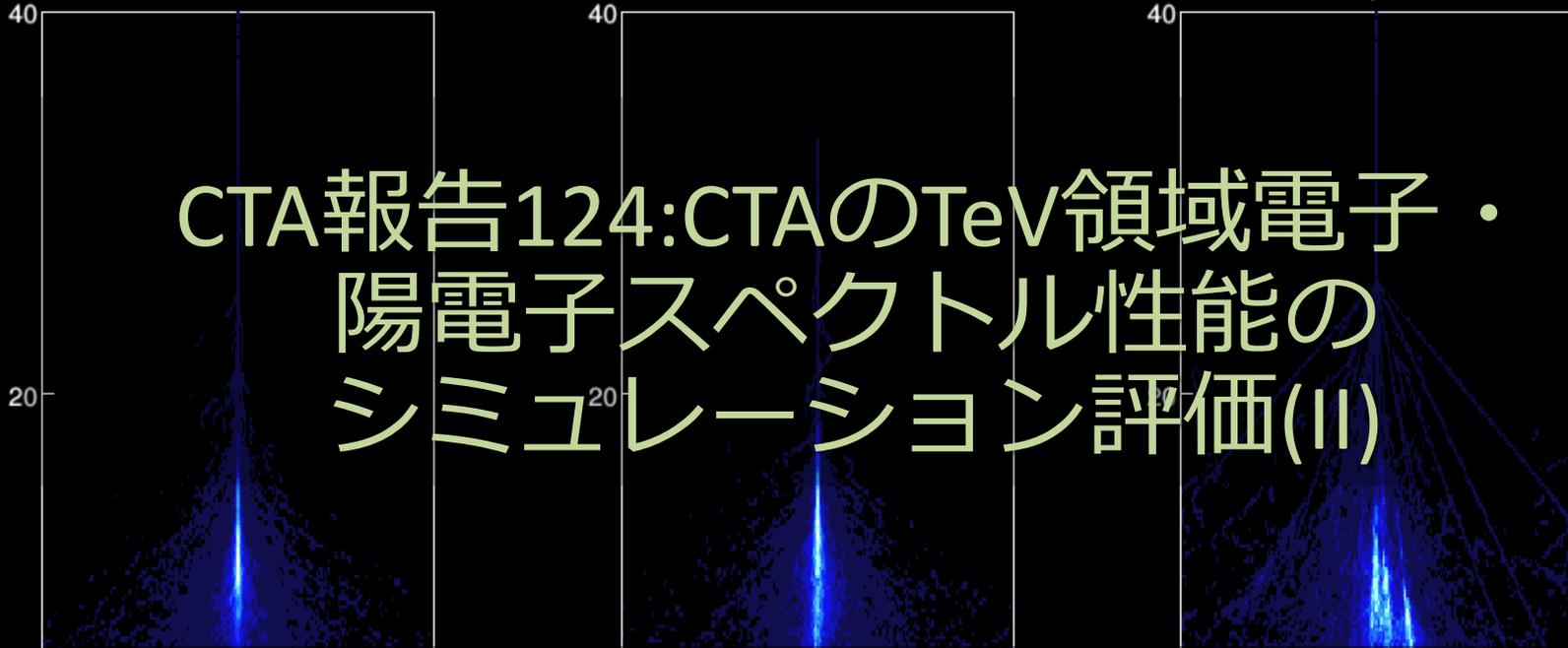


1 TeV e-

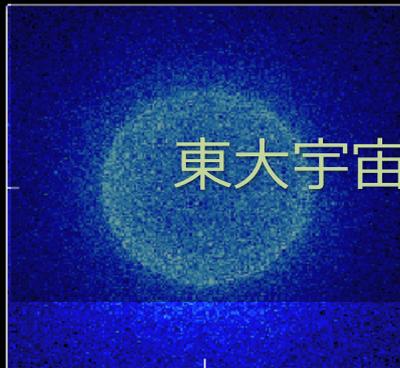
1 TeV gamma

3 TeV proton



CTA報告124:CTAのTeV領域電子・陽電子スペクトル性能のシミュレーション評価(II)

大石理子^A, 稲田知大^A, 奥村暁^B, 片桐秀明^C, 櫛田淳子^D, 郡司修一^E, 斎藤隆之^A, 榊直人^A, 千川道幸^F, 西嶋恭司^D, 三浦智佳^C, 吉越貴紀^A, 吉田龍生^C, 李健^F
 他 CTA-Japan コンソーシアム



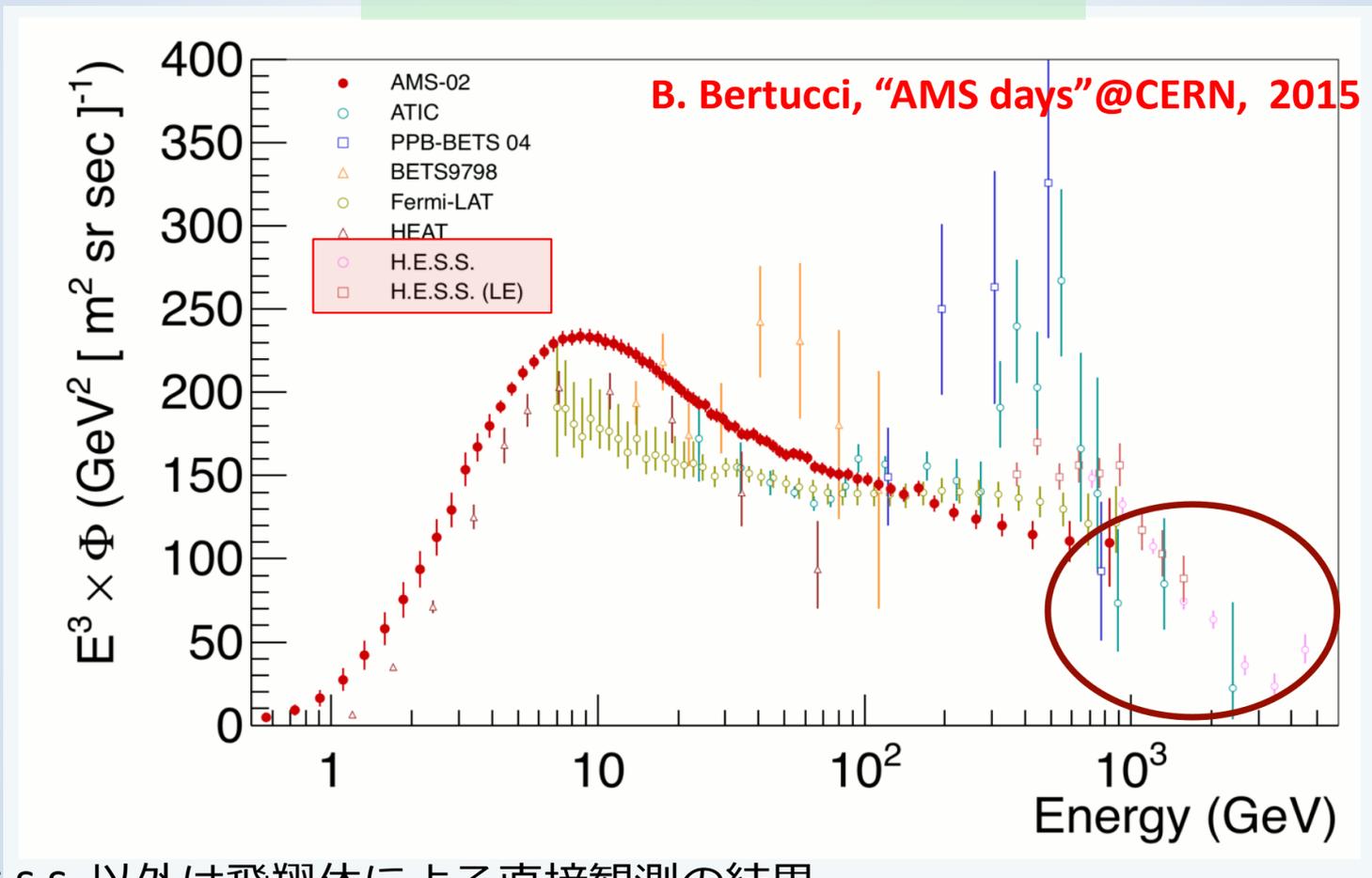
東大宇宙線研^A, 名大ISEE^B, 茨城大理^C, 東海大理^D, 山形大理^E, 近畿大理工^F

Outline

- TeV領域近傍の電子スペクトル測定の見況
- H.E.S.S.の電子成分解析
- CTAでのシミュレーション・解析
- 電磁成分・ハドロン成分の分離パラメータ
- 電子の予想カウント数
- 他粒子の混入の可能性（陽子のモデル不定性、ガンマ線）
- まとめ

