



LHAASO-WCDA++PMT批量测试报告

张恒英 冯存峰 于艳红(山东大学)

刘成(高能物理研究所)

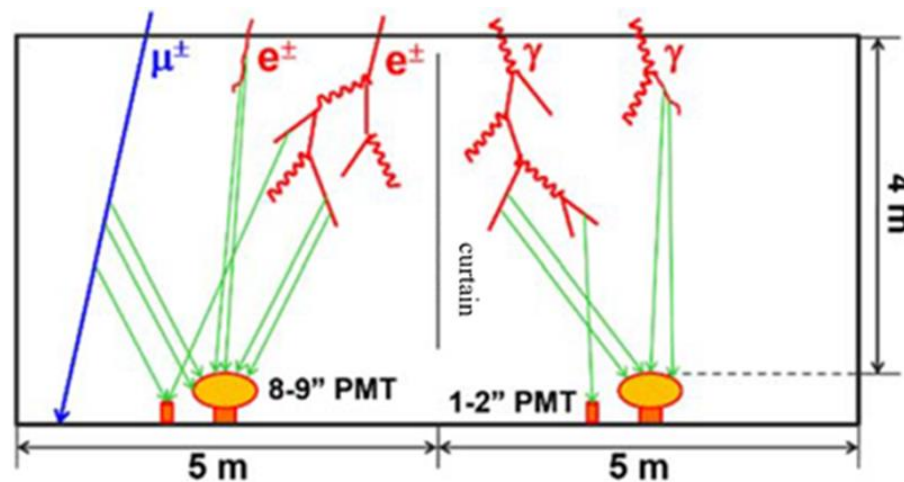
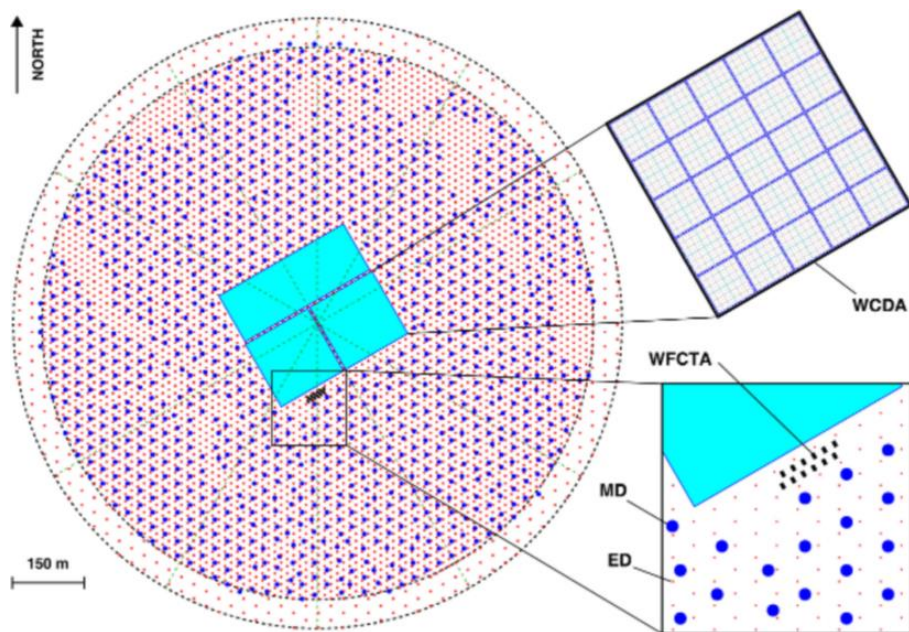
2018.10.10

目录

- WCDA动态扩展系统(WCDA++)和1.5inch PMT参数要求
- 全检项目测试简介
- 抽检项目测试简介
- 批量测试结果汇总
- 总结

1. WCDA动态扩展系统(WCDA++)和1.5inch PMT参数要求

- 单元数目：900个，每个单元5×5米
- PMT大小：1.5 inch
- 探测能量：100TeV—10PeV

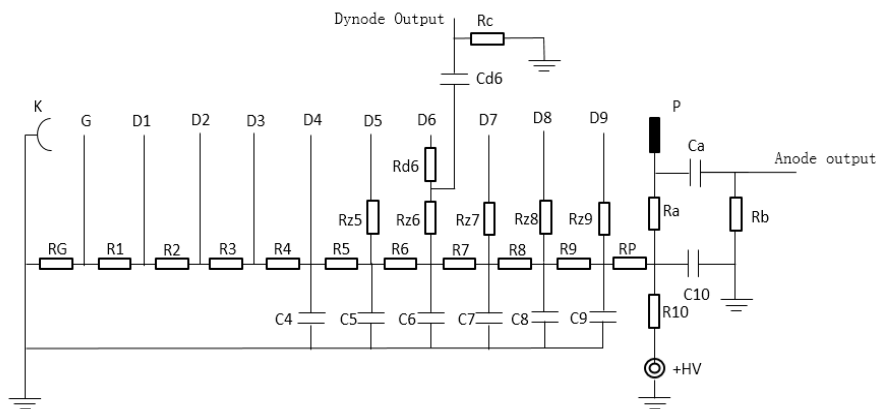


LHAASO WCDA主要是观测北部天空从100 GeV-20 TeV的稳定和瞬态源，具有很高的背景抑制能力和良好的角度分辨率。为了扩大动态范围，在1号水池加了1.5-inch的PMT，900个，探测原初宇宙线能量提高到100TeV-10PeV。测量宇宙线粒子的芯位信息并进行成分区分。

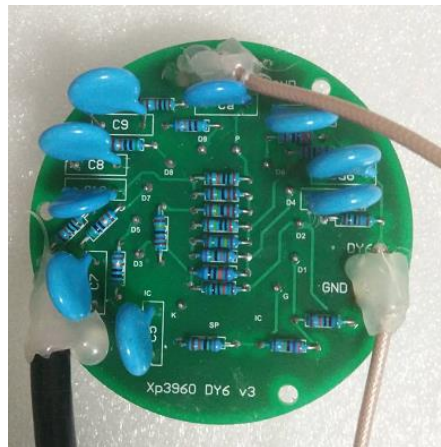
1. WCDA动态扩展系统(WCDA++)和1.5inch PMT参数要求

PMT采用阳极与第六打拿级双读出方式分压比1.5: 5.4 : 1 : 1 : 1.2 : 1.5 : 3 : 4 : 2.4 : 2.4 : 2.4。该分压比可使99%PMT满足WCDA++线性要求。

XP3960正高压Base设计图-V2.1



WCDA++分压器设计原理图



WCDA++ PCB图



PMT

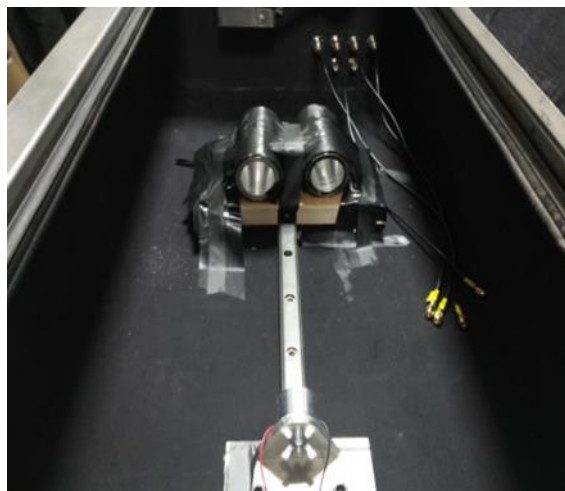
	项目名称	参数要求
全检	工作高压(Gain@2e+05)	变化±100V以内
	线性动态范围	90<ADratio<150,npe>20万
	暗噪声计数率	1mV阈值, <200Hz
抽检5%	光阴极响应均匀性	8mm内<10%
	TTS	<4.5ns

2. PMT 测试平台和全检项目测试简介



测试项目:

