

# CTA報告 97: Direct Cherenkov光を用いた宇宙線化学組成計測手法のモンテカルロシミュレーション評価(III)

大石理子, 池野祐平<sup>A</sup>, 石尾一馬, 稲田知大, 奥村暁<sup>B,C</sup>, 片桐秀明<sup>D</sup>, 櫛田淳子, 郡司修一<sup>E</sup>, 斎藤隆之<sup>F</sup>, 榊直人<sup>G</sup>, Dang Viet Tan<sup>D</sup>, 永吉勤<sup>H</sup>, 西嶋恭司<sup>A</sup>, 平井亘<sup>A</sup>, 増田周<sup>F</sup>, 吉越貴紀, 吉田龍生<sup>D</sup>  
他 CTA-Japan Consortium

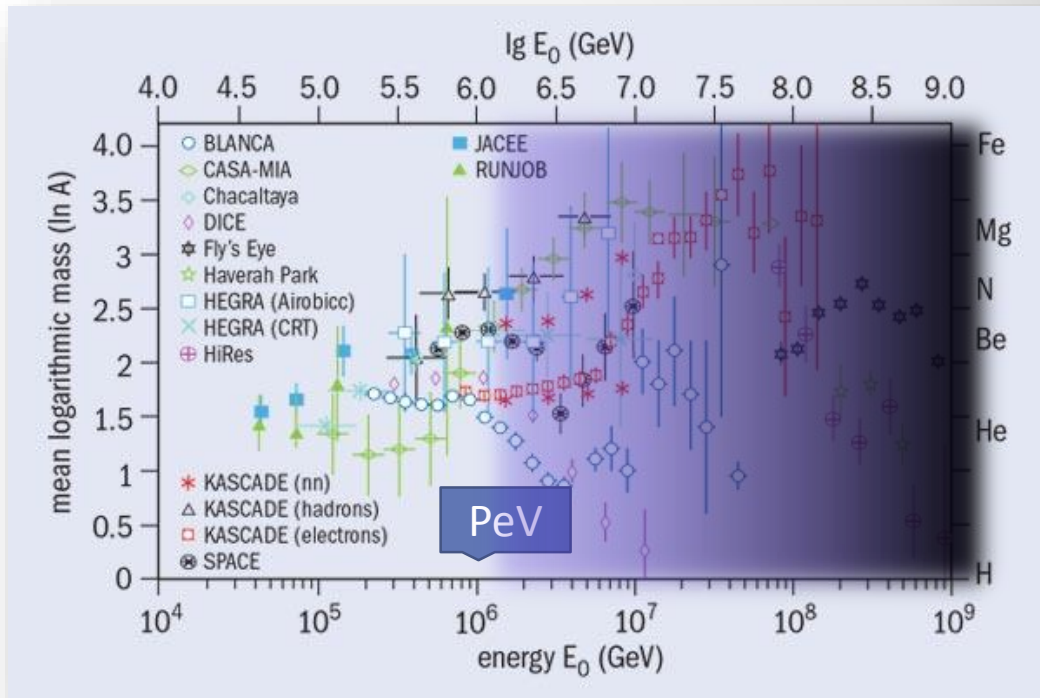
東大宇宙線研, 東海大理<sup>A</sup>, 名大STE研<sup>B</sup>, MPIK<sup>C</sup>, 茨城大理<sup>D</sup>, 山形大理<sup>E</sup>, 京大理<sup>F</sup>, 阪市大理<sup>G</sup>, 埼玉大理<sup>H</sup>

# Outline

- PeV領域近傍の宇宙線化学組成計測
- Direct Cherenkov光を用いた宇宙線電荷計測の原理
- CTAアレイの配置とMCシミュレーション
- データ解析の流れ
- シミュレーションデータから推定した期待イベント数と再構築電荷分布（電荷分解能）
- $X_{\max}$  と再構築電荷との関係
- まとめと今後