TeV領域近傍の電子スペクトル測定の現況: Before ICRC2017

$e^- + e^+$ 合算エネルギースペクトル

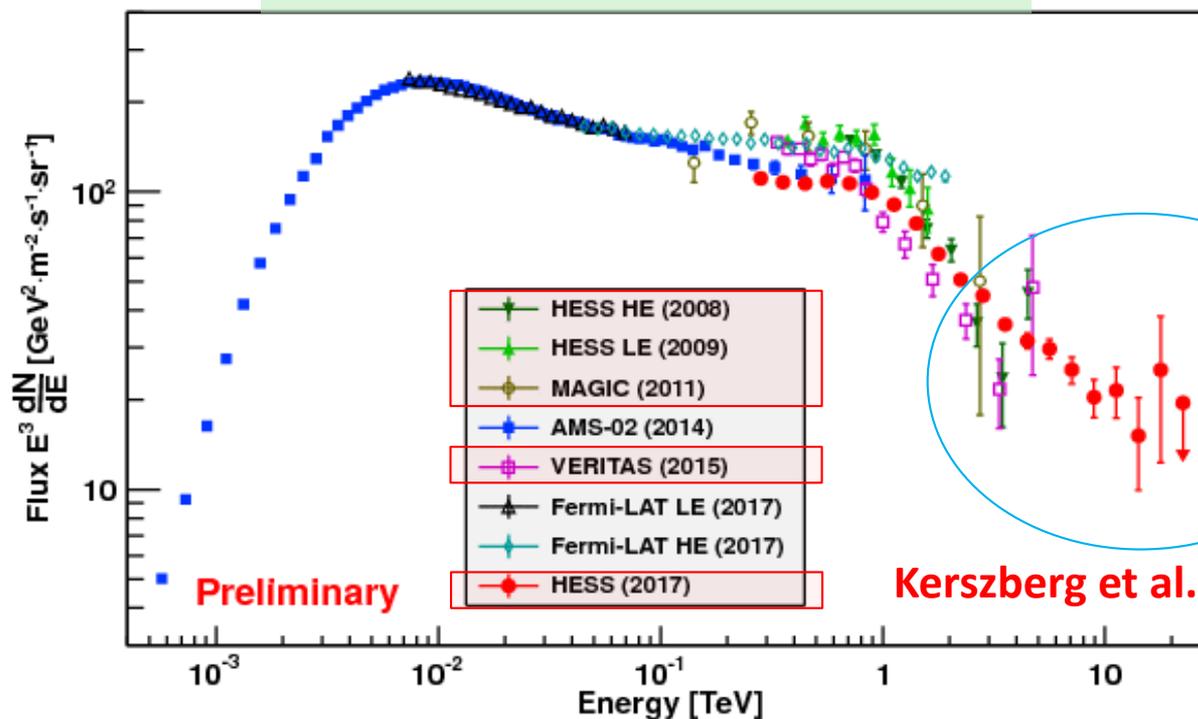


- H.E.S.S. 以外は飛翔体による直接観測の結果
- 解像型大気チェレンコフ望遠鏡(IACT)： 間接検出の広大な有効面積と、イメージングによる電磁/ハドロン成分の識別能力を生かして電子測定に貢献

TeV領域近傍の電子スペクトル測定の現況: after ICRC2017

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

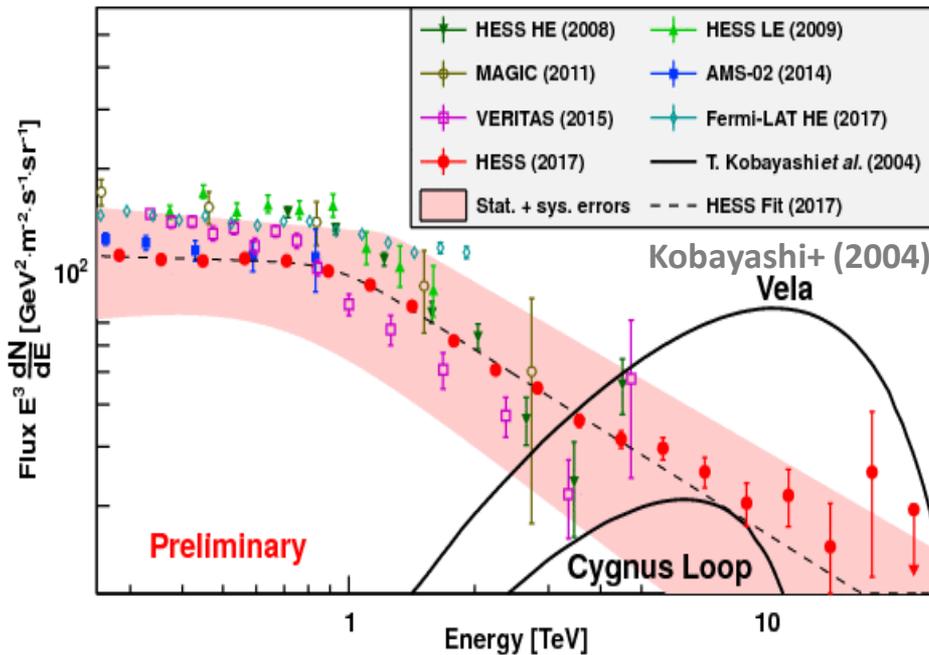
$e^- + e^+$ 合算エネルギースペクトル



- 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)も電子測定解析を発表している
- 1 TeV近傍での折れ曲がり(かたまり)は複数の測定結果で見えている

スペクトルの形状

Featureless spectrum up to the highest energies
Kerszberg et al., ICRC2017



スペクトル形状：

$$E^3 \frac{dN}{dE} = N_0 \left(\frac{E}{(1 \text{ TeV})} \right)^{3-\Gamma_1} \left(1 + \left(\frac{E}{E_b} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right)^{(\Gamma_1-\Gamma_2)\alpha}$$

Result of the fit:

$$\Gamma_1 = 3.04 \pm 0.01 \text{ (stat)}$$

$$\Gamma_2 = 3.78 \pm 0.02 \text{ (stat)}$$

$$E_b = 0.94 \pm 0.02 \text{ (stat) TeV}$$

$$N_0 = 105 \pm 1 \text{ (stat) GeV}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

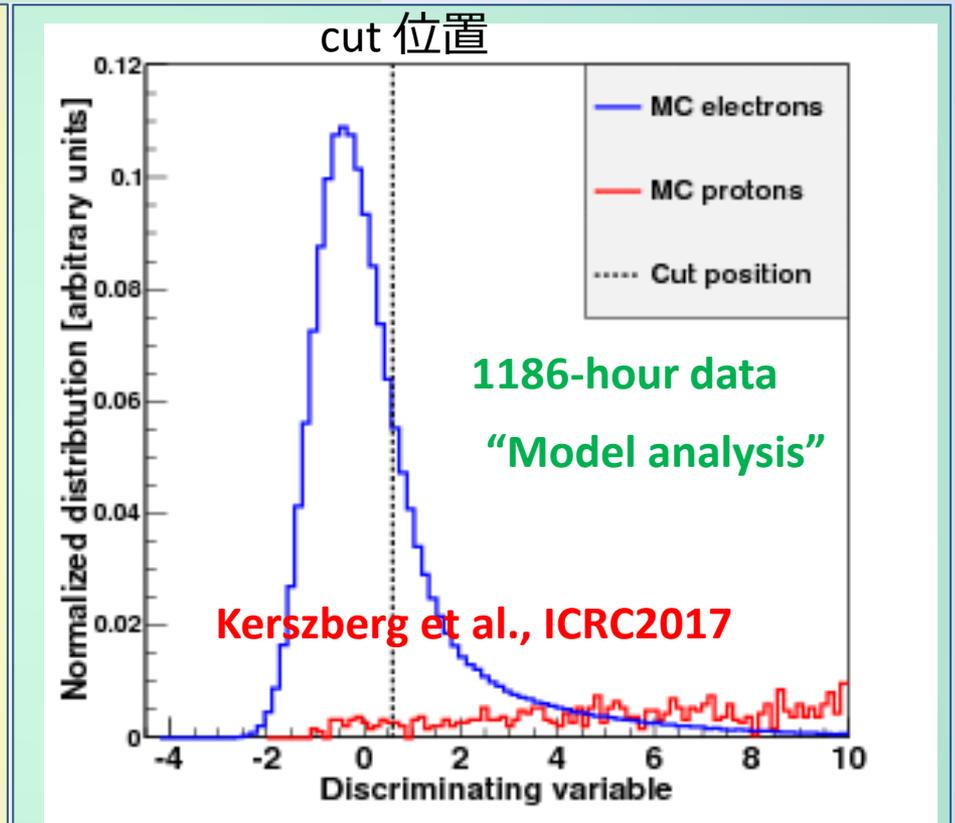
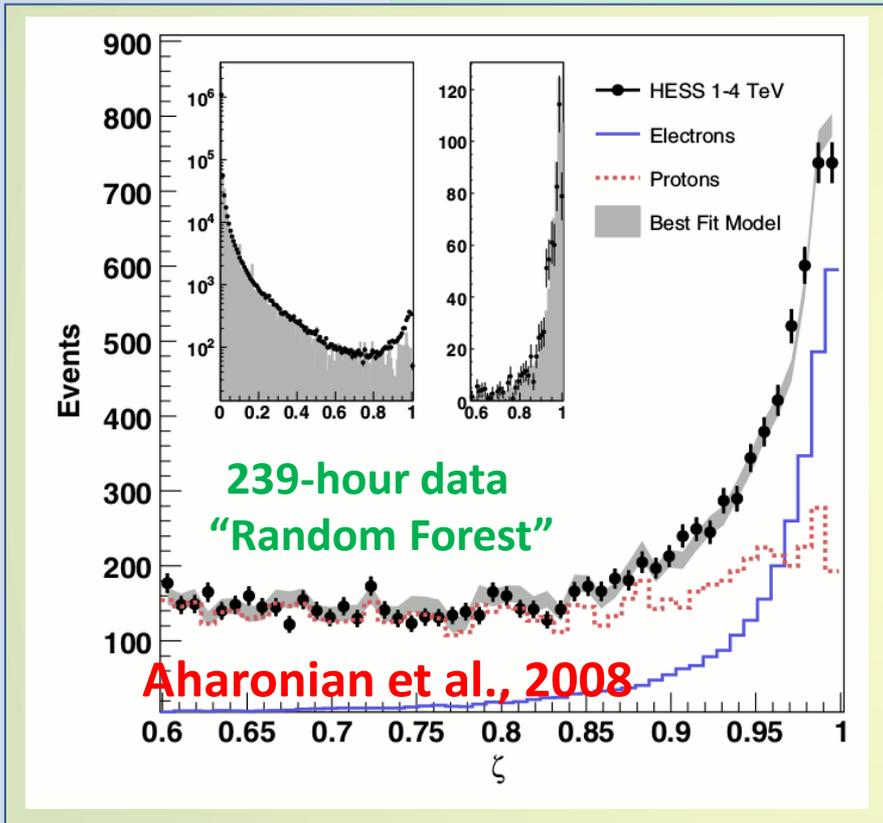
$$\alpha = 0.12 \pm 0.01 \text{ (stat)}$$