- 单光电子测量
- 高压响应曲线
- 暗噪声测试
- TTS(5%抽检)
- 均匀性(5%抽检)
- PMT线性测试



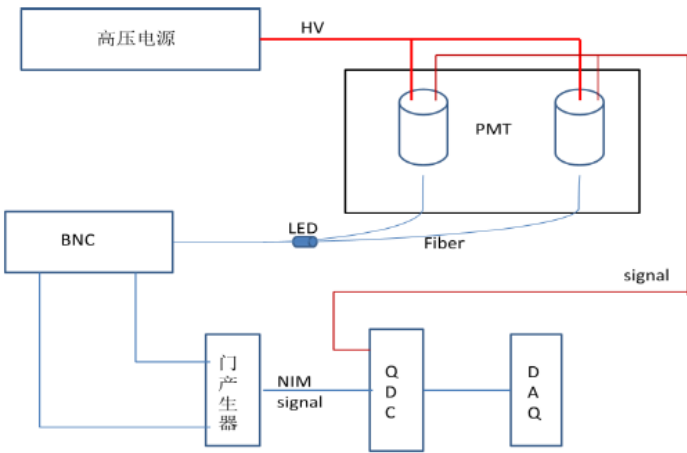
线性测试暗箱



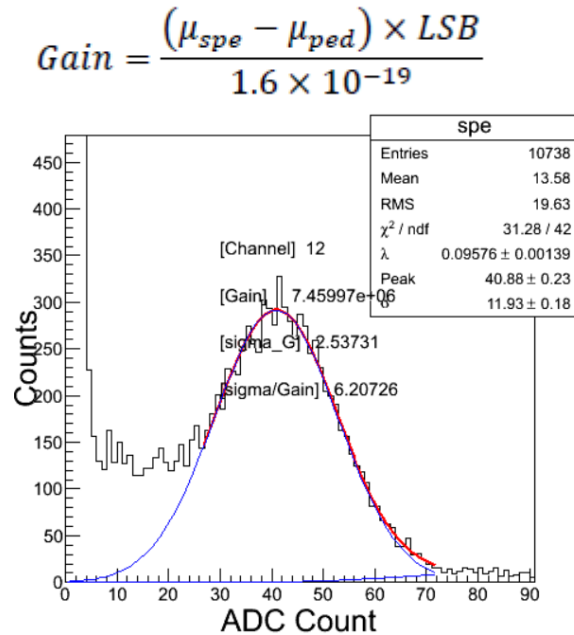
SPE, 高压响应曲线测试暗箱
暗噪声测试

2.1 全检项目--单光电子，高压响应曲线测试

- 弱光(单光子模式)，高压2000V，单次测试100000次，选择信号占10%左右，事例数9500—1100之间的测试结果。用泊松卷积高斯拟合，用Peak值计算增益。
- 强光(多光子模式)，测试高压在2000V—1100V，每100V改变一次高压，采用QDC高低量程测试，每个高压值下测试20000次。对应高压和增益的关系，拟合得到高压响应曲线。增益与高压的关系 $G = A \times V^\beta$ ，计算得到工作高压。

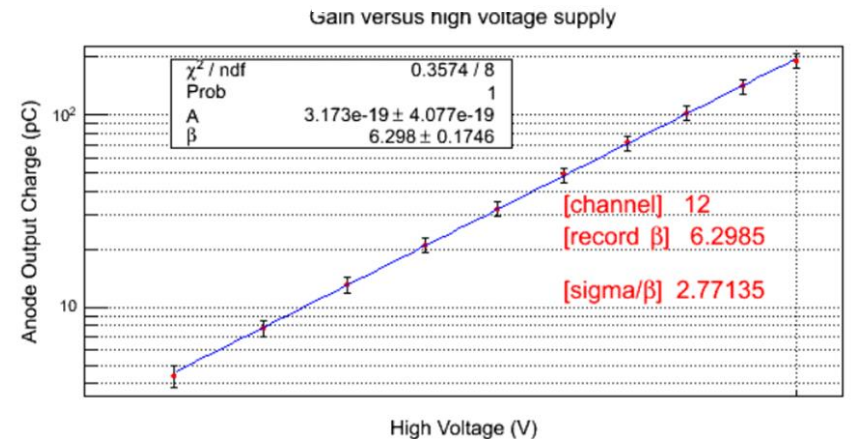


电量测试示意图



单光电子峰

$$\frac{G_1}{G_2} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\beta$$

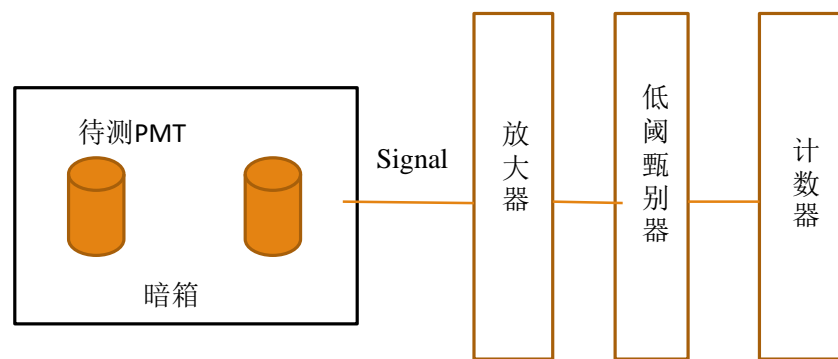


高压响应曲线

根据误差传递公式，增益，beta的误差传递到工作高压的误差，公式如下：
$$\frac{\sigma_V}{V} = \sqrt{\frac{1}{\beta^2} \left(\frac{\sigma_{G_0}}{G_0}\right)^2 + \left[\frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{G}{G_0}\right)\right]^2 \left(\frac{\sigma_\beta}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{V_0}}{V_0}\right)^2}$$

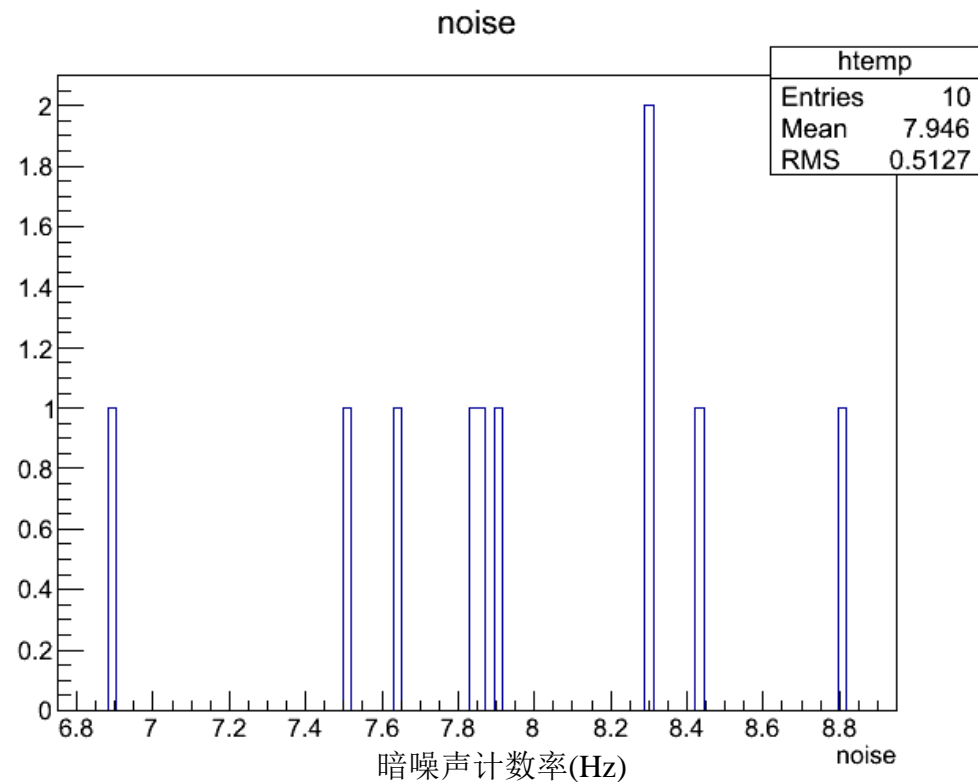
2.2 全检项目-- 暗噪声测试

在工作高压下(Gain:2e+05)测试, 将PMT信号放大10倍接入低阈甄别器, 阈值10mV, 每支PMT单次测试30s, 测试10次, 取Mean值为该PMT的暗噪声计数率。



