

KM2A阵列及数据处理流程

陈松战

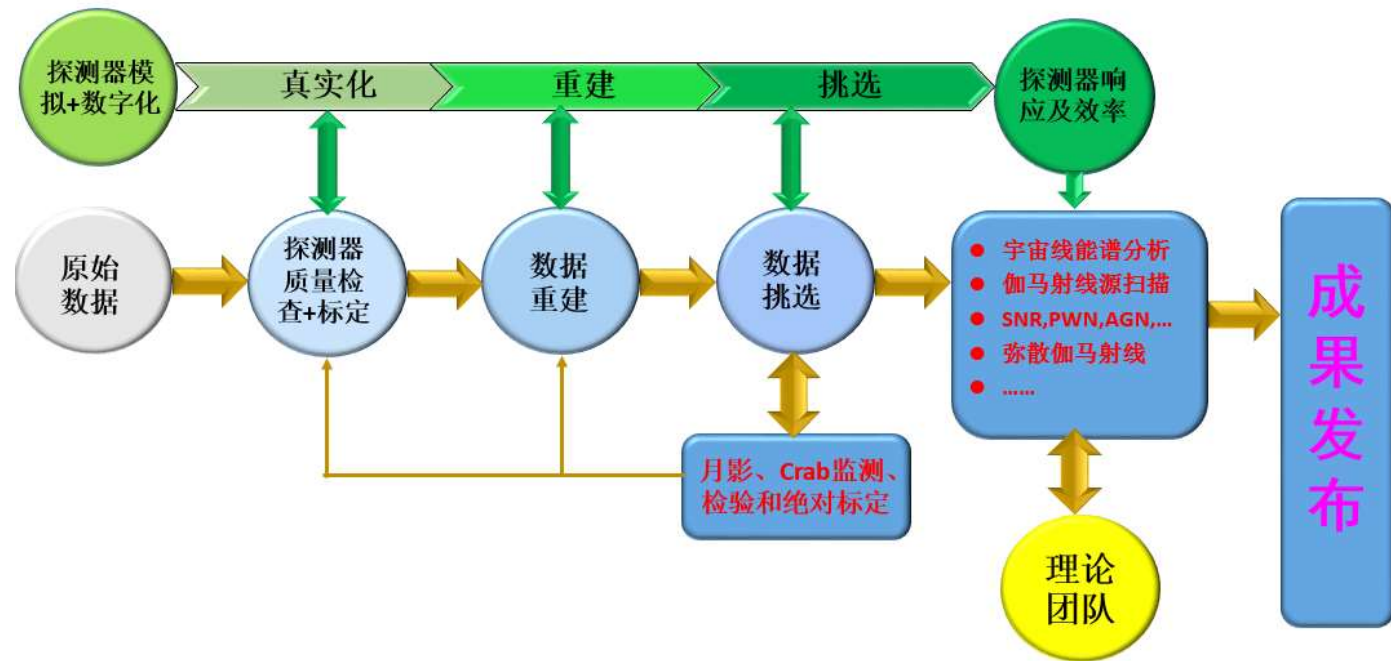
中国科学院高能物理研究所

2024.8.5@昆明云南大学



内容

- 一、KM2A探测器及阵列触发
- 二、KM2A探测器的标定
- 三、KM2A数据的重建
- 四、KM2A探测器的模拟
- 五、KM2A数据的质量监测
- 六、伽马天文背景估计



一、KM2A探测器及阵列触发

参考文献:

探测器文章: Ma et.al., Chapter 1 LHAASO Instruments and Detector technology, Chinese Phys. C, 46:030001(2022)

触发研究文章: Wu et.al., Study of the trigger mode of LHAASO-KM2A, Astroparticle Physics 103 (2018) 41–48

探测器模拟文章: LHAASO coll., LHAASO-KM2A detector simulation using Geant4, Radiation Detection Technology and Methods, <https://doi.org/10.1007/s41605-024-00467-8>

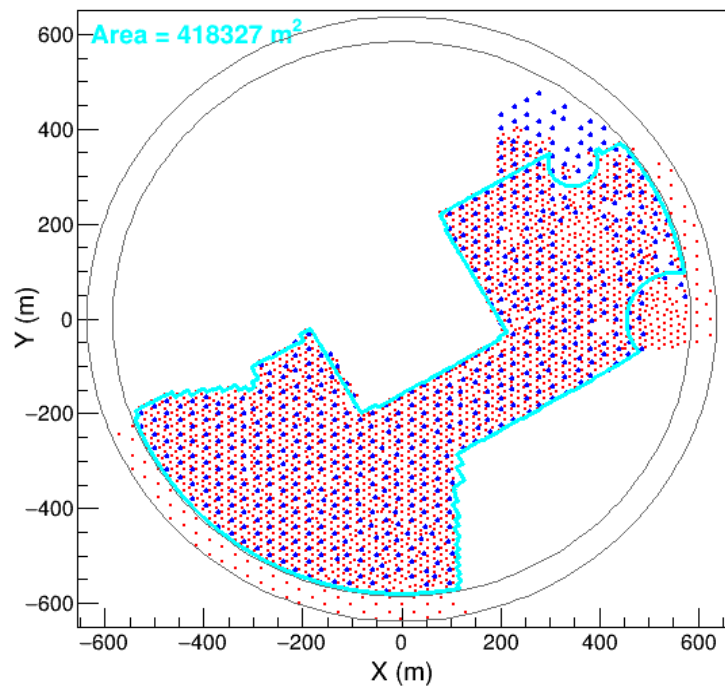
KM2A阵列

1/2 KM2A

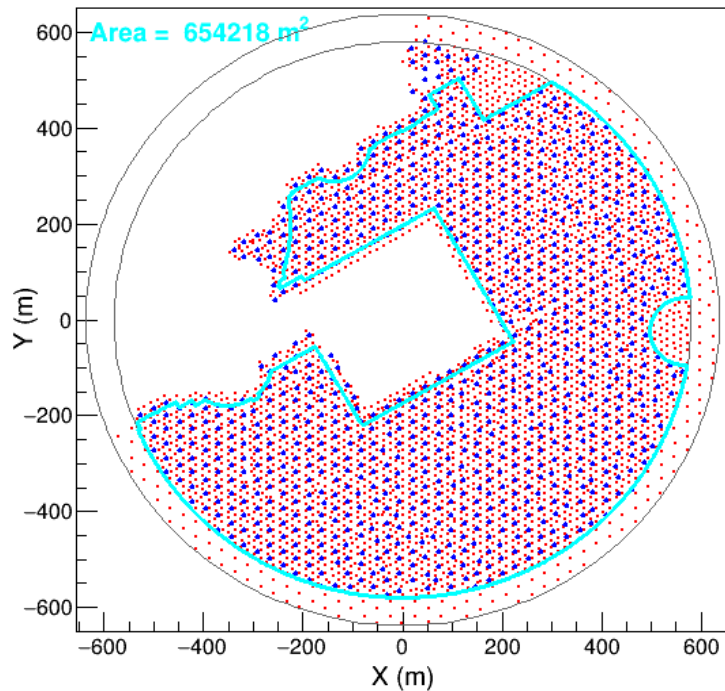
3/4 KM2A

Full-KM2A

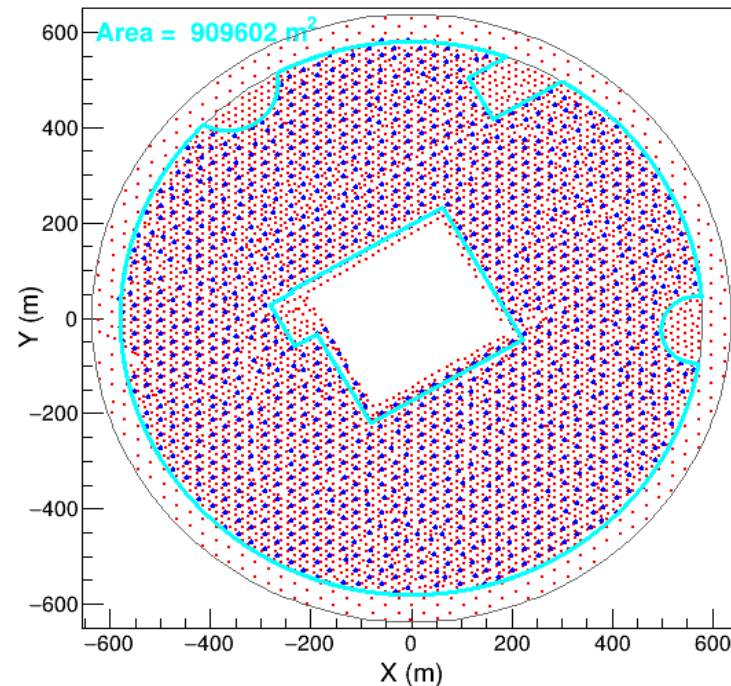
1/2 LHAASO Layout: 2365 EDs + 578 MDs



3/4 LHAASO-KM2A Layout: 3978 EDs + 917 MDs



LHAASO-KM2A Layout: 5249 EDs + 1188 MDs



2019-12-27至2020-11-30

2020-12-01至2021-07-19

2021-07-20至今

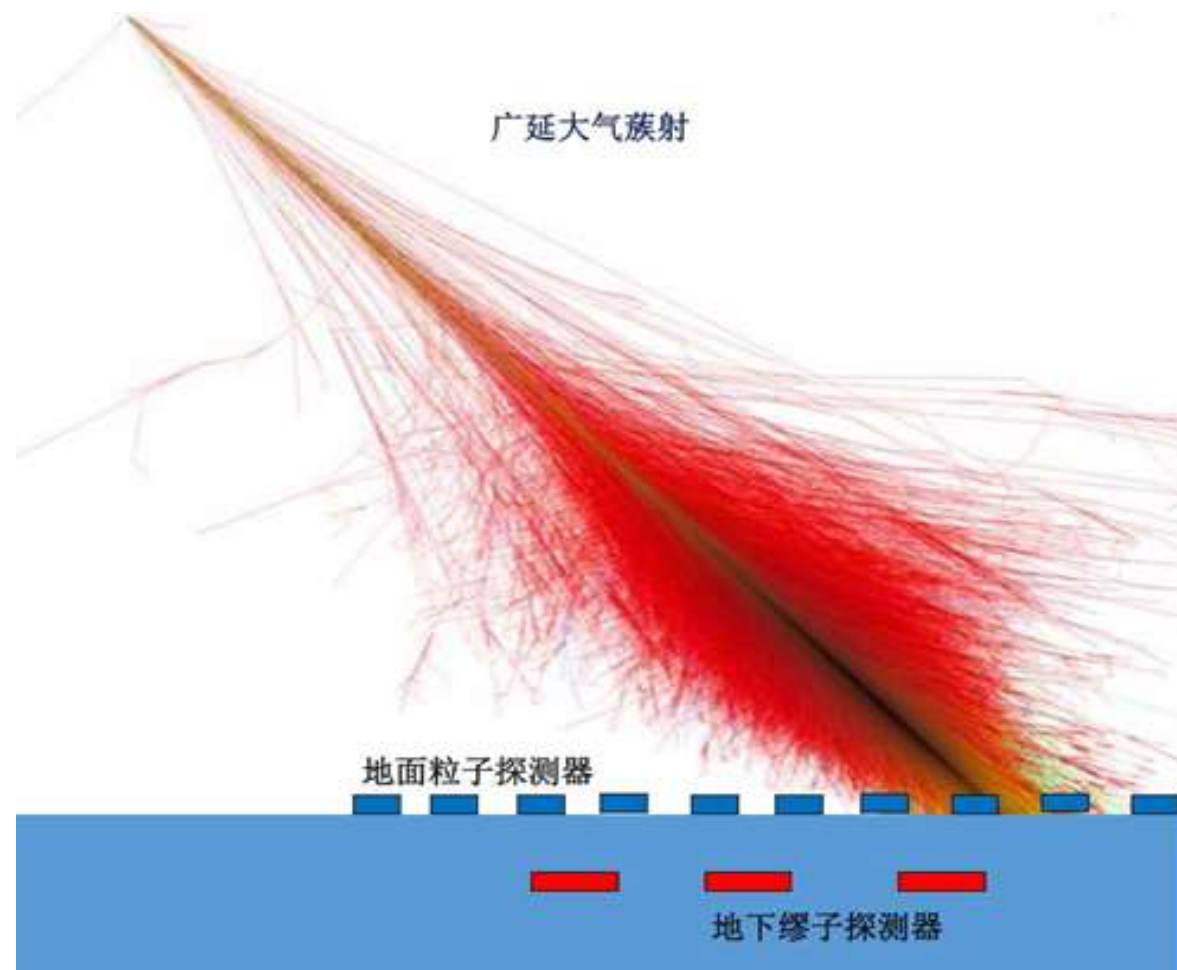
KM2A对簇射事例的测量原理

■ ED阵列

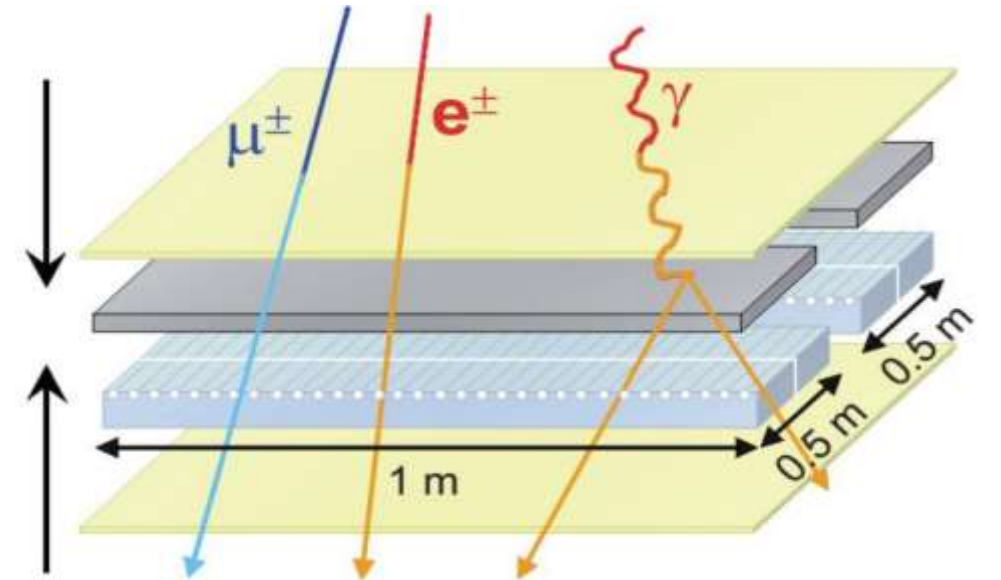
- 测量簇射事例方向、芯位、能量

■ MD阵列

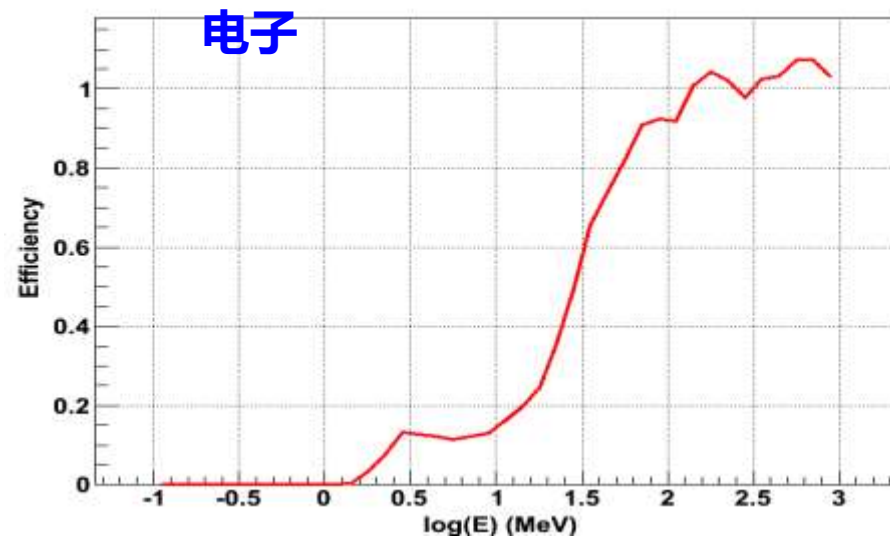
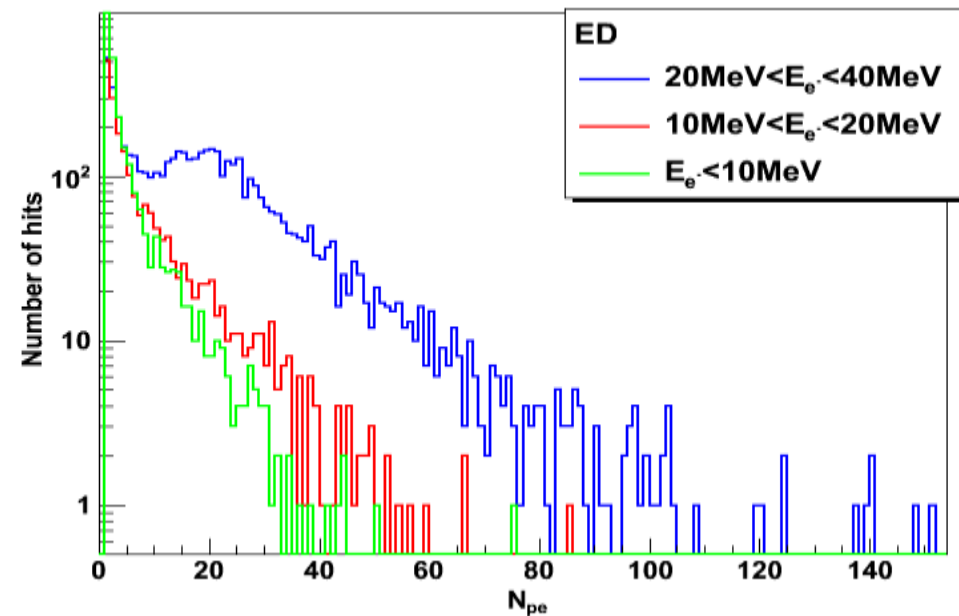
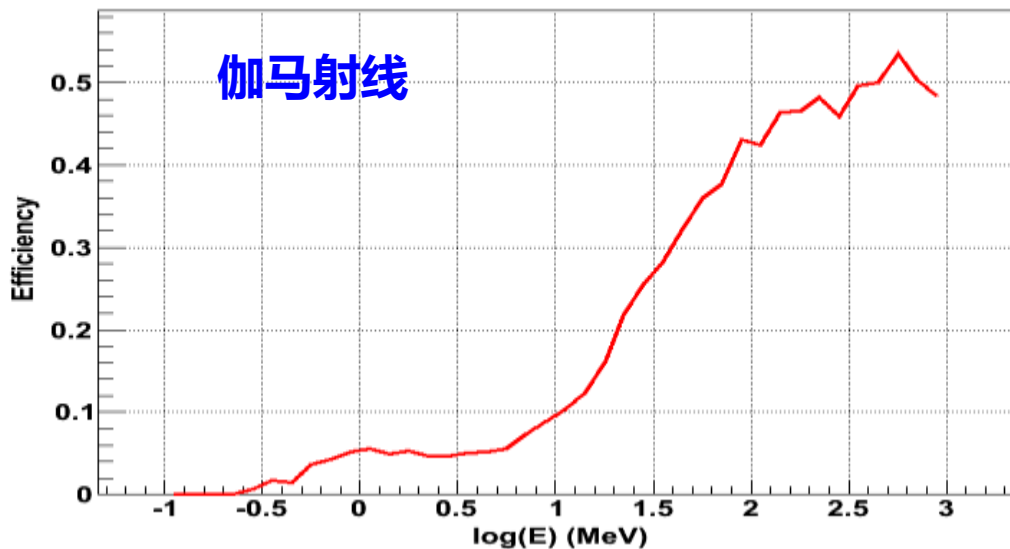
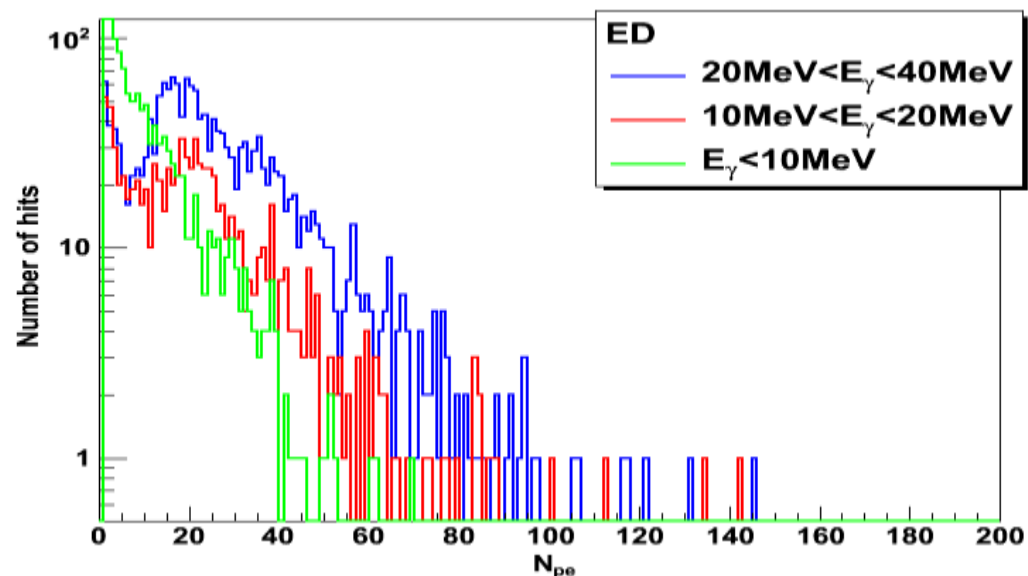
- 测量簇射事例缪子含量



