



# LHAASO-KM2A电磁粒子探测器模拟

---

报告人：赵静

合作者：陈松战，侯超，张忠泉

高能所

2017.07.06

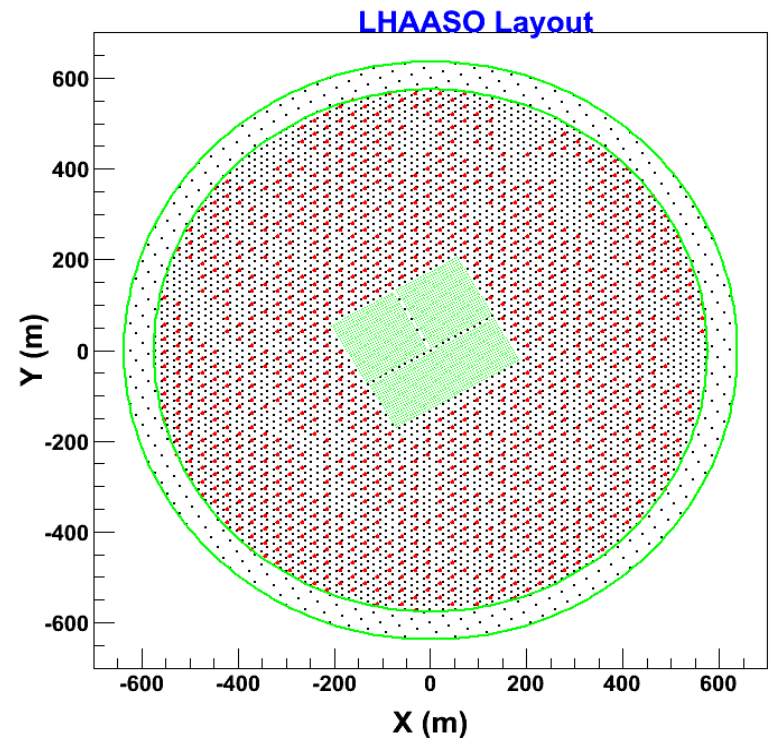
# 内容简介

---

- LHAASO-KM2A及电磁粒子探测器（ED）介绍
- ED探测器GEANT4模拟
  - ▶ 事例产生
  - ▶ 物理过程
  - ▶ 探测器构造
  - ▶ 灵敏探测器
  - ▶ 电子学模拟
- 应用：ED探测灵敏单元优化
- 小结

# 1 LHAASO-KM2A介绍

- KM2A的物理目标：
  - ▶ 10TeV-100PeV 北天区河内 $\gamma$ 源全天候扫描
  - ▶ 对膝区宇宙线单成分能谱进行测量
- LHAASO-KM2A阵列：
  - ▶ 5195个电磁粒子探测器（ED），探测器面积 $1\text{m}^2$ ，间距15m
  - ▶ 1171个缪子探测器（MD），探测器直径6.8m，间距30m



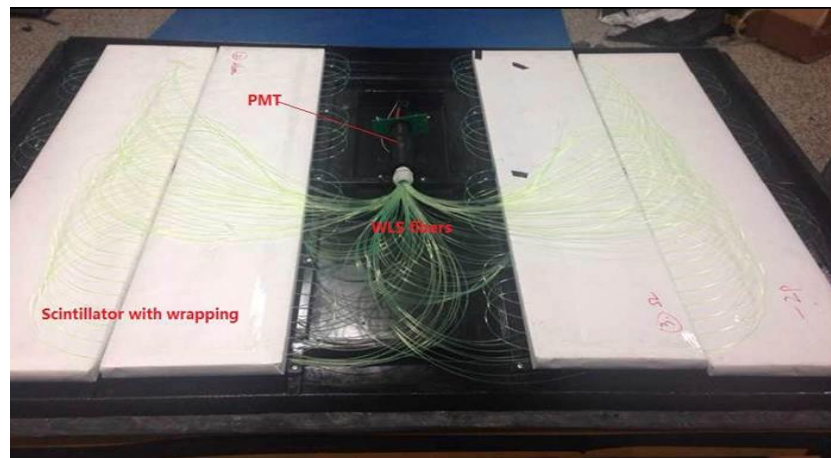
# 1 ED探测器

- 根据KM2A阵列的物理目标以及探测器排布，提出了ED探测器的性能指标
- 根据ED性能指标，最终确立了“闪烁体+波长位移光纤（WLS fiber）+光电倍增管（PMT）”的探测灵敏单元设置
- 探测器模拟，是研究阵列物理的基础

