

# 大亚湾中微子实验Gd-LS的衰减长度测量

WWW.IHEP.CAS.CN



报告人:高龙

gaol@ihep.ac.cn

高能物理研究所

核探测与核电子学国家重点实验室

作为捕获中微子的靶物质，液体闪烁体在中微子实验中得到越来越多的应用。

.....

KamLAND实验采用不掺金属的液闪；

LENS实验用掺Yb液闪探测太阳中微子；

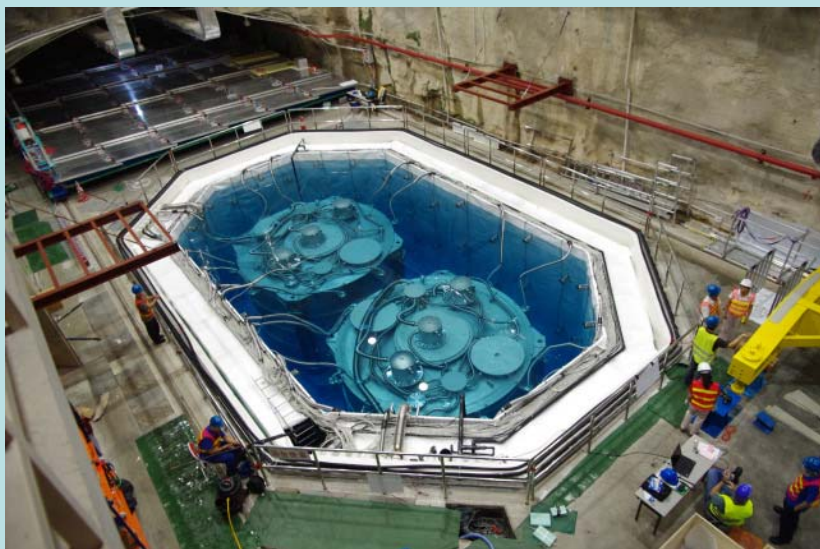
LNGS (Laboratory Nazionali del Gran Sasso) 实验使用掺In液闪；

CHOOZ实验，Palo Verde实验和大亚湾实验，均采用掺Gd液闪；

.....

大亚湾中微子实验用新的配方和生产工艺来提高Gd-LS的性能。在研制Gd-LS的过程中使用了一种以异壬酸为配位体的固体复合物。2007年，在一个原型探测器上测试了800升合成的Gd-LS(1g/L Gd)，并进行了长期的稳定性测试和高温老化实验。结果表明Gd-LS的性能能够满足大亚湾中微子实验中对中微子混合角 $\theta_{13}$ 的测量要求。

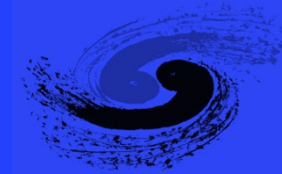
## 大亚湾中微子实验



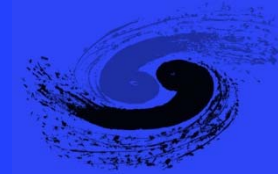
它通过分布在三个实验大厅的8个全同的探测器来获取数据。每个探测器为直径5米、高5米的圆柱形，装满透明的液体闪烁体，总重185吨。

对于用于反应堆中微子物理实验的液闪，**衰减长度**是表征其性能的重要参数之一。





- 1、研究了测量系统的稳定性。
- 2、研究了光源单色性对测量结果的影响。
- 3、提出一种基于比尔-朗伯定律的方法来获得实验装置的测量误差。
- 4、测量了Gd-LS和其它几种样品的衰减长度。
- 5、对比了三种用来纯化线性烷基苯（LAB）的纯化方法。



