



LHAASO-KM2A 电磁粒子探测器的标定研究

报告人：吕洪魁

中国科学院高能物理研究所

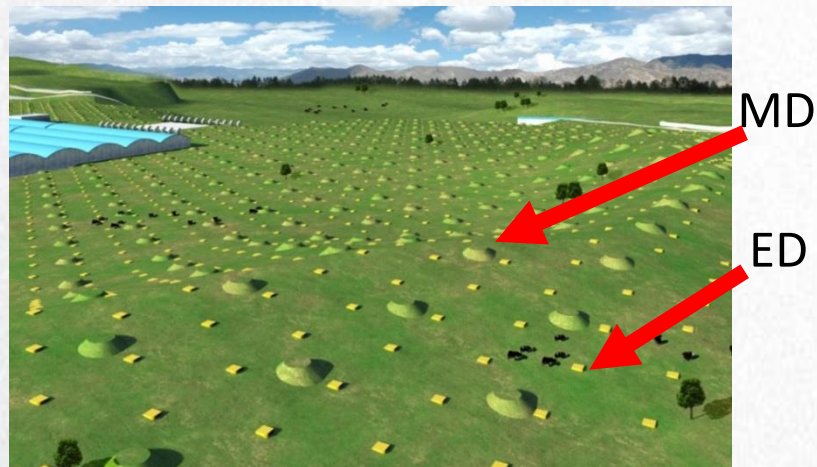
内容

- LHAASO-KM2A 实验简介
- KM2A 电磁粒子探测器
- KM2A 电磁粒子探测器的标定
- 总结

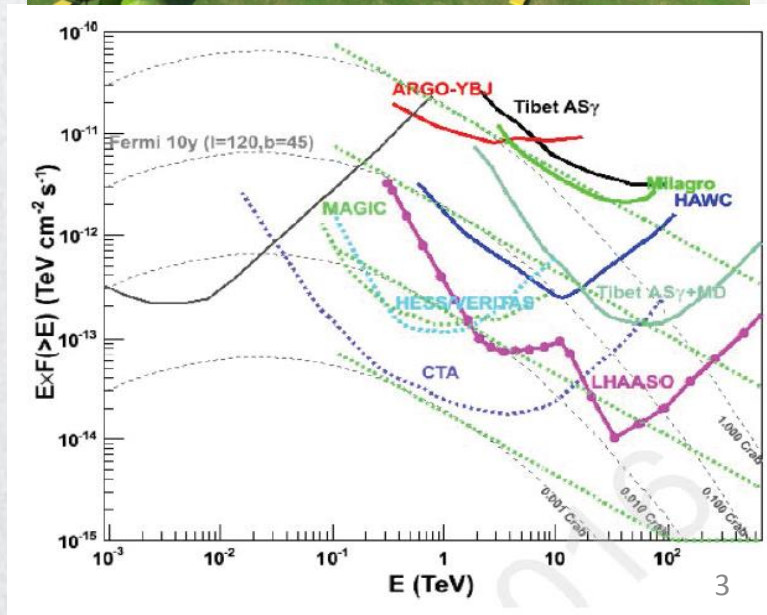
LHAASO-KM2A

■ KM2A承担的主要物理目标有：

- 宇宙线起源；
- 伽马天文；
- 宇宙线能谱测量；
- ...

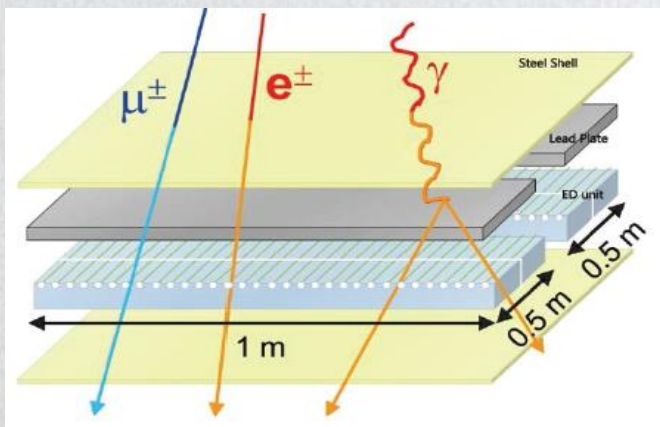


性能指标	性能参数
灵敏度	1.2% Crab @ 50 TeV
背景排除能力	Background free >50 TeV
角分辨	$\sim 0.5^\circ$ @ 30 TeV
探测能段	10 TeV - 100 PeV



● KM2A 电磁粒子探测器 (ED)

