

宇宙线次级muon分布的研究

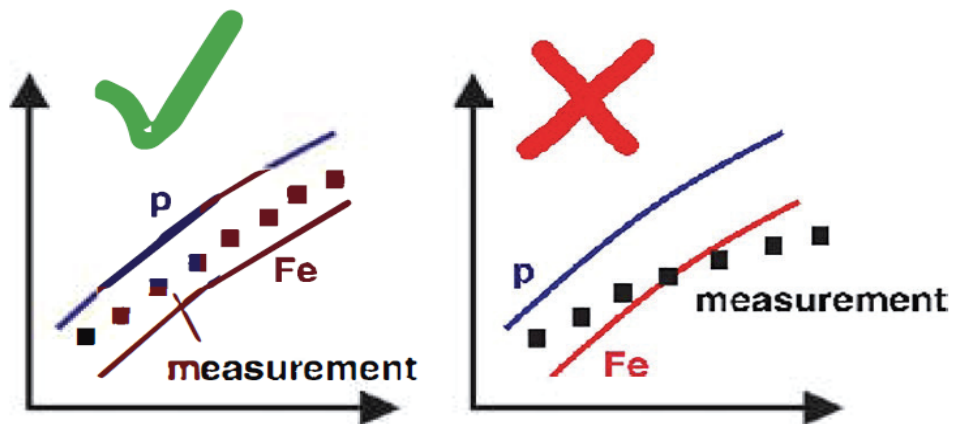
张恒英 李骢 冯存峰
山东大学 高能所





- 01 研究次级muon分布的动机
- 02 71ED10MD 模拟和实验的初步结果
- 03 四分之一阵列模拟的初步结果
- 04 总结和展望

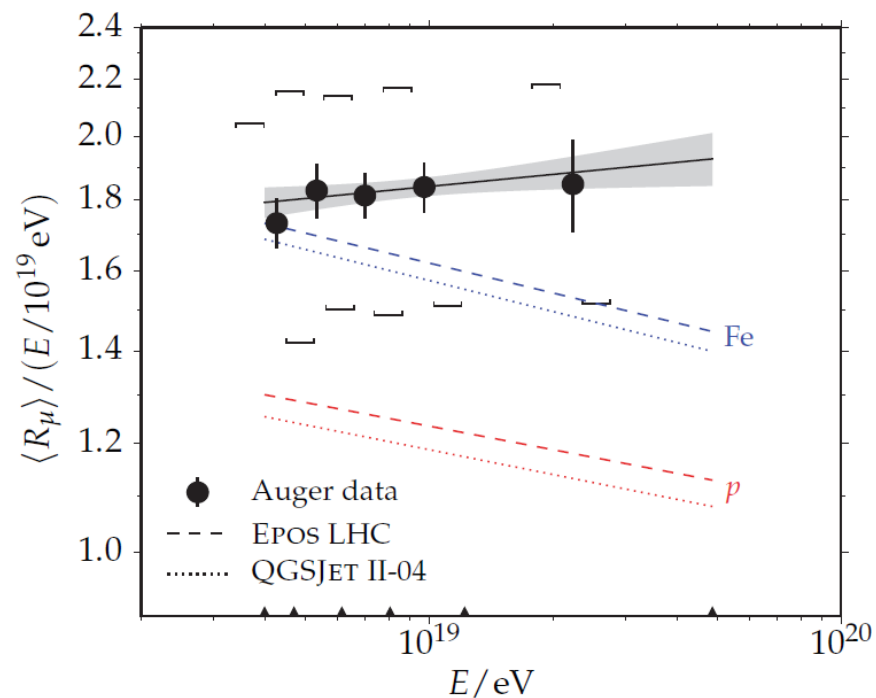
01 / 研究次级muon分布的动机



假设原初成分为质子或者铁核，而实验测量应该在这两种极端成分之间，否则模型就是存在明显不足。

$$N_{\mu} = A \left(\frac{E}{AC} \right)^{\beta} = A^{1-\beta} \left(\frac{E}{C} \right)^{\beta},$$

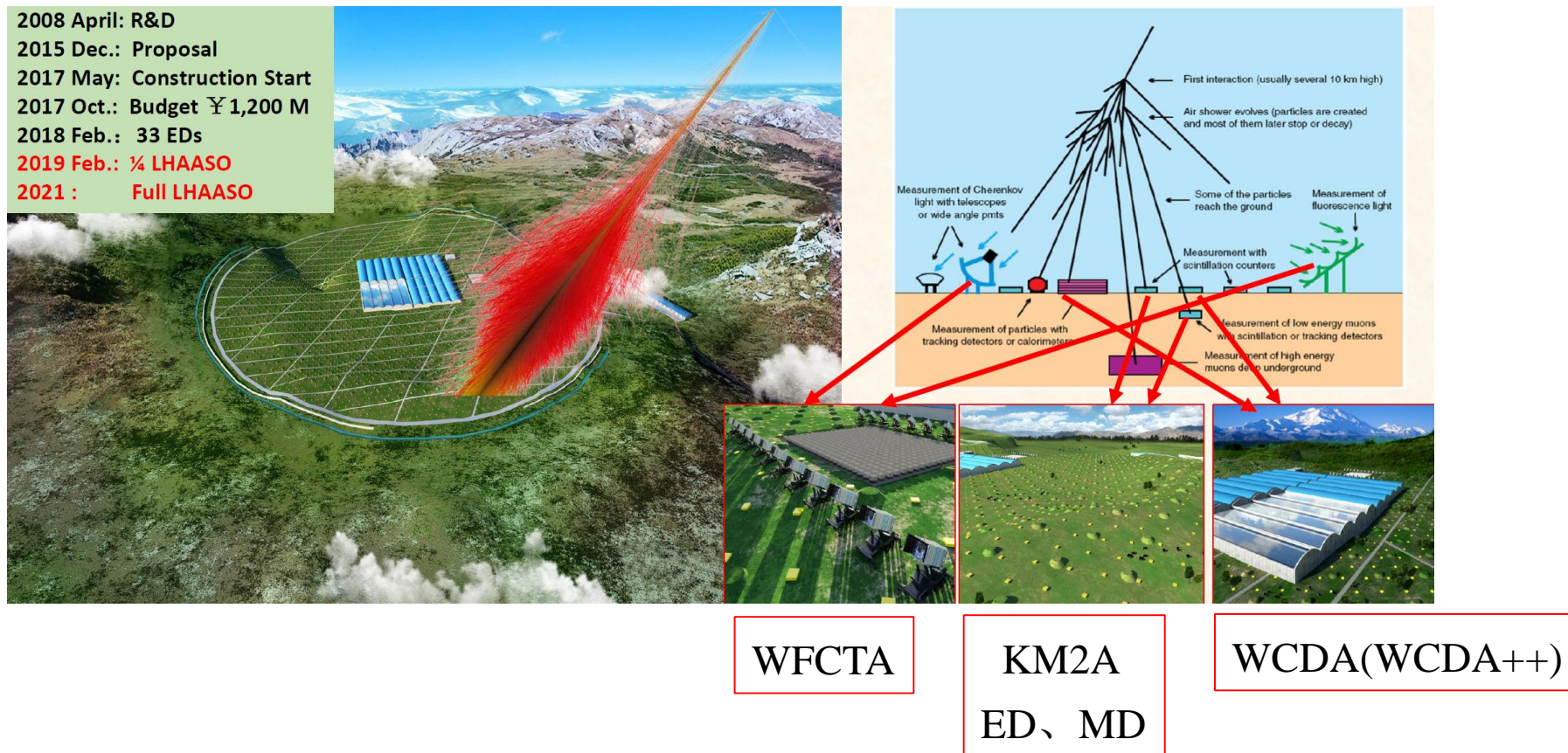
实验上观测到的与模型出现明显偏差的地方也主要集中在缪子信息上，模型预期的 μ 子数比实验测量到的 μ 子数要少，即存在 μ 子数超出的问题。



AUGER实验测量到的平均每个shower的 μ 子数随shower能量的变化

[A.Aab et al. Phys Rev. D 91, 059901 \(2015\).](#)

LHAASO高海拔宇宙线观测站



LHAASO位于四川稻城海子山上，海拔4410米，KM2A，WCDA，WFCTA混合阵列探测器。MD探测器总数定为1171个，占地面积达40000 m^2 ，是世界上最大的Muon探测器。

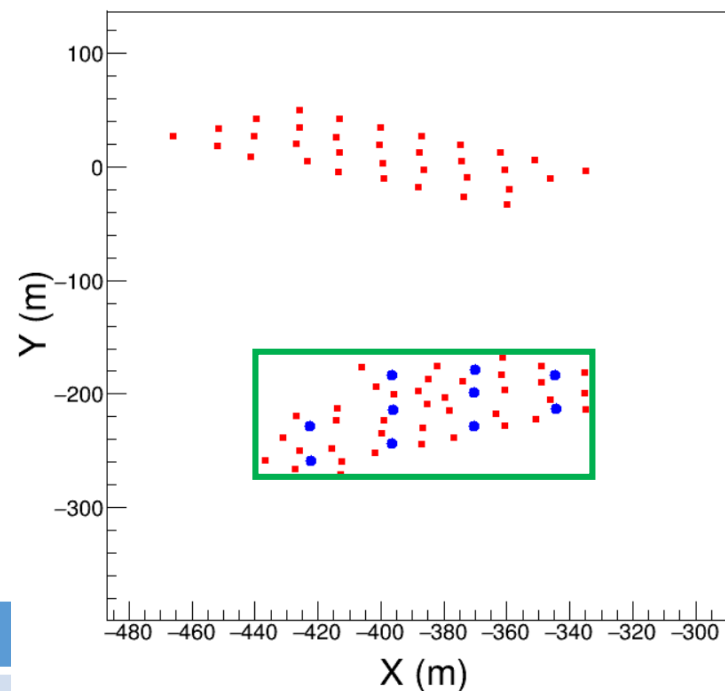
CORSIKA simulationHardronic interaction model: **EPOS,FLUKA**

