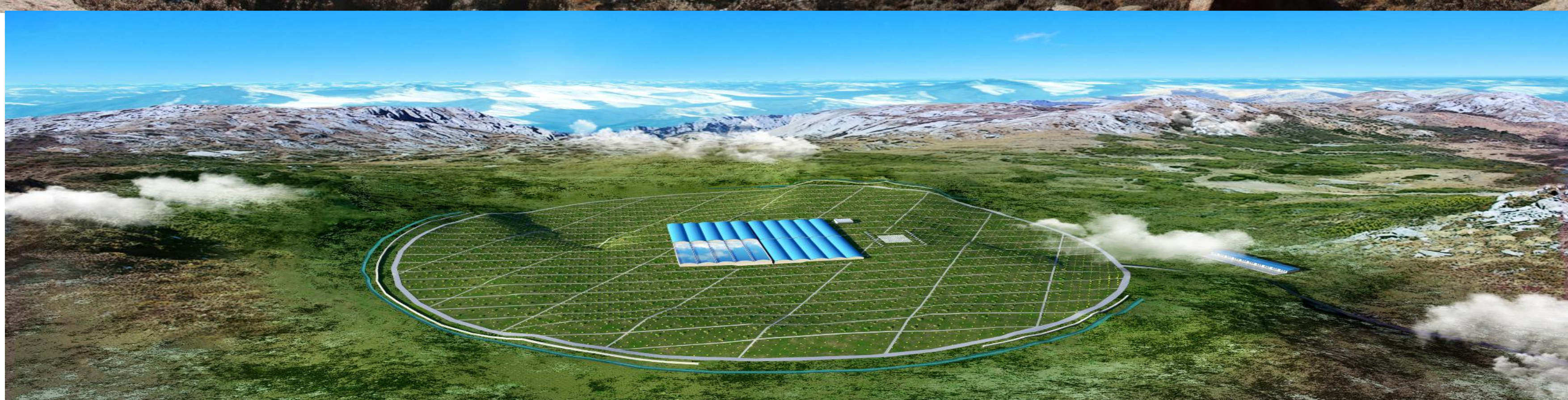
利用LHAASO实验精确测量100TeV以上宇宙线成分能谱

尹丽巧

中国科学院高能物理研究所

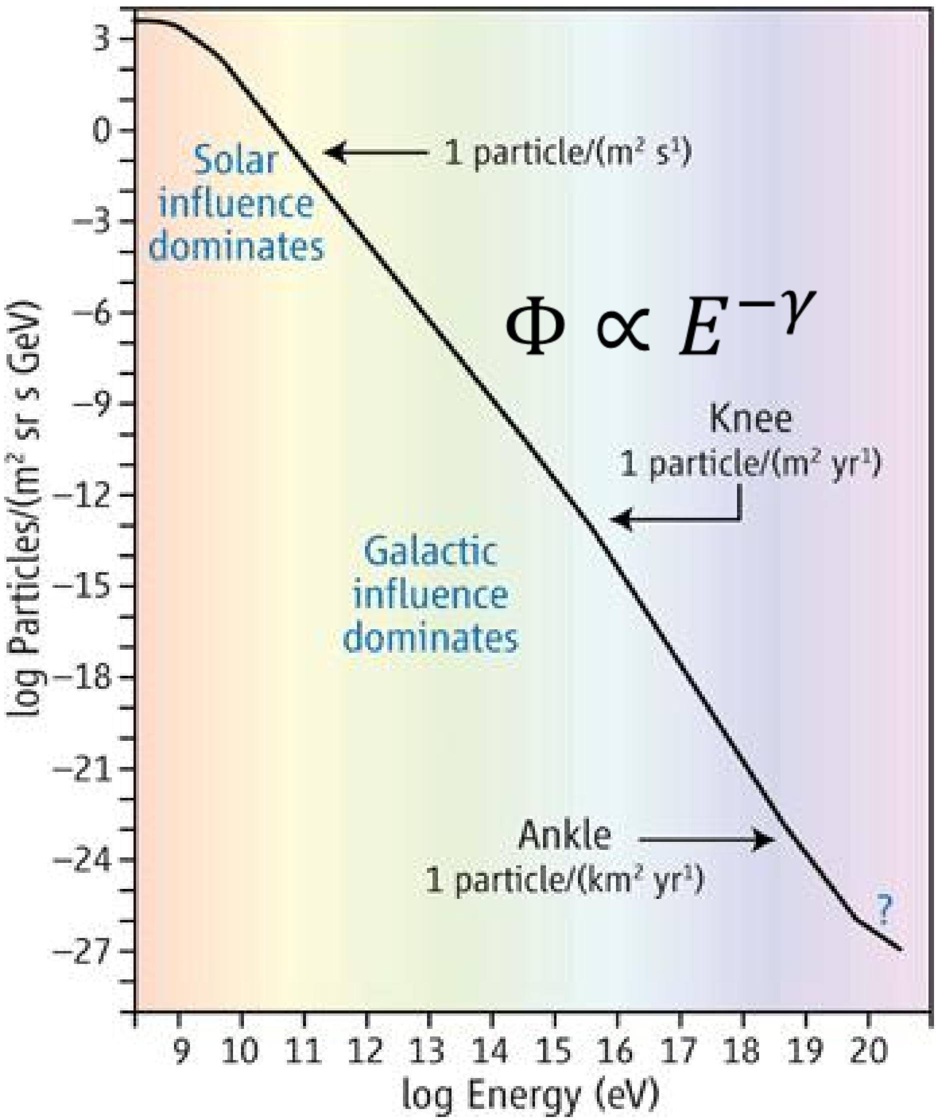


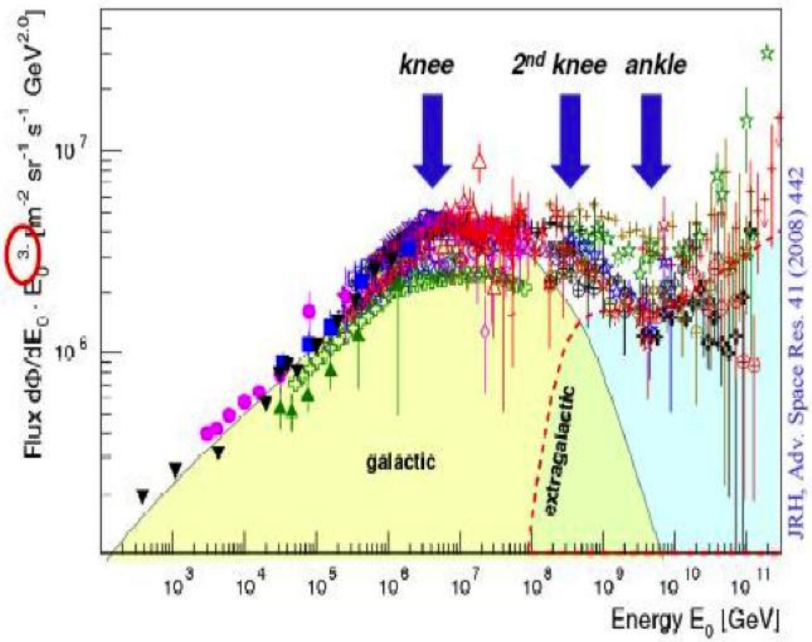
LHAASO第二届合作组会议，2017.1.17-20，云南大学

主要内容

- 背景介绍
- LHAASO多参数分析结果回顾
- LHAASO能量重建方法的讨论
- 小结与下一步工作计划

宇宙线能谱

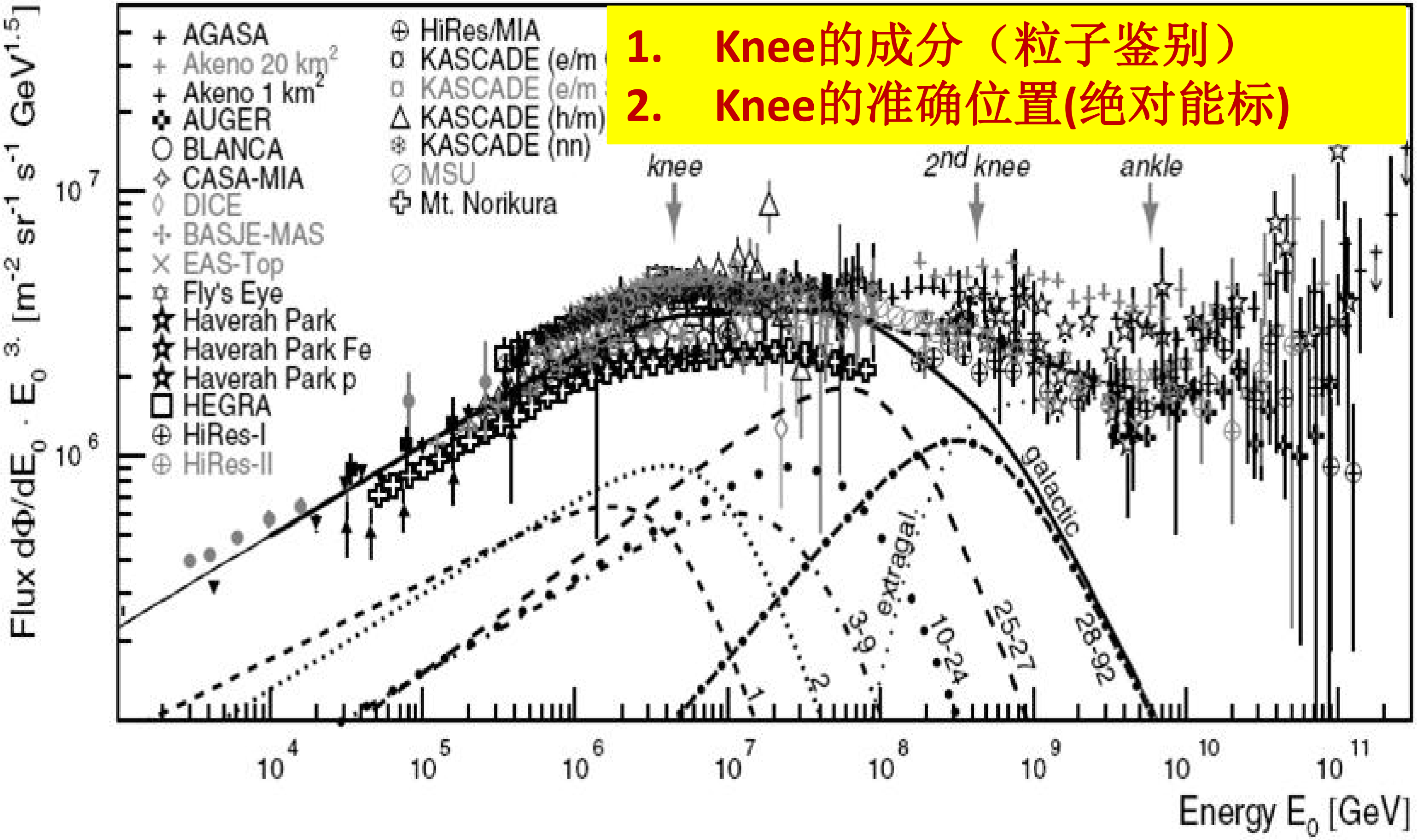




“膝”区的成因与宇宙线起源有密切的关联！

膝区物理面临的问题

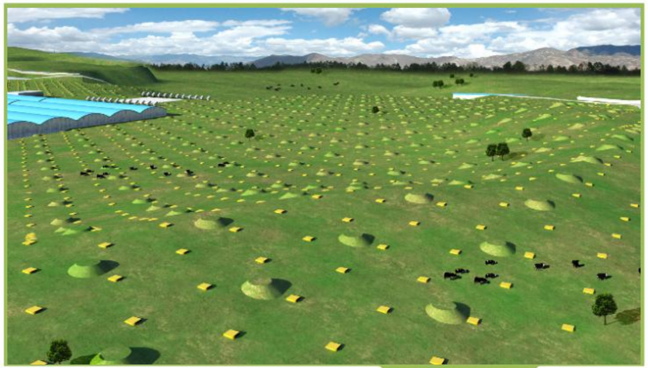
1. Knee的成分（粒子鉴别）
2. Knee的准确位置(绝对能标)

