

CALETの電子・陽子解析による 太陽変調の観測

高 柚季乃，加藤千尋，宗像一起，浅岡陽一^A，鳥居祥二^B，
赤池陽水^B，小林兼好^B，片岡龍峰^C，三宅晶子^D，
中平聡志^E，笠原克昌^F，他 CALET チーム
信州大理，東大宇宙線研^A，早大理工総研^B，
極地研^C，茨城高専^D，宇宙航空研究開発機構^E，芝浦工大^F

目次

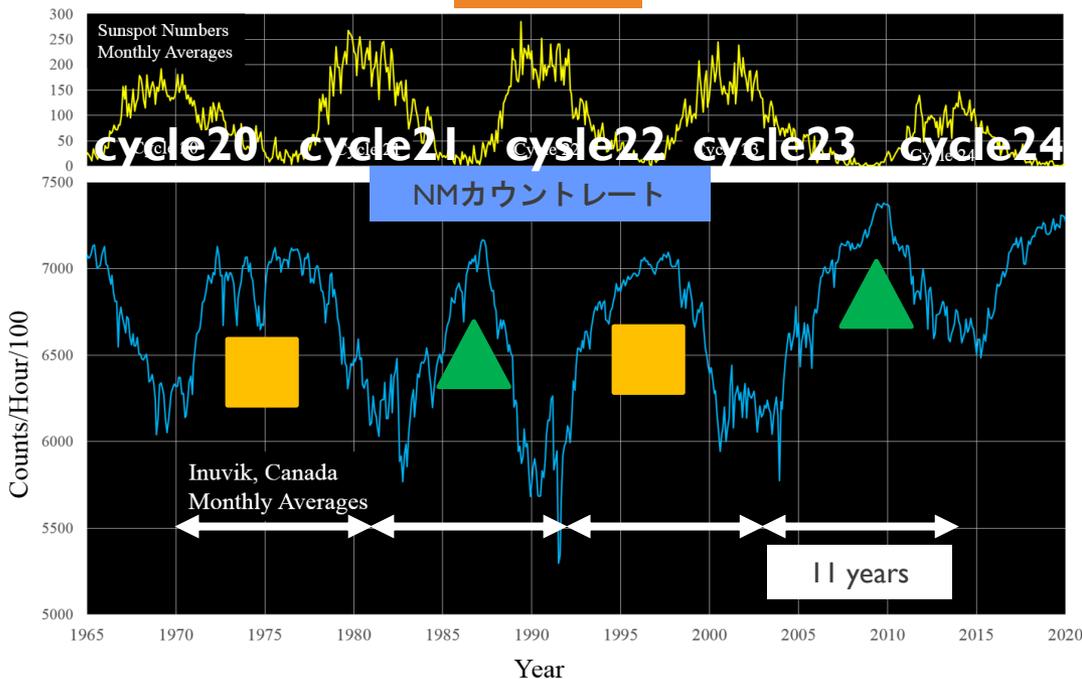
- 研究概要・目的
- 太陽活動の周期的変動
- 低エネルギー電子・陽子解析手法
- 結果
 - 電子・陽子カウントレート変動率の時間変動
 - Oulu中性子モニターとの比較
 - 電子計数率と陽子カウントレート変動率の比較
- まとめ・今後の課題

研究概要・目的

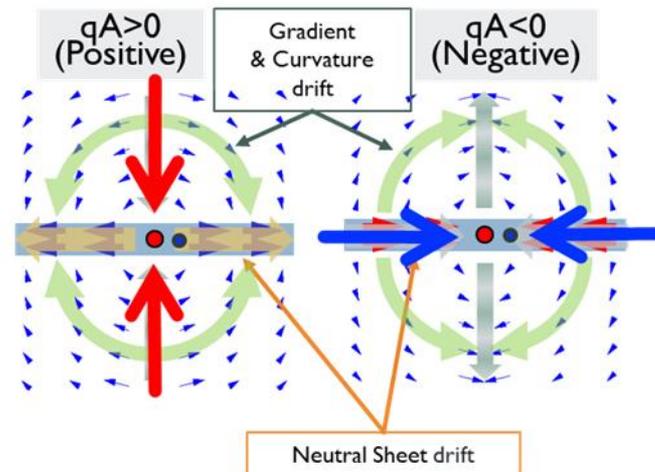
- ISSに搭載された宇宙線検出器CALETのデータを用いて
太陽活動の11年周期変動に相関する銀河宇宙線の強度変動の荷電依存性を調べる
太陽変調
- 低エネルギー電子・陽子を効率的に取得するために複数段階のイベント選別を行う
- モンテカルロシミュレーションによって最適化した選別条件を適用し
低エネルギー電子・陽子の解析を行い、電子・陽子のカウントレートを算出する
- 電子の強度変動と陽子の強度変動を比較し太陽変調における
荷電粒子のドリフト効果を検証する

