

第十八届全国科学计算与信息化会议

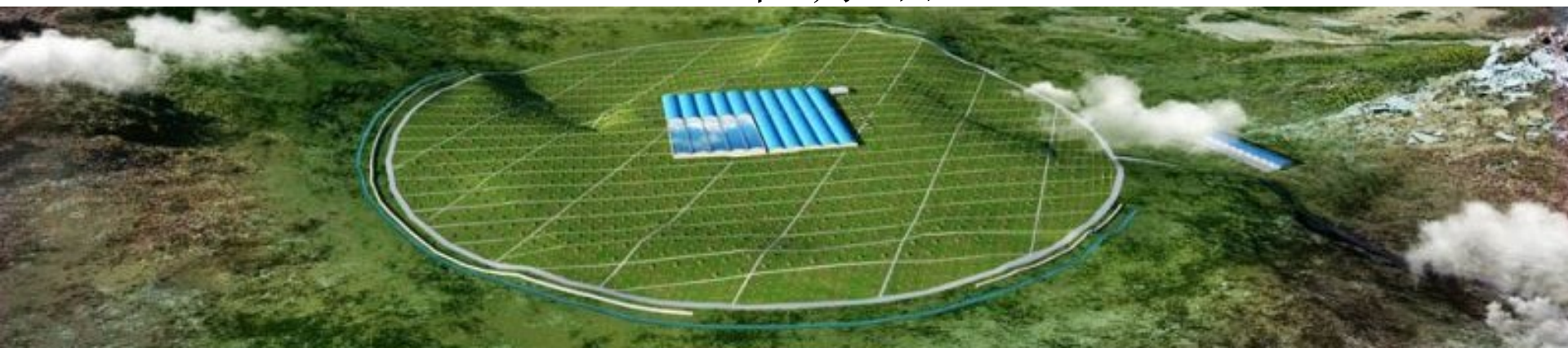
2017-07-03--2017-07-07 山东威海

# LHAASO-WCDA 时间标定方法和软件研究

刘金艳 (NKU/IHEP)

导师：姚志国 研究员 (IHEP)

