

WCDA水质标定的研究

李会财
高能所

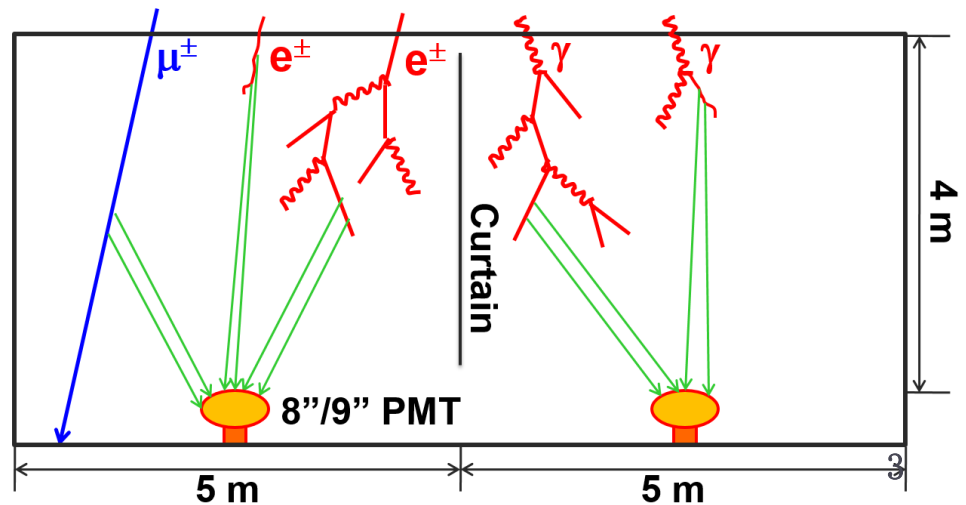
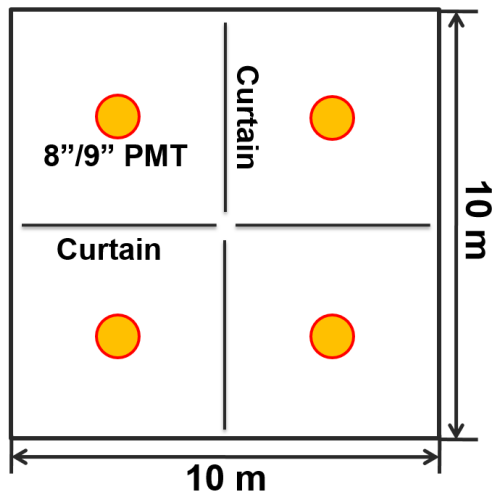
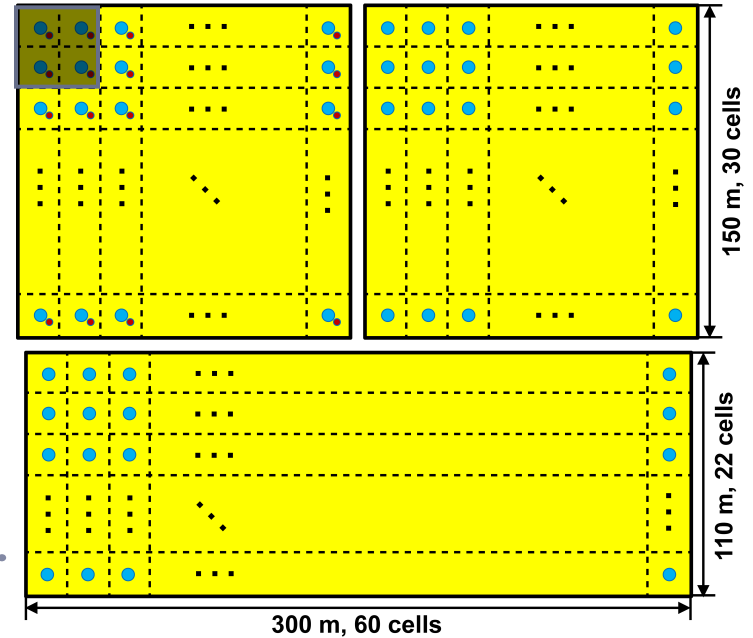
2017. 09. 22

主要内容

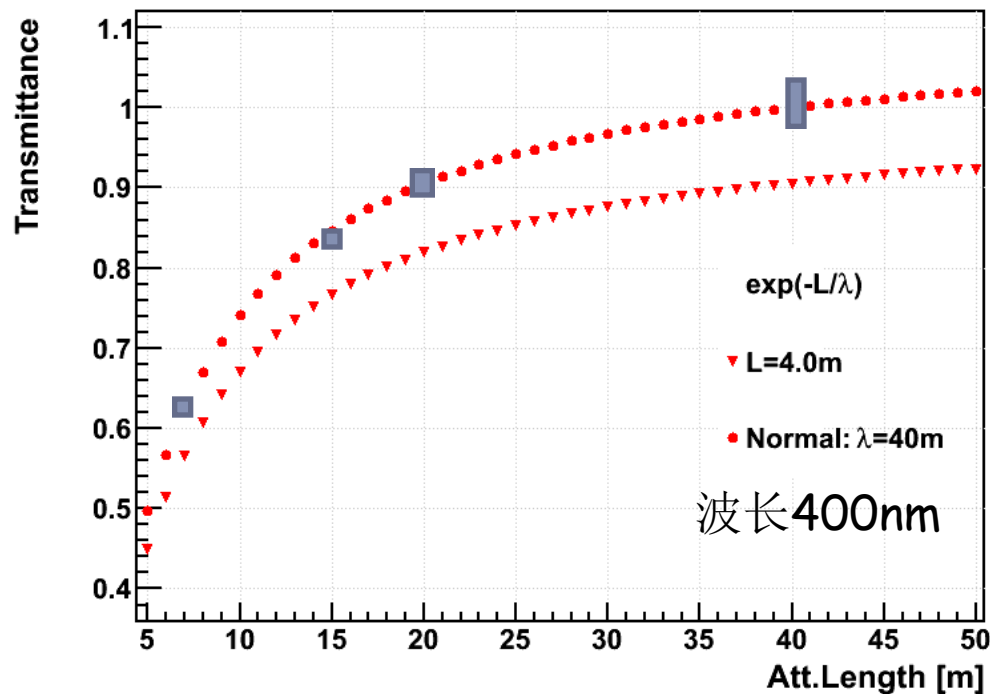
- ◆ 水质标定的意义
- ◆ 水质标定的方法
 - 测量装置的研究
 - 单路计数谱形研究
- ◆ 总结

Water Cherenkov Detector Array

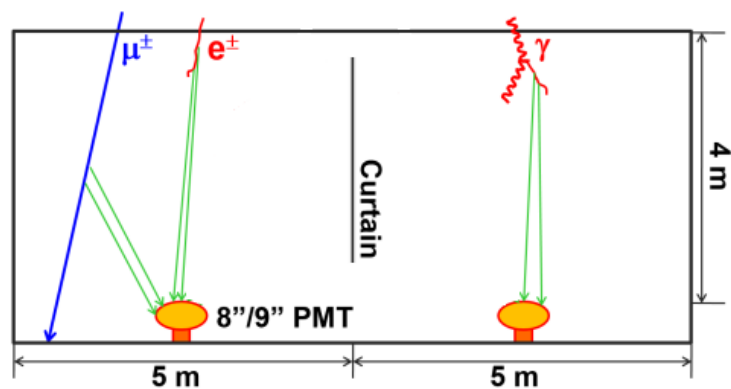
- ◆ 3 water ponds:
 - 3000 cells;
 - Cells are partitioned with black curtains;
 - 4 m effective depth;
 - 78,000 m² in total;
 - 350,000 tons of purified water.