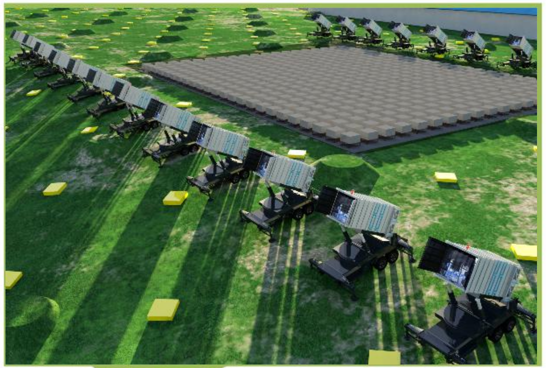


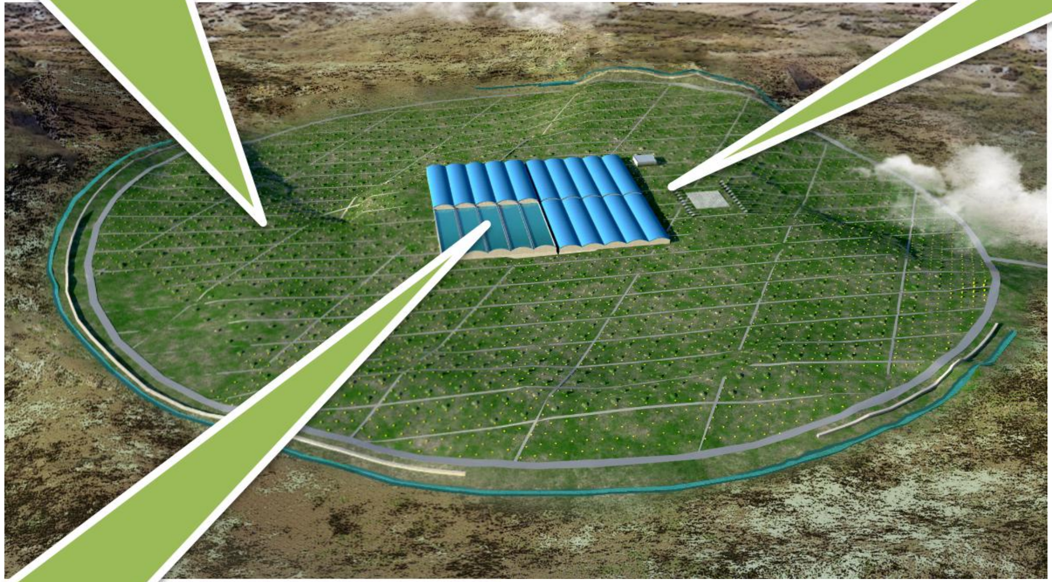
各实验的站点高度、探测技术、实验标定、数据重建和分析以及现有强相互作用模型等因素，都是造成能谱测量混乱的原因

