

基于暗物质粒子探测卫星实验 测量宇宙线质子能谱

DAMPE Collaboration

陈沛东SA22004005

2023/06/27

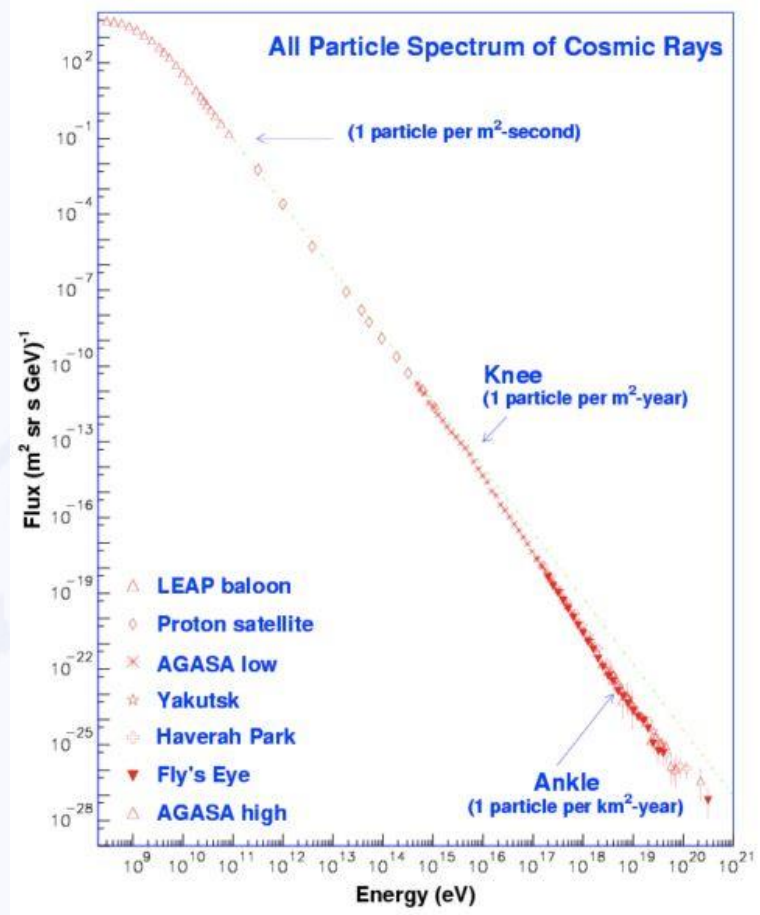
目录

- 背景介绍
- 数据分析

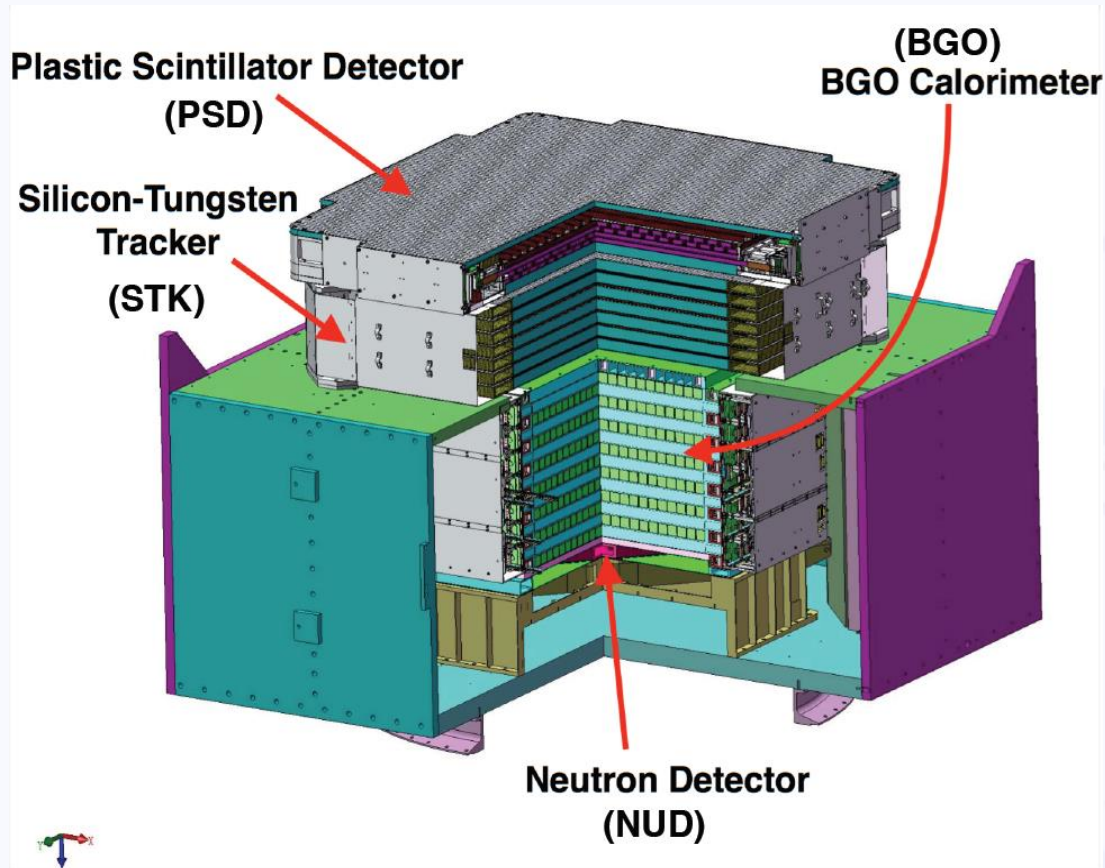


宇宙线

- 1912年，Victor Francis Hess发现了宇宙线，右图是宇宙线全粒子谱；
- 目前仍然对宇宙线的起源、加速和传播机制了解很少；
- 质子是宇宙线中丰度最高的粒子，约占90%，是研究宇宙线物理很好的探针。



