

1 PeV以下铁核能谱及10 PeV以上质子能谱测量进展

游智勇

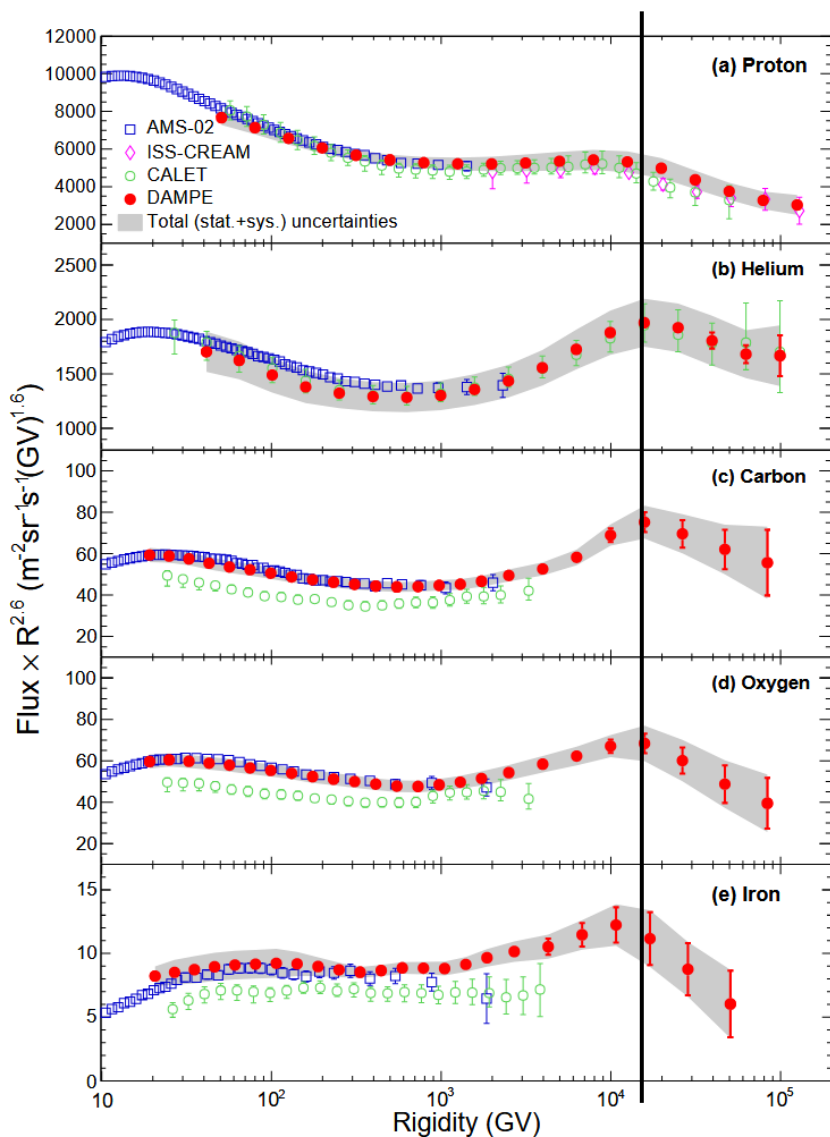
高能物理研究所

“LHAASO天体辐射与宇宙线成分谱观测研究及新探测技术研究”2026年度会议及相关研讨会，山东青岛，2026年8月

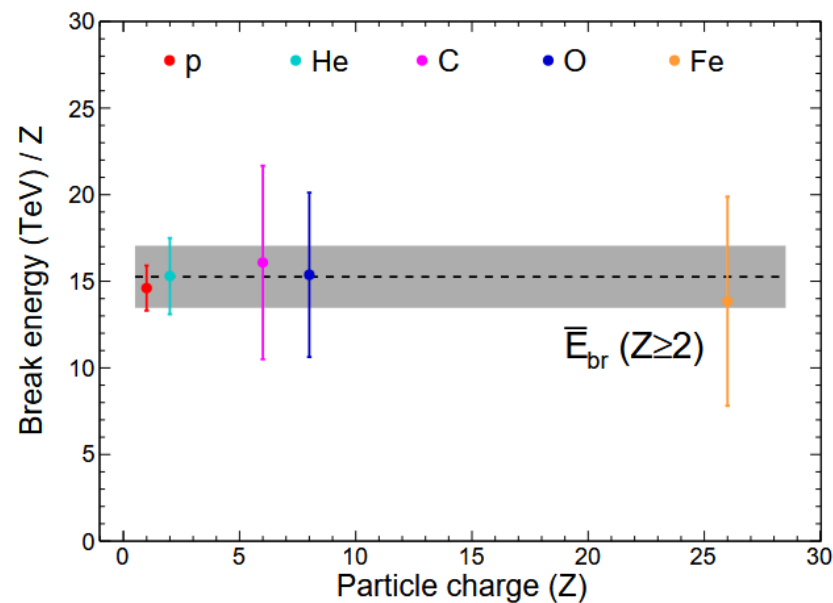
目录

- 研究背景
- 能谱测量进展
 - 铁核能谱测量进展
 - 质子能谱测量计划
- 后续计划

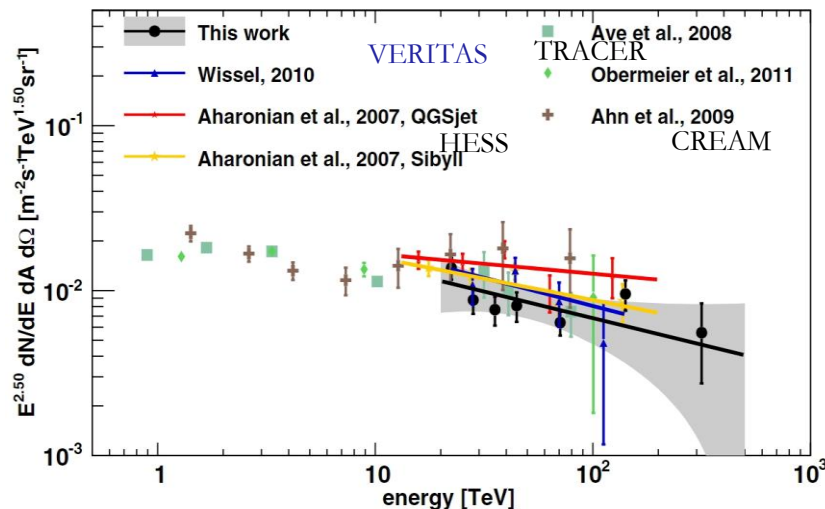
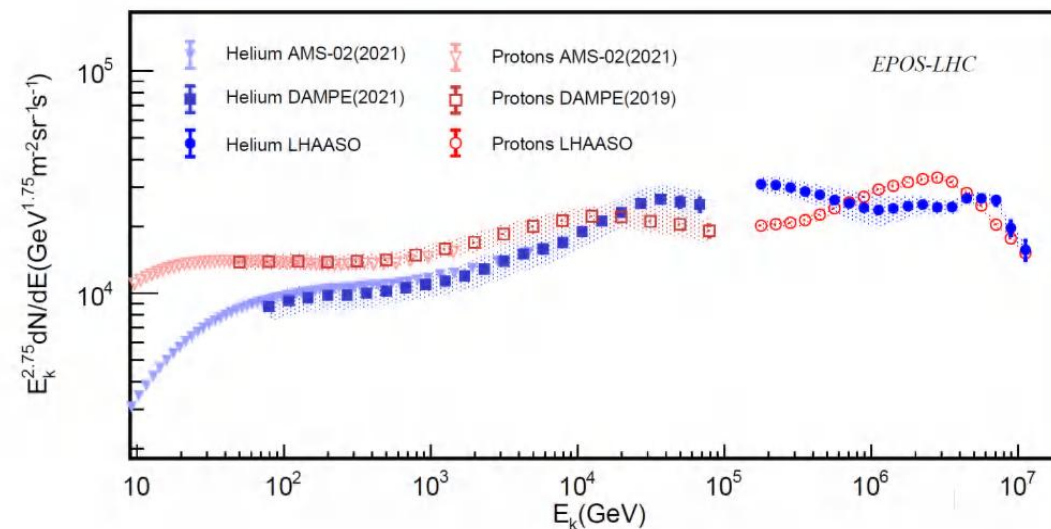
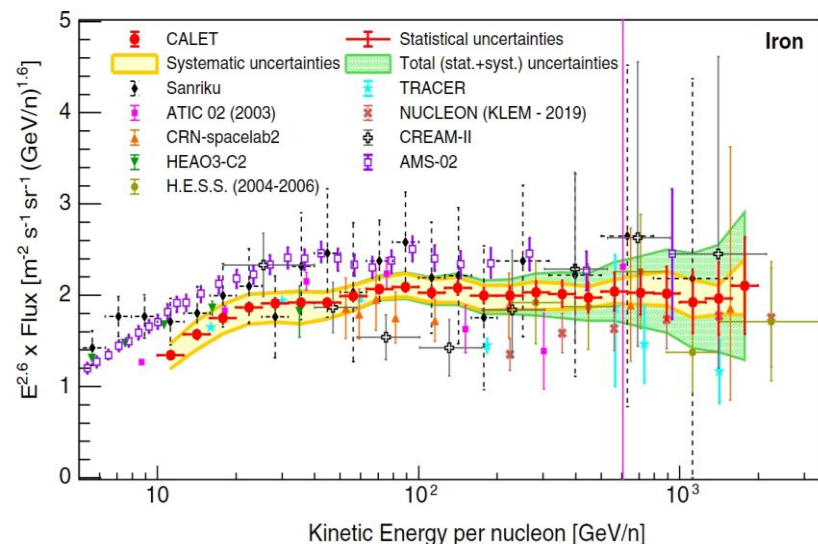
研究背景：DAMPE 五种宇宙线粒子测量结果



- 刚度依赖的能谱软化结构: $R_{\text{break}} \sim 15 \text{ TV}$
- 邻近源的贡献: $E_{\text{max}} \propto Z$