LHAASO

大型高海拔空气簇射观测站

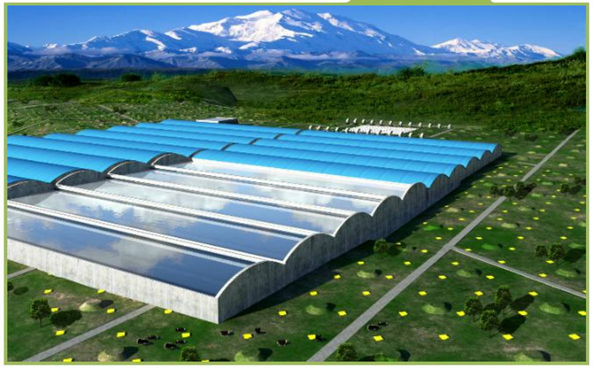






KM2A:
1平方公里电磁粒子和μ子探测器

WCDA:
水契伦科夫光探测器

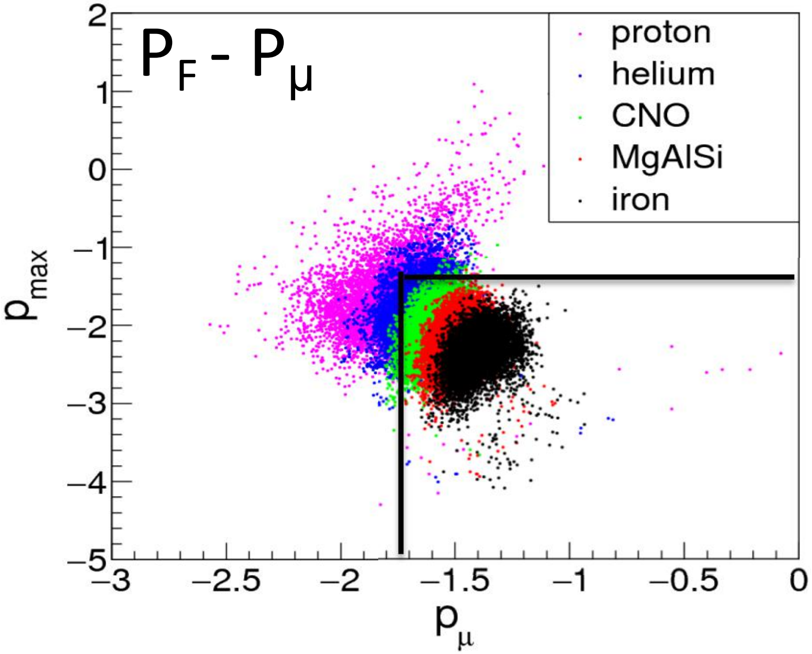


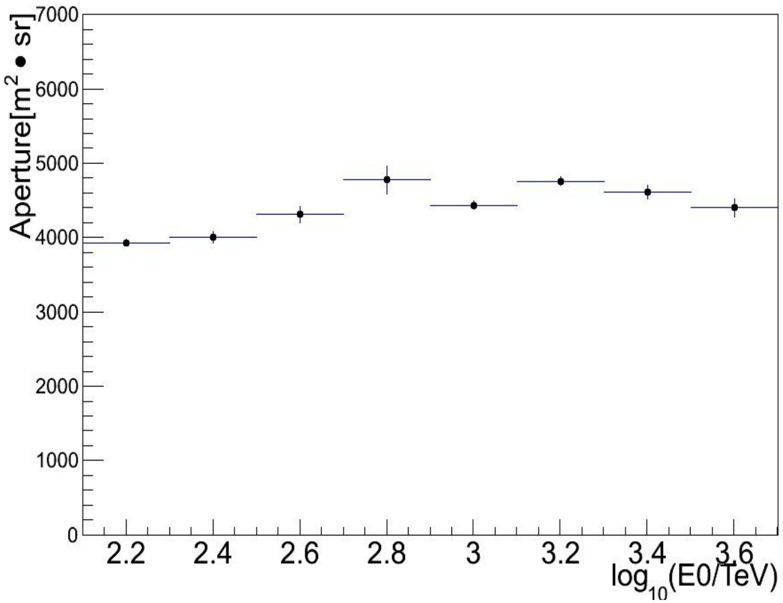
WFCTA:
18台广角契伦科夫望远镜

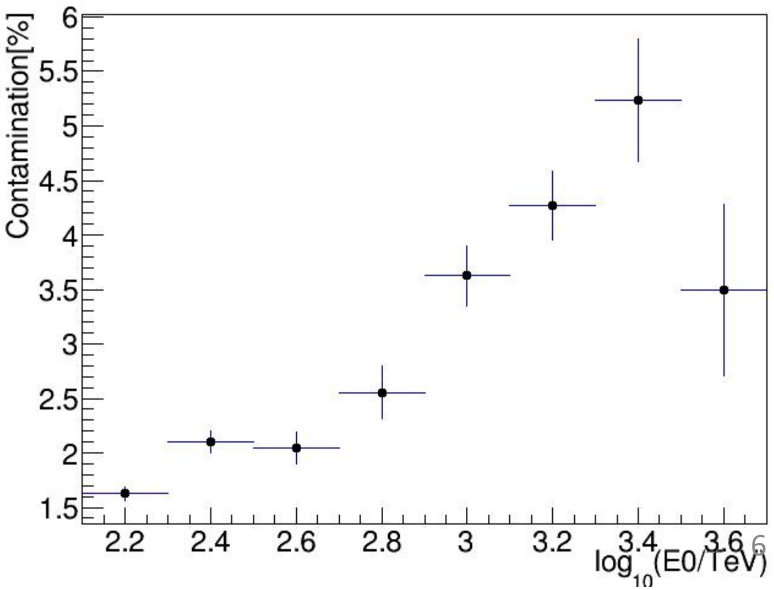
LHAASO物理目标之一：
精确测量宇宙线分成份能谱

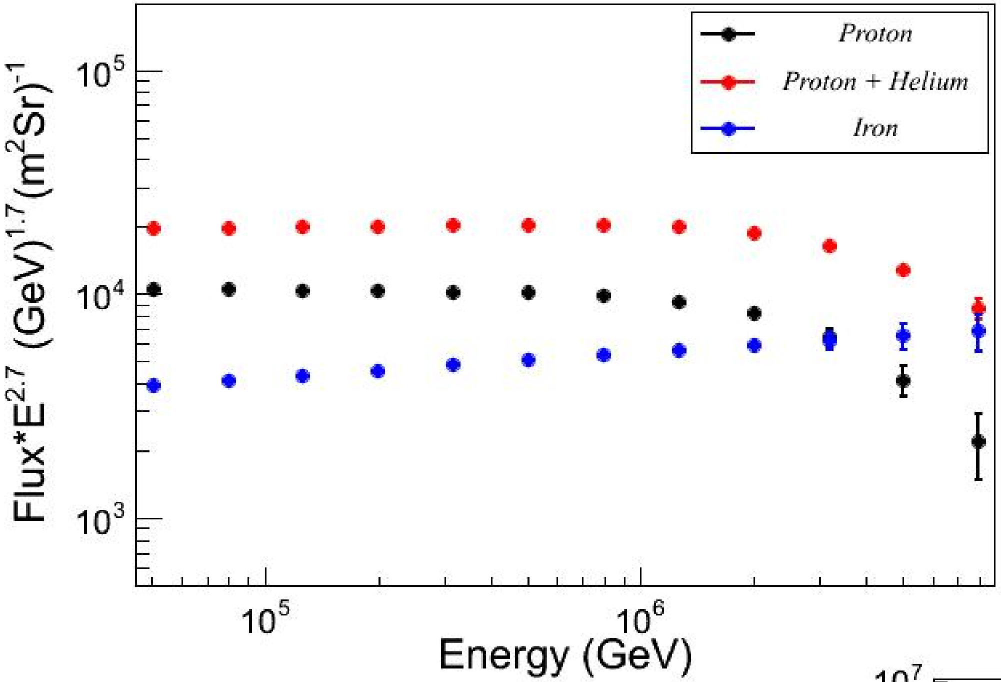
为了解决“膝”区物理面临的难题，就要**精确**测量宇宙线**分成份**能谱。

- 能标问题
  - 能量标定
  - **能量重建**
- 成分鉴别
  - LHAASO多参数分析，P_F，P_u，P_X，P_C
- 数据统计量
  - 以挑选质子+氦核为例

