

质子束流强刻度系统进展

报告人：吕游

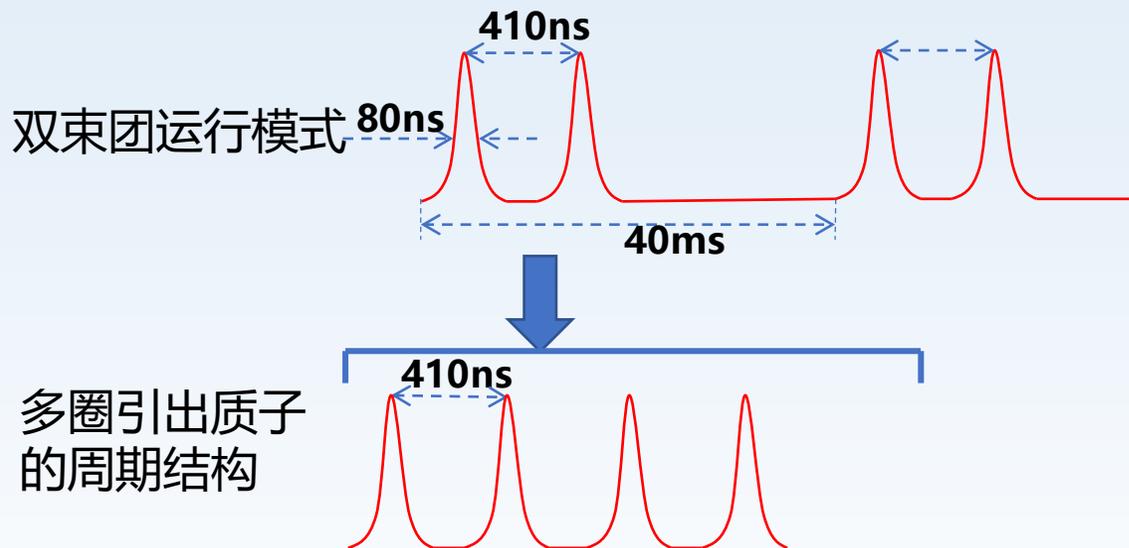
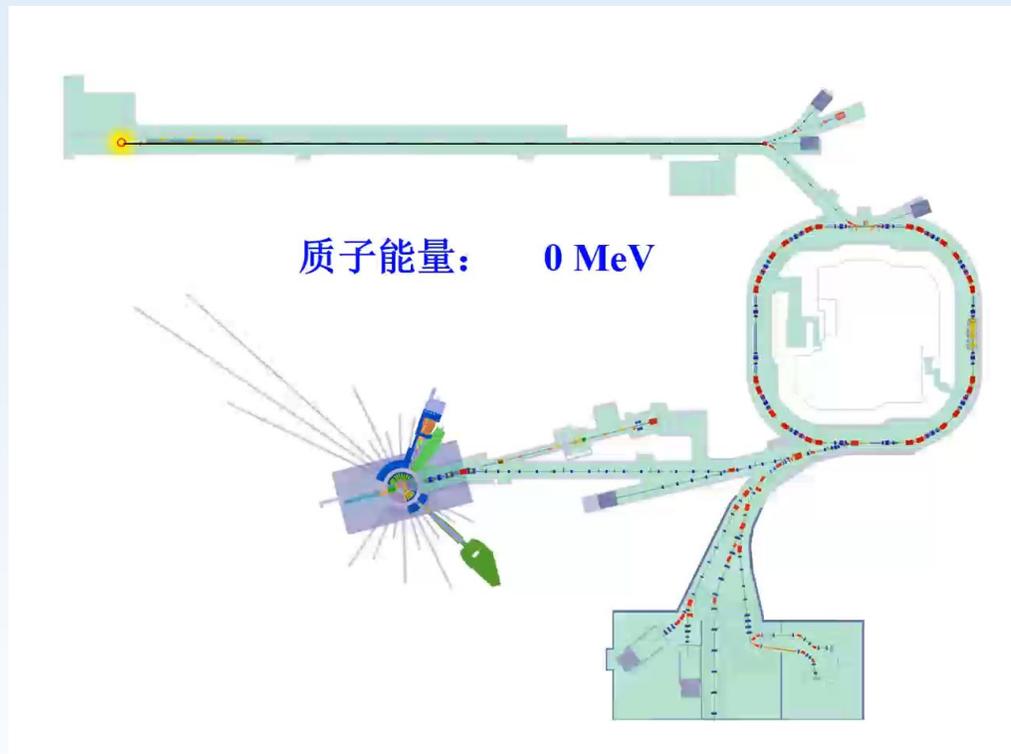
2023年10月19日
高能质子实验终端技术讨论会

