



LHAASO-WCDA基于簇射事例时间标定方法的研究

刘金艳

(高能所WCDA组)

2018年第二次LHAASO合作组会议

2018.10.8-10.12

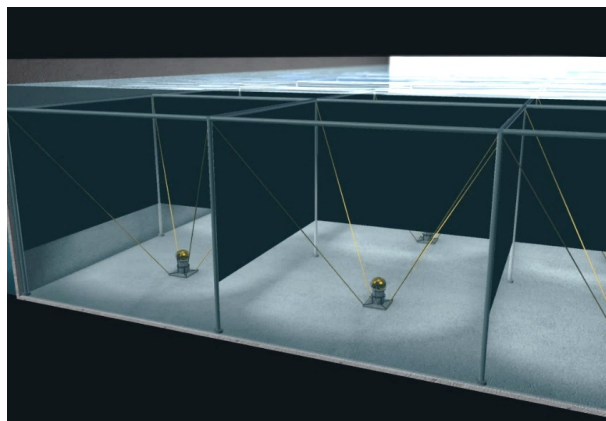
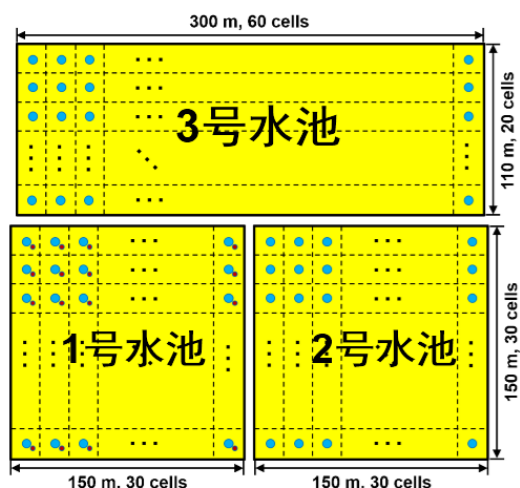
西藏·林芝

大纲

- 研究动机
- 时间标定方法的研究
- 软件研发现状
- 总结和展望

研究动机

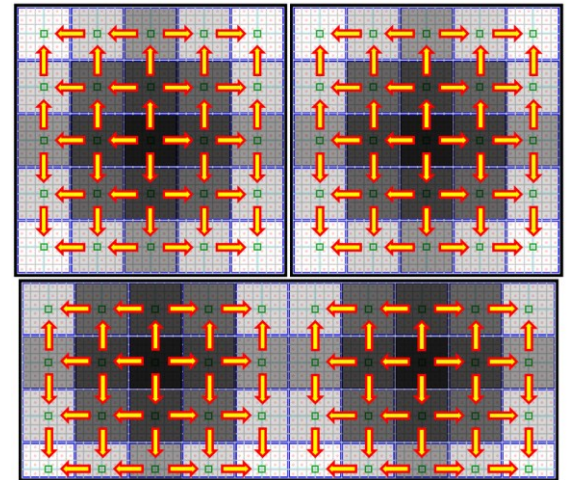
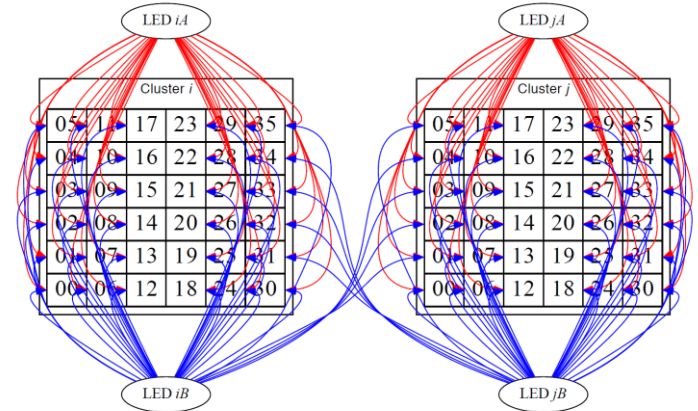
- WCDA主要物理目标：在100GeV-30TeV实现伽玛源的巡天观测。
- 探测器良好的角分辨是良好灵敏度的重要保证，WCDA时间标定精度 $< 0.2\text{ns}$ 。
- 时间标定手段：硬件标定和离线标定



WCDA探测器：
总共占地 78,000 m²
共3120个单元；
单元面积：5m×5m
有效水深：4m

WCDMA硬件标定

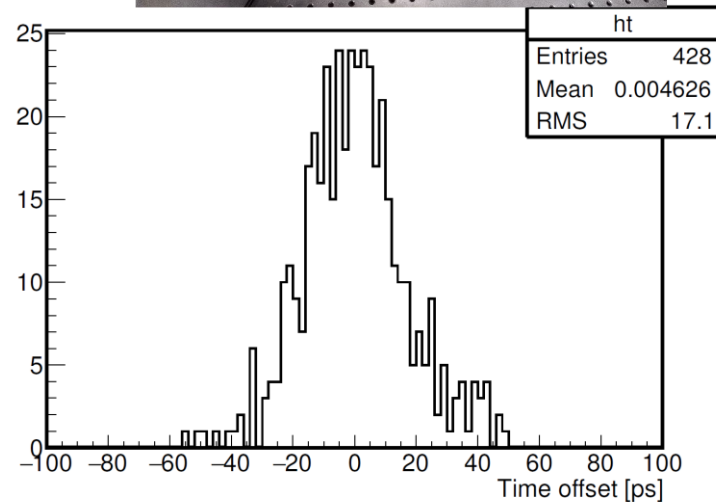
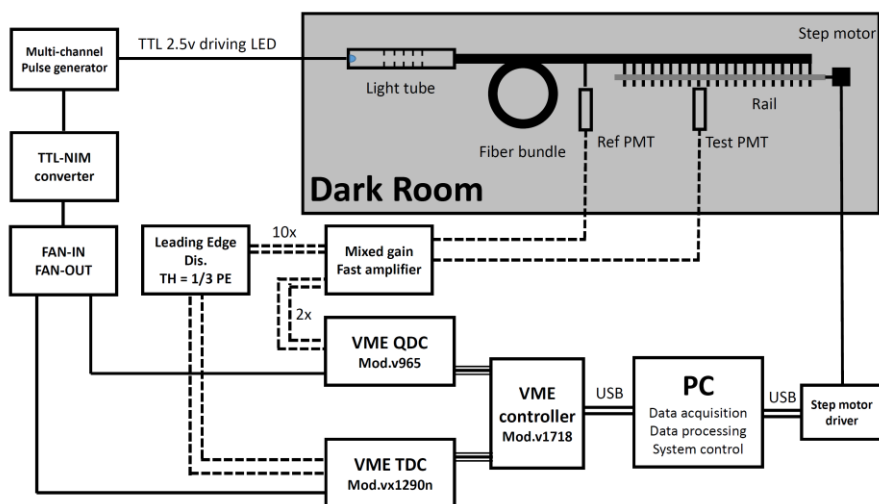
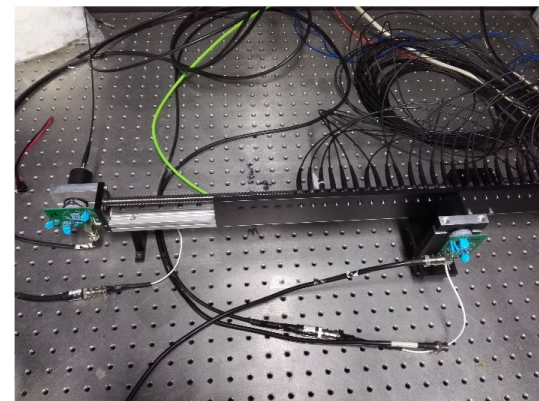
- 以cluster为单位的交叉标定方案
 - 一个cluster两套标定装置A/B。
 - 一套用于内部标定
 - 一套用于相邻cluster之间的标定，以此串联整个水池。
- 传递方法
 - 每个水池以中心为0级，共6级；
 - 对于一个cluster，只能从等级高于它的邻近1或2个cluster获得基准时间；
 - 探测器之间存在time offset，需要初始化标定；
- 硬件：基于LED、塑料光纤分光束、远程LED触发系统。