Energy range: 1TeV-10PeV

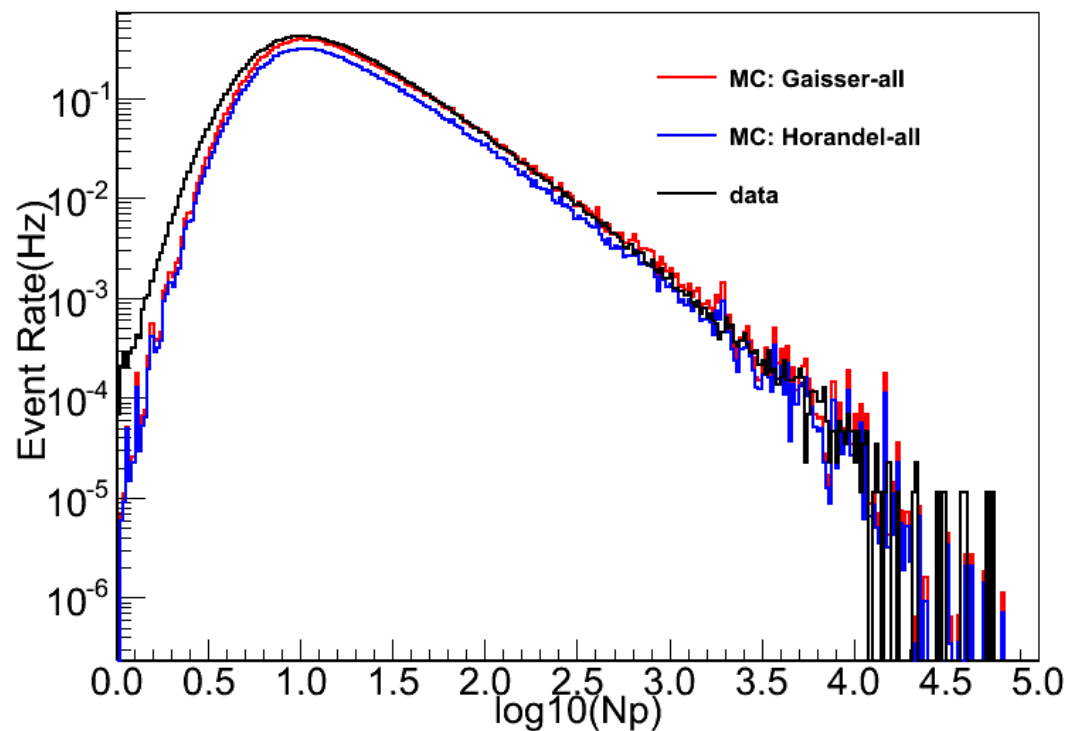
Zenith range: 0-70°

mass: **P**,He,**Fe**,CNO,MgAlSi

能量	1TeV-10TeV	10TeV-100TeV	100TeV-1PeV	1PeV-10 PeV
投点半径(m)	300	300	600	1200
P,Fe样本数	1.e8	1.e7	1.e7	1.e6
He,CNO,MgAlSi	5.e7	5.e6	5.e5	5.e4



筛选条件:
 芯位X(-445,-325)Y:(-280,-159)
 rec_theta: 0-30°
 NtrigE>=5



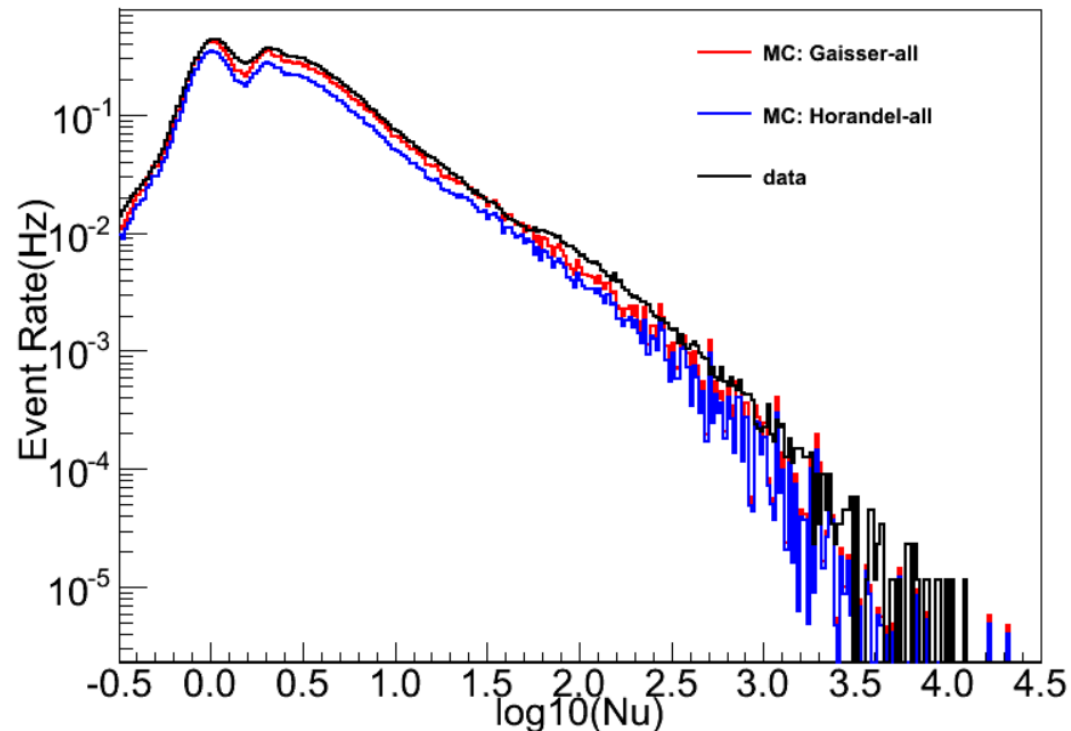
Gaisser event rate=18.8328

Horandel event rate=15.0418

Data event rate=21.0689

➤ Gaisser能谱比Horandel能谱的事例率高20%

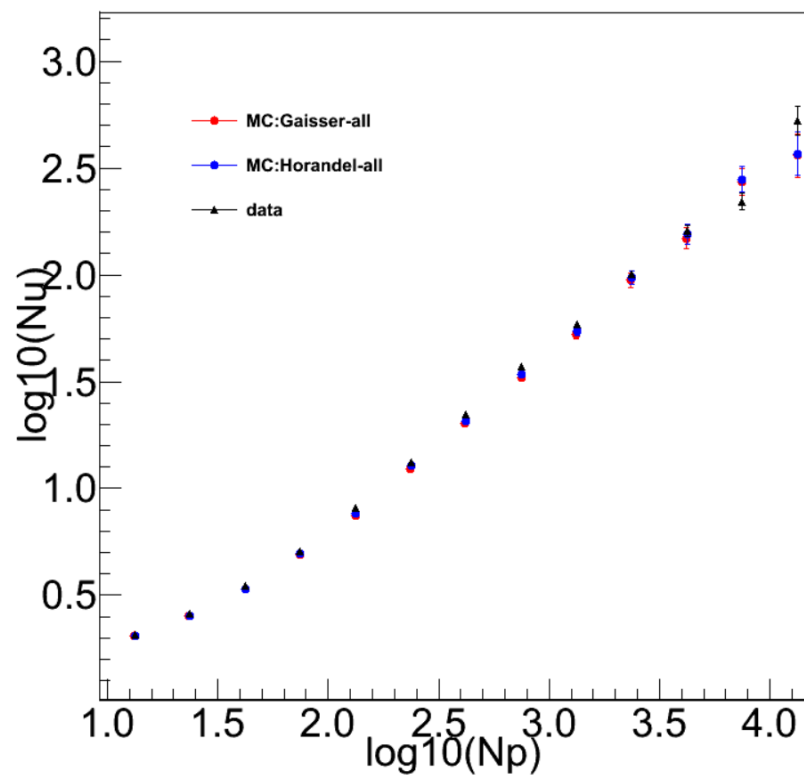
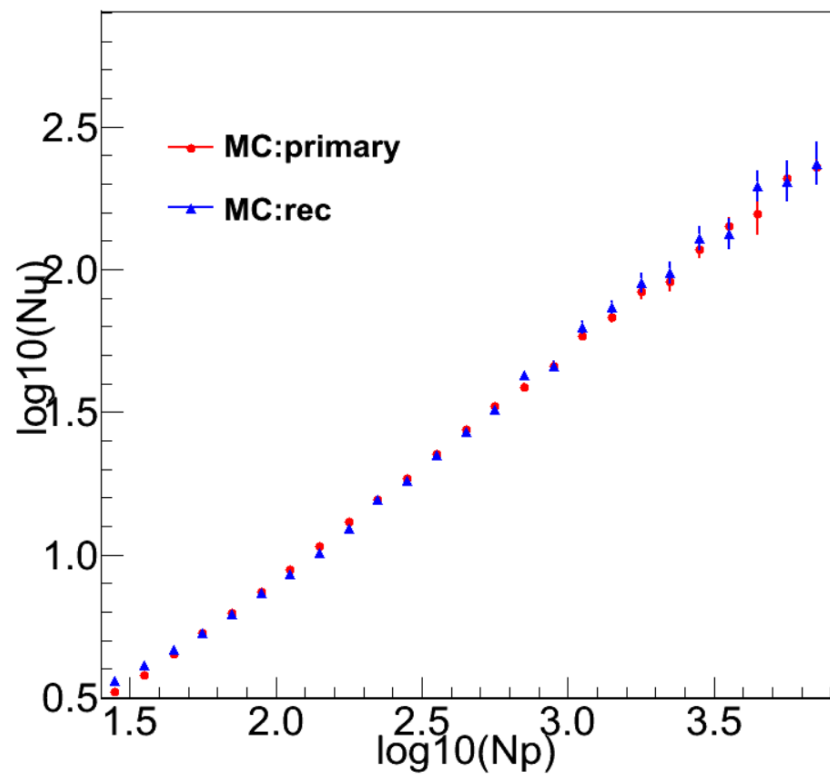
➤ 实验数据的事例率比模拟数据归一到Gaisser能谱事例率高12%