研究背景：单成分能谱测量结果



- LHAASO 已经实现膝区质子、氦核能谱测量，展现了其在能谱测量的强大能力
- 除了 DAMPE 实验，其他实验几乎没有对百TeV以上铁核能谱做精确测量

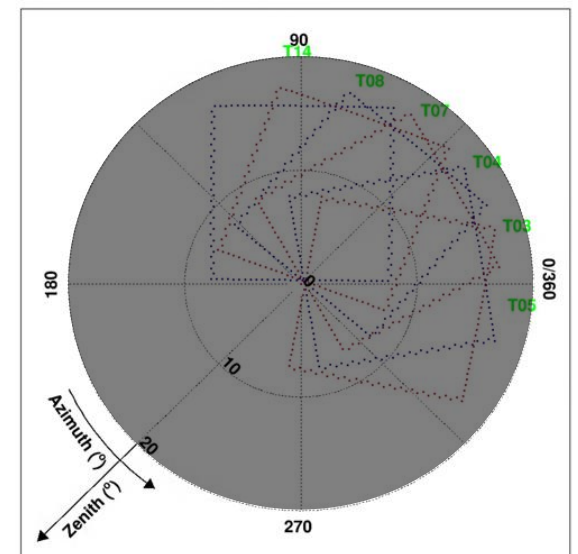
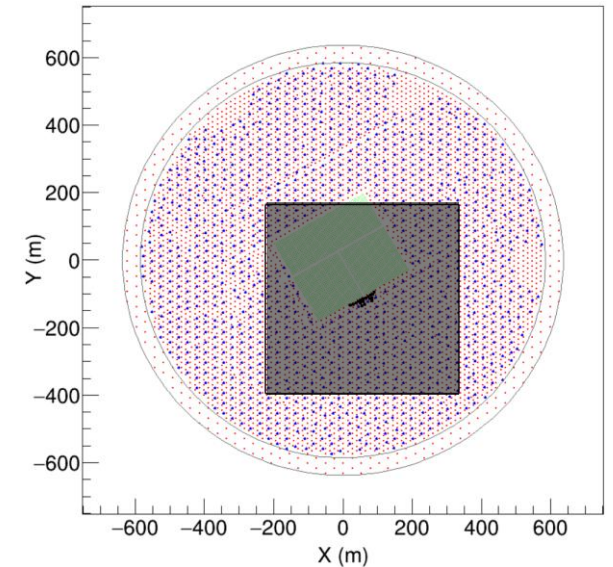
1 PeV以下铁核能谱：模拟事例样本

➤ 模拟设置

- 大气簇射模拟： CORSIKA 7.7410
- 强子相互作用模型： EPOS-LHC/QGSJETII04/SIBYLL2.3d + FLUKA

➤ 事例种类

- 原初粒子种类： Proton, Helium, CNO, MgAlSi, Iron
- 粒子能量: 10 TeV ~ 10 PeV
- 能谱指数： -1
- 方向范围： 天顶角 $0^\circ \sim 20^\circ$ ，方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$
- 芯位范围： $\pm 280\text{m}$



1 PeV以下铁核能谱：事例挑选条件

物理目标：测量100TeV~1PeV铁核能谱

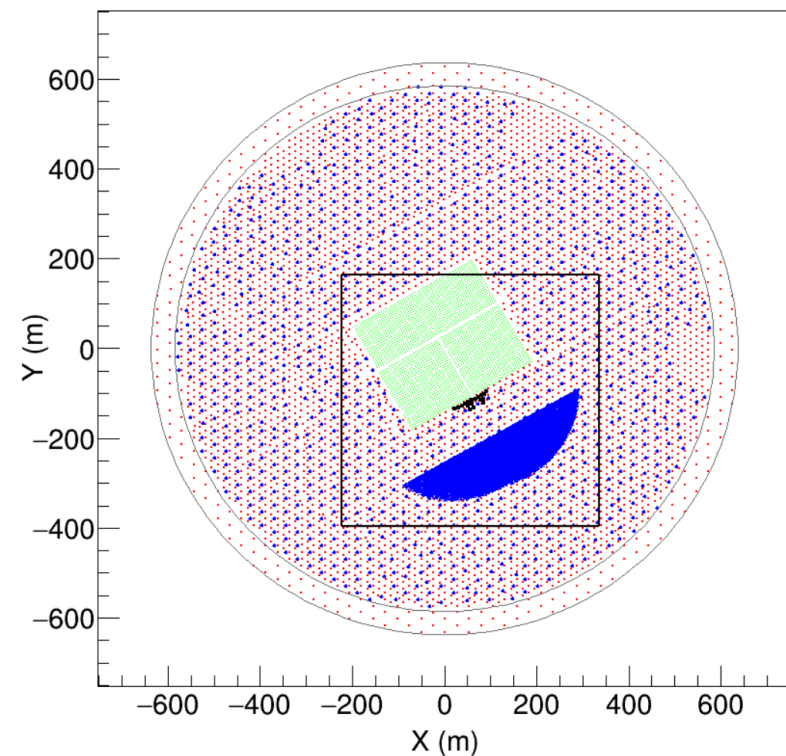
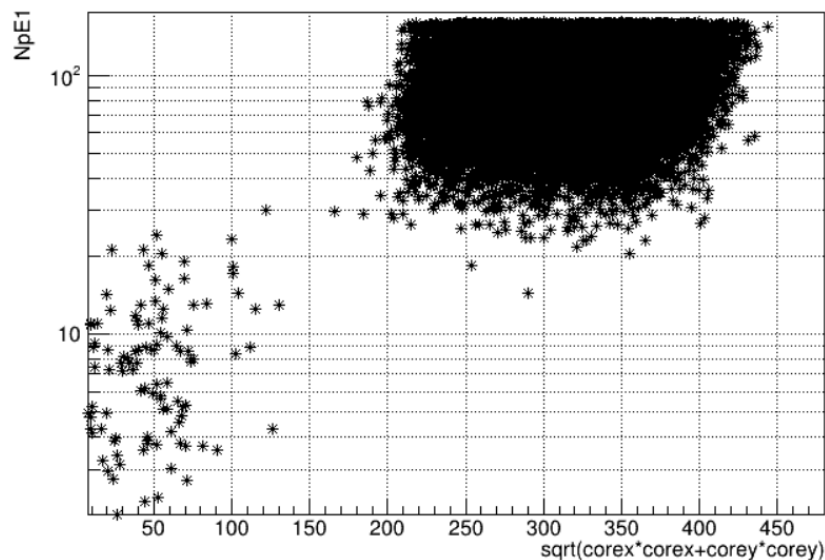
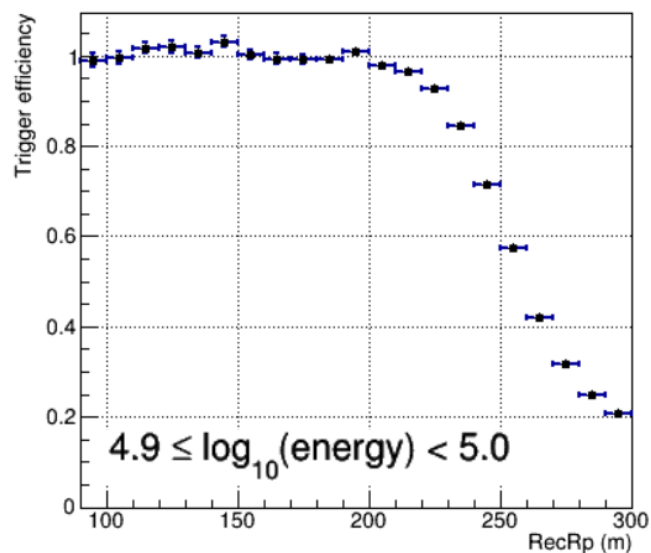
数据挑选条件：

➤ WFCTA 挑选条件：

- $N_{\text{pix}} \geq 3$ ，像的重心在 $\pm 5^\circ$ 以内
- R_p : 90 m ~ 200 m （保证满效率触发）

➤ KM2A 挑选条件：

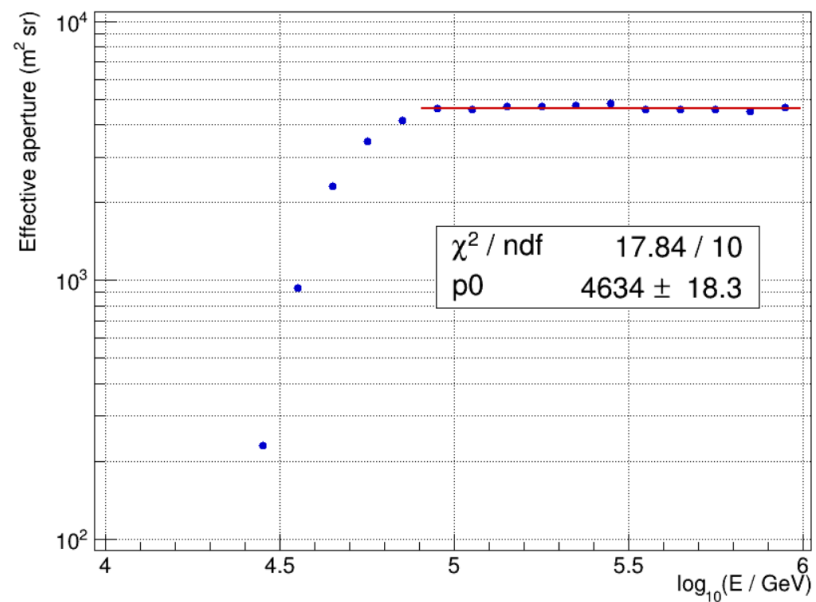
- 重建芯位在KM2A阵列内部
- $N_e^{100} > 20$ （排除外部事例污染）