- ED 是KM2A 中的一种探测器，其使用闪烁体作为探测介质，用于探测大气广延簇射 (EAS)中的 $e^{+/-}$ ， $\mu^{+/-}$ ， γ ；
- 两个基本测量量：EAS次级粒子的**粒子数密度**和**粒子到达时间**；



ED 性能指标	性能要求
探测效率 (> 5 MeV)	> 95 %
粒子数测量动态范围	4个量级 (1 - 10 ⁴ MIPs)
ED 之间时间同步精度	< 0.5 ns
时间分辨	< 2 ns
单通道计数率	< 2 KHz

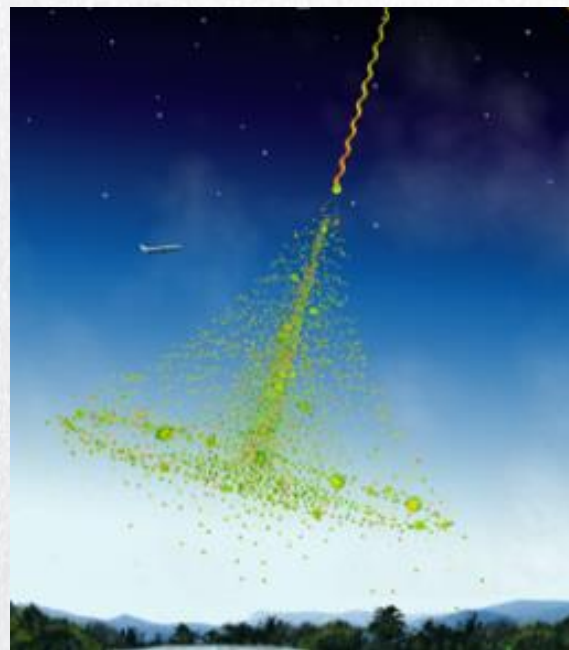


● KM2A-ED 标定需求

- ED 两个基本测量量：**粒子数和粒子到达时间**；
- 和两个重要的重建物理量（原初宇宙线粒子的**能量、方向**）有直接联系；

$$c(t_i - t_0) = \sin \theta \cdot \cos \varphi \cdot x_i + \sin \theta \cdot \sin \varphi \cdot y_i$$

- 单元探测器需要标定的物理量：
 1. 到达时间 → 方向重建
 2. 探测器位置坐标 → 方向重建
 3. 电荷量 → 粒子数 → 能量重建
- 阵列需要标定的物理量：
 1. 阵列方位指向 → 方向
 2. 阵列的能标 → 能量