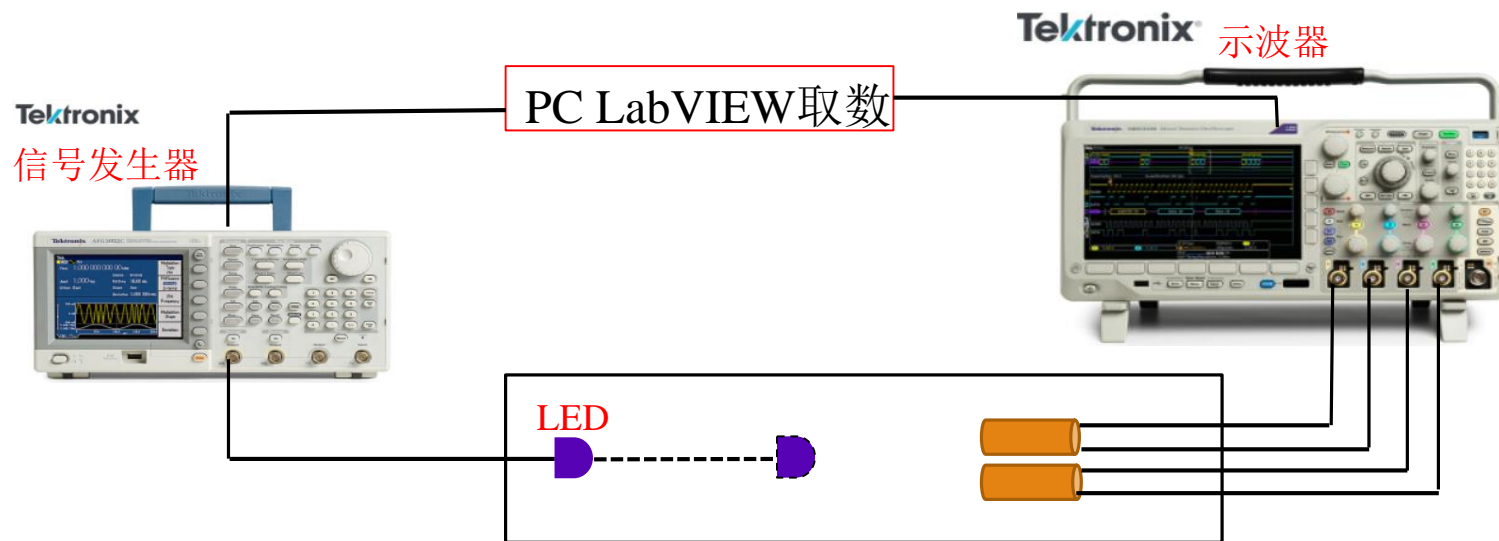
暗噪声测试示意图

单光电子, 高压响应曲线, 暗噪声测试8支PMT一组用时约1.5h.



2.3 全检项目--线性动态范围测试

为保证实验室LED驱动脉宽与实际信号脉宽相同，实验室改用AFG3252C信号发生器，实验过程设置脉宽为5.5ns，频率5kHz.LED与科大测试使用LED相同。

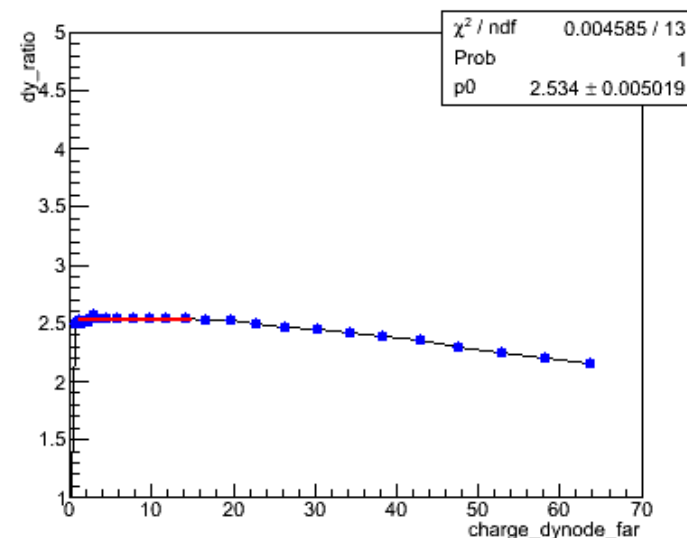


线性测试暗箱可同时测试2支PMT，一组用时50min.

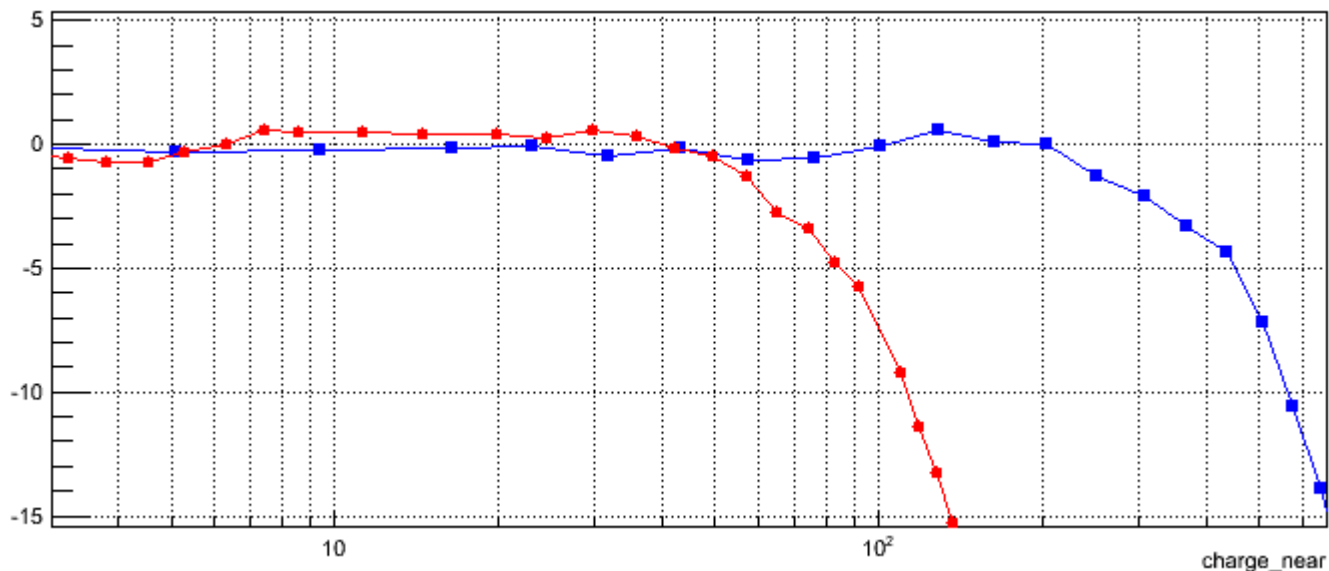
- 双距离法:

1. LED光强保持不变，分别在远、近两个距离下测试PMT电量输出
2. 逐渐增大光强，重复上述测试，线性区内，近距离与远距离PMT的输出比例恒定
3. 当比值减小时，说明在近距离下，PMT进入非线性区

$$\text{Nonlinearity} = \left(\frac{Q_{ni}}{Q_{fi}} - \text{mean} \right) / \text{mean} \times 100\%$$



