



# “悟空”实验对初级宇宙线能谱 普遍软化结构的观测

魏逸丰

中国科学技术大学  
(代表DAMPE合作组)

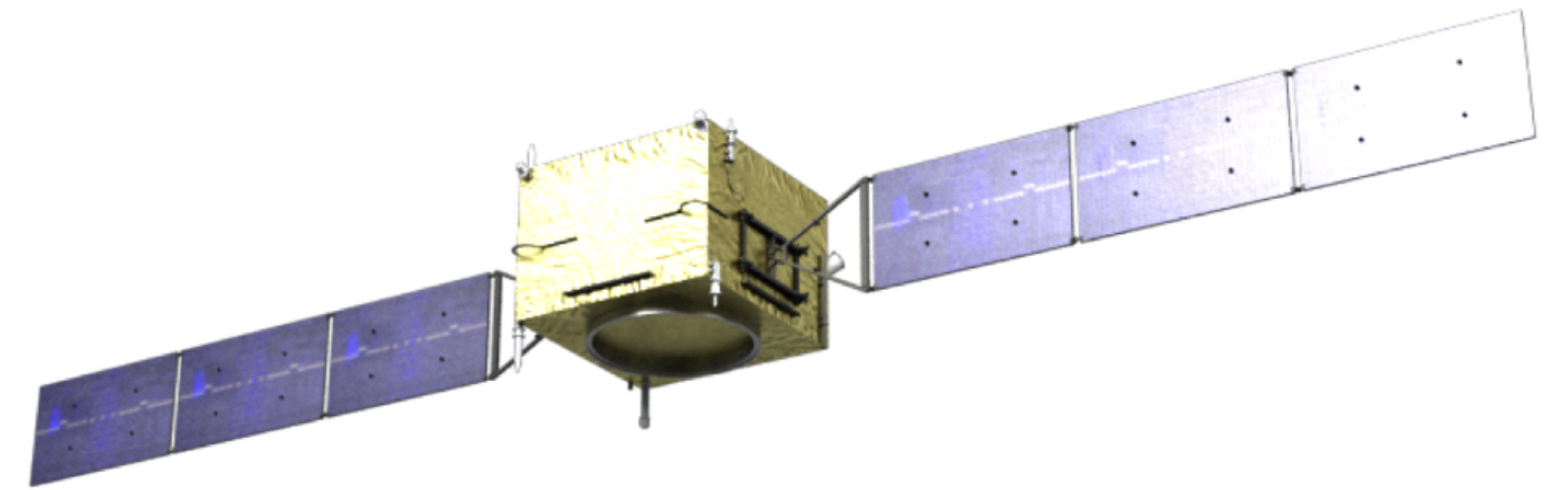
\*Speaker: [weiyf@ustc.edu.cn](mailto:weiyf@ustc.edu.cn)

第十八届粒子物理、核物理和宇宙学交叉学科前沿问题研讨会  
2026年4月11日, 中国 桂林



# 大纲

- 物理背景
- “悟空”实验 (DAMPE) 简介
- 研究方法
- 实验结果
- 总结

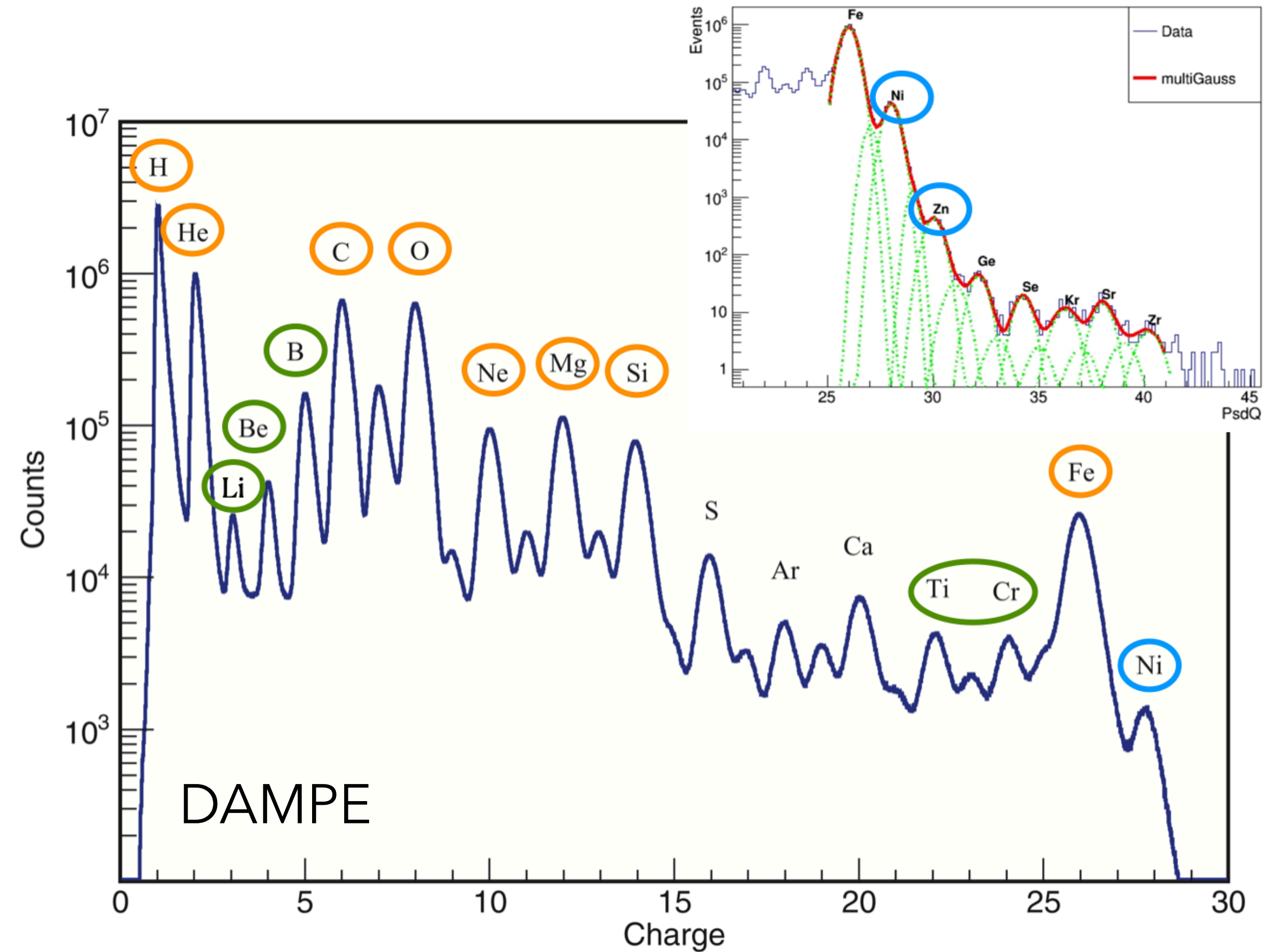


参考: DAMPE Collab., **Nature** (Accepted)  
doi:10.1038/s41586-026-10472-0  
arXiv: 2511.05409

# 物理背景

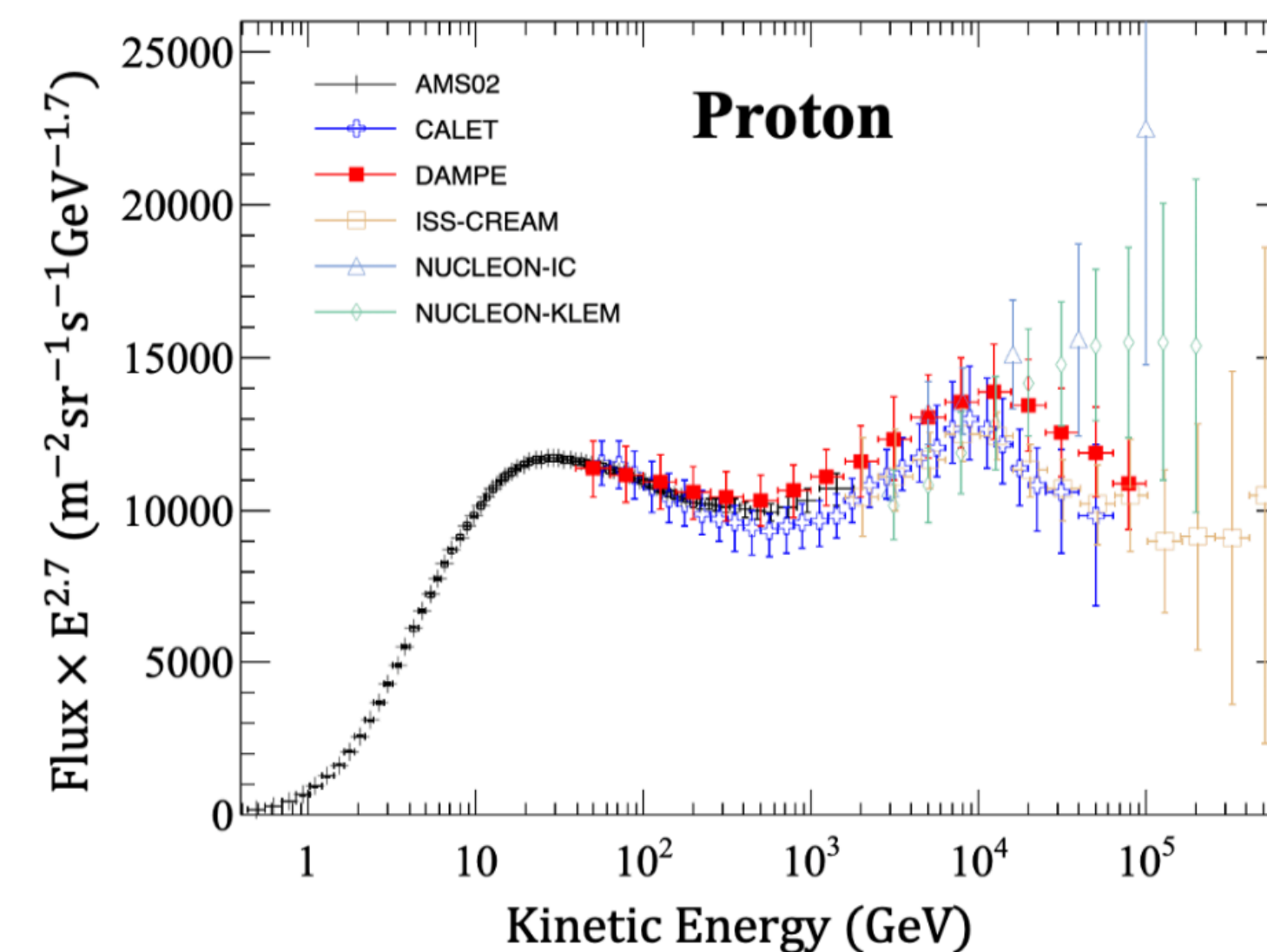
- 宇宙线的观测

- ✓ **初级成分** (质子, 氦, 碳, 氧, ..., 铁, ...): 研究宇宙线的起源和加速机制
- ❖ **次级成分** (锂, 铍, 硼, ...): 研究宇宙线的传播机制
- ❖ **超铁元素** (镍, 锌, ... ): 研究超铁元素起源



# 物理背景

- 现代观测表明，宇宙线能谱并非无结构的幂律谱，存在诸多“软化”、“硬化”的小结构，其背后存在复杂的物理效应
- 能谱结构可能存在的特性：
  - ❖ **电荷依赖性**: 来源于带电粒子在磁场中的回旋加速
  - ❖ **质量依赖性**: 来源于粒子的相互作用
- **实验挑战**: 需要对多种宇宙线成分进行高精度、宽能段的测量

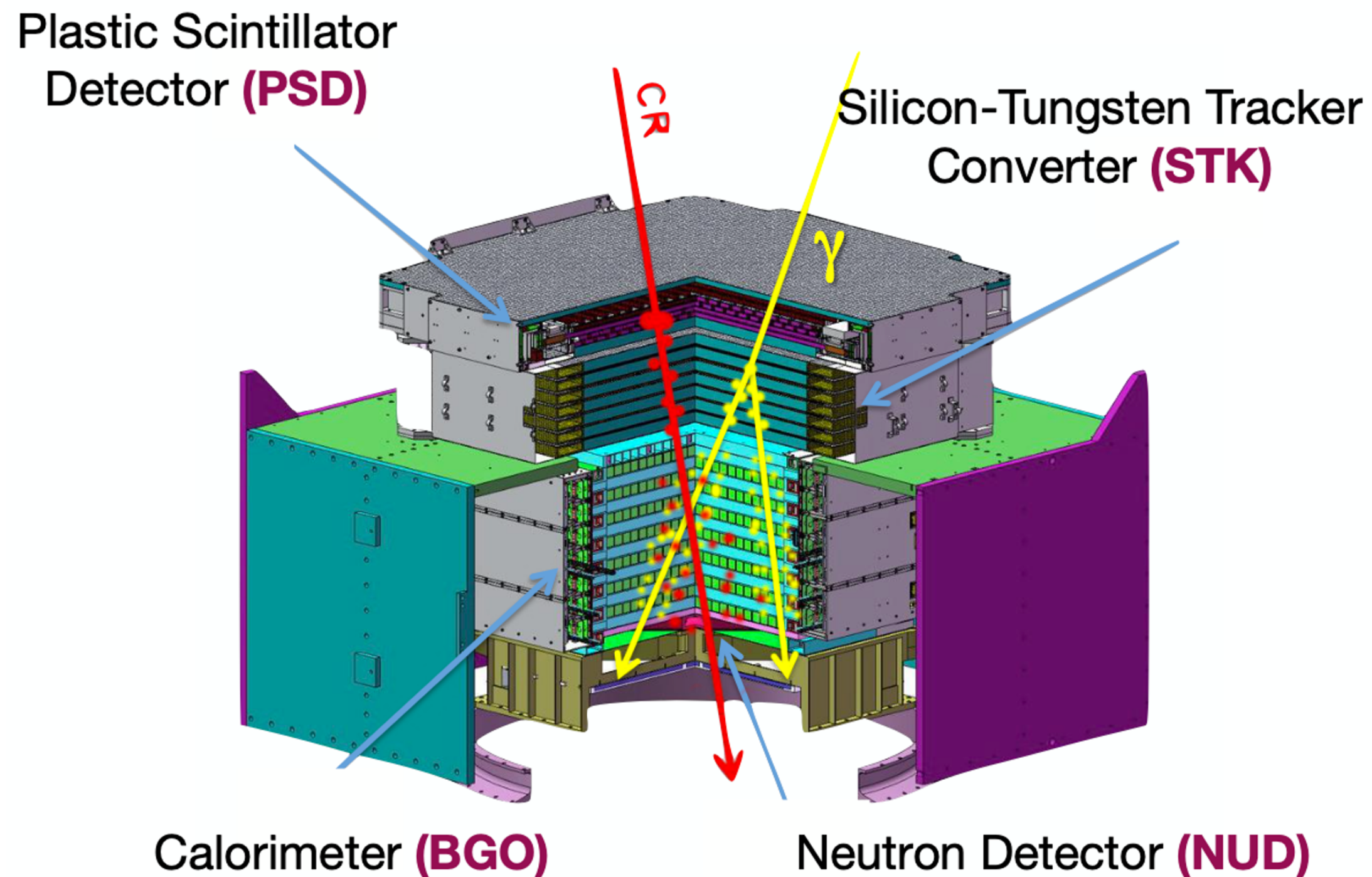


# “悟空”实验 (DAMPE)

## 各个子探测器功能:

- 电荷测量 (测量PSD、STK中的电离能损)
- 径迹测量和光子转换 (STK、BGO)
- 能量测量 (BGO)
- 电子强子鉴别 (BGO、NUD)

DAMPE Collab.,  
*Astropart.Phys.* 95 (2017)



参数指标	数值
能量动态范围 (e/ $\gamma$ )	5 GeV to 10 TeV
能量分辨 (e/ $\gamma$ )	<b>1.5% at 800 GeV</b>
能量动态范围 (p/nuclei)	<b>50 GeV to 500 TeV</b>
能量分辨 (p)	<b>~30% at 800 GeV</b>
电荷分辨 (p)	<b>0.06 charge unit</b>
几何因子 (e)	<b>0.3 m<sup>2</sup>sr above 30 GeV</b>
角分辨 ( $\gamma$ )	0.1 degree at 100 GeV

# 能谱（通量）测量

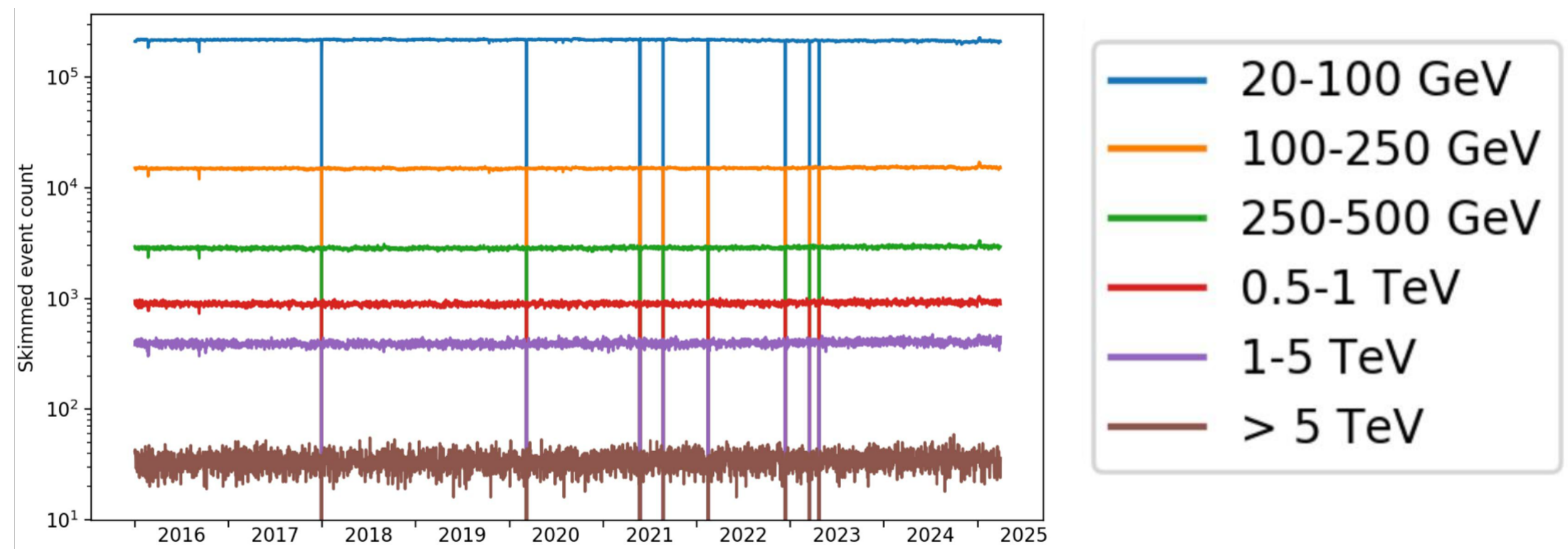
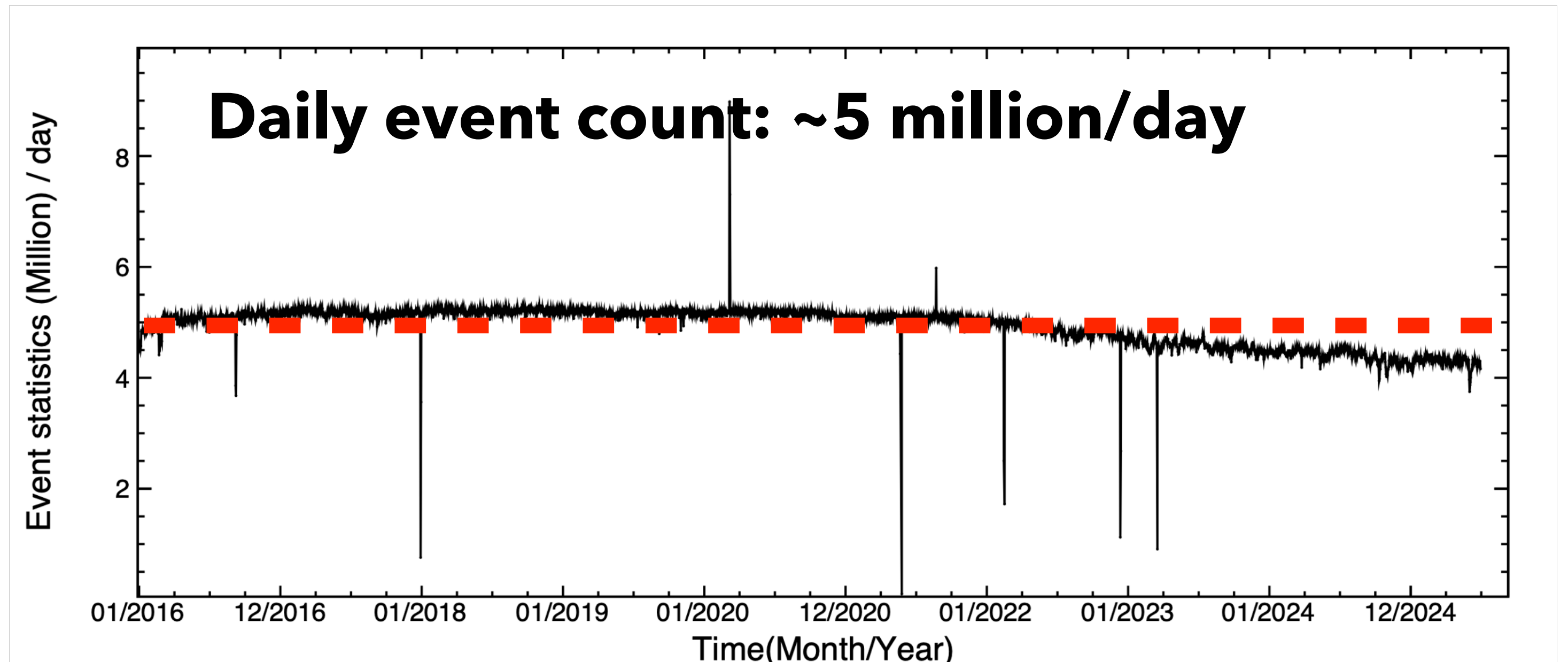
- 第  $i$  个能量区间的通量:

$$\Phi(E_i, E_i + \Delta E) = \frac{N_{obs}(E_i, E_i + \Delta E)}{A_{eff,i} T_{exp} \Delta E_i}$$