报告概要

- 流强刻度系统技术方案
- 塑闪辐照测试
- 多打拿极读出PMT探测器测试进展
- 总结
- 二次电子发射监测器

质子束引出时间结构

使用环散射器将高能质子从RCS环中引出



- ✓ 加速器脉冲频率25Hz，包括两个束团，束团脉宽为80ns，束团之间间隔410ns
- ✓ 在束流引出前的1-1.5ms内，每个束团经过引出点之后都会引出微量质子脉冲（经过环散射器2400-3600次）
- ✓ 脉冲之间间隔410ns，脉冲粒子个数1-10000个

高能质子流强测量需求

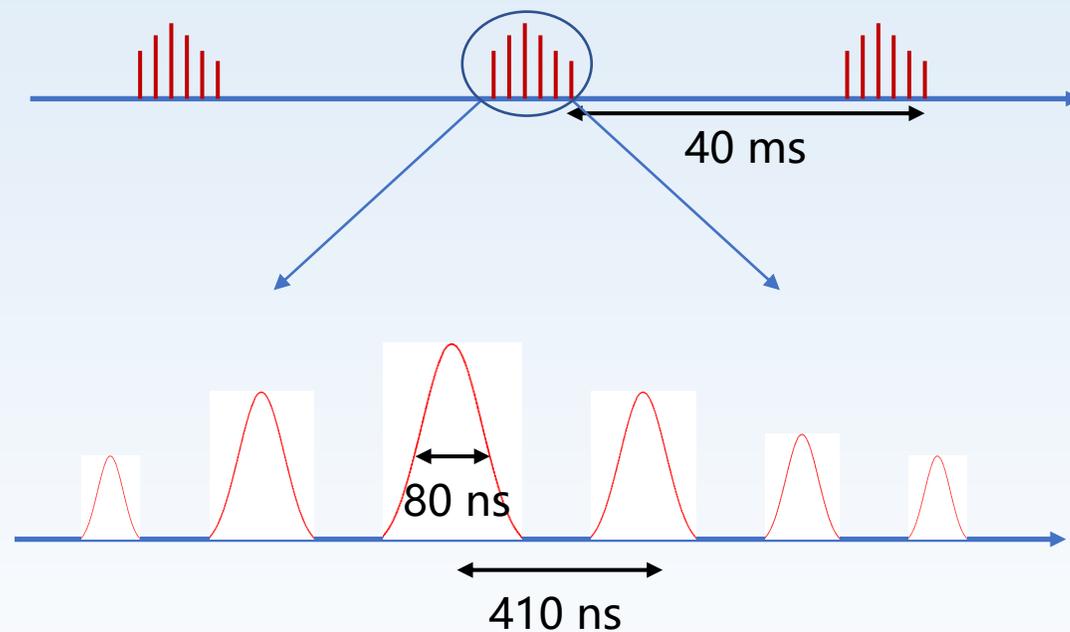
◆高能质子束线引出参数

- ✓ 质子能量：0.8~1.6 GeV
- ✓ 束流脉冲宽度：80ns
- ✓ 脉冲重复频率：410ns
- ✓ 引出时间：1-1.5ms (2400-3600次)
- ✓ 束斑尺寸： $\phi 100\text{mm}$
- ✓ 束流引出阶段单个脉冲束流粒子个数：1-10000