太陽活動の周期的変動

太陽黒点数



荷電粒子のドリフト効果



太陽活動の22年周期変動

太陽風磁場極性の違いによりおこる荷電粒子のフラックスの変化

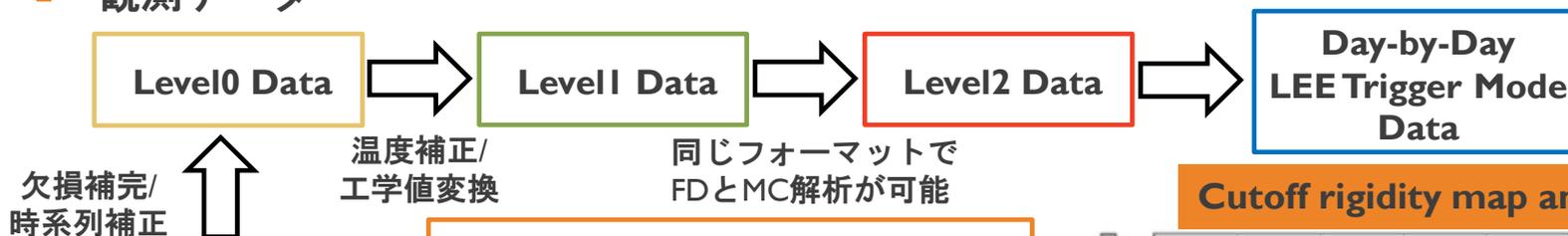
2020年頃 : 太陽風磁場極性は**正**
太陽活動が**最も穏やか**

Bartol Research Instituteによる太陽黒点数とNMカウントレートの長期的時間変化

カレントシートに沿って到来する電子は太陽圏内を伝播しやすくなり
急激に宇宙線量が増えピークが鋭くとがった形で観測される
極方向からやってくる陽子は太陽活動が穏やかであっても
急な変化は訪れずピークが比較的なめらかな平らな形となって観測される