- $\Phi$  : 微分通量 ( $\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{GeV}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
- $N_{obs}$  : 观测到的事例数
- $A_{eff,i}$  : 有效接收度 ( $\text{m}^2\text{sr}$ ),  $A_{eff} = \epsilon_{trig} \epsilon_{sel1} \cdots \epsilon_{selN} A_{geo}$
- $T_{exp}$  : 曝光时间 (s)
- $\Delta E_i$  : 能区宽度 (GeV)

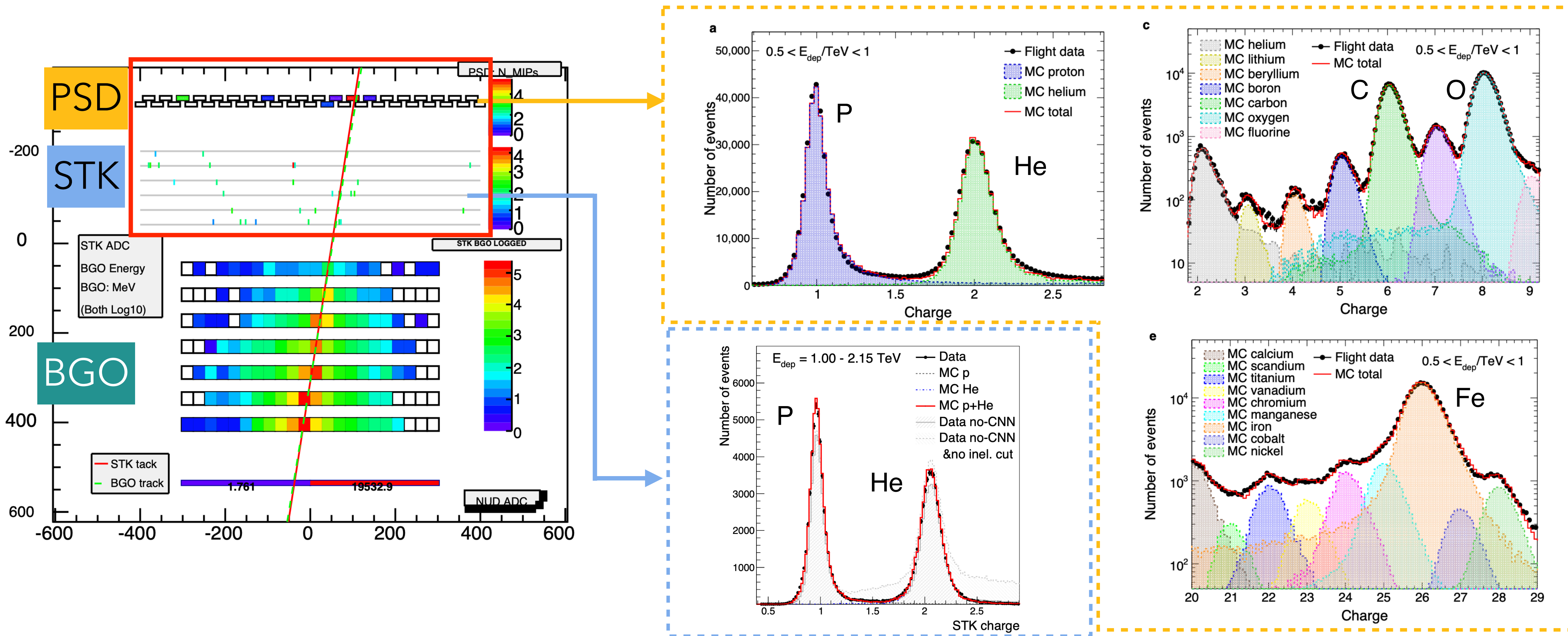
# 数据样本

- 9年飞行数据 (2016.01-2024.12)
- 曝光时间计算:
  - 排除南大西洋异常区数据
  - 排除2017.09剧烈太阳活动时期的数据
  - 扣除探测器死时间
- $T_{exp} \sim 2.18 \times 10^8 \text{ s}$  (占总观测时间 $\sim 76.8\%$ )



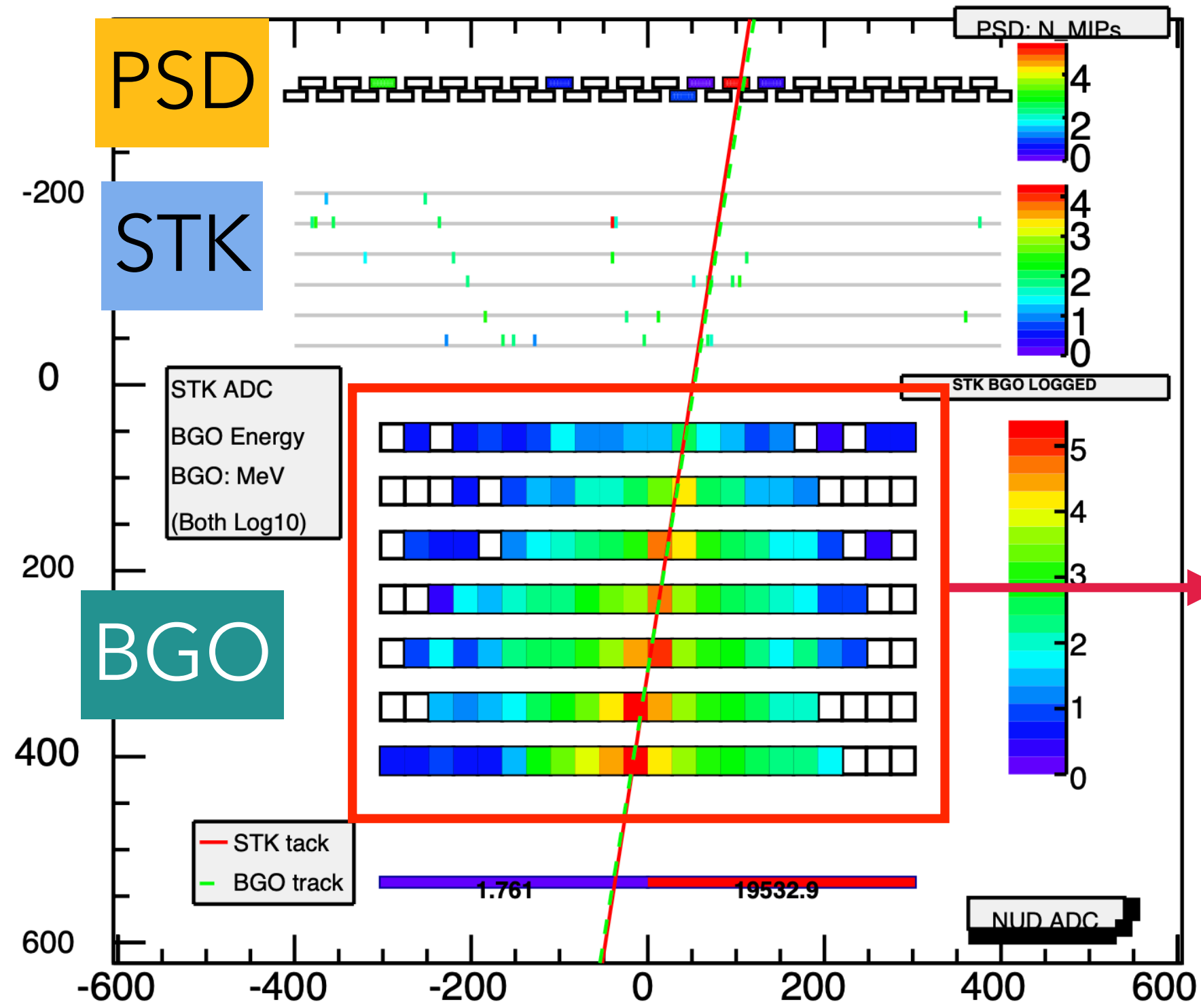
# 关键点 I : 电荷鉴别

$N_{obs}$  : 观测事例数由电荷鉴别获得

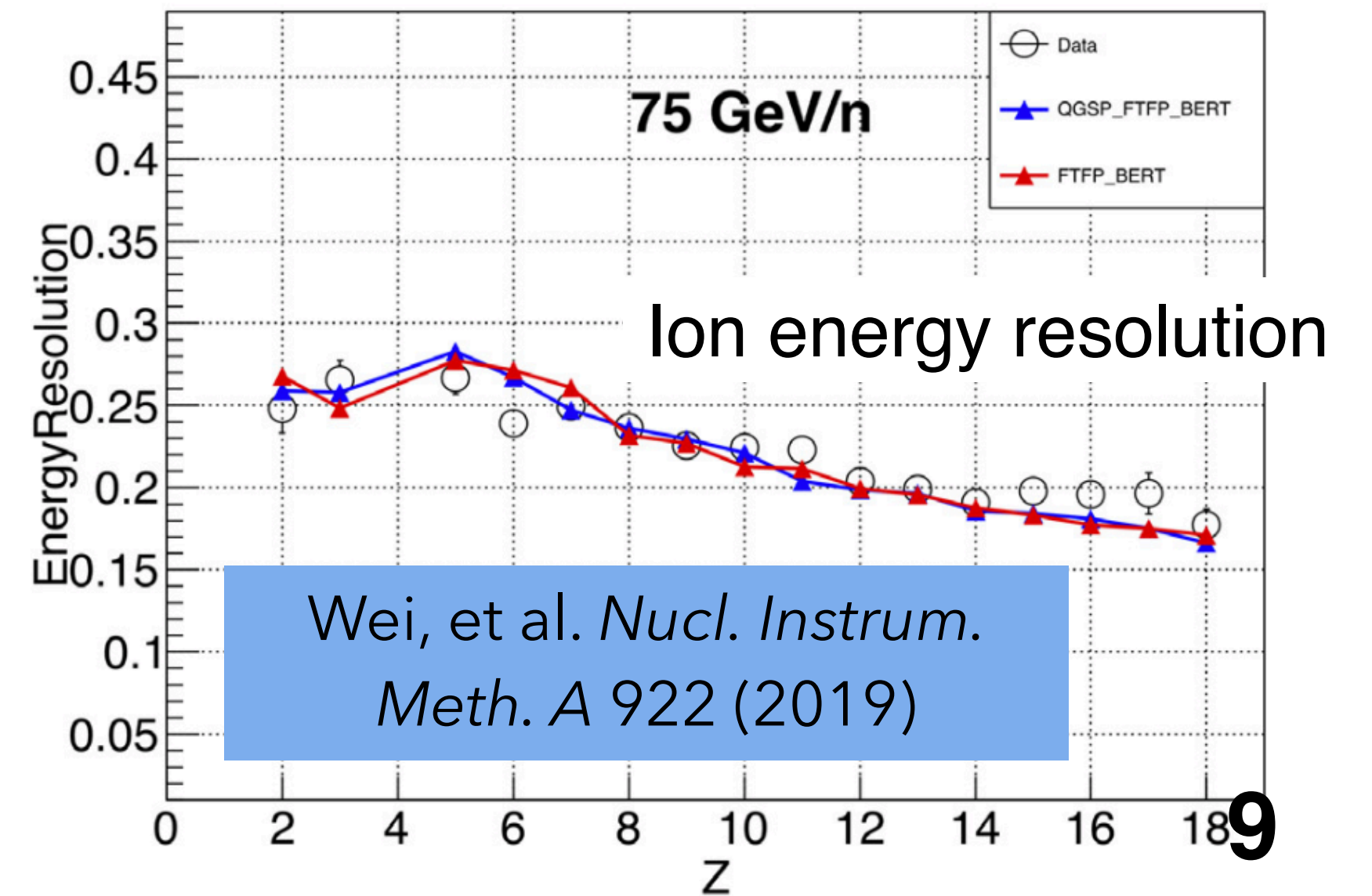
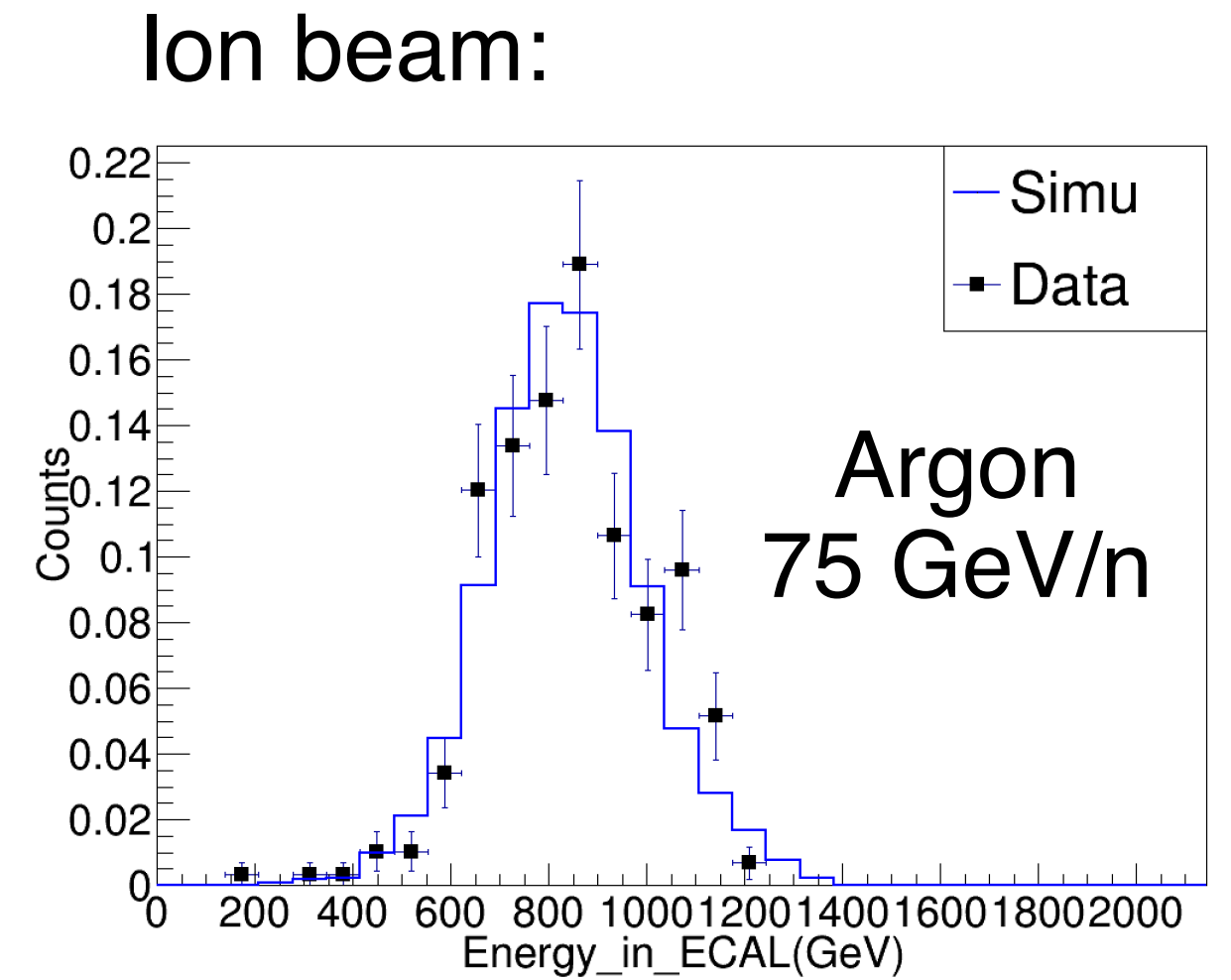
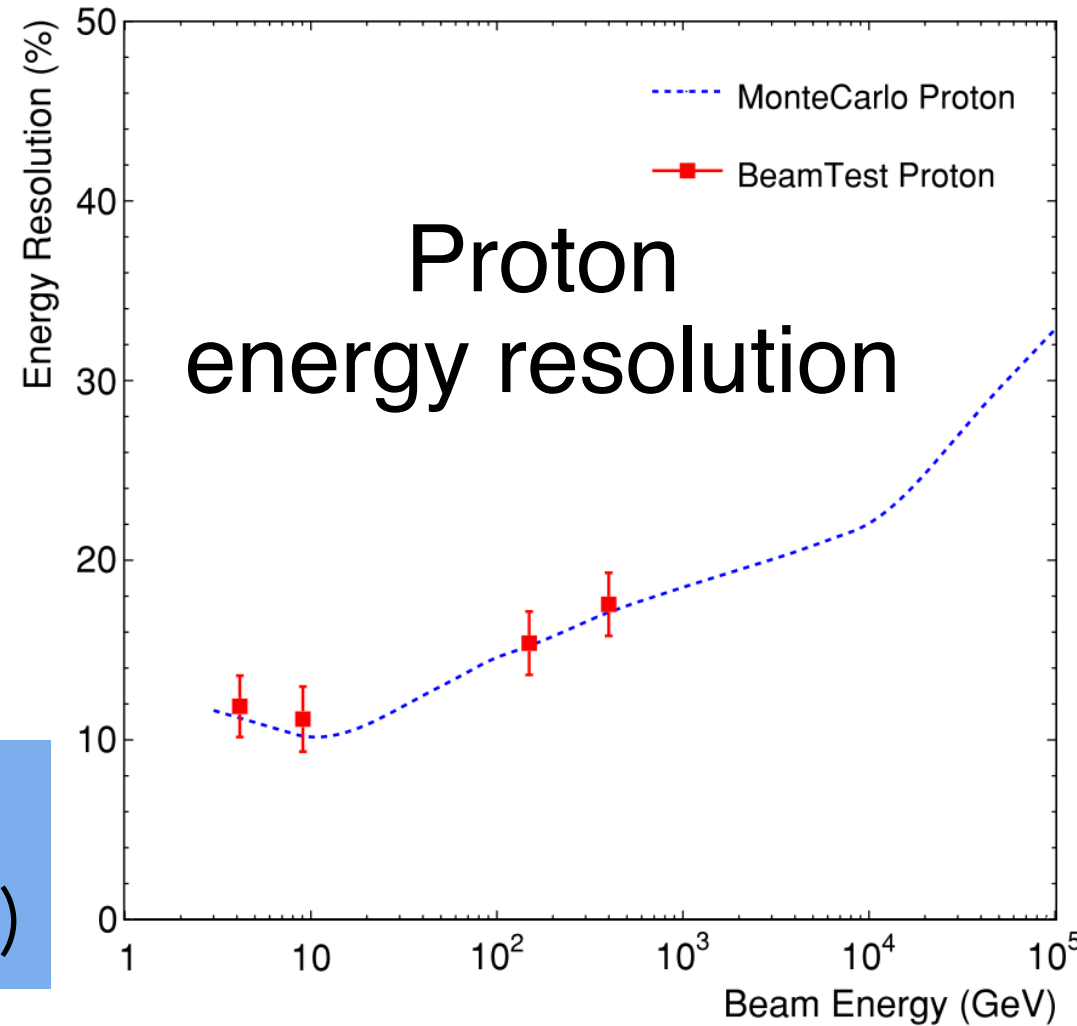
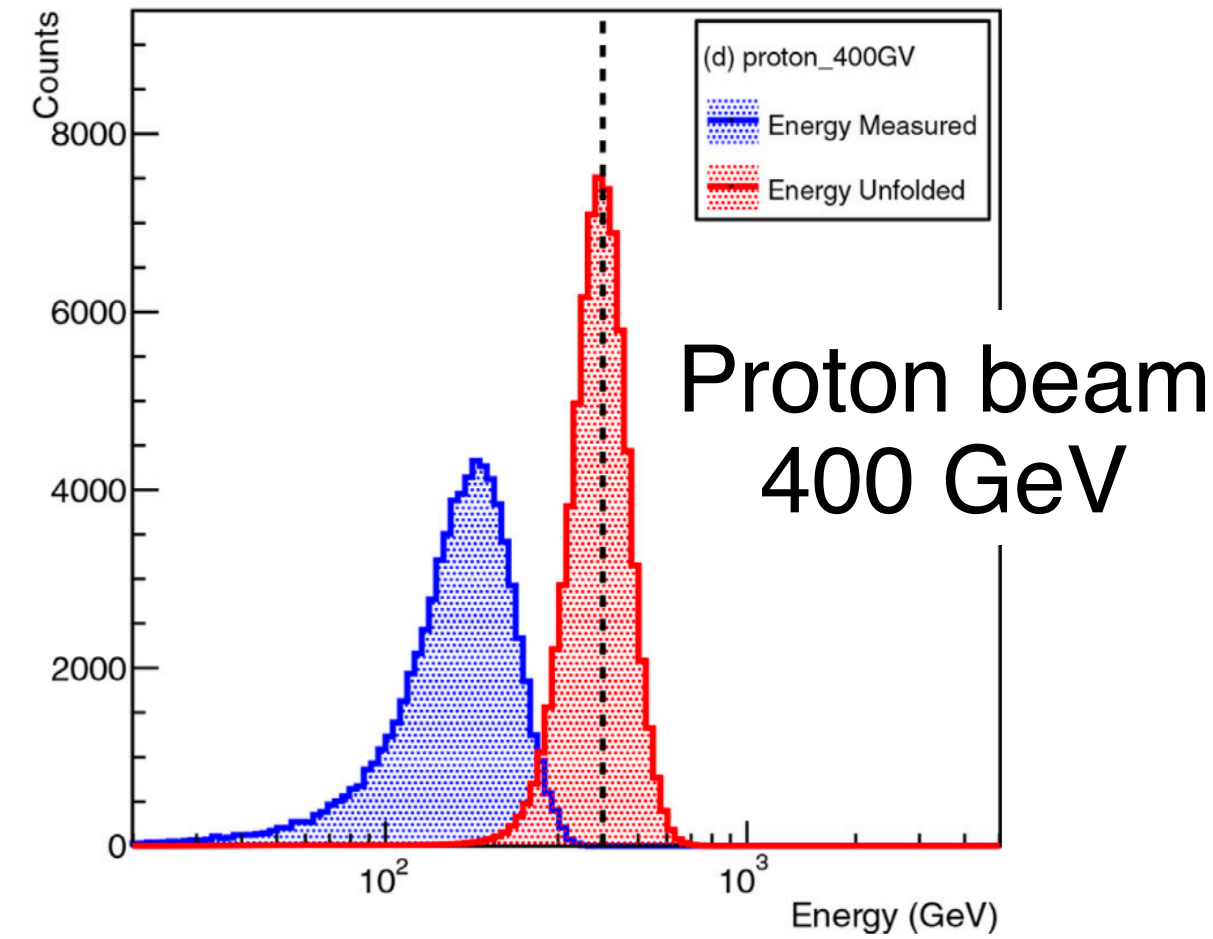