DARK MATTER PARTICLE EXPLORER(DAMPE)



电荷测量(PSD+STK) 径迹测量(STK+BGO)
能量测量(BGO) e/p鉴别(BGO+NUD)

目录

- 背景介绍
- 数据分析



质子能谱计算

$$F(E_i, E_i + \Delta E_i) = \frac{N_{inc,i}}{\Delta E_i A_{eff,i} T_{exp}}$$

- $F(E_i, E_i + \Delta E_i)$: 宇宙线质子通量
- $N_{inc,i}$: 原初能量在 $E_i \sim E_i + \Delta E_i$ 的质子数
- $A_{eff,i}$: 有效接收度
- T_{exp} : 有效曝光时间

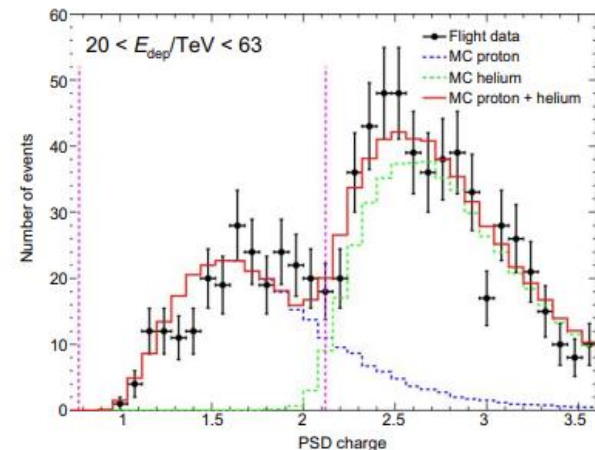
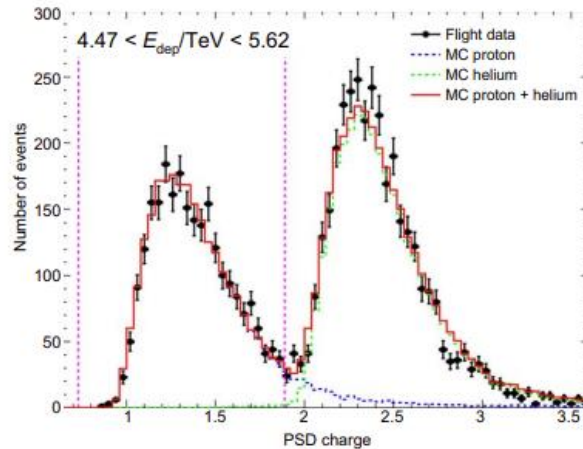
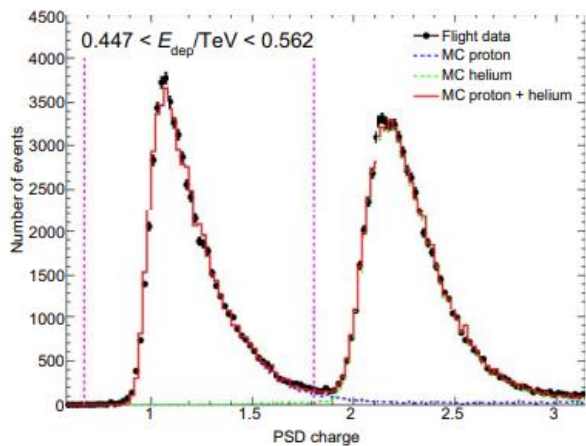
选择条件

- 去除卫星经过南大西洋磁场异常区的事例;
- $E_{dep} > 20 \text{ GeV}$: 排除地磁截断的影响;
- 高能触发;
- STK中至少有一条“goodtrack”，最后选择的径迹为最长且与BGO簇射中心夹角最小的;
 - 在xz和yz平面至少有四个击中
 - 拟合的 χ^2 小于25
 - 与BGO簇射中心的夹角小于 5°

选择条件

➤ PSD两层测量电荷的均值满足

$$0.6 + 0.05 \cdot \log\left(\frac{E_{dep}}{10 \text{ GeV}}\right) \leq Z_{PSD} \leq 1.8 + 0.002 \cdot \log^4\left(\frac{E_{dep}}{10 \text{ GeV}}\right)$$



