

# CTA報告 109: 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(V)

大石理子, 池野祐平<sup>A</sup>, 稲田知大, 奥村暁<sup>B</sup>, 片桐秀明<sup>C</sup>, 櫛田淳子<sup>A</sup>,  
郡司修一<sup>D</sup>, 斎藤隆之<sup>E</sup>, 榊直人, 佐藤雄太<sup>B</sup>, Dang Viet Tan<sup>C</sup>, 永吉勤<sup>F</sup>,  
西嶋恭司<sup>A</sup>, 増田周<sup>E</sup>, 吉越貴紀, 吉田龍生<sup>C</sup>

他 CTA-Japan Consortium

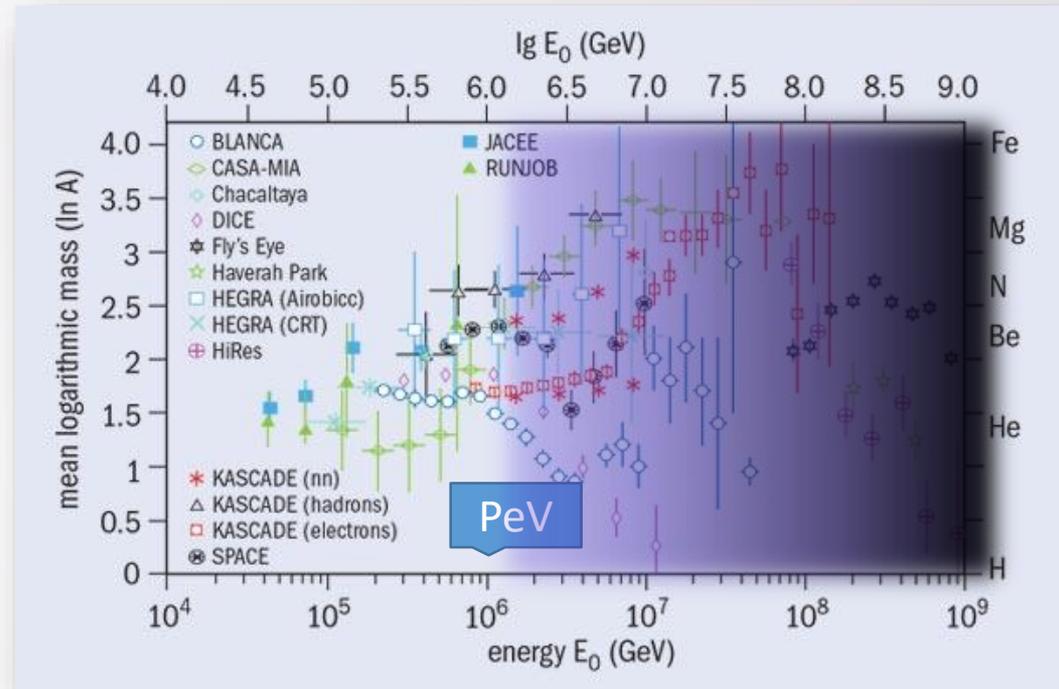
東大宇宙線研, 東海大理<sup>A</sup>, 名大STE研<sup>B</sup>, 茨城大理<sup>C</sup>, 山形大理<sup>D</sup>,  
京大理<sup>E</sup>, 埼玉大理<sup>F</sup>

# Outline

- Introduction
- CTAアレイの配置とMCシミュレーション・解析の流れ
- シャワーパラメータの多変量解析による核種弁別
- Direct Cherenkovのみの核種弁別
- シャワーパラメータから求められた分離パラメータとDirect Cherenkov解析の結果の相関
- 電荷分解能と予測イベントレート
- まとめ

# sub-PeV領域の宇宙線化学組成計測

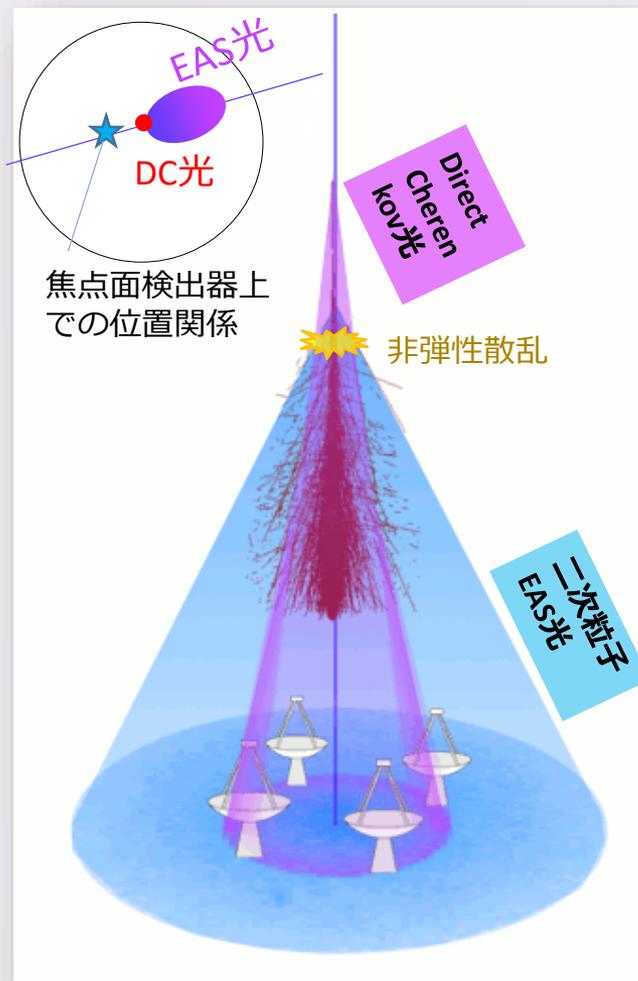
- 宇宙線スペクトルの3PeV近傍“knee”構造が系内天体での加速限界・閉じ込め効果の反映ならば、エネルギーが高くなるにつれ電荷の大きい重い元素の比率が増加すると予想される
- PeV近傍の重元素スペクトル計測は、飛翔体が低エネルギー領域( $< \sim \text{PeV}$ )を、空気シャワーアレイ実験が高エネルギー( $> \sim \text{PeV}$ )領域を担っている
- 化学組成の測定結果は実験ごとにばらつきが大きいのが現状