1 PeV以下铁核能谱：事例挑选结果

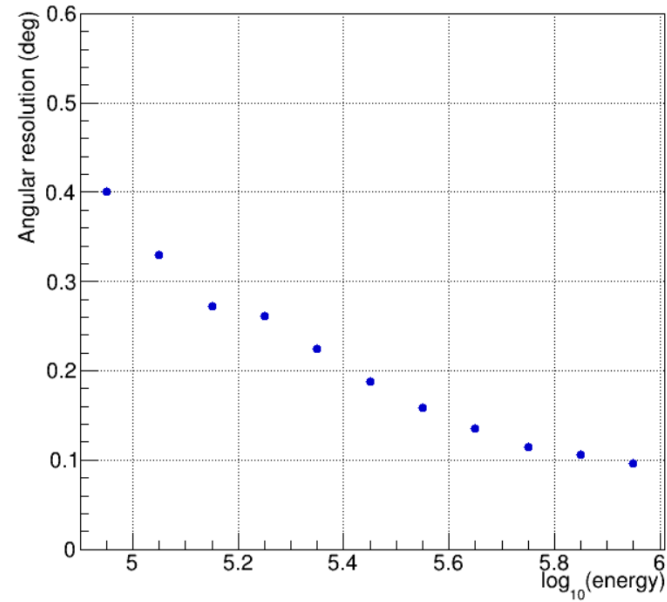
有效孔径 $\sim 4600 \text{ m}^2 \text{ sr}$:

- 80 TeV 以上达到满效率

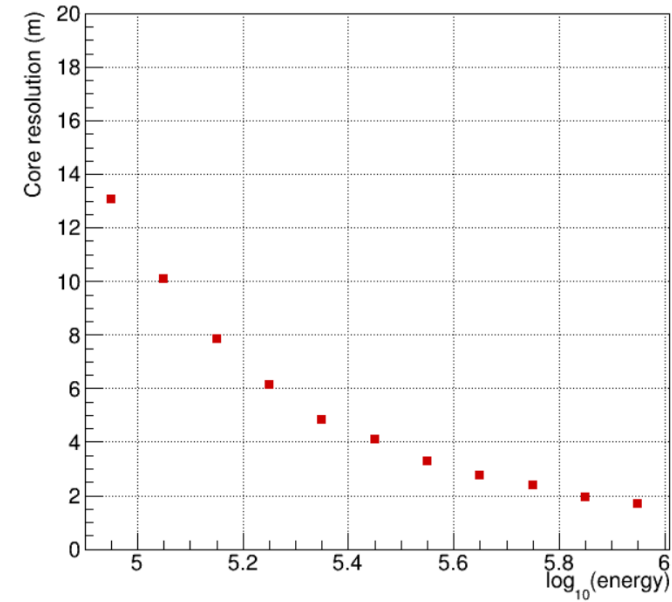


几何重建结果:

- 方向分辨: $< 0.4^\circ$

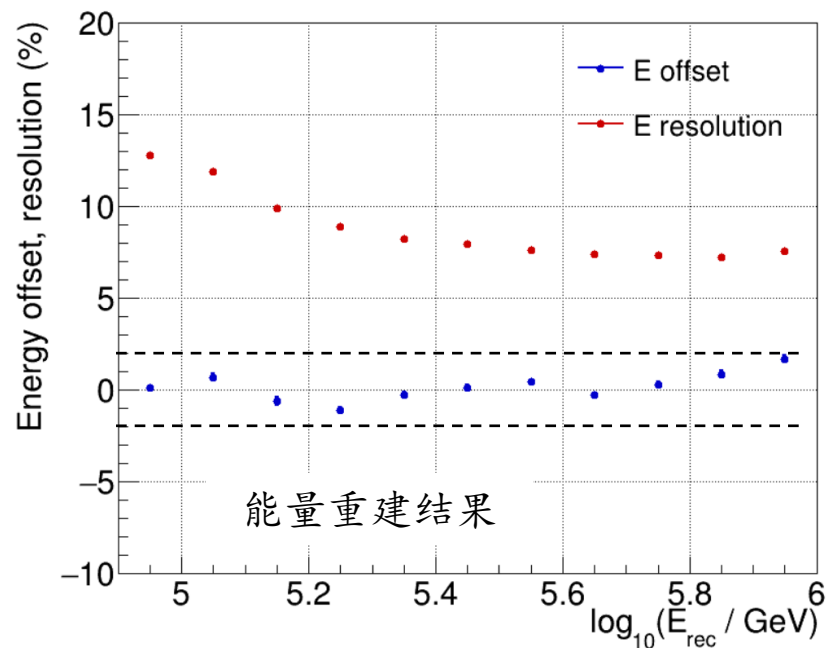
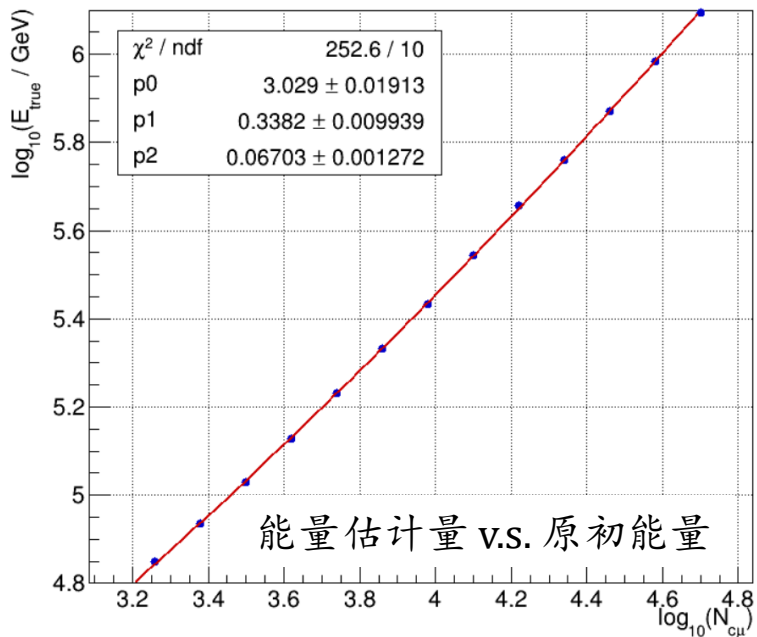
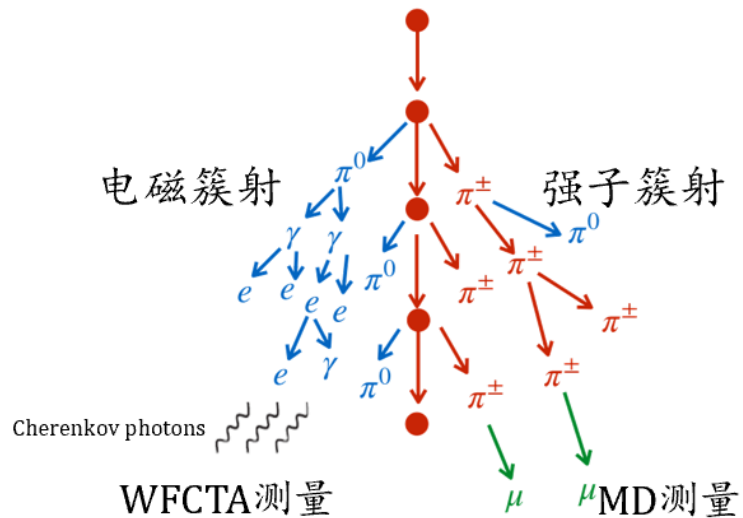


- 芯位分辨: $< 14 \text{ m}$



1 PeV以下铁核能谱：能量重建

- 簇射中，原初粒子的能量分配到次级粒子中
强子成分： $K^\pm, \pi^\pm \rightarrow \mu^\pm$
电磁成分： $e^\pm \rightarrow \text{Cherenkov photons}$
- 能量估计量： $N_{c\mu} = N_c + N_\mu$ （成分、相互作用模型弱依赖）
- 重建结果：bias小于 $\pm 2\%$ ，分辨率小于15%



