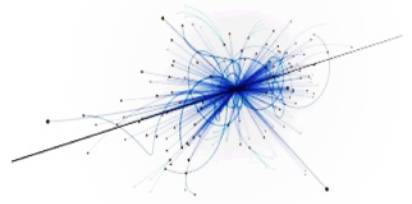


粒子物理与原子核物理

Particle and Nuclear Physics, Department of Modern Physics of USTC



DAMPE实验寻找分数电荷粒子

魏逸丰

(On behalf of the DAMPE USTC group)

中国科学技术大学

核探测与核电子学国家重点实验室

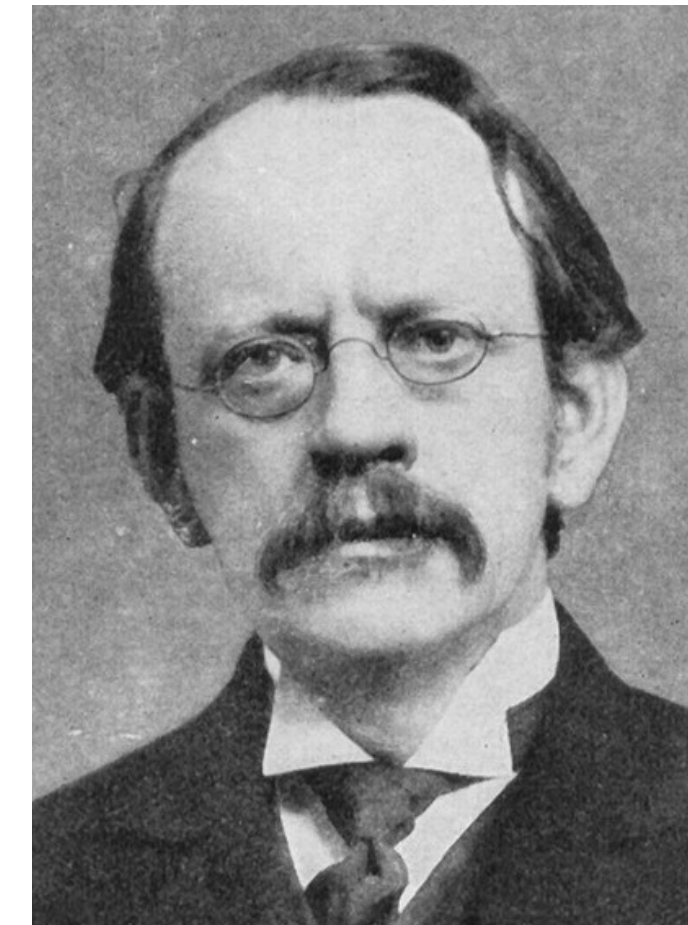
2022.10.14

大纲

- 分数电荷粒子及其寻找历史
- DAMPE实验简介
- DAMPE实验寻找分数电荷粒子的研究
- 总结与展望

带电粒子的电荷量

- 1897年汤姆逊发现电子
- 1909年密立根油滴实验
 - 首次测量了电子的电荷量
- 带电粒子的电荷量都是电子电荷的整数倍
- 是否存在非整数的电荷量?



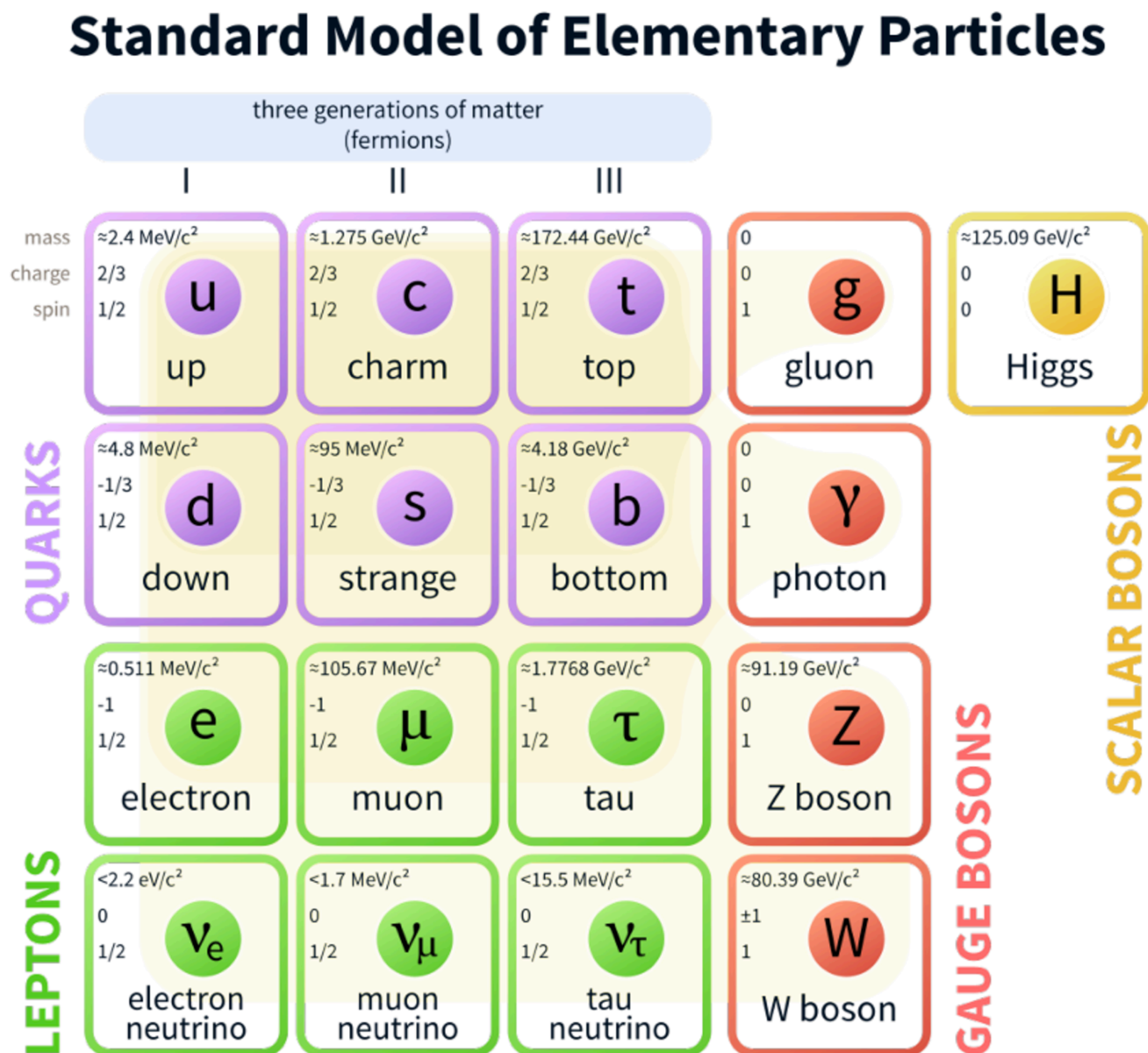
J. J. Thomson



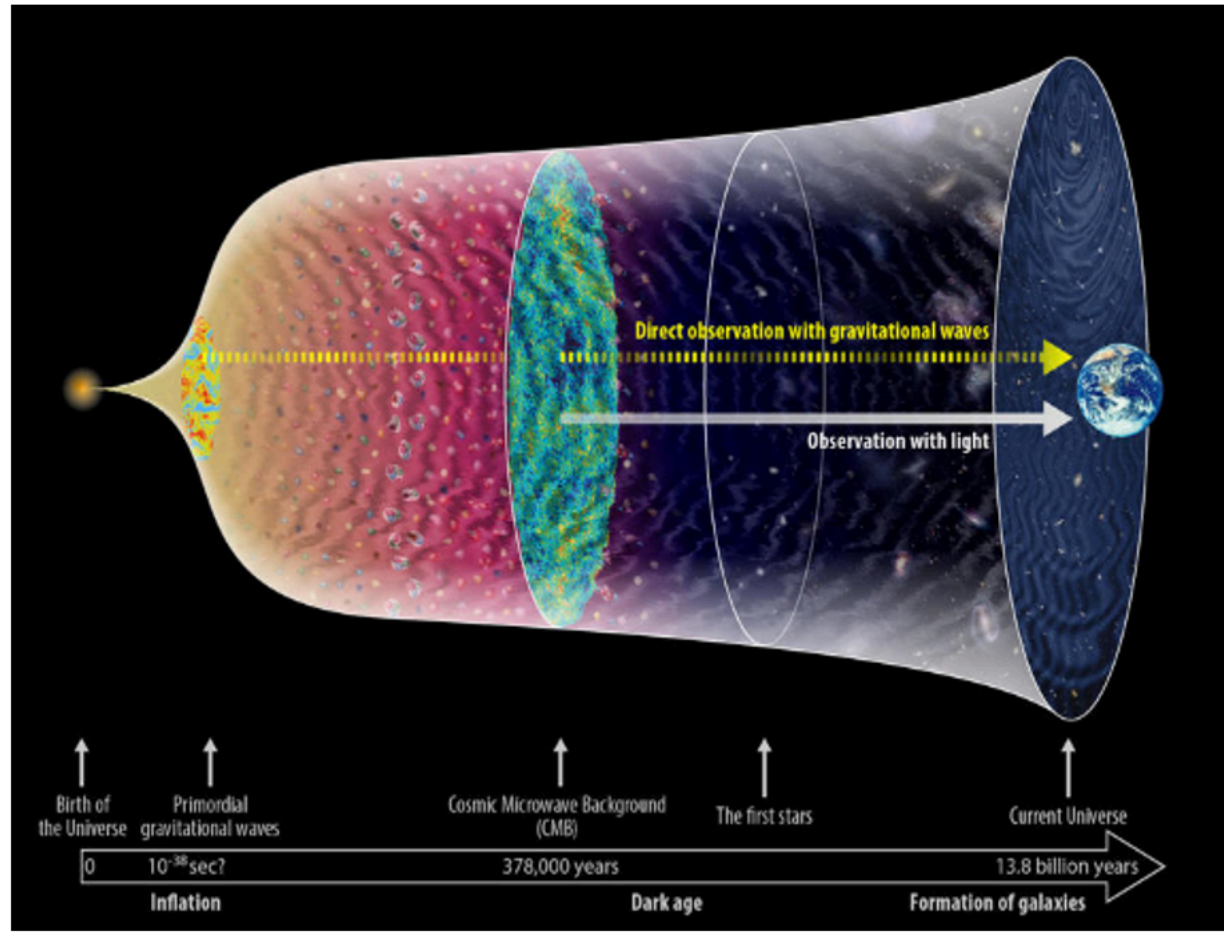
R. A. Millikan

标准模型和分数电荷粒子

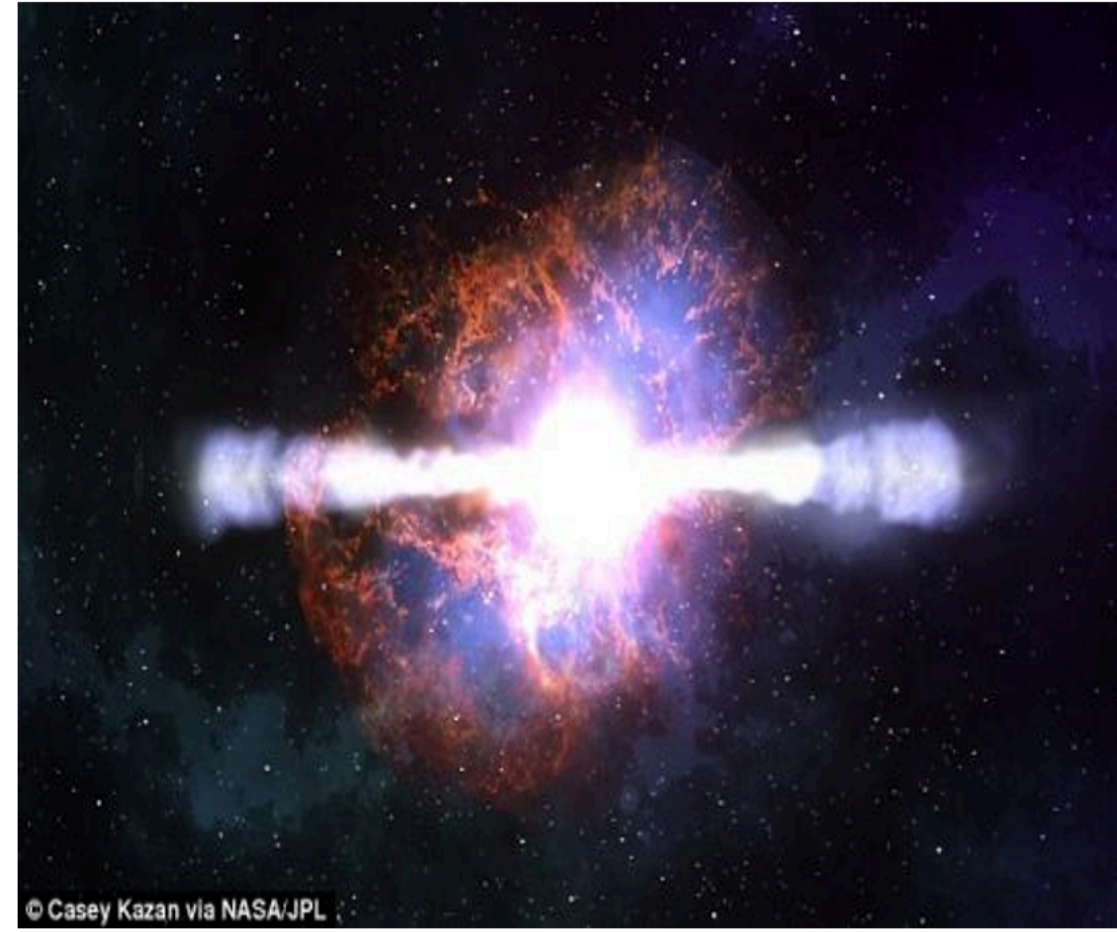
- 粒子物理标准模型
 - 夸克携带非整数电荷
 - 色禁闭导致不存在自由夸克
- 标准模型非万物理论
 - 暗物质与暗能量、中微子质量、正反物质不对称、引力.....
 - 标准模型外是否存在分数电荷粒子 (Fractional charged particle, FCP) ?
- 大统一理论 SU(5)、SU(8)、SO(14), 弦论.....
- 分数电荷粒子的可能
 - 自由大质量轻子型粒子



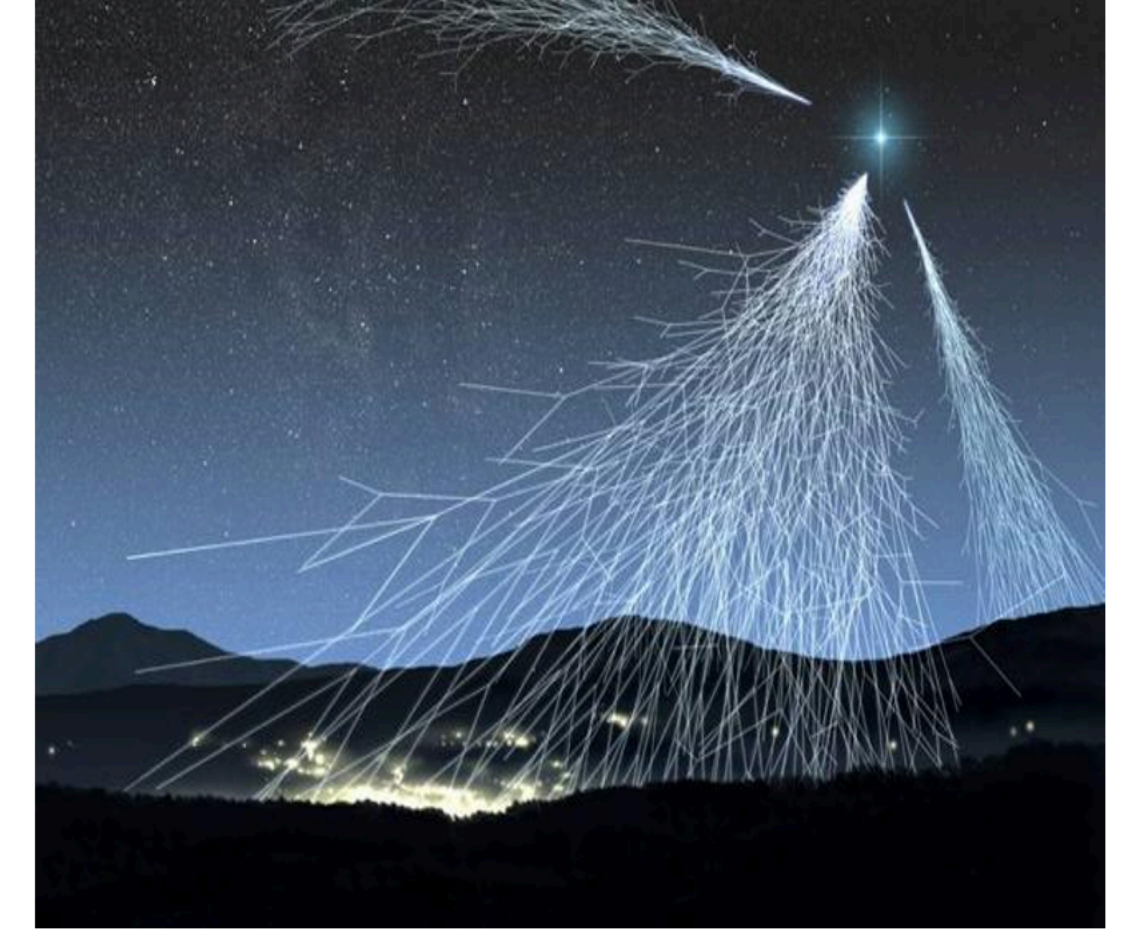
宇宙线中分数电荷粒子可能的来源



宇宙演化早期



超新星爆发



广延大气簇射

- 基于**大质量轻子型粒子**的假设，宇宙线分数电荷粒子有三个可能来源：
 - 宇宙大爆炸早期产生，稳定存在于一些大块物质中
 - 剧烈的天体活动中产生，经过漫长距离的传播到达太阳系
 - 高能粒子与地球大气的簇射产生，簇射中心可能会产生自由分数电荷粒子

实验寻找分数电荷粒子

疑似分数电荷粒子的信号

- 1969 年 McCusker和Cairns在云室中观测到疑似分数电荷粒子的信号
 - 对66240个事例进行了观察
 - 单电荷径迹上的液滴数为 $40.7 \pm 1.0 \text{ cm}^{-1}$
 - 径迹R上的液滴数为 $16.2 \pm 2.5 \text{ cm}^{-1}$

PHYSICAL REVIEW LETTERS

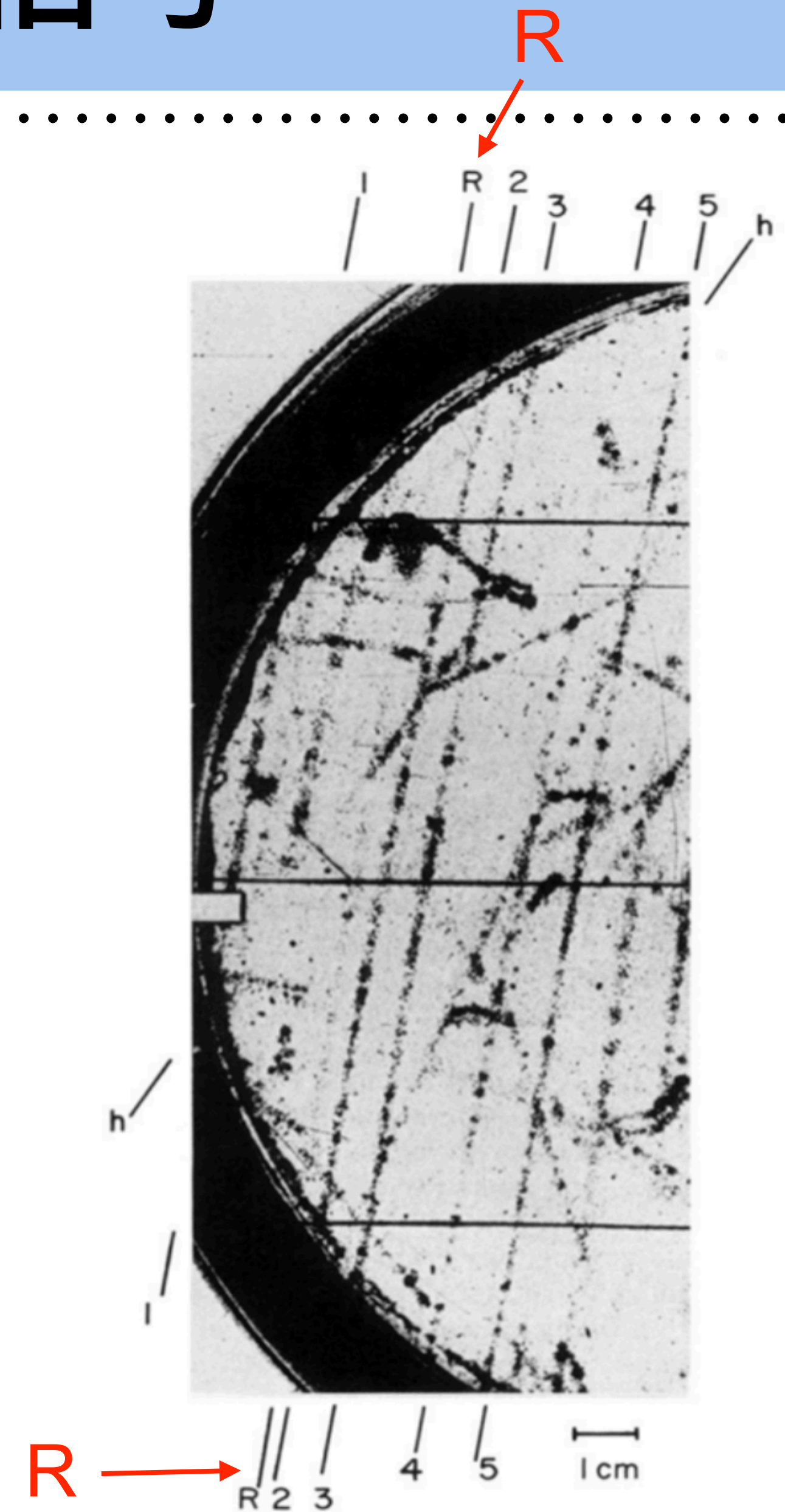
Highlights Recent Accepted Collections Authors Referees

Evidence of Quarks in Air-Shower Cores

C. B. A. McCusker and I. Cairns

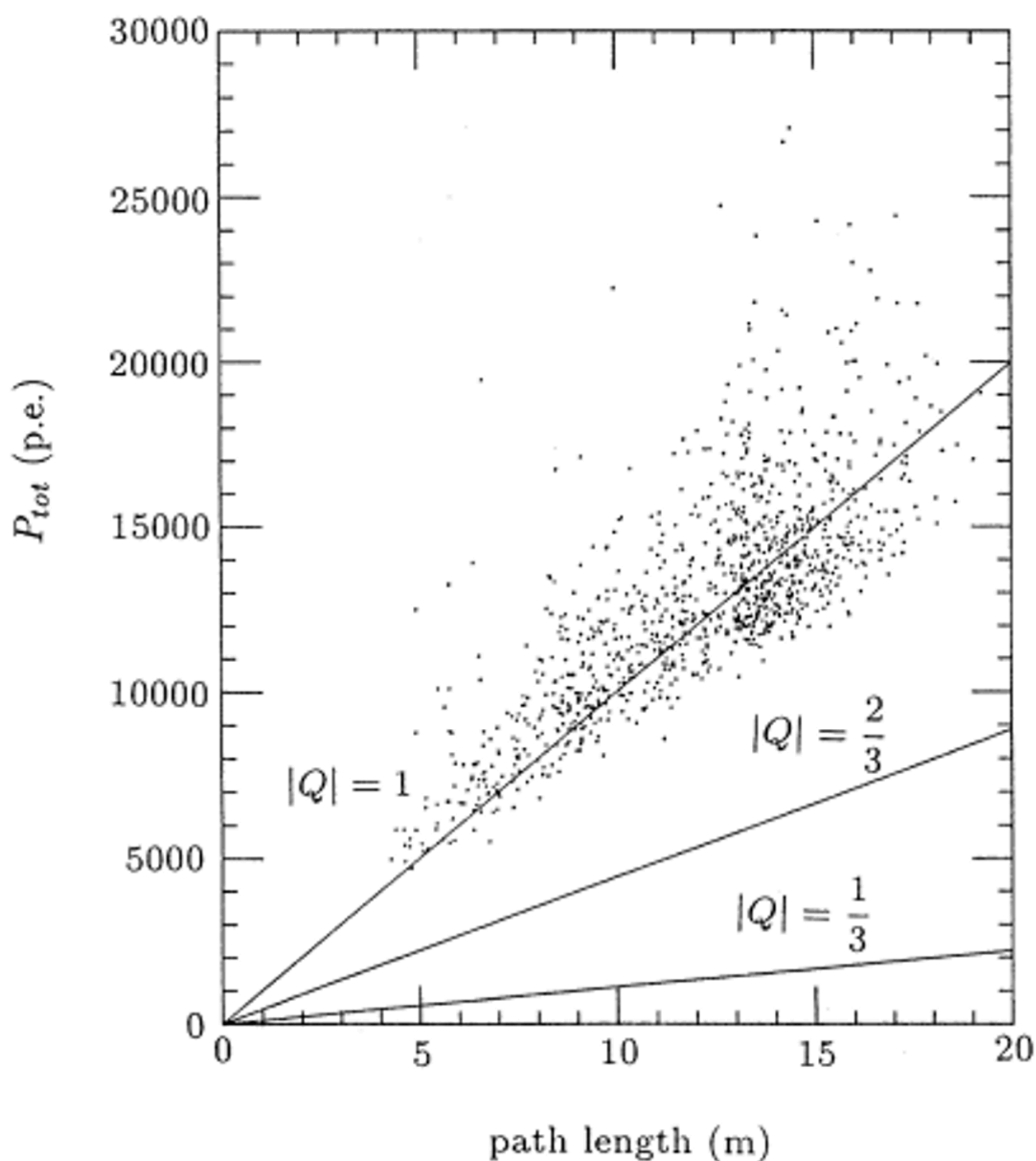
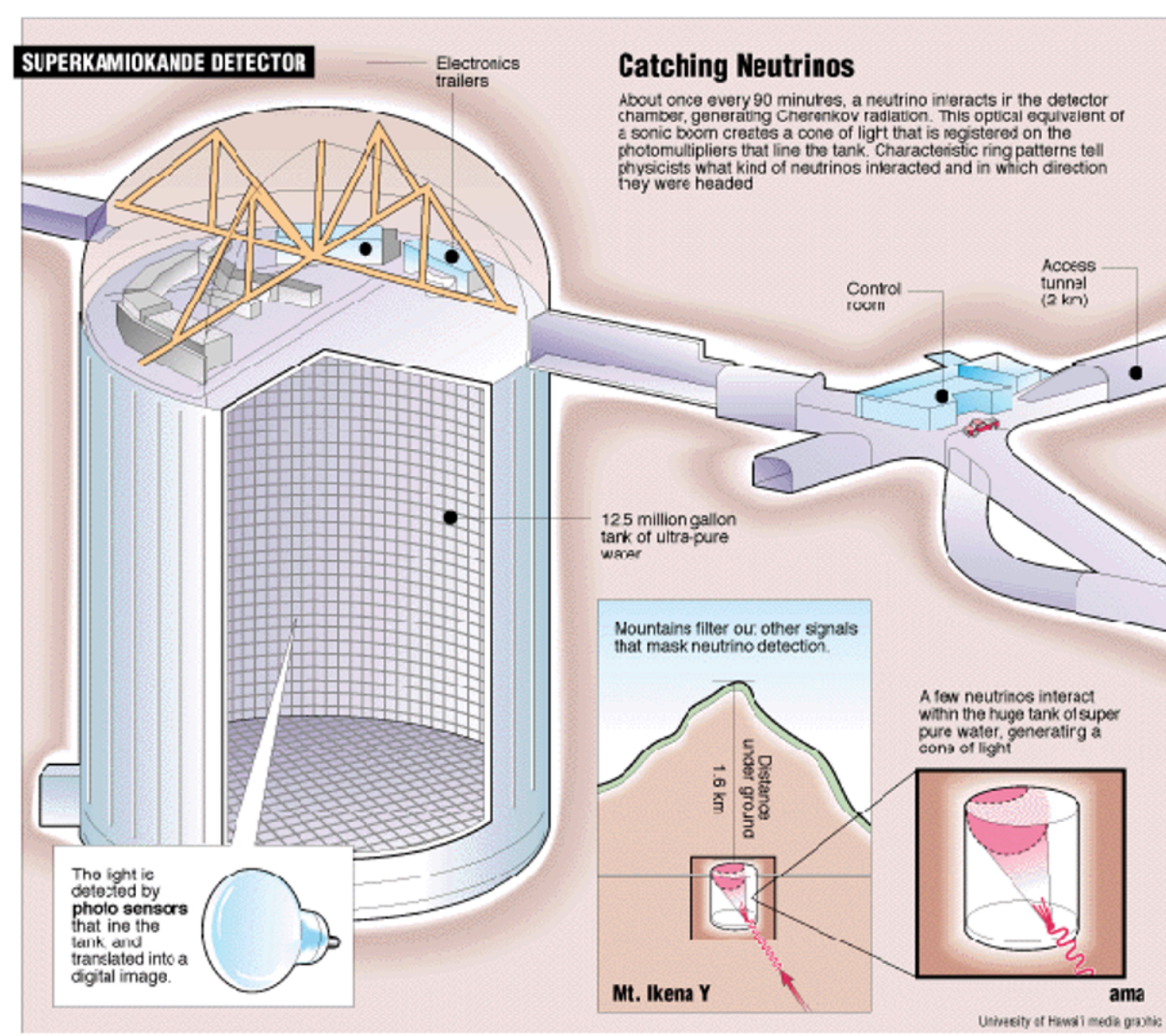
Phys. Rev. Lett. **23**, 658 – Published 22 September 1969

没有定论，没有其他实验证实



地下实验

Kamiokande II 水切伦科夫探测器



90%置信度下通量上限:

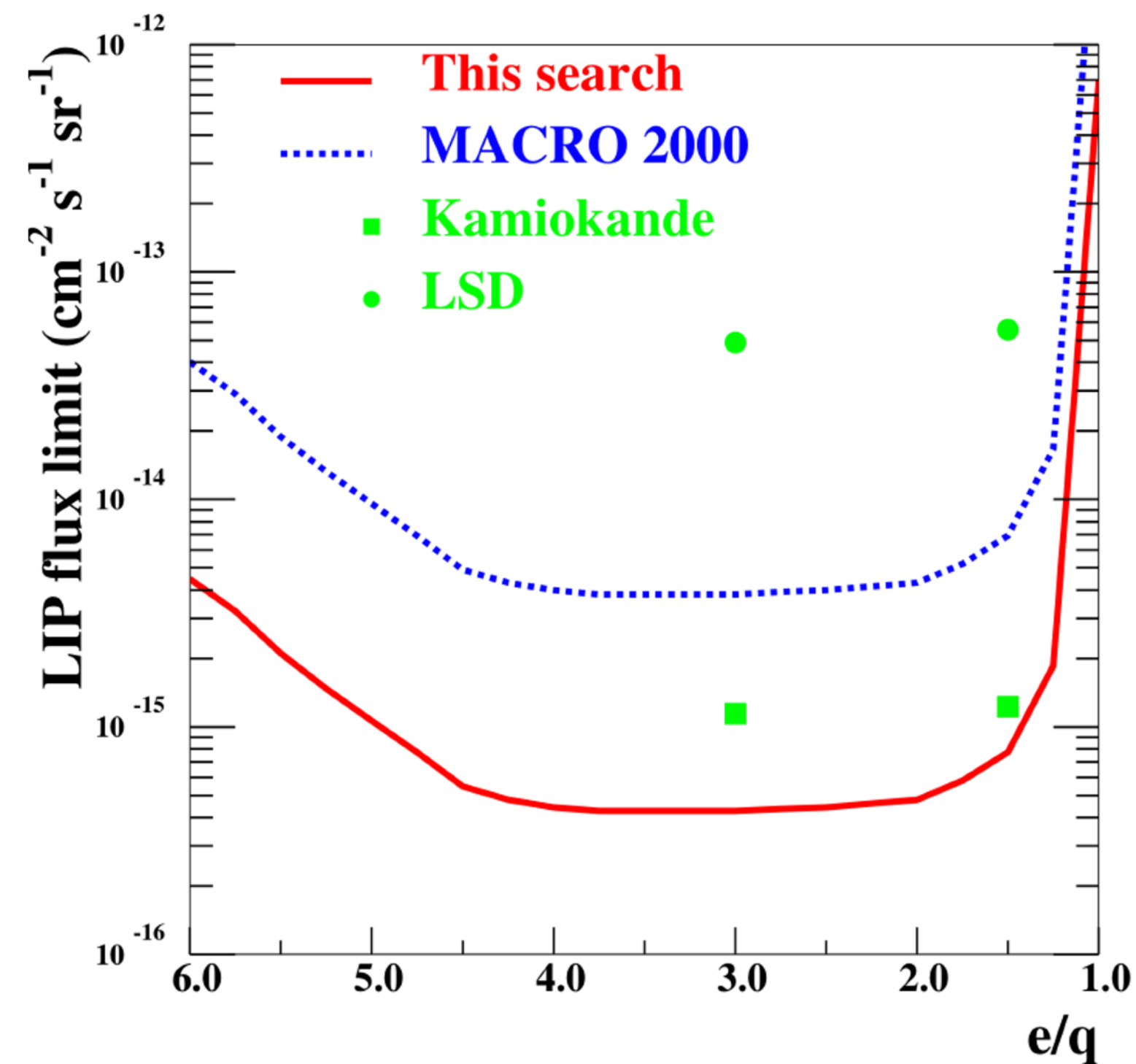
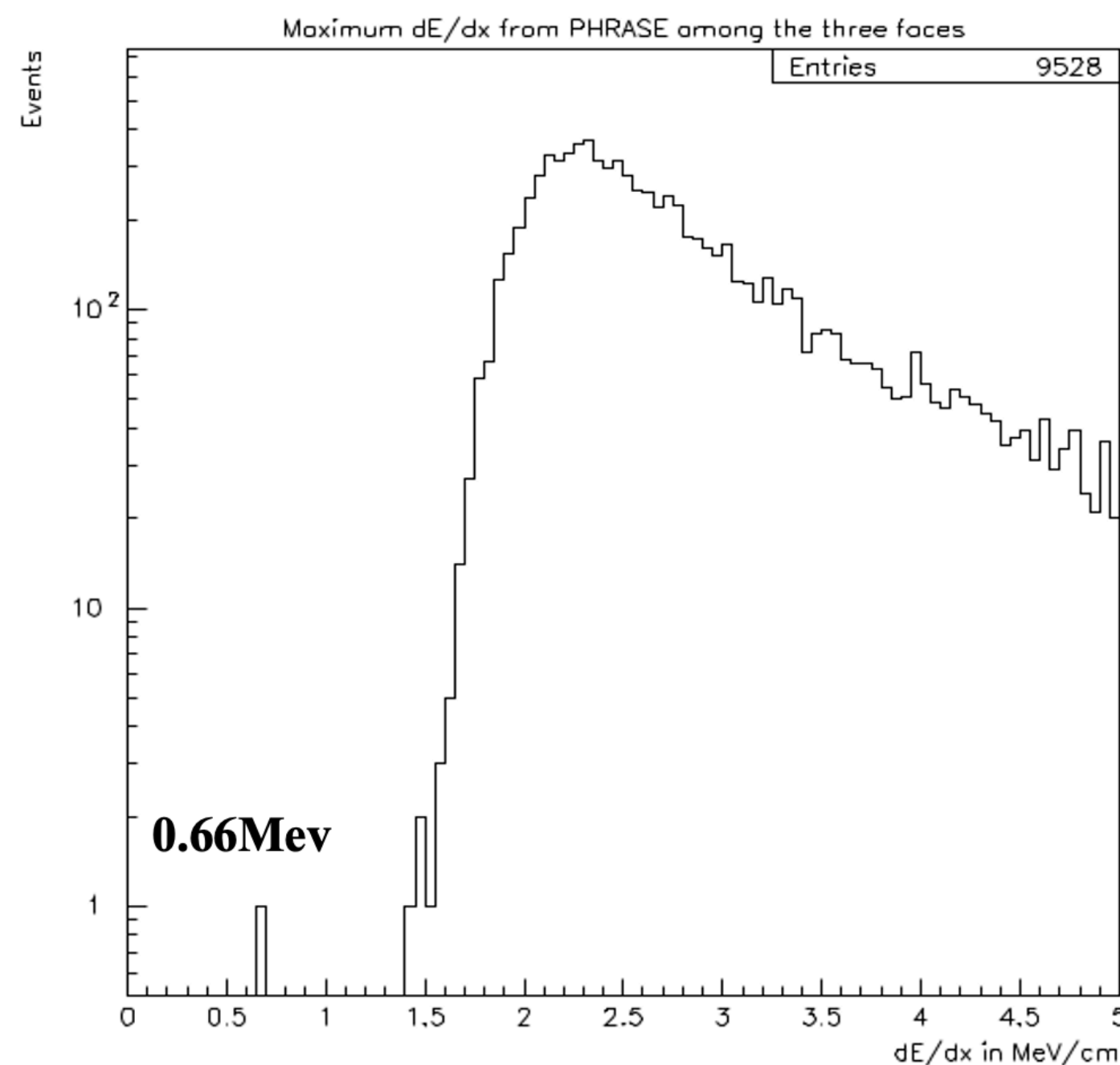
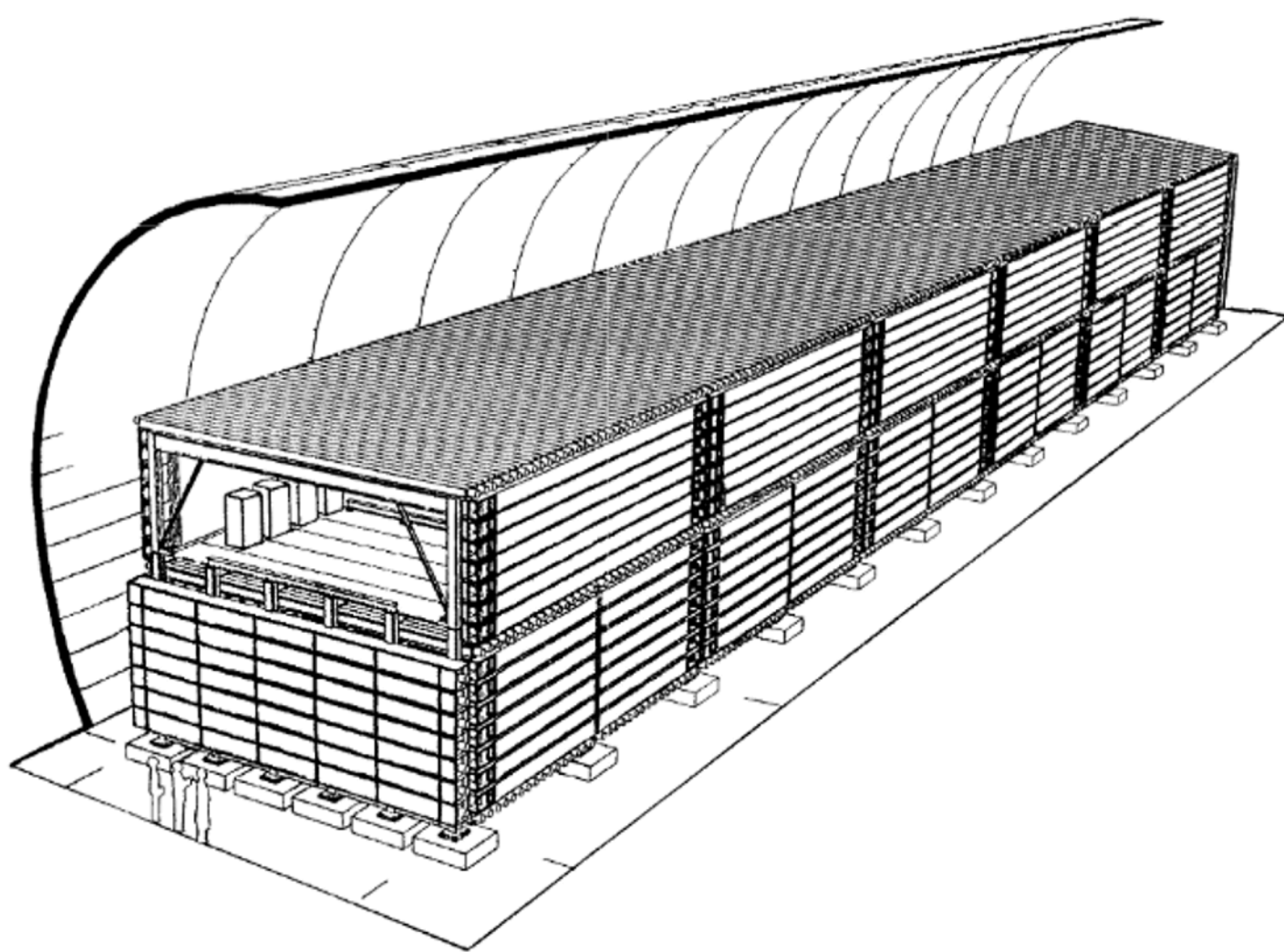
$$\Phi\left(\frac{1}{3}\right) = 2.1 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$\Phi\left(\frac{2}{3}\right) = 2.3 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

- 神冈核子衰变实验II期，位于日本岐阜县的一个地下 1000m 的铀矿中
- 探测器结构：柱形直径 39.3m，高41.4m，有约 13,000只光电倍增管，5万吨纯水

地下实验

MACRO



- 位于意大利亚平宁山脉最高峰科尔诺山下的一个隧道中 (深1400m)

- 长77m, 宽12m, 高9m

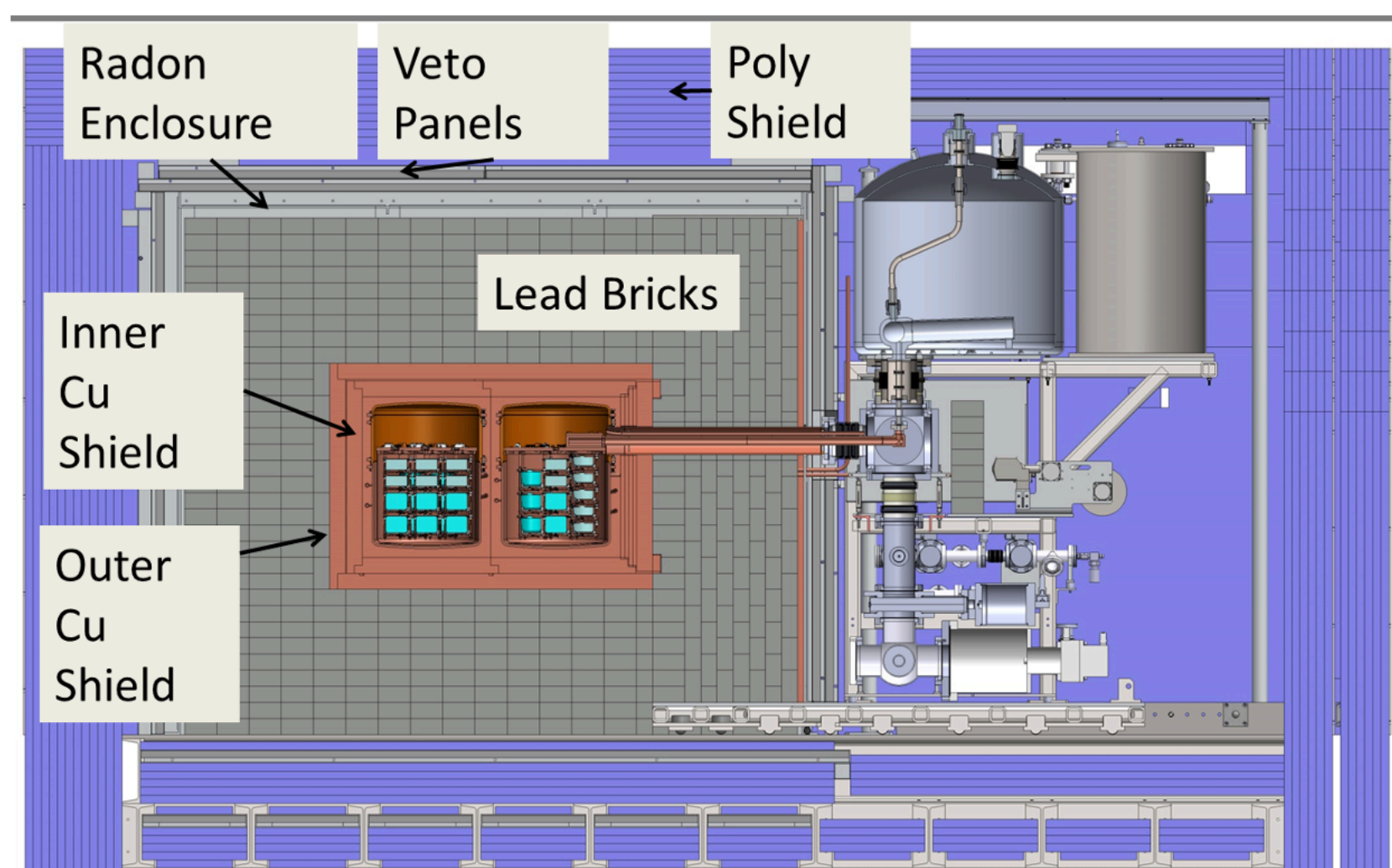
- 探测方式: 通过液闪测量时间能量信息, 流光管测量径迹能量信息

90%置信度下通量上限:

$$\Phi \left(\frac{1}{4} \sim \frac{2}{3} \right) = 6.1 \times 10^{-16} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

地下实验

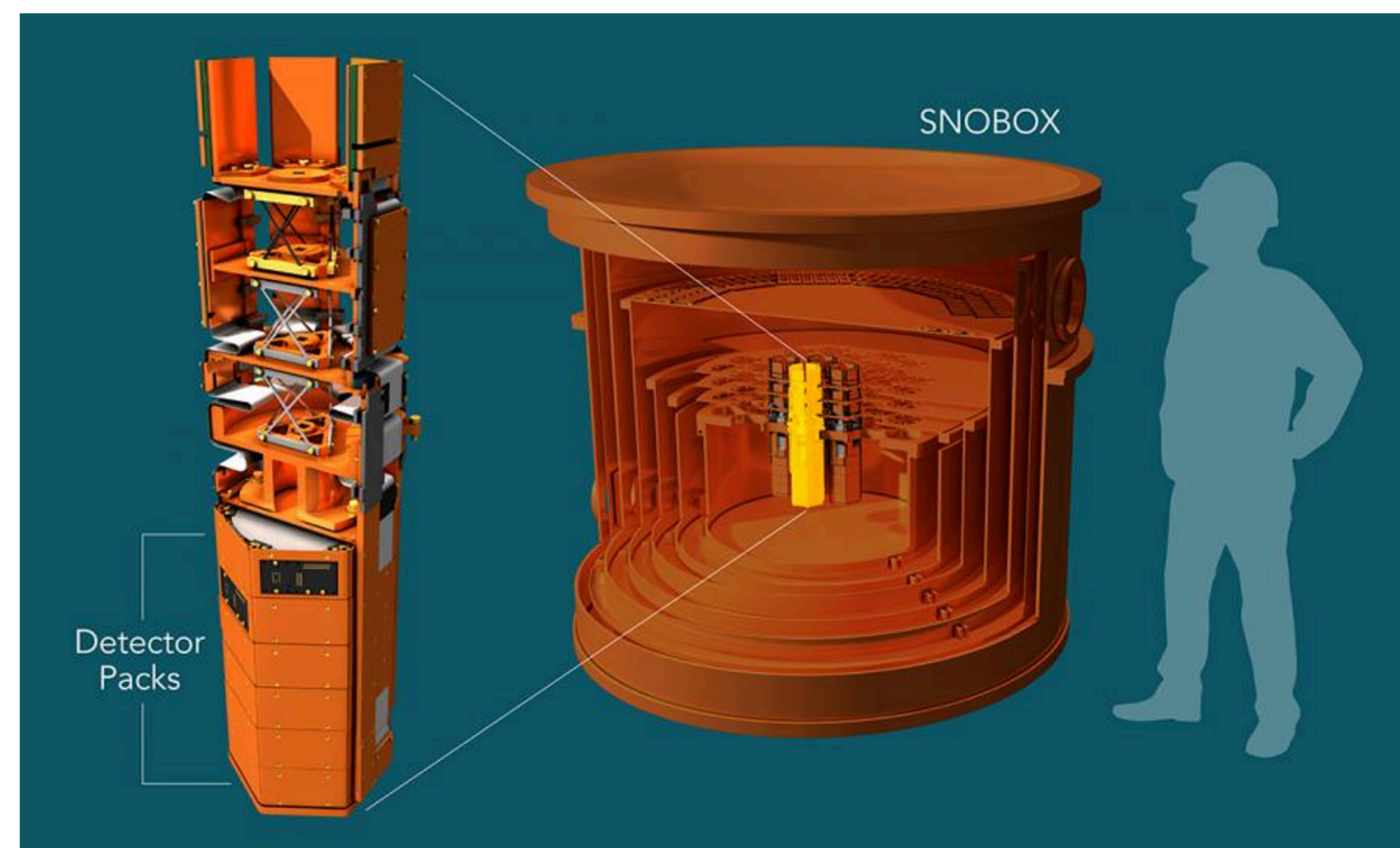
另一类半导体探测器的地下实验，能够测量非常小的粒子电荷探测器
灵敏材料为高纯锗或者单晶硅等



MAJORANA 1600 m

$$\frac{1}{1000} < Q < \frac{1}{6}$$

$$\Phi \left(\frac{1}{6} \sim \frac{1}{30} \right) = 2 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$



CDMS II 700 m

$$\frac{1}{200} < Q < \frac{1}{6}$$

$$\Phi \left(\frac{1}{160} \right) = 1.36 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

地下实验的限制

一个简单的计算：

岩石平均原子量和密度

$$Z = 11, A = 22, \rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$$

1 TeV μ 子在岩石中的平均电离能损

$$\frac{dE}{dx} = 2.5 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$$

穿过1000m 深度的岩石层损失的能量

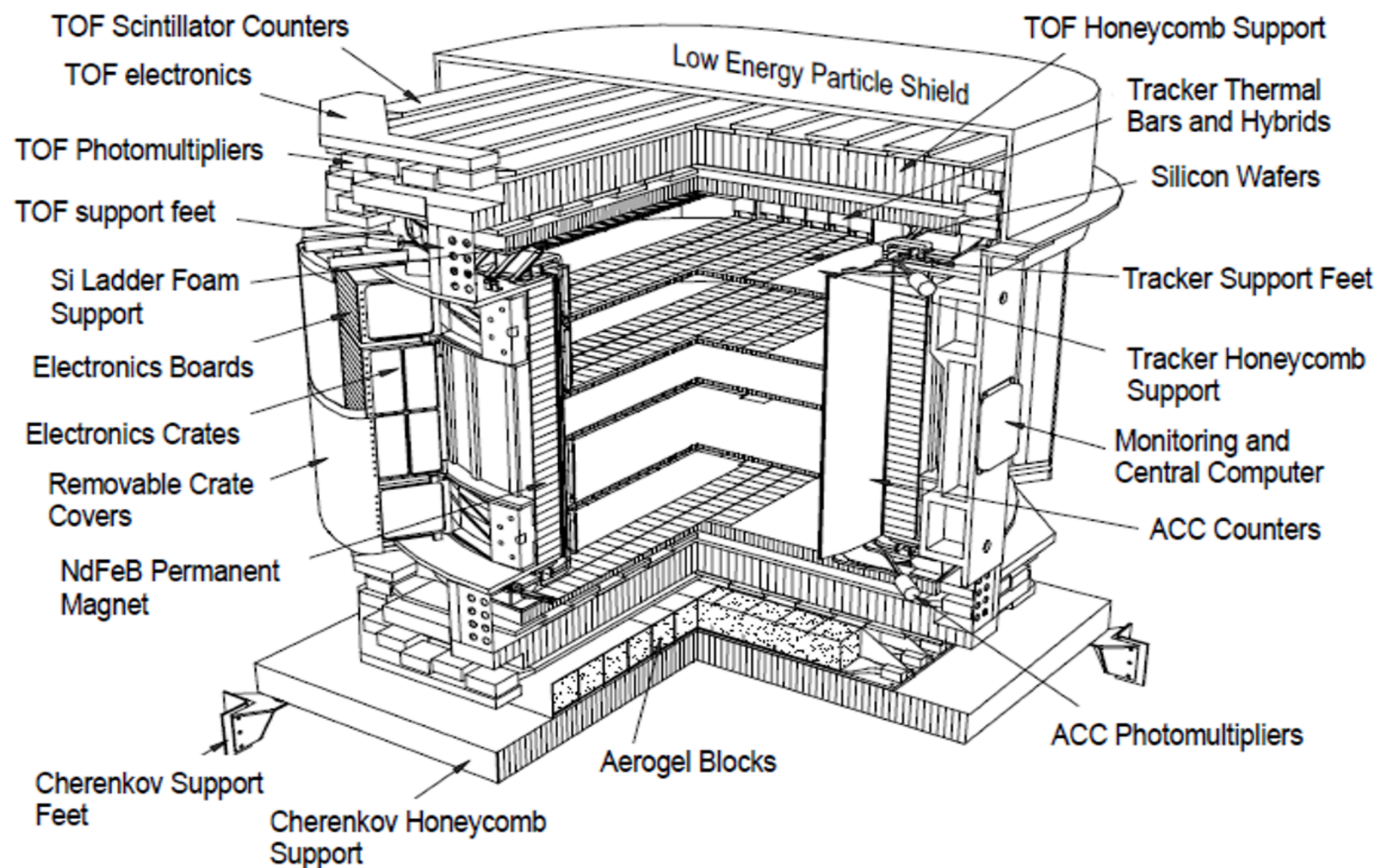
- 对 μ 子：~ 663 GeV
- 对2/3e FCP：~ 300 GeV



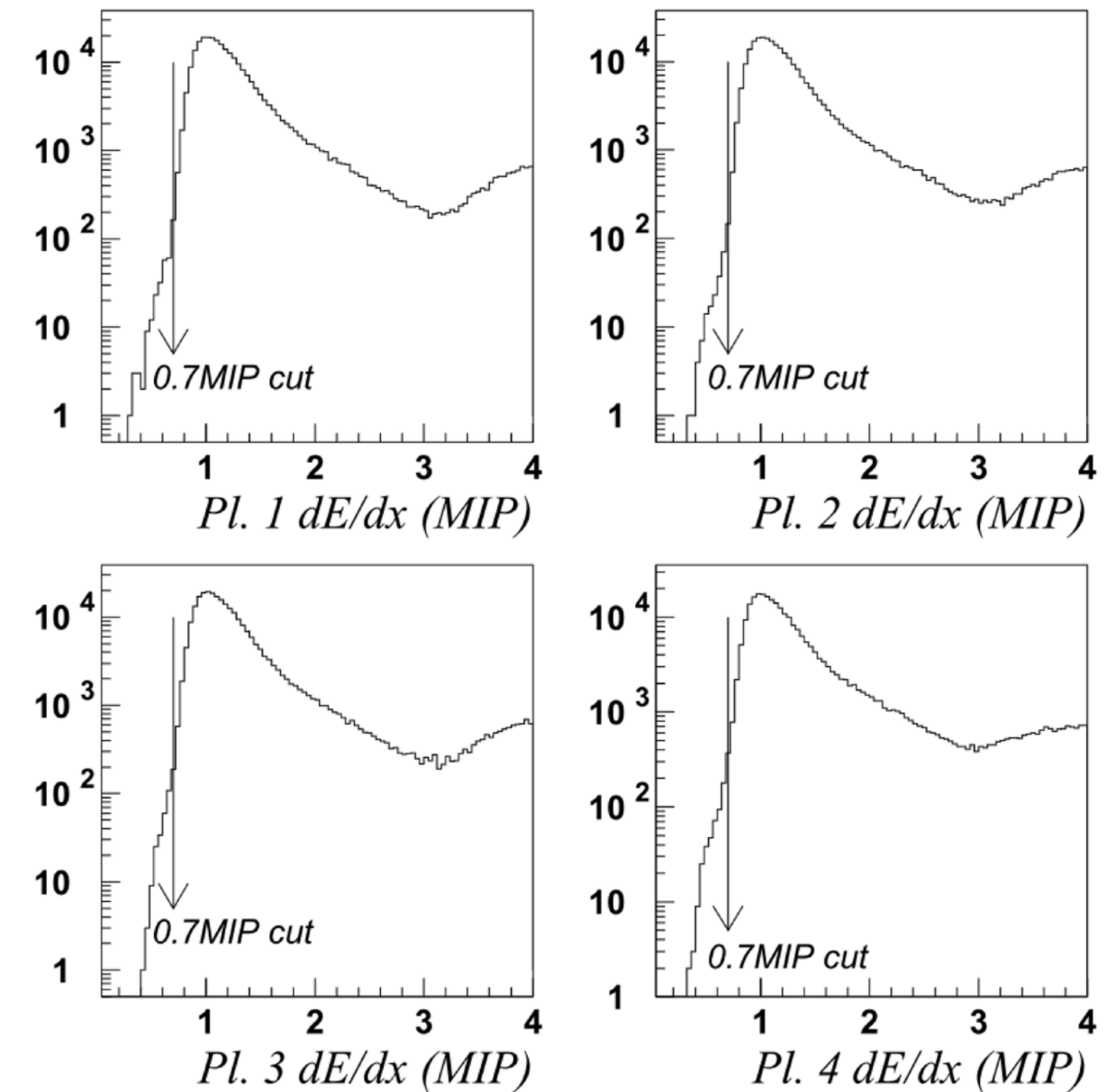
地下实验要求FCP具有数百 GeV以上的动能!

空间实验

- 1998年 **AMS-01** 搭载于探索号航天飞机
- 探测方式：通过上下共四个飞行时间探测器测量粒子电离能损



Eloss in TOF planes

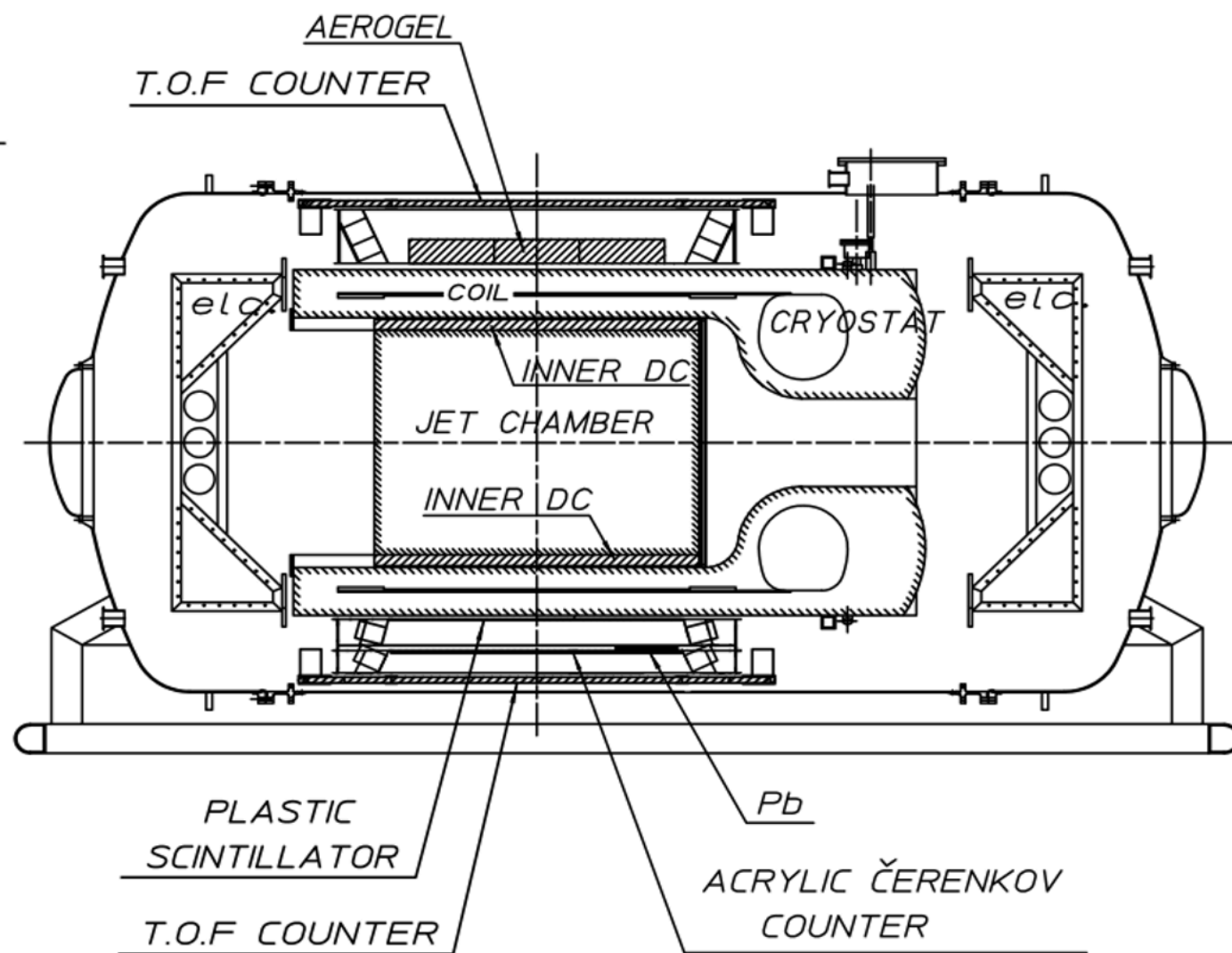


95%置信度下通量上限:

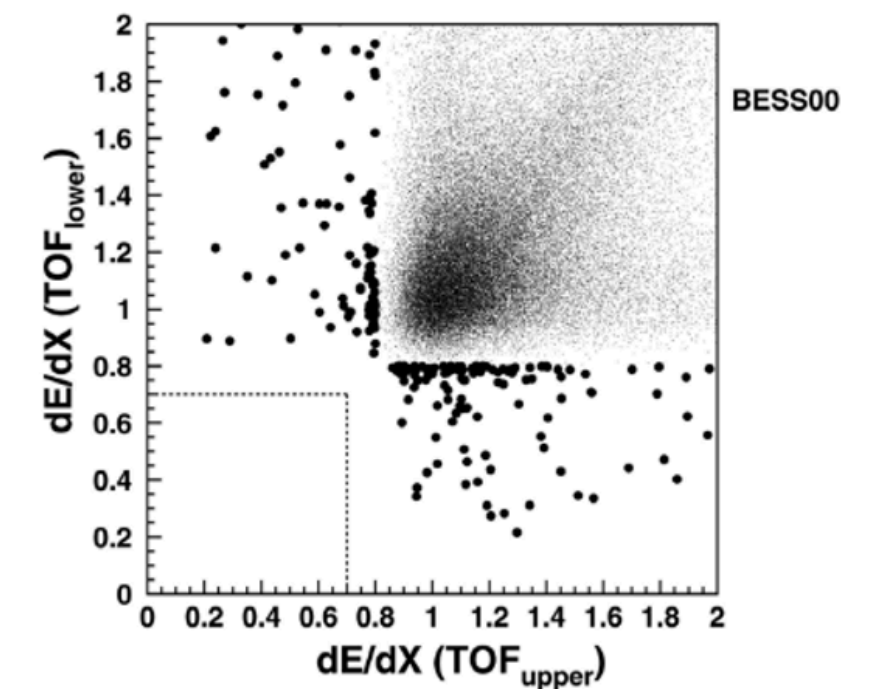
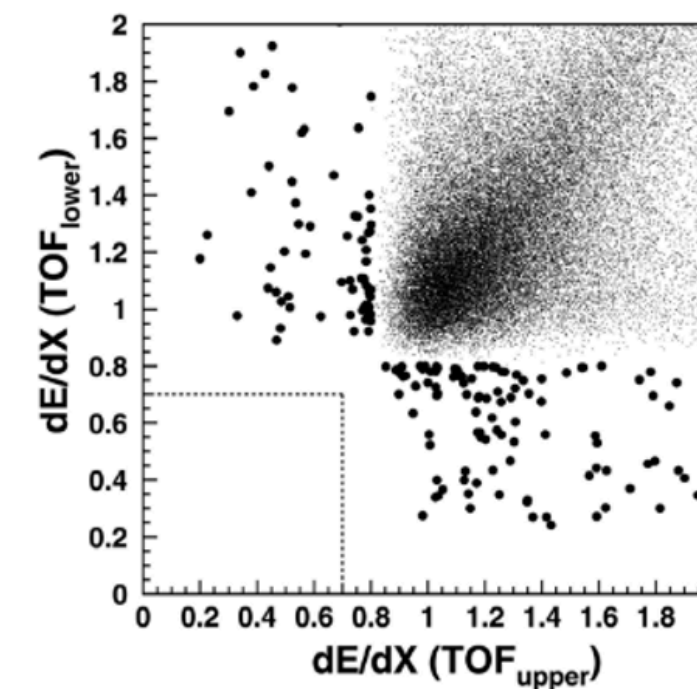
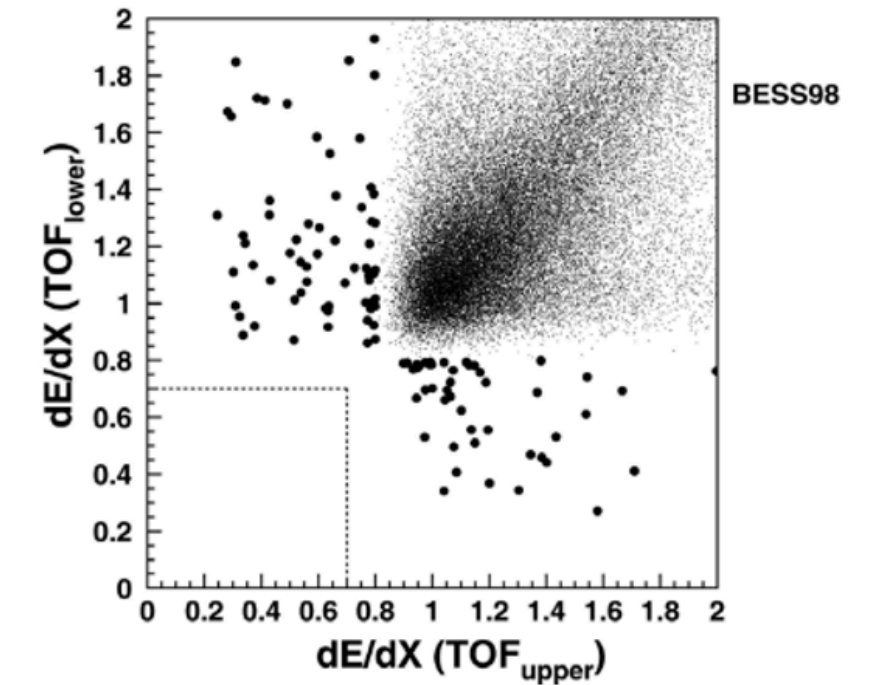
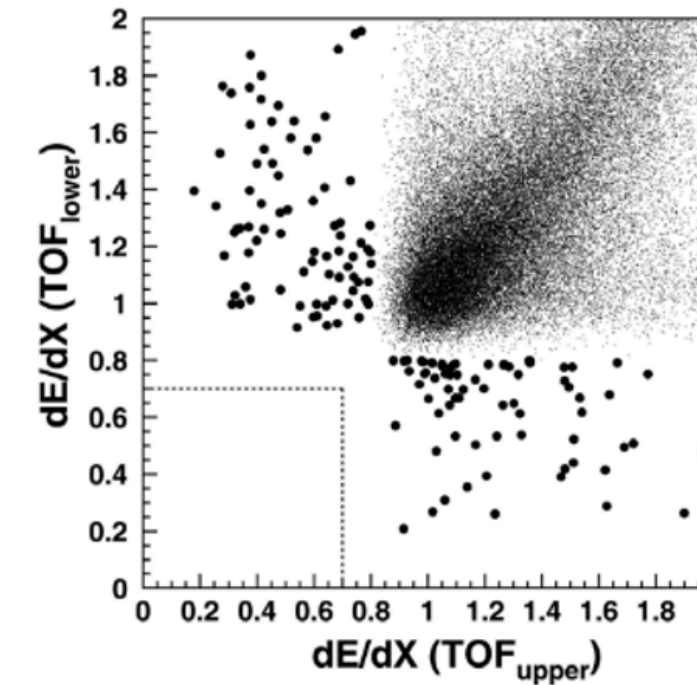
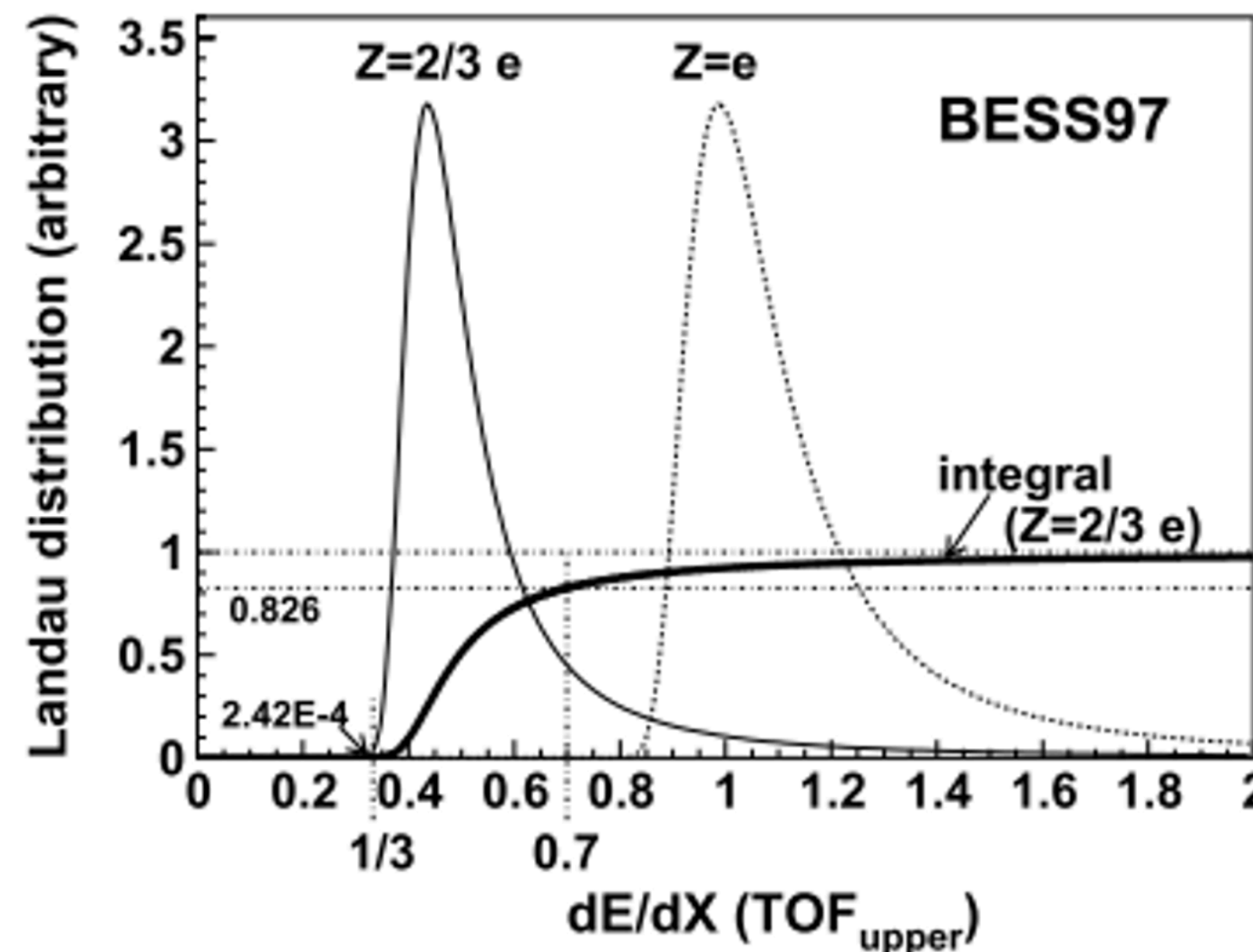
$$\Phi\left(\frac{2}{3}\right) = 3.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

空间实验

- 1997-2000年气球实验**BESS** 一共飞行了四次
- 探测方式：通过上下两个飞行时间探测器测量粒子电离能损



BESS



90%置信度下通量上限：

$$\Phi\left(\frac{2}{3}\right) = 4.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

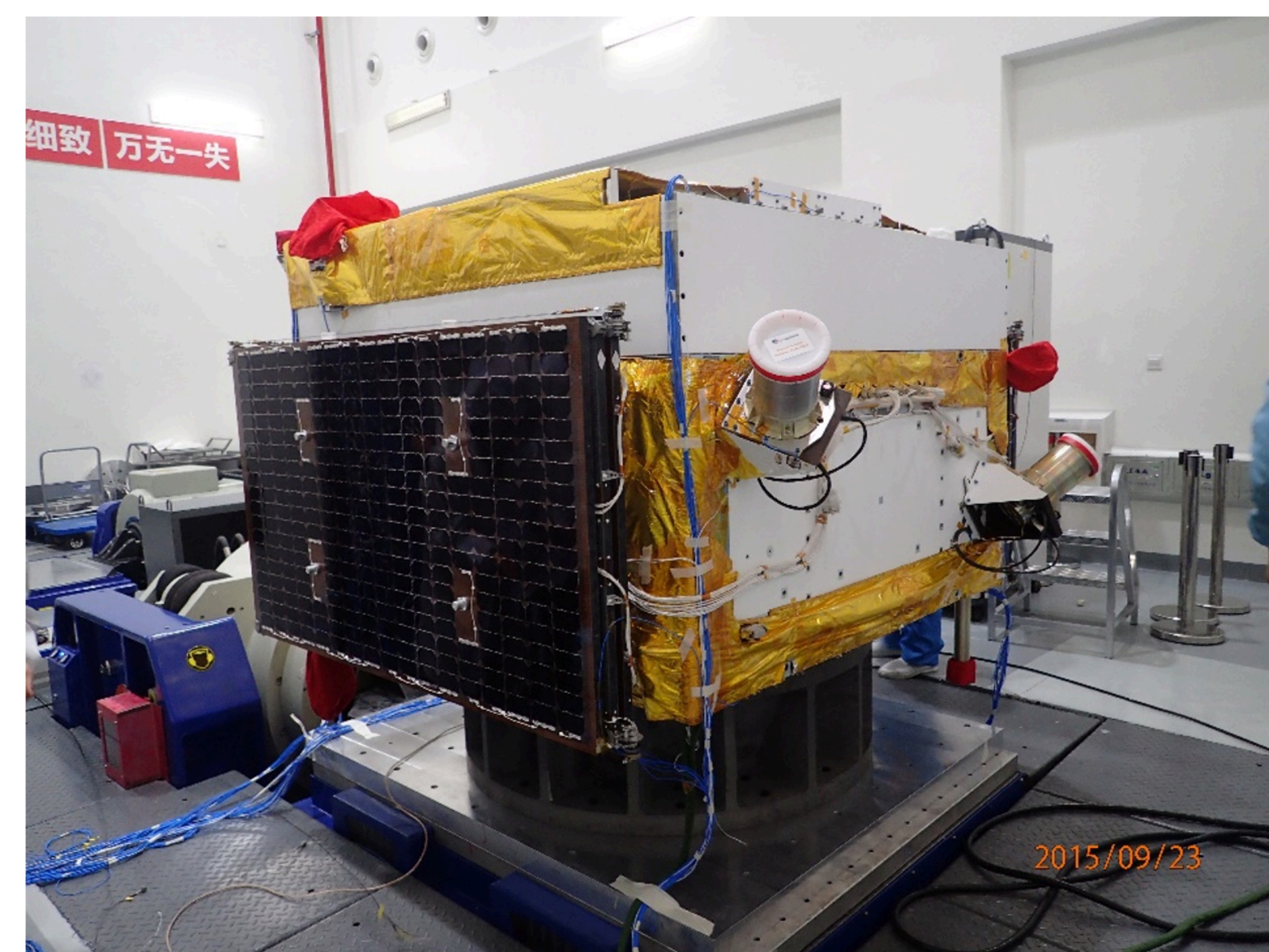
DAMPE实验寻找分数电荷粒子

- DAMPE实验相对于其他分数电荷粒子实验的**优势/独特性**
 - 相比地下实验，DAMPE实验的探测**能量下限更低**（低至几个GeV）
 - 相比其它空间实验，DAMPE实验具备**大接收度、长曝光时间**的优势

实验名称	几何接收度 (cm ² sr)	空间实验相关变量及结果对比	
		曝光时间 (s)	通量上限值 (cm ⁻² sr ⁻¹ s ⁻¹)
AMS-01	3000	3.6×10^4	3.0×10^{-7} (95% C. L.)
BESS	1500	3.2×10^5	4.5×10^{-7} (90% C. L.)
DAMPE	3000	2.3×10^7	?

暗物质粒子探测卫星“悟空” (DAMPE)

“悟空”号 (DAMPE) 是一个基于卫星的高能宇宙线直接探测实验



- 尺寸: $1.2 \times 1.2 \times 1.0 \text{ m}^3$
- 质量: 1.8 ton
- 轨道高度: 500 km
- 轨道倾角: 97.4°
- 轨道周期: 95 分钟
- 太阳同步轨道
- 触发率: 50 ~ 100 Hz
- 数据下传: 16 GB/day

DAMPE合作组

CHINA

- Purple Mountain Observatory, CAS
- University of Science and Technology of China
- Institute of High Energy Physics, CAS
- National Space Science Center, CAS
- Institute of Modern Physics, CAS



ITALY

- INFN Perugia and University of Perugia
- INFN Bari and University of Bari
- INFN Lecce and University of Salento
- INFN LNGS and Gran Sasso Science Institute

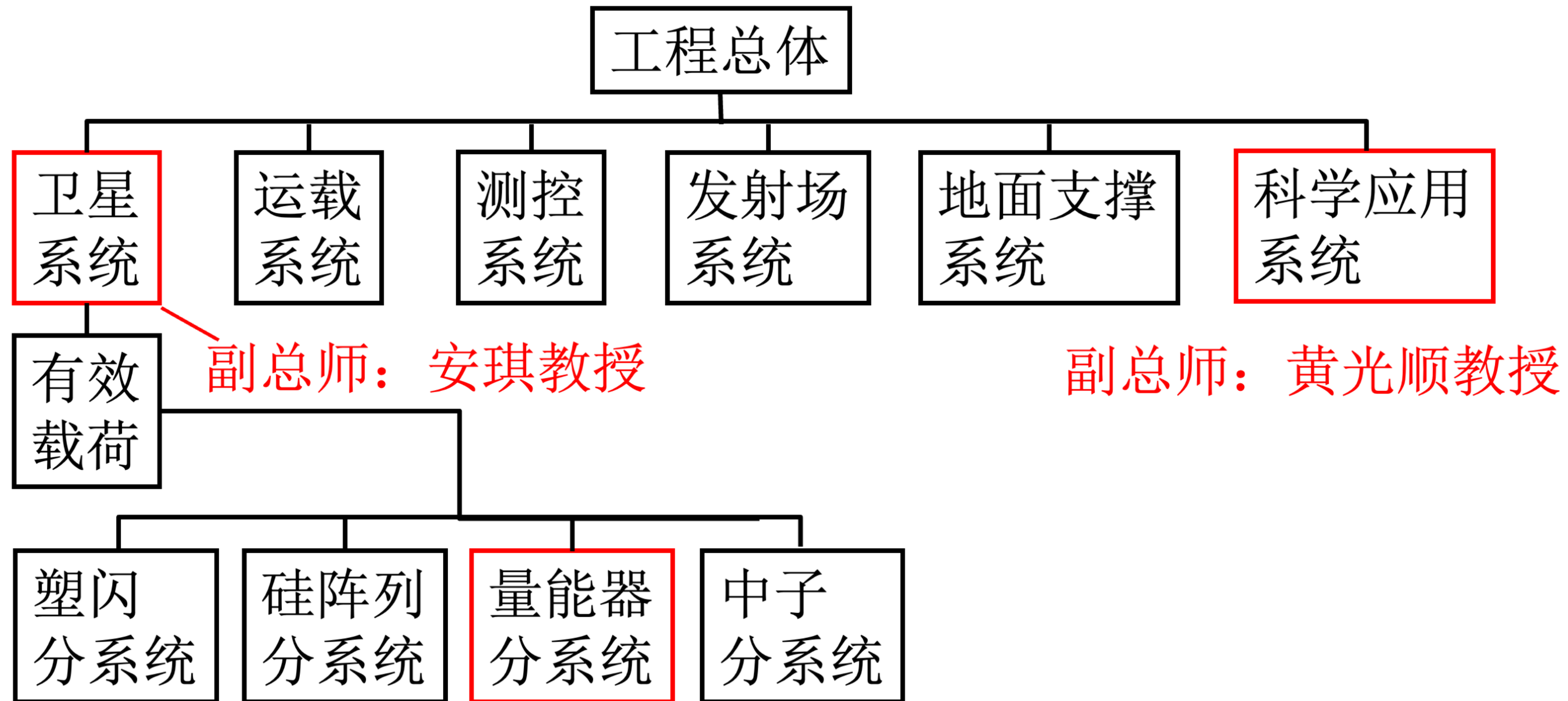


SWITZERLAND

- University of Geneva



DAMPE USTC Group



副总师: 安琪教授

副总师: 黄光顺教授

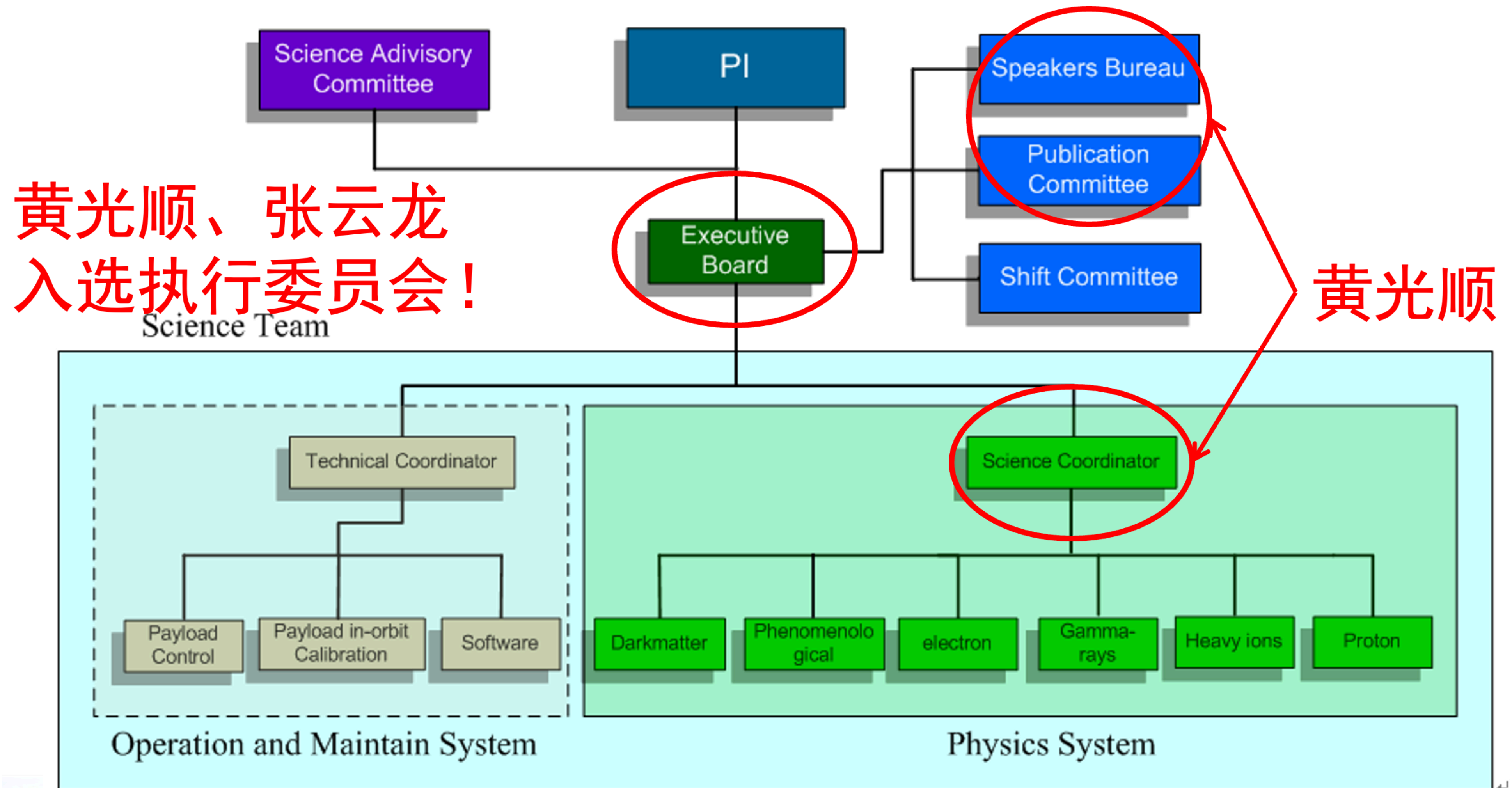
主任设计师: 刘树彬教授

副主任设计师: 黄光顺教授

副主任设计师: 封常青教授

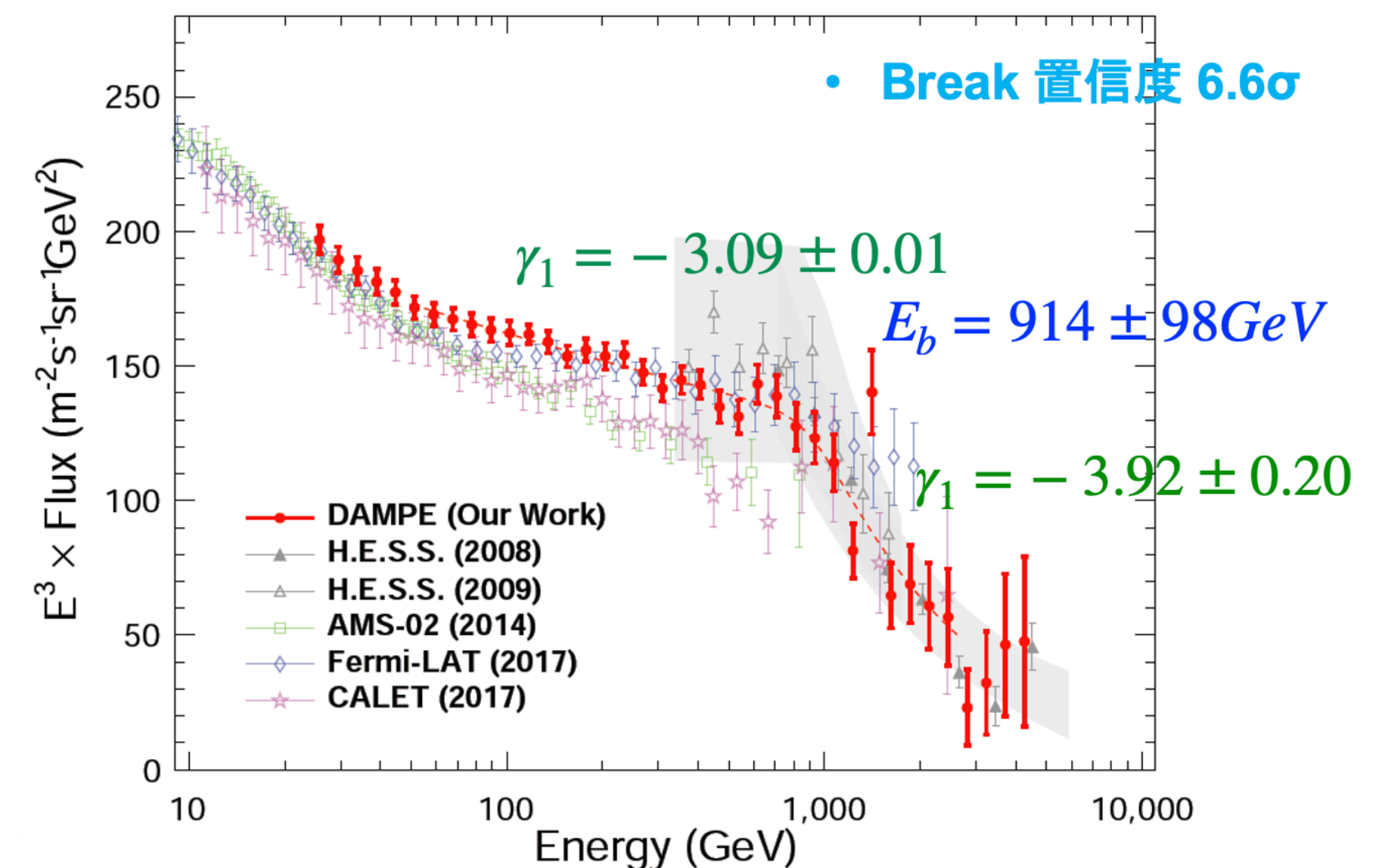
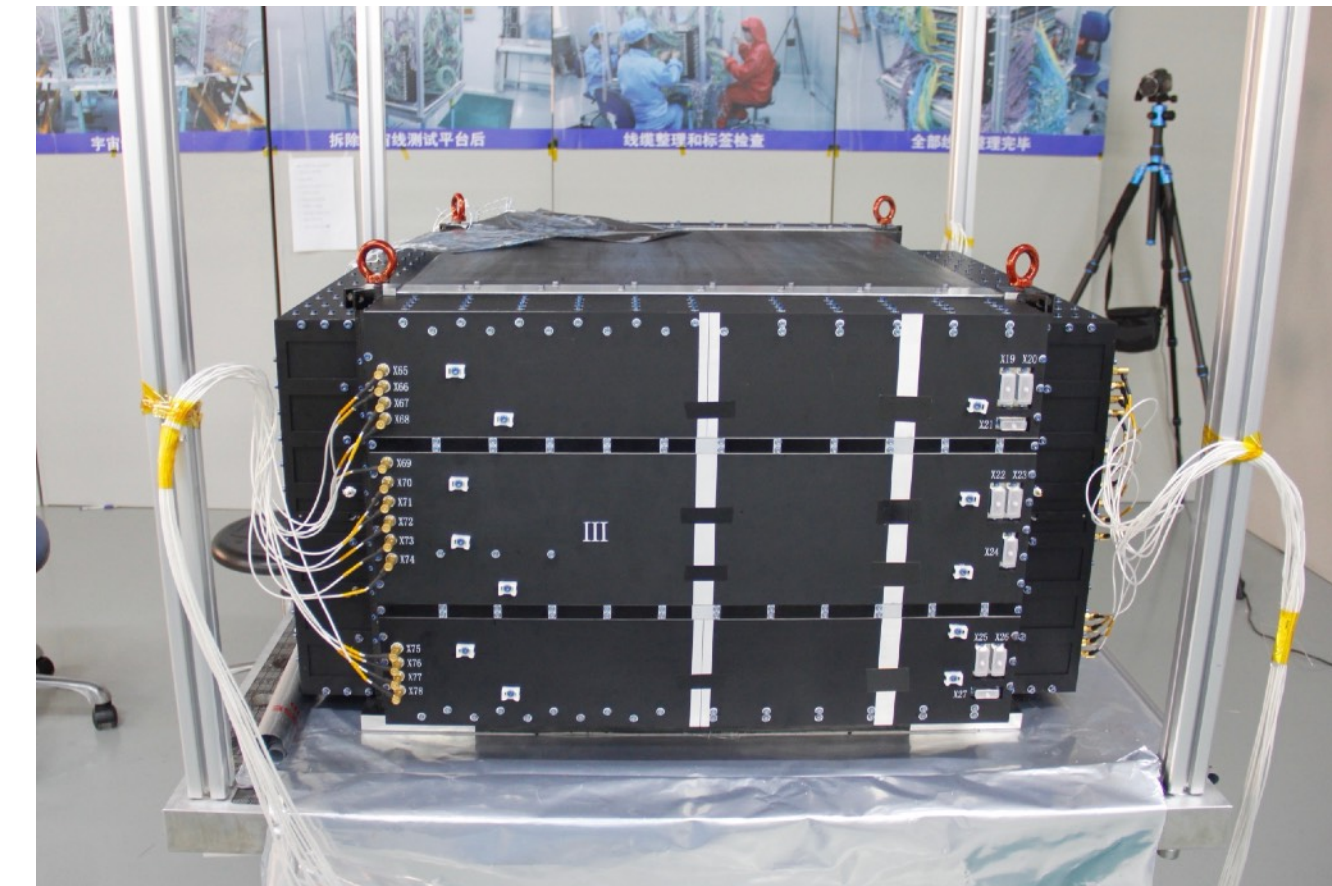
副主任设计师: 张云龙教授

DAMPE USTC Group



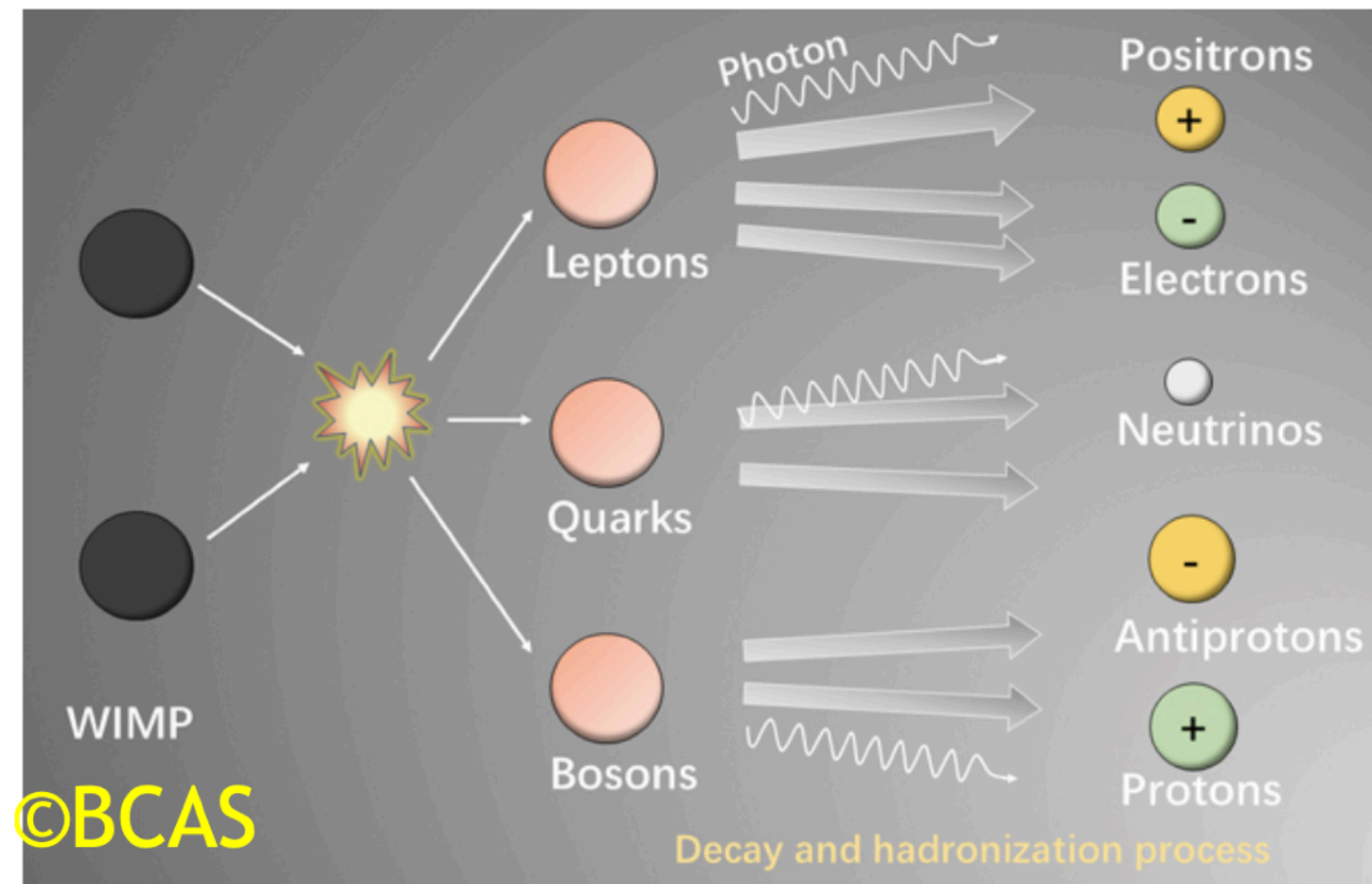
DAMPE USTC Group

- BGO量能器的硬件研制
- 量能器的在轨标定
- 物理分析
 - 宇宙线电子能谱的测量
 - 宇宙线BCNO能谱的测量
 - 超重核素的测量
 - 寻找分数电荷粒子
 -

