

利用DAMPE和LHAASO实验 联合测量百TeV附近质子能谱

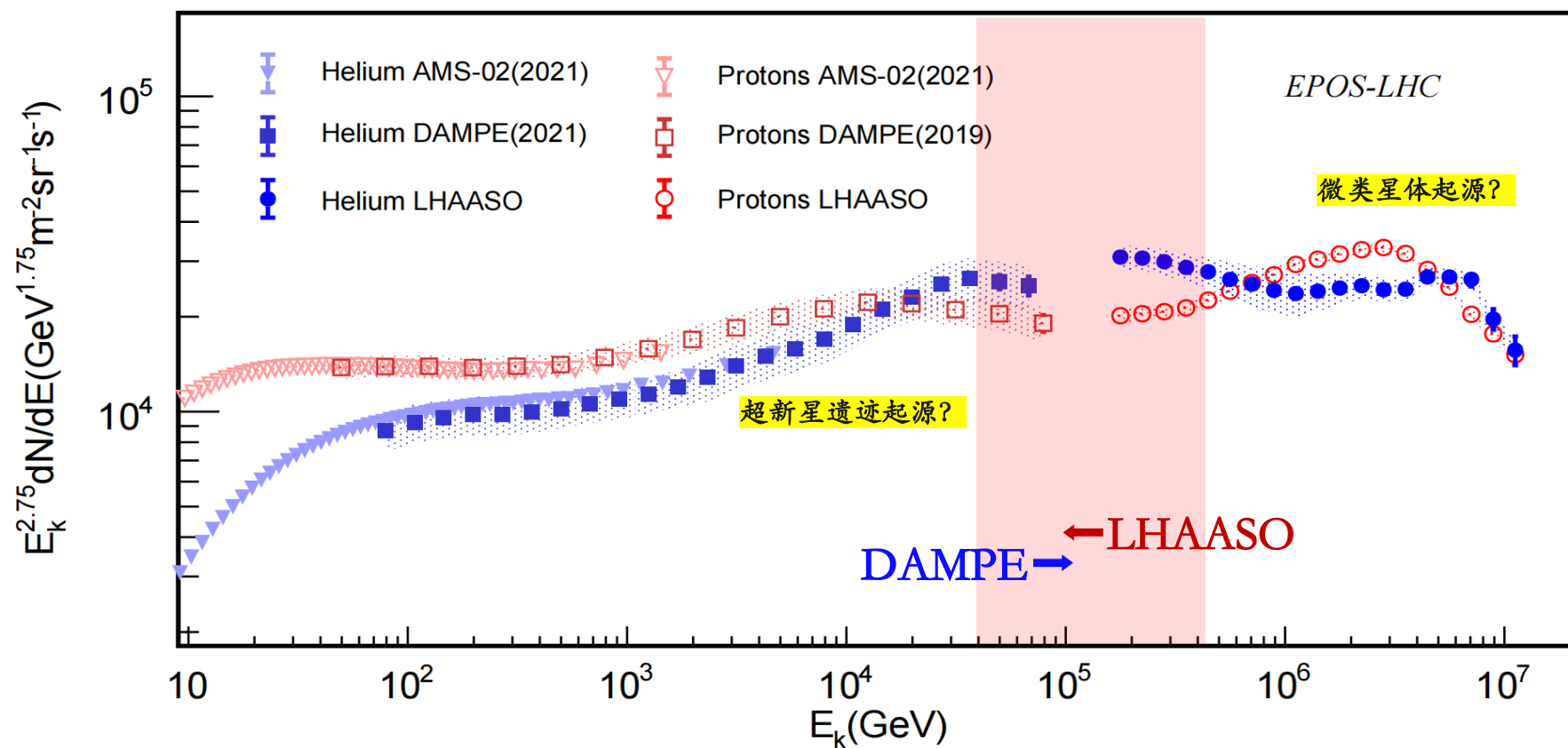
报告人：陈素弘（高能物理研究所）

2026 年 8 月 17 日

1. 研究动机
2. 能谱测量方法
3. 能谱结果及系统误差分析
4. 联合拟合质子能谱
5. 总结与展望

研究动机

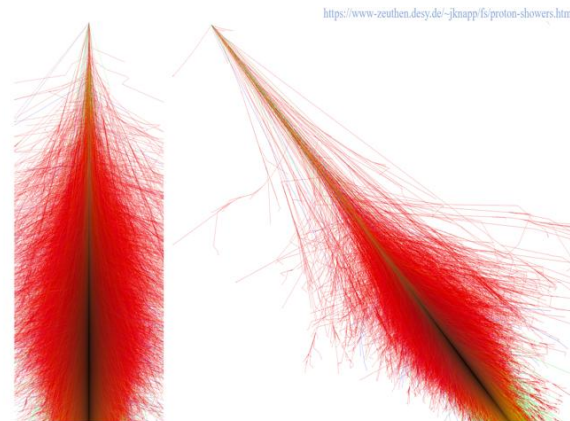
- 能谱结构是宇宙线起源、加速和传播的关键线索
- 约100 TeV：能谱硬化的关键过渡能区，尚未得到精确测量
- 目标：DAMPE – LHAASO形成可用于交叉标定的共同能区，交叉检验能标，确定硬化位置



8° 望远镜指向将质子观测阈能降至约50 TeV

➤ KM2A+WFCTA联合观测，降低观测阈能的阵列设置：

- 望远镜指向45°，LHAASO处大气深度 $\sim 850 \text{ g/cm}^2$ ，观测阈能为158 TeV。
- 望远镜指向8°，LHAASO处大气深度 $\sim 600 \text{ g/cm}^2$ ，观测阈能可降至50 TeV。



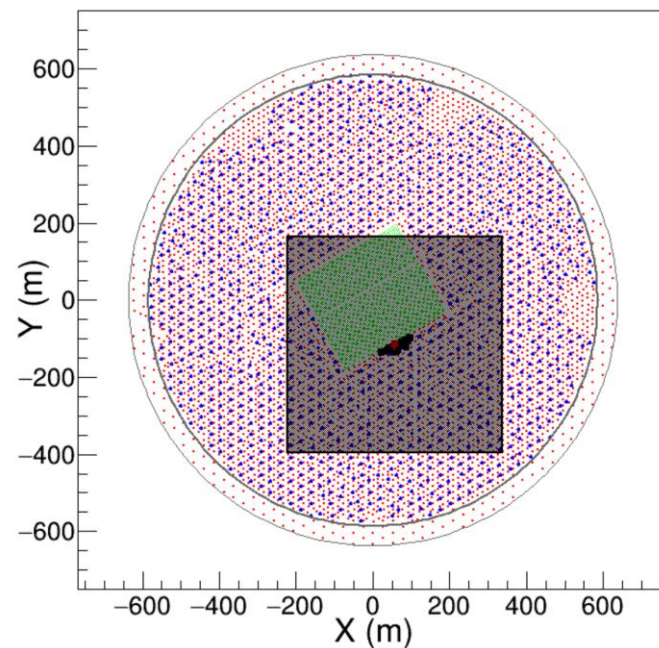
1 PeV, zenith=0°

1 PeV, zenith=45°

➤ 模拟数据介绍：

- 大气簇射模拟软件：CORSIKA 7.7410
- 投点方向：天顶角 $0^\circ \sim 20^\circ$ ，方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$
- 能量范围：10 TeV $\sim$ 10 PeV
- 粒子种类：Proton、Helium、CNO、MgAlSi、Iron
- 投点芯位： $\pm 280\text{m}$
- 强子相互作用模型：

EPOS-LHC, QGSJETII-04, SIBYLL2.3d + FLUKA



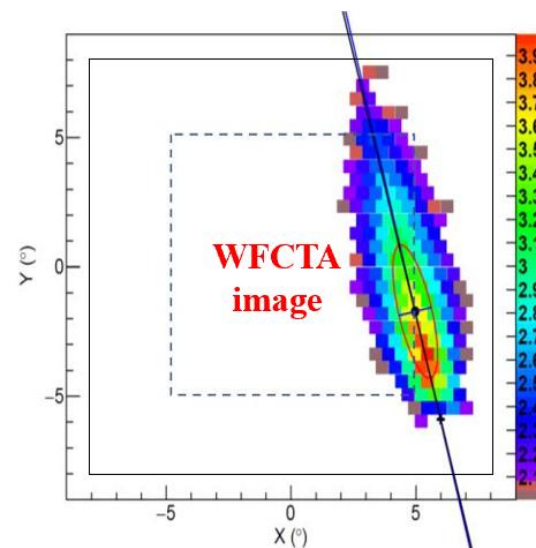
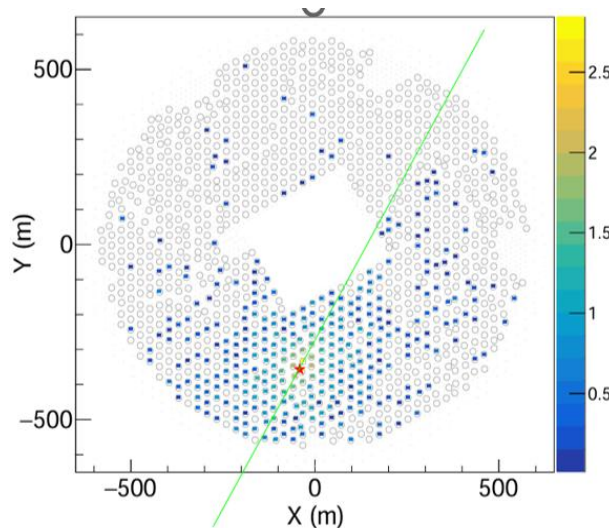
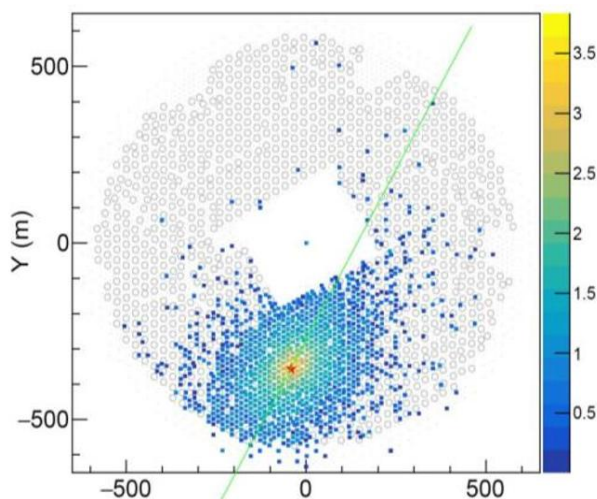
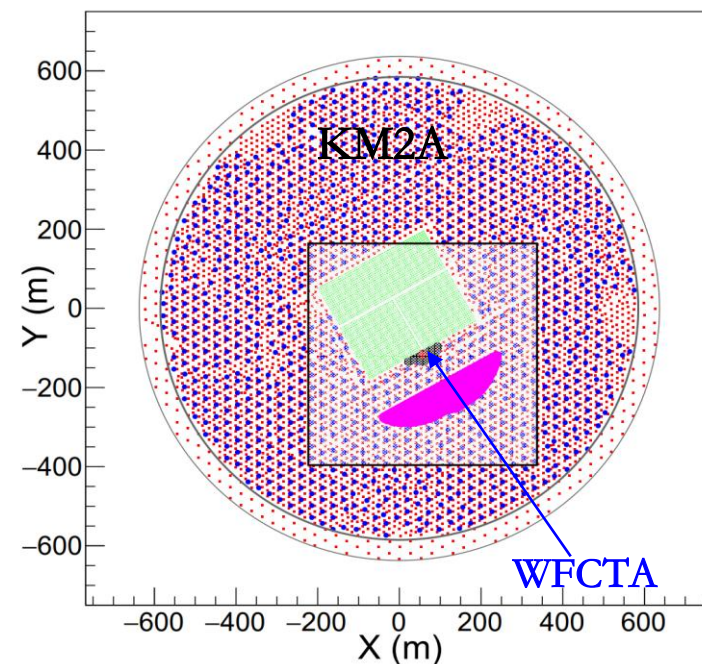
WFCTA & KM2A 联合观测宇宙线：数据质量筛选