# PeV領域近傍の宇宙線化学組成計測

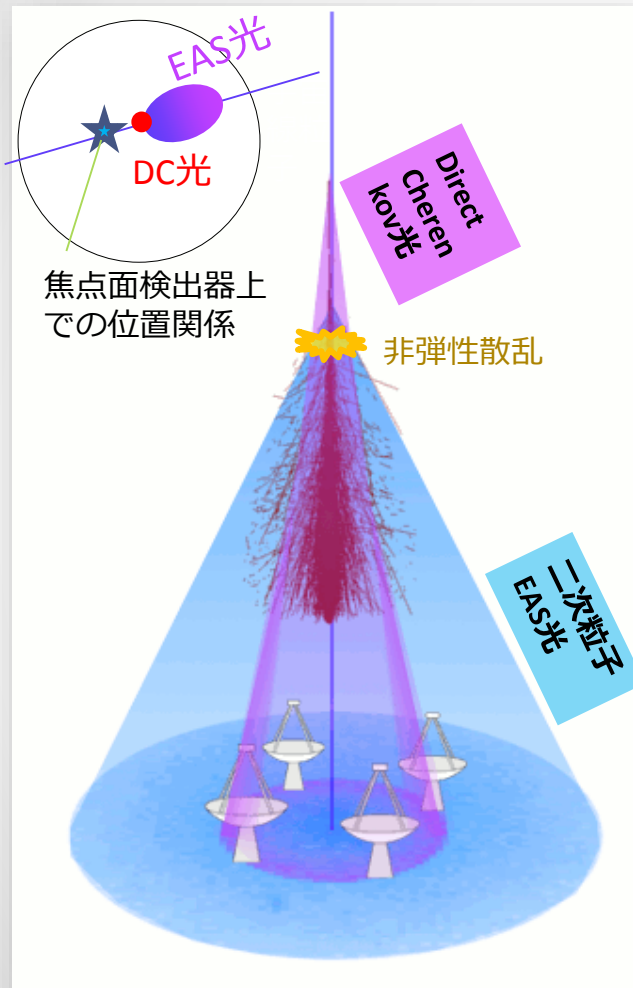
- 宇宙線スペクトルの3PeV近傍“knee”構造が系内天体での加速限界の反映であるならば、エネルギーが高くなるにつれ電荷の大きい重い元素の比率が増加すると予想される
- PeV近傍の重元素スペクトル計測は、低エネルギー (<~PeV)領域は飛翔体によって、高エネルギー(>~PeV)領域は空気シャワーアレイ実験によって担われている
- 化学組成の測定結果は実験ごとにばらつきが大きいのが現状



<http://cerncourier.com/cws/article/cern/28675>

	電荷分解	有効面積
飛翔体	良好	小
地上EASアレイ	困難	大

# Direct Cherenkov光を用いた宇宙線電荷計測の原理



地上望遠鏡を使用したDirect Cherenkov光検出手法の概要

- 一次粒子が大気上層部で放出する Cherenkov光を地上の望遠鏡で集光・検出
- 単位長さあたりのチェレンコフ光子放出数:

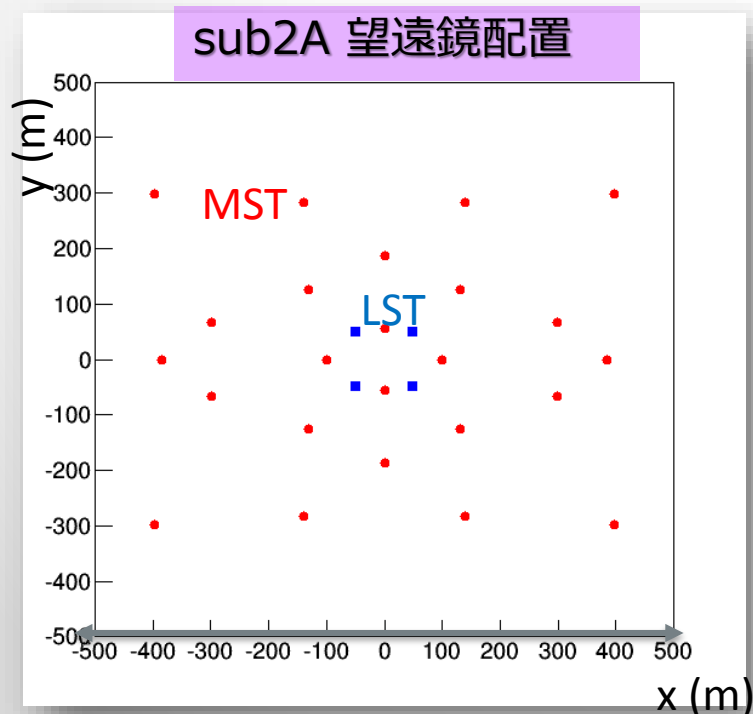
$$\frac{dN_c}{ds} = 2\pi Z^2 \alpha \int \frac{\sin^2 \theta_c}{\lambda^2} d\lambda$$

$$\alpha : \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \quad \cos\theta_c = \frac{1}{n\beta}$$

- 単位長さあたり発光量は電荷数 $Z$ の二乗に比例することを用いて、地表での検出光量から親粒子の電荷数を測定可能
- この地上の反射鏡を用いた観測手法の初めての定量的評価は Kieda et al. (2001) による
- H.E.S.S.がこの手法を用いて計測した宇宙線鉄のスペクトル(13 TeV-200 TeV)を2007年に発表

# CTAアレイの配置とMCシミュレーション

- CTAでの観測のモチベーション：中口径望遠鏡の数の増大によるイベント統計の改善（など）
- シミュレーションツール：空気シャワー記述部分はCORSIKA(6.990),装置応答記述部分は独自ツール(sim\_telarray)。ハドロン相互作用モデルはQGSJET-IIを使用。
- 使用したアレイ配置 Production 2 : sub-Array 2A の LST(4台)/MST(24台)
- 鉄( $z=26$ )に加え、C,O,Ne,Mg,Si ( $Z=6,8,10,12,14$ ),H,He( $Z=1,2$ )のデータも生成