2017年7月6日

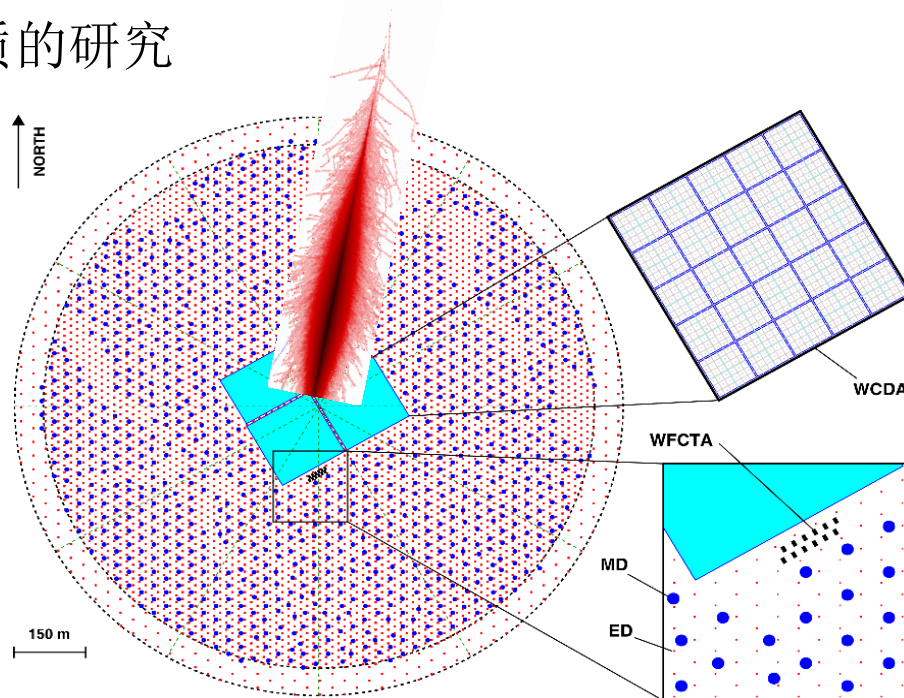


# 报告内容

- 背景介绍
- 基于簇射事例的刻度方法研究
- 时间刻度软件的开发
- 实验结果和分析
- 总结和展望

# LHAASO实验介绍

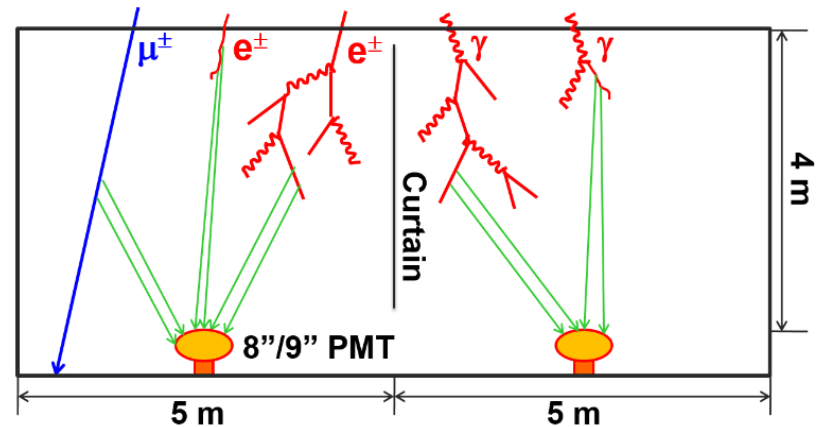
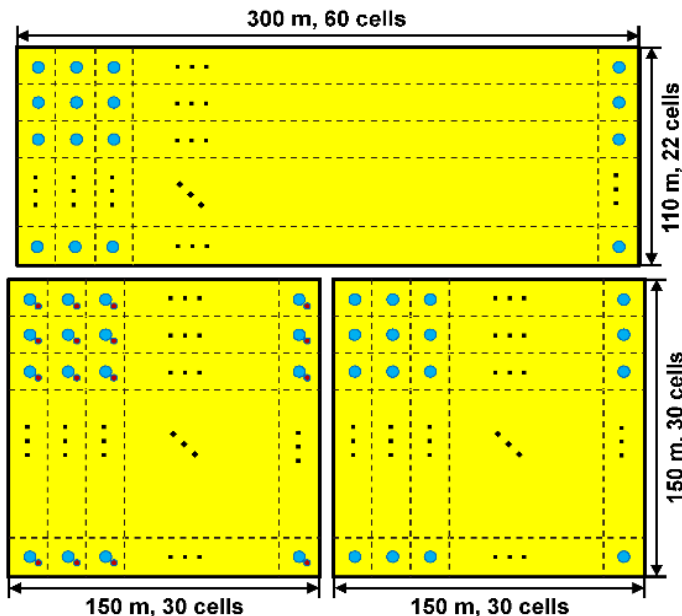
- 站址：四川稻城海子山，海拔高度4410m
- 主要物理目标：
  - 探索高能宇宙线起源及相关的宇宙演化
  - 高能天体演化和暗物质的研究
- 探测器组成部分
  - KM2A
  - WFCTA
  - WCDA



# WCDA - Water Cherenkov Detector Array

## 水切伦科夫测器阵列

- WCDA实验记录宇宙线引起的簇射： $\gamma$ 、 $e^\pm$ 、 $u^\pm$ 产生的切伦科夫光；
  - 三个水池：150m\*150m，300m\*110m；
  - 水深4.4m；
  - 分为3120个5m\*5m的单元结构；
  - 单元中央底部放置PMT。



# WCDA性能指标要求

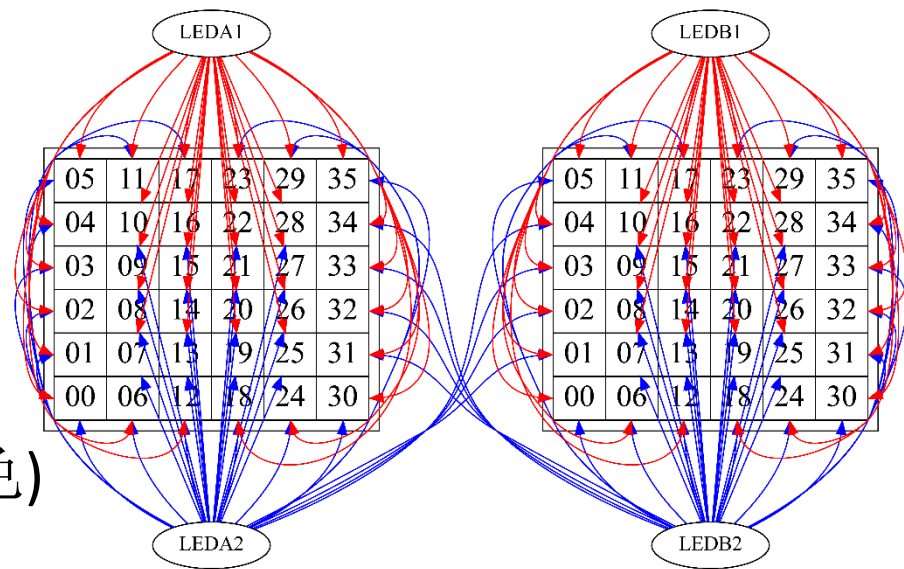
- WCDA依据物理需求对其性能提出了指标要求：
  - 阵列指向精度需小于 $0.1^\circ$
  - 角分辨小于 $0.4^\circ$
  - 时间标定系统精度要小于 $0.2\text{ ns}$ 。
- 精确的时间刻度对于原初宇宙线的重建、粒子源的鉴别等至关重要。

指标	数值
总面积	78, 000m
总单元数	3, 120
<b>阵列指向精度</b>	<b>&lt;0.1<sup>°</sup></b>
角分辨	<0.4 <sup>°</sup> (2 Tev)
单元面积	5*5=25 m <sup>2</sup>
有效水深	4.0 m
水衰减长度	>15m (400 nm)
整体探测器电荷分辨率	50% @1PE , 5% @ 4000PEs
整体探测器电荷标定精度	<2%
<b>时间标定系统精度</b>	<b>&lt; 0.2ns</b>
单元探测器单元时间分辨率	<2ns

# WCDA时间刻度

- 交叉标定方法 (硬件)

- 采用两套分光束刻度
- cluster内部刻度 (红色)
- cluster之间交叉刻度 (蓝色)
  - 交叉4根
- 内部刻度与交叉刻度光纤束，交替发光，从而完成刻度。



- 基于簇射事例的时间刻度 (软件)

