

CALET:シミュレーションによる検出器性能評価

赤池陽水、笠原克昌、鳥居祥二、小澤俊介、清水雄輝、荻部幹彦、Simone Bonechi(早大理工研)、吉田健二(芝浦工大)、田村忠久(神奈川大)、片寄祐作(横浜国大)、他JEM-CALETチーム

Calorimetric Electron Telescope (CALET) は、国際宇宙ステーション(ISS)の船外プラットフォームに搭載予定の宇宙線観測装置で、高エネルギーの電子、ガンマ線、陽子・原子核成分の直接観測を実施する。高エネルギー電子成分の観測から期待される電子加速源や暗黒物質の探索を実現するためには、検出器に優れたエネルギー分解能や強力な粒子識別能力が必須であり、CALETはこれらの性能を備える最適な検出器として開発されている。これまでに、装置性能の最適化、及び性能評価を目的としてシミュレーション計算を実施しており、CALETが高エネルギーの電子観測に必要な性能を持つことを確認している。本発表では、シミュレーション計算からこれまでに得られているCALETの観測性能について報告するほか、CALETが使用する機上のトリガー条件やISS軌道上におけるトリガーレートの予測値について報告する。

CALET (Calorimetric Electron Telescope)

■ CALET計画は、国際宇宙ステーションに検出器を搭載し、高エネルギー宇宙線を観測することにより、宇宙における高エネルギー現象の解明を目指している

観測対象・目的

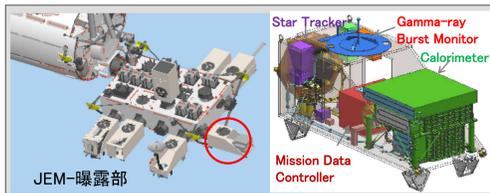
電子: 1GeV ~ 10TeV
加速・伝播機構、暗黒物質、太陽磁気圏

ガンマ線: 10GeV~10TeV
暗黒物質、γ線点源(SNR, Pulsar, AGN, etc.)
銀河内外拡散成分、γ線バースト

陽子・原子核: 数10GeV ~ 1000TeV
加速機構、銀河内伝播機構

観測概要

観測場所: ISS-JEM曝露部
観測期間: 5年
打ち上げ予定: 2013年



検出器

CHD: Charge Detector 電荷測定

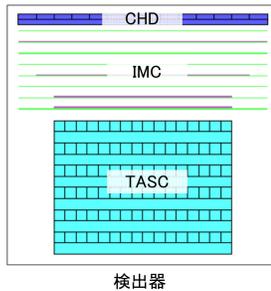
- Plastic Scintillator (32mm × 10mm × 448mm) × 14本 × 2層(X,Y)

IMC: Imaging Calorimeter 粒子の飛跡検出、エネルギー測定

- Scintillating Fiber (1mm × 1mm × 448mm) × 448本 × (X,Y) × 8層
- W plate 0.2X₀ × 5枚 + 1X₀ × 2枚 (計3X₀)

TASC: Total Absorption Calorimeter 粒子識別、エネルギー測定

- PWO (20mm × 20mm × 320mm) × 16本 × 12層 (計27X₀)



イベントトリガー

■ トリガーに用いる検出器
- IMC2層ずつのシグナルの和
- TASC1層目のシグナルの和

■ 機上におけるトリガー条件

- **High Energy Shower Trigger (HE)**
10GeV以上の粒子を対象にしたトリガー条件
CALETでは、主にこのトリガーを使用
- **Low Energy Shower Trigger (LE)**
1GeV以上の電子を対象にしたトリガー条件
地磁気の影響が小さい(<2GV)極域の観測で使用
- **Single Event Trigger (Single)**
1粒子以上を観測するトリガー条件
CALETの検出性能を確認するために使用

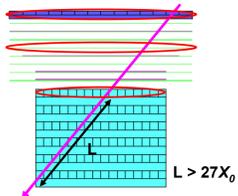
各トリガーの閾値 [粒子数/MIPs]					
	IMC-1,2	IMC-3,4	IMC-5,6	IMC-7,8	TASC1
HE	—	—	—	> 7.5	> 52
LE	> 1	> 1	> 1	> 2.5	> 7
Single	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1