	鉄( $z=26$ )	陽子( $z=1$ )
天頂角	z= 20 deg	
角度範囲	0-10 deg	
コア半径	1000 m	
べき指数	-2.0*	
エネルギー帯	5 TeV - 1 PeV	100 GeV - 1 PeV
イベント数	$1.8 \times 10^7$	$5.5 \times 10^8$

\*解析時に-2.7になるようイベントに荷重

# データ解析の流れ

## 望遠鏡抽出・ピクセル信号の時間積分

解析パラメータ：抽出する望遠鏡の選択・時間積分の幅と開始時刻

## シャワーイベント選定

解析パラメータ：ピクセル信号量しきい値・ピクセル本数

シャワー選定条件を満たさないイベントは排除

## エネルギー・到来方向・コア位置決定

解析パラメータ：到来方向再構築法・エネルギー構築法

エネルギー条件を満たさないイベントは排除

## Direct Cherenkov (DC) pixel 探索・DCイベント選択

解析パラメータ：ピクセル探索エリアの設定・カット値の設定

有意なDC pixelが見つからないイベントを排除

## 電荷再構築

解析パラメータ：ピクセル光量から電荷への変換look up tableの仕様

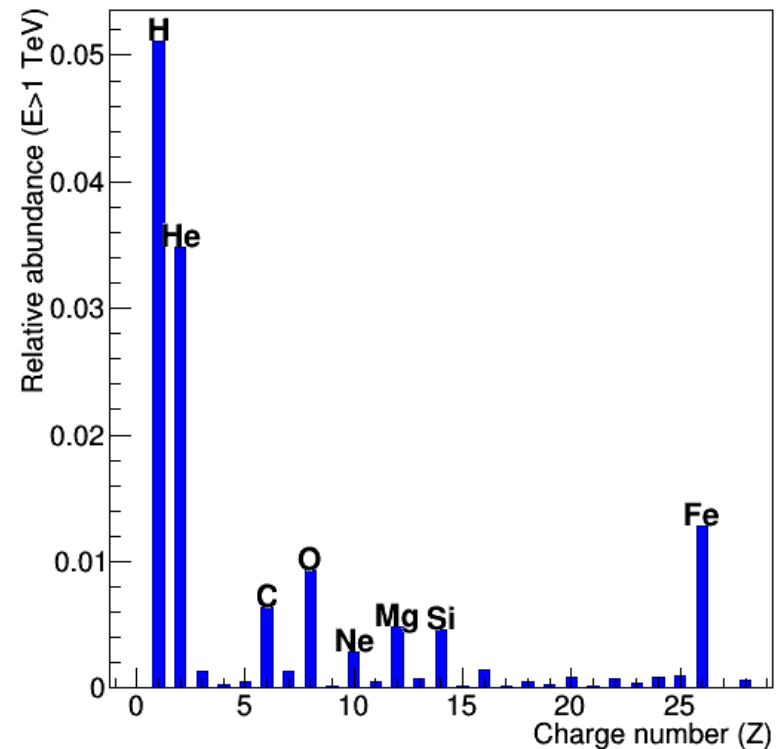
# イベントカウント見積もりに使用した VHE 領域の重元素flux 文献値

◆ Hörandel (2003) Astropart. Phys. **19** 193

E > 1 TeVでの積分フラックス比較

$$F = C(E/\text{TeV})^{-\gamma}$$

Element	C	$\gamma$
H (Z=1)	$8.73 \times 10^{-2}$	2.71
He (Z=2)	$5.71 \times 10^{-2}$	2.64
C (Z=6)	$1.06 \times 10^{-2}$	2.66
O (Z=8)	$1.57 \times 10^{-2}$	2.68
Ne (Z=10)	$4.60 \times 10^{-2}$	2.64
Mg (Z=12)	$8.01 \times 10^{-2}$	2.64
Si (Z=14)	$7.96 \times 10^{-2}$	2.75
Fe (Z=26)	$2.04 \times 10^{-2*}$	2.59