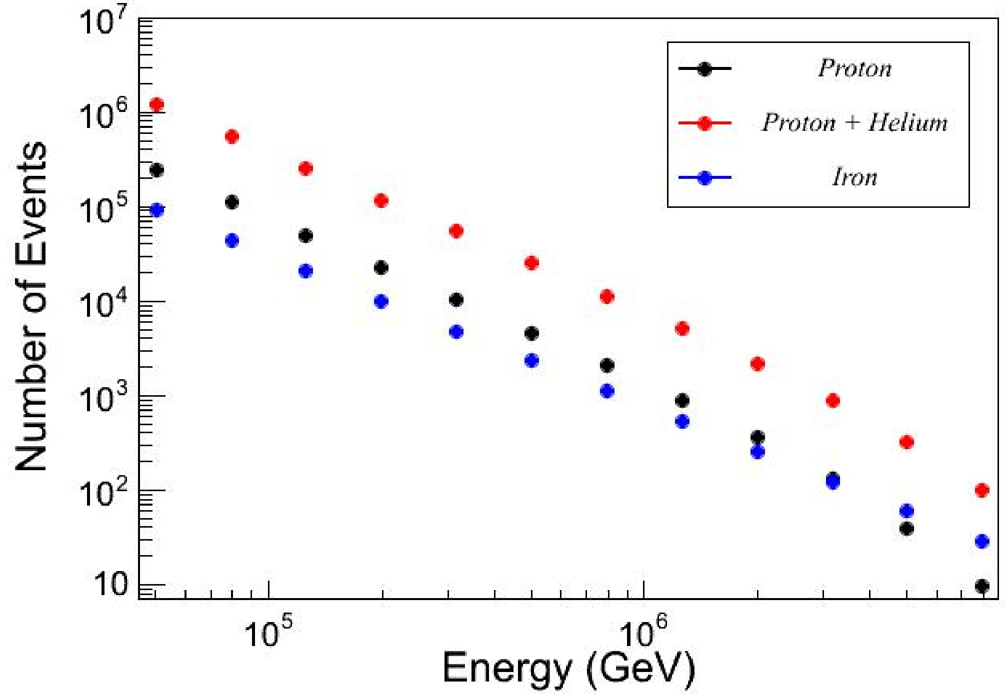






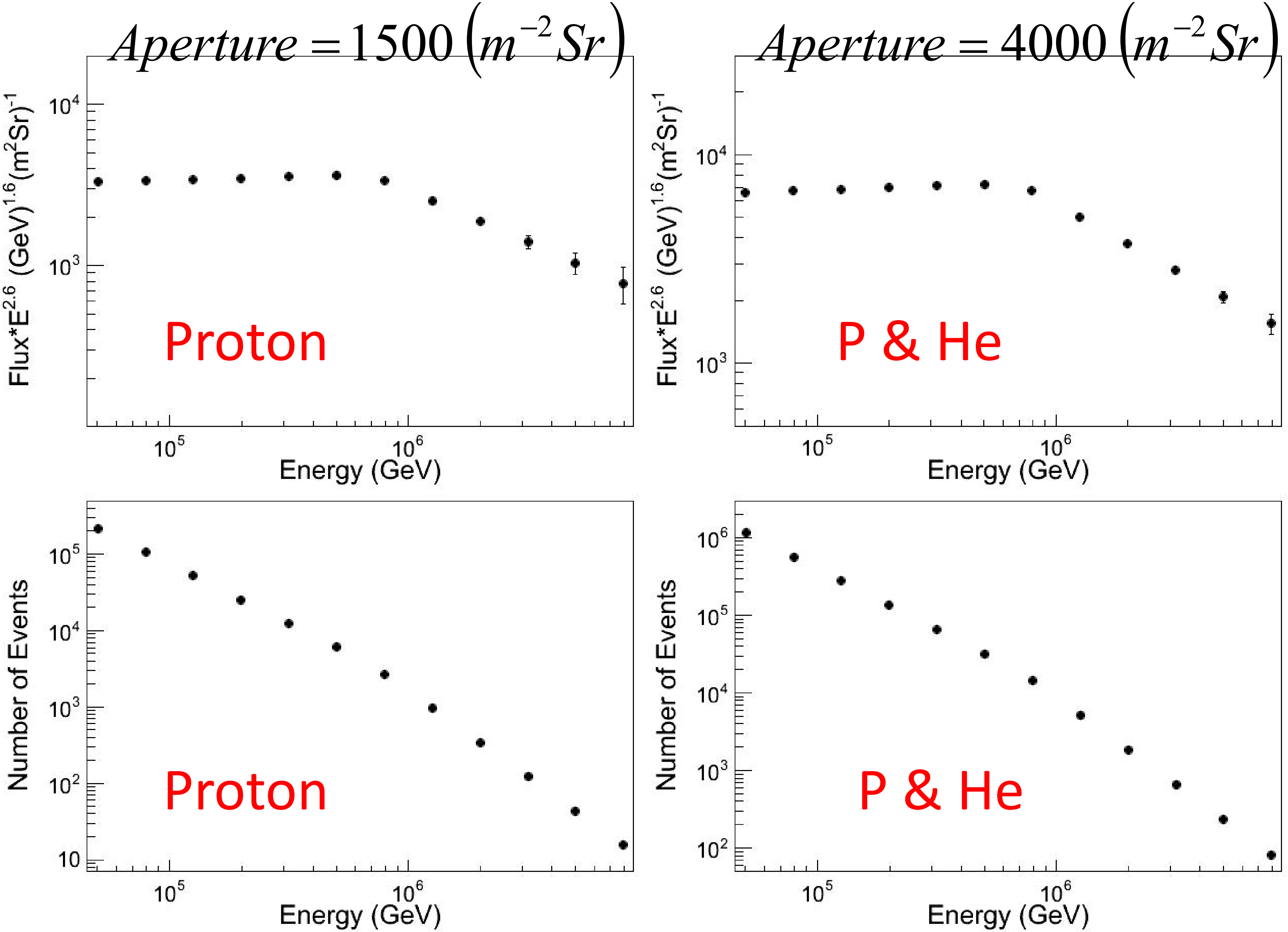


Horandel Model

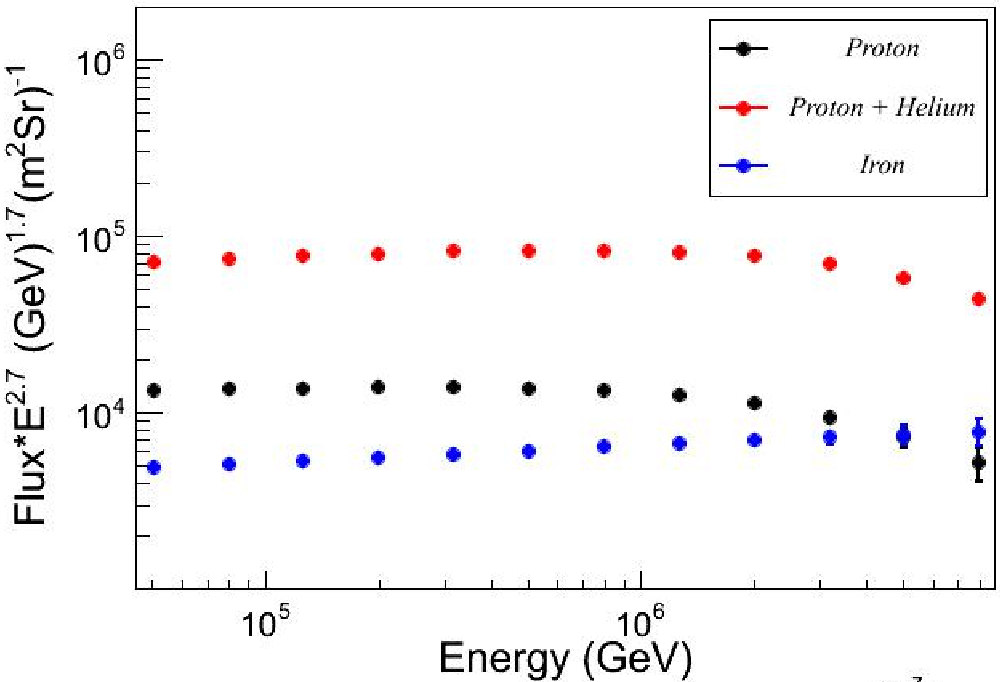


1年的统计量；
10%的duty circle；
12台望远镜。

ARGO - WFCTA

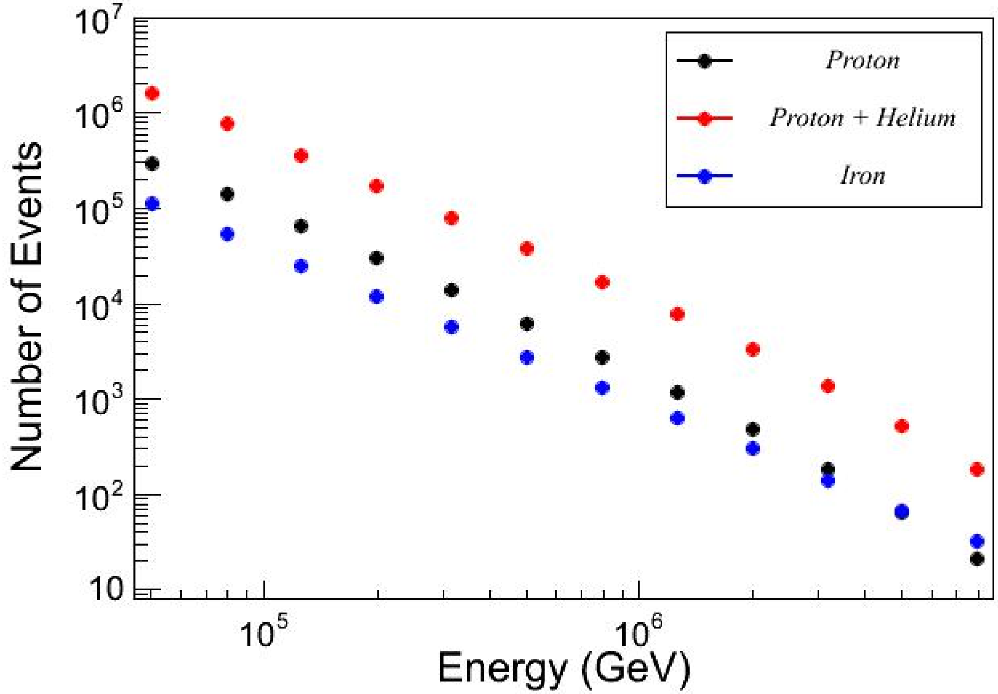


$Aperture = 1500 \left(m^{-2} Sr\right)$
$Aperture = 4000 \left(m^{-2} Sr\right)$
Flux*E^2.6 (GeV)^1.6 (m^2Sr)^-1
Energy (GeV)
Proton
P & He
Number of Events
Energy (GeV)
Proton
P & He



Flux*E^2.7 (GeV)^1.7 (m^2Sr)^-1
Energy (GeV)
Proton
Proton + Helium
Iron

H4A Model

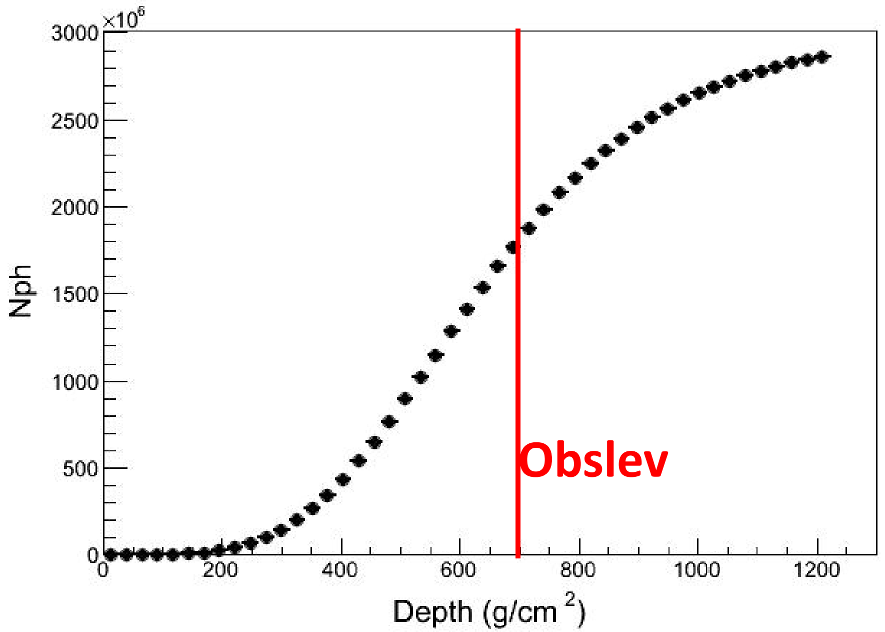


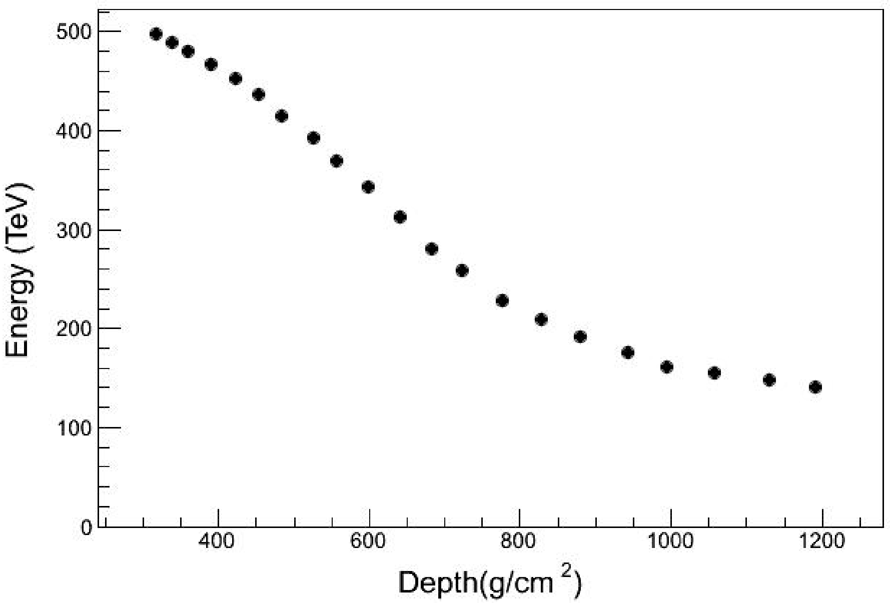
Number of Events
Energy (GeV)
Proton
Proton + Helium
Iron

能量重建

利用WFCTA探测到的光电子数和WCDA（或者KM2A）光电子数进行重建。

以500TeV的30度天顶角入射的质子为例，下图是200个质子事例的平均纵向分布。





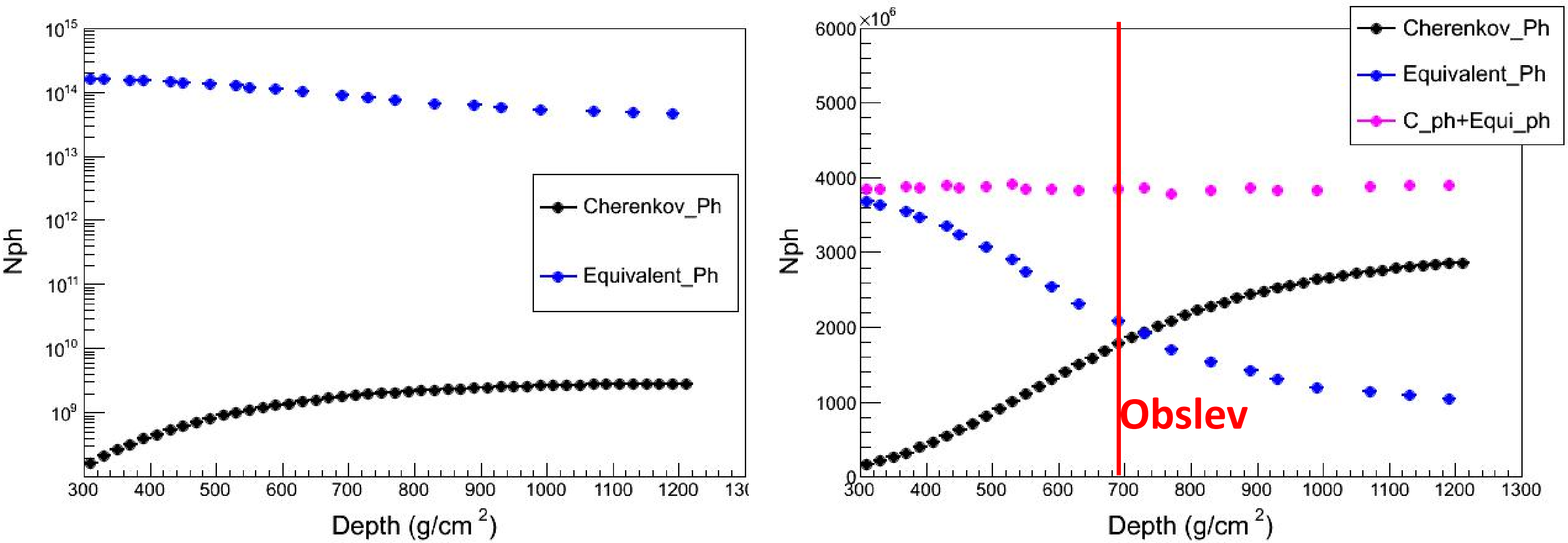
上图是Cherenkov光子的纵向分布图（左）和次级粒子在纵向能量沉积图（右）

将次级粒子能量转换为波长为400nm的光子数

$$E = \frac{hc}{\lambda} \qquad \lambda = 400\ nm$$

$$E = 3.102\ \ (eV)$$

通过调整次级粒子等效光子数的系数(4.34*10^-4)，可以使得总光子数与簇射发展的深度无关。这就是利用WFCTA和WCDA (KM2A)重建能量的出发点。



次级粒子等效光子数与Cherenkov光子数的纵向分布

WFCTA探测到的光子数： $N_0^{wfcta} = 10^{\log10(total\_c) + 0.00836*Rp + 0.01277*\alpha}$