<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

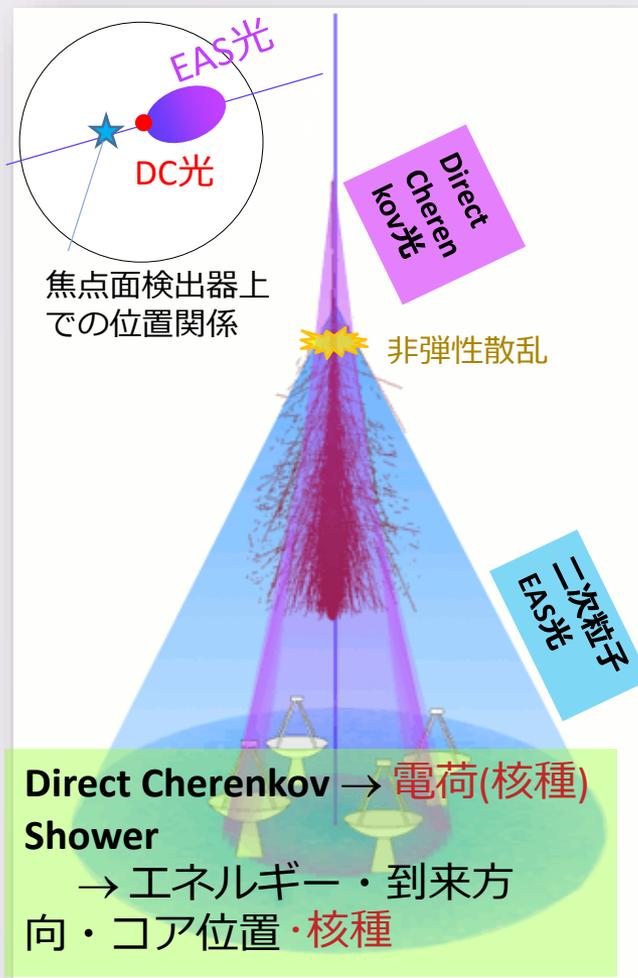
- 一次粒子が大気上層部で放出するCherenkov光を地上の望遠鏡で集光・検出  
単位長さあたりのチェレンコフ光子放出数:

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

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

- 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

# Direct Cherenkov光を用いた宇宙線電荷計測の原理



- 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:

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

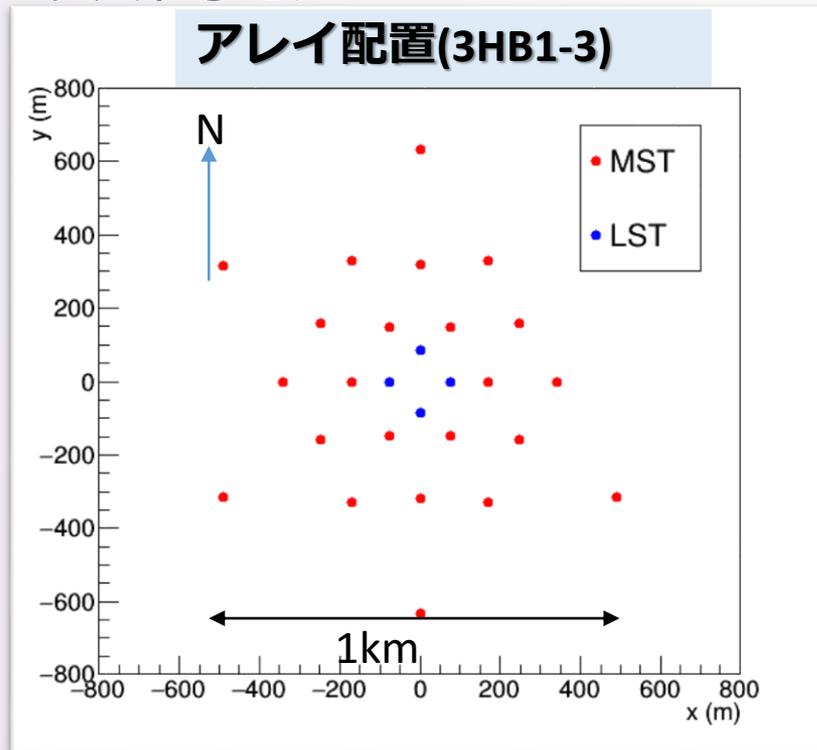
$$\alpha : \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \quad \cos\theta_c = \frac{1}{n\beta}$$

