

1 TeV e<sup>-</sup>

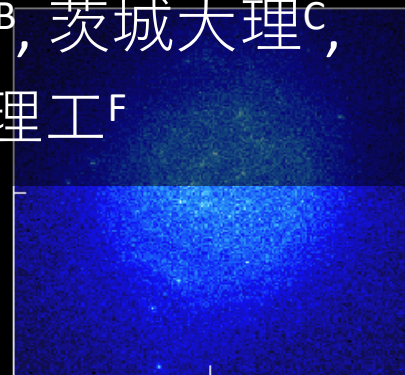
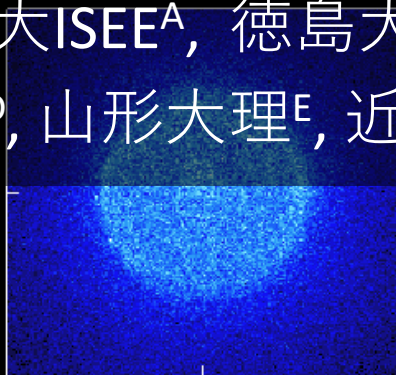
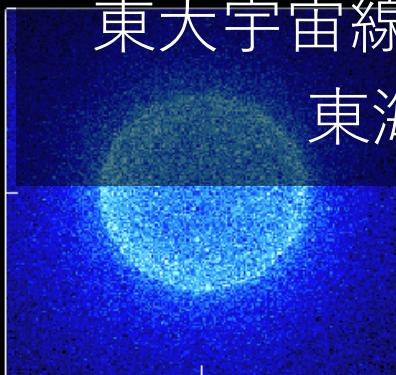
1 TeV γ

3 TeV p

# CTA報告132 : CTAのTeV領域 電子・陽電子スペクトル測定性能の シミュレーション評価(III)

大石理子, 奥村暁<sup>A</sup>, 折戸玲子<sup>B</sup>, 片桐秀明<sup>C</sup>, 神本匠<sup>D</sup>,  
櫛田淳子<sup>D</sup>, 郡司修一<sup>E</sup>, 齋藤隆之, 榊直人, 佐々井義矩<sup>A</sup>,  
高橋知也<sup>E</sup>, 種田裕貴<sup>D</sup>, 千川道幸<sup>F</sup>, 中森健之<sup>E</sup>, 西嶋恭司<sup>D</sup>,  
三浦智佳<sup>C</sup>, 吉越貴紀, 吉田龍生<sup>C</sup> 他 CTA-Japan コンソーシアム

東大宇宙線研, 名大ISEE<sup>A</sup>, 徳島大総科<sup>B</sup>, 茨城大理<sup>C</sup>,  
東海大理<sup>D</sup>, 山形大理<sup>E</sup>, 近畿大理工<sup>F</sup>



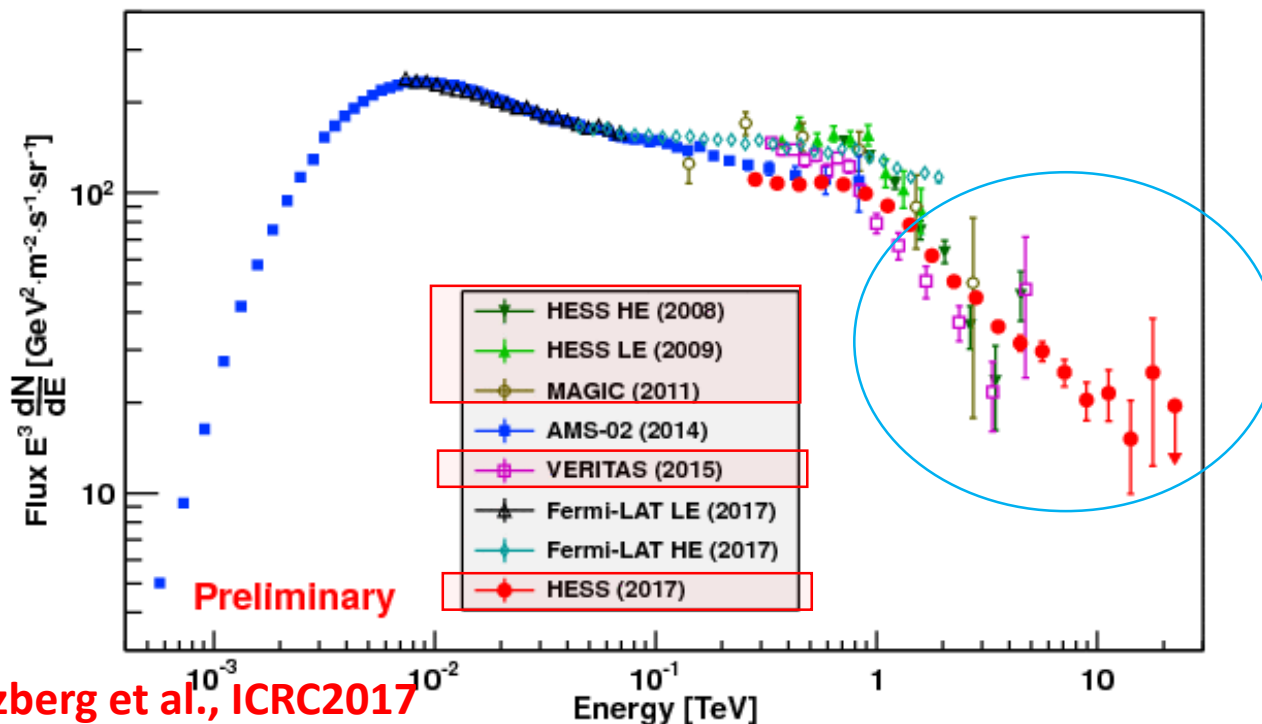
# outline

- TeV領域近傍の電子スペクトル測定の現況
- IACTでの電子測定 : H.E.S.S.の電子成分解析  
(電磁成分likeな陽子事象の除去)
- CTAのシミュレーション
  - アレイ配置・粒子種・ハドロン相互作用モデル
  - 電磁・ハドロン分離パラメータ (shape, BDT)
  - 予測される電子カウント数
  - ハドロン相互作用モデルの不定性の影響
- Summary