◆流强探测器测量需求

- ✓ 调试阶段给出单个脉冲内束流粒子个数
- ✓ 高效率，快响应
- ✓ 考虑噪声，探测器信号幅度满足：0.3-10000 mip

1. **脉冲束，无法进行计数测量，**
2. **重复频率快，难以采用电荷积分读出**
3. **考虑到探测器噪声，要达到约30000倍的动态范围**



束流引出阶段脉冲时间结构

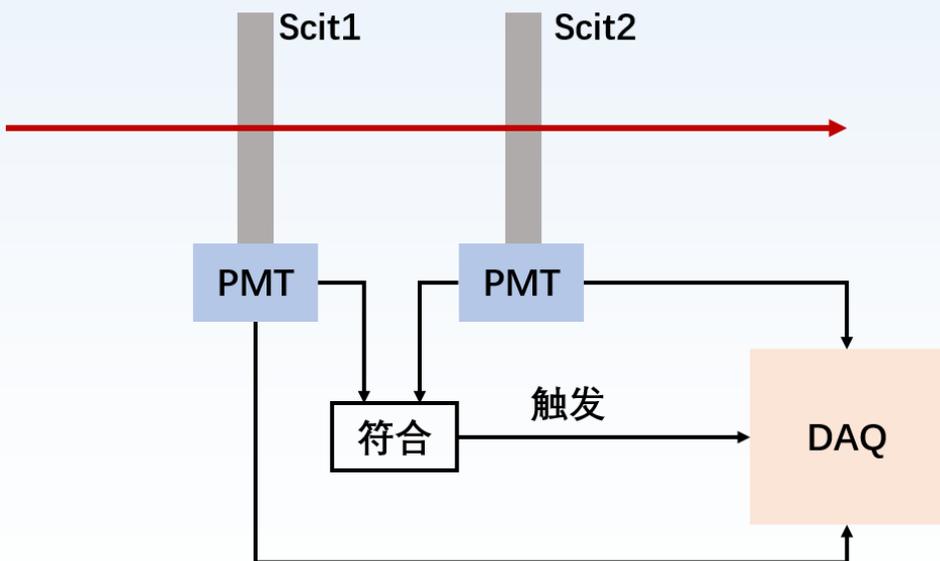
流强刻度探测器基本方案

◆ 塑闪+PMT+波形采集方案

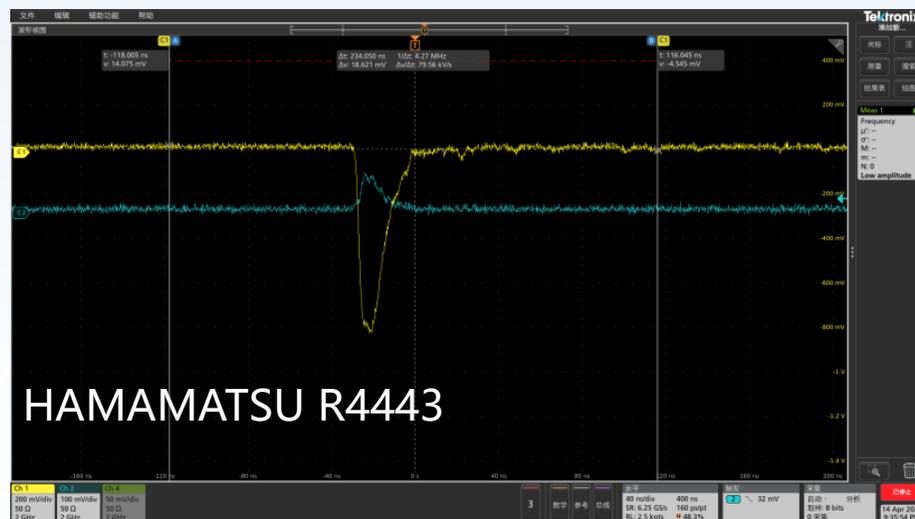
- ✓ 双闪烁体探测器做符合测试，排除本底信号
- ✓ 塑闪对质子探测效率：~100%
- ✓ 塑闪发光时间：~3ns，PMT时间响应：~ns
- ✓ 采用多打拿极读出方案（实现大动态范围）
- ✓ 波形采集卡、波形数字化读出电子学

| | |
|-------------|-------------|
| 探测器单元数 | 2 |
| 塑闪灵敏区面积 | 15cm*15cm |
| 塑闪厚度 | 1cm |
| PMT打拿极个数 | 10 |
| PMT打拿极读出通道数 | 3 |
| 探测器动态范围 | ~30000 |
| 探测效率 | >97%@1.6GeV |