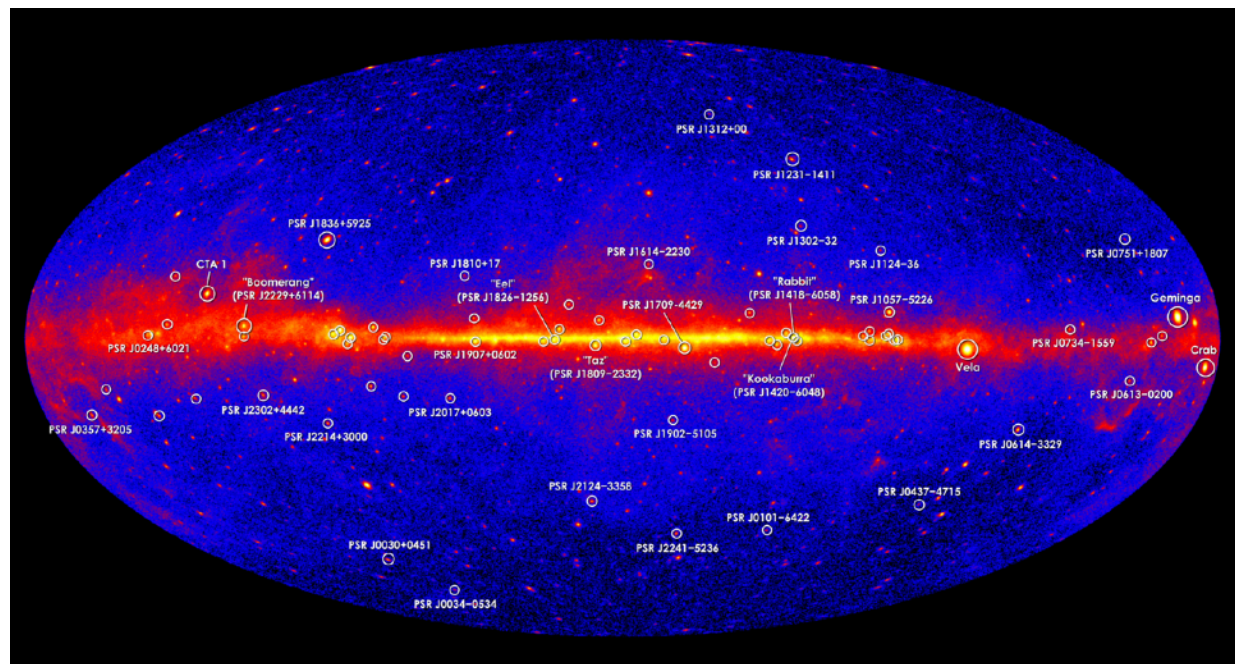


科学目标

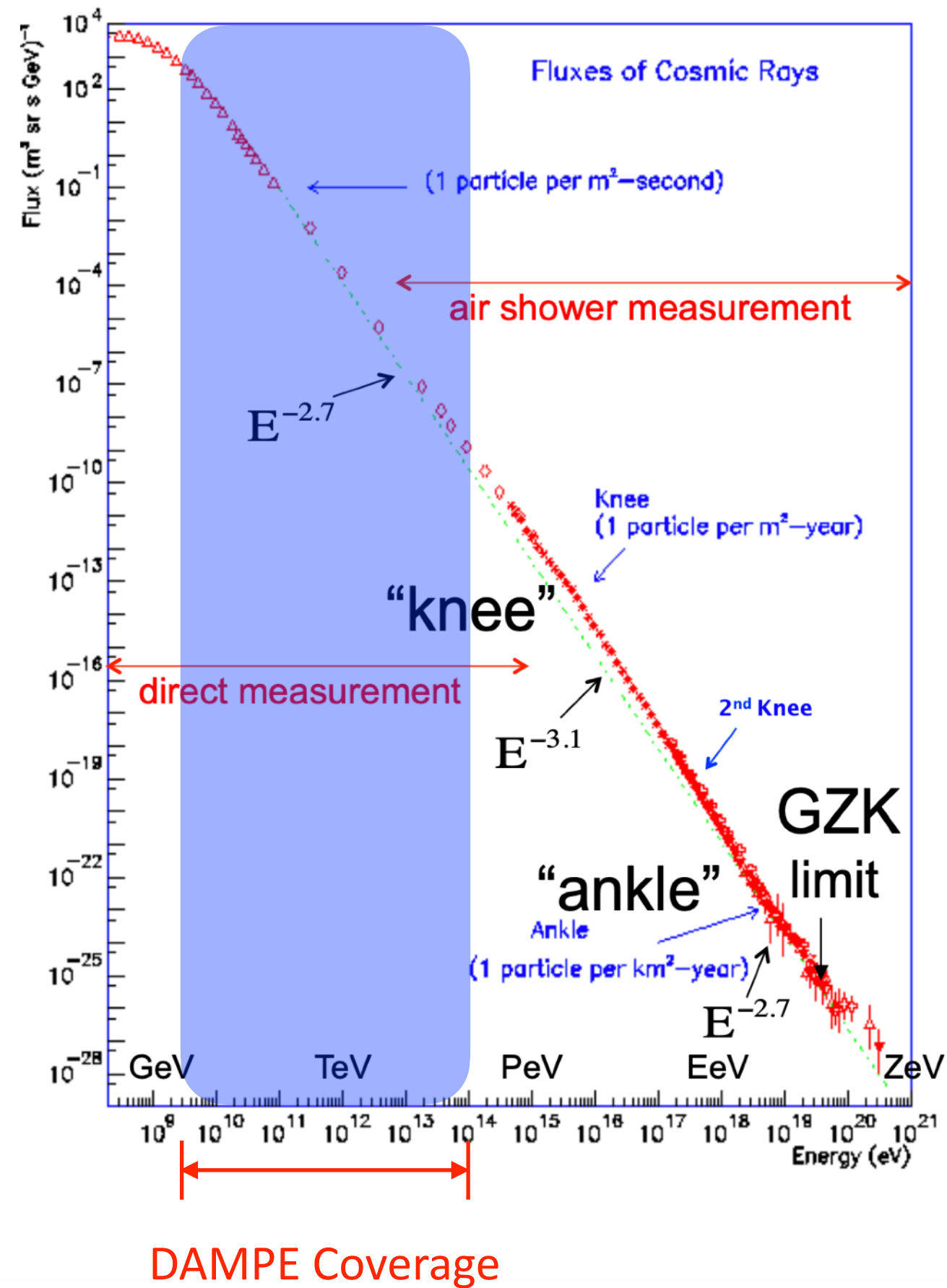
◆ 暗物质粒子间接探测



◆ γ 射线天文



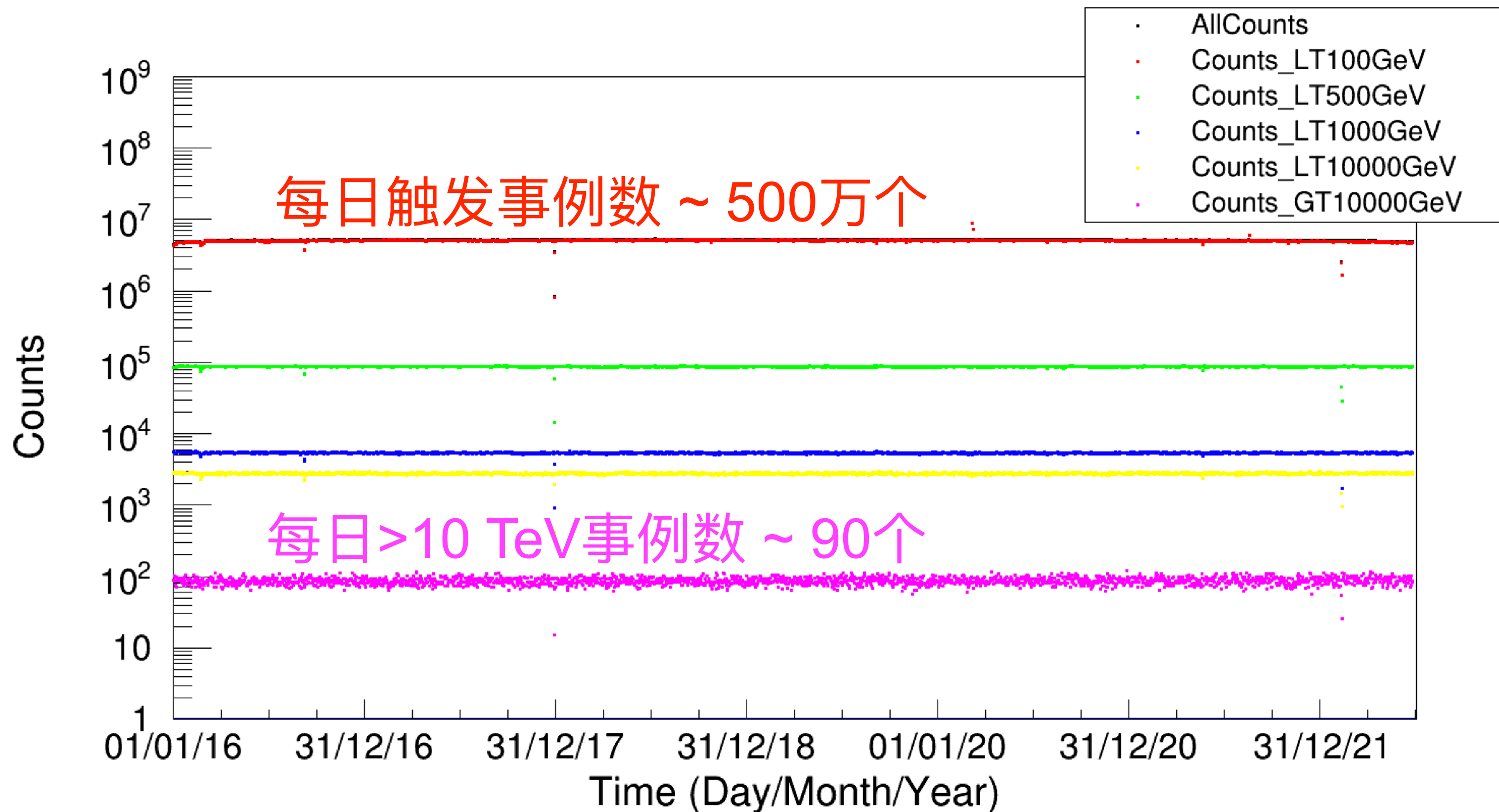
◆ 研究宇宙线的起源、传播、加速机制



- ◆ 太阳物理
- ◆ 超重元素的测量
- ◆ 新物理：寻找分数电荷粒子
- ◆

DAMPE实验在轨状态

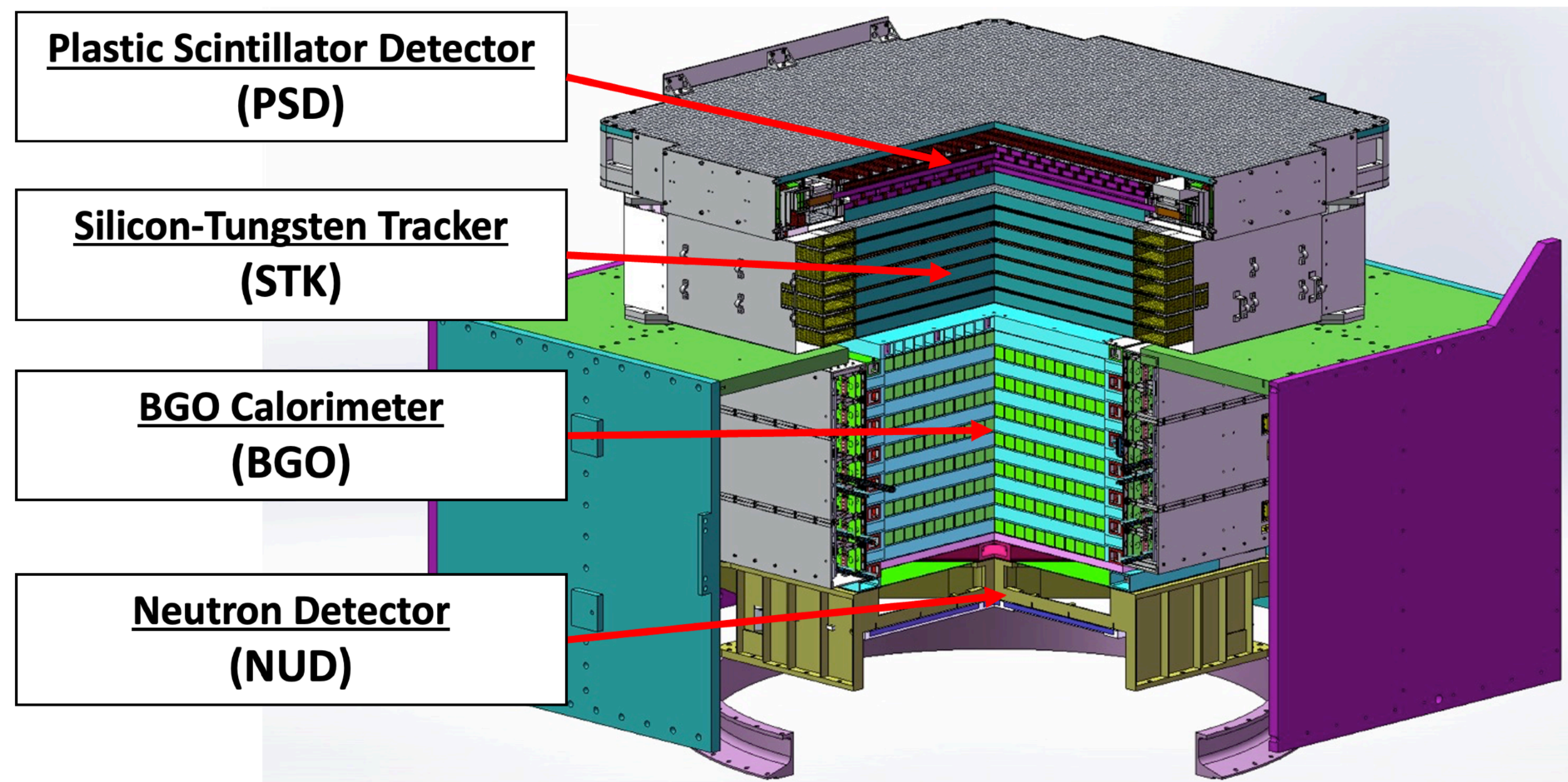
- 2016/01/01 ~ 2022/06/30 每日触发率



✓ 截至2020年底，已采集超过
90亿个宇宙线粒子数据

✓ 截至2022年9月30日，已采集
超过**120亿**个宇宙线粒子数据

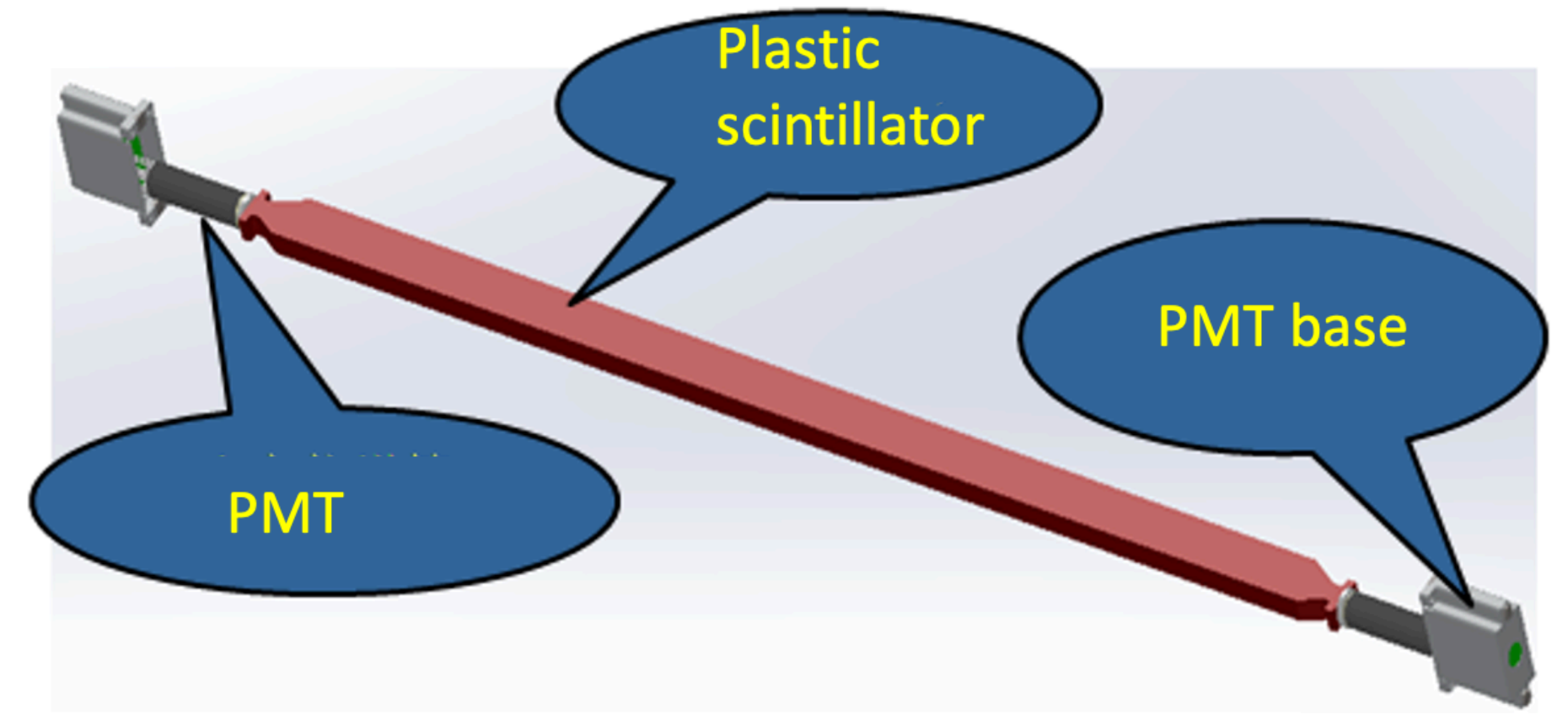
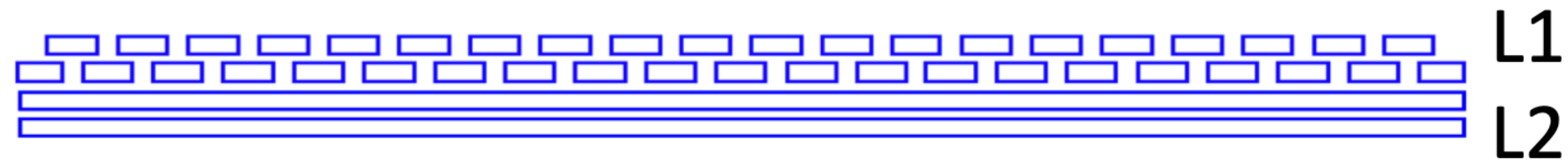
DAMPE探测器



- 电荷测量: **PSD + STK**
- 径迹测量: **STK + BGO**
- 能量测量: **BGO**
- 强子本底排除: **BGO + NUD**

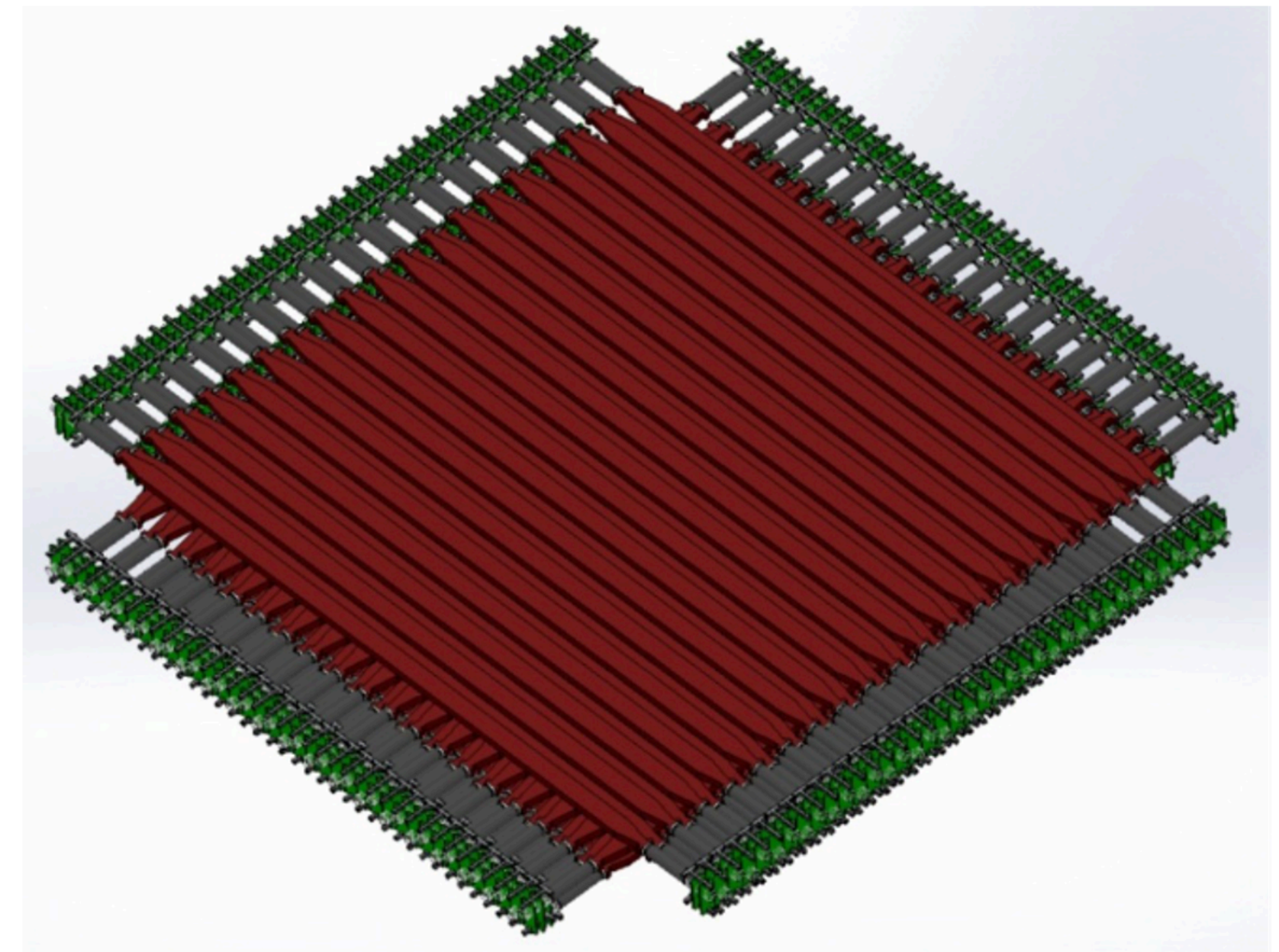
Astropart. Phys. 95 (2017) 6–24

电荷测量：塑料闪烁体探测器 (PSD)



• PSD结构

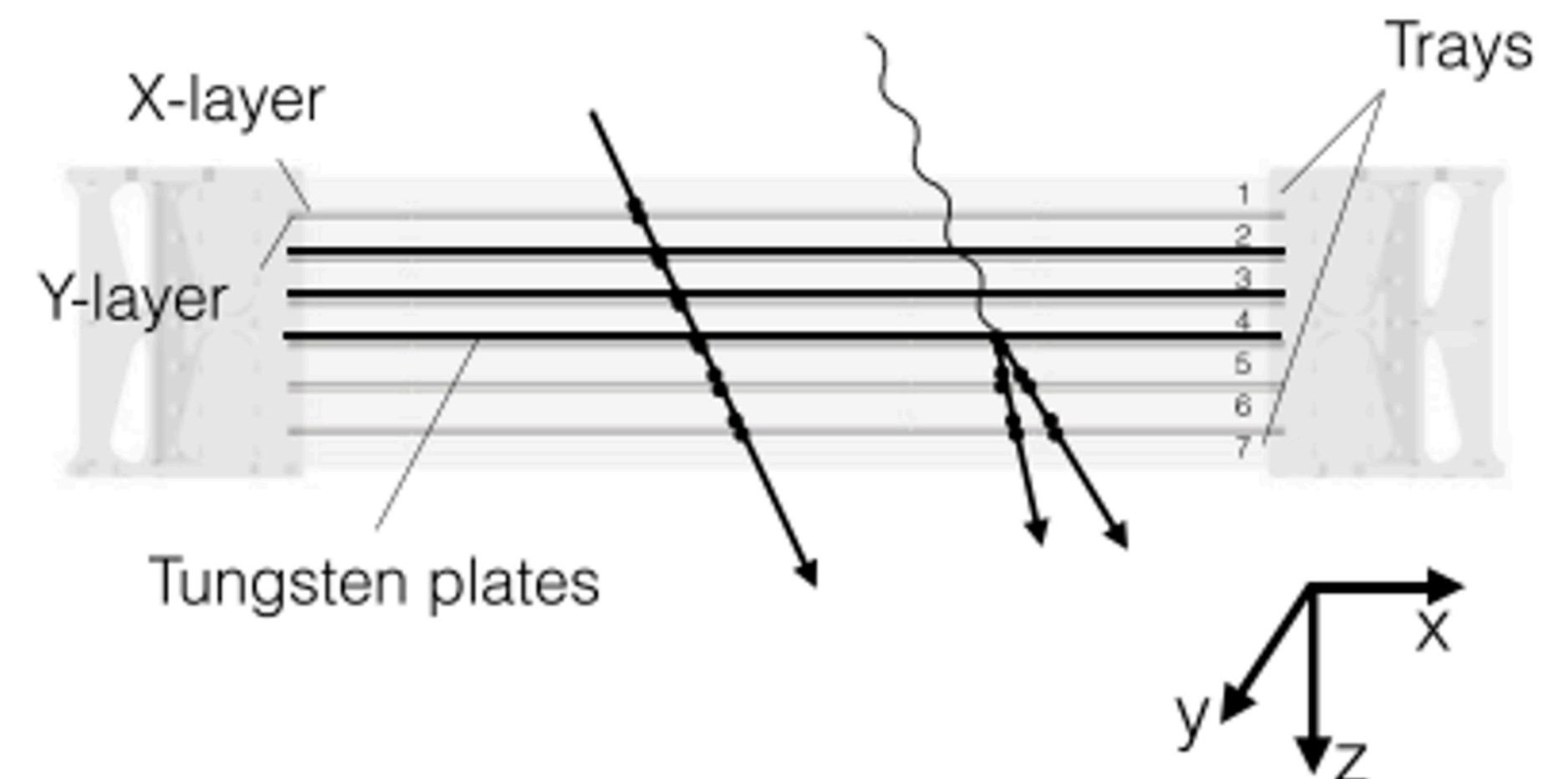
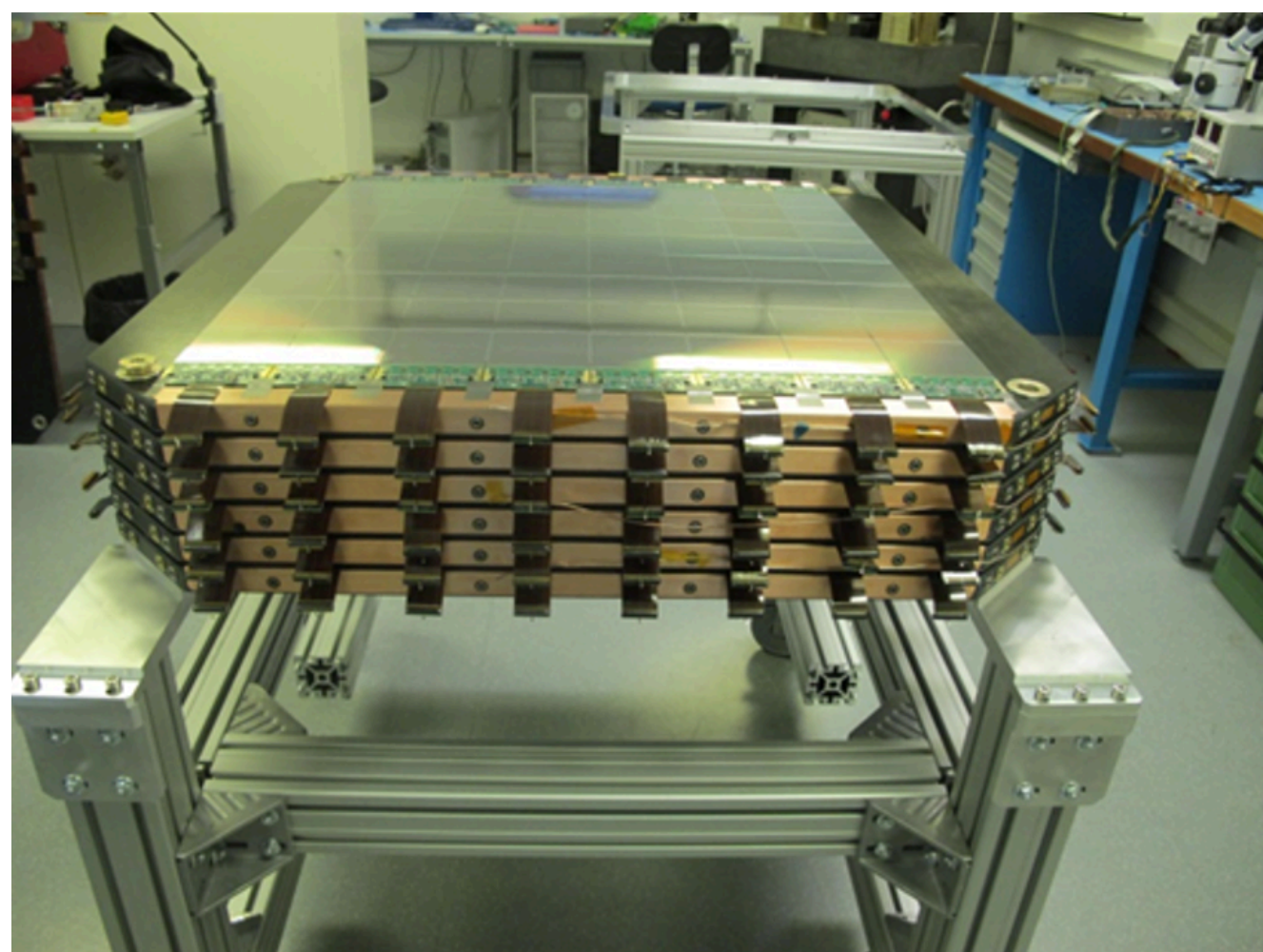
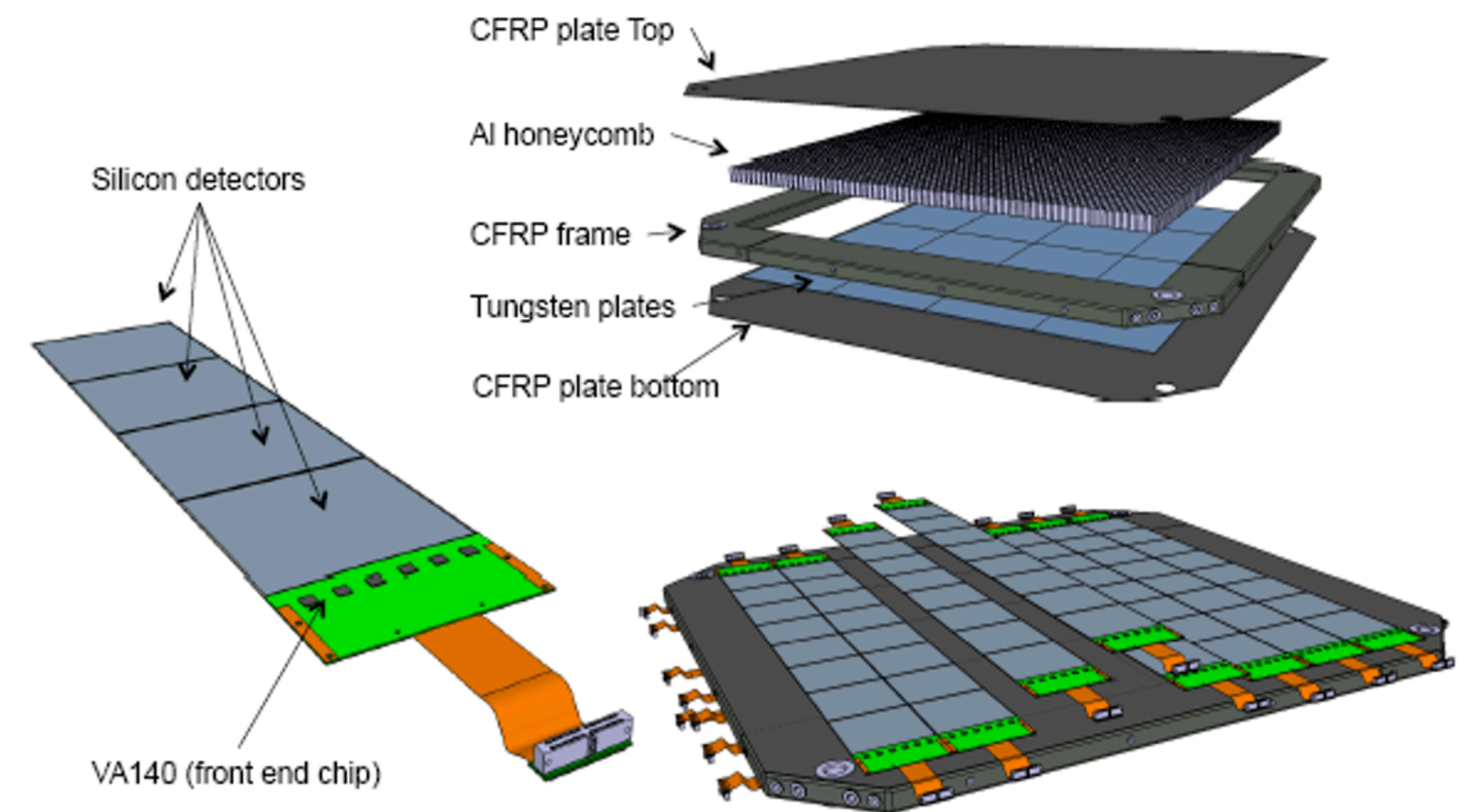
- 两大层，每层塑闪条呈品字形排列
- 每层41根塑闪条
- 有效面积 $82 \times 82 \text{ cm}^2$
- 塑闪条双端耦合光电倍增管读出



电荷测量：硅径迹探测器 (STK)

• STK结构

- 有效面积 $75.8 \times 75.8 \text{ cm}^2$
- 6 大层硅微条 (6X + 6Y)
- 三层 1 mm 钨板镶嵌在STK中
- 硅微条间距 $121 \mu\text{m}$