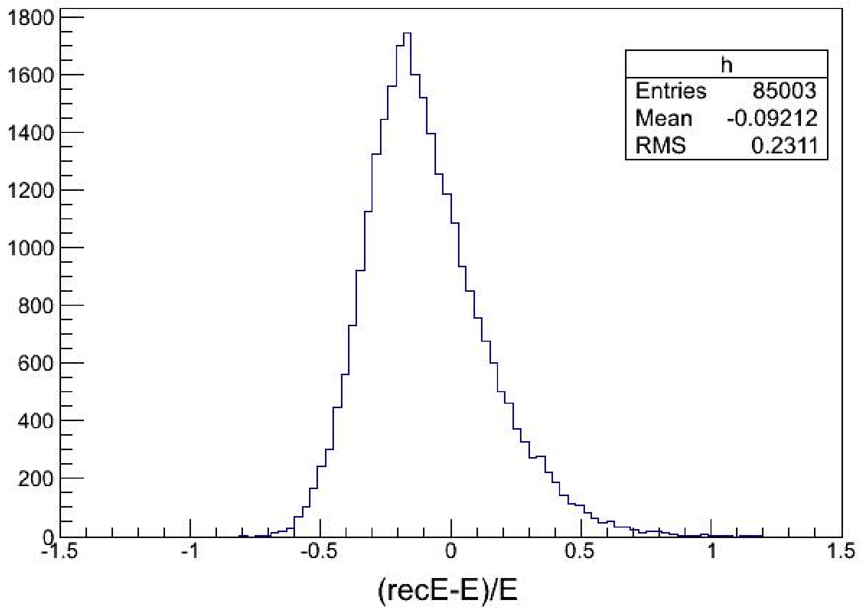
WCDA探测到的光子数： $N_0^{wcda} = total\_w$

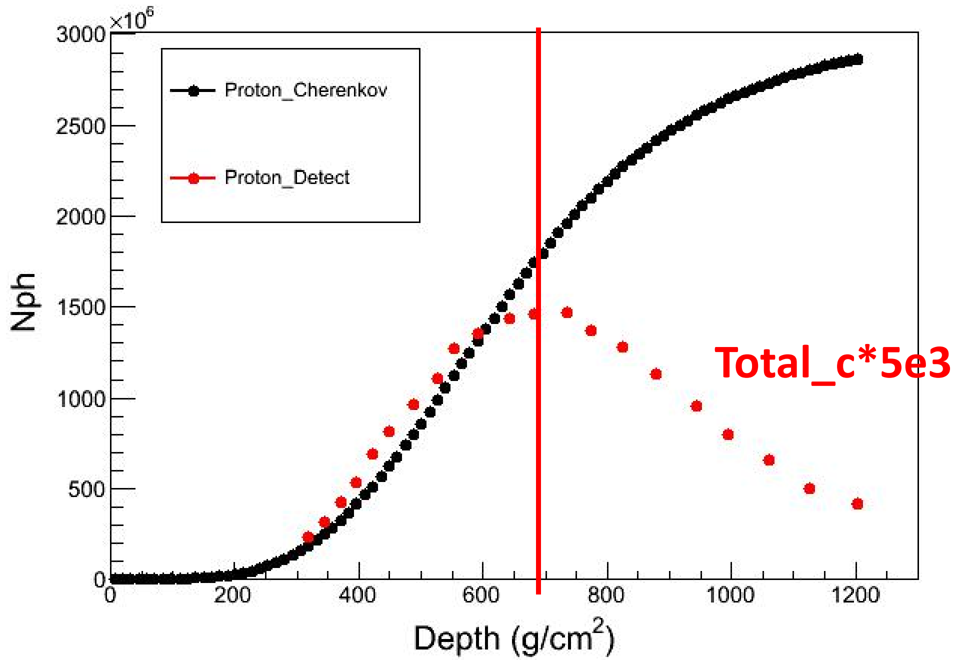
但探测器是取样测量的，需要将探测到的光子数进行修正：

$$N^{ph} = N_0^{wfcta} * \mathrm{k}_1 + N_0^{wcda} * k_2$$

利用修正后的总光子数进行能量重建：

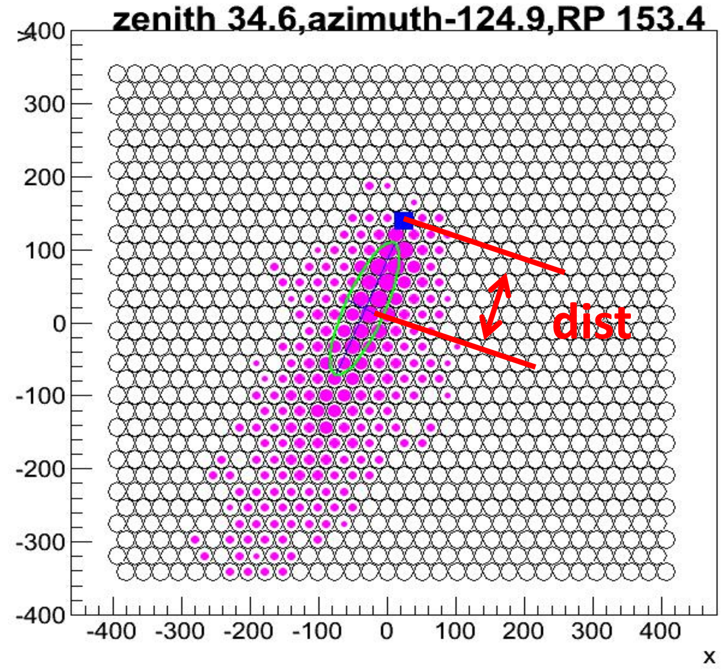
$$E_{rec} = 0.8956 * \log N^{ph} - 5.92704$$

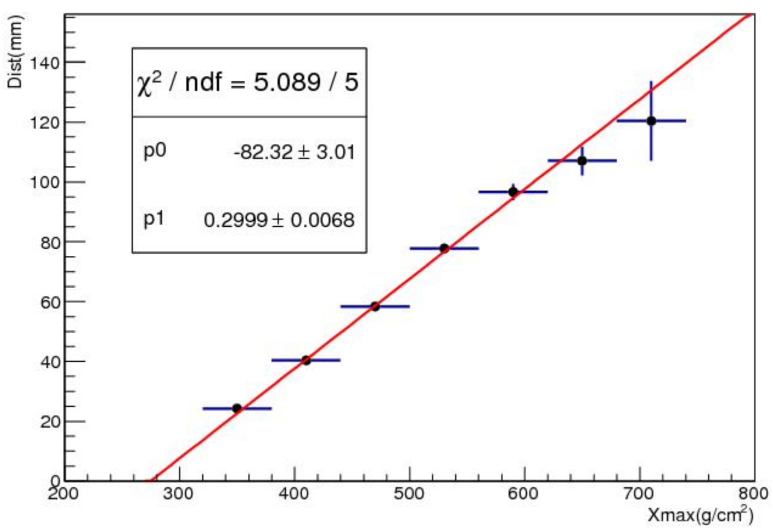


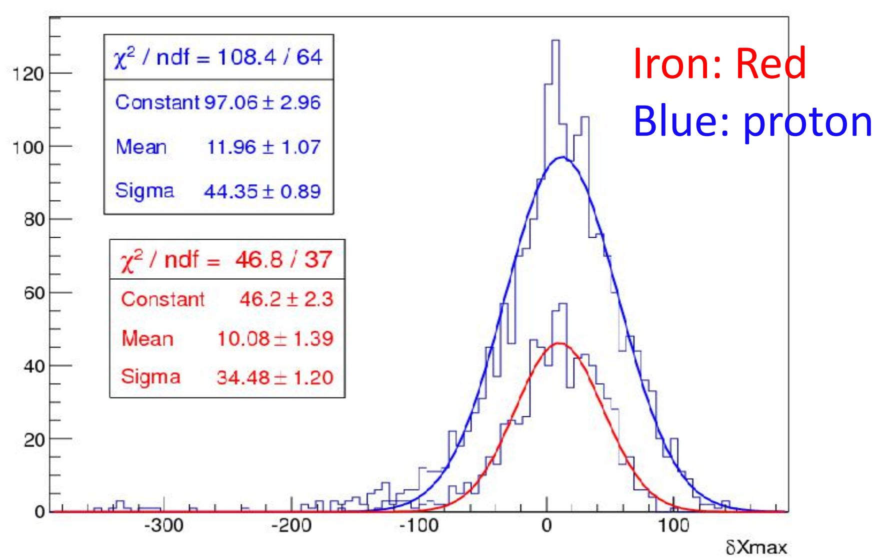


Xmax 重建

- 利用Distance变量进行Xmax的重建。
- Distance: 簇射到达的方向与像的质心直间的距离；并且与Rp相关。
- Xmax与Dist之间的关系如下式所述：
  - ((Dist-0.4868*Rp)+82.32)/0.2999







下一步工作

- 宇宙线粒子的能量重建精度取决于Xmax的重建精度。通过调研Xmax的重建方法，结合现有的模拟数据，提高Xmax的重建精度。
- 目前的研究都是在500TeV一个能量点下进行的，需扩展能量的研究范围。
- 系统误差的研究，主要是模型误差。
- 成分敏感参数的物理意义的研究。

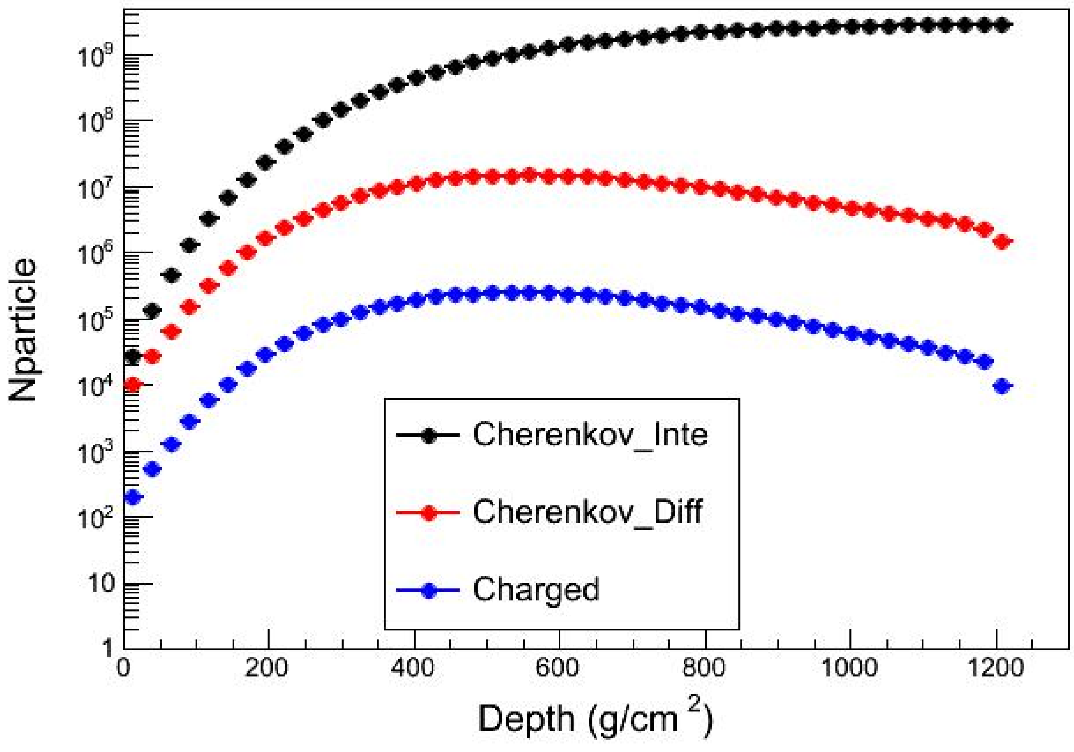
请各位老师同学批评指正！

谢谢！

当CORSIKA编译时，Cherenkov light vertical (longitudinal) distribution option:

1 – Photons counted only in the step where emitted

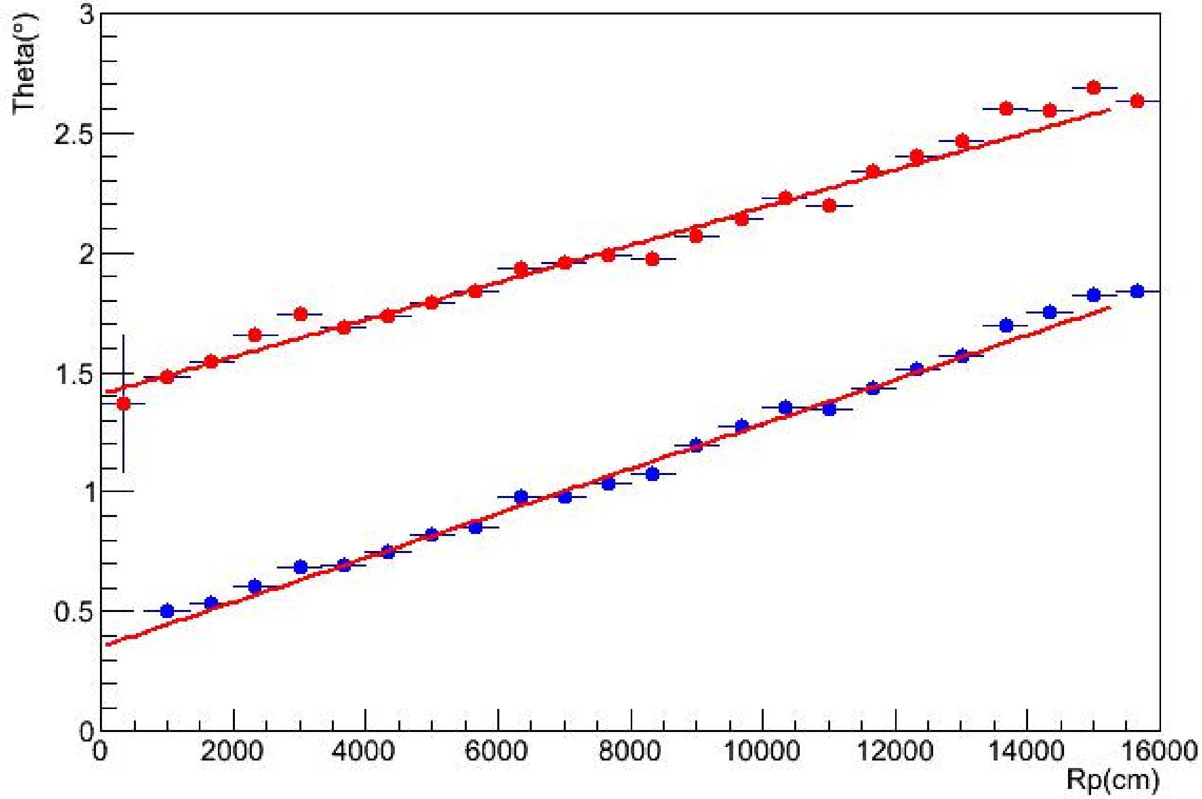
2 – Photons Counted in every step down to the observation level



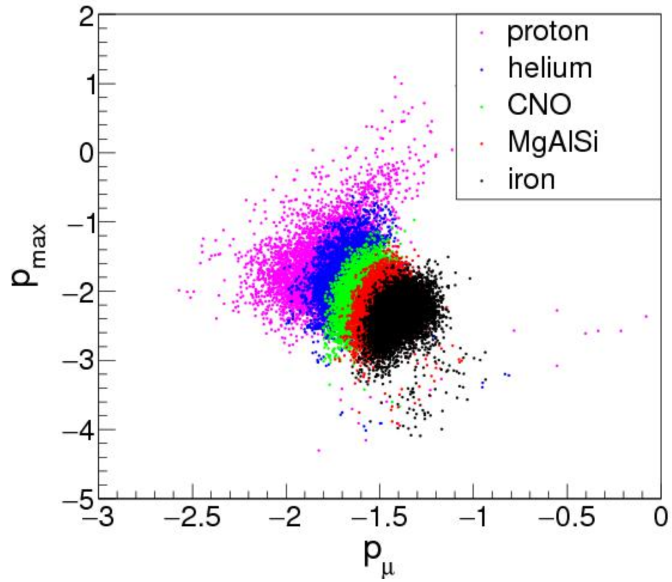
200个500TeV的质子事例的平均纵向分布，黑点是Cherenkov纵向发展，蓝点是带电粒子的纵向发展，红线是在某个大气深度下新产生C光，基本依赖与带电粒子的发展，是Cherenkov纵向分布的微分形式。

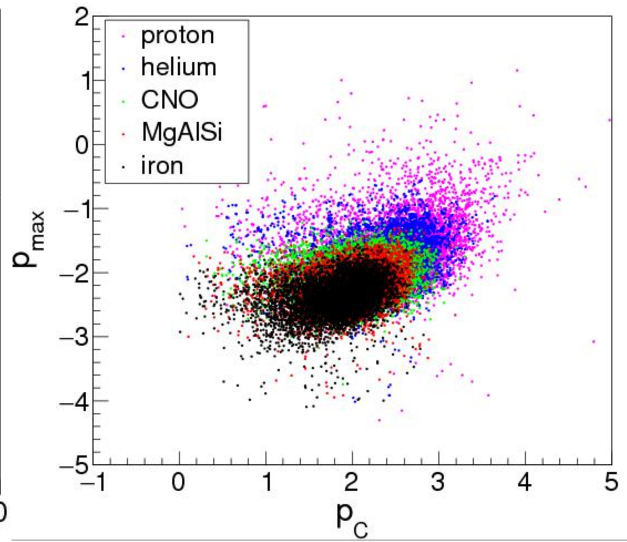
纵坐标theta是Cherenkov与簇射轴心方向的夹角；
横坐标R_p是探测器距簇射轴心的距离。

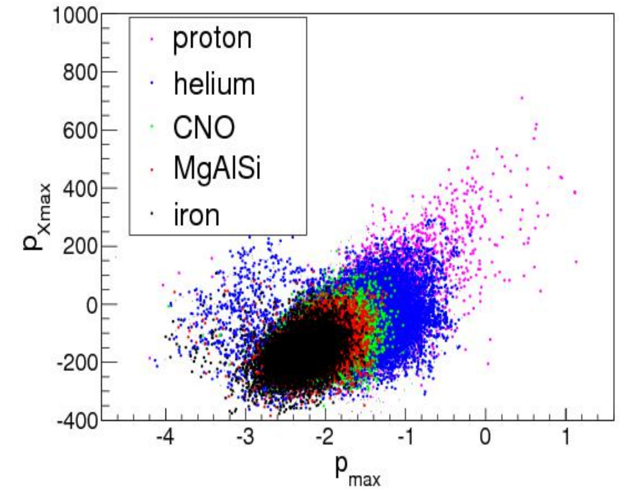
红线代表的是簇射整体的θ-Rp的分布；
蓝线代表的是簇射极大位置附近θ-Rp的分布，两者近似平行。

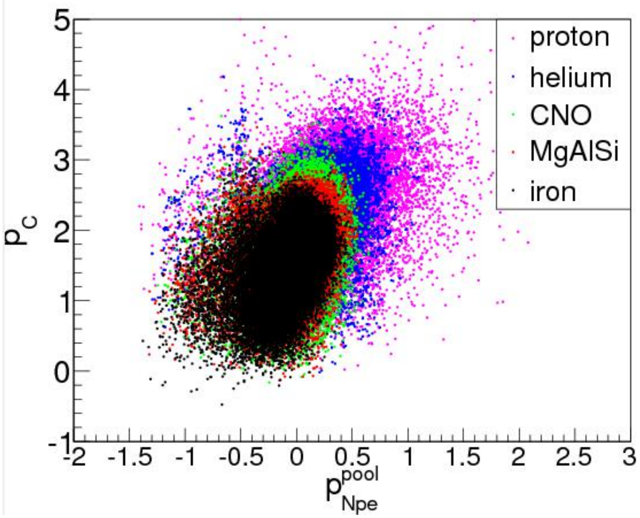


Mass sensitive parameter









$$p_{\mu} = N_{\mu} + 0.001 R_p - 0.86 log_{10} N_0^{pe}$$

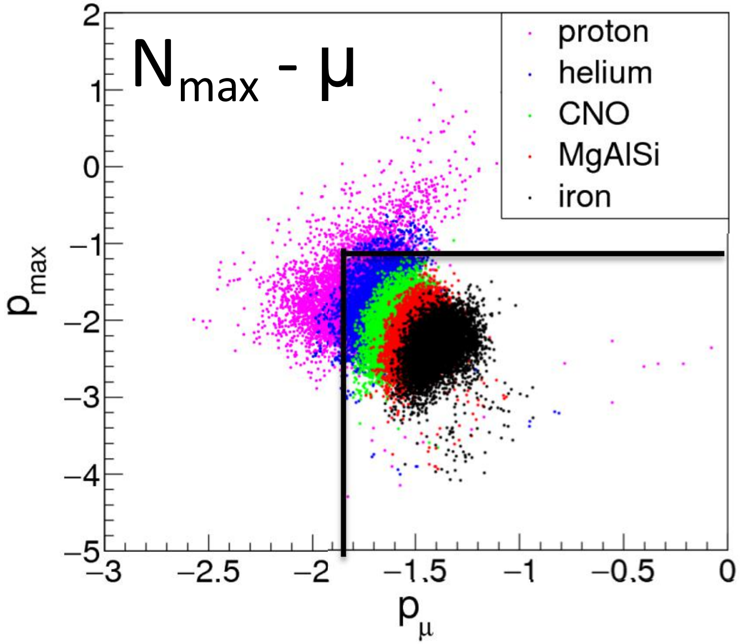
$$p_{max} = log_{10} N_{max} - 1.44 log_{10} N_0^{pe}$$

$$p_{Npe}^{pool} = log_{10} N_{pool}^{pe} - 1.18 log_{10} N_0^{pe}$$

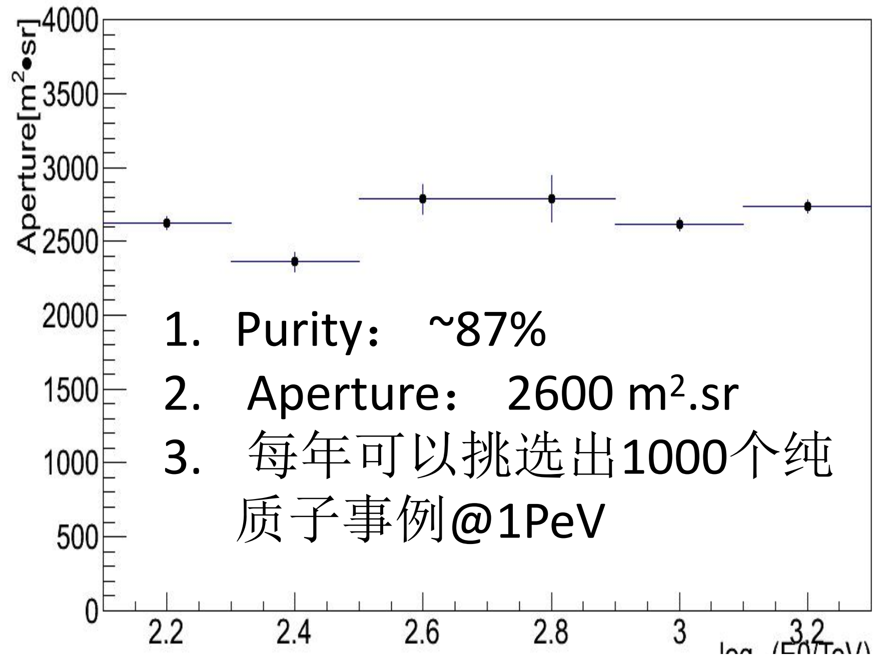
$$p_C = L/W - 0.018 R_p + 0.28 log_{10} N_0^{pe}$$