- 通过研究前锋面与PMT读出时间差，理解系统性的偏差。
- 本报告将介绍该方法及软件的实现。

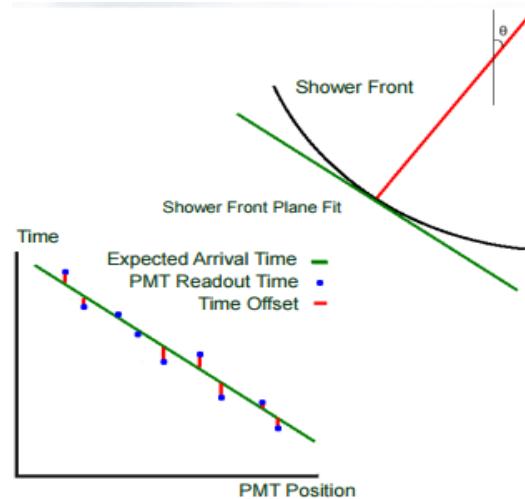
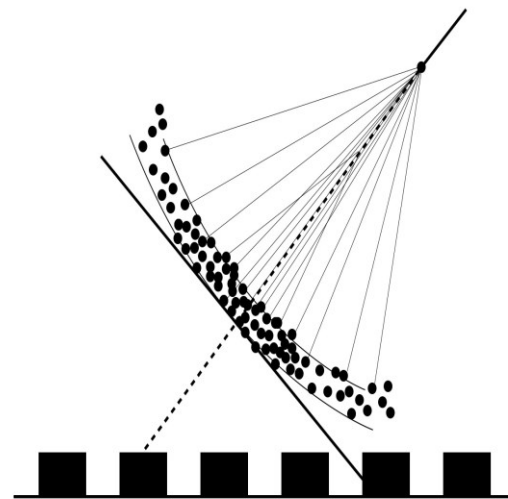
# 基于簇射事例的时间刻度方法

## □ 簇射事例

- 当宇宙线或伽马射线在大气中产生簇射时会产生大量的次级粒子。
- 次级粒子会沿着一定的方向传播，它们的前锋面会形成一个曲面，最终击中在WCDA探测器单元。
- 当探测单元阵列面积不大时，该前锋面可近似成平面。

□ 利用该前锋面可以预测PMT的到达时间，从而得出和真实时间的偏差。

□ 如果某个PMT存在系统性的偏差，则可以利用大量的簇射事例进行刻度。



# 基于簇射事例的时间刻度方法

## 事例重建基本原理

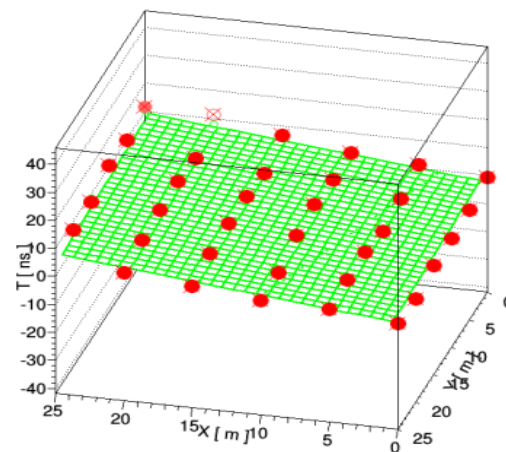
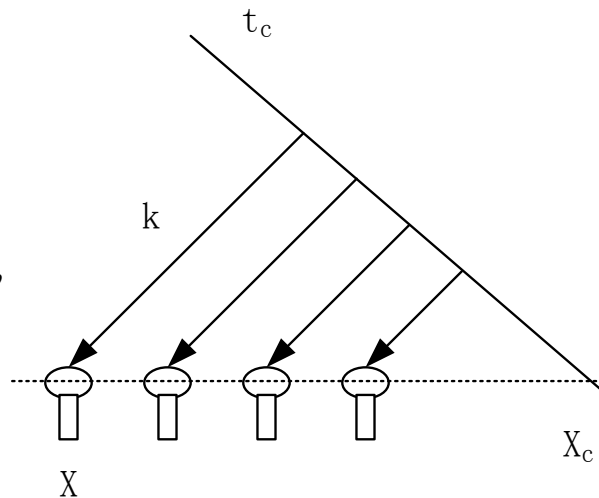
- 利用平面拟合的方法，可以实现对事例的重建。
- 假设前锋面的方向为 $\vec{k}$ ，探测器单元的位置为 $\vec{X}$ ，
- 为了计算方便，将距离换算为时间单位。
- 可以计算从前锋面( $\vec{X}_c, t_c$ )飞行至探测器单元的
- 预期时间 $t'$ 为