観測性能

イベント選択条件

正確な粒子識別、エネルギー決定のため、シャワー軸が以下の条件を満たすイベントを選択

- ① CHDを通過 (原子核成分のみ)
- ② IMC4層以上を通過
- ③ TASC最上層を通過
- ④ TASC中の通過距離が 27X₀(垂直方向の厚さ)以上



電子・ガンマ線に対する観測性能

幾何学的因子

検出器はシンプルな構造

閾値以上で検出効率は一定

(電子) 1200cm²sr
(ガンマ線) 1000cm²sr
これまでの観測の外挿から5年間の観測でTeV領域の電子を約1000例取得見込み

天頂角分布

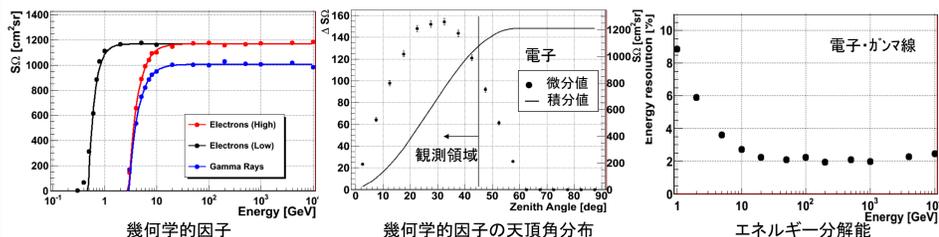
装置形状が立方体に近い構造

天頂角45度以内の視野で観測が可能

エネルギー分解能

CALETは厚いカロリメータ(30X₀)のため、電子やγ線はTeV領域までほぼ全吸収

数10GeV以上で優れた分解能 約2%
10GeV以上の分解能は電子・ガンマ線と同じ
特に数100GeVのエネルギー分解能は近傍加速源の探索に重要(参照:P3-012)



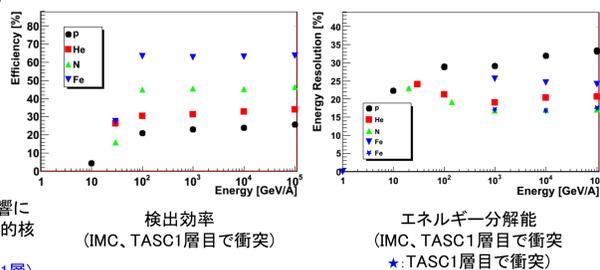
陽子・原子核成分に対する観測性能

検出効率

陽子・原子核は、シャワーエネルギーによるトリガーでは入射エネルギーとの対応が悪くなるが、検出効率は、100GeV以上で一定になる
p:20% He:30% N:45% Fe:65%
重粒子ほど衝突断面積が大きくなり、検出効率は増大

エネルギー分解能

重粒子ほど分解能は高くなる
p:30% He:20% N:17%
Feのような重い原子核は、標的核の影響によりエネルギー分解能が悪くなるが、標的核を分類することにより分解能が向上
Fe:25%(IMC+TASC1層) ⇒ 17%(TASC1層)



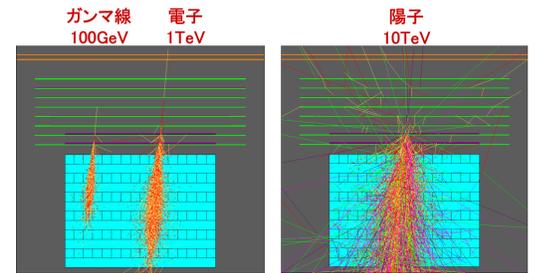
検出器シミュレーション

■ 宇宙線が検出器中で生成するシャワー現象を再現し、検出性能を評価する

シミュレーションコード

検出器シミュレーション: EPICS
核相互作用モデル: DPMJET3

シミュレーション計算の精度は加速器のビームテストによりキャリブレーションを行う

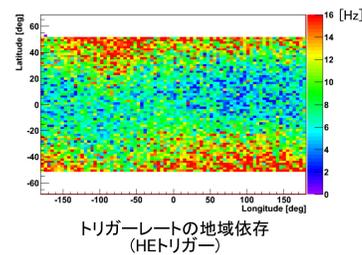


トリガーレート

■ 地磁気によるRigidity-Cutの効果や大気中で生成される二次粒子を考慮し、ISS軌道上で予測されるトリガーレートを見積もる

トリガーレートの平均値

HE: 11.4Hz (ISS1周の平均)
LE: 108Hz (極域 5分間の平均)