Gaisser event rate=18.7268

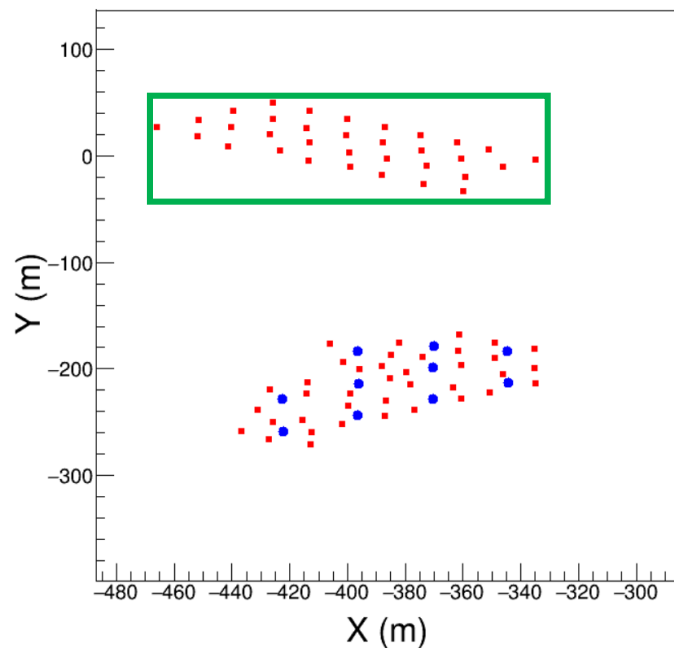
Horandel event rate=14.9524

Data event rate=20.8238

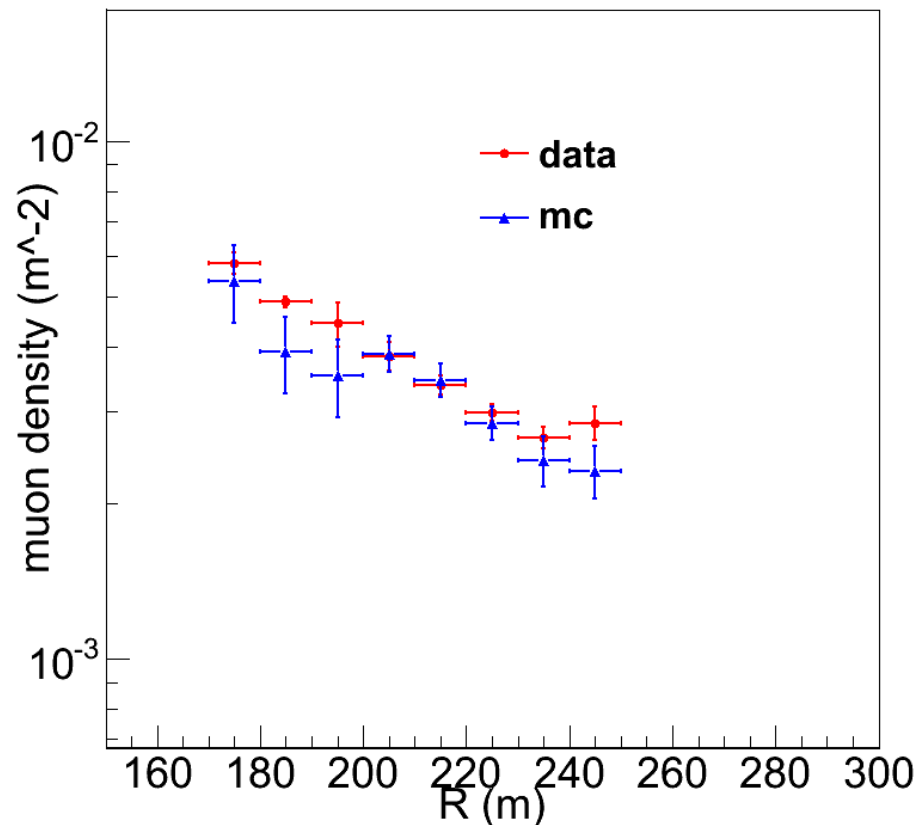


- 左图，通过模拟检验了缪子的重建算法的准确性；
- 右图，Gaisser 能谱和 Horandel 能谱与实验数据的 $N_\mu: N_p$ 分布一致

02 / 71ED10MD阵列初步结果



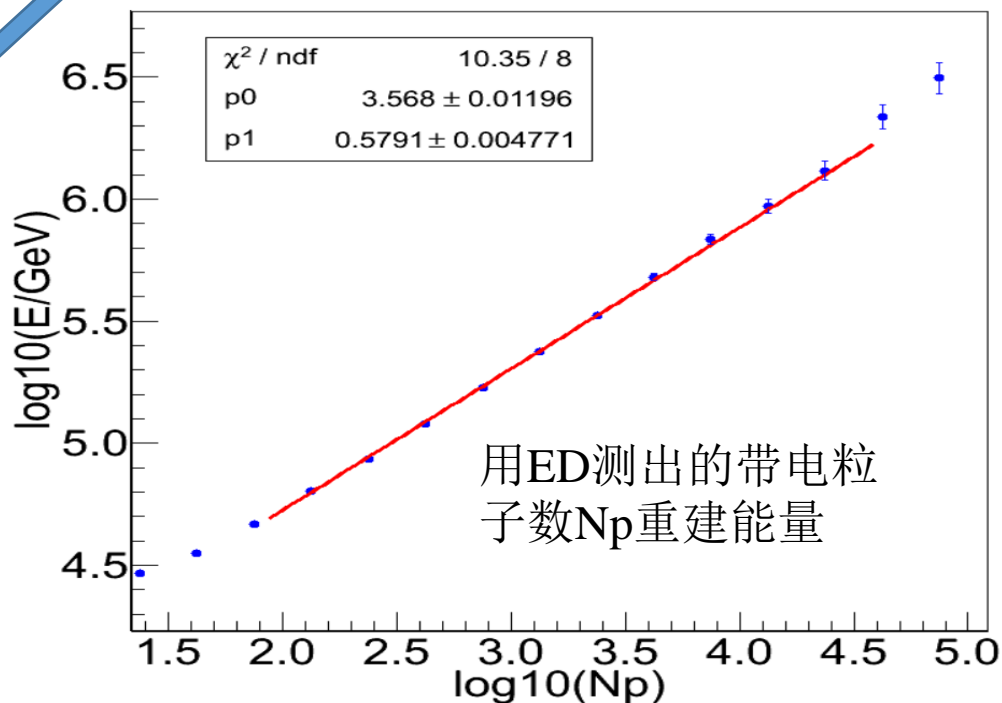
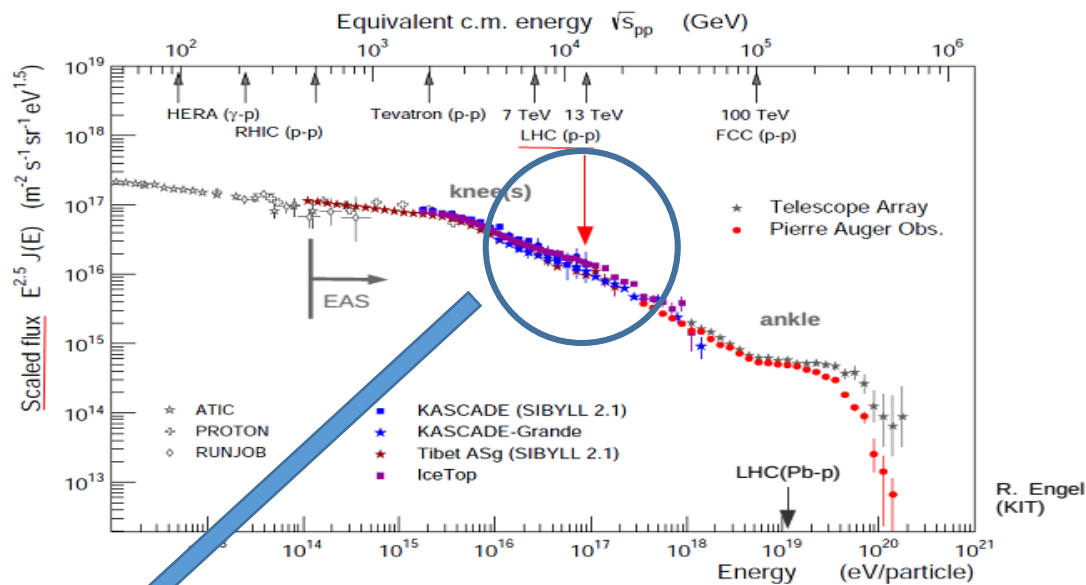
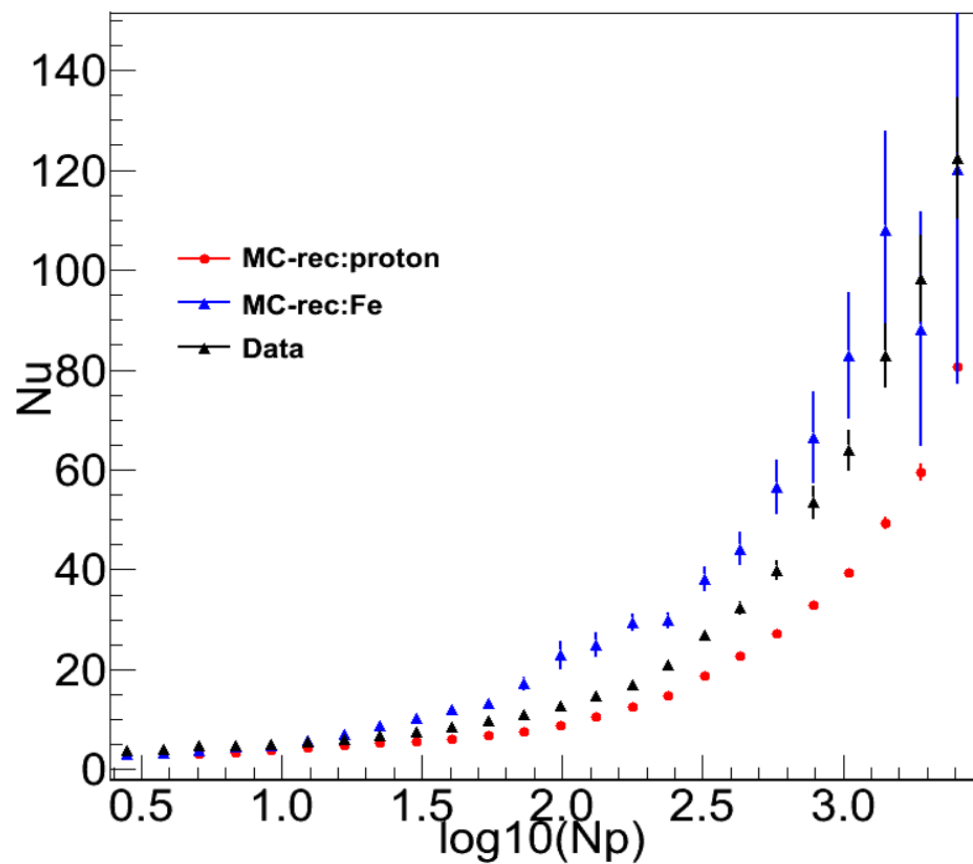
筛选条件:
芯位X(-480,-320)Y:(-48,64)
rec_theta: 0-15°
NtrigE>=8
筛选后能量在100TeV左右



➤ 71ED10MD实验与模拟的muon横向密度分布也是相符合的。

02 / 71ED10MD阵列初步结果

Gaisser能谱, 质子和铁核与实验数据的比较, 在百TeV处宇宙线成分变重?