探测器参数



流强刻度系统示意图



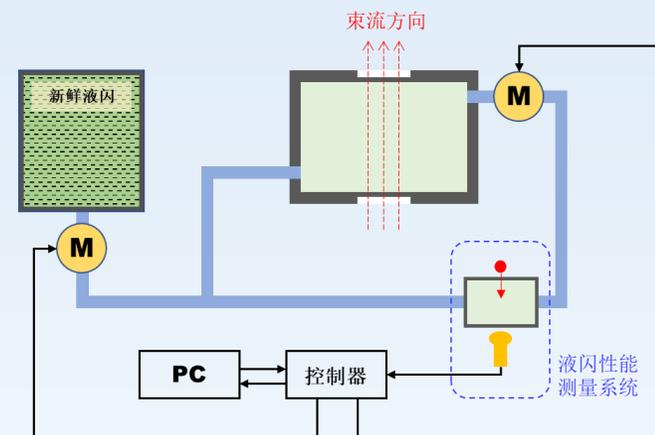
塑闪+双打拿极读出PMT探测器波形

流强刻度探测器升级方案

塑闪受强辐照后性能会下降，需要手动更换闪烁体

◆ 液闪+PMT+波形采集方案

- 液闪与塑闪性能平替，同时能循环，可实现自动化更换
- 预计能实现大动态范围流强的持续稳定测量
- 该方案正在研究中



可循环液闪系统示意图

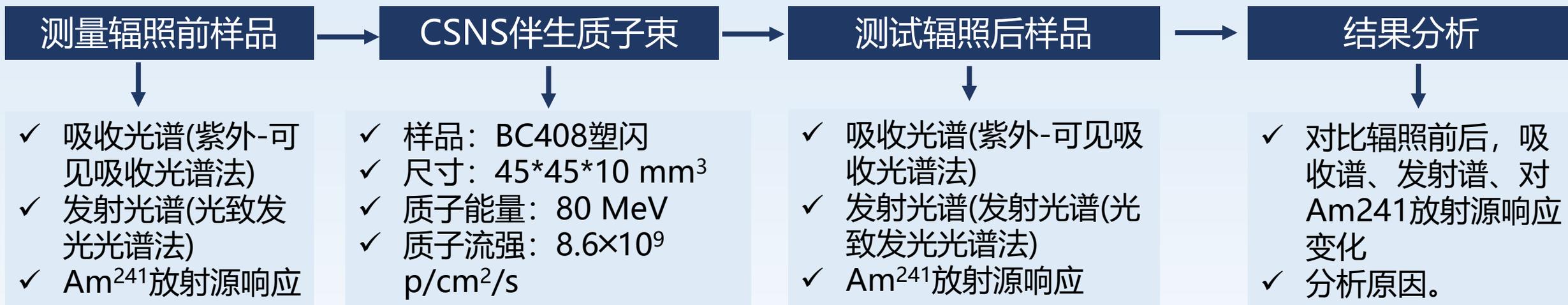
| 探测方案 | 探头尺寸 ($x \times y \times z, cm$) | 材料 | 使用备注 |
|-----------------|---------------------------------------|----------|----------------------|
| 塑料闪烁体方案 | 15 × 15 × 0.5 | 主要成分聚苯乙烯 | 准备十块塑闪，如发生性能下降，立即更换。 |
| 液体闪烁体方案 (备用) | 探测器15 × 15 × 1 SS外壳厚度1mm | 主要成分甲苯 | 可实时自动循环和更新 |

报告概要

- 流强刻度系统技术方案
- 塑闪辐照测试
- 多打拿极读出PMT探测器测试进展
- 总结
- 二次电子发射监测器

测试方法

实验流程



◆ 塑闪参数

- ✓ 塑闪尺寸: 45 mm *45 mm*10 mm
- ✓ 密度: 1.023 g/cm³

◆ 沉积能量计算

- ✓ 80 MeV质子穿越10 mm塑闪沉积能量9.09 MeV, 1.6 GeV质子沉积能量2.02 MeV
- ✓ 一个80 MeV质子辐照相当于4.5个1.6 GeV质子辐照

◆ 分组对照实验

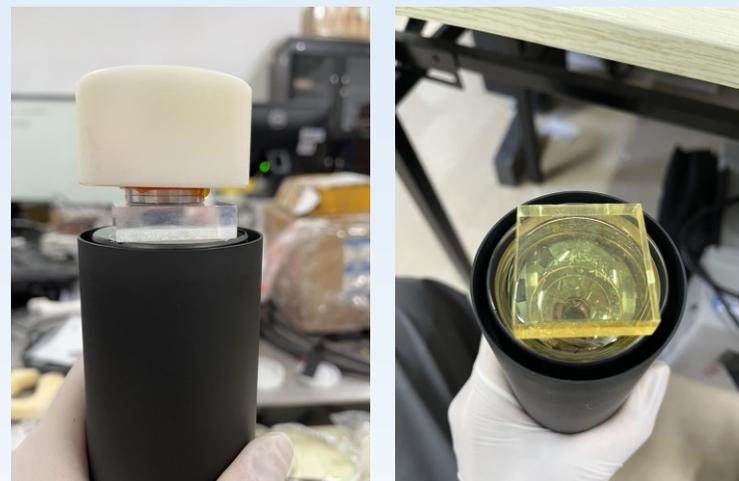
- ✓ 编号Plastic1-6 BC408塑闪进行最短5分钟, 最长20小时辐照
- ✓ 设置Plastic9和Plastic10不辐照作为对照组