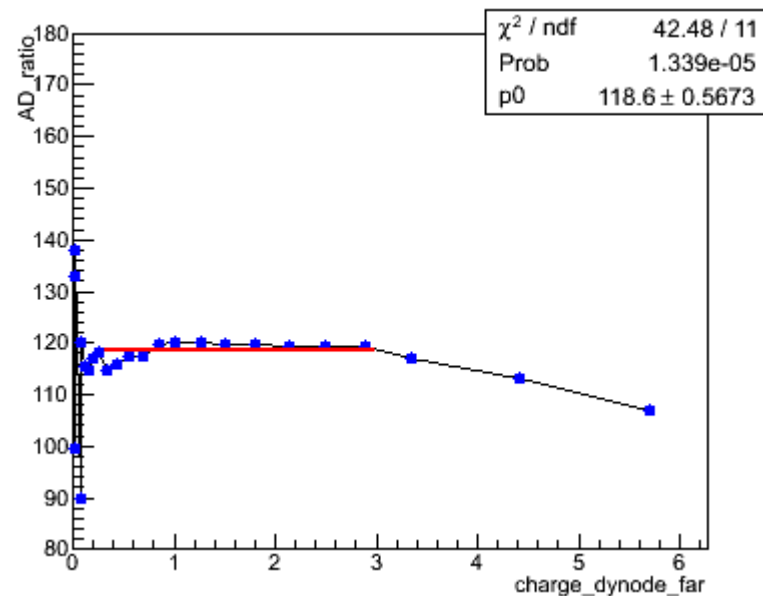
2.3 全检项目-- 线性动态范围测试



假设PMT线性在最后一个线性好于-5%的点 (Q_a, δ_a) 和第一个差于-5%的点 (Q_b, δ_b) 之间均匀变化，

$$\frac{Q_a - Q_{max}}{Q_a - Q_b} = \frac{\delta_a - \delta_{std}}{\delta_a - \delta_b}$$

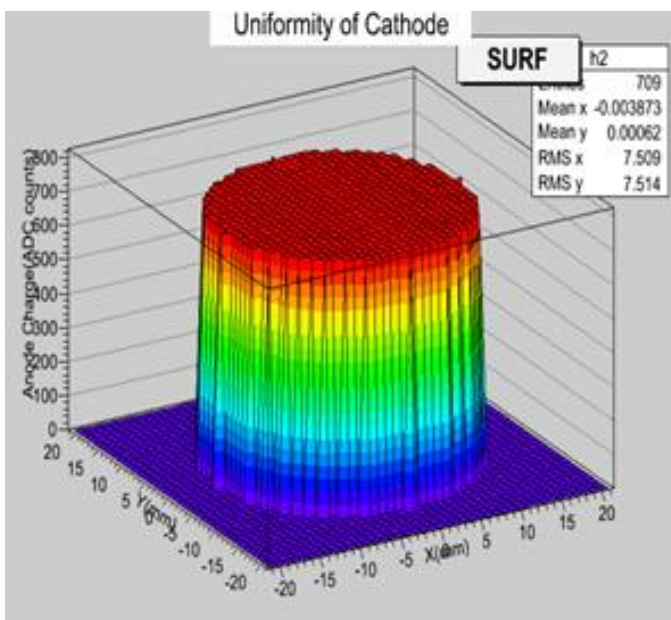
等效阳极光电子数计算公式如下：
$$N_{pe} = \frac{Q_{dy_max} \times ADratio}{Gain \times e}$$



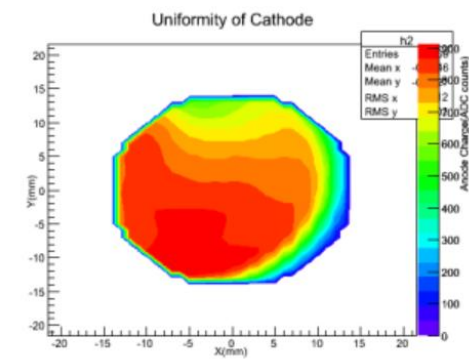
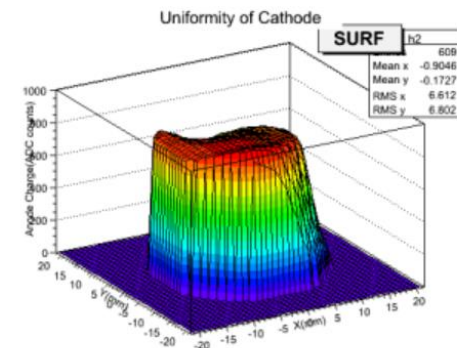
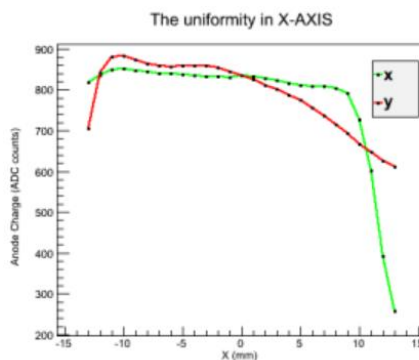
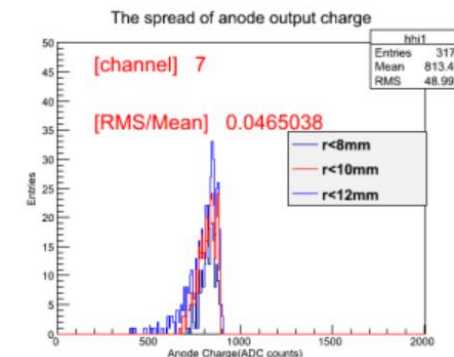
利用阳极与打拿级间输出的比值，可得到打拿级等效阳极光电子数。

3.1 抽检项目--均匀性测试(5%抽检)

- 工作高压下(Gain:2e+05)光纤距离光阴极面1mm，步进电机扫描步距1mm，对直径38mm的范围内进行扫描,用时约2.5h.
- 系统稳定性：测试前确认光纤位于PMT光阴极面中心，扫描过程中对系统进行监测，光源稳定性为 $\pm 0.3\%$