光透过率和水质关系



- ◆ λ_{att} : 40 m is limit;
- ◆ $L = 4$ m;



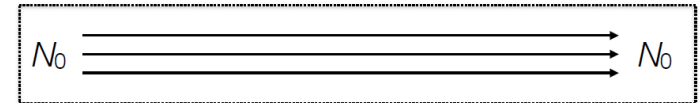
- ◆ WCDA是水切伦科夫探测器，水衰减长度是重要参数，对于探测器模拟的真实化以及深入理解探测器的性能都有重要意义；
- ◆ 水透明度的提高：1. 次级粒子探测效率升高；2. 有利于电荷的精确测量；
- ◆ 探测器运行整个过程：对水质进行持续的测量和监测，以满足标定要求。

水质要求

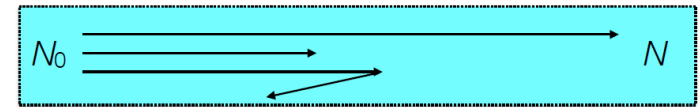
表 1.5: 水质要求的具体参数指标。

性能指标	性能参数
总有机碳TOC	<0.4 mg/l
微粒数 (>0.1 um)	<200 /ml
色度	<5 度
浊度	<0.5 NTU
悬浮物	<4 mg/l
电导率	<1000 mS/cm @ 25 °C
pH值	6.5 – 8.5之间
水衰减长度	>15 m (400 nm)
池内水质	整体均匀度好于80 %

真空



介质

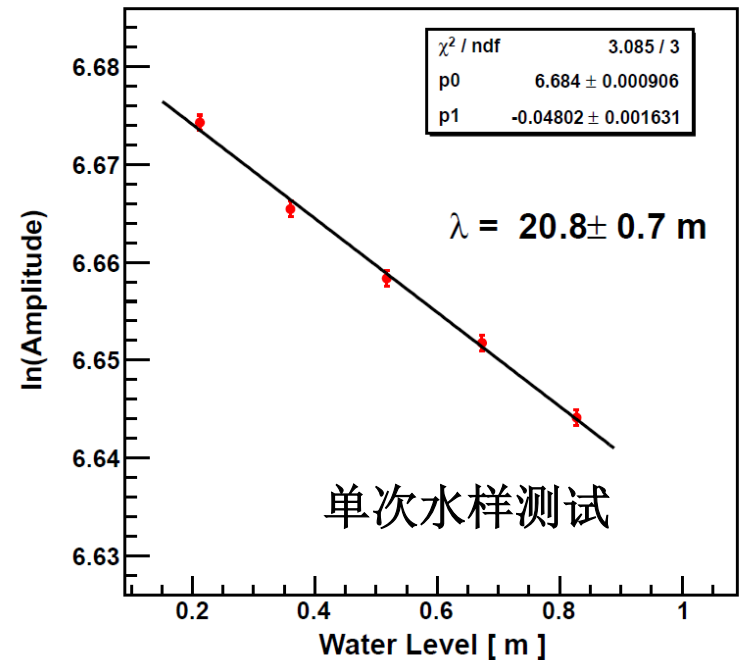
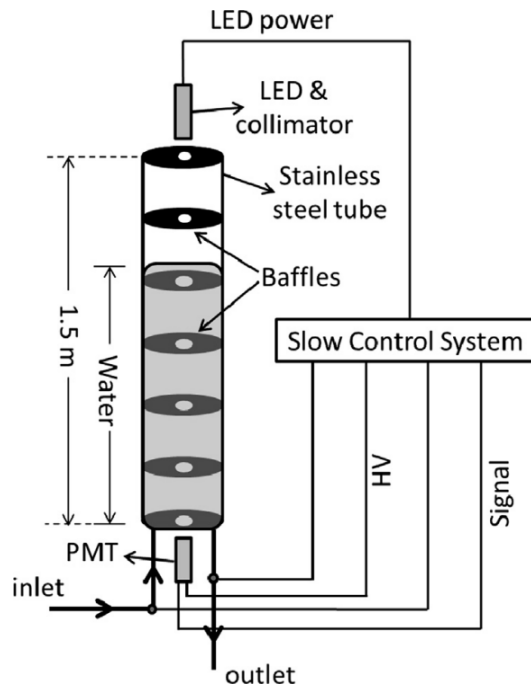


$$\frac{1}{\lambda_{Att}} = \frac{1}{\lambda_{Abs}} + \frac{1}{\lambda_{Scat}}$$

$$L_{Rayleigh} = \frac{\lambda^4}{K}$$

- ◆ 总有机碳**TOC**含量是影响水质的主要因素
- ◆ 池内水质均匀度：水体对光的吸收造成的单元差别<5%；保持探测器阵列的整体对称性： $\exp(-4/\lambda_1) / \exp(-4/(\lambda_2)) = 95\%$
- ◆ 水衰减长度的测量和监测

直接测量装置



- ◆ 由慢控制系统实现远程控制
- ◆ 自动不间断测量(单次1.5h); 20m: 误差7%
- ◆ LED温度效应对测量有影响
- ◆ 水吸收长度与LED波长相关
- ◆ 监测的水域十分有限: 水样取样点(净化后、循环水, 池内特殊位置, 不同水层)

$$A = A_0 e^{-h/\lambda}$$

$$\ln A = \ln A_0 - \frac{h}{\lambda}$$

$$\ln A = -\frac{1}{\lambda} h + \ln A_0$$

水吸收长度与波长的关系

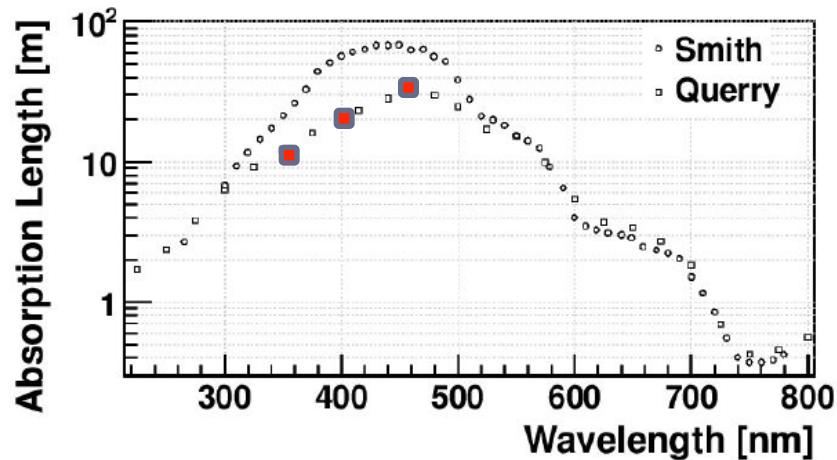
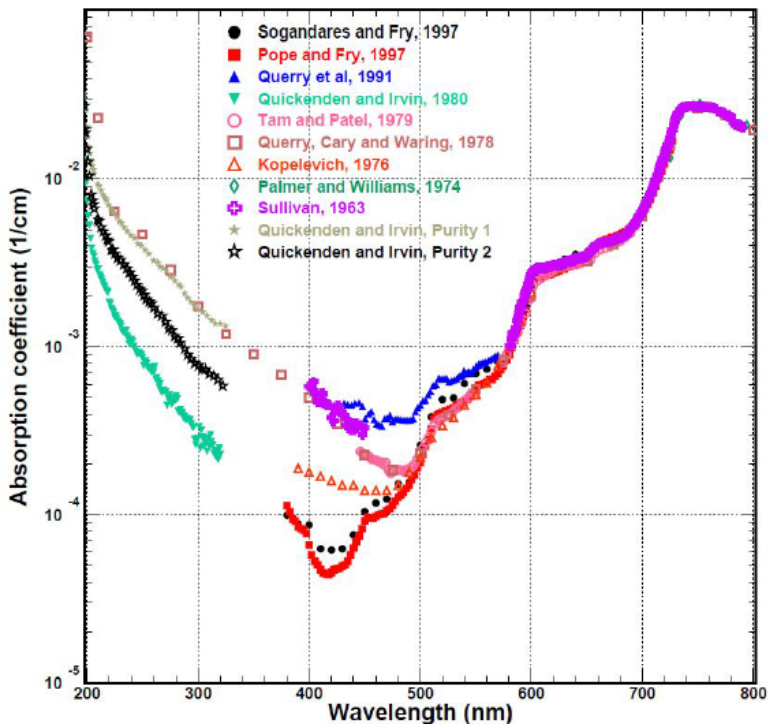
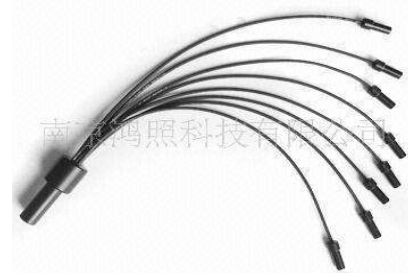
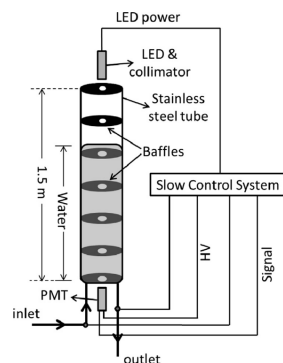


表 5.4: 不同水质模型下光产额的差别(单位: nPE)。

Model	Cherenkov	After ABS	After QE	After ABS and QE
Query	475.2	300.0	64.2	49.3
Smith	475.2	216.7	64.2	42.7