ED探测器及探测原理

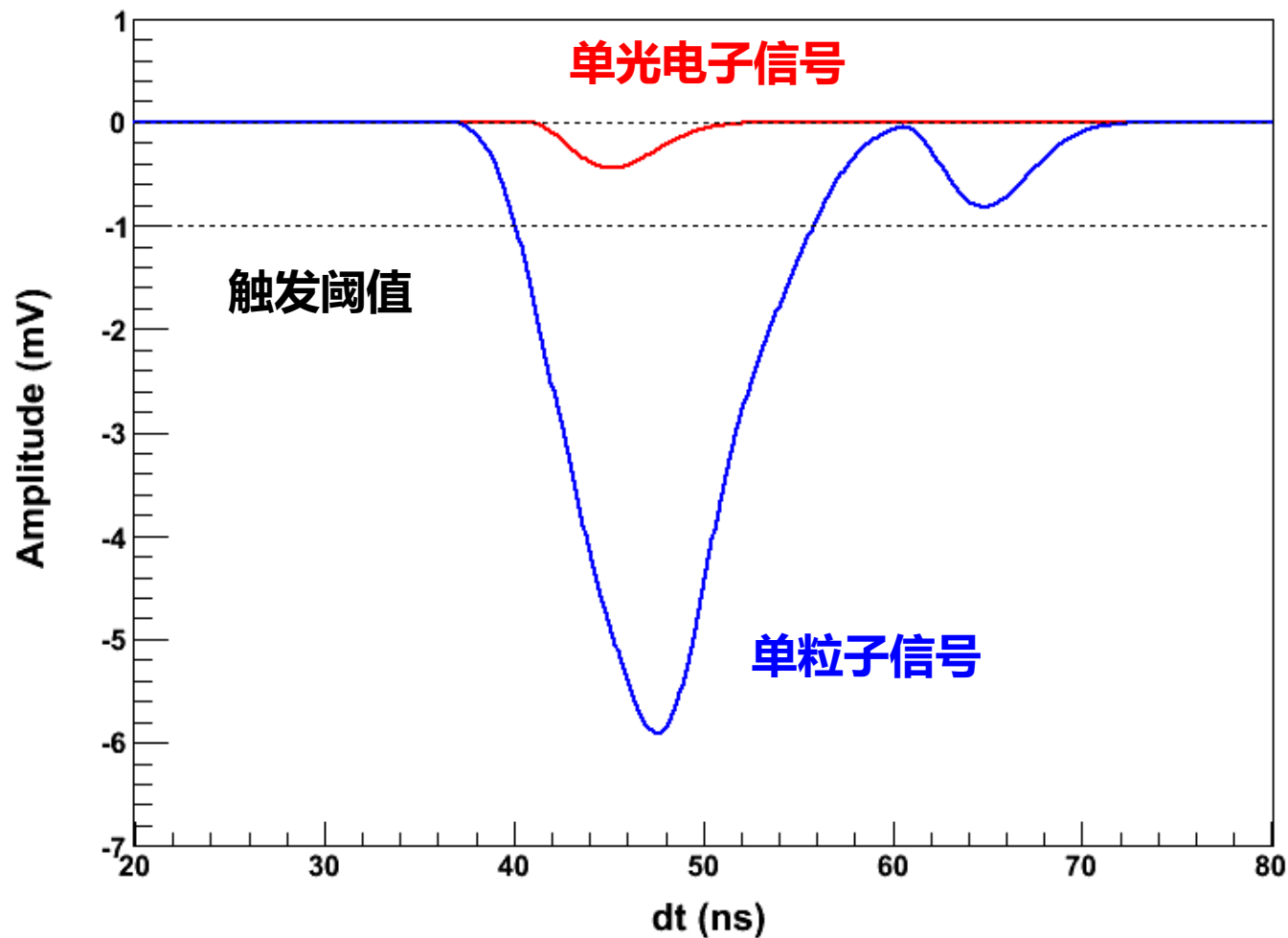


不同能量粒子到达PMT后产生的光电子数

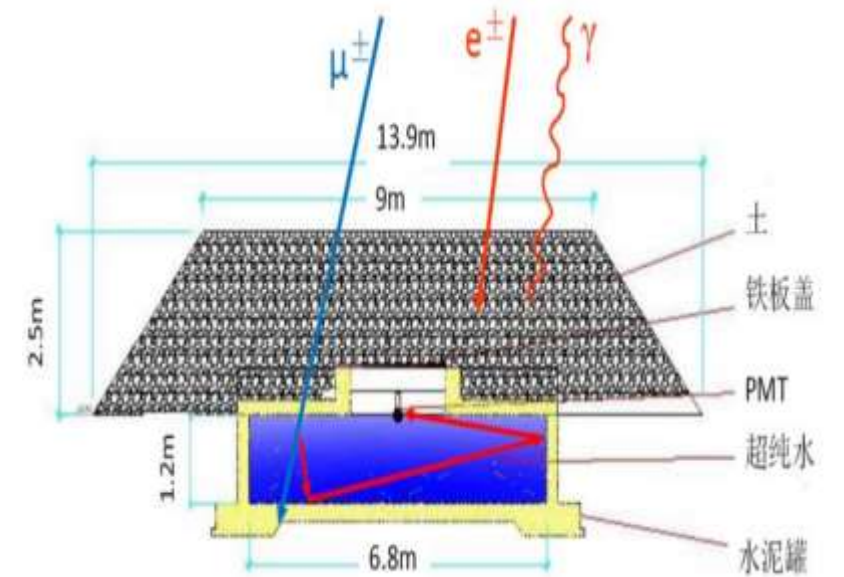


ED的PMT电信号

- 触发率: 1-2kHz
- 时间分辨率: 2ns
- 单粒子分辨25%
- 测量范围: 1-10000粒子
- 记录ADC和TDC信号



MD探测器及探测原理



MD探测器

触发率：6-8kHz

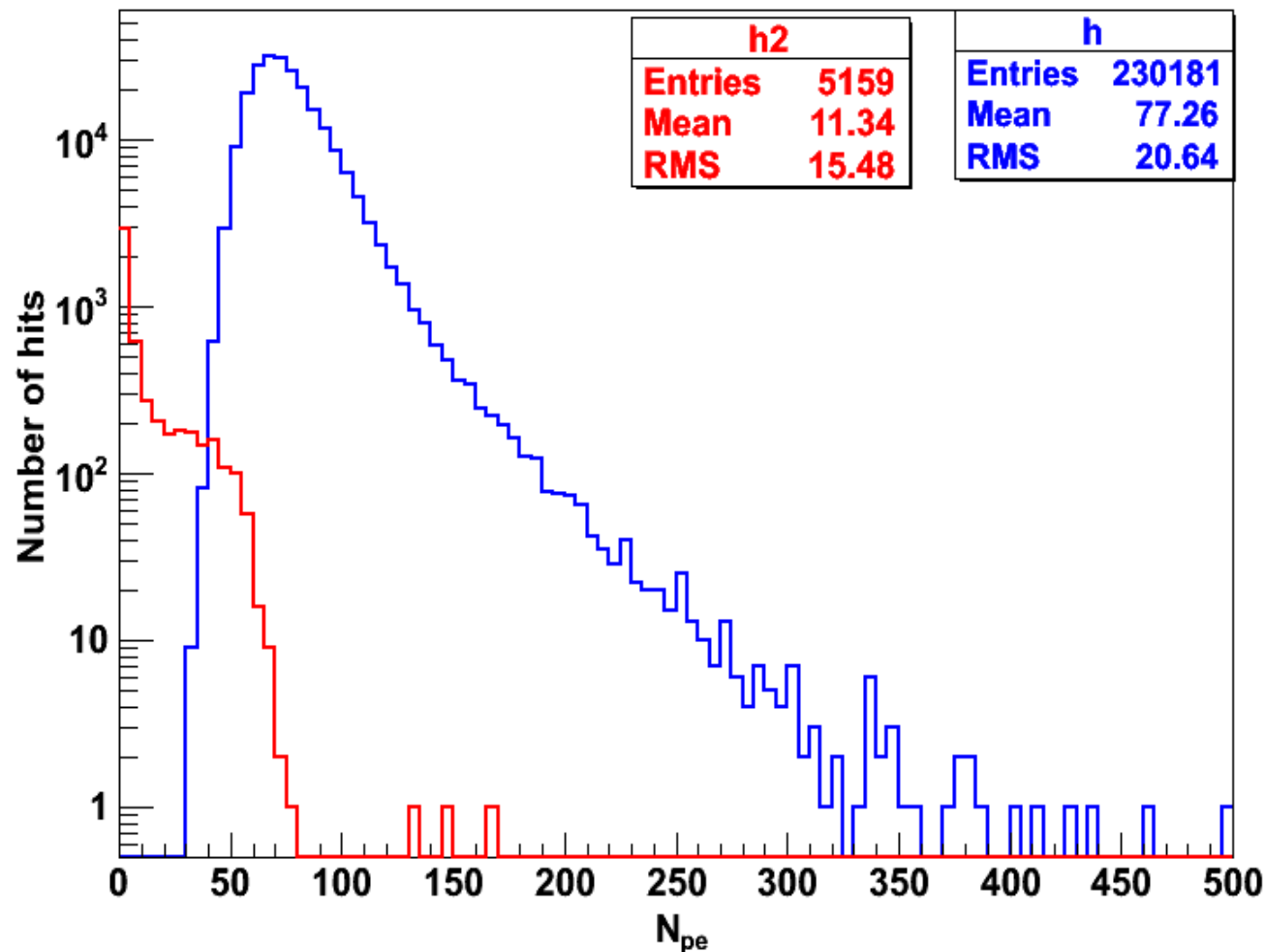
间分辨率：10ns

单粒子分辨：25%

测量范围：1-10000粒子

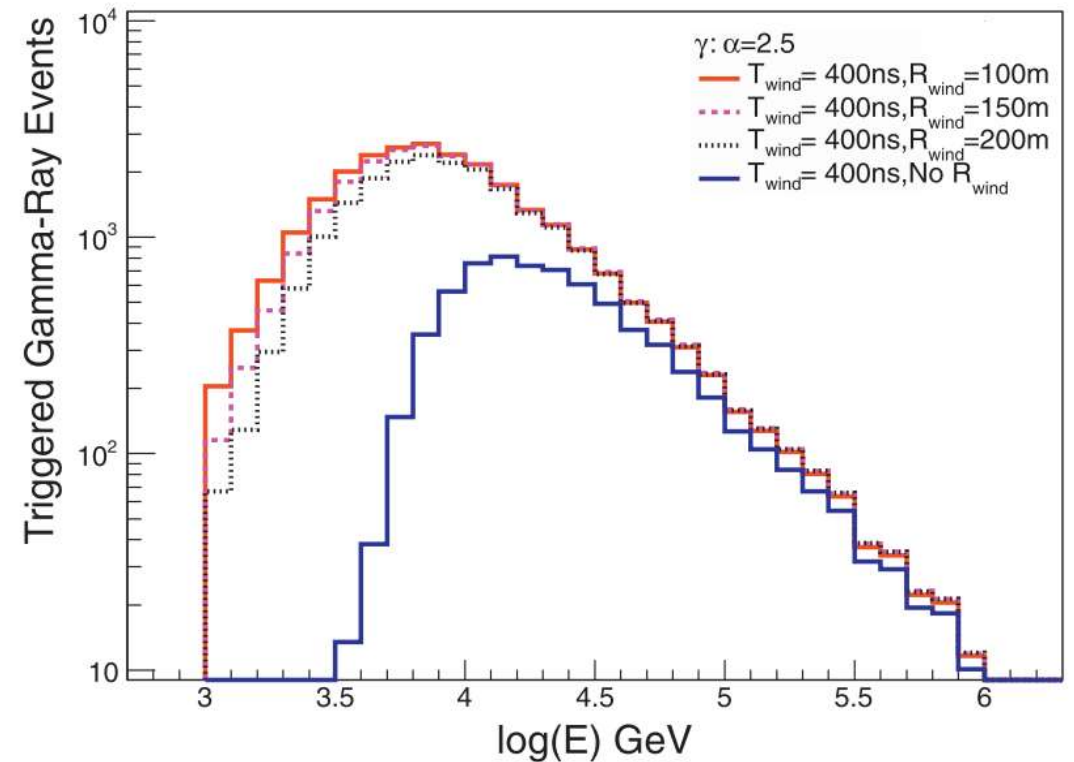
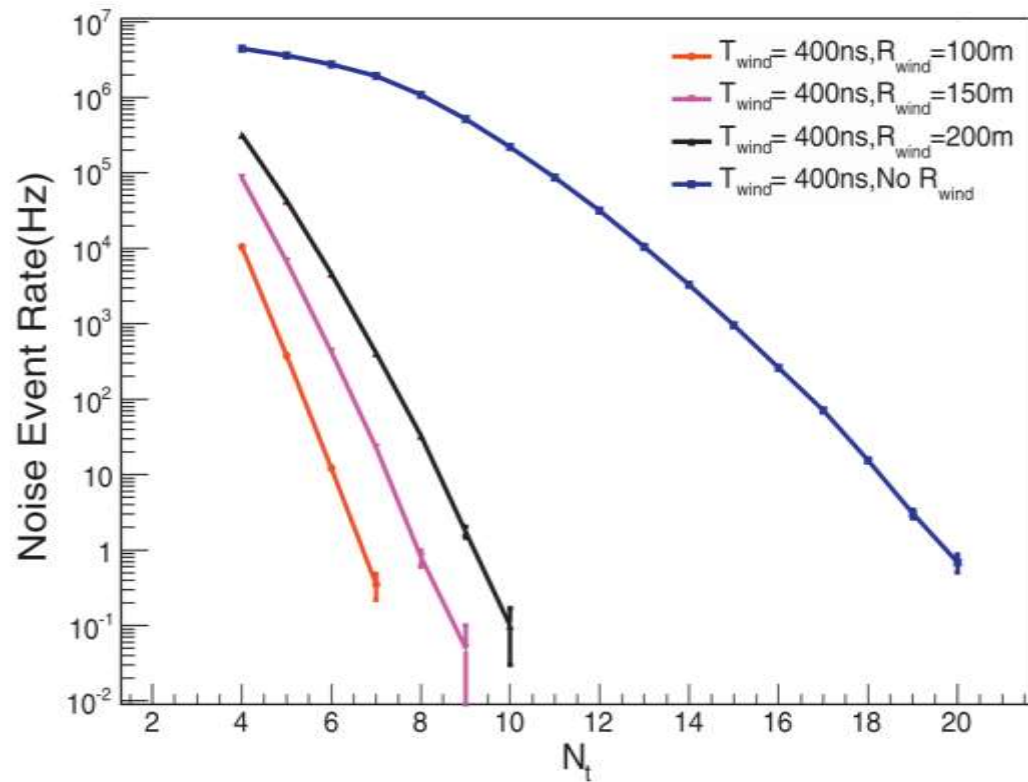
记录ADC和TDC信号

5GeV Muon产生的光电子数目



KM2A事例的触发判选

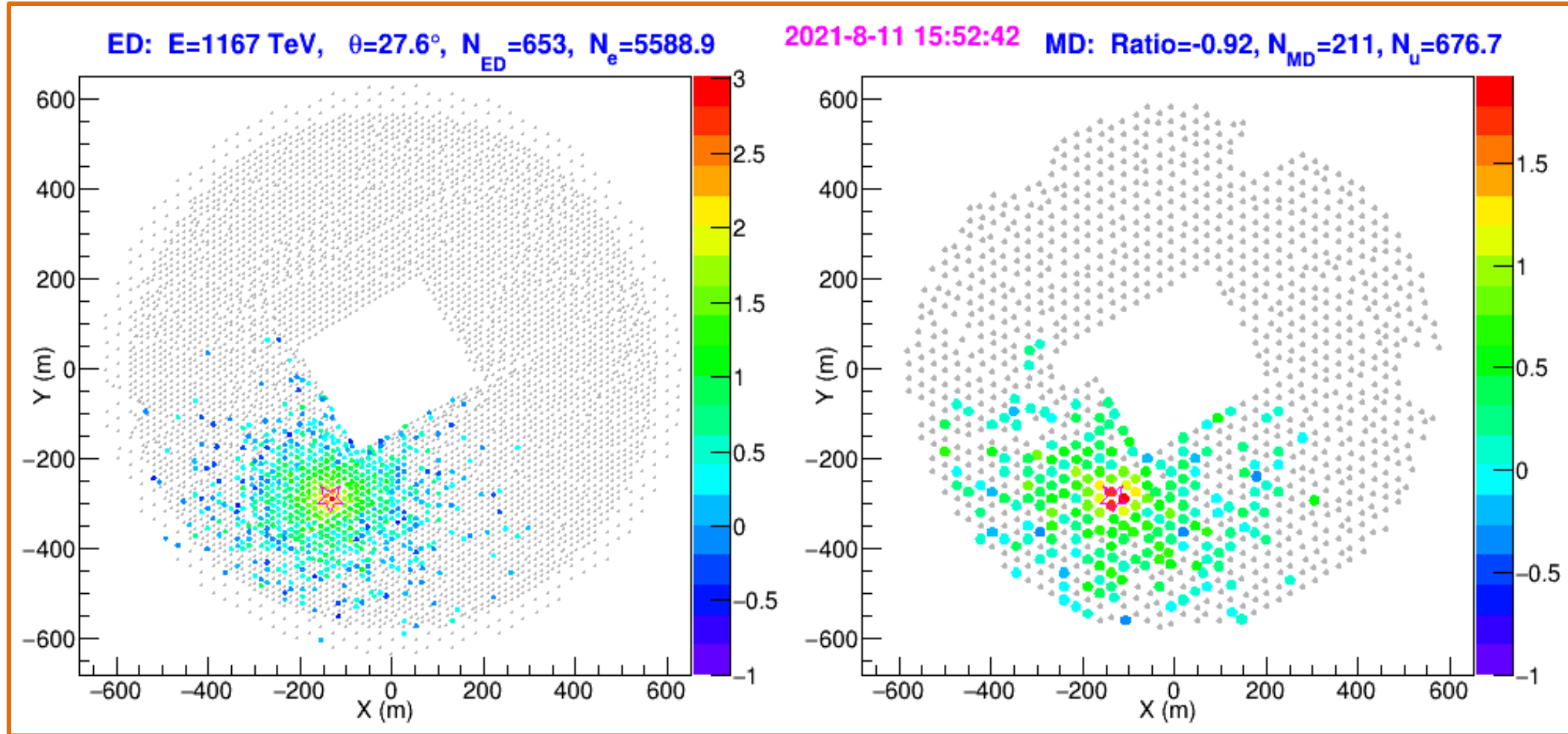
■ 事例触发条件：400ns内20个ED信号过阈



触发研究文章: Wu et al, Study of the trigger mode of LHAASO-KM2A, Astroparticle Physics 103:41–48 (2018)

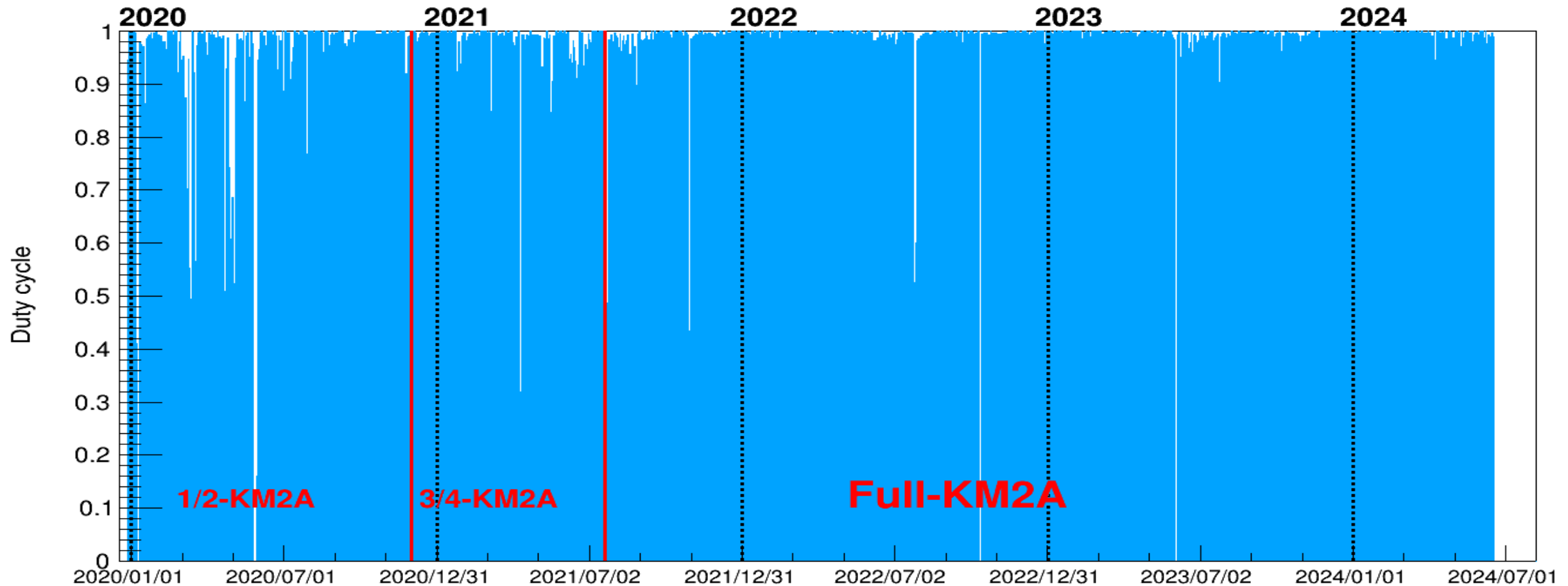
KM2A事例

1.17 PeV



LHAASO operation status

The duty cycle is $>98\%$ even after good data selection.



二、KM2A探测器的标定

参考文献:

时间标定文章: Lv et al, Astroparticle Physics, 100:22-28(2018)

电荷标定文章: LHAASO coll., Phys. Rev. D. 106:122004 (2022)

标定结果: LHAASO coll., Chinese Physics C 45:025002 (2021)

为什么要进行探测器标定?

- 5216台ED+1188个MD
- 探测器需测量信息：位置+TDC+ADC
- 位置绝对方位天文坐标不一致?
- 不同探测器时间响应不一致?
- 不同探测器对电荷响应不一致?

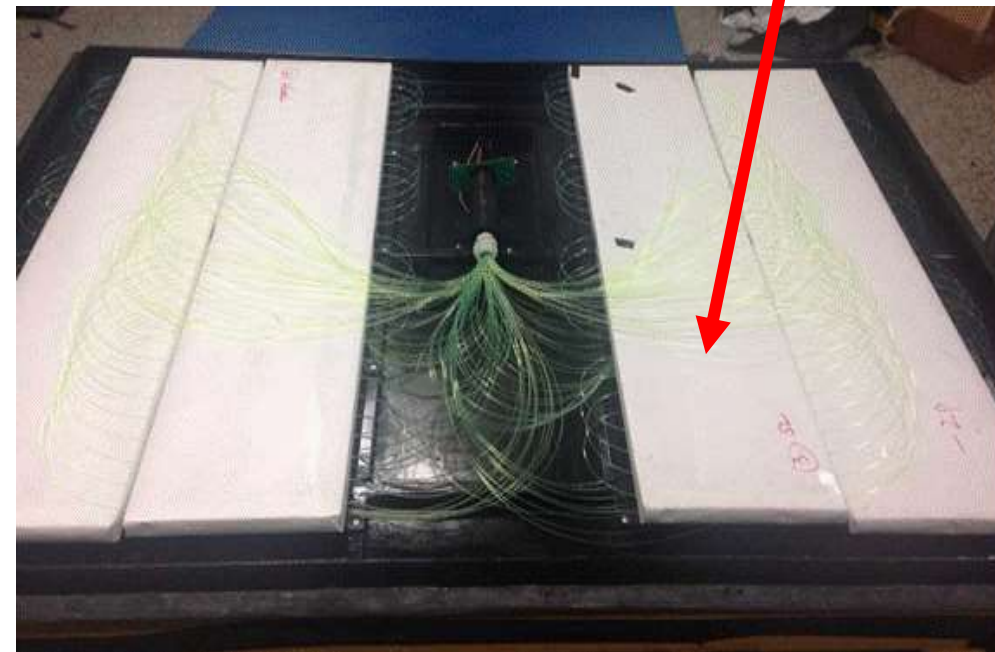
探测器位置的测量

- 通过GPS测量仪，位置测量精度可以到厘米。
- 这个定位出的方位角与天体上方位角约有0.5度差别！
- 可以利用太阳影子就行标定！



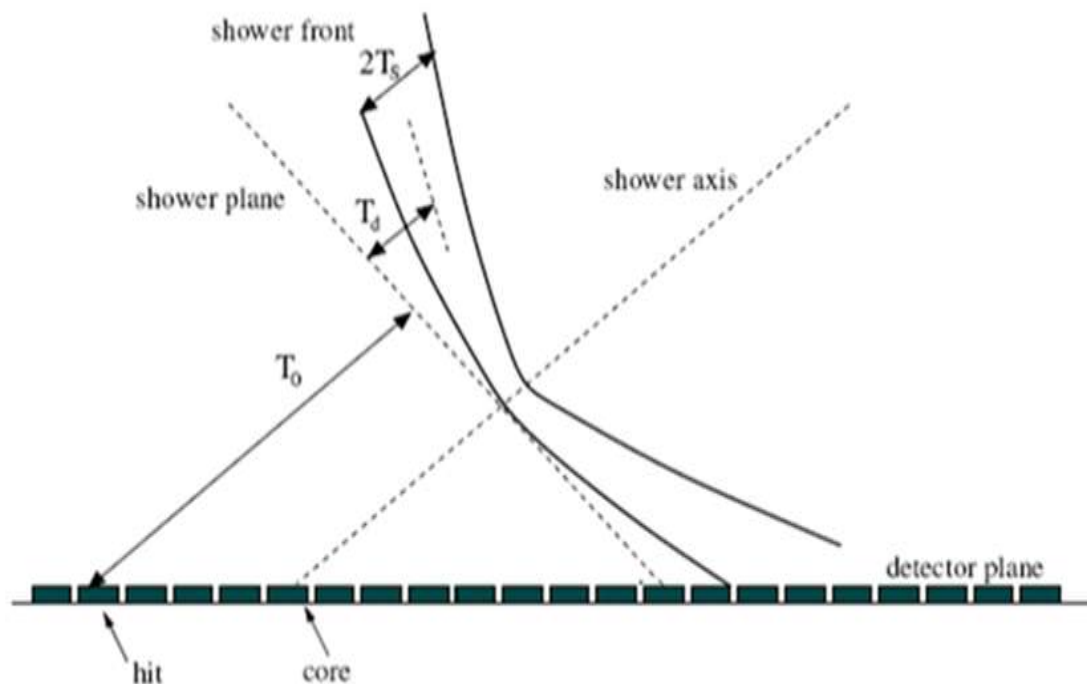
影响时间测量差别因素

- 探测器响应差异
- PMT响应差异
- 信号传输长度差异
- TDC测量精度差异
- 信号大小（阈值）差异
- 上述随温度等环境因素的变化



探测器时间标定的两种方法

- 利用宇宙线前锋面对所有探测单元测量时间进行标定



- 利用一个标准探测器对探测器逐一标定 (telescope法)

费时、费力

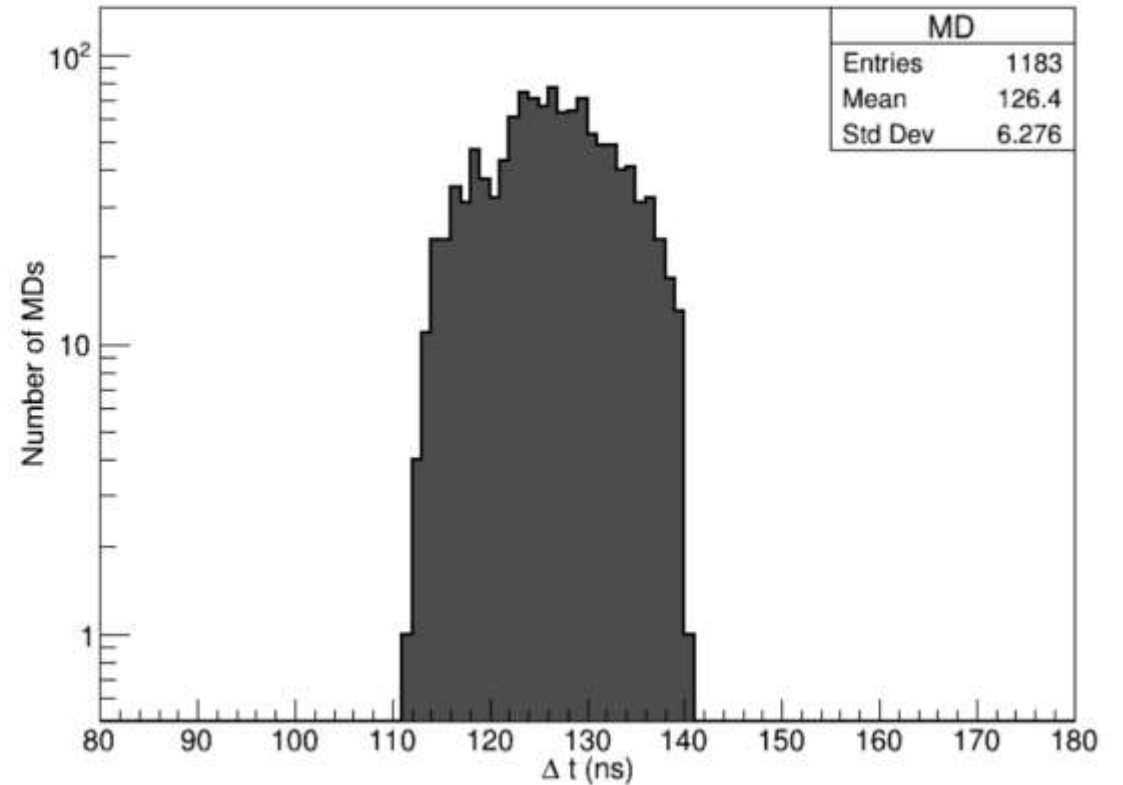
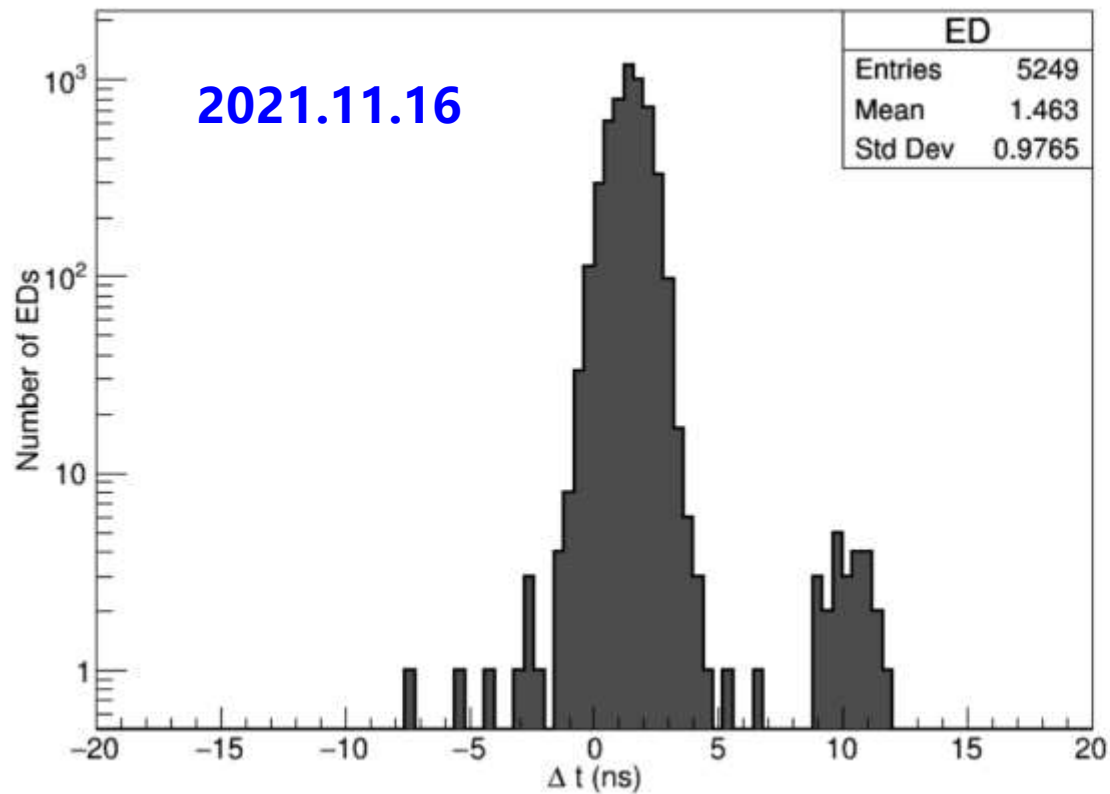
标准探测器

被测探测器

参考文献: Lv et al, Astroparticle Physics, 100:22-28(2018)

