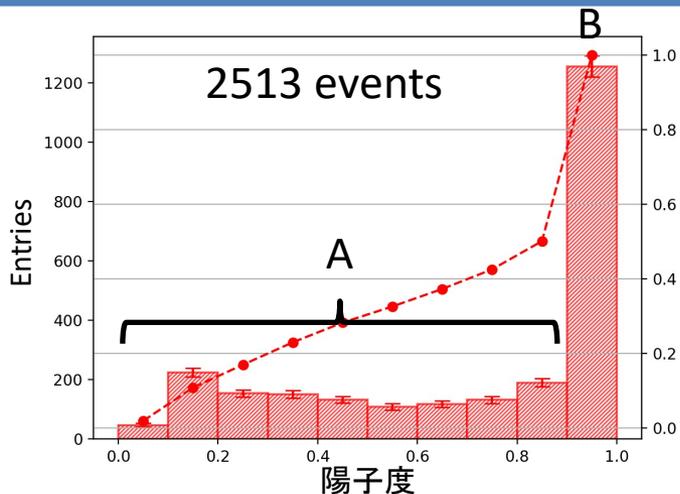
| | 中央値+分布幅(1σ) -分布幅(1σ) | イベント数 |
|-----|---------------------------|-------|
| 領域内 | $0.898^{+0.101}_{-0.625}$ | 2513 |
| 領域外 | $0.911^{+0.088}_{-0.639}$ | 1974 |

| | 中央値+分布幅(1σ) -分布幅(1σ) | イベント数 |
|-----|---------------------------|-------|
| 領域内 | $0.989^{+0.011}_{-0.431}$ | 111 |
| 領域外 | $0.952^{+0.047}_{-0.360}$ | 90 |

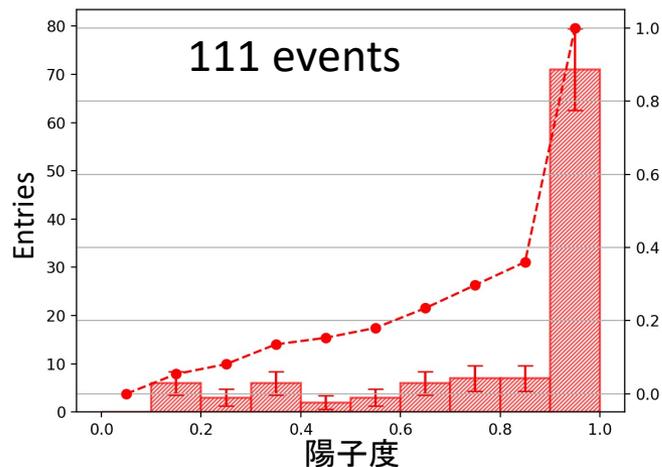
$10^{18.0} \text{ eV} < E < 10^{19.0} \text{ eV}$