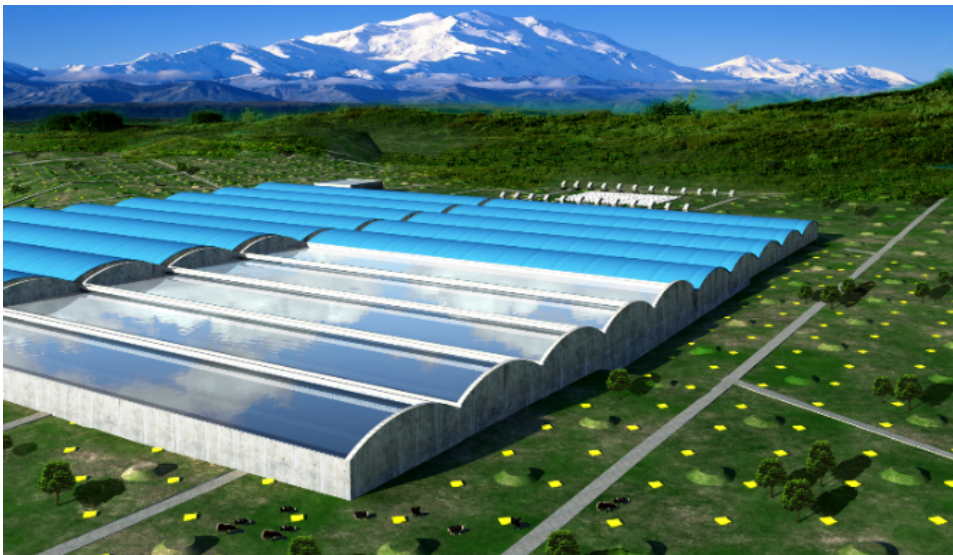
不同实验给出的纯水吸收系数与波长的关系

- ◆ 装置中通过不同波长的LED交替测量水质；确认符合的的波长与Att的关系，用于模拟
- ◆ 拟选取波长：350nm，400nm，460nm



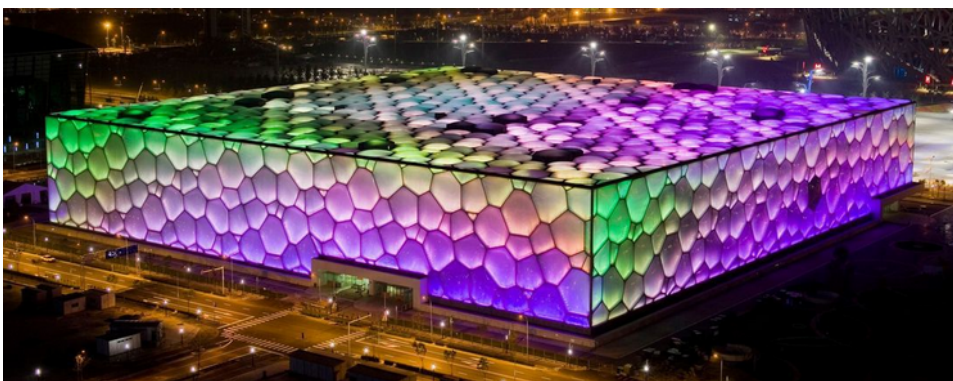
光纤分光束

困难和挑战



WCD:

- ◆ 78,000 m² in total;
- ◆ 350,000 tons of purified water;

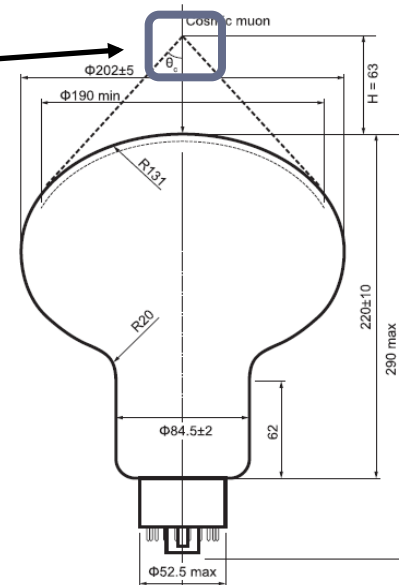
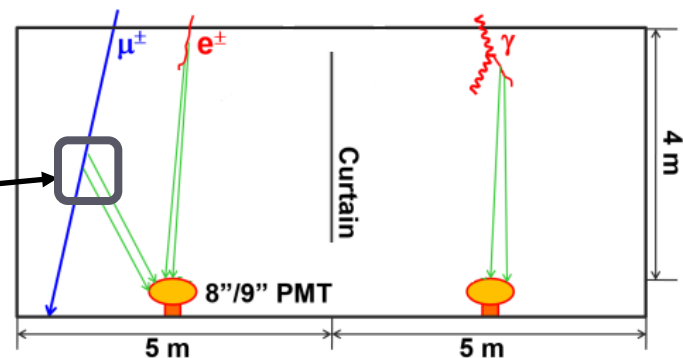
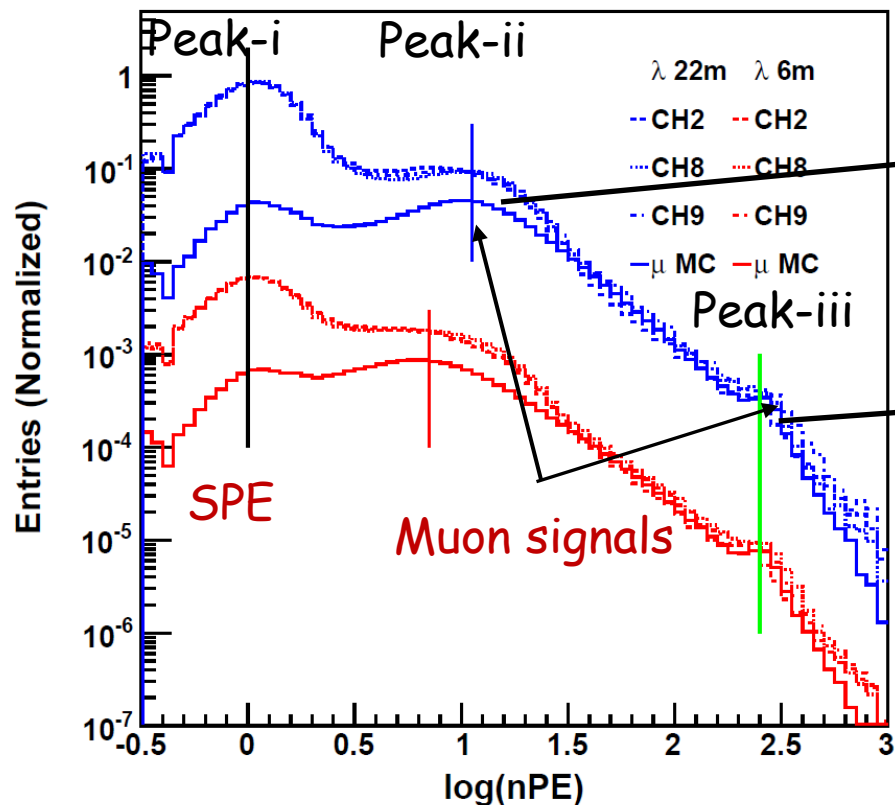


Water Cube:

- ◆ 31,000m² (177m x177m).

- ◆ 实时 / 高效 / 全面反应池内水质
- ◆ 新的监测、测量水质的方法

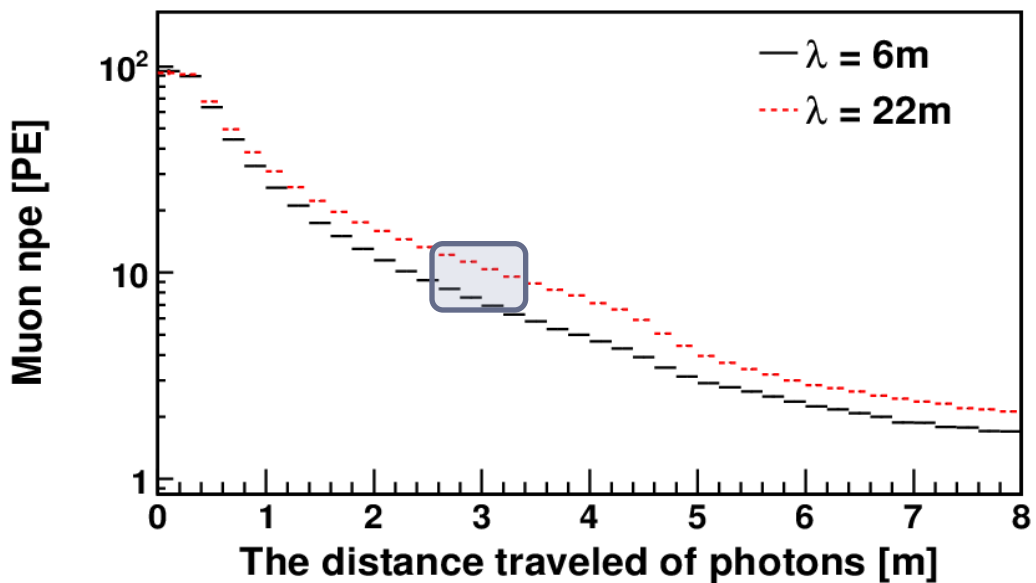
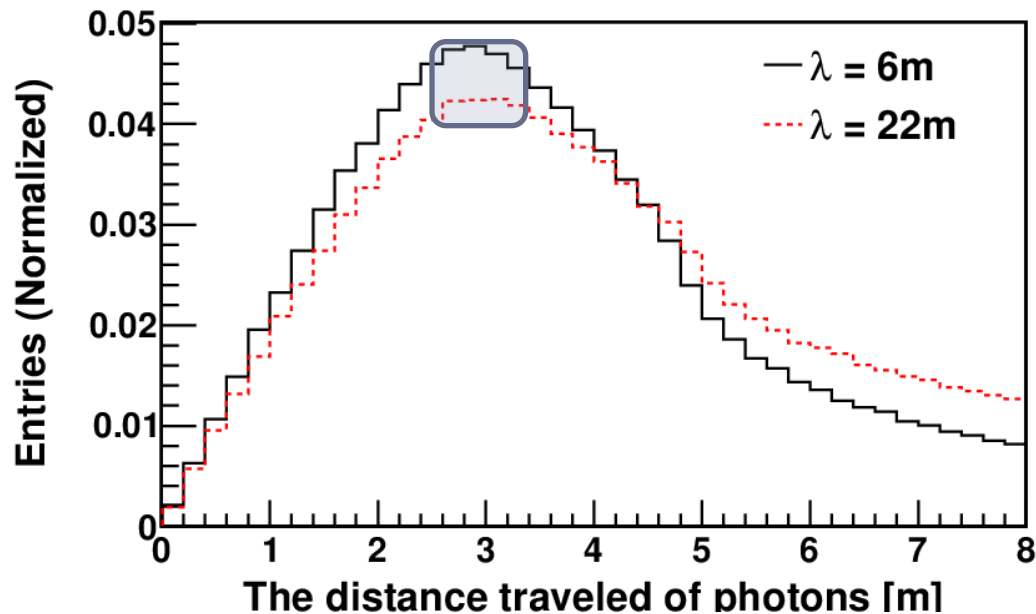
电荷分布谱的三峰结构特点