硬件标定精度好于0.2 ns

自动化测试平台

- 基于一维步进电机滑台和快速PMT
- 实现对标定装置的测试。

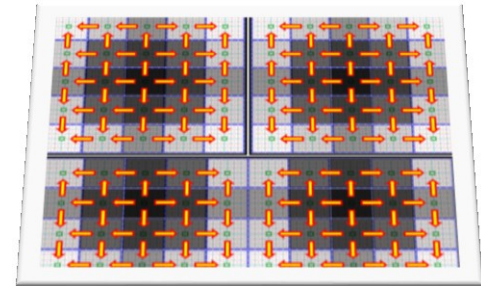


结果发表在JINST: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/10/P10021>

WCDA离线标定

- 基于传统的时间标定方法，利用前锋面拟合实现全阵列的标定。
 - 进一步修正残余的效应和改进标定结果
- 标定方法面临的挑战：
 - 大数据量，需要在合理的时间内完成数据处理；
 - 保证处理速度的同时，必须兼顾需要的数据精度。
 - 在小时量级实现标定，实时监测。
- 提出一种基于低能宇宙线的标定方法
 - 平面拟合完成局部标定
 - 交叉标定实现全阵列标定
 - 利用对称性实现边缘修正

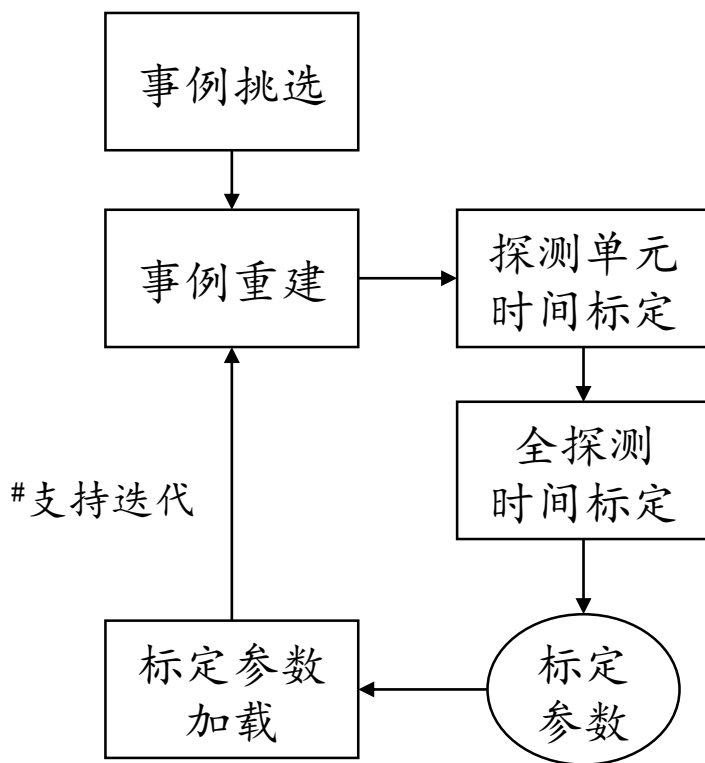
利用高统计量
低能宇宙线事例



- 简单快速
- 无需芯位重建
- 适用于实时检测

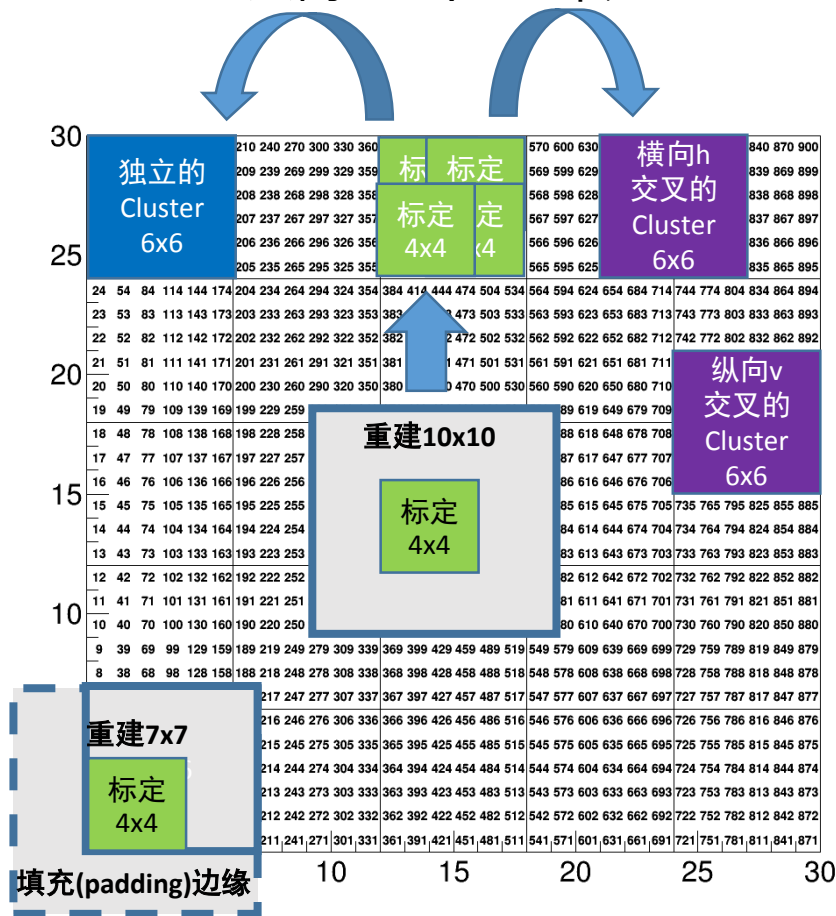
时间标定方法研究

• 方法处理流程



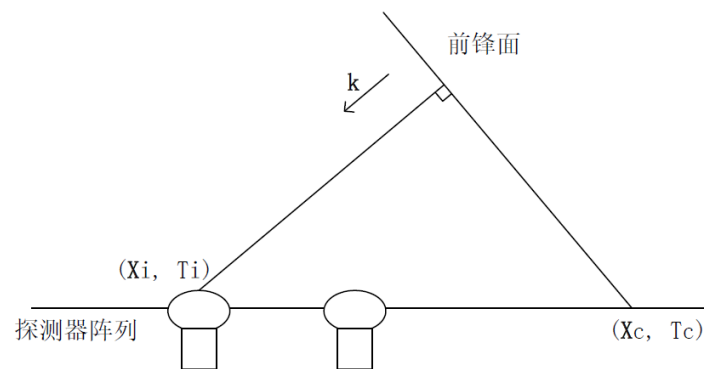
以30x30阵列为例：

- 25个独立的cluster
 - 20个横向交叉的cluster (h)
 - 20个纵向交叉的cluster (v)
- 每个cluster由4个4x4单元得出。
共需260个4x4单元。



基于“平面拟合”的方向重建

- 假设阵列面积不大，采用最小二乘法可重建簇射事例的方向。
- 重建采用模型（右图为二维简化模型）：
 - 前锋面平面 \vec{r} ，簇射方向 \vec{k} ，簇射轴 \vec{r}_0