探测器时间标定

■ 时间特征面法离线标定，每天一次

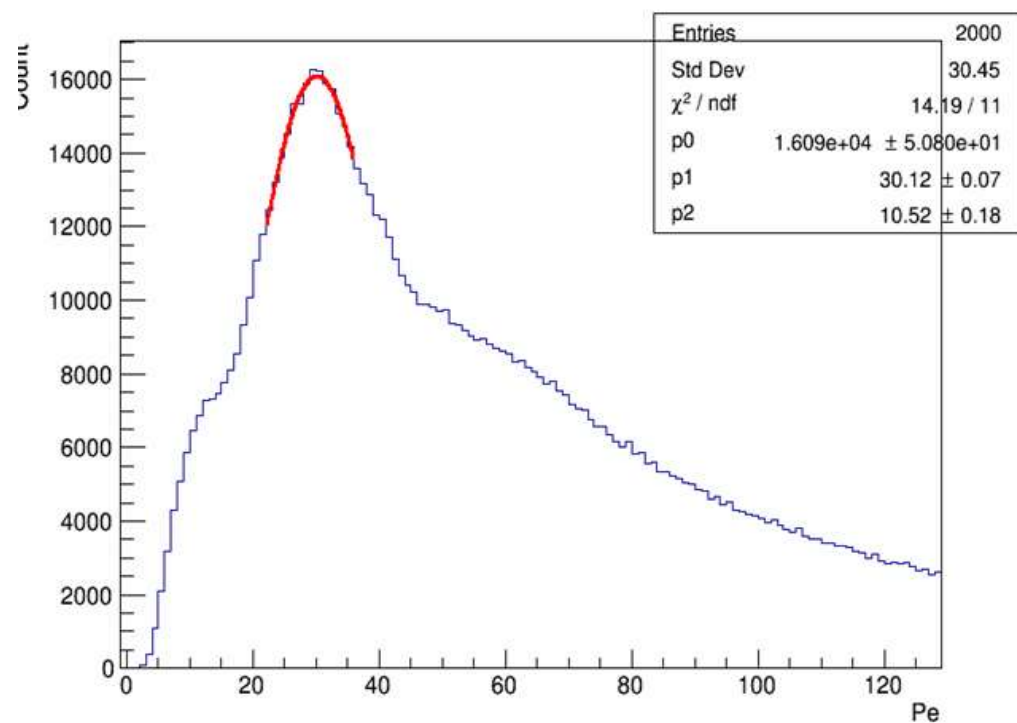


时间标定方法文章: [Astroparticle Physics 100 :22–28 \(2018\)](#)

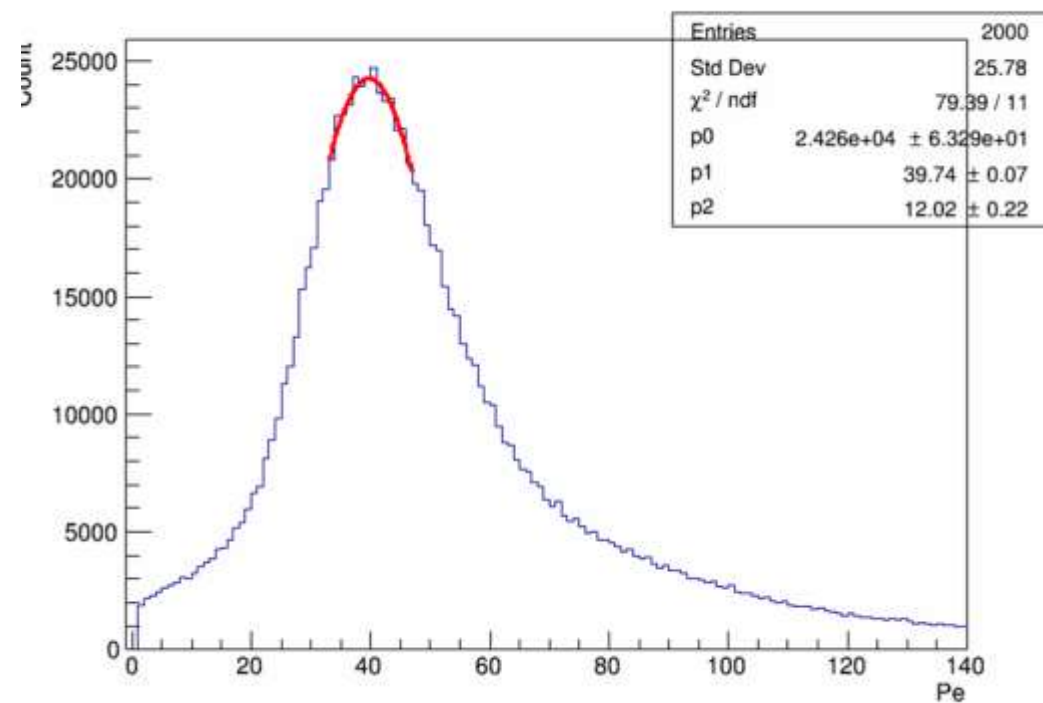
标定结果: [Chinese Physics C 45:025002 \(2021\)](#)

电荷标定方法

■ 利用ED单粒子和MD单 μ 峰位对电荷进行标定



单个ED电荷分布

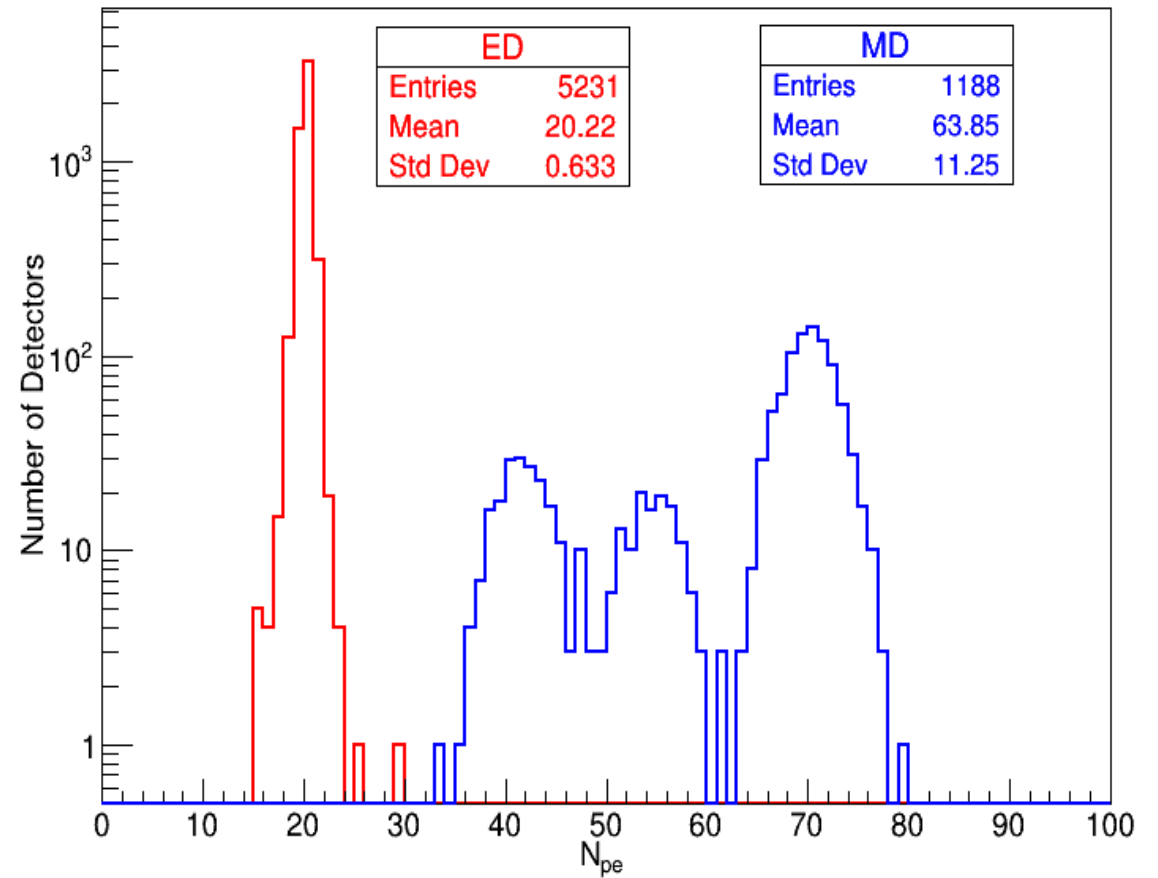


单个MD电荷分布

探测器电荷标定

■ ED+MD探测器粒子数标定

- 单粒子离线标定
- ED每4小时一次+温度修正
- MD每天一次

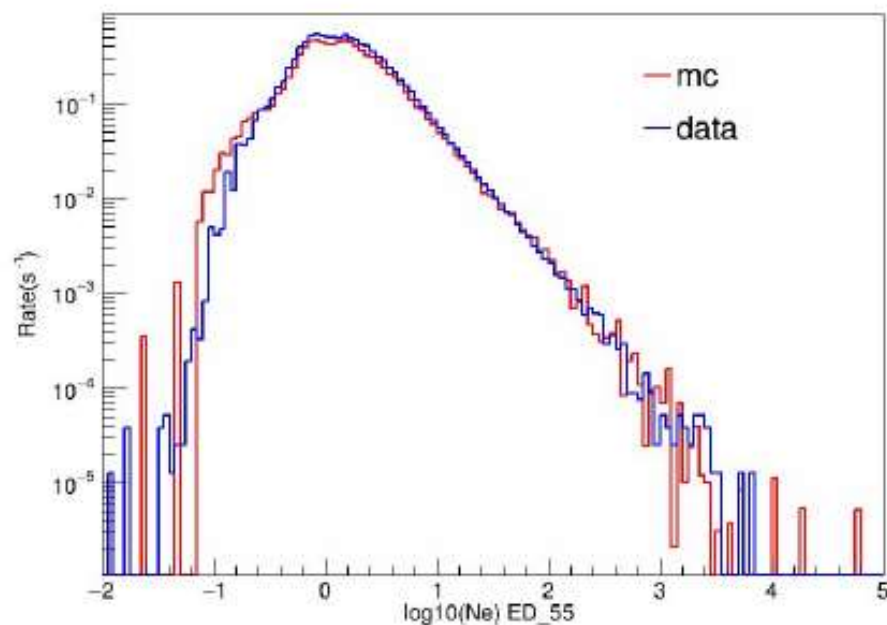


电荷标定文章:
Phys. Rev. D. 106, 122004 (2022)

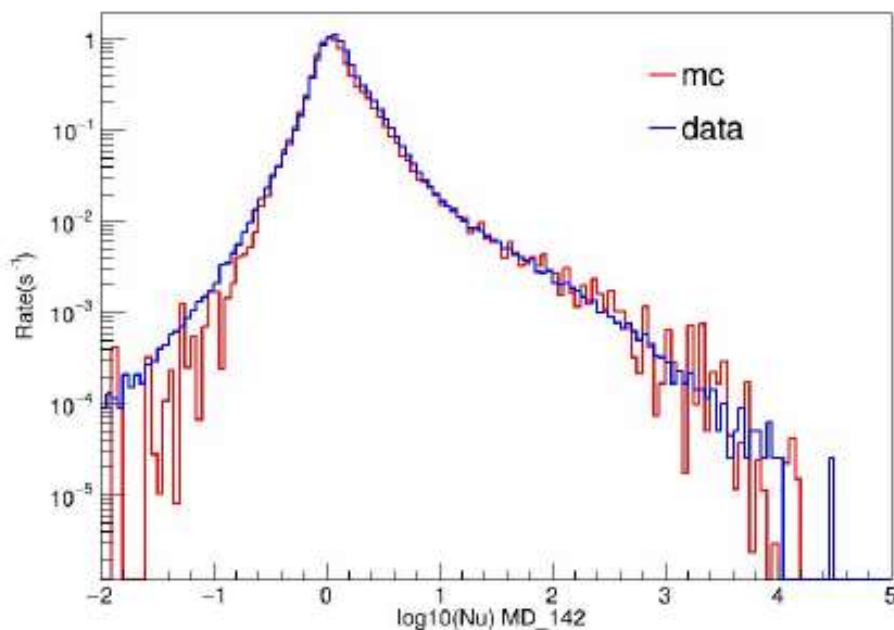
2023.5.27

标定后粒子数与模拟对比

单个ED测量粒子数



单个MD测量 μ 子数



电荷标定之后实验和模拟对比

三、KM2A数据的重建

参考文献:

重建方法文章: LHAASO coll., Chinese Physics C 45:025002 (2021)

事例重建方法

- 芯位重建:

- 每个ED探测器粒子数测量 + 探测器位置

- 方向重建:

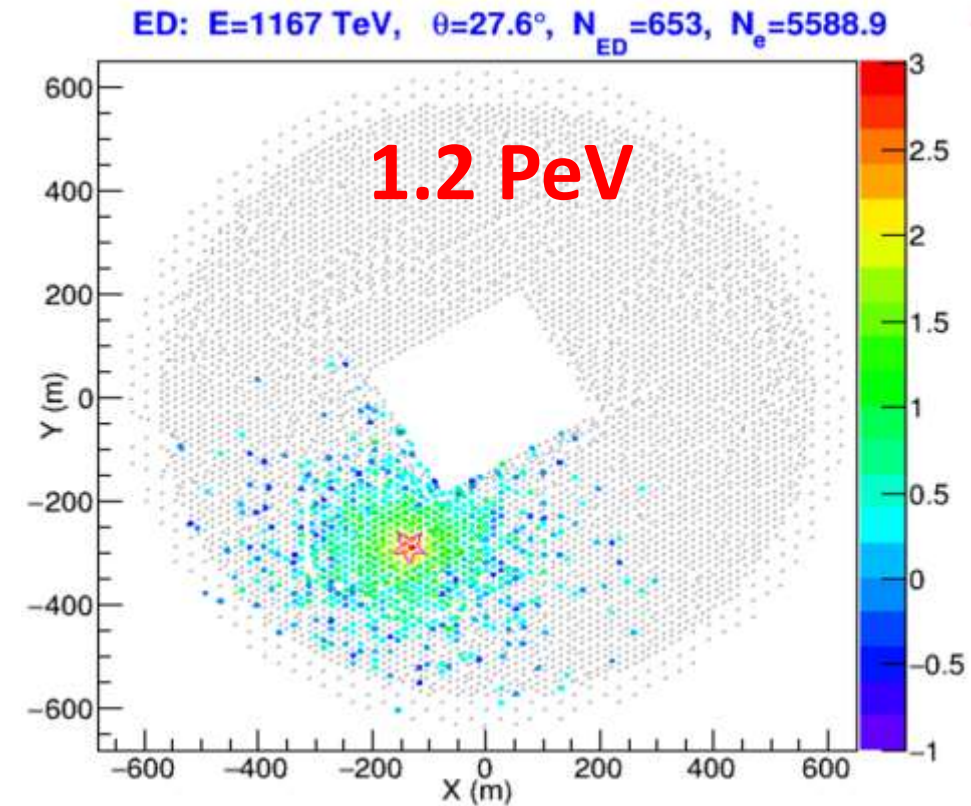
- 每个ED探测器1ns精确时间测量 + 探测器位置

- 能量重建:

- 芯位 + 方向 + ED探测器测量粒子数目

- 成分重建:

- ED探测器测量粒子数目 + MD探测器测量粒子数目



芯位重建

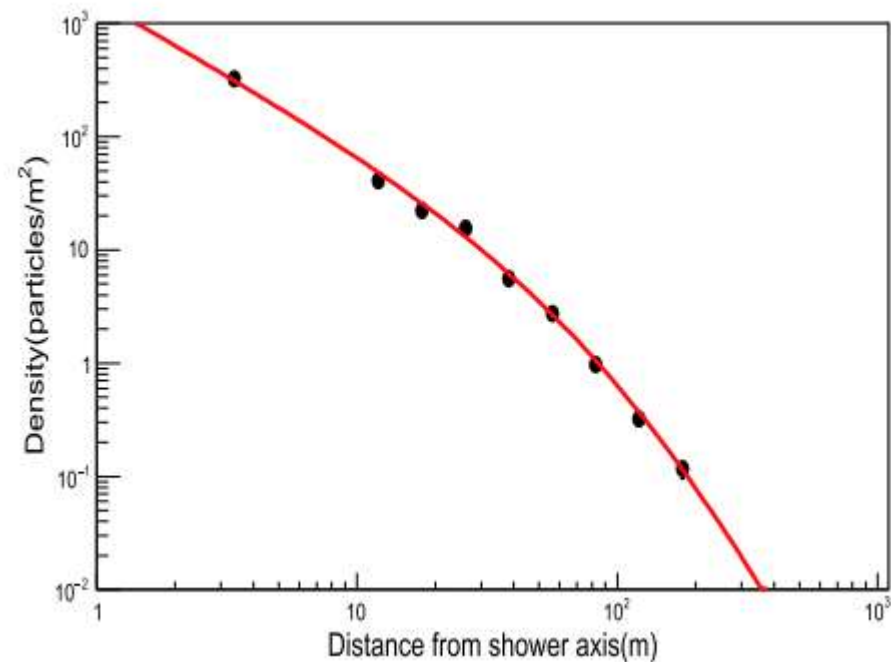
■ 重心法

$$\text{Core}_x = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i}, \quad \text{Core}_y = \frac{\sum w_i y_i}{\sum w_i}, \quad \text{Core}_z = \frac{\sum w_i z_i}{\sum w_i}$$

■ NKG+最大似然法

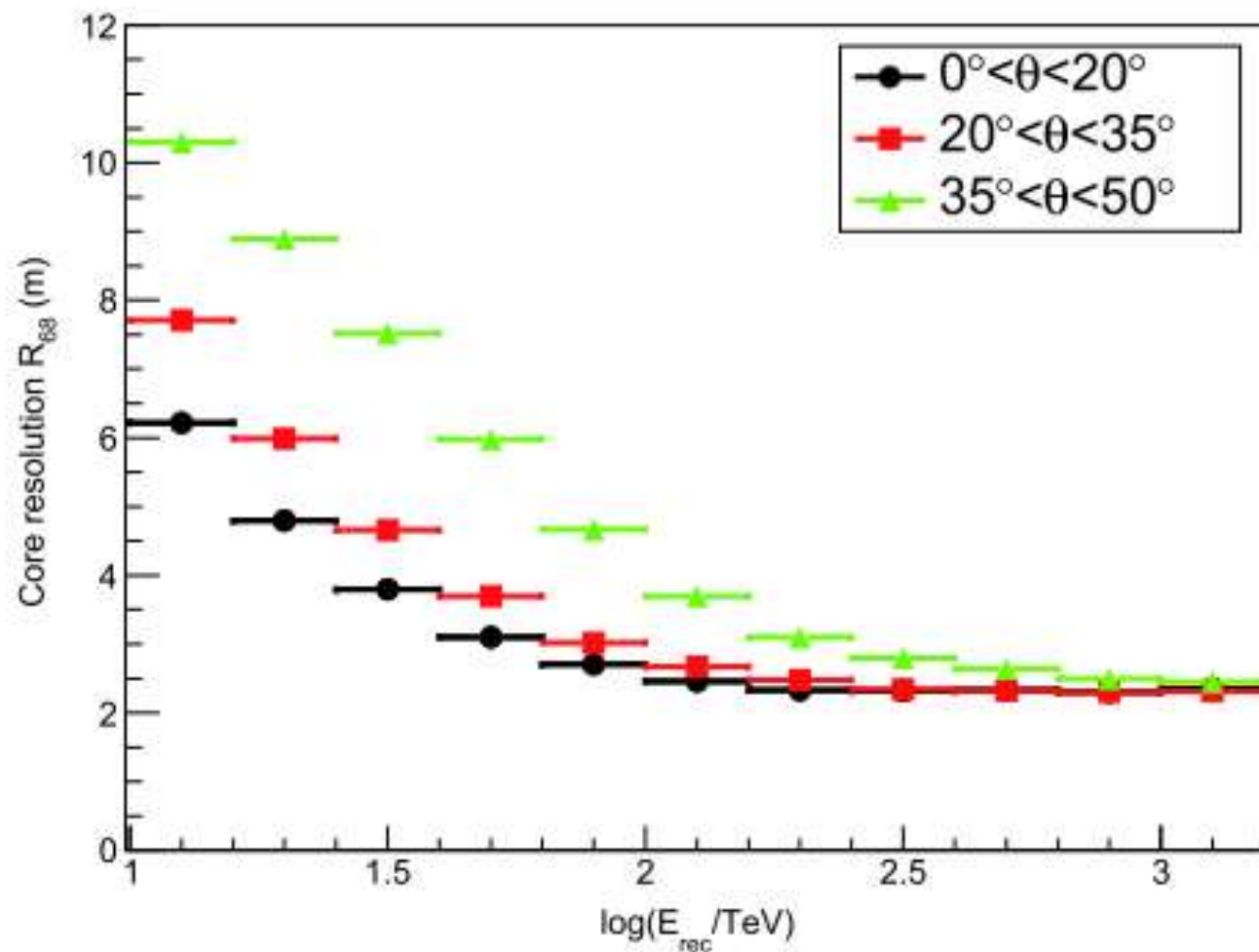
$$\rho(r) = \frac{N_{\text{size}}}{2\pi r_m^2} \frac{\Gamma(4.5 - s)}{\Gamma(s - 0.5)\Gamma(5 - 2s)} \left(\frac{r}{r_m}\right)^{s-2.5} \left(1 + \frac{r}{r_m}\right)^{s-4.5}$$

每个探测器测量满足预期为 $n = S * \rho$ 的泊松分布，基于此构造似然函数



芯位重建精度

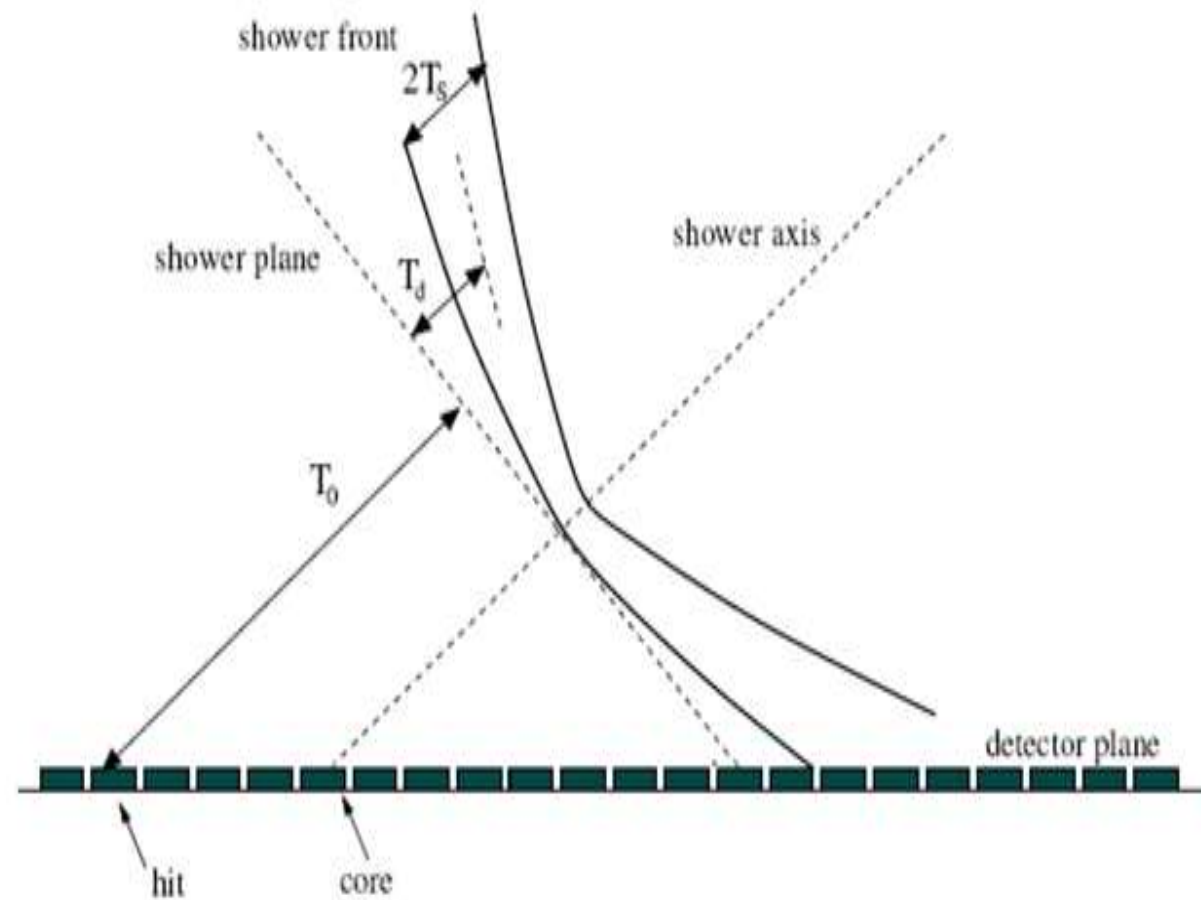
- 能量和天顶角依赖
- 3~5m@ 100TeV



方向重建

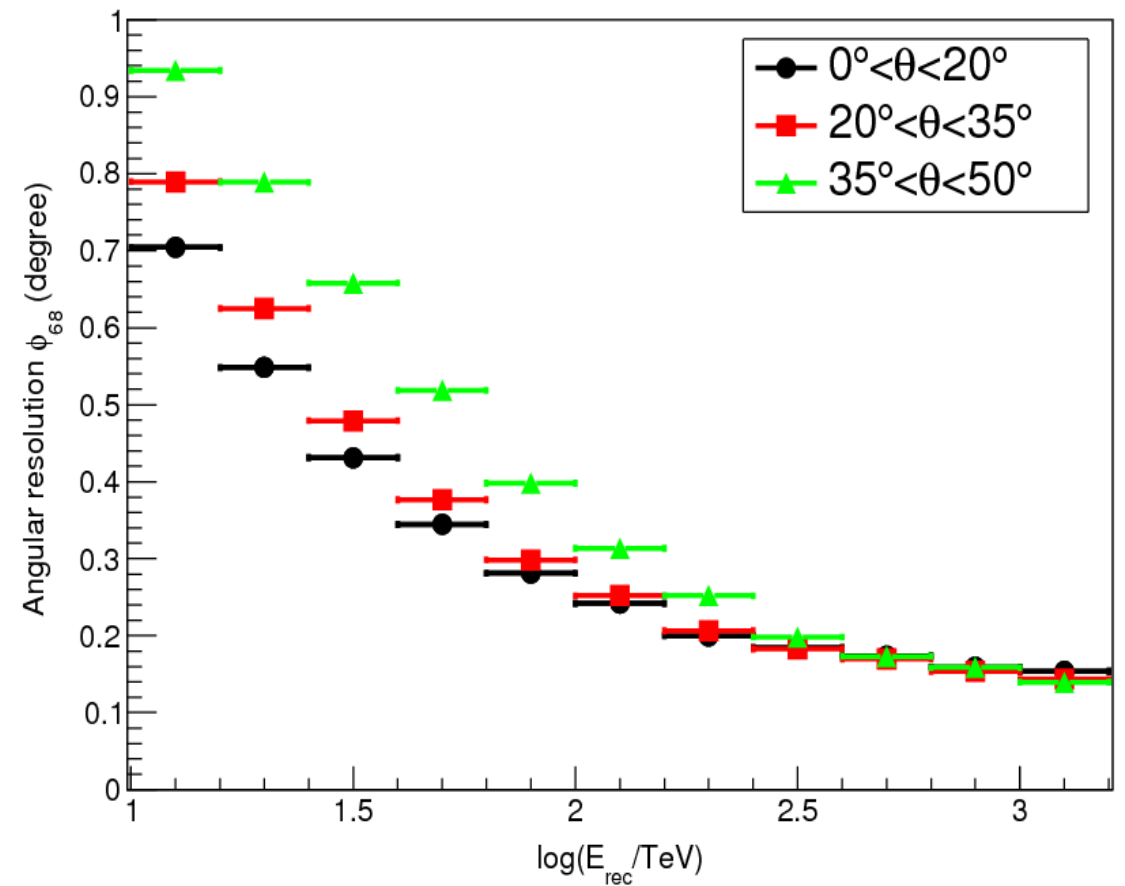
■ 最小二乘法拟合锥形前锋面

$$\chi^2 = \frac{1}{N_{\text{hit}}} \sum_{i=1}^{i=N_{\text{hit}}} w_i \left(t_i - l \frac{x_i}{c} - m \frac{y_i}{c} - n \frac{z_i}{c} - \alpha \frac{r_i}{c} - t_0 \right)$$