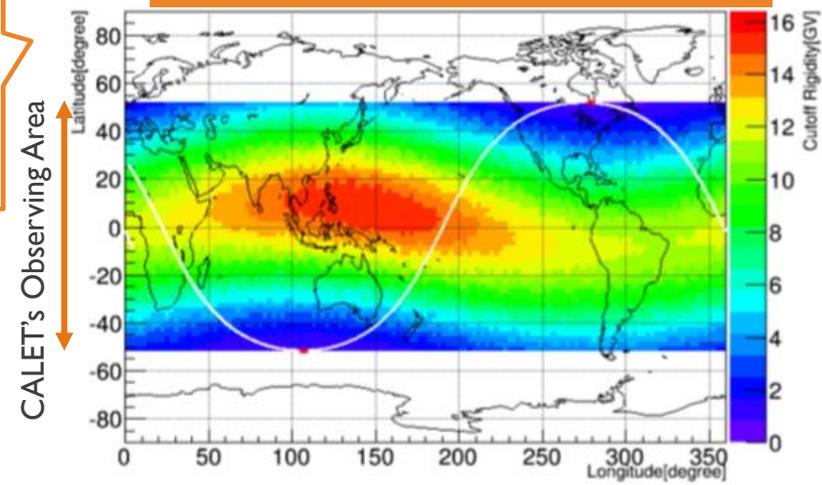
低エネルギー電子・陽子解析手法

観測データ



LEE Trigger Mode
 1周期あたり2度Cutoff Rigidityの最も低い領域を通過したときに各90秒間実施される

Cutoff rigidity map and ISS orbit



モンテカルロシミュレーションデータ

観測エネルギーから入射粒子のエネルギーを再構成し算出する過程や

電子・陽子選別条件の最適化を行うために使用

シミュレーションコード : EPICS ver. 9.22, COSMOS ver. 8.00

相互作用モデル : DPMJET-III

低エネルギー陽子・電子解析手法

バックグラウンドがある程度あっても計数率の時間変化がみられるような必要最低限のイベント選別条件を要請する解析手法を用いる

Offline Trigger : 検出器の閾値に相当するエネルギー損失量を持つイベント

Track Reconstruction : ハドロンシャワーを想定して考案された

Kalman Filter (KF) 法を用いた飛跡再構成ができたイベント

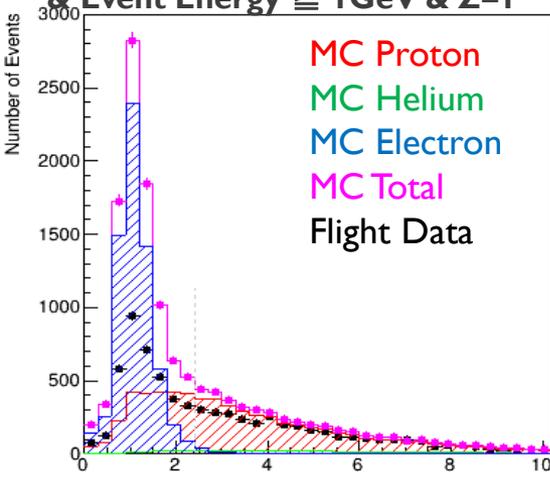
Geometry Cut : 検出器の横から入射する粒子を除外

Event Energy Cut : 観測エネルギーの閾値以上のイベント

CHD Energy Deposit Cut : ヘリウム以上の重粒子を除外

example : 20/04/30

Offline Trigger & Geometry=A
& Event Energy \geq 1GeV & Z=1



R_E Cut : TASC最上層の粒子シャワーの横拡がりにより電子・陽子の識別を行う

MC粒子のイベント数(/s)をLive Time倍してFDと比較した R_E 値分布

$$R_E = \sqrt{\frac{\sum_i \Delta E_i X_i^2}{\sum_i \Delta E_i}}$$

ΔE_i : TASC-XIの*i*列目のPWOの損失エネルギー
 X_i : 再構成された飛跡とPWOとの距離

電子の検出効率をなるべく高くして
陽子の混入を抑える選別条件を追加

IMC Energy Deposit Cut

: IMC最下層でのエネルギーデポジットの閾値以上のイベント

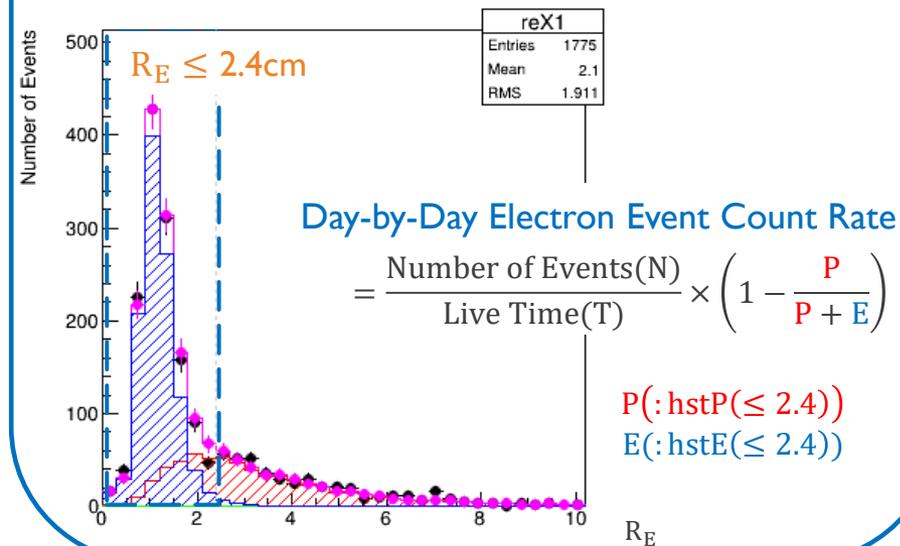
IMC Shower Concentration Cut

: IMC最下層でのシャワー集中度の閾値以上のイベント

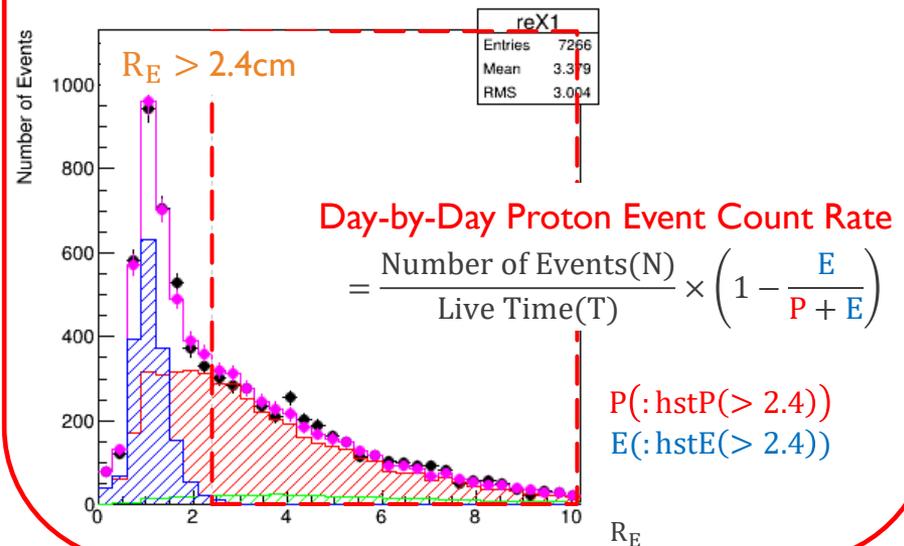
低エネルギー電子・陽子解析手法

MC と Flight Data が合うようにスケーリングした R_E 値分布

example : 20/04/30
 Offline Trigger & Geometry=A
 & Event Energy \geq 1GeV
 & Z=1 & IMC Energy Deposit \geq 3MIP
 & $0.5 \leq$ IMC Shower Concentration \leq 0.98