- べき乗以外の小構造は今のところ見えていない(“featureless”)
- 折れ曲がりの位置は 1 TeV近傍
下側のべき指数は 3.04, 上側のべき指数が 3.78

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

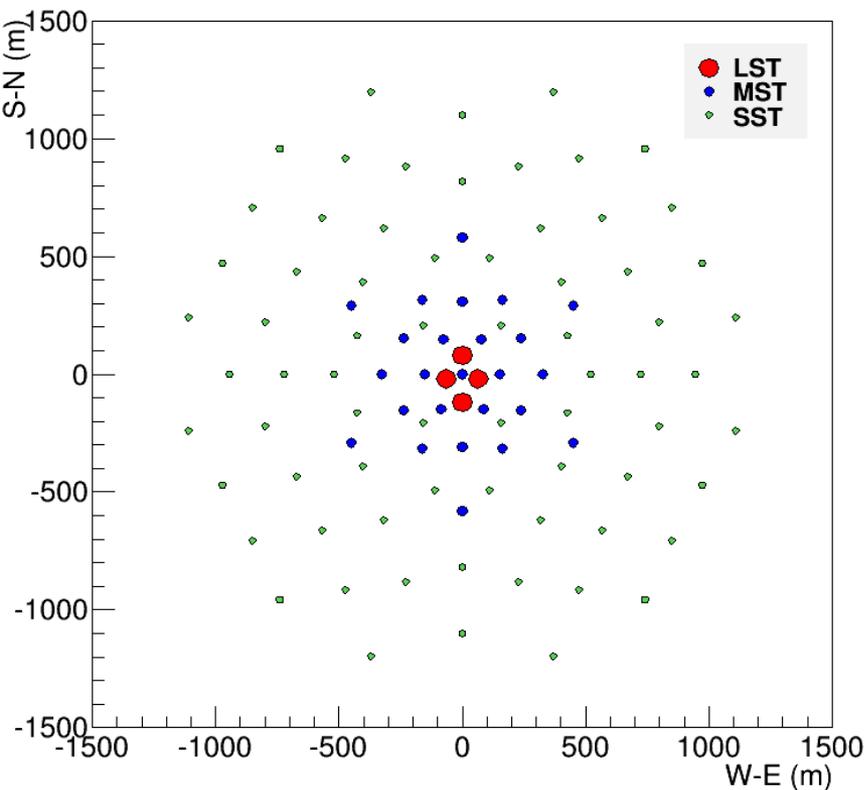


- ガンマ線観測と異なり、OFFの差し引きが不可能
 - ガンマ線観測以上に高い雑音除去能力(厳しい解析条件)が必要
- ハドロン由来の雑音成分の漏れ込み量推定はシミュレーションに依存
 - ハドロン相互作用モデルの不定性は系統誤差の主要な要因の一つ
- CTAでの電子観測 → 有効面積の拡大・信号雑音分離能の改善によりH.E.S.S.以上の高精度のスペクトル測定が期待される

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 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/EPOS-LHC* ¹) ガンマ線
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 * ²

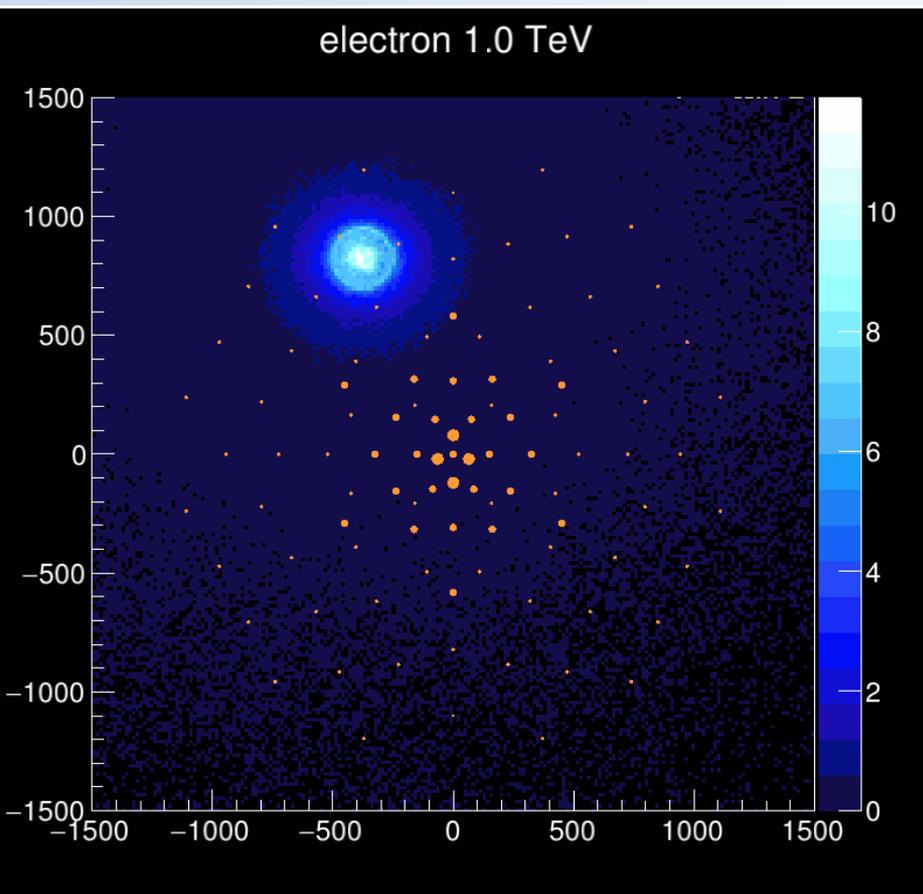
*1 CORSIKA 7.57中のものを使用

*2 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



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/EPOS-LHC* ¹) ガンマ線
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 * ²