➤ **标定的精度**直接影响测量精度，从而影响**物理结果的精度**。

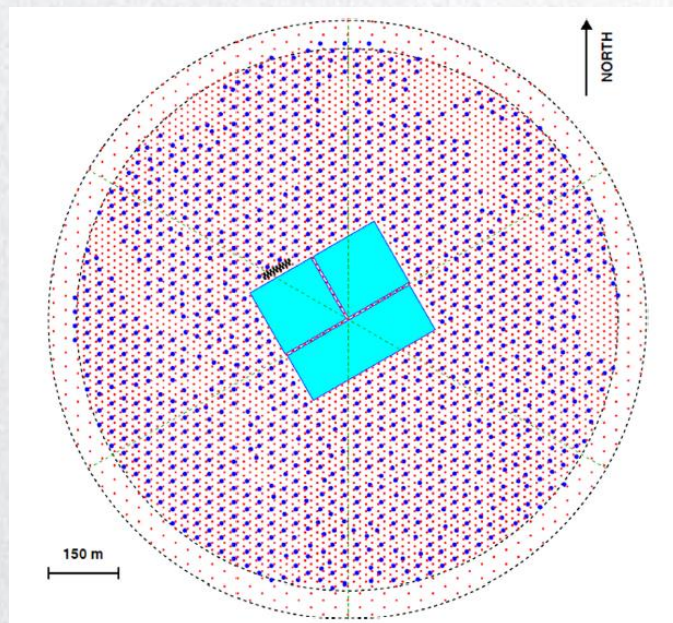
● KM2A-ED 标定需求

- 标定的难点：

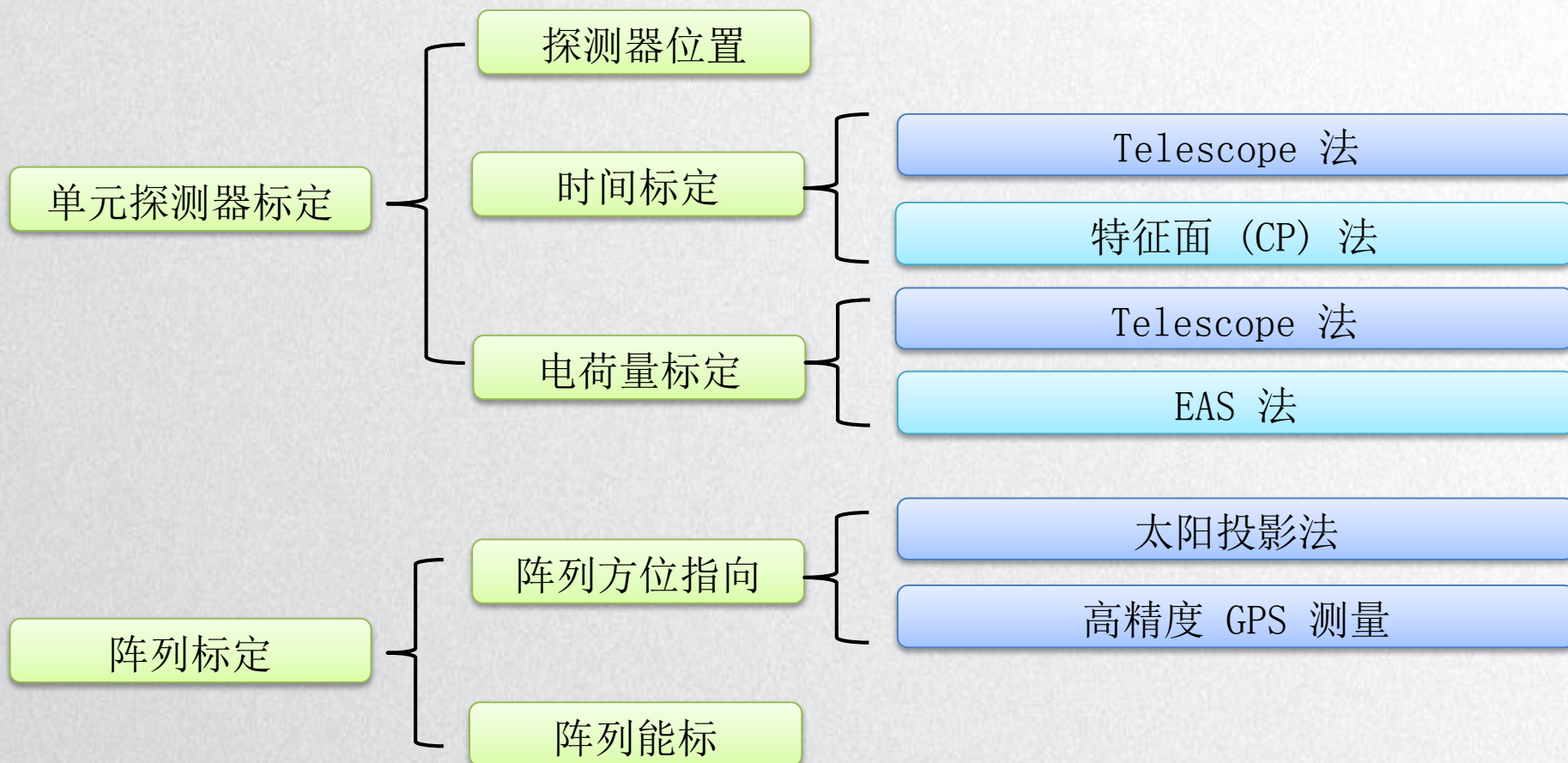
1. KM2A探测器数量庞大、分布广，传统实验方法标定**消耗时间和人力**，并不适用；
2. KM2A运行于野外环境，复杂多变的环境条件对探测器性能有潜在影响，需要**实时刻度和长期监测**，传统方法难以实现。