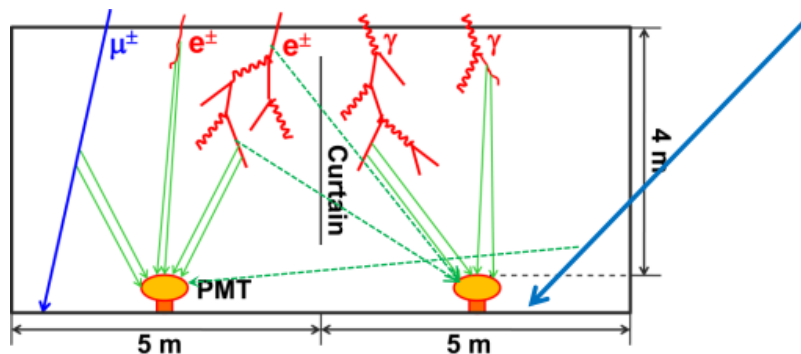
- ◆ 电荷分布谱中的第二个峰由muon贡献
- ◆ Peak-ii与muon的track径迹和cell的几何相关
- ◆ Peak-ii随水质的改善，锋位右移

NIM A, 644 (2011): 11 - 17

Peak-ii的成因

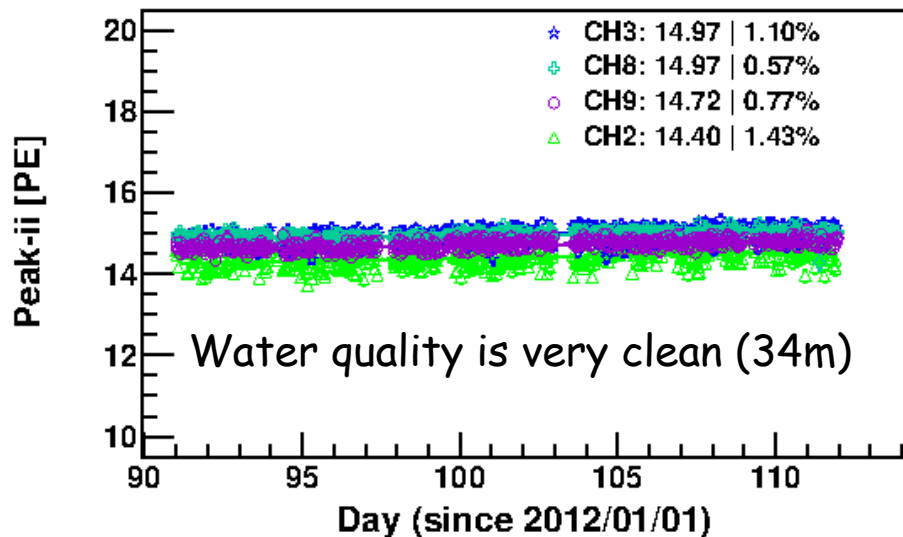
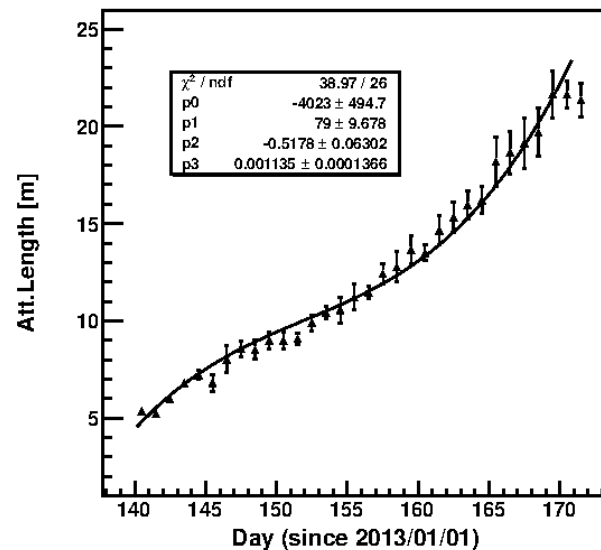
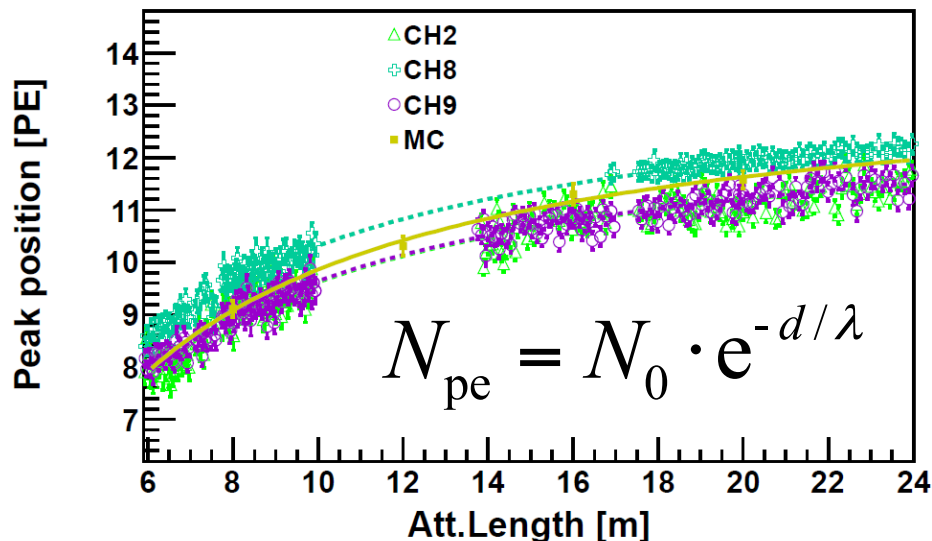


◆ 不同水质情况下，触发PMT的muon次级粒子径迹上的发光点到PMT光阴极表面的距离分布；



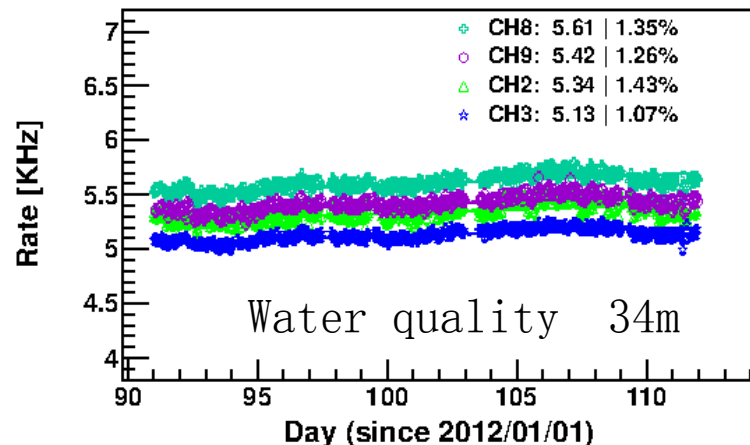
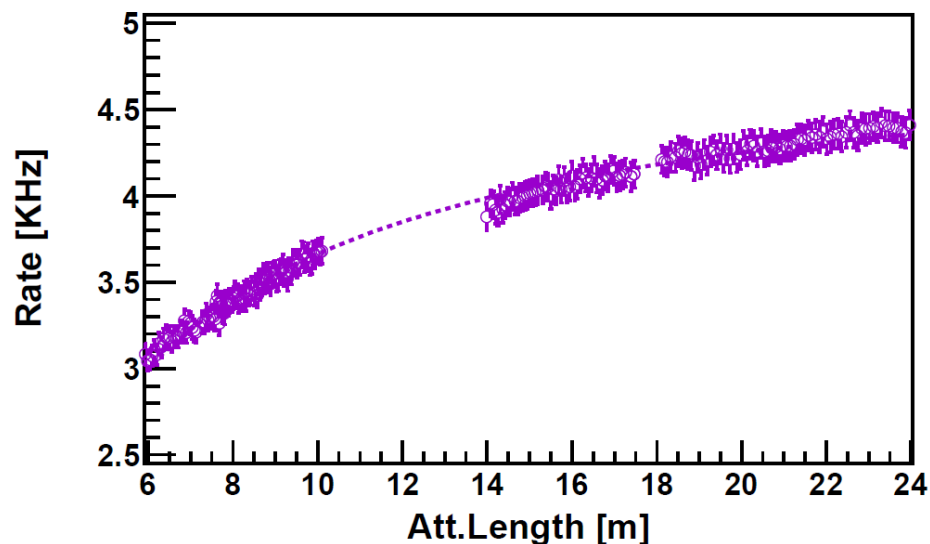
◆ PMT接收的信号大小随径迹上发光点到PMT光阴极表面距离变化的关系图；
◆ 在相同的径迹距离下，水透明度越高，PMT的信号越大；