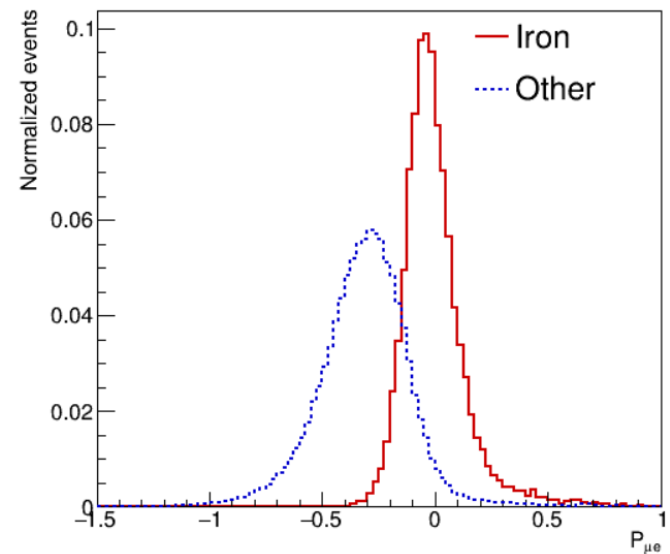
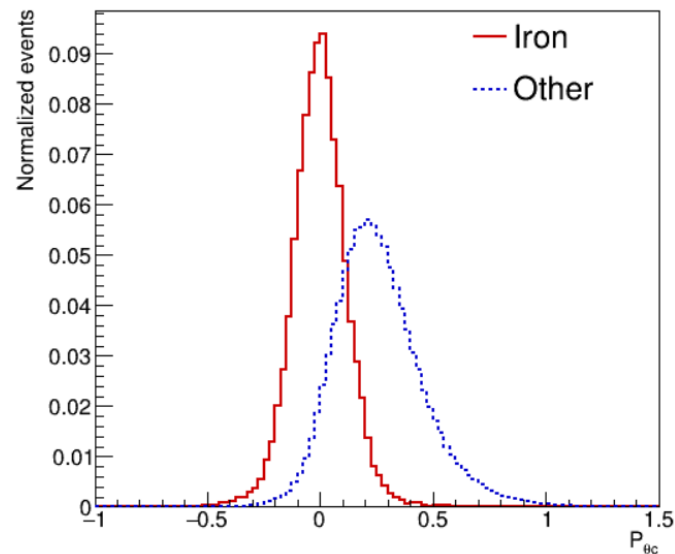
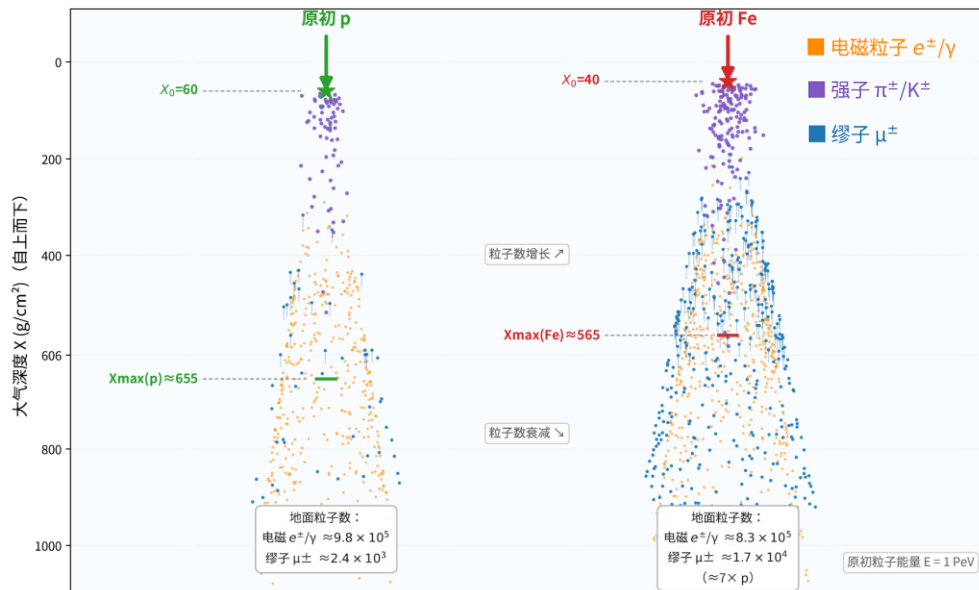
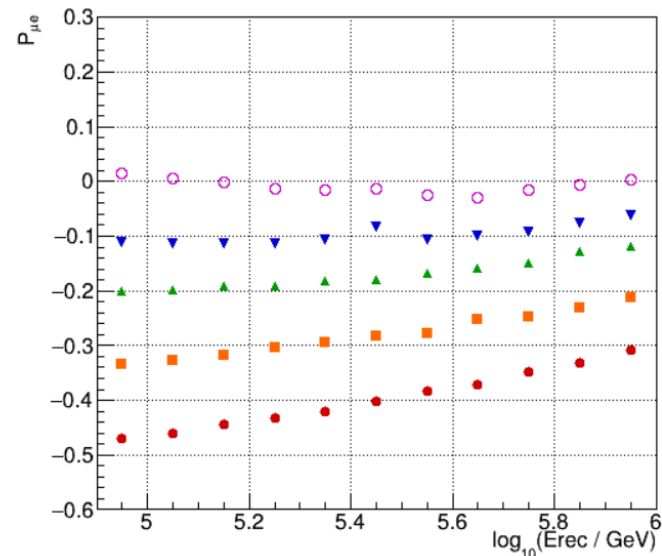
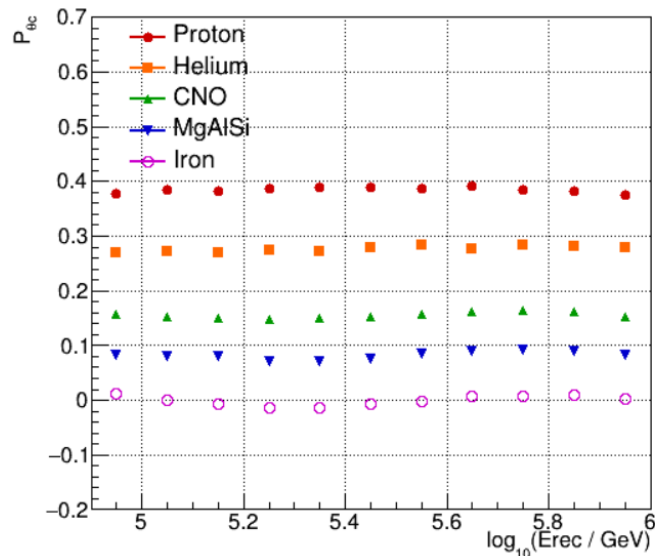
1 PeV以下铁核能谱：铁核挑选变量

$$P_{\theta c} = \frac{\theta_c^{160} - \langle \theta_c^{160} \rangle}{\langle \theta_c^{160} \rangle |_{\log_{10} E = 5.5}}$$

- 几何依赖： $\theta_c = p_0 + p_1 \cdot R_p + p_2 \cdot R_p^2$
- 能量依赖： $\theta_c^{160} = p_0 + p_1 \cdot \log_{10} E$

$$P_{\mu e} = \log_{10} \frac{N_{\mu}}{N_e^{0.68}}$$

- N_{μ} : MD 测量的缪子数
- N_e : ED 测量的电磁粒子数

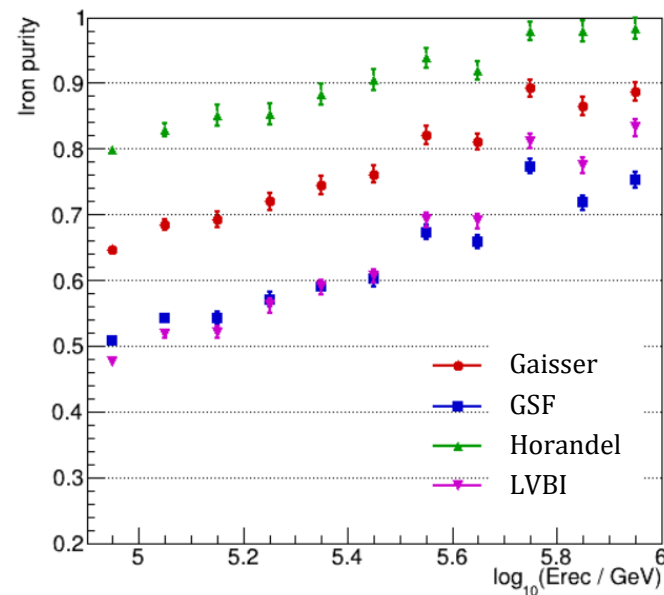
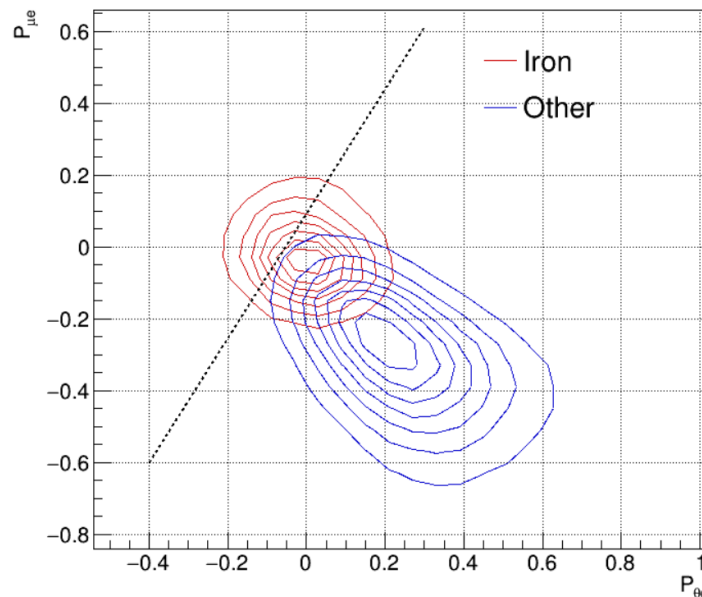


1 PeV以下铁核能谱：铁核挑选

$$P_{\text{combine}} = \cos(\delta) \cdot P_{\mu e} - \sin(\delta) \cdot P_{\theta c}, (\delta = 60^\circ)$$

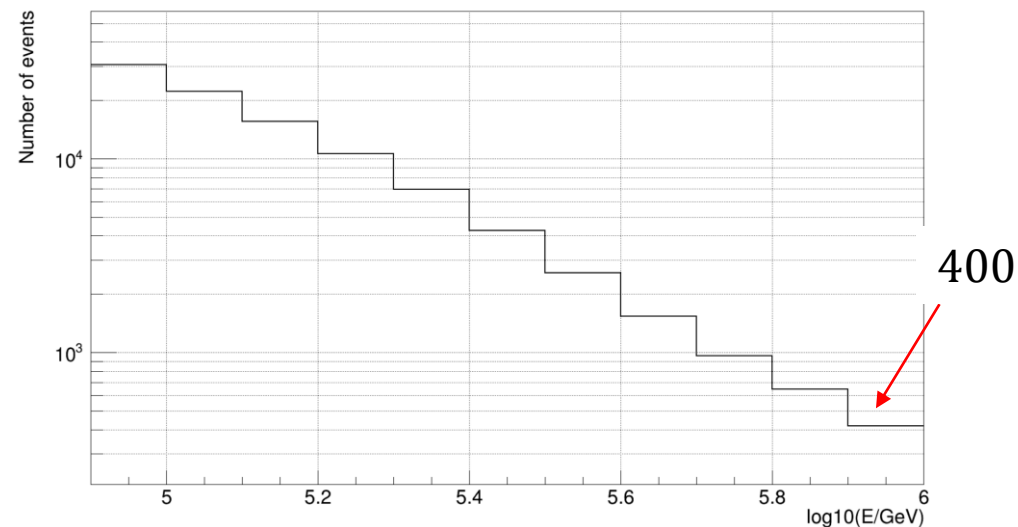
$P_{\mu e}$ 与 $P_{\theta c}$ 结合挑选铁核事例：

- 挑选效率： $\eta_I = \frac{N_S^I}{N_0^I} \sim 25\%$
- 铁核纯度： $\epsilon_I = \frac{N_S^I}{N_S^{\text{All}}} : 50\% \sim 90\%$