表 3-2 ED性能指标要求。

性能参数	指标要求
有效面积	$>1\text{m}^2$
时间分辨	$<2\text{ns}$
粒子数动态范围	1~10000个粒子
单粒子探测效率	$>95\%$
ED时间同步精度	$<0.5\text{ns}$
单粒子光电子数	18.5~22
粒子数分辨率	$<25\% @ \text{单粒子}, <5\% @ 10000 \text{粒子}$

表：ED探测器性能指标要求。



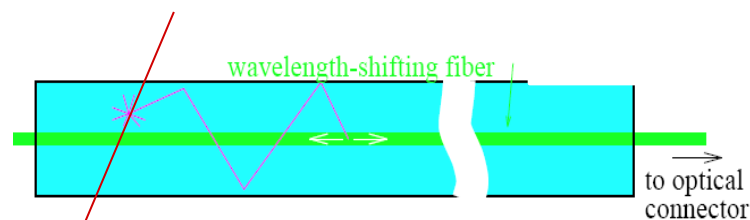
图：ED探测器内部结构图。

# 1 ED探测机制

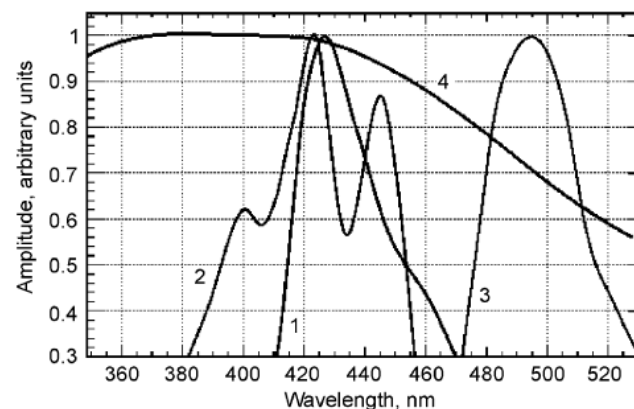
- 探测灵敏单元：闪烁体+波长位移光纤+光电倍增管

- 探测带电粒子的原理：

- ▶ 带电粒子在闪烁体内沉积能量，引起闪烁体内的原子电离，激发，在退激过程中发射闪烁光（波形1）。
- ▶ 闪烁光在闪烁体内传播，当光子穿过波长位移光纤时，波长位移光纤按照波长位移光纤吸收谱吸收闪烁光（波形2），并发出长波长的光子（波形3）。
- ▶ 当长波长的光子满足全反射在光纤中传播到PMT时，按照PMT量子效率谱（波形4）被PMT吸收并放出光电子，然后在PMT打拿级间倍增最后信号由电子学读出。