*1 CORSIKA 7.57中のものを使用

*2 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

今回のCTAシミュレーションデータの 解析手法

カメラピクセルの信号
を時間積分

イメージクリーニング

到来方向再構築
形状パラメータの計算

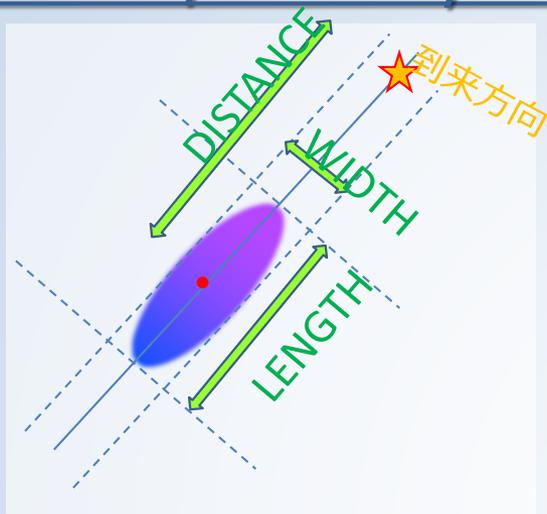
信号（電子）イベント
でlook-up table作成

エネルギー再構築
形状パラメータの規格化

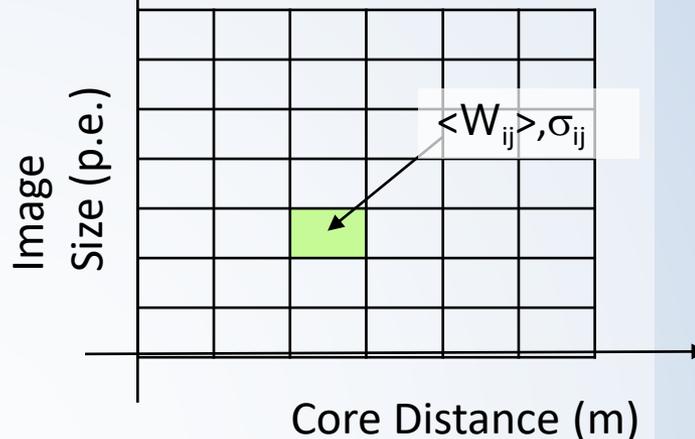
信号（電子）雑音（陽子）
イベントのパラメータで
多変量解析を教育

任意の粒子の入力に対し
多変量解析の応答分布を
調べる

MRSW/MRSL, Energy



MRSW/L, Energy Look-up Table



- 規格化に用いる粒子（ここでは電子）のシミュレーションデータを用いて、**手本となる**パラメータ分布の平均値とRMSをCore Distance/Image sizeごとに求める(Lookup-table, LUTの作成)。
- 基本パラメータはWidth, Length, Energyの**3つ**なので、LUTは**6つ**できる。
- MRSW/L, ERESOL, ECHI2はこのlookup-tableを使用して下記のように求められる。
(最新の解析ではMRSW/Lにさらにmultiplicityを考慮したscaling factorがさらにかかる)

$$MRSW = \frac{1}{N} \sum_{k=1, N} \frac{W - \langle W_{ij} \rangle}{\sigma_{ij}}$$

$$F = \left(0.01 + \left(\frac{\sigma_{ij}^E}{E_{ij}} \right)^2 \right)^{-1}$$

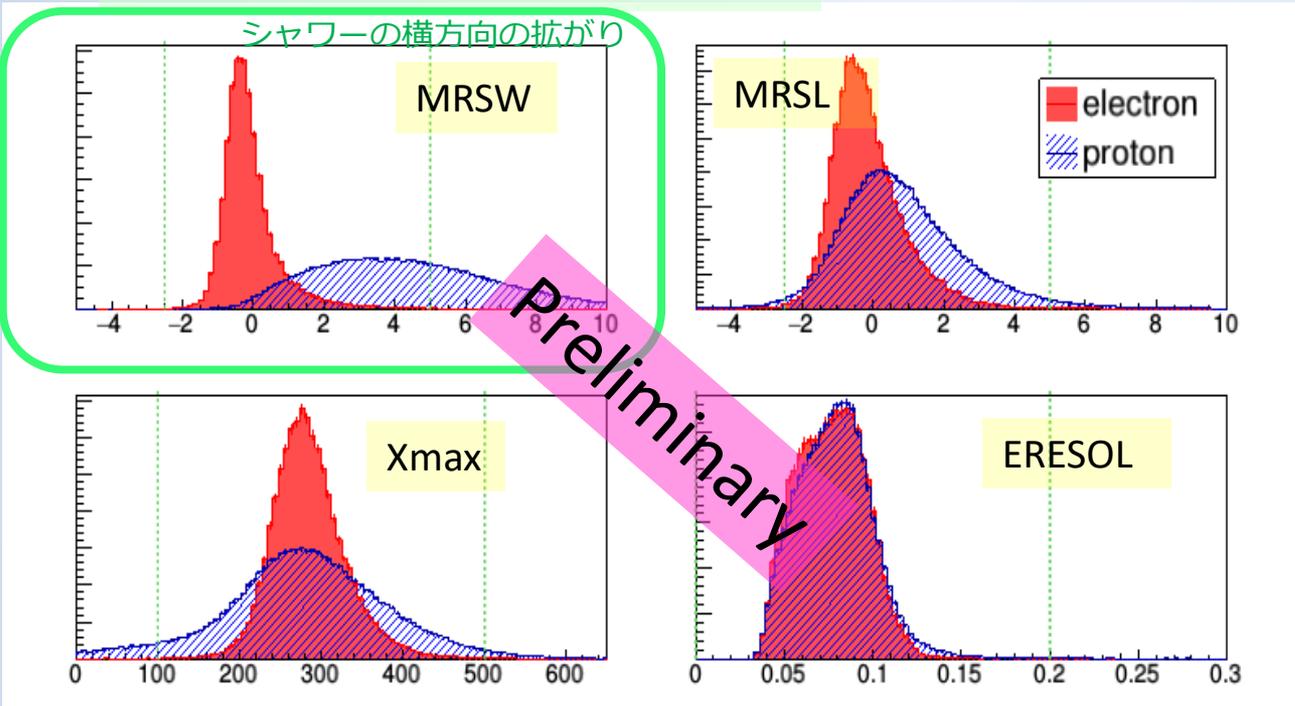
$$ERESOL = \frac{1}{\sqrt{\sum F}}$$

$$ECHI2 = \frac{N}{N-1} \left(\frac{\sum (\ln E_{ij})^2 \cdot F}{\sum F} - \left(\frac{\sum \ln E_{ij} \cdot F}{\sum F} \right)^2 \right)$$