# TeV領域近傍の電子スペクトル測定の現況 just after ICRC2017

## New H.E.S.S. cosmic-ray electron spectrum

$e^- + e^+$  合算エネルギースペクトル

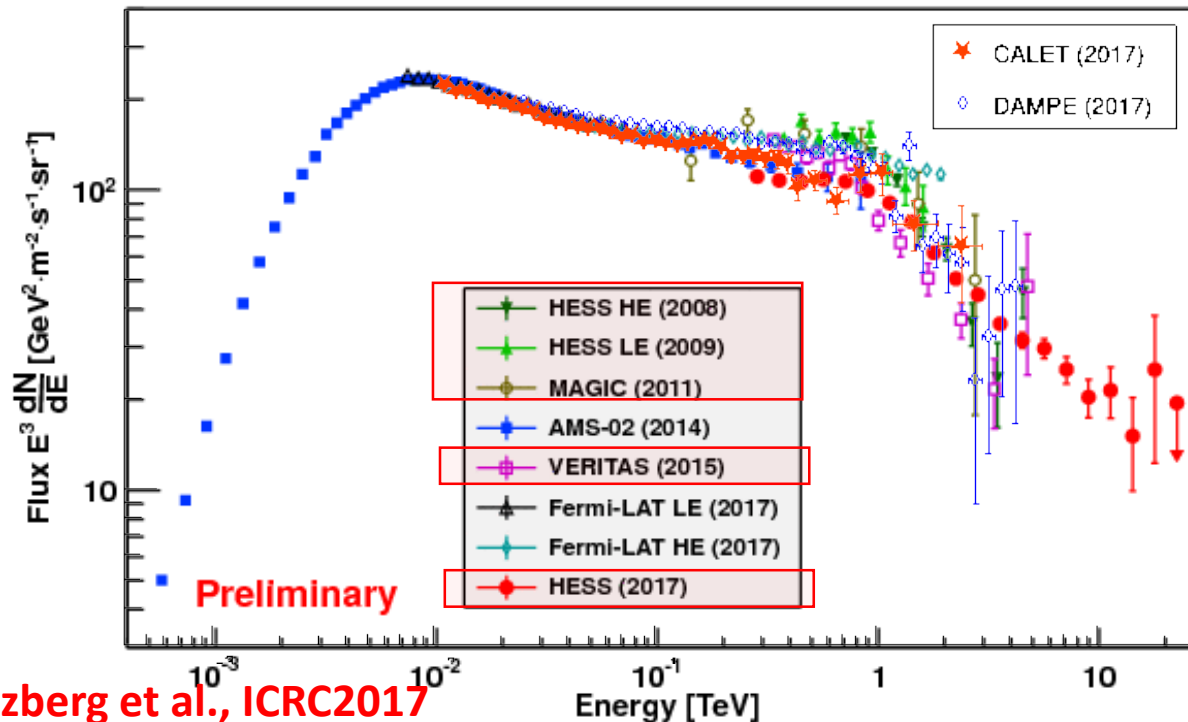


- H.E.S.S.がICRC2017で高エネルギー側**25 TeV**までの測定結果を発表
- 近年では他のIACTアレイ(VERITAS/MAGIC)も電子測定結果を発表している
- 1 TeV近傍での折れ曲がりには複数の結果で見えている

# TeV領域近傍の電子スペクトル測定の実況 ..and now

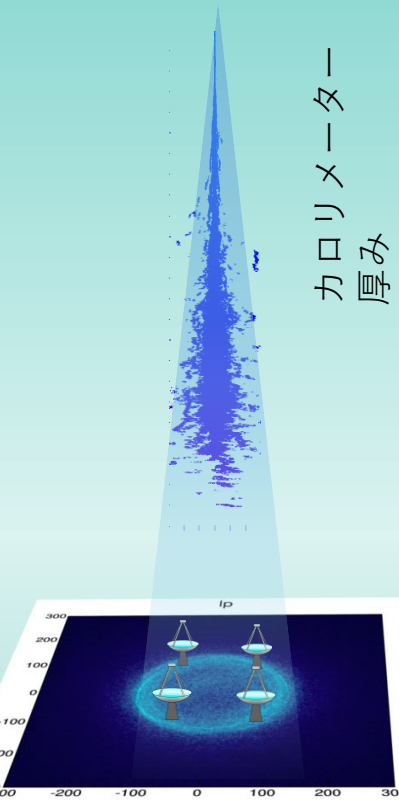
## New H.E.S.S. cosmic-ray electron spectrum

$e^- + e^+$  合算エネルギースペクトル

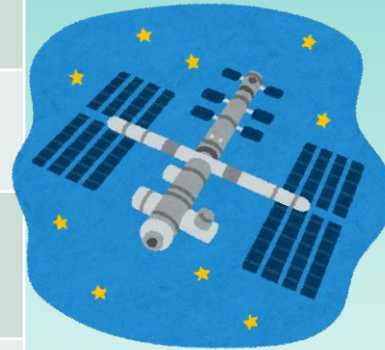


- CALET/DAMPEが直接観測の $E > 1 \text{ TeV}$ の測定結果を発表
- CALETの結果はIACTによる間接測定の結果と矛盾しない

# 間接/直接測定検出器



	IACT	直接測定 (CALET)
電磁成分 radiation length ( $X_0$ )	28	30
陽子の Interaction length	~11	1.3
有効面積@1 TeV	~ $10^{10} \text{cm}^2$ *1 (CTA)	~ $1040 \text{cm}^2 \text{sr}$
エネルギー分解能 @1TeV	~6%	~2%
測定フラックスの 系統誤差@1TeV	~40%*2	~10%
視野サイズ (str)	~ $4 \times 10^{-3}$ *3	~1.8 *4
Duty cycle	~10%	~100%



\*1 点源ガンマ線に対して  
\*2 H.E.S.S.電子測定から  
\*3 半角 3.0 degで換算  
\*4  $z < 45 \text{ deg}$ で換算