- 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

地上望遠鏡を使用したDirect Cherenkov光検出手法の概要

# CTA アレイの配置とMCシミュレーション

- 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)を使用。
- 2015年に装置設計プランの第3フェーズ“Prod3”に対応した新バージョンがリリース  
→ 新たにデータ生成を行った。観測サイトはParanal (チリ、南天サイト)、アレイ配置は3HB1-3のMST(24台) +LST(4台)を選択(下図)
- 中口径望遠鏡の二種類の検出器(FlashCam, NectarCam)のうち、信号サンプリングレートが速いNectarCam(1GHz)を解析に使用。
- CORSIKAの中で使用されるハドロン相互作用モデルは2種類(QGSJET-II-03, SIBYLL2.1)をテストした。



	鉄(z=26)	陽子(z=1)
サイト	Paranal, Chile	
天頂角	z= 20 deg	
角度範囲	0-10 deg	
コア半径	2000 m	
べき指数	-2.0	
エネルギー帯	5 TeV - 1 PeV	1 TeV - 1 PeV

他にHe, C, O, Mg, Ne, Si(Z=2,6,8,10,12,14)のデータも生成

# データ解析の流れ

Direct Cherenkov光の  
特性を利用した時間  
積分窓の設定

## 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

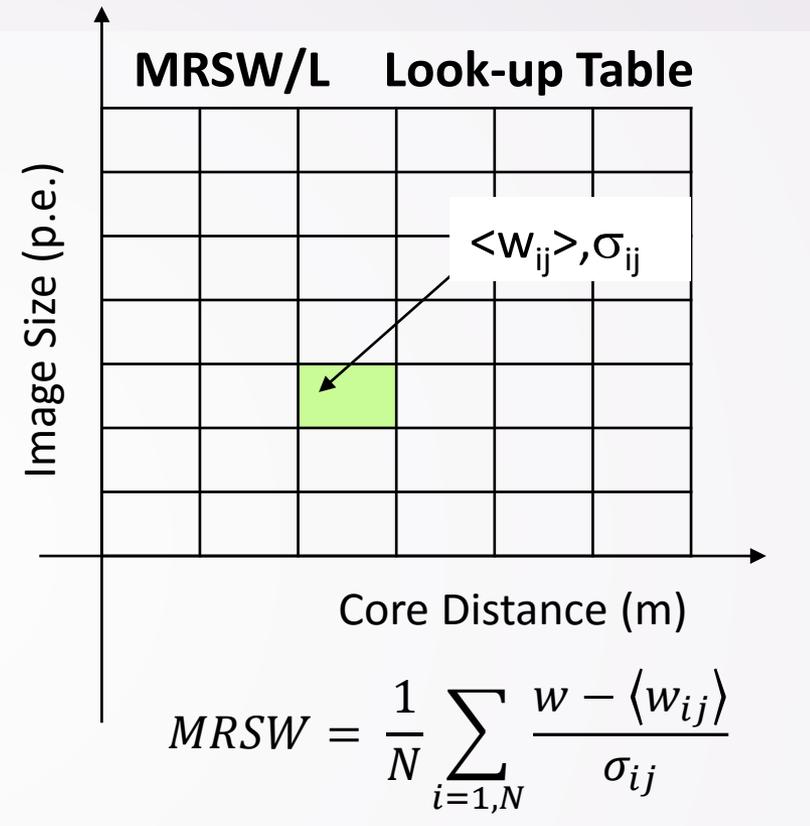
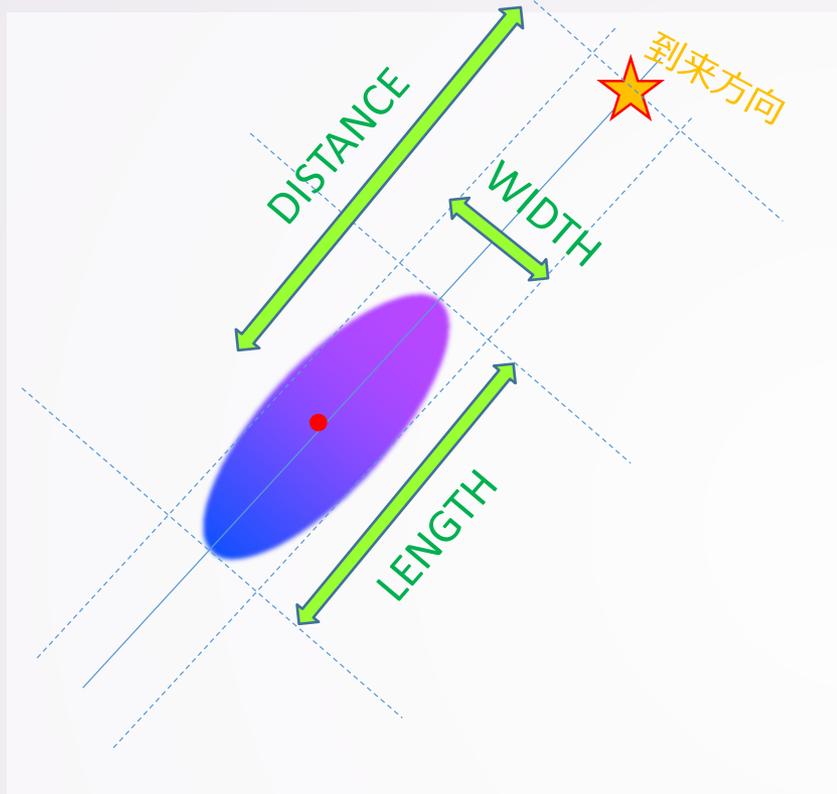
## シャワー形状を用いた多変量解 析のパラメータの最適化

解析パラメータ：多変量解析手法

分離パラメータの計算  
解析パラメータ：結合定数  
(Fisher Discriminantの場合)



