

# 利用大气广延簇射寻找磁单极子

1958

报告人：张中华

导师：吴雨生

2024.6.6

姓名：张中华

出生：2002年10月20日

高中：重庆市万州高级中学

本科：

- 专业：粒子与核物理
- GPA: 3.50
- 获得奖励：
  - 大一：新生银奖
  - 大二：国家励志奖学金，进步奖学金

研究生：计划校内保研

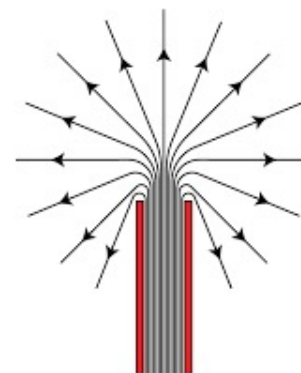
**电荷量子化难题：**为什么电荷是量子化的？

$$\frac{qg}{2\pi} \in \mathbb{Z},$$

$q$  : 电荷量子数  
 $g$  : 磁荷量子数

1931年，**狄拉克**从理论上指出孤立磁单极子的存在，并由此解释电荷量子化这一难题<sup>[1]</sup>

此后，大量理论泉涌出现，都预测了磁单极子的存在。



Dirac磁单极子<sup>[2]</sup>

**狄拉克磁单极子**

**GUTs**（如SO(10)、SU(5)）：预测高能下会产生磁单极子

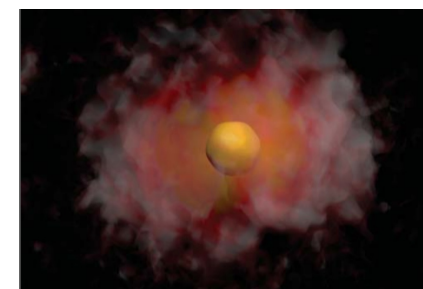
**超弦理论**：某些版本的超弦理论中，磁单极子自然出现

**Kaluza-Klein理论**：引入额外空间维统一电磁和引力，预测磁单极子

**霍金辐射**：磁单极子可以在黑洞蒸发过程中产生

**Montonen-Olive对偶性**：超对称杨-米尔斯理论中提到电磁对偶

.....

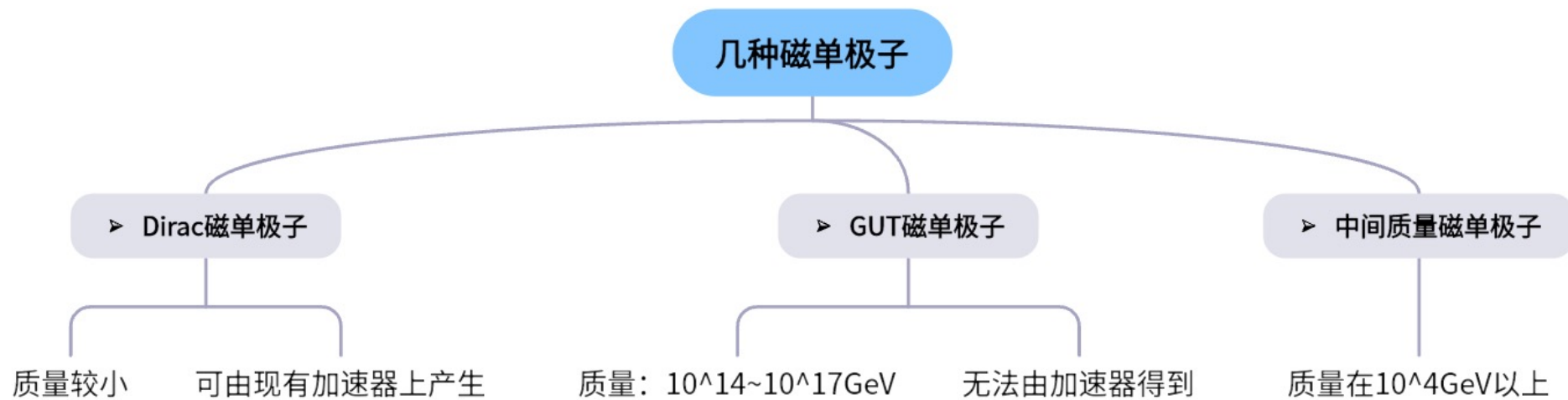


t'Hooft, Polyakov通过量子场论提出了“刺猬”解，磁单极子被一团量子云围绕。<sup>[1]</sup>

如果磁单极子在  
实验上得到证实

1. 为GUT等理论提供直接的实验证据，促使理论修正或拓展。
2. 确认磁单极子的存在将是高能物理领域的重大突破。
3. 磁单极子研究对理解宇宙的基本结构和物理规律有深远影响。
4. 磁单极子的研究不仅影响高能物理，还可能对材料科学、宇宙学等领域产生重要影响。
5. ....