03 / 四分之一阵列模拟结果

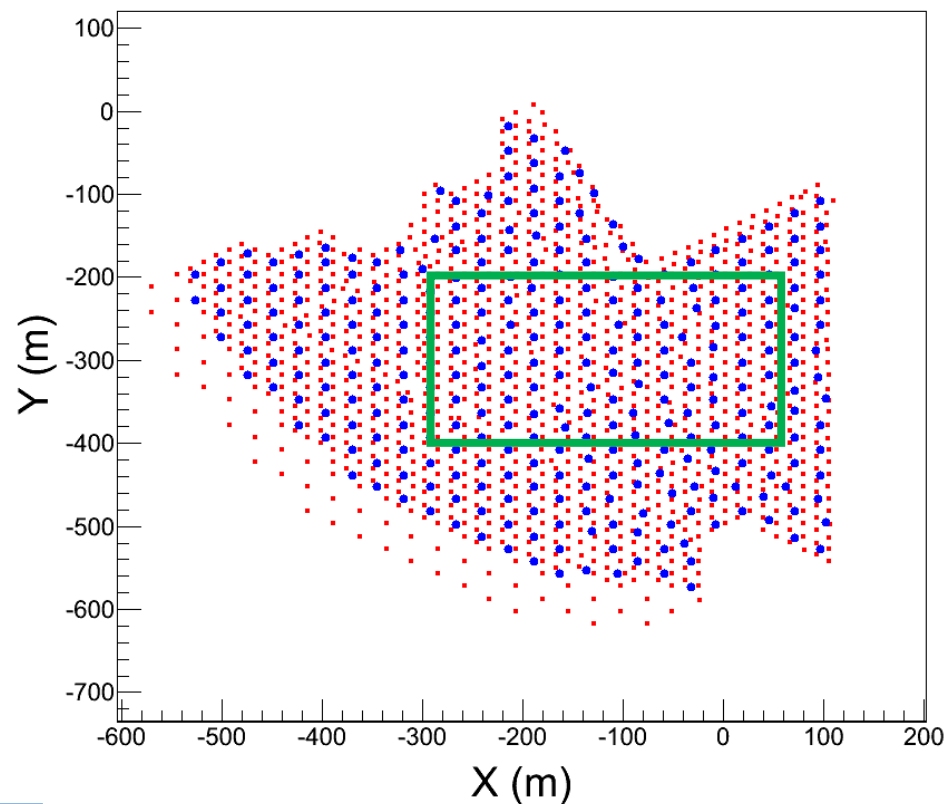
CORSIKA simulation

Hardronic interaction model: **QGSJETII, GHEISHA**

Energy range: 1TeV-10PeV

Zenith range: 0-70°

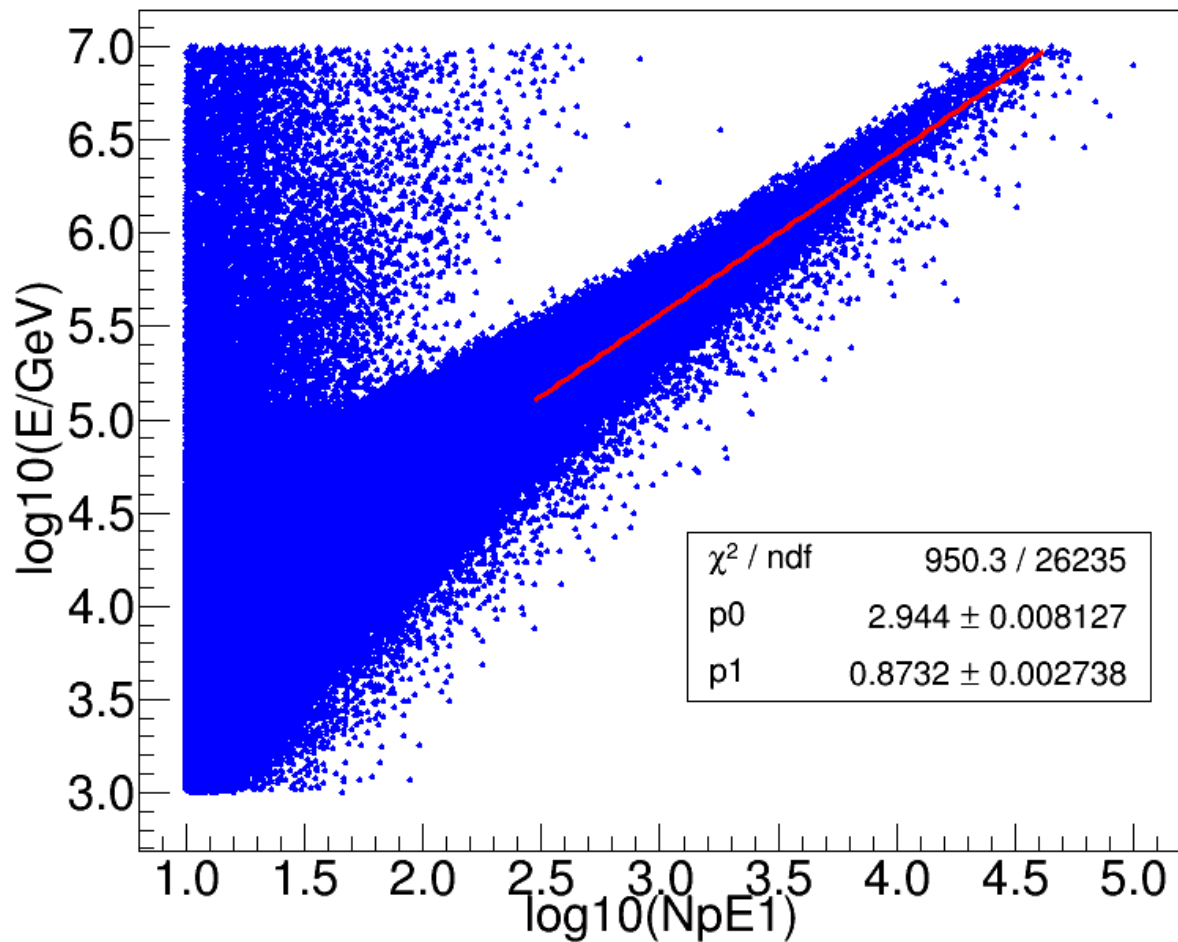
mass: **P,Fe**,He,CNO,MgAlSi



筛选条件:
芯位X(-300,50)Y:(-400,-200)
rec_theta: 0-30°

能量	1TeV-10TeV	10TeV-100TeV	100TeV-1PeV	1PeV-10 PeV
投点半径(m)	1000	1000	1000	1000
P,Fe样本数	2.e8	2.e7	2.e7	2.e6
He,CNO,MgAlSi	5.e7	5.e6	5.e5	5.e4

03 / 四分之一阵列模拟结果

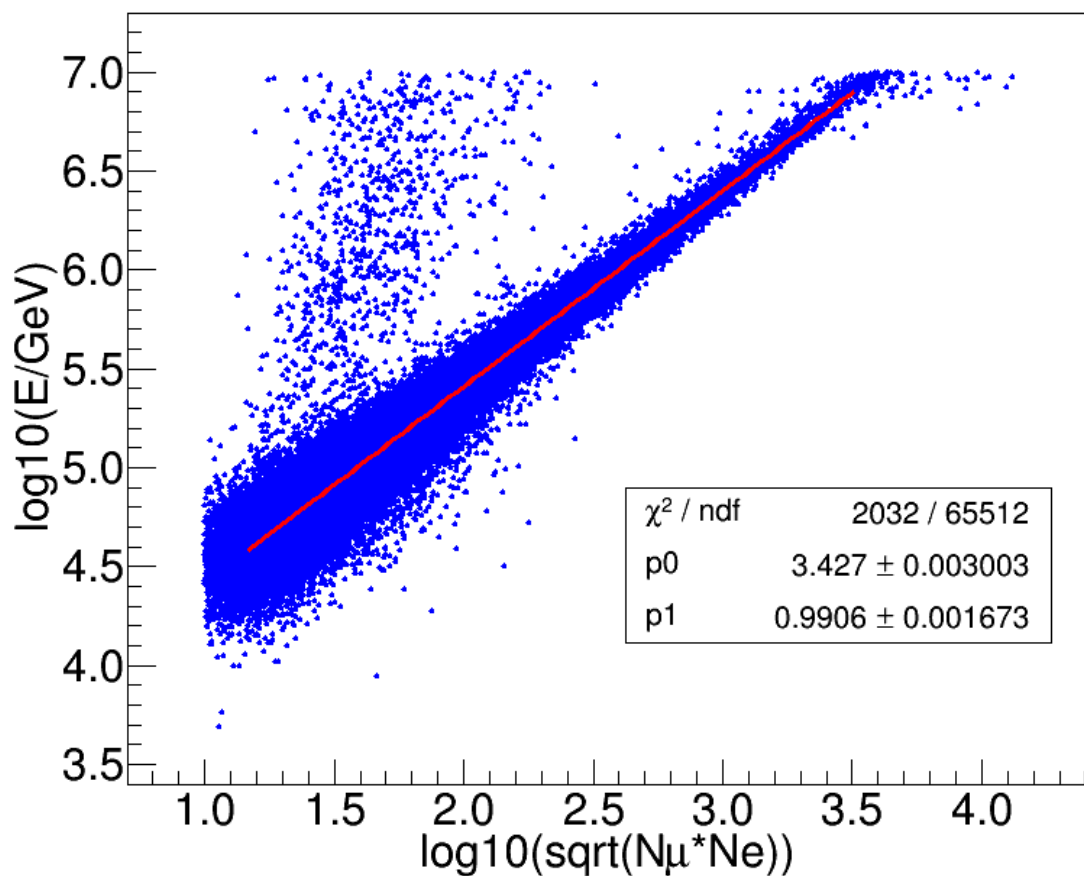


能量	NpE1
4.5	62
4.75	120
5	230
5.25	450
5.5	873
5.75	1690
6	3281
6.25	6310
6.5	12300
6.75	23878