实验数据量

- 2023~2025年：经过铁核挑选后，在 1 PeV 附近约有400个事例
- 2025年~2026年的数据还未完成标定，之后可以添加到能谱测量中



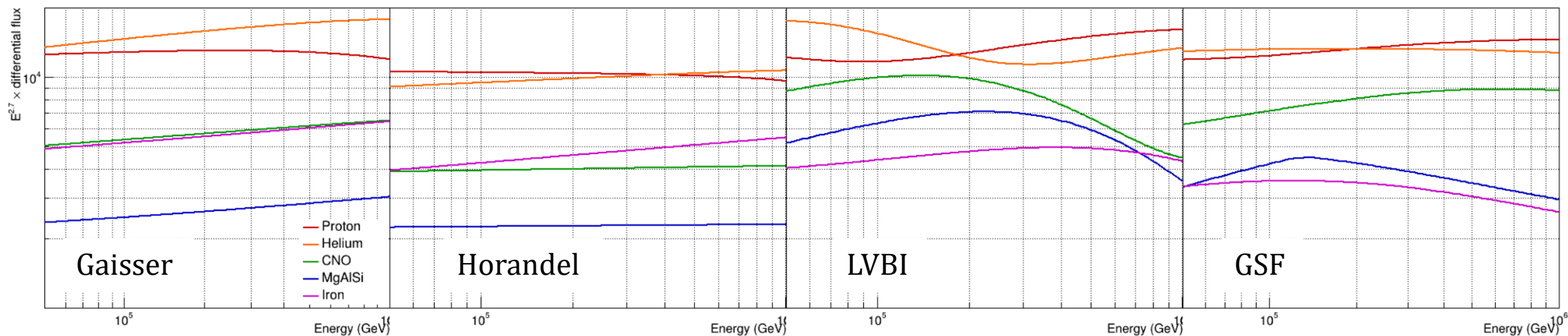
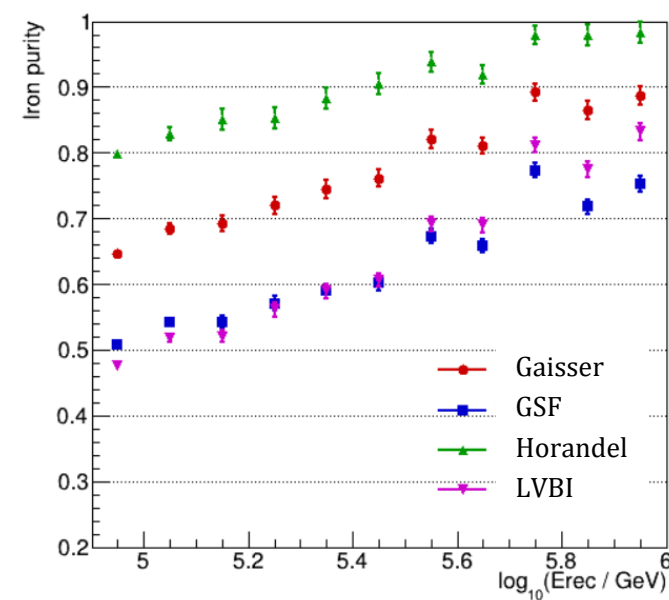
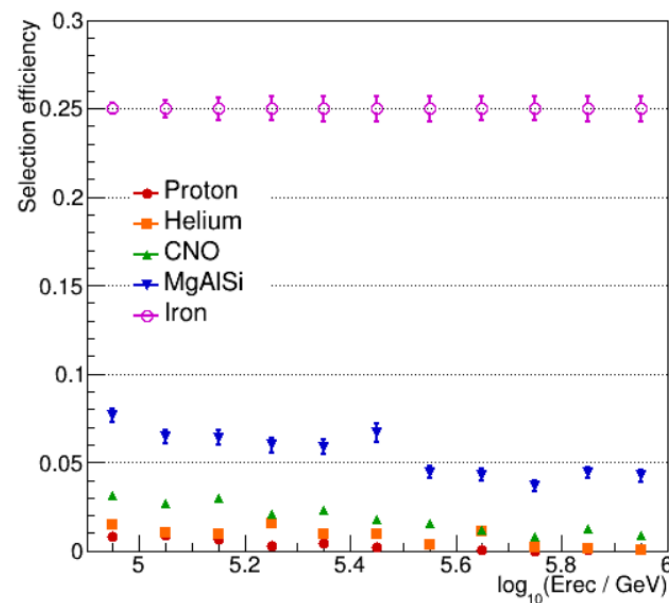
1 PeV以下铁核能谱：铁核挑选

- 不同成分模型原初铁核占比： $F_I/F_{I+CNO+MgAlSi}$ 差异大

Gaisser, Horandel: $F_I/F_{I+CNO+MgAlSi} \sim 50\%$

LVBI, GSF: $F_I/F_{I+CNO+MgAlSi} \sim 25\%$

- Iron挑选效率25%时，MgAlSi事例保留比为8%~5%，CNO事例保留比小于3%

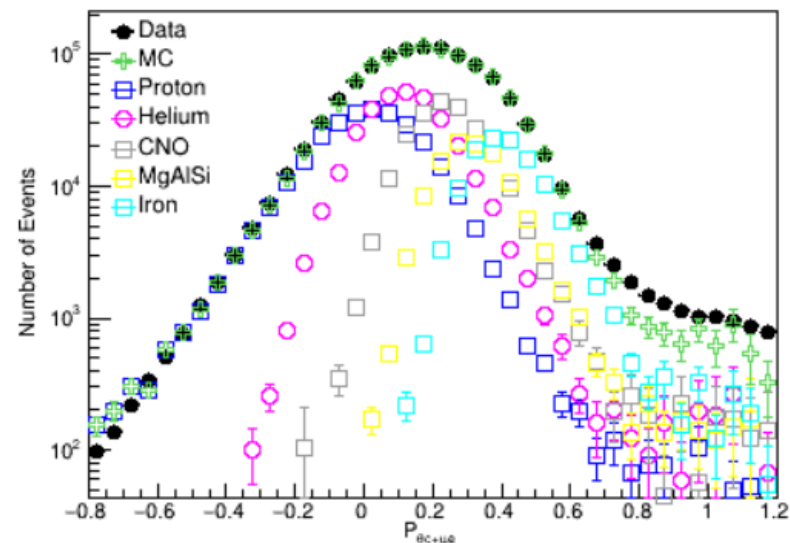
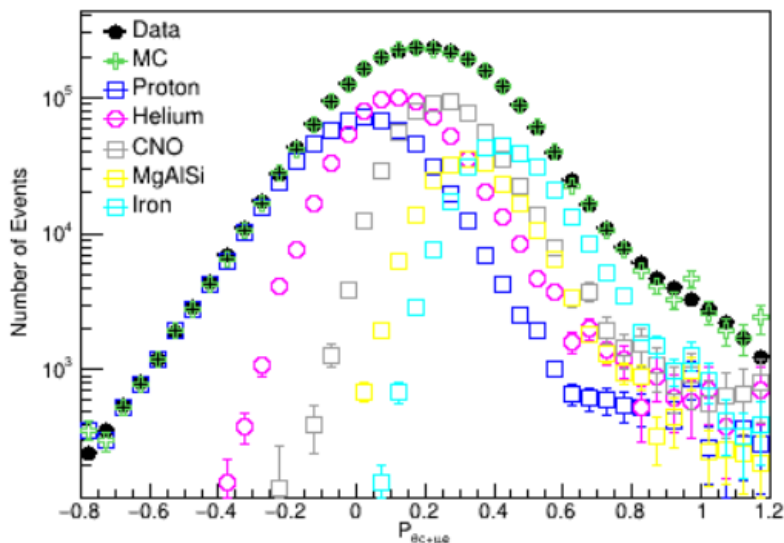
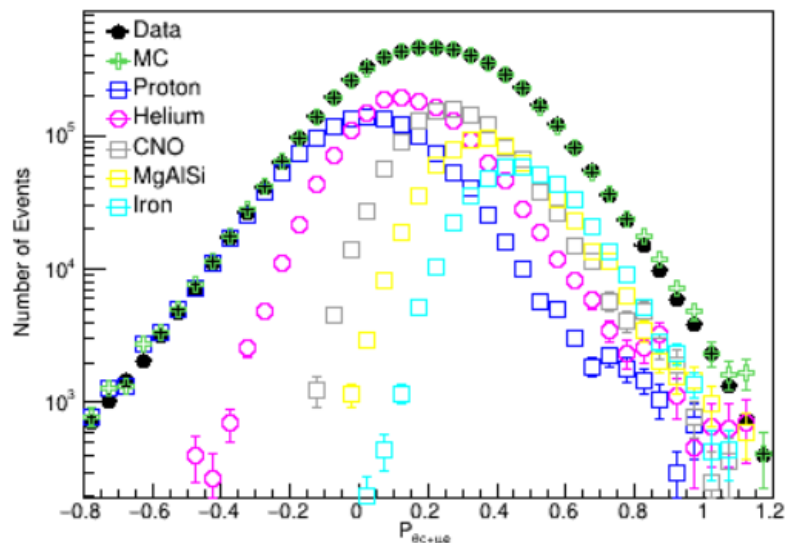


1 PeV以下铁核能谱：铁核挑选优化

利用实验数据限制重核比例

$$N_i^{\text{fit}} = AT\Delta P_i \left[\Phi_p f_p^i + \Phi_{He} f_{He}^i + \Phi_{\text{CNO}} f_{\text{CNO}}^i + \Phi_{\text{MgAlSi}} f_{\text{MgAlSi}}^i + \Phi_{\text{Fe}} f_{\text{Fe}}^i \right]$$

- 目前 150 TeV ~ 10 PeV 已有LHAASO测量的质子、氦核能谱
- 拟合实验中 P_{combine} 分布，得到CNO、MgAlSi和Iron的相对比例
- 根据拟合得到的比例重新估计纯度，这样可以有效控制成分模型引入的系统误差



