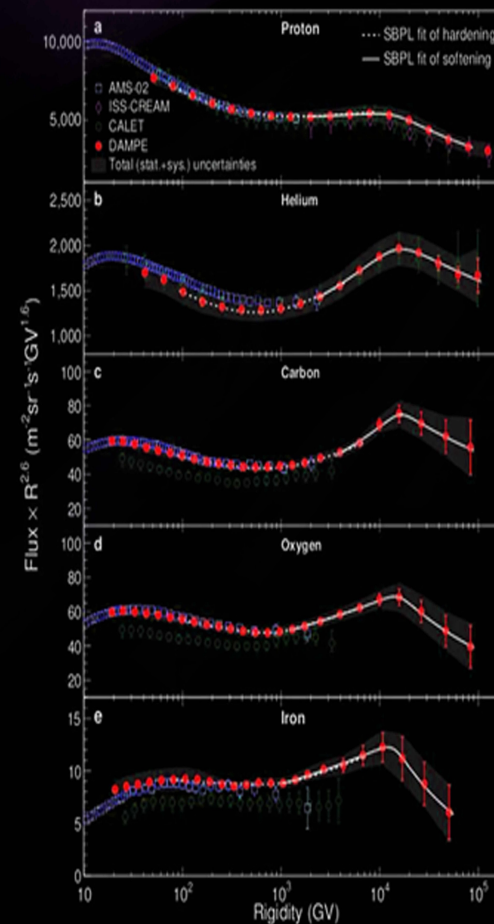
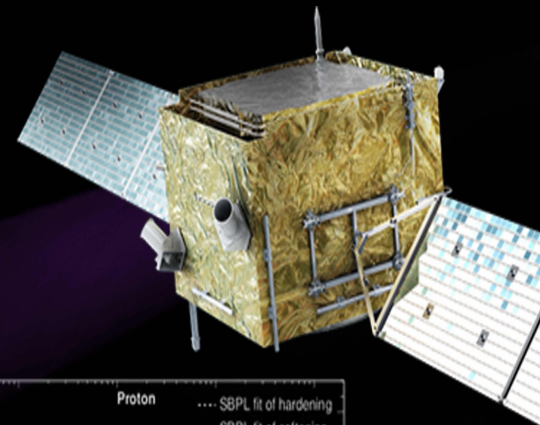
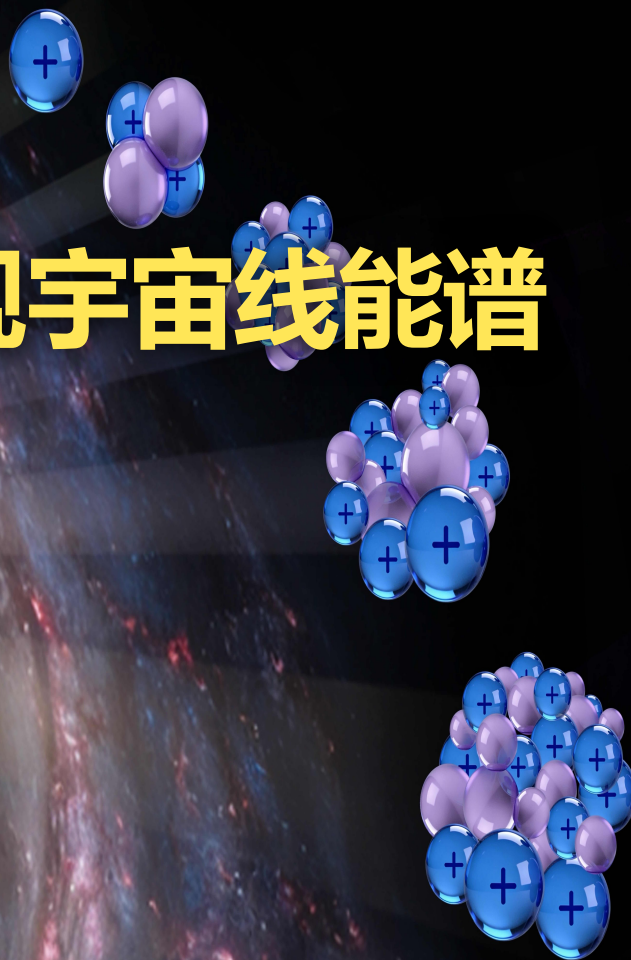