用rec_NpE1重建能量的公式 $\lg E = 2.94 + 0.87 * \lg(NpE1)$

03 / 四分之一阵列模拟结果

用 $\sqrt{Nu*Ne}$ 重建能量

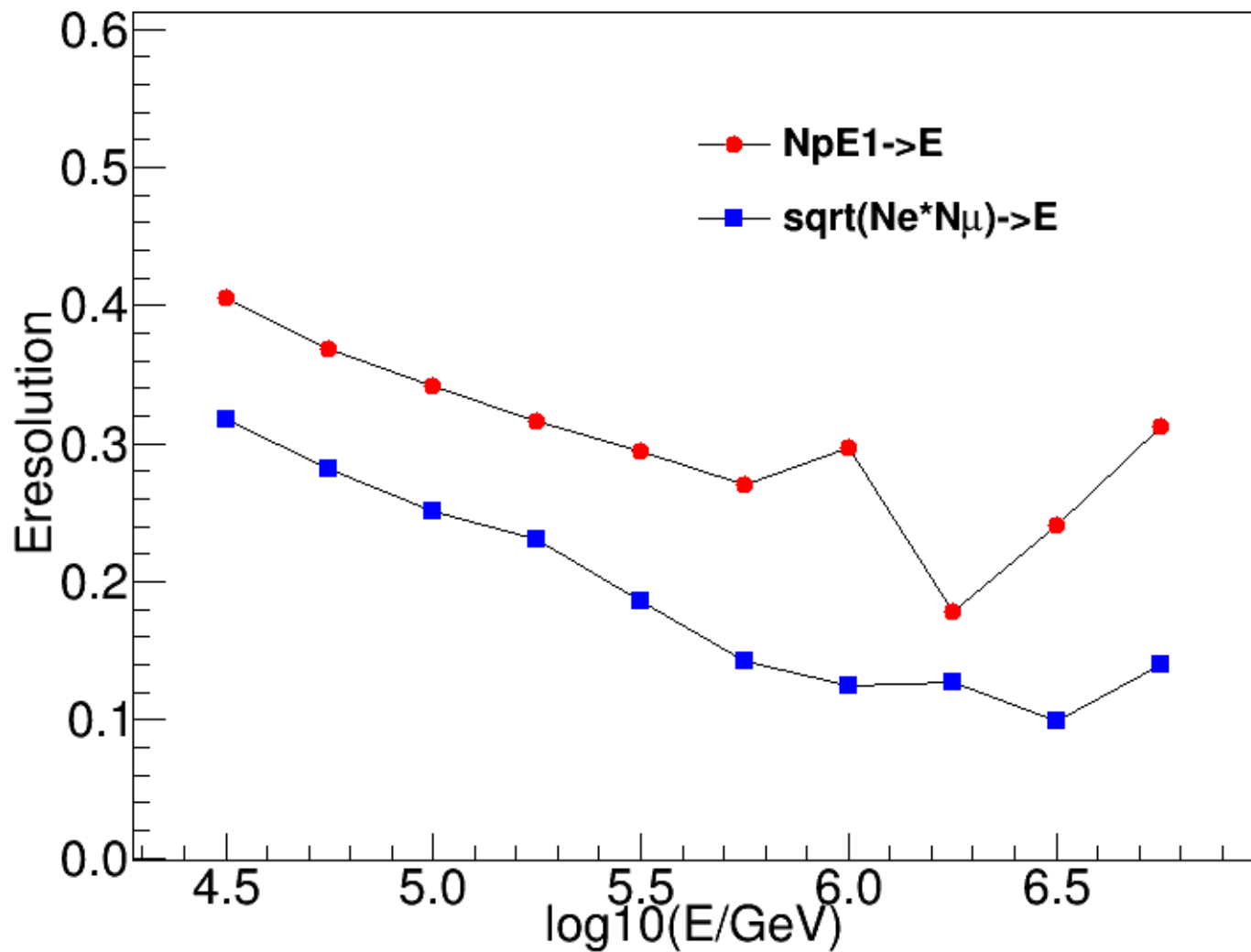


能量分bin

能量	$\sqrt{Nu*Ne}$
4.5	12
4.75	22
5	39
5.25	69
5.5	124
5.75	221
6	396
6.25	708
6.5	1265
6.75	2262

重建能量公式: $\lg E = 3.43 + 0.99 * \lg(\sqrt{Nu*Ne})$

03 / 四分之一阵列模拟结果



$$E_{\text{resolution}} = \frac{E_{\text{rec}} - E_{\text{pri}}}{E_{\text{pri}}}$$

➤ 用Ne*Nu重建能量比Ne重建精度好

03 / 四分之一阵列模拟结果

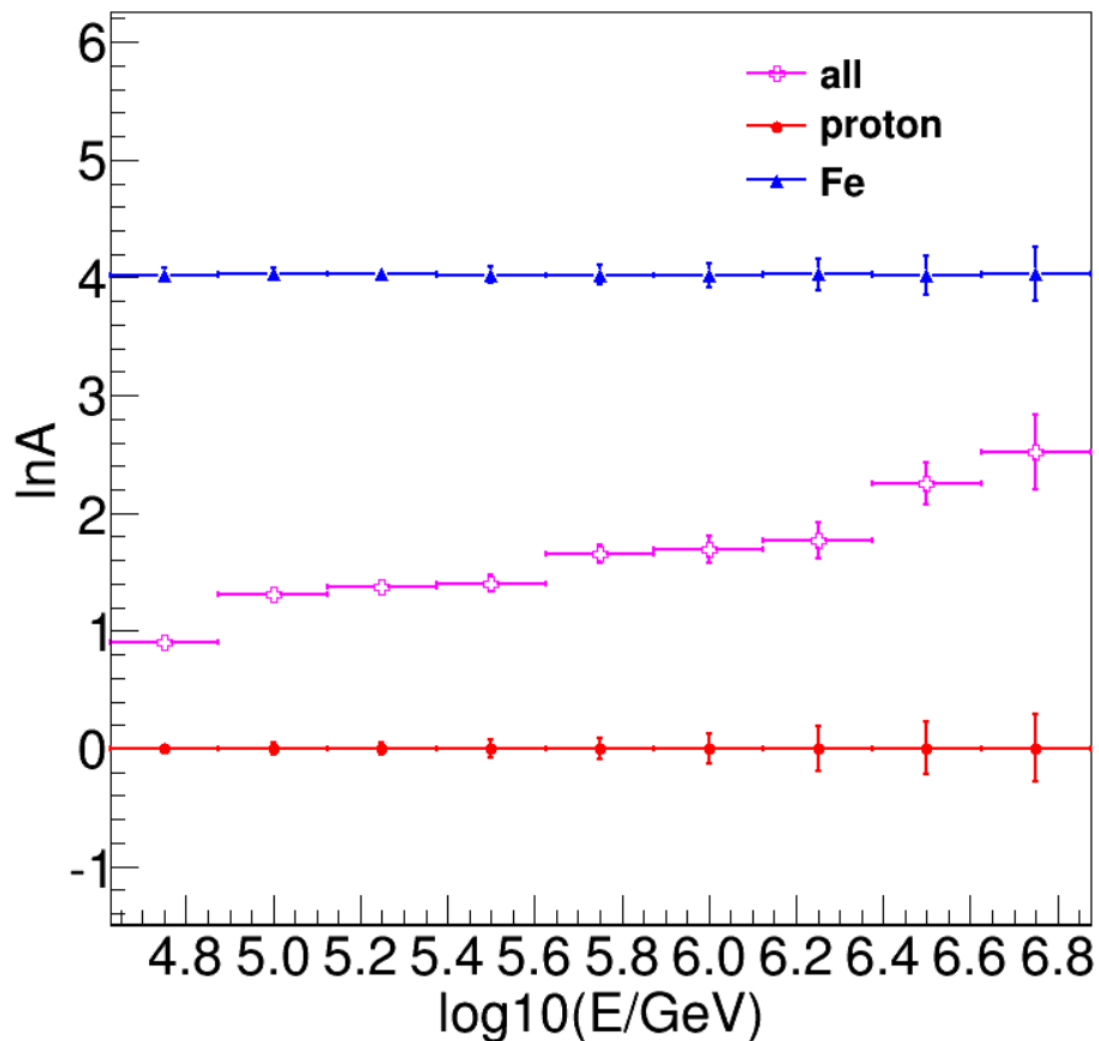
四分之阵列模拟数据，归一到Gaisser能谱
all代表5种原初组分

$$N_{\mu} = A \left(\frac{E}{AC} \right)^{\beta} = A^{1-\beta} \left(\frac{E}{C} \right)^{\beta},$$

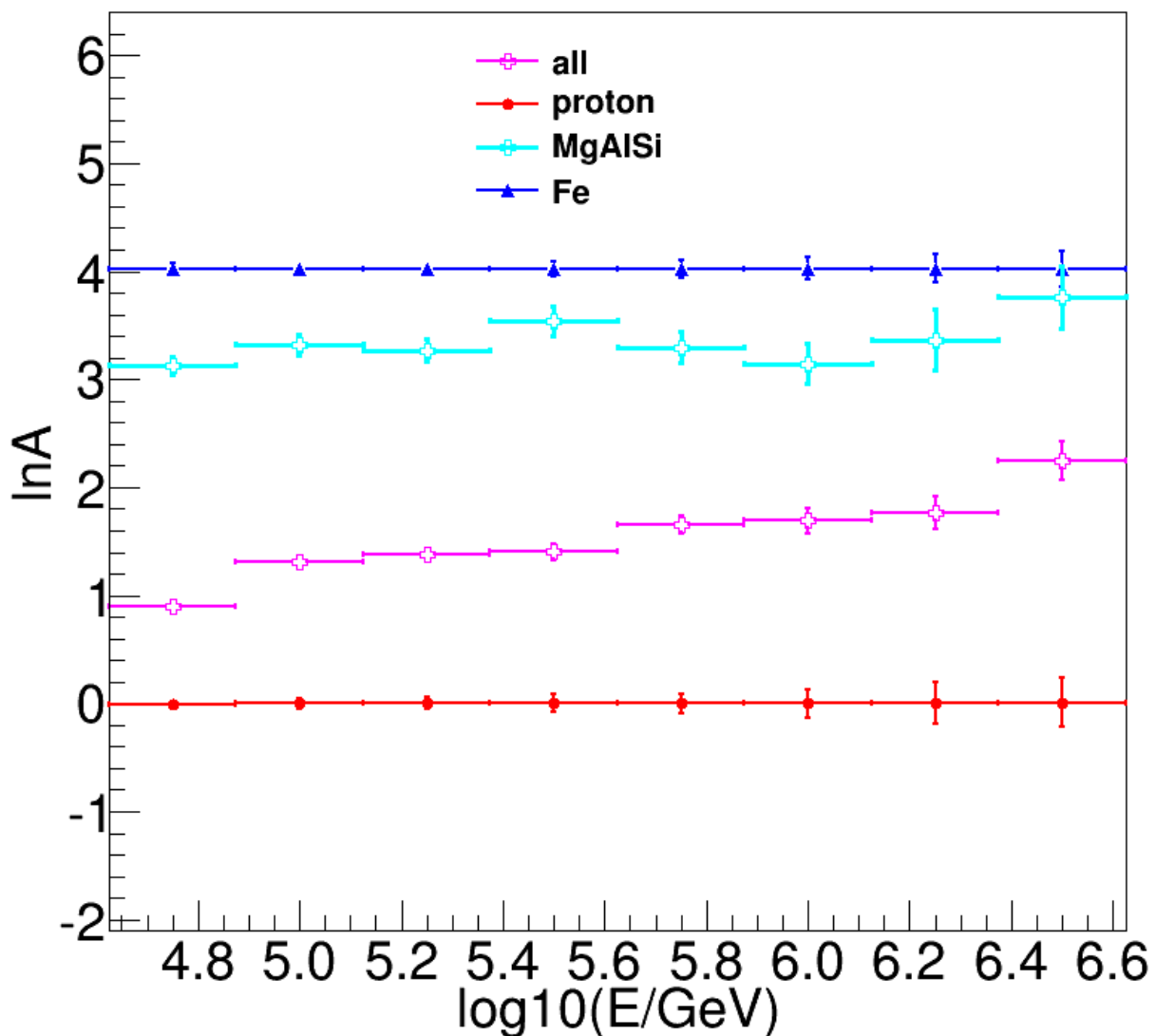
公式:

$$\langle \ln N_{\mu} \rangle = \langle \ln N_{\mu} \rangle_p + (1 - \beta) \langle \ln A \rangle$$

$$\beta = 1 - \frac{\langle \ln N_{\mu} \rangle_{Fe} - \langle \ln N_{\mu} \rangle_p}{\ln 56}$$