几个能区的p和He的在轨数据电荷谱与模拟数据电荷谱

选择条件

$$EP_{val} = \frac{\sum_{i=1}^{\mathcal{L}} RMS_i}{\mathcal{L}} \times \mathcal{F}_{last}$$

$$RMS_i = \sqrt{\frac{\sum_j (x_{j,i} - x_{c,i})^2 E_{j,i}}{\sum_j E_{j,i}}}$$

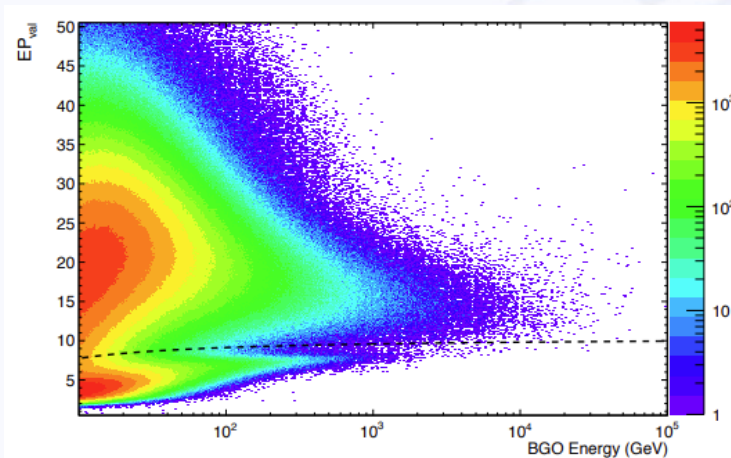
\mathcal{L} : 簇射发展的最后一层

$E_{j,i}$: 第*i*层第*j*根晶体的沉积能量

$x_{j,i}$: 第*i*层第*j*根晶体的中心位置

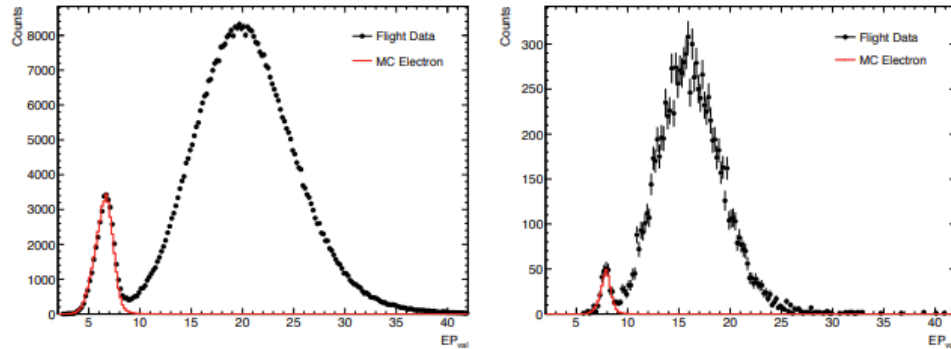
$x_{c,i}$: 第*i*层的能量重心位置

\mathcal{F}_{last} : 最后一层沉积能量与总沉积能量的比值

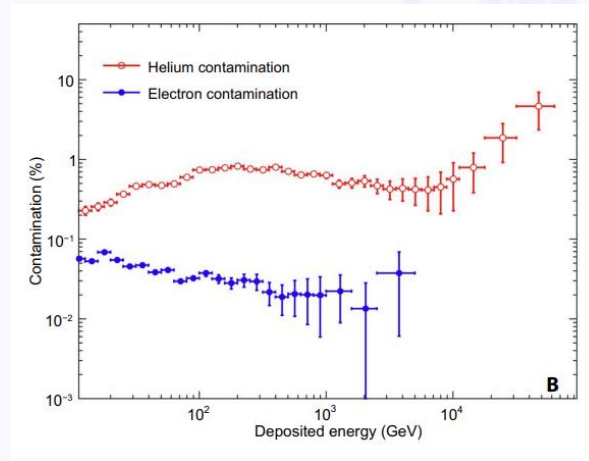