$$t' = t_c + \vec{k} \cdot (\vec{X} - \vec{X}_c)$$

- 设实验探测粒子到达的时间为 $t$ ，它的误差为 $\sigma^2$ ，可通过构建 $\chi^2$

$$\chi^2 = \sum \frac{(t - t')^2}{\sigma^2}$$

- 并对其进行最小化，从而得出重建的方向为 $\vec{k}$ 。





# 基于簇射事例的时间刻度方法

## 事例刻度基本原理

- 完成一个事例的重建后，根据重建的方向，可计算出每个探测器单元预期的预期到达时间 $t'$ 。
- 定义一个探测器单元的探测时间与预期时间的时间差为

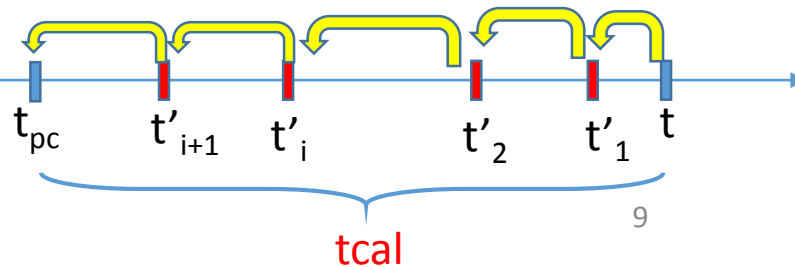
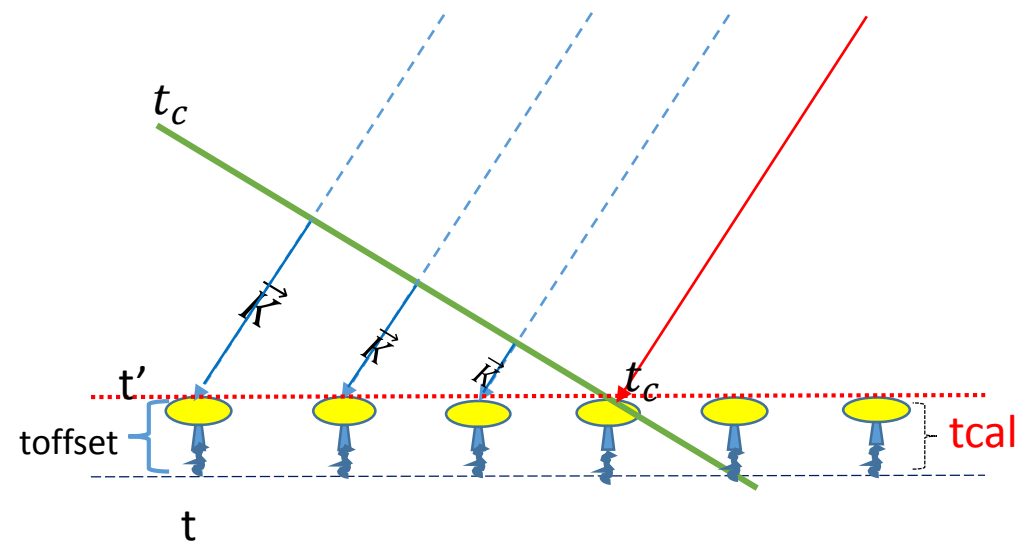
$$\Delta t = t - t'$$

- 通过不断迭代的方法，使时间得到修正

### 刻度流程

第0次迭代,  $tcal_0$  初值设置为 0,  $t'_0 = t - tcal_0$   
开始迭代, 重复1-4步:

- 第 $i$ 次迭代, 使用 $t'_i$ 重建得出 $t_c, k$
- 计算每个cell的预期到达时间 $t'_{i+1}$
- 计算时间残差 $dt = t'_i - t'_{i+1}$
- 更新 $tcal_{i+1} = tcal_i + dt$

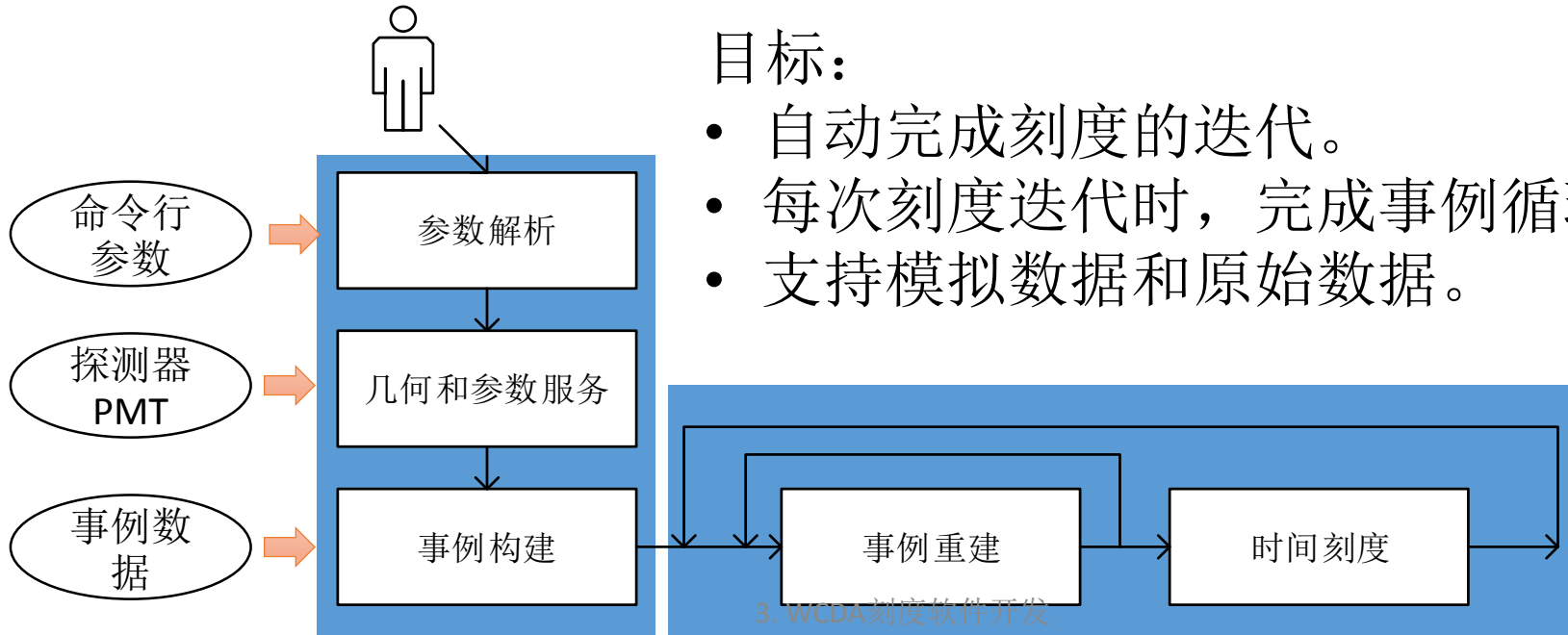


# 刻度方法的样本挑选

- 重建算法的挑战
  - 依赖于重建算法的精度。
  - 迭代次数多，计算量大，刻度时间久。
- 因此，挑选合适的重建样本用于刻度。
  - 变量jdrop用于描述当前探测单元是否参与平面拟合
  - 变量nfit用于描述参与平面拟合的探测单元个数。
    - 数目越大表示有更多的探测单元有击中并参与了平面拟合。
  - 变量 $\chi^2$ 。构建变量 $\chi^2 / (nfit - 3)$ ，从而评估平面拟合的质量。
  - 变量q，即探测单元的电荷信息。