03 / 四分之一阵列模拟结果



公式:

$$\langle \ln N_\mu \rangle = \langle \ln N_\mu \rangle_p + (1 - \beta) \langle \ln A \rangle$$
$$\beta = 1 - \frac{\langle \ln N_\mu \rangle_{Fe} - \langle \ln N_\mu \rangle_p}{\ln 56}$$

MgAlSi计算lnA的分布

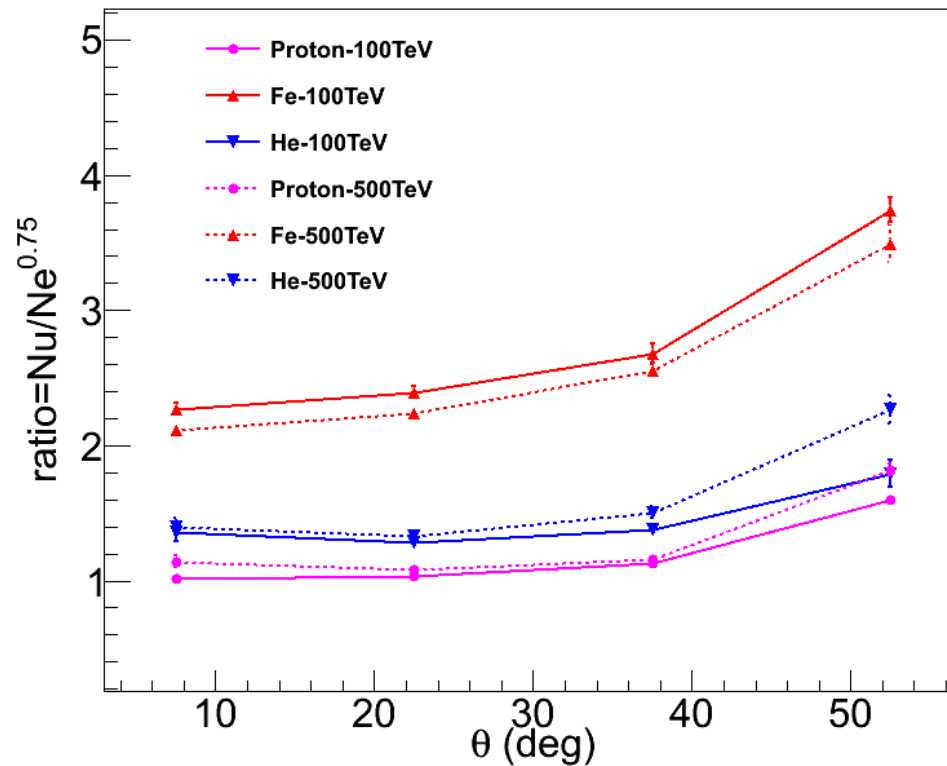
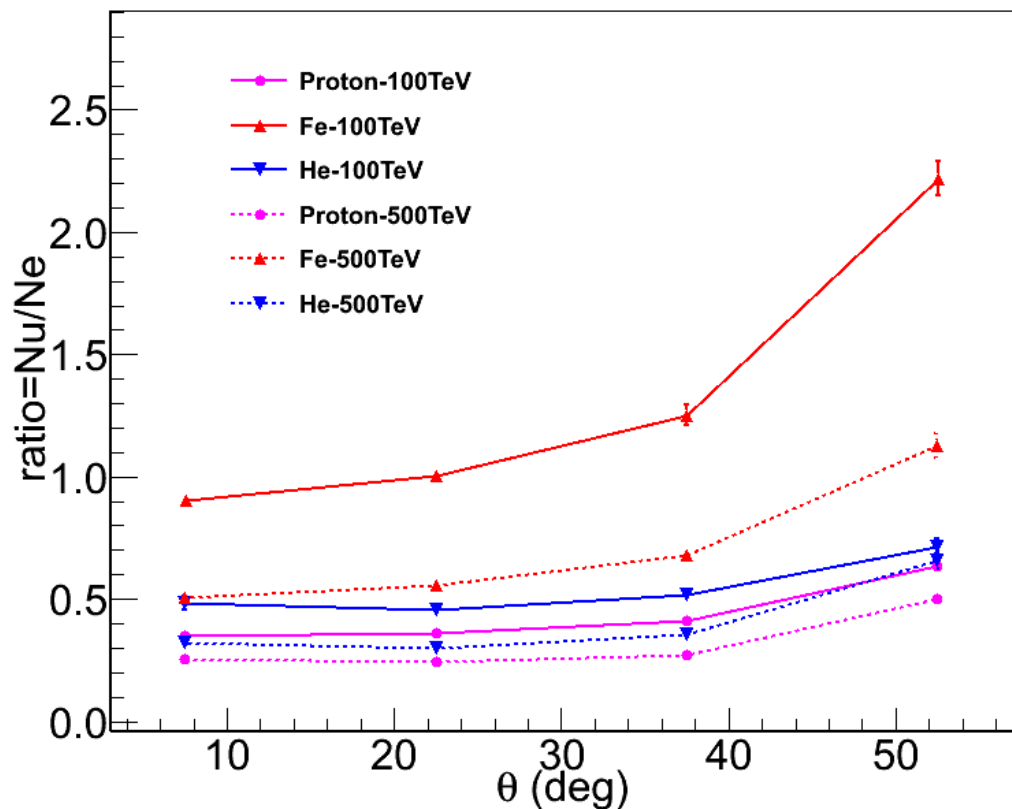
MgAlSi, A=26,对应的lnA=3.258

➤ lnA与宇宙线成分相关

03 / 四分之一阵列模拟结果

四分之一阵列，选择距离阵列中心60米的圆内事例，根据 $\sqrt{Nu*Ne}$ 能量筛选

天顶角: (0-15°) (15-30°)
(30-45°) (45-60°)



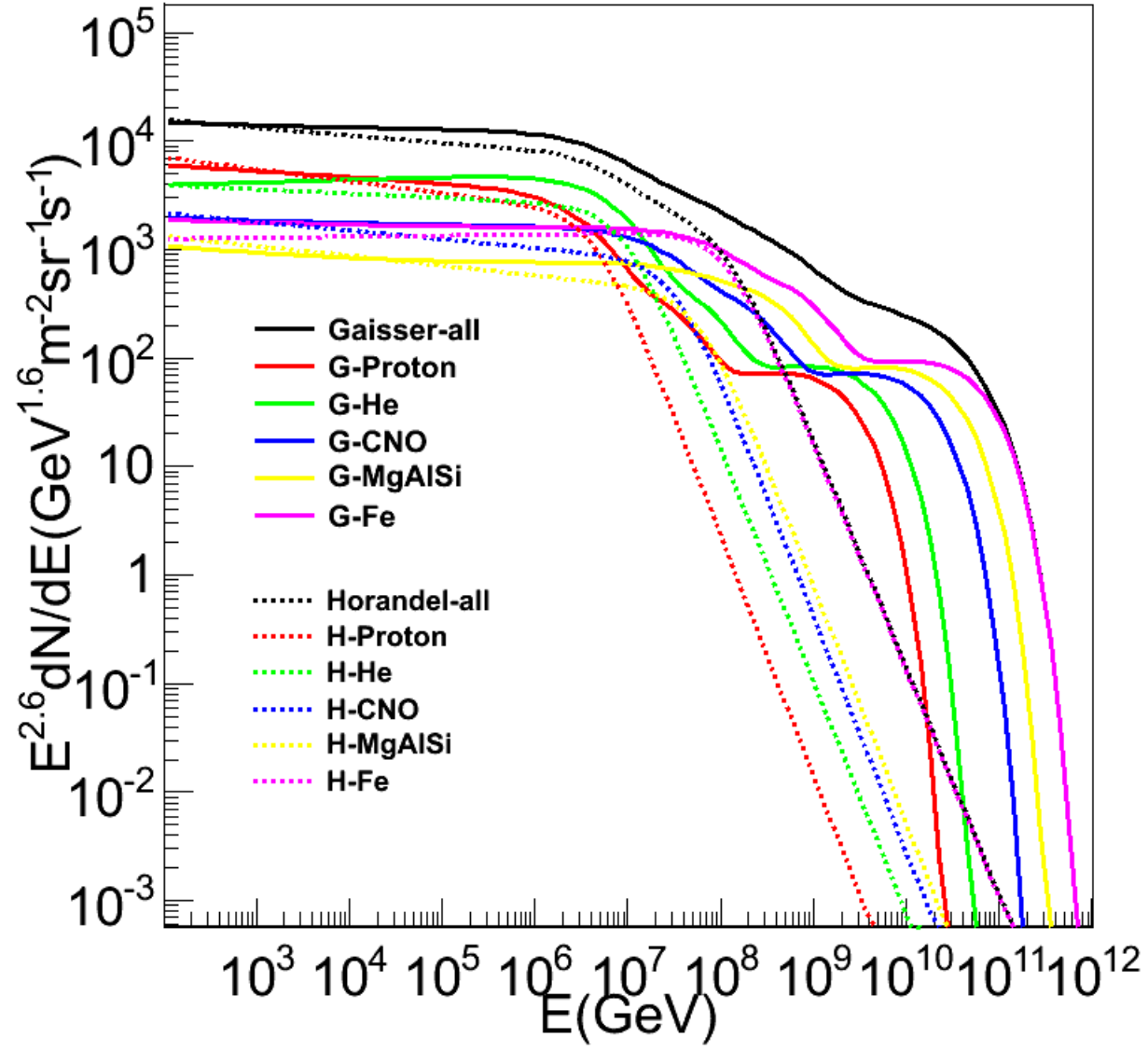
- $ratio=Nu/Ne^{0.75}$ 的关系与原初能量关联弱, 有利于原初成分分辨
- 天顶角大于45° 的事例, $ratio$ 明显变大, 需单独考虑