$$I = I_0 e^{-(x/\lambda)}$$

$\lambda$ : 衰减长度

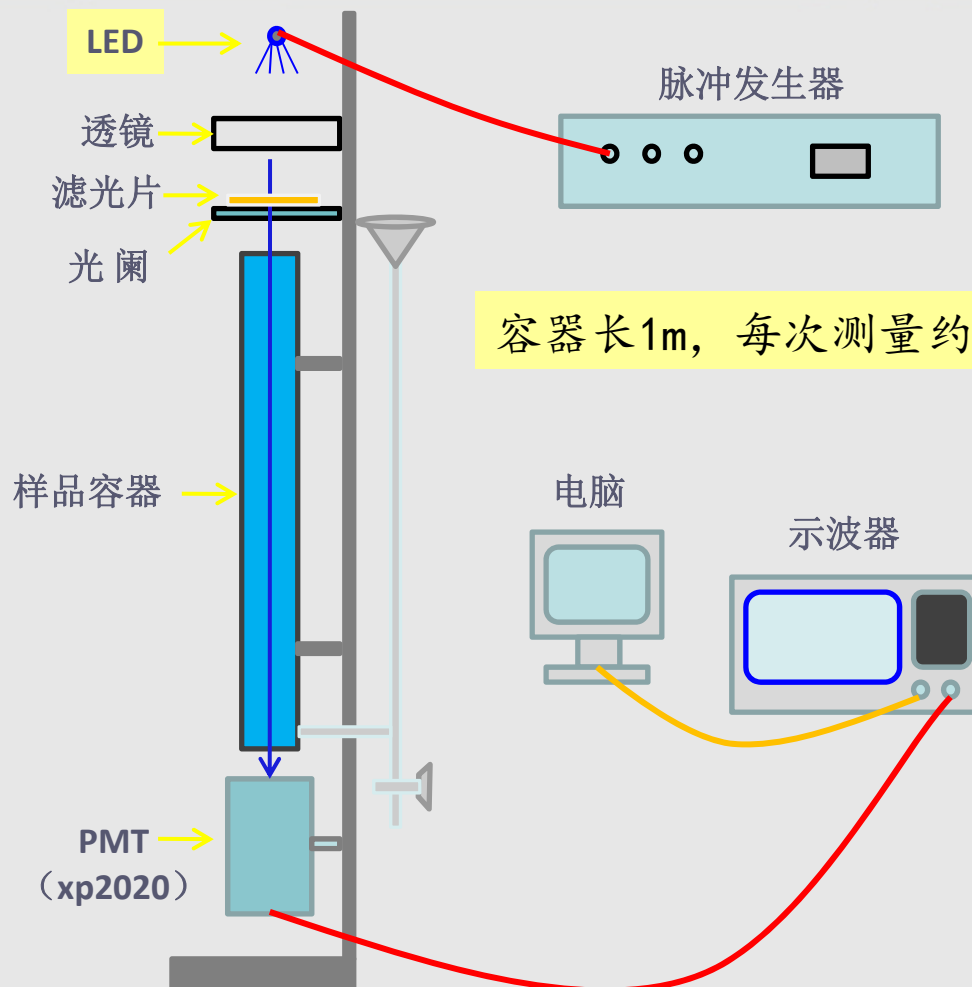
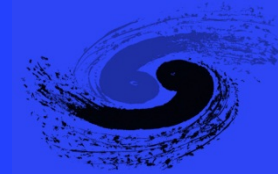
$x$ : 吸光样品厚度

$I_0$ : 通过样品前的光强

$I$ : 通过样品后的光强

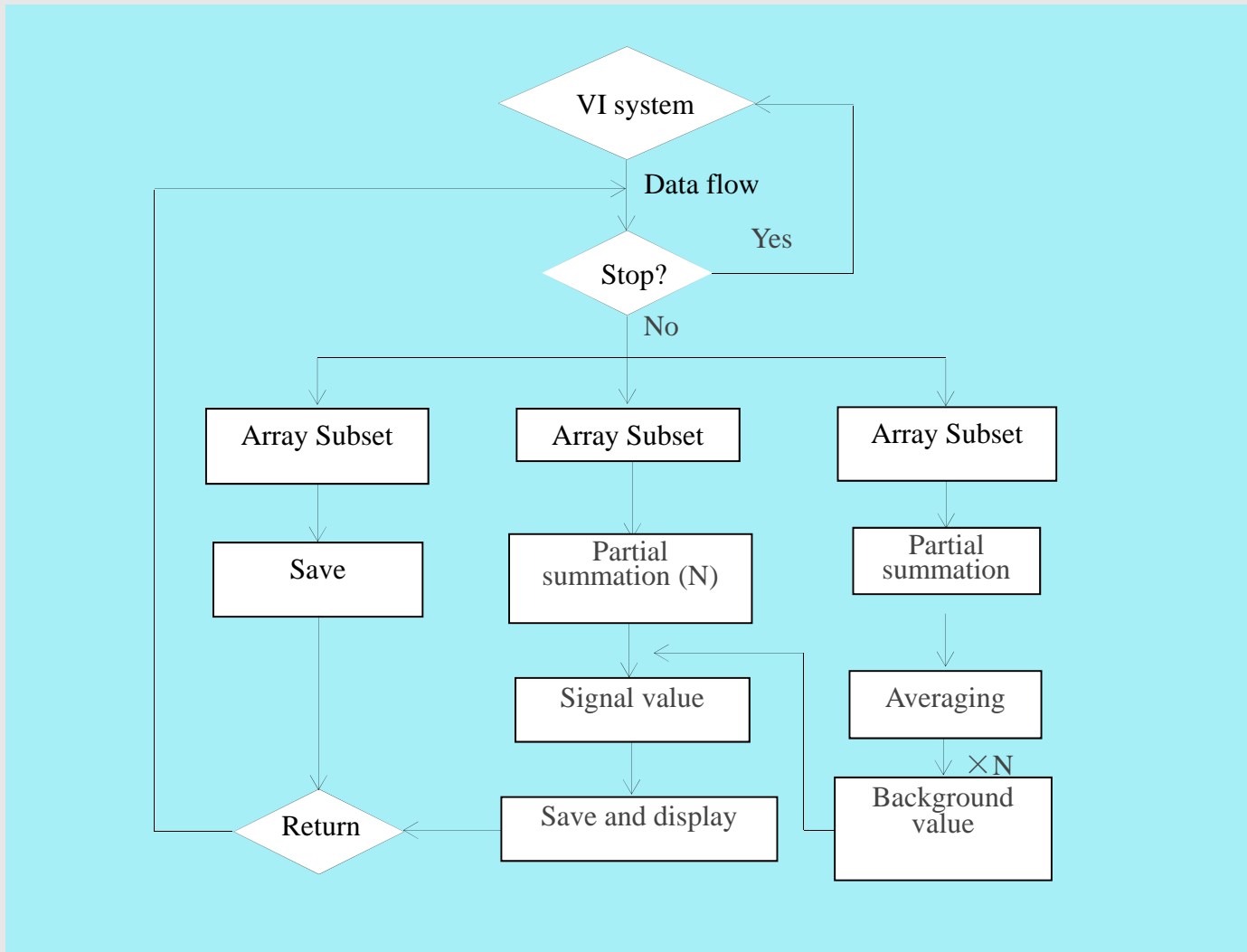
光衰减长度定义：一单色光在样品介质中传输，其强度衰减到初始光强的 $1/e$ 时所传播的距离。一般而言，衰减长度随着光波长的变化而变化，波长越长，衰减长度越长。