- 解决方案：

1. 硬件优化升级，从测量端保证精度；
2. 发展了一套基于物理事例的标定方法 (利用EAS次级粒子作为标定束流)；

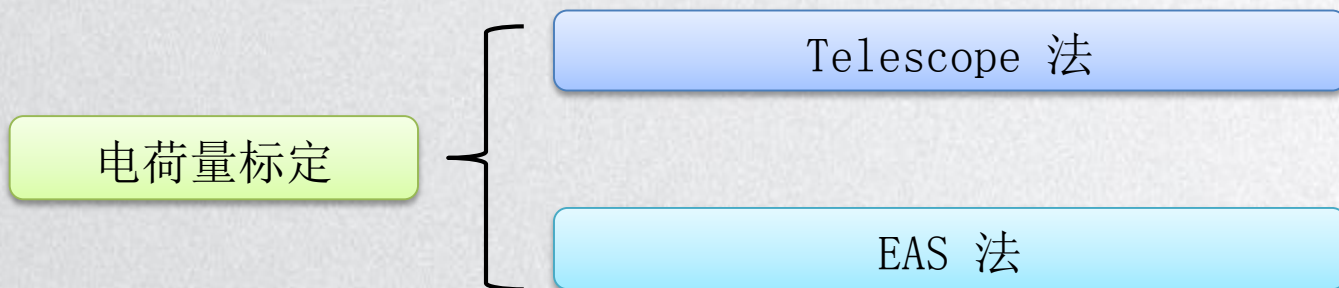


● KM2A-ED 标定方案



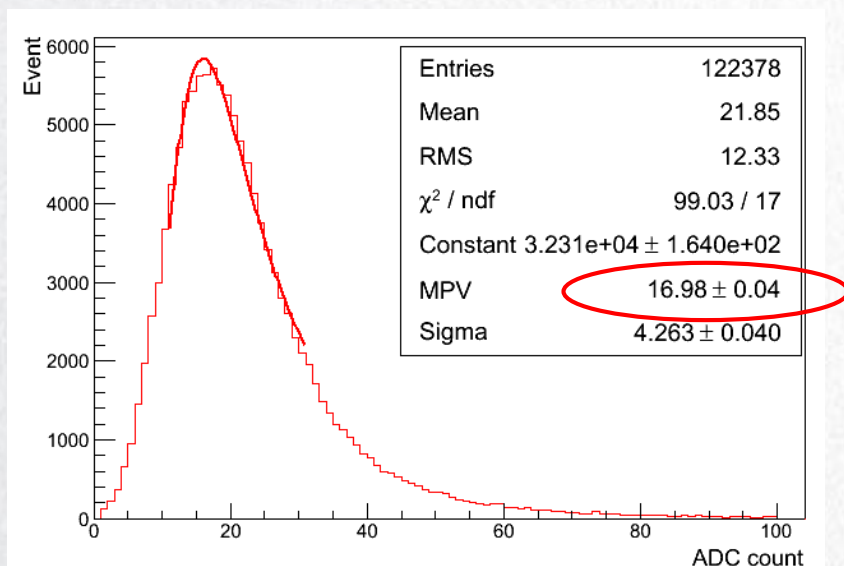
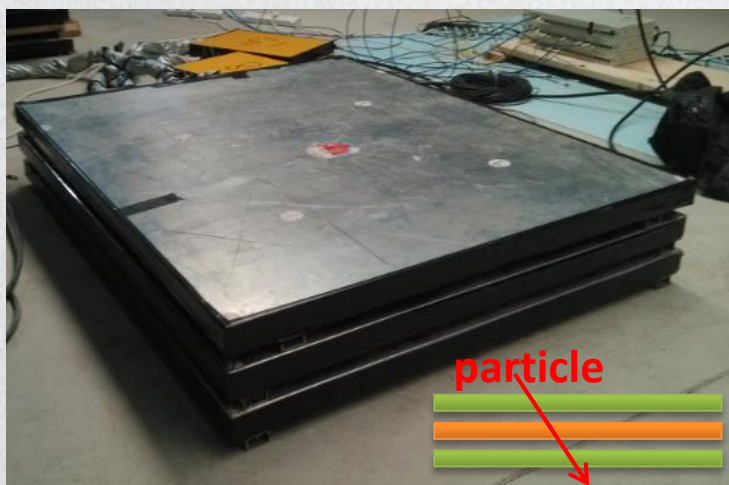
● 电荷量标定

- 刻度粒子数信息：ED输出积分电荷量 (电子学ADC count 为单位) 到粒子数 (以MIP 为单位) 的转换。
- 标定方法：从ED的**单粒子输出响应**(以ADC count/MIP 为单位)可得到转换系数，单粒子是ED探测器探测到的**最小单位**，是粒子数测量的基础。其**谱分布稳定**，有很好的数学描述(朗道卷积高斯)，可以作为标准来标定探测器输出charge。
- 如何得到探测器的单粒子响应？