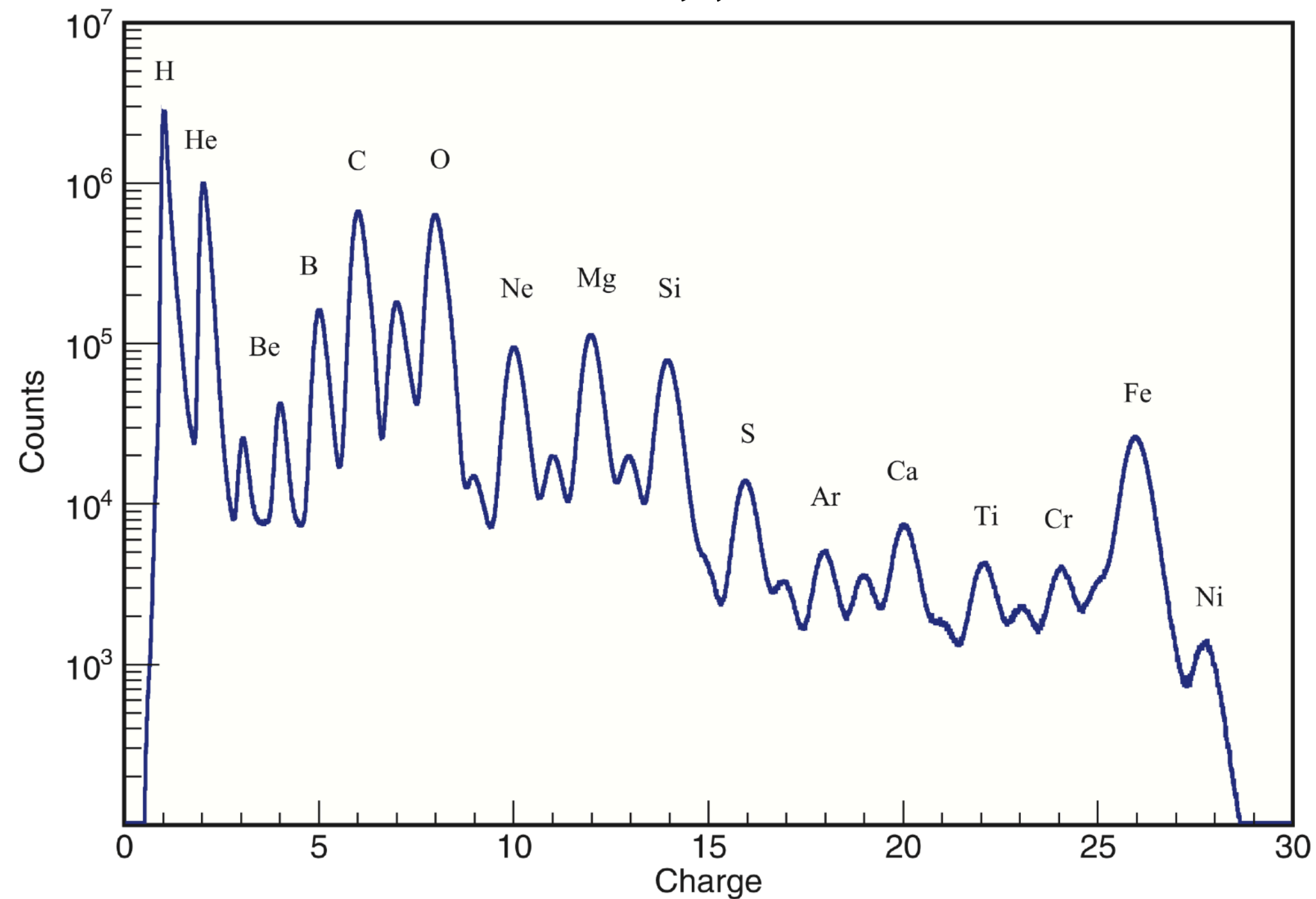


电荷测量

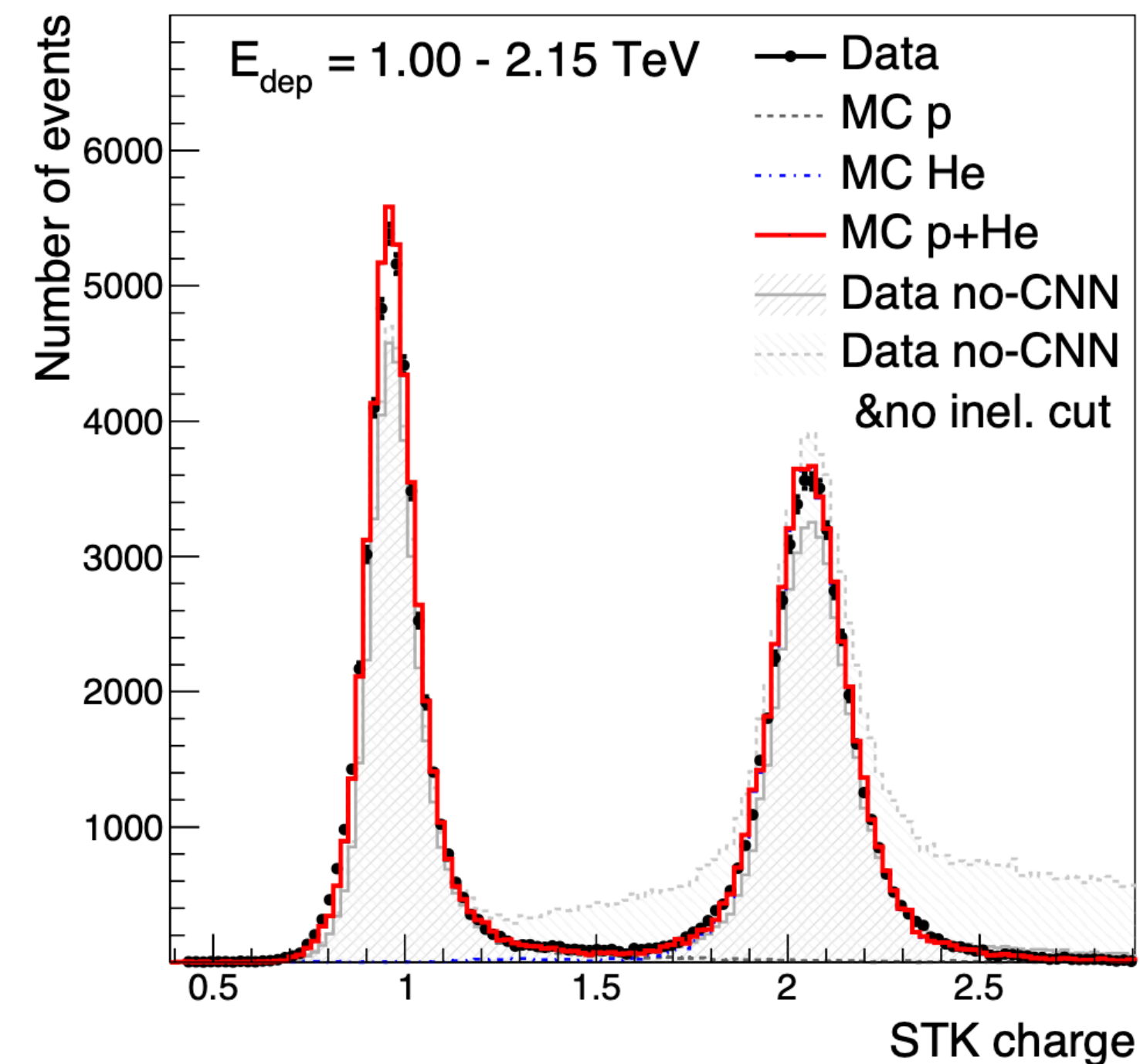
$$-\frac{dE}{dx} = K Z^2 \frac{Z}{A \beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

	PSD电荷分辨 (Charge unit, c.u.)	STK电荷分辨 (Charge unit, c.u.)
质子	0.06	0.04
氦核	0.10	0.07

PSD 电荷测量

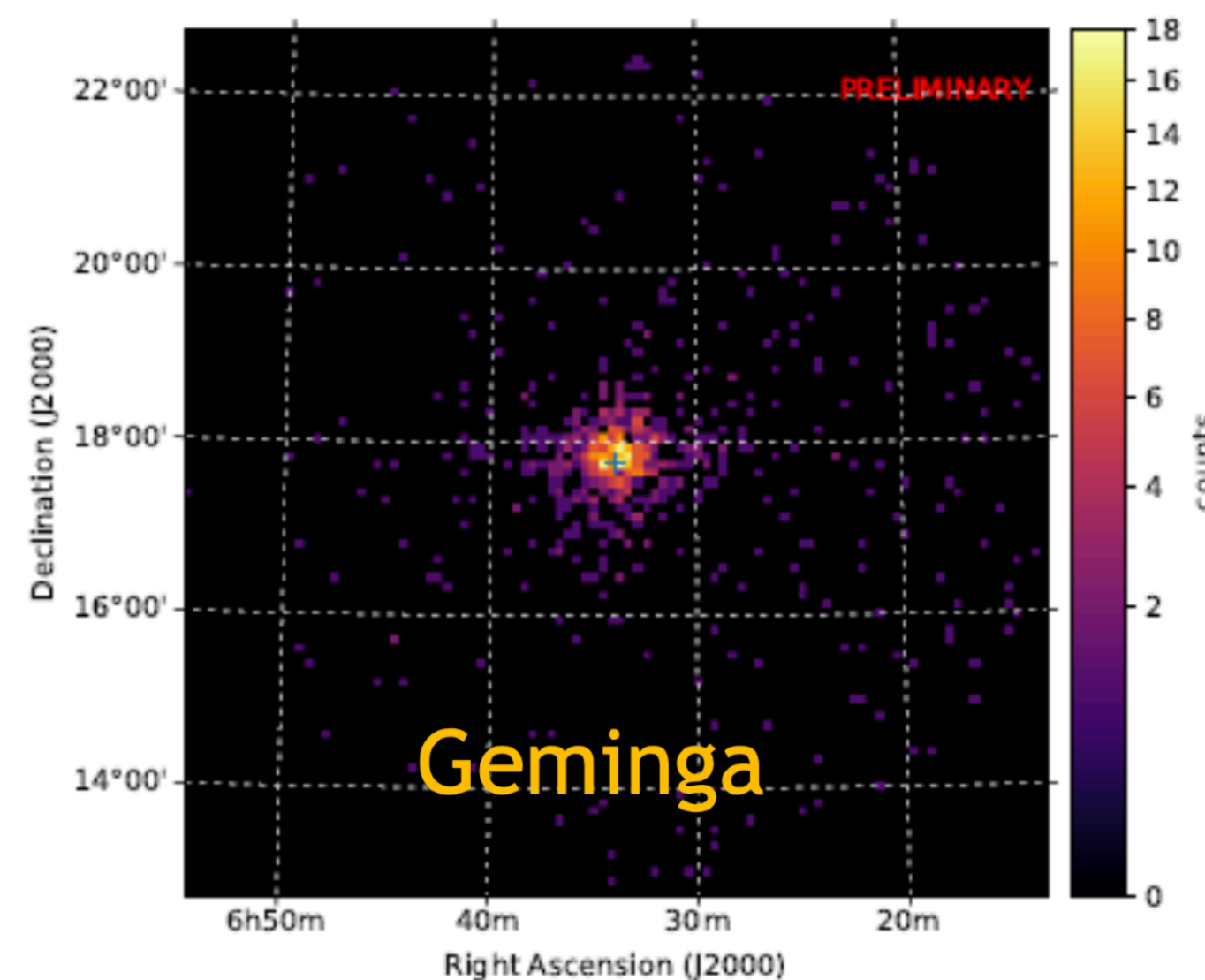
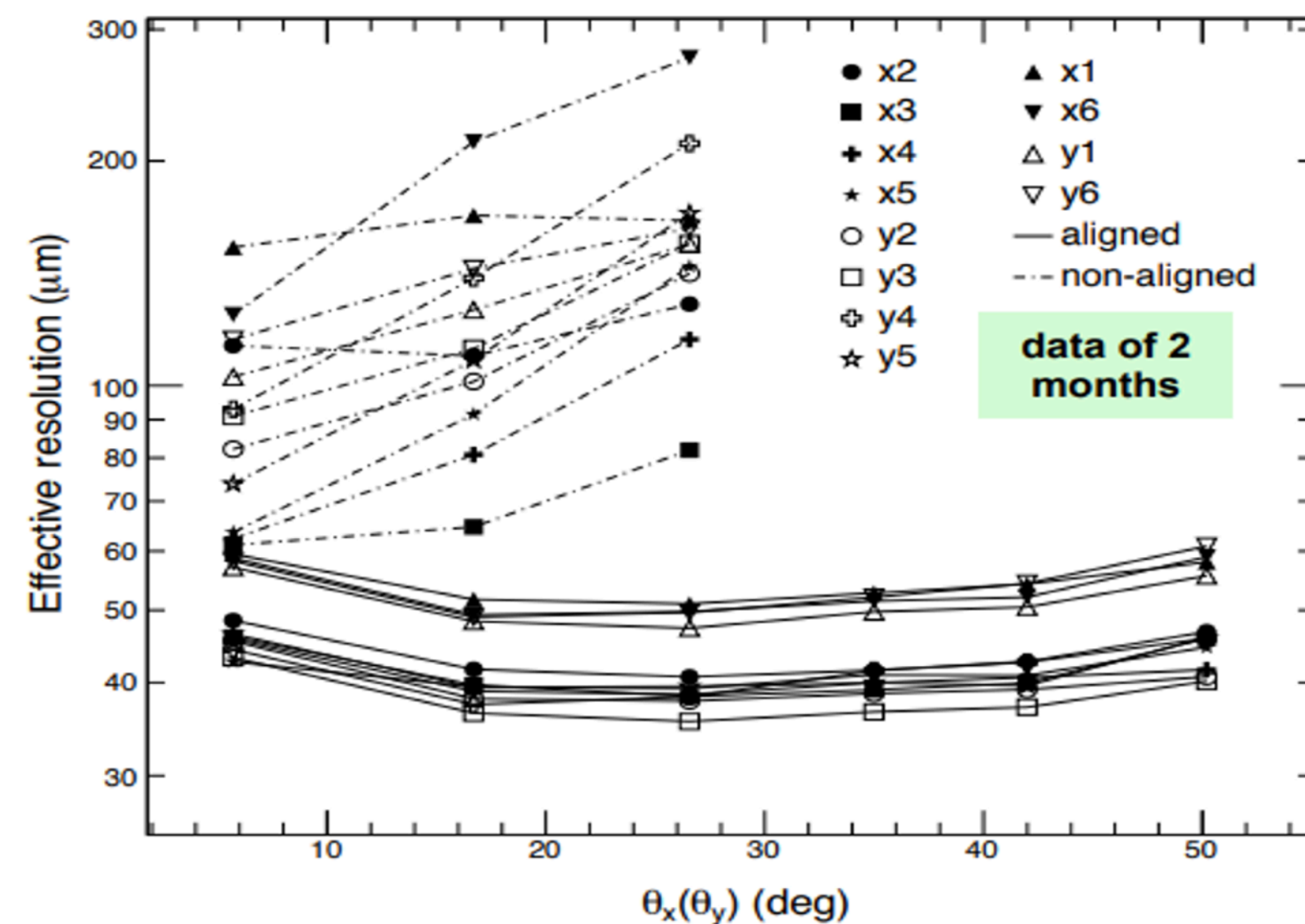


STK 电荷测量



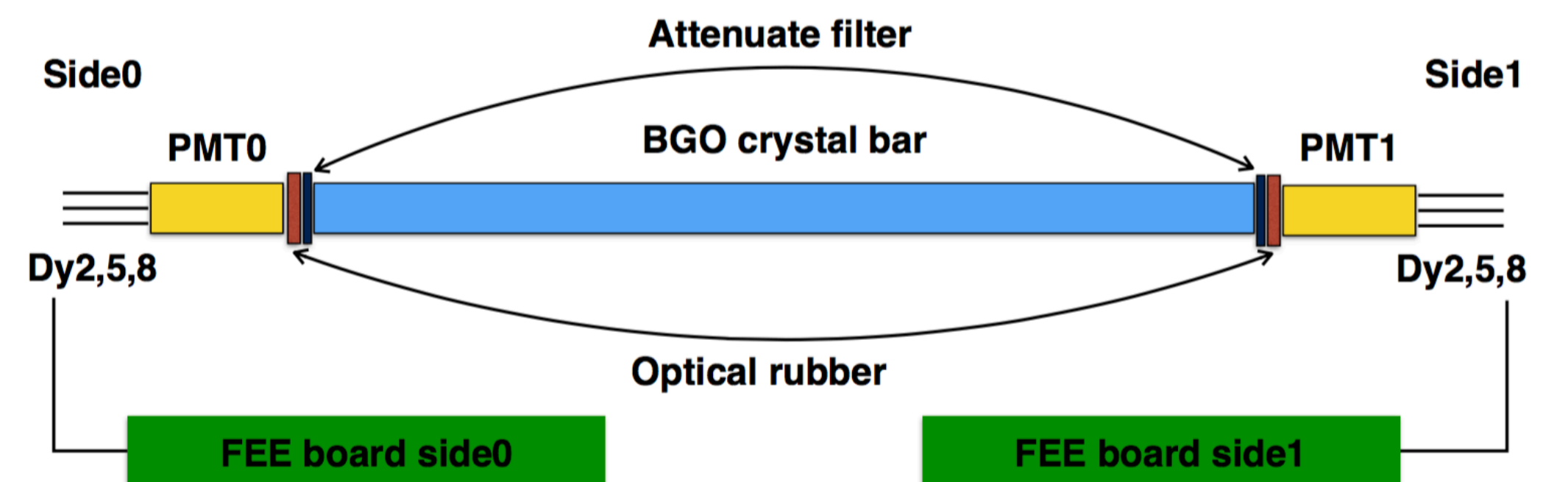
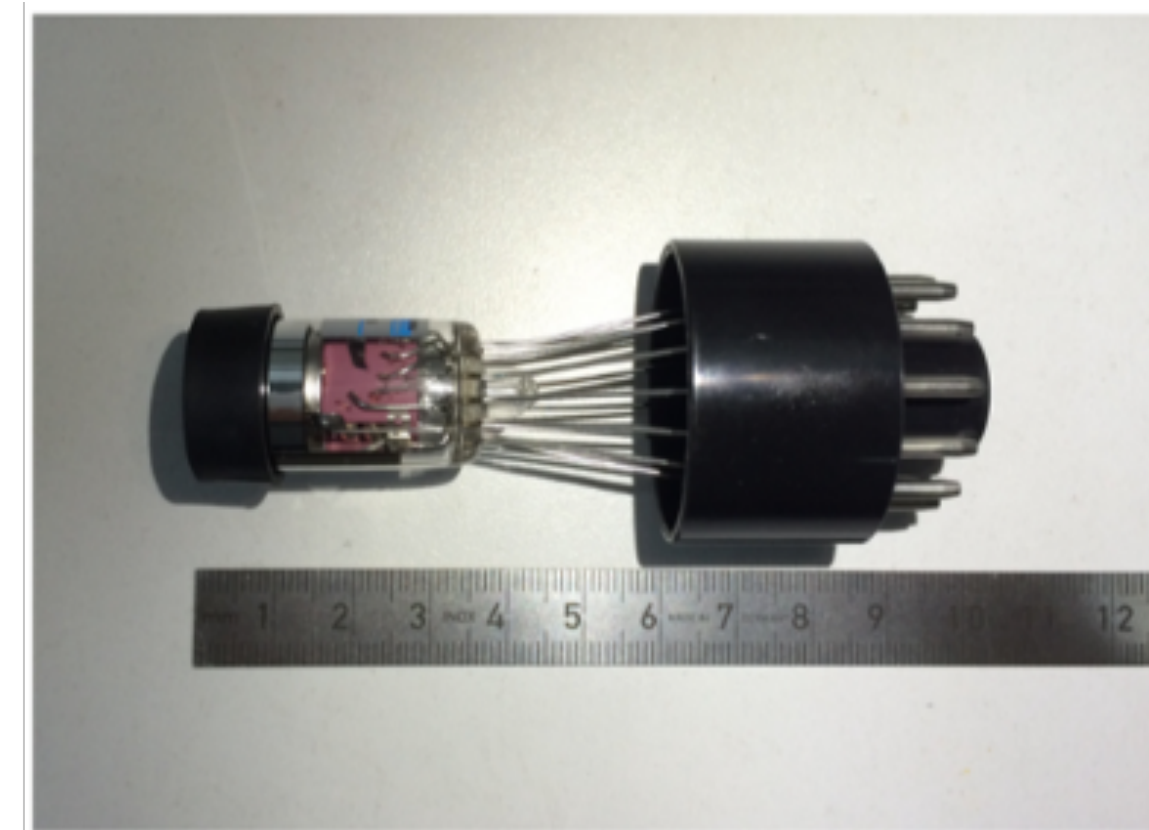
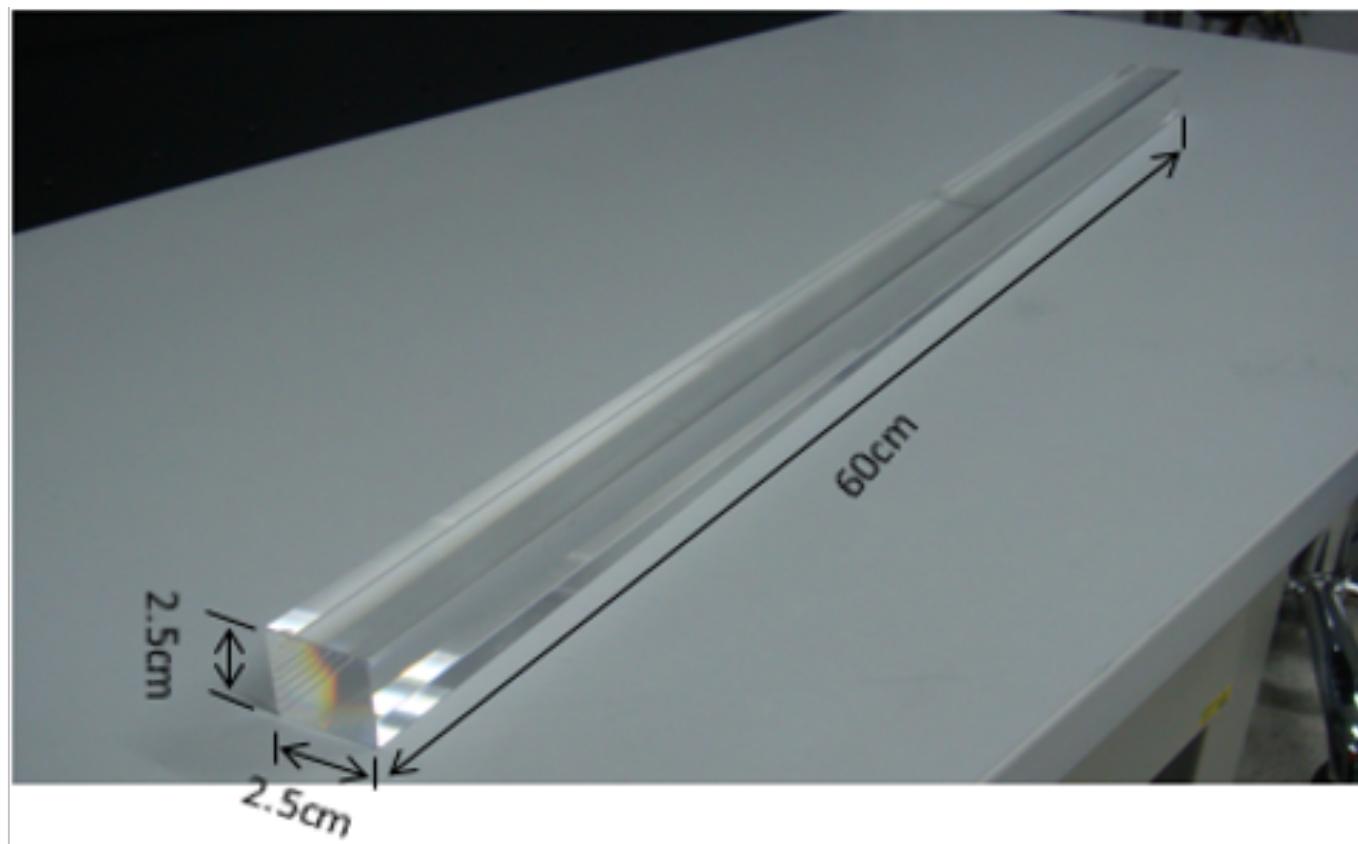
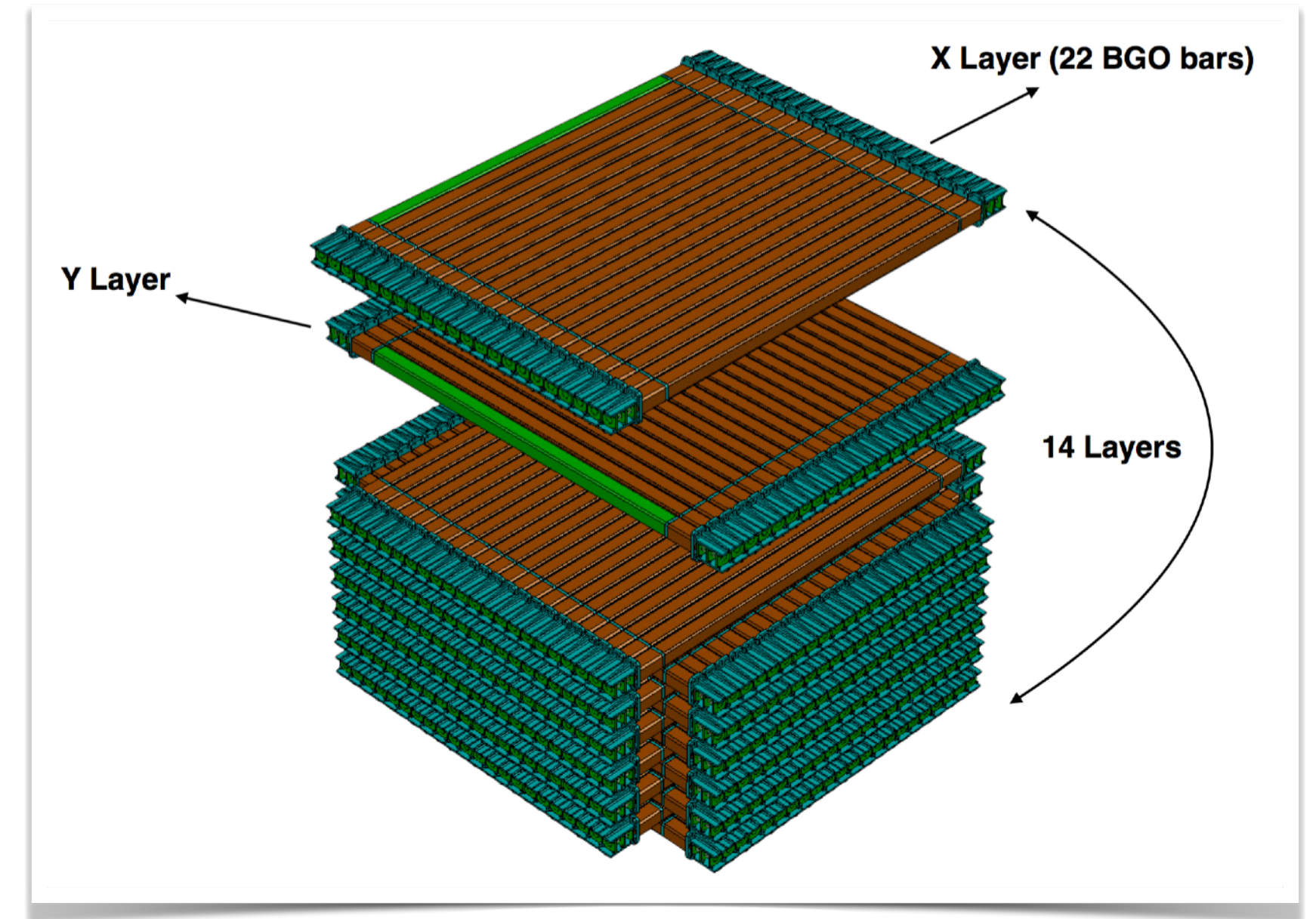
径迹测量

- 利用STK进行径迹测量
- STK单层空间分辨: 优于60微米
- 角分辨:
 - 0.1 度 @ 100 GeV
 - 利用脉冲星/AGN的光子进行角分辨的标定, ~0.5 度 @ 5 GeV



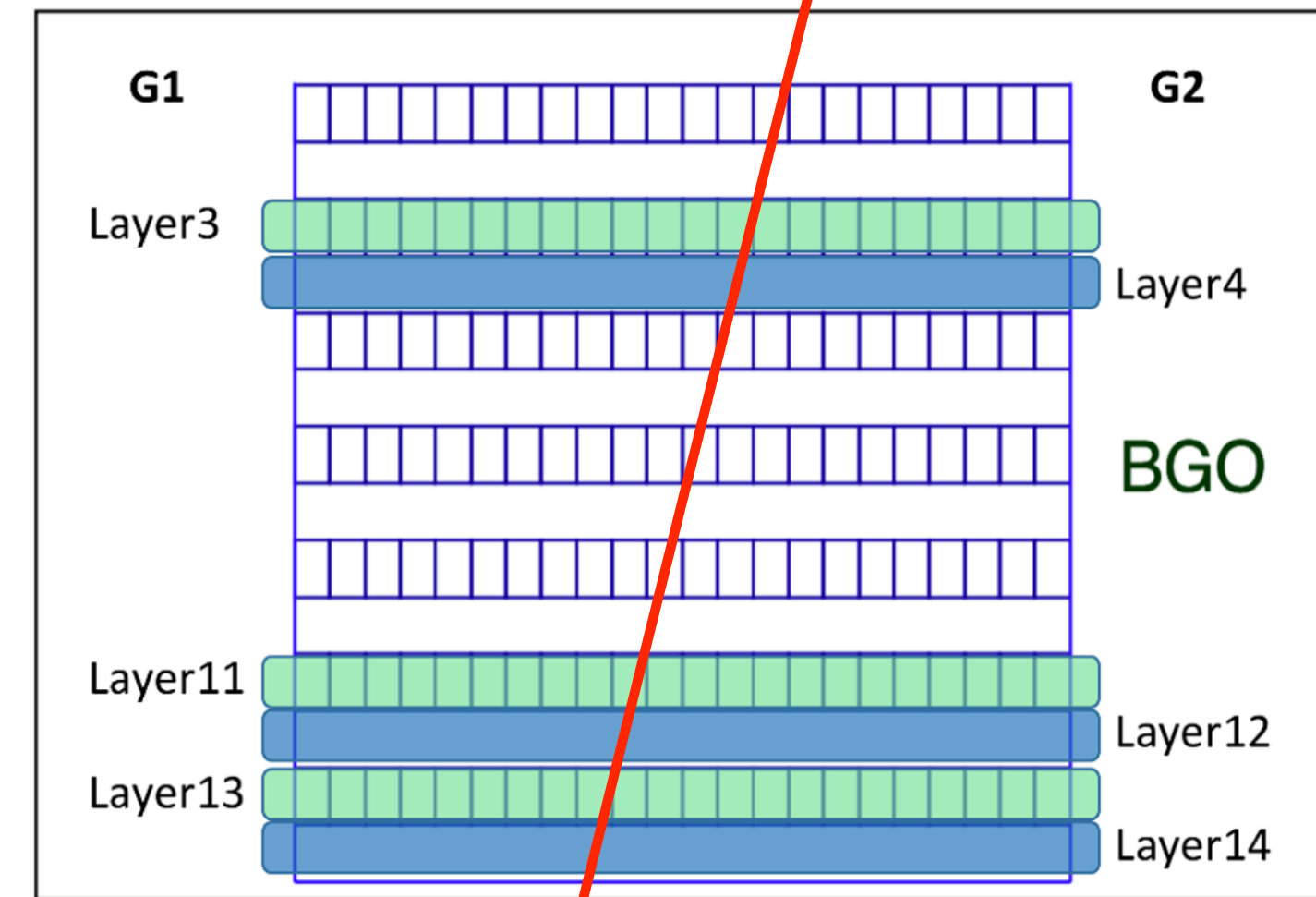
能量测量：BGO量能器 (BGO)

- 14 × 22 BGO晶体阵列
 - BGO晶体尺寸：2.5×2.5×60cm³
 - 相邻两层正交排列
- 纵向尺寸：32X₀, 1.6λ_I
- 晶体双端耦合光电倍增管读出



分数电荷粒子性质的假设

- 分数电荷粒子性质的假设：
 - 有较重的质量
 - 参与电磁相互作用
 - 不参与强相互作用
 - 电荷可能为 $1/3e$? $2/3e$? 或者任意分数电荷?
 - 行为、性质类似于大质量轻子 (比如 μ 子)

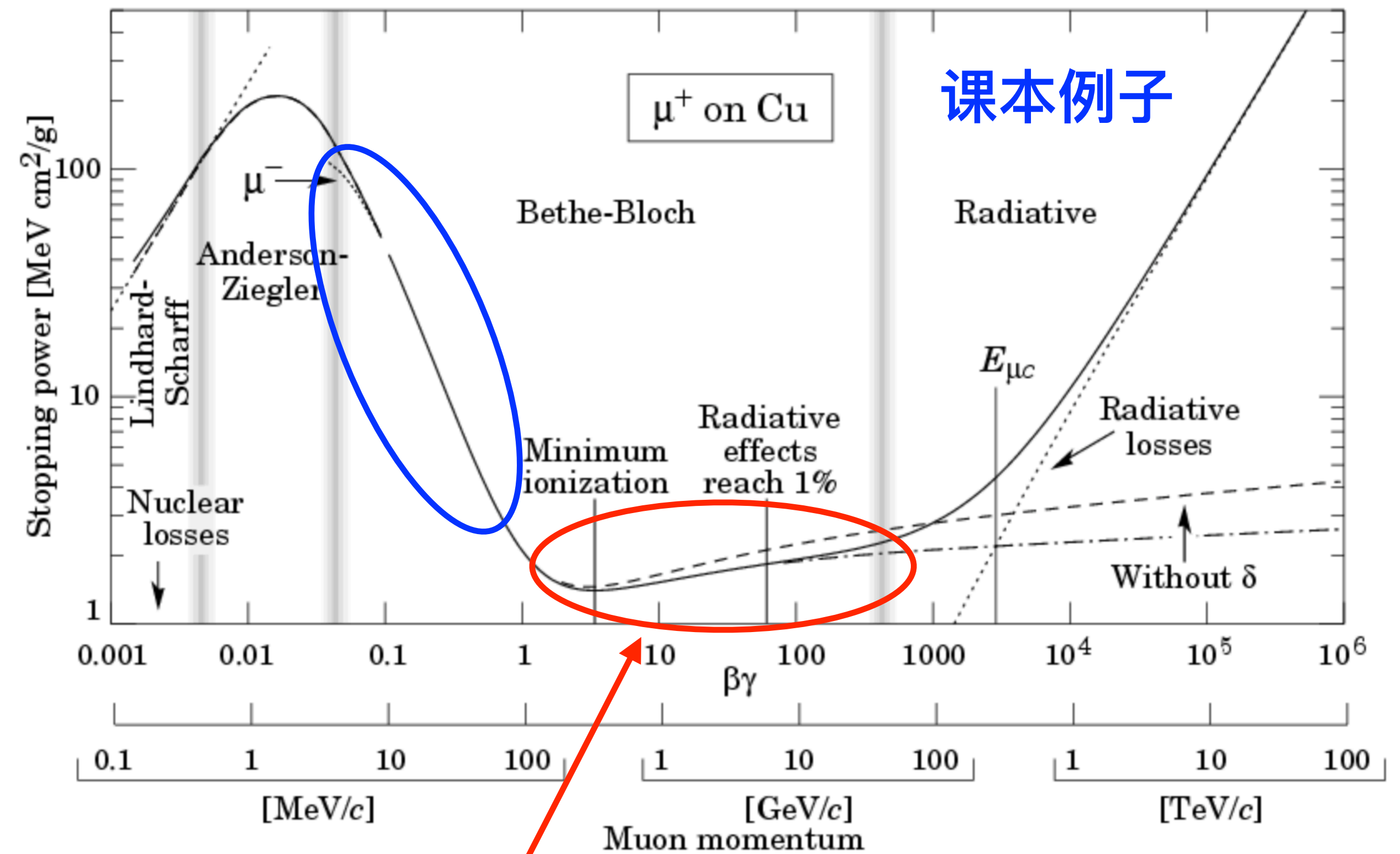


- DAMPE的MIPs触发模式 (G1 || G2)
- 触发阈值 ~ 0.2 MIP
- $1/3 e$ FCP的电离能损 $\approx 1/9$ MIP, 无法触发
- $2/3 e$ FCP的电离能损 $\approx 4/9$ MIP, 可以触发

物理目标!