$$p_{xmax} = X_{max} - k log_{10} N_0^{pe}$$

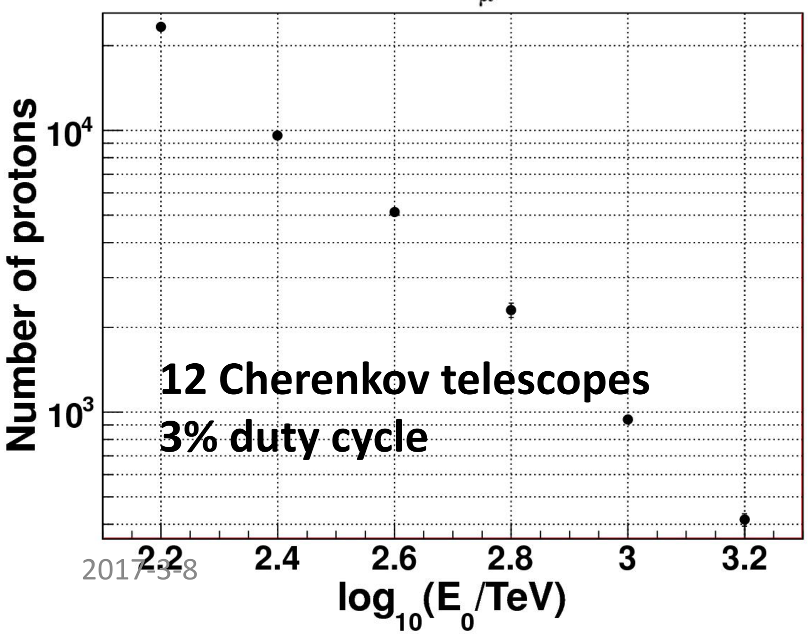
纯质子能谱测量预期



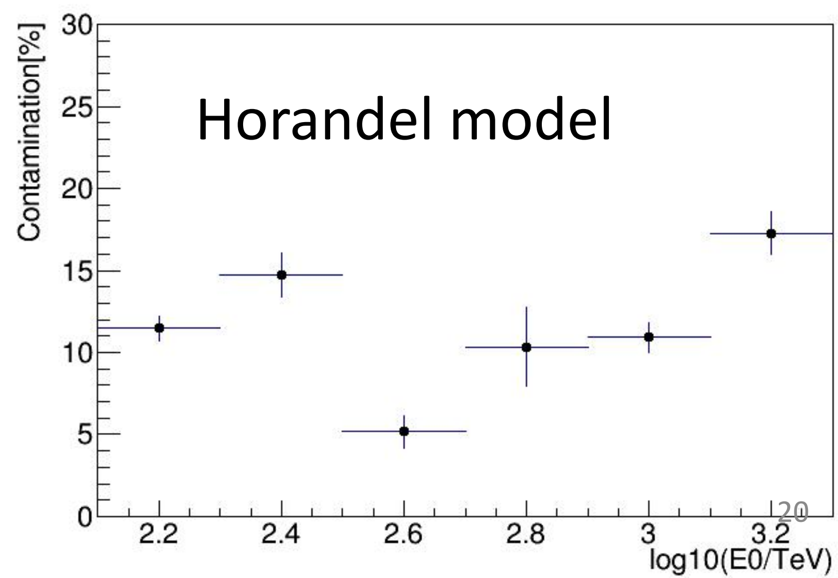
N_{max} - μ
proton
helium
CNO
MgAlSi
iron
p_{max}
p_{μ}



Aperture[m²•sr]
1. Purity： ~87%
2. Aperture： 2600 m².sr
3. 每年可以挑选出1000个纯质子事例@1PeV

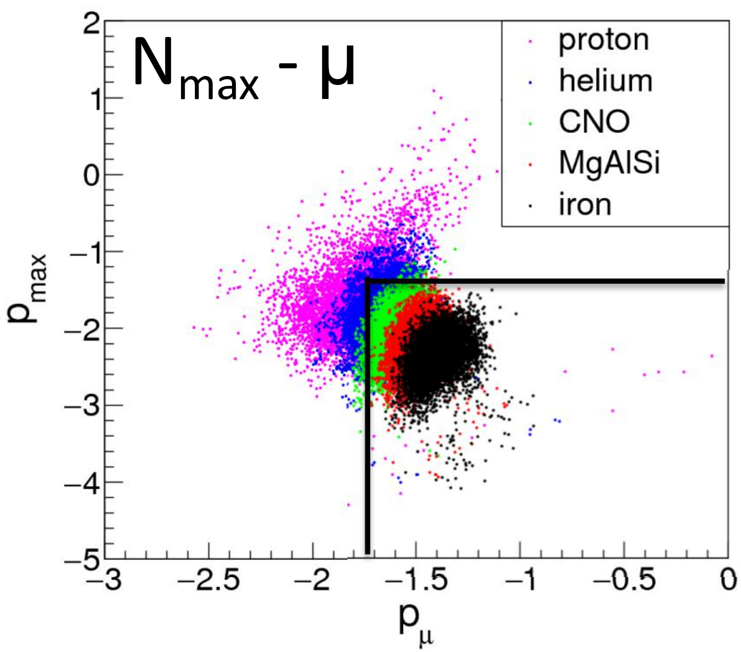


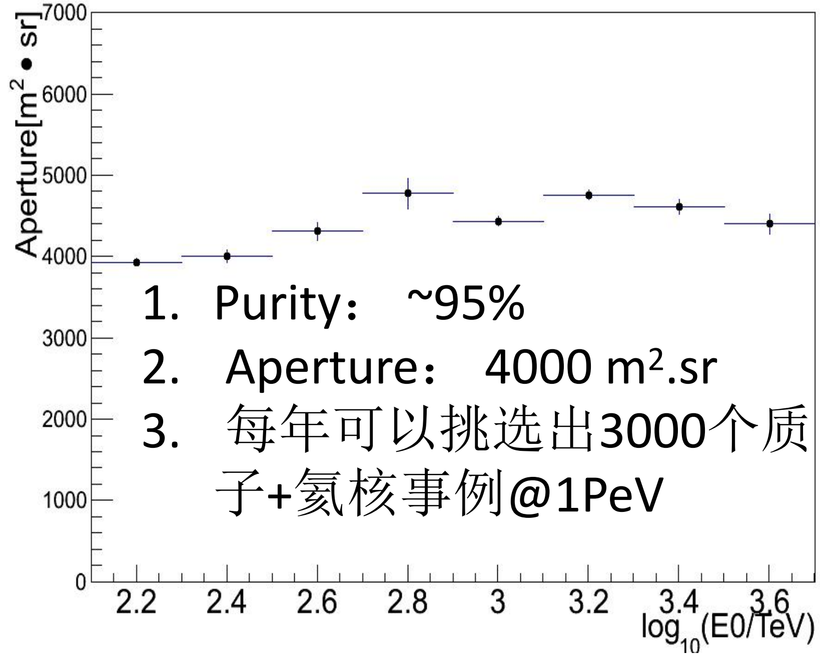
Number of protons
12 Cherenkov telescopes
3% duty cycle
$\log_{10}(E_0/TeV)$



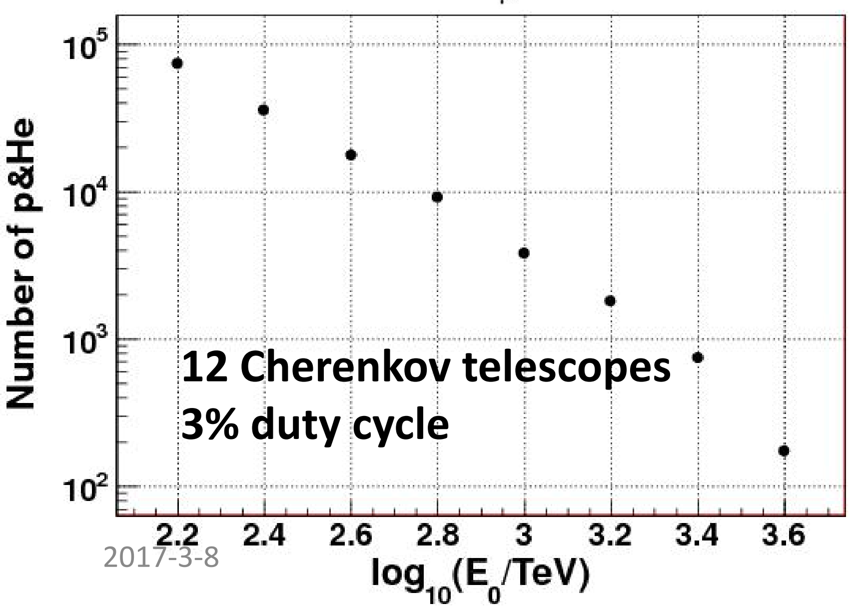
Contamination[%]
Horandel model
log10(E0/TeV)