電磁成分・ハドロン成分のパラメータ分布

H.E.S.S.の γ 線解析の標準的なパラメータ群

E > 1 TeV all events, N_{tel} >= 4



点線：多変量解析の前のprecutの選択範囲

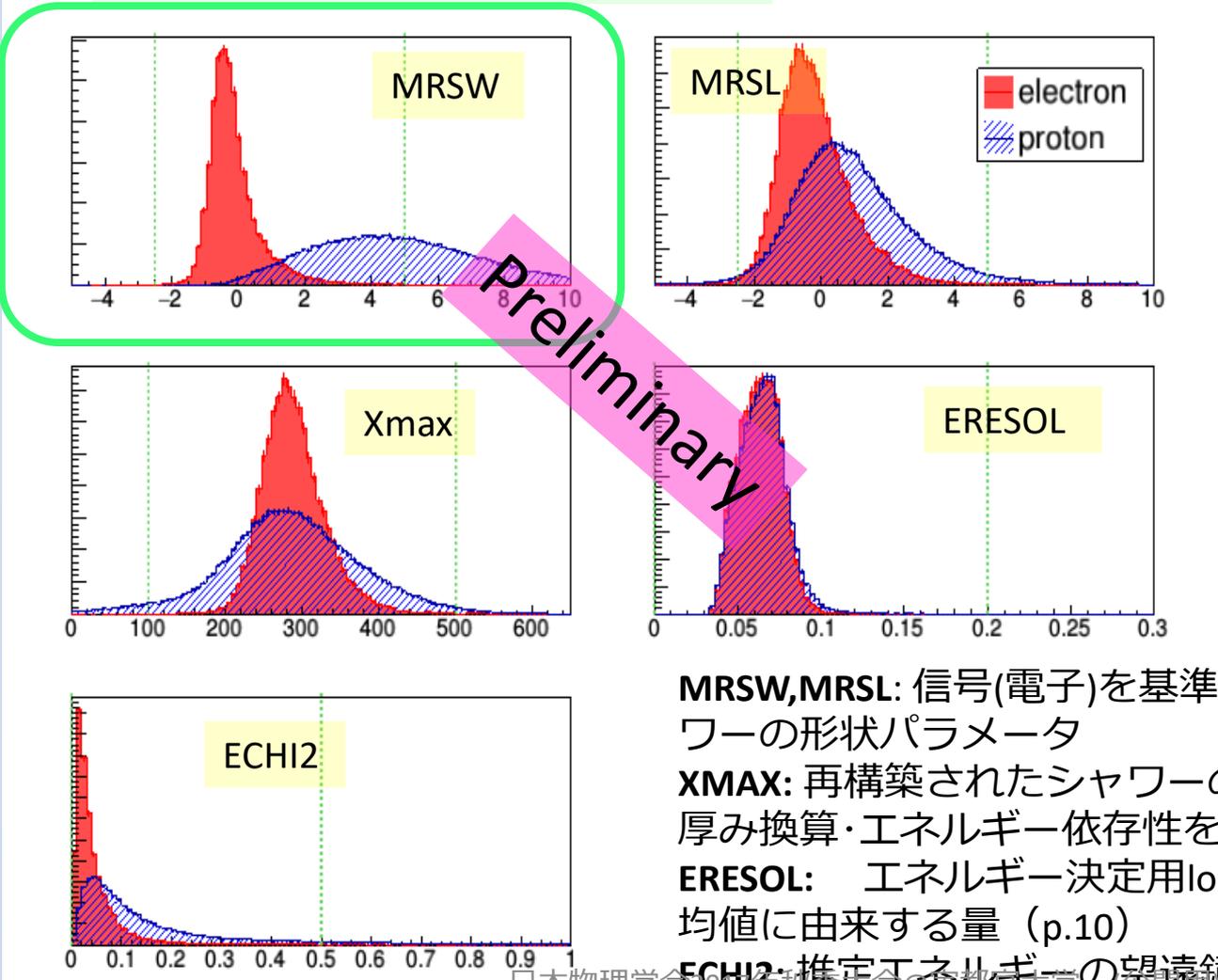
N_{tel} >= 4

- MRSW, MRSL:** 信号(電子)を基準に規格化されたシャワーの形状パラメータ
- Xmax** 再構築されたシャワーの最大発達高度の空気厚み換算・エネルギー依存性を補正
- ERESOL:** エネルギー決定用lookup-tableの分布幅/平均値に由来する量 (p.10)
- ECHI2:** 推定エネルギーの望遠鏡間のばらつき

電磁成分・ハドロン成分のパラメータ分布

H.E.S.S.の γ 線解析の標準的なパラメータ群

E > 1 TeV all events, N_{tel} >= 6



点線：多変量解析の前のprecutの選択範囲

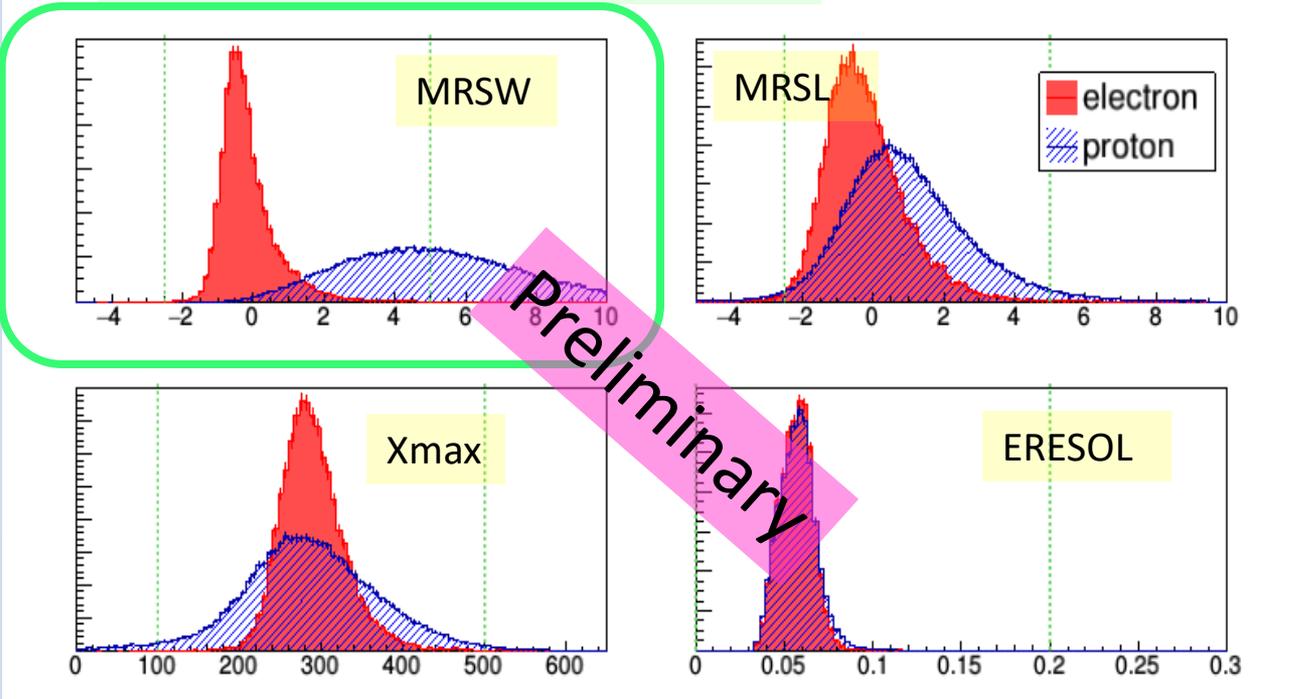
N_{tel} >= 6

- MRSW, MRSL:** 信号(電子)を基準に規格化されたシャワーの形状パラメータ
- XMAX:** 再構築されたシャワーの最大発達高度の空気厚み換算・エネルギー依存性を補正
- ERESOL:** エネルギー決定用lookup-tableの分布幅/平均値に由来する量 (p.10)
- ECHI2:** 推定エネルギーの望遠鏡間のばらつき

電磁成分・ハドロン成分のパラメータ分布

H.E.S.S.の γ 線解析の標準的なパラメータ群

E > 1 TeV all events, N_{tel} >= 8



点線：多変量解析の前のprecutの選択範囲

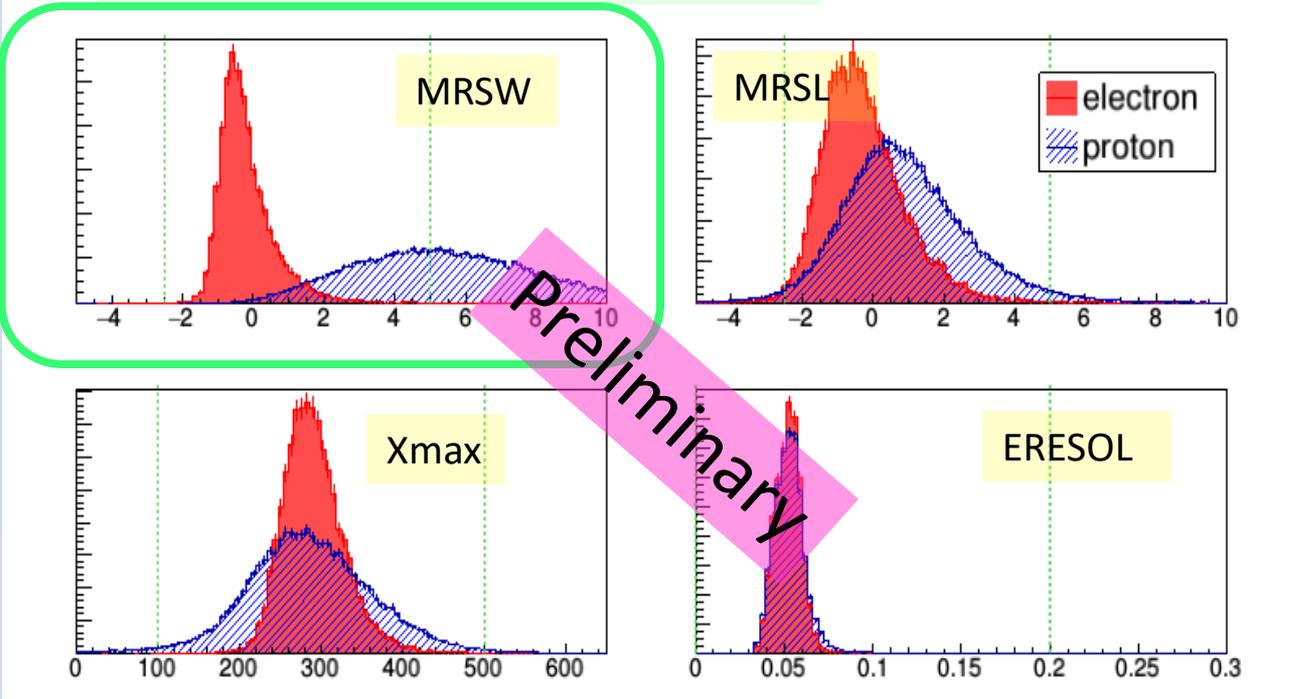
N_{tel} >= 8

- MRSW, MRSL:** 信号(電子)を基準に規格化されたシャワーの形状パラメータ
- XMAX:** 再構築されたシャワーの最大発達高度の空気厚み換算・エネルギー依存性を補正
- ERESOL:** エネルギー決定用lookup-tableの分布幅/平均値に由来する量 (p.10)
- ECHI2:** 推定エネルギーの望遠鏡間のばらつき