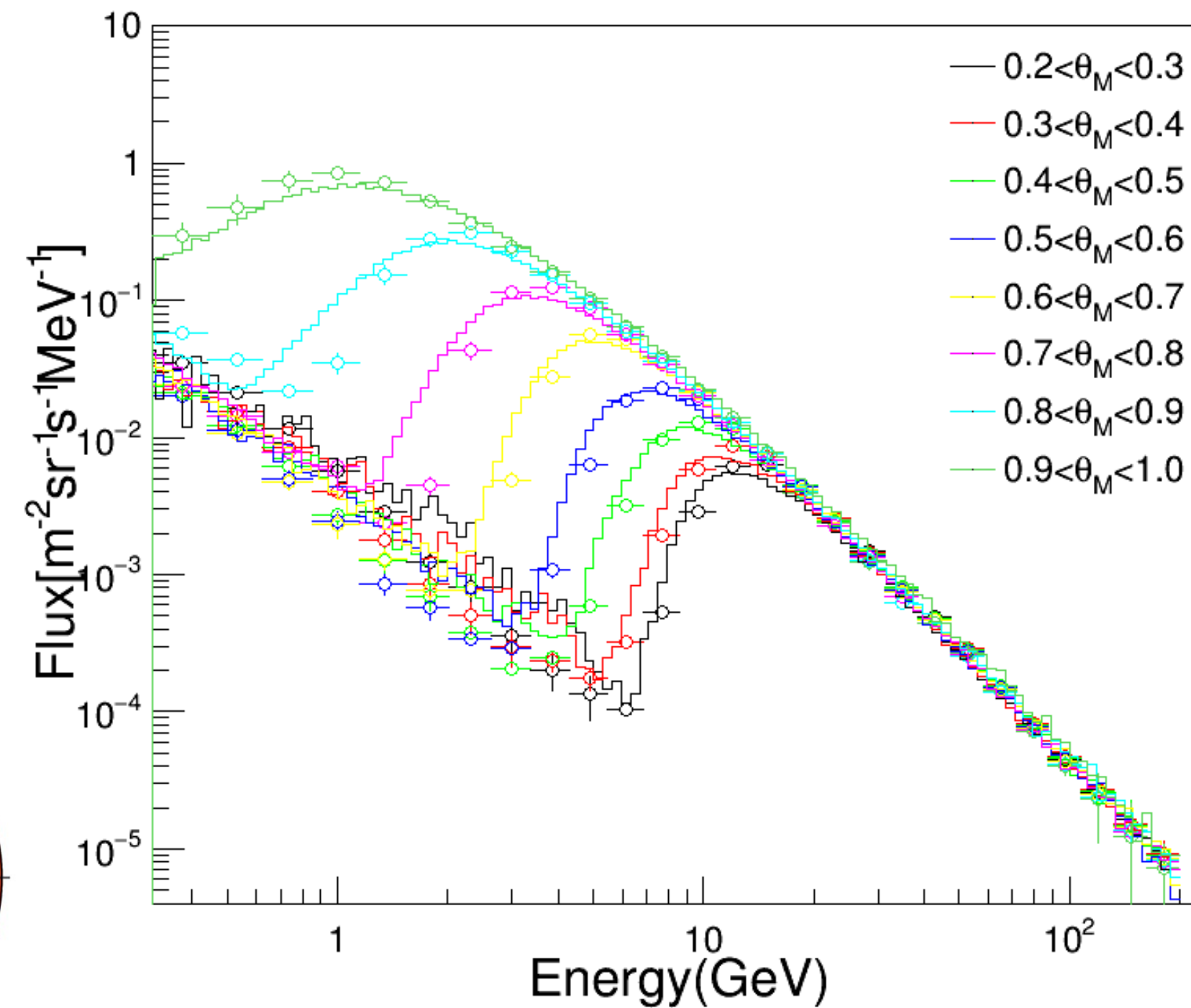
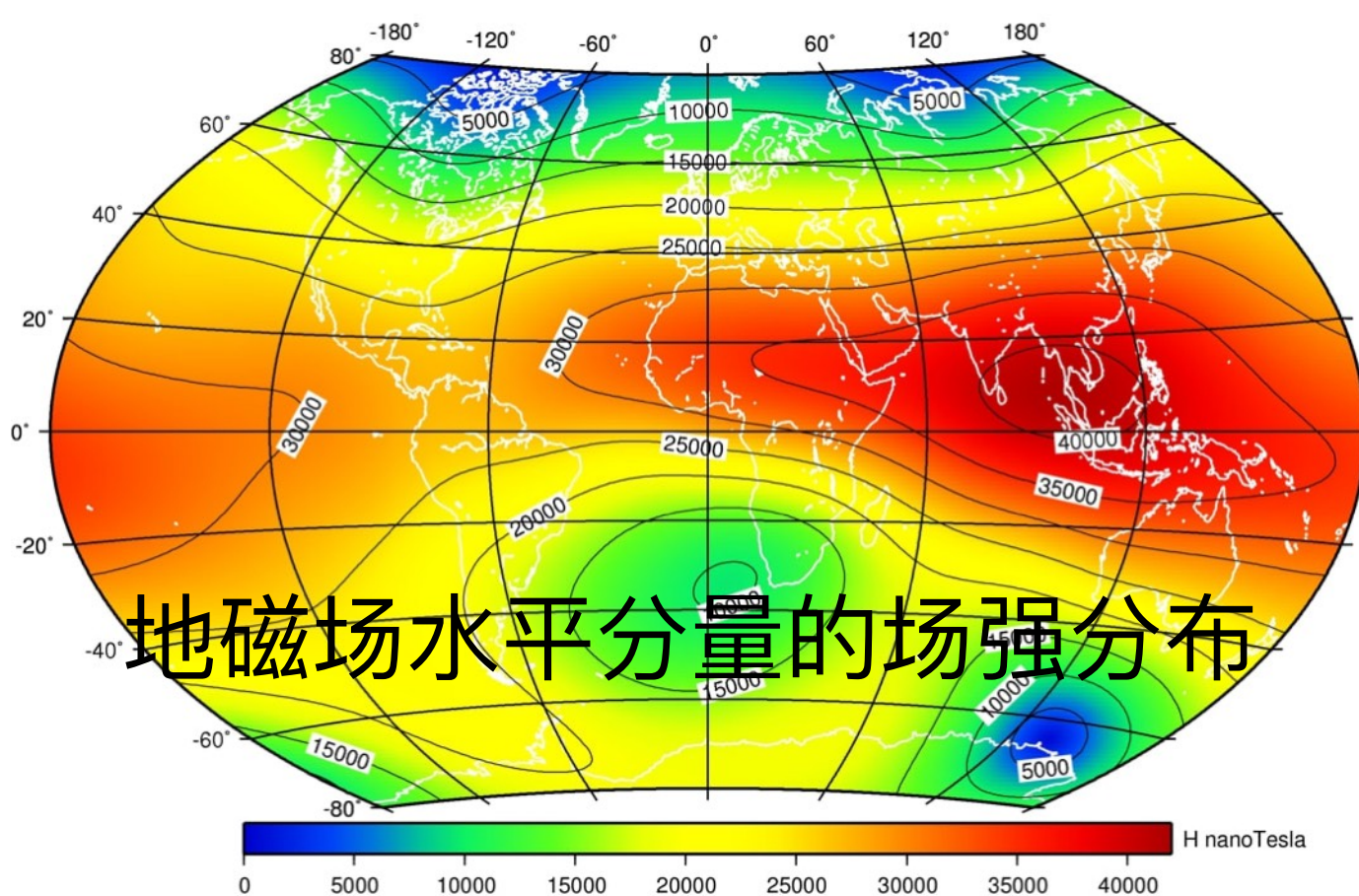
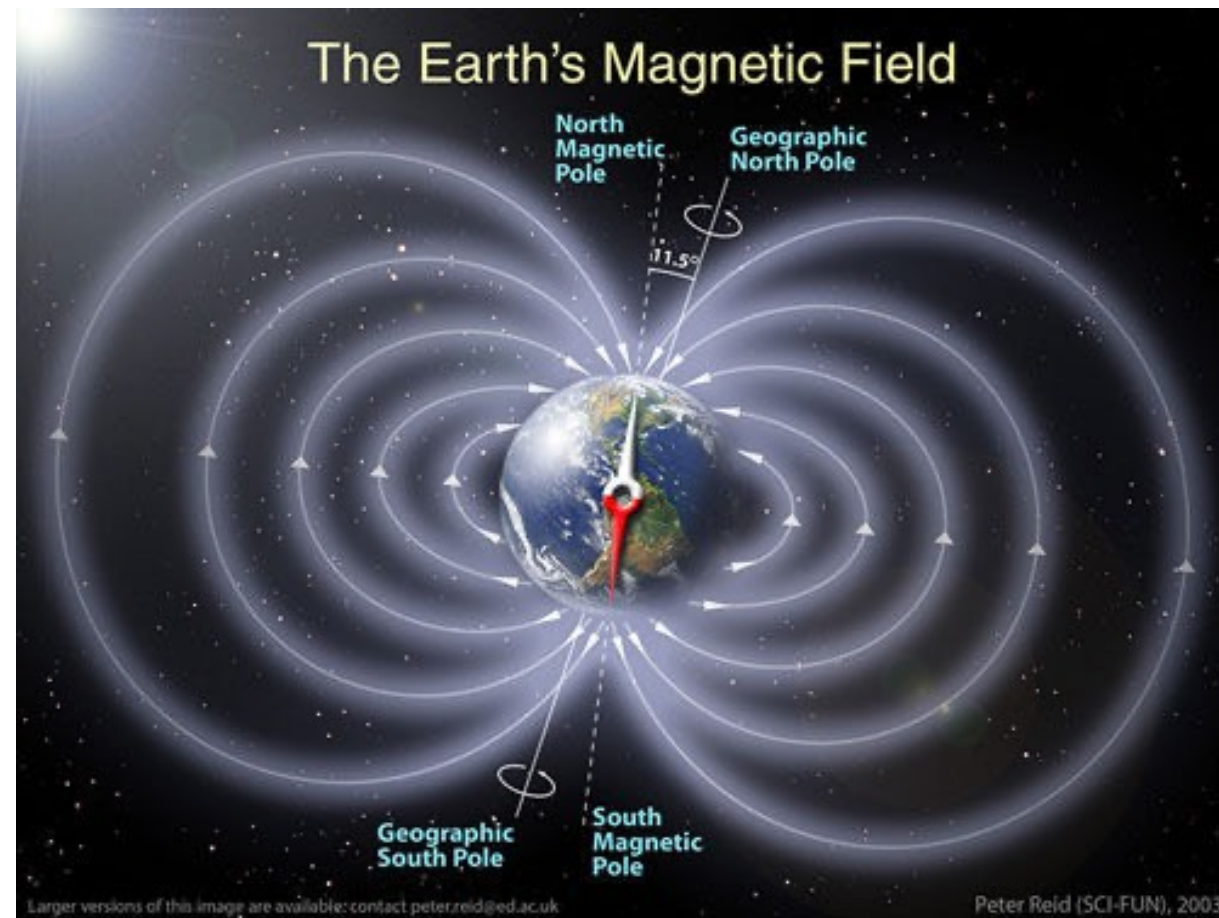
分数电荷粒子的能量估计

- 类MIP粒子无法通过量能器测量动能
- 粒子动能与电离能损 dE/dx 的关系
 - 非相对论区的 dE/dx 非常大
 - 最小电离点之后 dE/dx 相对稳定



目标能区

分数电荷粒子的能量估计



- 宇宙线能谱服从 $\phi = AE^{-\gamma}$
- 近地轨道上带电粒子的能谱受地球磁场影响，存在截断
- 赤道附近的质子能谱截断值 ~ 10 GeV，高于质子MIP (3~4 GeV)
- 2/3e FCP能谱截断值估计为 6 ~ 7 GeV
- 通过选择纬度 $\pm 20^\circ$ ，控制选取最小电离能量以上的FCP样本

本底来源

- 本底来源1：单电荷粒子：

- 正反质子



- 正负电子



- 本底来源2：光子

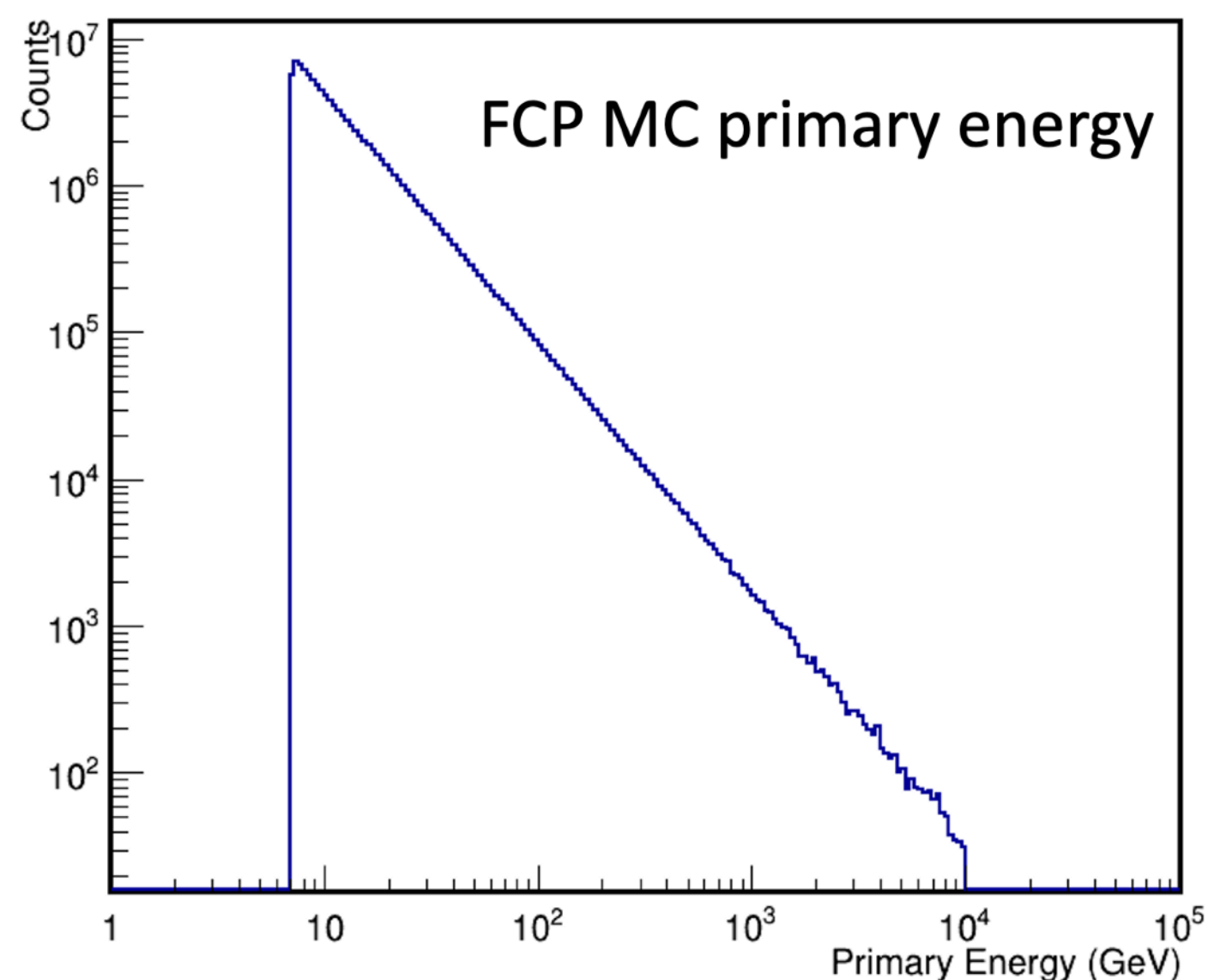


经过1.6个核作用长度的量能器
约20%事例表现为MIPs
是FCP的主要本底

在量能器中发生电磁簇射
筛选类MIPs粒子时排除

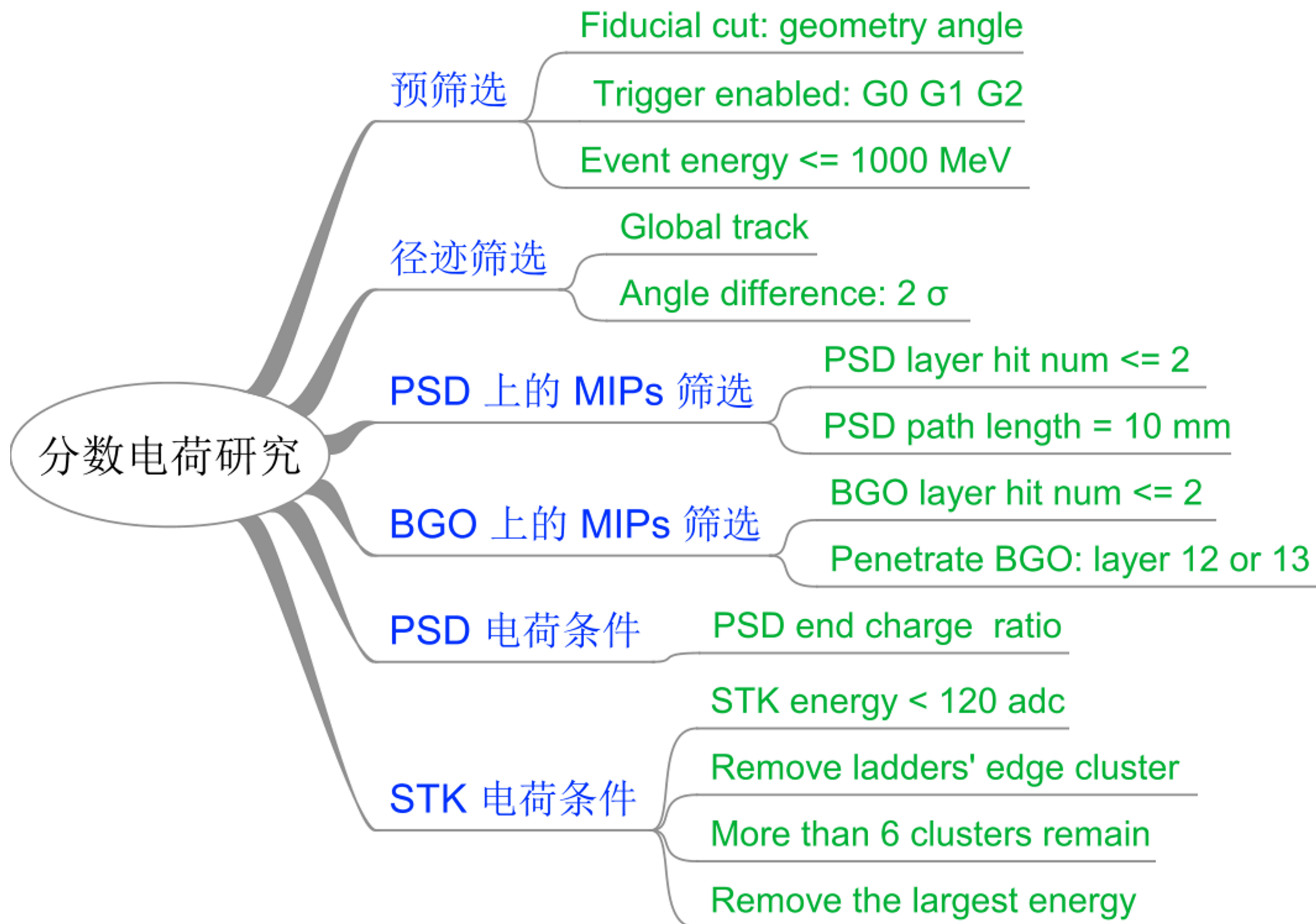
数据样本

- 实验数据样本：2016.01.01 ~ 2020.12.30
- 模拟数据样本：
 - 质子 10 GeV ~ 100 TeV
 - FCP 7 GeV ~ 10 TeV



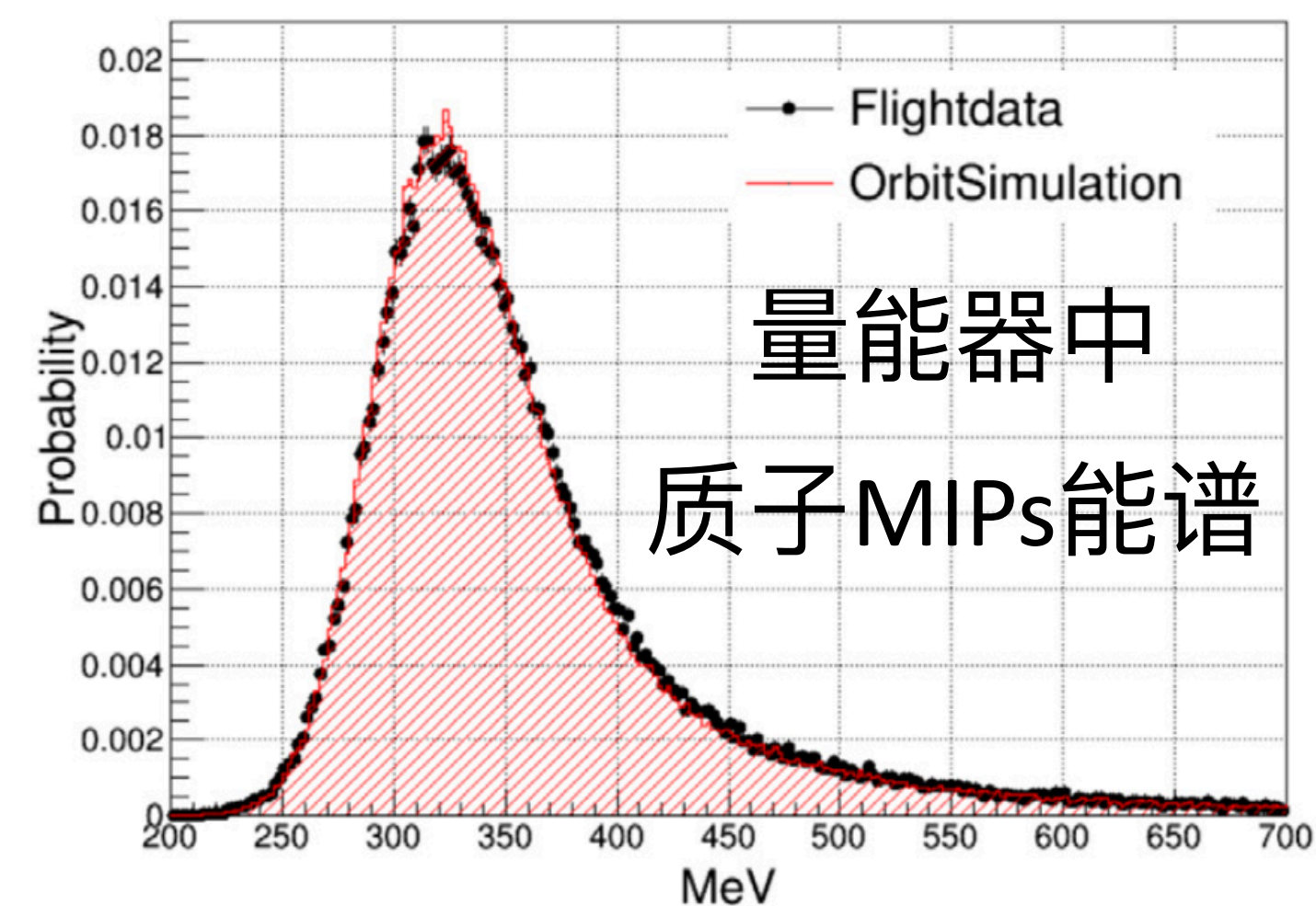
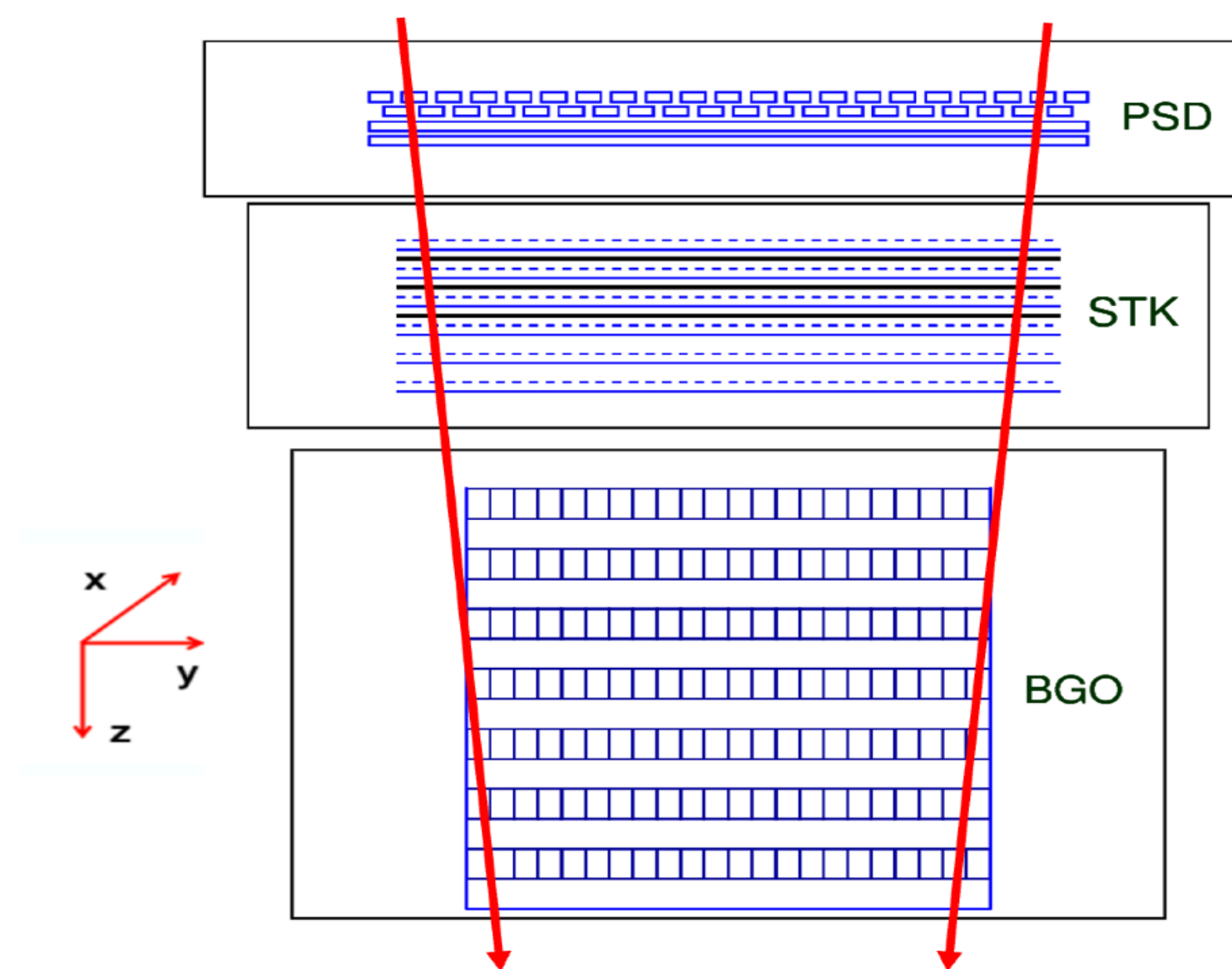
- 分数电荷粒子的模拟
 - 通过Geant4创建虚拟粒子
 - 电荷值为 $2/3e$
 - 质量设为任意值1.2 GeV
 - 添加电离和多次散射过程
 - 能谱服从 $E^{-2.7}$
 - 粒子源为球面源