在轨数据 EP_{val} 与沉积能量的二维分布

选择条件

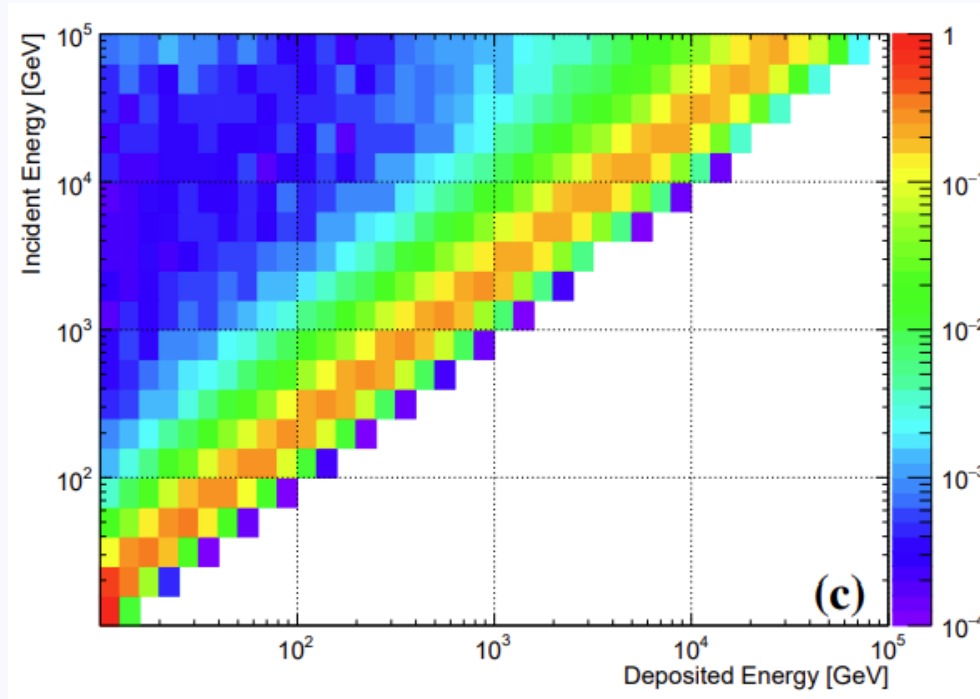


两个能区 EP_{val} 的拟合结果



各个能区电子和氦的污染

反卷积



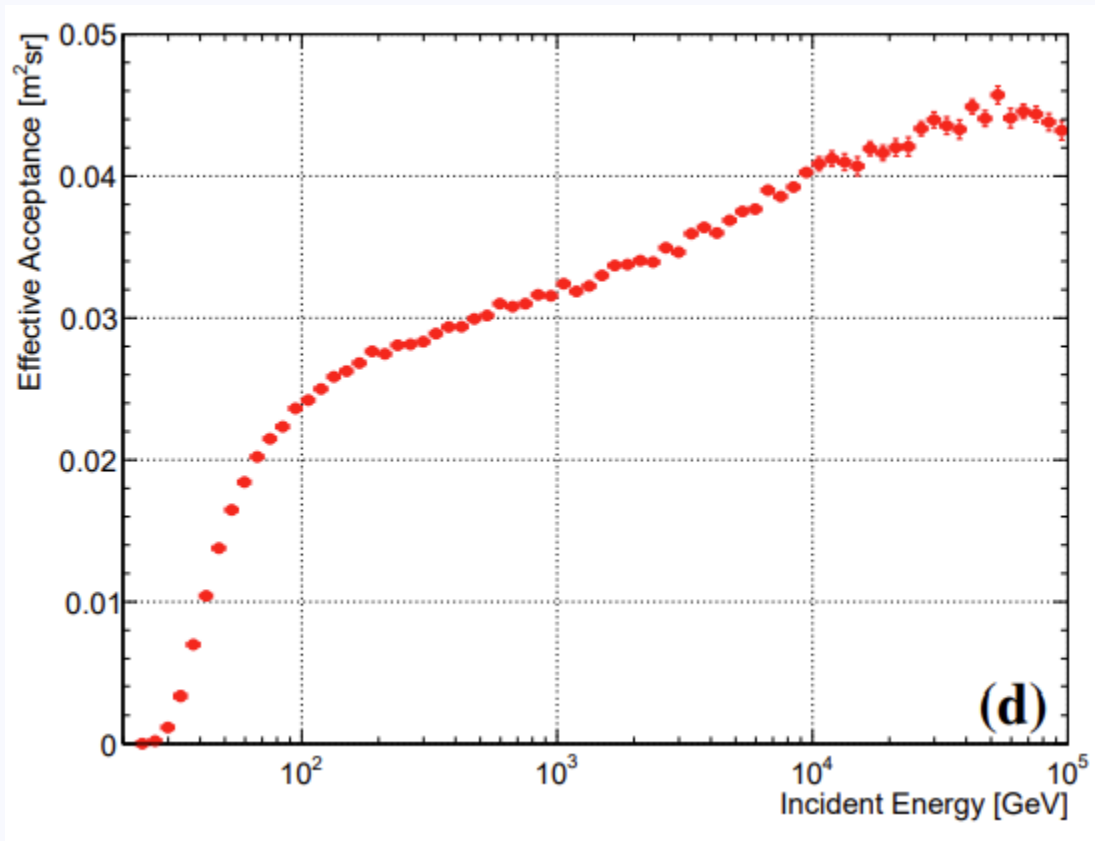
$$P(E0_i|E_j) = \frac{P(E_j|E0_i)P_0(E0_i)}{\sum_{l=1}^{N_{E0}} P(E_j|E0_l)P_0(E0_l)}$$

$E0$: primary energy

E : deposition energy

有效接收度

$$A_{eff,i} = A_{gen} \times \frac{N_{pass,i}}{N_{gen,i}} \quad \left\{ \begin{array}{l} A_{gen}: \text{几何因子} \\ N_{gen,i}: \text{模拟产生的事例数} \\ N_{pass,i}: \text{通过选择的事例数} \end{array} \right.$$