“悟空”巡天：发现宇宙线能谱统一软化结构

魏逸丰，张云龙
中国科学技术大学
(DAMPE合作组)
2026/7/16



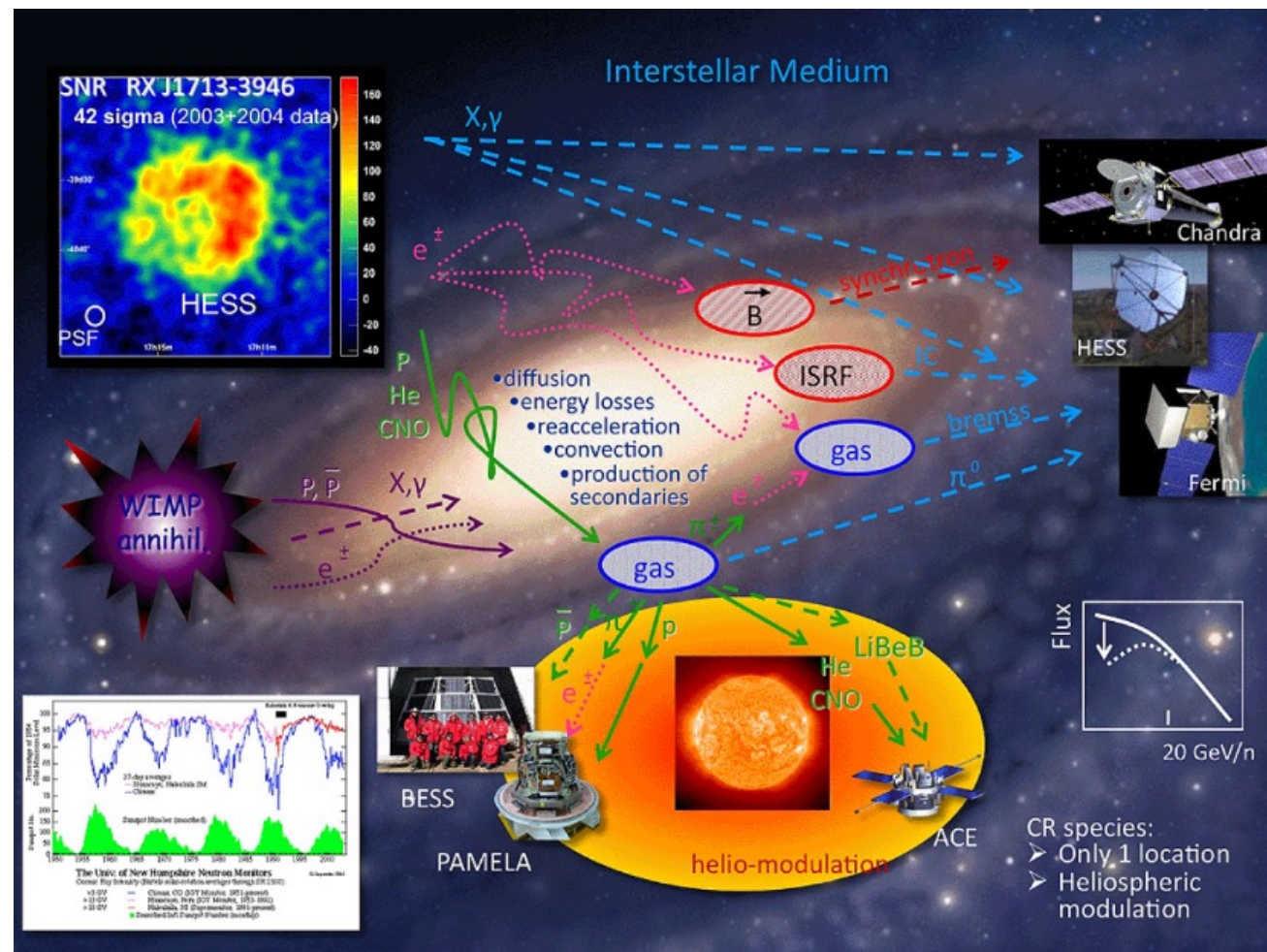
提纲

- 研究背景
- “悟空”号介绍
- 统一软化结构的电荷依赖关系
- 总结



研究背景

- 宇宙线起源于极端天体物理过程，在宇宙磁场中传播
- 宇宙线物理世纪之谜
 - 宇宙线的起源
 - 加速机制
 - 传播过程

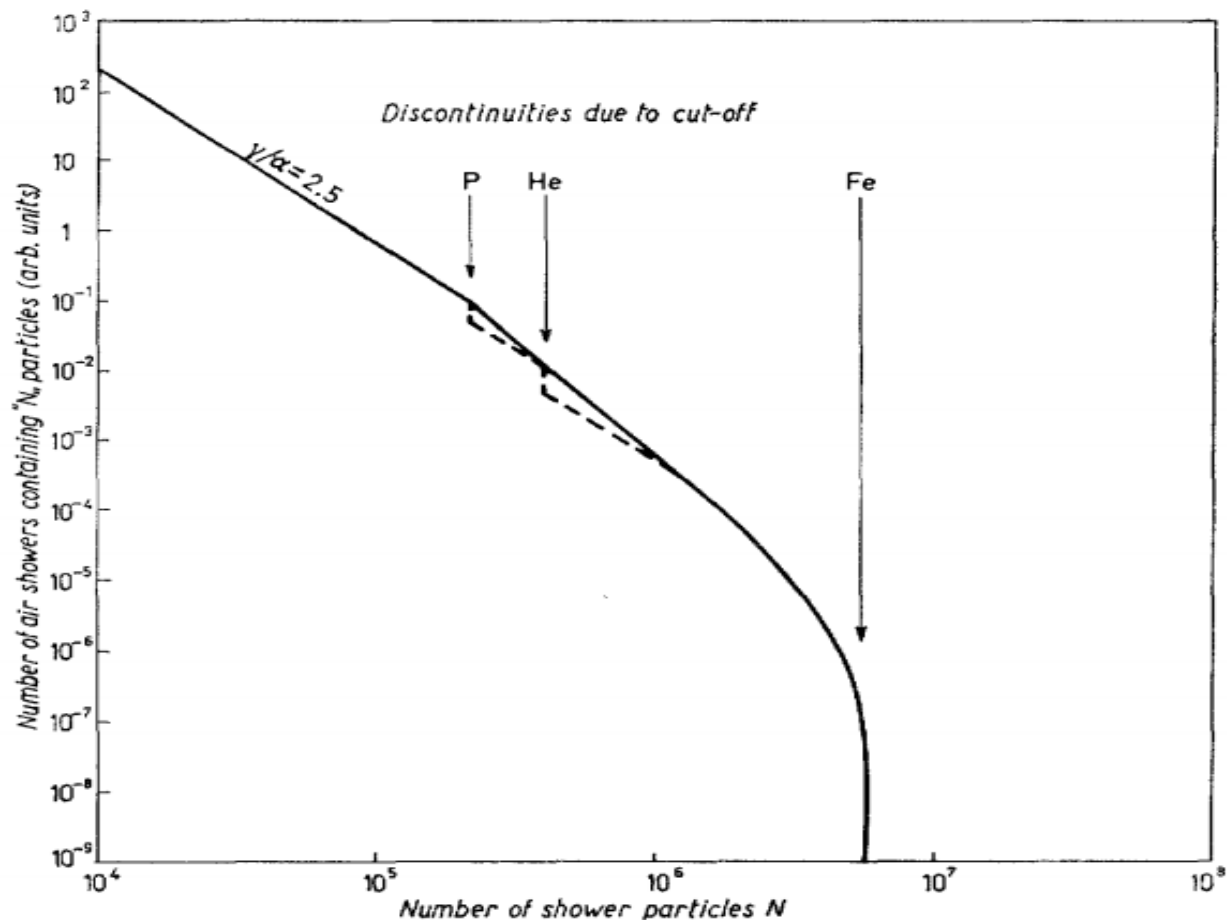


Peters循环

- 在磁场约束条件下，带电粒子加速的能量上限正比于电荷 Z
- 在能谱上形成一组能量依赖的结构—Peters循环

- 实验挑战

- 粒子种类鉴别
- 宽能区测量
- 能量分辨优

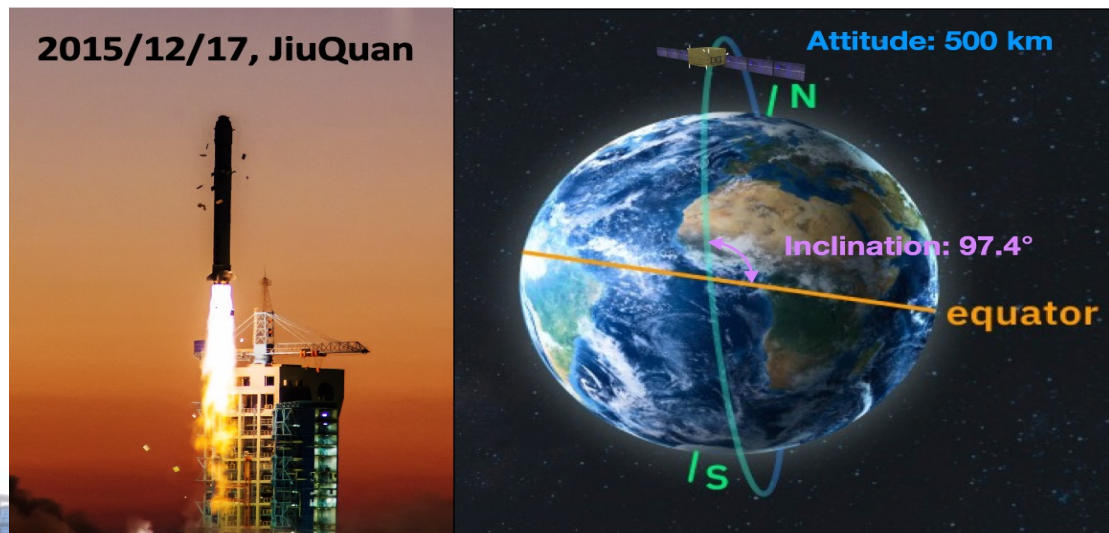


(B. Peters, 1961, Nuovo Cim., 22, 800)



“悟空”号 (DAMPE)