# 关键点 II : 能量测量

**E** : BGO量能器负责能量测量



DAMPE Collab.,  
*Astropart.Phys.* 95 (2017)

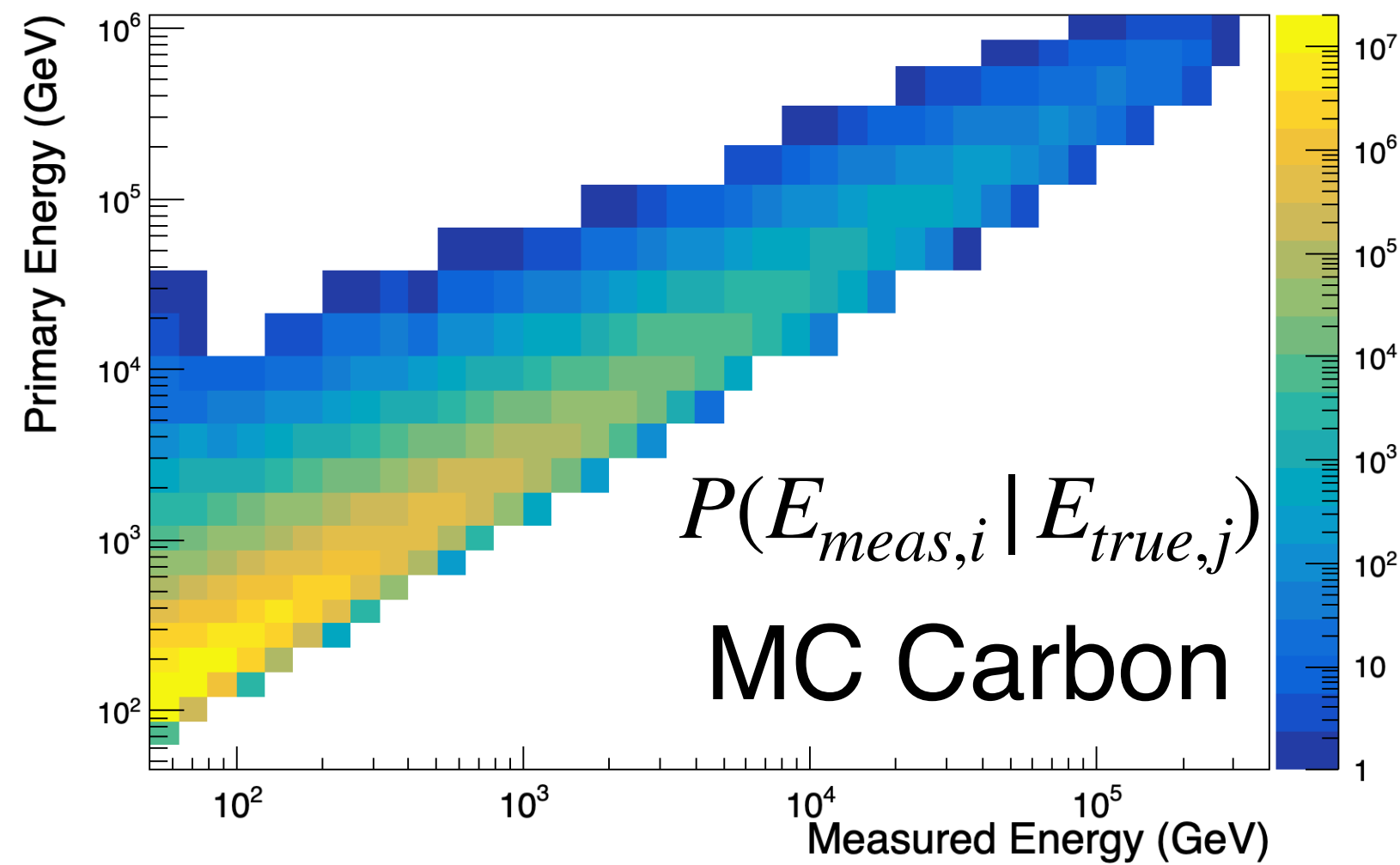


# 关键点 II：能量测量

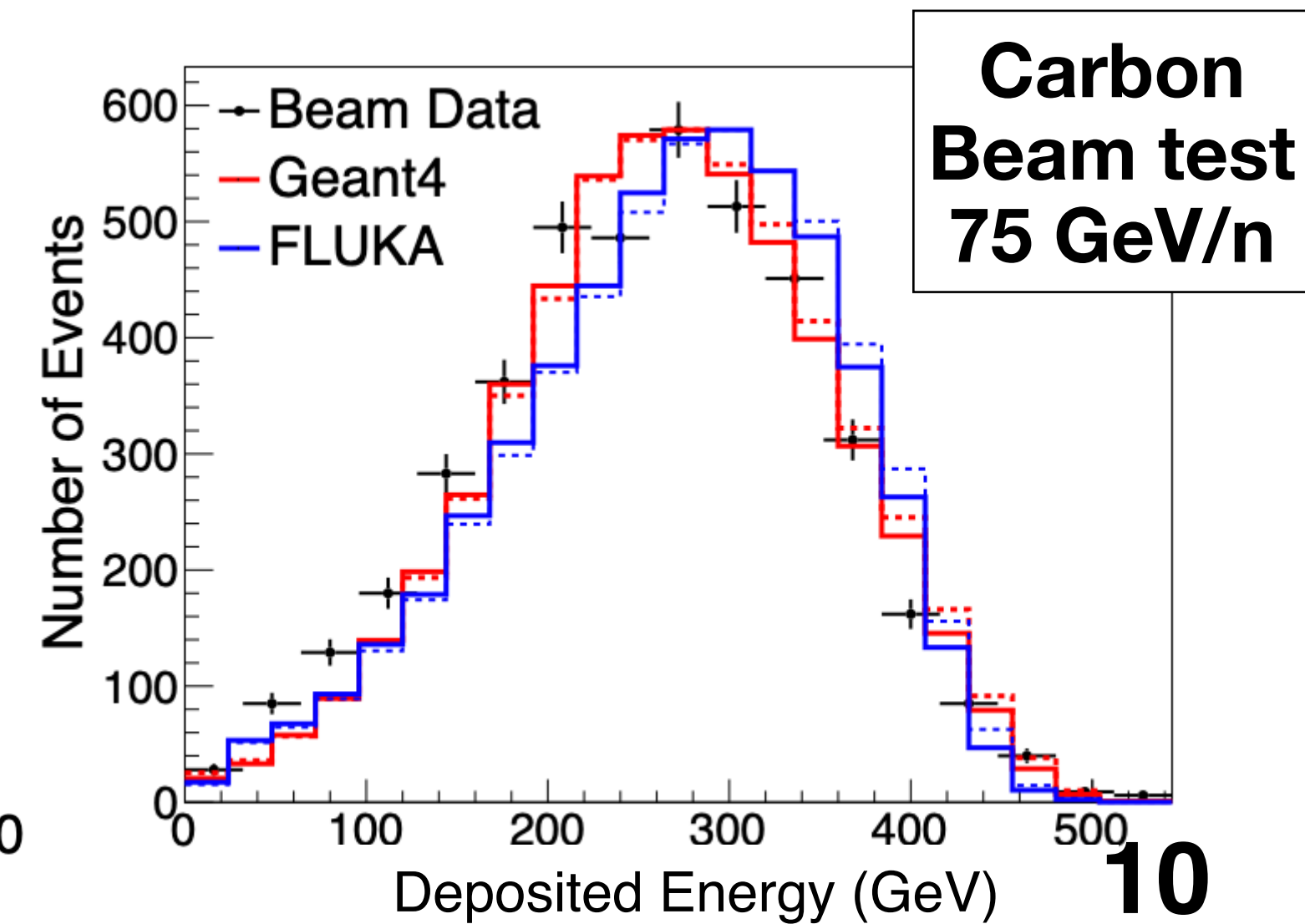
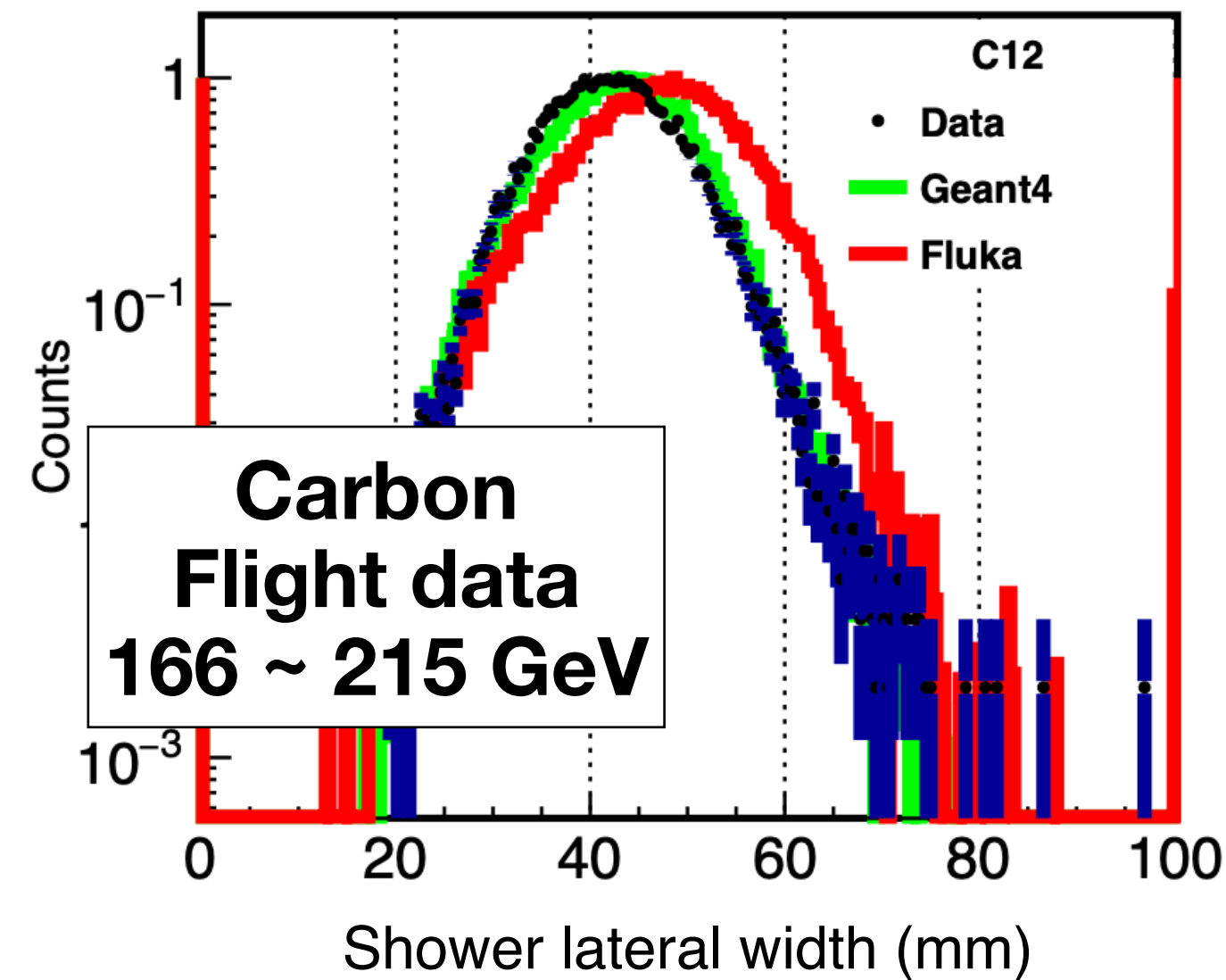
- 采用贝叶斯反卷积方法，将测量的沉积能谱转换成入射粒子动能谱
- 基准模拟工具: GEANT4
  - FTFP\_BERT model
  - EPOS-LHC (> 100 TeV)

$$P(E_{true,j} | E_{meas,i}) = \frac{P(E_{meas,i} | E_{true,j})P(E_{true,j})}{\sum_k P(E_{meas,i} | E_{true,k})P(E_{true,k})}$$

- 采用 FLUKA (DPMJET III) 进行对比，评估模型系统误差



能量响应矩阵  
(由MC模拟给出)