# WCDA时间刻度软件的研发

- 时间刻度过程繁琐，需要自动化完成完整的迭代过程。
- 因此开发了全新的时间刻度软件，用于时间刻度的研究和未来的刻度工作。

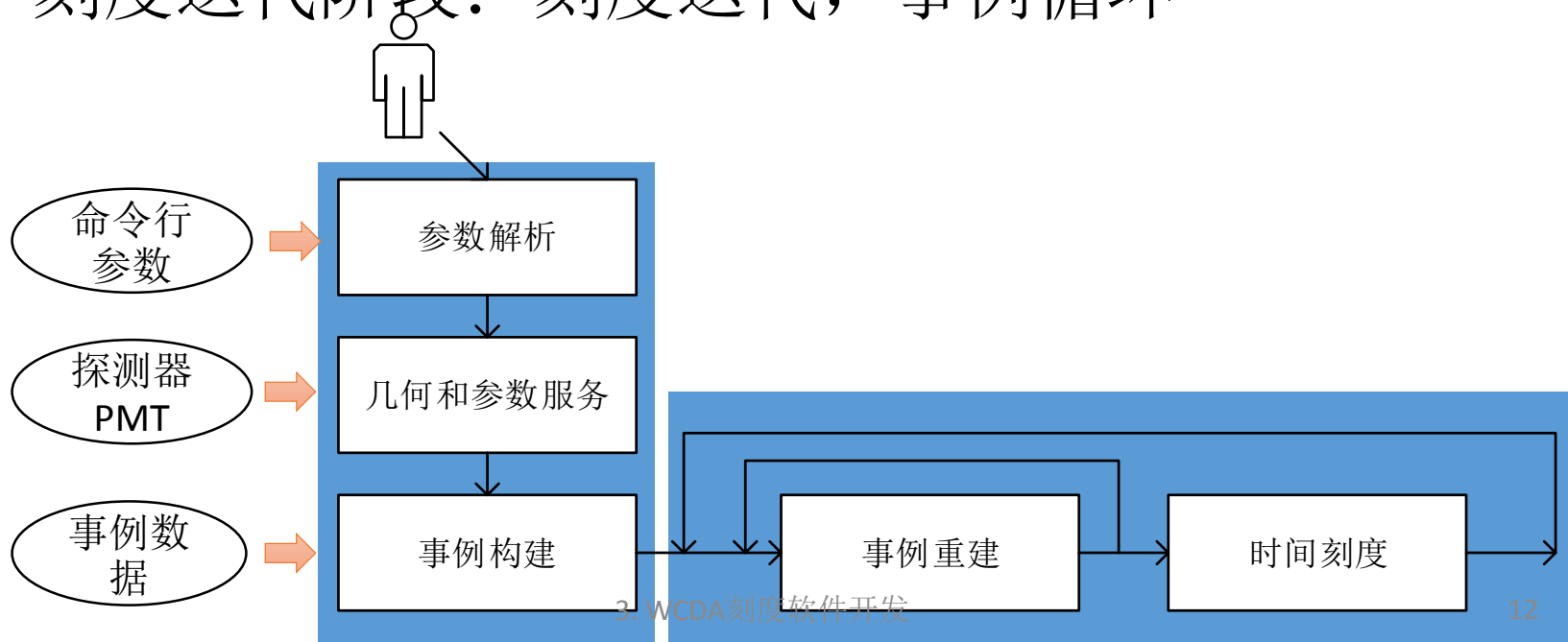


目标:

- 自动完成刻度的迭代。
- 每次刻度迭代时，完成事例循环。
- 支持模拟数据和原始数据。

# 软件整体结构

- 为避免不一致，只构建一个独立程序。
  - 但是包含多种功能，可开关。
- 初始化阶段：参数解析，几何服务，事例构建
- 刻度迭代阶段：刻度迭代，事例循环



# 参数解析

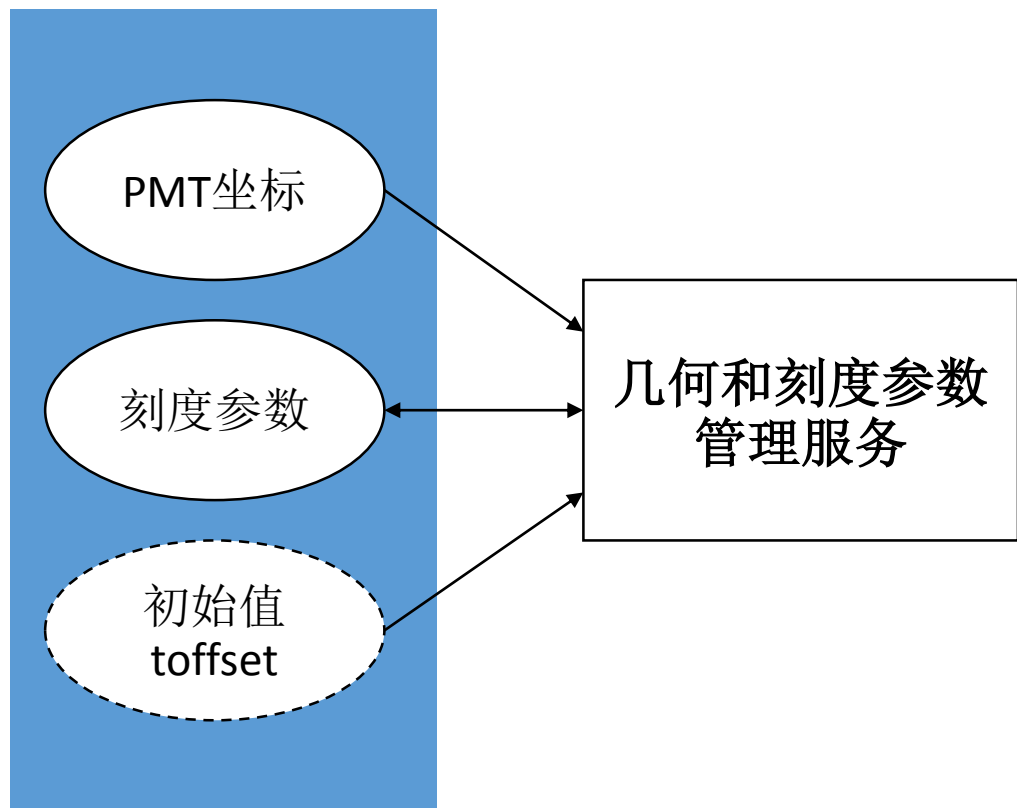
## 1. 命令行参数支持多种类型

```
./wcdatcal --dir-result-top $DIR_TOP \  
✓ 字符串 --fixed-time-err 0 \  
--fn-input-events zzz-hc-hballn.txt \  
--fn-toffset toffset.txt \  
--fn-input-tcalpar "" \  
--n-iter-calib $ITER \  
--n-limit-events $EVTMAX \  
✓ 整型 --ndet-col 6 \  
--ndet-row 6 \  
--nfit ${NFIT} \  
--npemin -${NMAX} \  
--npeextra ${NMIN} \  
--rdnm-init-var 1 \  
--seed 42 \  
--tcal-mean-corr 0 \  
--tcal-method 0 \  
--terr-method ZERO \  
--jtimecorr 0 \  
--fixed-terr-tags 900000 \  
--fixed-tc0 1 \  
--force 1 \  
✓ 数组 --algs eb,rec,cal \  
iter-calib 3
```

2. 所有的参数都被保存到作业的元文件中
3. 运行前检查该元文件，避免工作覆盖。

```
PROG: wcdatcal @9acad2e ✓ 软件版本  
Running @linux-o296 on Sat, 10 Jun 201  
=====   
== JOB CONFIGURATION ✓ 运行主机、时间  
=====   
algs: eb,rec,cal ✓ 具体参数  
chi2-over-ndf: 5  
dir-result-top: jobtop-all-tao/jobtop-  
fixed-tc0: 1  
fixed-terr-tags: 900000  
fixed-time-err: 0  
fn-geom:  
fn-input-events: zzz-hc-hballn.hc-6x6-  
fn-input-tcalpar:  
fn-output-pf: pfoutput  
fn-tcalpar: tpar  
fn-toffset: toffset-36cell-0ns.txt  
force: 1  
iter-calib-start: 0  
jdebug: 0  
jscan: 0  
jtimecorr: 0  
iter-calib: 3
```

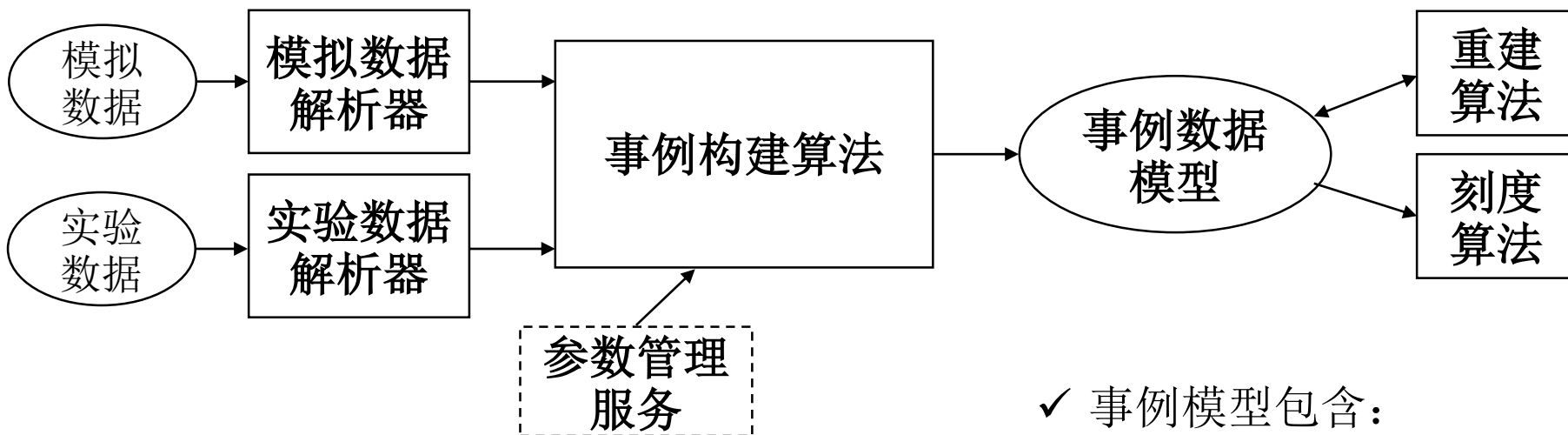
# 几何和刻度参数管理



1. 统一管理探测器相关的参数信息。
2. 定义统一的探测器编号。自动完成真实实验中不同系统编号的转换，如cell和channel编号。
3. 负责程序初始化阶段探测器信息的构建。
4. 通过类派生，隐藏不同探测器的具体实现。
5. 提供查询接口，供后续算法使用。
6. 提供对刻度参数的更新。