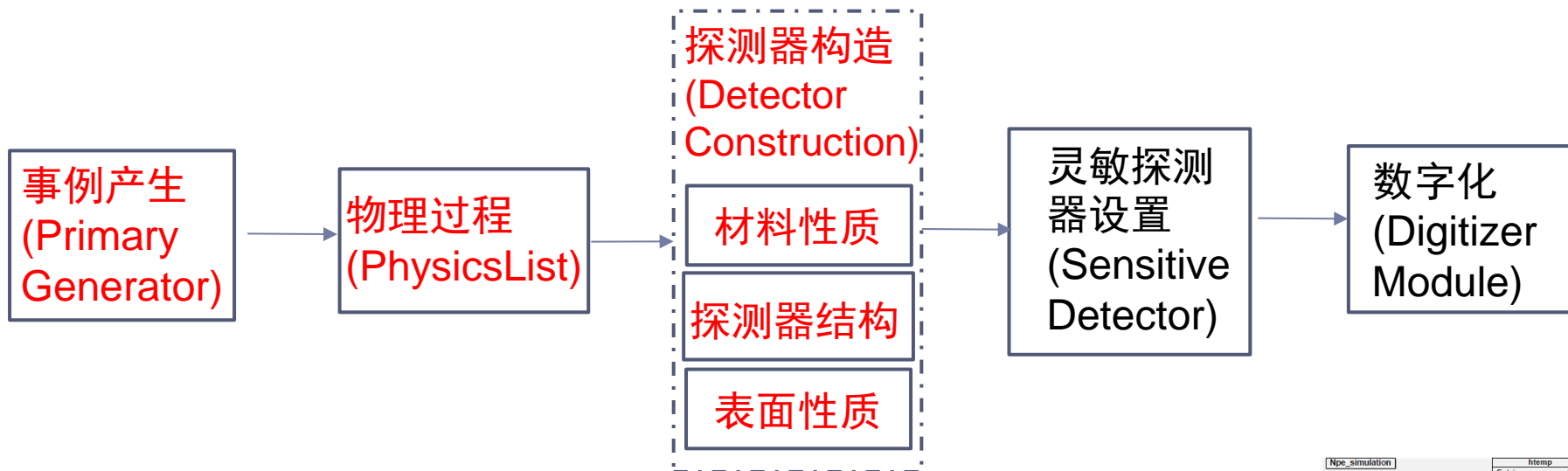


ED探测器探测原理



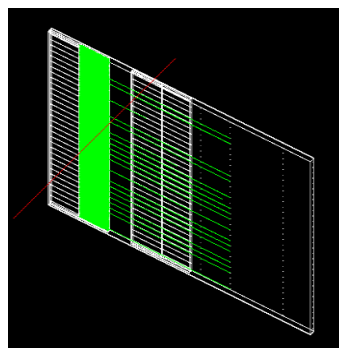
光子谱分布，1.闪烁光发射谱，2.WLS光纤吸收谱，3.WLS光纤发射谱，4.PMT量子效率谱