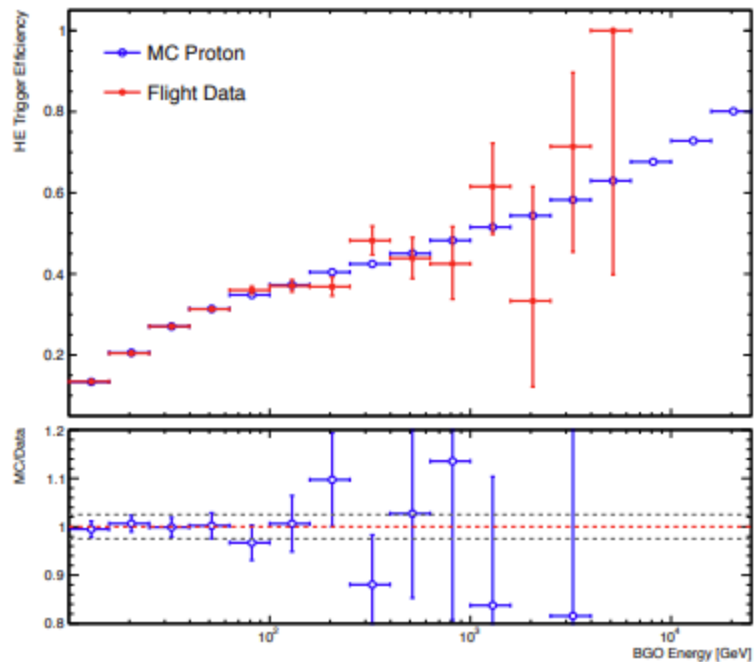
误差分析

高能触发效率

$$\epsilon_{trigger} = \frac{N_{HE|Unb}}{N_{Unb}}$$

N_{Unb} : 通过无偏触发的质子事例数

$N_{HE|Unb}$: 进一步通过高能触发的质子事例数

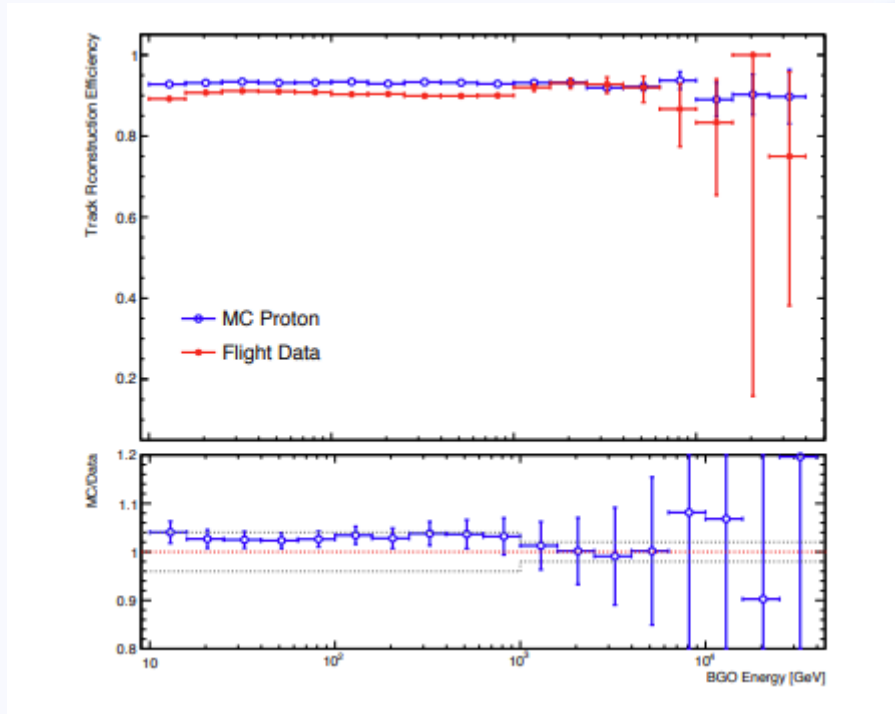


在轨数据和模拟数据质子样本的高能触发效率，
两者偏差作为系统误差

误差分析

径迹重建效率 $\epsilon_{track} = \frac{N_{STK|BGO}}{N_{BGO}}$

N_{BGO} : 利用簇射中心做为入射径迹选出的质子事例数
 $N_{STK|BGO}$: 进一步能够重建出STK径迹的质子事例数



在轨数据和模拟数据质子样本的径迹重建效率，
两者偏差作为系统误差

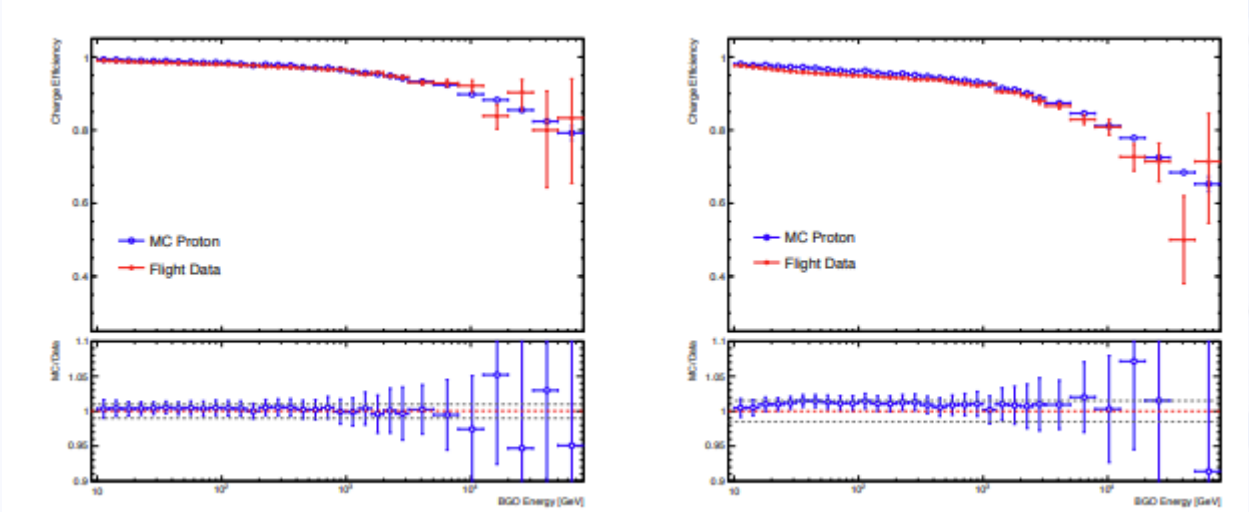
误差分析

电荷选择效率

$$\epsilon_{psd1} = \frac{N_{psd1|psd2+stk1}}{N_{psd2+stk1}} \quad \epsilon_{psd2} = \frac{N_{psd2|psd1+stk1}}{N_{psd1+stk1}}$$

$N_{psd2+stk1}$, $N_{psd1+stk1}$: 利用第一层STK和第二层PSD或第一层STK和第一层PSD或选出的质子事例数

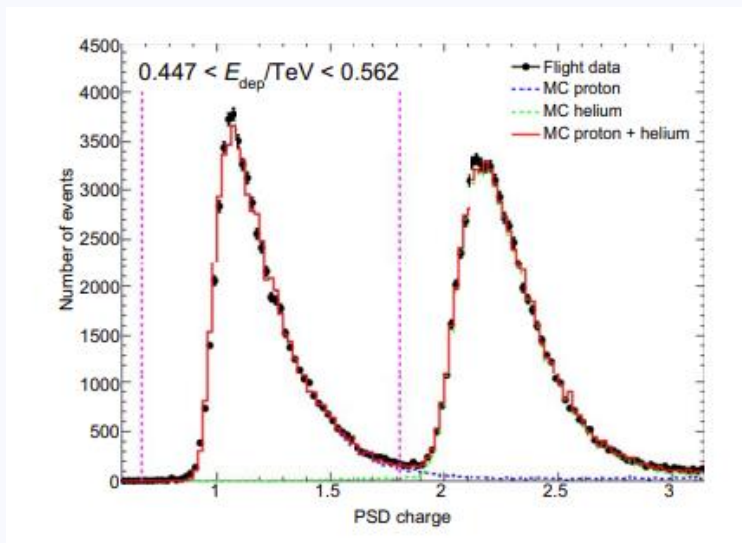