这将是人类认知水平的一个极大飞跃！

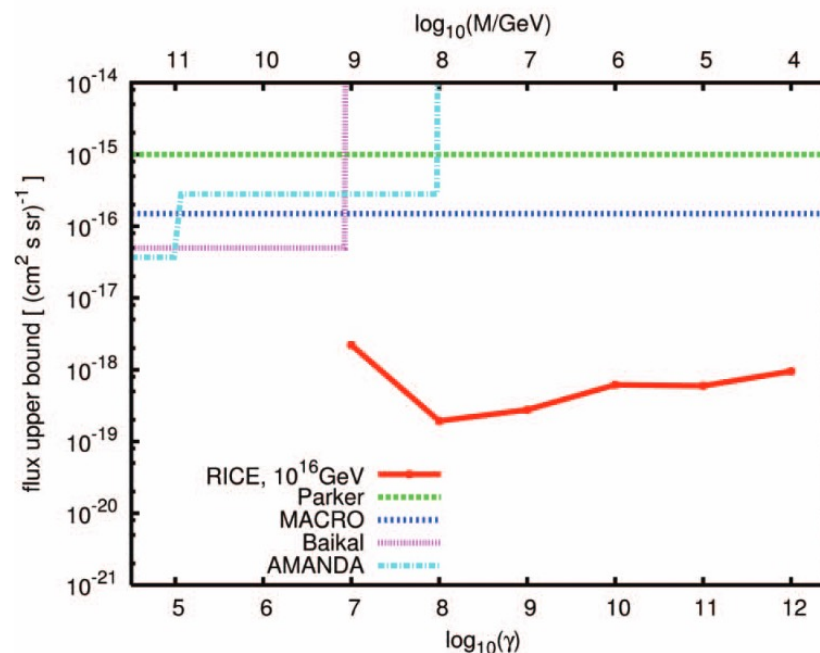


早期宇宙极端活动产生磁单极子  
可利用源：宇宙射线

不同实验给出的磁单极子通量极限<sup>[1]</sup>:

从宇宙学角度: Parker Bound

$$F \lesssim 10^{-16} (10^{16} \text{ GeV}/M) (v/10^{-3}c) \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1};$$



## 广延大气簇射(EAS)

磁单极子与大气相互作用，产生级联簇射，在观测平面上得到数以万计的次级粒子，可能产生显著可观测量

## 高海拔宇宙线观测站(LHAASO)

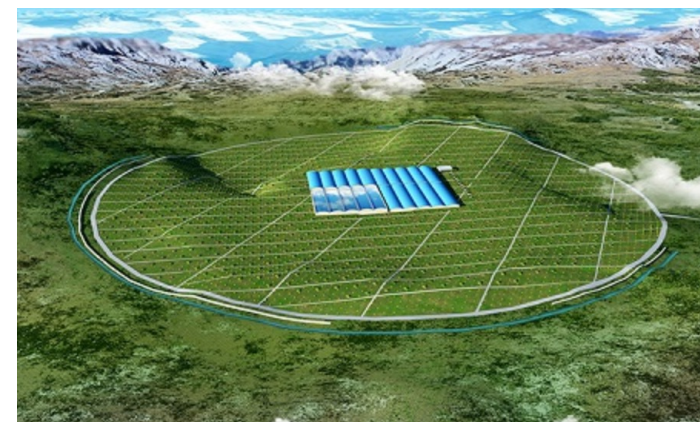
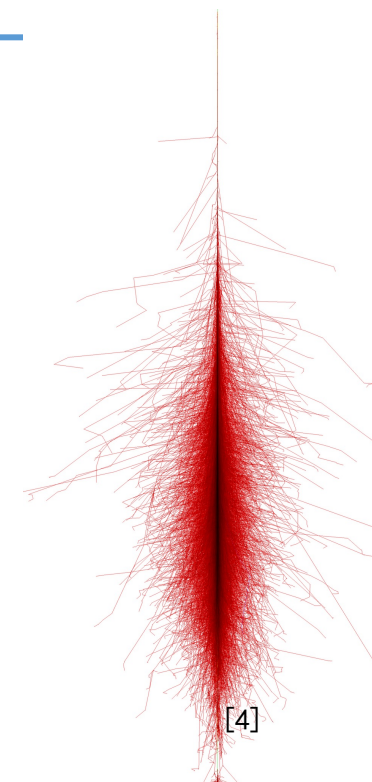
- (1)  $1\text{km}^2$  电磁探测器阵列和面积达 $42000\text{m}^2$  的缪子探测器阵列 (KM2A)。
- (2) 测量簇射粒子在水中产生的切伦科夫光的 $78000\text{m}^2$  探测器阵列 (WCDA)。
- (3) 18台广角切伦科夫望远镜阵列 (WFCTA)。