# 2 ED探测器的GEANT4模拟

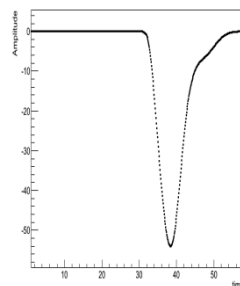


- 1.宇宙线模式
- 2.单粒子模式

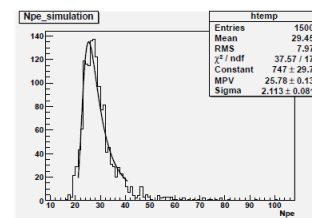
光子产生过程  
光子传播过程



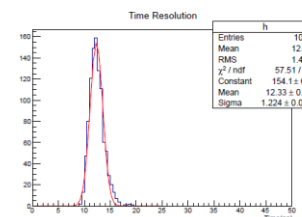
探测器结构



PMT波形模拟



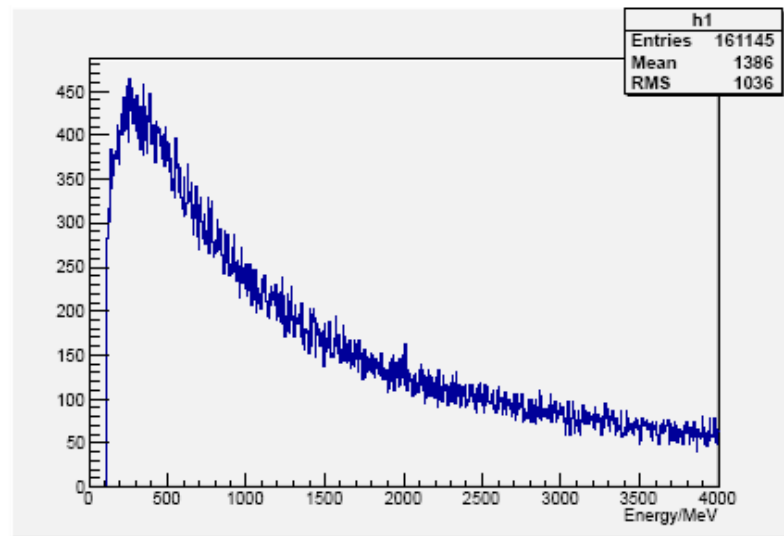
模拟得到的探测器单muon谱



时间分辨

## 2.1 ED探测器事例产生

- 必须指定如何产生一个事件，才能进行模拟，这部分是在PrimaryGenerator中完成
- ED探测器事例产生：
  - ▶ 单粒子模式：利用G4ParticleGun发射指定能动量的特定粒子。
  - ▶ 宇宙线模式：利用G4HEPEvtInterface读入宇宙线模拟CORSIKA中粒子信息。
- 单粒子标定模式(G4ParticleGun):
  - ▶ 粒子：muon
  - ▶ 方向分布： $\cos^2\theta$ 抽样
  - ▶ 能量：真实簇射中muon能量分布抽样



图：海拔4000m处muon能量分布

## 2.2 ED探测器物理过程

- 物理过程的模拟，必须知道涉及哪些粒子，在物质中会发生哪些相互作用，这些需要在PhysicsList 中定义
- ED物理过程：
  - ▶ 主要粒子：带电粒子（ $e^{\pm}$ ， $\mu$ 等等），光子（optical photon: wave like nature of EM radiation）
  - ▶ 相互作用：带电粒子涉及到电离、韧致辐射、对产生等等，光子涉及光学产生和传播：

过程分类	过程名称	G4类
光子产生过程	荧光过程	G4Scintillation
	切伦科夫辐射	G4Cerenkov
	穿越辐射	G4TransitionRadiation
光子传播过程	界面的折射反射	G4OpBoundaryProcess
	吸收	G4OpAbsorption
	瑞丽散射	G4OpRayleigh
	波长位移	G4OpWLS

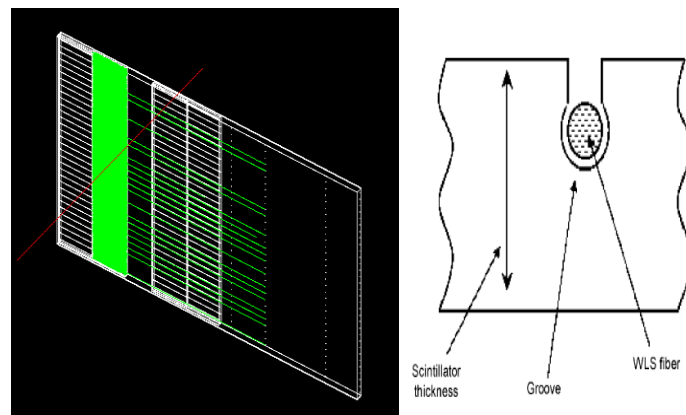


## 2.3 ED探测器构造—几何结构，材料

- 探测器结构的建模需要进行探测器材料和几何结构的定义
- ED探测器构成：
  - ▶ 闪烁体
  - ▶ 光纤槽
  - ▶ 波长位移光纤：包层，芯
  - ▶ Tyvek包层
  - ▶ 光电倍增管
- 重点在于光学界面性质的设置。

型号	光纤类型
基材	芯材料
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	芯密度(g/cm <sup>3</sup> )
折射率	芯折射率
相对光产额 (%)	内包层材料
发光效率 (光子/MeV)	内包层密度(g/cm <sup>3</sup> )
上升时间 (ns)	内包层反射率
衰减时间 (ns)	外包层材料
衰减长度 (cm)	外包层密度(g/cm <sup>3</sup> )
	外包层折射率
	衰减长度(cm)