# 事例构建

事例构建目的：读取数据，加载到内存用于后续处理。

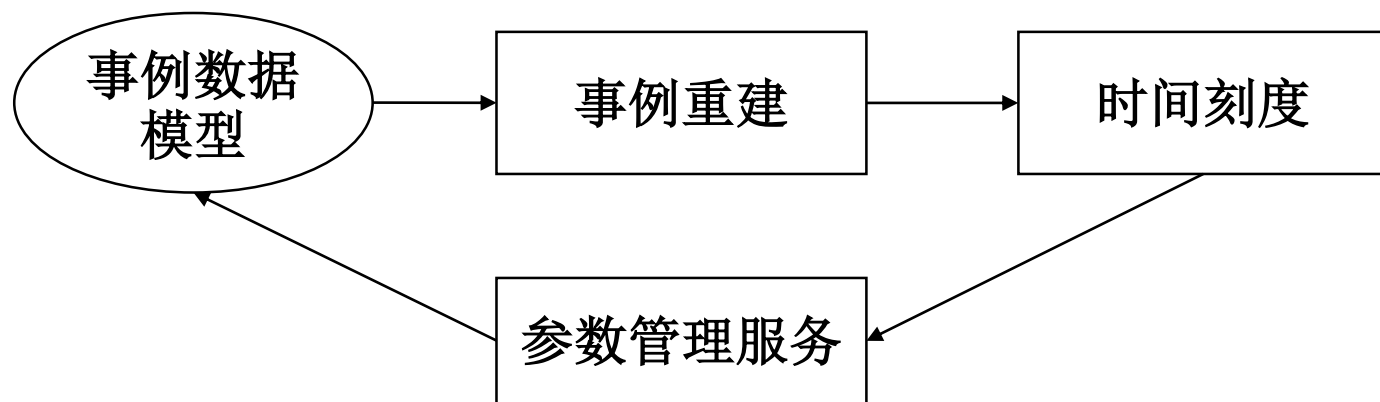


- ✓ 解耦刻度程序与输入的数据。
  - 支持模拟数据和实验数据。
  - 只需要添加对应的解析器。

- ✓ 事例模型包含：
  - 事例编号
  - 芯位
  - 重建后的方向
  - 总光电子数
  - 每个击中的位置、时间和电荷信息等

# 刻度迭代管理

刻度迭代流程：事例重建+时间刻度



- 每次刻度迭代时依次调用重建算法和刻度算法
  - 使用重建算法处理一遍所有事例。
  - 挑选事例用于时间刻度。
  - 更新刻度参数，用于下一轮迭代。
- 按照上述流程，反复进行迭代，最后修正得出的刻度参数会趋于收敛。



# 实验数据和模拟数据的结果

## □ 对刻度软件进行检验:

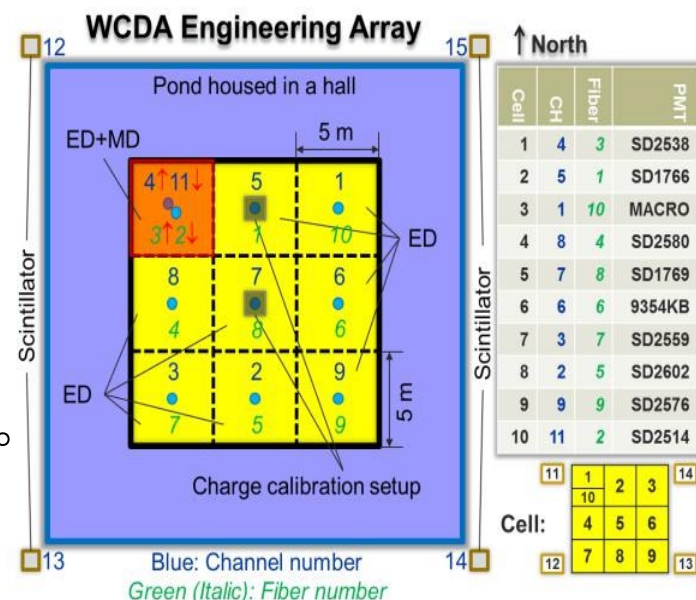
- ✓ 使用工程样机的实验数据和模拟数据进行了检验
- ✓ 在刻度中，仅使用水池中的3\*3探测单元
- ✓ 由于样机中有多套编号方式，为避免不一致性，使用几何服务将这些编号统一。

## □ 关于实验数据的处理

- ✓ 基于羊八井工程样机数据。
- ✓ 数据格式与模拟数据不同。
- ✓ 从类EventBuilder派生实现类。
- ✓ 解析生成刻度所需的事例数据模型。

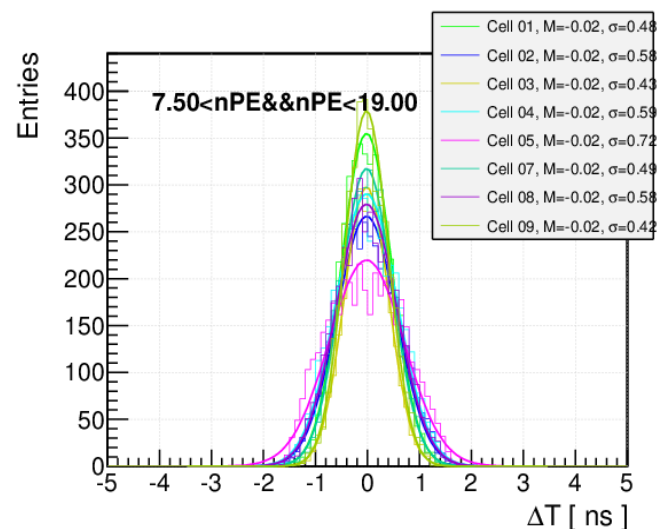
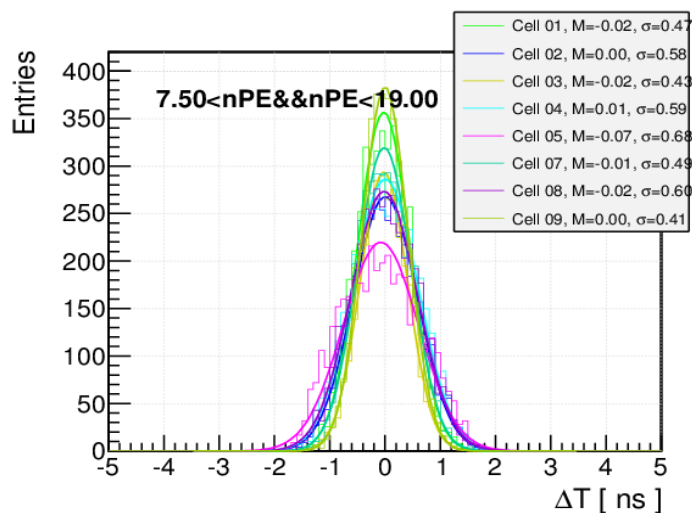
## □ 关于软件性能 (采用编译优化)