Telescope法（电荷量标定）

- 原理：多层探测器复合测量宇宙线游离单粒子($\sim 600 \text{ Hz}$ @ YBJ)；

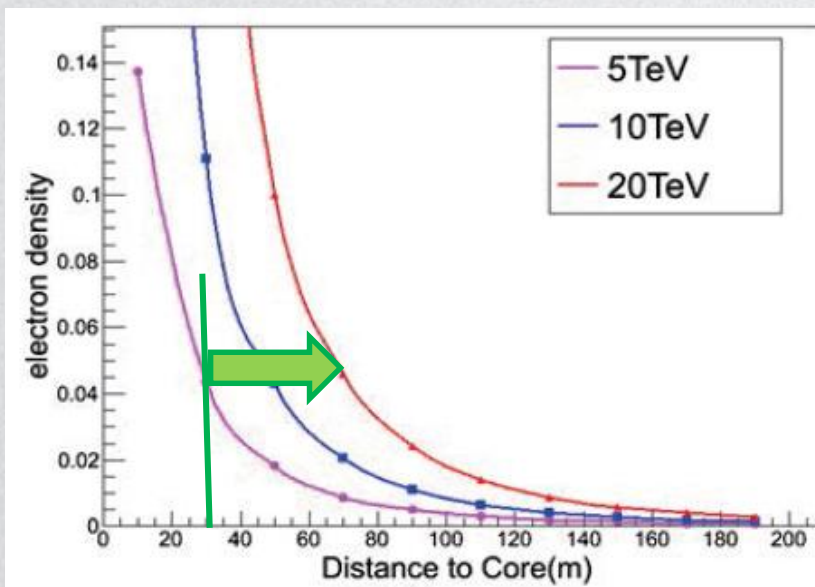


Telescope测试系统（上下探头两重复合）（为了实现动态范围，单粒子峰位统一控制在20count附近）

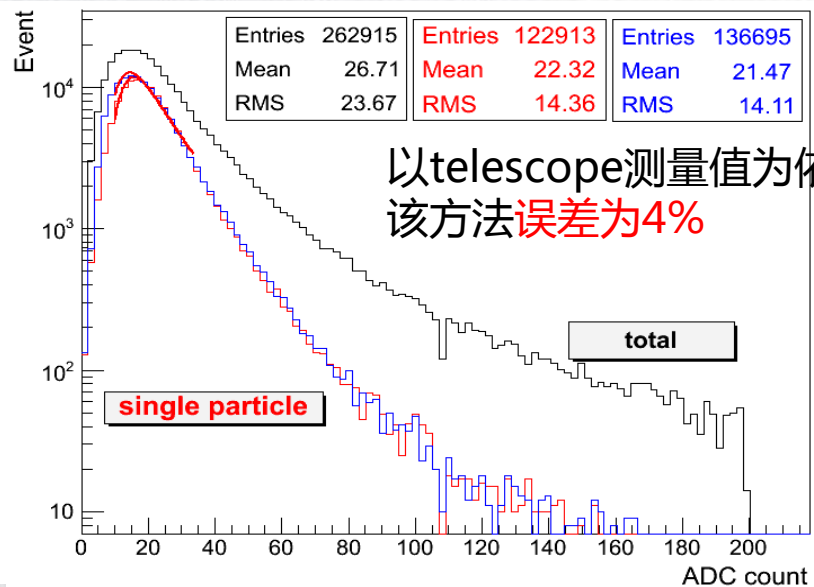
- 单粒子谱峰值的统计误差： $< 1\%$ @ 10^5 事例数；
- Charge刻度的系统误差：电子学ADC在低量程下的微分非线性（ $\sim 3\%$ @ 20 counts），PMT在高量程在高量程的非线性（ $< 3\%$ @ 10^4 MIPs），探测器温漂（ $\sim 1.2\%$ 在 3°C 范围内）。
- 全阵列标定需要几个月的时间，效率很低。

EAS法（电荷量标定）

- 原理：利用EAS中的单粒子事例刻度探测器响应，剔除多粒子事例，提取纯度高的单粒子事例；
- 单粒子事例筛选方法：
 1. 距离EAS芯位远 \rightarrow 粒子数密度低(NKG函数) \rightarrow 多粒子击中概率低；
 2. 原初粒子能量低 \rightarrow EAS次级粒子稀疏，数密度小；



□ EAS次级电子数密度横向分布



以telescope测量值为依据，
该方法误差为4%

□ 标定前(黑色)后(蓝色)事例谱对比，红色为telescope法实验标定的单粒子谱

● 时间 (time-offset) 标定

- ED时间测量的重要性：时间测量的精度直接影响阵列的角分辨和指向方向的偏差大小。

$$c(t_i - t_0) = \sin \theta \cdot \cos \varphi \cdot x_i + \sin \theta \cdot \sin \varphi \cdot y_i$$

- 时间测量的不确定性：各探测器之间对同一时刻信号的响应时间不一致（即time-offset），将导致重建方向出现系统偏差，需要标定。
- ED相对time-offset差异主要来源：WLSF长度(~ 7ns)、PMT的渡越时间(~ 30 ns)不一致；
- **高精度要求**：为了保证角分辨 $< 0.5^\circ$ ，指向偏差 $< 0.1^\circ$ ，时间刻度的精度应达到**亚纳秒**量级。