$10^{19.0} \text{ eV} < E < 10^{20.0} \text{ eV}$

領域内

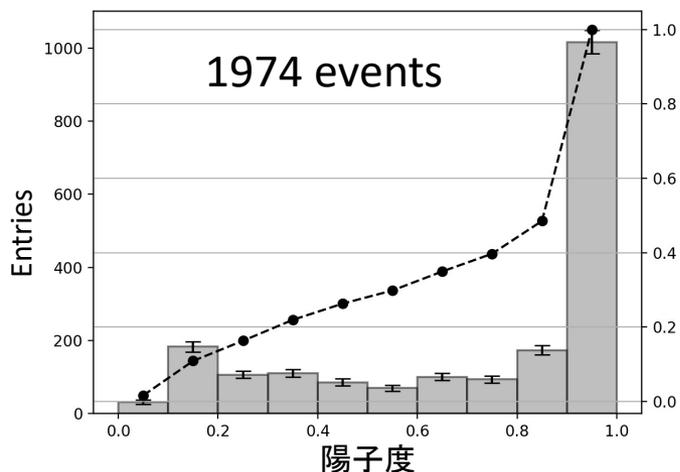


A : B 0.501 : 0.499

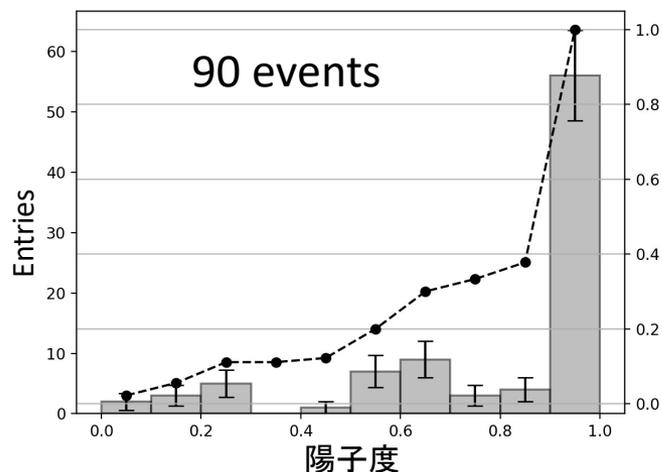


A : B 0.360 : 0.640

領域外

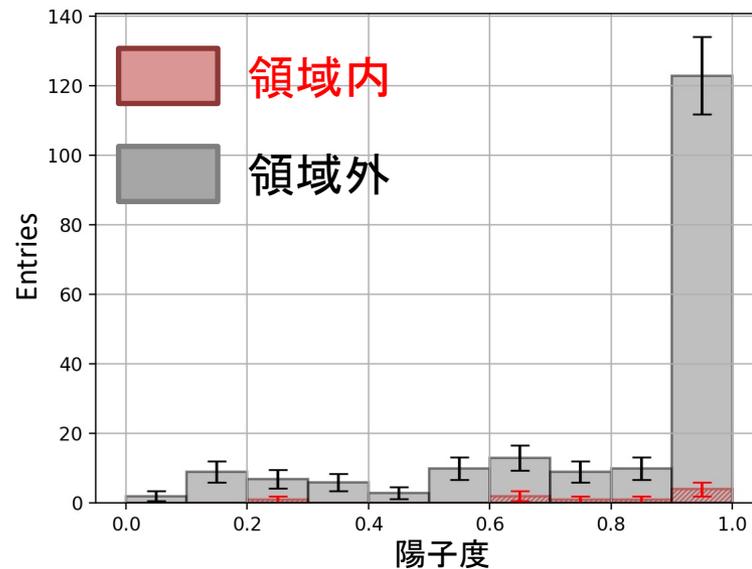
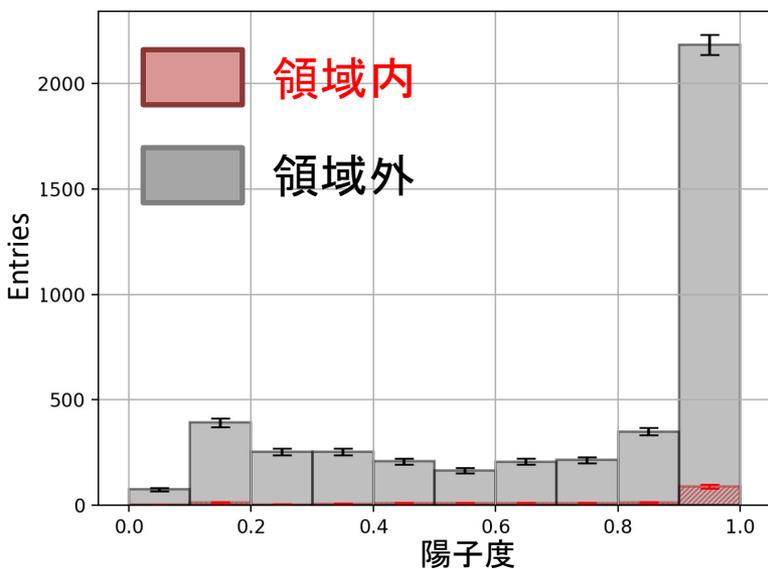
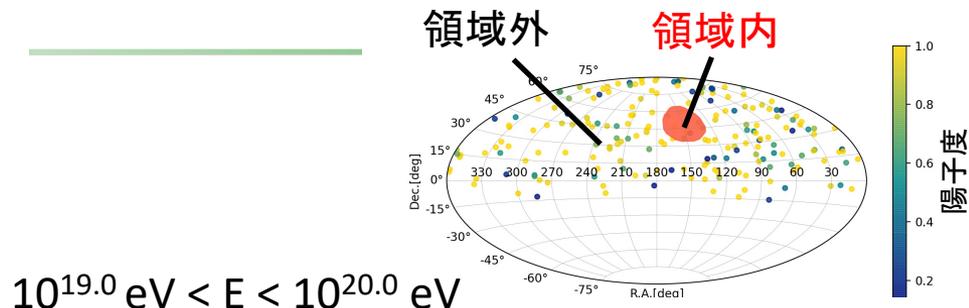
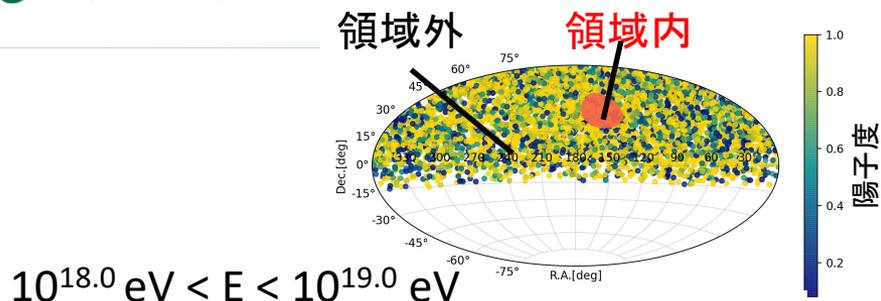