➤ WFCTA：广角切利科夫成像望远镜

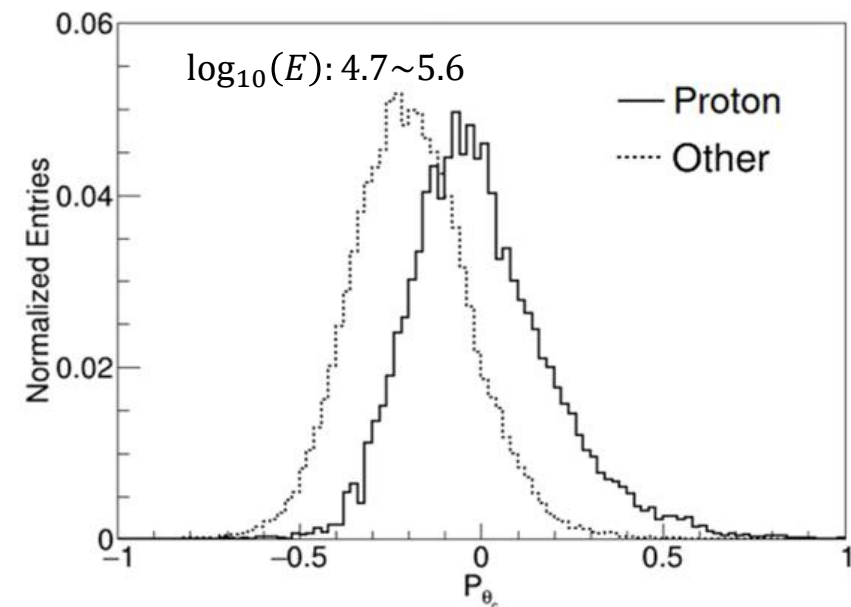
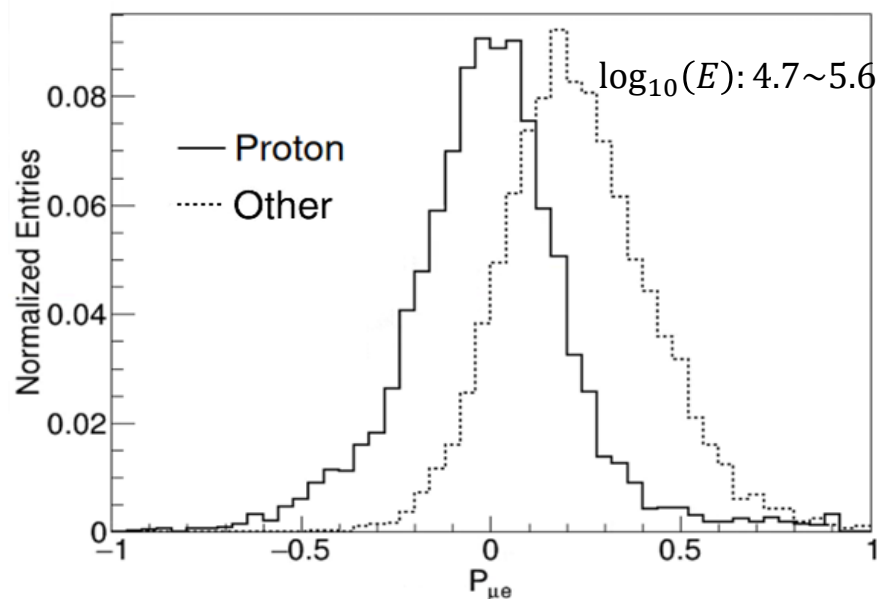
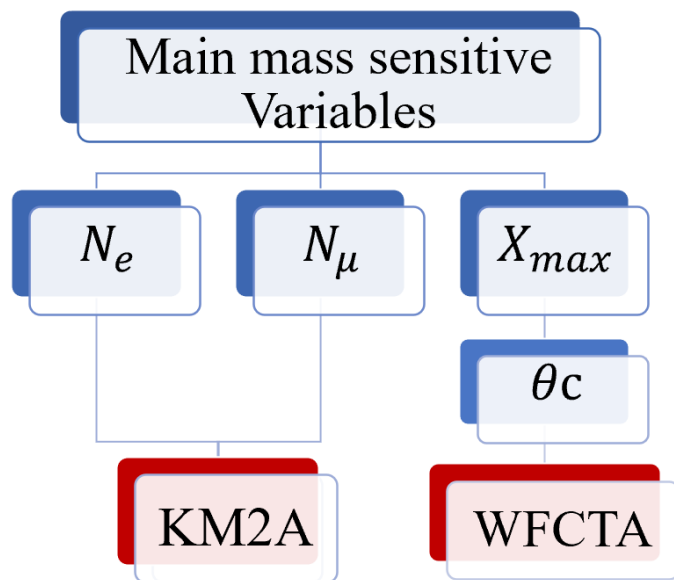
- 望远镜到簇射轴的垂直距离: $90m < R_p < 150m$
- 保证切伦科夫像的完整性: $|\text{MeanX}(Y)| < 5^\circ$
- 着火的SiPM个数: $N_{pix} \geq 3$

➤ KM2A：缪子探测器MD+电磁粒子探测器ED

- 重建芯位: 位于KM2A阵列中
- 距离芯位0-100m环带内电磁粒子数: $N_{pE1} > 30$



成分敏感参量



叠加模型:

$$N_u^A \propto A^{0.10} E^{0.85}; \quad N_e^A \propto A^{-0.05} E^{1.03}$$

$$X_{max}^A = X_{max}^p - \lambda_r \ln A$$

Modern Physics Letters A Vol. 22, No. 21 (2007) 1533-1551

$$P_{\mu e} = \log_{10} \frac{N_{\mu}}{N_e^{0.82}} + 0.81$$

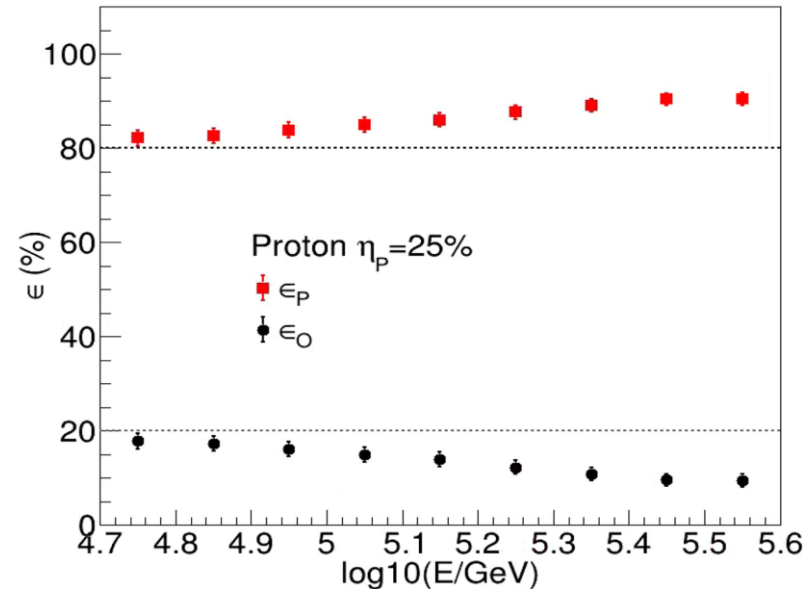
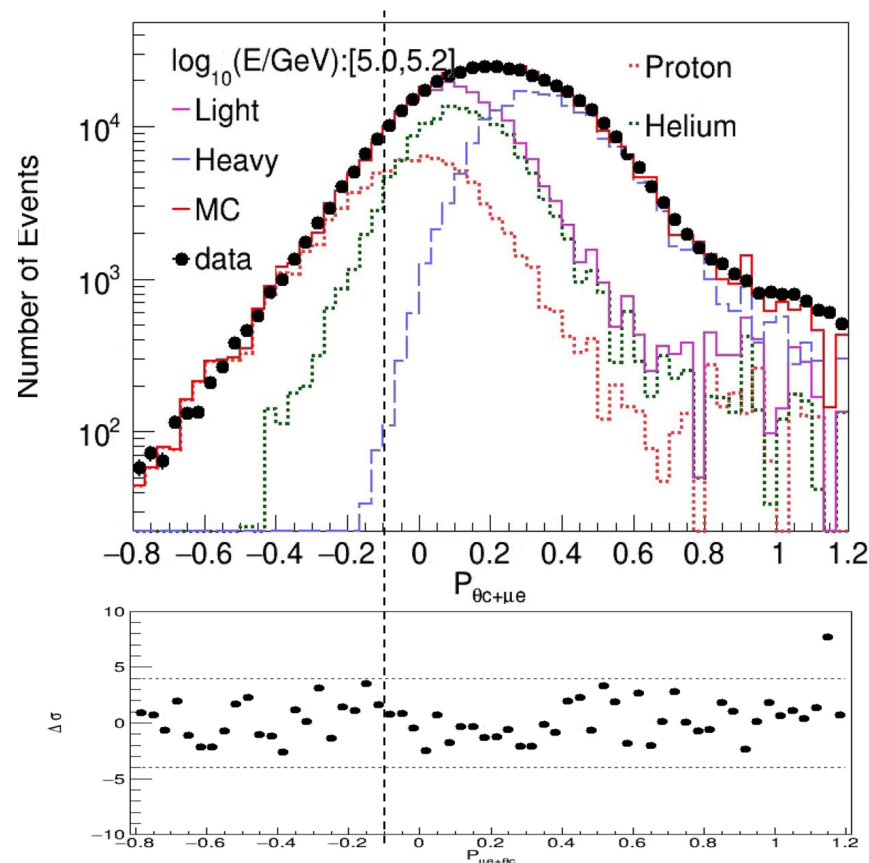
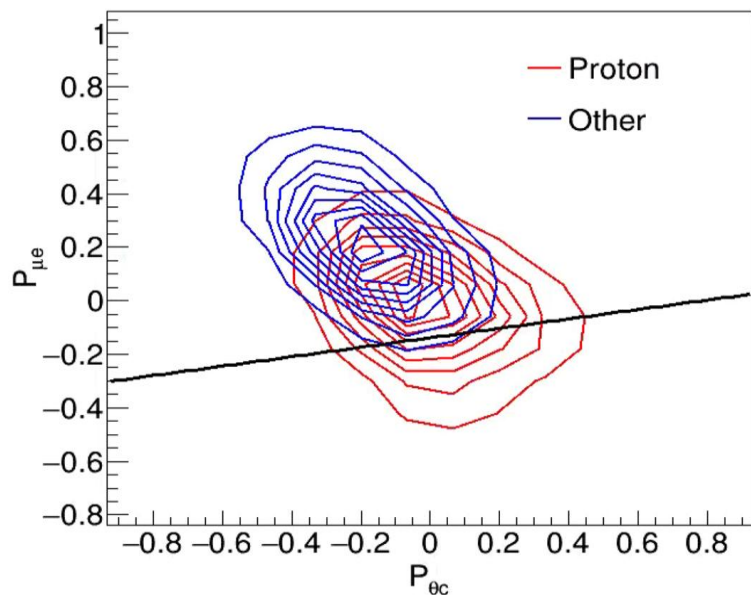
- N_{μ} : 40~300 m
- N_e : 20~100 m

$$P_{\theta c} = \frac{\theta_c^{130} - \langle \theta_c^{130} \rangle}{\langle \theta_c^{130} \rangle |_{100 \text{ TeV}}}$$

- 归一化至 $R_p=130\text{m}$ 处: θ_c^{130}
- 归一化至 100TeV 处: $\langle \theta_c^{130} \rangle$

- N_{μ} 、 N_e 、 X_{max} 同时和 A, E 相关;
- 构造成分鉴别变量时尽量消除变量与能量的关系

质子样本筛选



➤ 挑选变量: $P_{\theta c+\mu e} = -\sin(\delta) \cdot P_{\theta c} + \cos(\delta) \cdot P_{\mu e}$ ($\delta = 10^\circ$)

➤ 挑选效率 ($\eta_P = \frac{N_{select}^{proton}}{N_{all}^{proton}}$): 25%。

➤ 纯度 ($\epsilon_P = \frac{N_{select}^{proton}}{N_{select}^{proton} + N_{select}^{other}}$): 平均纯度约86%，样本中污染主要来自氦核。

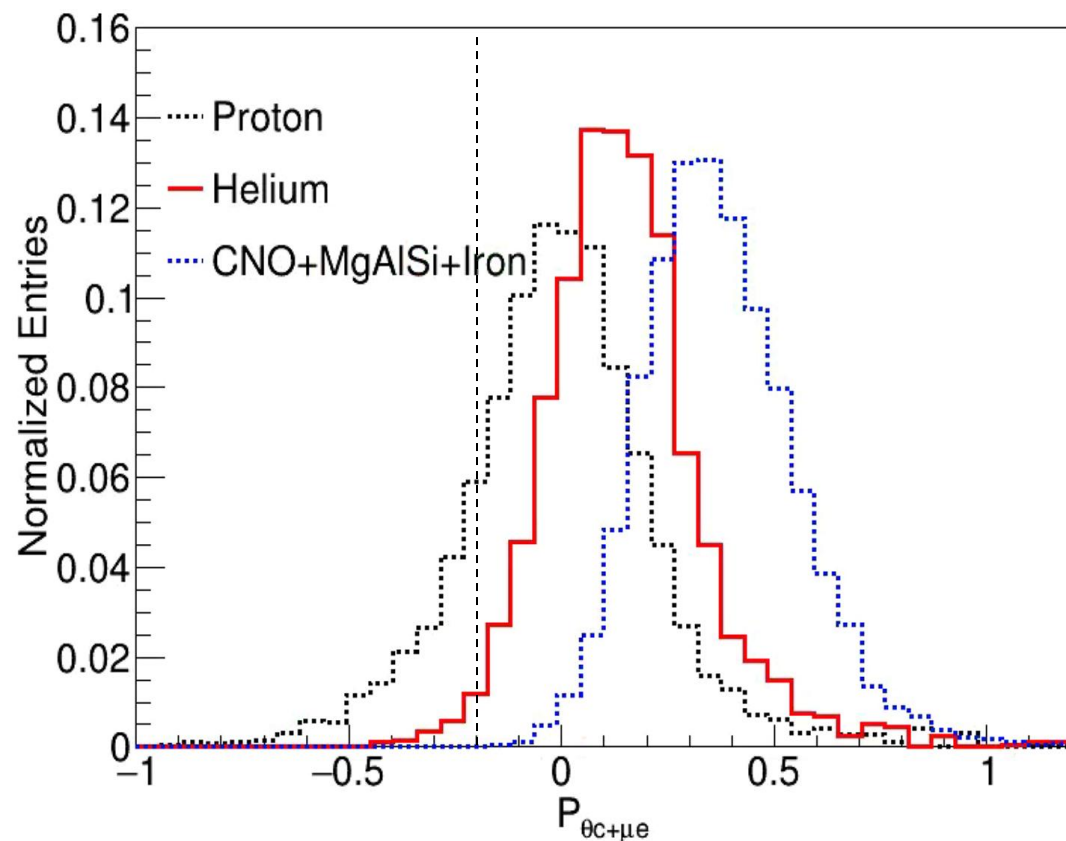
氦核能谱提取方法

💡 氦核与质子分布高度重叠，难以直接筛选纯氦样本。

➤ 采用**相减法**提取氦核能谱：

$$\Phi_{He} = \Phi_{Light} - \Phi_{Proton}。$$

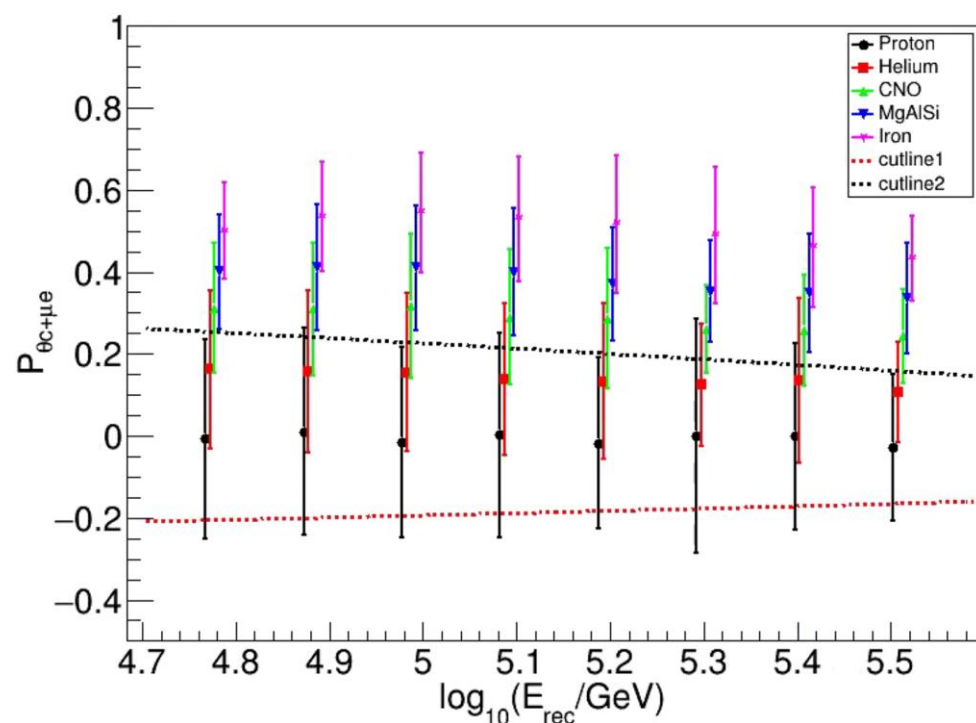
- 轻成分分析沿用质子能谱的数据集与能量重建公式，保证能标一致。
- **关键问题：**单边切选对质子和氦核的选择效率不同，使筛选前后 p/He 比例发生变化。因此，轻成分的效率与纯度修正依赖于成分比例；当MC假设与真实数据不一致时，轻成分流强产生偏差，并进一步影响氦核能谱的相减提取。