電磁成分・ハドロン成分のパラメータ分布

H.E.S.S.の γ 線解析の標準的なパラメータ群

E > 1 TeV all events, N_{tel} >= 10



点線：多変量解析の前のprecutの選択範囲

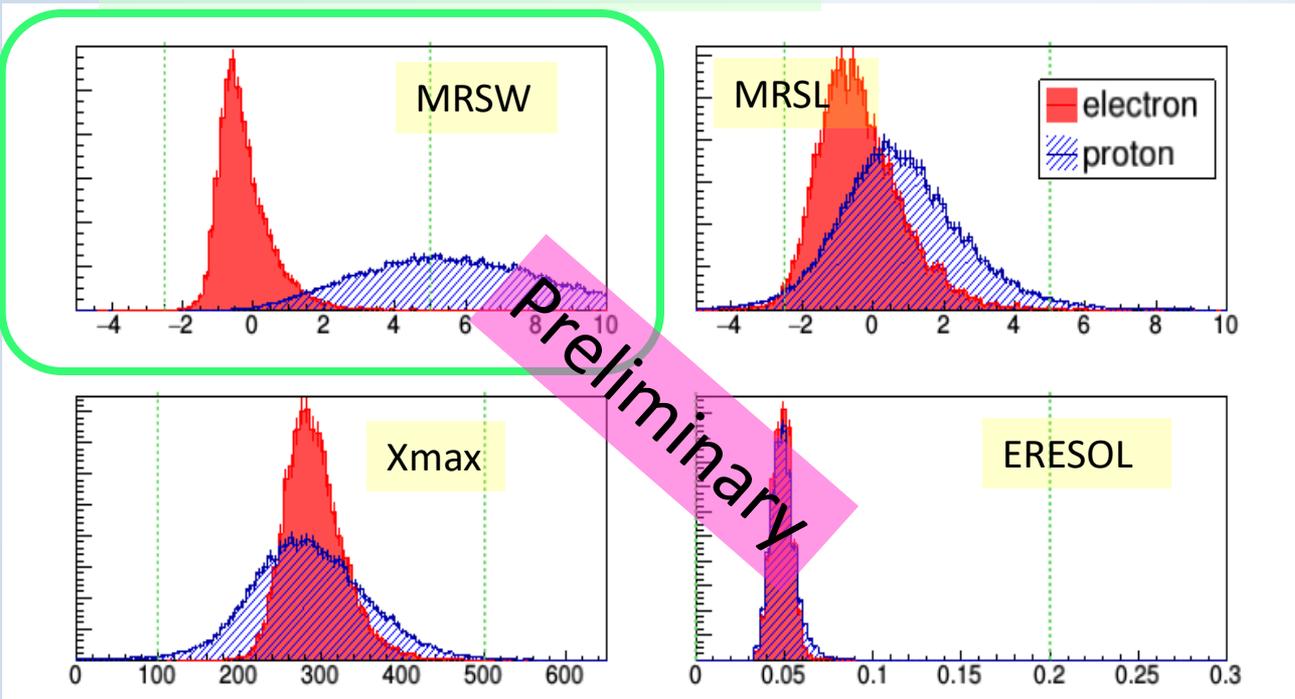
N_{tel} >= 10

- MRSW, MRSL:** 信号(電子)を基準に規格化されたシャワーの形状パラメータ
- XMAX:** 再構築されたシャワーの最大発達高度の空気厚み換算・エネルギー依存性を補正
- ERESOL:** エネルギー決定用lookup-tableの分布幅/平均値に由来する量(p.10)
- ECHI2:** 推定エネルギーの望遠鏡間のばらつき

電磁成分・ハドロン成分のパラメータ分布

H.E.S.S.の γ 線解析の標準的なパラメータ群

$E > 1$ TeV all events, $N_{tel} \geq 12$



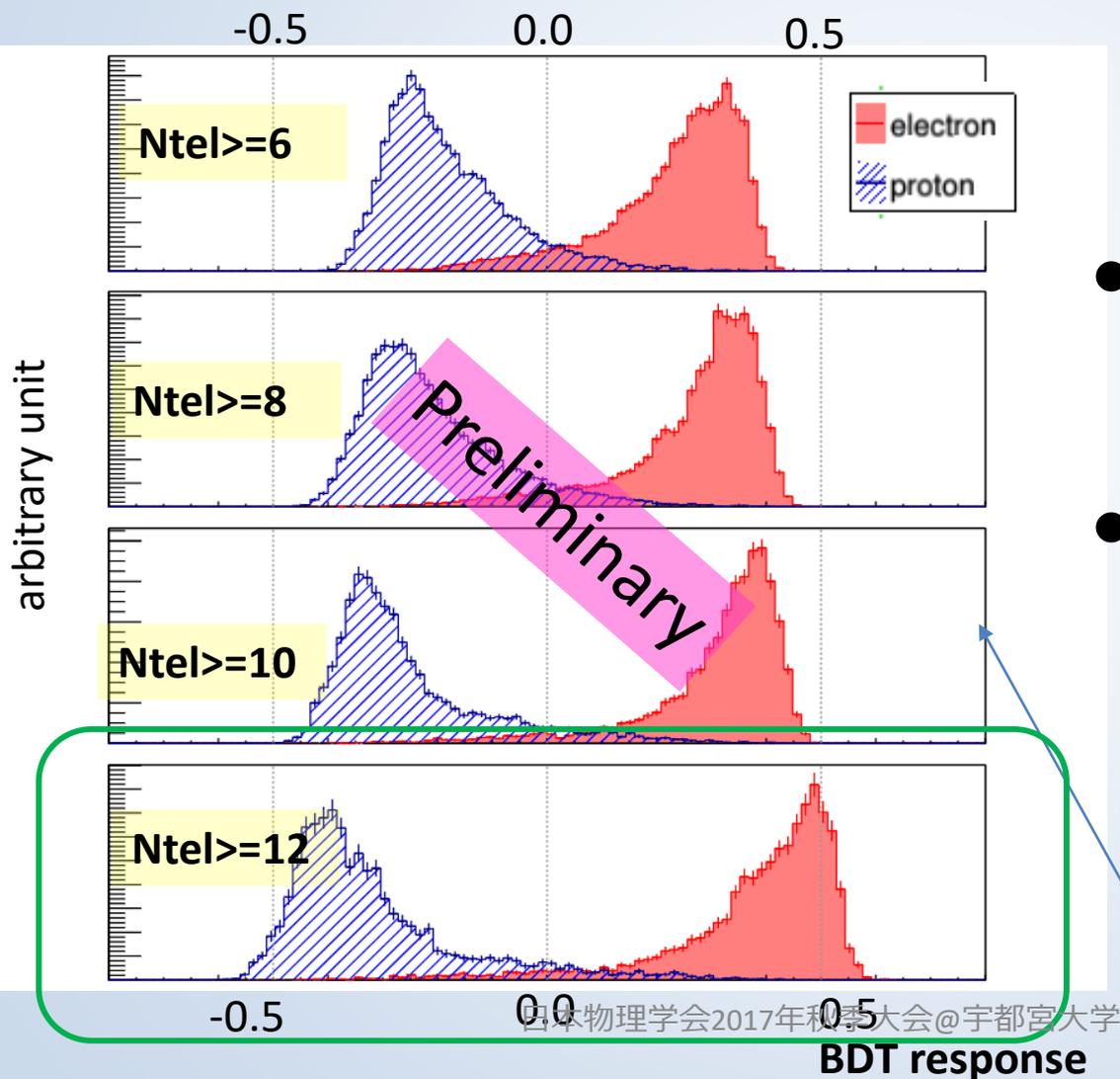
点線：多変量解析の前のprecutの選択範囲

$N_{tel} \geq 12$

- MRSW, MRSL:** 信号(電子)を基準に規格化されたシャワーの形状パラメータ
- XMAX:** 再構築されたシャワーの最大発達高度の空気厚み換算・エネルギー依存性を補正
- ERESOL:** エネルギー決定用lookup-tableの分布幅/平均値に由来する量 (p.10)
- ECHI2:** 推定エネルギーの望遠鏡間のばらつき

分離パラメータ：多変量解析の導入

多変量解析の出カパラメータ分布



- 1つのイベントが持つ複数の特徴パラメータを単一の指標（信号らしさ、雑音らしさ）に変換
- 今回の多変量解析には**BDT** (Boosted Decision Tree)を採用
実装は ROOT TMVAを利用
- 全イベントの1/3を教育 (training)用、残り2/3を評価用に使用