LHAASO是目前世界上：

在高能端以最高灵敏度探测伽马射线、  
对TeV能段的伽马射线源有最强的巡天扫描搜索能力、  
对宇宙线的能谱测量将覆盖最宽广的能量范围。

利用高灵敏度、高时间分辨率和大视场等优势，  
能够对宇宙射线进行全方位的观测和分析。

故可以借助LHAASO实验的探测阵列去有效寻找磁单极子引起的簇射





目标： 利用广延大气簇射寻找磁单极子

模拟使用程序：

产生簇射： CORSIKA<sup>(1)</sup>

探测器模拟： G4KM2A<sup>(2)</sup>

CORSIKA使用磁单极子能损公式

辐射能损

$$\frac{dE_{\text{rad}}}{dx} \simeq -\frac{16}{3} \frac{\alpha \alpha_M^2 Z^2 N_A}{A M} \gamma \ln(\gamma).$$

对产生

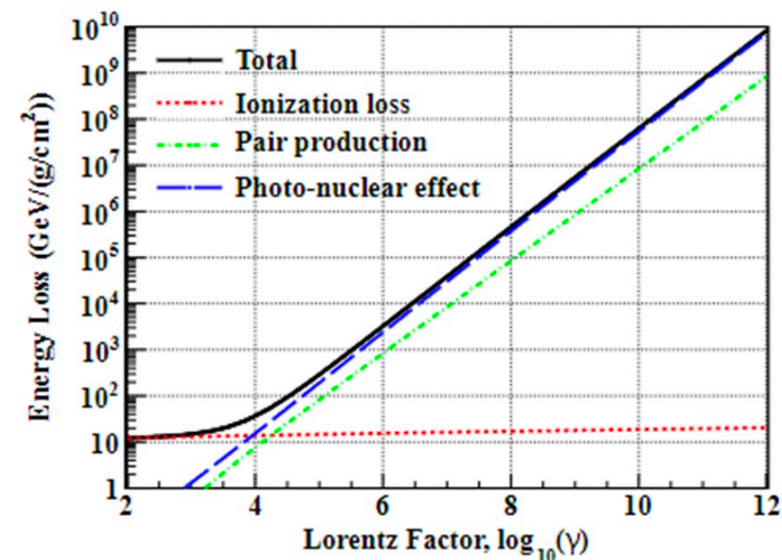
$$\frac{dE_{\text{pair}}}{dx} \simeq -\frac{19\pi}{9} \frac{\alpha^3 \alpha_M Z^2 N_A}{A m_e} \gamma \left[ (1 - B_1) \ln\left(\frac{\gamma}{4}\right) - B_2 \right],$$

光核作用

$$dE/dx \propto \gamma^{1.28}.$$

电离能损

$$\frac{dE_{\text{coll}}}{dx} = -\frac{4\pi Z \alpha \alpha_M N_A}{A m_e} \left[ \ln\left(\frac{m_e \beta^2 \gamma^2}{I}\right) - \frac{\delta}{2} \right].$$