- 2015年年底发射
- 已在轨稳定运行超过十年，下传了近200亿高质量宇宙线数据



CNINA

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

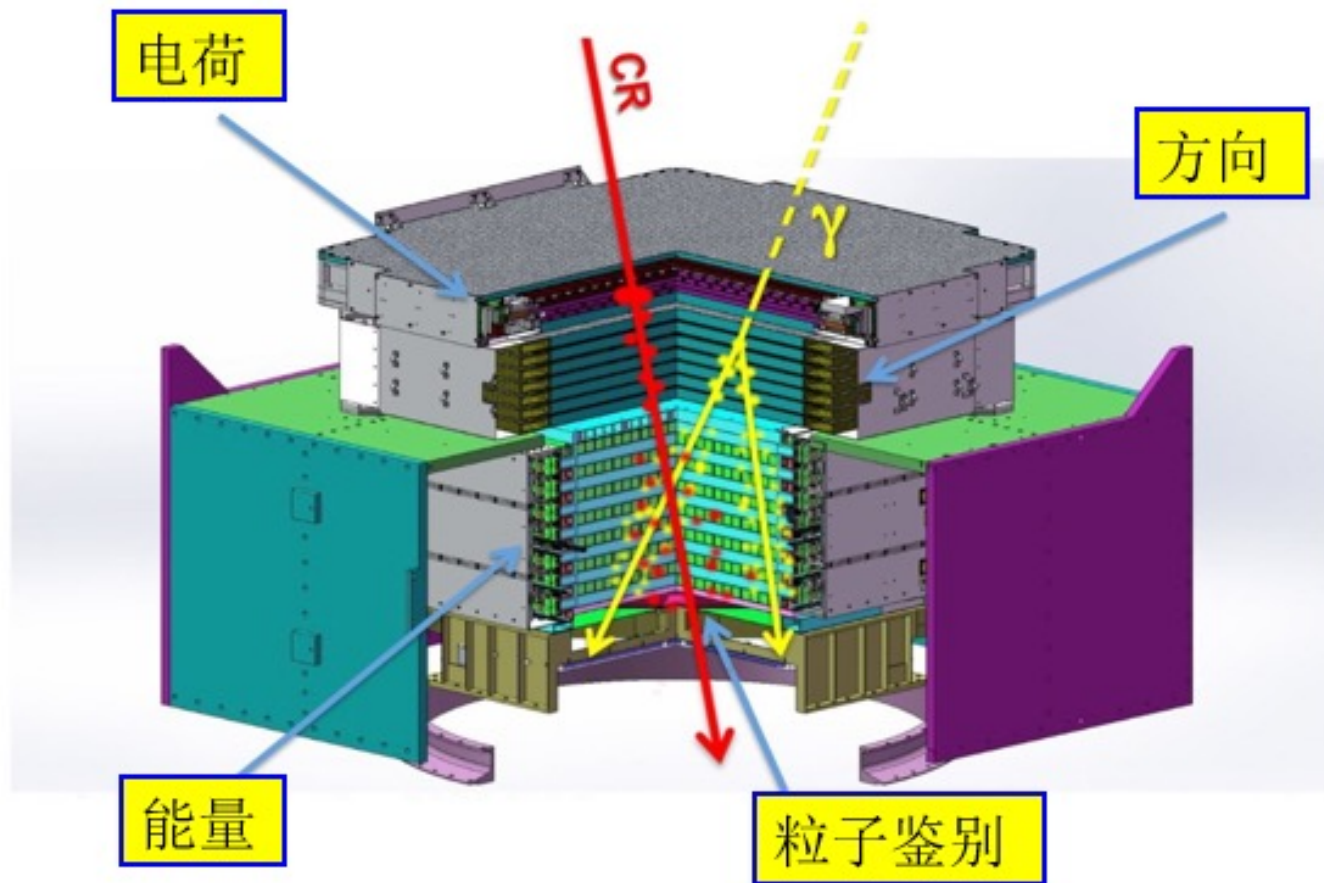
- University of Geneva



“悟空”号 (DAMPE)