- 71ED10MD的结果表明，muon探测器模拟与实验测量一致；
- 四分之一阵列，Ne*Nu重建能量与Ne重建能量的比较结果显示，Ne*Nu重建精度更好；
- 研究lnA与宇宙线成分的关系，需要实验数据验证；
- $\text{ratio} = \text{Nu}/\text{Ne}^{0.75}$ 的关系与原初能量关联弱，有利于原初成分分辨；
- ◆ 四分之一阵列再加入EPOS模型的模拟，检验相互作用模型对重建结果带来的差异；
- ◆ 进一步分析四分之一阵列试验数据，验证次级muon分布是否会有超出行为；

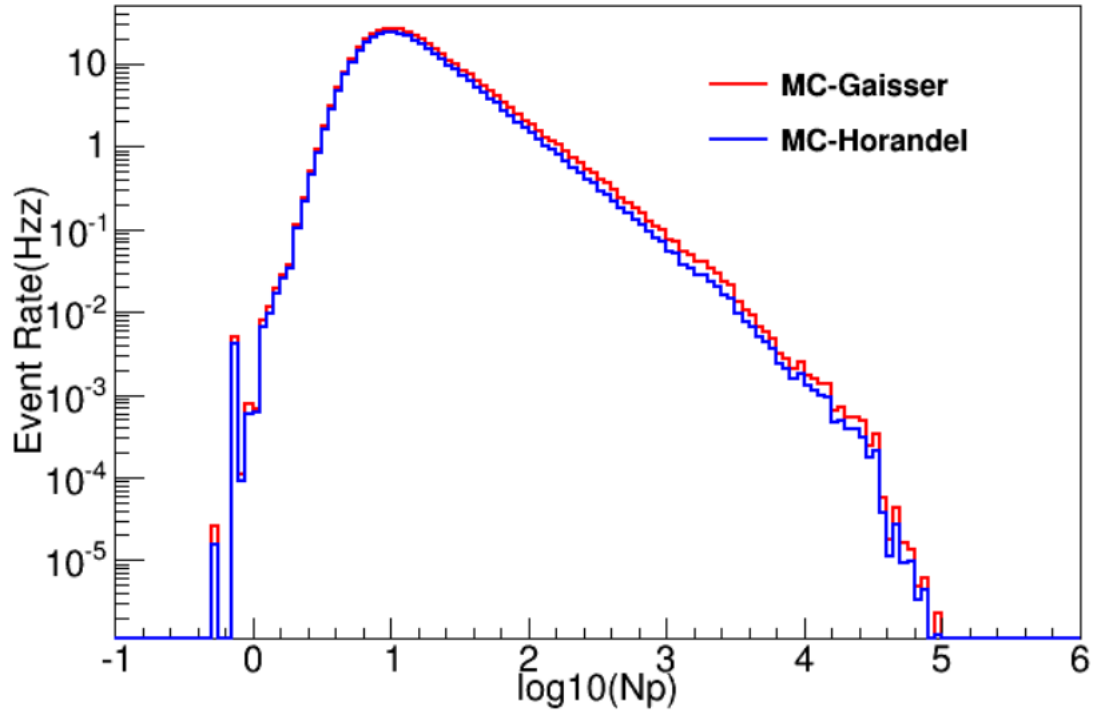
LHAASO

Thank you

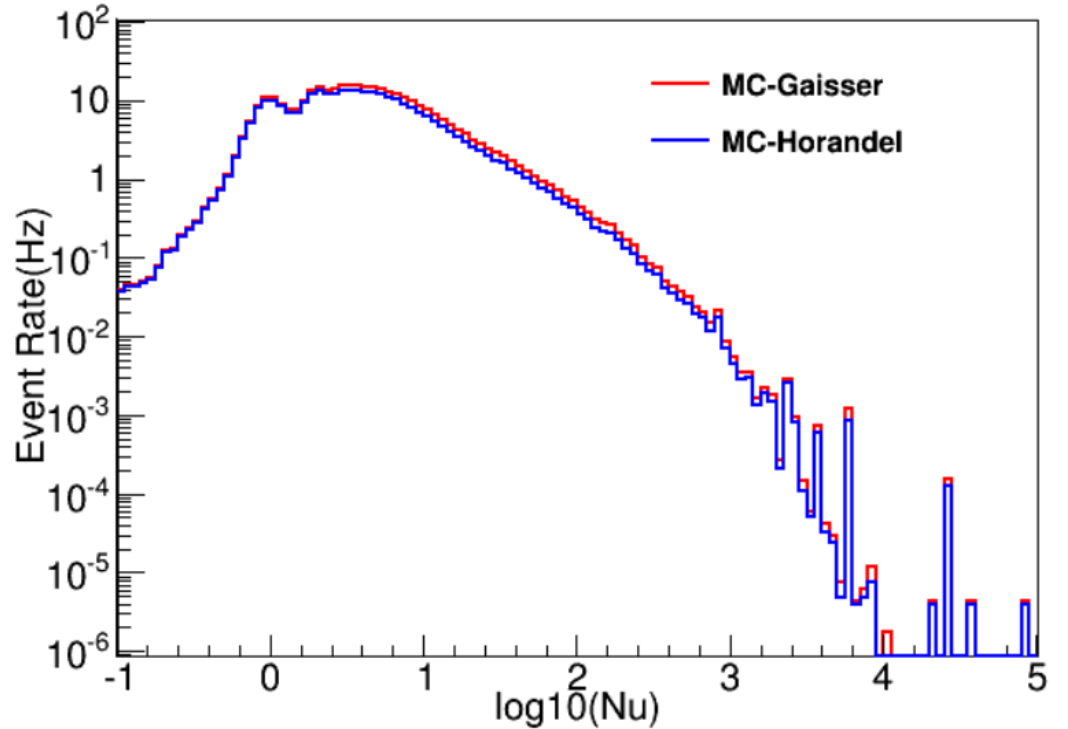
Back up



四分之一阵列, N_p, N_u 分布



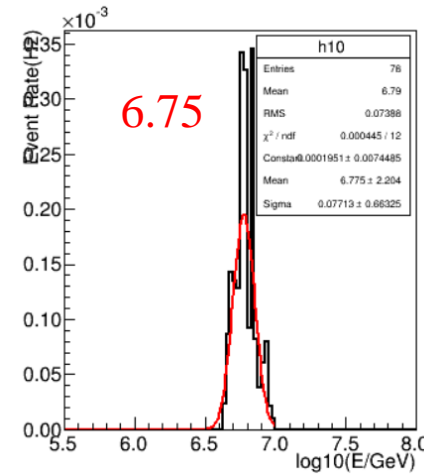
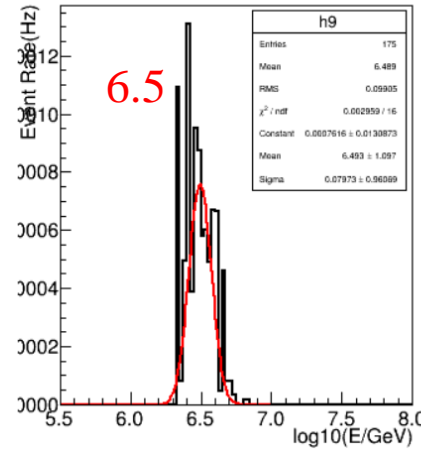
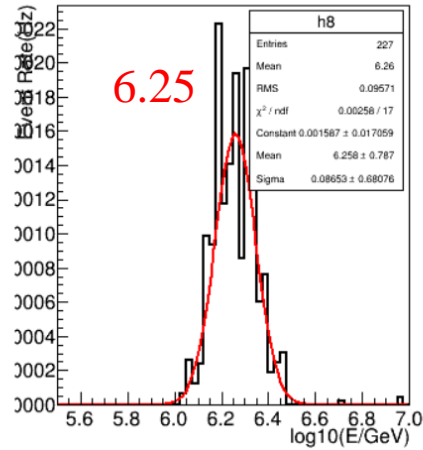
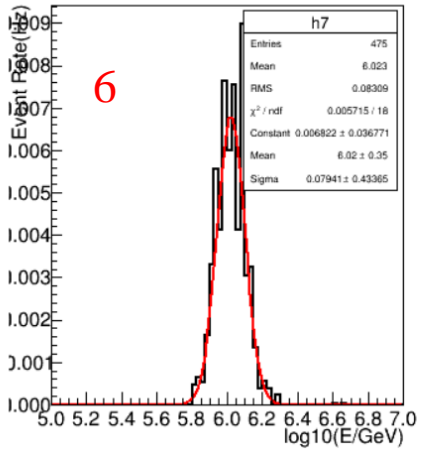
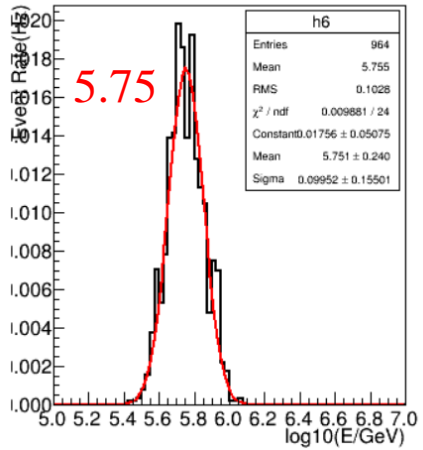
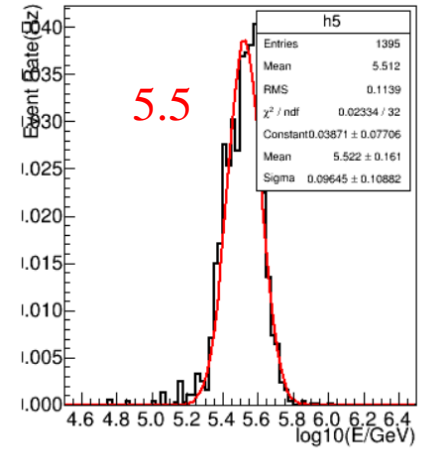
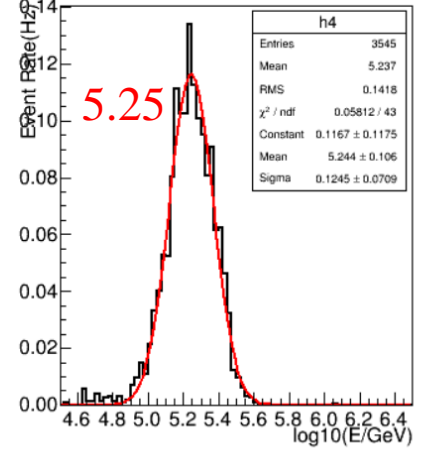
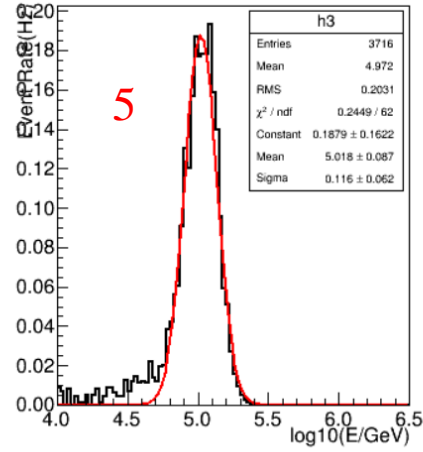
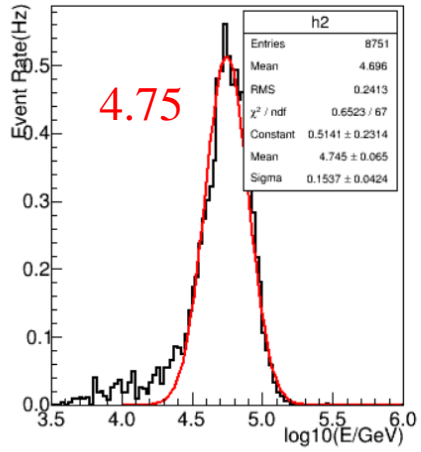
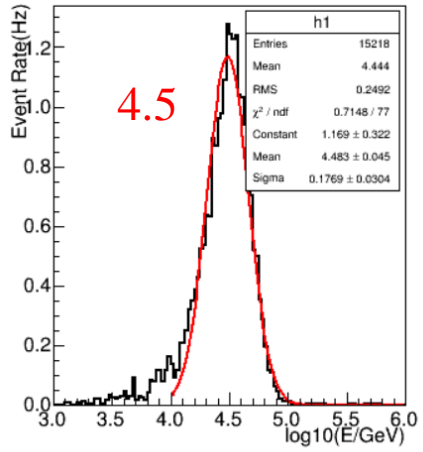
Gaisser event rate=388.53
Horandel event rate=342.73