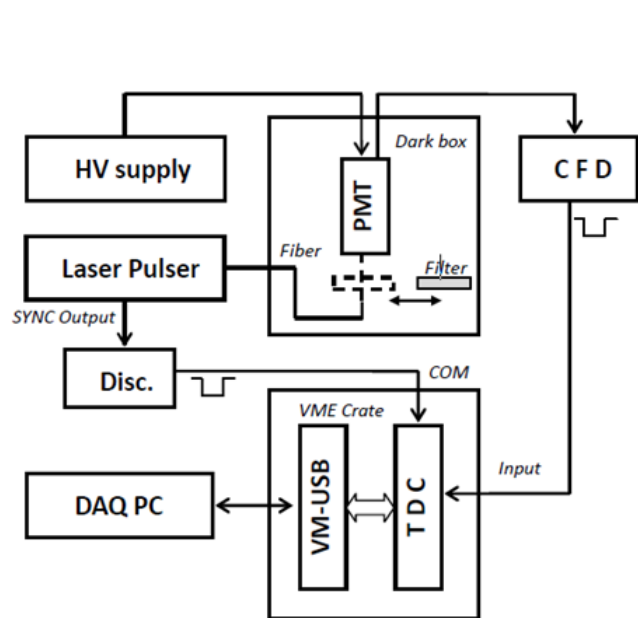
标准管检测光源稳定性



取光阴极面半径8mm内的电量输出做出分布图，定义RMS/Mean表征Uniformity的大小

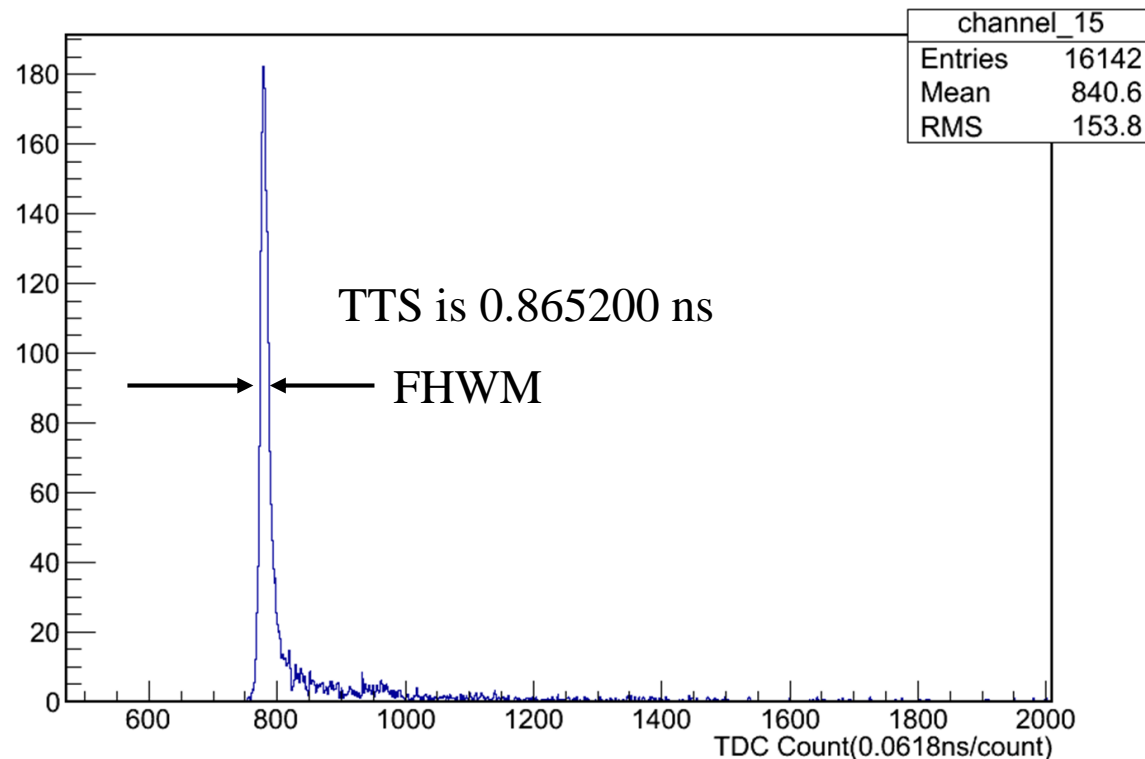
3.2 抽检项目-- TTS渡越时间分散测试(5%抽检)

- Ps激光发生器(70ps)
- PMT Gain is $5e+06$
- 单光电子信号经过10倍放大器后进入CFD



TTS测试示意图

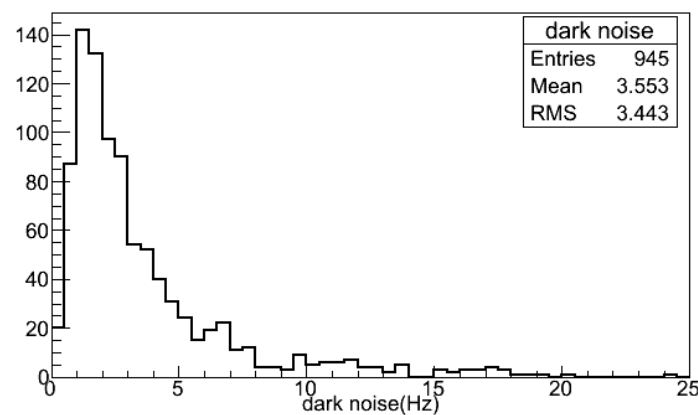
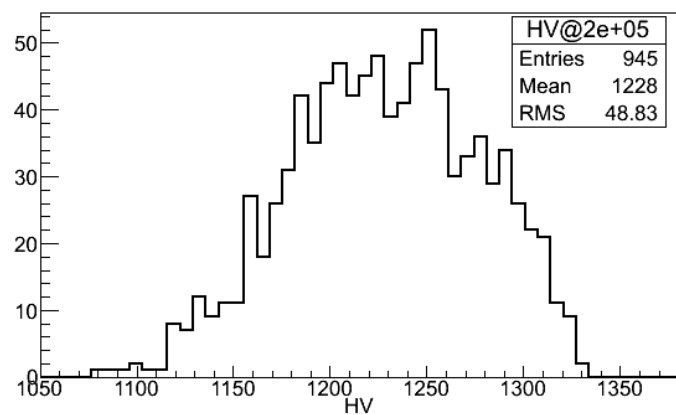
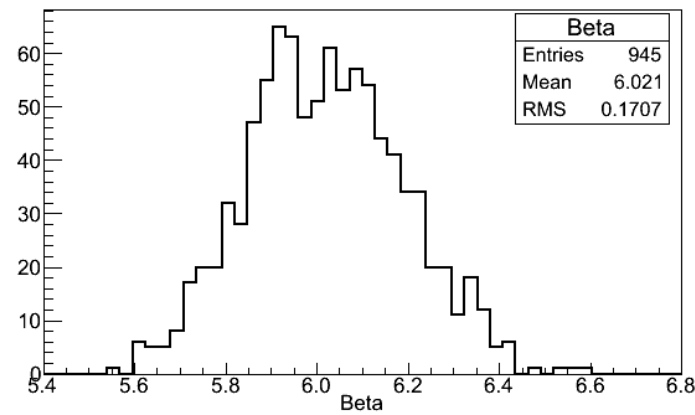
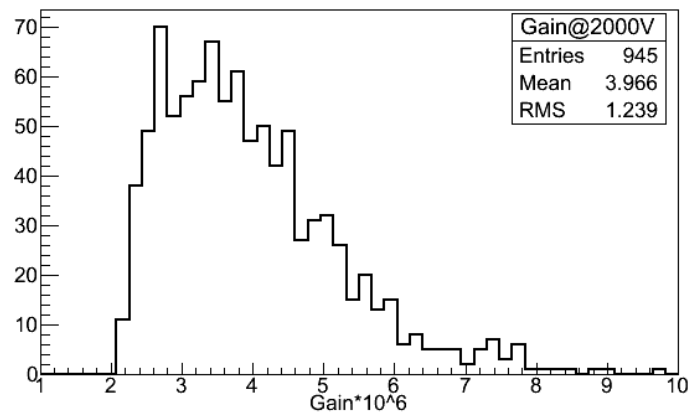
1支PMT 用时约10min.



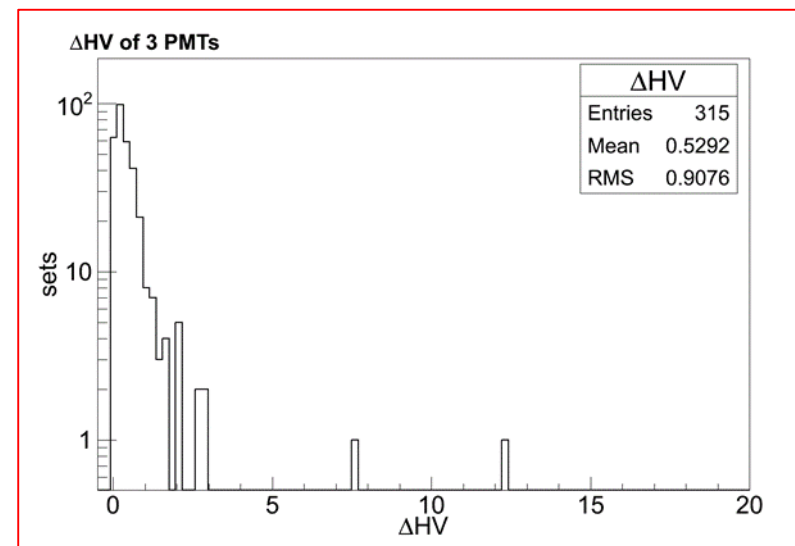
4. WCDA++批量测试结果汇总

- 945支PMT Gain@2000V: 平均值 $3.972e+06$
- Beta值(@2000-1100V): 平均值6.021
- 工作高压@ $2e+05$: 平均值1228V
- 暗噪声计数率: 3.55Hz