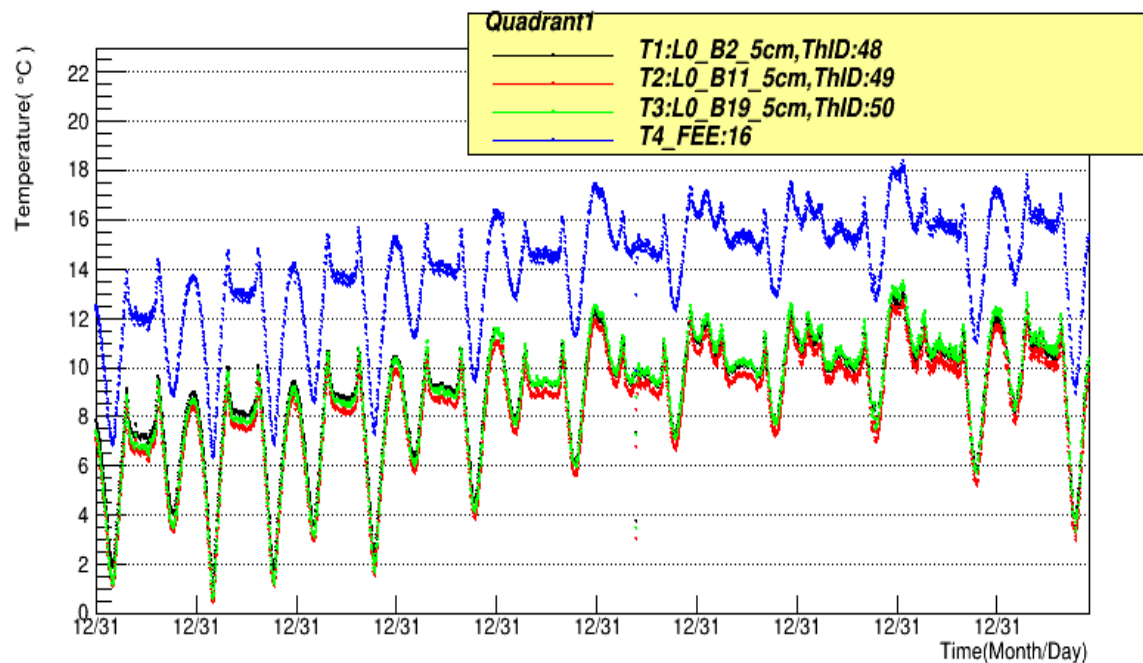
DAMPE包含4个子探测器

- 塑闪阵列探测器—电荷测量
- 硅径迹探测器—方向测量
- BGO量能器—能量测量、粒子鉴别、提供触发
- 中子探测器—粒子鉴别

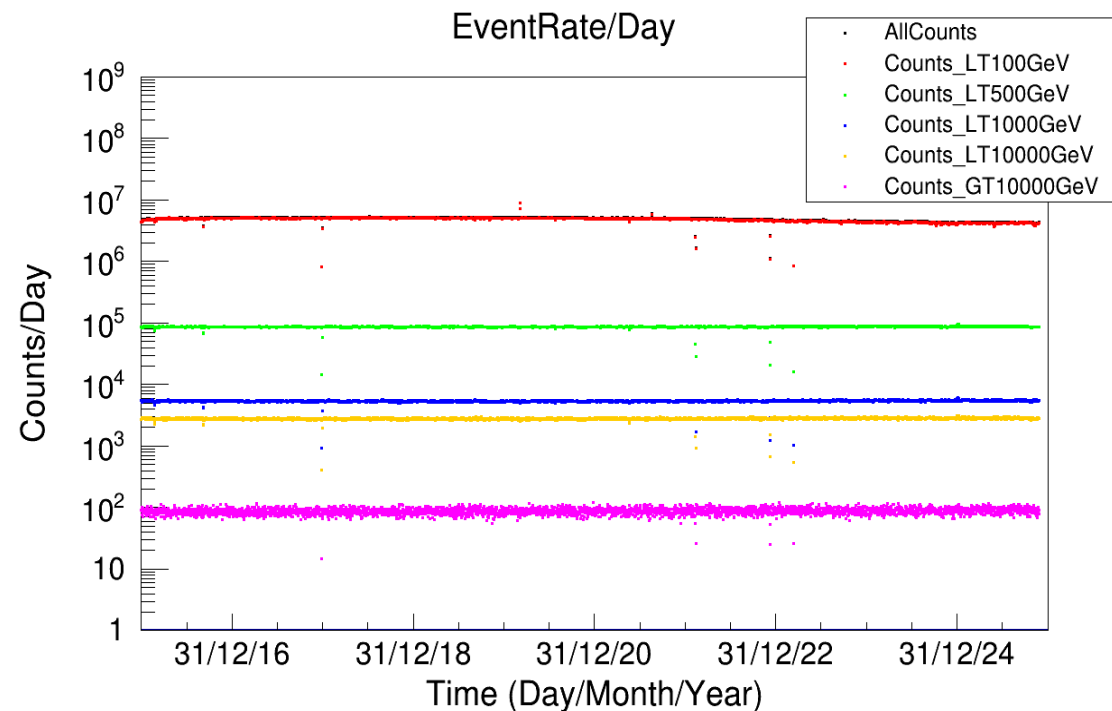


在轨状态

- ◆ 温度变化每天约0.1度
- ◆ 每天下传数据量~500万



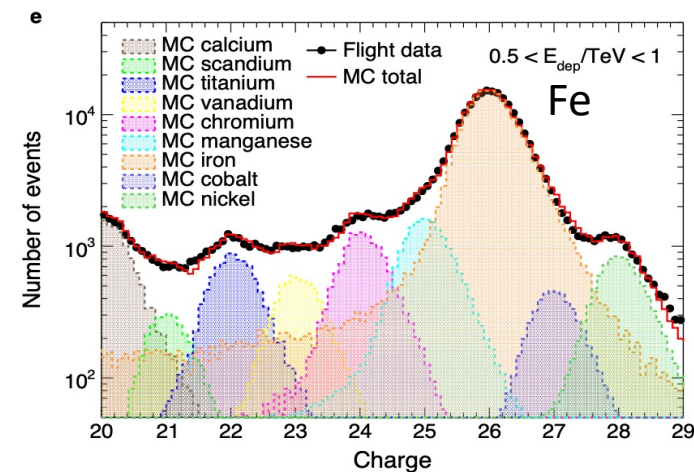
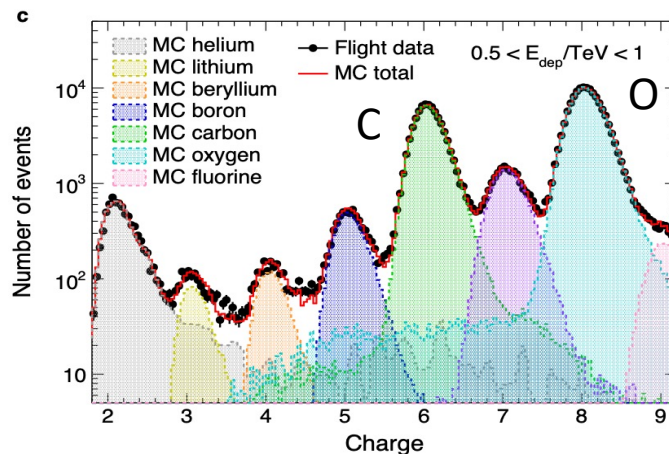
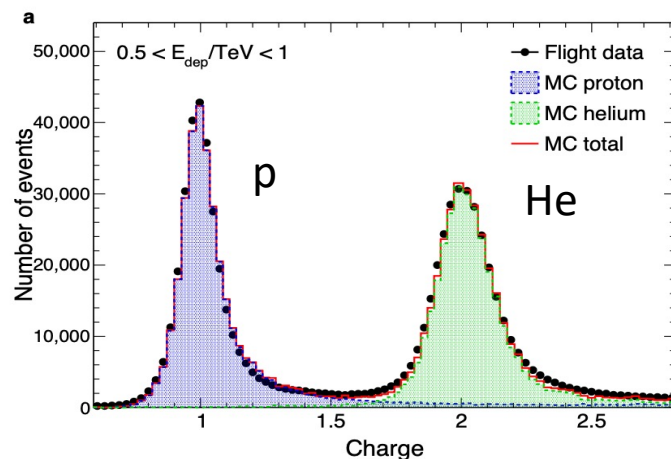
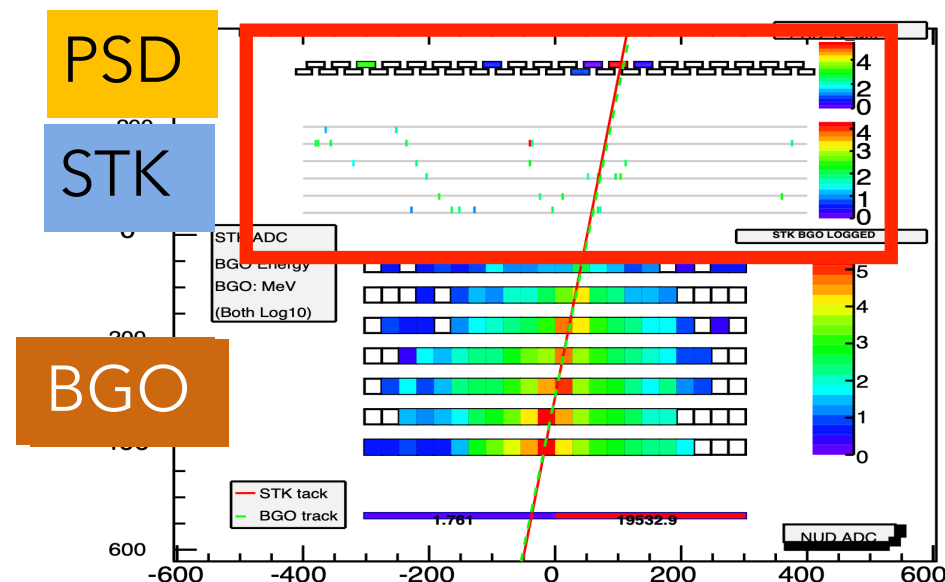
温度变化