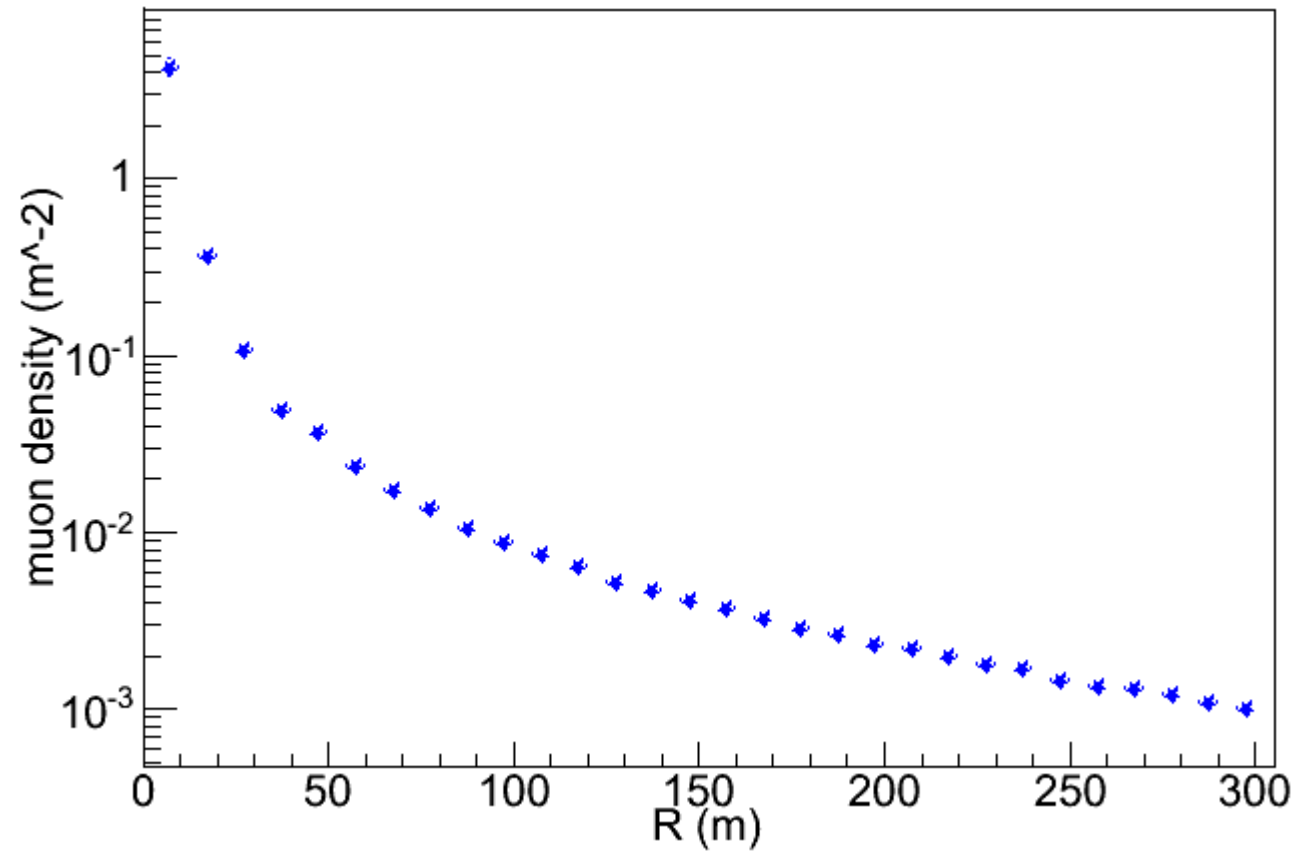
Gaisser event rate=339.47
Horandel event rate=296.04

- Gaisser能谱比Horandel能谱的事例率高12%

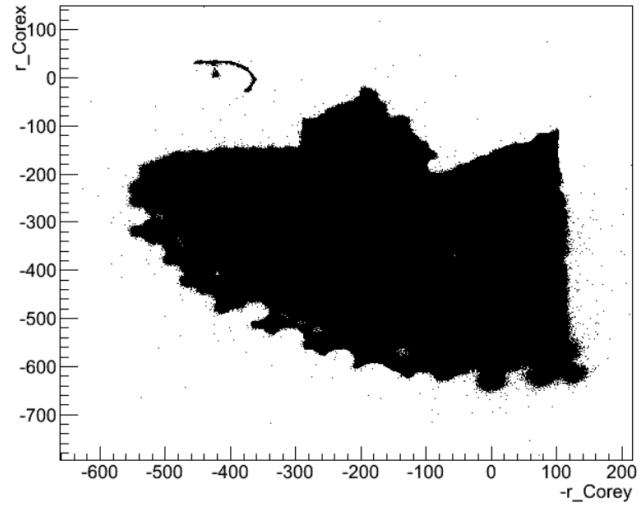
四分之一阵列，能量分bin



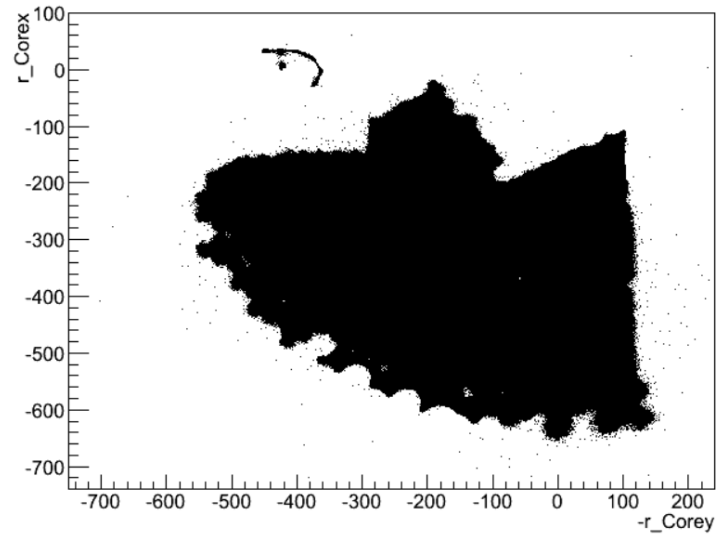
四分之一阵列, 0-15° 100TeV, muon横向密度分布



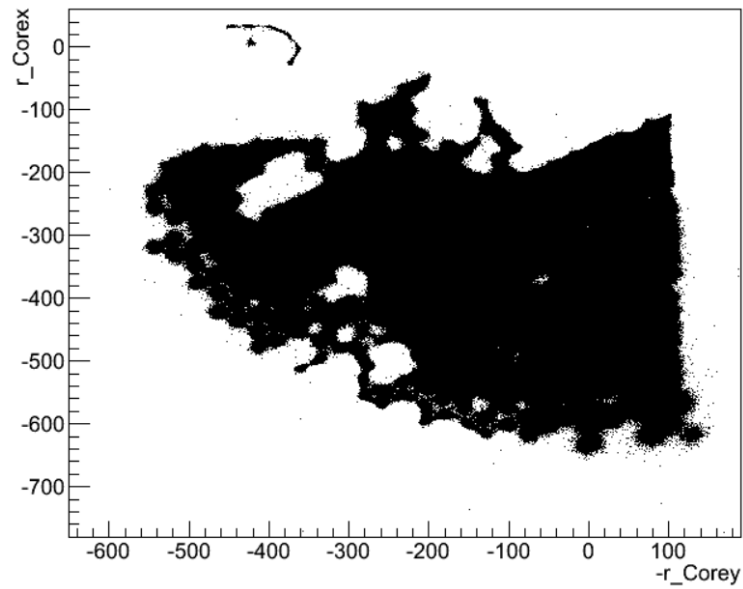
2019.10.12



2019.10.13



2019.10.15



2019.10.17