Peak-ii和水质的关联

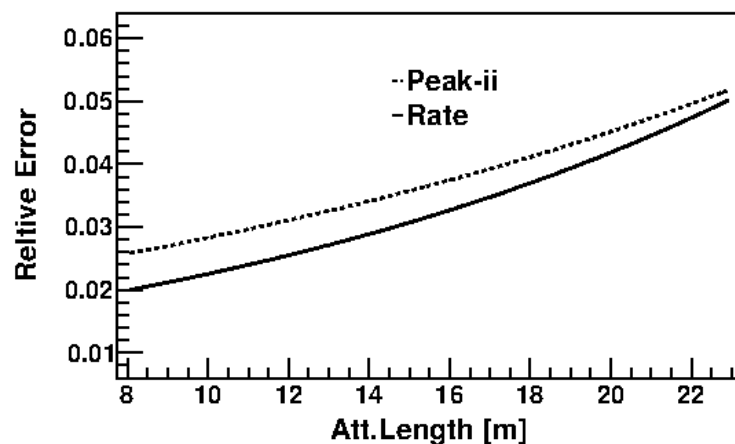


- 实验和**MC**相符合，找到了一种标定水质的新方法：
- ◆ 弥补了直接测量装置测量区域局限性
- ◆ 可以对cell的不一致性进行监测
- ◆ 用物理数据分析，更符合实际情况

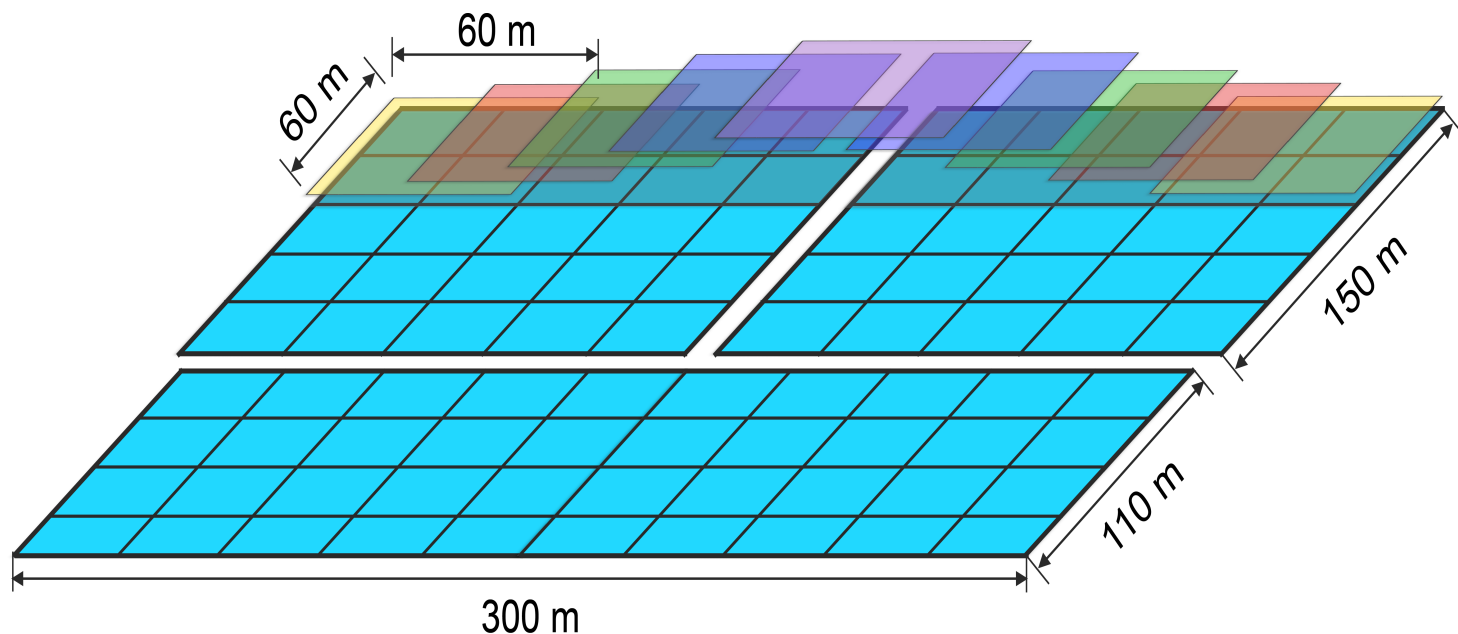
一定阈值下的计数率监测水质



- ◆ 通过电荷分布谱的锋位变化监测水质
- ◆ 一定阈值上的计数率变化实现水质监测
- ◆ 实时性：实时分析各个cell内水质变化
- ◆ 高效性：单次测量时间只有几十秒，不引入死时间，不影响正常的物理取数
- ◆ 高精度：测量精度达到测量装置同等水平
- ◆ 结合硬件测量，对池内水质变化全面监测，同时监测cell间的不均匀度

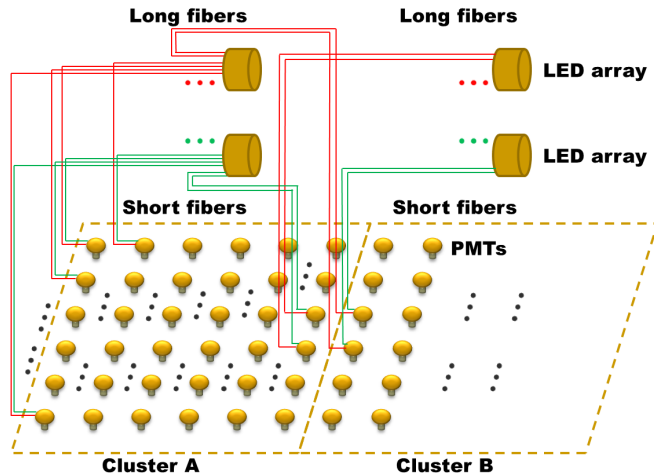


区域水质监测



- ◆ 基于单独的**cluster**: 大小为 $6 \times 6 = 36$ 个单元
- ◆ 一段时间内: **cluster**内的有一定量的 (e. g. 50%) 的PMT实时监测的**cell**内平均水质降低20%, 发送预警信息
- ◆ 迅速反馈一定区域内水质的实际情况, 便于发现运行中出现的问题
- ◆ 做到见微知著, 防患于未然

时间和电荷标定



◆ Time Calibration

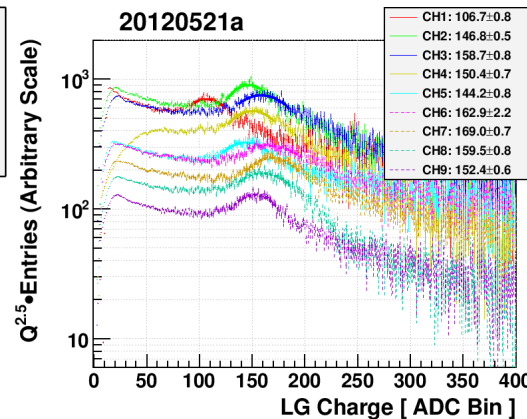
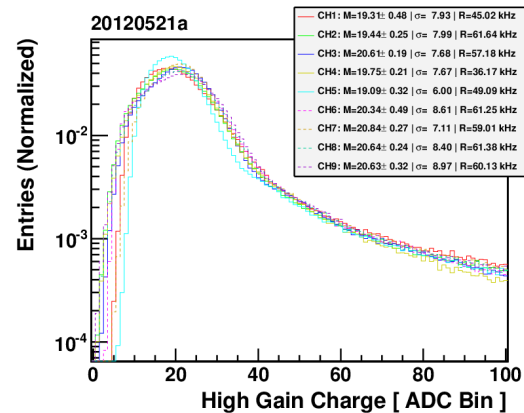
- Cluster-based, cross-calibrated;
- 2 fibers per PMT (short & long);
- 2 LEDs per cluster, lit in turn;
- Frequency of LED pulsing: 5-10Hz;
- Time offset precision: ~ 0.1 ns.