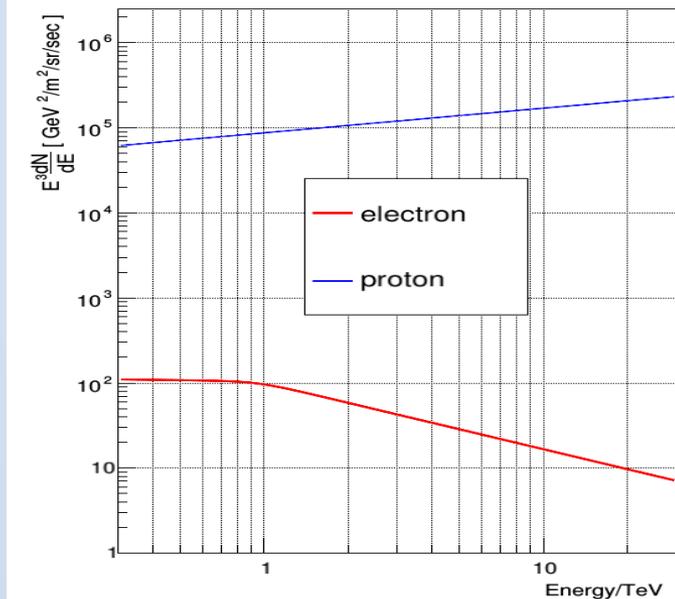
3.16 TeV < E < 10 TeVのBDT分布
使用する望遠鏡（イメージ）の数が多いと信号・雑音分離度が高くなる
分布は面積で規格化

BDT分布と予測イベント数

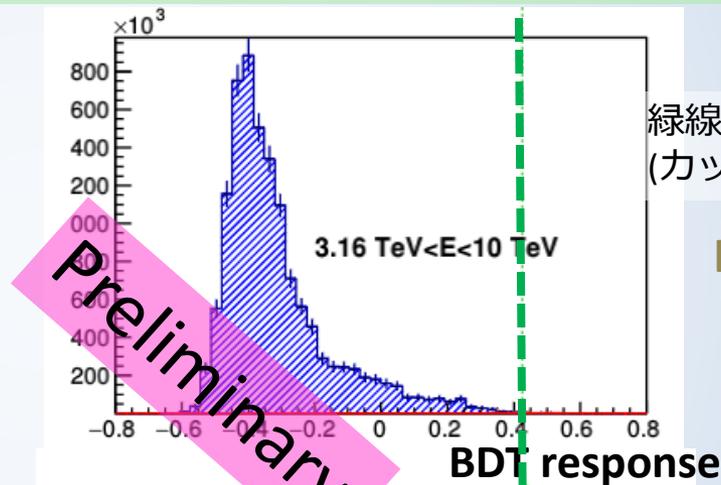
- **電子のスペクトル** : H.E.S.S.の測定結果、
陽子のスペクトル : 文献値(Hörandel 2003)を使用してイベントに重みかけ

使用した宇宙線陽子・
電子スペクトル

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

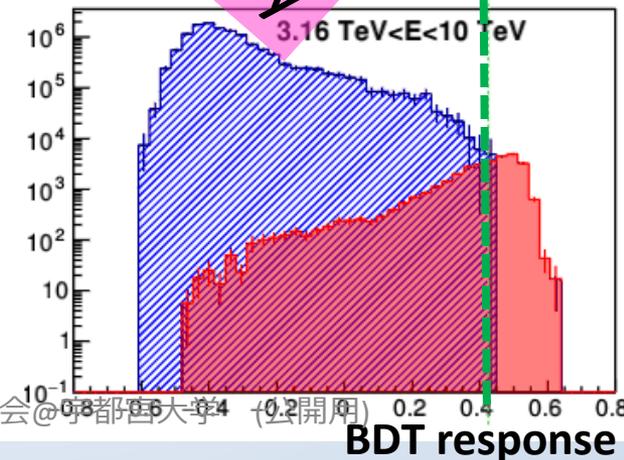


陽子の方が3桁近くフラックス
強度が高い



緑線 : BDT>0.425
(カット位置)

linear scale

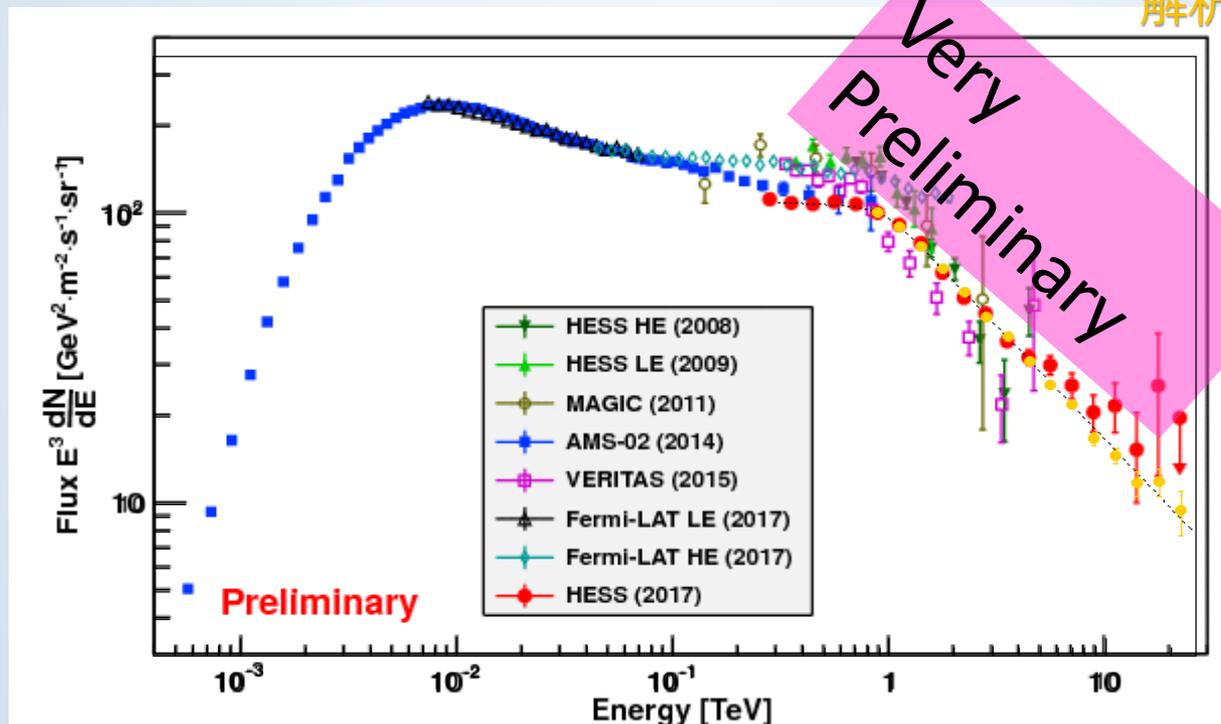


log scale

CTA+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>0.425で固定
- H.E.S.S.のスペクトルを仮定

- CTA 今回の高エネルギー特化解析での予測点



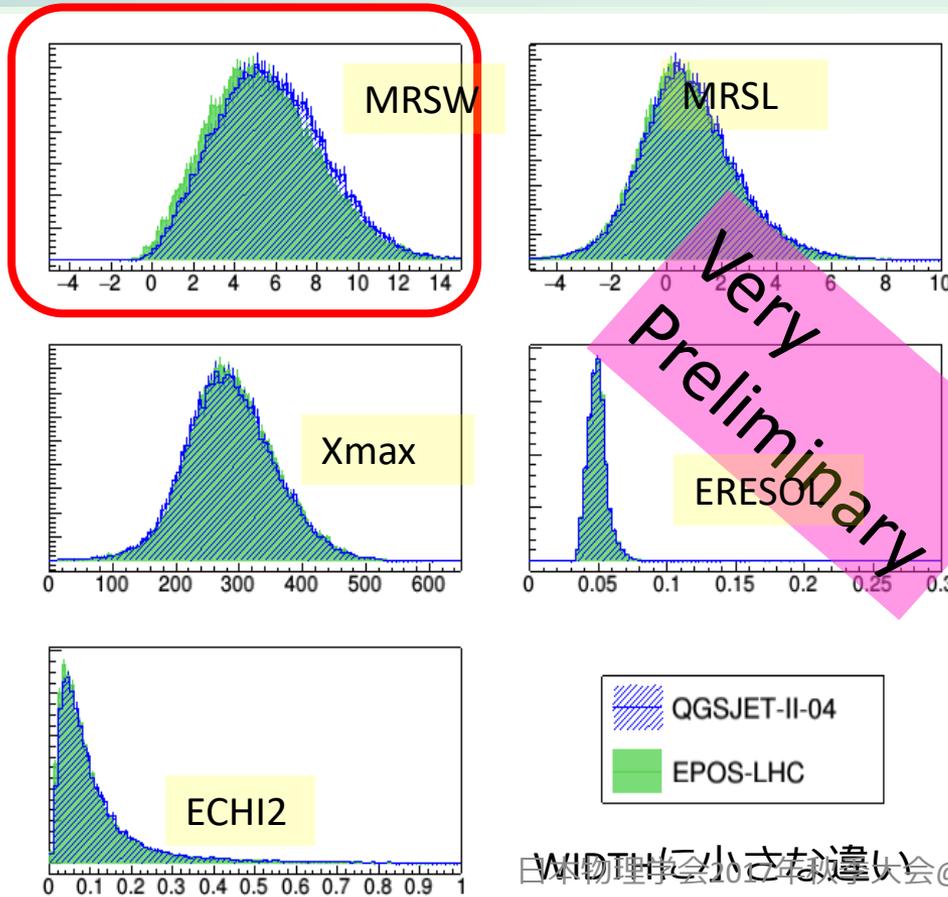
- エネルギー1桁10分割 @ 10TeVで $\sim 2 \times 10^2$ events
- しかし予測イベント数は解析収率に強く依存するので、陽子の混入率の推定精度を上げて再評価が必要