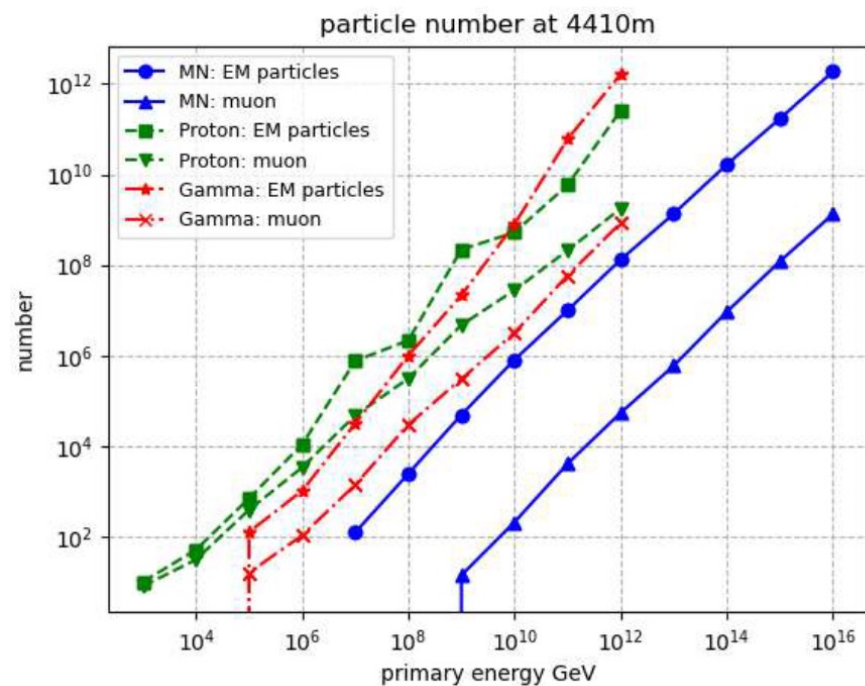
1: 用于模拟高能宇宙学簇射的蒙特卡洛程序，已被广泛应用于各大宇宙线实验，如KASCADE, LHAASO, AUGER

2: G4KM2A为LHAASO中为KM2A探测阵列，基于Geant4的蒙卡程序

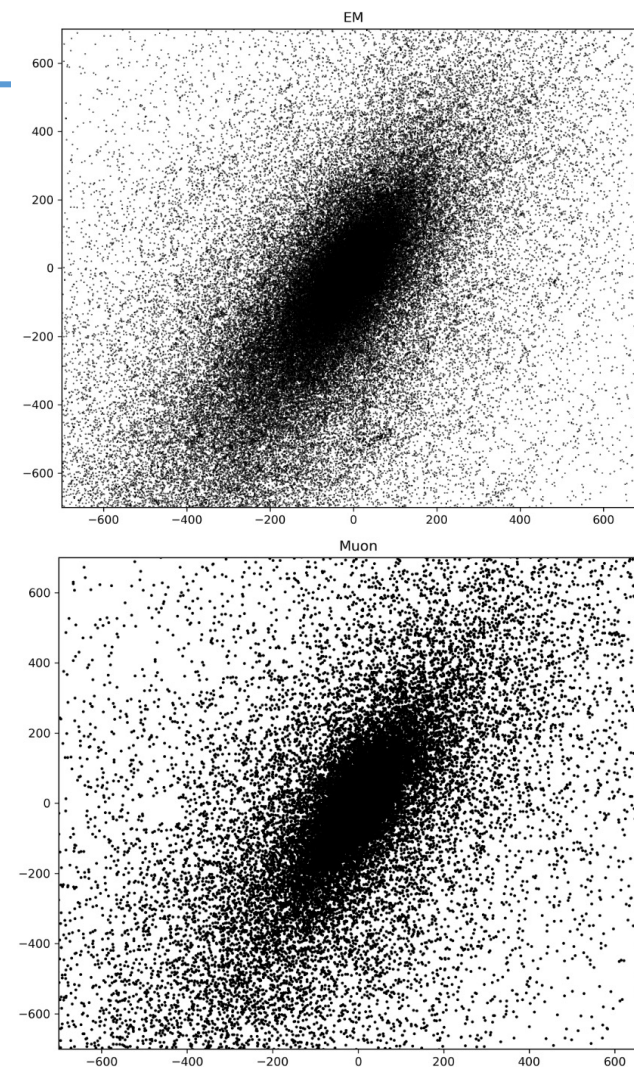
产生簇射:

由CORSIKA程序<sup>[5]</sup>产生磁单极子簇射, 可以得到在LHAASO观测平面上的次级粒子数及其分布

CORSIKA中, 设置磁单极子质量为 $10^5$  GeV时, 与p、 $\gamma$ 在不同能量下簇射规模



在相同能量下, 磁单极子簇射发展比较慢, 探测平面观测到的粒子数少于gamma与质子簇射



CORSIKA产生的磁单极子 ( $E=10^{16}$  GeV,  $M=10^5$  GeV) 簇射末态电磁粒子与muon分布

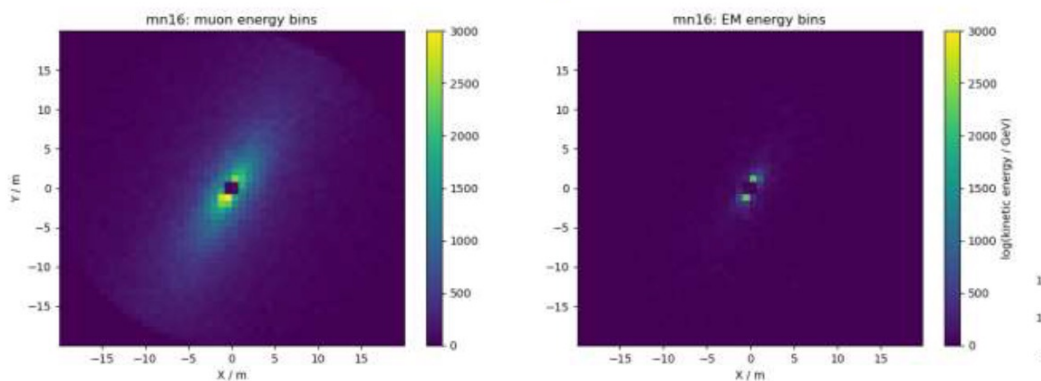


比较不同粒子簇射的区别：

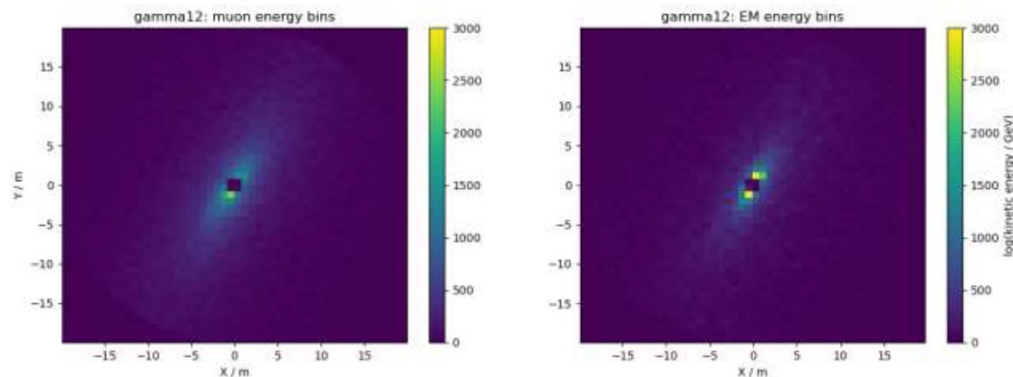
这里比较宇宙线中最多的成分质子和与磁单极子簇射类似的  $\gamma$  簇射