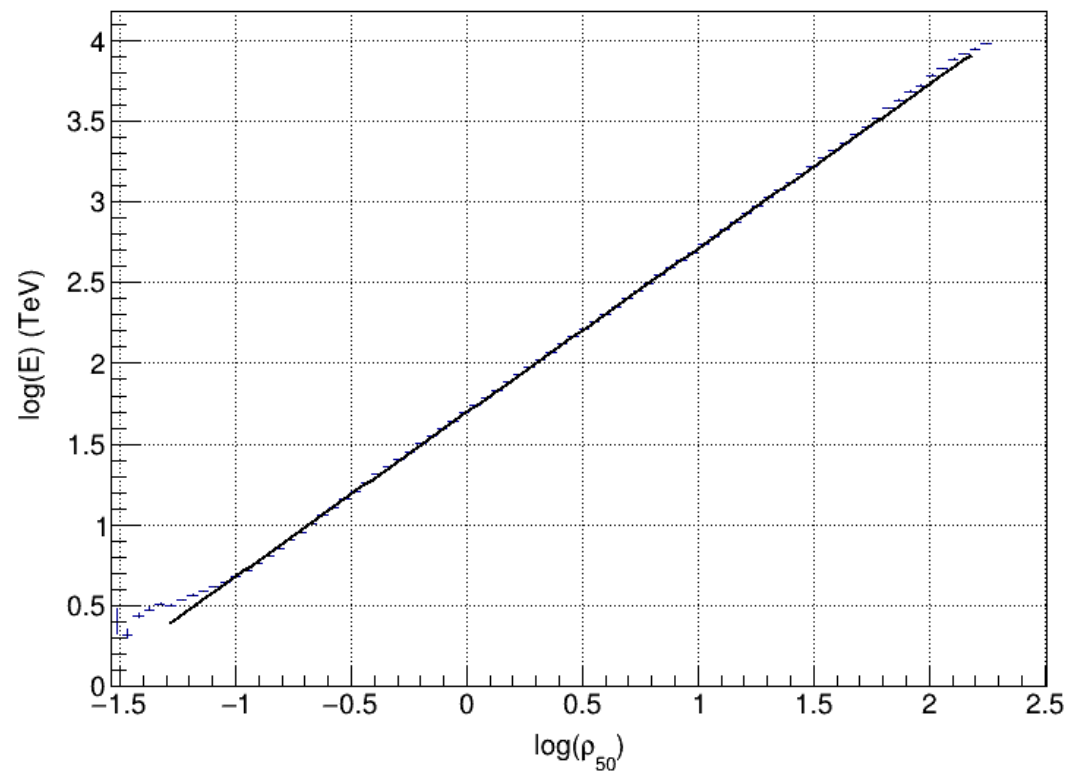
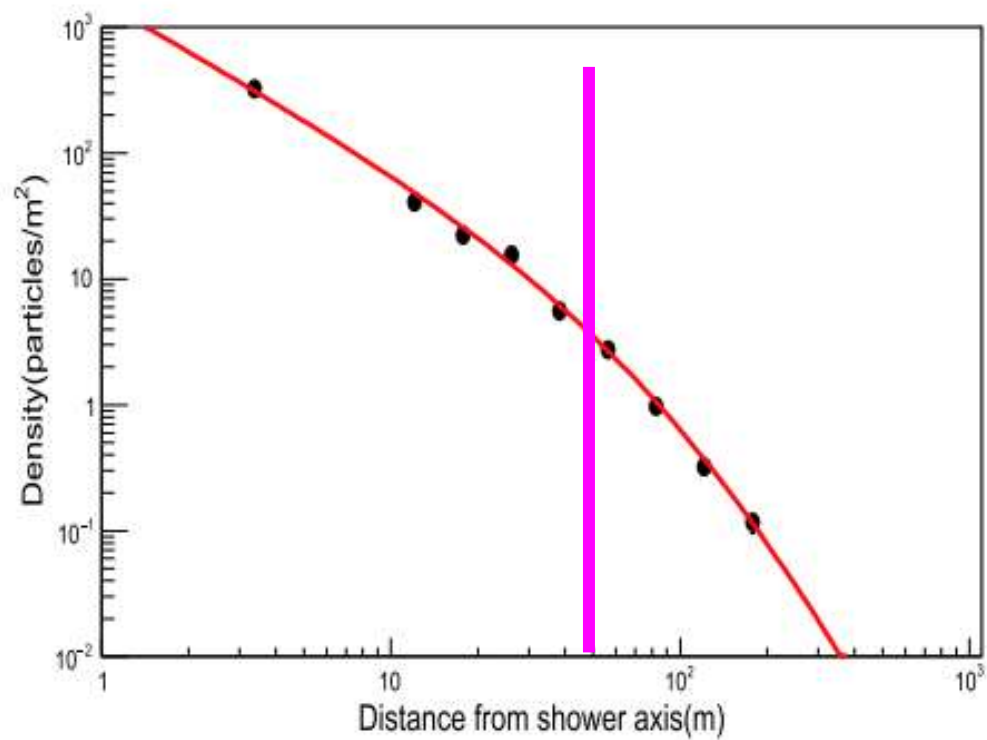
角分辨率

- 能量和天顶角依赖
- $0.25^\circ \sim 0.3^\circ @ 100\text{TeV}$



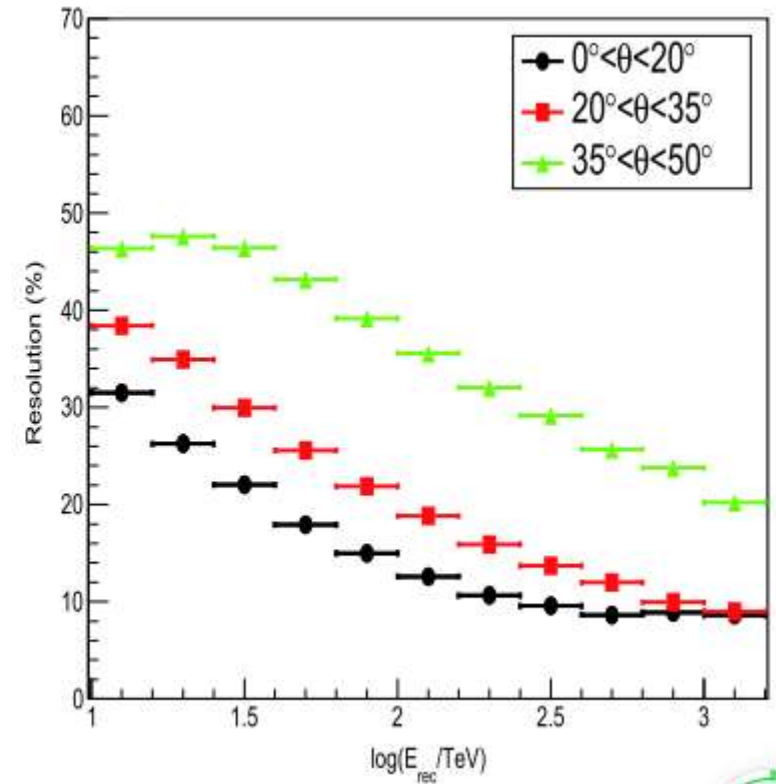
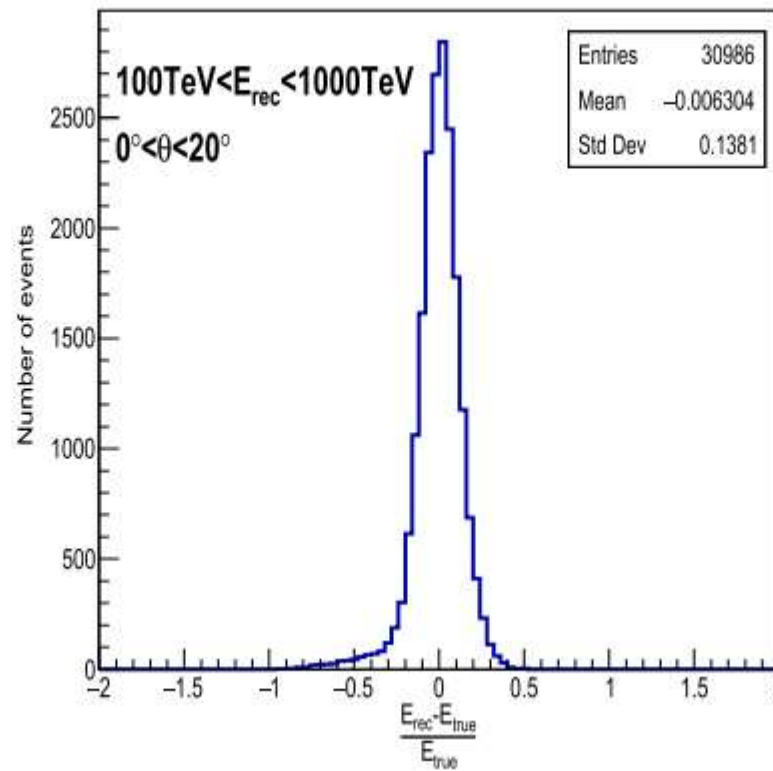
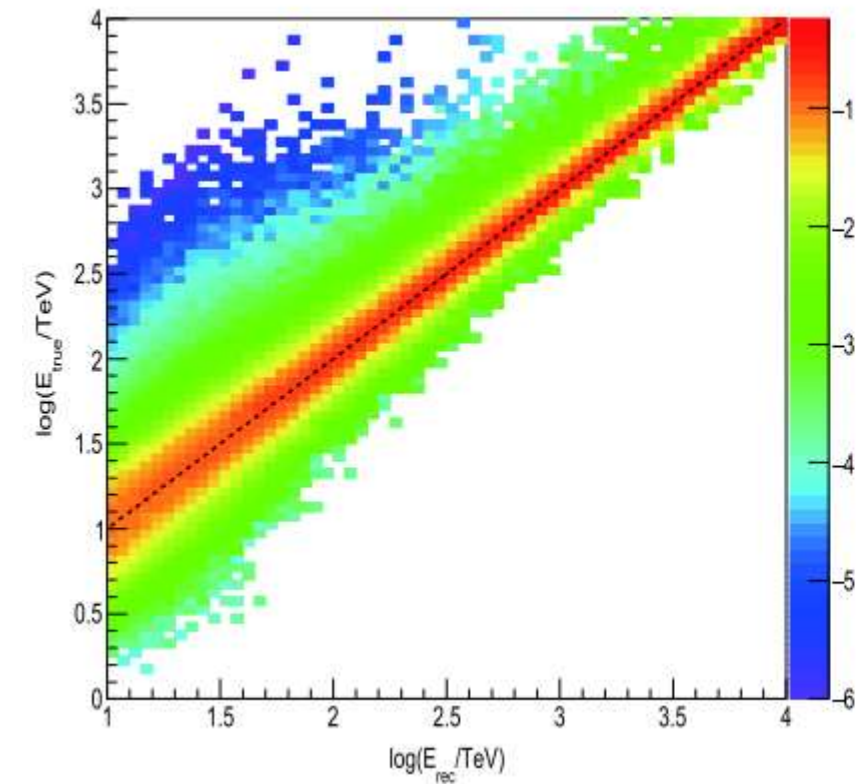
能量重建

- 芯位50m处密度与能量关系重建能量
- 按天顶角分bin拟合二次函数

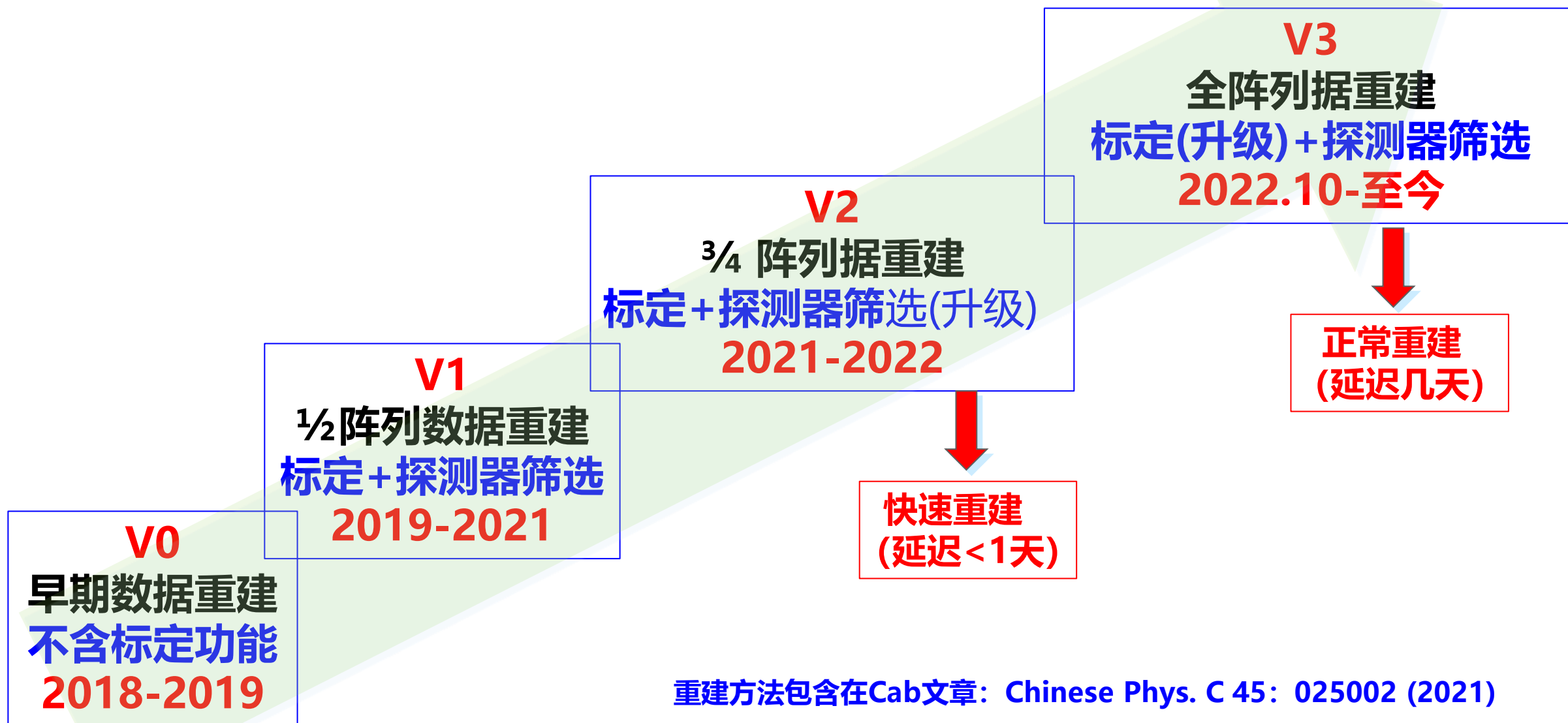


能量分辨率

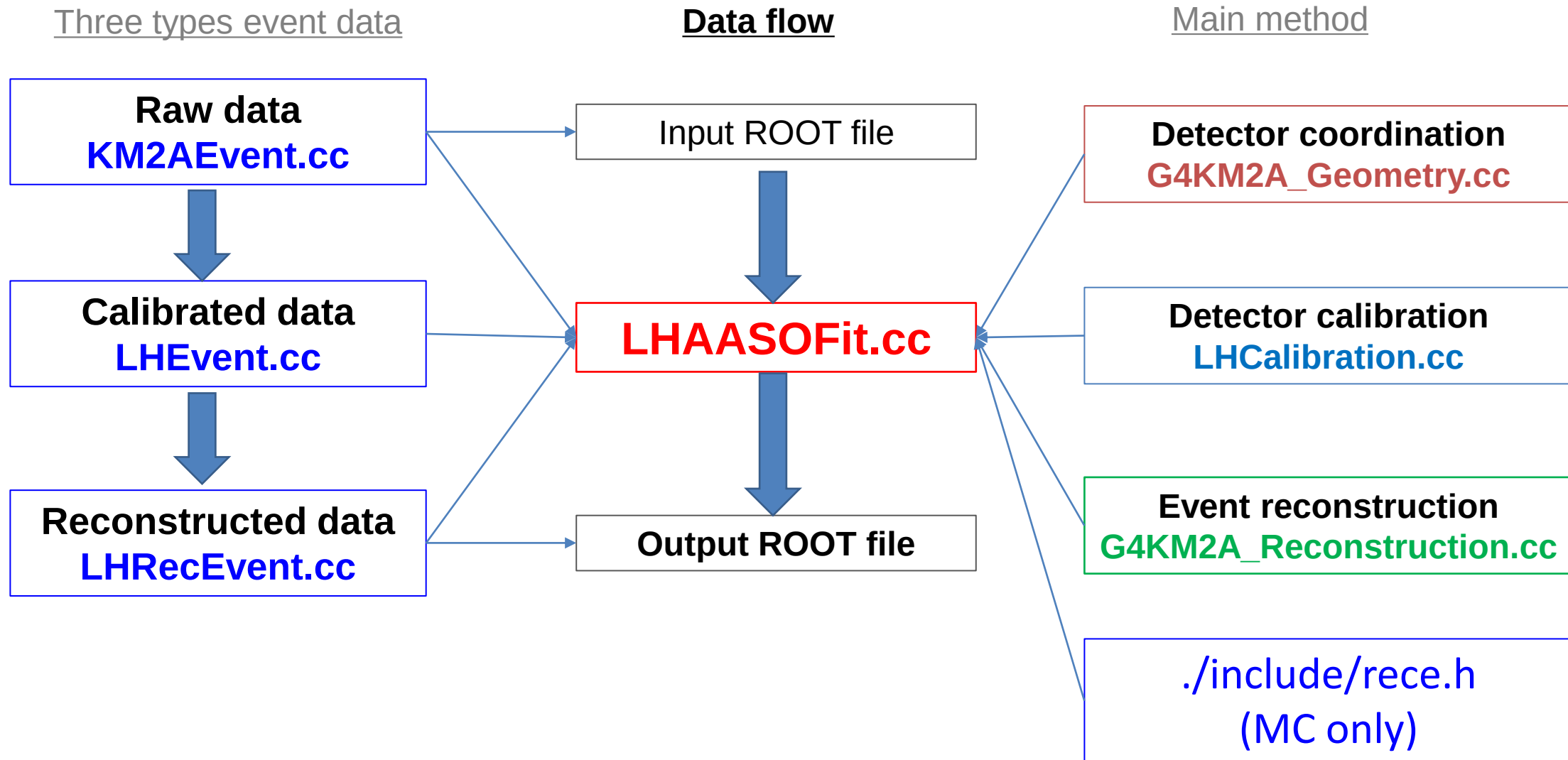
● 13%~35% @ 100 TeV



重建程序更新历史



KM2A重建程序框架结构



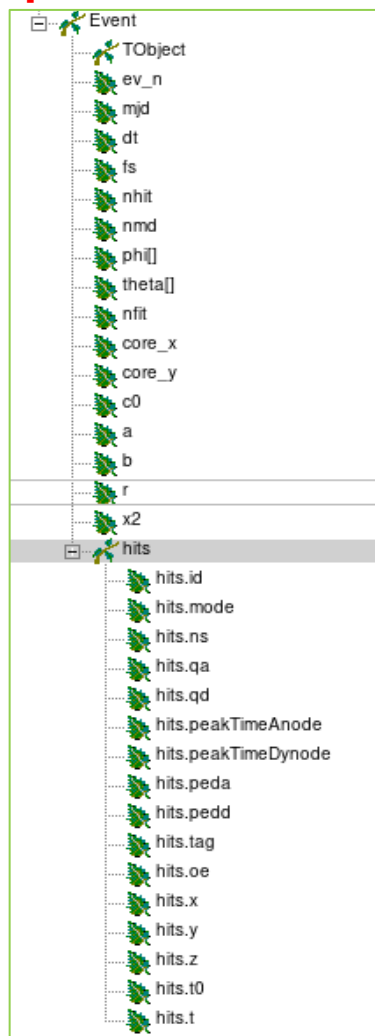
重建程序获取和运行

- KM2A的模拟和重建程序在下面公共目录：
[/lhaasofs/user/lhaasorec/publish/km2asoftware](#)
- KM2AMCrec_V3.tar用于模拟数据重建
- KM2ADatarec_V3.tar用于实验数据重建
- 两个程序主要差别在LHAASOFit.cc，其它子程序没有变化
- **编译：** 运行其中的compile
- **运行：** 参考Run.sh

事例结构变化流程

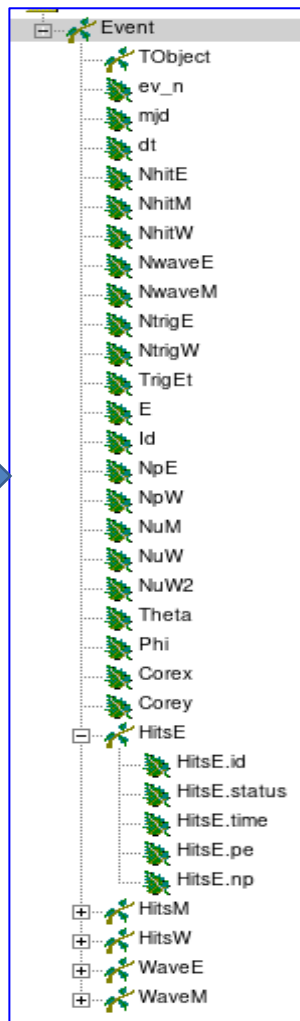
KM2AEvent.cc

Experiment Data start



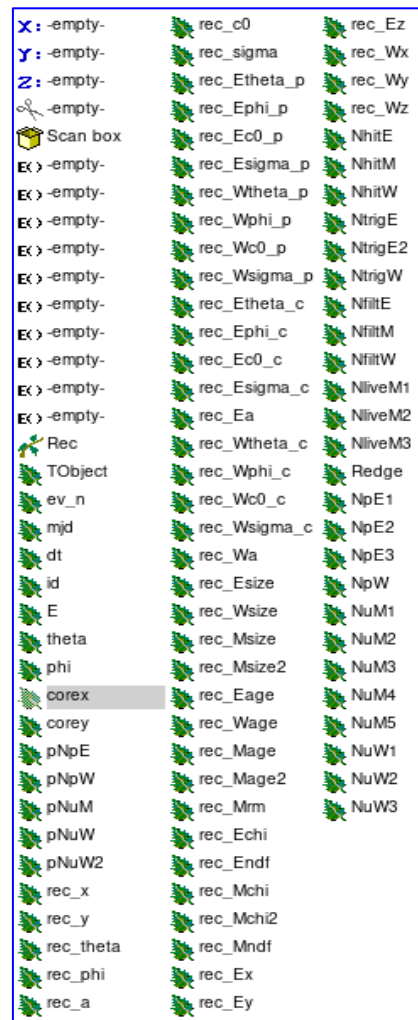
LHEvent.cc

MC data start



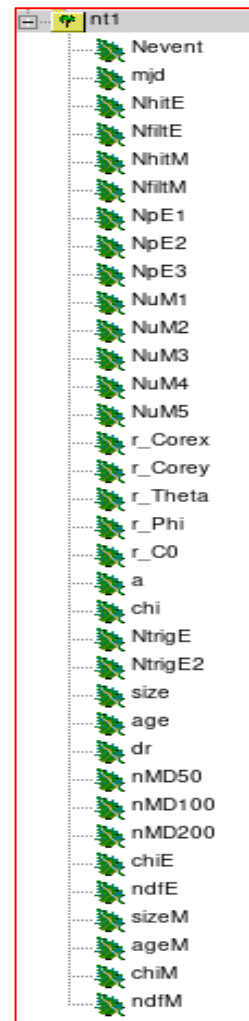
LHRecEvent.cc

MC data output

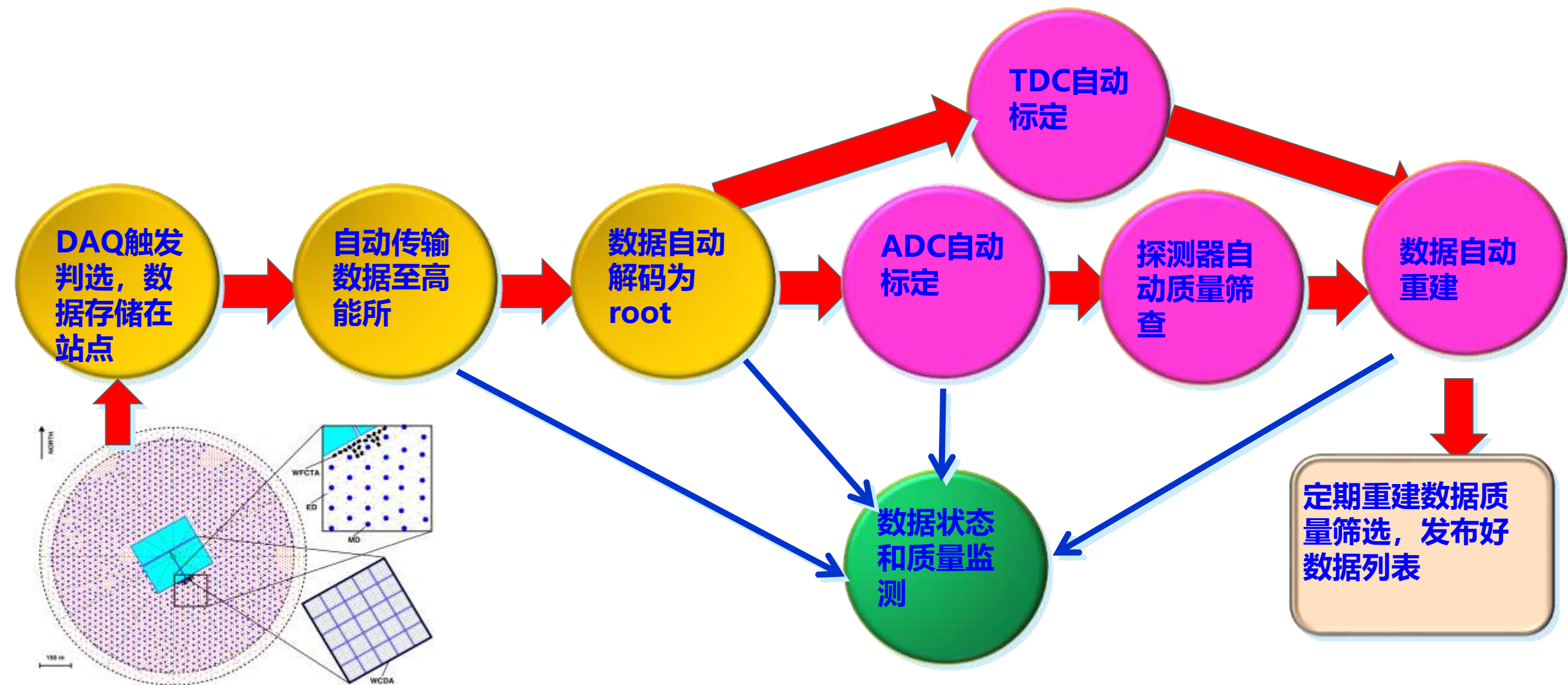


输出数据结构

Data output

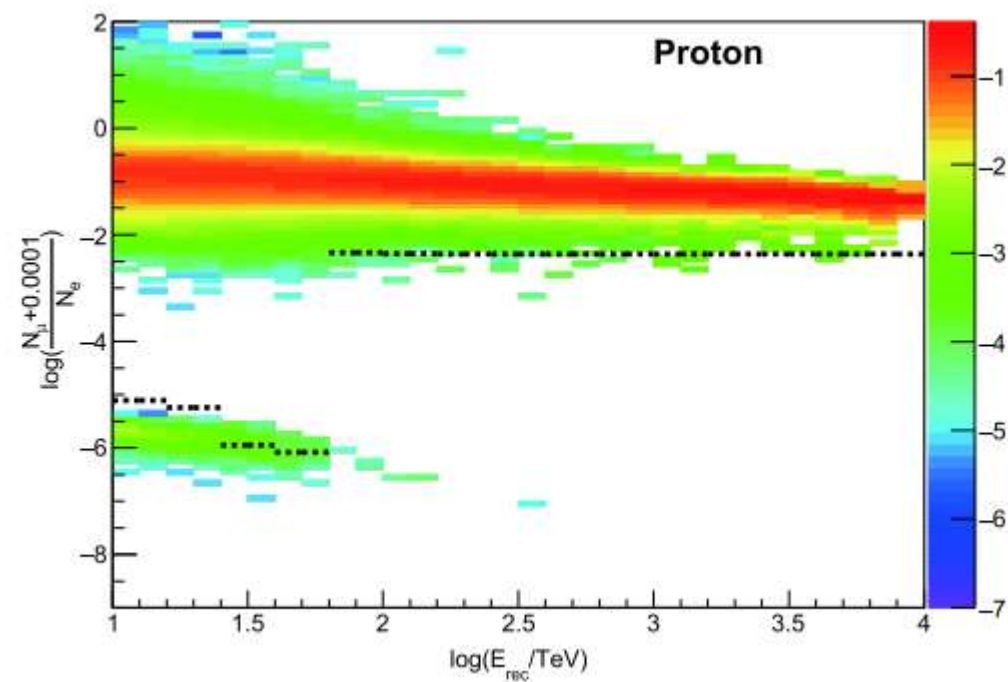
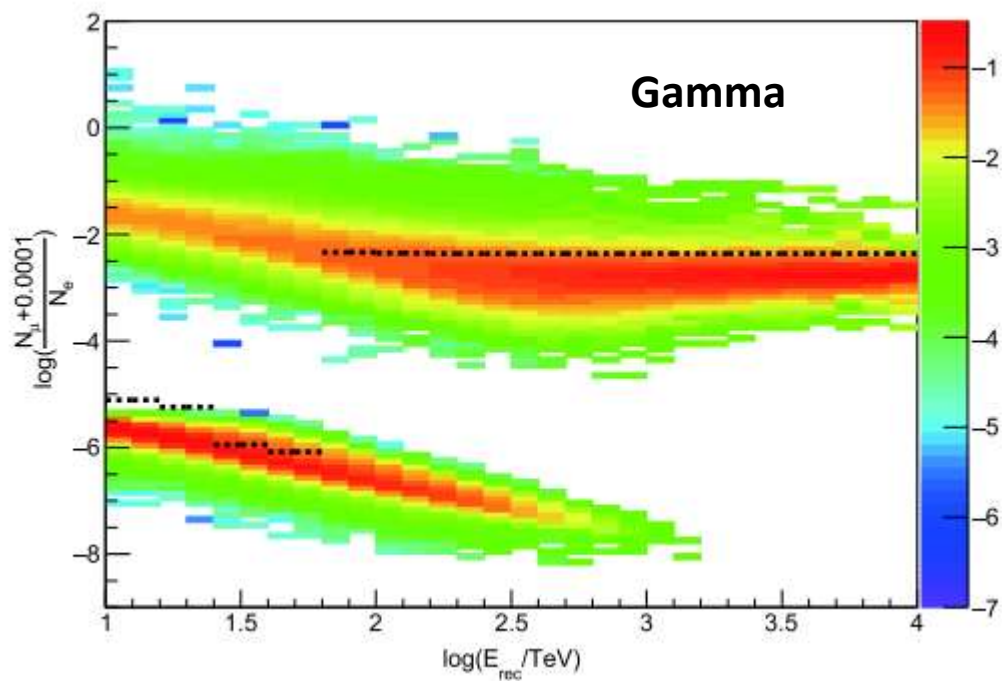