1 PeV以下铁核能谱：铁核挑选优化

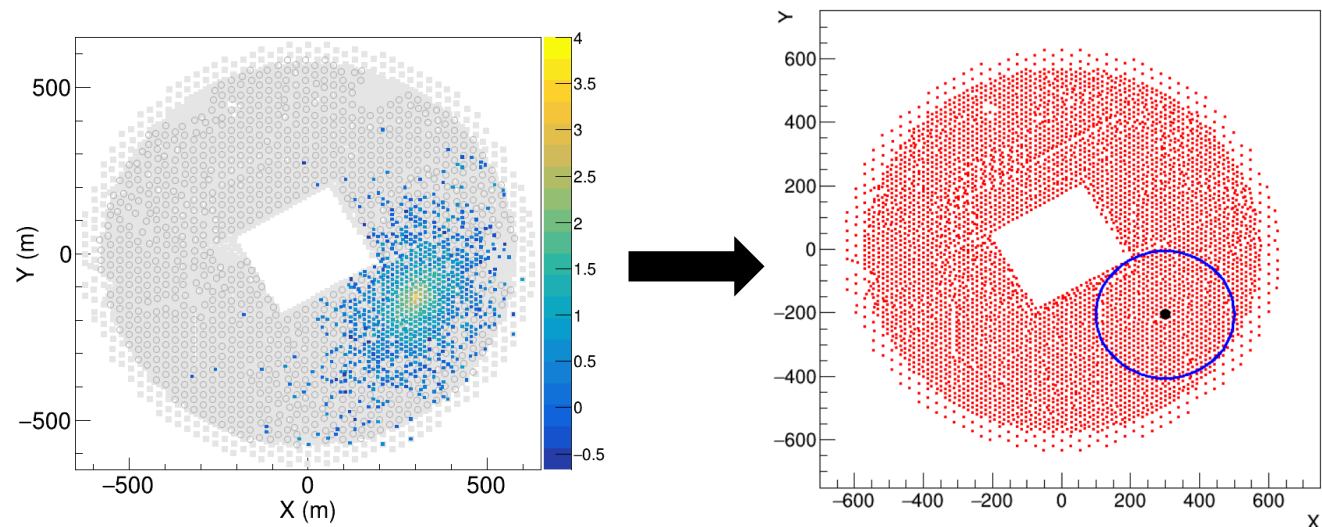
次级粒子横分布均匀性

Wasserstein距离 (W2)

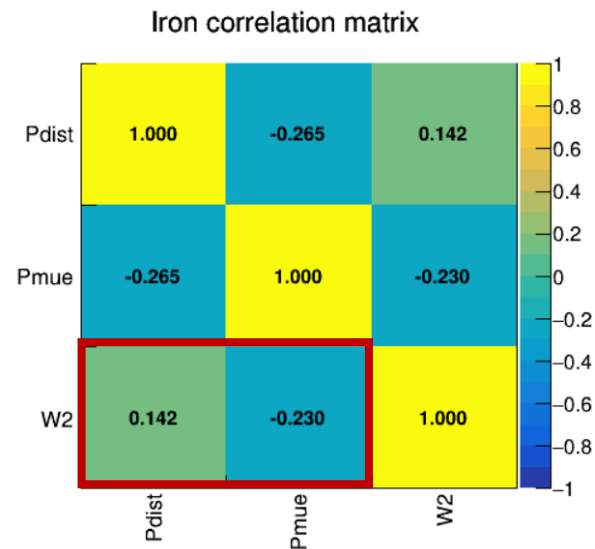
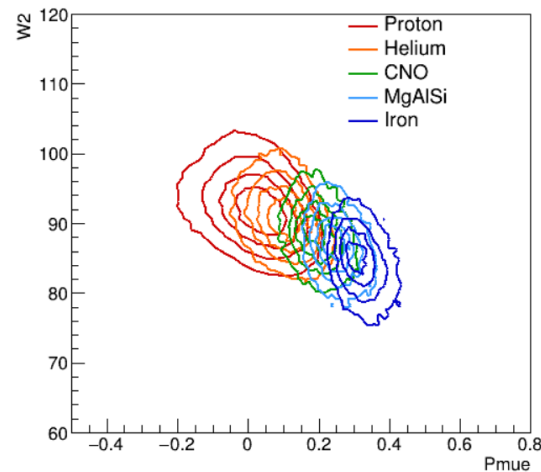
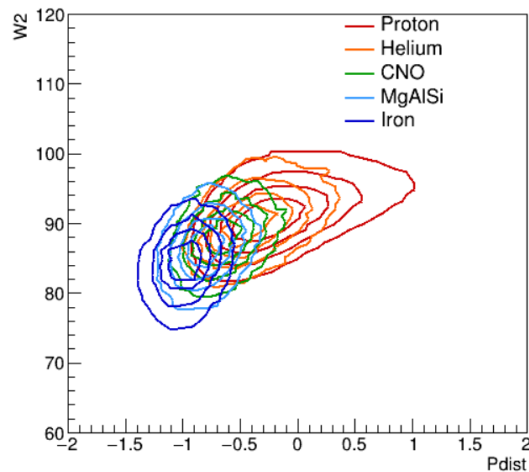
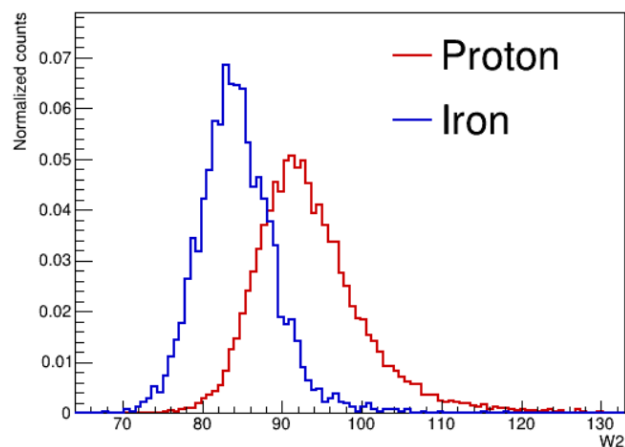
$$W_2^2(\mu, \nu) = \min_{\gamma} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} C_{ij}$$

$$C_{ij} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2 = (dx_i - dx_j)^2 + (dy_i - dy_j)^2$$

- 把一个分布搬成另一个分布所需的最小搬运功
- 宇宙线事例分布→均匀触发的模板
- 考虑了次级粒子的空间位置信息，能区分同样强度、不同形态的事例

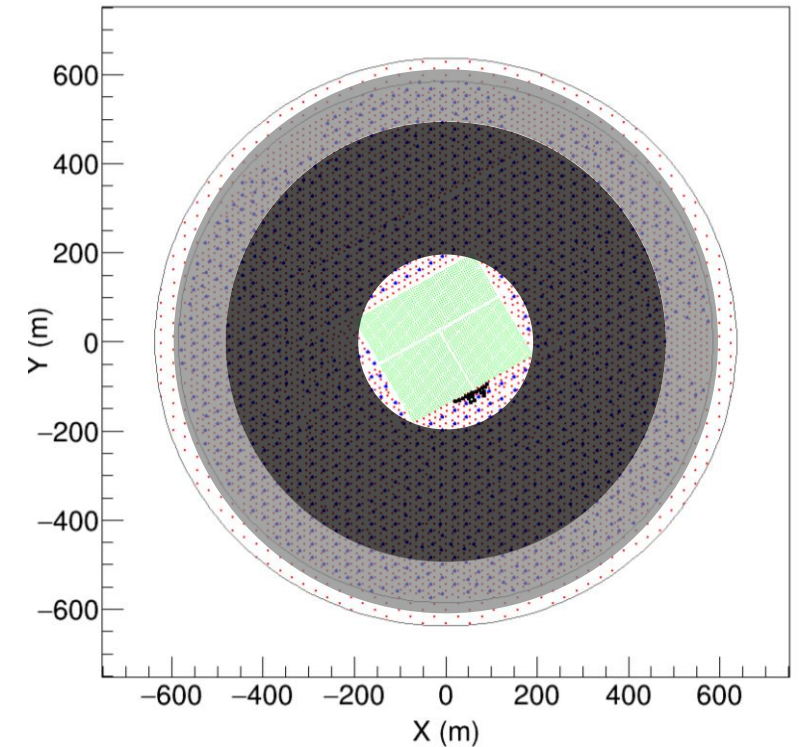


变量相关性

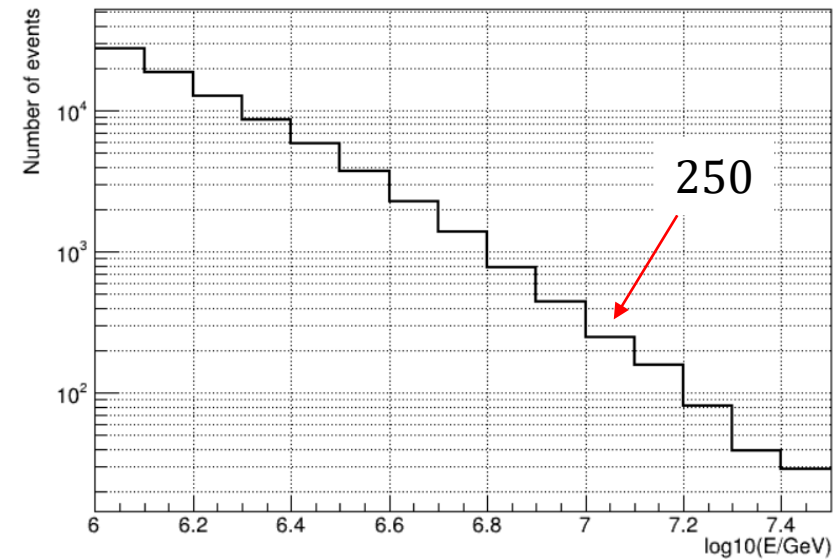
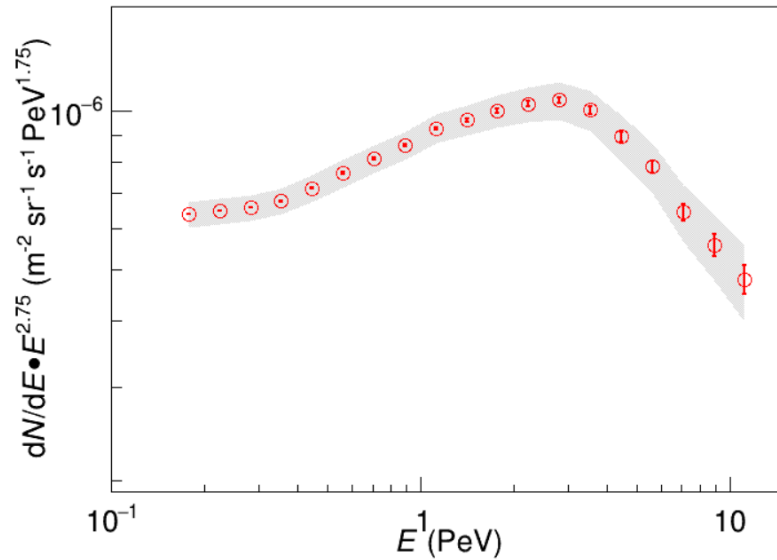