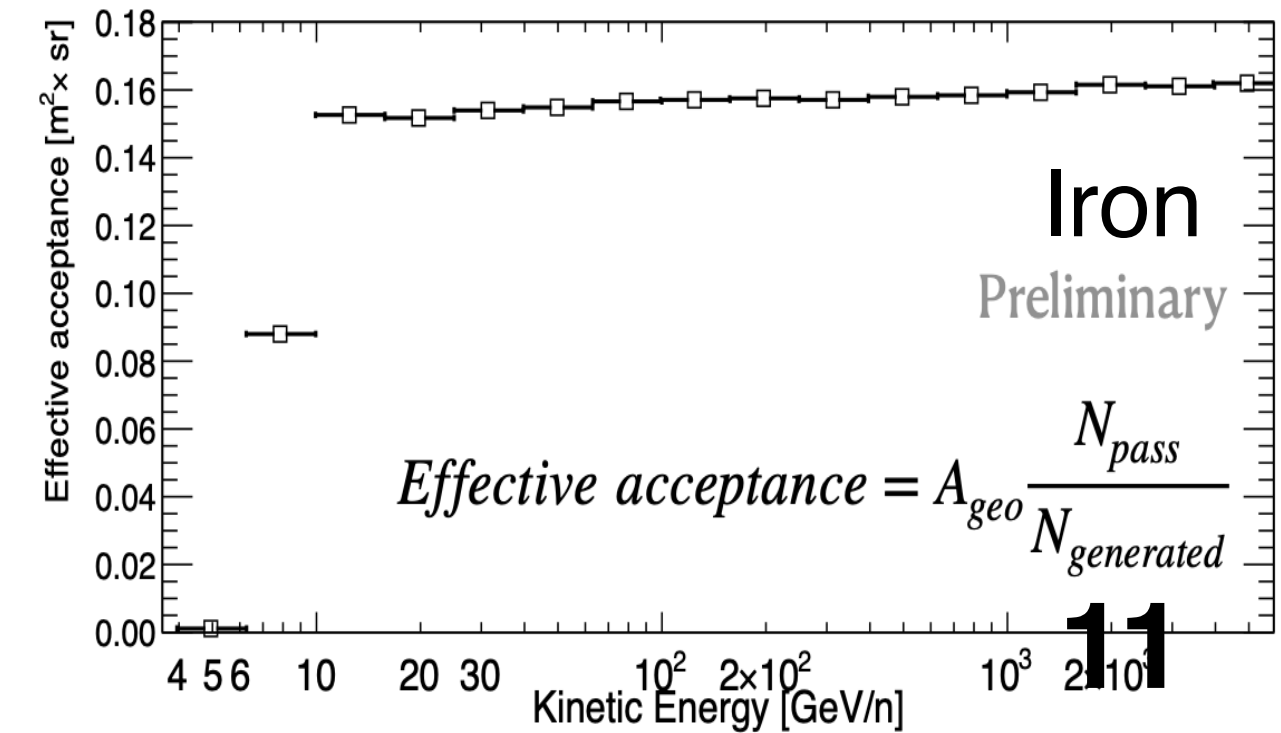
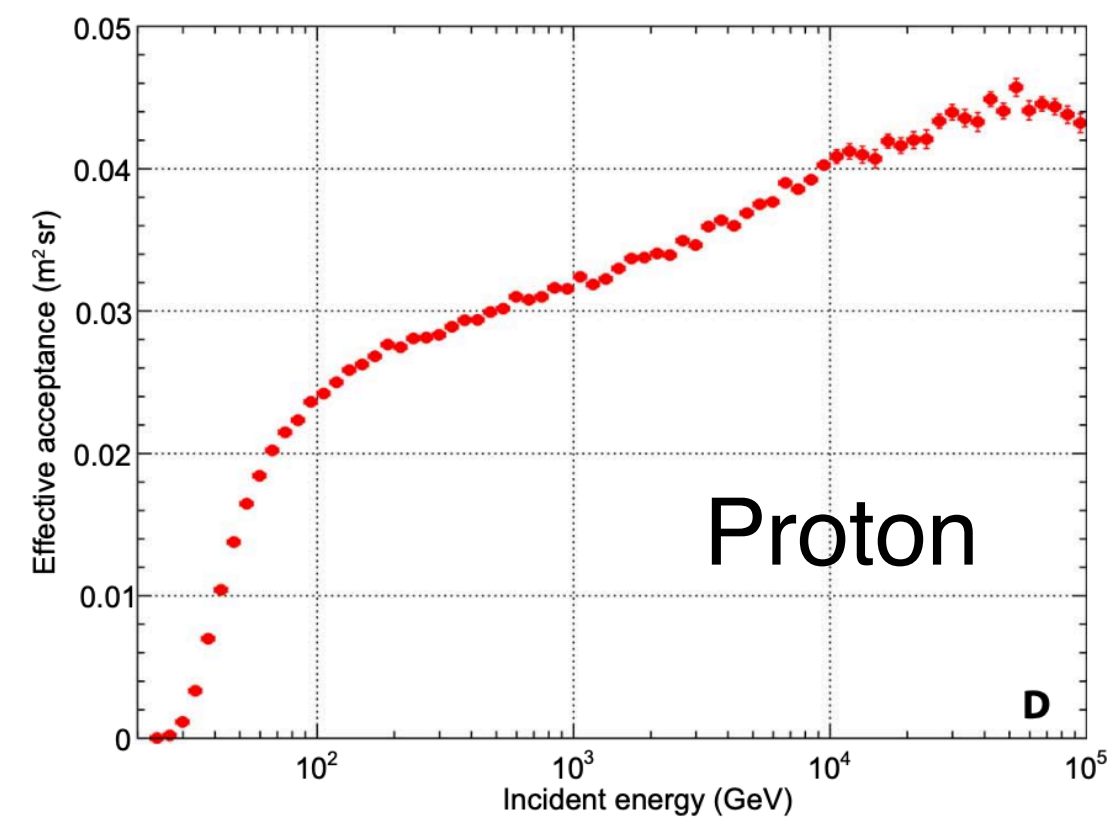
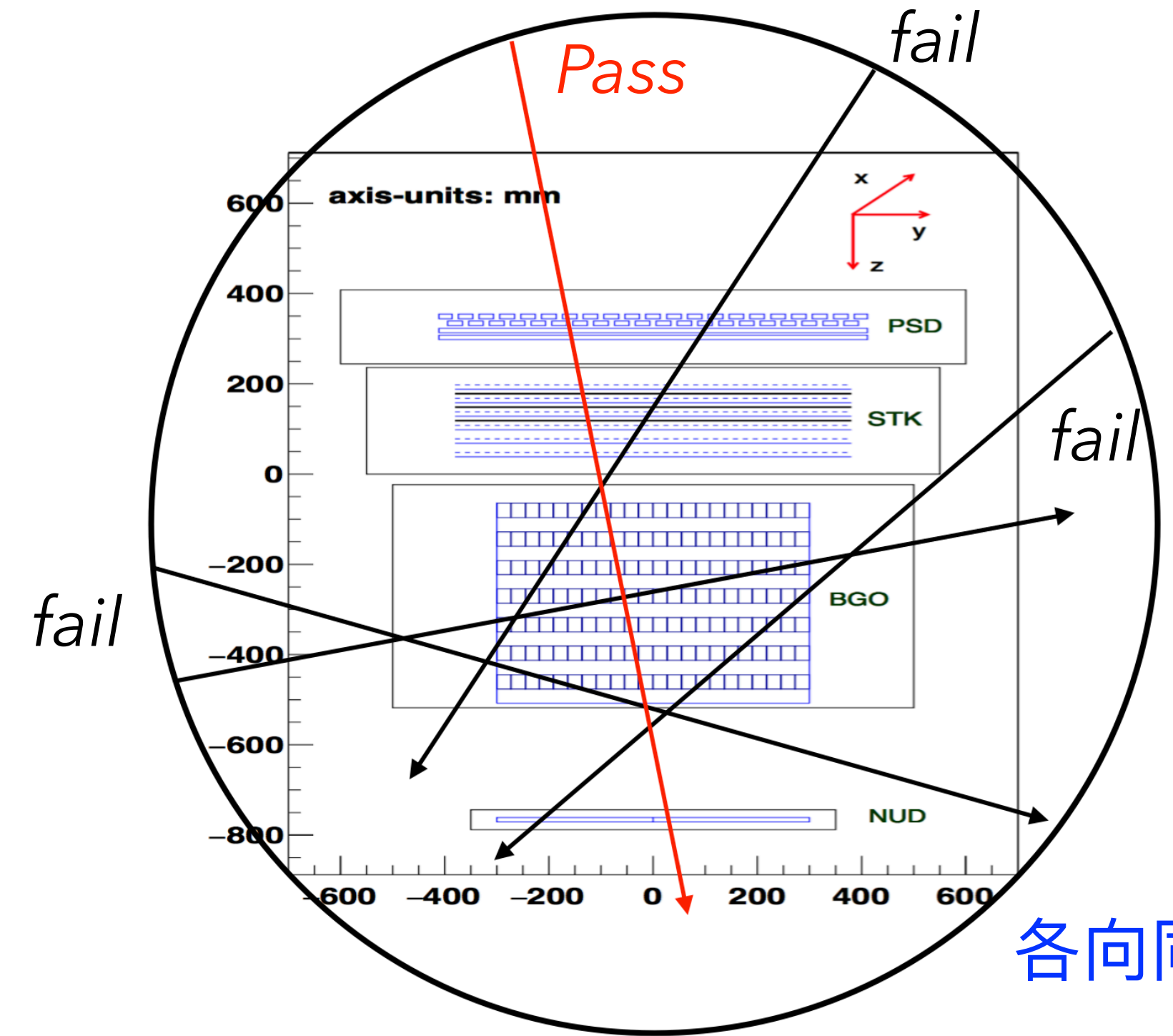


# 有效接收度

$$\Phi(E_i, E_i + \Delta E) = \frac{N_{obs}(E_i, E_i + \Delta E)}{A_{eff,i} T_{exp} \Delta E_i}$$

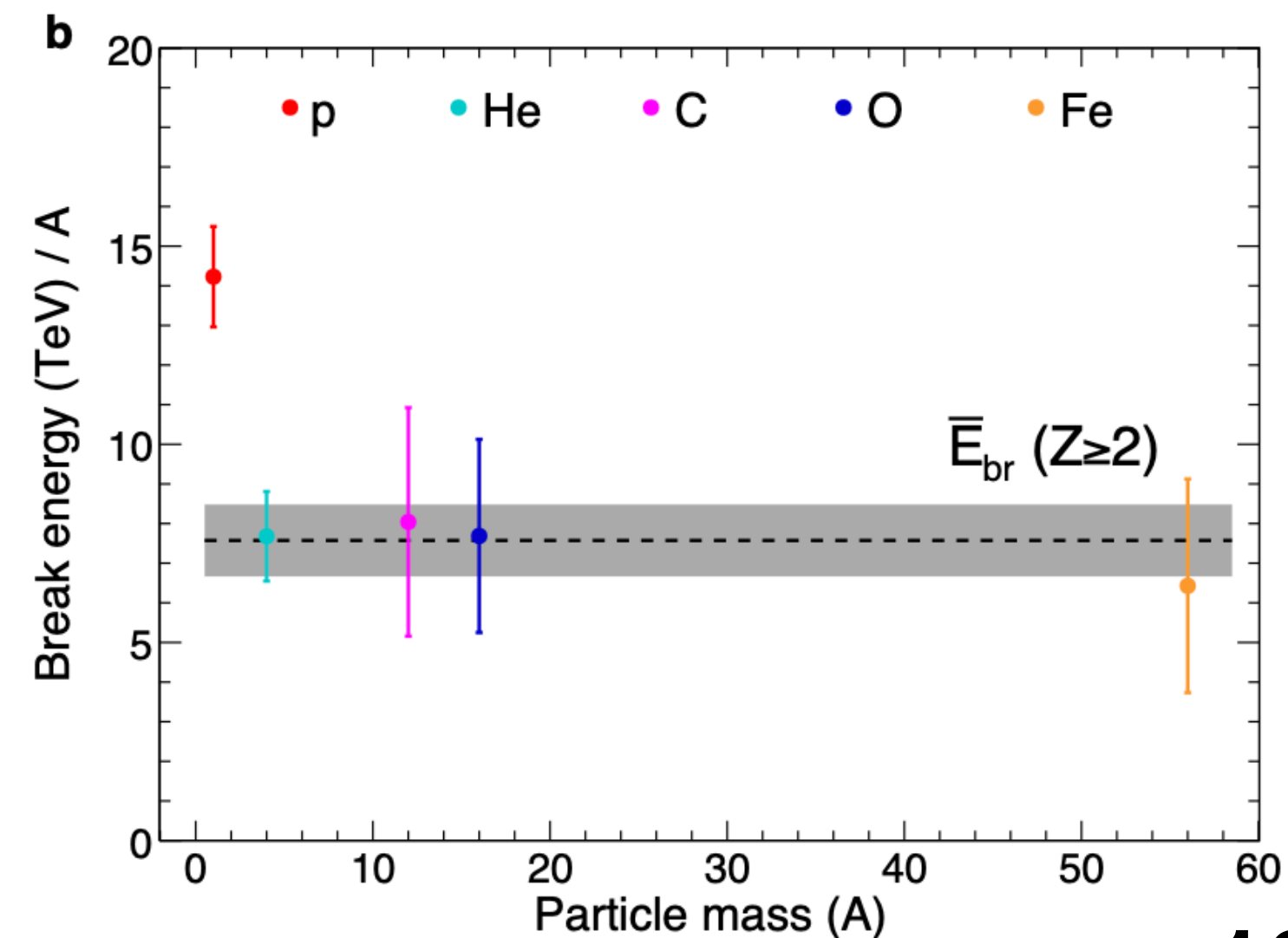
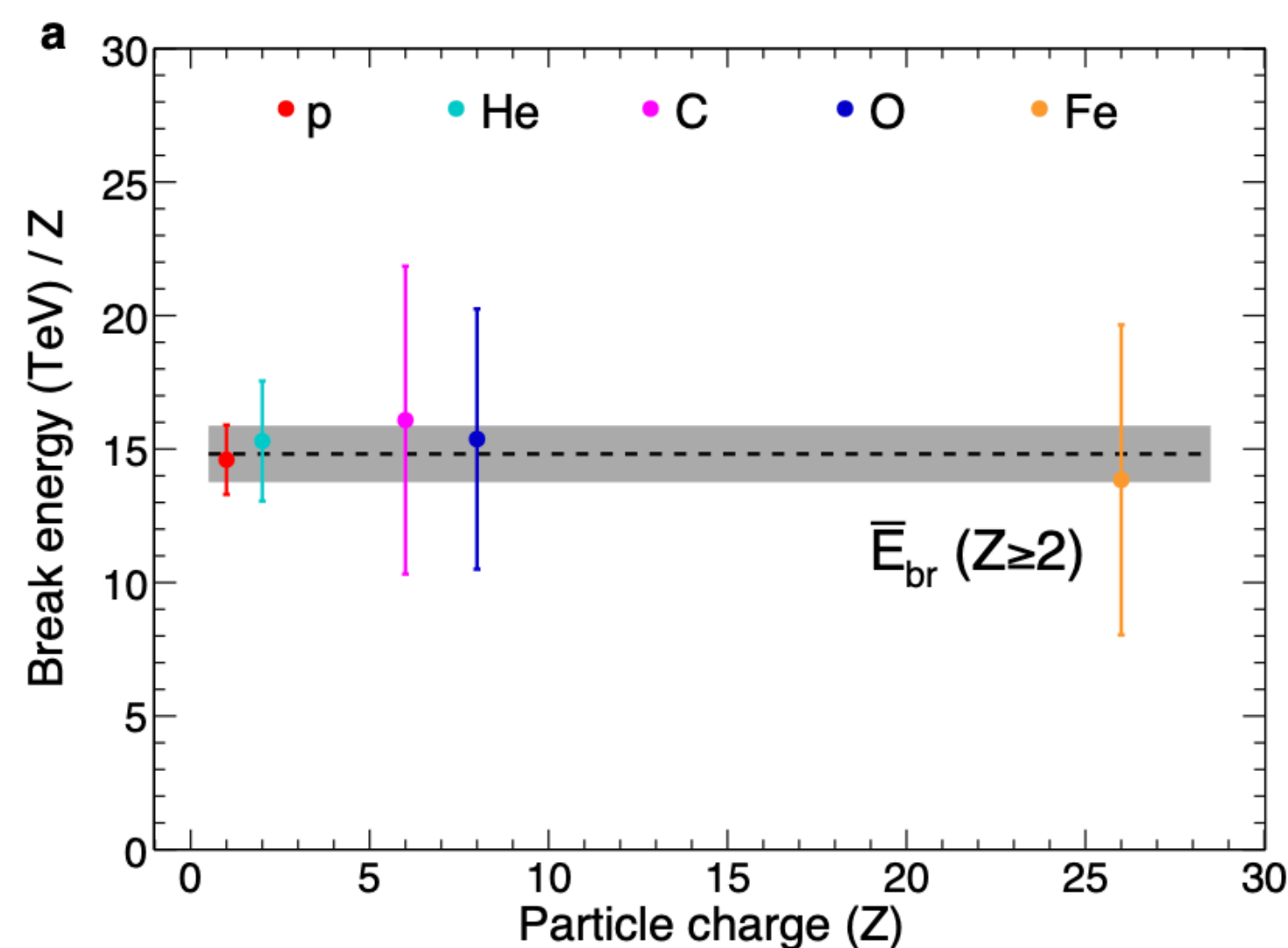
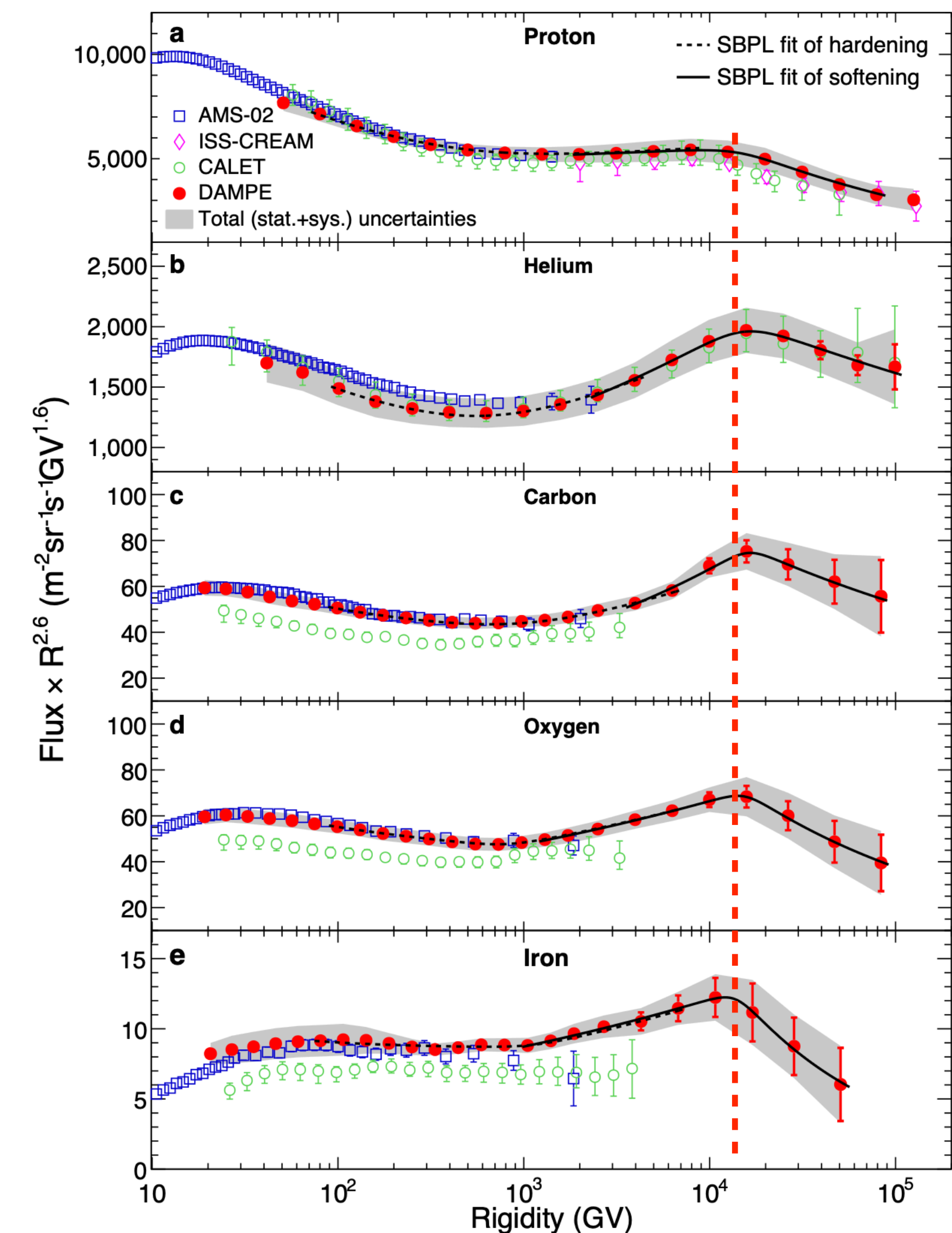
$$A_{eff,i} = A_{gen} \times \frac{N_{pass,i}}{N_{gen,i}}$$

- $A_{gen}$ : MC事例产生器的几何因子, 对球面源而言  $A_{gen} = 4\pi^2 r^2$
- $N_{gen}$ : MC事例产生器产生的事例数
- $N_{pass}$ : 通过选择之后的事例数



# 实验结果

- 精确测量初级宇宙线  $p, \text{He}, \text{C}, \text{O}, \text{Fe}$  直到 **100 TV** (对铁为  $\sim 60 \text{ TV}$ )
- 发现这些宇宙线在刚度15 TV处存在普遍的软化结构, 并且该结构与粒子电荷存在依赖性
- 在  $4.4\sigma$  的置信程度上排除了质量依赖性



# 总结

---

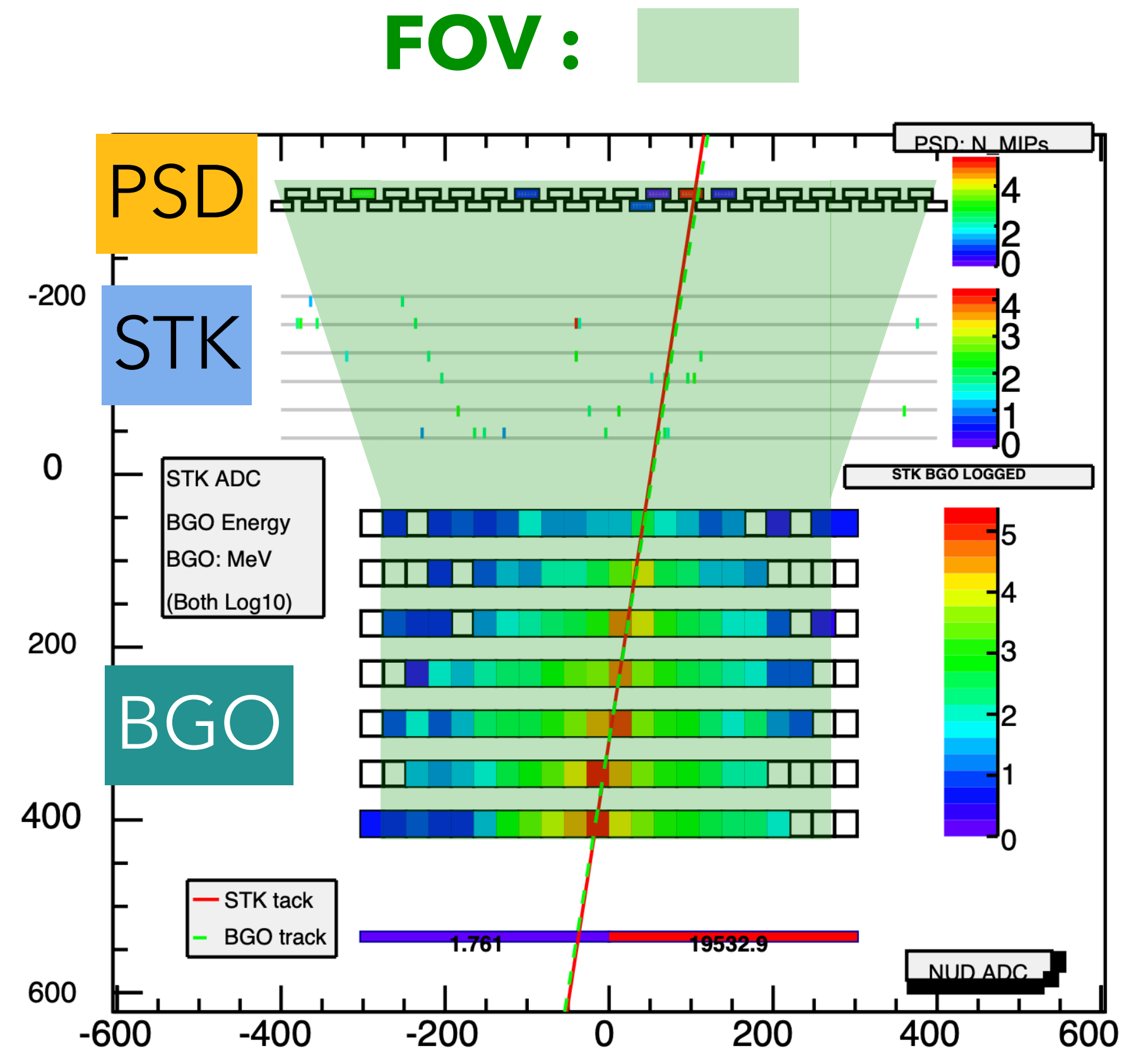
- “悟空”实验是一个中国主导的宇宙线观测实验，已经稳定在轨运行超过10年
- 最近，“悟空”实验观测到初级宇宙线 (p, He, C, O, Fe) 在刚度15 TV处存在普遍的软化结构
- 软化拐点存在电荷依赖性，预示可能与宇宙线的加速或传播机制有关