放射源测试平台

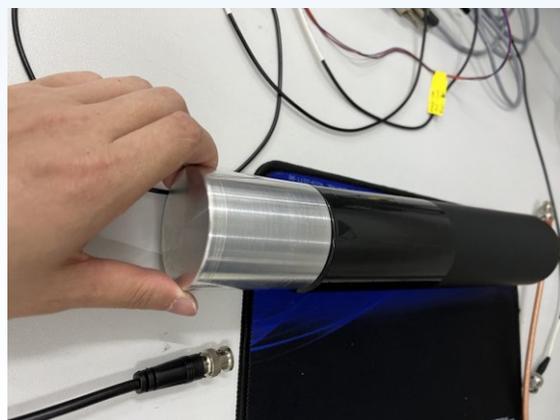
实验原理图



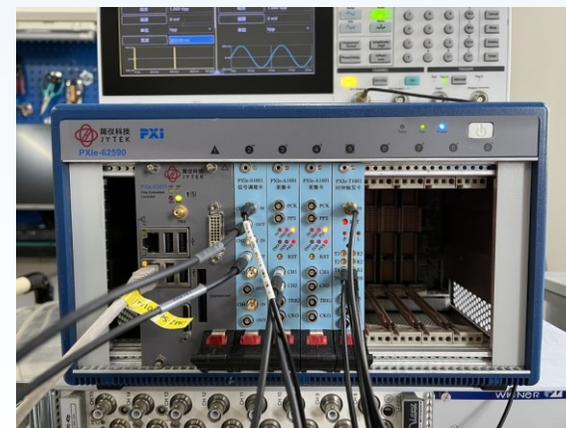
PMT+塑闪



3D打印支架



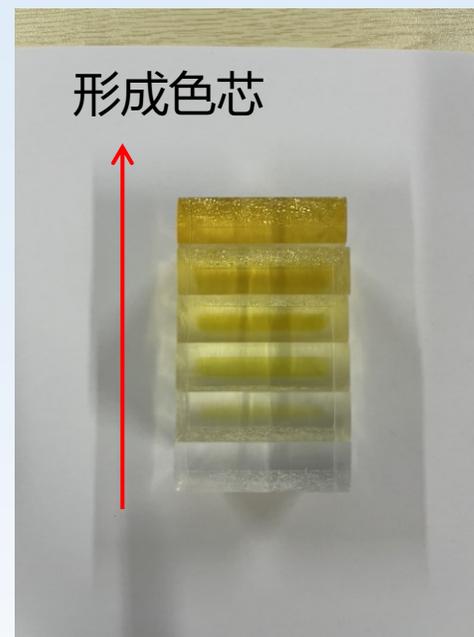
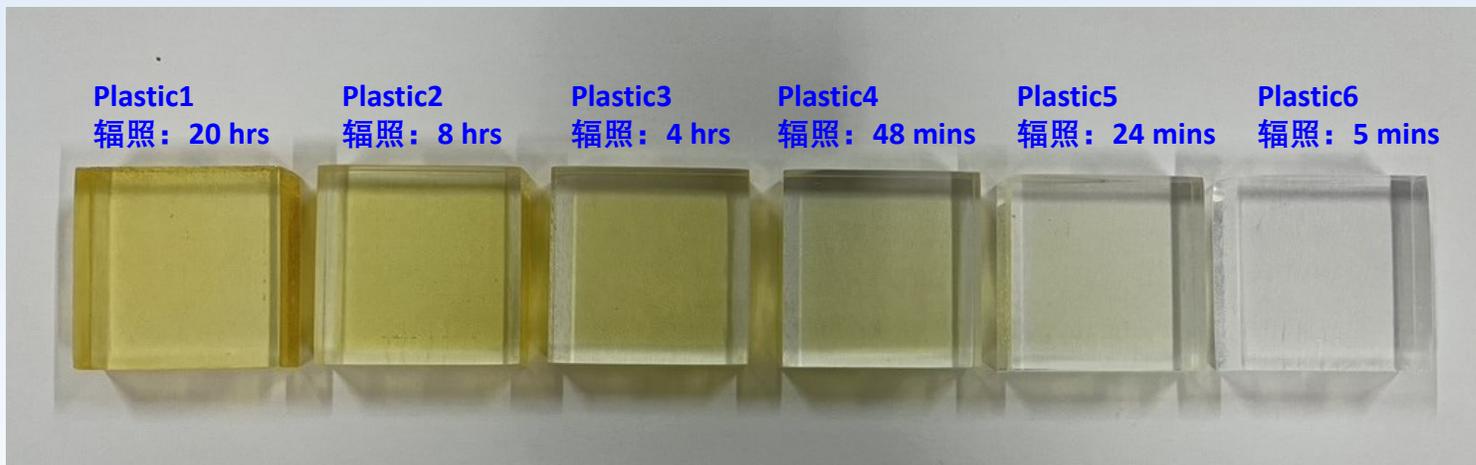
封装的PMT+塑闪+放射源



DAQ数据获取系统

辐照前后塑闪颜色对比

- ✓ 辐照过后，塑闪形成色芯
- ✓ 辐照时间越长，颜色越黄



可见光能区 (大于 400 nm), 蓝光和蓝绿光吸收增加, 允许绿、黄、橙、红光能透过。叠加以后, 塑闪呈现黄色。

| 塑闪编号 | 80 MeV质子辐照塑闪 | | | 1.6 GeV质子辐照塑闪 | | | |
|-----------|--------------|--------------------|-------------------------|---------------|--------------------|-----------------|------------|
| | 质子能量 (MeV) | 1 cm塑闪能量沉积 (MeV/p) | 吸收剂量 Gy/cm ³ | 质子能量 (GeV) | 1 cm塑闪能量沉积 (MeV/p) | 相当1.6 GeV质子辐照数量 | 相对100 kW发次 |
| Plastic-6 | 80 | 9.08 | 3846 | 1.6 | 2.02 | 1.2E+13 | 0.8 |
| Plastic-5 | 80 | 9.08 | 18460.8 | 1.6 | 2.02 | 5.8E+13 | 3.7 |
| Plastic-4 | 80 | 9.08 | 36921.6 | 1.6 | 2.02 | 1.2E+14 | 7.5 |
| Plastic-3 | 80 | 9.08 | 184608 | 1.6 | 2.02 | 5.8E+14 | 37.4 |
| Plastic-2 | 80 | 9.08 | 369216 | 1.6 | 2.02 | 1.2E+15 | 74.8 |
| Plastic-1 | 80 | 9.08 | 923040 | 1.6 | 2.02 | 2.9E+15 | 187.0 |