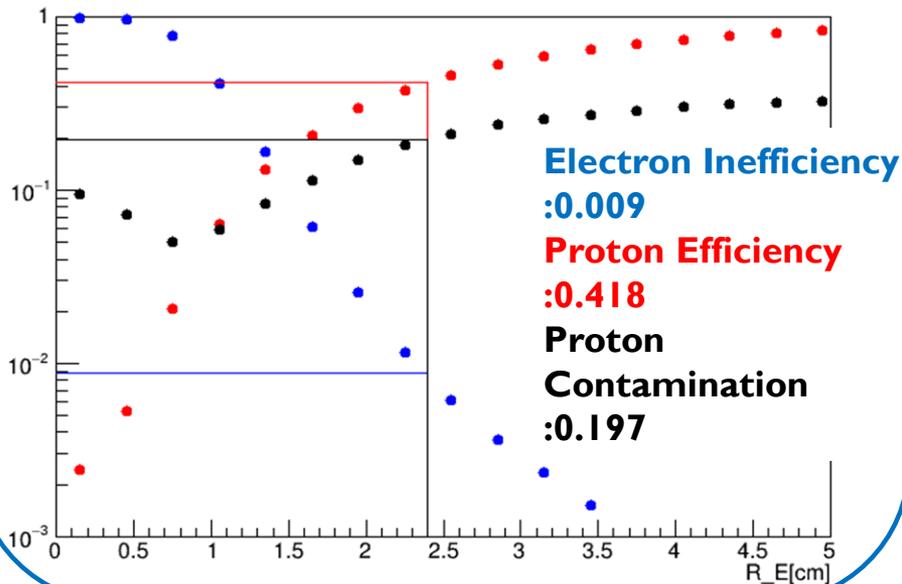
example : 20/04/30
 Offline Trigger & Geometry=A
 & Event Energy \geq 1GeV & Z=1



低エネルギー電子・陽子解析手法

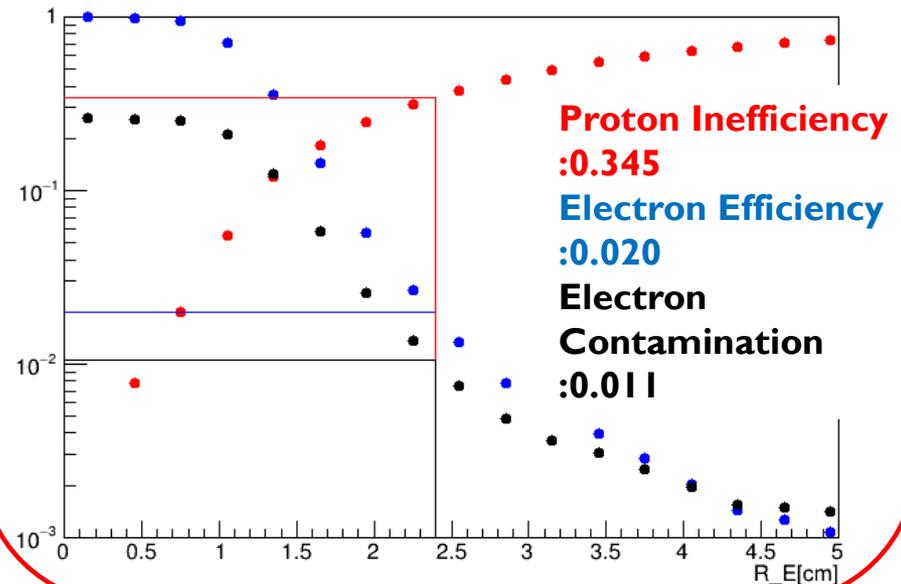
Re Cut =2.4 の 電子検出効率と陽子混入率

example : 20/04/30
Offline Trigger & Geometry=A
& Event Energy ≥ 1 GeV
& Z=1 & IMC Energy Deposit ≥ 3 MIP
& $0.5 \leq$ IMC Shower Concentration ≤ 0.98