$N_{psd1|psd2+stk1}$, $N_{psd2|psd1+stk1}$: 进一步被第一层PSD或第二层PSD判定为质子的事例数



两层PSD在轨数据和模拟数据质子样本的电荷重建效率，两者偏差作为系统误差

误差分析

氦的污染



通过晃动电荷选择窗口 $\pm 10\%$ 观察对结果的影响

电子的污染类似

误差分析

反卷积

$$P(E0_i|E_j) = \frac{P(E_j|E0_i)P_0(E0_i)}{\sum_{l=1}^{N_{E0}} P(E_j|E0_l)P_0(E0_l)}$$

$E0$: primary energy

E : deposition energy

$$0 \leq \epsilon_i = \sum_{j=1}^{N_E} P(E_j|E0_i) \leq 1$$

反应量能器的探测效率

$$n(E0_i) = \frac{1}{\epsilon_i} \sum_{l=1}^{N_E} n(E_l)P(E0_i|E_l)$$

$$P(E0_i) = \frac{n(E0_i)}{\sum_{i=1}^{N_{E0}} n(E0_i)}, \epsilon_i = \frac{n(E_j) \cdot P(E0_i|E_j)}{n(E0_i)}$$

1. 观察不同的 reweight 系数从 2.5 到 3.1 下的响应矩阵和原始输入谱对结果的影响
2. 对响应矩阵的每个 bin 进行泊松抽样，抽取多个响应矩阵，观察不同矩阵对结果的影响