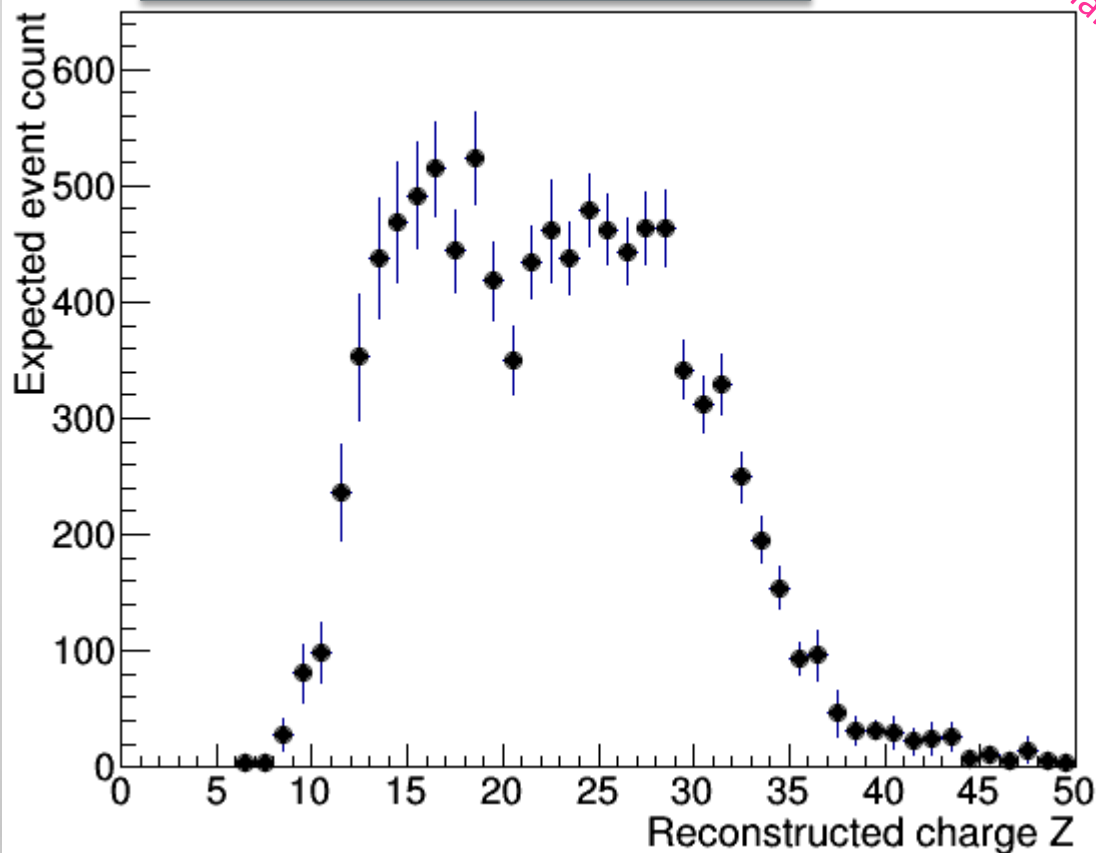
シミュレーションを行ったエネルギー範囲での積分フラックス値をイベント数見積もり時に使用

\* H.E.S.S.測定値  $C=(2.2 \pm 0.9) \times 10^{-2}$ ,  $\gamma=2.62$   
(QGSJET-II)

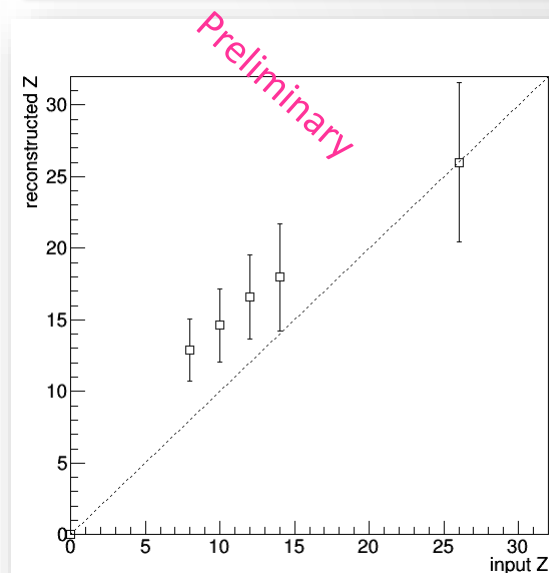
# 再構築電荷の分布と期待イベント数 (24 MSTs, All energy)

- 観測時間は50時間を仮定

再構築電荷分布 ( $E > 12.5$  TeV)



電荷分解能(All energy)



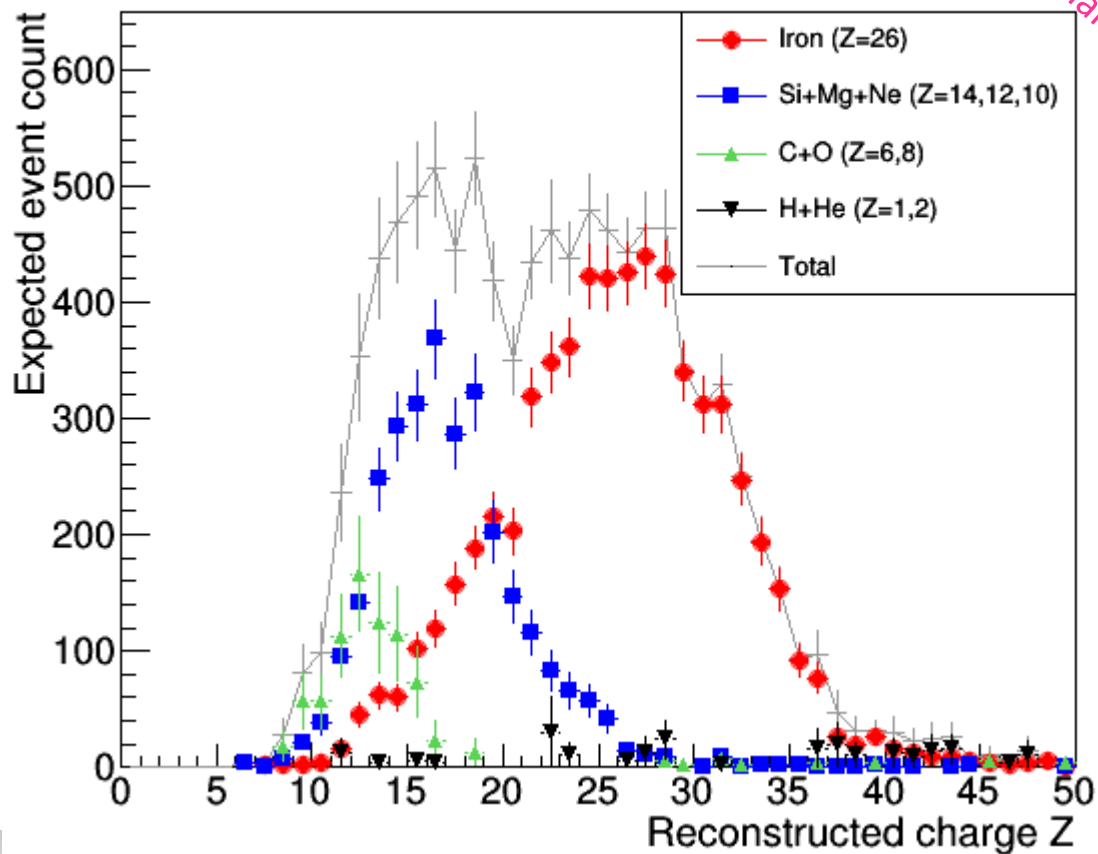
- 電荷分解能は Gaussian Fit での値
- 電荷分解能はエネルギー依存性がある