- ✓ 处理10000个事例，每次迭代时重建需要20s，刻度需要5s



羊八井工程样机示意图

# 实验数据和模拟数据的结果

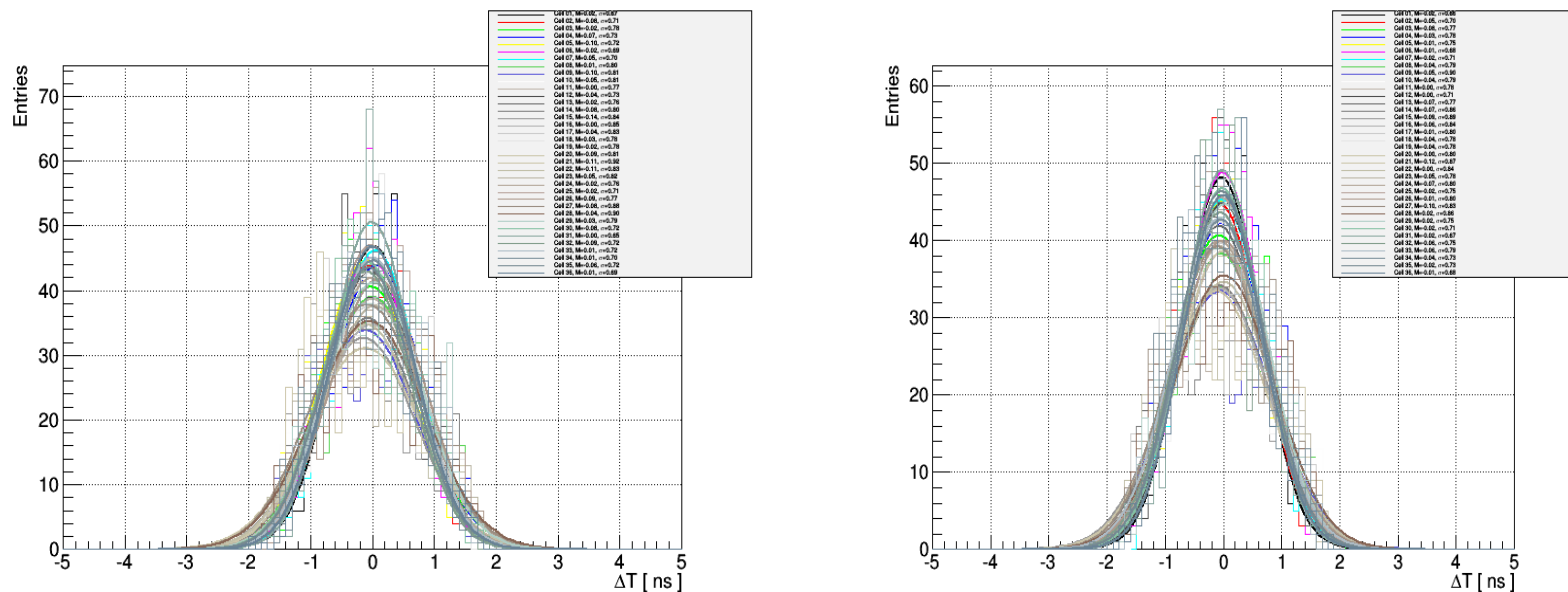


3\*3工程样机数据经过刻度后的 $\Delta t$ 分布。左图为第0次迭代，右图为第70次迭代。

□ 上图给出第0次和70次迭代后 $\Delta t$ 的分布，时间偏差经过刻度后可以控制在0.02ns以内。随着迭代次数的增加， $\Delta t$ 被逐渐修正，如cell 5的时间偏差基本被修正。

□ 软件上修正很好的另一原因在于，硬件上的刻度已做到近1 ns的精度，所以有利于精确的径迹重建。

# 实验数据和模拟数据的结果



模拟6\*6探测单元数据经过刻度后的 $\Delta t$ 分布。左图为第0次迭代，右图为第20次迭代。

- 由于实验数据的真实时间偏差未知，因此采用模拟对6x6探测单元结果进行验证。经过检验，使用模拟数据得出的结论与实验数据一致表明该刻度方法和刻度软件能够正常工作。

# 总结和展望

- 时间刻度的精度对于LHAASO-WCDA非常重要。
  - 研究并开发了一套基于簇射事例的时间刻度方法和软件。
  - 通过精确重建簇射事例可以得出到达探测单元的预期时间，利用探测时间和预期时间的差值，可以实现对刻度参数的修正。
  - 通过不断进行迭代，改进重建结果，得出刻度修正的数值。
- 下一步工作将集中于对物理性能的研究，研究如何进一步改善刻度方法，提高时间的刻度精度。

谢谢！