事例率

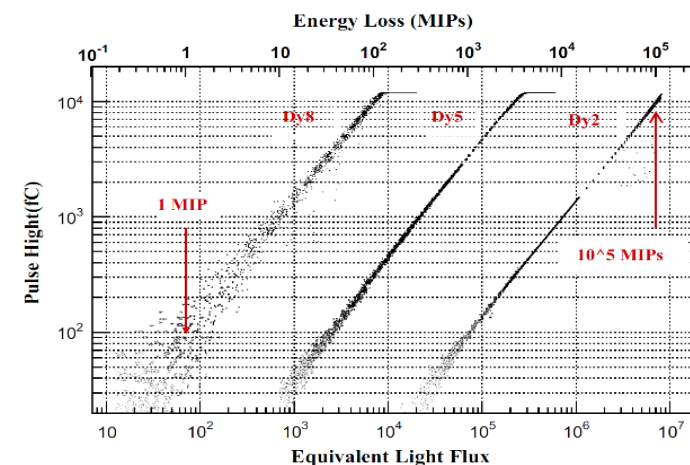
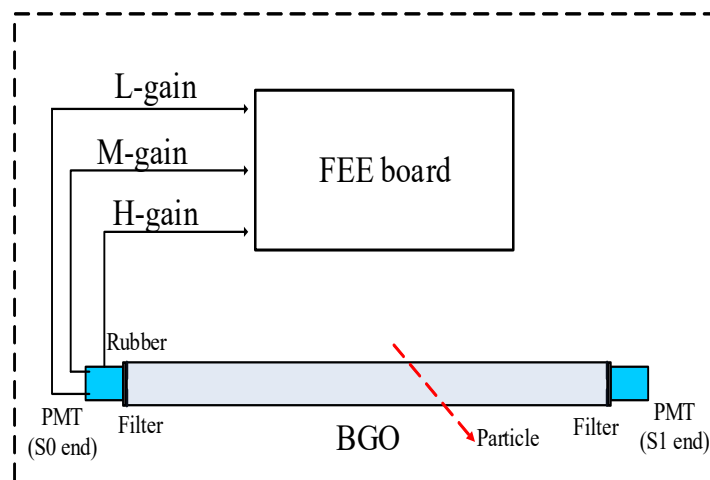
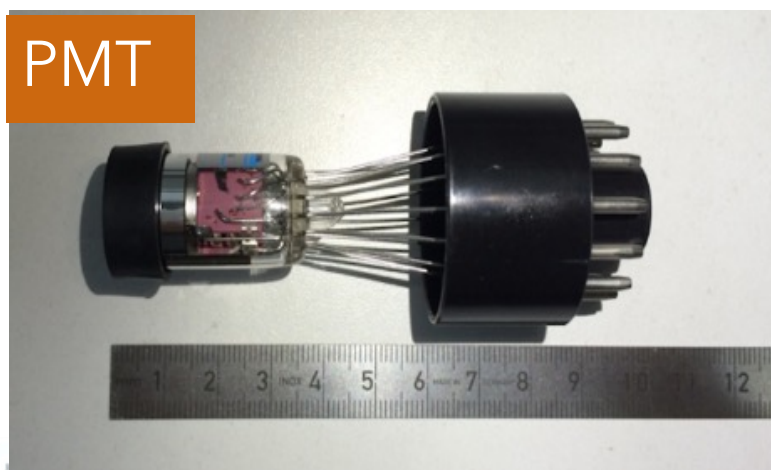
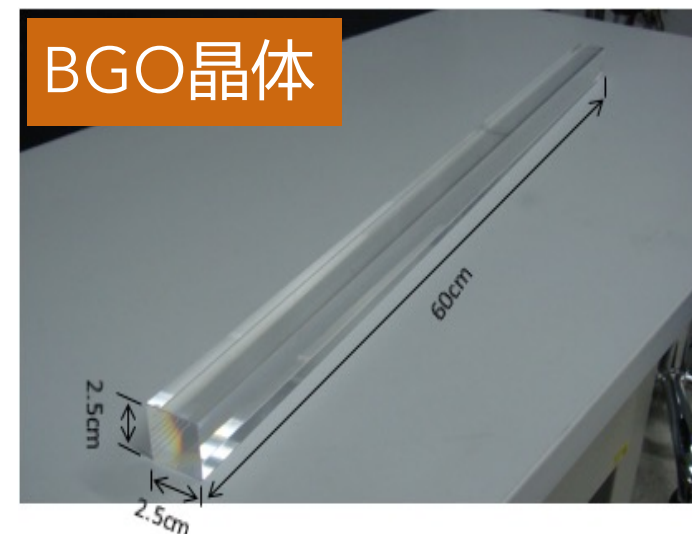
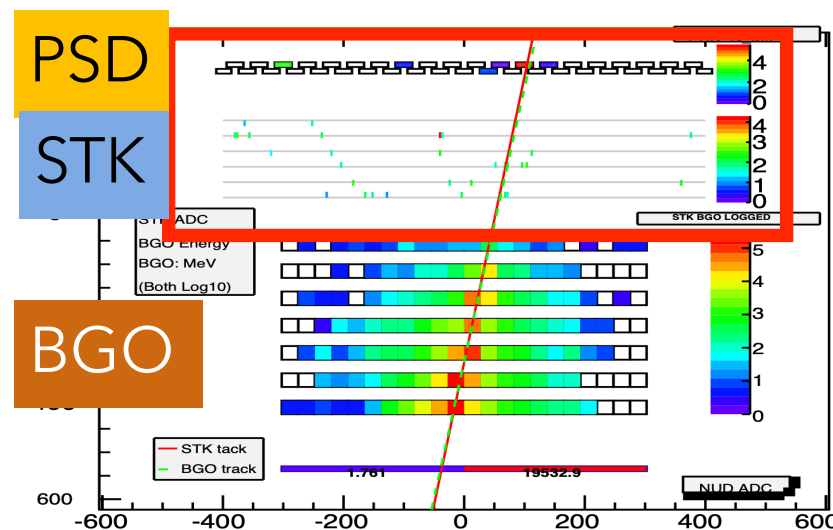
挑战I — 粒子种类区分

- PSD和STK探测器进行电荷测量
 - 塑料闪烁探测器，电荷分辨： $0.06e$ @ $Z=1$, $0.3e$ @ $Z=26$
 - 硅微条径迹探测器，电荷分辨： $0.05e$ @ $Z=1$



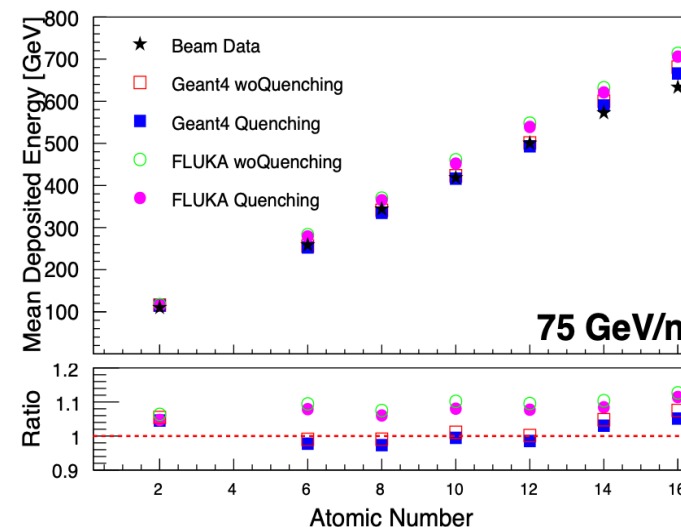
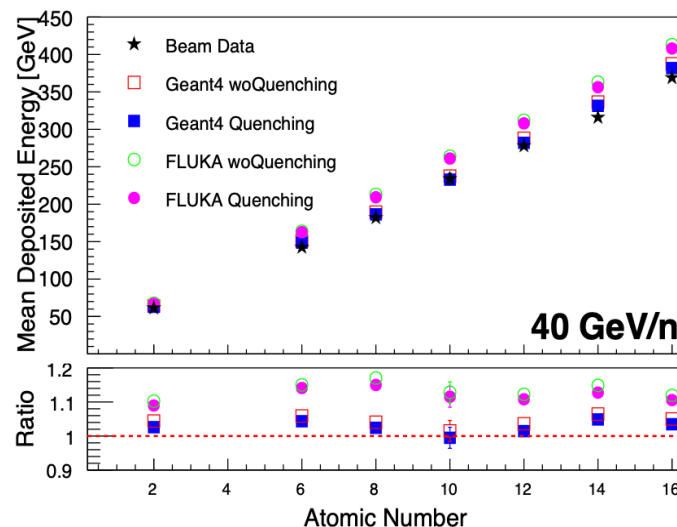
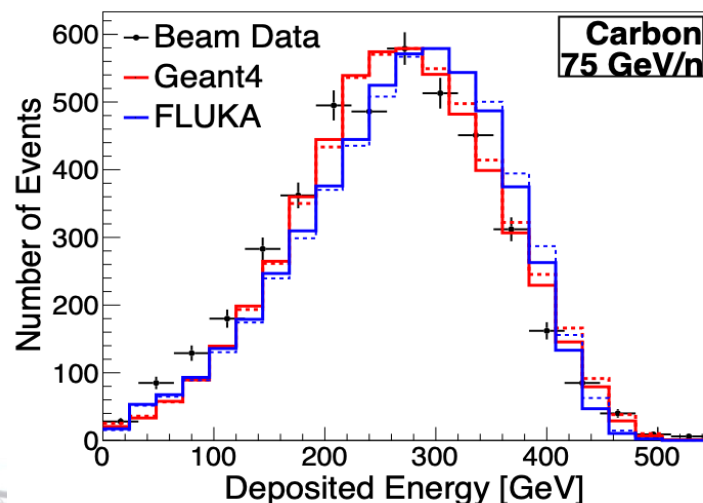
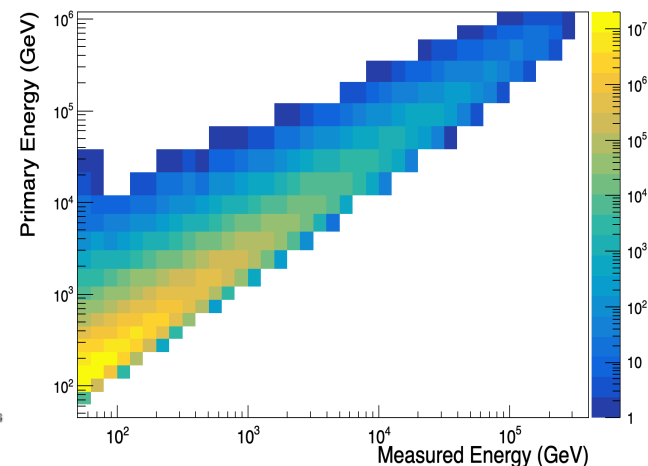
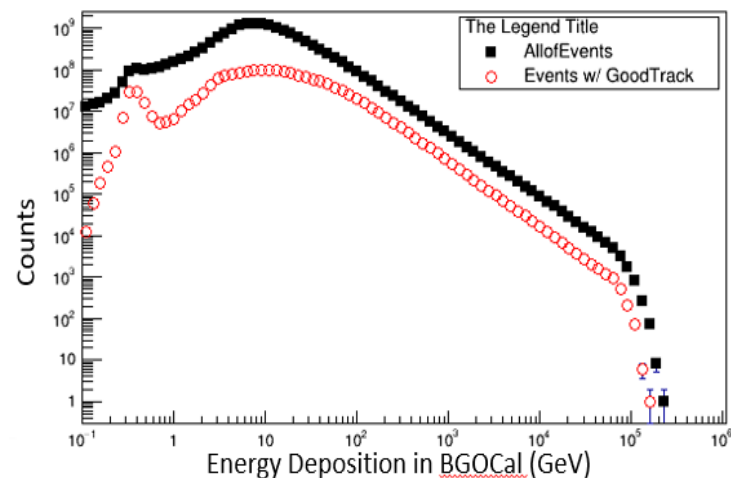
挑战II—宽能区测量