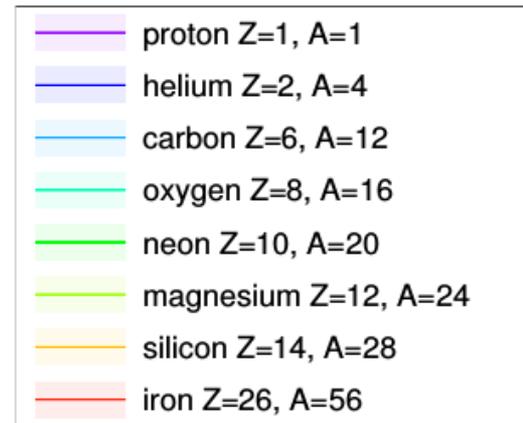
# MRSW/MRSL, XMAX



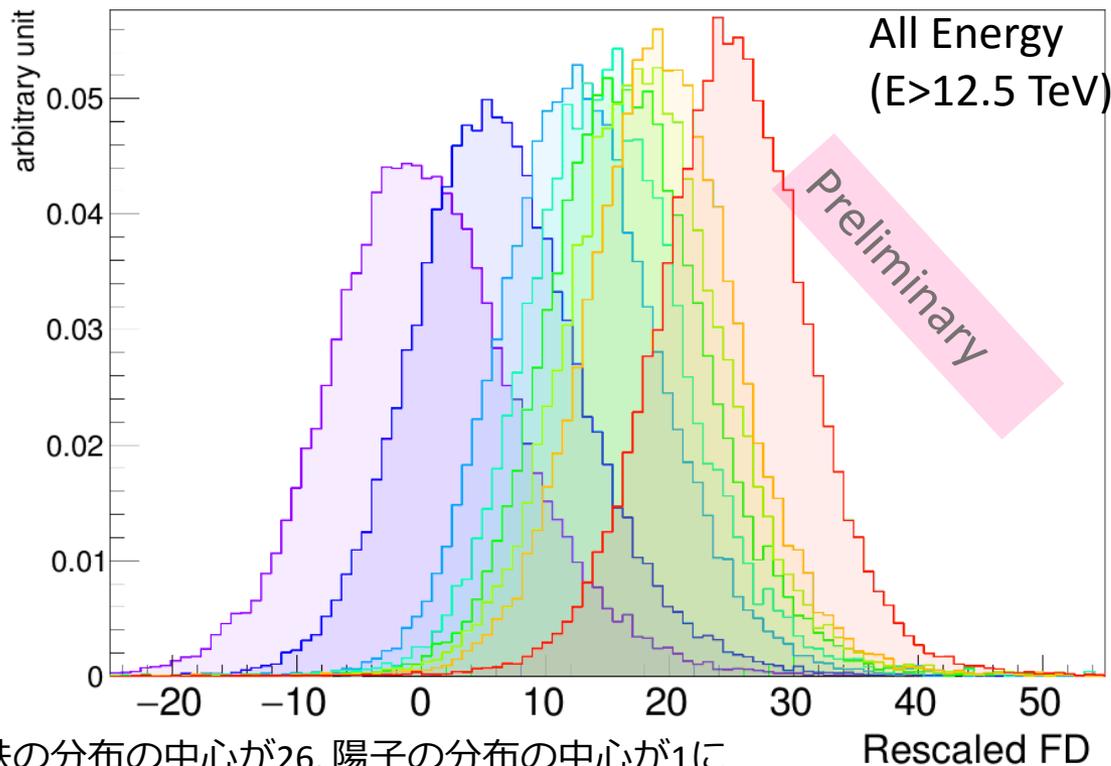
- MRSW/L: シミュレーションデータから作成した上右図のようなLook-up Table(LUT)を使って、WIDTH/LENGTHのCore DistanceとImage Size (~Energy)への依存性を補正して、全望遠鏡に渡る平均を取ったもの。今回はLUT作成には鉄イベントを使用。
- XMAX : シャワーの3次元構成の後、DISTANCEをシャワー極大高度に変換し、高度をさらに空気厚みに換算したもの

# 多変量解析(MVA) : Fisher Discriminant

- Fisher Discriminant: パラメータ群の線形結合(実装にはROOT TMVAを使用)
- “信号”分布と“雑音”分布の合計の分散を最大化し、信号と雑音それぞれの分布の分散を最小化するように結合の係数を最適化
- ここでは 鉄 = 信号、陽子 = 雑音として学習 (全イベントの20%を学習用としてランダムサンプリング)