相同规模下：4410m的观测平面 **muon**, **EM particles** 能量分布

monopole

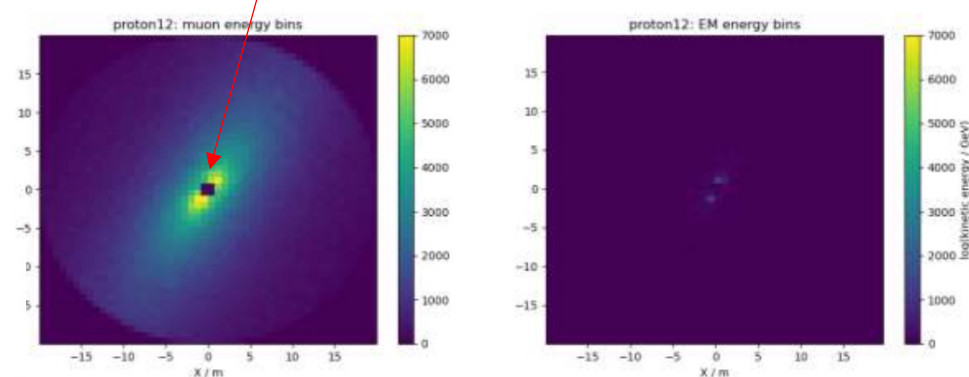


gamma

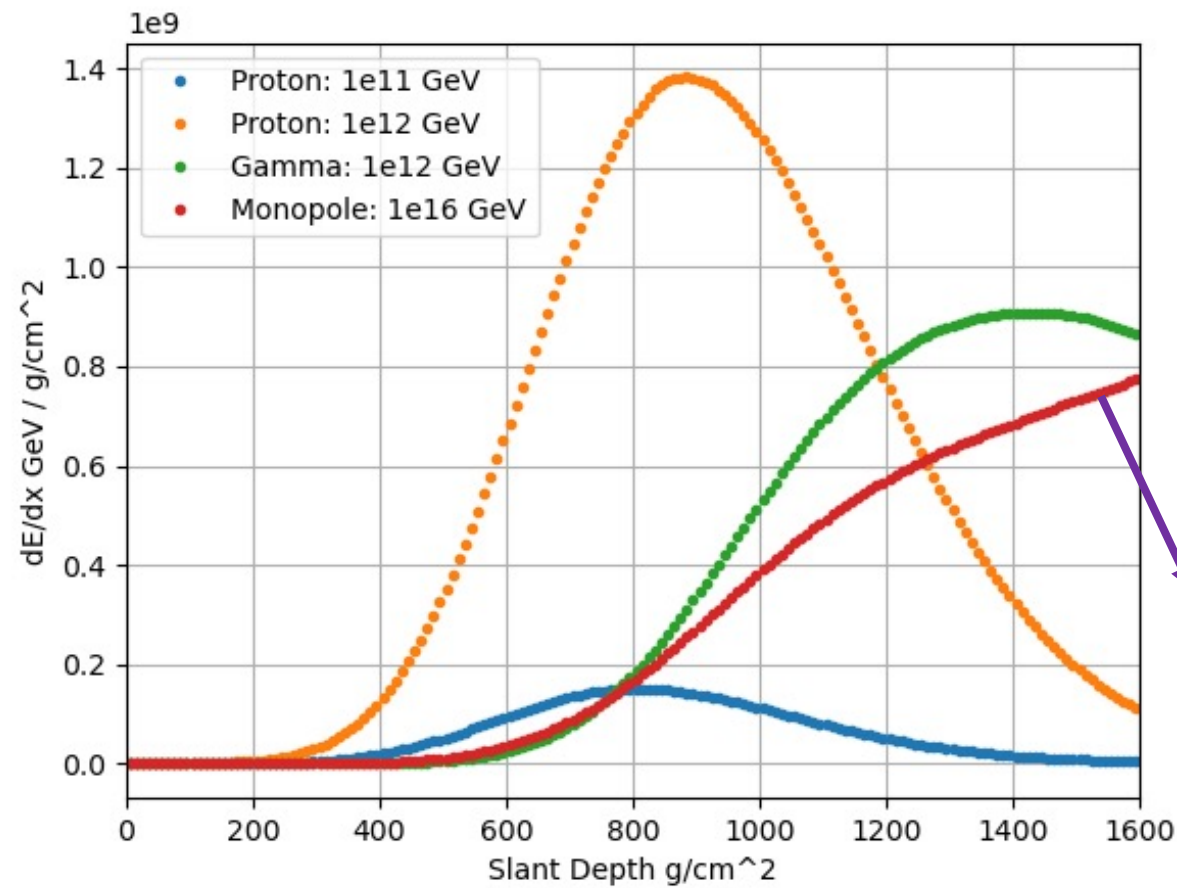


注：去芯

proton



不同能量的质子，gamma，磁单极子簇射纵向发展  
( $dE/dX$  vs. Depth)比较