➤ 模拟事例情况

- 粒子种类: Proton, Helium, CNO, MgAlSi, Iron
- 粒子能量: 10 PeV ~ 100 PeV
- 方向范围: 天顶角 $0^\circ \sim 40^\circ$, 方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$
- 芯位范围: 200~480 m (后续增加到200~600 m)
- 模拟数据量 (10PeV~100PeV):
 - IHEP: 10万 (QGSJET), 5万 (EPOS), 5万 (SIBYLL)
 - 天河: 20万 (EPOS)
- 100PeV~500PeV的事例待产生: 20万 (EPOS)



10 PeV以上质子能谱：能谱测量计划



➤ WFCTA+KM2A联合观测结果延伸

- 2021~2022观测季，经过质子挑选后（50%挑选效率），10PeV附近约有250个事例
- 结合后续几年的测量数据，10PeV附近质子事例可以增加至1000个，最终将质子能谱能量延伸至50PeV

➤ KM2A独立观测数据

- 有效孔径增加：75000 $\text{m}^2 \text{sr}$ $\rightarrow$ 270000 $\text{m}^2 \text{sr}$
- 时间增加：每年900 h $\rightarrow$ 每年8300 h
- 将质子能谱测量结果延伸到100 PeV

➤ 铁核能谱

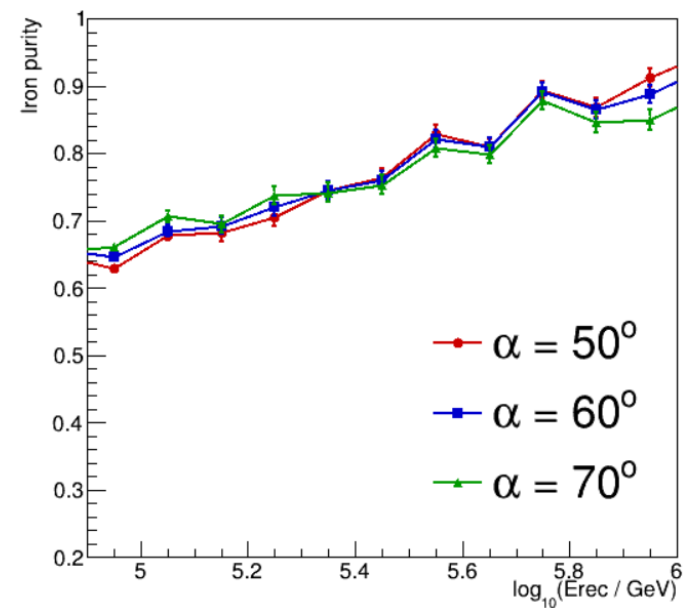
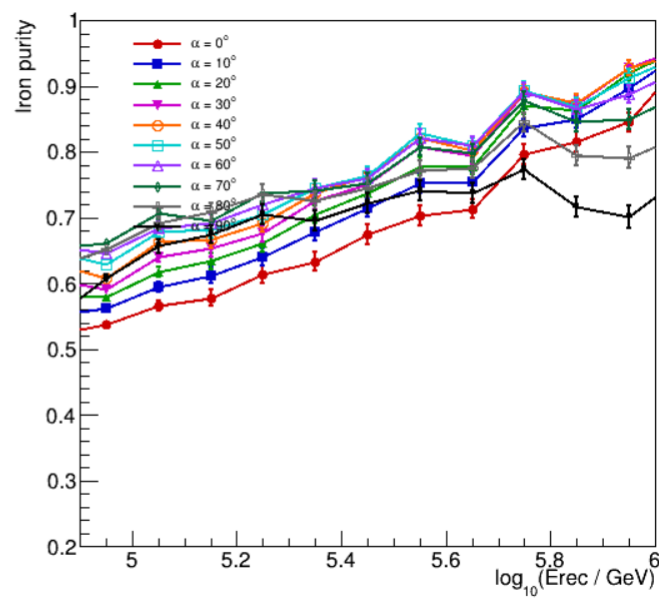
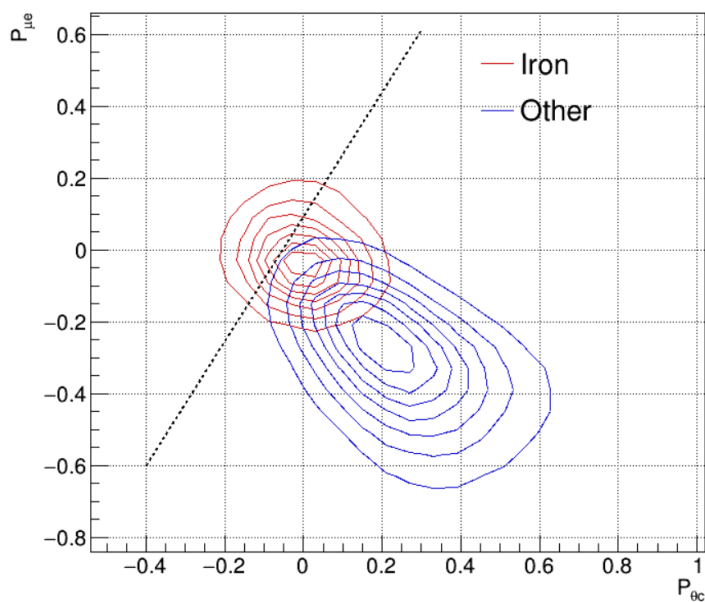
- 优化铁核挑选：根据LHAASO实验数据限制原初成分比例；结合新的变量提高铁核事例纯度
- 利用AI优化芯位重建，提高芯位分辨率
- 利用2023年至2026年的实验数据得到铁核能谱（100 TeV~5 PeV），与高能铁核能谱衔接

➤ 质子能谱

- 产生模拟事例
- 利用WFCTA+KM2A联合观测事例将测量能量延申到 50 PeV
- 利用KM2A单独观测数据测量 10 PeV~100 PeV 能谱

1 PeV以下铁核能谱：铁核挑选

$$P_{\text{combine}} = \cos(\delta) \cdot P_{\mu e} - \sin(\delta) \cdot P_{\theta c}, (\delta \text{ 选择不同值})$$