## 入力4パラメータに対するFisher Discriminant



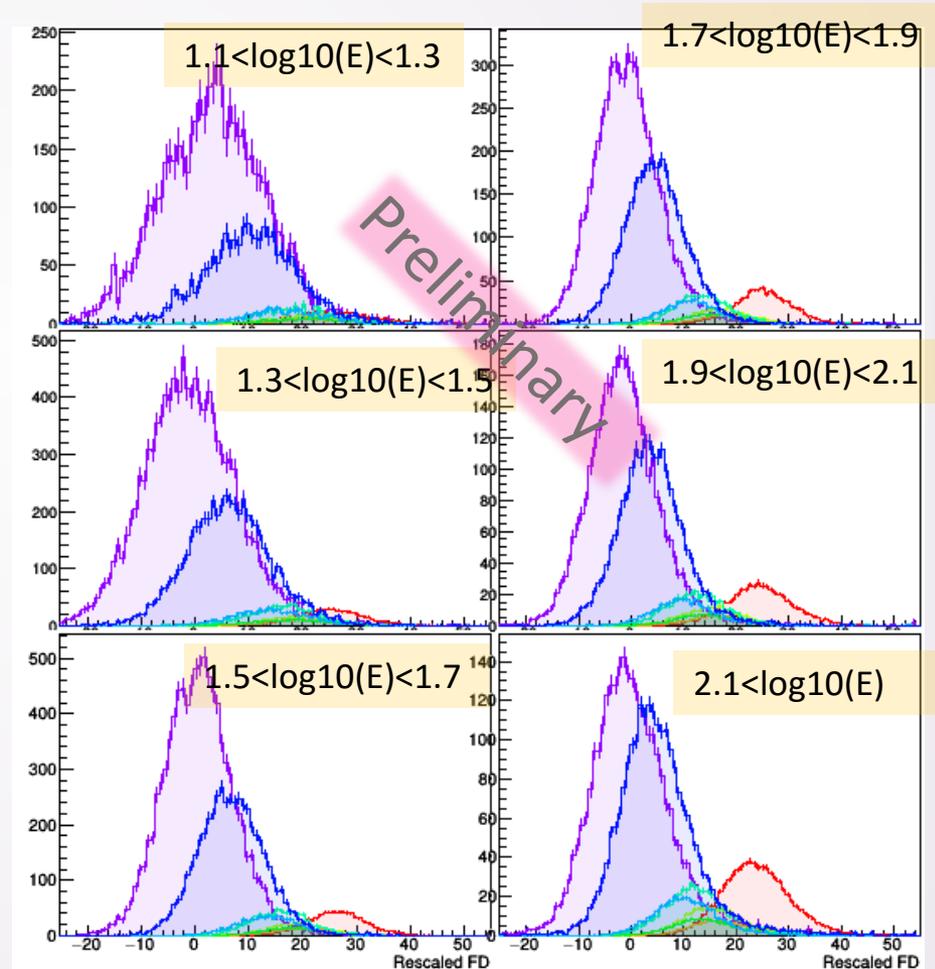
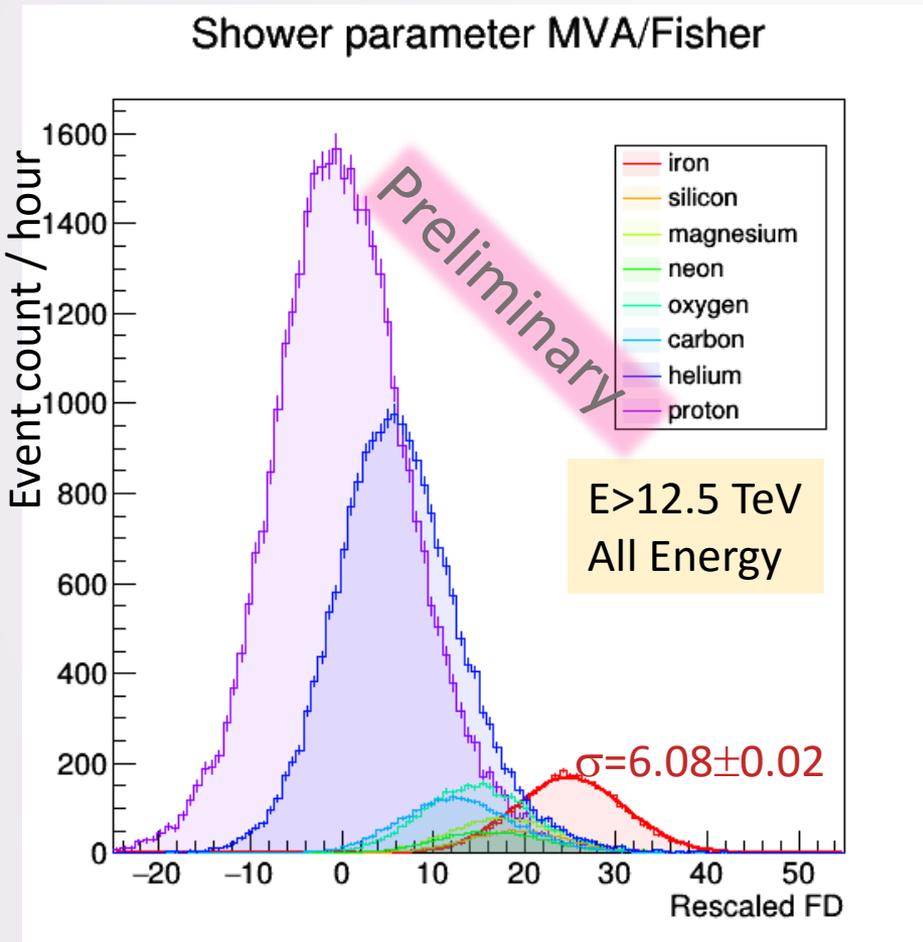
## パラメータのVariable ranking

Rank	Var.	Discr. power
1	MRSW	4.552e-1
2	XMAX	3.067e-1
3	MRSL	5.511e-2
4	r_tel_mean	3.3633e-2