KM2A数据重建流程



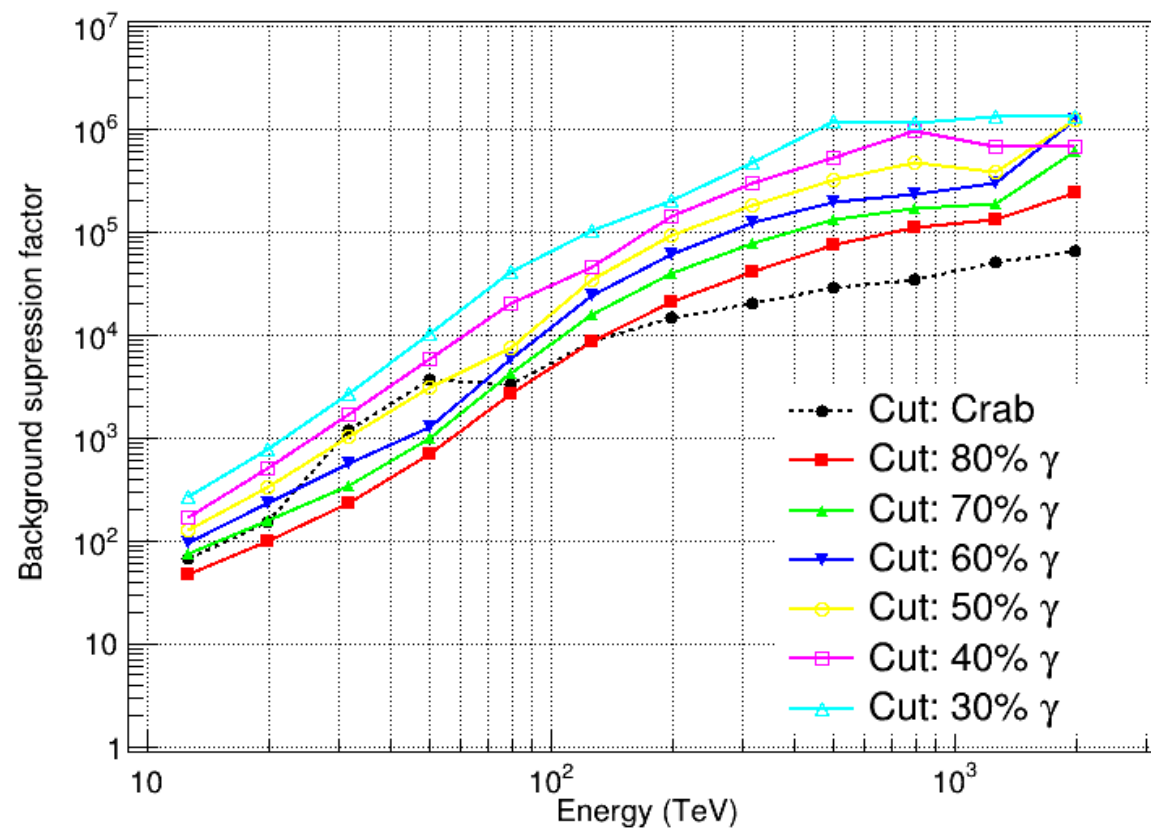
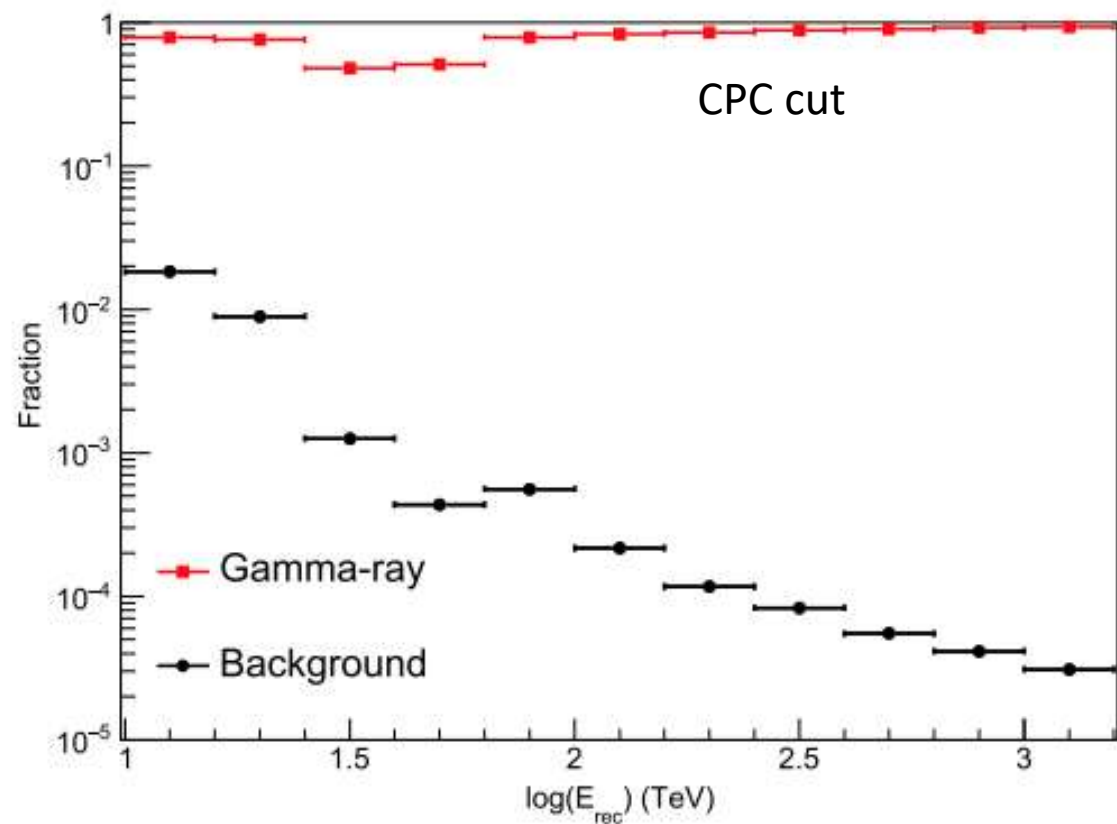
成分重建

■ 缪子数目与电磁粒子数目比值



鉴别能力

■ Cut的严或松严重影响背景排除能力和伽马的保留率



四、KM2A探测器的模拟

参考文献:

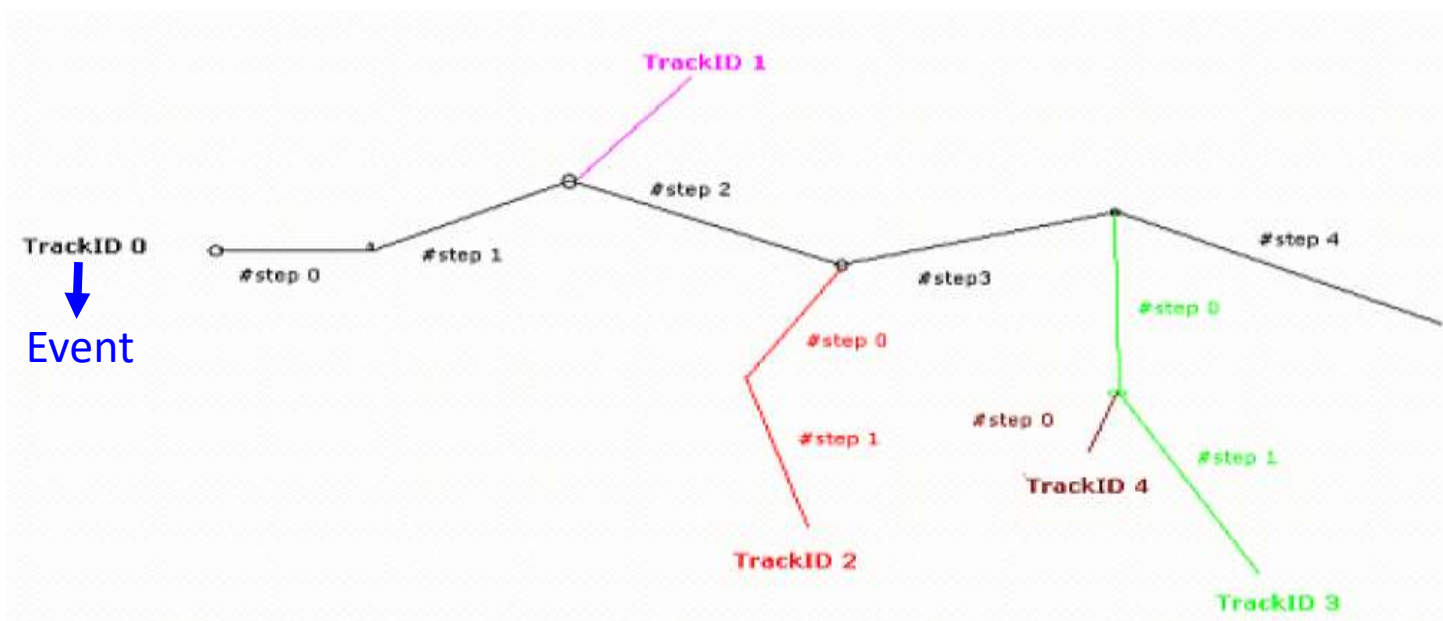
探测器模拟文章: LHAASO coll., LHAASO-KM2A detector simulation using Geant4, Radiation Detection Technology and Methods, <https://doi.org/10.1007/s41605-024-00467-8>

Geant4 工作流程

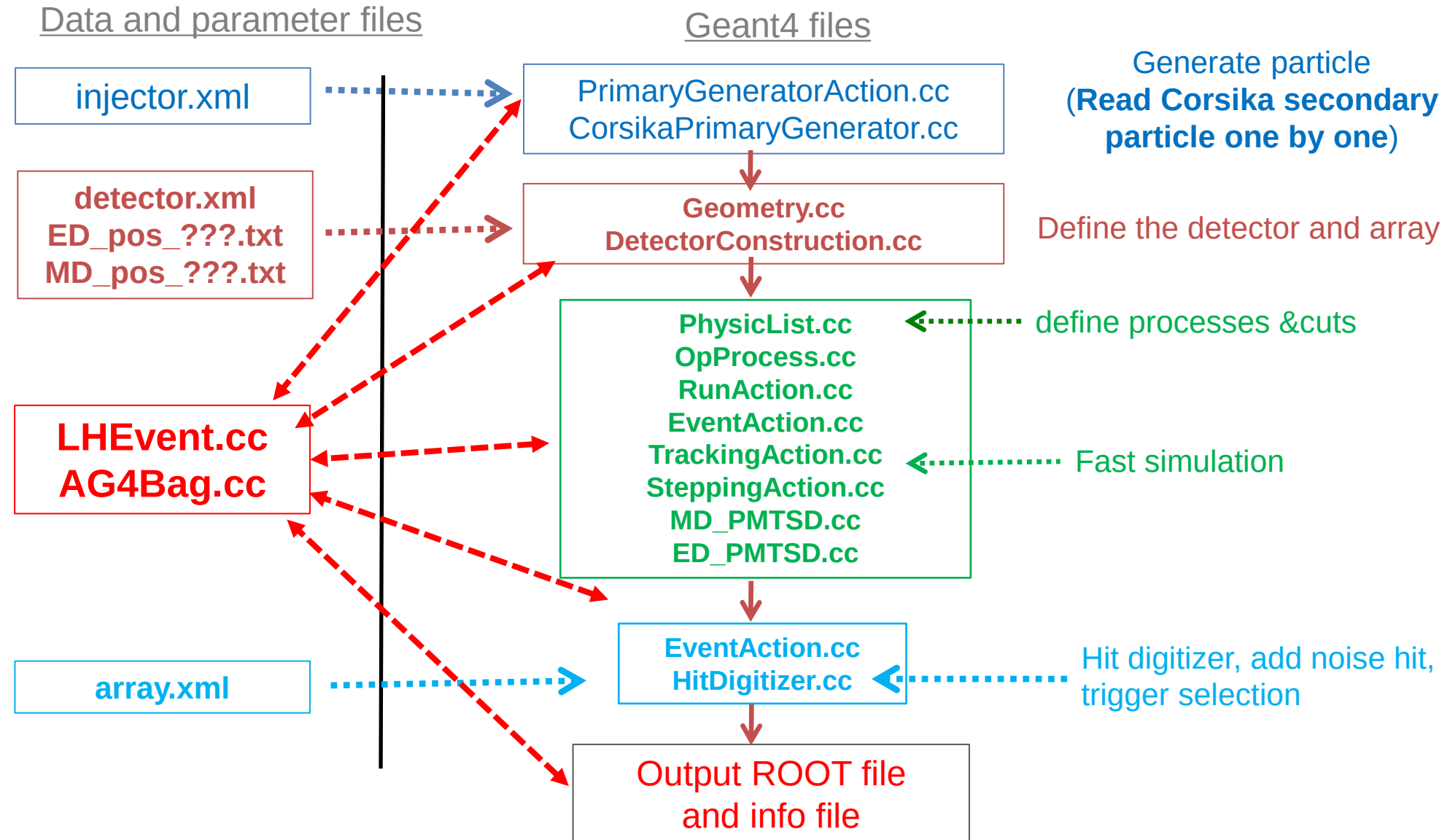
■ Run

- Event 0
 - Track 0
 - Step 0
 - Step 1
 - Step 2
 -
 - Track 1
 - Track 2
 -
- Event 1
- Event 2
-

一个corsika事例有几万至百万个次级粒子，每个次级粒子进入探测器又会产生上万个次级粒子或光子。



G4KM2A 程序框架结构



单元探测器设置 -ED

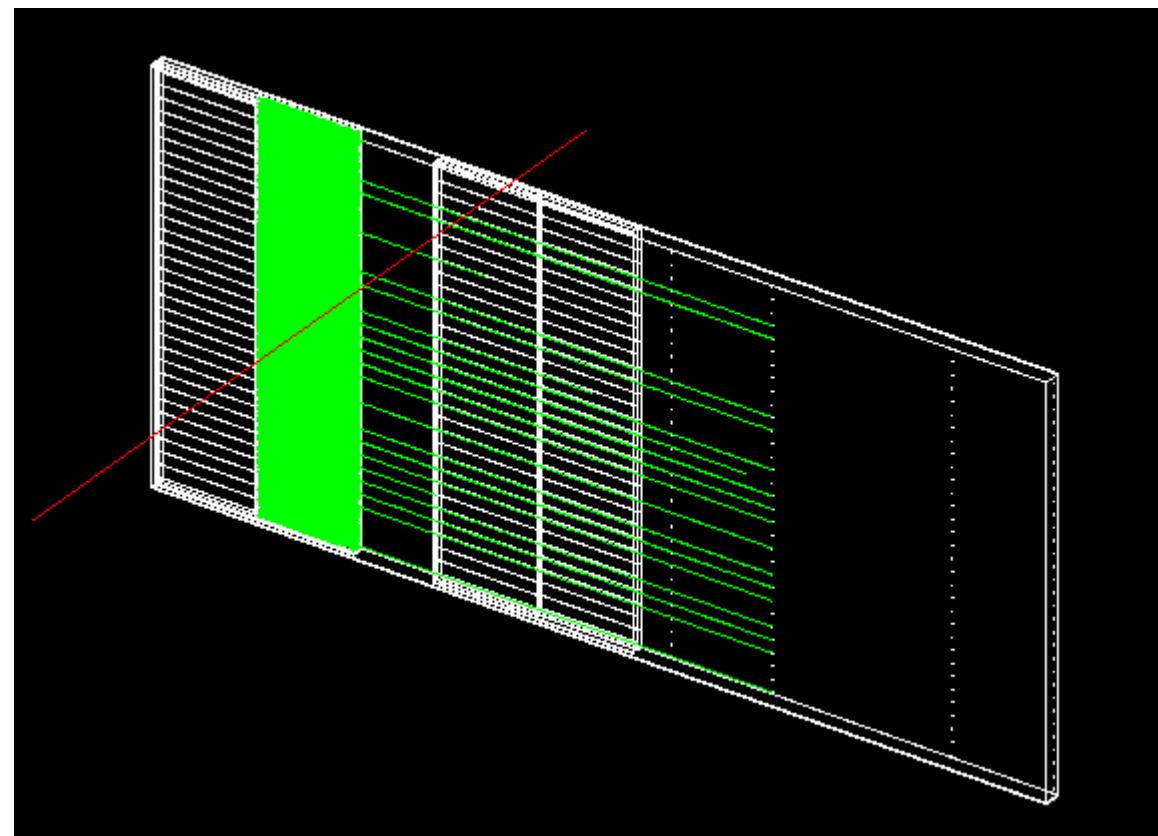
■ 探测器构造从上往下:

- 0.2 cm 铝壳
- 1.0 cm 空气
- 0.5 cm Pb
- tyvek反射膜
- 0.05 cm 空气
- 闪烁体4块100cm*25cm*1cm
- 波长位移光纤130cmx32x4
- PMT

■ 主要参数 (依赖所用闪烁体型号) :

- 闪烁体光产额**11136光子/MeV**, 吸收长度**3.8m**
- Tevk反射吸收, 反射率:**91.5%**
- PMT量子效率最大28.5%, 收集效率**80%**

■ 问题: 为符合实验, 目前Fiber界面加了1%的不平滑度 (Csl=0.01, a=0.06) , 最近修改为 (Csl=0.02, a=0.08) ,



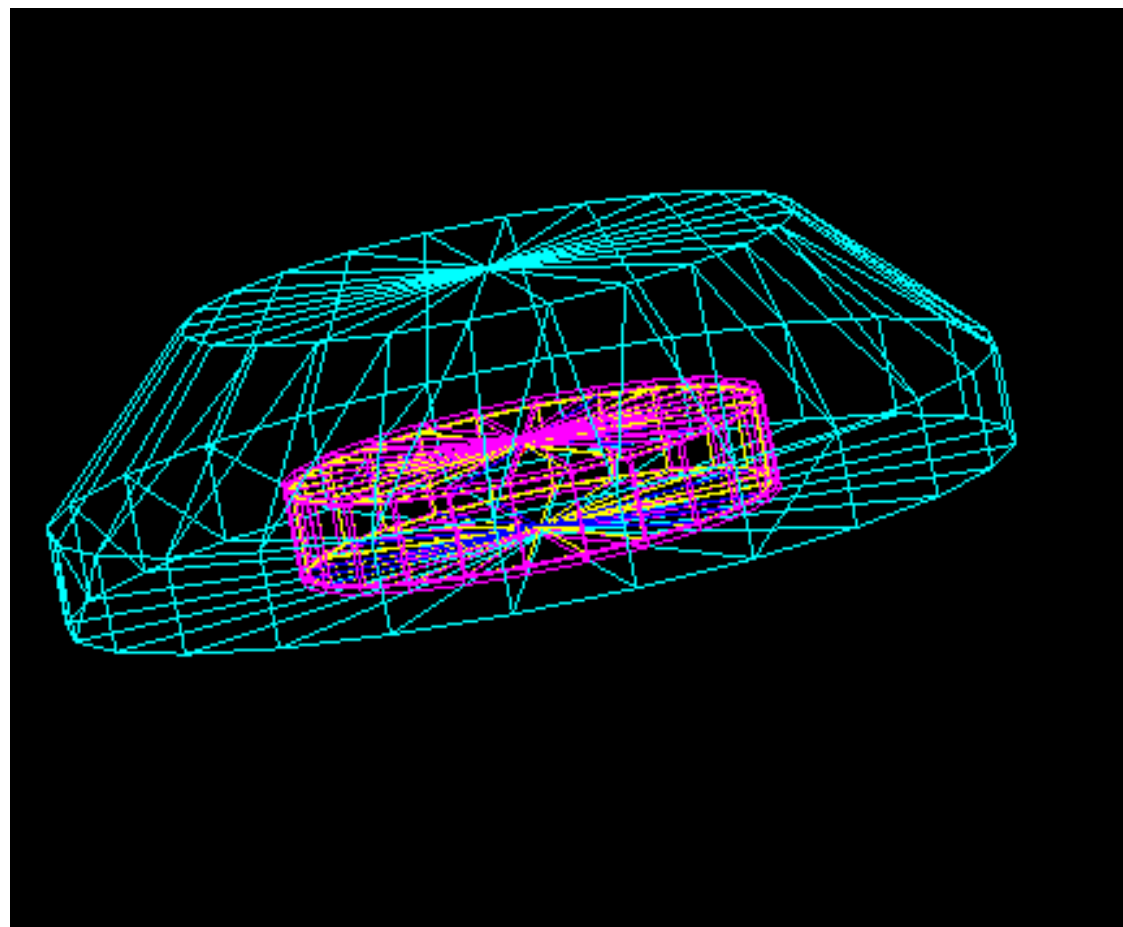
单元探测器 -MD

■ 探测器构造从上往下:

- 土层 $9 \times 13.9 \times 2.5 + 13.9 \times 1.4$
- 水泥罐体 $6.8 \text{m} \times 1.2 \text{m} (0.1 \text{m})$
- tyvek反射袋
- PMT
- 纯水

■ 主要参数:

- 光吸收长度最大 150m (波长依赖)
- Tyvek最大反射率: 97.5% (波长依赖)
- PMT量子效率最大 24.9% , 收集效率 85%



程序使用指南

■ **源程序位置:** `/lhaasofs/user/lhaasorec/publish/km2asoftwre/G4KM2A_V2`

■ **编译方式**

`source setup.bsh; make clean; gmake`

■ **运行前需要设置相应文件**

`xml/injector.xml` 运行模式参数和单元模式下事例产生子

`xml/detector.xml` 探测器尺寸及性质参数

`xml/array.xml` 信号、噪声、触发判选参数

`config/ED_pos_???.txt` ED旋转、各探测器位置

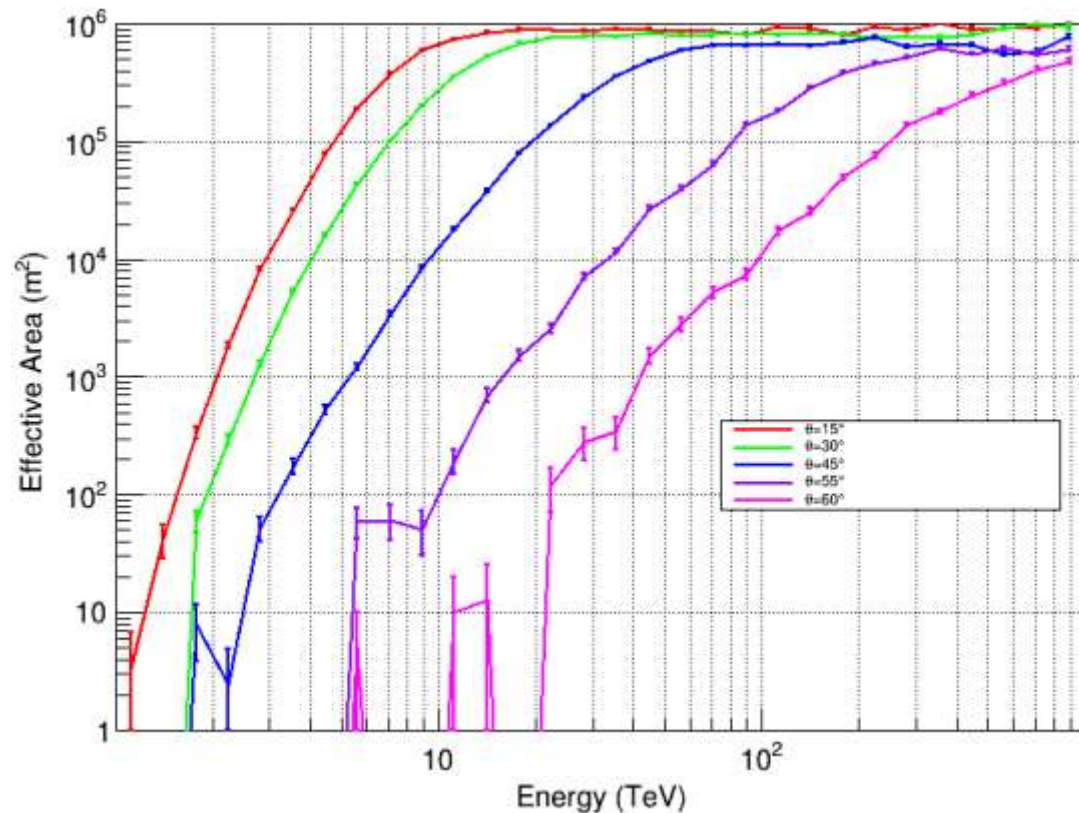
`config/MD_pos_???.txt` MD各探测器位置

■ **运行命令:**

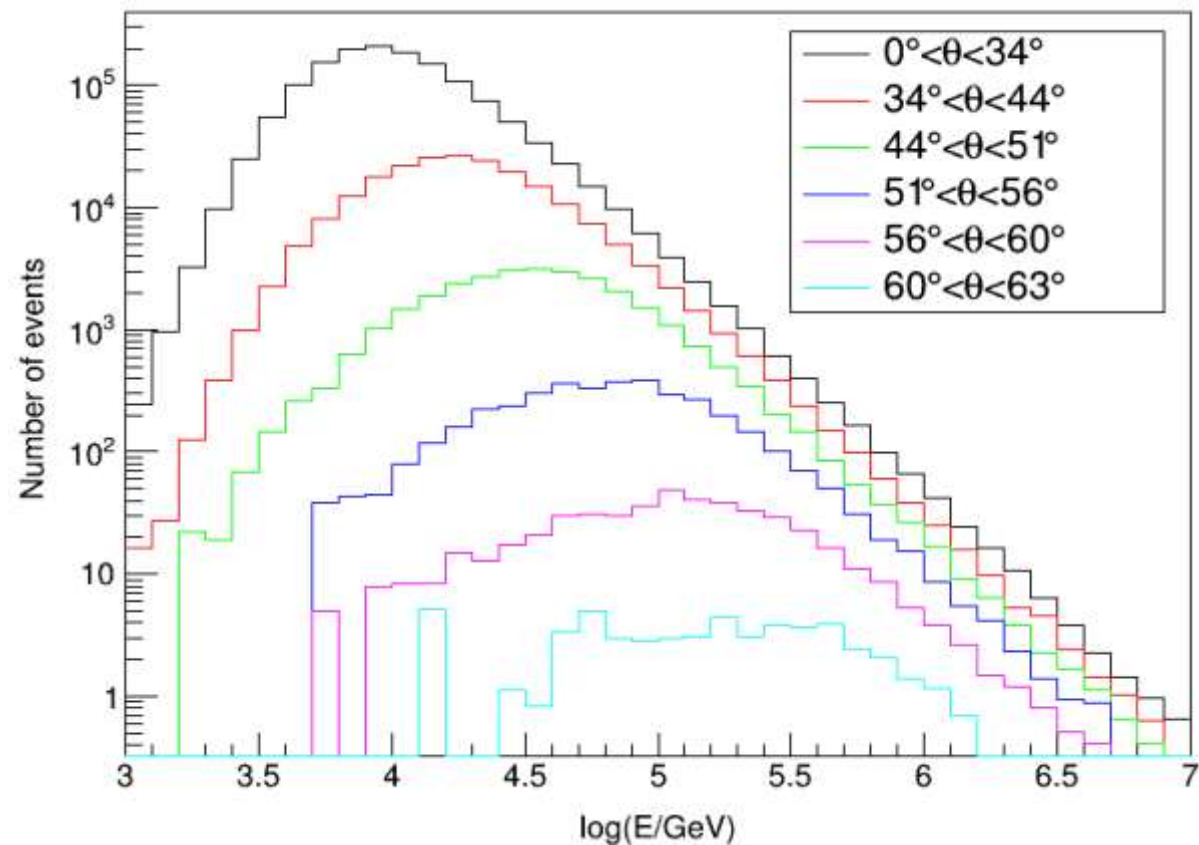
`G4KM2A 模式 N(抽样事例) R(投点圆半径m) out.root(输出文件) corsikafile (输入corsika文件)`