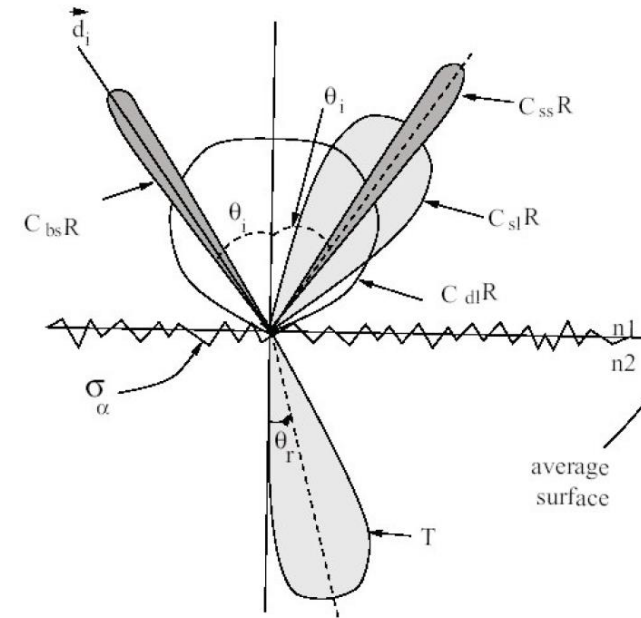
闪烁体和WLS光纤材料性质的设置



ED探测器几何结构

## 2.3 ED探测器构造—光学界面

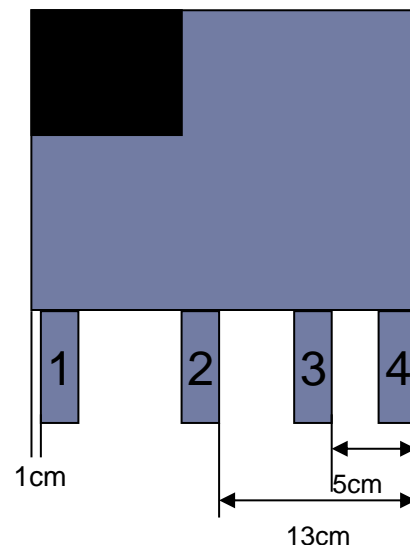
- G4OpBoundaryProcess主要处理光子到达界面时的折射反射概率
- 界面类型：dielectric-dielectric、dielectric-metal
- 界面模型：glisur、unified
- 界面光洁度：polished、ground等等
  - ▶ 界面光洁度为ground(unified模型)，需要定义：
    - $\alpha$ ：微平面与均平面之间的夹角（the angle between micro-facet normal and that of the average surface）。
    - Specular Spike：均平面反射的比例
    - Specular Lobe：微平面反射的比例
    - Diffuse Lobe：漫反射比例
    - Backscatter Spike：背反射比例



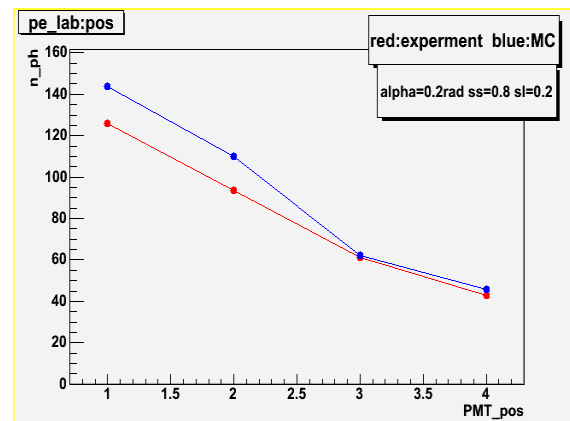
Polar plot of the radiant intensity in the UNIFIED model

## 2.3 ED探测器构造—光学界面

- ED需设置的界面：
  - ▶ 闪烁体-空气
  - ▶ 光纤槽-空气
  - ▶ Tyvek反射层-空气
  - ▶ Fiber-空气
- 闪烁体-空气界面性质的确定：
  - ▶ 实验中利用未开槽的闪烁体直接耦合光电倍增管，通过对比PMT耦合闪烁体4个不同的位置，确定闪烁体表面参数（ $\alpha, ss, sl, bs, dl$ ）。
  - ▶ 通过实验和模拟的对比结果（图3右）最终确定闪烁体表面的参数：粗糙度 $\alpha=0.1\text{rad}$ ， $ss=0.7$ ， $sl=0.3$ 。
- 类似的，根据实验确定了其他三个界面的光学性质的各种参数