\*鉄の分布の中心が26, 陽子の分布の中心が1になるように結合定数をre-scaleしオフセットを加えてある

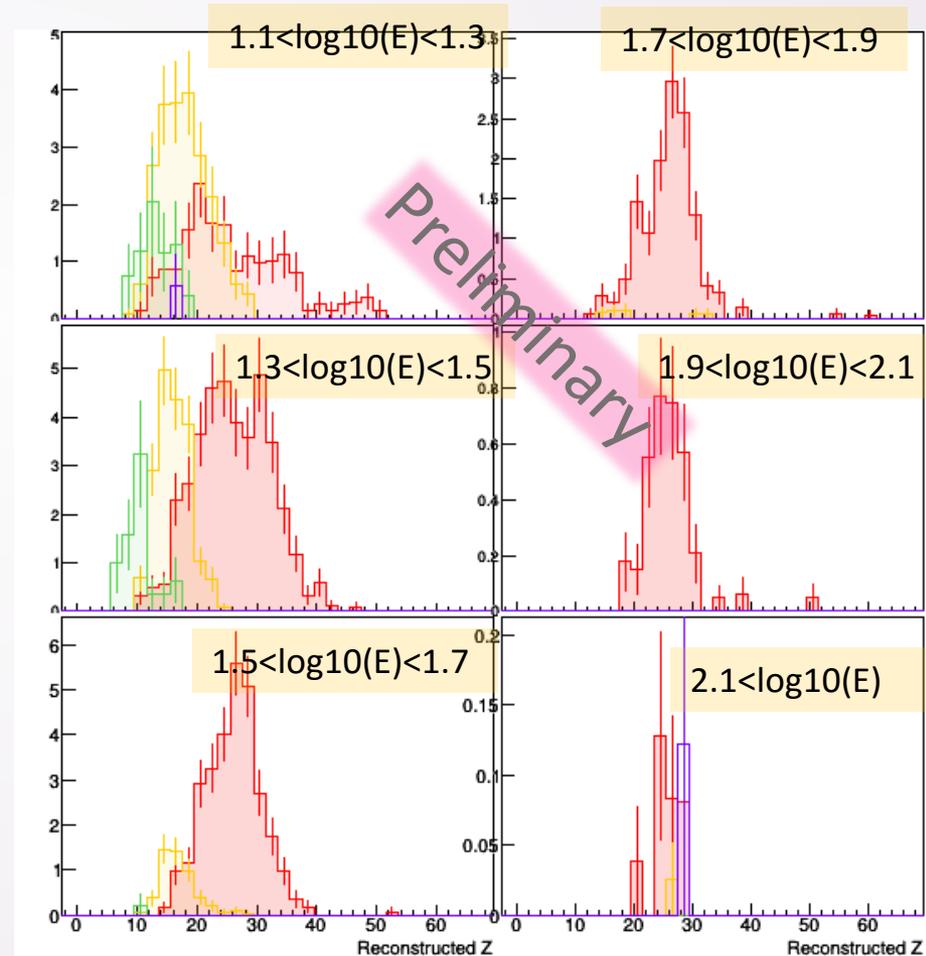
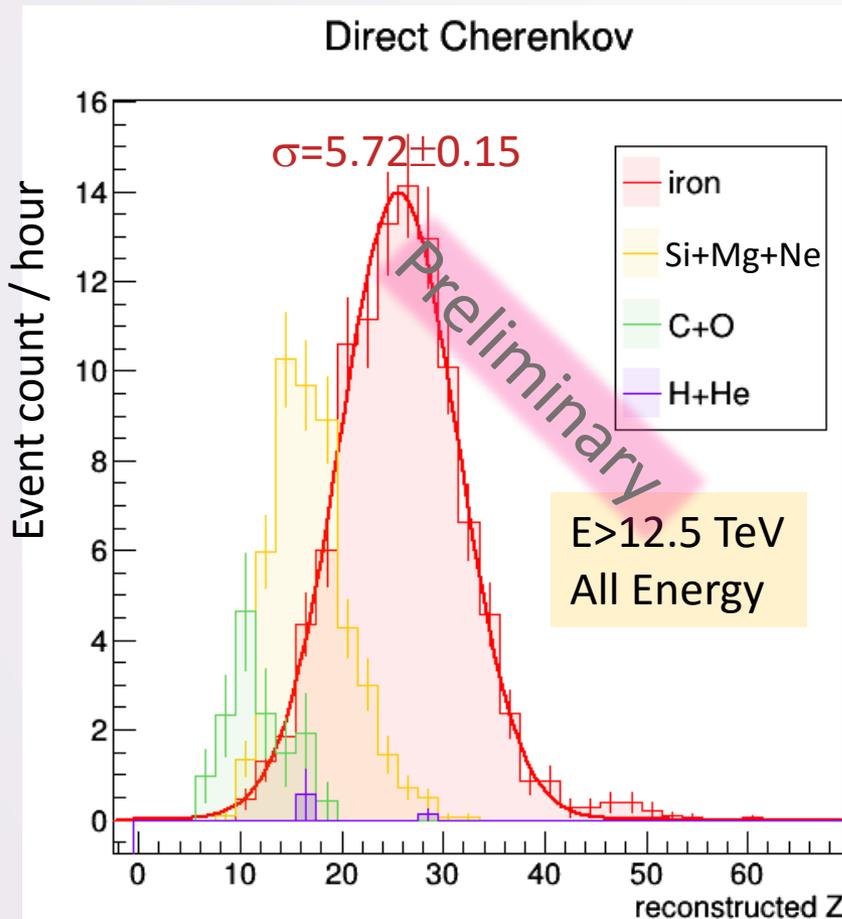
# 核種弁別： Shower parameterのみを使った場合

- 核種ごとの宇宙線フラックスをHörandel(2003)の文献値から引いて重み付け
- 観測時間は1時間（単位時間）
- エネルギーは鉄を仮定して再構築（鉄以外の粒子は実際の値からsystematicにずれる）