A : B. 0.485 : 0.515



A : B 0.378 : 0.622

HotSpot領域で比較



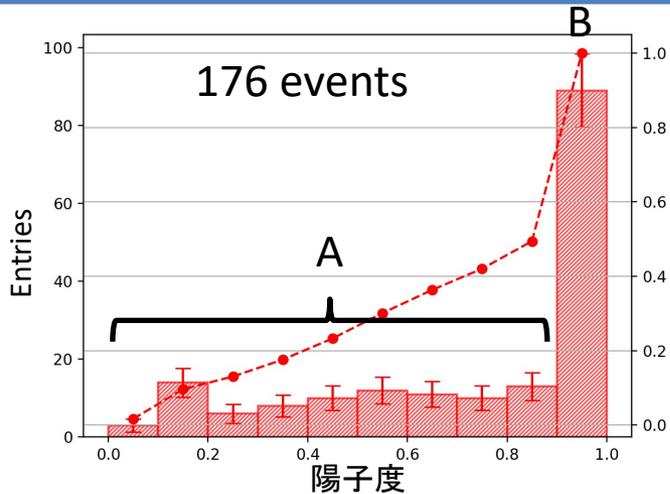
| | 中央値+分布幅(1 σ) -分布幅(1 σ) | イベント数 |
|-----|---|-------|
| 領域内 | 0.909 ^{+0.088} -0.533 | 176 |
| 領域外 | 0.911 ^{+0.088} -0.639 | 4311 |

| | 中央値+分布幅(1 σ) -分布幅(1 σ) | イベント数 |
|-----|---|-------|
| 領域内 | 0.821 ^{+0.177} -0.218 | 9 |
| 領域外 | 0.982 ^{+0.017} -0.458 | 192 |

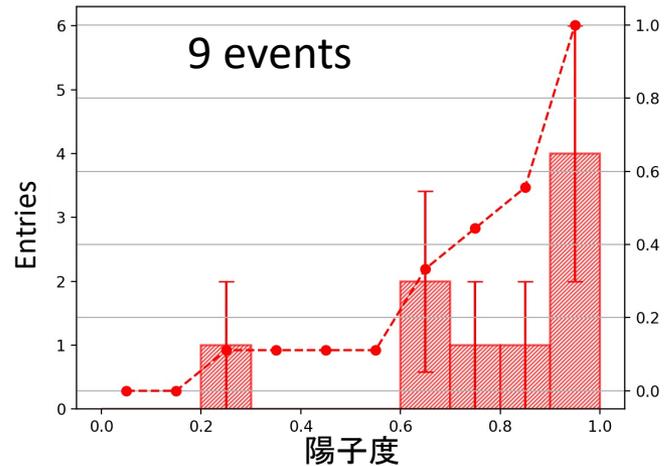
$10^{18.0} \text{ eV} < E < 10^{19.0} \text{ eV}$

$10^{19.0} \text{ eV} < E < 10^{20.0} \text{ eV}$

領域内

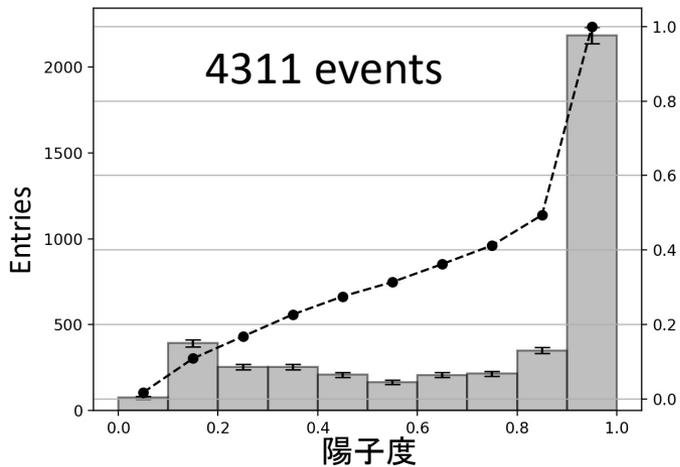


A : B 0.494 : 0.506

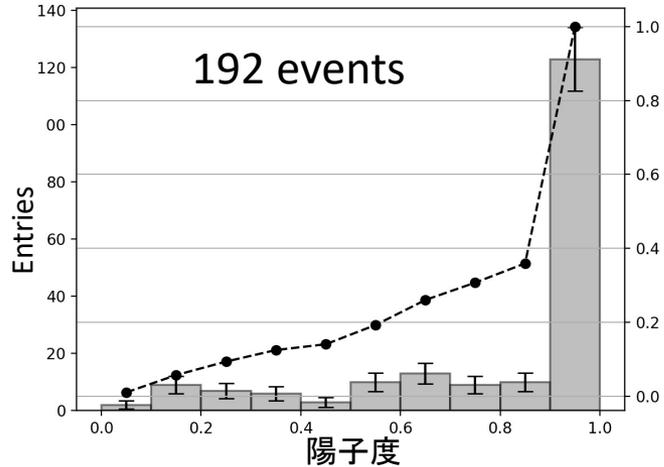


A : B 0.556 : 0.444

領域外



A : B. 0.494 : 0.506



A : B 0.354 : 0.646