# 测量装置

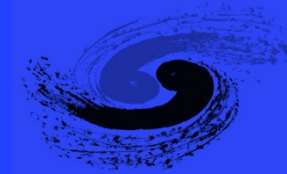


光束直径约为2mm, 样品容器中装满样品前后在PMT上光斑位置和大小变化很小。

# LabVIEW数据流程图



# LabVIEW取数界面



复件 Tek3000-new-NEW.vi 前面板 \*

文件(F) 编辑(E) 查看(V) 项目(P) 操作(O) 工具(T) 窗口(W) 帮助(H)

VISA resource name  
TCP/IP::192.168.0.1::inst0::INSTR

Ch 1 Ch 2

| Source    | 大小 | 算术平均    | 标准差    | Mean-Ch1 | Mean-Ch2 |
|-----------|----|---------|--------|----------|----------|
| Channel 1 | 22 | 784.789 | 3.1670 | 784.789  | 0        |

(直方图)

Trigger Slope measurement  
Positive Negative -781.9

Trigger Source Channel 1 Trigger Level (V) 0.00

Waveform Start Waveform End  
1 10000

Set Max Count Max Count  
 1000

Set Max Time Max Time (s)  
 0

Counts Elapsed Time (s) Rate (cps)  
22 3.57813 6.1484

等待时间(秒) 0 存储的文件个数? 5 正在存储第 1 个文件

SaveFile? Save Nihe1.txt and Nihe.txt? play sound? STOP

WaveFile CH1  
D:\Daya-Bay-Ls-Test\KOH-Water-0.05mole(1-2)-20111214\KOH-Water-0.05mole(1)-729-1.txt

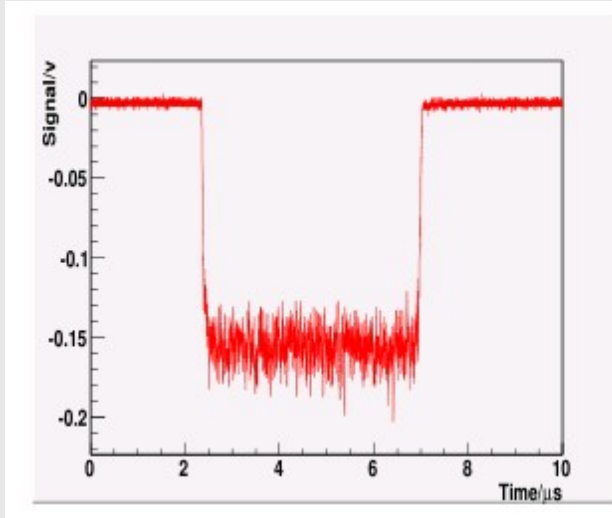
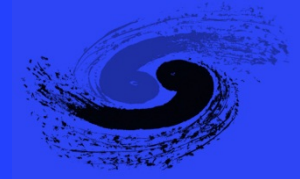
WaveFile CH2  
D:\Daya-Bay-Ls-Test\KOH-Water-0.05mole(1-2)-20111214\Nihe1.txt