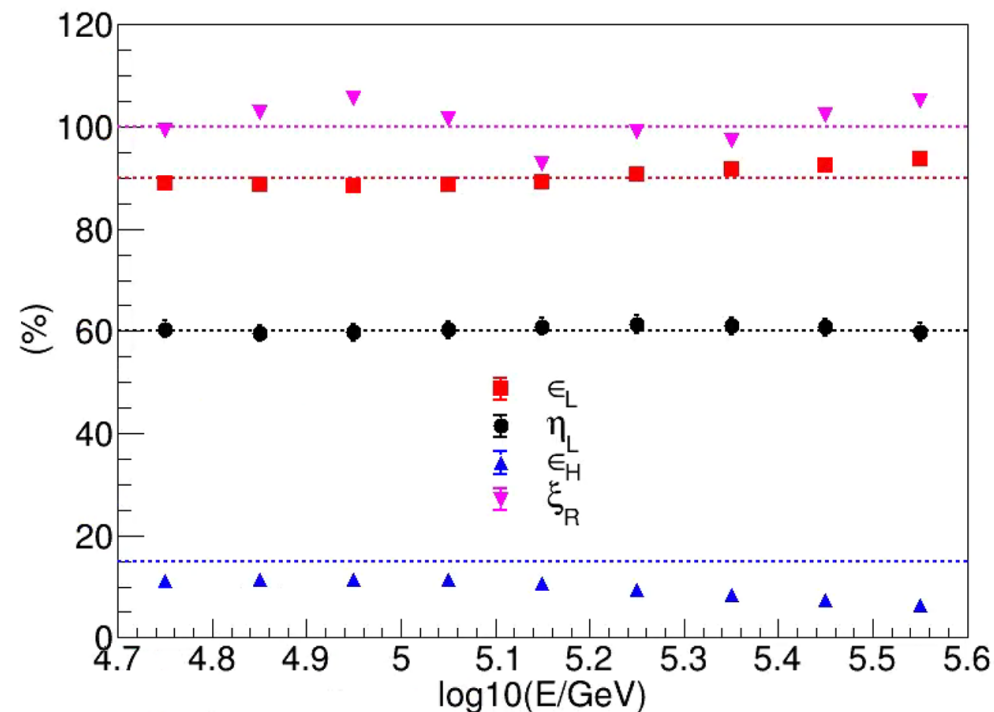
需要使质子氦核挑选效率相等，即筛选前后 p/He 比保持不变——本工作采用双边切选。

轻成分样本（质子+氦核） 筛选

- 相减法提取氦谱的前提：p/He在筛选前后保持不变。
- 采用双边切选（dual-cut），使质子与氦核的挑选效率基本一致，避免单边切选造成的 p/He 比例变化。



- 挑选前后p/He的比值: $\xi_R = \frac{p/\text{He}(\text{after})}{p/\text{He}(\text{before})} \sim 1$



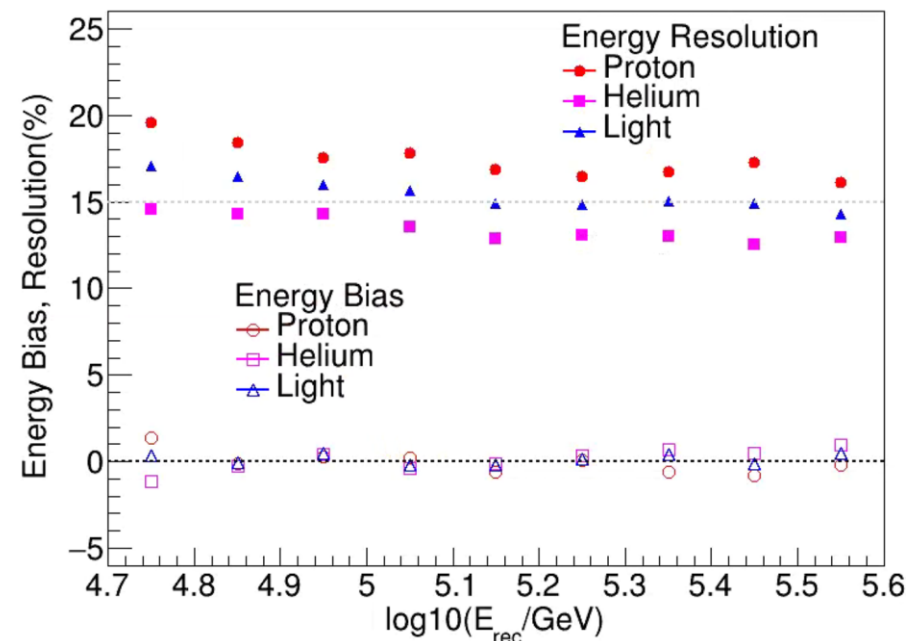
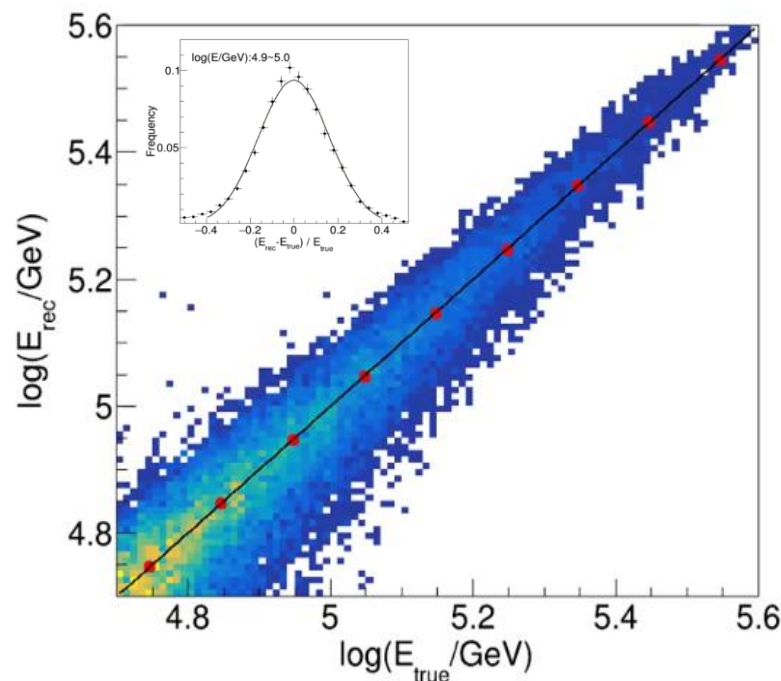
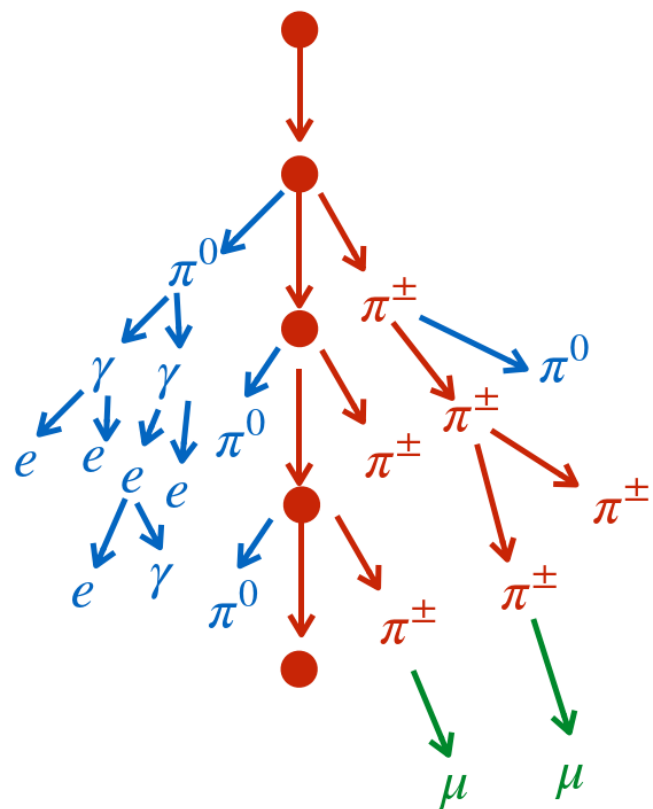
- 轻成分样本挑选效率：60%。
- 轻成分样本纯度：均值约90%。
- 样本主要污染来自CNO。

能量重建

➤ 簇射总能量由电磁分量和强子分量组成: $E_0 = E_{em} + E_h$

- 电磁分量(E_{em}): 通过WFCTA切伦科夫光子数 N_{ph} 或KM2A电磁粒子数 N_e 测量;
- 强子分量(E_h): 通过缪子数 N_μ 间接重建, 缪子来自带电 π 介子衰变。
- 联合重建: $N_{c\mu} = N_{ph} + CN_\mu$ *Phys. Rev. D 106, 123028 (2022).*

宇宙线质子, 氦核...