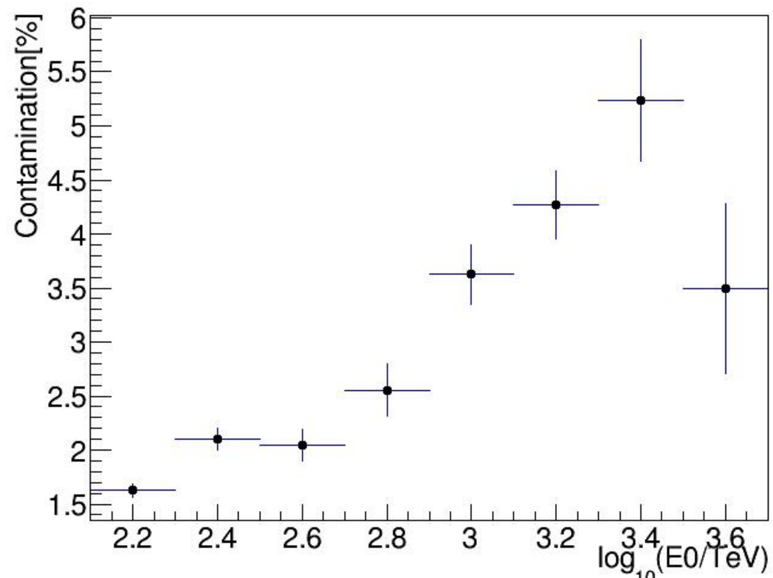
质子+氦核能谱测量预期



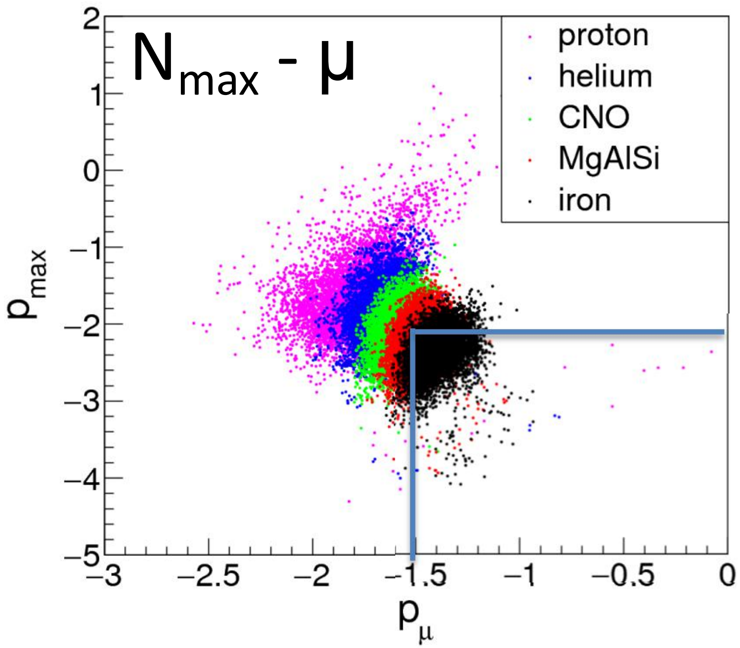


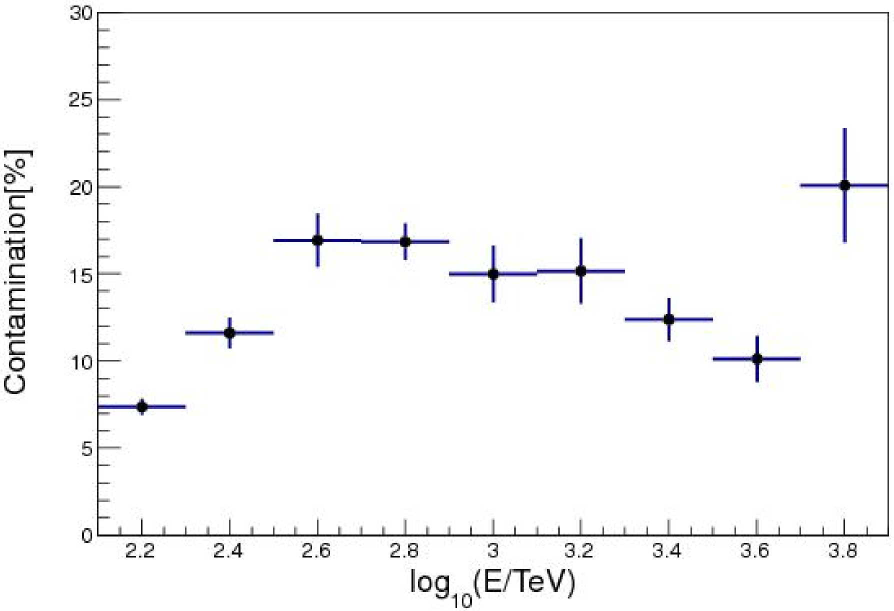
1. Purity： ~95%
2. Aperture： 4000 m².sr
3. 每年可以挑选出3000个质子+氦核事例@1PeV

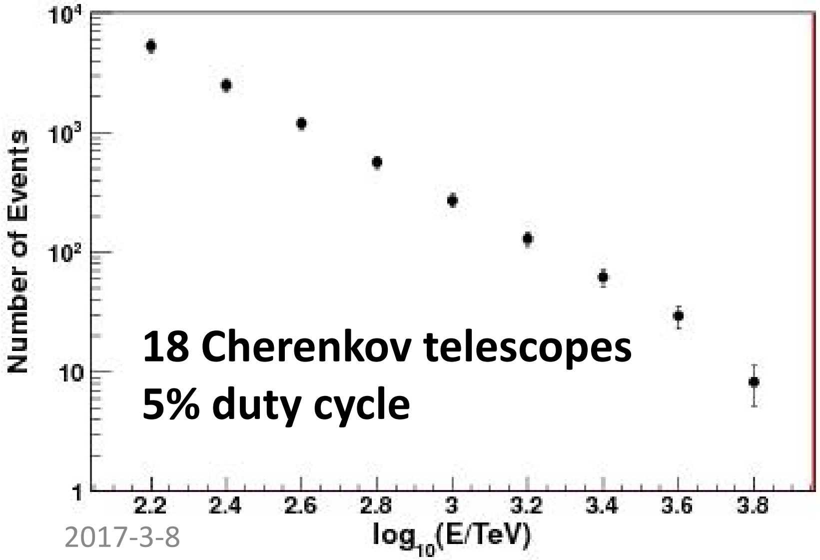




纯铁核能谱测量预期

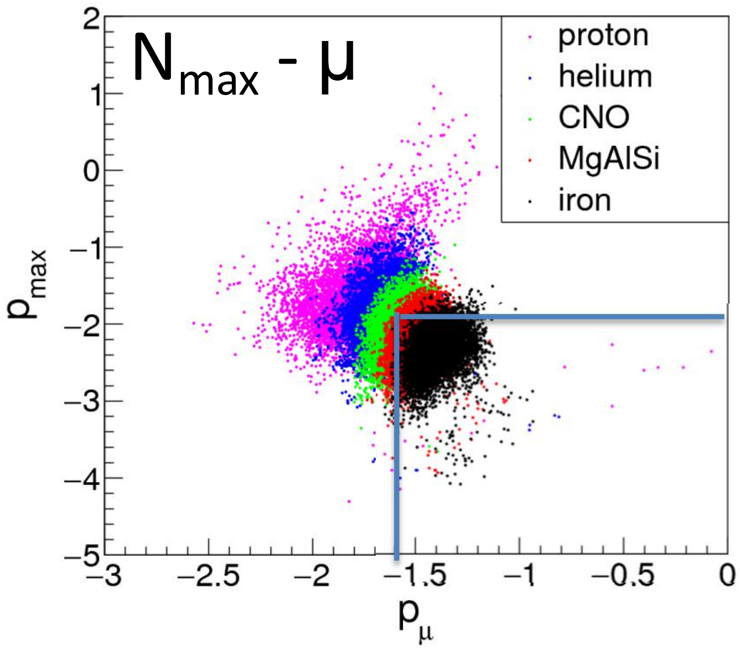


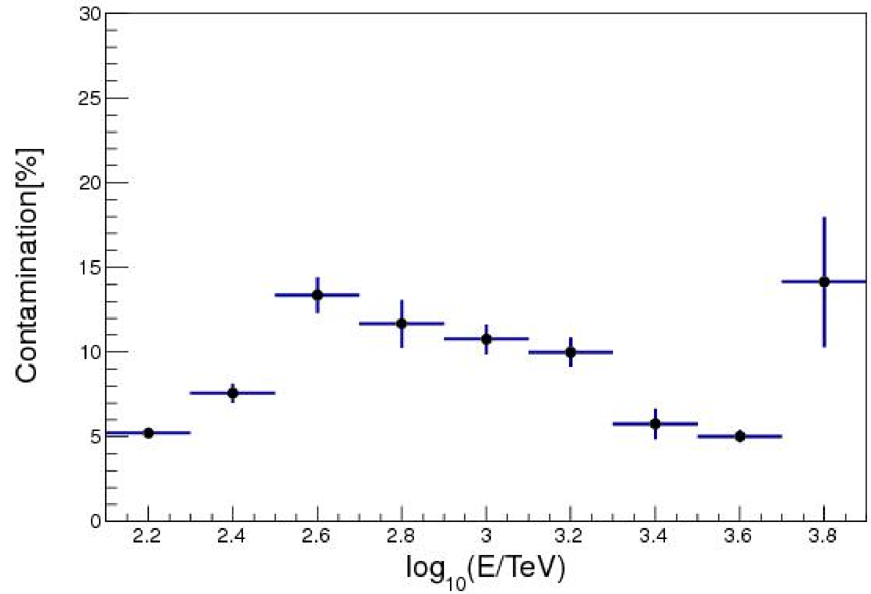


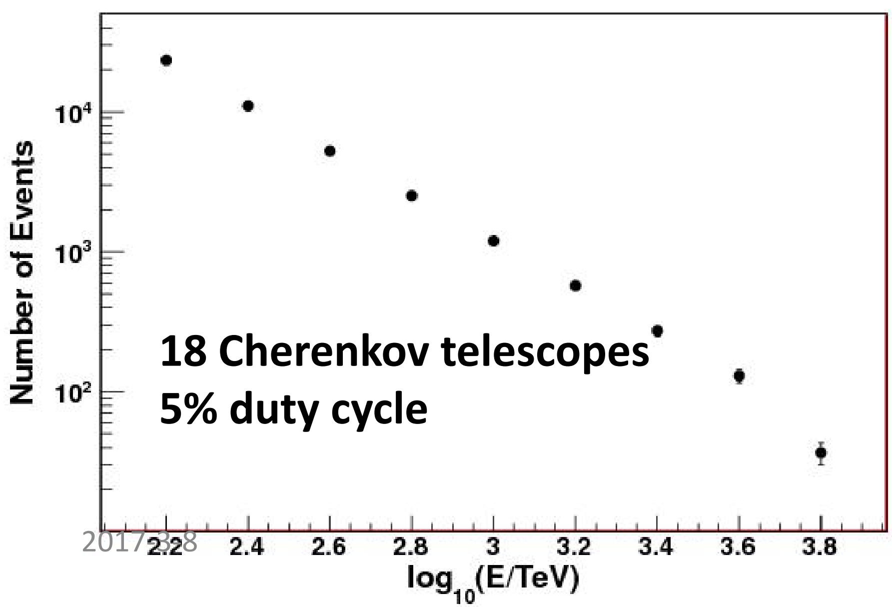


1. Purity： ~85%
2. Aperture： 600 m^2.sr
3. 每年可以挑选出270个纯铁核事例@1PeV

镁铝硅+铁核能谱测量预期







1. Purity： ~90%
2. Aperture： 1800 m^2.sr
3. 每年可以挑选出1200个镁铝硅+铁核事例@1PeV

附页

高能宇宙线的起源和加速机制仍然是迷

$$E_{max} = \beta ZeBL$$