Save Nihe1.txt  
D:\Daya-Bay-Ls-Test\KOH-Water-0.05mole(1-2)-20111214\Nihe1.txt

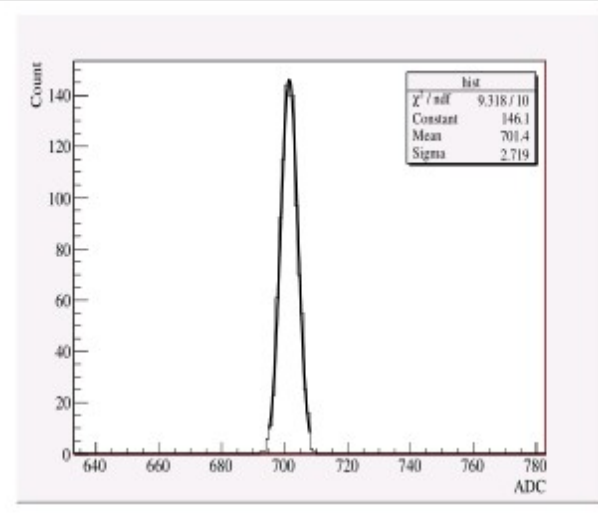
Save Nihe.txt  
D:\Daya-Bay-Ls-Test\KOH-Water-0.05mole(1-2)-20111214\Nihe.txt

Wave sound  
C:\Documents and Settings\zhou1\桌面\sound\3.wav





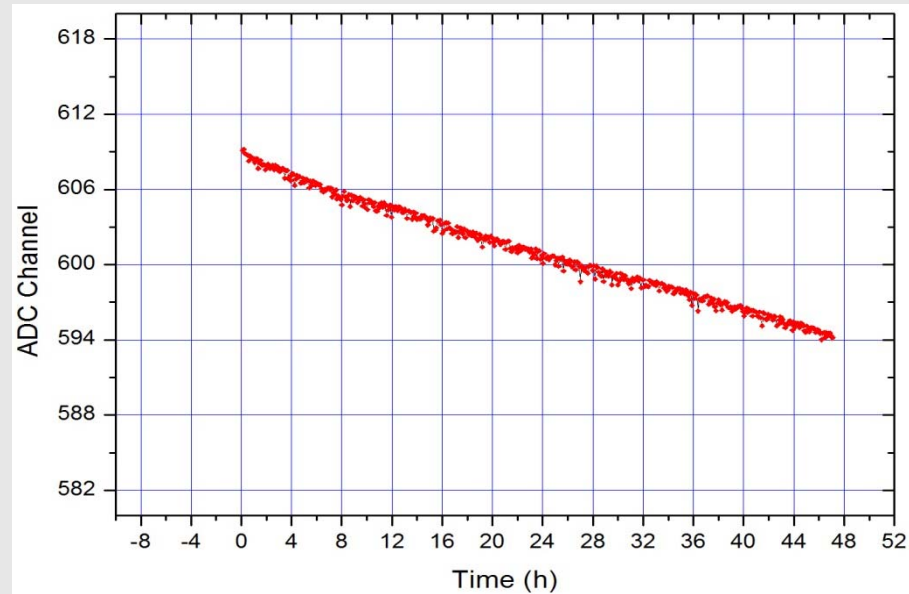
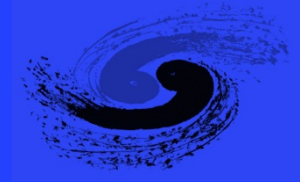
PMT信号



直方图的高斯拟合

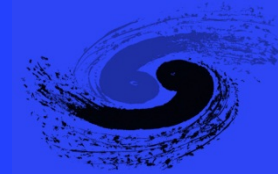
从波形两端计算出信号背景并从积分结果中扣除。信号随机性服从**高斯分布**，通过对3000次采样的直方图统计分析后可以得到精确的光强大小。