**谢谢！**

**Backup**

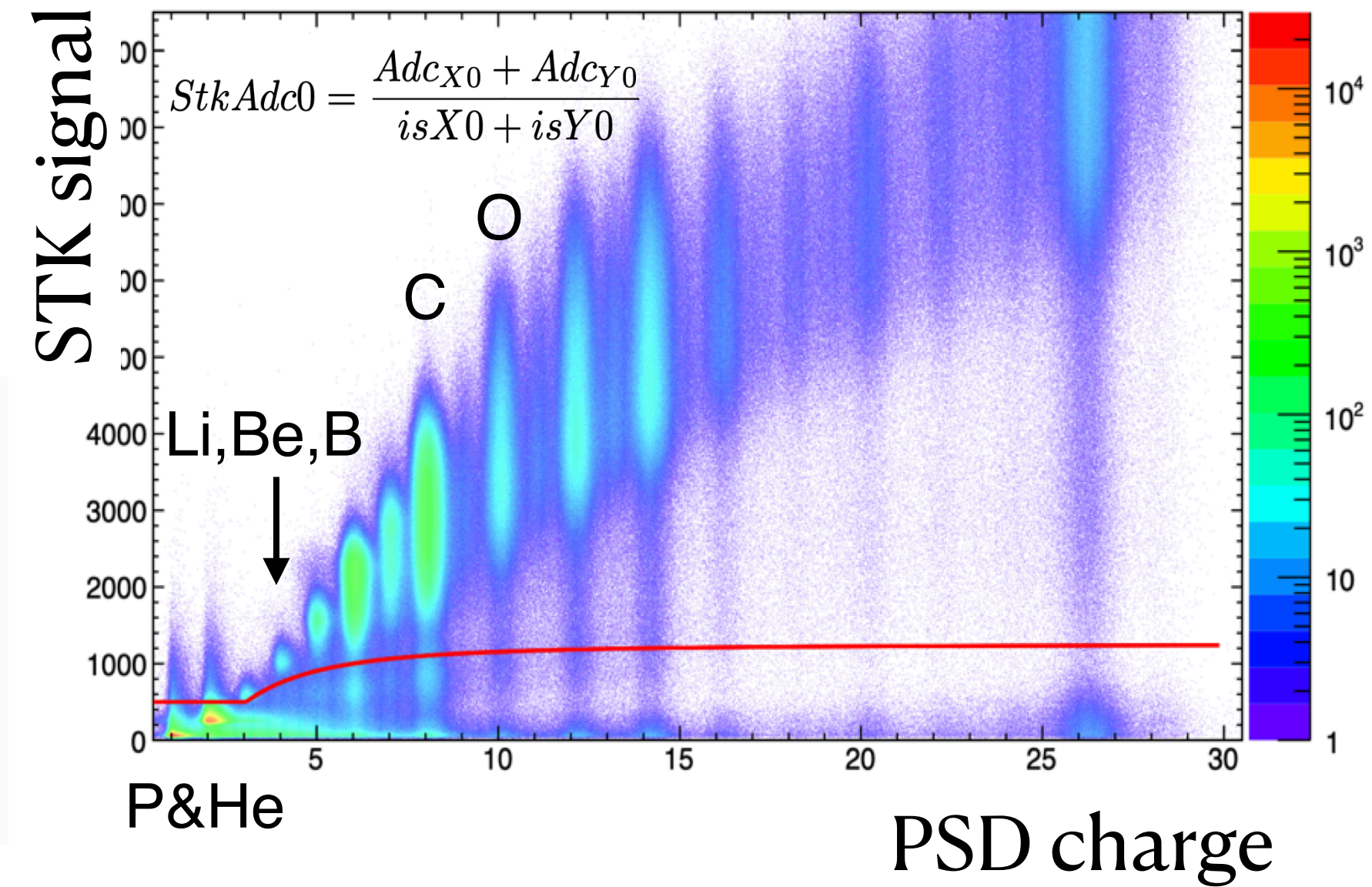
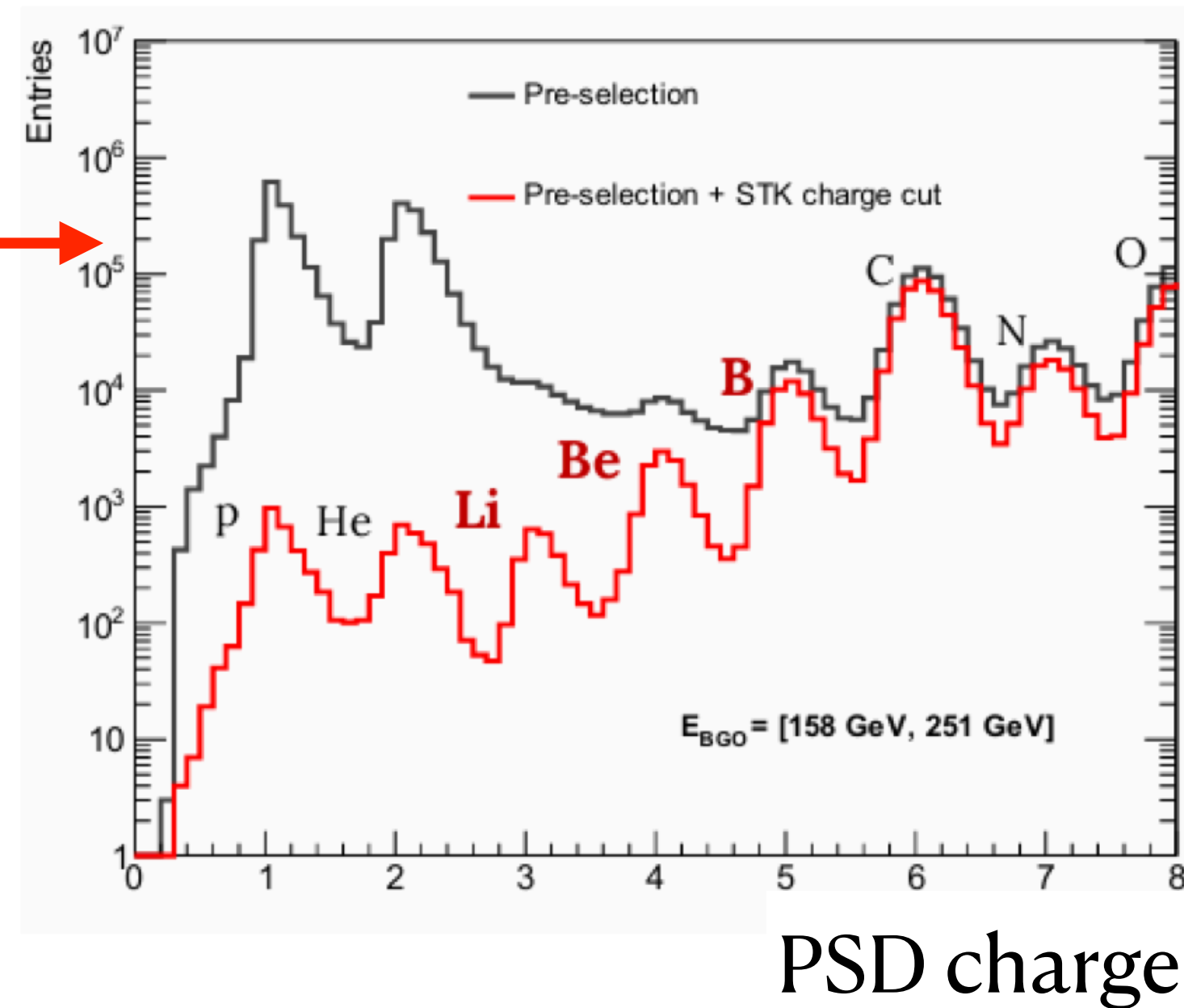
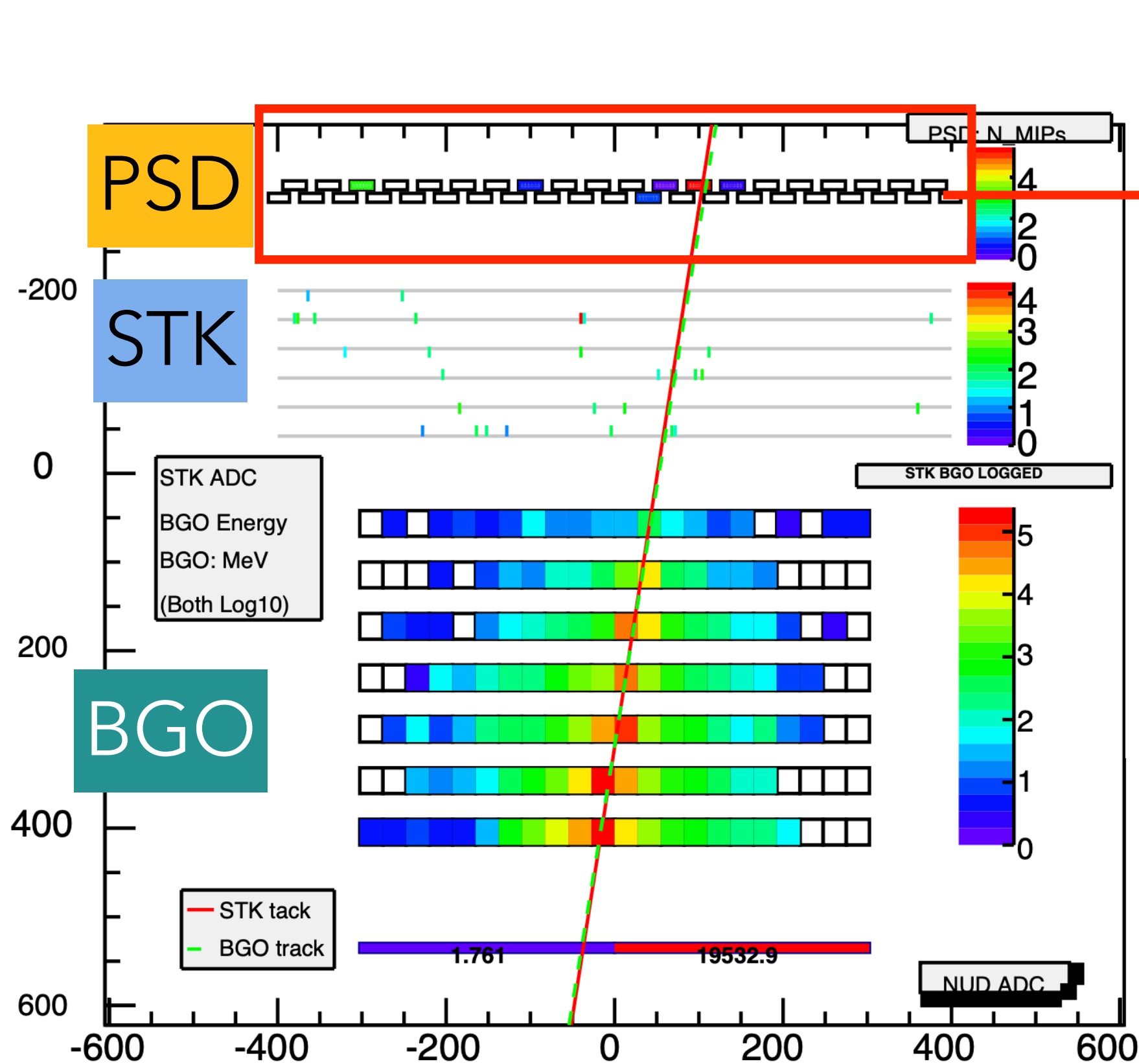
# 事例选择

- 高能触发
- 设置能量低阈以避免地磁截断的影响
- 选择落在视场 (FOV) 内的事例
  - 依靠径迹进行判断 (径迹重建: Kalman filter & Machine learning)



# 关键点 I : 电荷鉴别

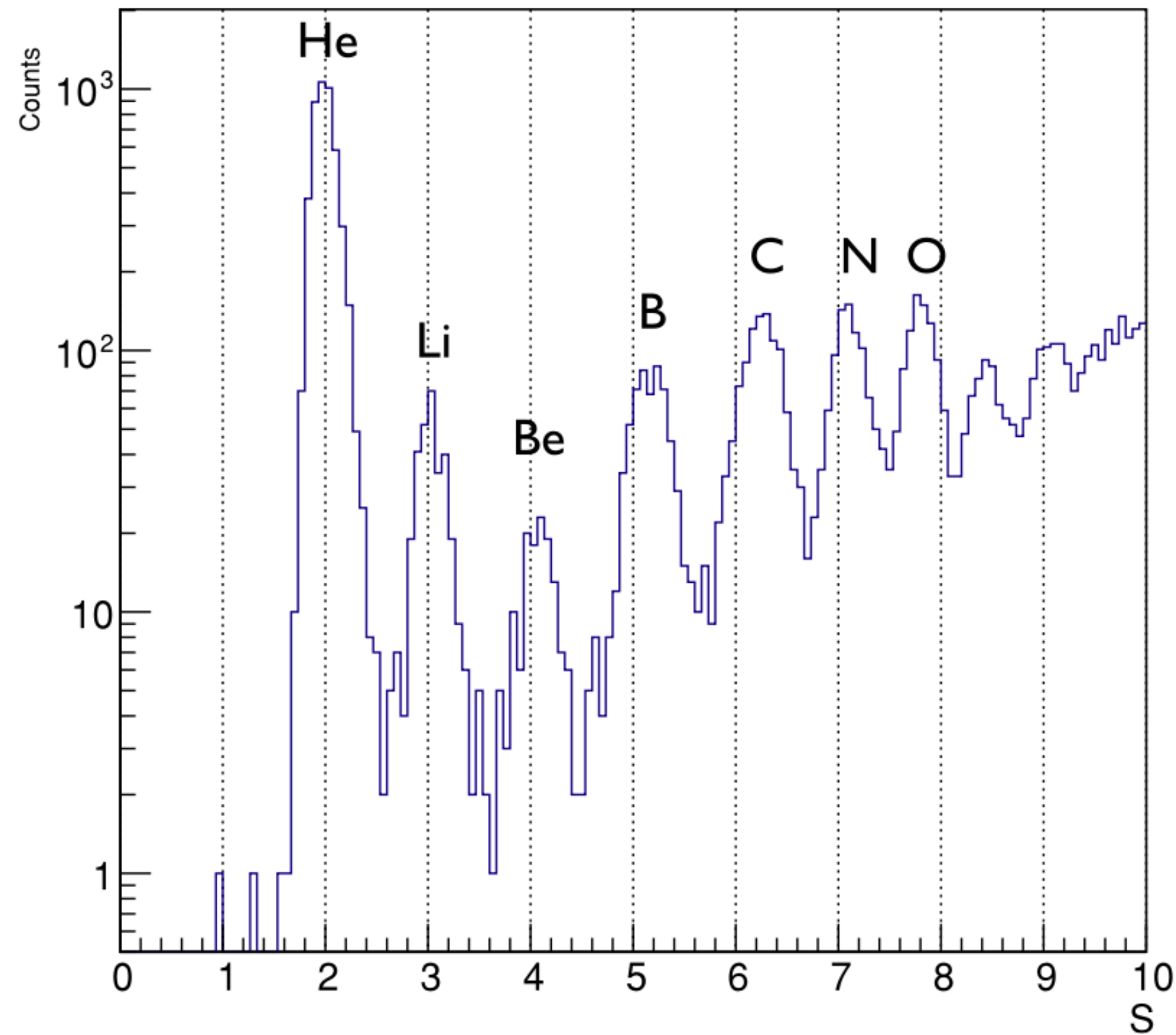
$N_{obs}$  : 观测事例数由电荷鉴别获得



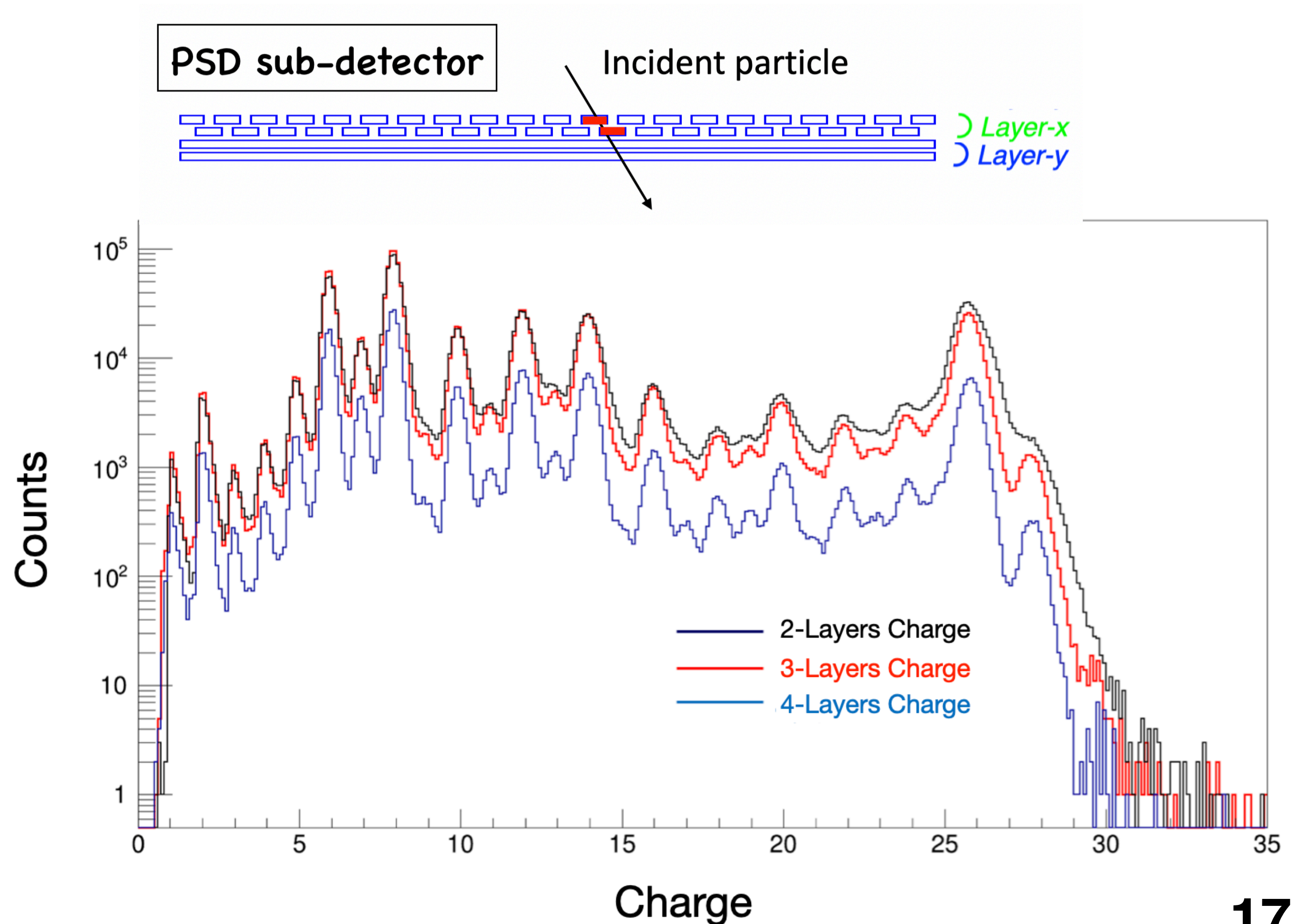
- 对碳、氧、铁:
  - PSD 是主要的电荷探测器
  - 利用STK的信号来抑制高丰度的质子、氦本底