## IACT 間接検出

**利点** : 有効面積が大きい

**欠点** : 粒子種の識別能力が低く雑音量が多い

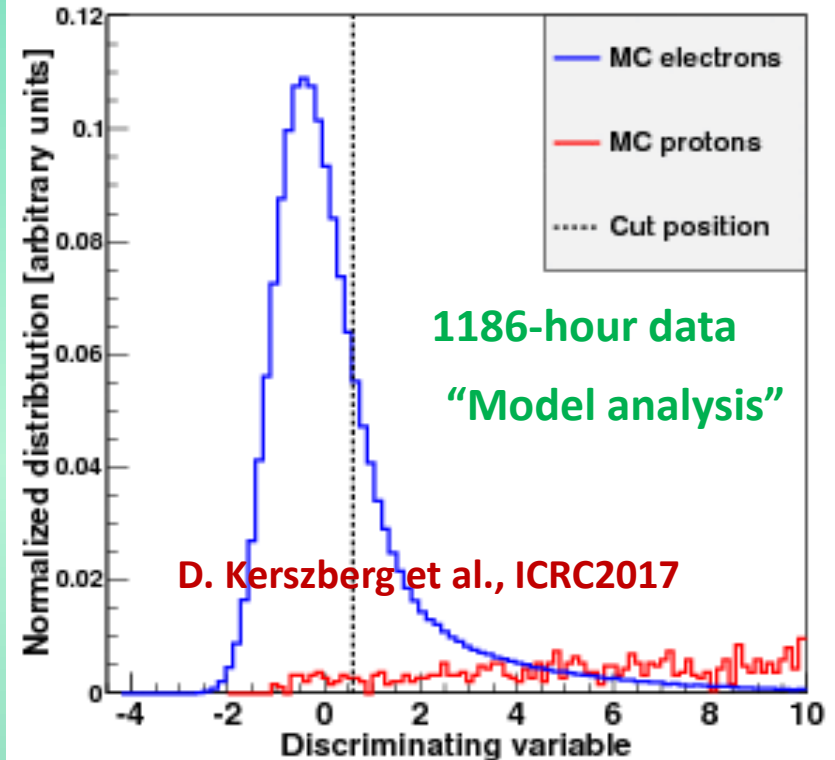
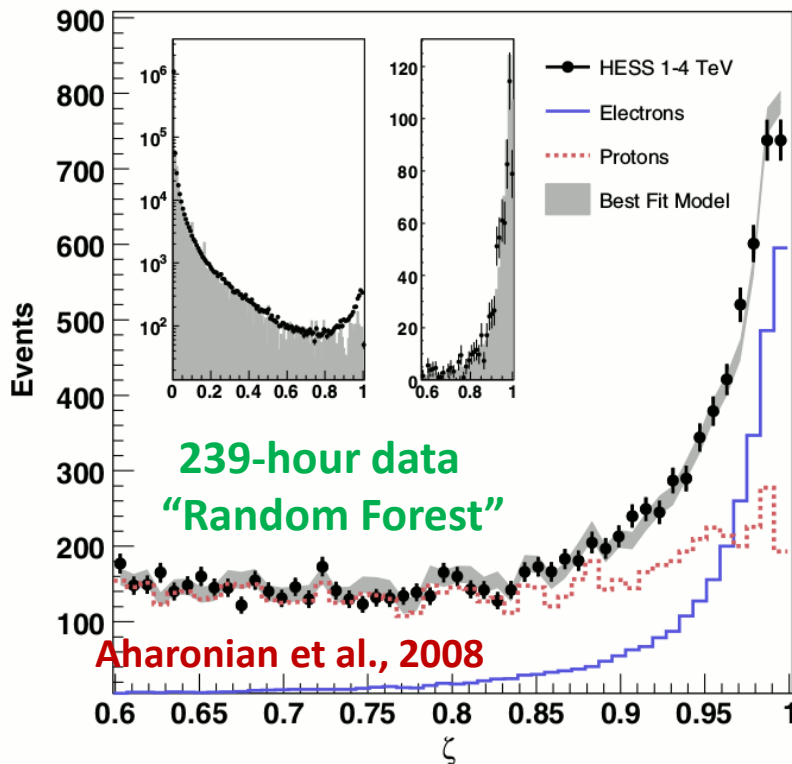
大気状態の不定性等による系統誤差が大きい