信号峰位在550-660道左右的情况下，sigma为**2.7**，sigma/mean为**0.4%**。

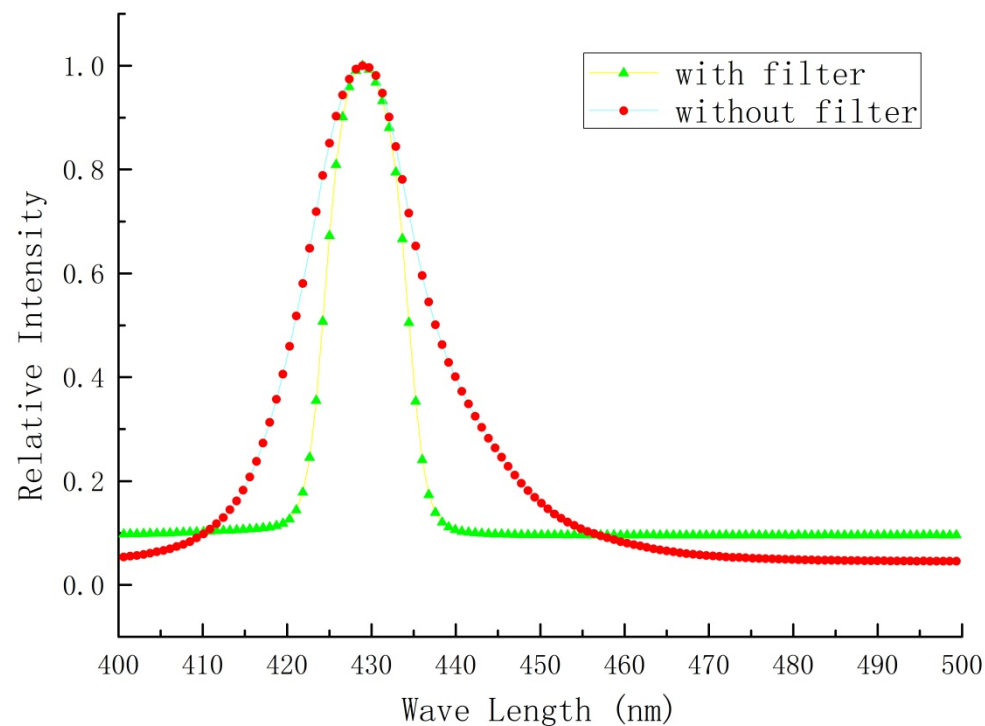


48个小时的系统变化小于2.5%，而测量一个样品的周期一般为5小时，系统变化应该在0.3%以内，说明测量系统是比较稳定的。

## 光源的单色性对测量结果的影响

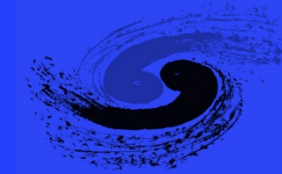


样品对光的衰减长度会随着光波波长而变化，通过对有无滤光片的测量结果进行对比来研究滤光片对测量结果的影响，亦即光源的单色性对测量结果的影响。



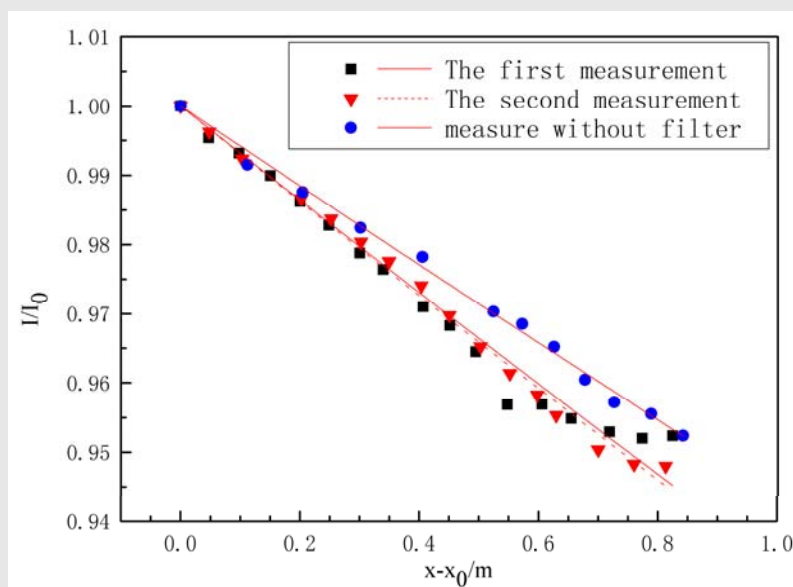
LED发光光谱比较：原始光谱和通过滤光片后的光谱

## 光源的单色性对测量结果的影响

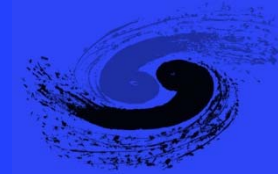


第一次测量结果为 $14.62 \pm 0.32\text{m}$ ，第二次测量结果为 $14.38 \pm 0.15\text{m}$ 。

拿掉滤光片，衰减长度变为 $17.22 \pm 0.17\text{m}$ 。



这说明实验光束的**发光光谱宽度**（单色性程度）会对测量结果造成影响，且宽度变宽，测量结果会变大。实验中通过**使用滤光片**来使LED所发光的光谱变**窄**，从而使测量结果更准确。