# 关键点 I : 电荷鉴别

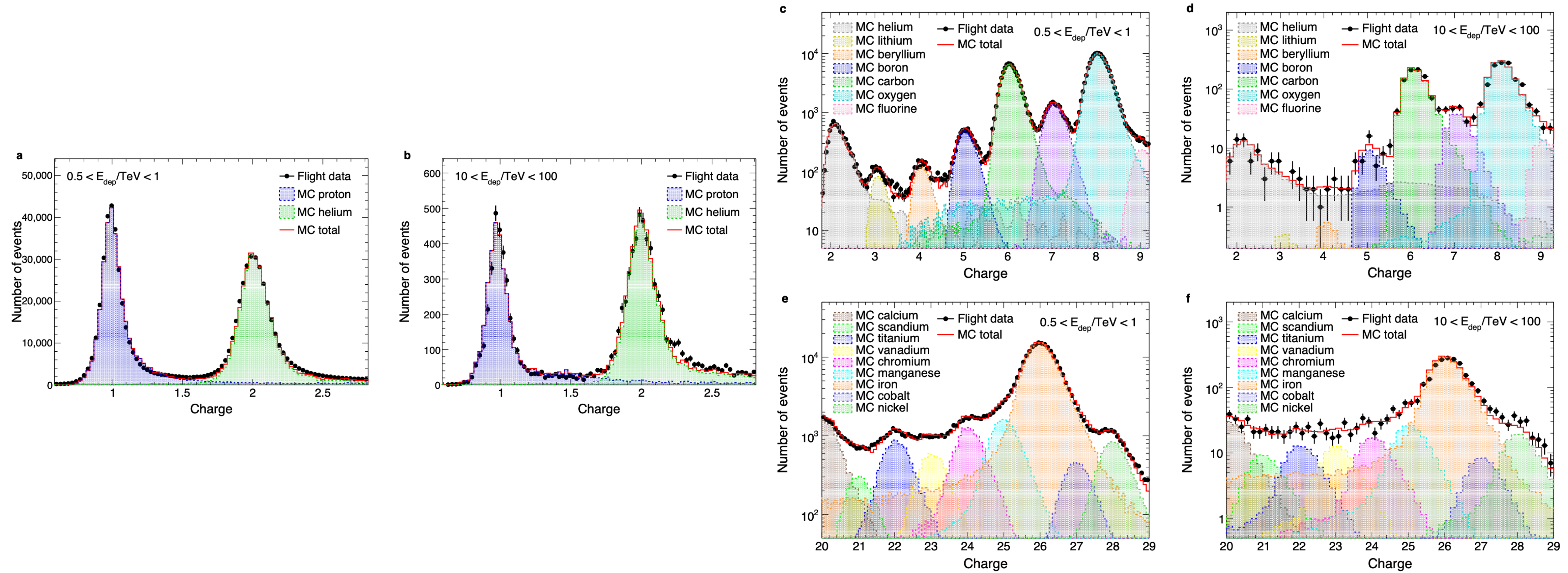
- STK 束流电荷谱



- PSD多小层电荷重建



# 关键点 I : 电荷鉴别



# 关键点 II : 能量测量

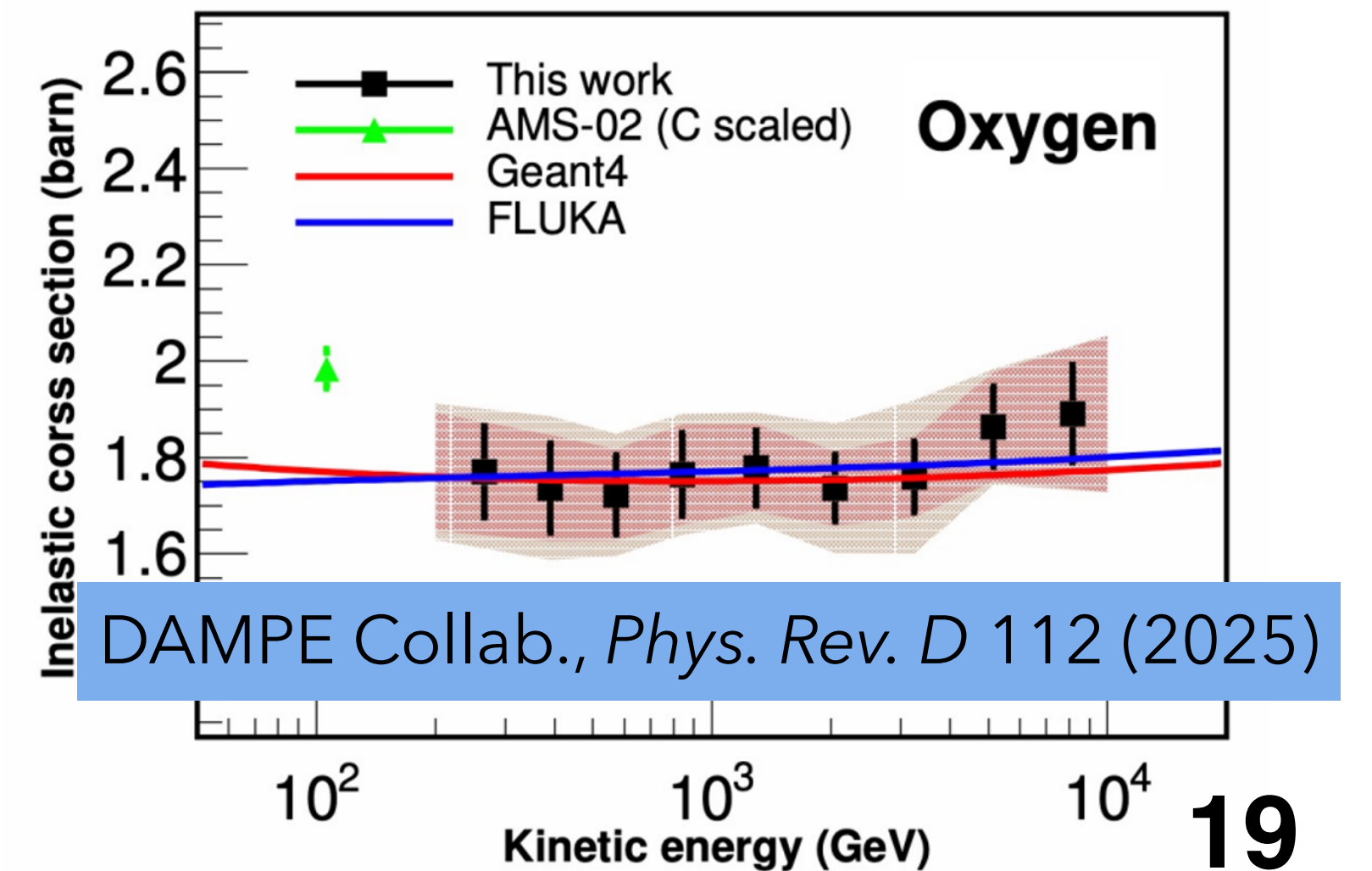
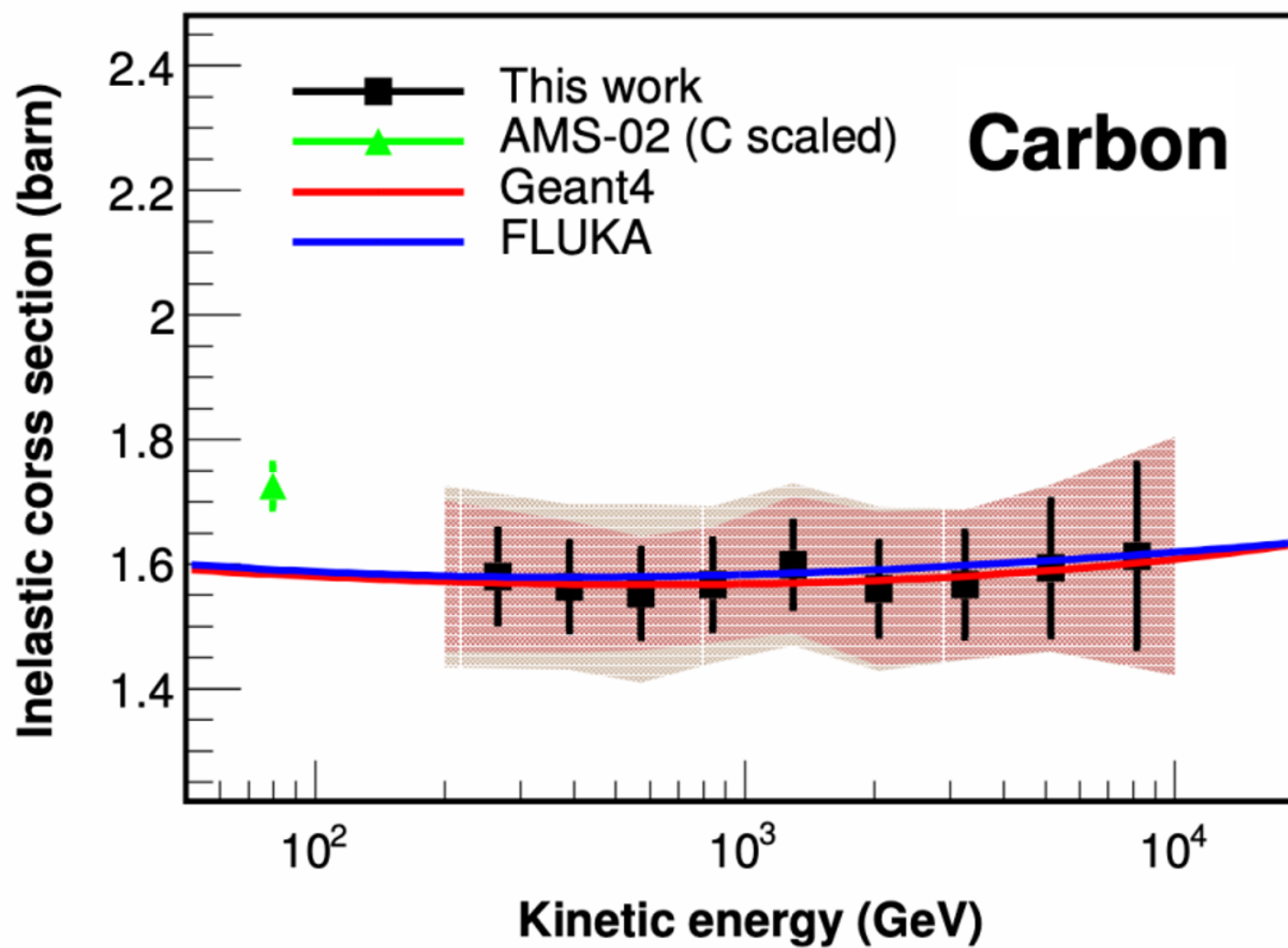
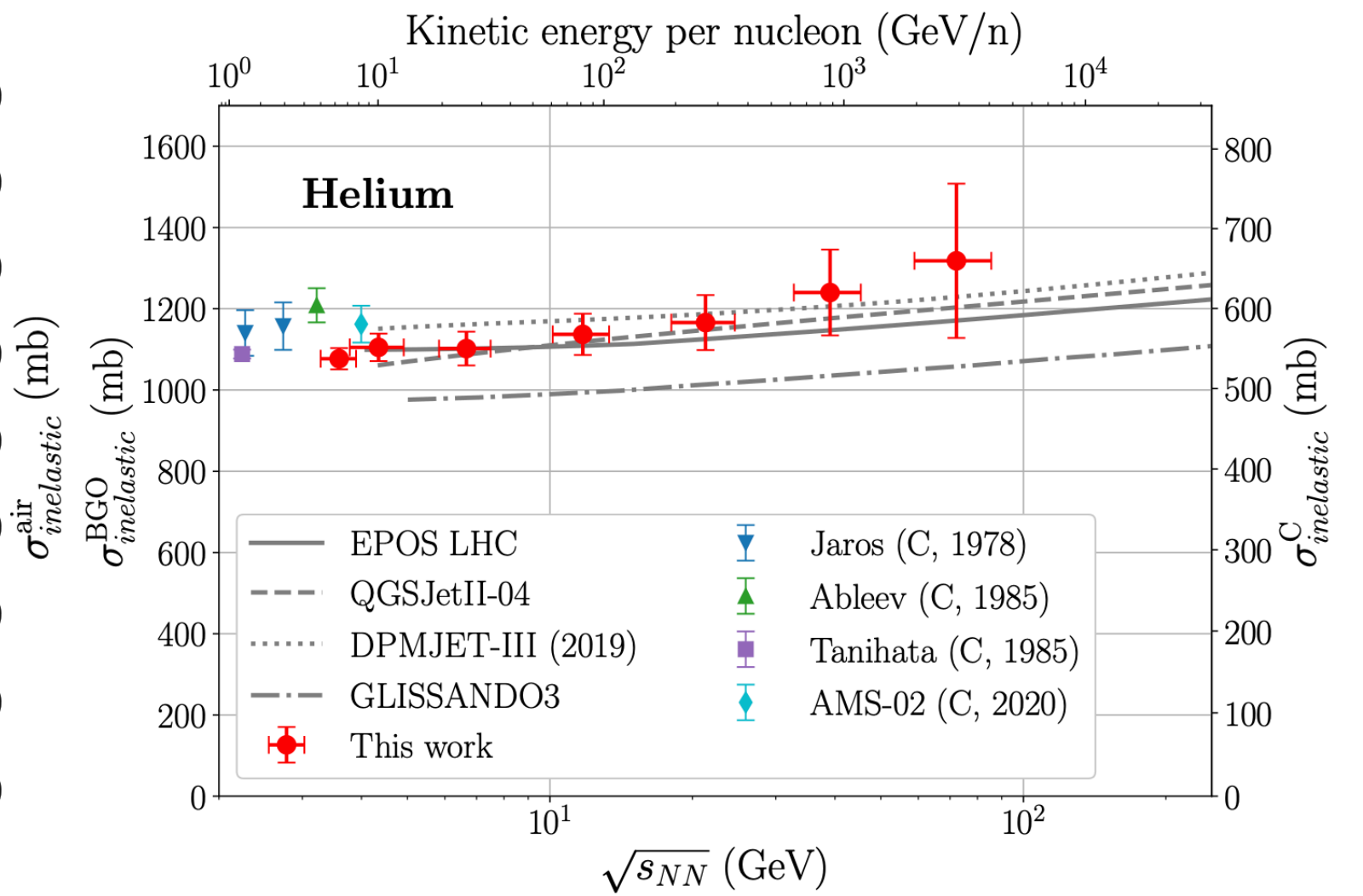
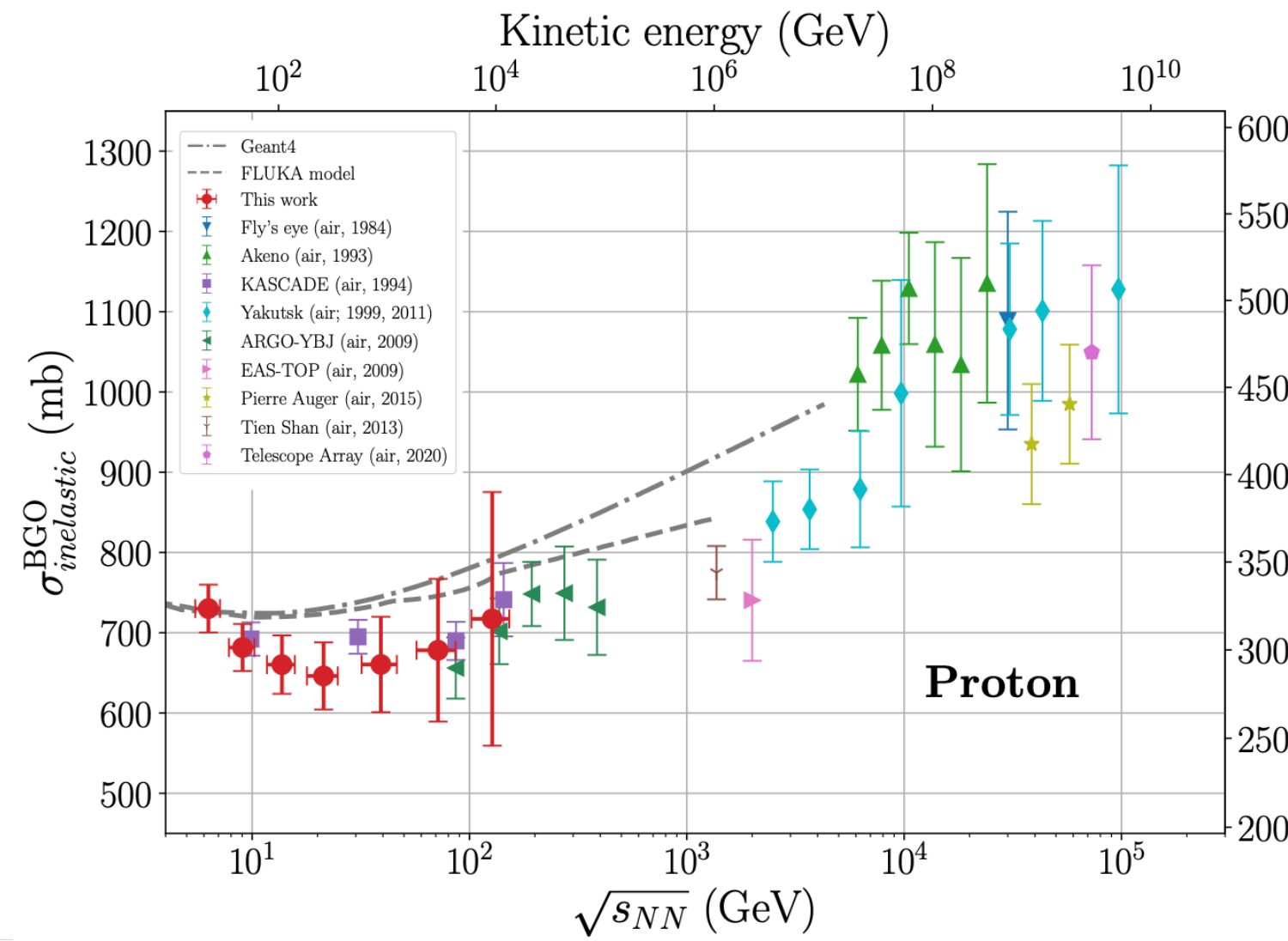
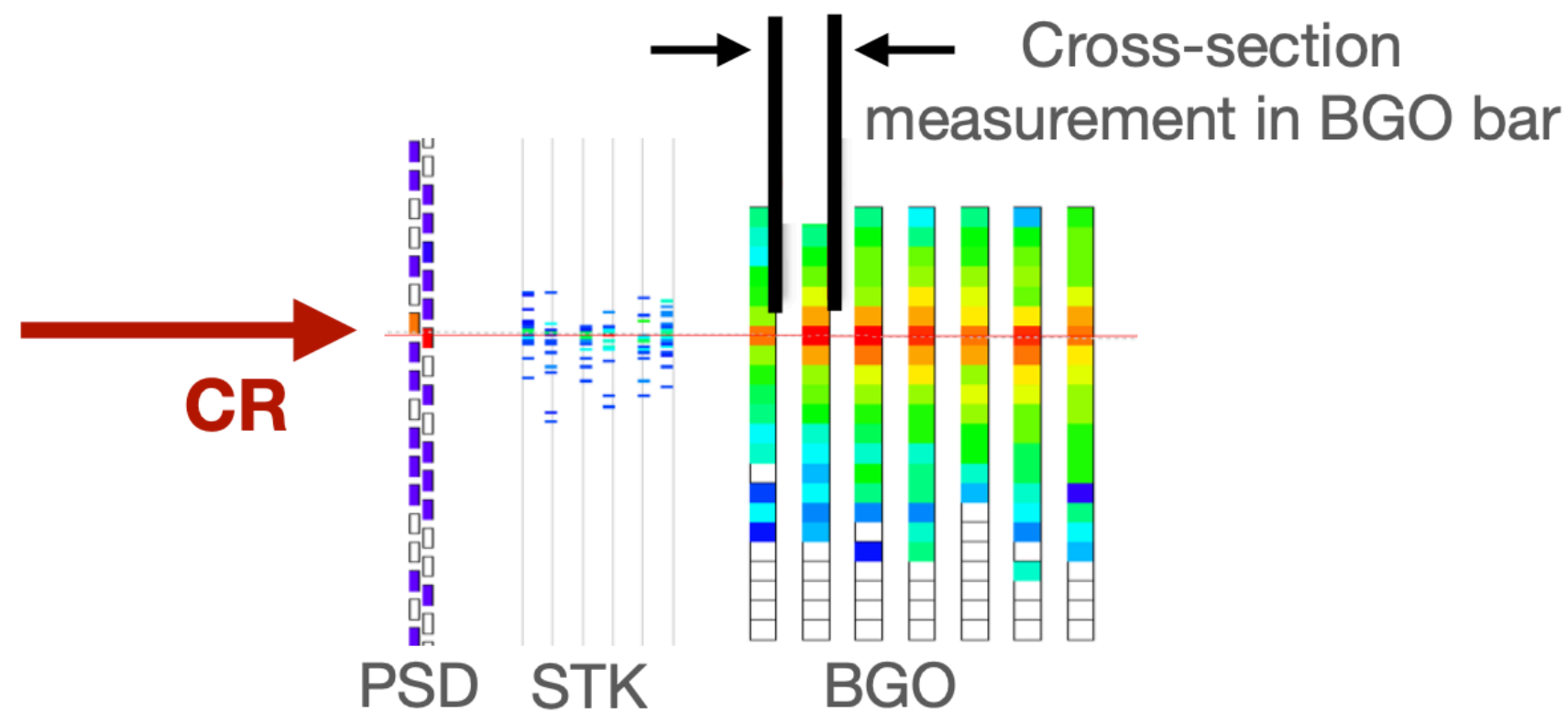
DAMPE Collab., *Phys. Rev. D* 111 (2025)