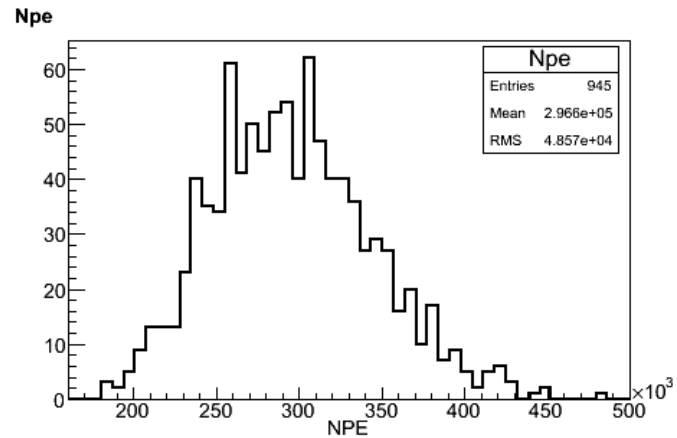
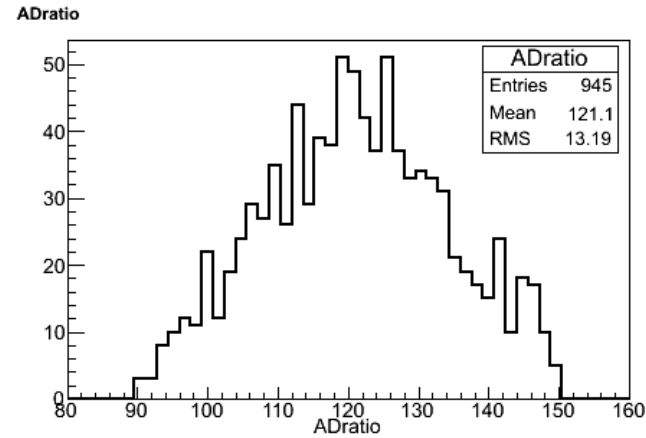
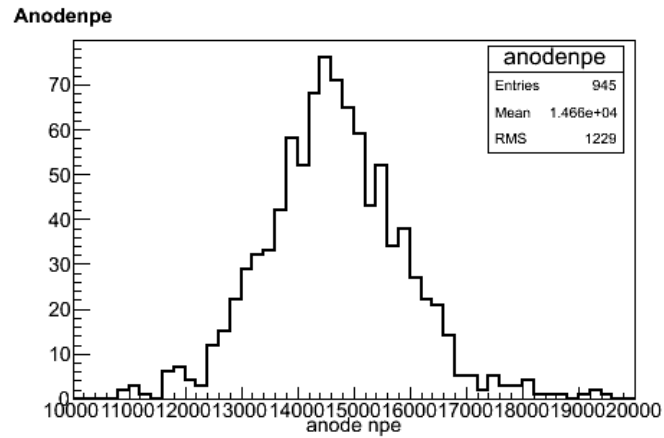
3支PMTs共用同一个电源高压值, 按工作高压从低到高排序后, 3个为一组, 这一组内3支PMTs的最大高压差的分布图。从图上可以看出2组PMTs工作高压差大于5V, 其他的都在3V以内。



945支PMT增益, beta, 工作高压, 暗噪声统计结果。



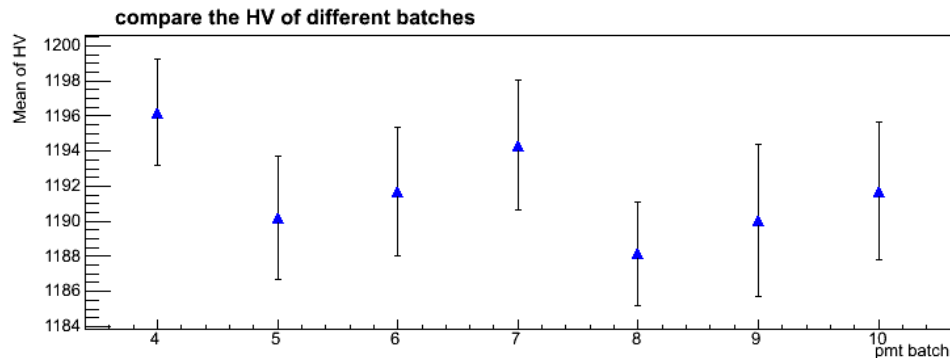
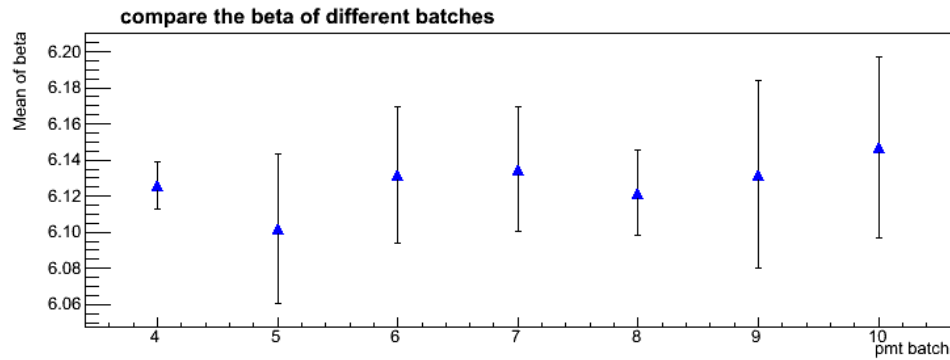
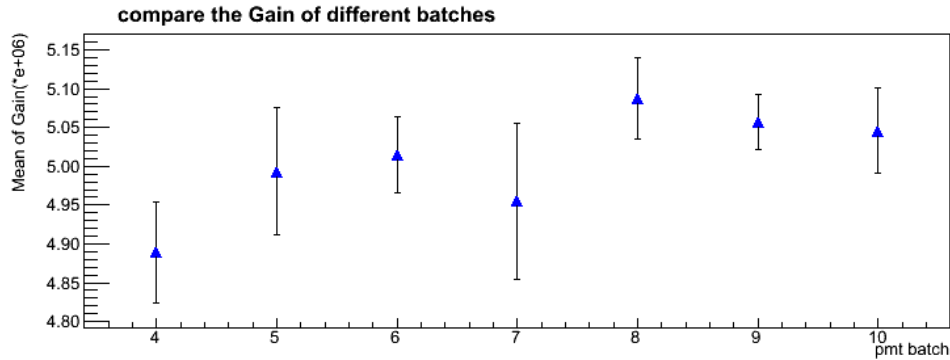
4. WCDA++批量测试结果汇总



- 阳极最大光电子数：平均值1.47万
- 阳极打拿极增益比：平均值121.1
- 等效阳极最大光电子数：平均值29.66万

945支PMT线性测试汇总结果，左上是阳极光电子数，右上是阳极打拿极增益比，左下是等效阳极光电子数。

4. WCDA++批量测试结果汇总



整个测试过程中，系统稳定性检测

WCDA++PMT批量测试开始时间2018.4.28—2018.9.6，从第4批开始测试，之前前三批在5,6月份复测。

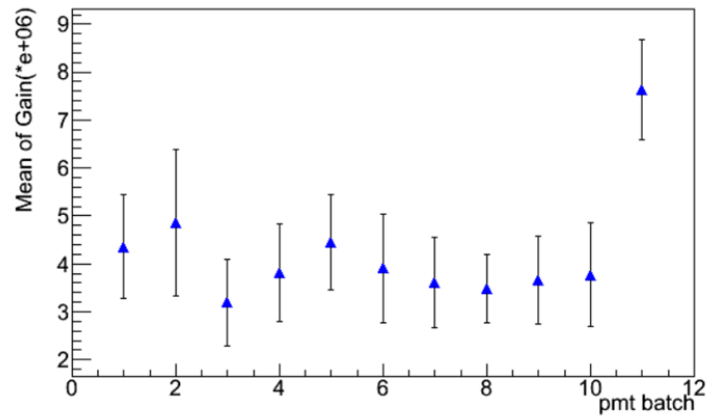
在测试期间，标准管的增益，beta，工作高压的变化

	4	5	6	7	8	9	10
Gain(*e+06)	4.889	4.993	5.015	4.955	5.087	5.057	5.046
Beta(@1800-1100)	6.1258	6.102	6.1315	6.135	6.1218	6.1319	6.1468
HV(@4e+05)	1196.21	1190.19	1191.687	1194.34	1188.15	1190.08	1191.7