朗伯—比尔定律:

$$A = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \varepsilon \times b \times c$$

$A$ : 一定波长  $\lambda$  下的吸光度

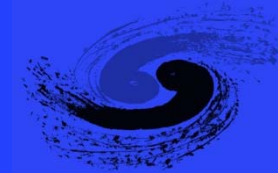
$I_0$ : 通过样品前的光强

$I$ : 通过样品后的光强

$\varepsilon$ : 摩尔吸光系数

$b$ : 吸光样品厚度

$c$ : 吸光物质的浓度



$$I = I_0 e^{-(x/\lambda)}$$

$$A = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \varepsilon \times b \times c$$

结合衰减长度定义和朗伯-比尔定律可以得到

$$\varepsilon c \lambda = \log(e)$$

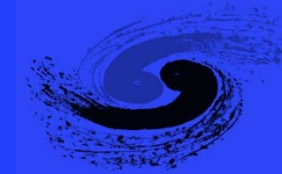
即：

$$1/\lambda = \varepsilon \ln(10) c$$

$1/\lambda$ 与 $c$ 成正比，配置不同浓度的溶液并测量其衰减长度，然后进行线性拟合。

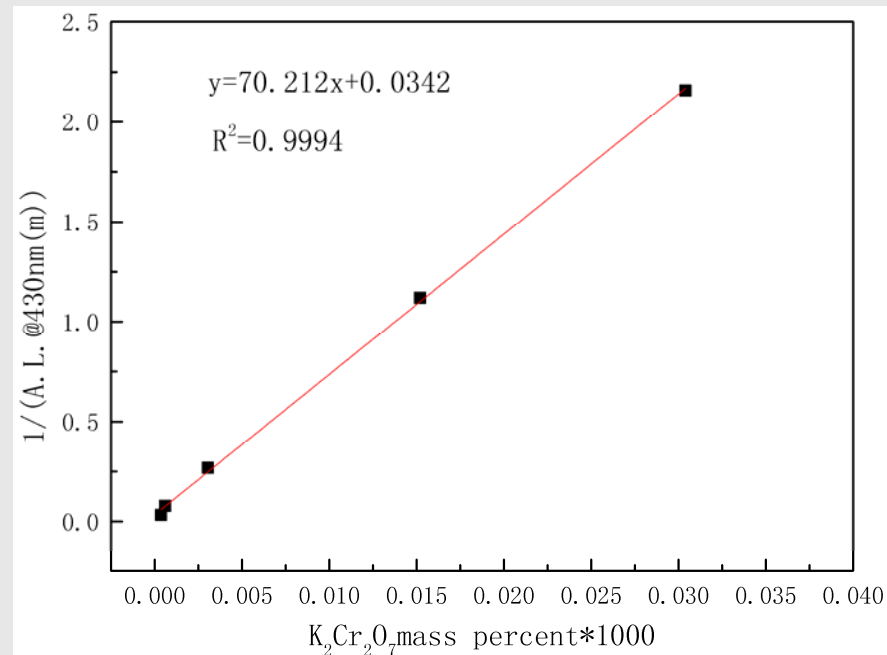
比尔-朗伯定律的使用需要满足几个条件。例如：确保样品的浓度低于0.01M，确保入射光束平行和有良好的单色性，确保样品的化学平衡和浓度恒定。如果其中任何一个条件得不到满足，在应用比尔-朗伯定律的过程中就会出现偏差。比尔-朗伯定律没有对样品浓度下界的限制，但当浓度过低时，由于测量系统达到或接近其测量极限或光强测量的信噪比（PMT的噪声、光子噪声、光源涨落）过低，测量结果的误差会很大。

# 装置的测量误差



用  $y = ax + b$  进行拟合。

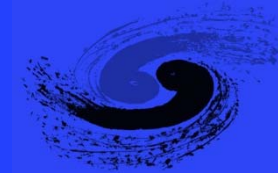
$1/\lambda$  与  $c$  之间的线性相关系数为 0.9994



| Samples              | Attenuation length( $\lambda$ )/m |
|----------------------|-----------------------------------|
| 0.0365% $K_2Cr_2O_7$ | $30.72 \pm 1.01$                  |
| 0.0611% $K_2Cr_2O_7$ | $12.89 \pm 0.11$                  |
| 0.304% $K_2Cr_2O_7$  | $3.75 \pm 0.02$                   |
| 1.52% $K_2Cr_2O_7$   | $0.89 \pm 0.01$                   |
| 3.04% $K_2Cr_2O_7$   | $0.46 \pm 0.01$                   |

