



軌道上におけるCALETのエネルギー較正手法の開発

赤池陽水¹, 寺澤敏夫¹, 鳥居祥二^{2,3}, 笠原克昌², 小澤俊介³, 浅岡陽一², 仁井田多絵³, 田村忠久⁴, 清水雄輝⁵, 他CALETチーム
東大宇宙線研¹, 早大理工研², 早大先進理工³, 神奈川大工⁴, JAXA/SEUCE⁵

CALET (CALorimetric Electron Telescope) は、国際宇宙ステーションに搭載予定の高エネルギー宇宙線観測装置であり、1 GeVから20 TeVの電子、4 GeVから10 TeVのガンマ線、数10 GeVから1000 TeVの陽子、原子核成分について、長期間の直接観測を実施する。CALETの主検出器は、高エネルギーの電子成分に最適化した30放射長の物質量を持つ解像型のカロリメータで、高いエネルギー分解能と強力な粒子識別性能を有する。CALETが軌道上でこの高い観測性能を発揮、維持するためには、定期的なエネルギー較正の実施が不可欠であり、軌道上における装置の健全性確認、及び詳細なエネルギー較正は、陽子やヘリウムの最小電離損失粒子による1粒子通過相当の信号応答を用いる。これまでに加速器ビーム実験で、ミュオンの最小電離損失粒子を利用したエネルギー較正手法の有効性を実証しており、同様の手法により装置較正を実施する。本発表では、この加速器ビーム実験におけるエネルギー較正手法について紹介すると共に、地磁気や大気による2次粒子の影響を考慮したシミュレーション計算を基に、軌道上における最小電離損失粒子のイベント取得方法、イベント取得レート、及び最小電離損失粒子のイベント選別方法について報告する。

CALET: CALorimetric Electron Telescope

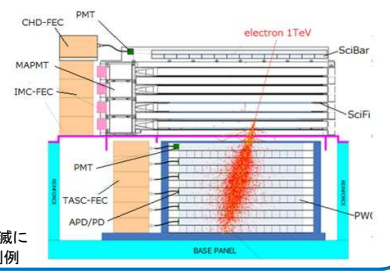
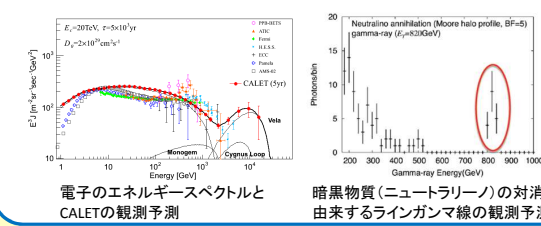
- 国際宇宙ステーション「きぼう」に搭載
- 2015年打ち上げ予定
- 観測期間: 2年 (5年目標)

CALET検出器の特徴

30放射長の物質量をもつ解像型のカロリメータ

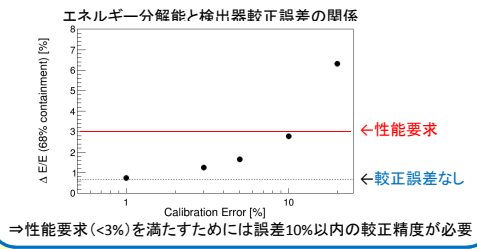
- 高エネルギー分解能
 - ~2% (>100 GeV)
 - 強力な粒子識別性能
 - 陽子除去性能 ~10⁵@ TeV
- ⇒ TeV領域の高精度な電子・ガンマ線観測が可能

観測目的	観測対象
宇宙線近傍加速源の同定	TeV領域における電子エネルギースペクトル
暗黒物質の探索	電子・ガンマ線の100 GeV-10 TeV領域におけるスペクトルの異常
宇宙線の起源と加速機構の解明	電子(1 GeV ~ 20 TeV)及び陽子・原子核(数10 GeV ~ 1000 TeV)の精密なエネルギースペクトル、超重核のフラックス(cutoff-rigidity以上)
宇宙線銀河内伝播過程の解明	二次核/一次核(B/C)比のエネルギー依存性
太陽風圏の研究	低エネルギー(<10GeV)電子フラックスの長・短期変動
ガンマ線バーストの研究	7 keV ~ 20 MeV領域でのX線・ガンマ線のバースト現象



最小電離粒子による検出器較正

各検出器からの信号は、最小電離損失粒子(MIP)によるシグナルを基準として絶対値を較正する。最小電離損失とは、相対論的速度を持つ荷電粒子の電離損失によるエネルギー損失量である(厳密にはその最小値)



加速器ビーム実験における検出器較正と観測性能検証

CERN-SPS加速器で電子・陽子の照射実験を実施

●ビーム種類

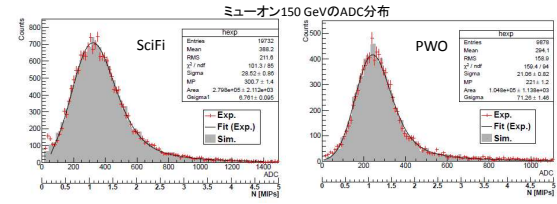
- ミュオン: 150, 180 GeV/c
- 電子: 10 ~ 290 GeV/c
- 陽子: 30 ~ 400 GeV/c