計算手順

1. ISS高度に到来する一次宇宙線Flux
これまでに得られた一次宇宙線のデータに基づき、ISSの高度(400km)に到達する一次宇宙線を推定
- 宇宙線の伝播: COSMOS, ATMNC3
- 磁場モデル: IGRF2005
2. ISS軌道に飛来する二次宇宙線Flux
一次宇宙線が大気や磁場との相互作用で生成する二次粒子のISS軌道上でのフラックスを計算
- 大気モデル: US-Standard
3. CALETの検出効率
各粒子に対する検出器応答の計算から検出効率を見積もり、トリガーレートを推定
- 検出器シミュレーション: EPICS
- 核相互作用モデル: DPMJET3

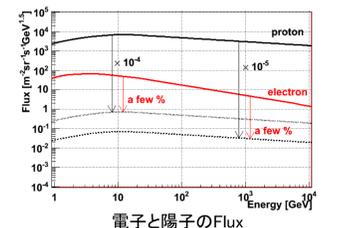
粒子識別性能 ~ 陽子除去能 ~

■ 高精度な電子観測には強力な陽子除去性能が必須

電子・陽子の存在比予測

e : p = 1 : 100 @10GeV
e : p = 1 : 1000 @1TeV

高エネルギーほどe/p比は小さくなり、TeV領域では、約10⁵の陽子除去能力が必要



識別方法

TASC中におけるシャワー発達の違いを利用して識別

Energy Weighted Spread R_E

核相互作用による陽子のシャワーは、二次粒子がつくるシャワーのために、電子のシャワーより広がる
⇒ TASC各層のシャワーの拡がりに差

Energy Fraction F_E

電子のシャワーは検出器中でほぼ全吸収するのに対し、陽子のシャワーは4割程度のエネルギー損失
⇒ 検出器下層のエネルギー損失に差

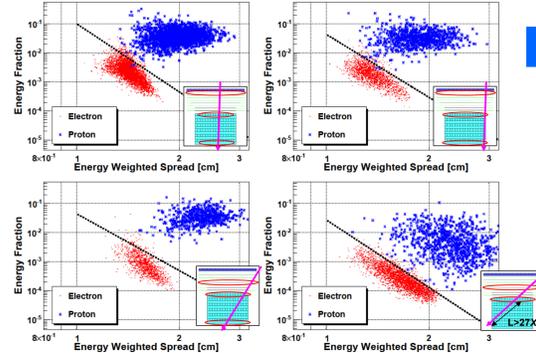
$$R_E = \sqrt{\frac{\sum_i (\Delta E_{layer_i} \times R_i^2)}{\sum_i \Delta E_{layer_i}}}$$

$$F_E = \frac{\Delta E_{layer_{12}}}{\sum_i \Delta E_{layer_i}} \left(R_i = \sqrt{\frac{\sum_j (\Delta E_{PWO_j} \times (x_j - x_c)^2)}{\sum_j \Delta E_{PWO_j}}} \right)$$

x_c : シャワー中心座標
 ΔE_{PWO_j} : j番目のPWOのエネルギー損失
 ΔE_{layer_i} : i層目のPWO層のエネルギー損失

R_EとF_Eの相関図

(シャワー軸の幾何条件により分類することで、識別性能が向上する)



TeV領域の陽子除去性能

電子: 1TeV
陽子: 1~1000TeV (E^{-2.7}dE)
生成イベント数: 1.6x10⁶

電子の検出効率95%
残存陽子数: 4 events
⇒ 2.0 x 10⁵ (90% C.L.)

まとめ

■ シミュレーション計算によりCALETの基本観測性能

- 幾何学的因子 (電子) 1200cm²sr、(γ線) 1000cm²sr
- エネルギー分解能: 約2% > 数10GeV
- 陽子除去性能: 2.0 x 10⁵ @ TeV
- トリガーレート: 11.4Hz (HEトリガー: 一周平均)、108Hz (LEトリガー: 極域5分間の平均)
- シミュレーション計算の精度はビームテストにより検証