本实验所用的标准样品为以 0.05mol/L 的 KOH 为溶剂的  $K_2Cr_2O_7$  溶液

## 装置的测量误差



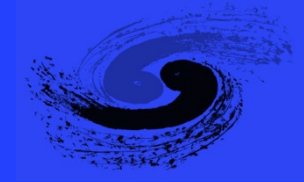
实验装置的误差可以通过测量标准样品的衰减长度和对多个不同浓度样品的测量结果应用比尔-朗伯定律来得到。本实验所用的标准样品为以0.05mol/L的KOH为溶剂的 $K_2Cr_2O_7$ 溶液。

$$\frac{\sigma(\hat{a})}{\hat{a}} = \sqrt{[(1/\rho)^2 - 1]/(n - 2)} \times 100\%$$

其中 $n=5$ 。将 $n$ 和 $\rho$ 代入可以得到 $\frac{\sigma(\hat{a})}{\hat{a}} = 2.00\%$ 。 $\lambda$ 的标准偏差可以用误差传播公式和公式4计算得到。

$$\frac{\sigma(\lambda)}{\lambda} = \frac{\sigma(\hat{a})}{\hat{a}} = 2.00\%$$





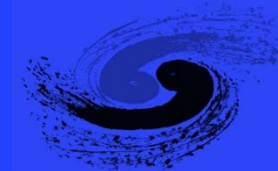
## 一些样品的衰减长度

| Samples  | Attention length( $\lambda$ )/m |
|--|---------------------------------|
| LAB  | 18.17±0.44                      |
| LS   | 15.00±0.36                      |
| Gd-LS  | 14.25±0.23                      |
| Alcohol  | 16.94±0.07                      |
| 0.0365%K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> | 30.72±1.01 ←                    |
| 0.0611%K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> | 12.89±0.11                      |
| 0.304%K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>  | 3.75±0.02                       |
| 1.52%K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>   | 0.89±0.01                       |
| 3.04%K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>   | 0.46±0.01                       |

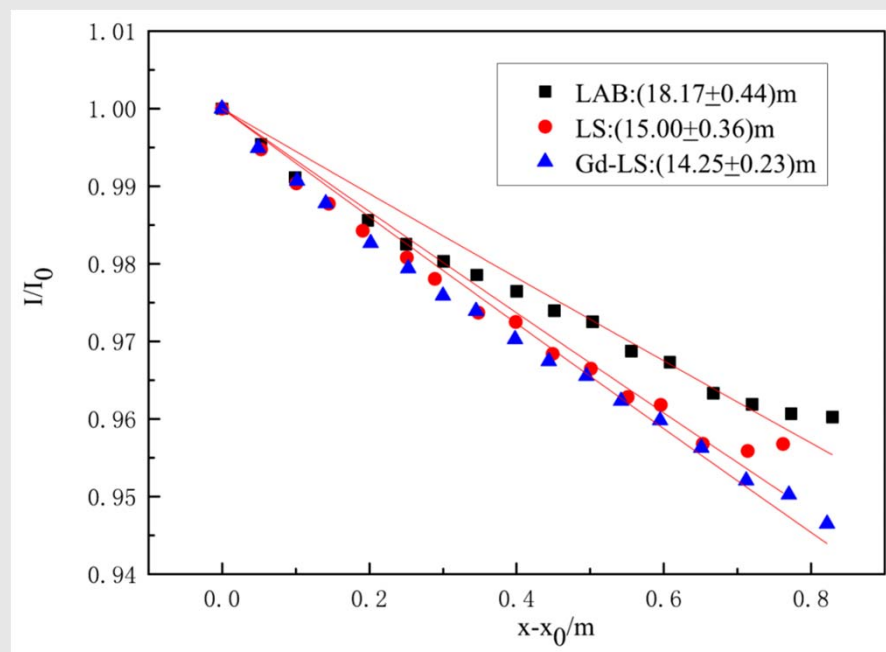
对于K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>溶液，其浓度单位为质量百分比。

低于实际统计误差主要原因：标准样品的化学性质较液闪稳定，酒精衰减长度的统计误差很低（成分单一，化学性质很稳定）。

## 测量样品的衰减长度

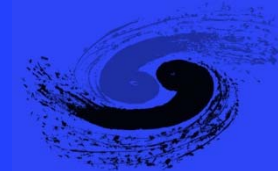


实验中测量了三种样品：LAB、LS和Gd-LS的衰减长度，它们都被用于大亚湾中微子实验。除了LAB之外，还有羧酸、氯化钆、PPO和bis-MSB用于合成Gd-LS。用这种配方合成的Gd-LS有较长的衰减长度、较高的光产额和很好的稳定性。