选择条件



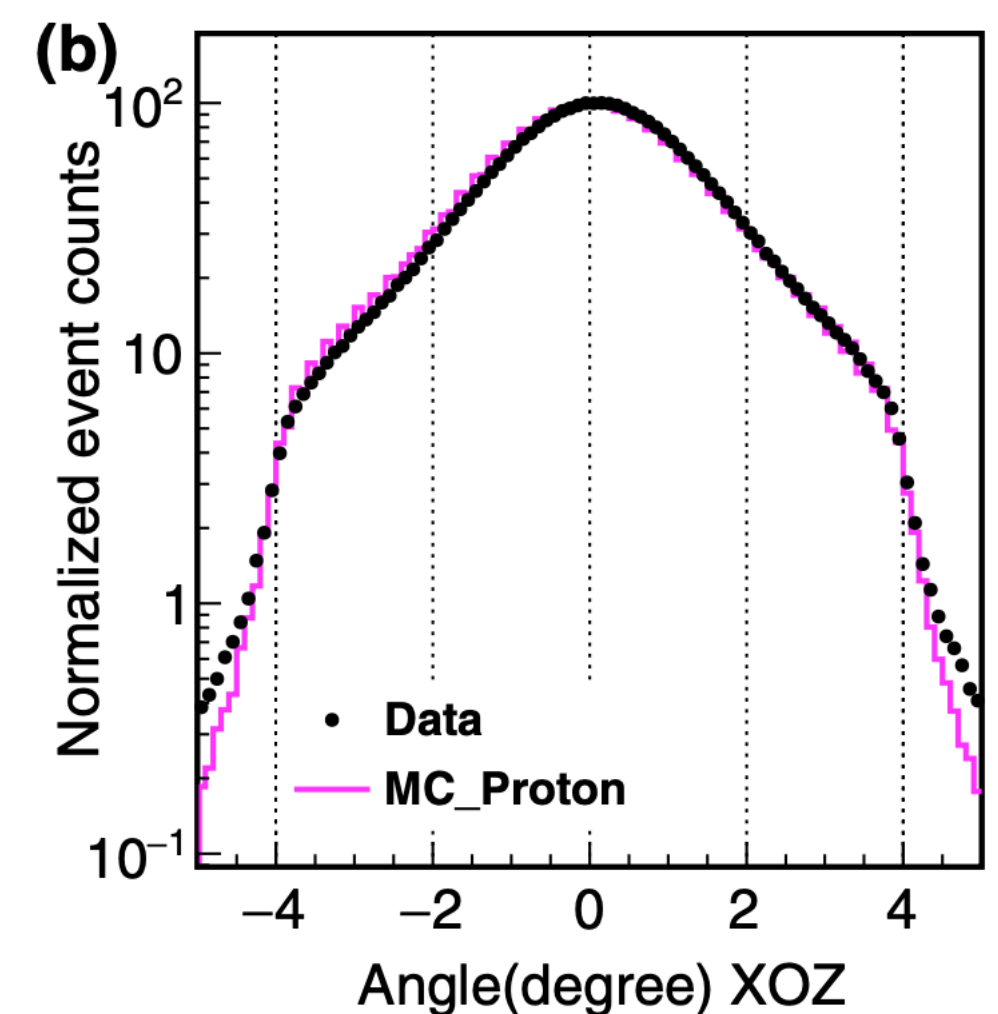
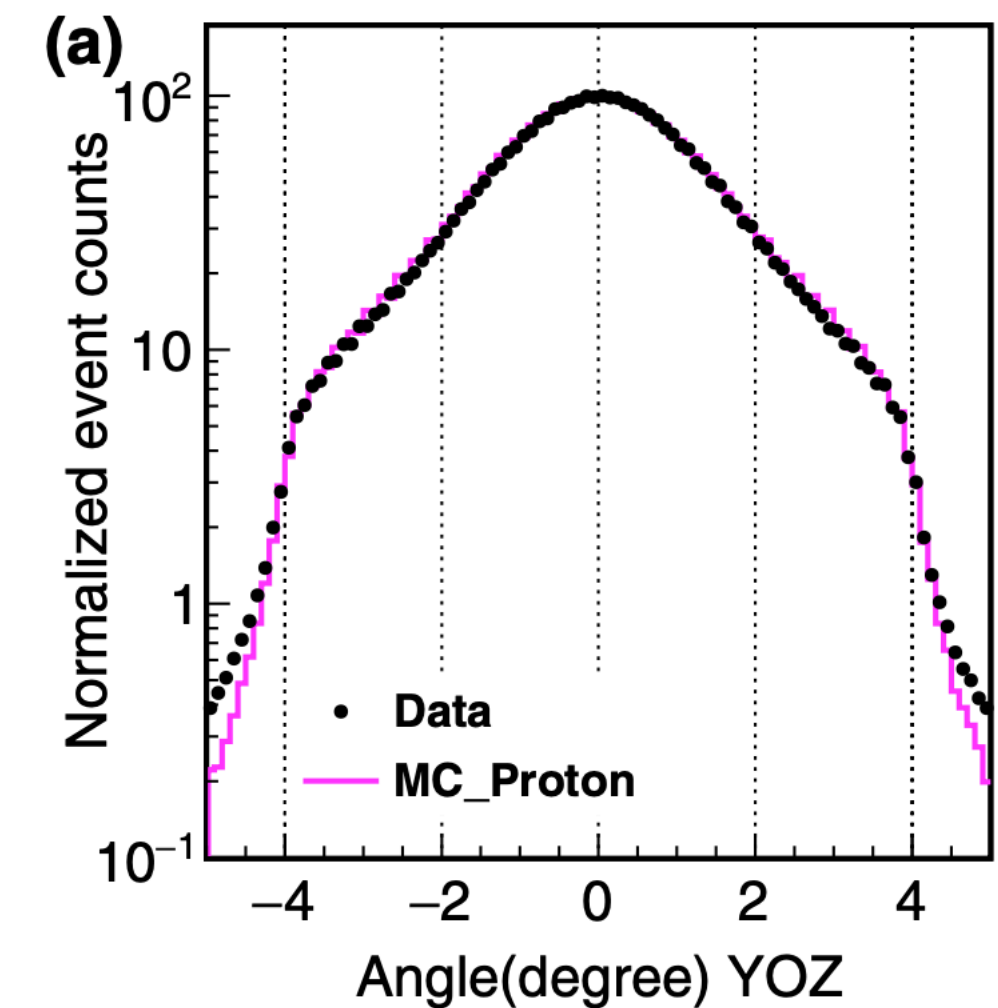
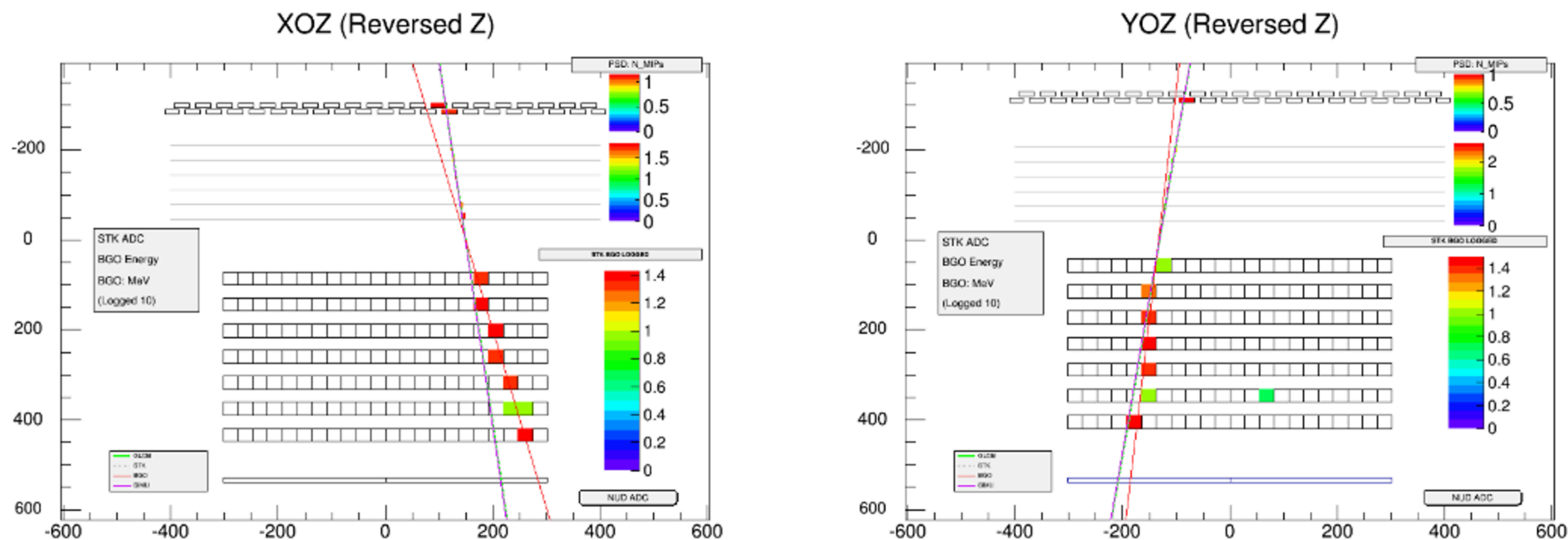
预选择

- MIPs触发选择: G1 || G2 || G0
- 限制事例的入射位置和出射位置在探测器几何张角内, 如图中红色线条标注范围内
- MIPs 沉积能量限制:
 - BGO量能器中总沉积能量小于1000 MeV, 设置一个比较松的条件去除高 Z 核素 MIPs 的影响



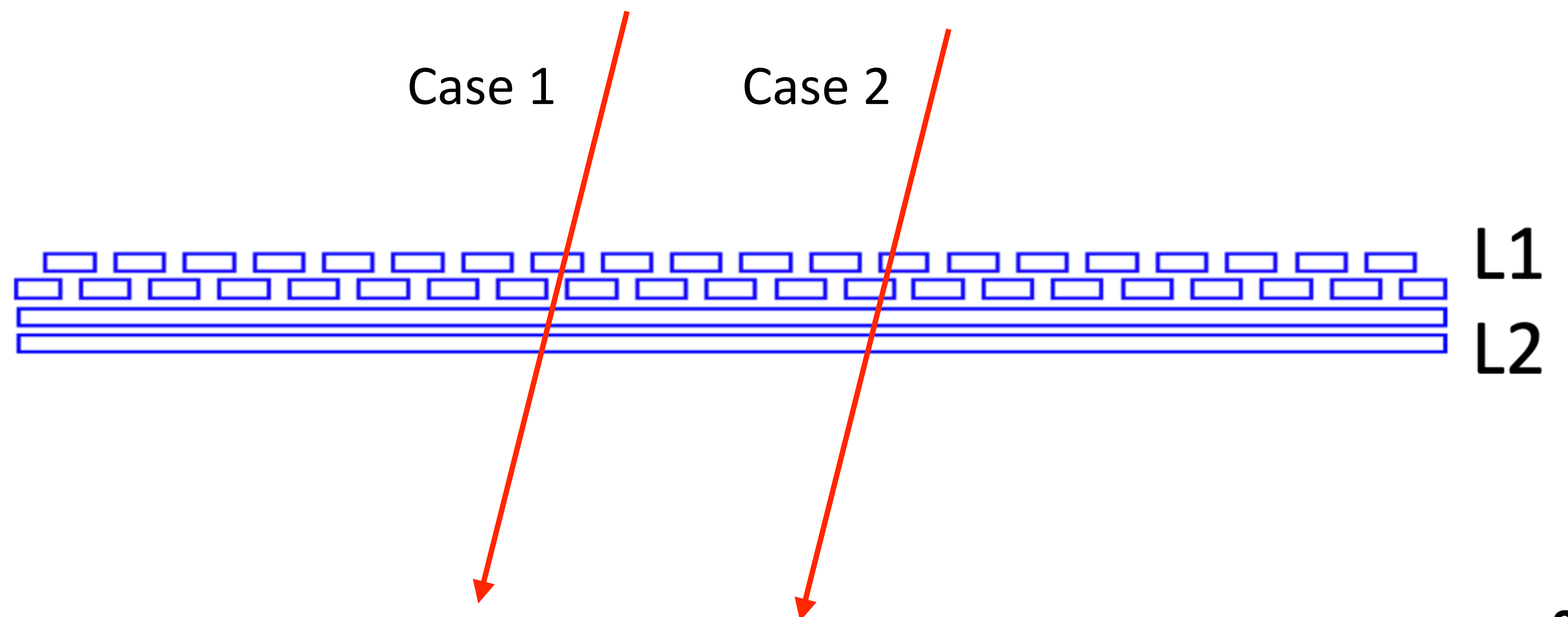
径迹选择

- **STK 径迹:** STK 探测器上能够重建一个比较好的事例径迹
- **STK 径迹和 BGO 径迹的角度差:**
 - BGO 量能器中的击中晶体能够重建一个 BGO 径迹
 - **散射事件** STK 径迹和 BGO 径迹偏差太大



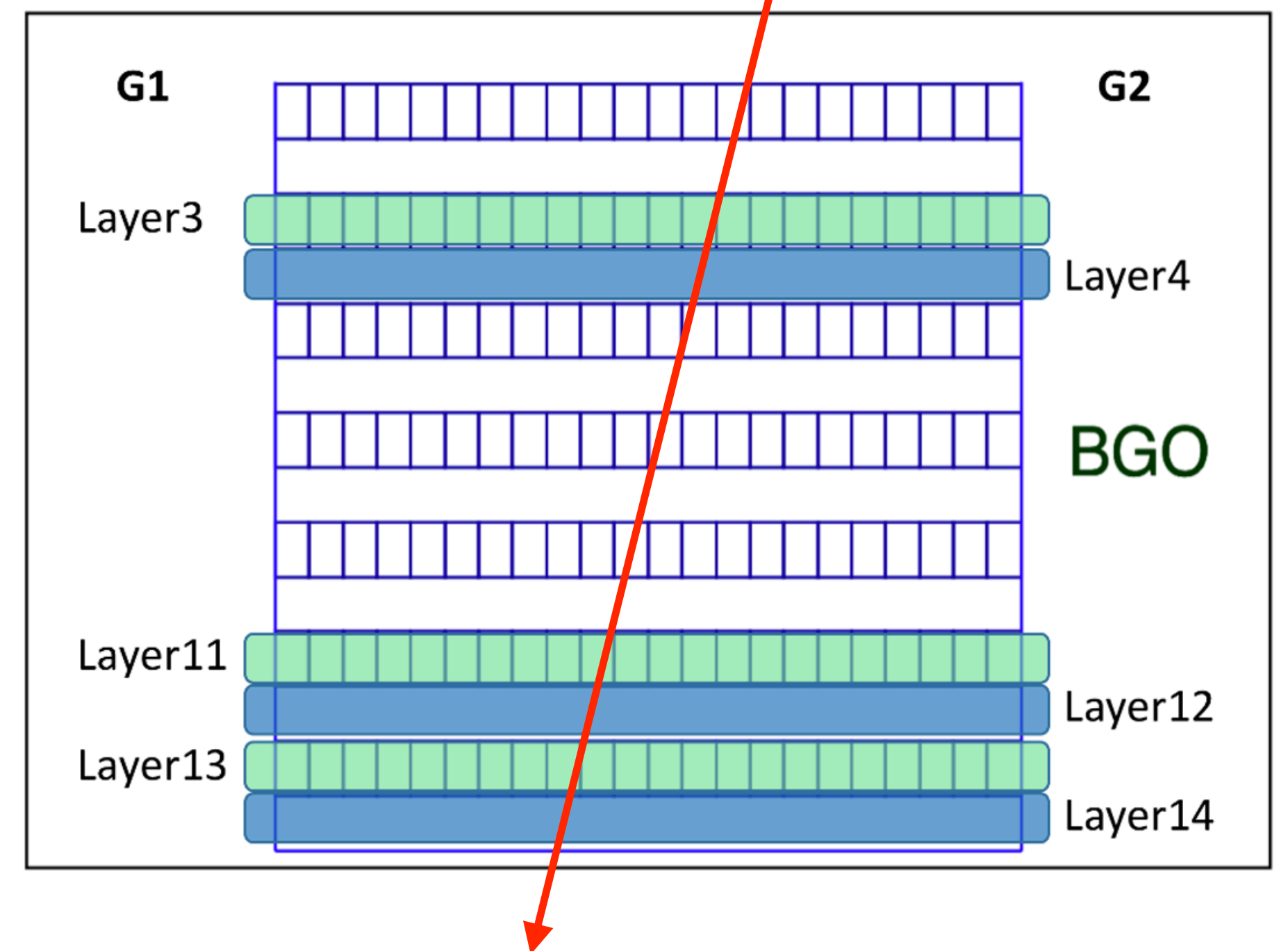
MIPs事例选择

- PSD 上的 MIPs 筛选:
 - 每一大层 PSD上过阈的塑闪条数 ≤ 2
 - STK径迹贯穿重建电荷的塑闪条



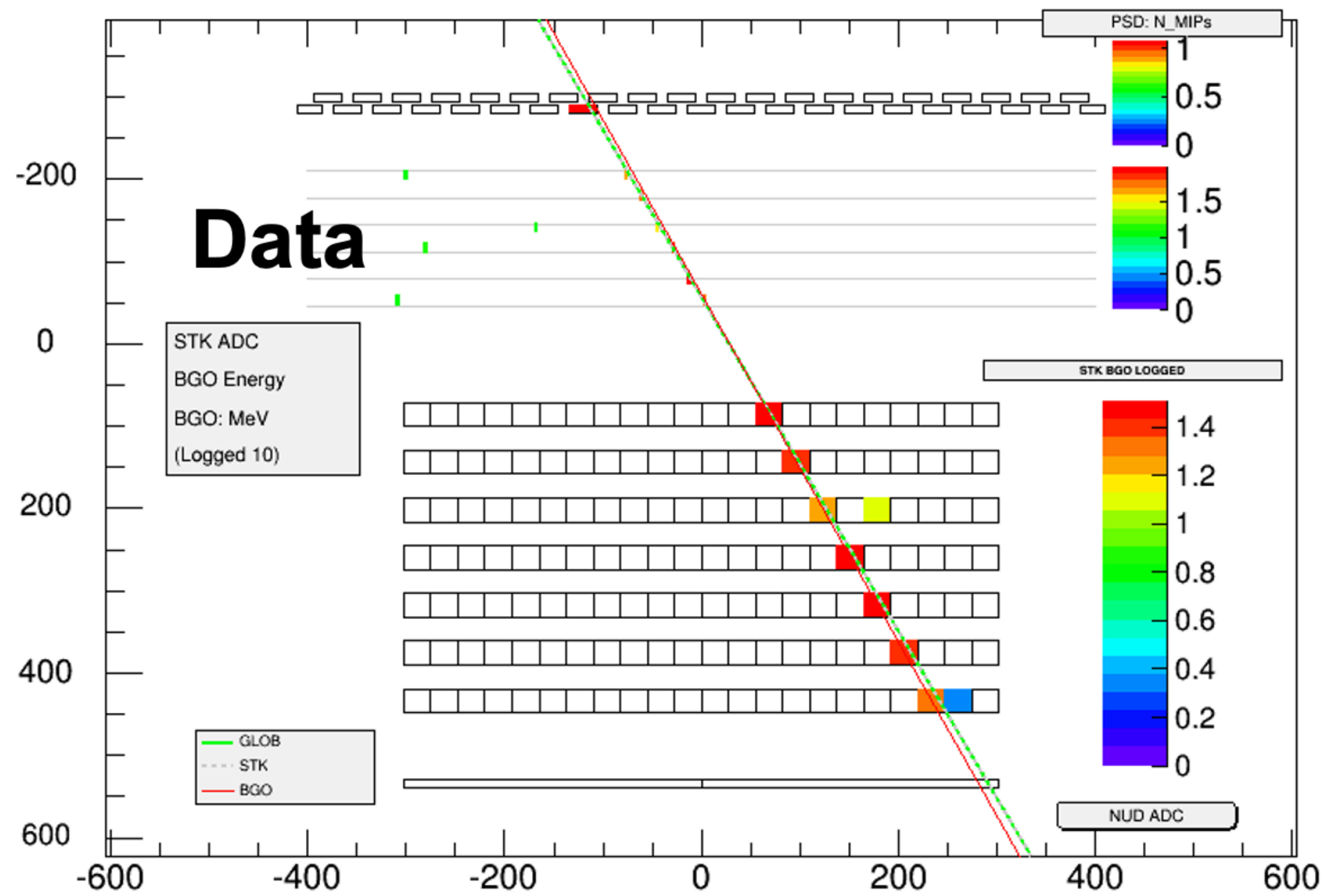
MIPs事例选择

- BGO 上的 MIPs 筛选:
 - 每一层径迹周围过阈(2 MeV) 晶体数不超过 2
 - 整个量能器中的击中晶体不超过 28 (14×2)
 - 在 YOZ 和 XOZ 平面击中晶体的层数均大于等于 5
 - 为了保证 MIPs 的触发, 两个平面最后一层必须有击中

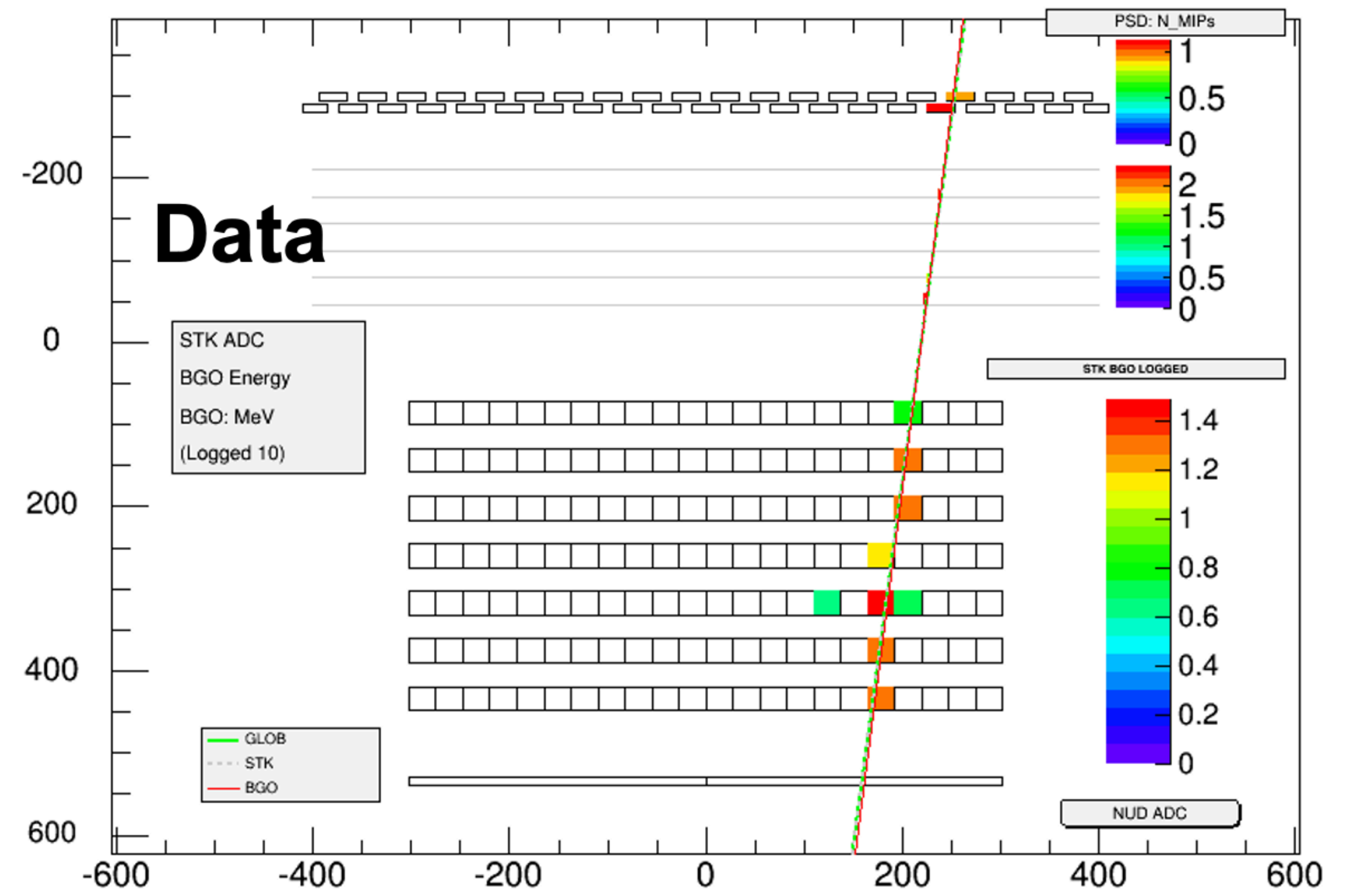


MIPs事例选择

XOZ (Reversed Z)



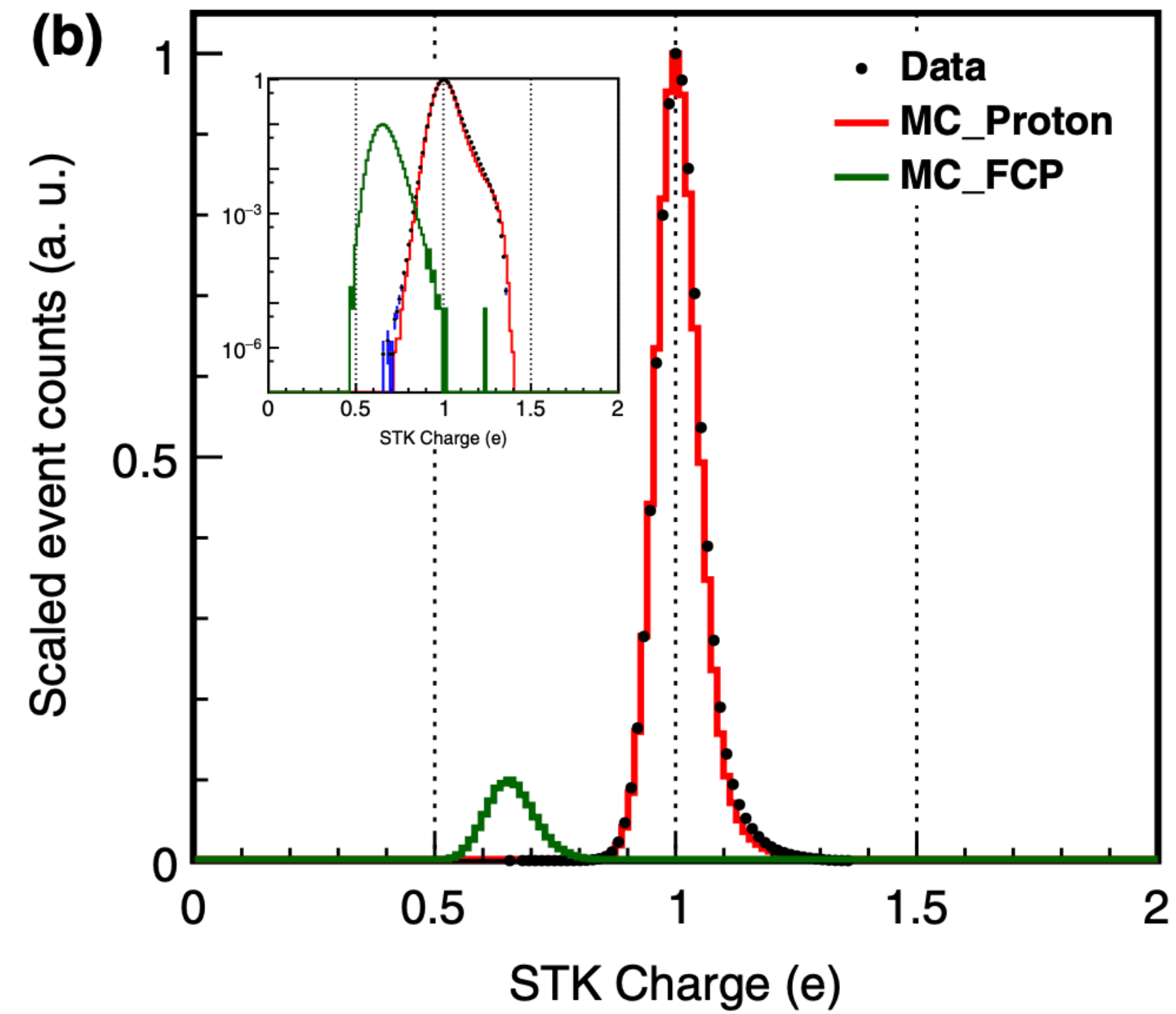
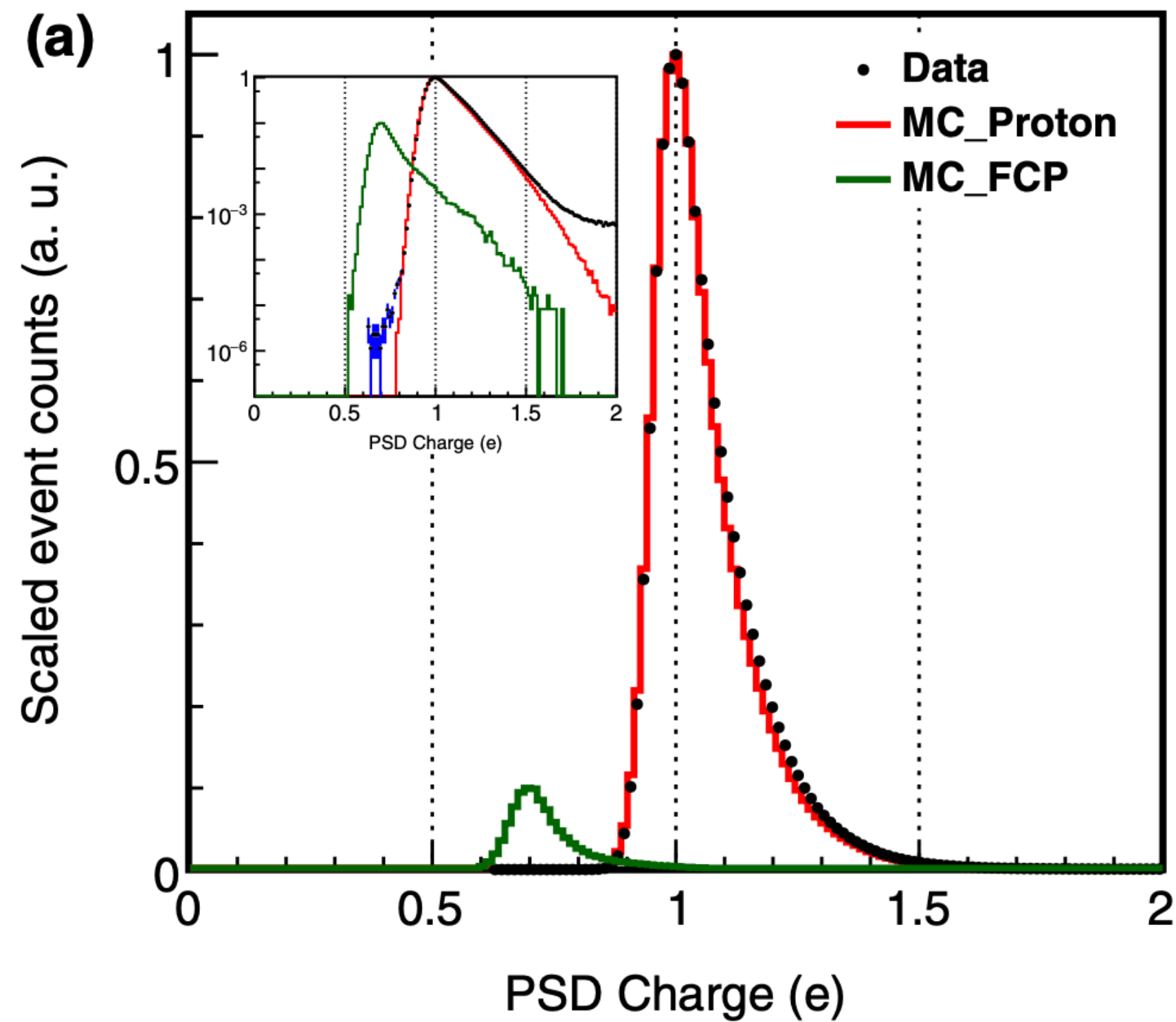
XOZ (Reversed Z)