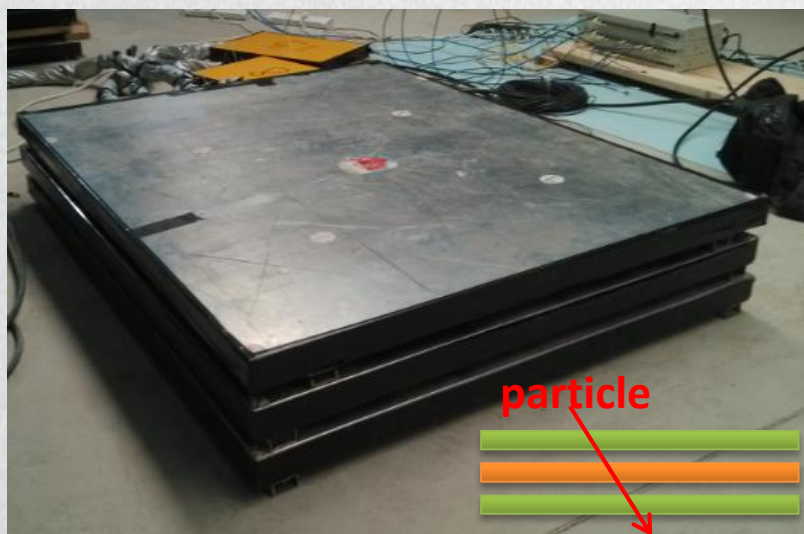
Time-offset标定

Telescope 法（实验）

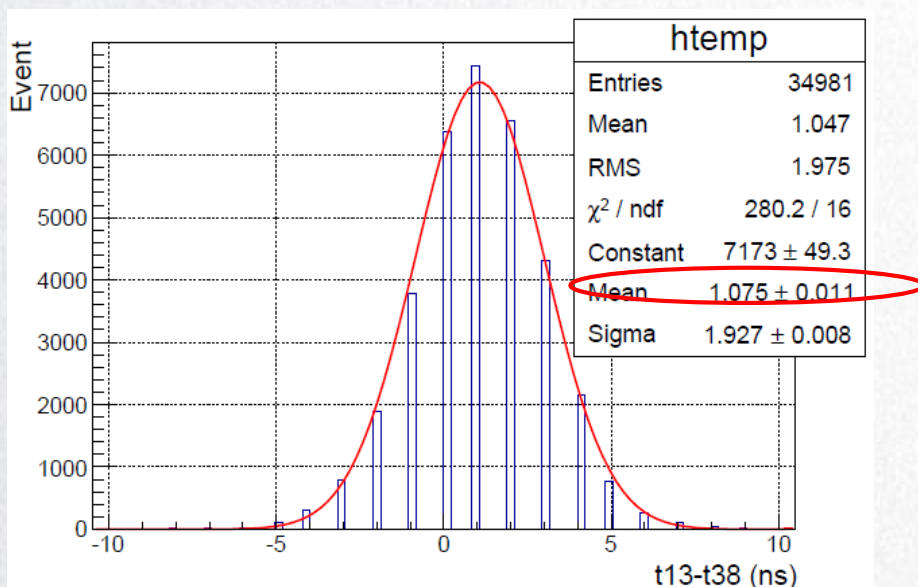
特征面（CP）法（物理数据分析）

Telescope法 (time-offset 标定)

- 原理：在telescope 复合测量系统中，宇宙线同时贯穿三个探测器，选一块固定探测器作为标准时间，测量其他所有探测器与其时间差。



Telescope测试系统 (中间一层ED提供标准时间)

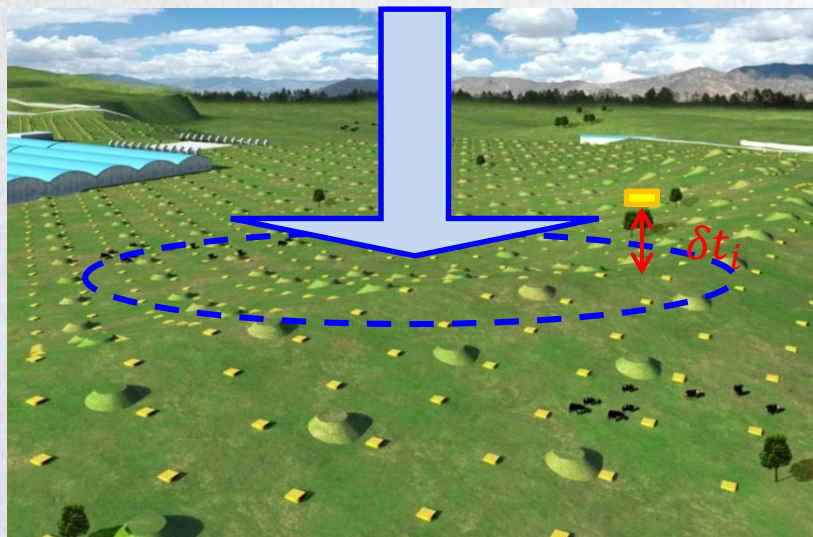


两块ED探测器的相对时间差;