 - $\vec{k} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_0) = 0$
 - 探测器平面，探测位置及时间 (\vec{X}_i, T_i)
 - 前锋面与探测器平面相交处：
 - (\vec{X}_c, T_c)
 - 从前锋面到达探测单元飞行时间：
 - $tof_i = \vec{k} \cdot (\vec{X}_i - \vec{X}_c) / v$
 - 预期时间则为： $T'_i = T_c + tof_i$
- 构建 $\chi^2 = \sum_i (T_i - T'_i)^2 / \sigma_i^2$ ，通过最小化得出方向。

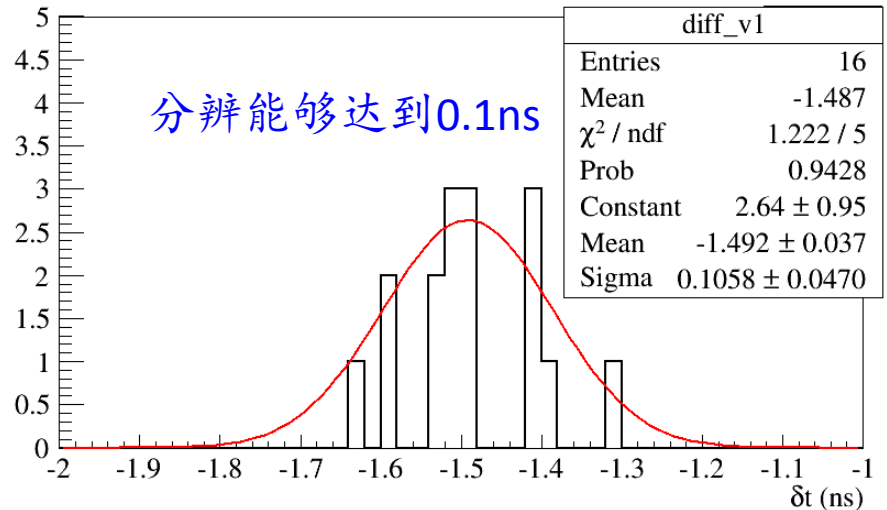
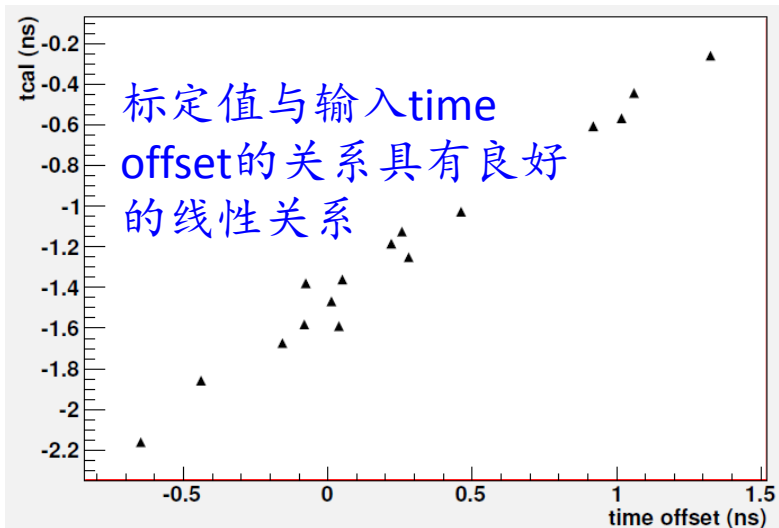


标定基本思想

- 对于一个事例，当得出方向 \vec{k} 后，即可得出探测单元 i 的真实到达时间 T_i 与预期到达时间 T'_i 之差
 - $\Delta T_i = T_i - T'_i$
- 假设累计足够多的事例，对于探测单元 i 来说， ΔT_i 将会服从特定的分布。如果探测单元存在偏移，那么则从该分布中可以观察到。
 - 若 $\Delta T_i > 0$ ，表示真实时间晚于预期时间，为完成修正可以使真实时间稍早，即扣除 ΔT_i ；
 - 若 $\Delta T_i < 0$ ，表示真实时间早于预期时间，可使真实时间稍晚。
- 为提高标定精度，可以进行多轮标定，以迭代的方法改进标定结果。
 - 迭代停止判据：前后两轮结果无明显差异。

Cluster标定研究 (I)

- 处理流程：
 - 采用10x10阵列选数据并进行重建，然后利用高斯函数拟合每个单元的峰值，从而标定位于中心4x4阵列。
 - 通过4个重叠的4x4阵列，得出6x6阵列，即cluster。
- 4x4阵列标定性能：