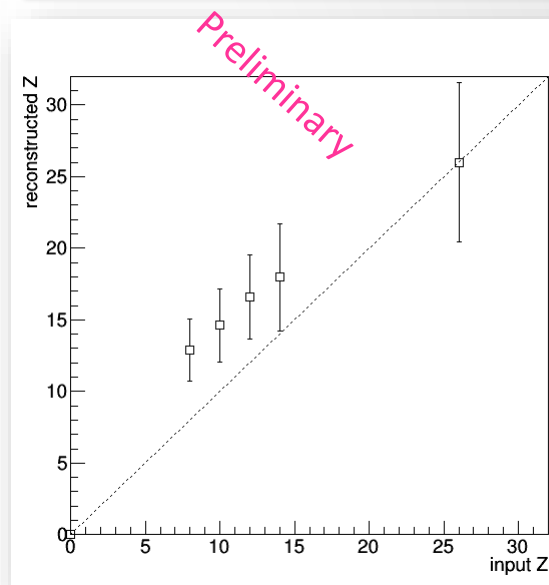
# 再構築電荷の分布と期待イベント数 (24 MSTs, All energy)

- 観測時間は50時間を仮定

再構築電荷分布 (E>12.5 TeV)

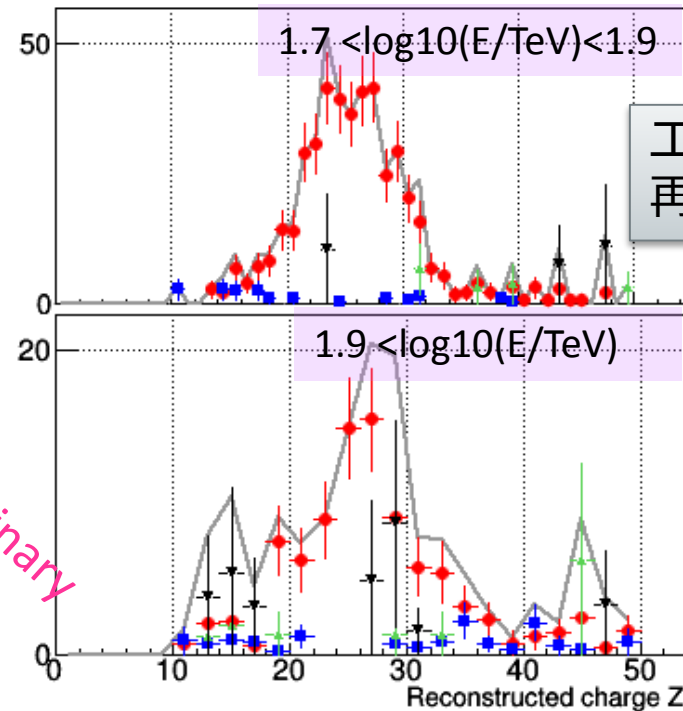
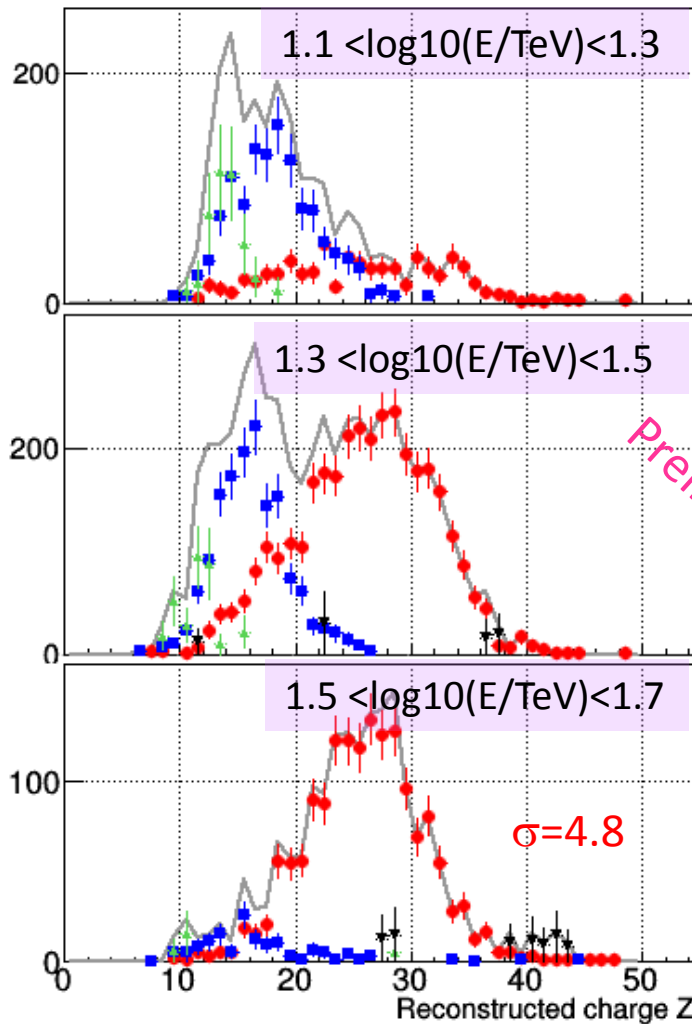