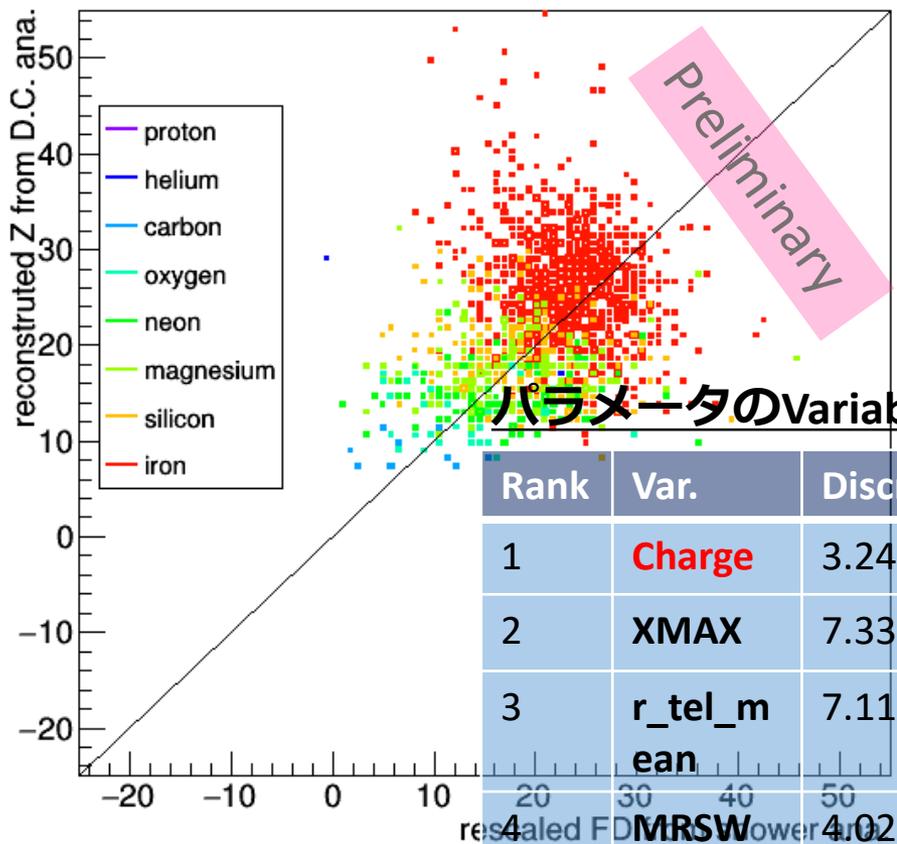
# 核種弁別：Direct Cherenkovのみを使った場合

- 使用したデータセットは前頁と同じ
- D.C. 解析に使えるのはコアから近い(<140m)望遠鏡だけ
- Direct Cherenkov(D.C.)イベント抽出時に軽元素（主に陽子）はカットで排除
- 上記からshower eventと比較するとD.C. eventは希少



# Shower parameterから得られた分離パラメータとD. C.解析結果の相関

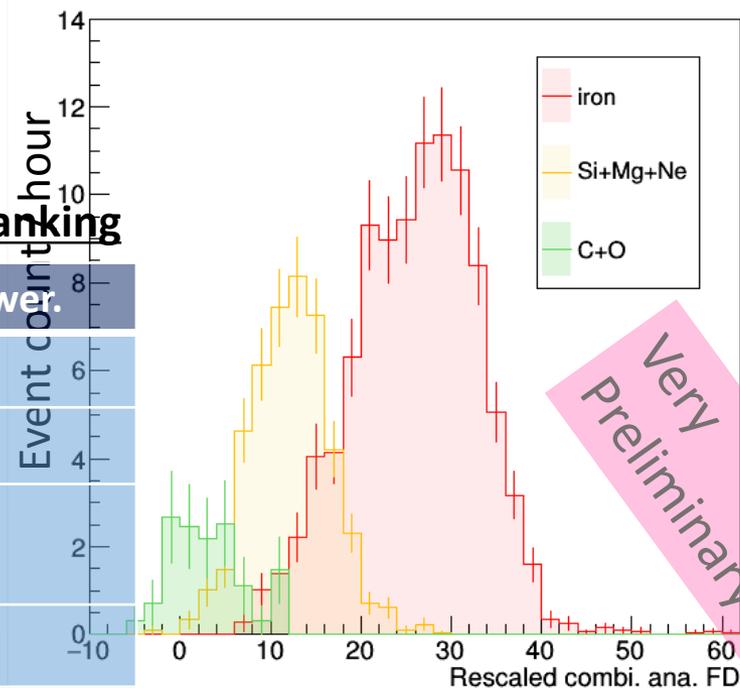
シャワー解析からの分離パラメータ（横軸）とDirect Cherenkovから得られた再構築電荷（縦軸）