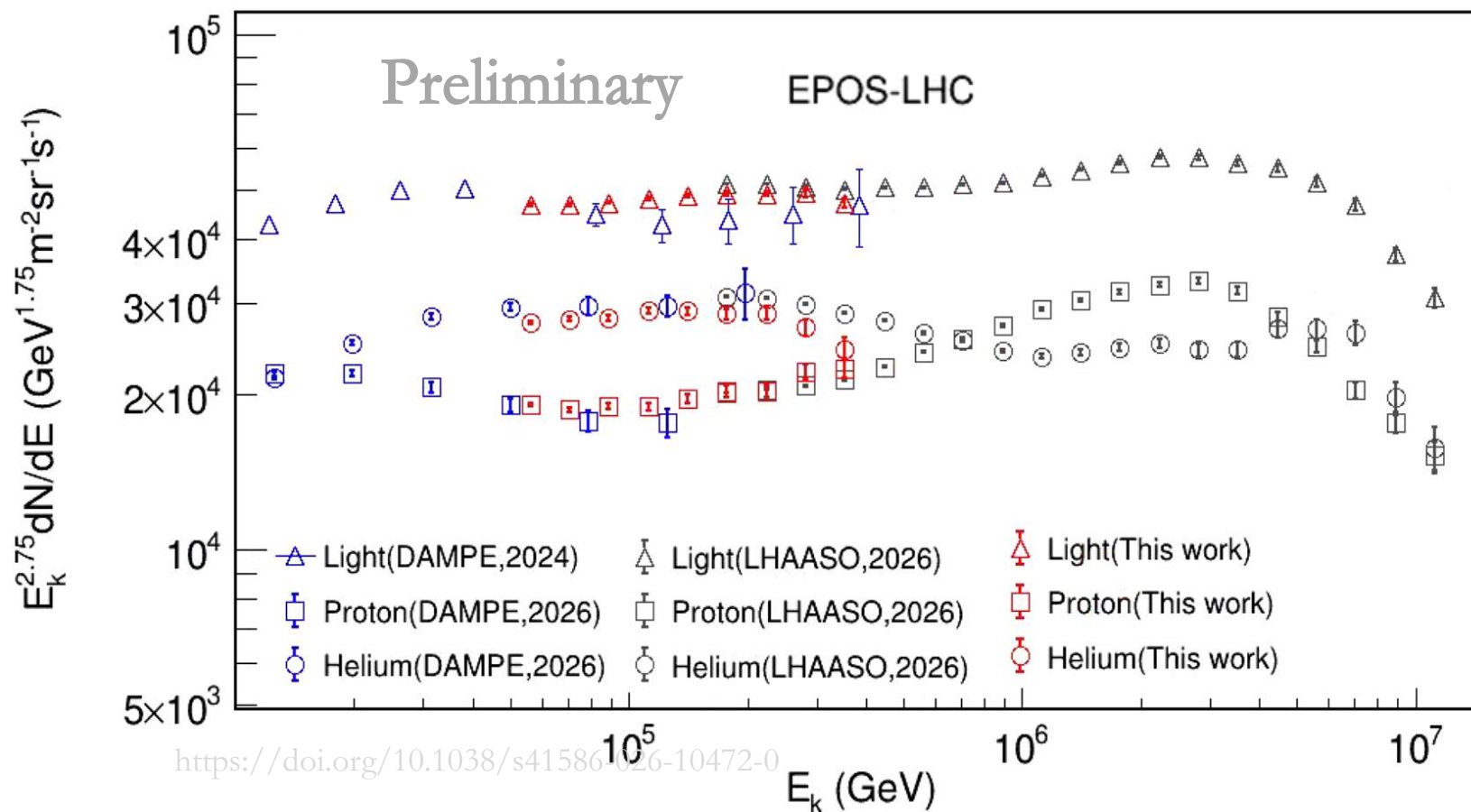


- 能量分辨率: 质子 < 20%, 轻成分 < 17%
- 能量偏差: 质子和轻成分均 < 2%

轻成分、质子和氦核能谱

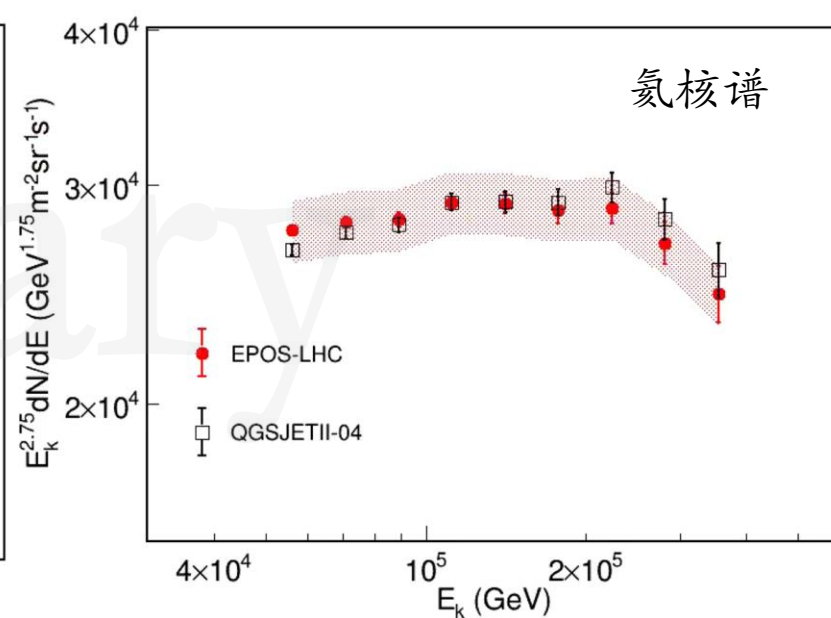
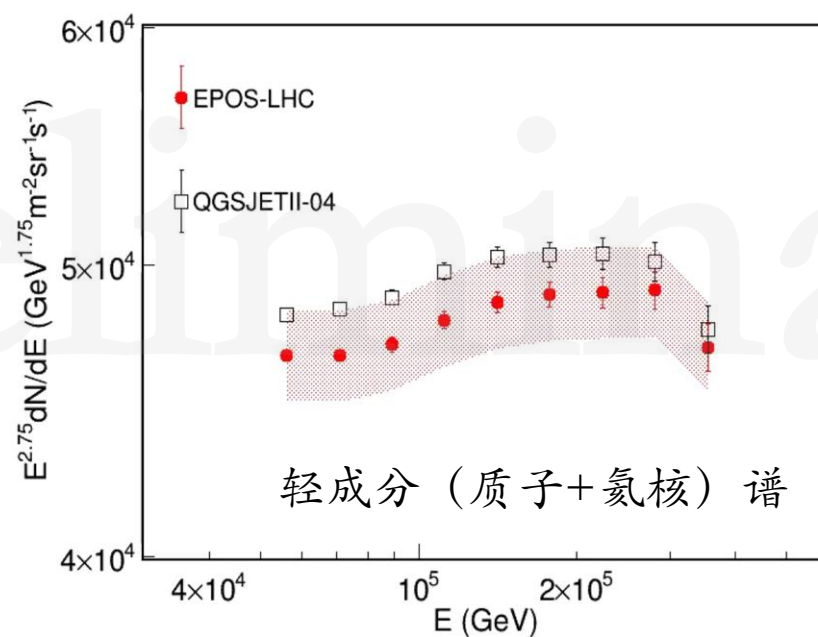
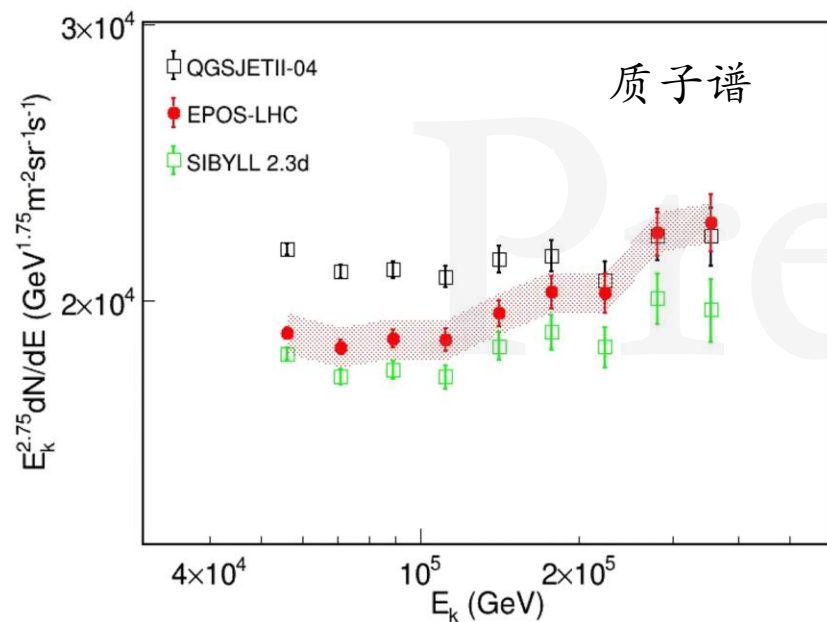
$$F(E) = \frac{\Delta N_{sel}(E) \cdot \epsilon_P}{\Delta E \cdot A_{eff} \cdot T \cdot \eta_P}$$

- 实验数据：2023.10~2025.4
- 有效观测时间：~1600 小时
- 有效孔径：~1500 $m^2 sr$



测量了50-400TeV的轻成分，质子能谱，提取了氦核能谱

系统误差分析



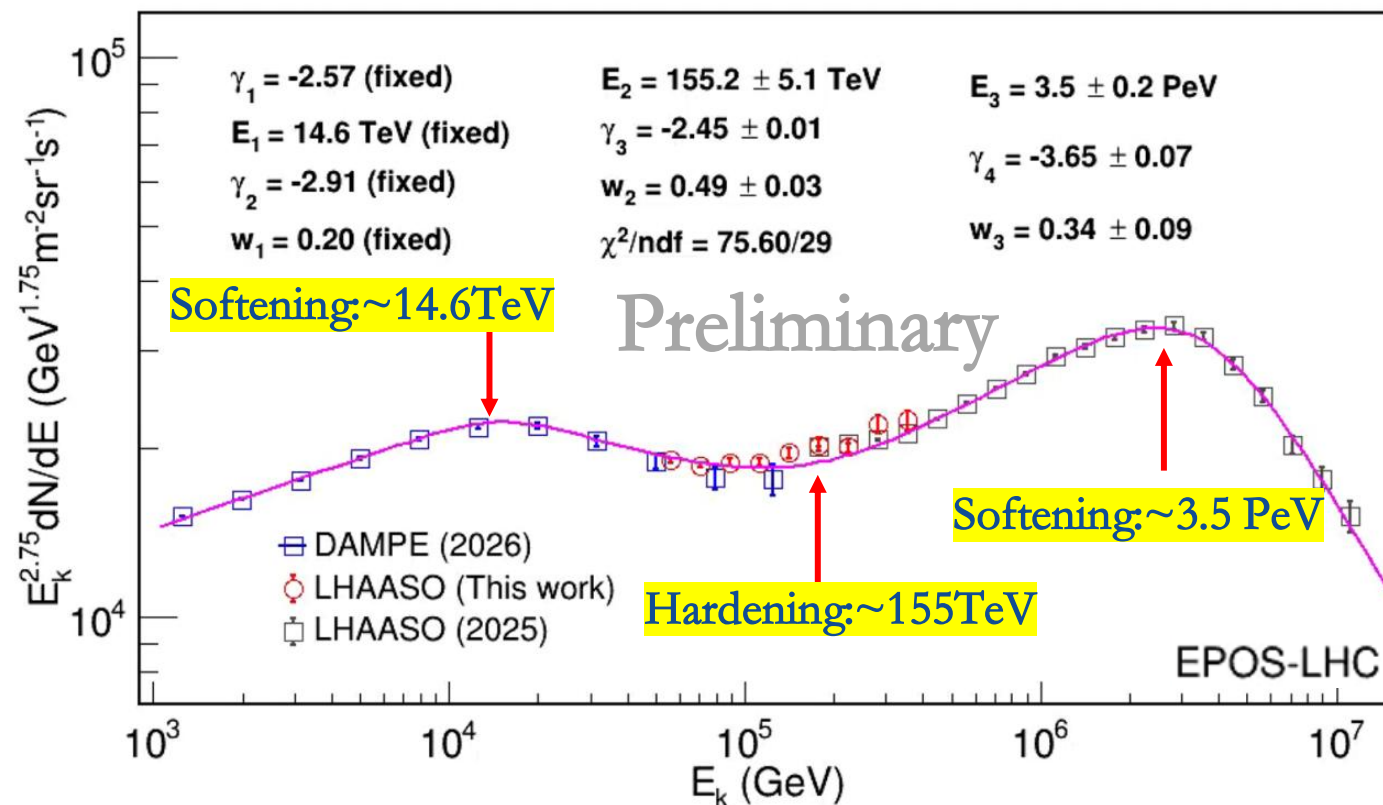
误差来源	质子能谱误差	轻成分能谱误差	氦核能谱误差
成分模型	$\lesssim 0.5\%$	$\lesssim 3\%$	$\lesssim 5\%$
质子挑选效率	$\lesssim 1.5\%$	$\lesssim 1.1\%$	$\lesssim 2\%$
气压	$< 2\%$	$< 0.6\%$	$< 1\%$
绝对湿度	$< 1.5\%$	$< 1. \%$	$< 2\%$
强子相互作用模型	$\lesssim 13\%$	$\lesssim 4\%$	$\lesssim 5\%$