電荷分解能(All energy)

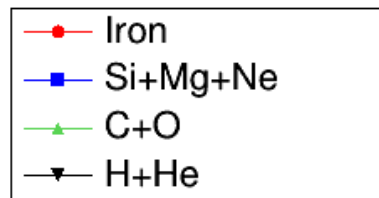


- 電荷分解能は Gaussian Fitでの値
- 電荷分解能はエネルギー依存性がある

# 再構築電荷の分布と5期待イベント数 (エネルギー帯分割)



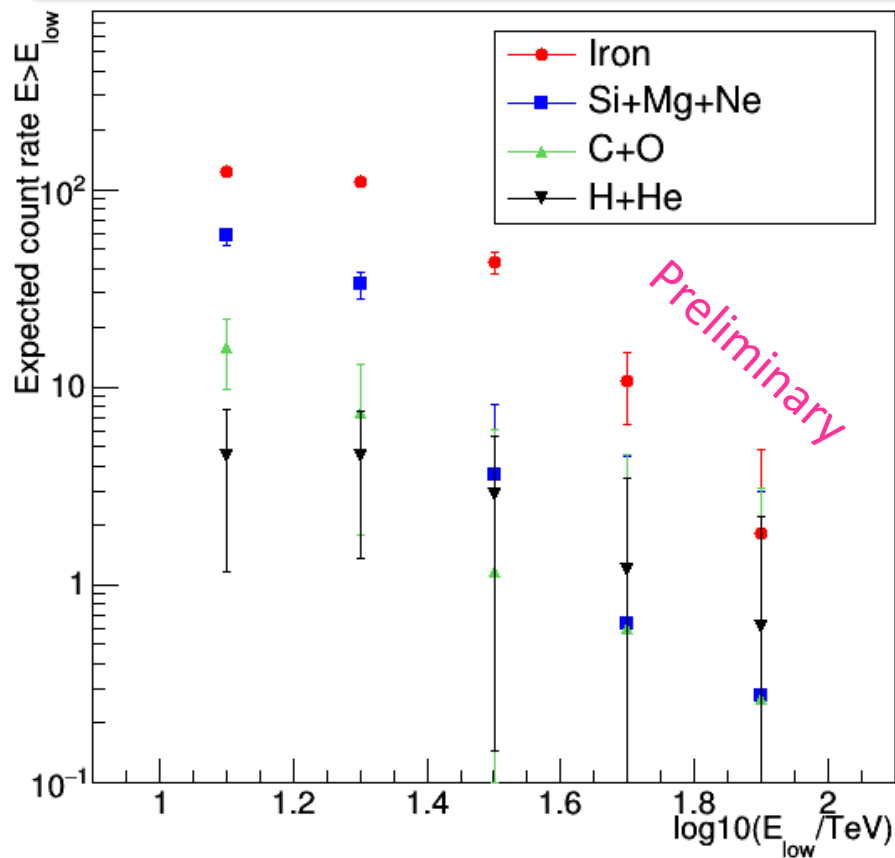
エネルギー帯別の  
再構築電荷分布



エネルギーは鉄データで  
作成したlookup tableを使  
用した再構築エネルギー

# 単位時間当たりの期待イベント数

単位時間当たりの期待イベント数 (積分)