他粒子の混入の可能性：陽子

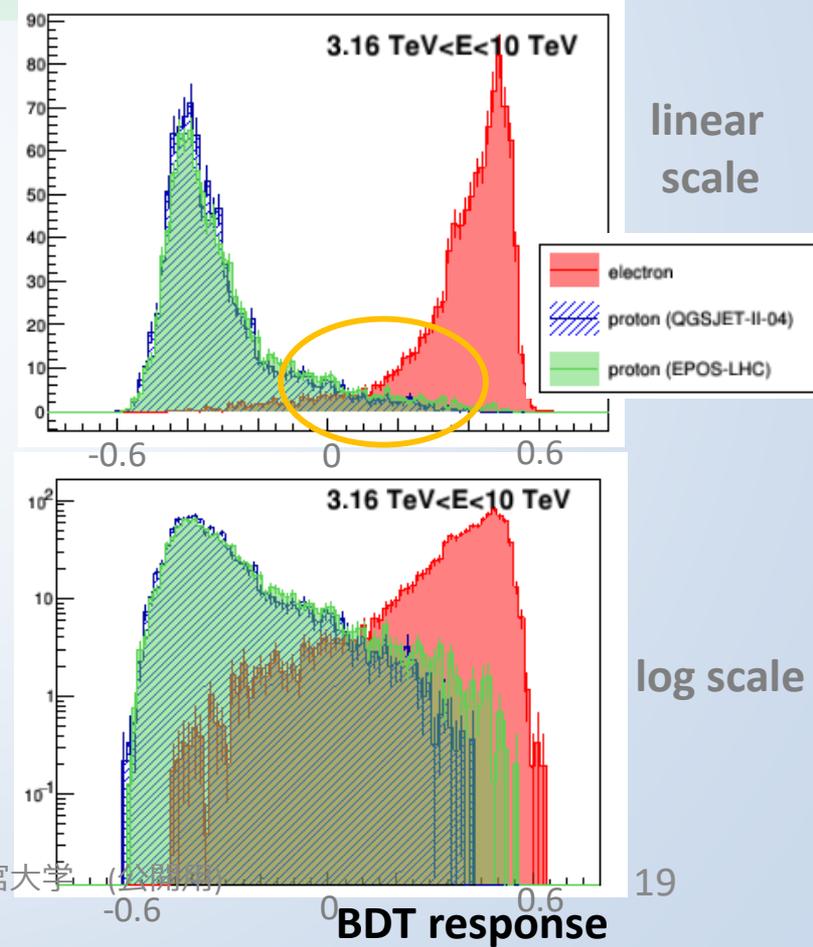
- 陽子の混入率推定はシミュレーションに依存する
- 二つのハドロン相互作用モデルのデータを用意(QGSJET-II-04/EPOS-LHC)

二つの相互作用モデルに対するBDT分布

二つの相互作用モデルに対するパラメータ分布（陽子）

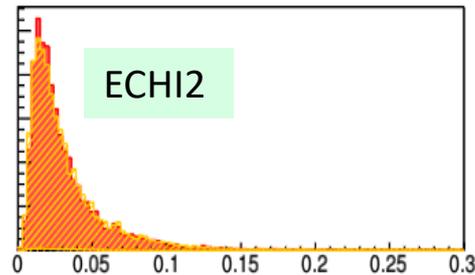
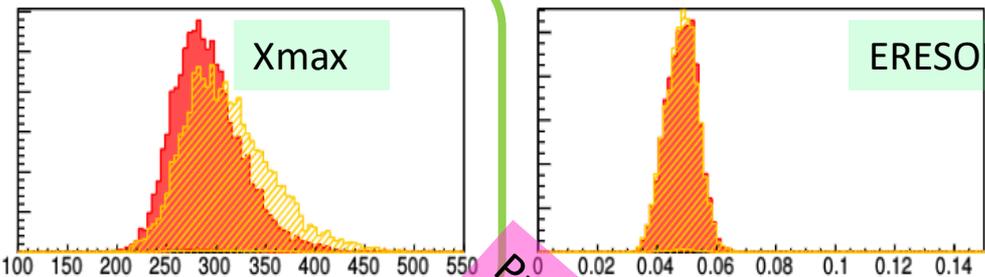
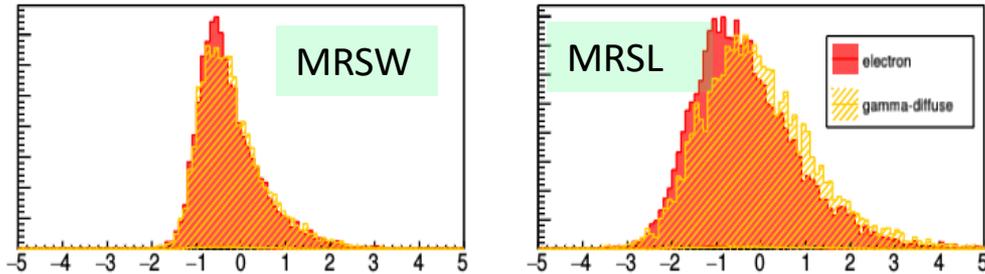


BDT教育：QGSJET-II-04



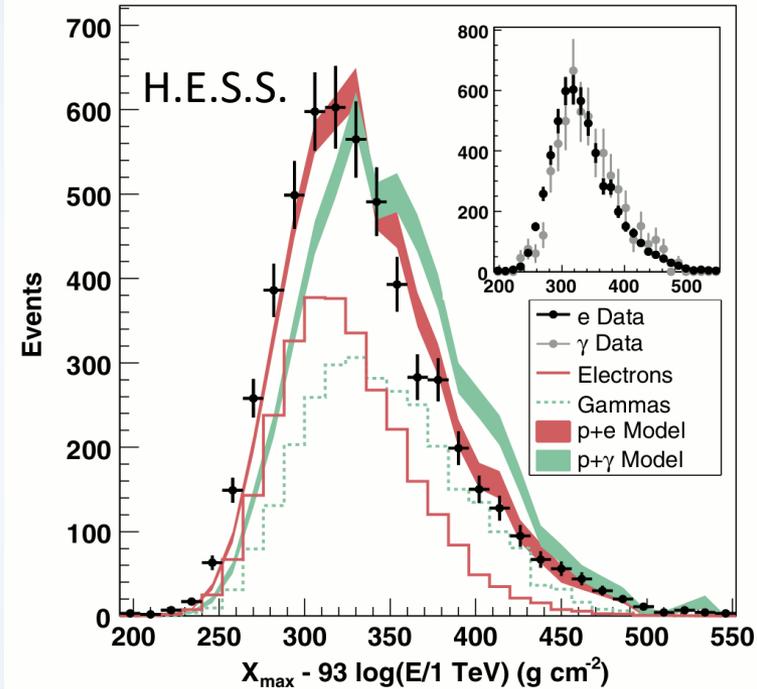
他粒子の混入の可能性：ガンマ線

イメージ形状の規格化パラメータ分布
(電子とガンマ線, 1-5 TeV)



Preliminary

Aharonian et al., 2008



- 初段反応の違いにより電子とガンマ線では最大発達高度がわずかに異なり、電子の方が小さいXMAX分布を持つ。

→ガンマ線の混入率の見積もりに利用することが可能

まとめと今後

- CTAの南半球サイトのbaseline array (LST4台, MST25台, SST70台)に対して、 $E > 1$ TeVに特化して電子・陽子 (ハドロン相互作用モデル2種) のシミュレーションイベントを生成した。
- 電子成分と陽子成分の分離に多変量解析(BDT)を導入した。BDT値のラフなカットで電子様成分を抽出した場合の予測イベント数を推定した。
- 電子成分の測定では、陽子・ガンマ線の混入率推定の精度を上げることが非常に重要であり、測定精度は統計よりも系統誤差が大きい。ハドロン相互作用モデルの不定性の影響も無視できない要素である。
- 今後は、陽子データのイベント統計を改善して陽子混入率の推定精度を上げた状態でBDTのカットの最適化を行い、予測イベント数の再評価を行う。BDT以前の特徴抽出についてもtemplate likelihood解析の導入などの改善を試みる。