電子と $\gamma$ 線の分離が困難、視野が狭い、duty cycleが小さい

# H.E.S.S.の電子成分解析(2008 & 2017)

## H.E.S.S.解析の電子成分分離パラメータ

赤線、青線はシミュレーション

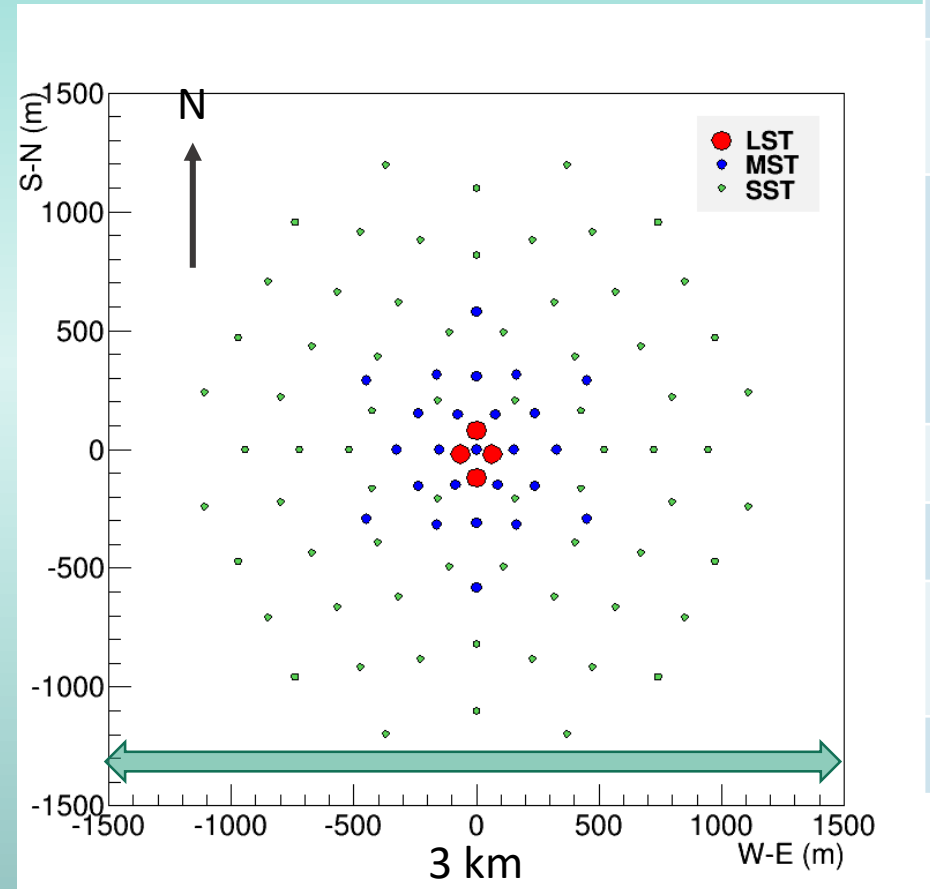


- シャワーの特徴量抽出を用いて電磁・ハドロン成分を弁別
- 残存する“電磁成分like proton” →ガンマ線観測のようにはOFFデータを差し引けない
- proton由来の雑音成分の漏れ込み量推定はシミュレーションに依存  
→ ハドロン相互作用モデルの不定性は系統誤差の主要な要因の一つ
- CTAでの電子観測 → 有効面積の拡大・信号雑音分離能の改善によりH.E.S.S.以上の高精度のスペクトル測定が期待される

# CTAでのシミュレーション

- 今回のシミュレーションは高エネルギー ( $E > 1 \text{ TeV}$ ) に特化

## アレイ配置



パラメータ	値
サイト	Paranal (Chile)
アレイ	“Baseline” 4 LSTs, 25 MSTs, 70 SSTs
粒子種	電子( $e^-$ ) 陽子 QGSJET-II-04 <sup>*1</sup> /EPOS-LHC v3.4 <sup>*1</sup> , QGSJET-II-03 <sup>*2</sup> /SIBYLL2.1 <sup>*2</sup>
コア半径	2500 m
Viewcone	0 - 10 deg, uniform
エネルギー 範囲	0.5 - 300 TeV ( $e^-$ , ガンマ) 1.0 - 1000 TeV (陽子)
べき指数	-2.0 <sup>*3</sup>

\*1 CORSIKA 7.57中のものを使用

\*2 CORSIKA 6.99中のものを使用

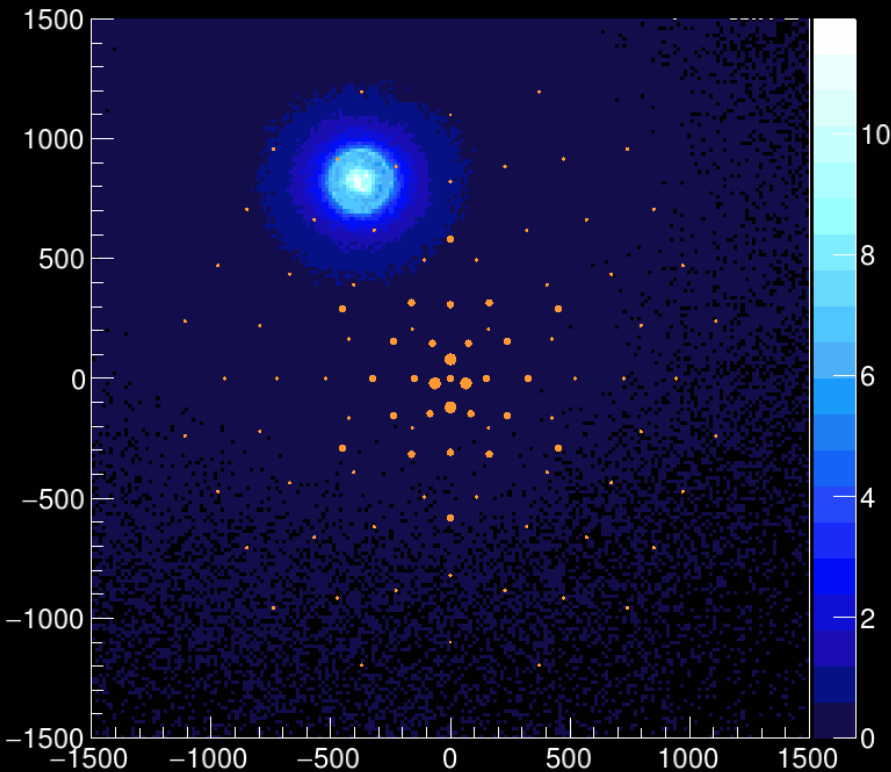
\*3 解析時にイベントの重みがけを行って  
任意のスペクトルの入力を再現する

# CTAでのシミュレーション

- 今回のシミュレーションは高エネルギー (E > 1 TeV) に特化

## アレイ配置

electron 1.0 TeV



パラメータ	値
サイト	Paranal (Chile)
アレイ	“Baseline” 4 LSTs, 25 MSTs, 70 SSTs
粒子種	電子(e <sup>-</sup> ) 陽子 QGSJET-II-04 <sup>*1</sup> /EPOS-LHC v3.4 <sup>*1</sup> , QGSJET-II-03 <sup>*2</sup> /SIBYLL2.1 <sup>*2</sup>
コア半径	2500 m
Viewcone	0 - 10 deg, uniform
エネルギー 範囲	0.5 - 300 TeV (e <sup>-</sup> , ガンマ) 1.0 - 1000 TeV (陽子)
べき指数	-2.0 <sup>*3</sup>