パラメータのVariable ranking

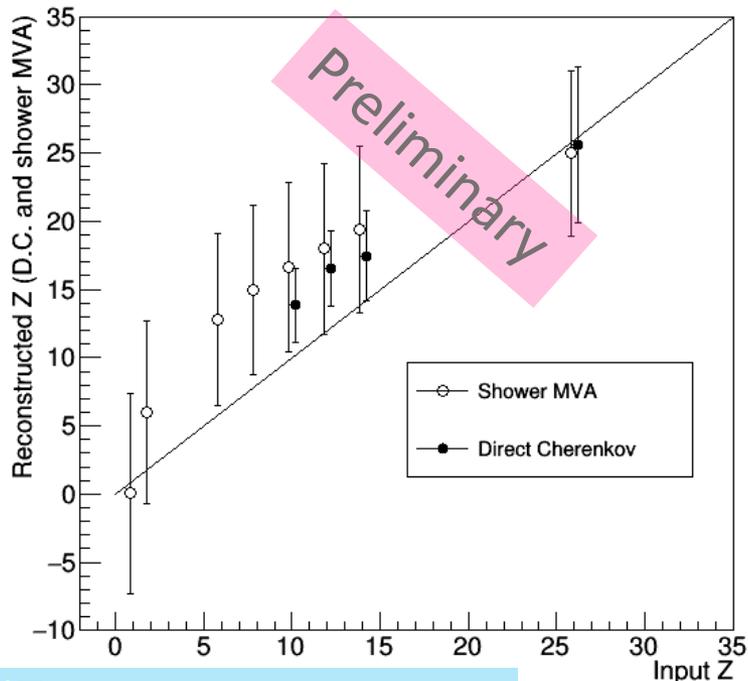
Rank	Var.	Discr. Power.
1	<b>Charge</b>	3.241e-1
2	<b>XMAX</b>	7.332e-2
3	<b>r_tel_mean</b>	7.119e-2
4	<b>MRSW</b>	4.024e-2
5	<b>MRSL</b>	2.891e-2

- Direct Cherenkov解析からの再構築電荷を第5の入力パラメータとして多変量解析に取り込むことも可能
- 現状では学習サンプルがpoor
- D.C. イベント抽出カットを緩めた組み合わせ等を検討

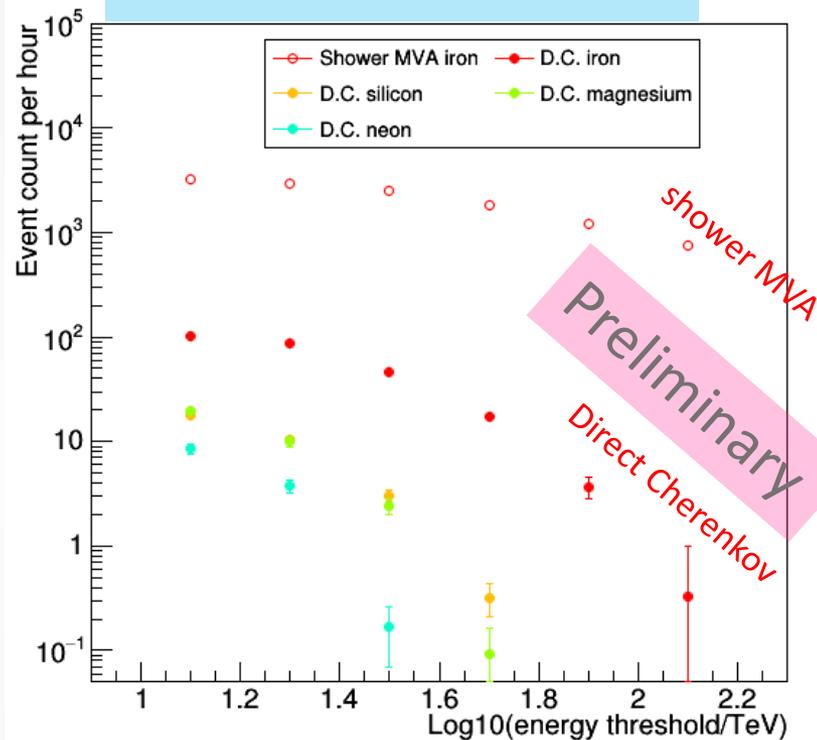


# 電荷分解能と予測イベントレート

再構築電荷 vs 入力電荷



予測積分イベントレート



電荷幅(E>12.5 TeV all energy)

	Shower	D. C.		Shower	D.C.
Fe	6.08±0.02	5.72±0.15	O	6.19±0.04	-
Si	6.09±0.03	3.31±0.25	C	6.31±0.04	-
Mg	6.25±0.03	2.73±0.27	He	6.67±0.03	-
Ne	6.21±0.04	2.72±0.58	H	7.37±0.03	-

←D.C.(はO(z=8) 以下の軽元素は低統計のため表示せず

# Summary

- CTAの南サイト Paranalの 中口径望遠鏡 24台のアレイ(Prod3 3HB1-3)に対し、8種類の原子核のシミュレーションデータを生成し、核種判別のための2種類の解析法 (Direct Cherenkov, シャワーパラメータを使った多変量解析(MVA))を適用した。
- $E > 12.5$  TeV(鉄を仮定したエネルギー再構築、ハドロン相互作用モデルはQGSJET-II-03) の積分データセットについては、鉄粒子のシャワーパラメータMVAの分離指標もDirect Cherenkovに迫る分解能( $\Delta Z \sim 6$ )を持つ。有効面積は10 TeV領域ではシャワーMVAの方が一桁以上上回り、高エネルギー領域ではさらに差が広がる。
- 一方で  $Z=10-14$ の中間的な軽元素については、Direct Cherenkov手法の方がより高い陽子雑音除去率・よりよい電荷分解能(Siの場合で Shower MVA  $\Delta Z \sim 6.1$ , D.C.  $\Delta Z \sim 3.3$ )を得られる。これらの軽元素については2つの手法をエネルギーで切り替え、あるいは組み合わせる (Direct Cherenkovの再構築電荷を多変量解析の枠組みに入れることが可能) hybrid解析が有用であると考えられる。
- シャワーMVAによる核種弁別については、特にbeyond PeVで MST以外にもSSTが寄与できると予想される。Direct Cherenkov手法については、LST, また Schwarzschild-Couder型のMST(SCT)も微細なピクセルサイズを生かしてより高いS/Nの測定を可能にすると予想される。