图：闪烁体表面性质确定性实验



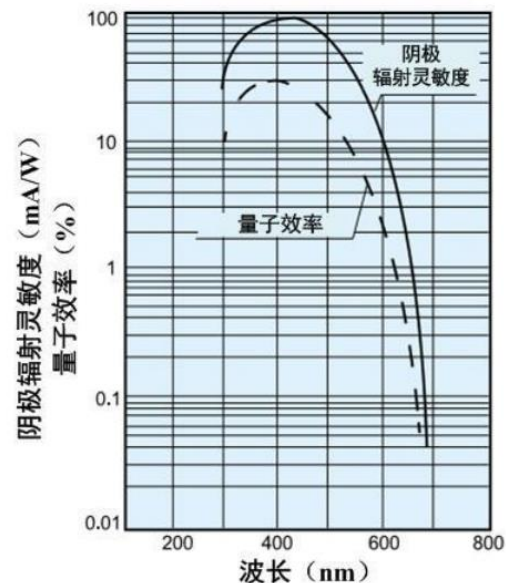
图：闪烁体表面性质确定性实验结果和模拟结果的对比

## 2.4 ED探测器灵敏探测器—PMT

- 灵敏探测器（Sensitive Detector, SD）：使几何结构中的一部分变得“敏感”，敏感区域中的各种事件信息会被记录（Hit）
- ED灵敏探测器：PMT光阴极面
- PMT记录的Hit：  
将穿过PMT光阴极面的光子信息（能量，到达时间），根据PMT量子效率谱将光子信息转化为光电子信息（时间）。

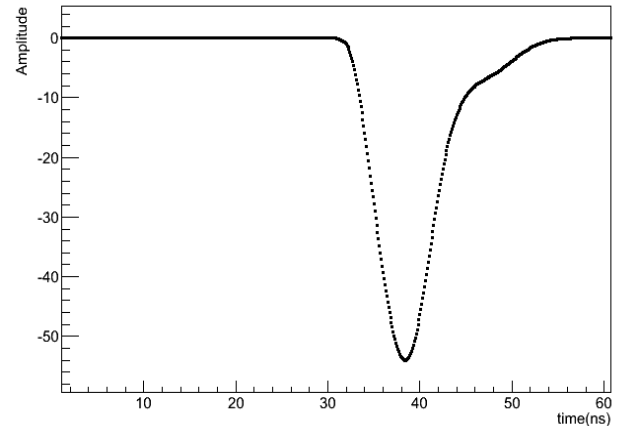


典型光谱响应曲线

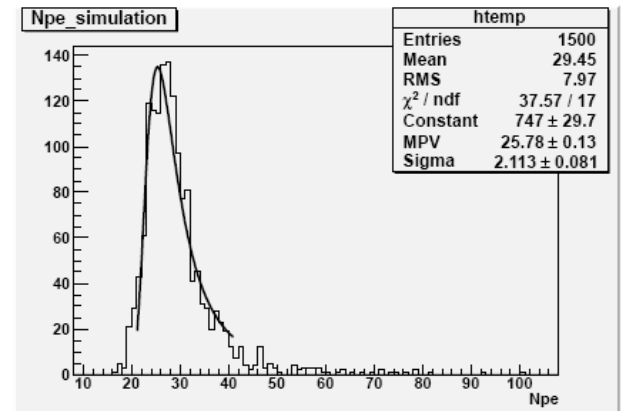


## 2.5 ED探测器灵敏探测器—数字化

- 数字化（Digit）代表着一个探测器的输出，是将Hit信息转化为Digit信息，用于探测器电子学模拟和触发模拟等等
- ED输出：Hit信息（光电子数+时间）  
→ PMT响应模拟 → ADC/TDC信息
  - ▶ PMT响应模拟：
    - 单光电子波形可以用函数  $A\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^2 e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}$  描述，将Hit的N个光电子，抽取N个单光电子波形按其时间排列形成PMT波形。
  - ▶ 电子学模拟（正在进行）：
    - ADC：PMT波形积分。
    - TDC：记录过阈（2mV）时间。