\*1 CORSIKA 7.57中のものを使用

\*2 CORSIKA 6.99中のものを使用

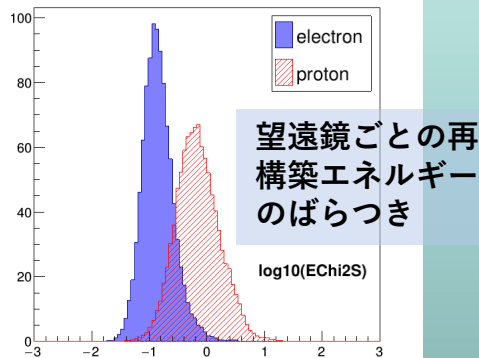
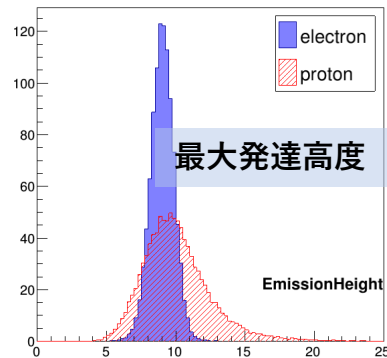
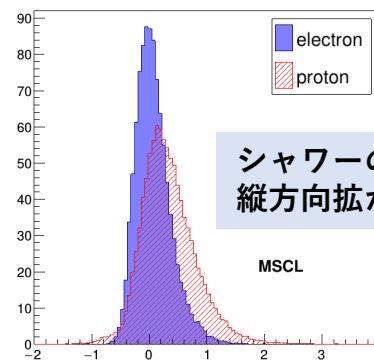
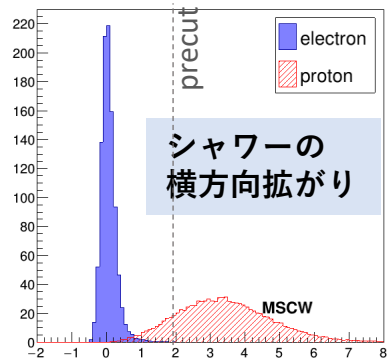
\*3 解析時にイベントの重みがけを行って  
任意のスペクトルの入力を再現する



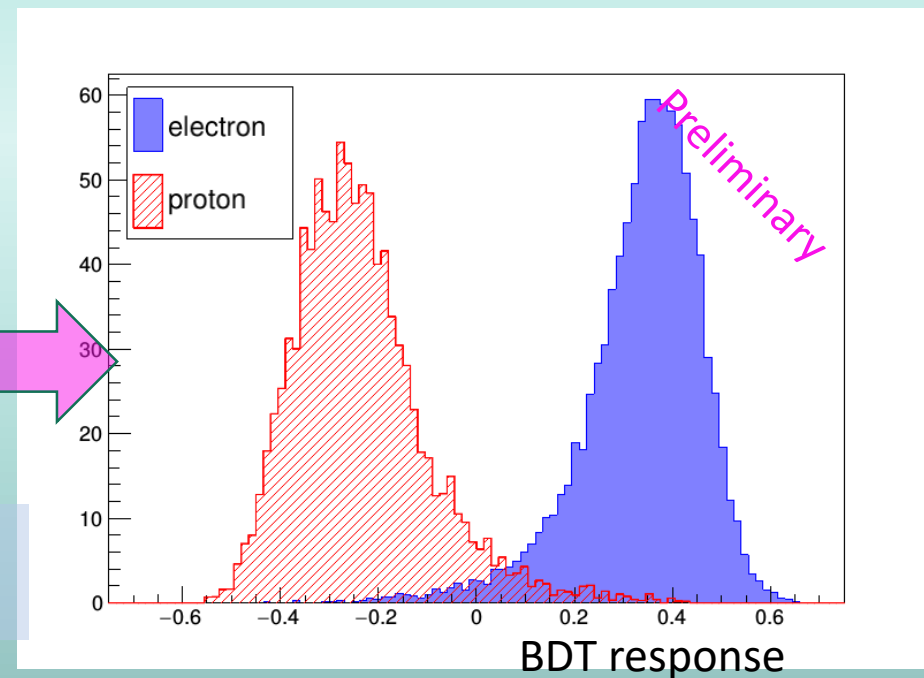
# Electron/hadron分離とパラメータ群

- イメージクリーニングを行いシャワー像を抽出
- イメージ特徴量パラメータ群を計算
- Telescope multiplicity $\geq 12$ を要求 (通常のガンマ線解析では $\geq 4$ )
- 多変量解析(ここではBoosted Decision Tree)を用いて一つの“電子らしさ”の指標を導入 入力パラメータ数は11
- Low-level analysisの手法はガンマ線感度曲線計算に使用されているものを採用