- 时间差的不确定性：包含两台ED 时间分辨(~ 2 ns)的影响，需要积累一定事例数提高精度；
- 标定精度估计：在 $> 10^4$ 的事例数下，误差为 ± 102 ps，可以满足要求。

● 特征面 (CP) 法

- 原理：EAS 次级粒子前锋面有很好的时间特性(锥面形状)，可以作为标定束流，利用EAS 粒子预期到达时间来刻度(校准)探测器时间；



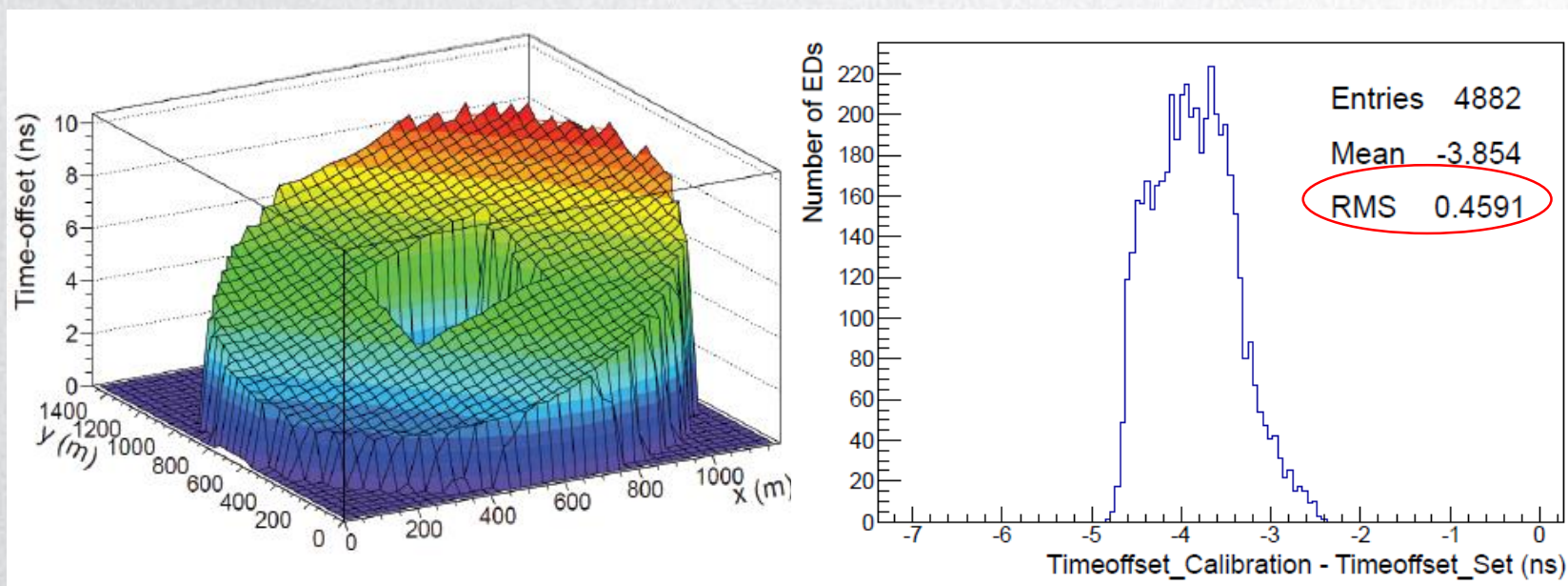
- EAS前锋面的时间特性(锥面型)；

- 预期EAS 到达时间的关键信息：准确的EAS 形状、准确的EAS 方向(如何得到)；

$$t_i^{\text{real}} = a^{\text{real}} \frac{x_i}{c} + b^{\text{real}} \frac{y_i}{c} + \alpha r_i + t_0$$

● 特征面 (CP) 法——KM2A 全阵列标定 (模拟数据)