Cluster标定研究 (II)

通过重叠区域平均值相等，实现合并

- 将4个4x4阵列的结果合并成的1个6x6的cluster。

- 以左下角阵列(1)为基准
- 以步骤A)和B)计算阵列(2)和(3)
- 仅更新阴影部分。

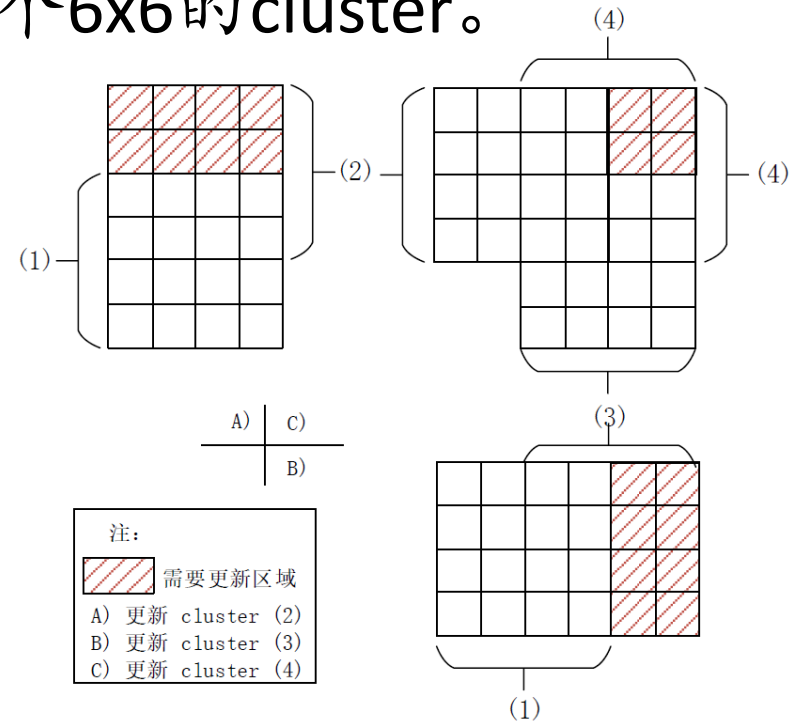
- 计算方法，以步骤A)为例：

- 分别计算重叠部分在(1)和(2)中的均值，并算出相对值：

$$\delta = \bar{T}^{(2)} - \bar{T}^{(1)}$$

- 更新阵列(2)剩余部分

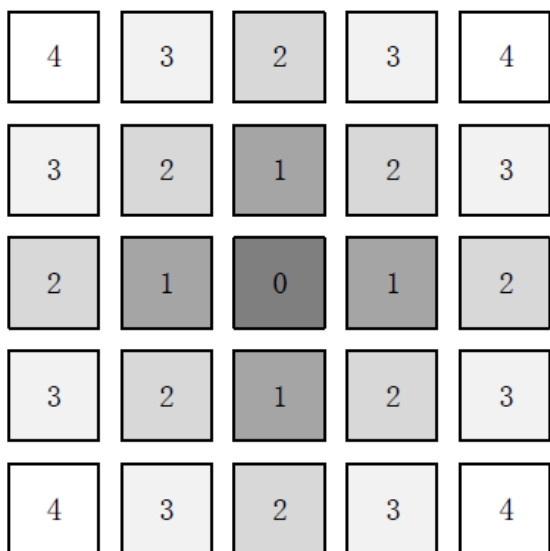
$$T_i^{(2)} = \begin{cases} T_i^{(1)}, & \text{if } i \in \text{交叉部分} \\ T_i^{(2)} - \delta, & \text{if } i \in \text{阴影部分} \end{cases}$$



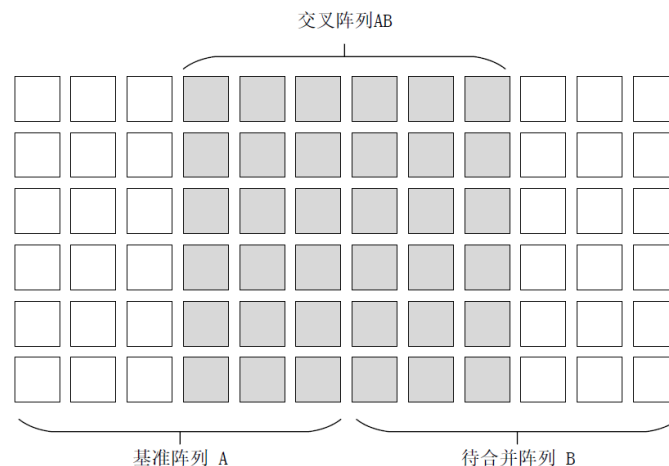
全探测器标定研究

- 每个cluster都有各自的相对时间差，然后需要将它们标定到相同的基准。
 - 借助“分级”，从高优先级向低优先级传递。
 - 相邻阵列的标定则引入交叉阵列。