- 陽子+ヘリウムの混入数が鉄に対して~3%になるカットの場合で、単位時間あたりの検出期待値として Fe  $1.2 \times 10^2$  イベント, Si+Mg+Ne  $5.8 \times 10^1$  イベントと見積もった。

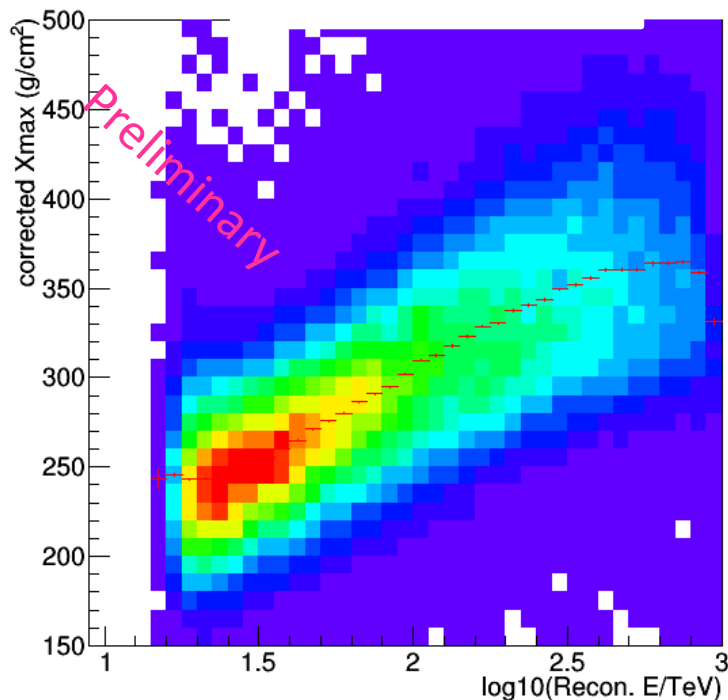
- H.E.S.S.での観測では、 $z < 22^\circ$ の条件の357時間データで、カット後に残ったイベント数が1899。

- 現状での見積もり数はH.E.S.S.の~30倍となるが、H.E.S.S.の解析は陽子の混入率は1%未満であるため、カット効率が今解析と同一でないことは注意

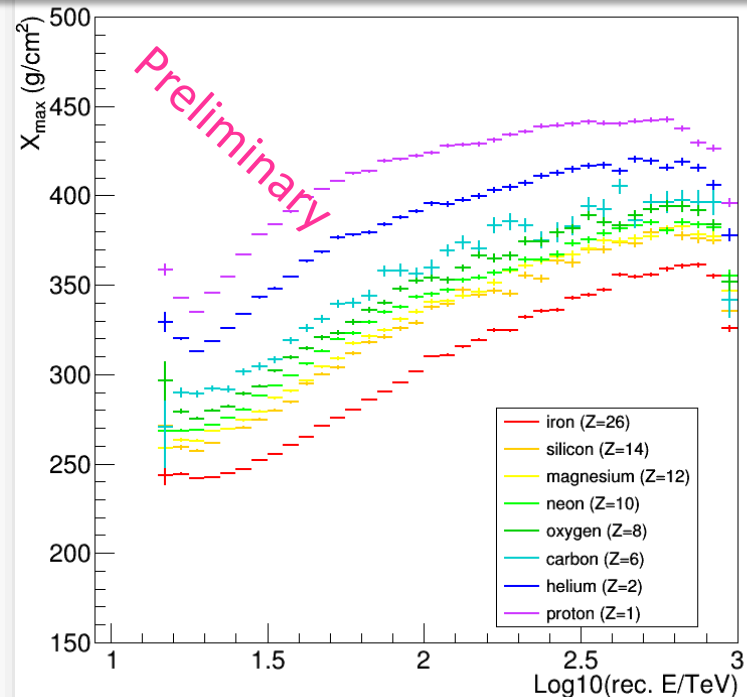
# $X_{\max}$ と原子核質量数(A)の関係性

- $X_{\max}$  : 空気シャワー中の粒子の数が最大になる高度の空気厚み
- チェレンコフ光イメージの重心位置から $X_{\max}$ の推定が可能
- 原子核の散乱断面積がおおよそ質量数Aの2/3乗に比例するため、 $X_{\max}$ も入射原子核の核種を知る指標となる

$X_{\max}$ と再構築エネルギーの関係 (鉄)