Re Cut =2.4 の 陽子検出効率と電子混入率

example : 20/04/30
Offline Trigger & Geometry=A
& Event Energy ≥ 1 GeV & Z=1



結果 - 電子・陽子カウントレート変動率

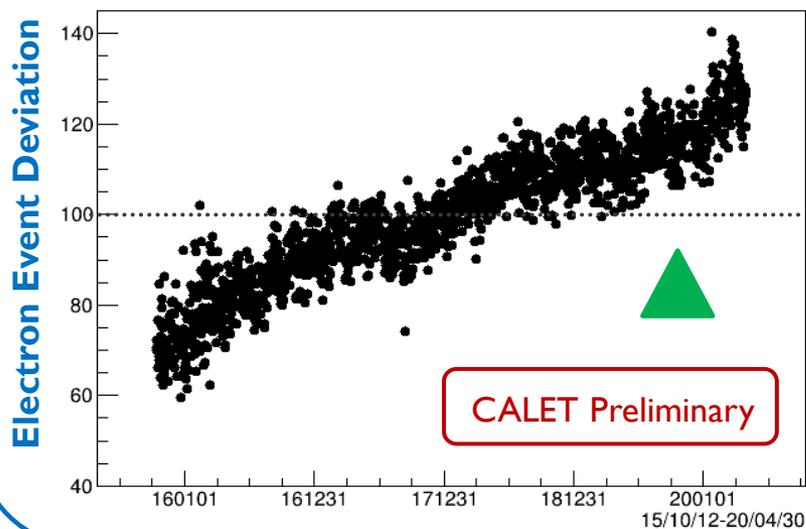
Deviation[%] for Periodic Average

15/10/13-20/04/30

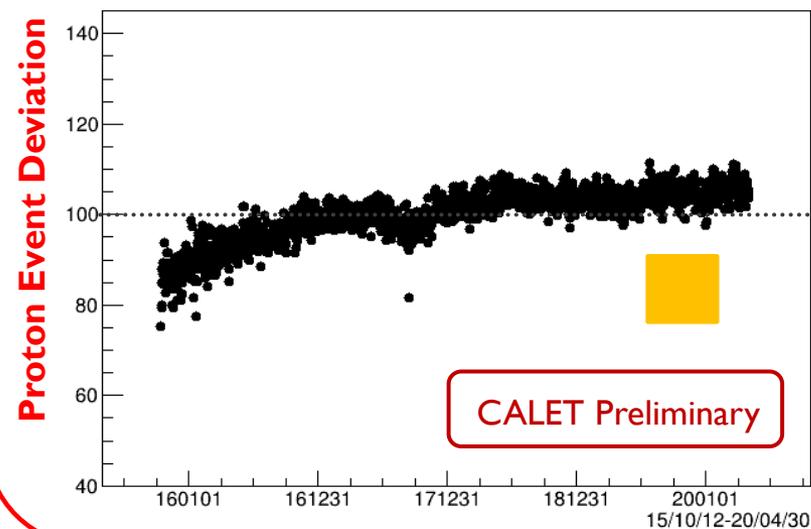
Offline Trigger & Geometry=A
& Event Energy ≥ 1 GeV
& Z=1 & IMC Energy Deposit ≥ 3 MIP
& $0.5 \leq$ IMC Shower Concentration ≤ 0.98

Offline Trigger & Geometry=A
& Event Energy ≥ 1 GeV & Z=1

Electron Event Deviation



Proton Event Deviation



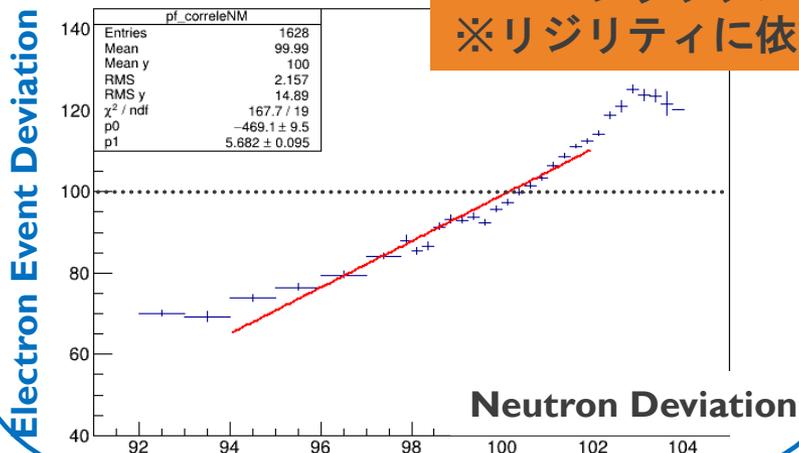
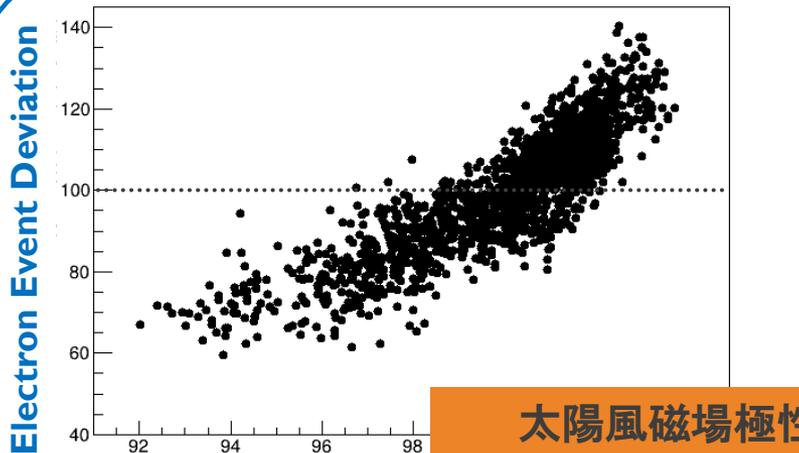
カウントレート変動率のシャープなピークの形