■ミュオンによるエネルギー較正

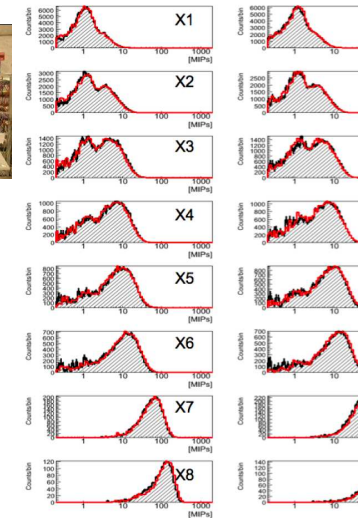
ミュオンの最小電離損失粒子を利用して、検出器の各ADC値を粒子数に換算

- ADC分布は、Landau関数にGauss関数を畳み込んだ関数でフィッティングし、Landau関数成分の最頻値を1粒子通過相当のエネルギー損失として定義

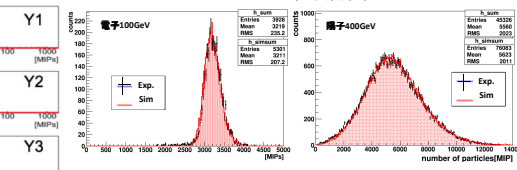
- シミュレーション(EPICs)で得られるエネルギー損失も同様に粒子数に換算し、実験データで得られているGauss成分をシミュレーションデータに組み入れて電子・陽子のシャワー粒子と比較・検証



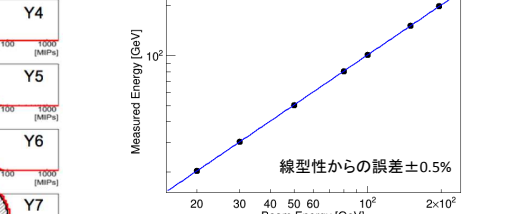
IMCの粒子数分布 (電子100 GeV)



TASCの粒子数分布



●ビームエネルギーと観測エネルギーの相関



ミュオン信号を基に粒子数換算で、以下を確認

- 200 GeVまでの線型性を±0.5%で保持
- MCが電子・陽子のシャワー粒子の観測応答を再現

ISS軌道上における検出器較正のシミュレーション

■宇宙線を利用した検出器較正

- 宇宙線中の陽子やヘリウムの最小電離損失粒子を利用して検出器較正を実施
- 検出器較正に必要なデータ収集時間と較正精度を見積もるため、ISS(高度400 km)における宇宙線の検出頻度をシミュレーション計算を利用して推定
- 検出器較正に適したイベントの選別手法を開発

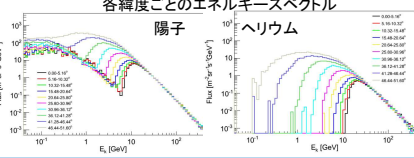
●軌道上における宇宙線フラックスの推定

- 銀河宇宙線: AMS-01 (J. Alcaraz et al. 2000)

$$p: \frac{dJ_p}{dR} = 17.1 \times 10^{-3} E^{-2.78}$$

$$\text{He: } \frac{dJ_{\text{He}}}{dR} = 2.52 \times 10^{-3} E^{-2.74}$$
- 太陽変動: Force-Field近似 ($\phi = 0.6 \text{ GV}$)

$$J(E) = \frac{E^2 - m^2}{(E + z\phi)^2 - m^2} J_{\text{IS}}(E + z\phi)$$
- 地磁気の影響: ATMNC3
 - 大気モデル: US-standard
 - 磁場モデル: IGRF2010



●検出器シミュレーション

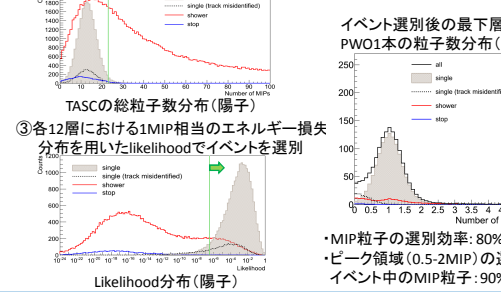
検出器中の宇宙線の相互作用を計算し、最小電離損失や粒子シャワーによる検出器個々の信号応答を再現

- シミュレーション: EPICs
- ハドロン相互作用モデル: DPMJET-III

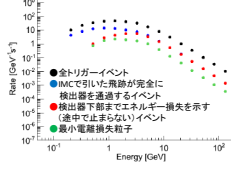
●最小電離損失粒子の選別

トリガーされるデータ中には、シャワー粒子を含むため、オフライン解析で検出器較正に適したイベント(最小電離損失粒子: MIP)を選別

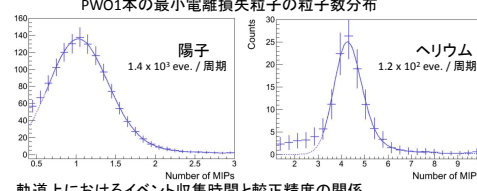
- IMCで飛跡を再構成し、検出器を完全に通過するイベントを選別
- TASCの総粒子数を基に、イベントを選別 (陽子: $N_{\text{TASC}} < 23 \text{ MIP}$)



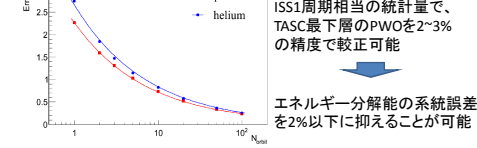
高緯度における検出頻度



ISS軌道1周期分(約90分)の観測時間に対するPWO1本の最小電離損失粒子の粒子数分布



軌道上におけるイベント収集時間と較正精度の関係



まとめ

- CALETでは、軌道上で収集する陽子やヘリウムを利用して、検出器のエネルギー較正を行う
- エネルギー分解能の要求性能(<3%)を満たす較正精度(~数%)を1周期の統計量で達成可能である
- 陽子・ヘリウムによるエネルギー較正を用いた効率的な運用計画を作成中である