分级传递，0级为最高优先级

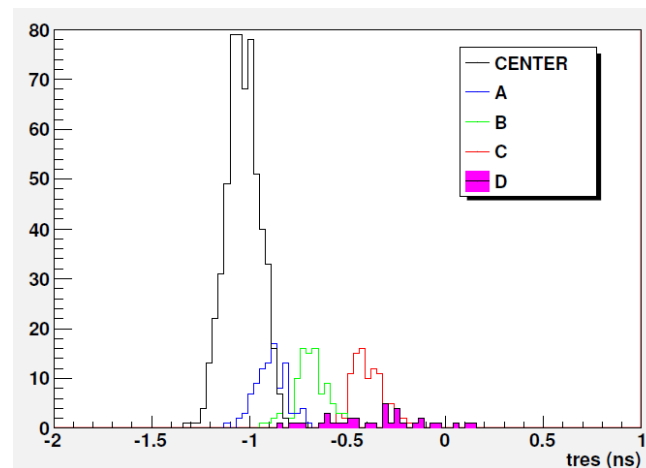
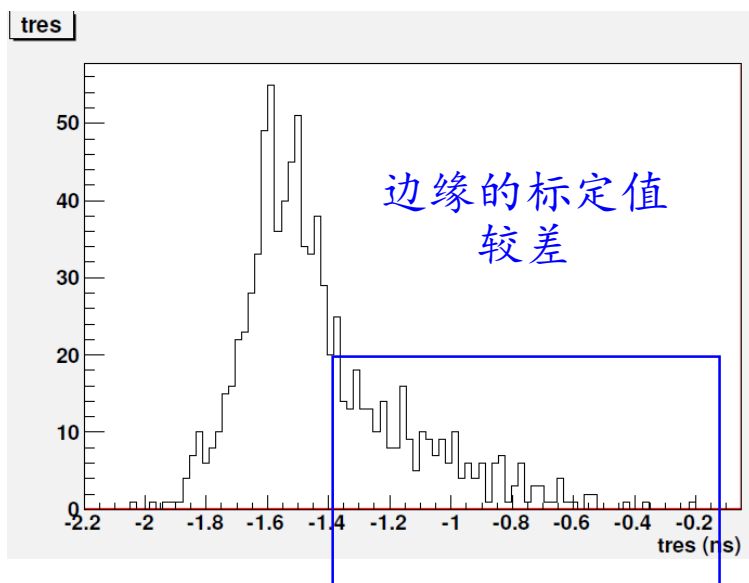
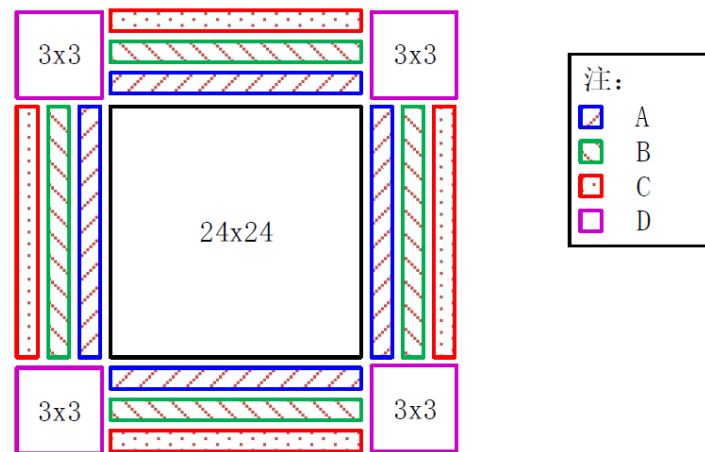


通过交叉阵列标定相邻的阵列。
基准阵列的标定值不变



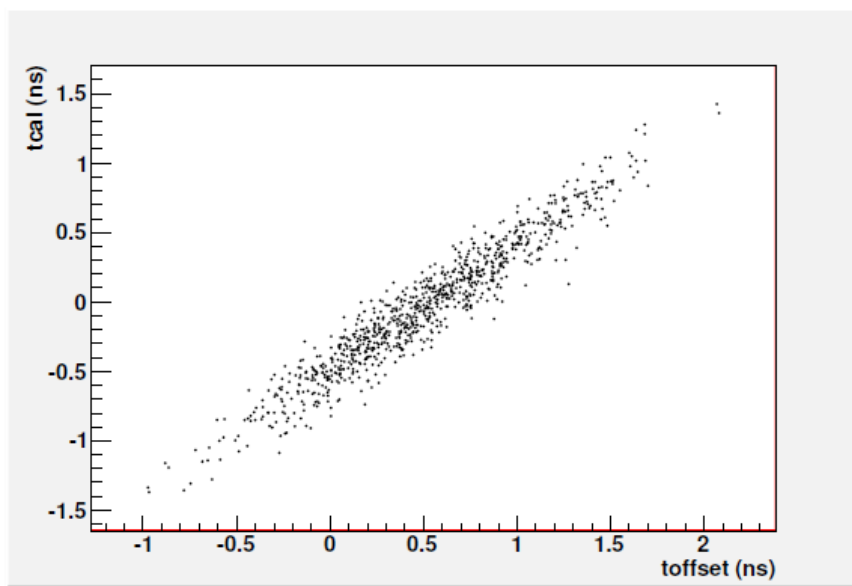
边缘阵列标定 (I)

- 由于探测器边缘无法使用10x10阵列进行重建，导致性能变差。
- 将阵列分成4个区域，分别进行修正

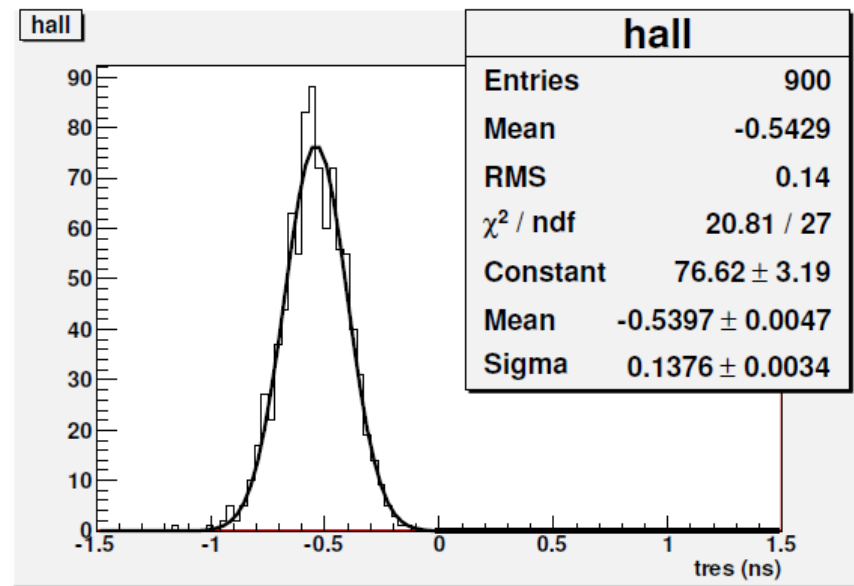


边缘阵列标定 (II)