- 研究方法：模拟数据中，人为设定各个ED 设定time-offset 值，通过CP 法求解出time-offset 值，并和初始设定值对比。



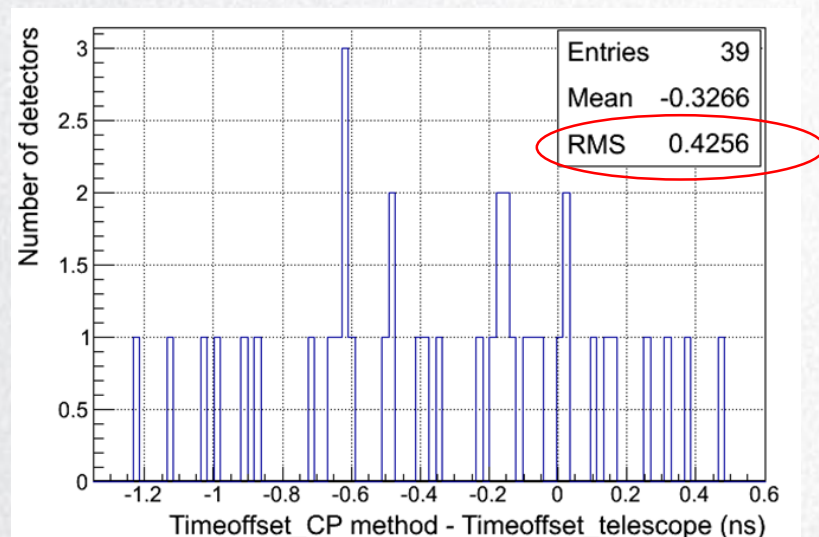
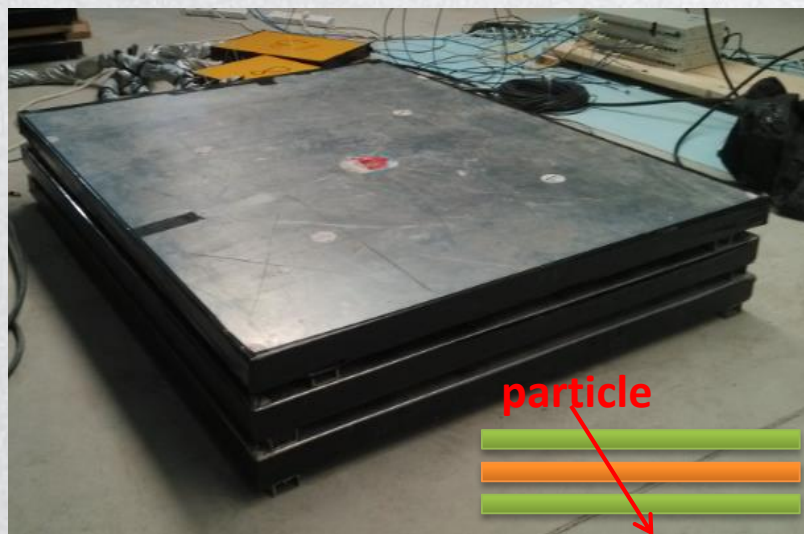
□ 全阵列Time-offset刻度值结果；

□ Time-offset刻度值和预设定值的差异分布；

- 标定的精度：**好于 0.5 ns** (事例数大于 2×10^6)，满足实验的要求；
- 标定时长：为了减小CP 方向的统计不确定性，保证标定精度，需要积累 2×10^6 个EAS事例，一次全阵列标定仅需要**小时量级**的曝光时间。

● 特征面 (CP) 法的检验

- 研究方法：通过标定实验，对比两种独立的标定方法(telescope 法和CP 法)的结果，估计标定精度；



□ Telescope测试系统（中间一层ED提供标准时间） □ telescope / 特征面法的标定结果差异分布；

- 精度估计：两种刻度结果的残差分布的 RMS ~ 0.43 ns，包含了两种刻度方法的不确定性；其中，telescope 法不确定性 ~ 0.1 ns；CP 法不确定性 ~ 0.42 ns。

● 标定总结

- 针对LHAASO-KM2A 电磁粒子探测器的标定需求，提出了整套标定方案，分析了各种标定方法的精度，从模拟、实验中检验了整套标定方案；
- 采用人工和数据分析两种独立的方式，对定型阵列中的39 块ED 探测器进行标定，通过对比结果差异给出精度；

标定内容	标定方法	标定精度
ED相对time-offset	CP法/ telescope法	0.4 ns/ 0.1 ns
ED输出charge	EAS法/ telescope法	~4% (不包含系统偏差)/ ~4%
ED几何位置	全站仪测量	<1 cm (半径100 m范围内)
阵列方位角	太阳影子法	0.03°

- 软件标定方法效率极高，一次全阵列标定仅耗时小时量级，给阵列的实时刻度及长期监测提供了可能；
- KM2A 整套标定方案经过了模拟、阵列实验的检验，精度均达到了KM2A 的要求；