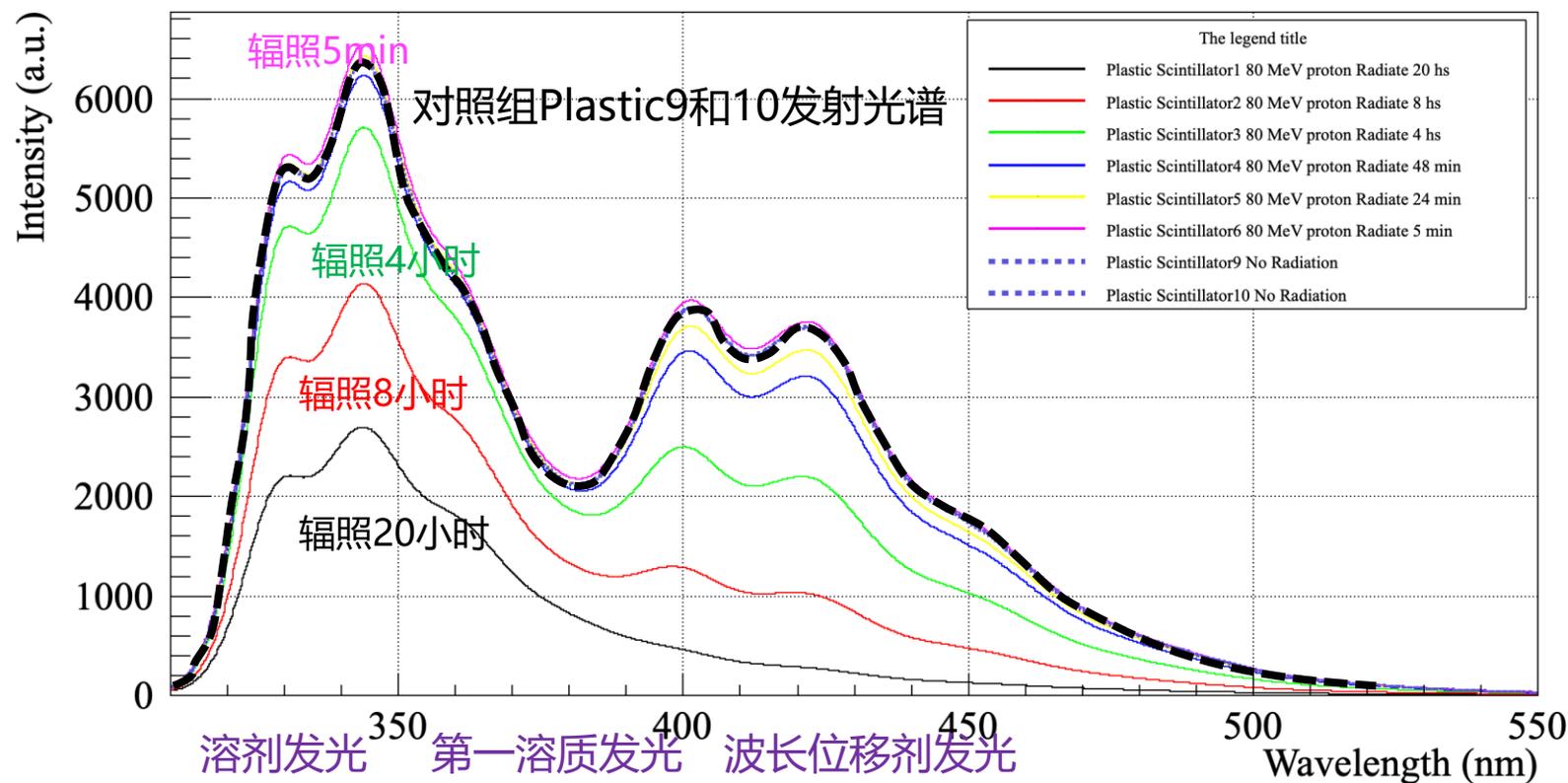
辐照前后发射光谱

◆ 塑闪发光机制

1. 溶剂：聚乙烯基甲苯，激发退激后发光 300-350 nm；
2. 第一溶质：无辐射方式或再吸收方式吸收退激后发光 350-400 nm；
3. 波长位移剂：吸收溶质产生的荧光再发光 400-500 nm 蓝绿荧光。