- BGO量能器的PMT采用多打拿极读出方案
- 实现 $>10^5$ 的动态范围
 - 0.5 MIPs – 1×10^5 MIPs



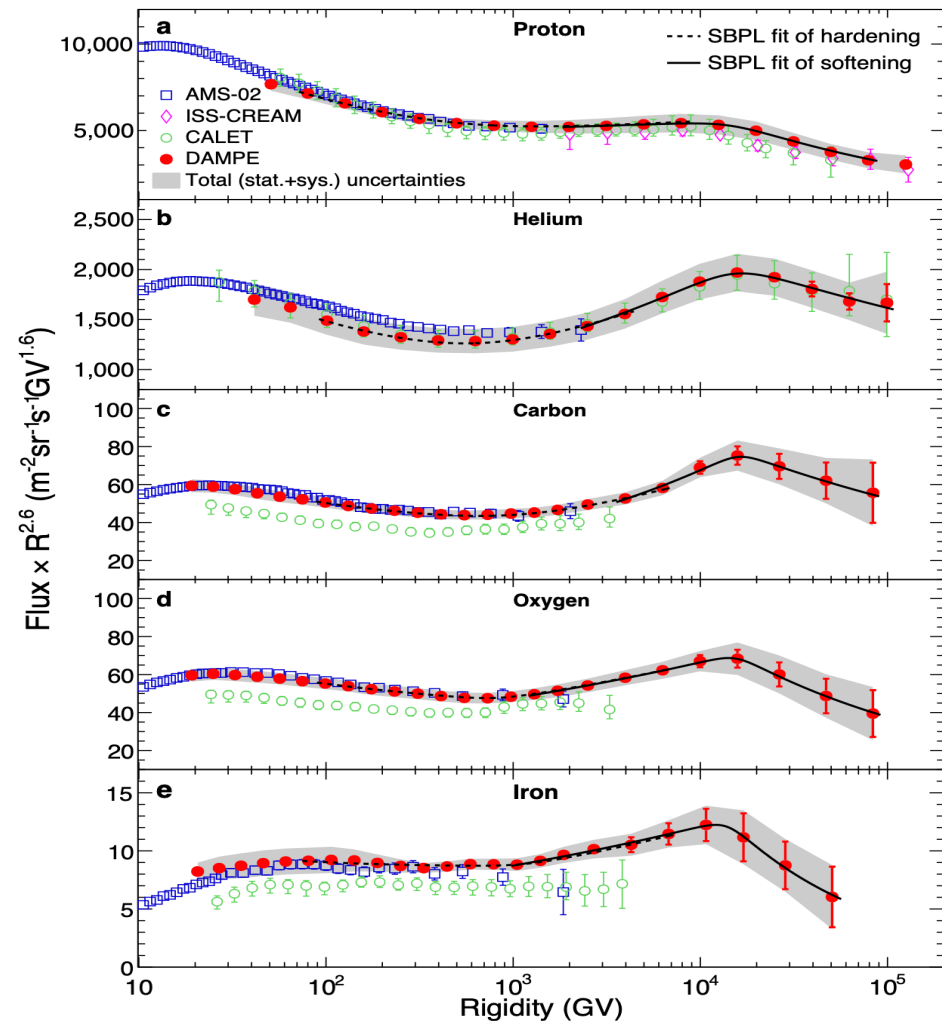
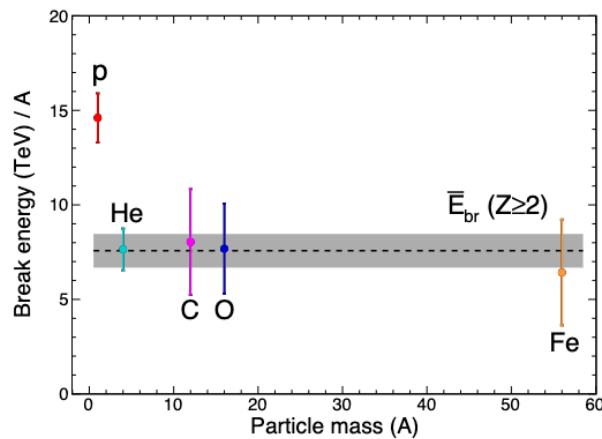
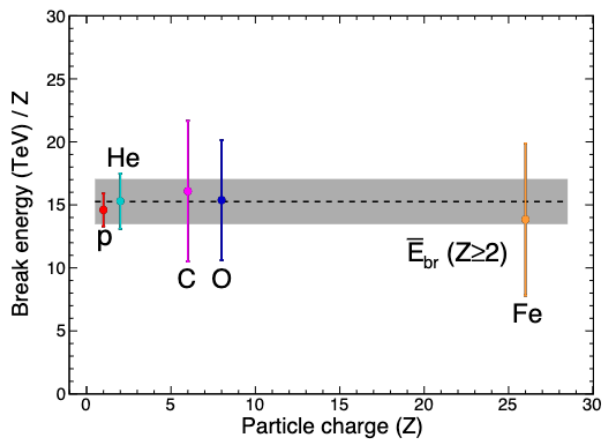
挑战III—“高精度”能量测量