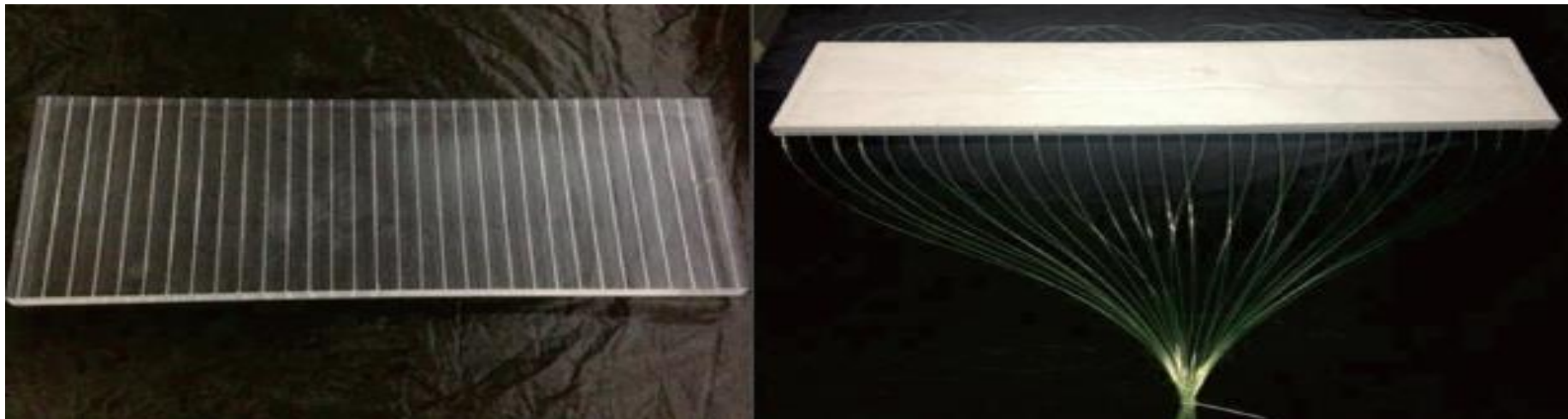


图：模拟单粒子条件下PMT波形



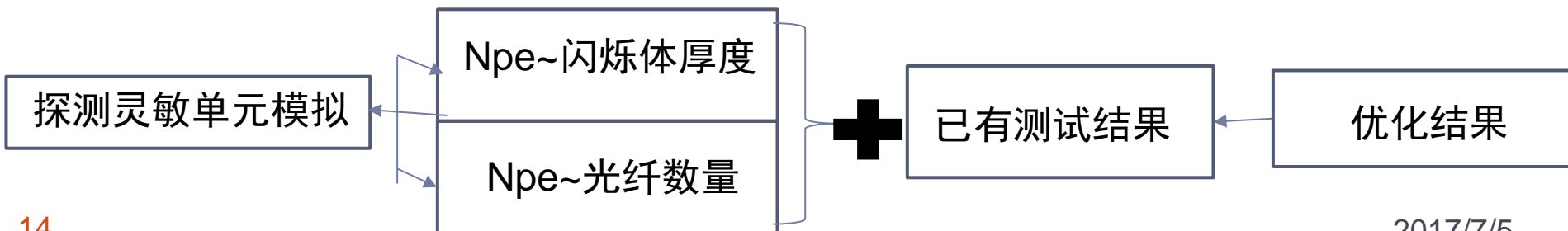
图：模拟单 $\mu$ 信号分布

### 3 ED模拟应用：探测灵敏单元优化



闪烁体：BC-408, EJ-200, ND-100, ST-401, HND-S2  
波长位移光纤：BCF-92SC, Y11(200)SC, Y11(200)MC