◆ 辐照前后对比

- ✓ 光谱主峰峰位基本不变。
- ✓ 辐照时间越长，荧光强度越低。

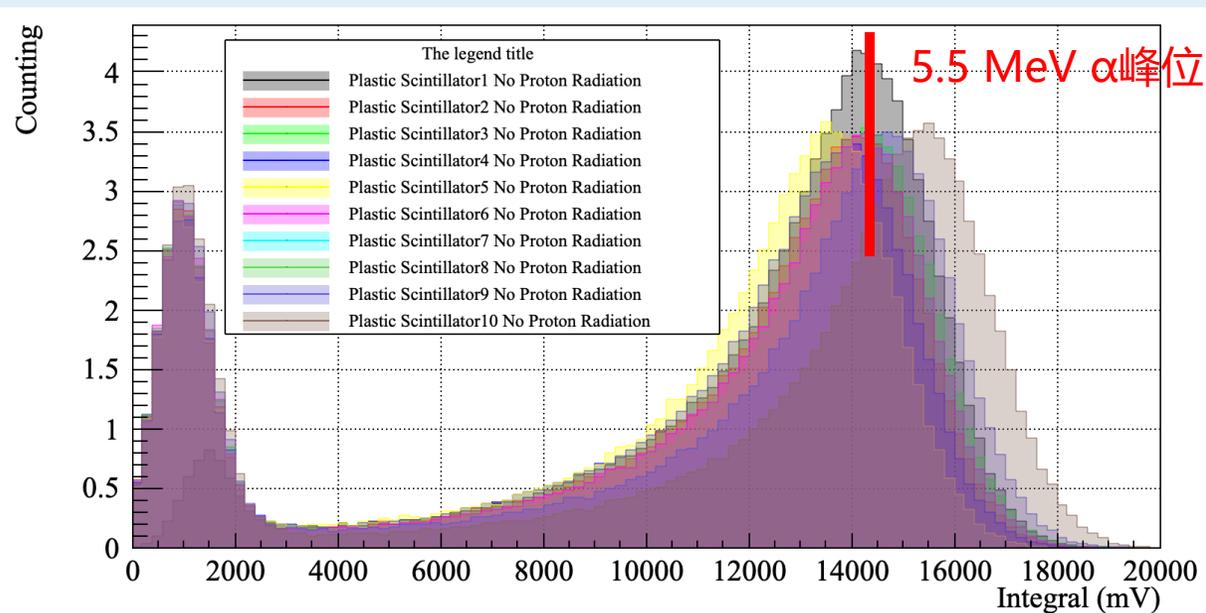


| 编号 | 峰位 | 峰值 | 峰值相对变化 |
|-----------|-------|------|--------|
| Plastic1 | 343.7 | 2698 | 57.8% |
| Plastic2 | 343.9 | 4141 | 35.1% |
| Plastic3 | 343.7 | 5710 | 10.1% |
| Plastic4 | 343.1 | 6234 | 2.3% |
| Plastic5 | 343.7 | 6432 | -0.8% |
| Plastic6 | 343.7 | 6544 | -2.5% |
| Plastic9 | 343.7 | 6379 | |
| Plastic10 | 343.9 | 6389 | |