伽马射线响应

有效面积



触发事例能量分布



五、KM2A数据的质量监测

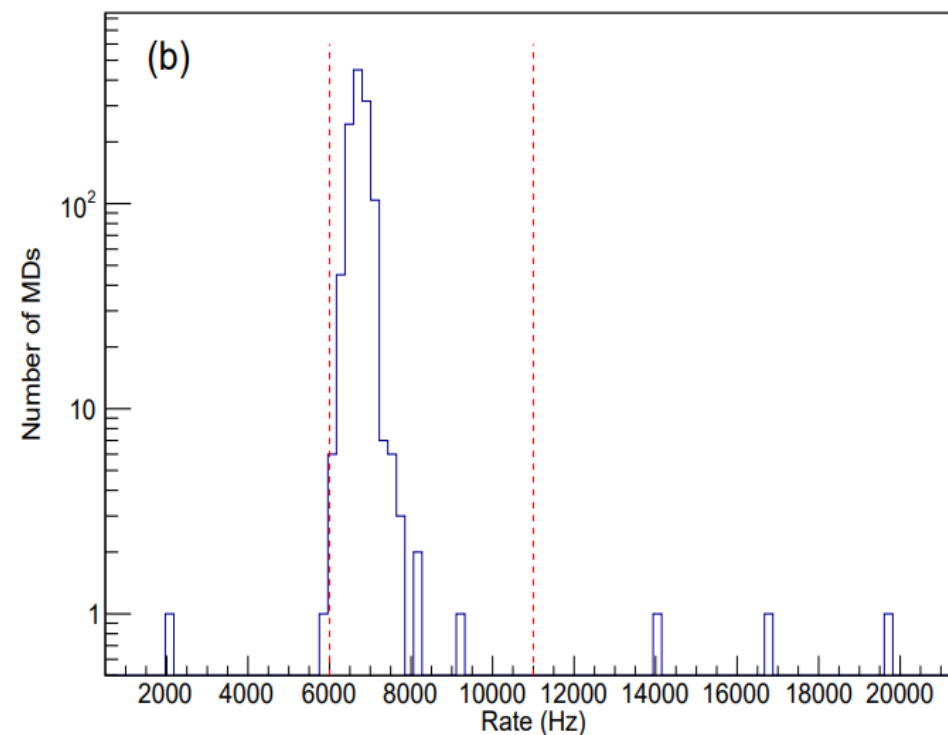
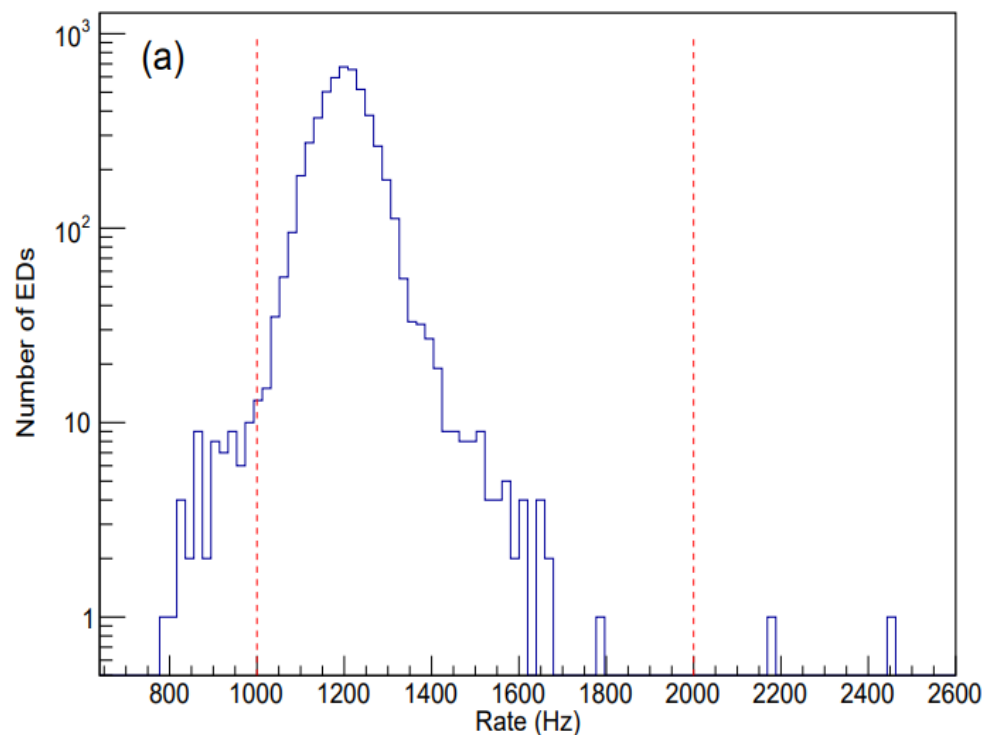
参考文献:

数据质量监测文章: LHAASO coll., Data quality control system and long-term performance monitor of the LHAASO-KM2A, arXiv:2405.11826v3

太阳和月亮影响: Wen et al, Research in Astronomy and Astrophysics, 24:065020 (2024)

事例重建前：探测器质量筛选 (1)

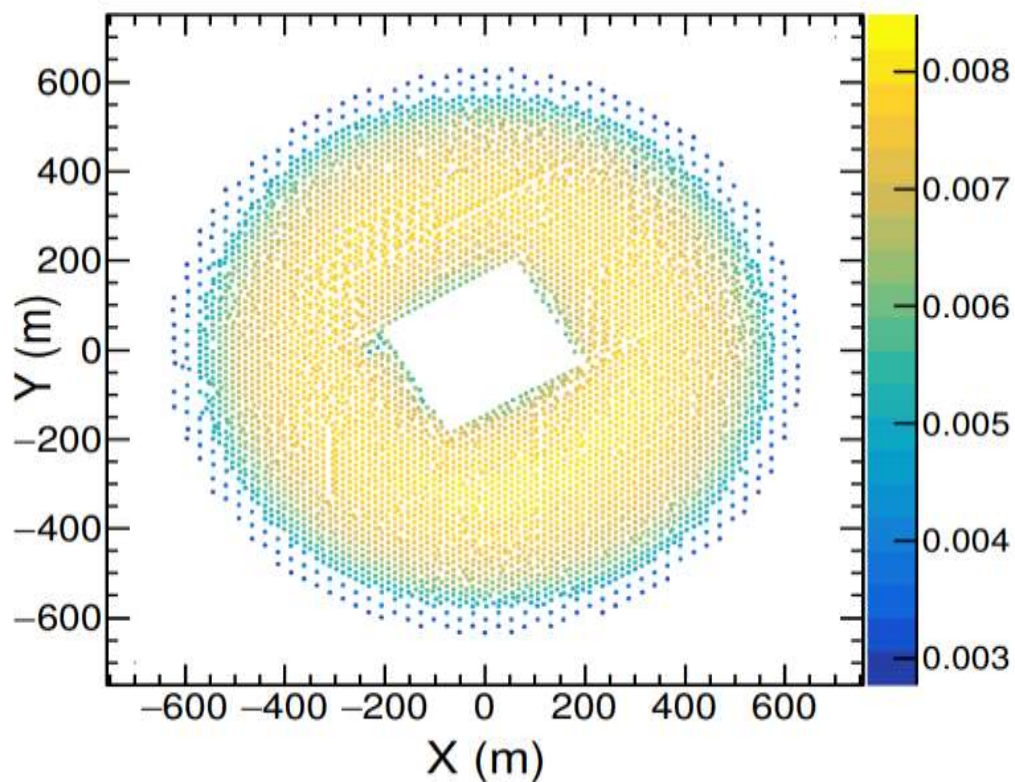
■ 探测器触发率判选



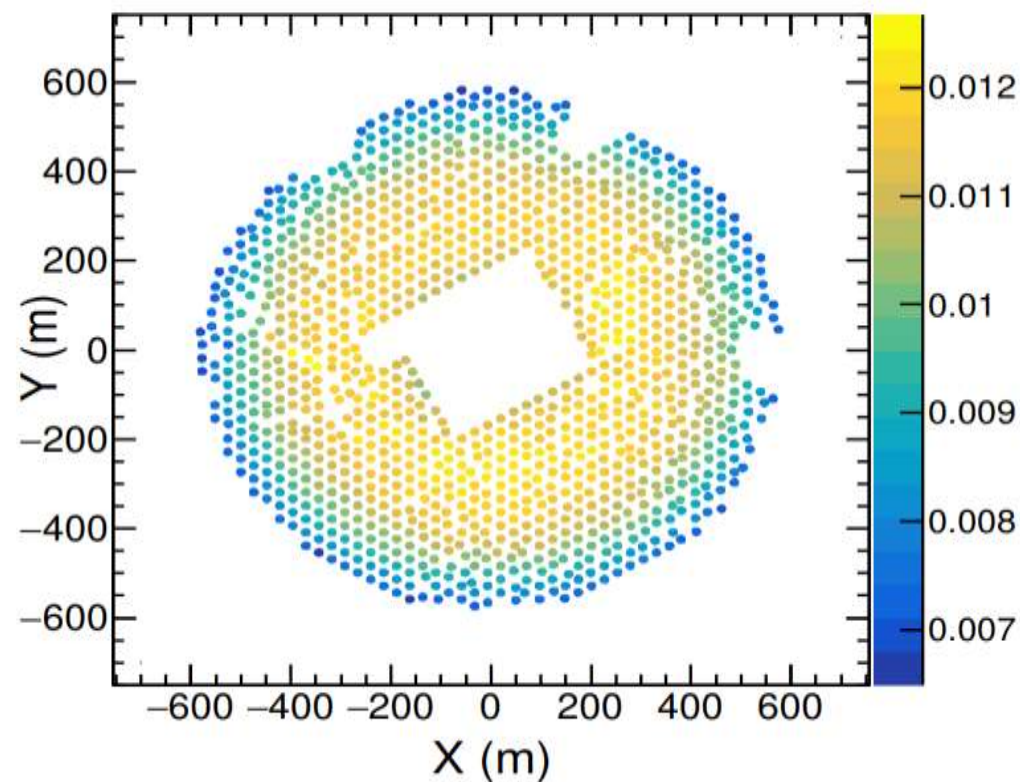
事例重建前：探测器质量筛选 (2)

■ 探测器时间是否同步判选

ED Standard Occupancy

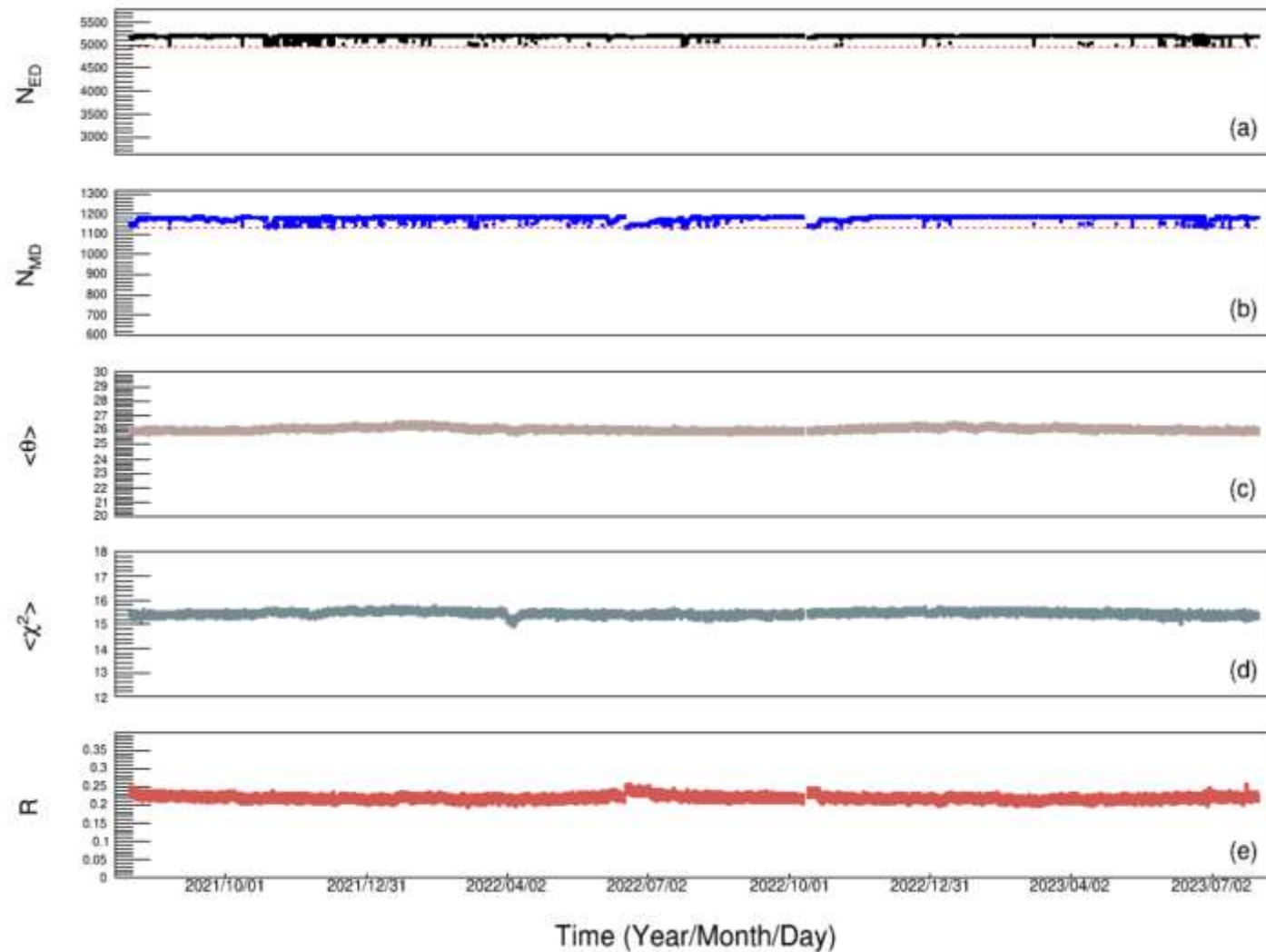
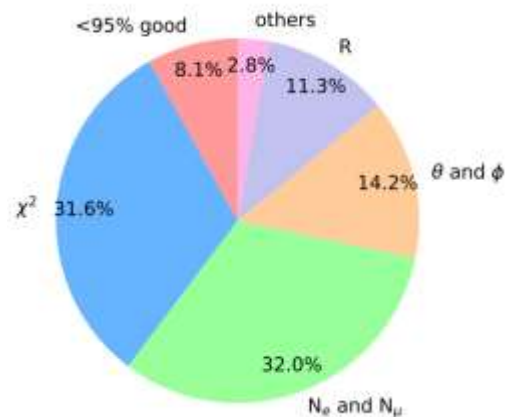
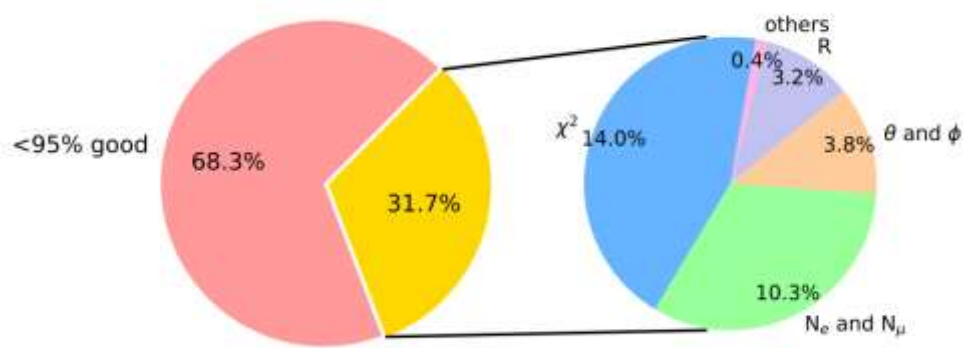


MD Standard Occupancy



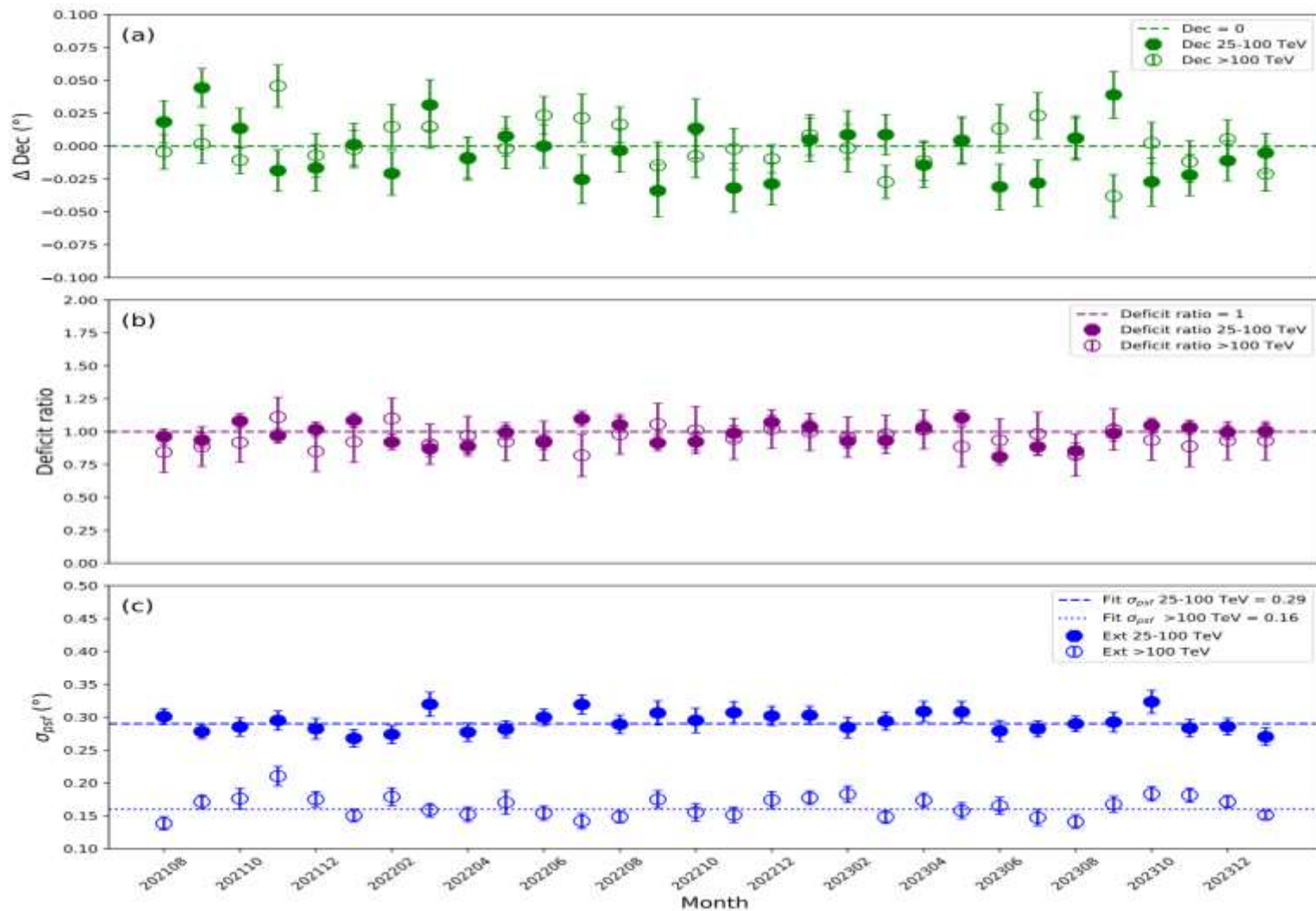
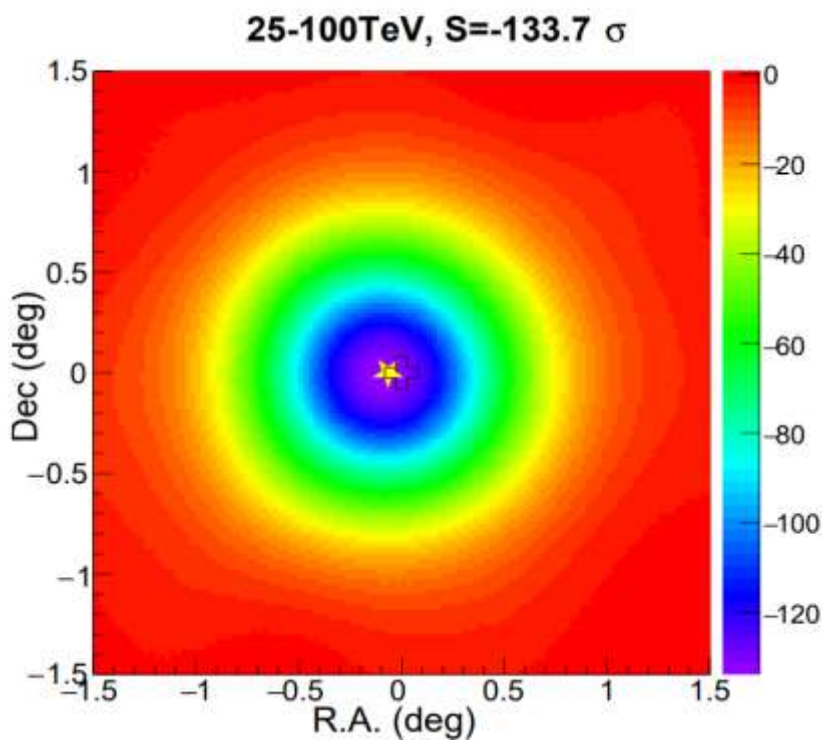
事例重建后：重建数据质量筛选