カウントレート変動率のフラットなピークの形

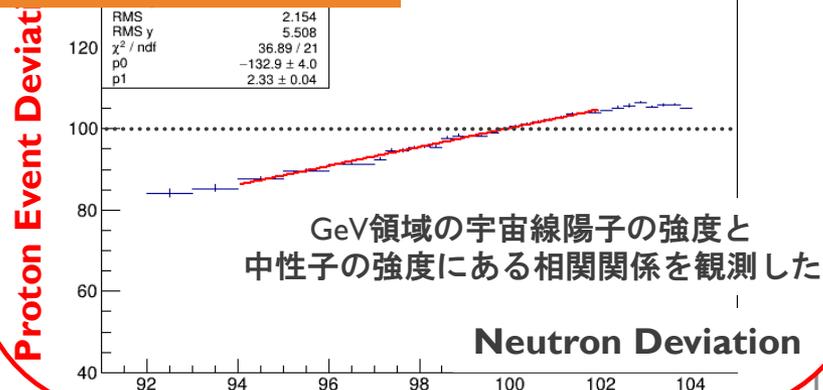
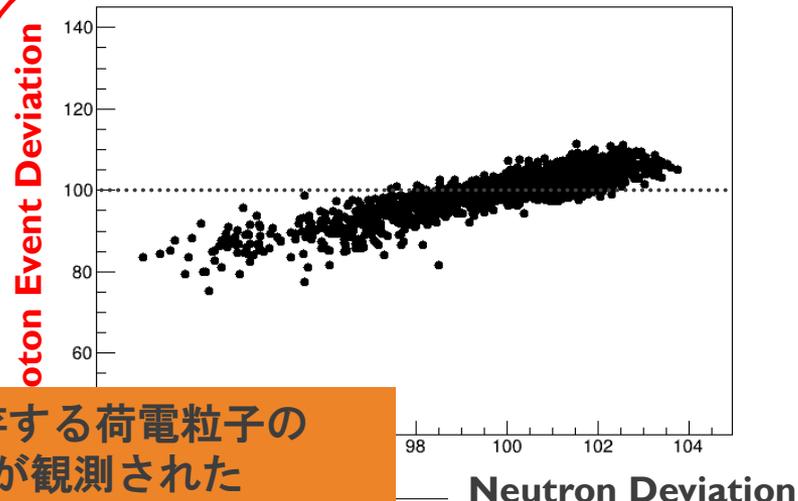
太陽風磁場極性に依存する荷電粒子のフラックスの違いが観測された