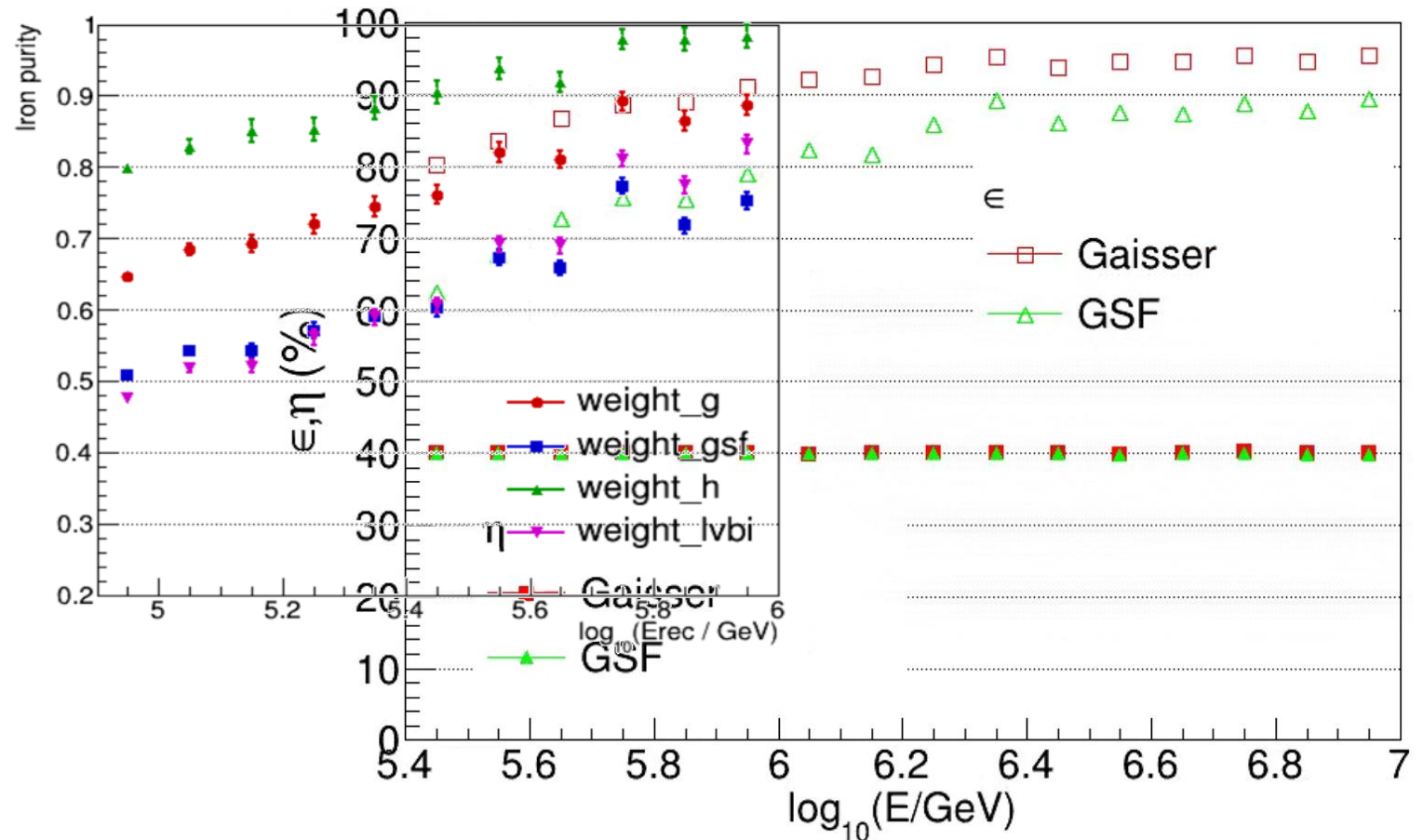


Status of Iron Spectrum Measurement by LHAASO

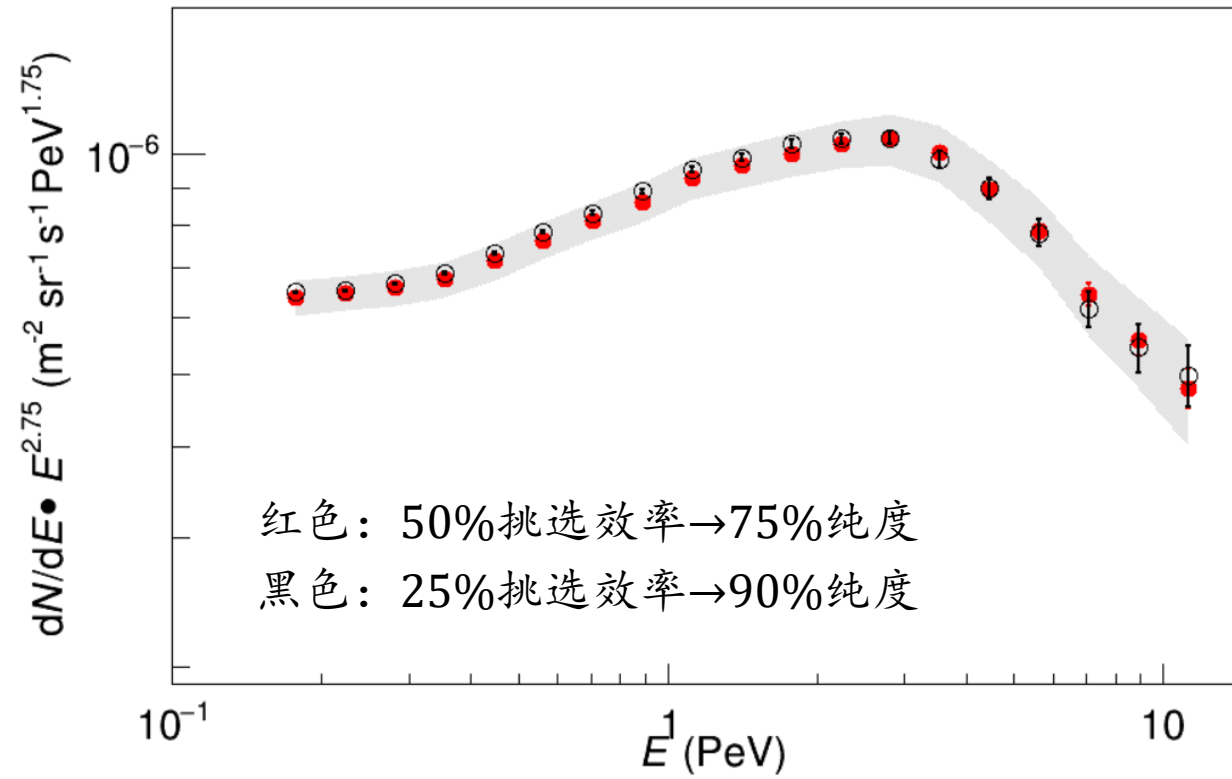
Energy reconstruction and component identification have been optimized for selecting iron.

➤ Iron Selection

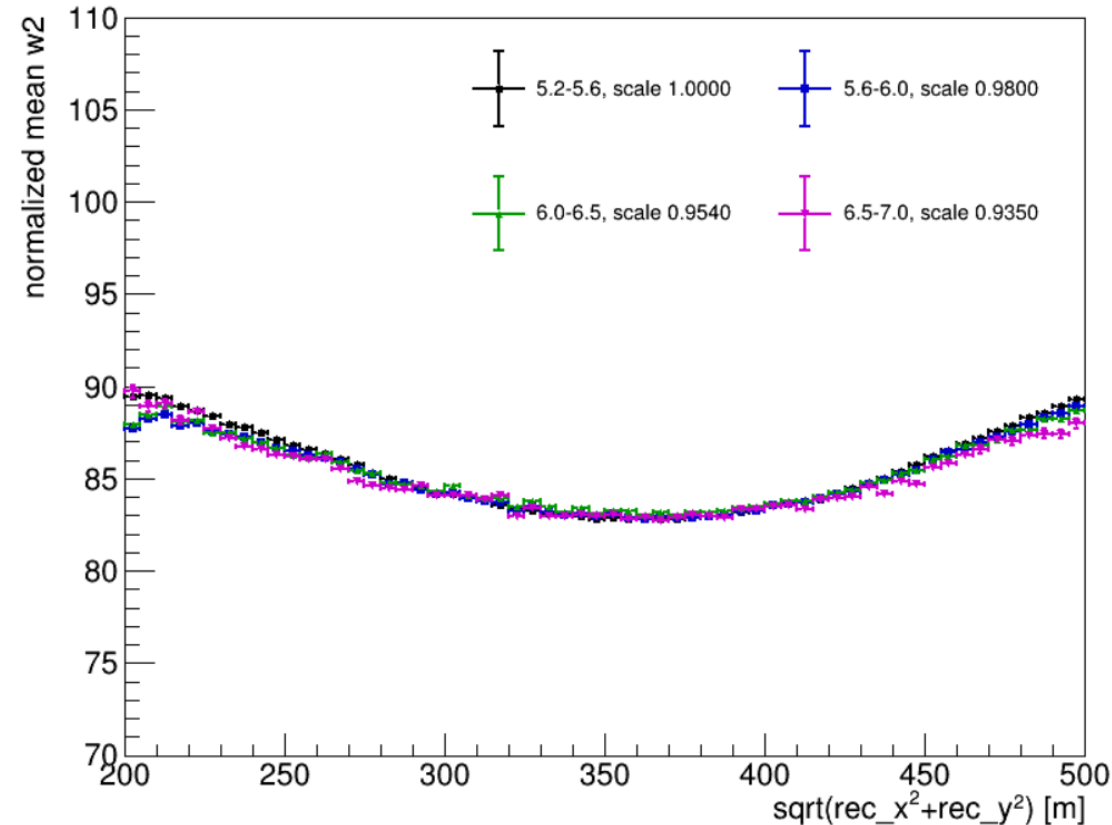
- WFCTA: θ_c (or $X_{\max}$)
- KM2A: N_e , N_μ , N_μ/N_e



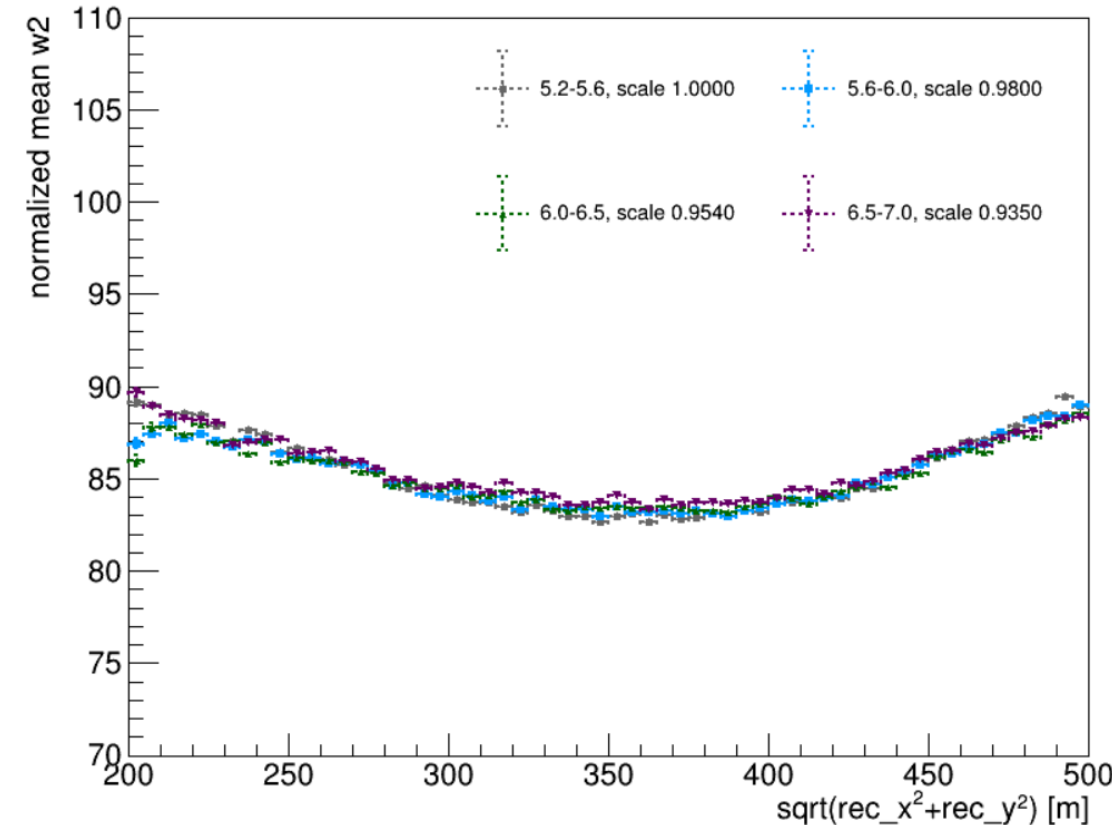
10 PeV以上质子能谱：能谱测量计划



Data: energy-normalized mean w2 versus core radius



MC GSF: energy-normalized mean w2 versus core radius



1 PeV以下铁核能谱：能量重建