- DAMPE BGO量能器有1.6 rl
- 强子（原子核）约30%的能量沉积在量能器中
- 采用贝叶斯反卷积方法，将沉积能谱转换成原初动能谱

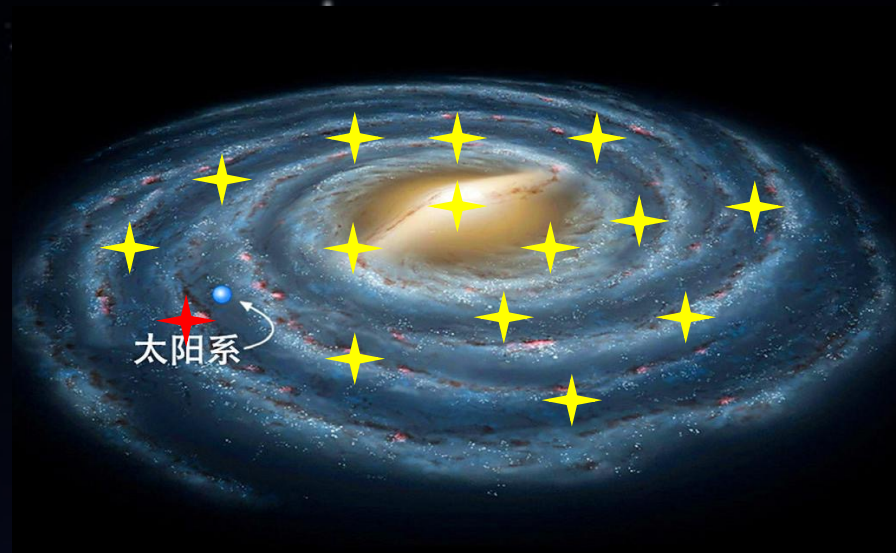


观测结果

- 精确测量初级宇宙线p, He, C, O, Fe 到 100 TV (对铁为~60 TV)
- 在刚度15 TV处存在**统一的软化结构**, 并且该结构存在**电荷依赖性**
- 在 4.4σ 的置信程度上排除了质量依赖性

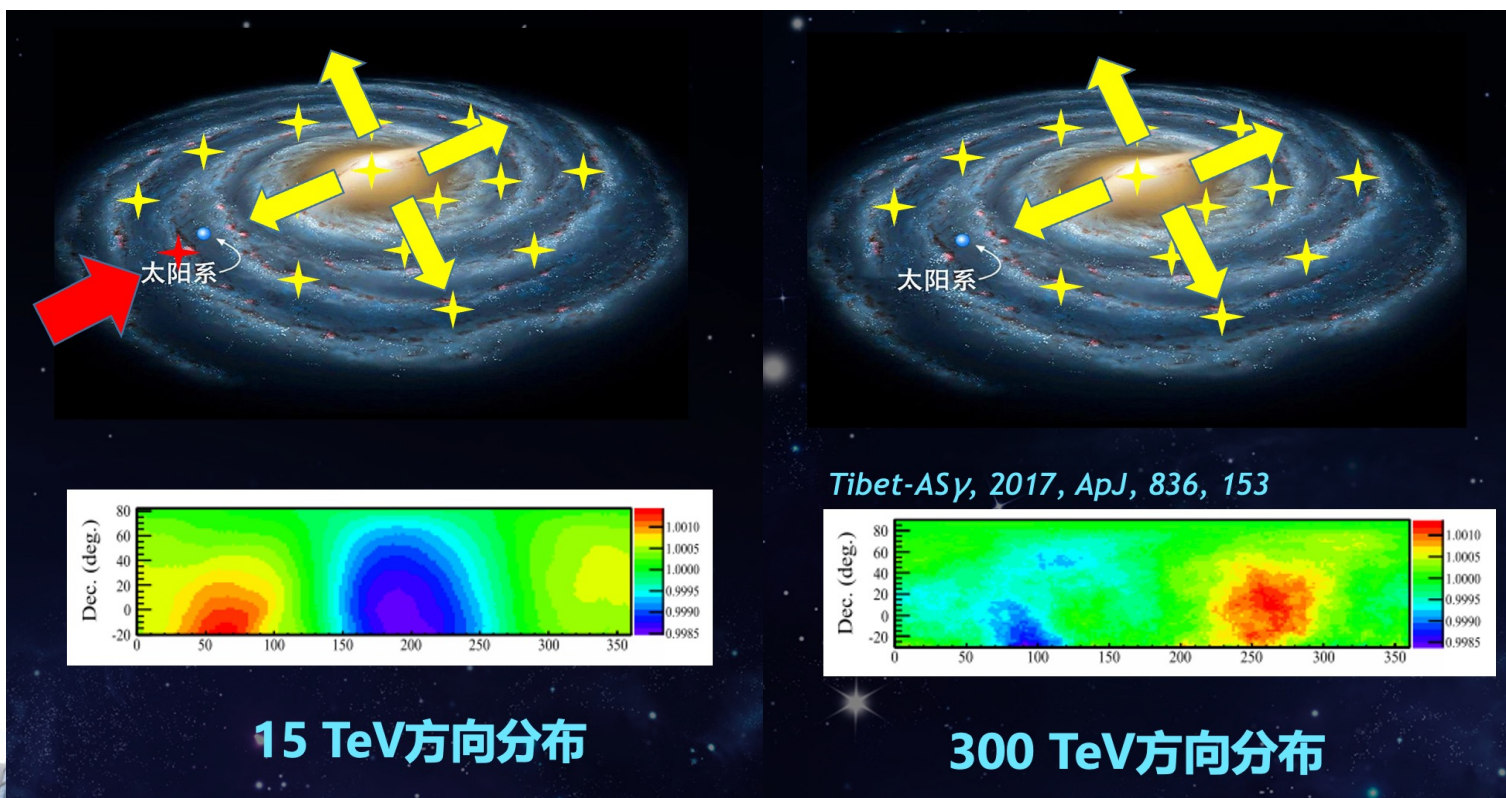
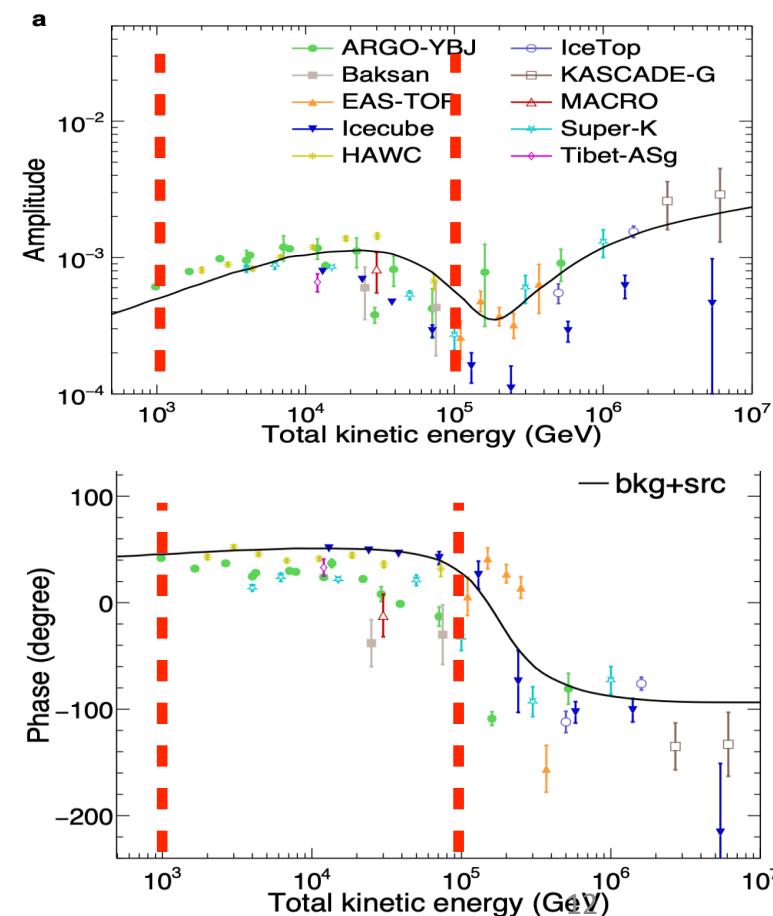
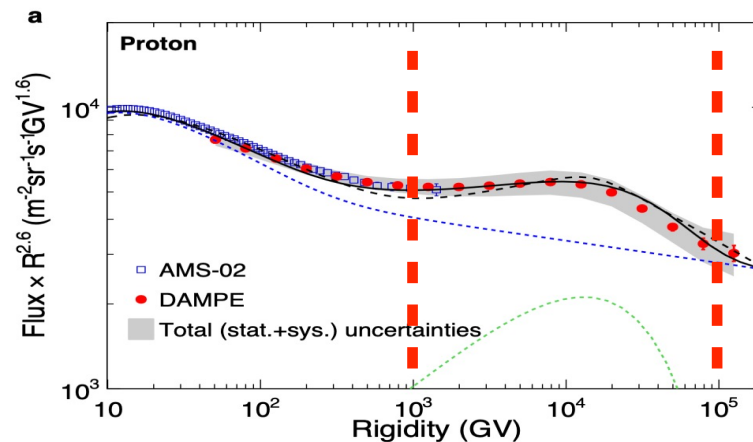