## 特徴パラメータ群の例(1 – 3 TeV)



## BDT分布の例(1 – 3 TeV)

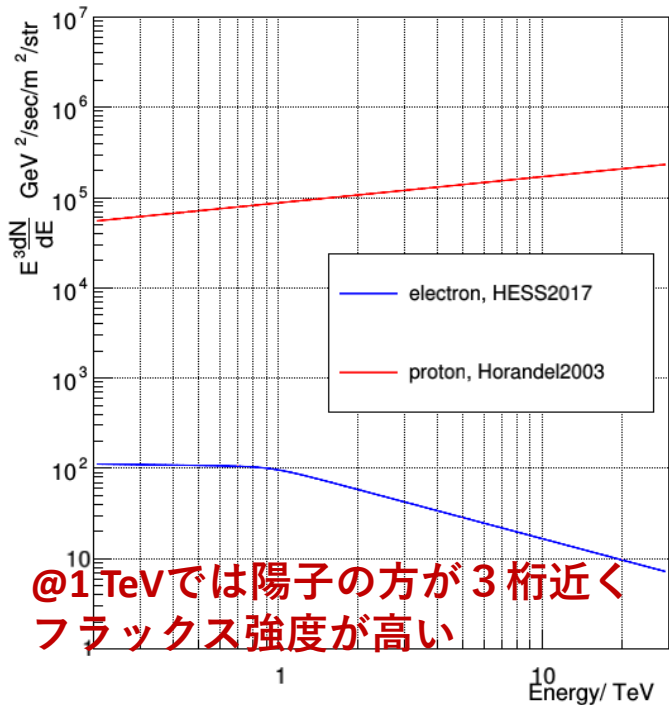


陽子はQGSJET-II-04を使用

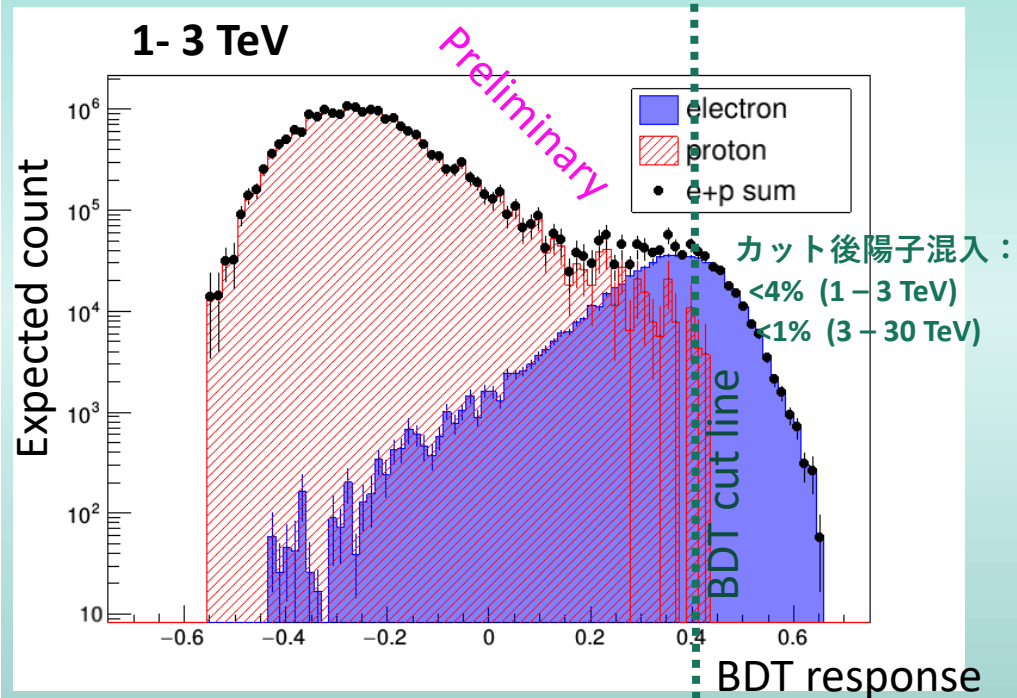
# BDT分布と予測イベント数

- 電子のスペクトル：H.E.S.S.の測定結果、  
陽子のスペクトル：文献値(Hörandel 2003)を使用してイベントに重みがけ

使用した宇宙線陽子・  
電子スペクトル



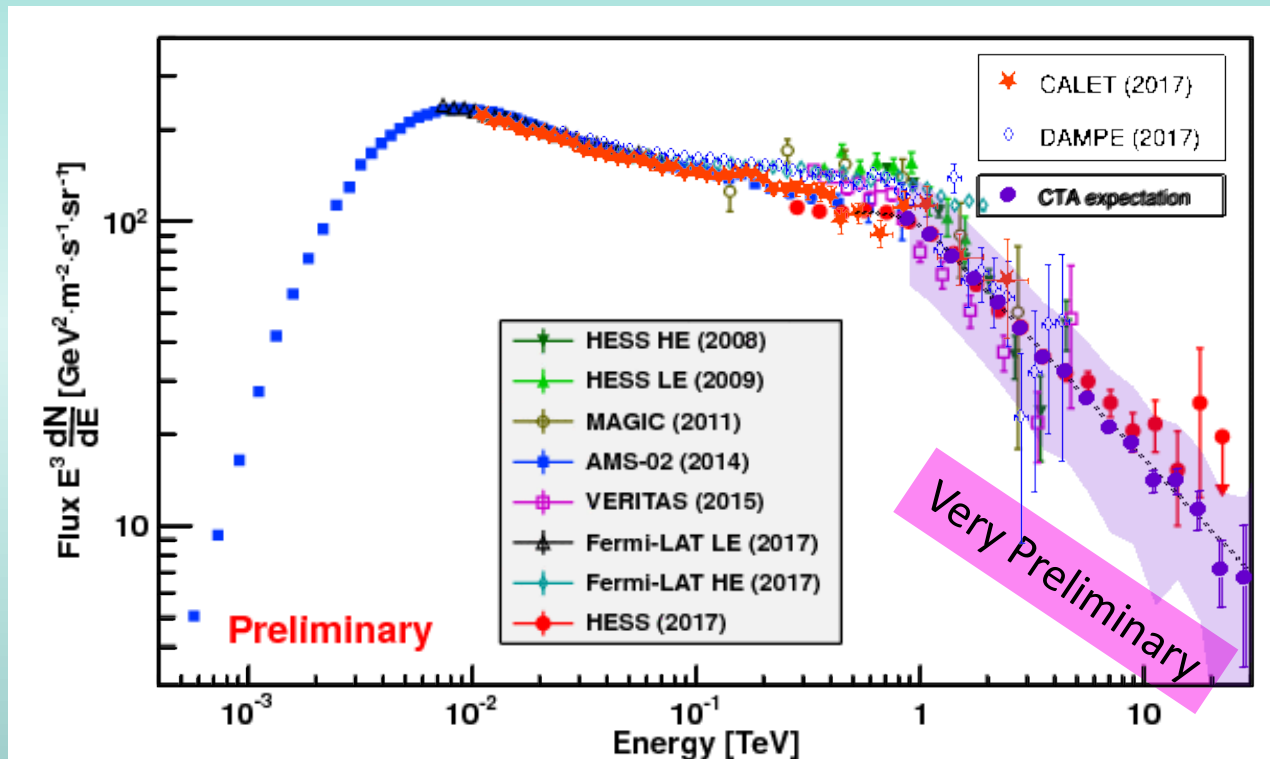
多変量解析の出力パラメータ分布,  
縦軸：予測イベント数(1000時間観測)



- 陽子のシミュレーション事象数を現在の $10^2$ 倍にするのは現実的ではない
- 電磁成分likeな事象を生成する条件を絞り込み、重点的に事象生成して reweight手法が適用できればシミュレーションコストの大幅な低減が可能 (ガンマ線にも応用可能)

# CTAの今回の解析でのexpected count (<25 TeV)

- 観測時間 1000時間を仮定 (BDTのカットは>0.40で固定)
- H.E.S.S.のスペクトルを仮定
- 予測イベント数から統計誤差を計算 / 系統誤差はH.E.S.S.測定から推定(pessimistic)