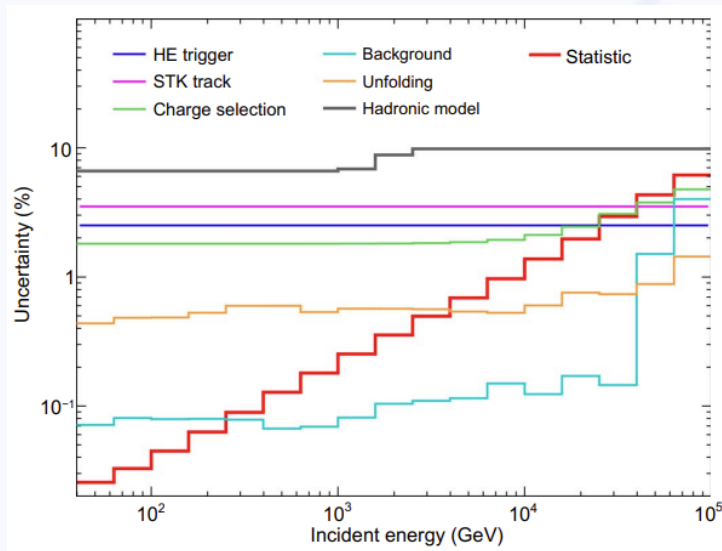
误差分析

强相互作用模型

比较GEANT4 FTFP-BERT和FLUKA的差异作为强相互作用模型的系统误差

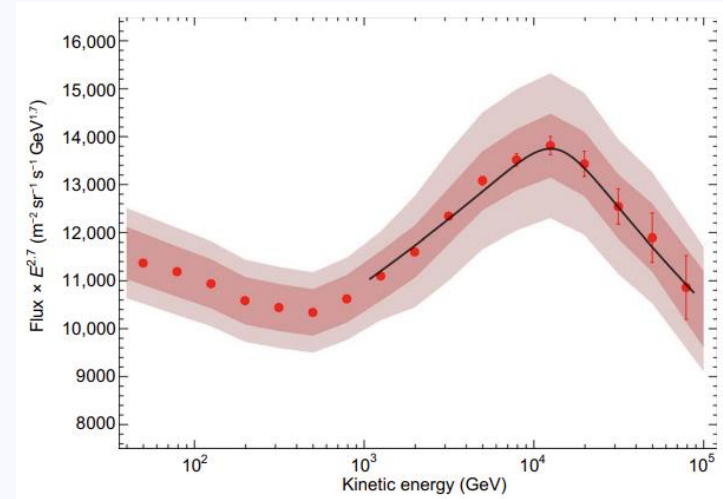
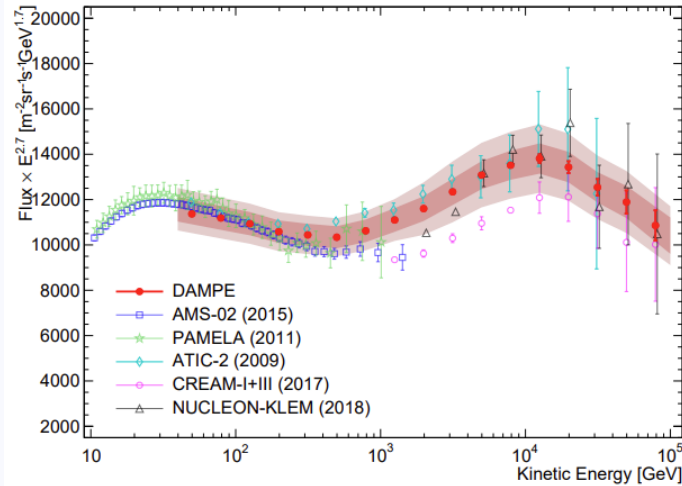
统计误差

对沉积能量计数谱中每个bin进行泊松抽样，得到多个沉积能量谱，经过反卷积之后观察结果的差异



误差分布

结果与分析



$$F(E) = F_0 \left(\frac{E}{\text{TeV}} \right)^{-\gamma}$$

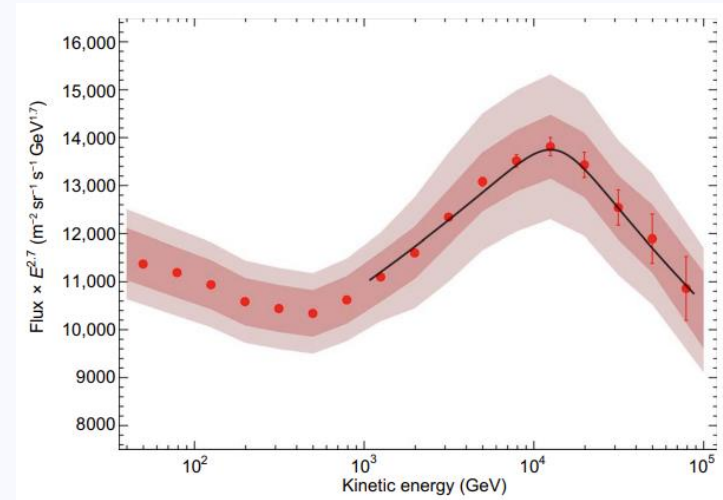
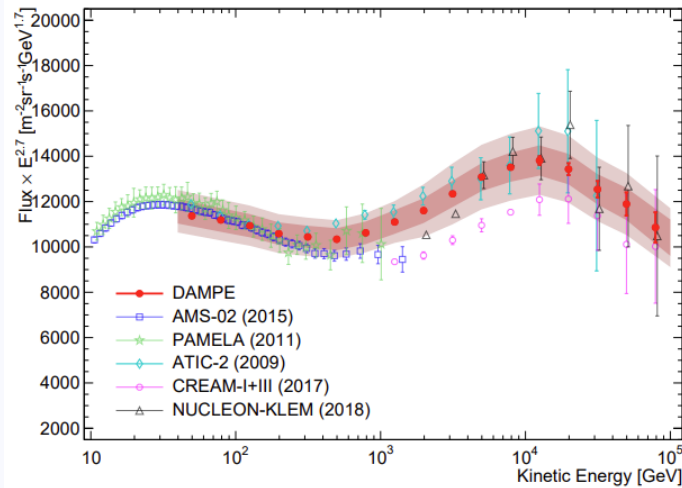
$$\chi^2 = 28.6$$