可能的理论解释



可能的理论解释

- 能谱：背景+临近源代数和
- 各向异性：背景+临近源矢量和



可能的理论解释

● 能谱：怎么拐折，电荷说了算！

● 各向异性：现代物理知识杂志 2026年6月4日 17:03 北京

以下文章来源于中国科学院紫金山天文台，作者袁强



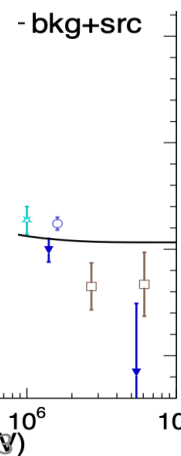
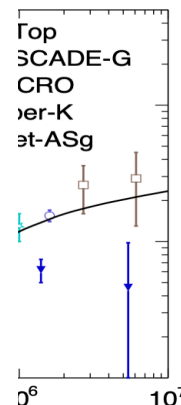
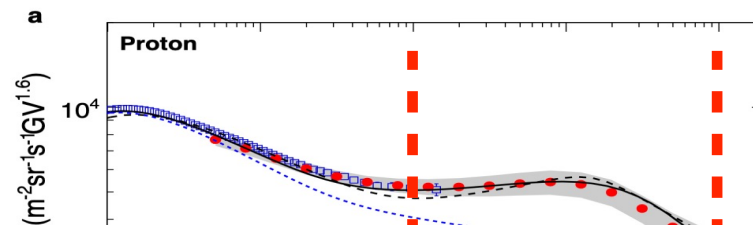
中国科学院紫金山天文台

中国科学院紫金山天文台官方微信

近期，《自然》杂志在线发表了“悟空”号暗物质粒子探测卫星^Q宇宙射线观测新结果，发现质子、氦、碳、氧、铁等5种原子核存在统一的软化拐折（指粒子能谱斜率变得更陡）结构，且拐折的能量正比于粒子电荷，并以>99.999%的高置信度排除了另一类广泛讨论的拐折正比于质量的模型，对理解宇宙射线起源和加速提供重要观测证据。

15 TeV方向分布

300 TeV方向分布



总结

- “悟空”号已成功在轨运行超过10年时间，取得了大量的
高质量宇宙线数据，为开展科学研究提供了基础
- 发现五种初级宇宙线 p 、He、C、O、Fe 在刚度15 TV处
存在**统一的软化结构**
- 软化拐点的**电荷依赖性**，预示宇宙线的加速可能存在某种
极限或对应特定加速源



总结

- “悟空”号已成功在轨运行超过10年时间，取得了大量的
高质量宇宙线数据，为开展科学研究提供了基础
- 发现五种初级宇宙线 p 、 He 、 C 、 O 、 Fe 在刚度15 TV处
存在统一的软化结构
- 软化拐点的电荷依赖性，预示宇宙线的加速可能存在某种
极限或对应特定加速源

“立足常规，着眼新奇！”



总结

- “悟空”号已成功在轨运行超过10年时间，取得了大量的
高质量宇宙线数据，为开展科学研究提供了基础
- 发现五种初级宇宙线 p 、 He 、 C 、 O 、 Fe 在刚度15 TV处
存在统一的软化结构
- 软化拐点的电荷依赖性，预示宇宙线的加速可能存在某种
极限或对应特定加速源

“立足常规，着眼新奇！”

谢谢!

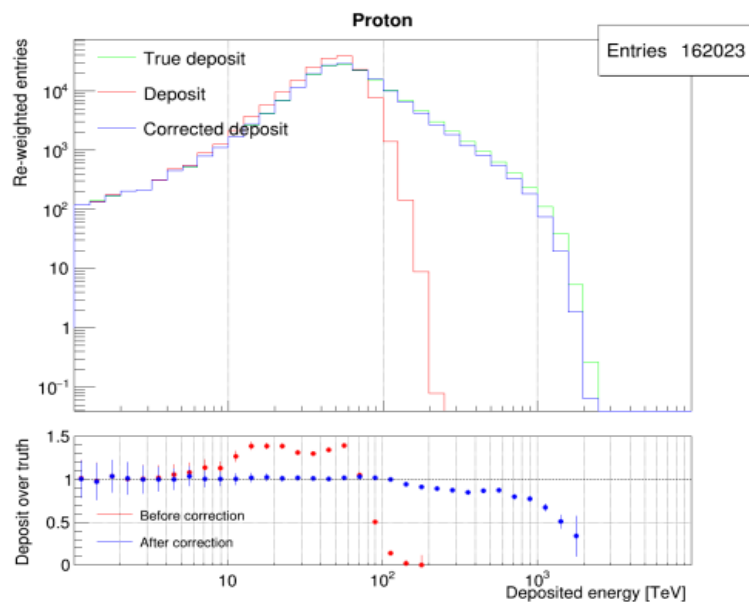
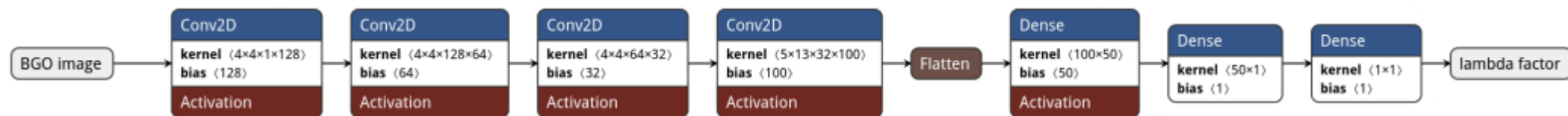


Backup

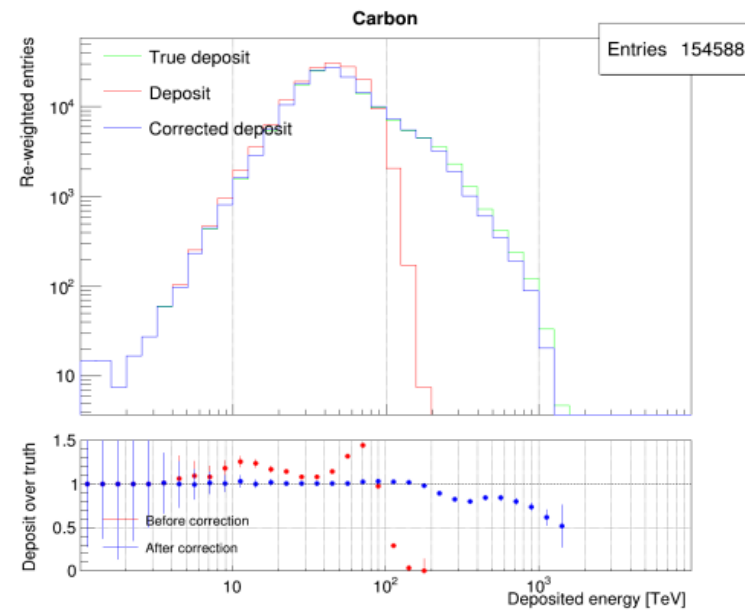


饱和效应的修正

- 基于CNN方法，对BGO量能器读出饱和效应造成的能量损失进行修正。



质子能量饱和修正



碳核能量饱和修正