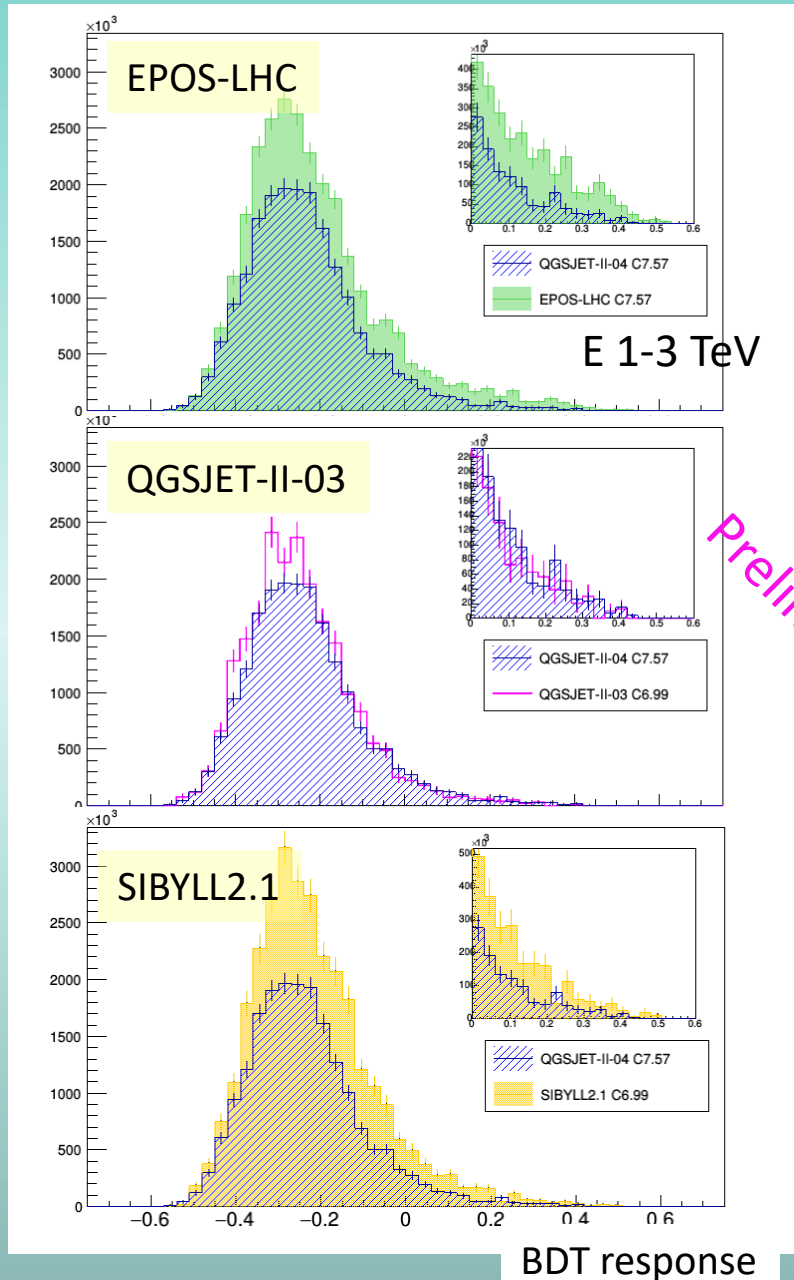
今回は  
E > 1 TeV特化

ガンマ線とほ  
ぼ同じエネル  
ギー帯で測定  
可能

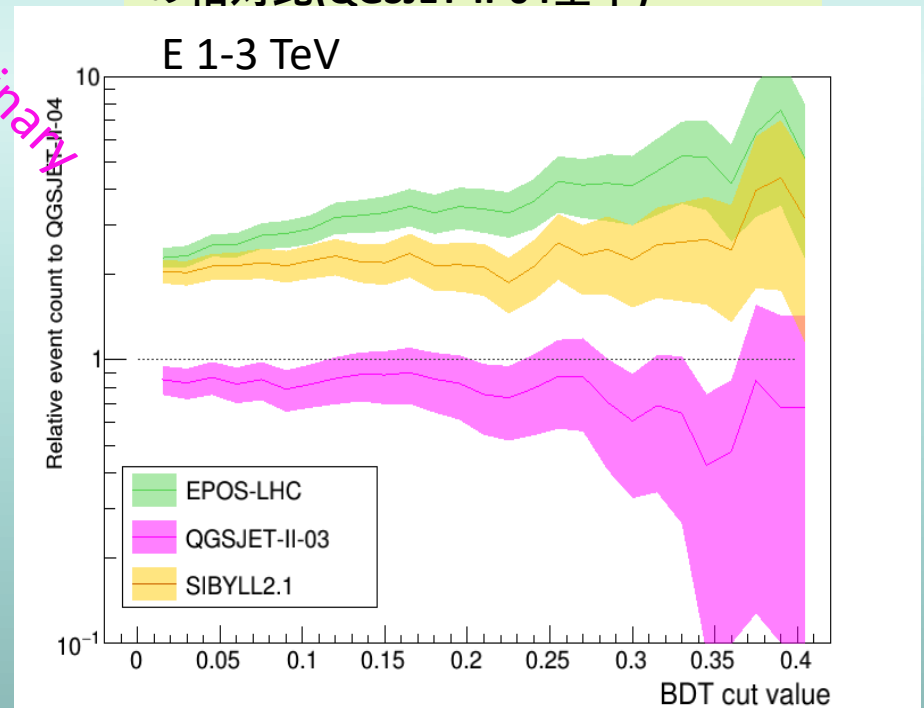
- エネルギー1桁10分割 @ 10TeVで  $\sim 2 \times 10^2$  events
- しかし予測イベント数は解析収率に強く依存する
- Electron-like な事象の発生確率はハドロン相互作用モデルに依存する

# ハドロン相互作用モデルの不定性の影響 (BDT)

- 4つの相互作用モデルに対し BDT分布を比較
- 分布は入力事象数で規格化
- BDTはQGSJET-II-04でtrainされている同一のものを使用。



BDTカット下限と残存イベント量の  
の相対比(QGSJET-II-04基準)