- 测量  $p, He, C, O$  的强相互作用截面至 10 TeV

A beam-target experiment

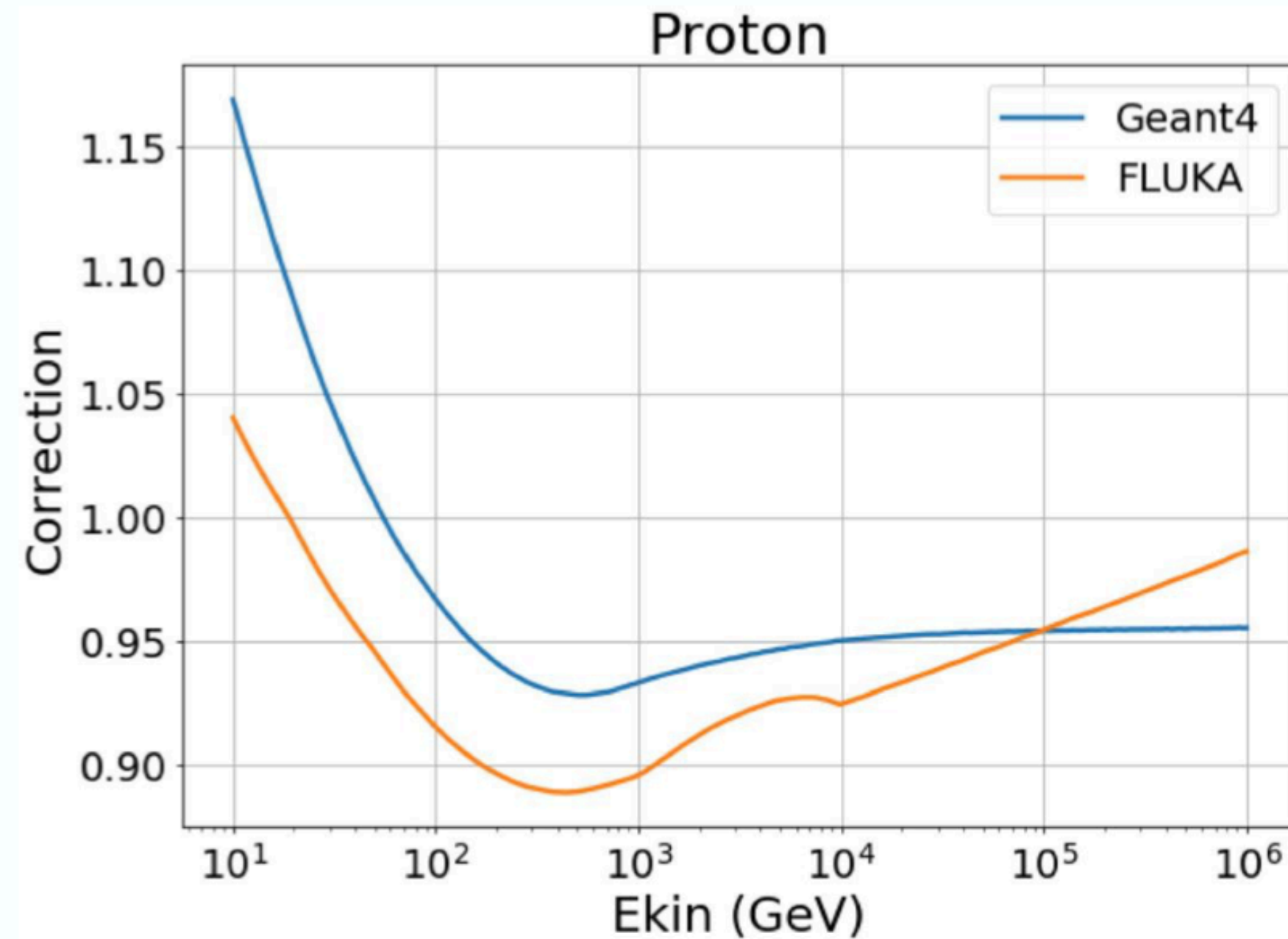
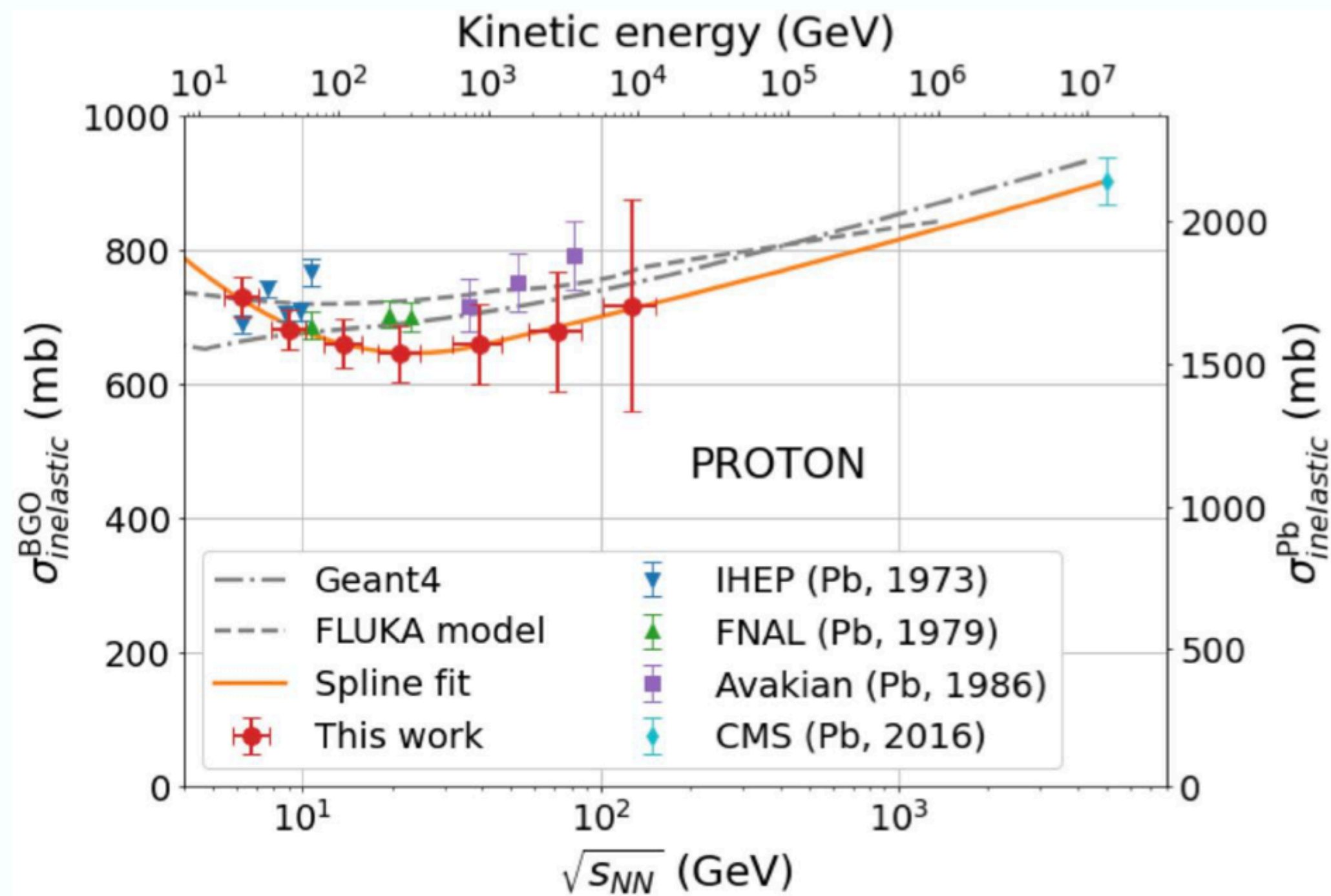
Beam: CR nuclei

Target: BGO ( $Bi_4Ge_3O_{12}$ )



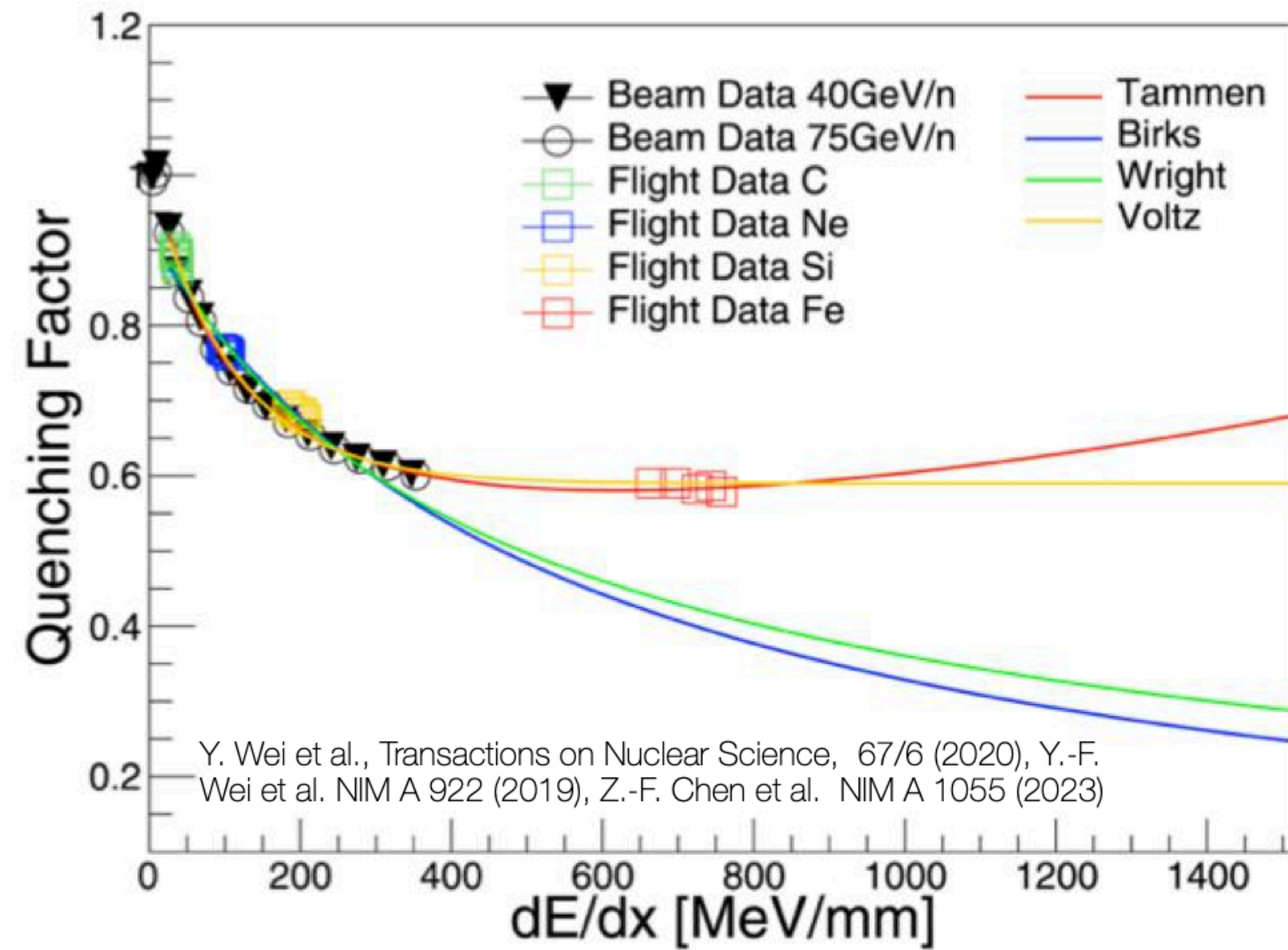
DAMPE Collab., *Phys. Rev. D* 112 (2025)

# 能量修正

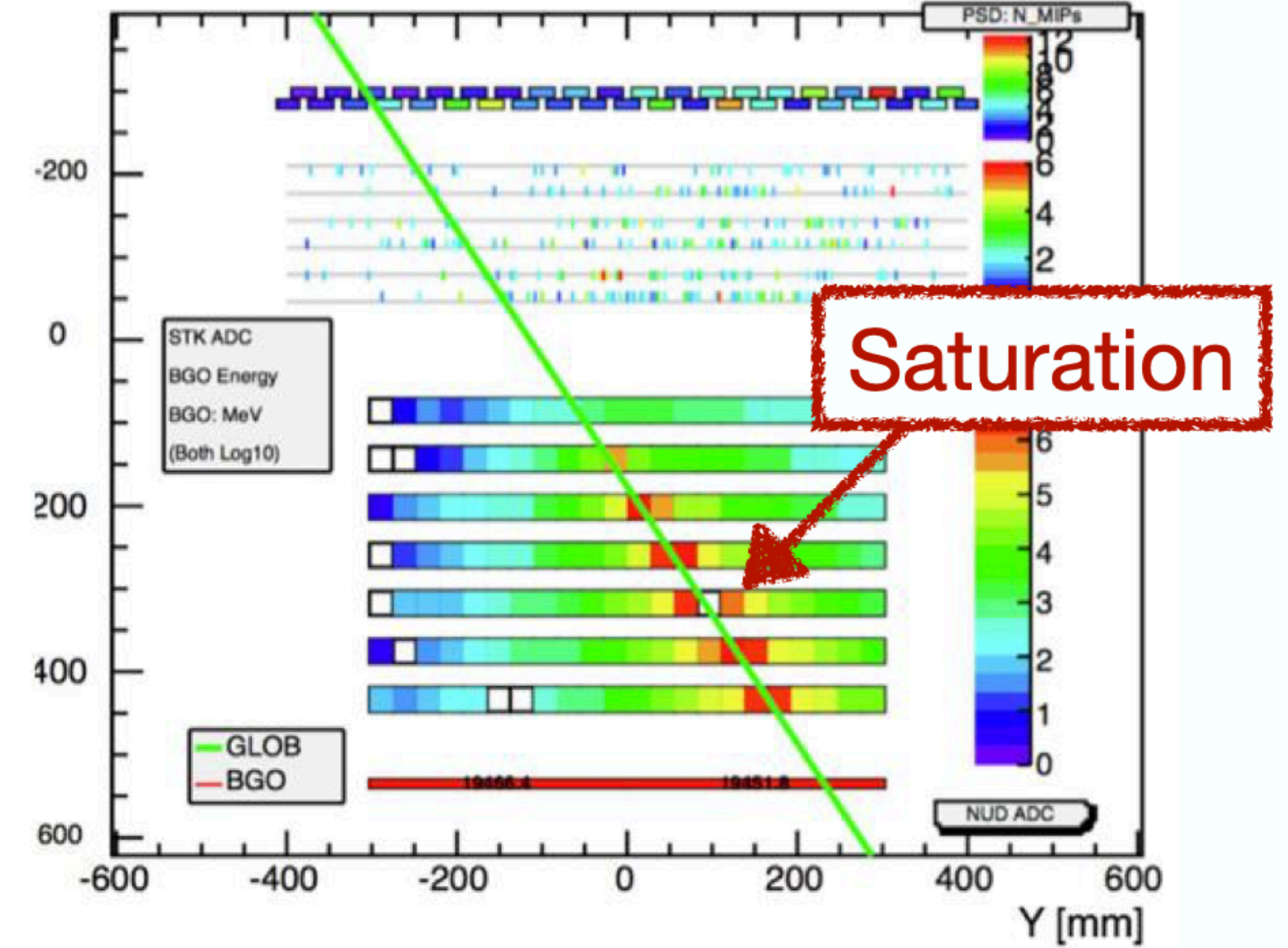


We use the measured DAMPE values to correct inelastic cross sections in Monte-Carlo