結果 – OULU中性子モニターとの比較

corr-Electron Event Deviation vs Neutron Deviation



Proton Event Deviation vs Neutron Deviation

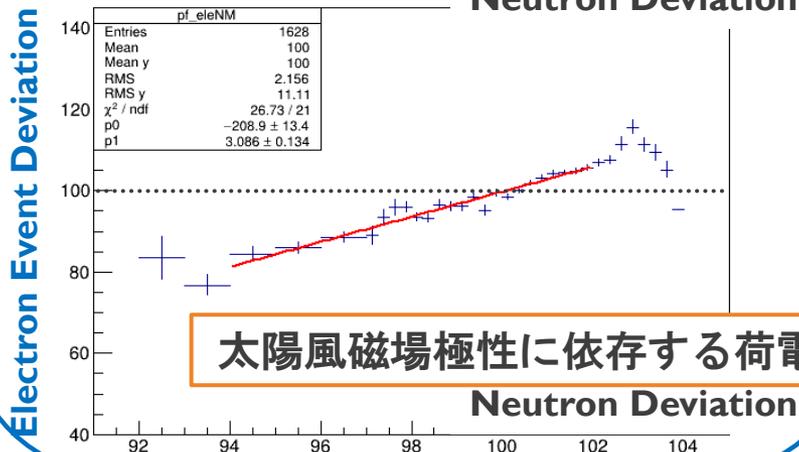
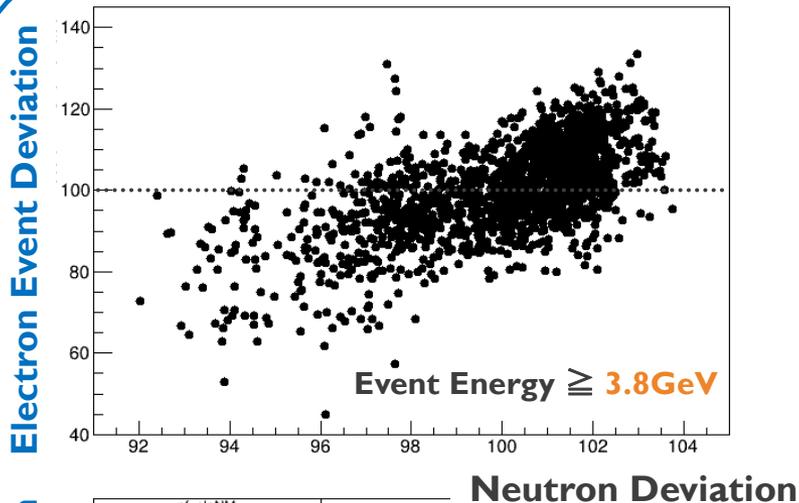


太陽風磁場極性に依存する荷電粒子の
フラックスの違いが観測された
※リジリティに依存する違いも含まれている

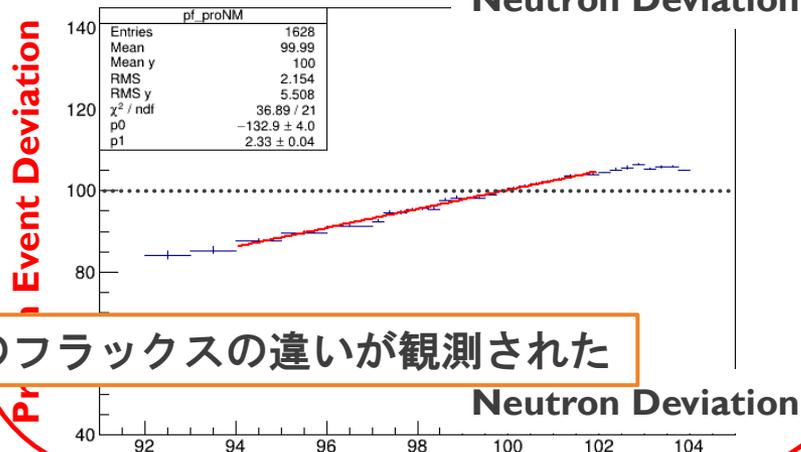
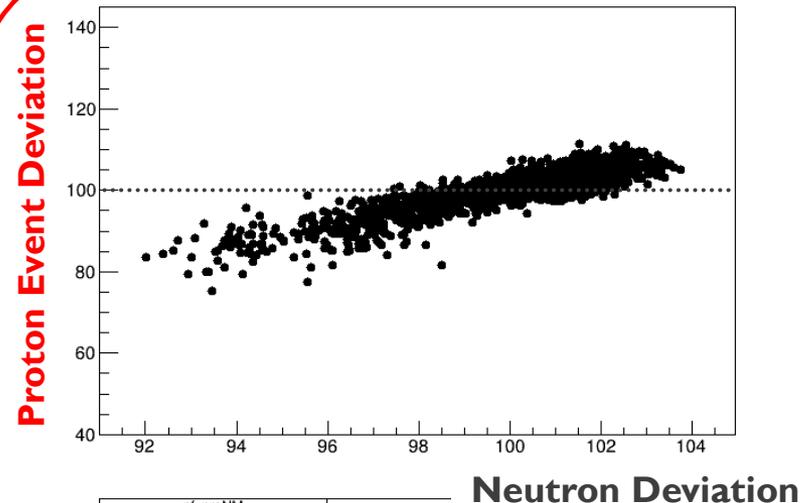
電子と陽子の平均レジリティを9.23GVに揃えた