- 加入 $\sigma=0.5\text{ns}$ 的time offset, 物理性能研究。
- 残差的 σ 为 0.14ns , 结果满足实验的需求。

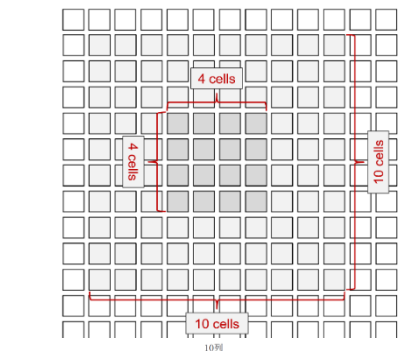


(a) 刻度值与输入的 time offset 散点图

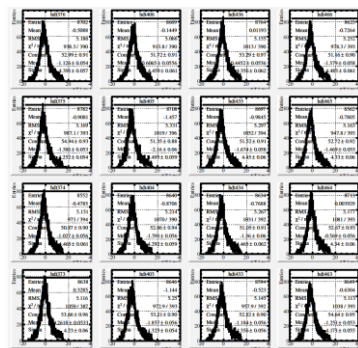


(b) tres 分布

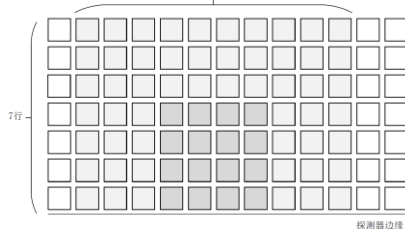
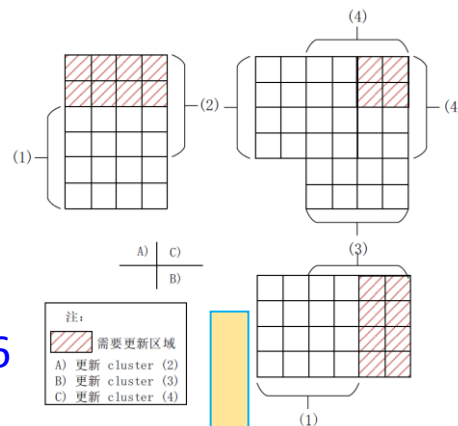
时间标定处理流程小结



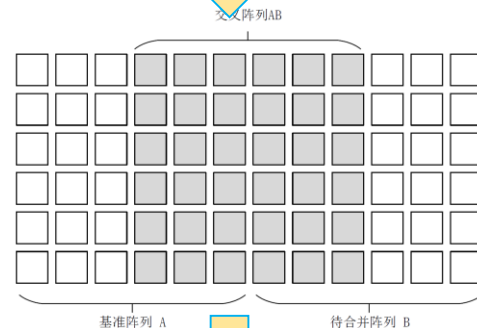
10x10重建
4x4标定



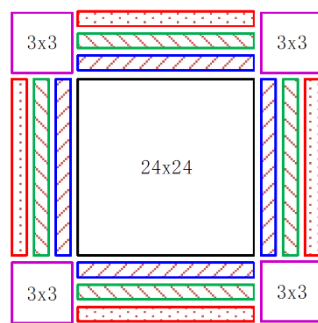
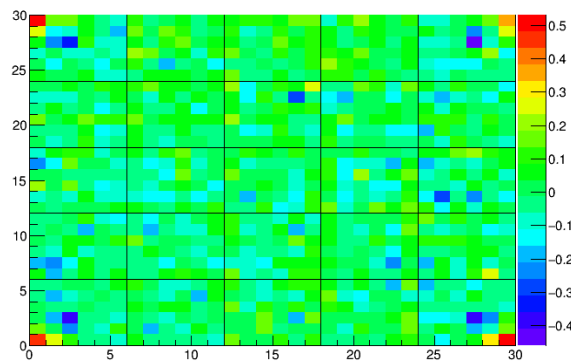
4个4x4
合并成6x6



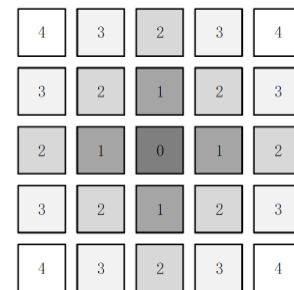
边缘事例重建,
采用边缘填充的方式



交叉标定



边缘修正



WCDMA时间标定性能相关研究

- 前面介绍了标定的基本方法，并且使用 σ 为0.5ns的time offset对标定方法进行了性能测量。
- 但是相对来说比较理想，因此扩展了之前的工作，做了部分探测单元出现较大的时间偏移研究。
 - 某些探测单元出现不可预见问题，导致硬件标定变差。
- 我们根据0.2ns的要求，可对硬件标定方法提出需要达到的性能。