电荷重建

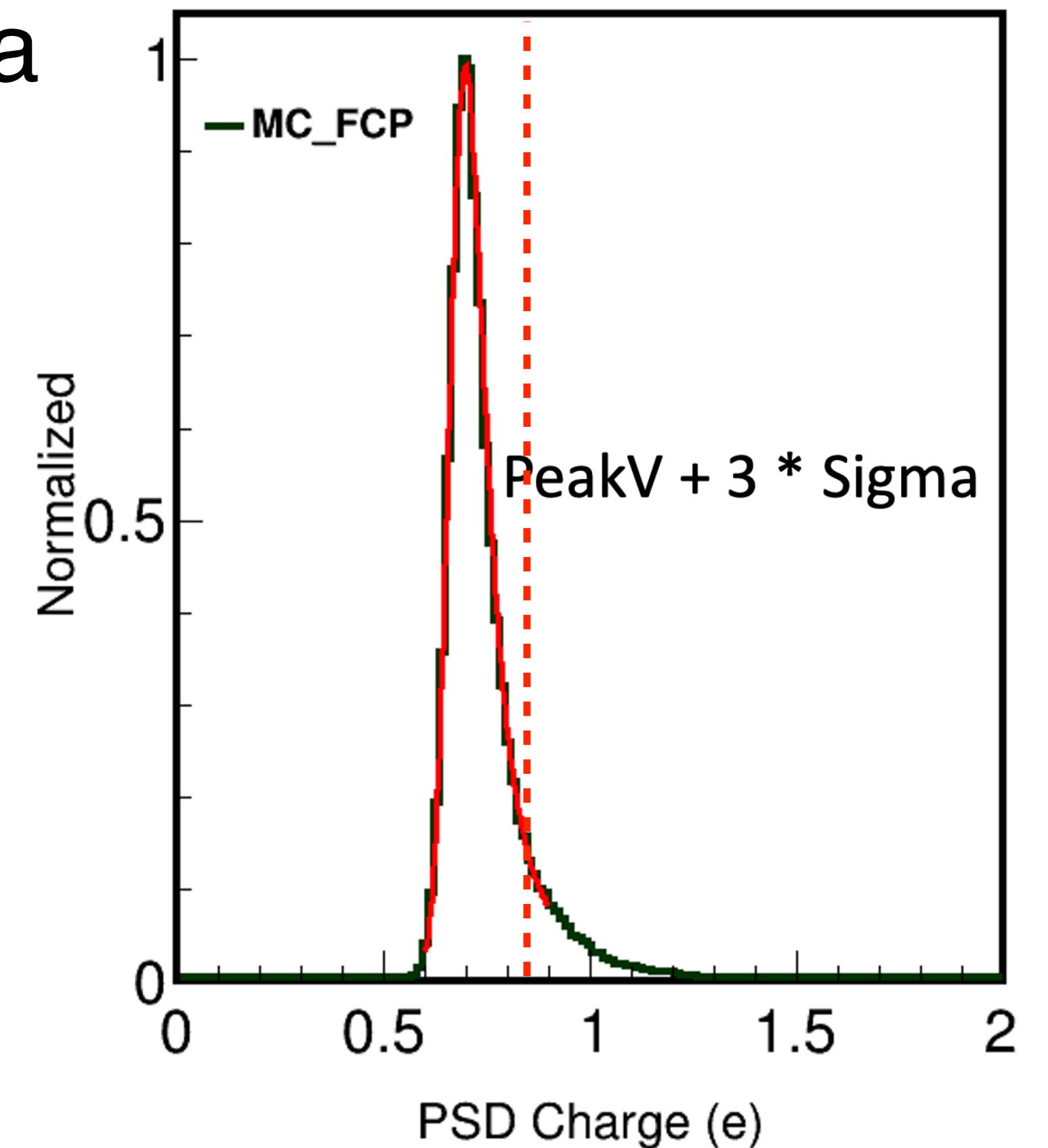
$$Q_{PSD} = \frac{Q_0 + Q_1}{2}$$

$$Q_{STK} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N}$$

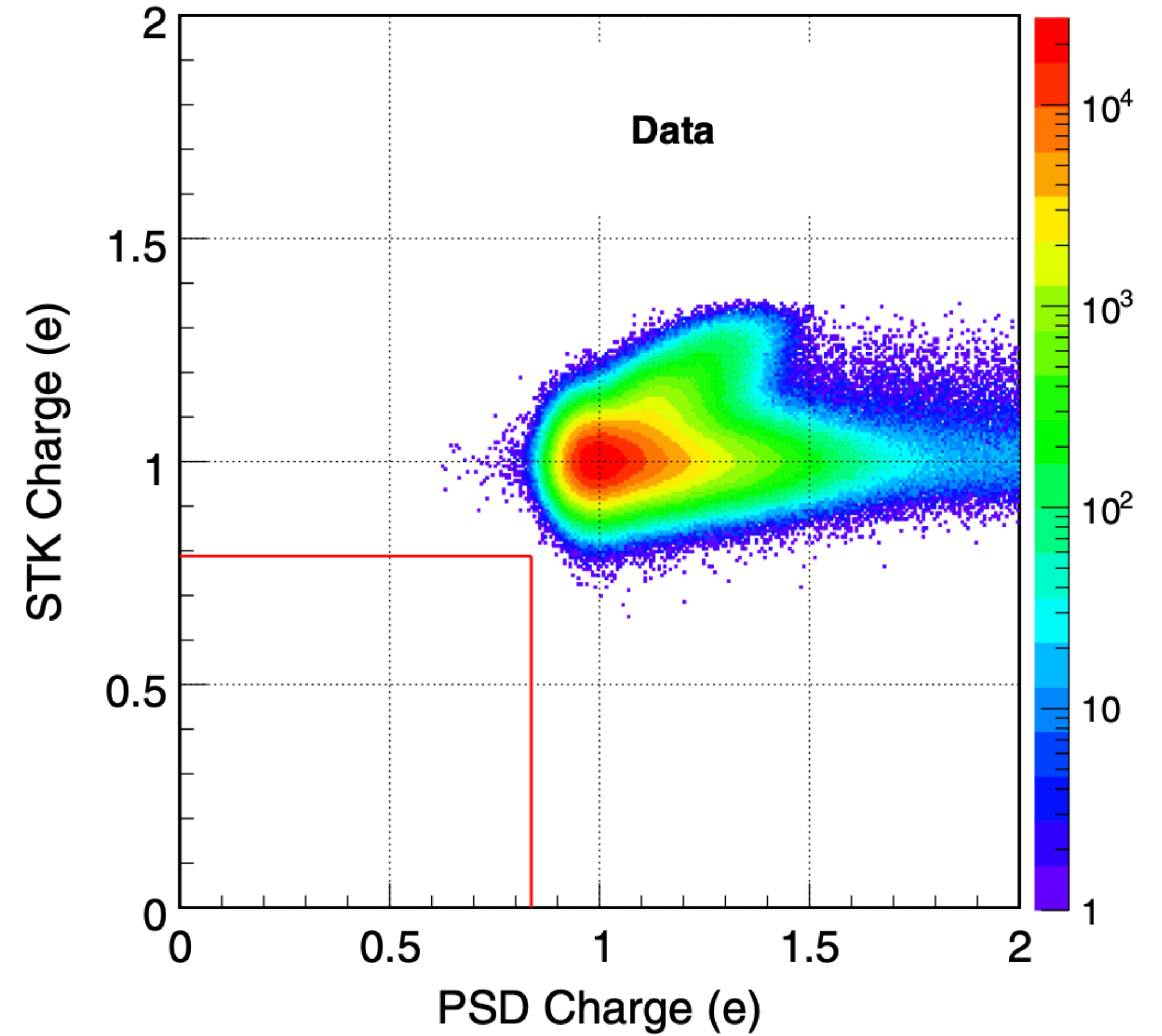
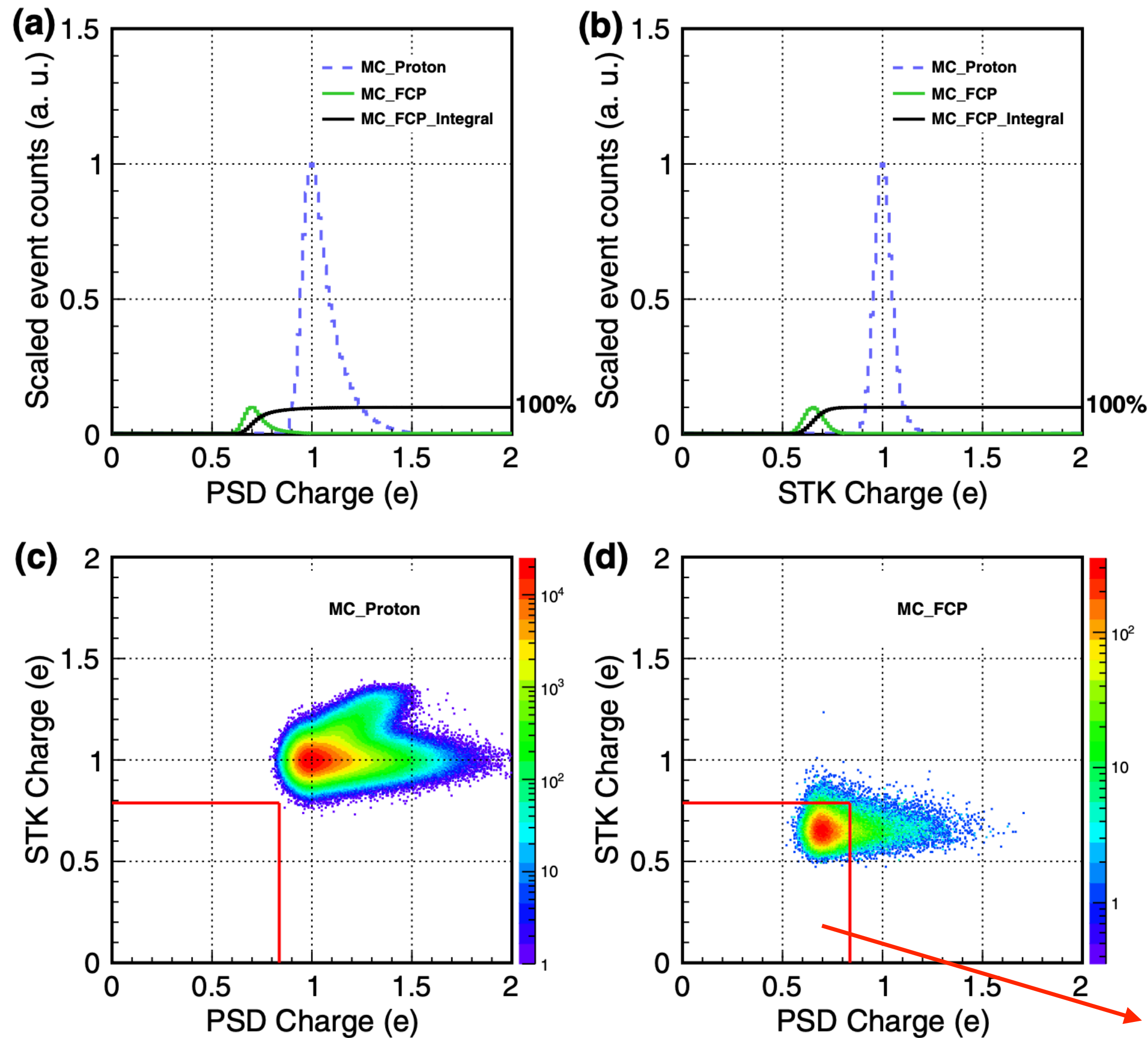


信号区定义

- 信号区选择条件：MC FCP信号的峰值 + 3sigma
 - PSD信号区： $Z < 0.84e$
 - STK信号区： $Z < 0.79e$



信号选择



电荷选择效率为86%

积分通量的计算

$$\Phi = \frac{N_{\text{obs}}}{T_{\text{exp}} \epsilon_{\text{scale}} \epsilon_{\text{trig}} A_{\text{eff}} \epsilon_{\text{region}}},$$

Φ : 通量或通量上限 ($\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{s}^{-1}$)

ϵ_{trig} : 触发效率

N_{obs} : 实验观测到的分数电荷粒子数量

ϵ_{scale} : 触发分频数

T_{exp} : 观测时间

A_{eff} : 有效接收度

ϵ_{region} : 信号选择效率

通量上限的计算

N_{obs} : 未观测到, 90%置信度
下, 上限取值为2.44

T_{exp} : 观测时间, $2.34 \times 10^7 \text{s}$

ϵ_{trig} : 85.5%, 由MC给出

ϵ_{scale} : 触发分频数为1/4

A_{eff} : 有效接收度940 cm^2sr

ϵ_{region} : 信号选择效率为86%

$$\delta = \sqrt{\delta_{\text{trigger}}^2 + \delta_{\text{track}}^2 + \delta_{\text{charge}}^2} = 3.1\%$$

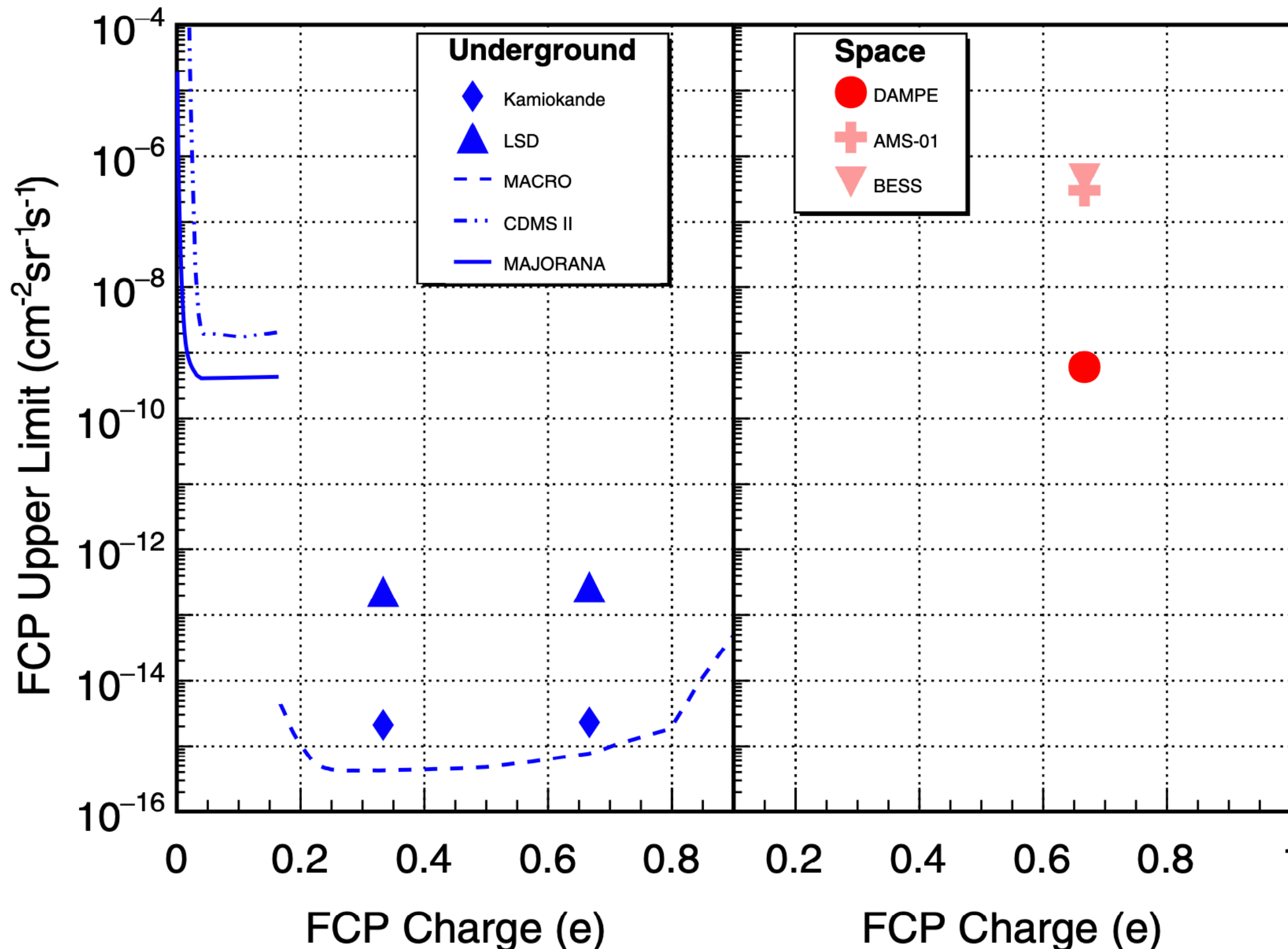
where $\delta_{\text{trigger}} = 1.1\%$, $\delta_{\text{track}} = 2.9\%$, and $\delta_{\text{charge}} = 0.5\%$

2/3e 分数电荷粒子通量上限

TABLE I. The comparison between DAMPE and other similar types experiments.

Experiments	Geometric acceptance($\text{cm}^{-2} \text{sr}$)	Exposure time (s)	Upper limit ($\text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1}$)
AMS-01	3000	3.6×10^4	3.0×10^{-7} (95% CL)
BESS	1500	3.2×10^5	4.5×10^{-7} (90% CL)
DAMPE	3000	2.3×10^7	6.2×10^{-10} (90% CL)

$$\Phi < 6.2 \times 10^{-10} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1}$$



本分析工作由DAMPE
USTC group独立完成！

Phys. Rev. D 106, 063026
(2022)

评审人评价

- An observation of fractionally charged particles is a result **significant enough for a publication in Nature**. (by Nature referee)
- Since fractional charged particles play a central role in the Standard Model, **it is important to keep looking for them**, even though QCD seems to rule out the possibility of finding them. For similar reasons **they frequently show up in New Physics models in some versions** of which they might be observable. Thus, **these searches are well motivated, and better limits on their abundance are useful**. (by PRD referee)

总结与展望

- DAMPE实验得到空间实验中最严格的 $2/3e$ 分数电荷粒子通量上限，比以往同类实验更优三个数量级，相关成果已发表在 *Phys. Rev. D 106, 063026 (2022)*
- 进一步研究
 - 轻质量分数电荷粒子的寻找
 - Colorless bound quark systems ?

致谢

- 感谢唐孝威院士和赵政国院士对本工作的关心和支持！

Workshop on Fractional Charge Particles, Monopoles, and Dark Photon

2019.5.31-6.1

Location:
Meeting Room 410,
4 th floor of Tsung-Dao Lee Library

Sponsors:
Shanghai Jiao Tong University
University of Science and Technology of China
ShanghaiTech University
Academy of Science of China

Organizers:
Xiao-gang He (Co-Chair)
Zhengguo Zhao (Co-Chair)
Guangshun Huang
Jing Shu
Weishi Wan
Yusheng Wu
Dao Xiang

**Shanghai Particle and Cosmology Symposium 2021:
Emerging Frontiers of Axion,
Dark Photon,
Fractional Charged Particle
and MonoPole**

2021.11.19-11.21

Location: MEHOODLESTIE Hotel

Website: <https://indico-tkli.sjtu.edu.cn/event/445/>

Sponsors:
Shanghai Jiao Tong University
University of Science and Technology of China

Organizers:
Shao-Feng Ge (TDLI & SPA, SJTU)
Xiao-Gang He (TDLI, SJTU)
Guangshun Huang (USTC)
Kim Siang Khaw (TDLI & SPA, SJTU)
Shu Li (Co-Chair, TDLI & SPA, SJTU)
Zuwei Liu (NJU)
Jing Shu (Co-Chair, ITP)
Yusheng Wu (USTC)
Lailin Xu (Co-Chair, USTC)
Haijun Yang (SPA & TDLI, SJTU)
Yong Yang (SPA, SJTU)
Zhengguo Zhao (USTC)

Workshop Secretary:
Zi Yang (ziyang@sjtu.edu.cn)
Wen Wang (wang.wen@sjtu.edu.cn)
Gang He (hegang@sjtu.edu.cn)
Fangying Qiu (fangyingqiu@sjtu.edu.cn)

李政道研究所
Tsung-Dao Lee Institute

**Workshop on Multi-front
Exotic phenomena in Particle
and Astrophysics (MEPA 2022)**

25-27 November 2022
Hefei
University of Science and Technology of China

Organizers:
Haipeng An (Tsinghua)
Shao-Feng Ge (TDLI & SPA, SJTU)
Xiao-Gang He (TDLI & SPA, SJTU)
Guangshun Huang (USTC)
Kim Siang Khaw (TDLI & SPA, SJTU)
Shu Li (TDLI & SPA, SJTU & CHEP, PKU)
Jia Liu (PKU)
Kun Liu (TDLI & SPA, SJTU)
Qing Lin (Co-Chair, USTC)
Zuwei Liu (NJU)
Jing Shu (ITP)
Yusheng Wu (USTC)
Lailin Xu (Co-Chair, USTC)
Haijun Yang (SPA&TDLI, SJTU)
Yong Yang (TDLI & SPA, SJTU)
Zhengguo Zhao (USTC)

Local Organization Committee:
Guangshun Huang (USTC)
Yusheng Wu (USTC)
Lailin Xu (Co-Chair, USTC)
Qing Lin (Co-Chair, USTC)

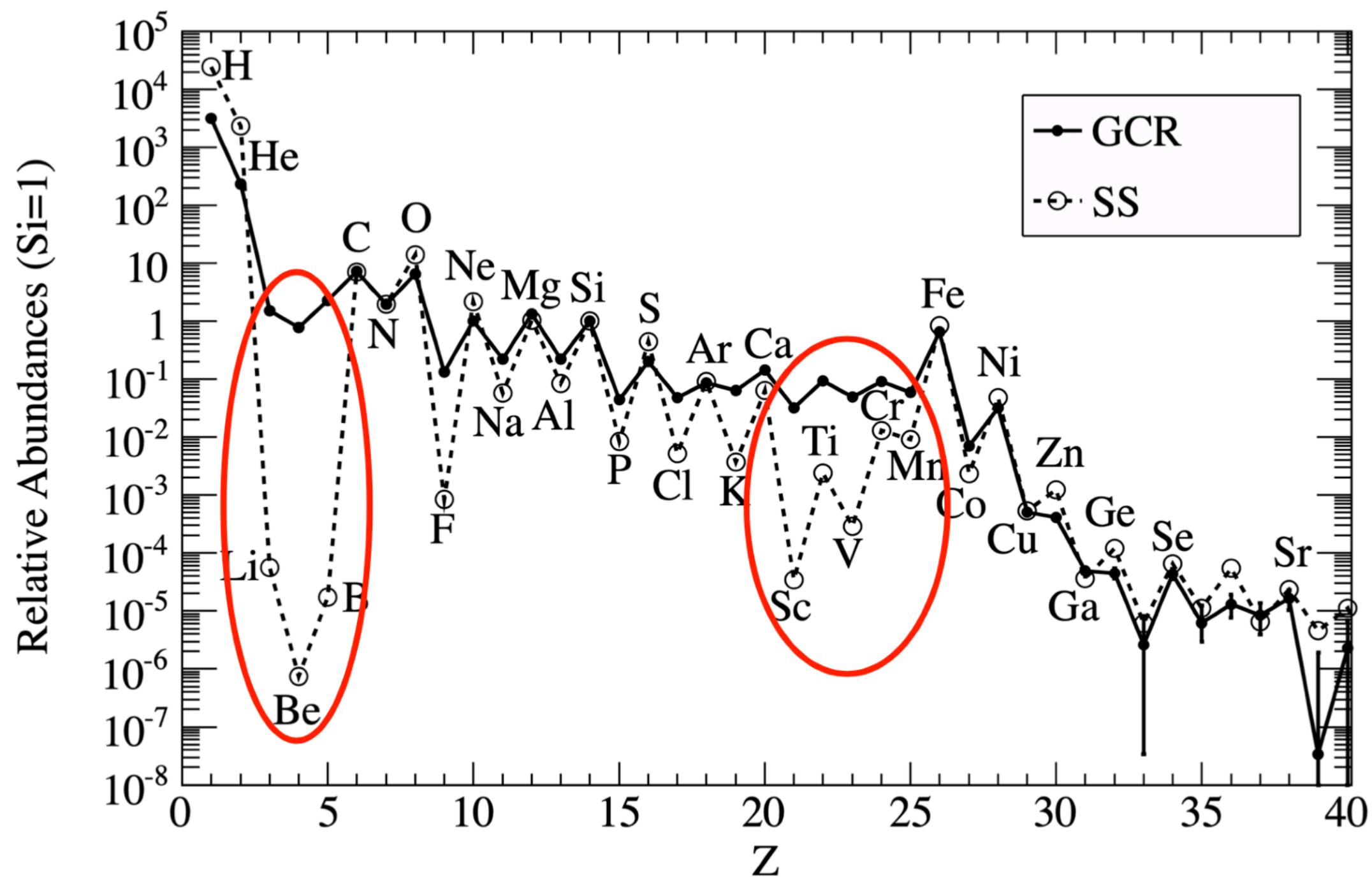
Workshop Secretary:
Liufang Zhu (zhulf@ustc.edu.cn)
Hong Li (hongli26@ustc.edu.cn)

李政道研究所
TSUNG-DAO LEE INSTITUTE

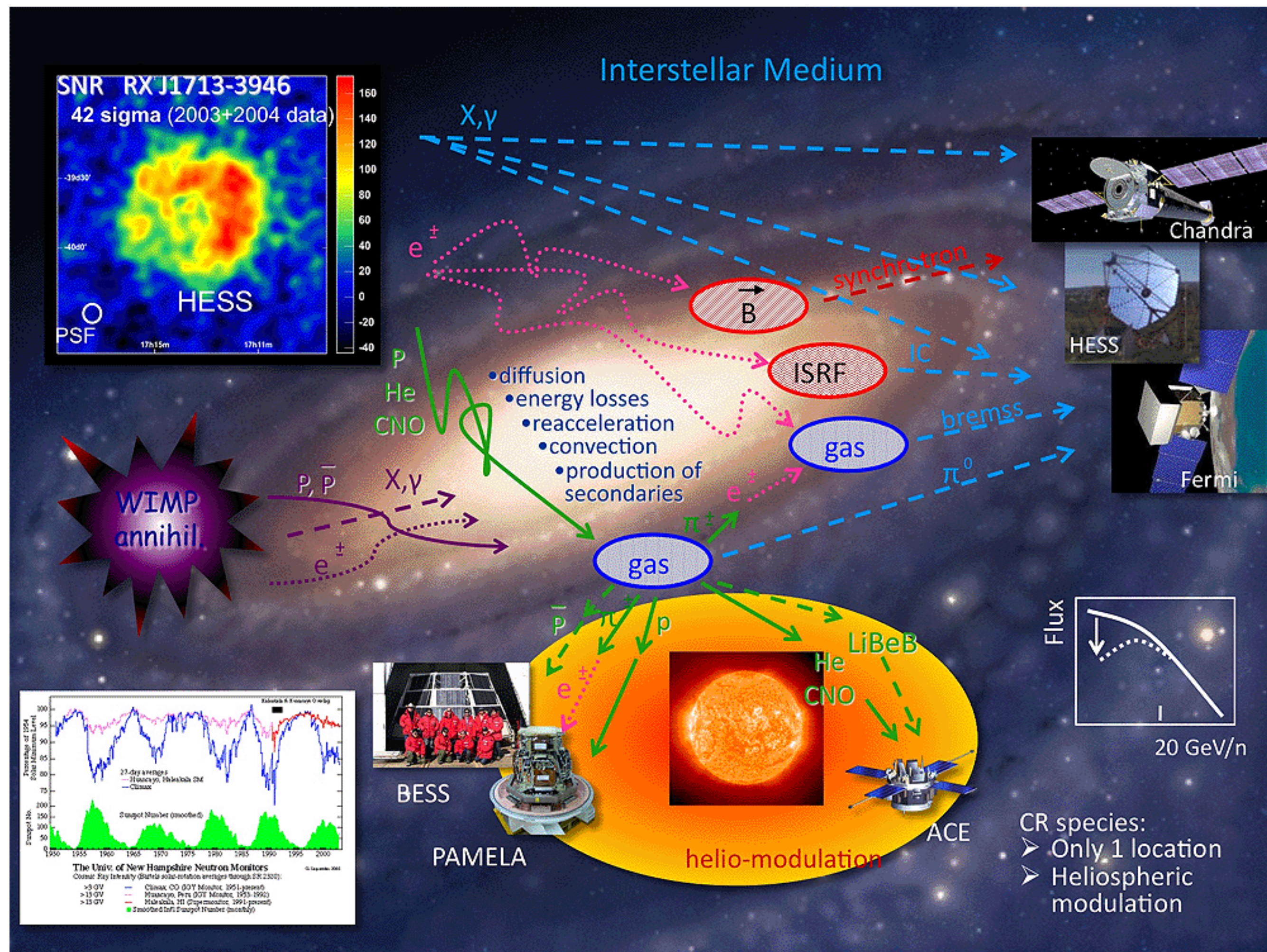
<https://indico-tkli.sjtu.edu.cn/event/1130/>

DAMPE实验最新发表的其它结果

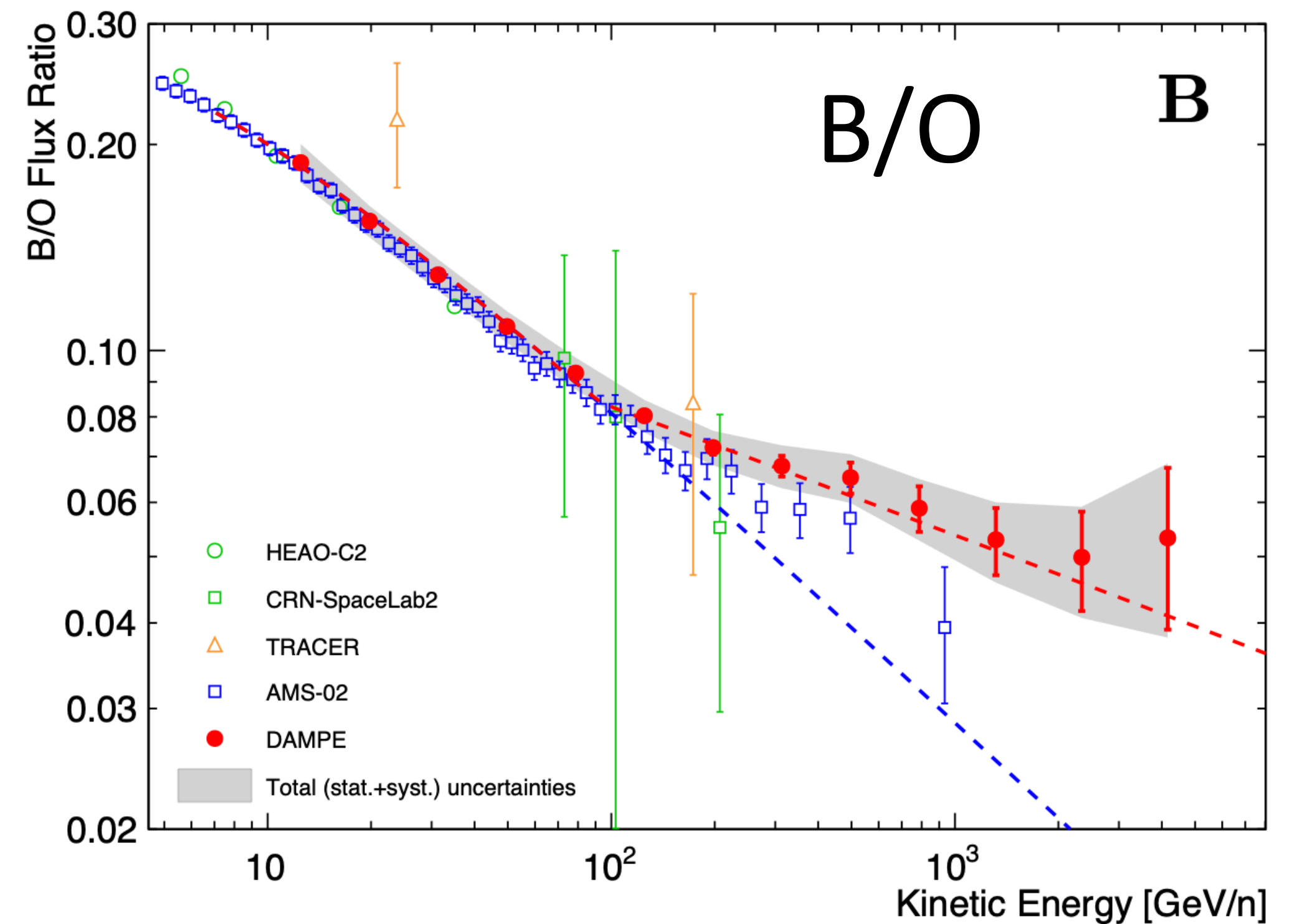
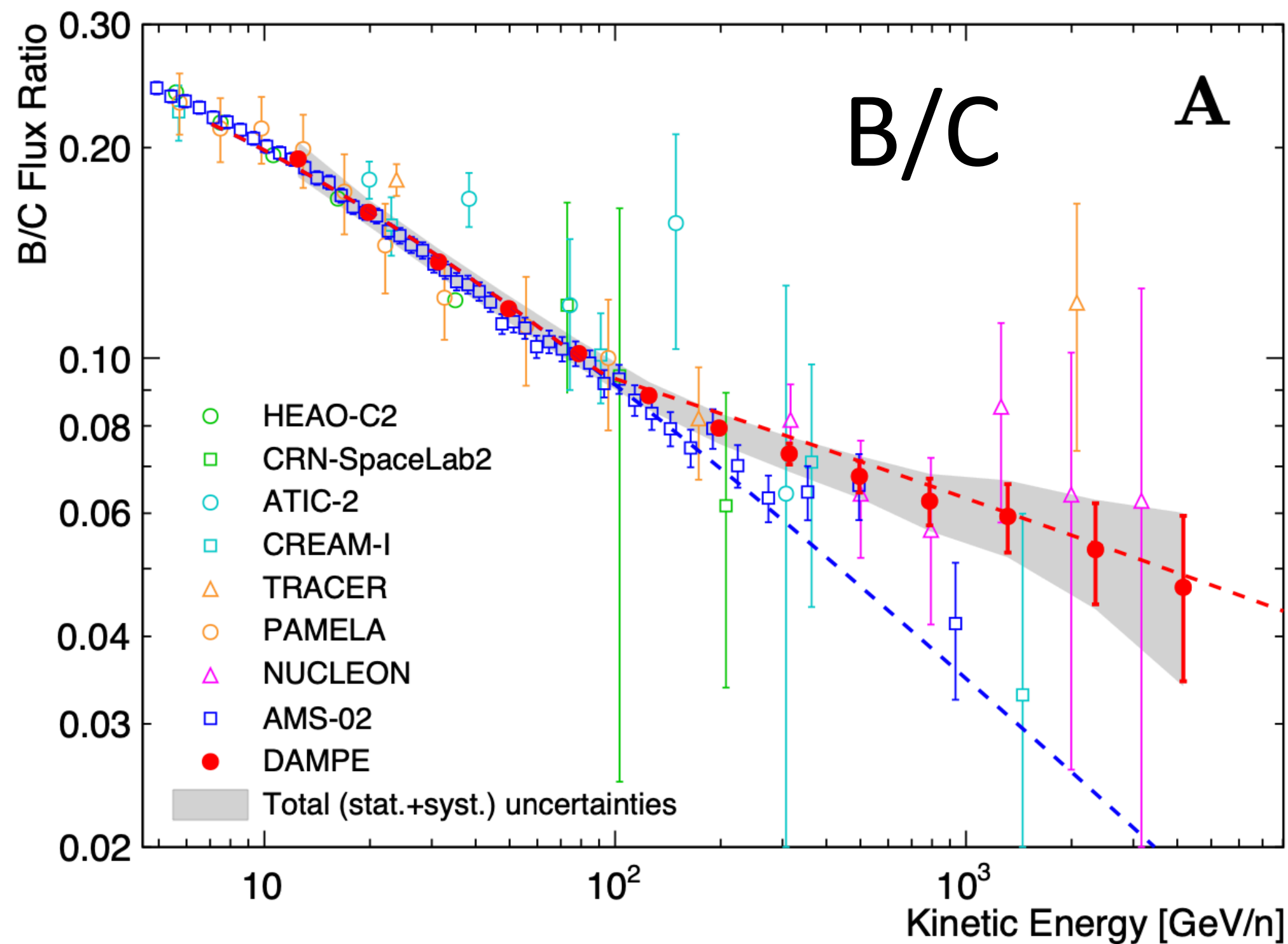
硼碳、硼氧比例的测量



- 通量比例 B/C 、 B/O 是研究宇宙线传播模型的重要探针



硼碳、硼氧比例的测量



文章已经被 *Science Bulletin* 接收 (10月11日)

Backup