剔除1.77%数据

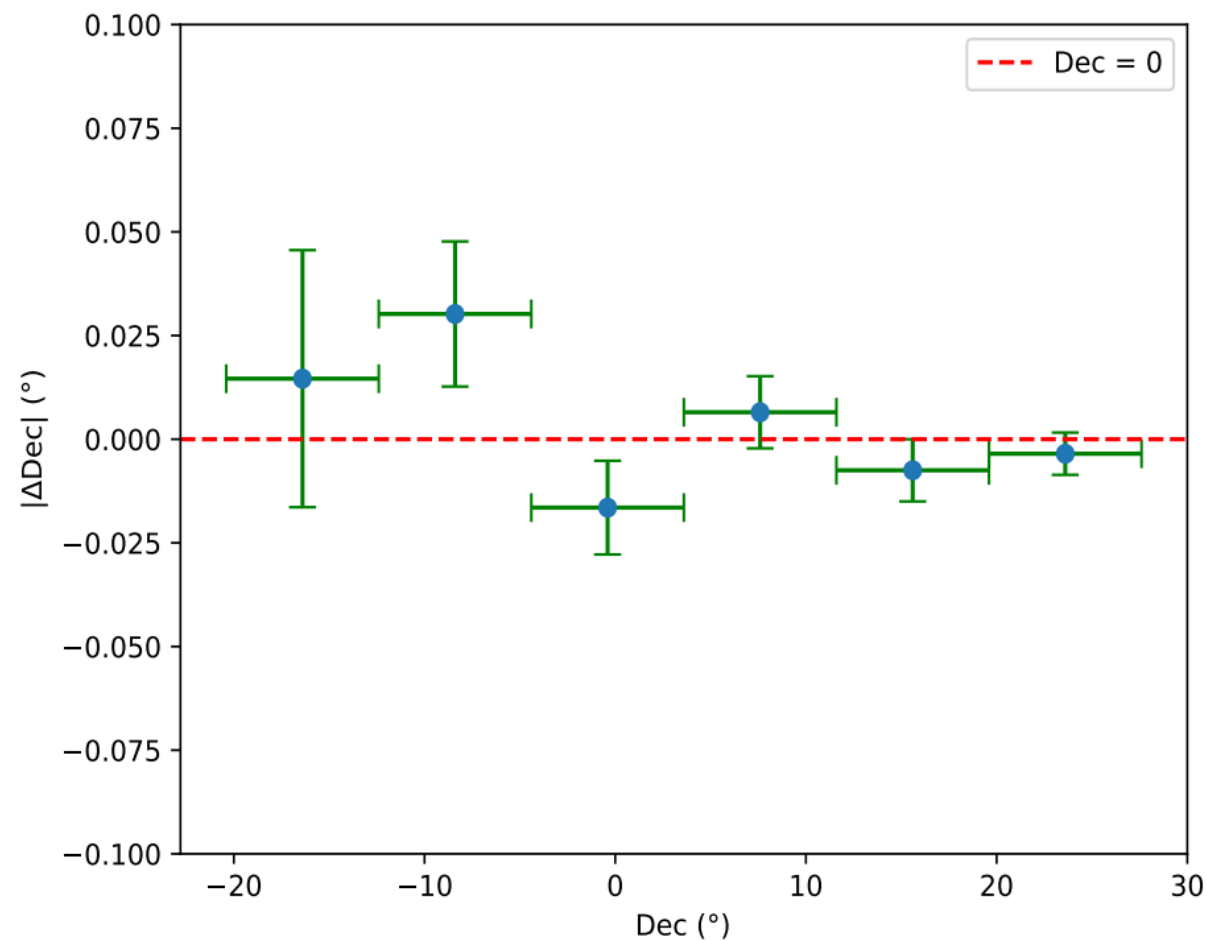
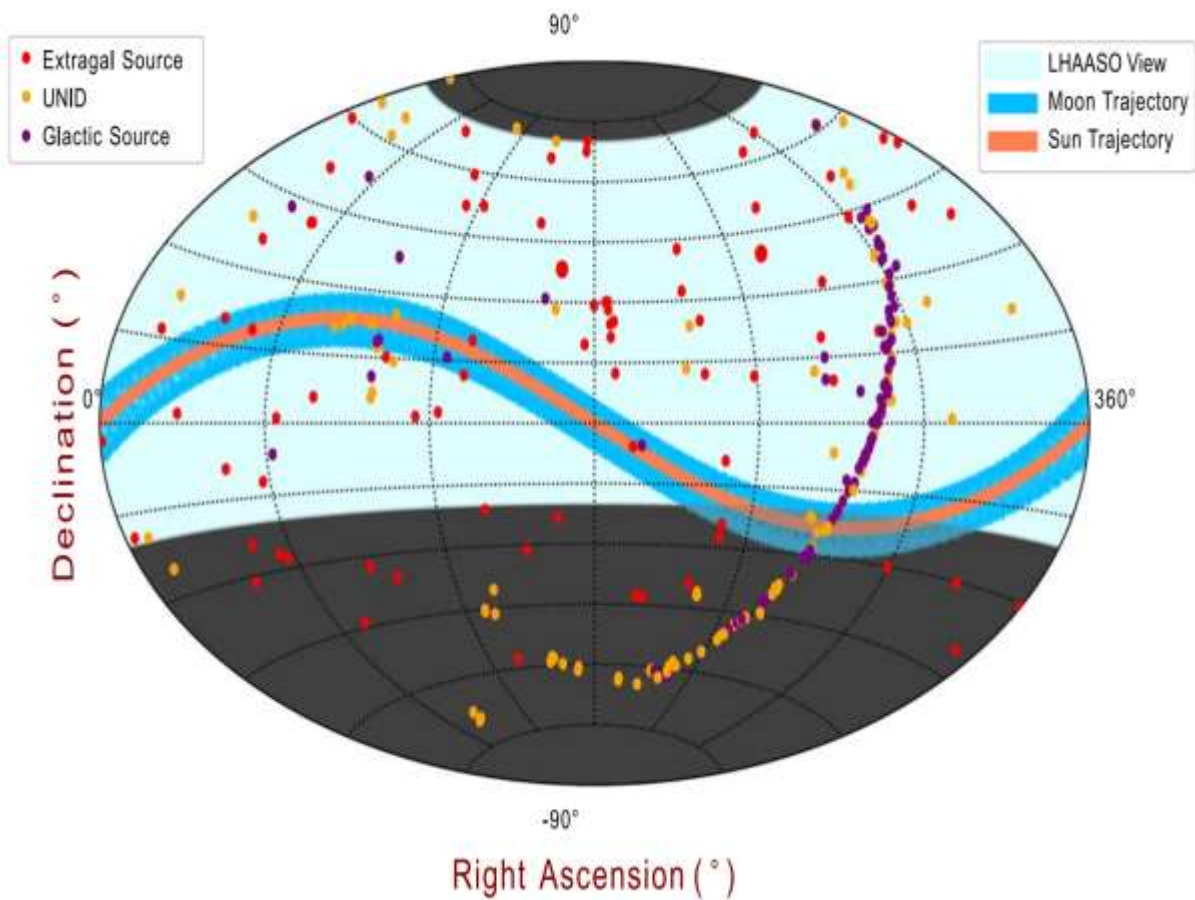


宇宙线月影监测阵列指向和数据稳定性

$$\Delta Dec = -0.003^\circ \pm 0.004^\circ.$$



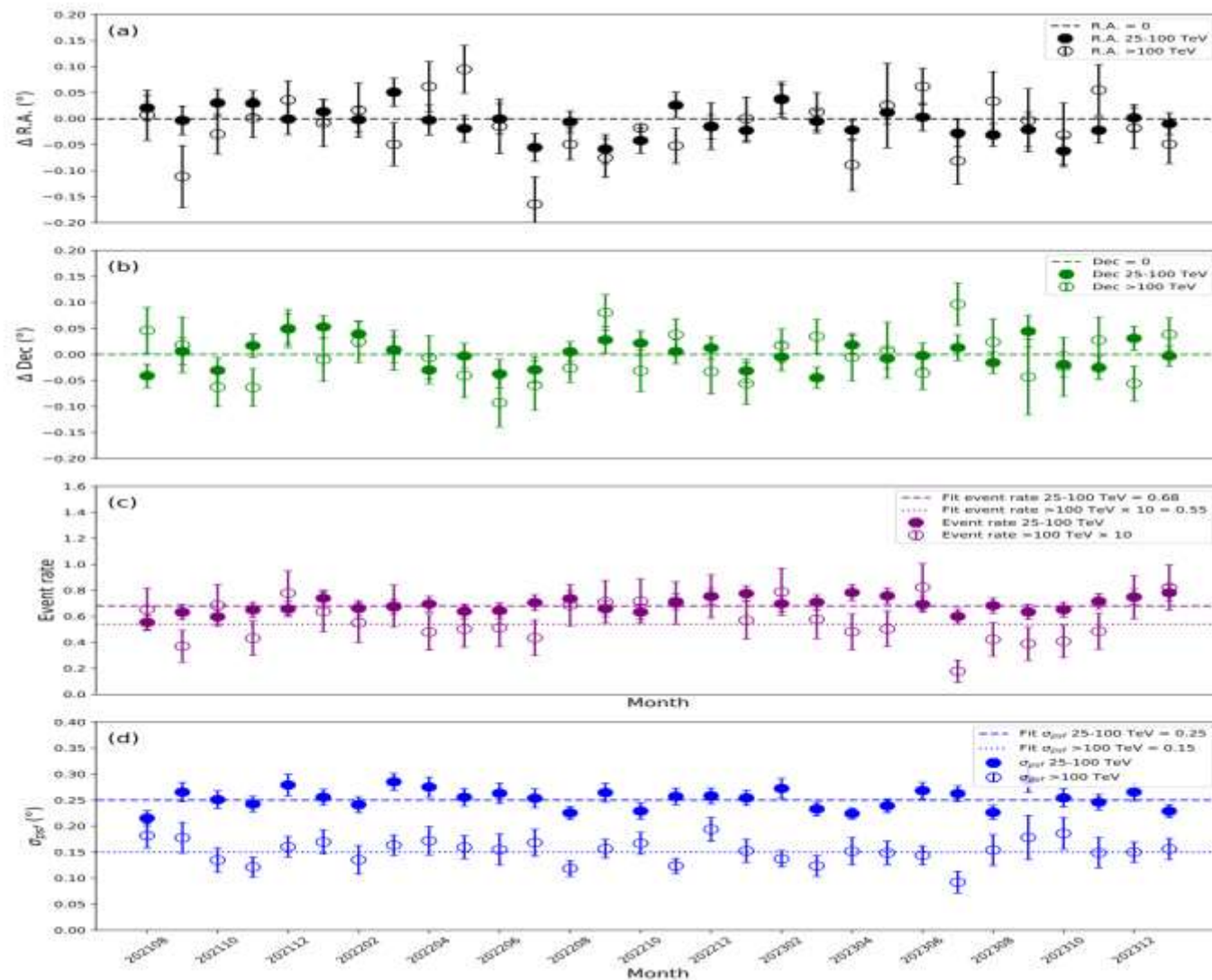
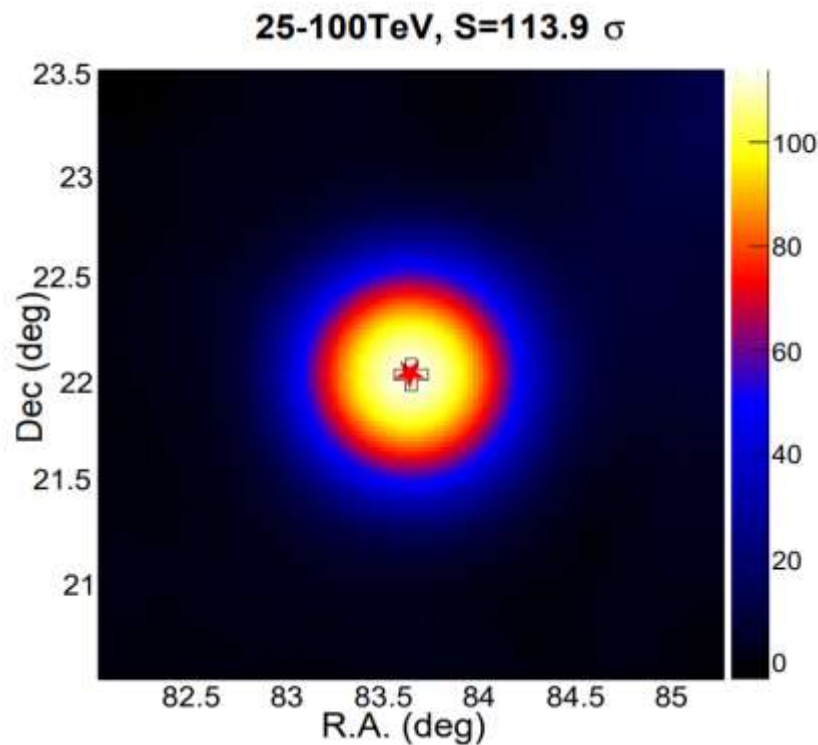
利用月影检测不同Dec的指向偏差



标准烛光Crab监测阵列指向和数据稳定性

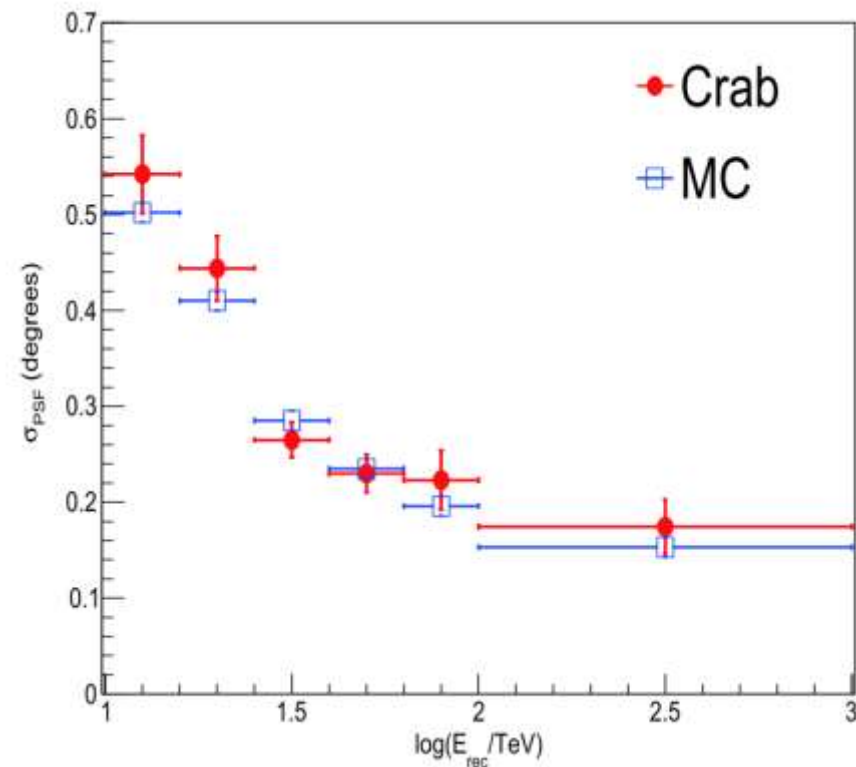
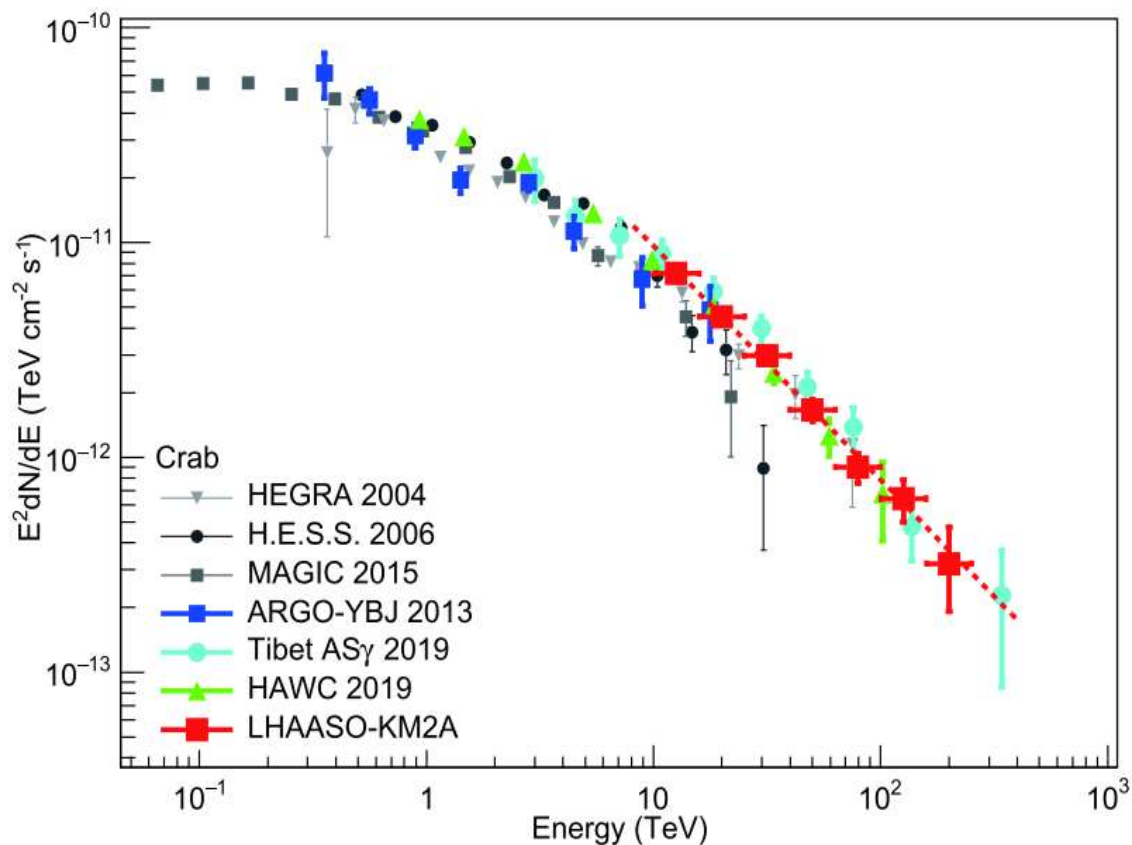
$$\Delta R.A. = -0.003^\circ \pm 0.005^\circ$$

$$\Delta Dec = 0.001^\circ \pm 0.006^\circ$$



标准烛光测量

验证LHAASO指向精度、角分辨率、灵敏度和能谱测量能力！



六、伽马天文背景估计



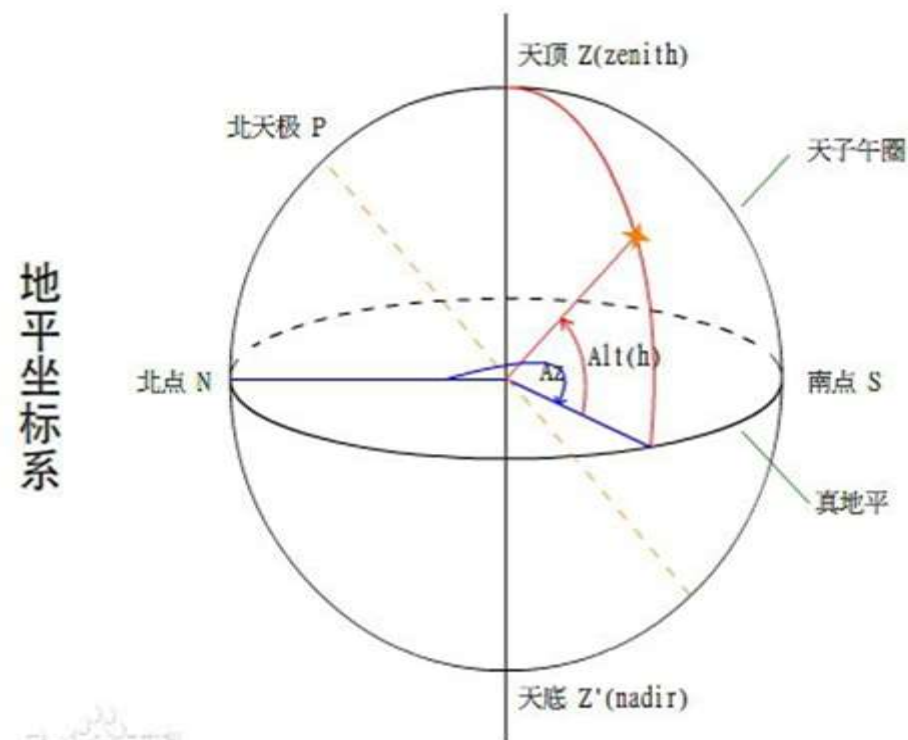
参考文献:

背景估计方法: Fleysher et al., ApJ 603:355 (2004)

显著性估计方法: T.P. Li, Y.Q. Ma, Astrophys. J. 272:317 (1983)

地平坐标系

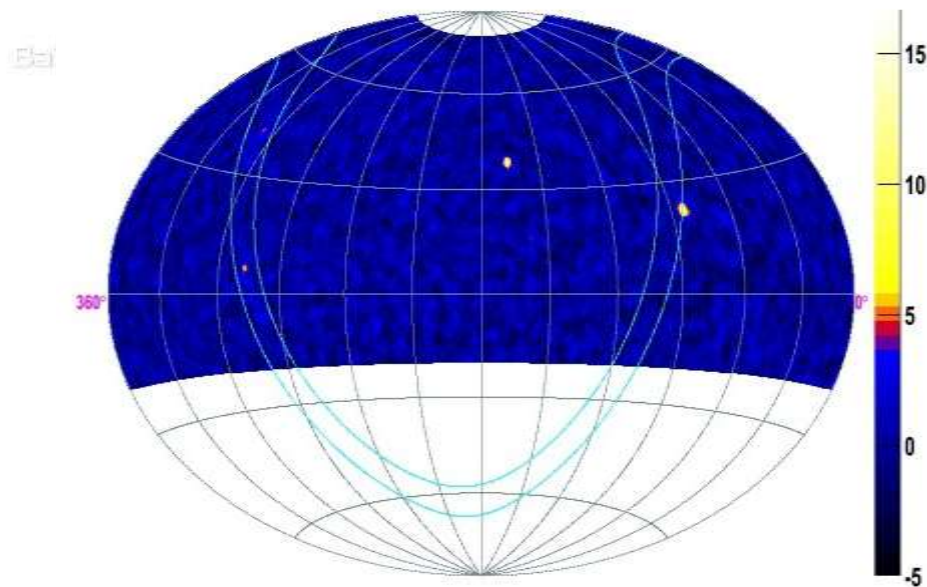
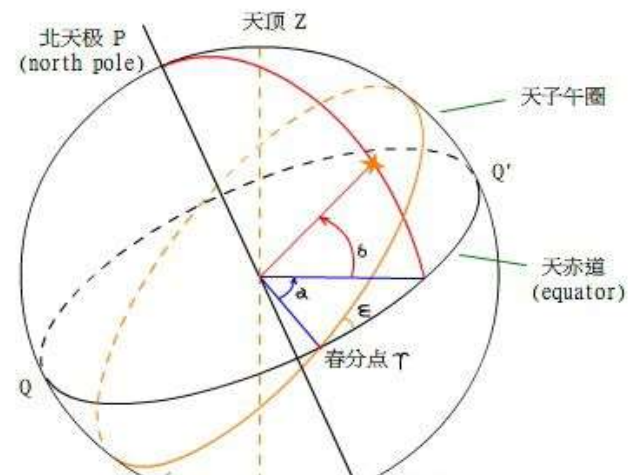
- 观测者为中心的测量坐标系
- 天顶角zenith angle: 正天顶为0度
- 仰角elevation angle: 正天顶为90度
- 方位角azimuth angle: 北方为0点, 顺时针方向度量。



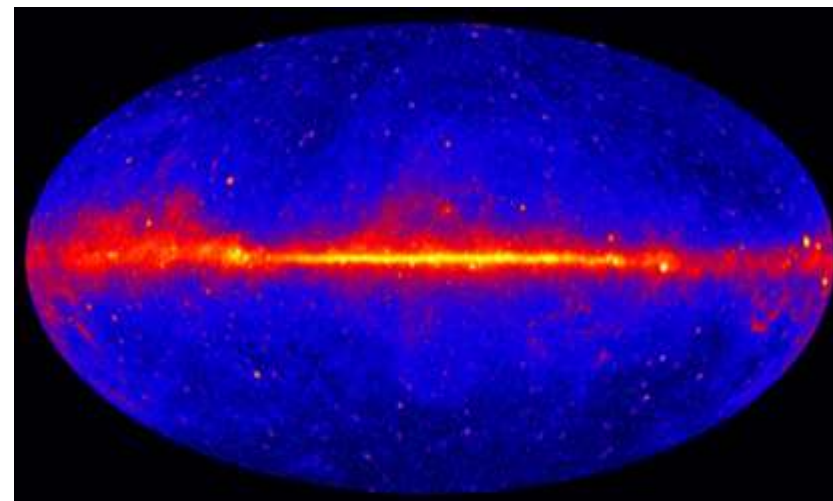
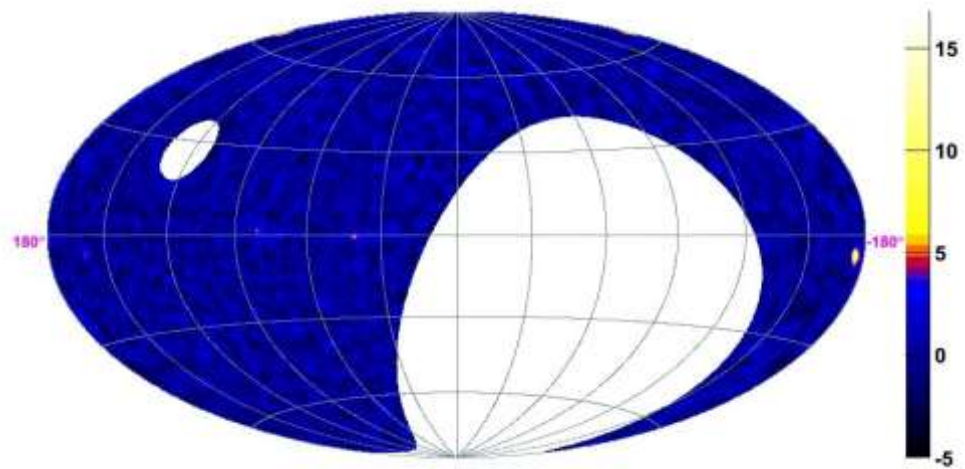
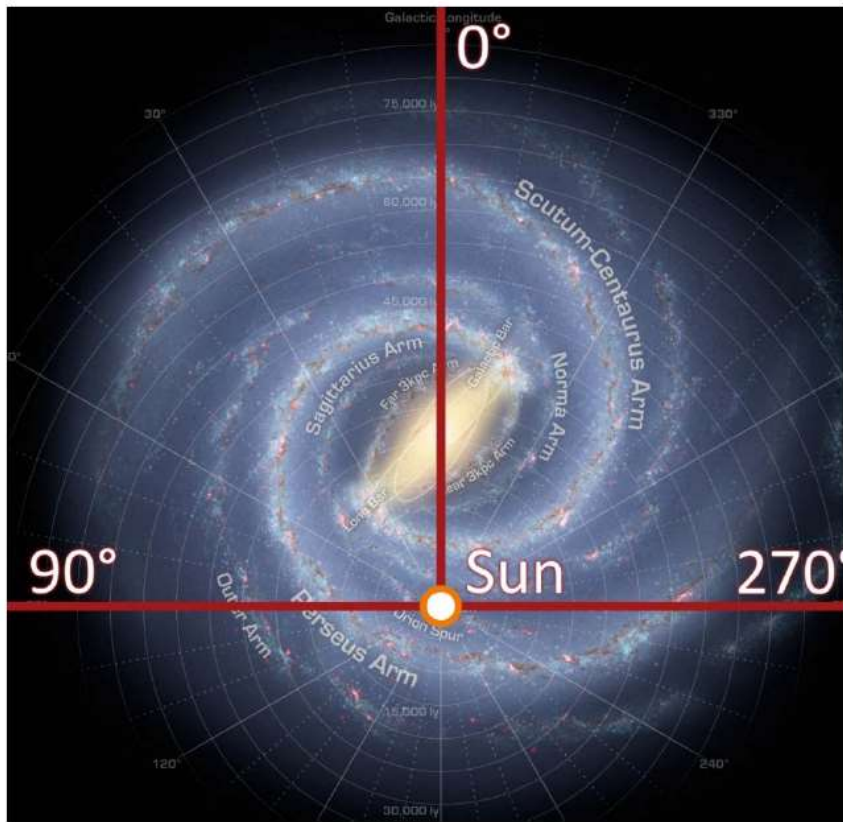
赤道坐标系

- ▶ 参考物体：地球赤道
- ▶ 第一赤道坐标系又称时角坐标系，与观测者有关。时角。时角从 0° 到 $\pm 180^\circ$ 或从0h到 ± 12 h计量，向东为负，向西为正。
- ▶ 第二赤道坐标系或简称赤道坐标系，主点取为春分点。赤经从 0° 到 360° 或从0h到24h计量。天体的赤经和赤纬，不因周日视运动或不同的观测地点而改变。
- ▶ 赤经，赤纬