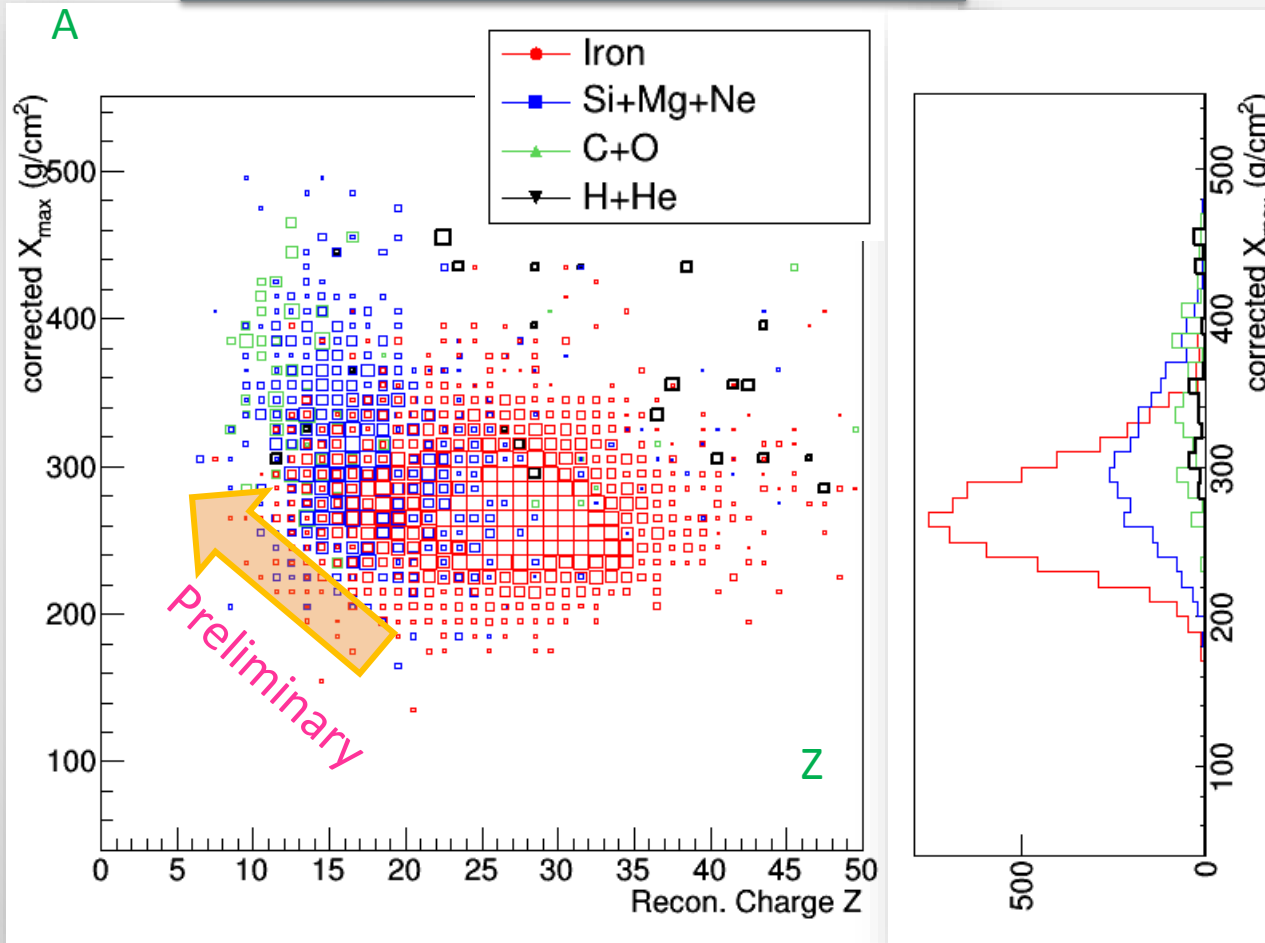


$X_{\max}$ と再構築エネルギーの関係 (全粒子)



# Xmaxと再構築電荷数(Z)の相関

補正XmaxとDirect Cherenkov光解析  
で得られた再構築電荷の関係



- Xmaxのエネルギー依存性を補正
- 重元素イベント抽出カット後  
→ 陽子+ヘリウムの数は希少（誤判定による混入イベント）
- 軽元素の方がXmaxが大きくなる傾向は有意
- Xmaxを陽子+ヘリウムの雑音除去に補助的に使用することが可能

# まとめと今後

- CTAのレイ(sub2A, MST+LST)に対し、鉄, 陽子, ヘリウム等の8種類の原子核のデータを生成し、MST 24台についてH.E.S.S.-likeな重元素抽出カットを施して、期待イベント数を見積もった。
- 重元素選択過程後に残る単位時間あたりの期待検出イベント数は、鉄  $1.2 \times 10^2$  イベント, Si+Mg+Ne  $5.8 \times 10^1$  イベント。H.E.S.S.観測では $z < 22^\circ$ の条件下の357 hourで鉄以外の軽元素も含んだ値で1899 イベントであり、現解析では~30倍程度のイベントレートが見込まれている（解析のカット効率および天頂角分布が同一ではないため粗い比較）
- 鉄のシミュレーションデータをlookup-tableとして使用し、8種類の核種に対して電荷の再構築を行った。 $1.5 < \log_{10}(E/\text{TeV}) < 1.7$ のエネルギーバンドにおいては再構築電荷の幅は $\sigma = 4.8$  (H.E.S.S.とおよそ同等)。
- (今後)これらの結果はhadron interaction modelに依存するので、現在のQGSJETに加え、SIBYLLでのデータ生成を行う。
- (今後)解析パラメータ群について最適化を続行する。
- (今後) LSTで同様の観測をした場合の結果を求める（ピクセルサイズ・時間分解能が向上することによる効果の評価）