$$F(E) = F_0 \left(\frac{E}{\text{TeV}} \right)^{-\gamma} \left[1 + \left(\frac{E}{E_b} \right)^s \right]^{\Delta\gamma/s}$$

$$\chi^2 = 2.5$$

减少了两个自由参数， χ^2 减少了26.1，显著性 4.7σ

结果与分析



$$F(E) = F_0 \left(\frac{E}{\text{TeV}} \right)^{-\gamma}$$

$$\chi^2 = 28.6$$

$$F(E) = F_0 \left(\frac{E}{\text{TeV}} \right)^{-\gamma} \left[1 + \left(\frac{E}{E_b} \right)^s \right]^{\Delta\gamma/s}$$

$$\chi^2 = 2.5$$

减少了两个自由参数， χ^2 减少了26.1，显著性 4.7σ

谢谢



Back up



子探测器介绍

• 塑料闪烁体探测器 (PSD)

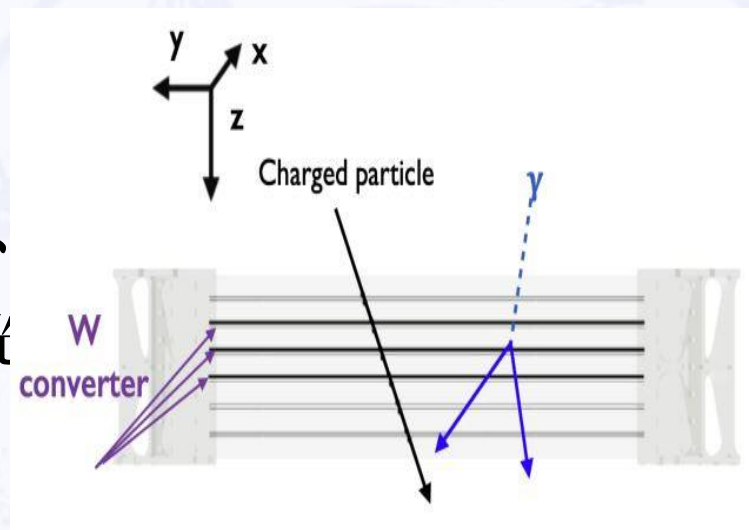


- 两大层，四小层，每大层有41根塑料闪烁体，两小层之间“品”字排列
- 电荷测量

PSD

• 硅微条径迹探测器 (STK)

- 六大层，每大层由XY两小层构成，二、三、四大层前分别有一块钨板，提高光子转换成正负电子对的效率。
- 径迹测量，小电荷测量 (如p,He)

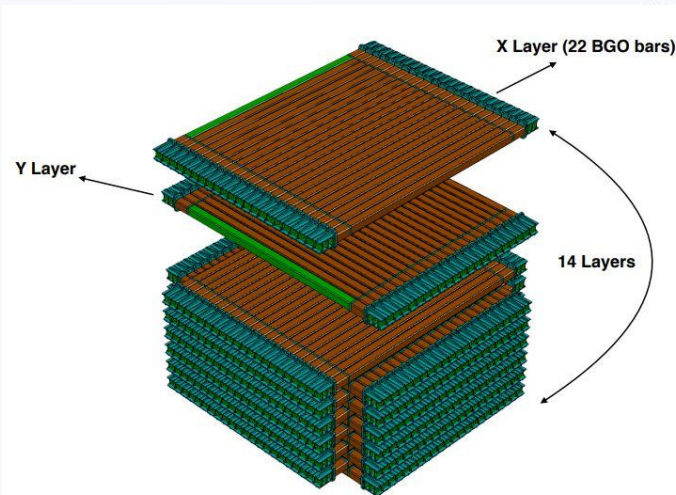


STK

子探测器介绍

• BGO量能器 (BGO)

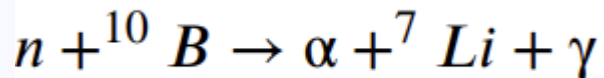
- 七大层，每大层由XY两小层构成，约32个辐射长度，1.6个核作用长度。
- 能量测量，径迹测量，e/p鉴别



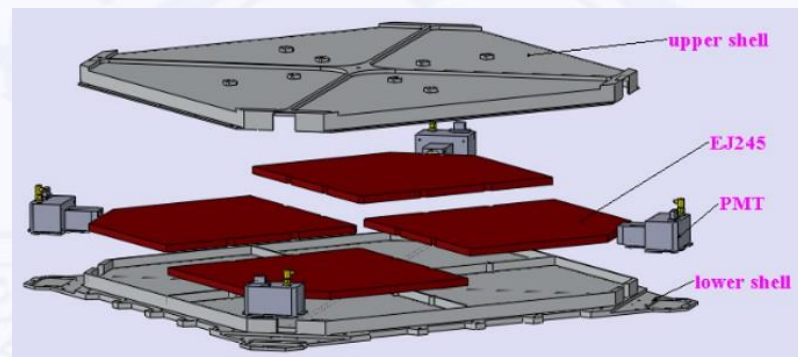
BGO

• 中子探测器 (NUD)

- e/p鉴别



产生的 α 粒子电离激发塑料闪烁体产生荧光，经过波长位移光纤传输到光电倍增管中



NUD