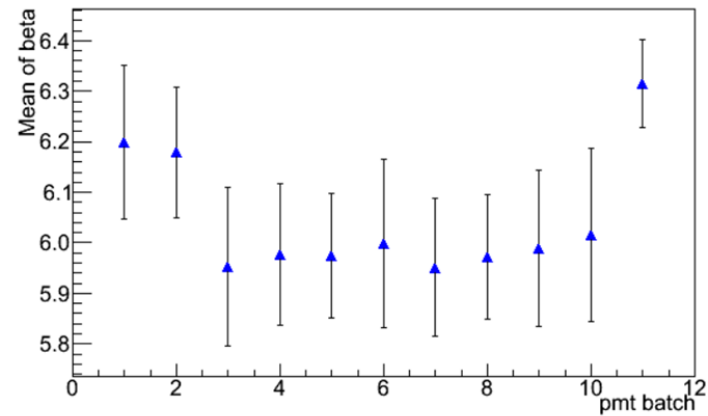
平均增益变化4%，beta变化0.7%，工作高压变化0.7%，系统是稳定的。

4. WCDA++批量测试结果汇总

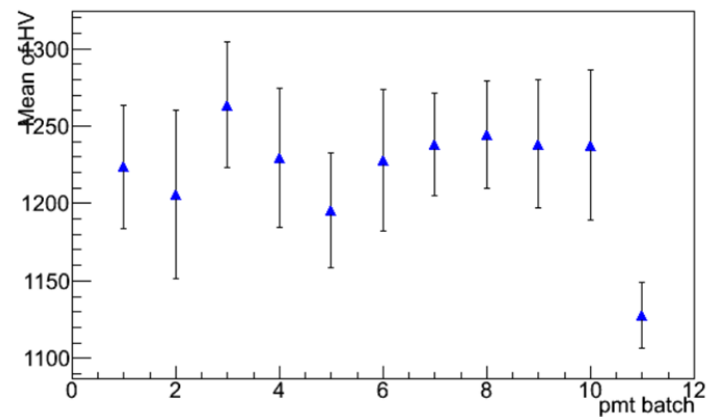
compare the Gain of different batches



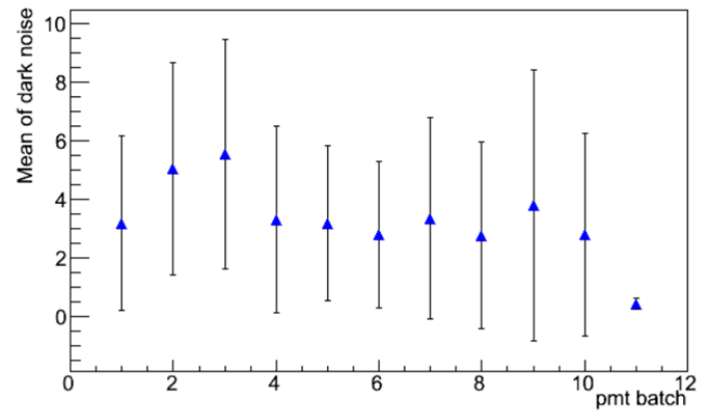
compare the beta of different batches



compare the HV of different batches

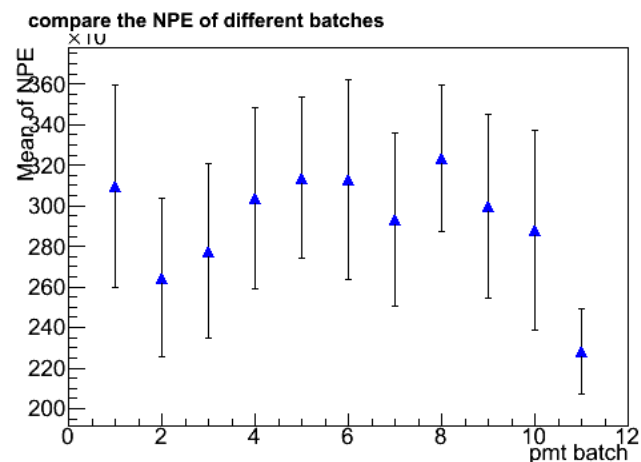
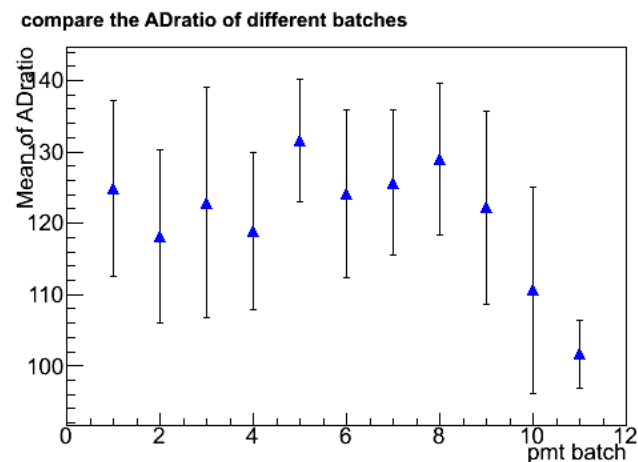
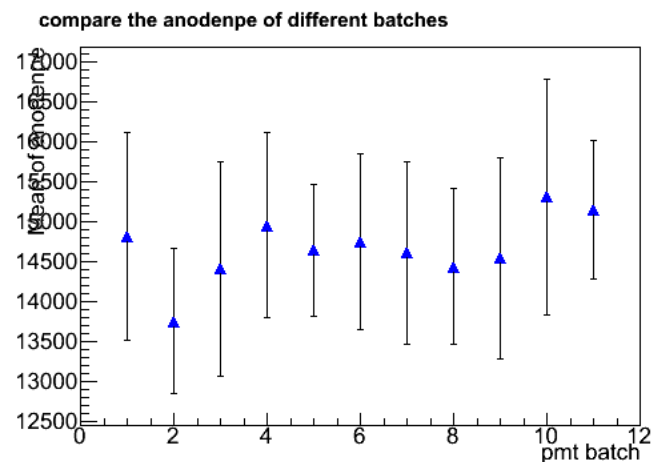


compare the noise of different batches



WCDA++各个批次之间的比较，从第4批到第10批的增益，beta，HV，noise比较稳定。第11批20支HZC挑选的增益大的，平均增益 $8e+06$ 。前三批的PMT性能变化较大。

4. WCDA++批量测试结果汇总



WCDA++各个批次之间的比较，从第4批到第9批的线性测试相对稳定，第10批改工艺后，ADratio变低。

4. WCDA++批量测试结果汇总

WCDA++各个批次测试统计，第二批第三批合格率较低，从2018.04月份第4批供货开始，合格率明显上升。

批次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
入库日期	01.11	01.29	03.15	04.02	04.10	04.20	06.10	07.02	07.27	08.01	09.03
入库数量	54	200	150	250	43	195	75	32	75	95	20
合格数量	43	122	79	232	40	183	70	27	64	75	16
合格率	79.6%	61%	52.7%	92.80%	93%	93.8%	93.3%	84.4%	85.3%	78.9%	80%
测试日期	06.01	06.30	05.31	04.28	05.26	05.15	06.11	07.06	07.29	08.04	09.06

数据按测试时间顺序记录，记录分不同批次存储。

5. 总结

发货WCDA++	数量
04.23寄往高能所	2-1(1支增益低带回)
05.11刘老师带走	5-5(带回)
05.16寄往高能所	21
06.24寄往封装厂	300
07.30寄往封装厂	150
08.04寄往封装厂	150
08.18寄往封装厂	75
08.18寄往封装厂	75
08.29寄往封装厂	50
08.30寄往封装厂	50
08.31寄往封装厂	63
09.10寄往高能所	10
发货总计	945