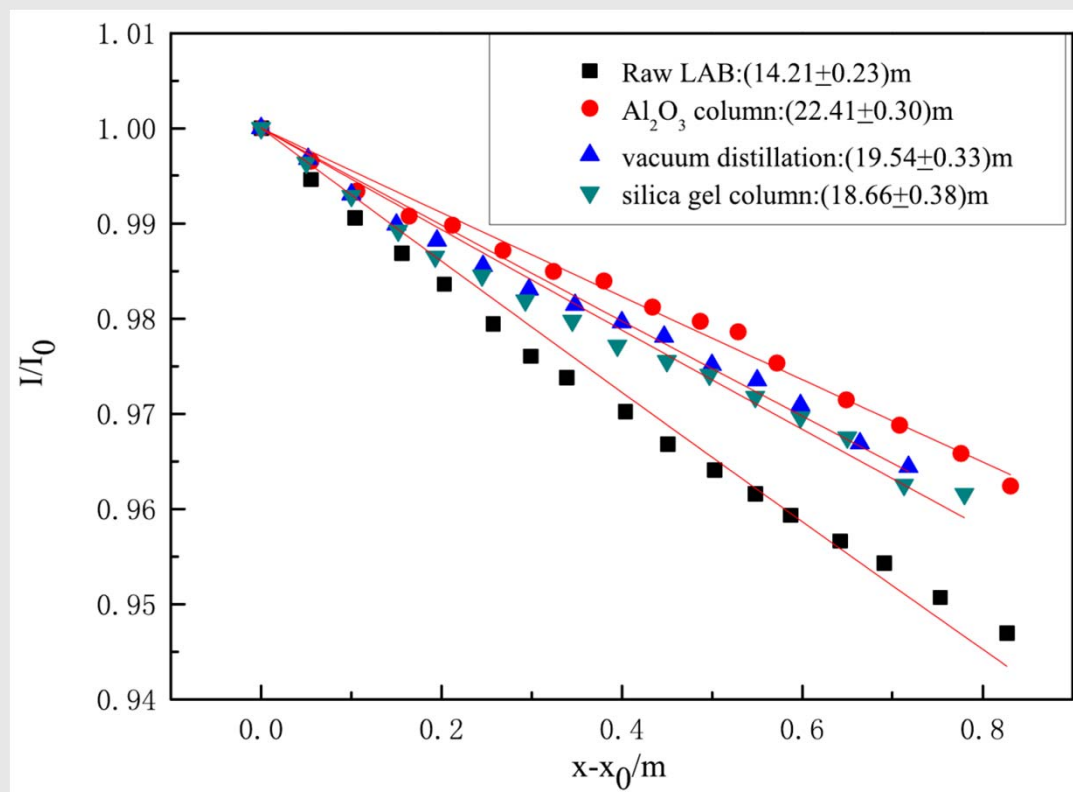


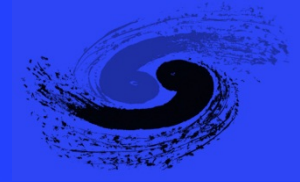
装置外侧有一个与样品容器相连的细玻璃管，通过旁边的直尺可以读出样品液面的位置。选择一个测量点作为参考点，用公式1进行拟合就可以得到样品的衰减长度。

## 不同纯化LAB方法的比较



在大亚湾中微子实验二期工程中，中心探测器将会更大，如果Gd-LS的衰减长度很短，闪烁光在Gd-LS中将会衰减更多，这就需要对合成液体闪烁体的基本原料LAB进行纯化。实验中对商业上购买的LAB分别用真空蒸馏、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、硅胶柱纯化法进行了纯化。





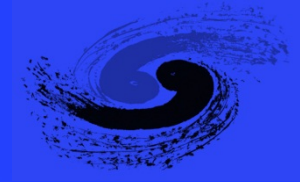
滤光片能使LED的发光光谱变窄，提高了测量准确性，使测量值更接近真实值（单色光源是最理想的）。

研究了整个测量系统的稳定性，结果表明整个测量系统能够满足实验要求。

用一种基于比尔-朗伯定律的方法测量和计算出来的误差可以用来定量地评估测量系统的可靠性。

精确测量了Gd-LS和其它几种样品的衰减长度，其中Gd-LS的衰减长度为14.25m，它是大亚湾中微子实验中的一个Monte Carlo参数。

研究了几种用来纯化LAB的方法，结果表明 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 有最好的纯化效果。



谢谢！