质子能谱联合拟合

联合拟合质子能谱公式(4SBPL):
$$F_0 \left(\frac{E}{100 \text{ TeV}} \right)^{\gamma_1} \left[1 + \left(\frac{E}{E_1} \right)^{\frac{1}{w_1}} \right]^{(\gamma_2 - \gamma_1)w_1} \left[1 + \left(\frac{E}{E_2} \right)^{\frac{1}{w_2}} \right]^{(\gamma_3 - \gamma_2)w_2} \left[1 + \left(\frac{E}{E_3} \right)^{\frac{1}{w_3}} \right]^{(\gamma_4 - \gamma_3)w_3}$$

低能软化参数固定为DAMPE
已发表结果。

<https://doi.org/10.1038/s41586-026-10472-0>



- 硬化位置: $155.2 \pm 5.1 \text{ TeV}$, 谱指数由 -2.91 变化为 -2.45 ;
- LHAASO质子能谱流量比DAMPE高约4%, 对应约1.5%的能标差异;
- 约160 TeV附近存在疑似精细结构, 需要增加统计量并结合系统误差进一步检验。

总结与展望

总结:

- LHAASO实现了 50 – 400 TeV 质子和氦核能谱的精确测量。
- 基于 EPOS-FLUKA 模型, LHAASO与DAMPE质子谱的流量差异约为 4%, 约 1.5% 的能量尺度差异。
- LHAASO与DAMPE联合拟合将质子能谱硬化特征定位在约 155 TeV。

在研与工作计划:

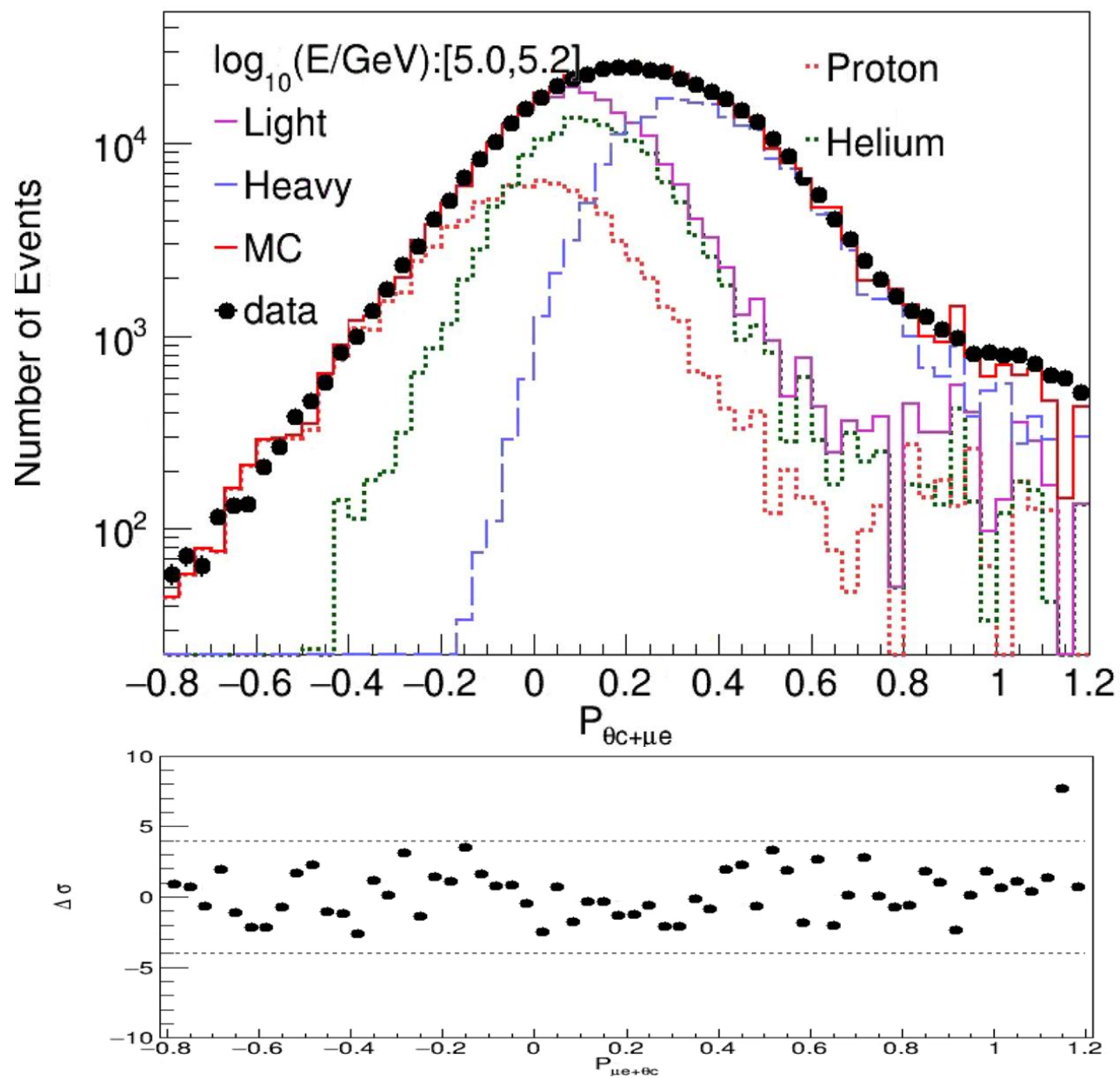
- 开展LHAASO – DAMPE的QGSJET-FLUKA能谱对比; 结合DAMPE新电荷标定能谱(预计9月发布), 更新LHAASO – DAMPE跨实验比较与联合拟合。
- 扩大 R_p 接受范围, 提高高能区统计量, 精细检验约160 TeV附近的疑似能谱结构。
- 发现地磁场引起的方位角调制现象, 研究修正方法, 降低能谱测量的相关系统误差。



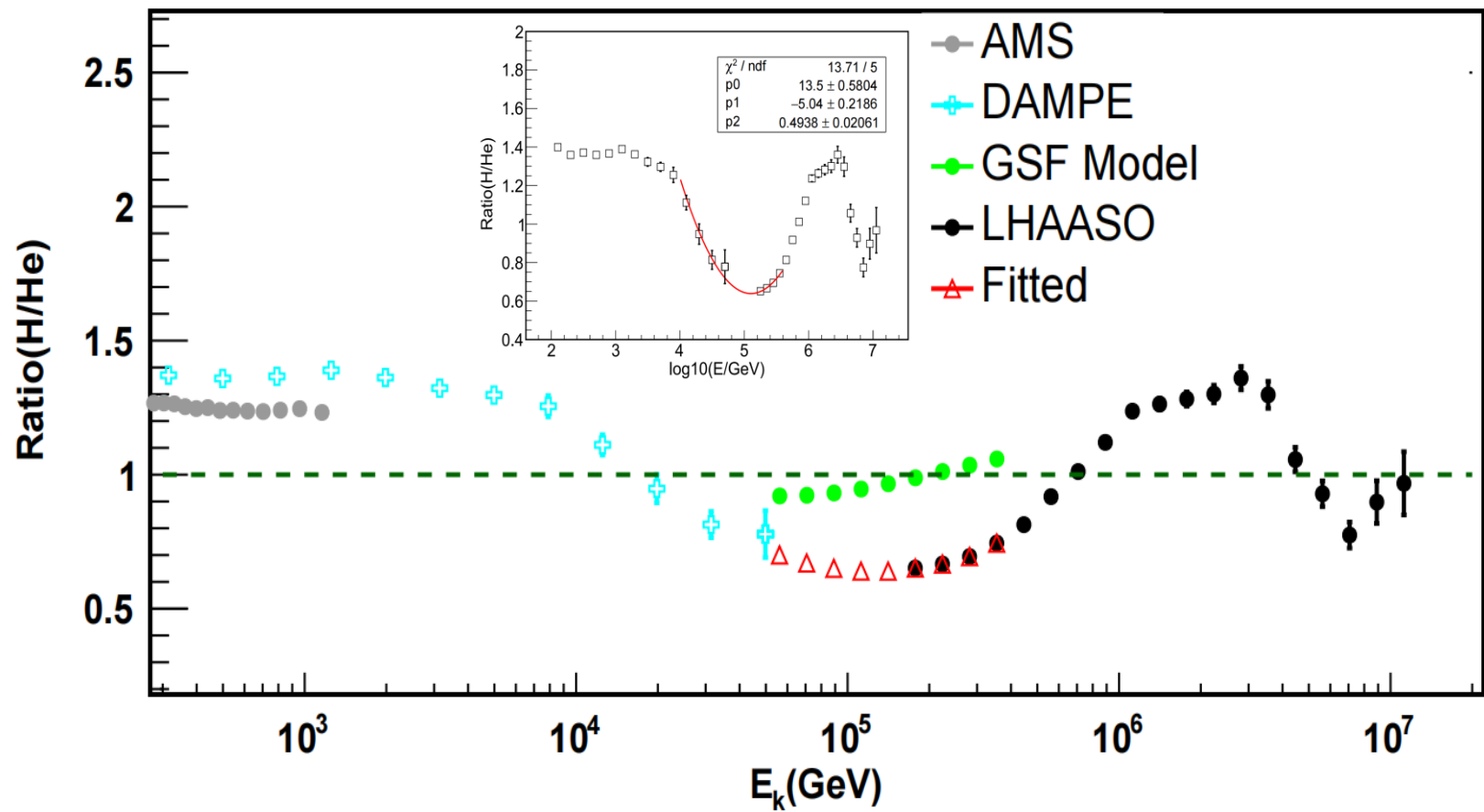
谢谢！

chensh@ihep.ac.cn

Back up



$$n_{\sigma,i} = \frac{F_{\text{data},i} - F_{\text{MC},i}}{\sigma_{\text{data},i}^2 + \sigma_{\text{MC},i}^2}$$