◆ Low range: single rate (peak-i)

- ~ 40 kHz;
- SPE signal dominated;
- 2% per 30 seconds;

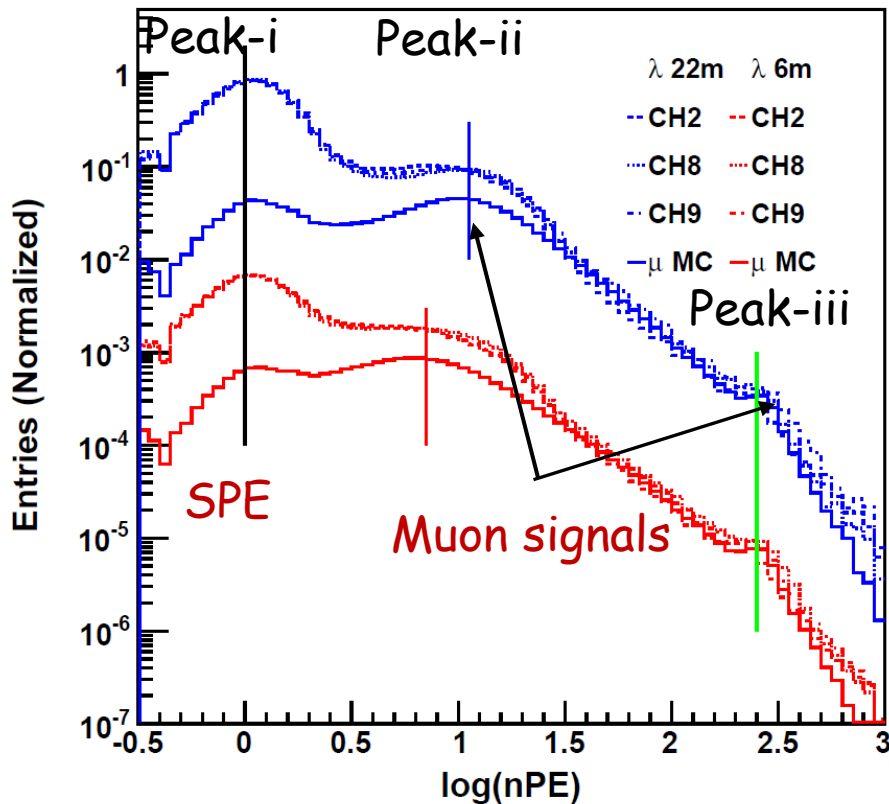
◆ High range: muon peak-iii

- ~ 10 Hz;
- Vertical muons hitting;
- 2% per 30 minutes.



水质标定是电荷标定的重要部分

Charge and PMT performance Calibration



- ◆ Low range: single rate (**peak-i**)
 - SPE signal dominated;
 - Including PMT low range Gain + cable + pre-amp + electronics.
- ◆ Low range: muon peak (**peak-ii**)
 - PMT low range Gain + QE + CE cable + pre-amp + electronics.
- ◆ High range: muon peak (**peak-iii**)
 - Vertical muons hitting PMT;
 - PMT high range gain + QE + CE + cable + pre-amp + electronics;

- ◆ Charge Calibration : peak-i and peak-iii
- ◆ PMT performance (QE+CE) Calibration:
peak-i and peak-ii / peak-i and peak-iii

$$G\beta\mu m = q_{\text{spe}}$$

$$N_{C,\mu} Q\eta G\beta\mu m = q_{\mu}$$

$$Q\eta = \frac{1}{N_{C,\mu}} \frac{q_{\mu}}{q_{\text{spe}}}$$

总结

◆ 直接测量装置的研究

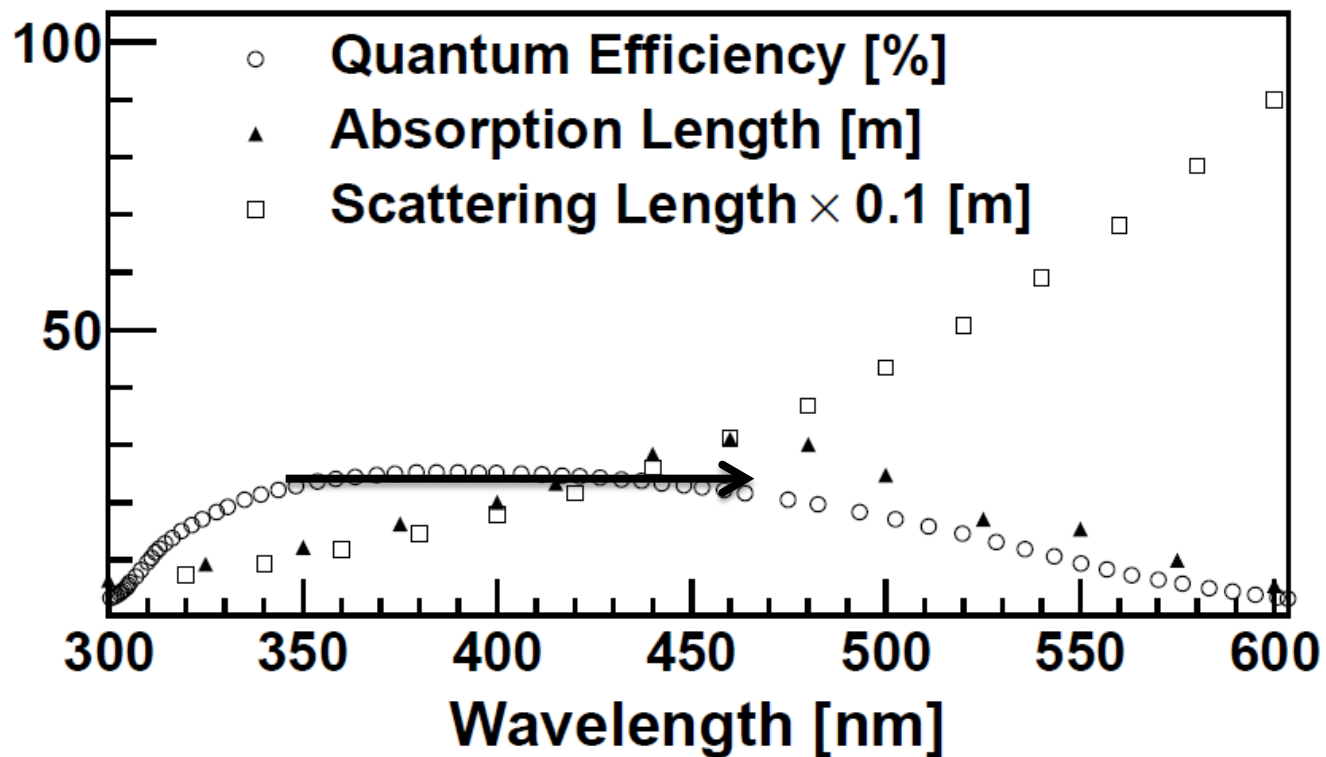
- 测量装置整体得到验证
- LED温度效应：温控模块，挑选温度系数很小的LED
- 水吸收长度与波长的关系：多个不同波长LED测量确定

◆ 单路计数谱形的研究

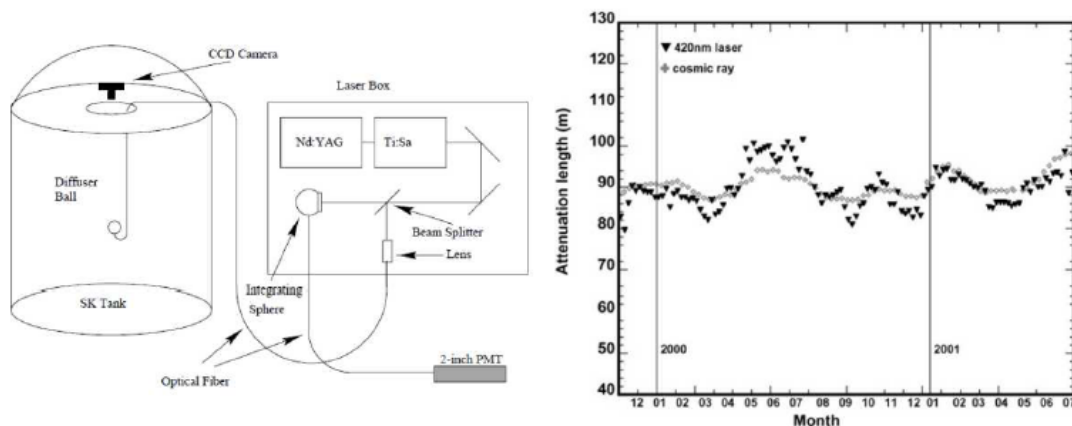
- 电荷分布谱具有三峰结构特点
- 水质的实时、高效、高精度的监测
 - ▶ 利用谱形中的Peak- i 峰位变化
 - ▶ 一定阈值下的计数率变化
- 三峰的峰位变化可用于charge的标定，PMT性能(QE+CE)的监测