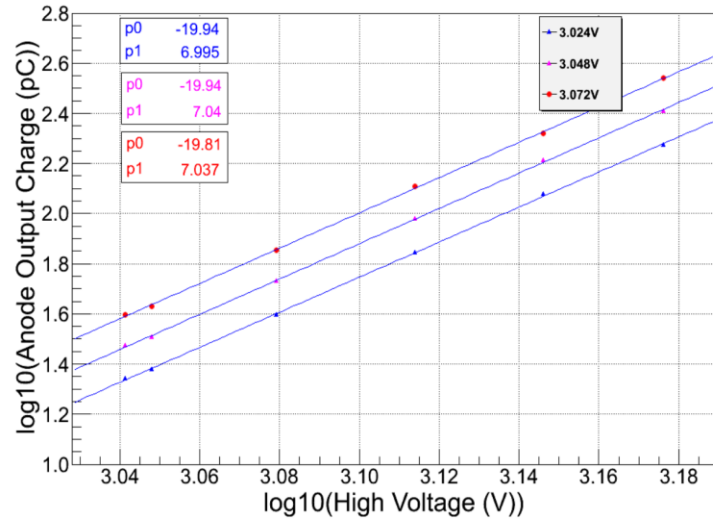
- 山东大学测试平台根据WCDA++需求更改LED，信号发生器等，开始批量测试WCDA++PMT在2018年4月份。
- 批量测试期间，由标准管监测，测试系统是稳定的。
- 共测试WCDA++ XP3960 PMT 1189支，合格951支，实际供货945支。
- 山东大学批量测试系统，已经完成WCDA++用XP3960管型945支测试任务，合格PMT满足参数要求。

谢谢！

PMT 95706 阳极输出高压响应曲线(用示波器测)

信号发生器驱动LED电压3.024, 3.048, 3.072V

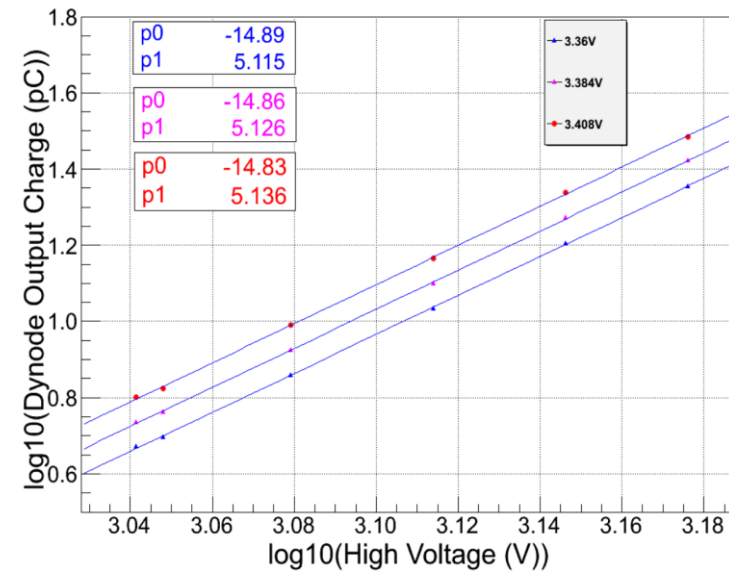
PMT anode Gain versus high voltage supply



PMT 95706 打拿极输出高压响应曲线(用示波器测)

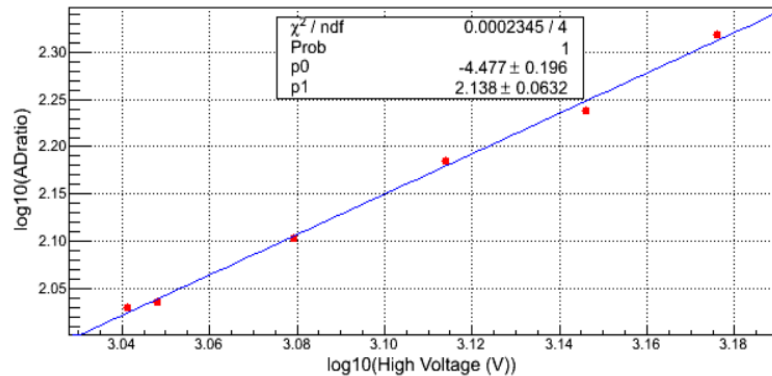
信号发生器驱动LED电压3.36, 3.384, 3.408V

PMT dynode Gain versus high voltage supply



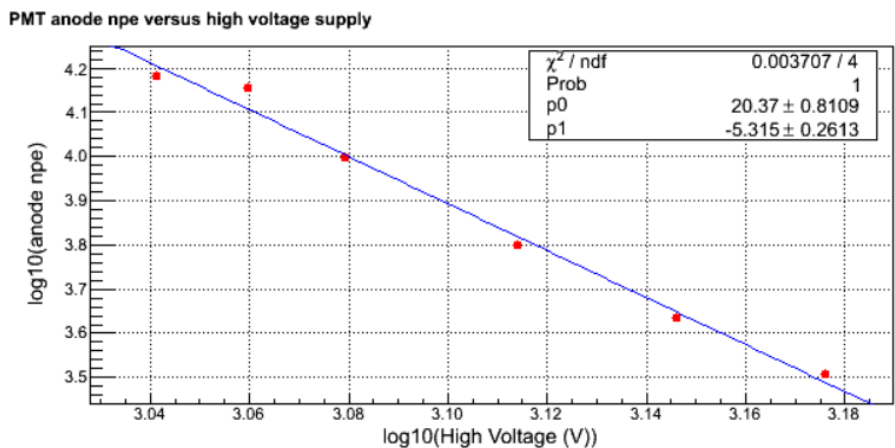
PMT 95706阳极打拿极增益比

PMT ADratio versus high voltage supply



最大阳极光电子数随高压的变化

用直线拟合的

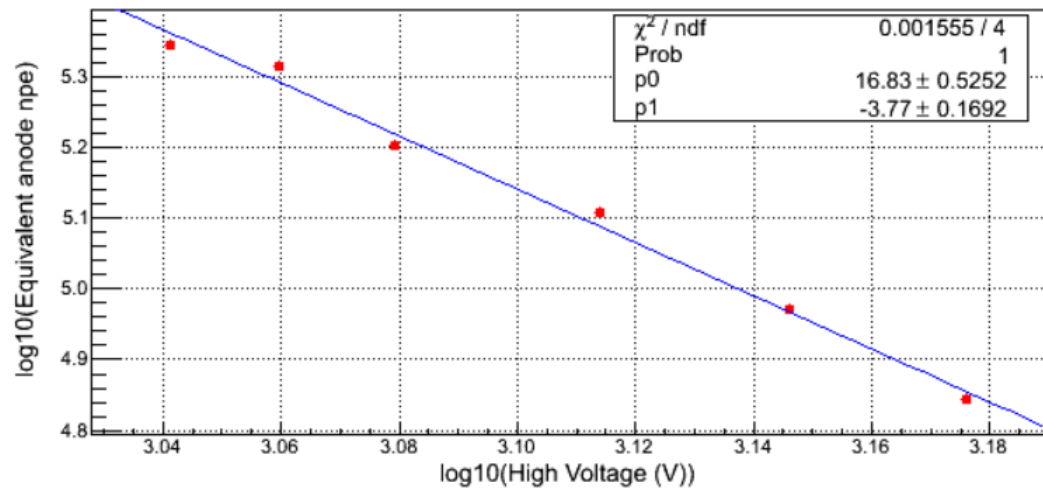


计算阳极打拿极光电子数时，不同高压下的增益不同

高压	增益*e+05
1100	1.865
1117	2
1200	3.2
1300	5.26
1400	8.34
1500	12.8

等效阳极光电子数随高压的变化

PMT Equivalent anode npe versus high voltage supply



光电子数随高压的增加而降低。