测量的P/He比值代替成分模型假设的P/He，减少成分模型引入的系统误差

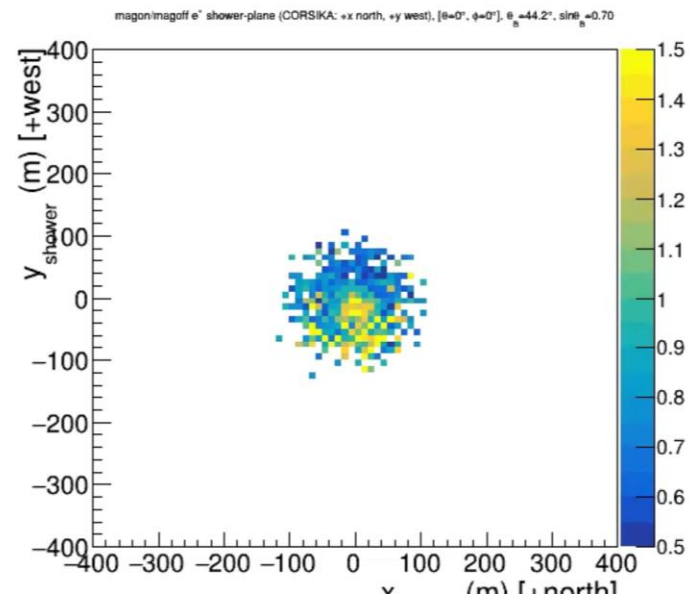
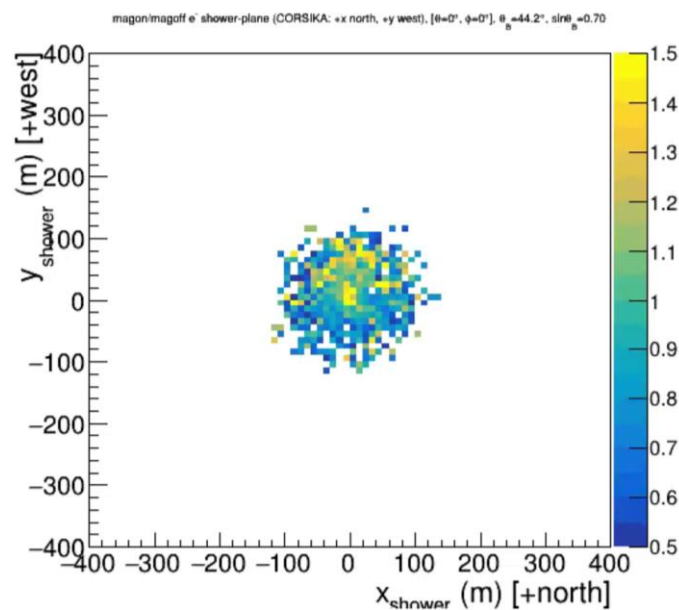
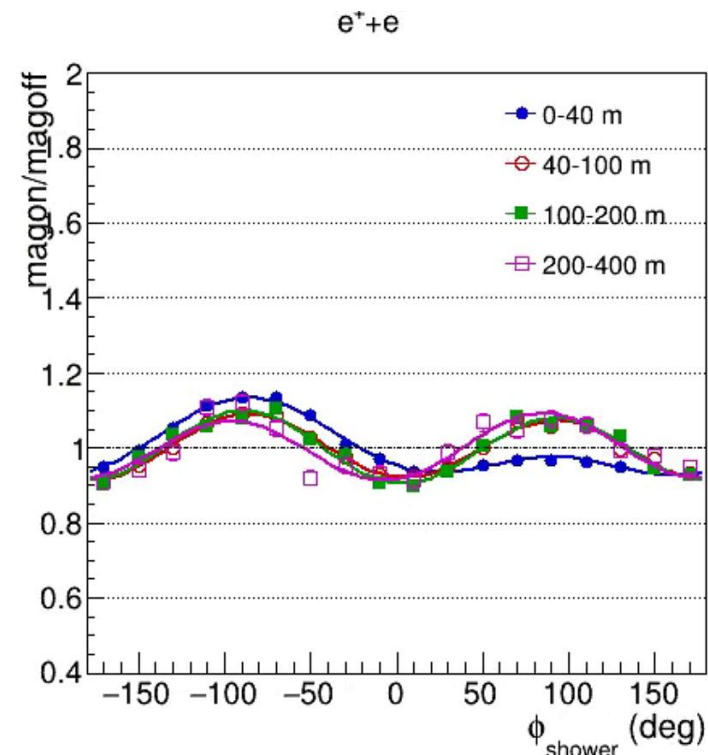
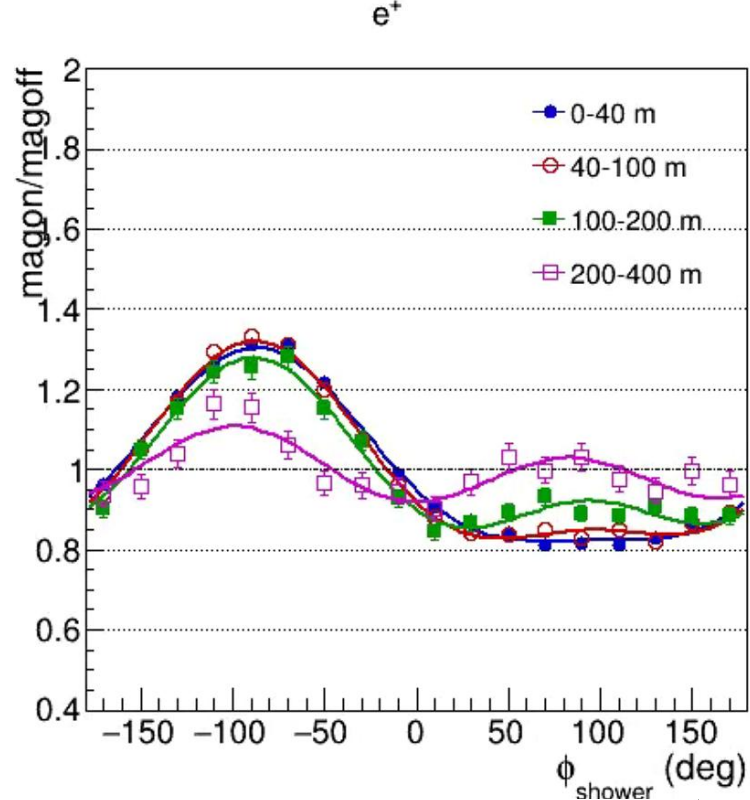
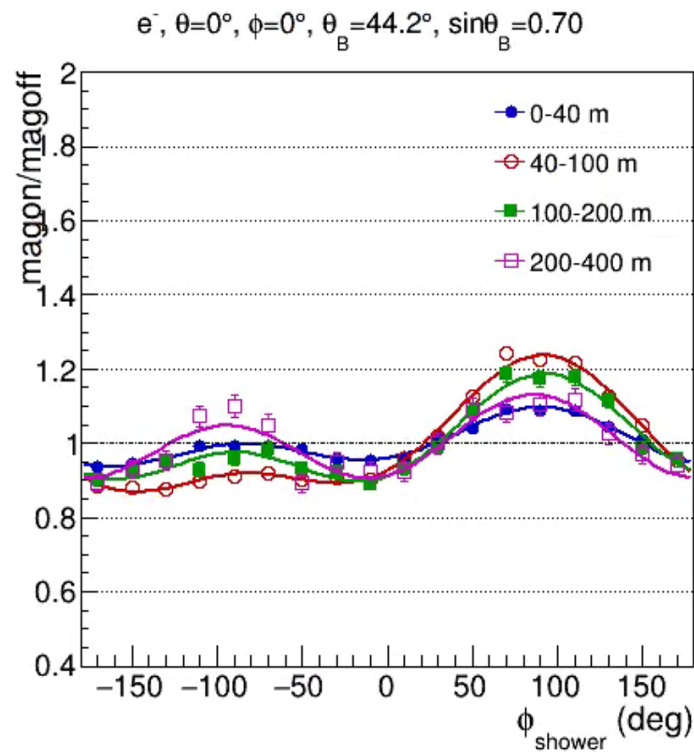
$$\begin{aligned}
& [\Phi(E) \propto E^{-\gamma}] \\
& \left[\frac{\Delta\Phi}{\Phi} \simeq \gamma \frac{\Delta E}{E} \right] \\
& \left[\frac{\Delta\Phi}{\Phi} \simeq 4\% \right] \\
& [\gamma_{\text{local}} \simeq 2.45 - 2.91] \\
& \left[\frac{\Delta E}{E} \simeq \frac{4\%}{\gamma_{\text{local}}} \simeq 1.4\% - 1.6\% \right] \\
& \left[\frac{\Delta E}{E} \sim 1.5\% \right]
\end{aligned}$$

$$\epsilon_p = \frac{N_{p,\text{sel}}}{N_{p,\text{true}}}, \quad \epsilon_{\text{He}} = \frac{N_{\text{He},\text{sel}}}{N_{\text{He},\text{true}}}$$