- 磁单极子更具有穿透性；
- 纵向发展更为缓慢；

此特征可以由LHAASO中的广角切伦科夫望远镜阵列(WFCTA)探测

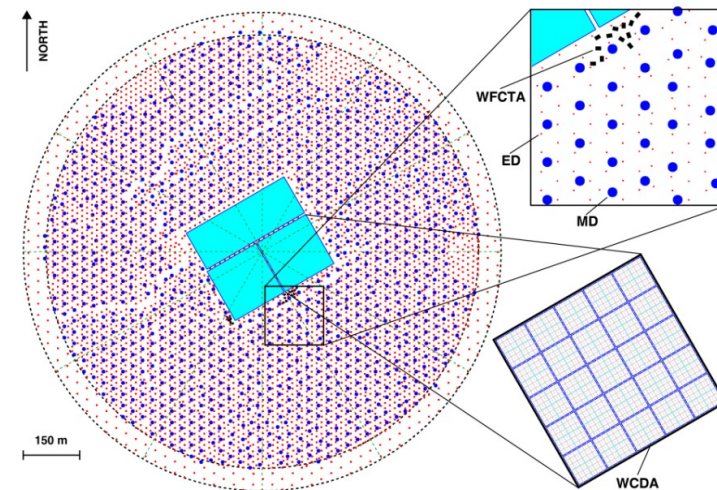
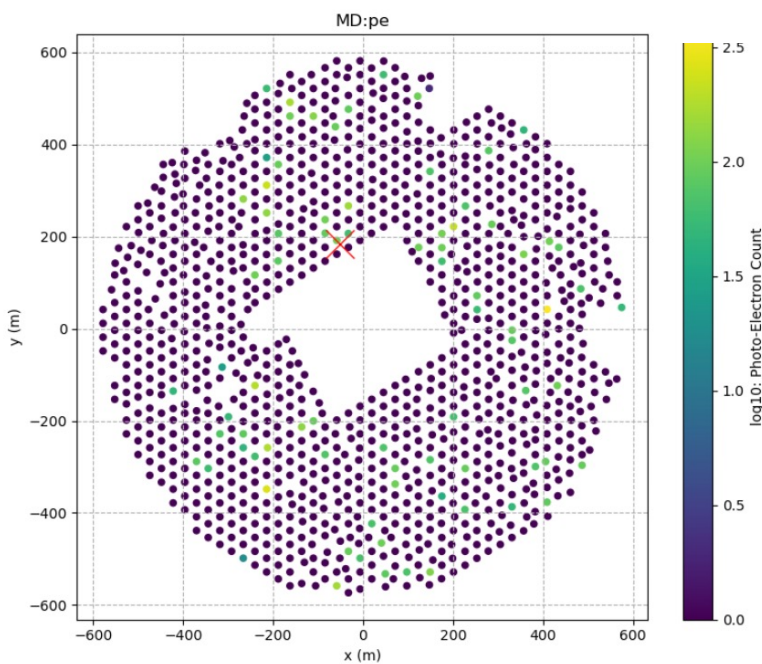
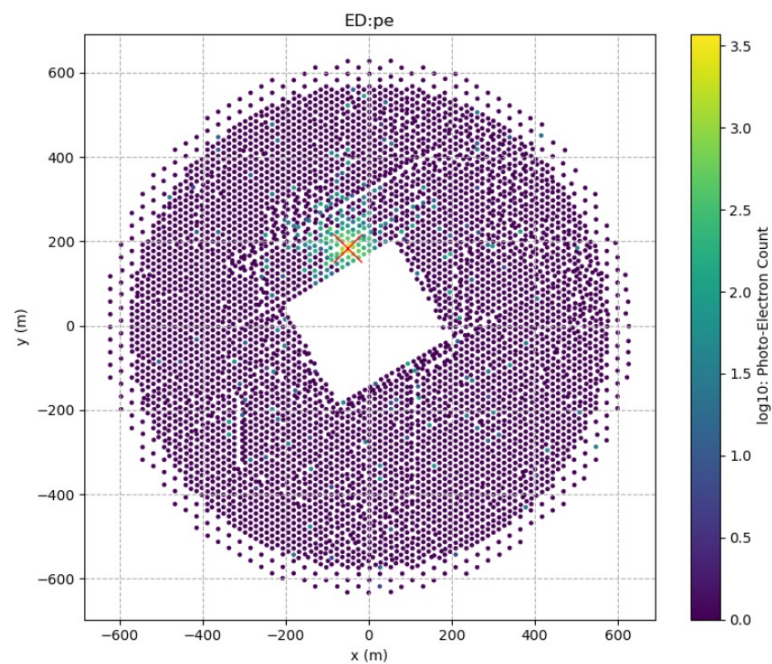
磁单极子簇射  
纵向发展