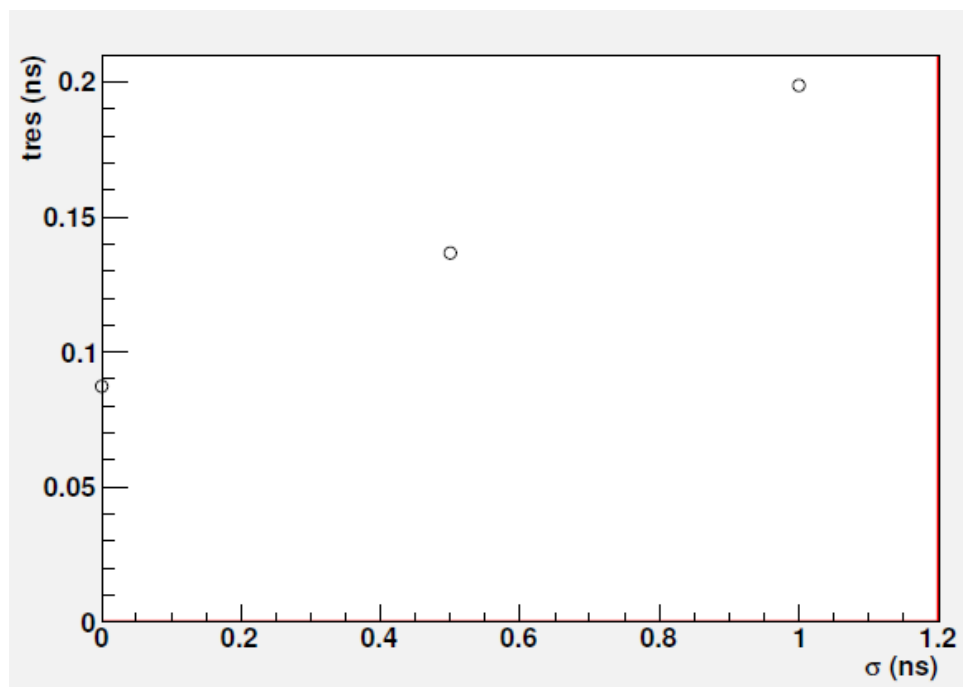
全探测器的影响

- 考虑硬件性能下降的情况，分别考虑time offset的 σ 为0ns (无offset)、0.5ns、1.0ns的情况。

当time offset的 σ 变大时，标定的结果变差。

在1ns的情况下，tres分辨接近0.2ns。

如果 σ 更大，将不能满足实验的要求。这对硬件提出了要求。

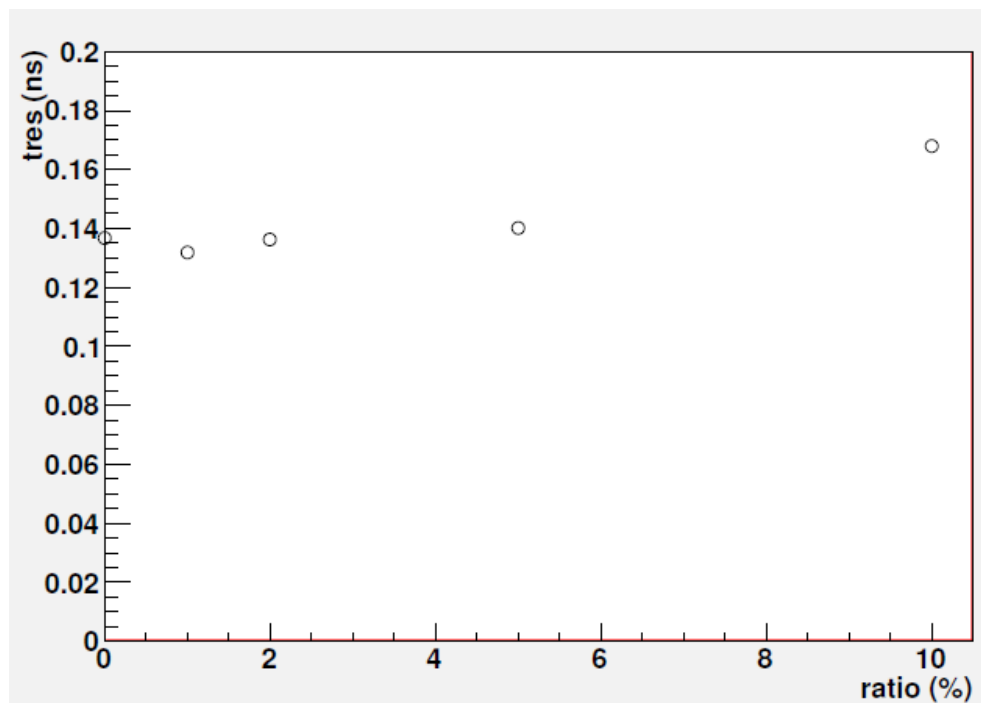


探测单元的影响

- 基于之前的研究，现在设 M 个($ratio \times N$)不服从之前的正态分布(μ 为 0.5ns ， σ 为 0.5ns)，而服从 1ns 至 5ns 的均匀分布。

与预期一致，随着 $ratio$ 增加，分辨变差。

但是直到 10% ，探测器整体的标定性能还能够满足要求，即小于 0.2ns 。

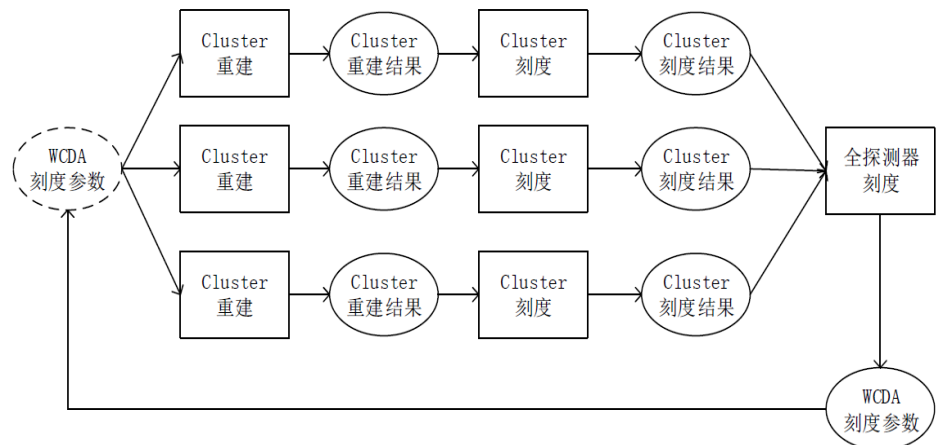


时间标定软件的设计与开发

- 软件需求分析：
 - 要易与未来的框架整合，轻量级、可扩展。
 - 由于水池的通道数很多，需要充分利用计算资源。

- 需要支持以下特性

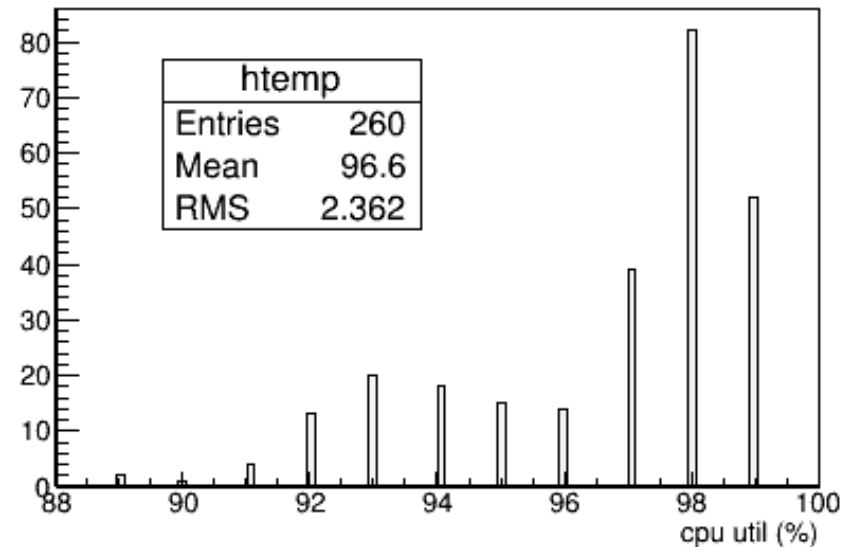
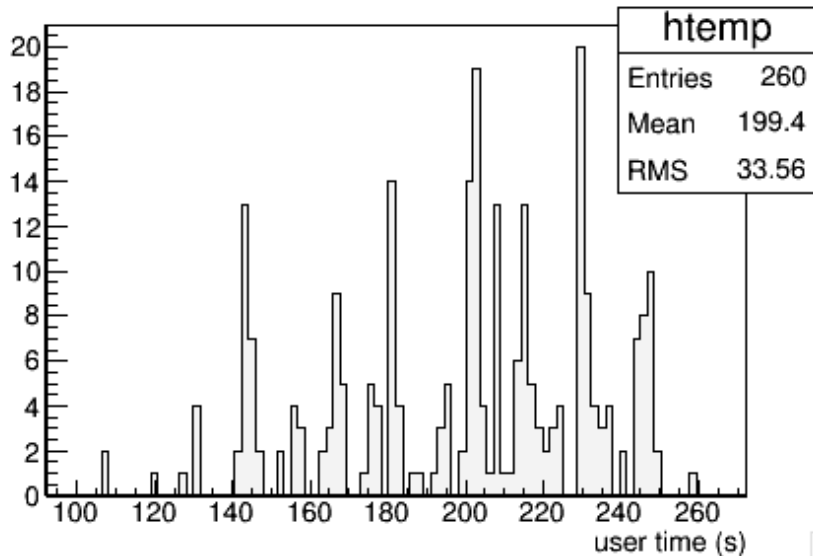
- 复杂的运行流程
- 可定制的算法组件
- 多类型的数据
- 统一的作业配置
- 支持完善的服务组件