通过调节闪烁体厚度和光纤数量，保证优化出来的闪烁体+波长位移光纤组合满足ED要求（20p.e.）

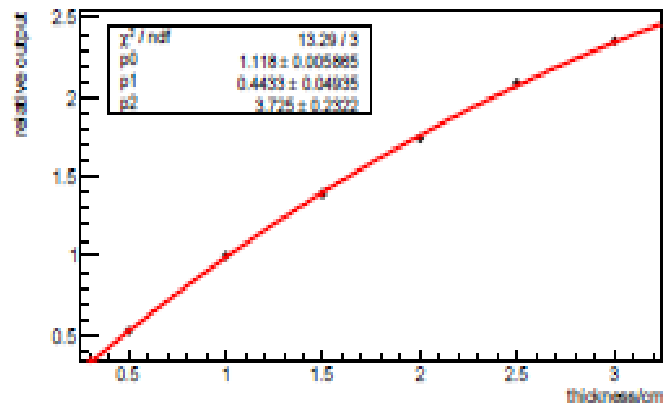


# 3.1 ED模拟应用：探测灵敏单元厚度优化

- 利用模拟程序模拟不同厚度闪烁体的响应，得到了单粒子信号随闪烁体厚度变化的关系
- 通过对比，实验结果和模拟结果有很好的的一致性
- 根据模拟曲线，寻找到满足要求的闪烁体的厚度

$$N = p_0 \times D \times e^{-\frac{p_1 \times D}{p_2}}$$

abslength = 3.8m



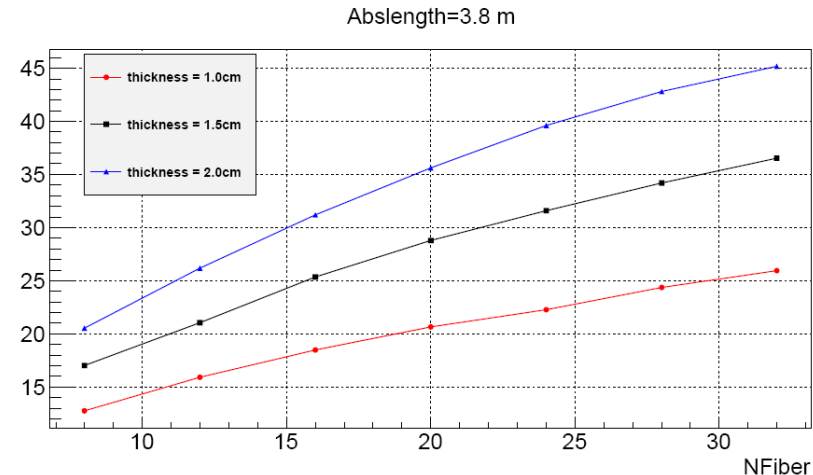
图：单粒子信号随闪烁体厚度的变化趋势，信号归一化到1cm闪烁体

厚度(cm)	2	1.5	1
实验值	1.66	1.39	1
模拟值	1.76	1.40	1

表：不同闪烁体厚度的模拟和实验结果对比（信号归一化到1cm闪烁体）

## 3.2 ED模拟应用：探测灵敏单元光纤数量优化

- 模拟了不同光纤数目对信号的影响，发现单粒子信号和光纤数量存在正比关系
- 实验中测试了BC-408闪烁体耦合32根光纤和16根光纤的结果，与模拟结果一致
- 通过改变闪烁体厚度和波长位移光纤数量，最终给出了12种满足ED要求的方案



图：Npe与光纤数量的关系

BCF92SC	CR285_01		
	厚度(cm)	光纤数	预期Npe
EJ-200	1.0	32	21.6
ND-100	1.5	32	20.5
ST-401	1.2	32	20.9
HND-S2	2.5	32	21.1

表：模拟给出的ED探测灵敏单元优化方案



## 4.小结

---

- ▶ 基于GEANT4发展了一套ED模拟程序，通过实验和模拟的比较，设置了物理过程，探测器结构（特别是界面性质），灵敏探测器模拟和电子学模拟，最终得到了一套可靠的ED模拟程序。
- ▶ 基于这套程序，对ED灵敏探测单元的厚度和光纤数量进行了优化，得到了和实验相符的结果，为ED的选型奠定了基础。