Thank you

模拟中的参数



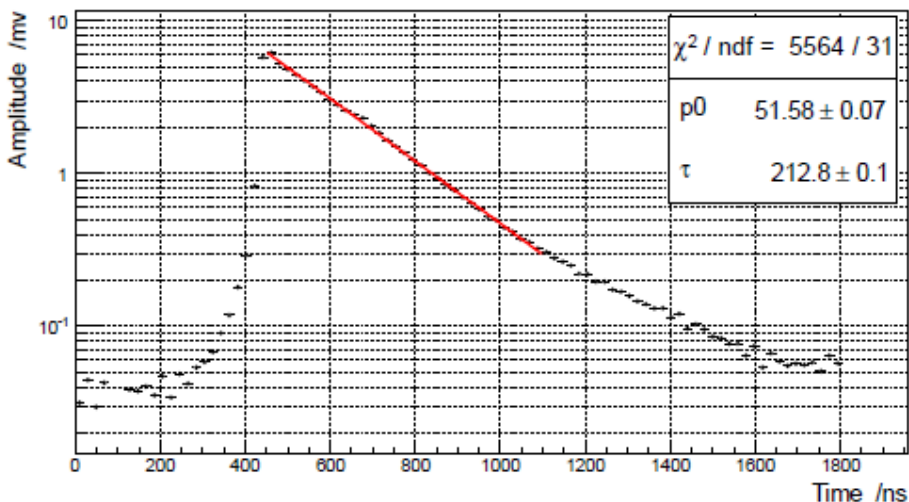
水质测量的方法



$$I = \frac{I_0}{l^2} \cdot e^{(-l/\lambda)}$$

$$Q = Q_0 \frac{f(\theta)}{l} \cdot e^{(-l/\lambda)}$$

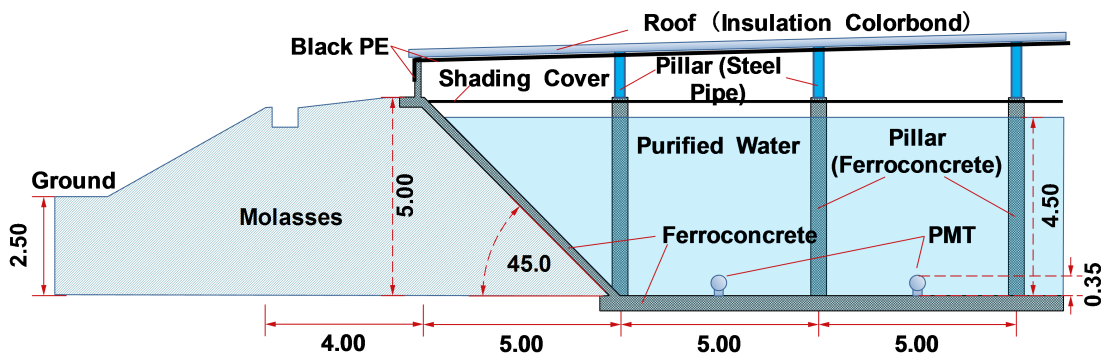
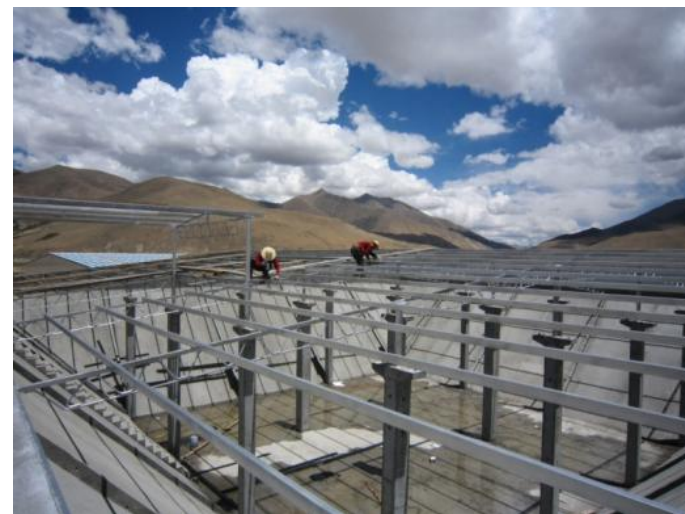
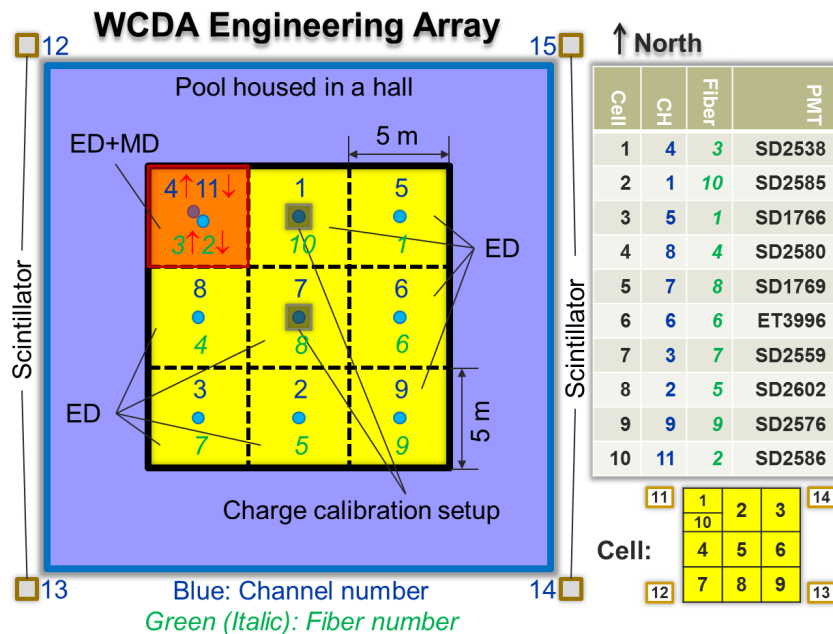
图 5.36: 左图为Super-K实验水质测量装置示意图；右图为利用 μ 间接测量水质和测量装置直接测量结果的比较 [99]。



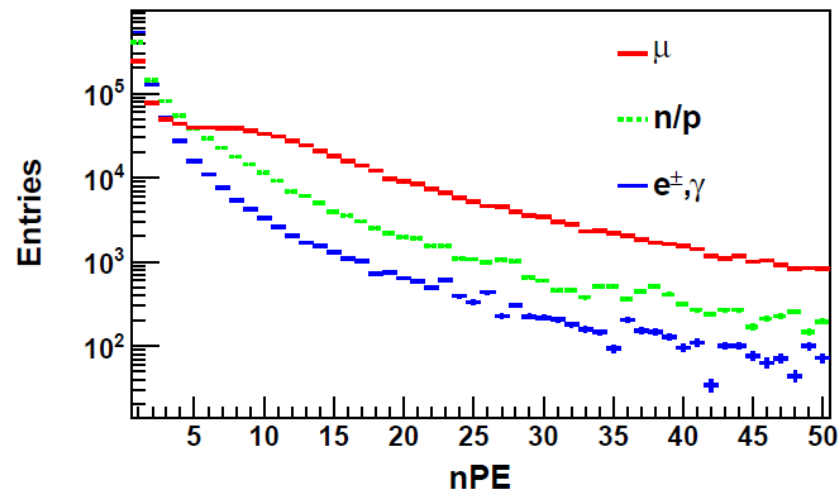
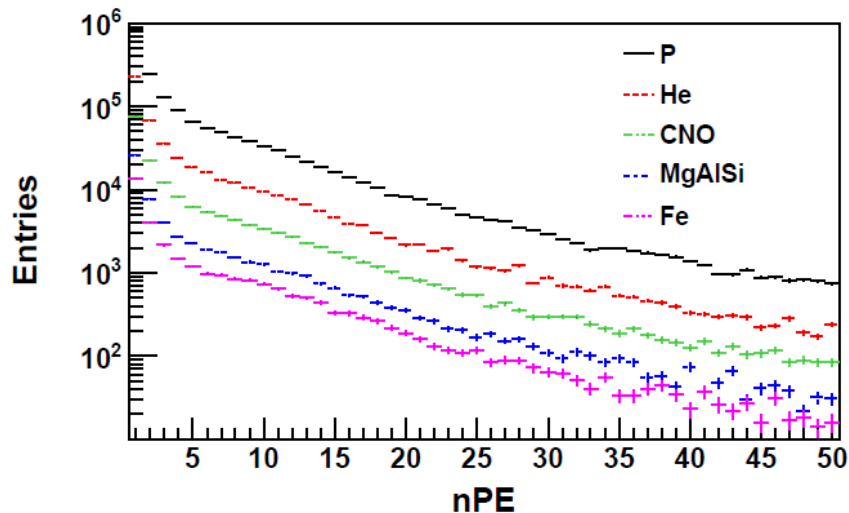
$$\frac{1}{\tau} = \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{\ln f}{L} \right) \cdot \frac{c}{n}$$