首次在LHAASO探测器模拟平台上模拟出磁单极子簇射的响应

利用KM2A探测阵列的模拟程序G4KM2A，模拟探测器对CORSIKA中次级粒子的响应

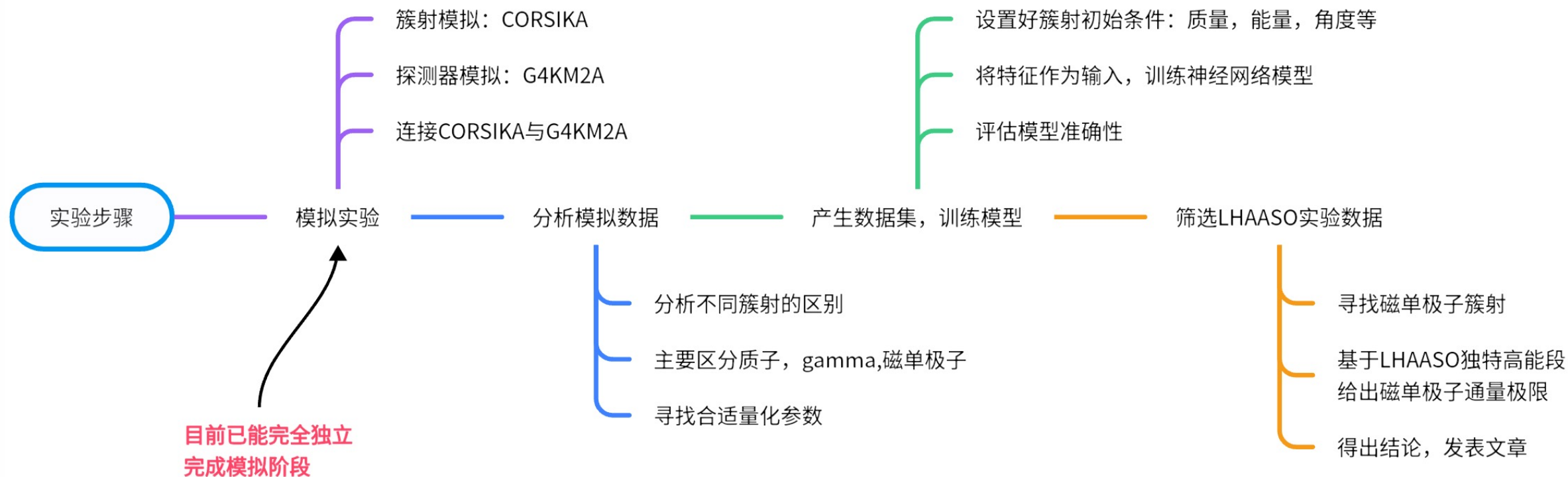
G4KM2A对 $10^{12}\text{GeV}$ 的磁单极子簇射的响应

core=[-51.286, 184.579]



LHAASO探测阵列分布

注：1. 红叉表示簇射芯位置  
2. 颜色为PMT接受光电子数





- 寻找磁单极子是基础物理的一个重要目标
- 利用广延大气簇射寻找磁单极子
- 本研究将首次在世界领先宇宙线观测平台LHAASO上完成对磁单极子模拟并搜寻
- 目前已完成模拟，即将结合实验观测及机器学习手段，预期产生有较大影响力结果



- [1] Introduction to magnetic monopoles, Contemporary Physics, 53:3, 195-211, DOI: [10.1080/00107514.2012.685693](https://doi.org/10.1080/00107514.2012.685693)
- [2] Dirac, P.A.M., "Quantised Singularities in the Electromagnetic Field", Proc. Roy. Soc. A 133 60 (1931)
- [3] EXPERIMENTAL STATUS OF MONOPOLES G. Giacomelli
- [4] Fabian Schmidt, University of Leeds, UK
- [5] CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers
- [6] Large High Altitude Air Shower Observatory. LHAASO Collaboration

谢谢！