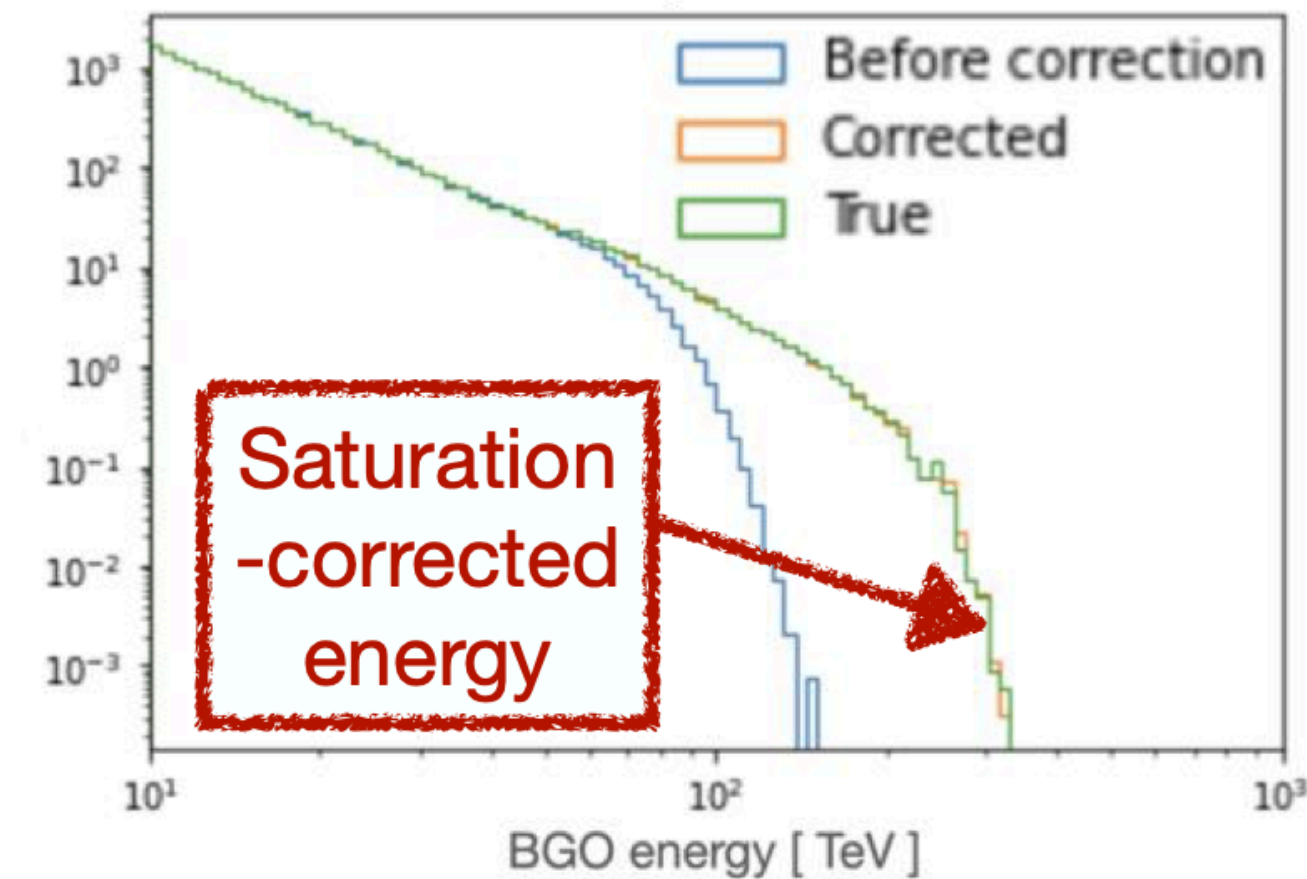
# 能量修正



C. Yue et al. NIM, A 984 (2020) 164645



M. Stolpovskiy et al. JINST (2022)



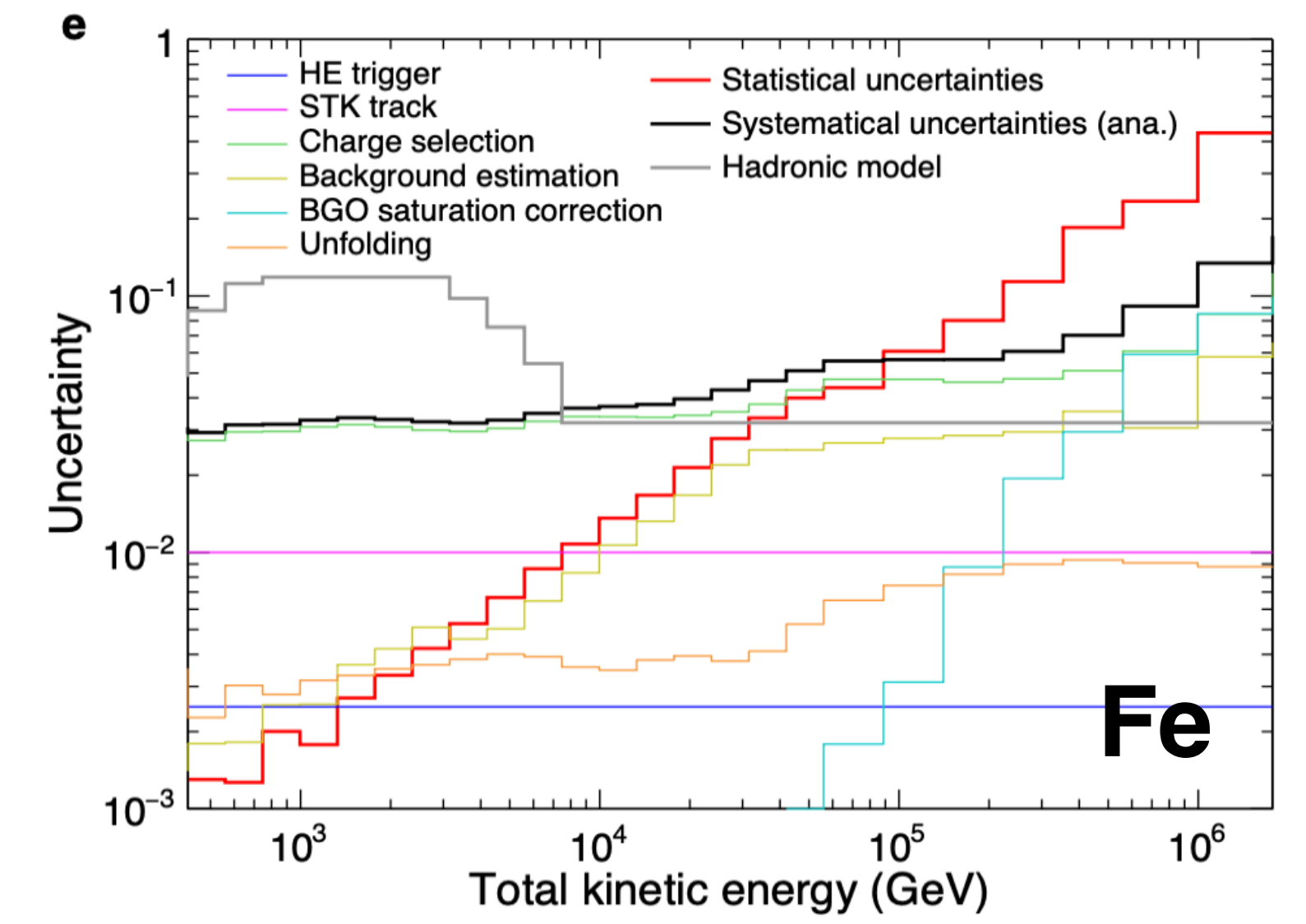
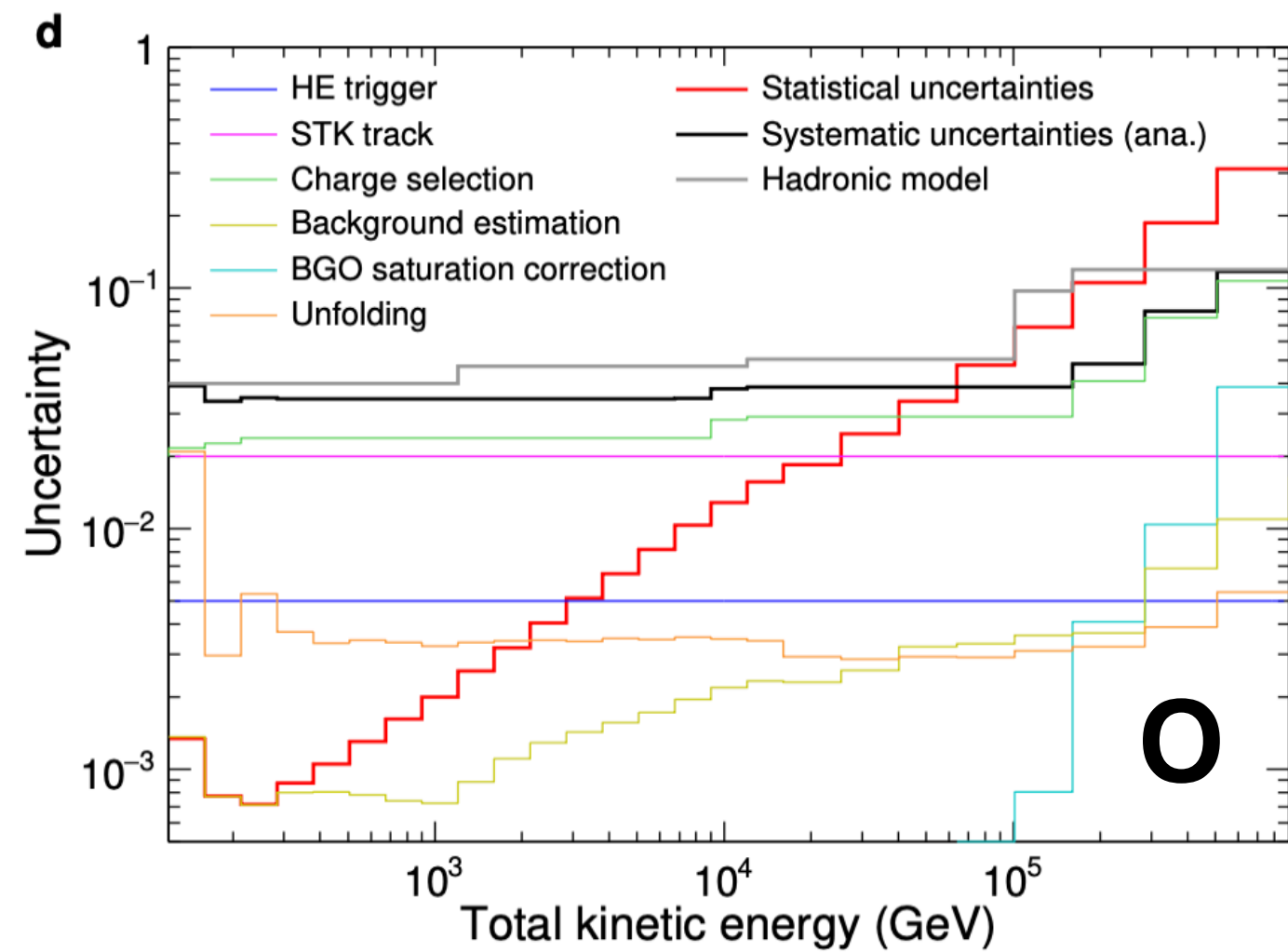
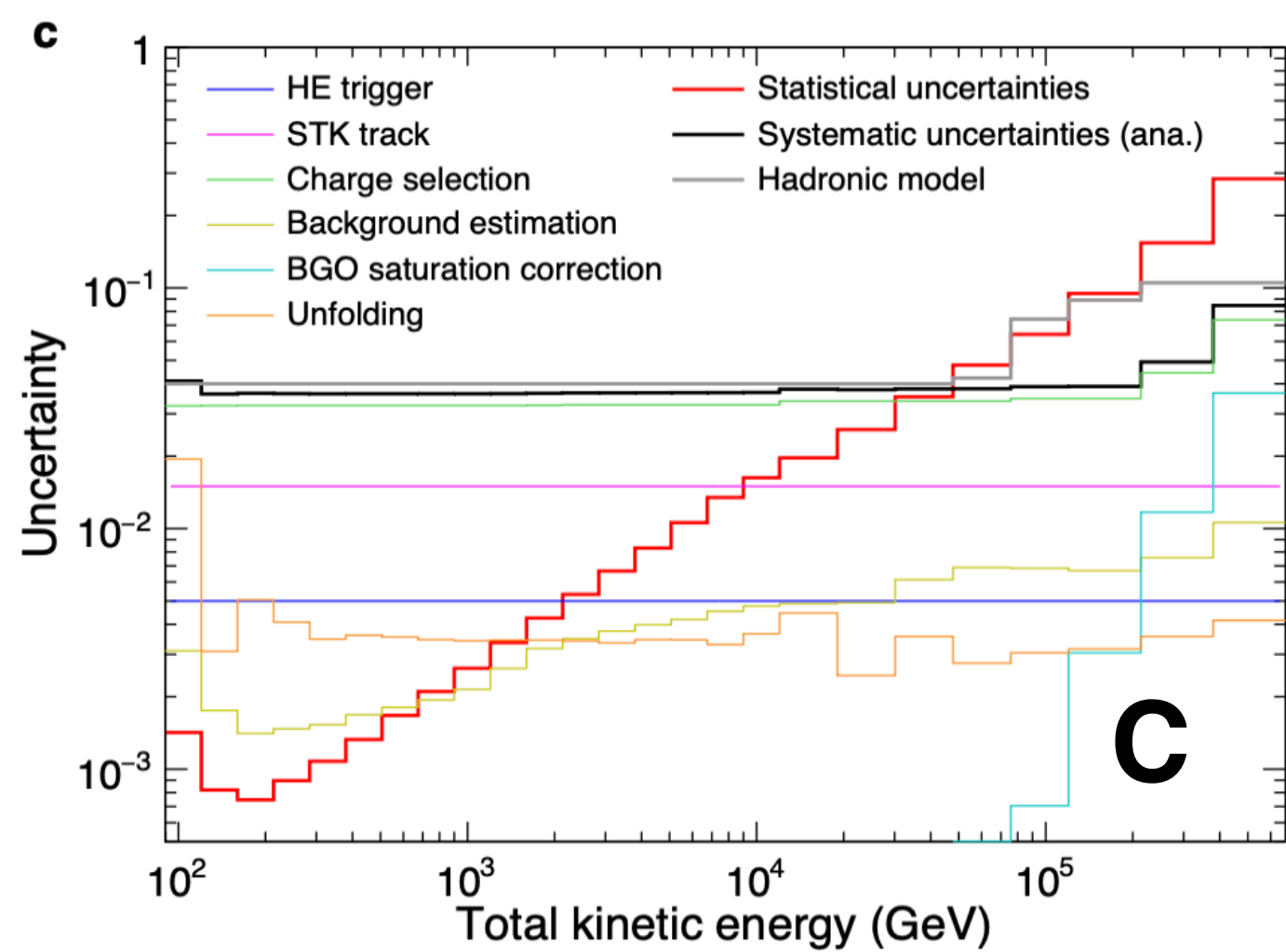
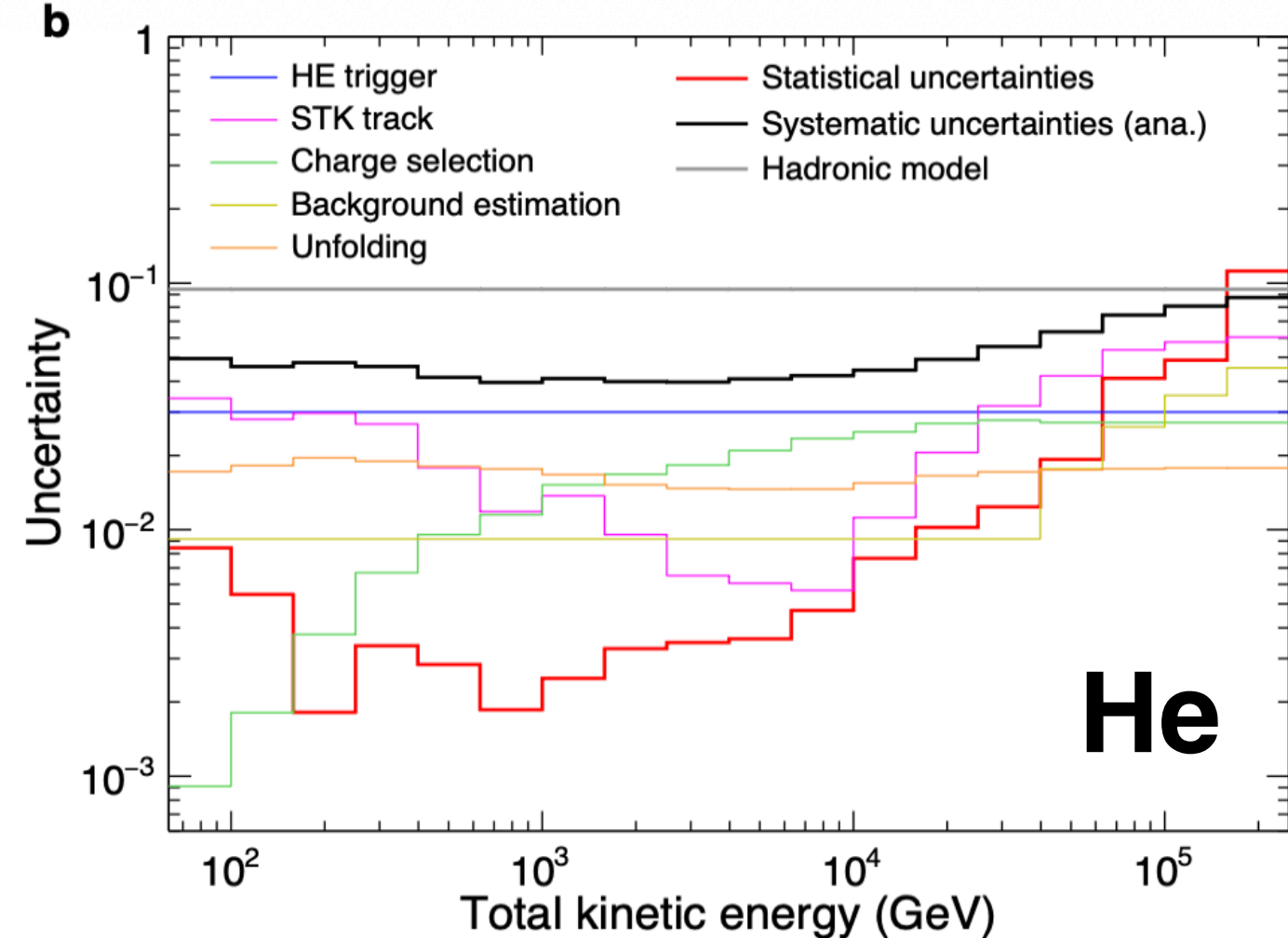
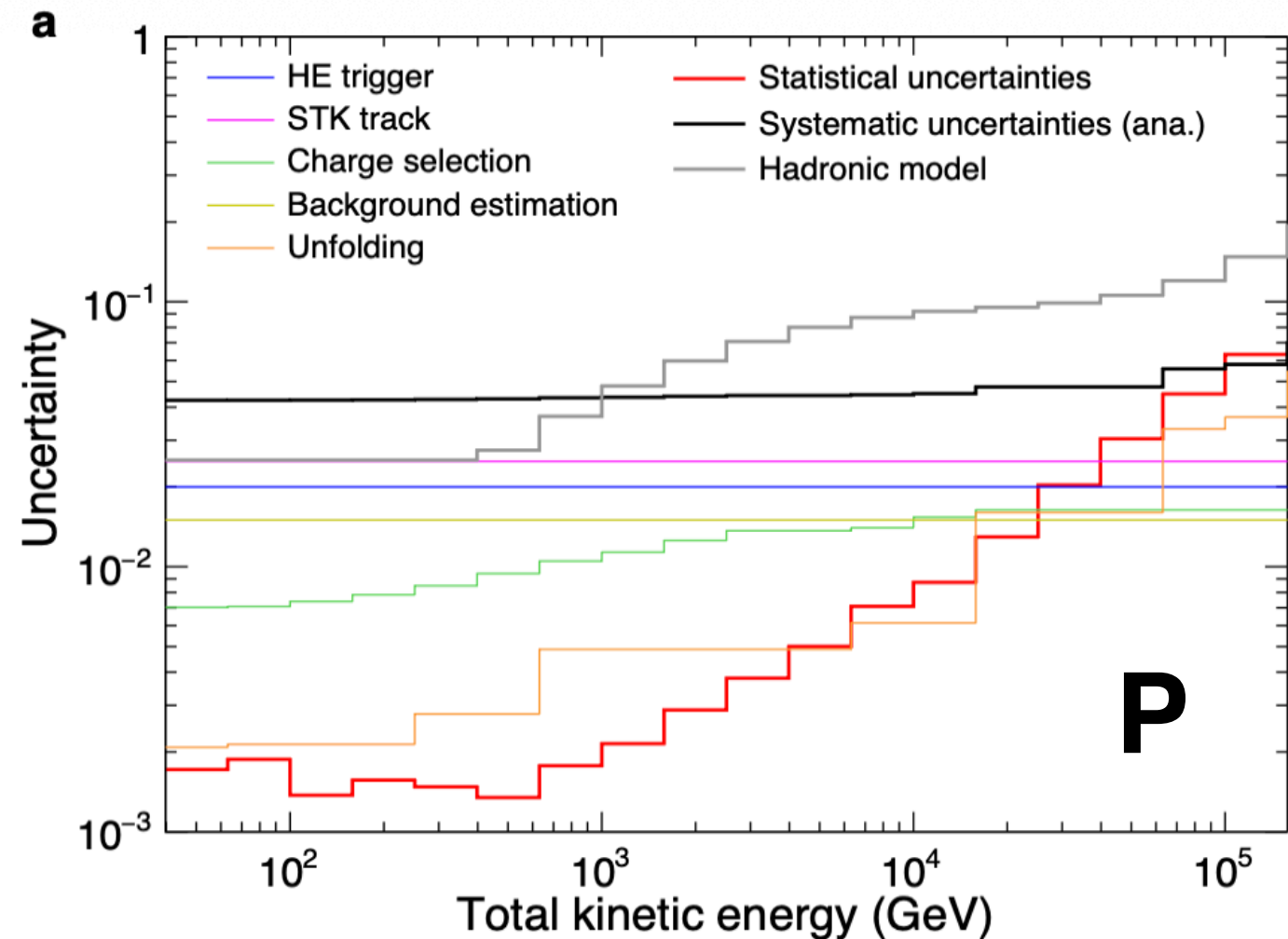
**Quenching** — nonlinear fluorescence response of BGO for large ionization

- correction derived from beam test and flight data
- implemented in the detector simulation, ~3% effect for  $p$  at 10 GeV

**Saturation** of BGO bars at ~100 TeV CR kinetic energy:

- corrections derived using analytical and ML methods

# 误差



# 可能的理论解释

- 理论解释：袁强 (PMO) 等
- 能谱：背景+邻近源代数 $\sum$ ；各向异性：背景+邻近源矢量 $\sum$