赤道坐标系

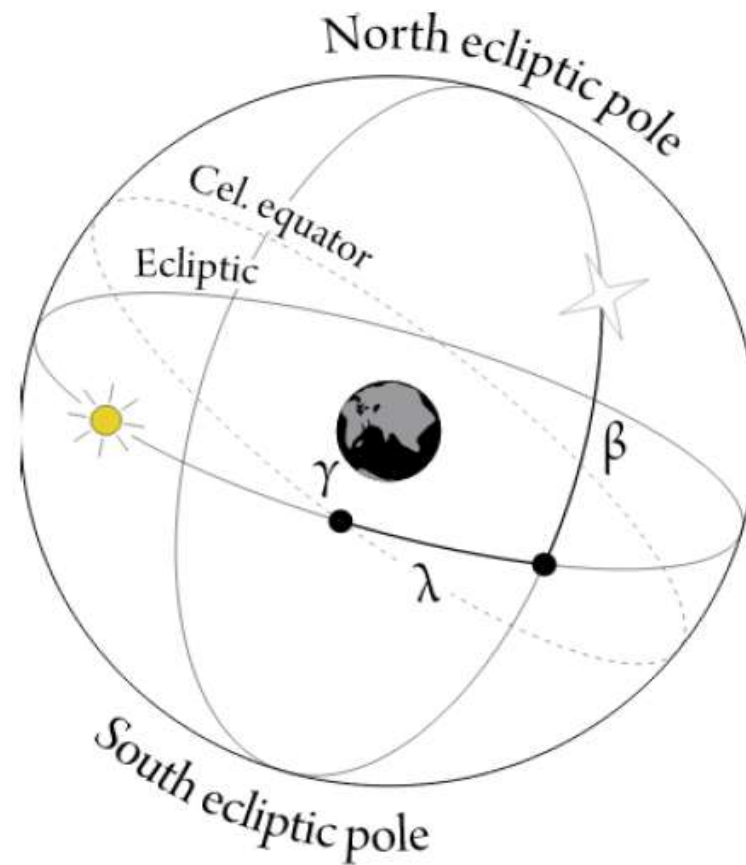


银道坐标系



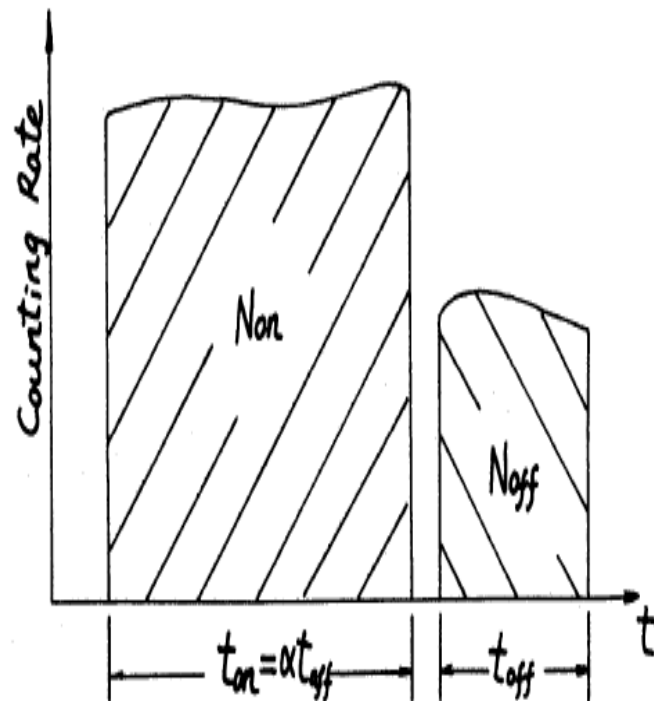
黄道坐标系

- 参考物体：地球绕日轨道
- 以春分点为起点，在黄道上逆时针度量，从 0° 到 360°



背景估计

- **源区**的观测事例**Non**包含源辐射的事例和其它来源的背景事例，背景估计就是通过**其它无源区域**的观测事例**Noff**来估计**源区**的背景事例数**Nb**。
- $a = T_{on}/T_{off}$ ，向源和背源观测时间比
- $N_b = aN_{off}$ ，源区预期的背景事例数
- $N_s = N_{on} - N_b$ ，预期源辐射的事例数



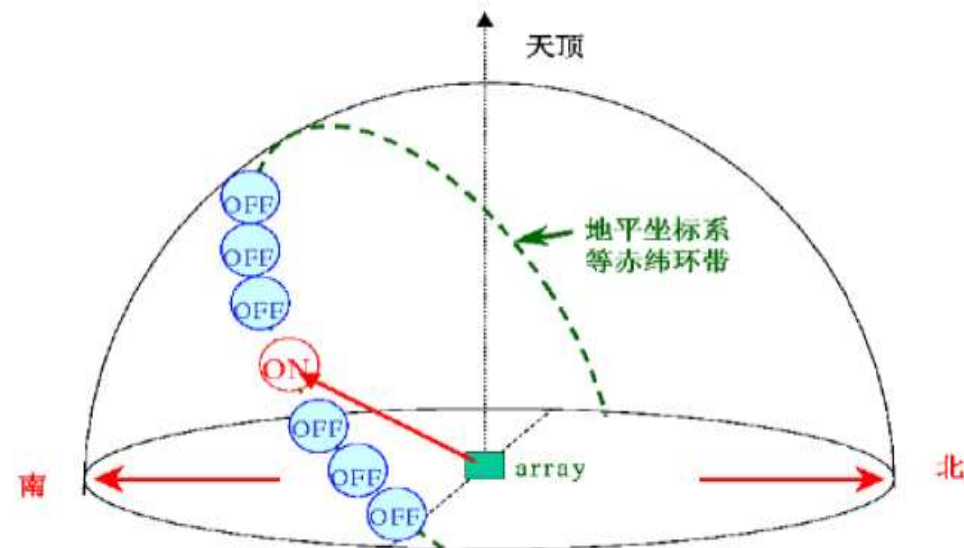
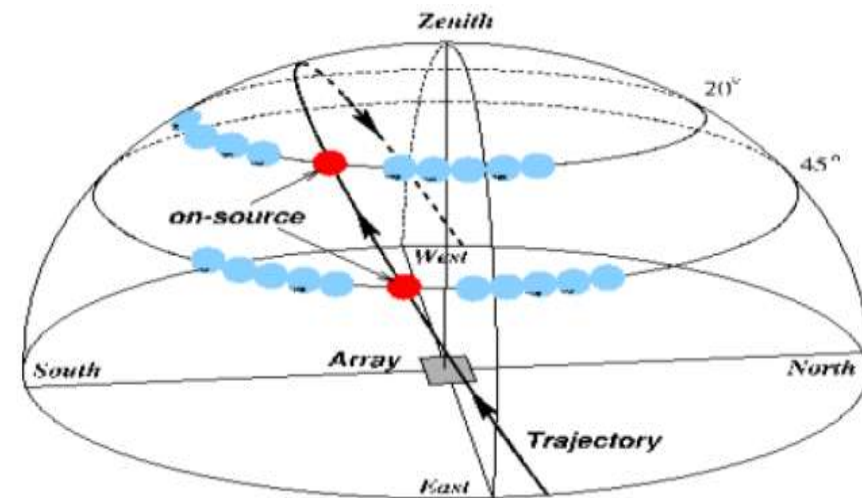
背景估计方法

■ 等天顶角法：

同一时刻，**同样天顶角**，不同方位角。

■ 等赤纬法：

同样天顶角，同样方位角，但是不同时刻。



等赤纬方法

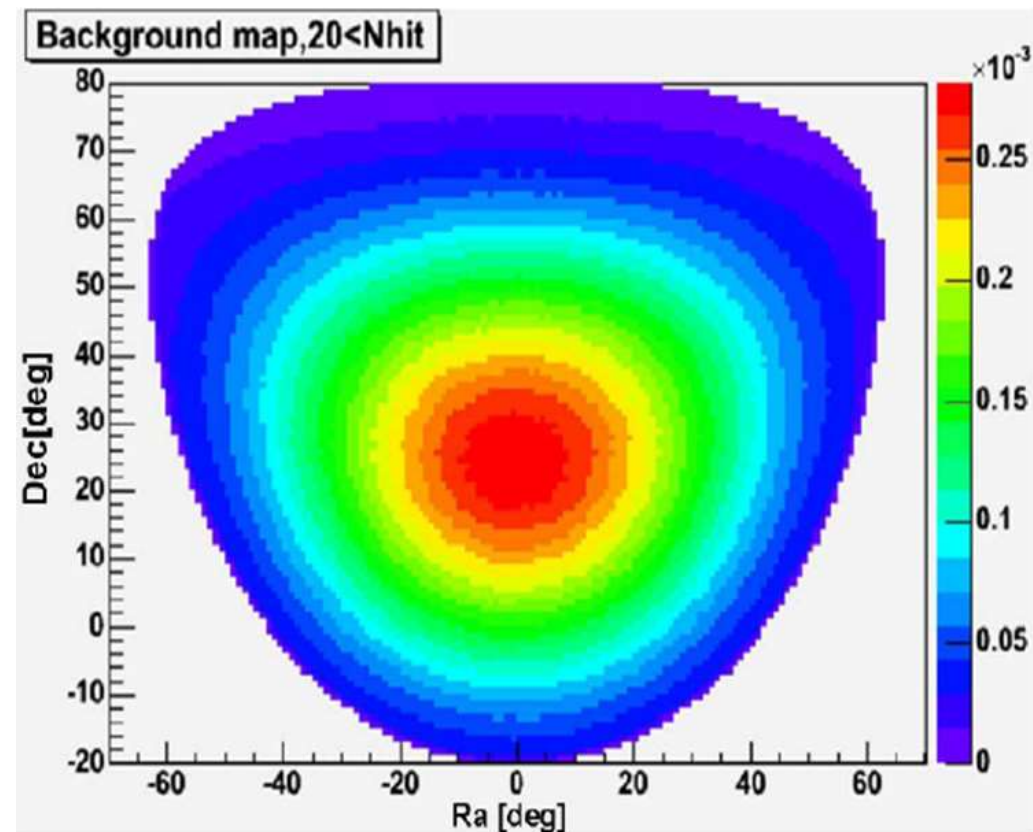
- 利用长时间数据(2h,4h,24h等)产生时角坐标系 (或地平坐标系) **效率图**

- **Time swapping**

通过效率图抽取10倍待估时间窗口内
总触发事例数估计背景

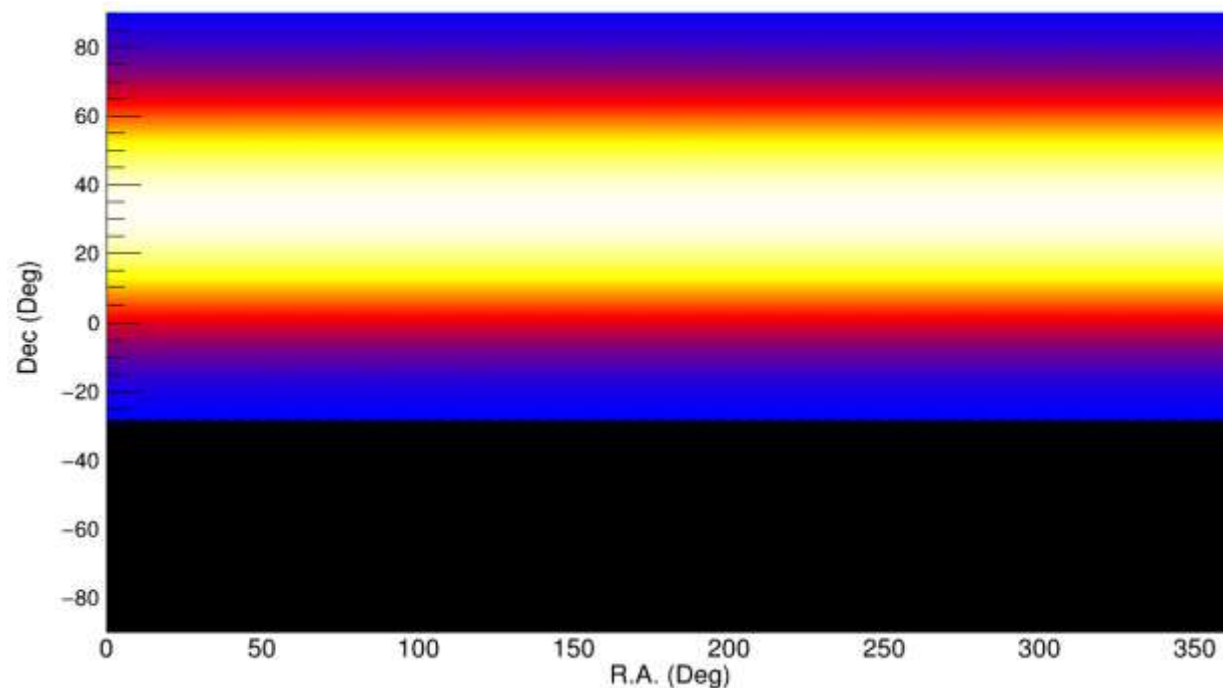
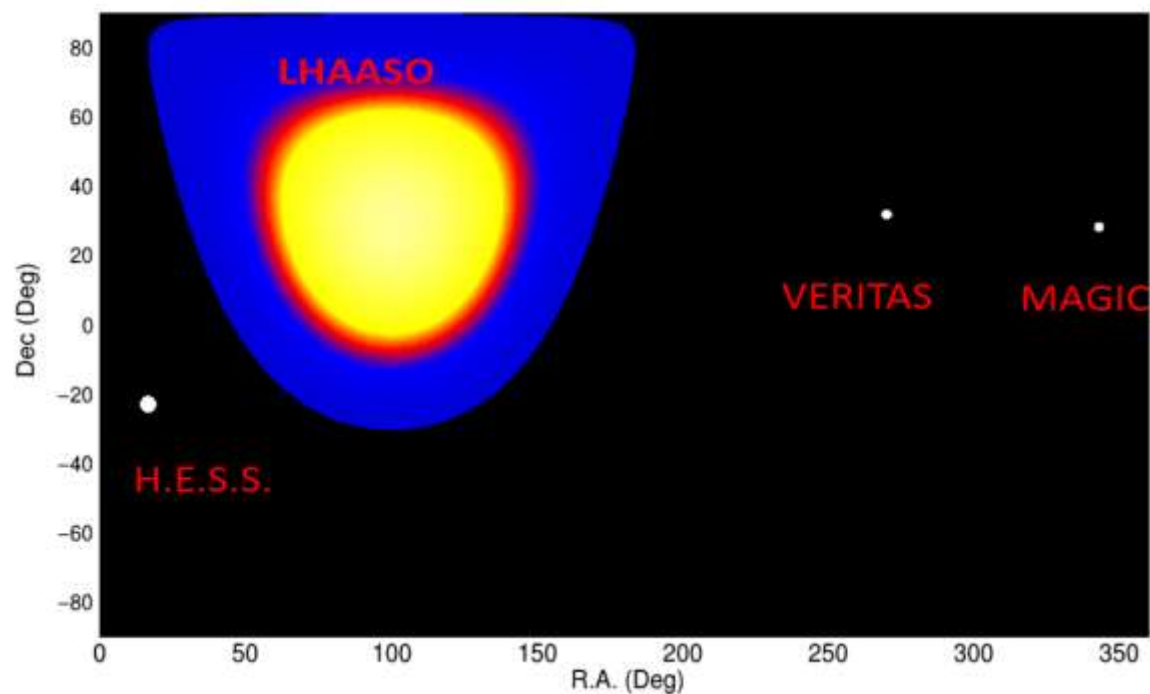
- **Direct integral**

待估时间窗口总触发事例乘以效率估计
背景



天图分析

- 由于地球自转，天体源在探测器视场内不停的移动，所以在实际数据分析中，都是按一定的时间步长（0.1deg/24s）对天体源进行跟踪，然后再累积起来。
- 一般对天区划分为0.1degx0.1deg，然后对视场内所有的天区进行分析。



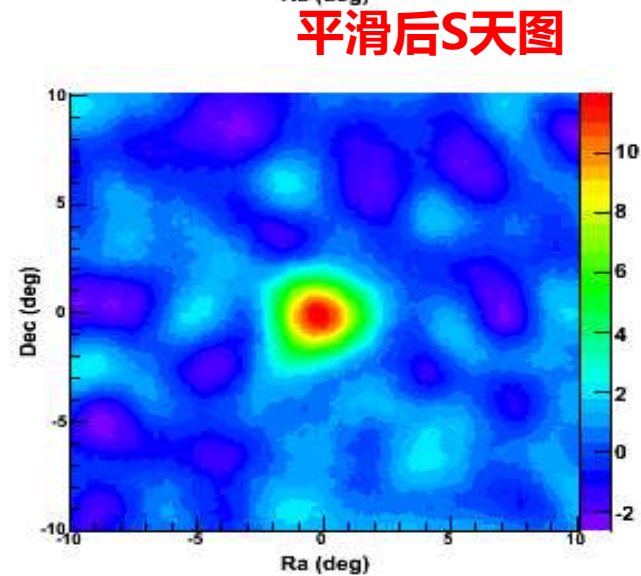
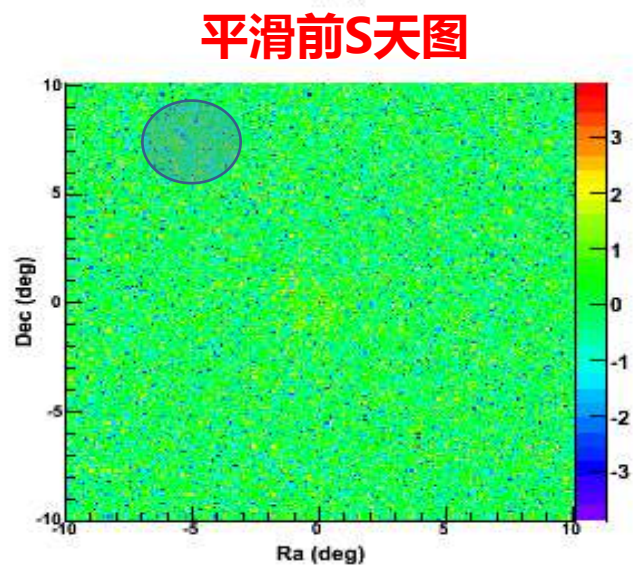
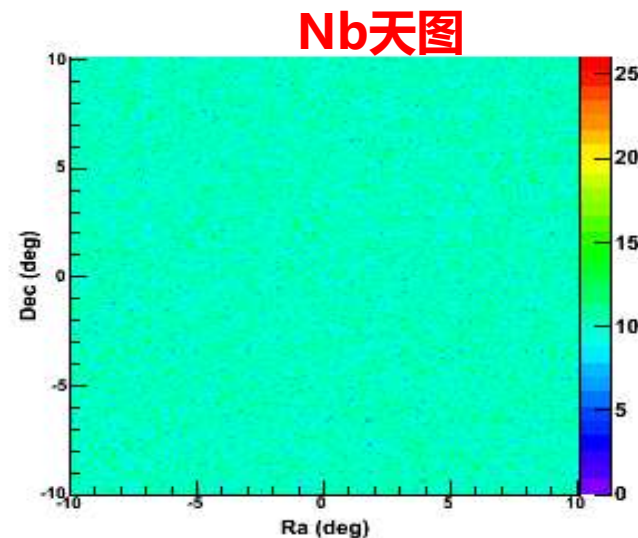
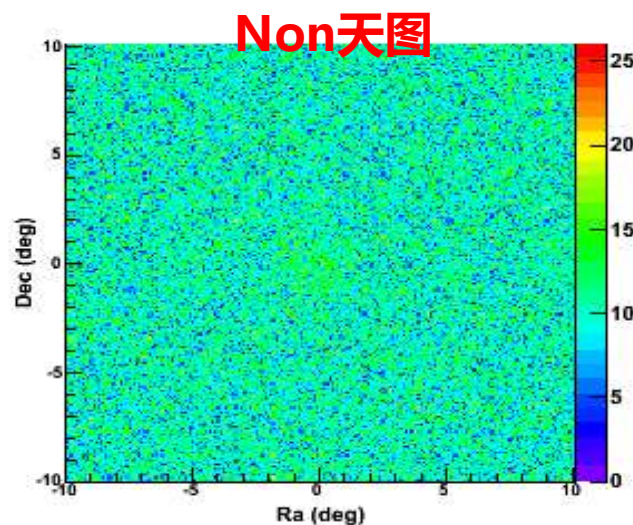
天图与平滑

■ 平滑

根据角分辨率大小对天图进行平滑

■ 简单平滑

■ 高斯平滑



显著性估计

- 在Non、Nb数比较大时，三个公式结果基本一致，但是在数目小时李马公式17最正确。

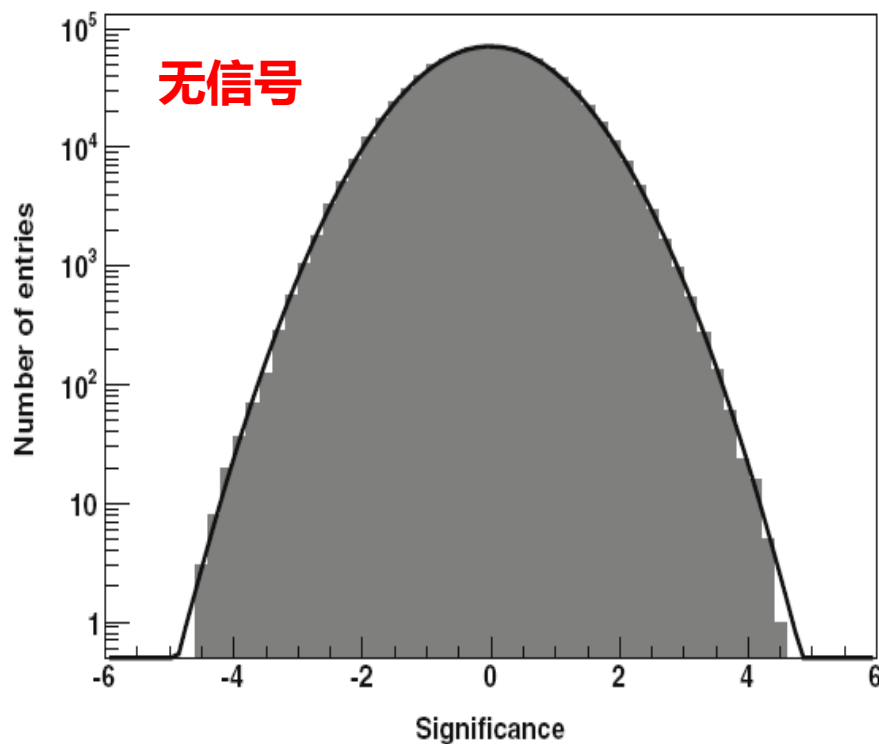
$$S = \frac{N_S}{\hat{\sigma}(N_S)} = \frac{N_{\text{on}} - \alpha N_{\text{off}}}{\sqrt{N_{\text{on}} + \alpha^2 N_{\text{off}}}}. \quad (5)$$

$$S = \frac{N_S}{\hat{\sigma}(N_S)} = \frac{N_{\text{on}} - \alpha N_{\text{off}}}{\sqrt{\alpha(N_{\text{on}} + N_{\text{off}})}}. \quad (9)$$

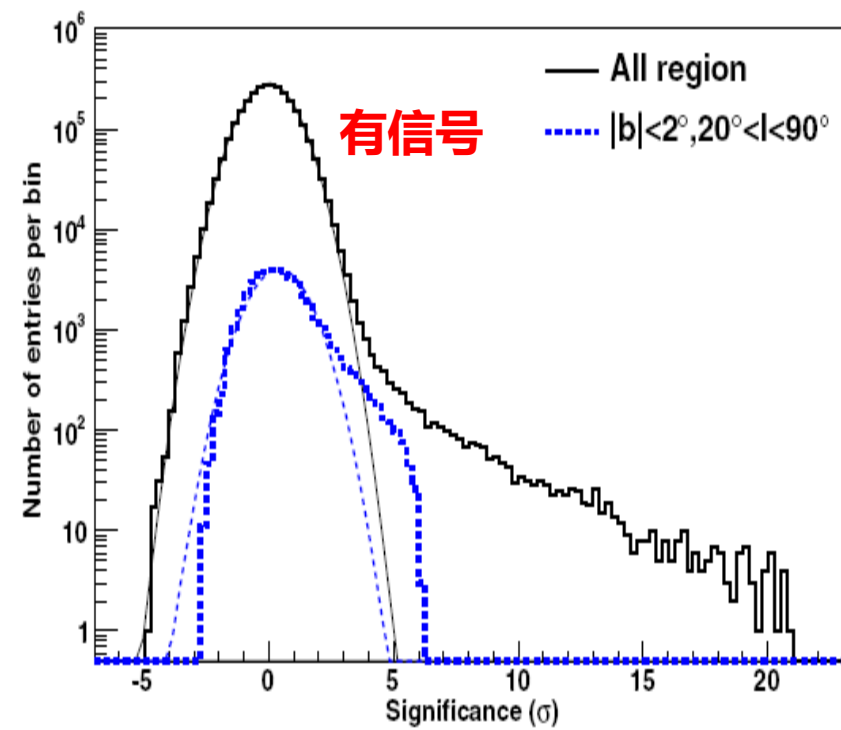
$$S = \sqrt{-2 \ln \lambda} = \sqrt{2} \left\{ N_{\text{on}} \ln \left[\frac{1 + \alpha}{\alpha} \left(\frac{N_{\text{on}}}{N_{\text{on}} + N_{\text{off}}} \right) \right] + N_{\text{off}} \ln \left[(1 + \alpha) \left(\frac{N_{\text{off}}}{N_{\text{on}} + N_{\text{off}}} \right) \right] \right\}^{1/2}. \quad (17)$$

显著性分布

- 在没有源的情况下，显著性符合标准正态分布，超出标准正态分布说明可能存在信号。



Astroparticle Physics 32 (2009) 47–52

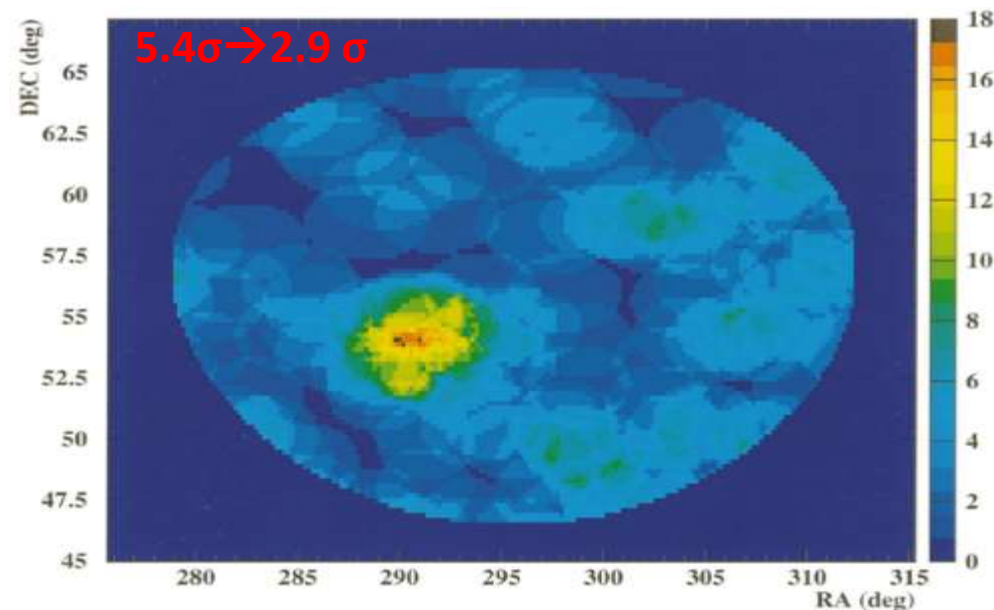
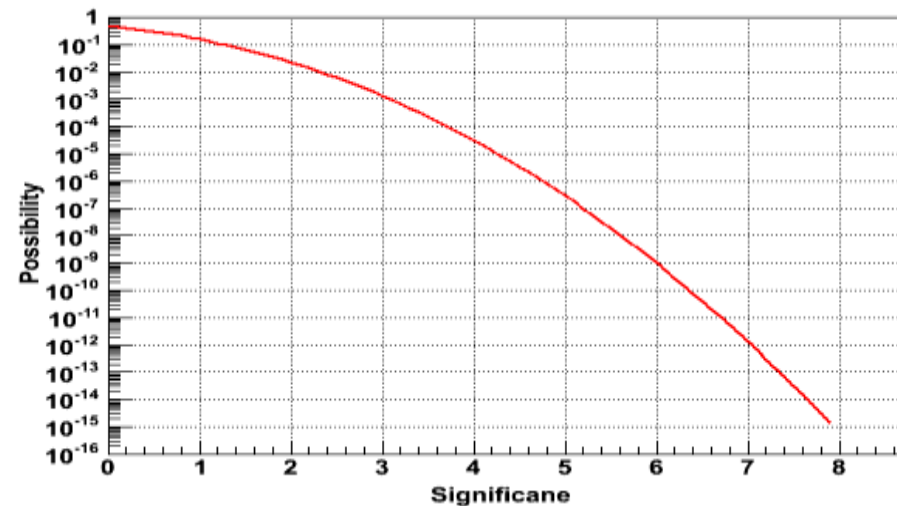


ApJ 779:27, 2013

显著性与概率

- 3σ , $P=1.35e-3$
- 5σ , $P=2.87e-7$
- 6σ , $P=9.87e-10$

验前概率乘以实验次数为验后概率，**验后概率才反应事件真实性概率**。在分析中应严格统计实验次数，低估实验次数将会高估显著性。



更多成果见LHAASO官网: <http://english.ihep.cas.cn/lhaaso/>

谢谢!