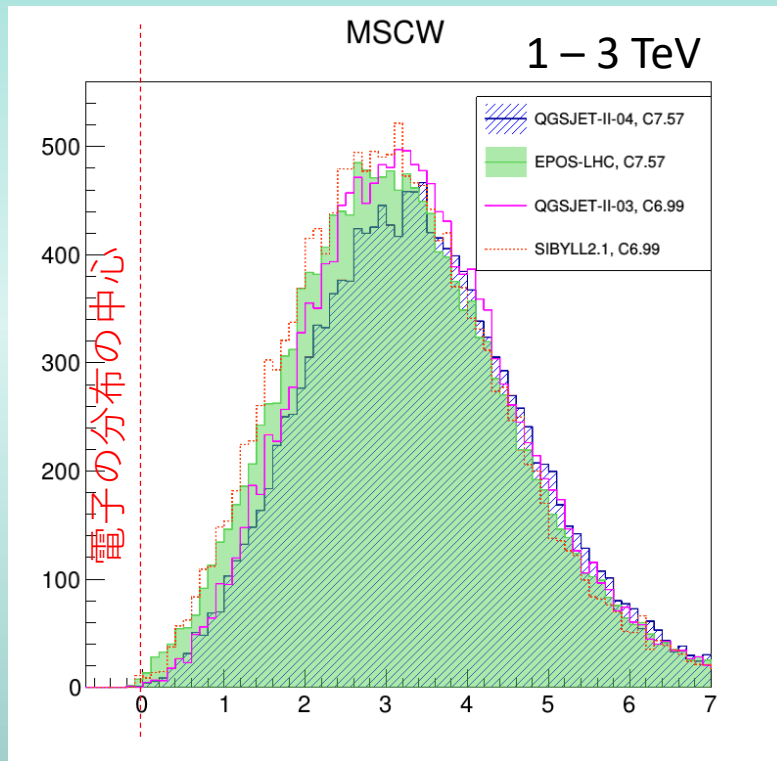


Preliminary

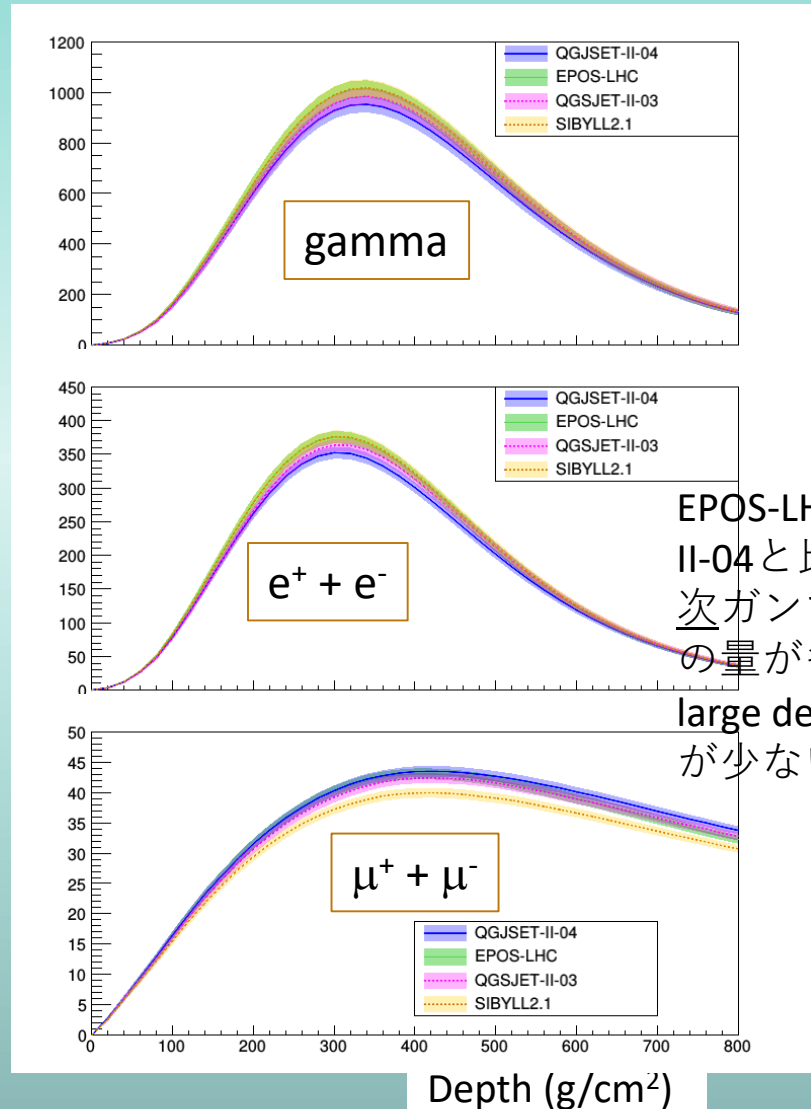
# ハドロン相互作用モデルの不定性

どのシャワーの特徴量パラメータが影響を与えているか

## MSCW (シャワーの横方向拡がり)



## シャワー中の粒子数プロファイル (1-3 TeV)



EPOS-LHCはQGJSJET-II-04と比較して二次ガンマ線と電子の量が多く、large depthで $\mu$ 粒子が少ない

- 電磁・ハドロン分離で最も重要なパラメータ
- EPOS-LHC/SIBYLL2.1は分布が電磁成分likeな方向に寄っている

# Summary

- CTAの南サイト(チリ、LST 4台 MST 25台 SST 70台) のアレイに対し、 $E > 1 \text{ TeV}$ 領域に重点を置いた電子データ生成を行った。
- ガンマ線感度曲線導出に用いられているlow-level analysis と多変量解析を用いて電子成分・ハドロン成分の分離を行い、カット後に予測される電子カウント数を見積もった。
- 電子測定の性能推定の精度を向上させるためには陽子事象の大量データが必要になる。電磁成分likeな陽子事象を生成する条件を絞り込み、ただ全体の事象数を増やすこと以外のintelligentなデータ生成でシミュレーションコストを下げる手法の開発が必要。ガンマ線感度曲線導出にも応用可能。
- ハドロン相互作用モデル由来の不定性により、同一カット条件下での残存陽子の値は $\sim 2$ 倍ゆらぐ。Colliderの実験結果・現行装置でのモデルの評価を行い、モデル由来の不定性を小さく抑えていくことも特に電子測定では重要。