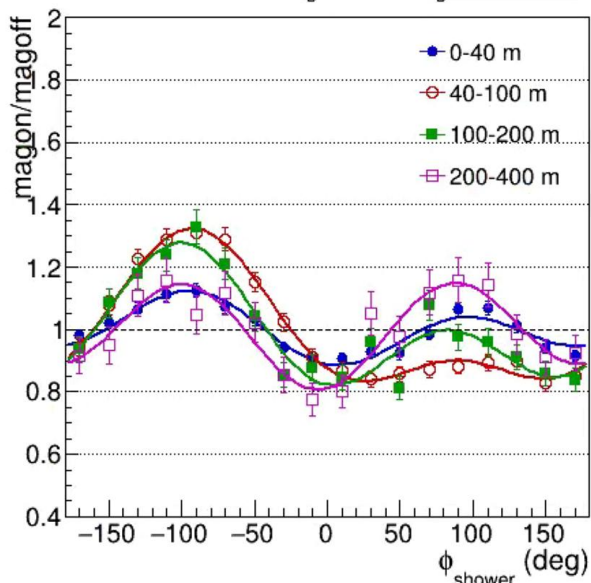
$$\epsilon_{\text{L}} = \frac{\epsilon_p N_{p,\text{true}} + \epsilon_{\text{He}} N_{\text{He},\text{true}}}{N_{p,\text{true}} + N_{\text{He},\text{true}}}$$

$$\frac{(p/\text{He})_{\text{after}}}{(p/\text{He})_{\text{before}}} = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_{\text{He}}}$$

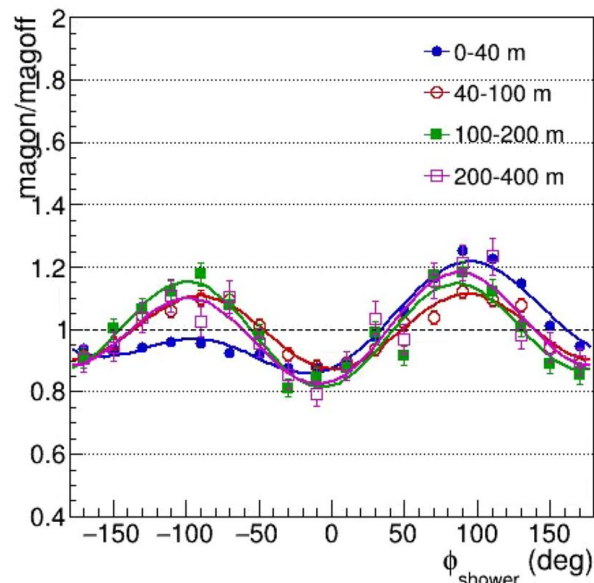
$$\epsilon_p = \epsilon_{\text{He}} \iff (p/\text{He})_{\text{after}} = (p/\text{He})_{\text{before}}$$



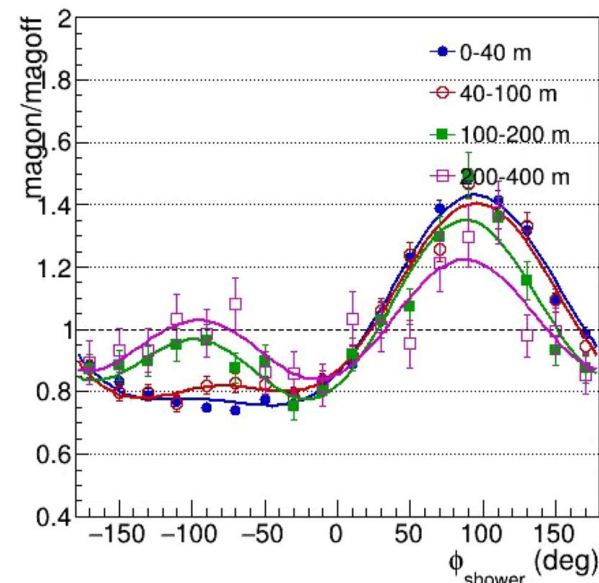
e^- , $\theta=20^\circ$, $\phi=180^\circ$, $\theta_B=64.2^\circ$, $\sin\theta_B=0.90$



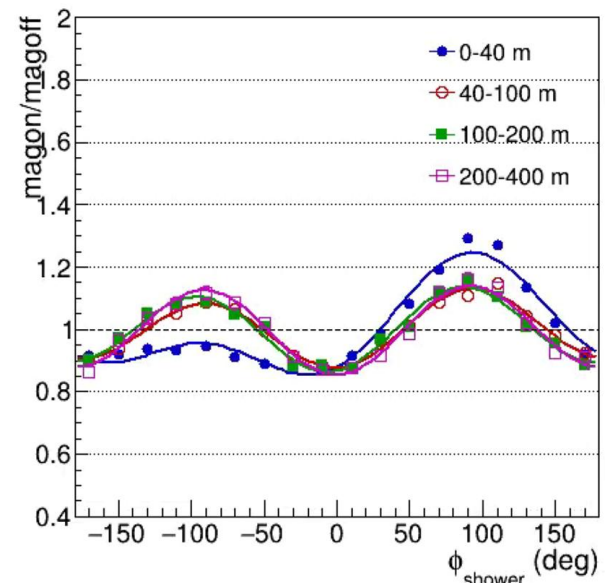
e^+e^-



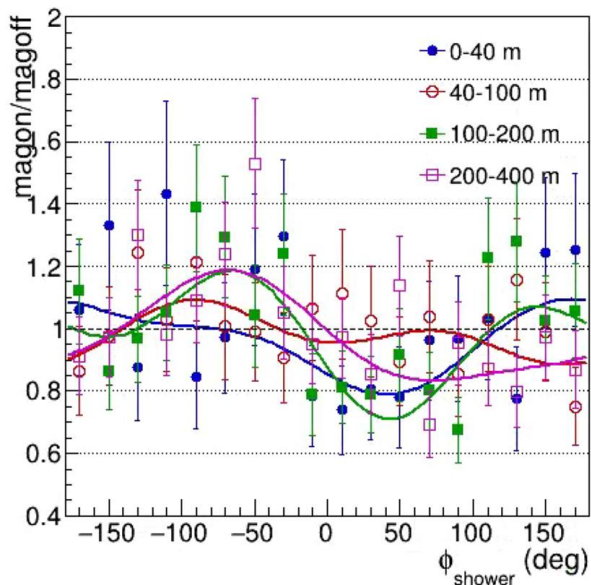
e^+



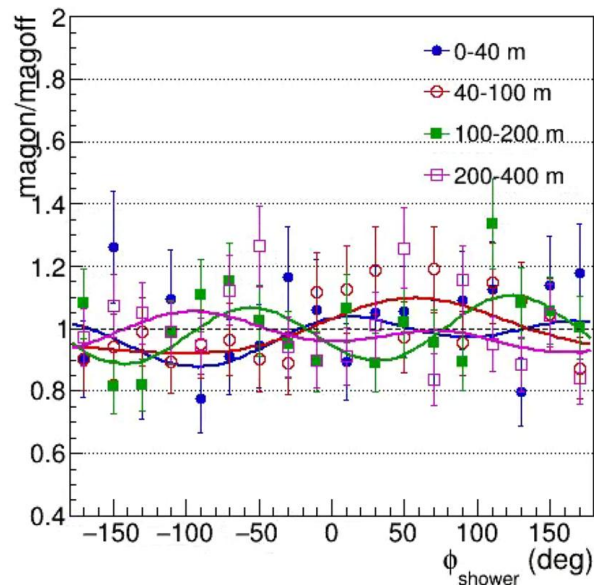
γ



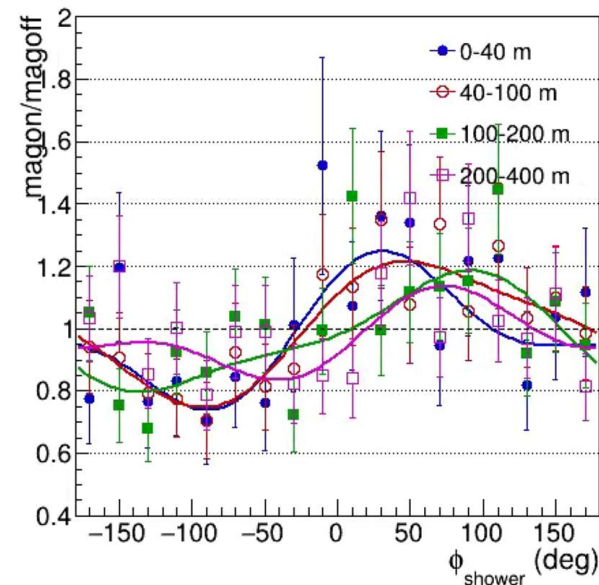
μ^-



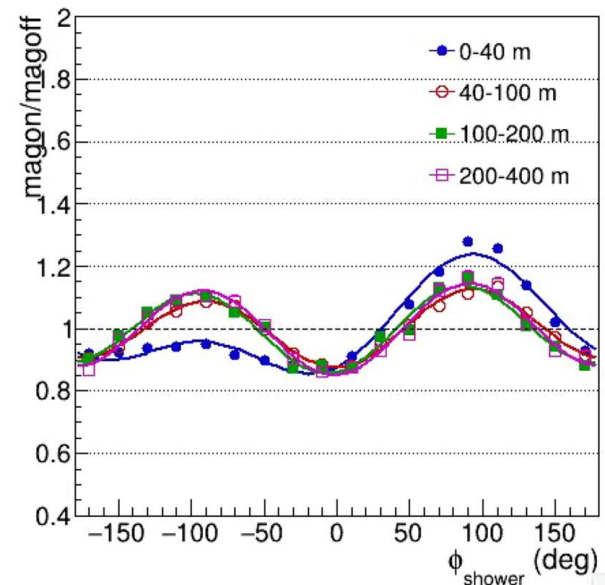
$\mu^+\mu^-$



μ^+



$e^+e^-\gamma$



能量区间 log(E/GeV)	质子事例数/个	轻成分事例数/个
4.7-4.8	13791	71673
4.8-4.9	8960	49259
4.9-5.0	6059	33356
5.0-5.1	3982	22920
5.1-5.2	2714	15278
5.2-5.3	1783	10277
5.3-5.4	1269	6906
5.4-5.5	825	4620
5.5-5.6	572	2929