单缪信号的阳极平均波形，利用指数拟合，得到波形后沿衰减时间

工程阵列



单路计数率模拟结果

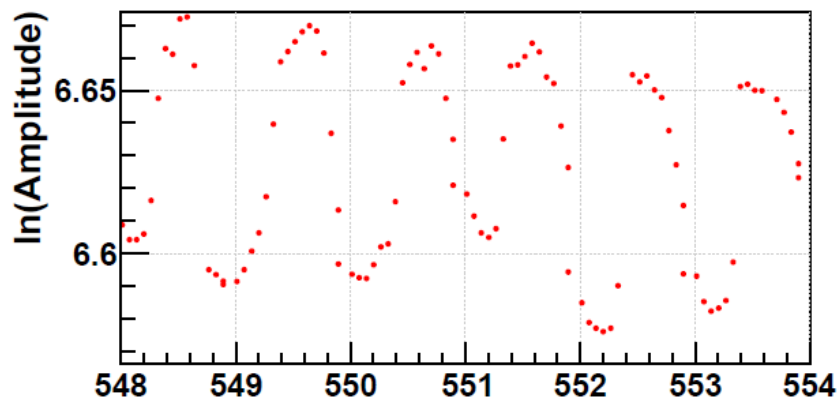
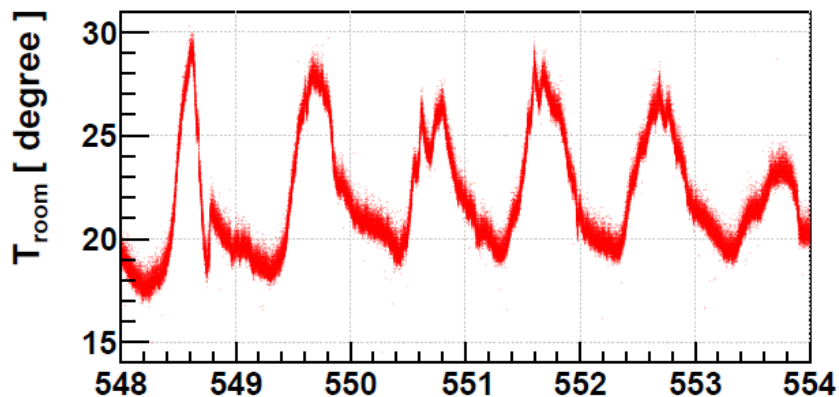


- ◆ P、He: 占总Rate的90%
- ◆ 其余三种成分占10%
- ◆ u: n-p: EM = 10.3:9.9:8.8
- ◆ MC Rate = 31.4kHz
- ◆ Data: 30.5--32.2kHz

Table 2. The single rate comparison.

Primary CR	rate/kHz	Secondary particles	Rate/kHz
P	20.37	μ	10.27
He	5.69	n-p	9.91
CNO	1.94	e^\pm, γ	8.82
MgAlSi	0.68		
Fe	0.36		
Total	29.04	Total	29.00
Corrected	APR: 3.0%	Dark noise: 1.5 kHz	
MC		31.4 kHz	
DATA		30.5~32.2 kHz	

LED的温度效应



直接测量装置中LED的温度效应

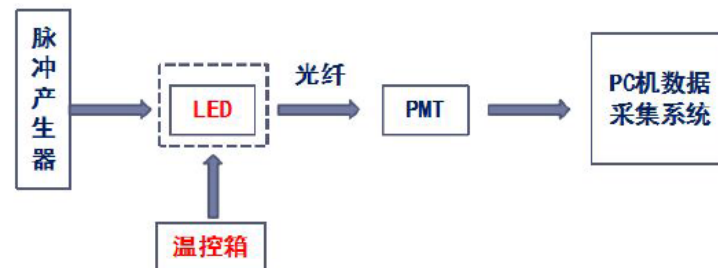
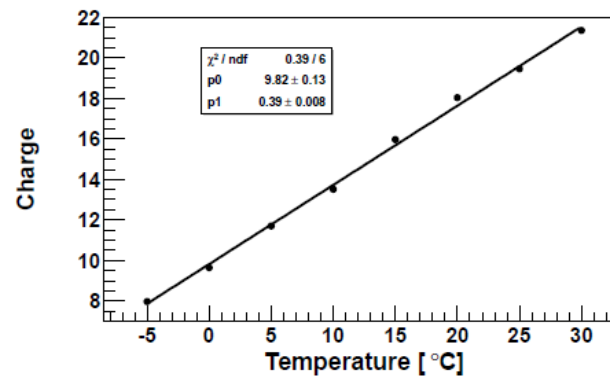


图 3.23: LED在恒压脉冲驱动下, 温度效应测试框架示意图。

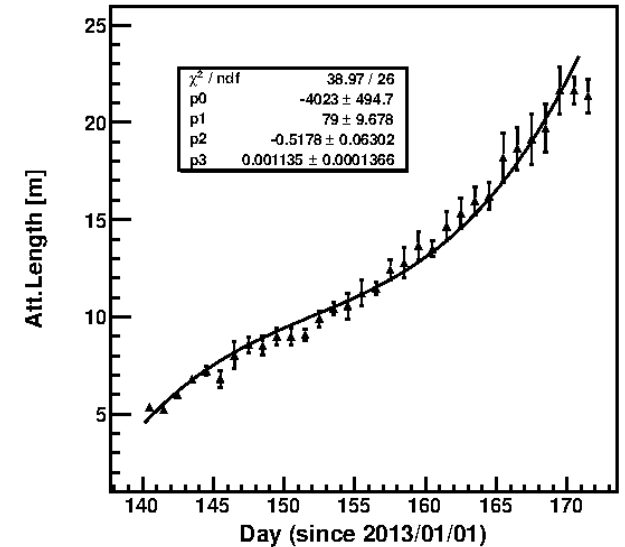
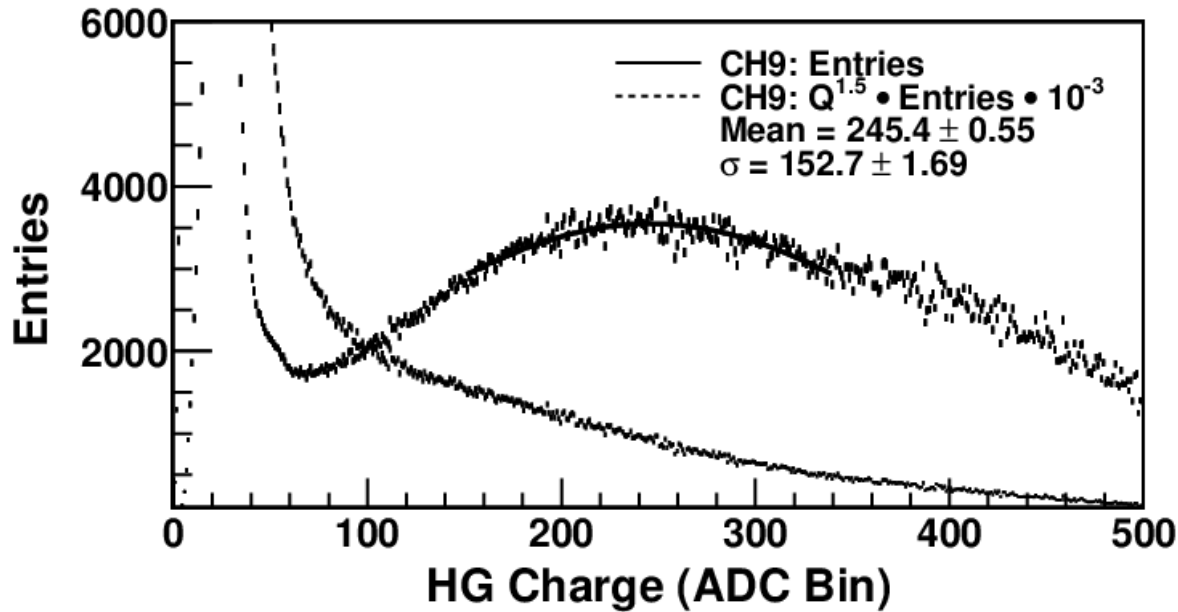


LED在恒压脉冲驱动下, PMT所测电量随LED所处温度的变化关系。

温度影响测量 (类似LED)

- ◆ 通过温控模块, 控制LED所处的微环境温度; 温度系数很小的LED

峰位拟合



- ◆ The 2nd peak: Gaussian fitting after a power law of charge is multiplied;
- ◆ Variation of the attenuation length during a month.