- 现状：已完成软件的设计和开发，能够满足要求。

时间标定软件性能

- 软件运行平台：HTCondor+EOS
- 测量内容：对260个4x4单元进行重建和标定。
- 平均运行时间200秒，CPU利用率：98%
- 对4x4单元的作业，处理速度：**每秒约400个事例**



能够实现小时量级的时间标定

总结和展望

- 总结

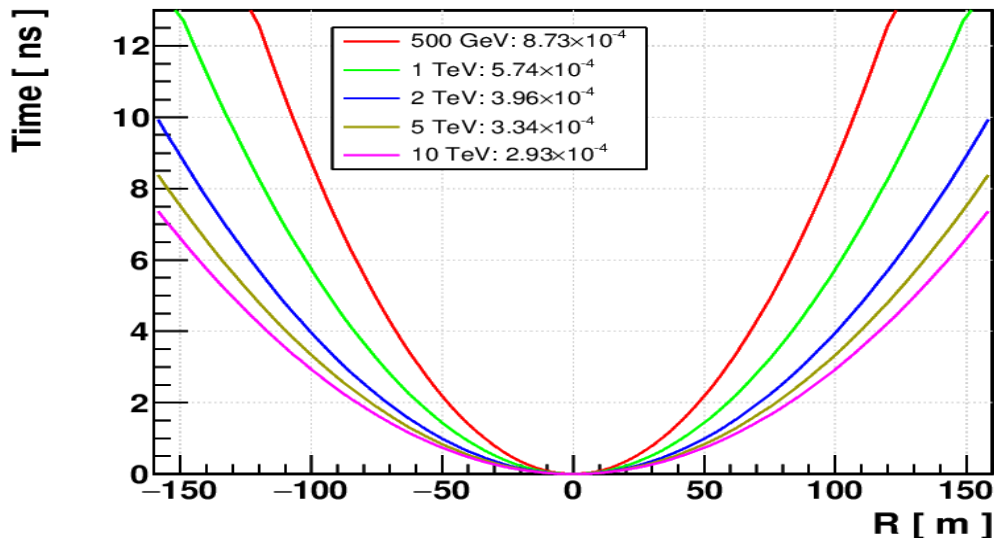
- 高精度的时间标定对WCDA物理目标的实现至关重要，包含硬件和软件两种标定手段。
- 研究并改进了基于物理簇射事例的相对时间标定方法，并研制了一套相应的时间标定软件，该标定方法可使用低能事例进行小时级别的标定，精度好于0.2ns，能够满足实验要求。

- 展望

- LHAASO-WCDA正在紧张的建设阶段，预计今年年底/明年初完成1/4阵列。
- 后续将开展基于1/4阵列实验数据的刻度研究。

谢谢！

Backup



- $t = t_0 + aR^2$ ($a = 8.73 \times 10^{-4} \text{ ns/m}^2$)
- 对于其中两点 x_1, x_2 , 其时间分别为: $t_1 = t_0 + a \cdot x_1^2$, $t_2 = t_0 + a \cdot x_2^2$;
- 对于位置中点 $x_m = 0.5 \cdot (x_1 + x_2)$, 其对应的时间为 t_m , $t_m = t_0 + a \cdot x_m^2 = t_0 + a \cdot (x_1 + x_2)^2 / 4$
- 采用平面拟合, 假设平面通过 $(x_1, t_1), (x_2, t_2)$ 两点 (因为外围大小为 10×10 , 会有其它探测器参与拟合), 那么 x_m 处的时间拟合值为 $t_m' = 0.5 \cdot (t_1 + t_2) = t_0 + a(x_1^2 + x_2^2) / 2$
- 我们定义时间测量误差为 $dt = |t_m' - t_m| = a \cdot (x_1 - x_2)^2 / 4 \rightarrow$ 时间误差和距离差是平方的关系
- 对于 $x_1 - x_2 = 20 \text{ m}$, $dt = 8.73 \times 10^{-4} \cdot 20^2 / 4 = 0.0873 \text{ ns}$. 如果 $x_1 - x_2 = 30 \text{ m}$, $dt = 0.1964 \text{ ns}$.

通过Toy模拟，模拟大气簇射粒子打在一个触发区域内，用来确定角度分辨率和时间精度之间的关系。如图 3.12所示，其中 $\delta\theta$ 是重建事例在不同设置的时间精度 δt 下对应的角分辨率。设触发区域面积为 S ($S=3600 \text{ m}^2$)，PMT的击中数为 N 。在模拟中，被击中的PMT是随机均匀的分布在触发区域内的，标

准偏差 δt 在大气簇射平面天顶角为 20° 附近时，到达时间的波动是符合高斯分布的。利用一种快速迭代的方法，找到最好的探测单元用来计算角分辨率 $\delta\theta$ [91]。大气簇射拟合的自由度为 $N - 2$ ，其中天顶角和方位角是两个未知的参数。如图 3.12所示。

在研究这些数据点之后，可以获得上述参数之间的以下关系式：

$$\delta\theta = A \frac{\delta t}{\sqrt{(N-2)S}} \quad (3.1)$$

其中 A 是一个常系数，它是对于不同的时间精度拟合（例如0.1 ns, 0.2 ns, 0.3 ns, 0.5 ns, 0.8 ns, 1.0 ns）得出 A 的平均值 ($A \simeq 63.3^\circ \text{ m/ns}$)，同时计算拟合的数据点。从模拟结果来看，这个相关系数 $A \simeq 63.3^\circ \text{ m/ns}$ 能够很好的描述这种函数的变化关系，甚至对于WCDA其他的较大的子区域也可以用不同的时间精度来描述。

方向重建实际上是围绕大气簇射的真实方向的一个二维分布。假设这个分布是一个二维对称的高斯函数，一般认为取包含90%信号的角半径为最优角半径 $\Delta\theta$ ，重建的方向存在于一个圆锥体内，在角半径为 $\Delta\theta$ 围绕簇射的方向满足的关系式： $\Delta\theta = 2.15 \cdot \delta\theta$ ，如果要求 $\Delta\theta < 0.1^\circ$ ，那么 $\delta\theta < 0.047^\circ$ ，将这个要求带入方程 3.2，时间精度是：

$$\delta t = \frac{\delta\theta}{A} \sqrt{(N-2)S} < 0.13 \text{ ns} \quad (3.2)$$