結果 – OULU中性子モニターとの比較

Electron Event Deviation vs Neutron Deviation



Proton Event Deviation vs Neutron Deviation

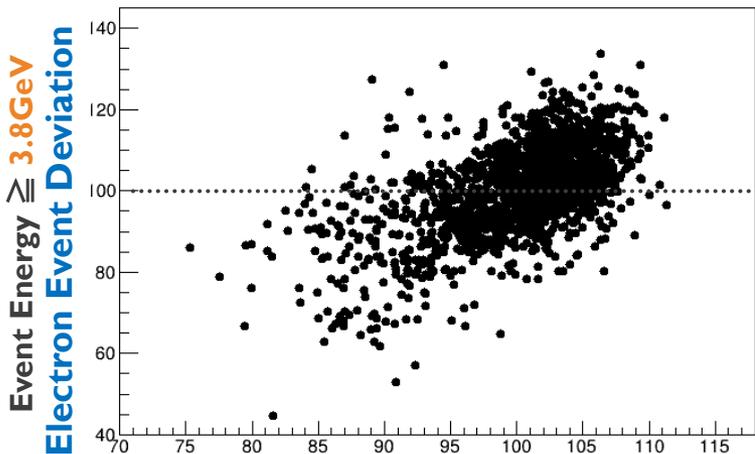


太陽風磁場極性に依存する荷電粒子のフラックスの違いが観測された

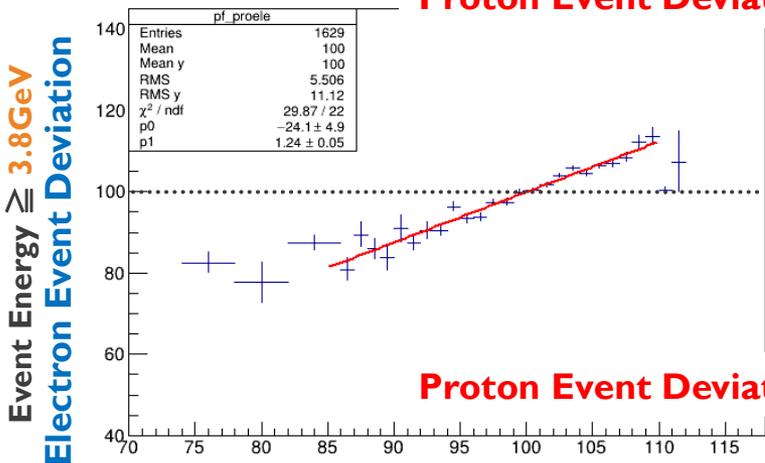
電子と陽子の平均リジリティを9.23GVに揃えた

結果 – 電子・陽子カウントレートの比較

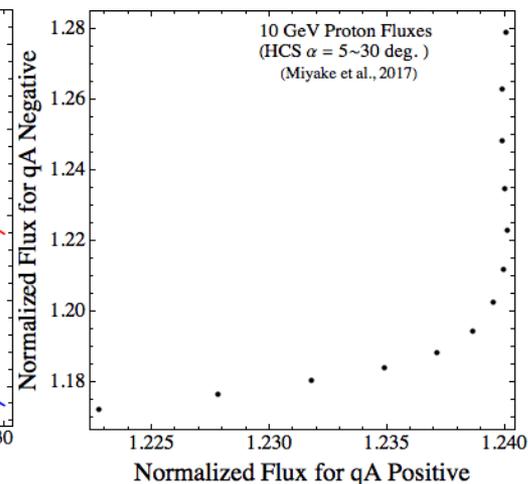
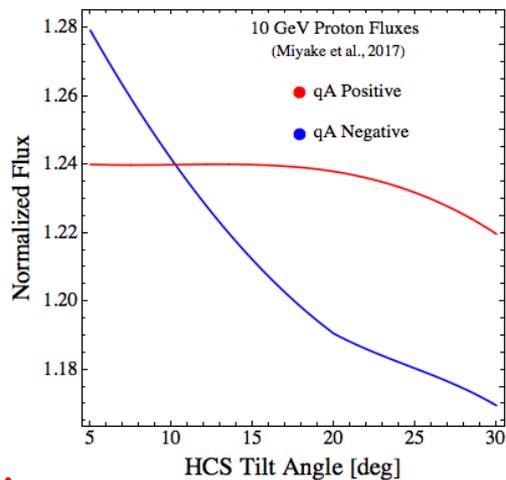
Proton Event Deviation vs Electron Event Deviation



Proton Event Deviation



Proton Event Deviation



ドリフトモデル
Miyake et al.(Space Weather, 2017)

太陽風磁場極性：正
電子のシャープな時間変化
陽子のフラットな時間変化

↓
Solar Minimum期間中のGCRフラックスの
典型的な特徴が観測された

まとめ・今後の課題

まとめ

- モンテカルロシミュレーションによって最適化した選別条件
→ GeV領域の電子・陽子を効率よく取得することができた
- 電子のカウントレートと陽子のカウントレートの比較
→ CALET検出器で太陽風磁場極性に依存する荷電粒子のドリフト効果を示唆する変動の違いを観測した

今後の課題

- ドリフトモデルとの比較により定量的な太陽変調の荷電依存性の理解を図る