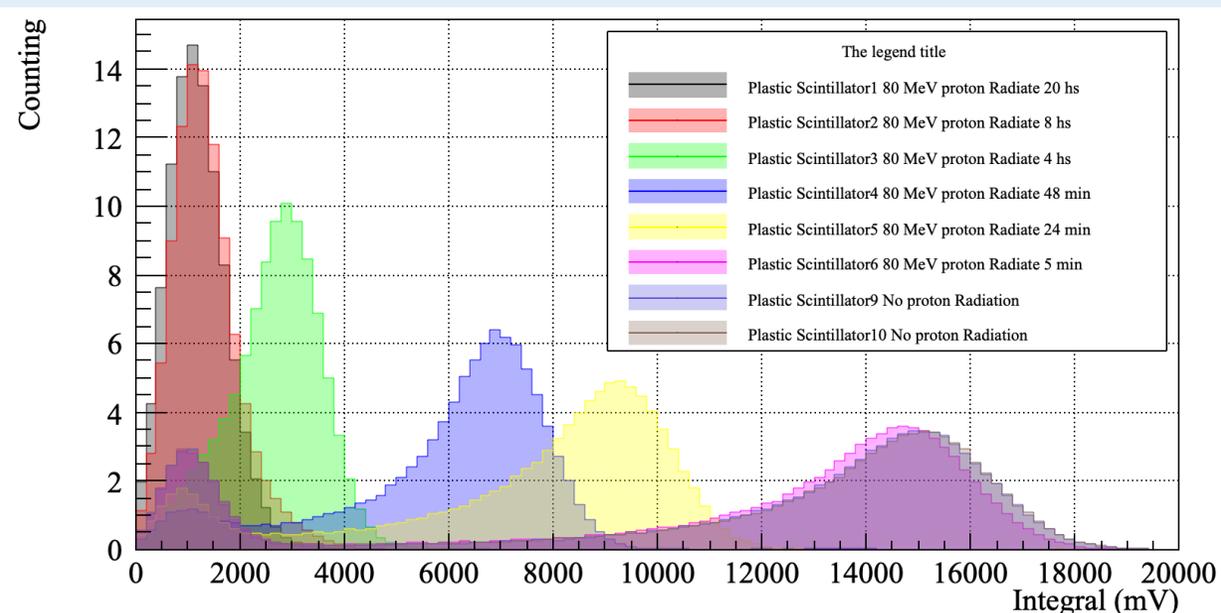
质子辐照塑闪以后，破坏塑闪发光机制，损伤了塑闪发光成份。

辐照前后Am241放射源响应对比

辐照前



辐照后

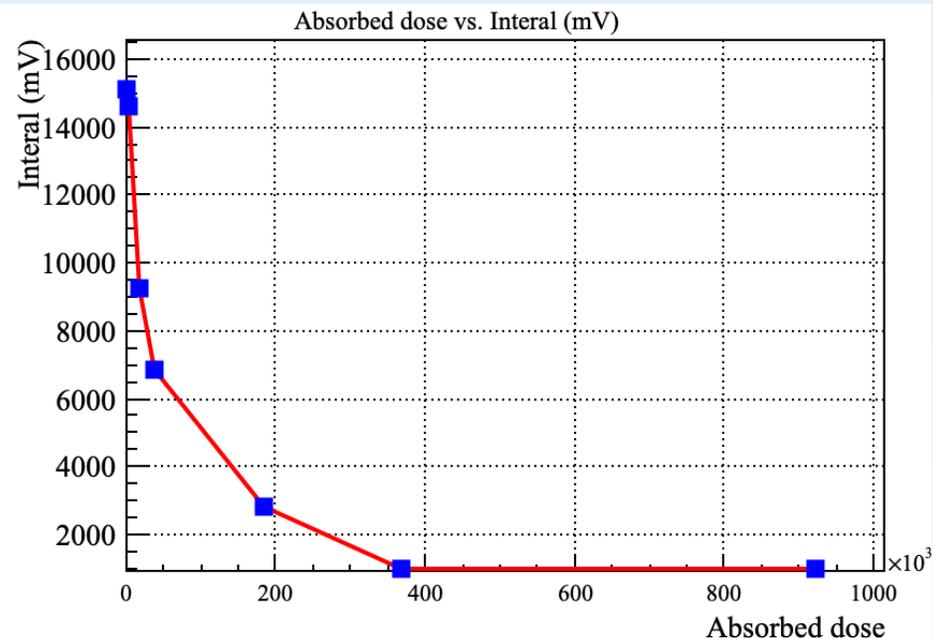


- ◆ 辐照前能谱：本底@1000 mV，平均值@14300 mV
- ◆ 质子辐照塑闪以后，塑闪光产额变成差，辐照时间越长，损伤效果越大。

能谱峰位 vs. 辐照吸收剂量

表 3.3 质子辐照后塑闪对 ^{241}Am 放射源响应变化

| 辐照情况 | 塑闪编号 | Plastic1 | Plastic2 | Plastic3 | Plastic4 | Plastic5 | Plastic6 | Plastic9 | Plastic10 |
|--------------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| 质子辐照前 | 5.5 MeV α 峰位 (mV) | 14100 | 14100 | 14300 | 13900 | 13500 | 14300 | 14700 | 15500 |
| 80 MeV 质子辐照后 | 辐照时间 | 20 hours | 8 hours | 4 hours | 48 mins | 24 mins | 5 mins | 0 | 0 |
| | 吸收剂量 (Gy) | 923040 | 369216 | 184608 | 36922 | 18461 | 3846 | 0 | 0 |
| | 5.5 MeV α 峰位 (mV) | 1100 | 1100 | 2900 | 6900 | 9300 | 14700 | 14900 | 15100 |
| | 相对辐照前变化 | 92.2% | 92.2% | 79.7% | 50.4% | 31.1% | -2.8% | -1.4% | 2.6% |



- ◆ 吸收剂量小于3846 Gy时，不影响塑闪性能，吸收剂量大于369216 Gy塑闪完全失效。
- ◆ BC408塑闪能够承受 1.2×10^{13} 量级的1.6 GeV的质子辐照。
- ◆ 束线流强 10^8 protons/s计算，基于BC408塑闪的探测器可以使用33.3 小时。
- ◆ 塑闪能够满足高能质子束线流强的刻度需求。

报告概要

- 流强刻度系统技术方案
- 塑闪辐照测试
- 多打拿极读出PMT探测器测试进展
- 总结
- 二次电子发射监测器

塑闪和PMT需求

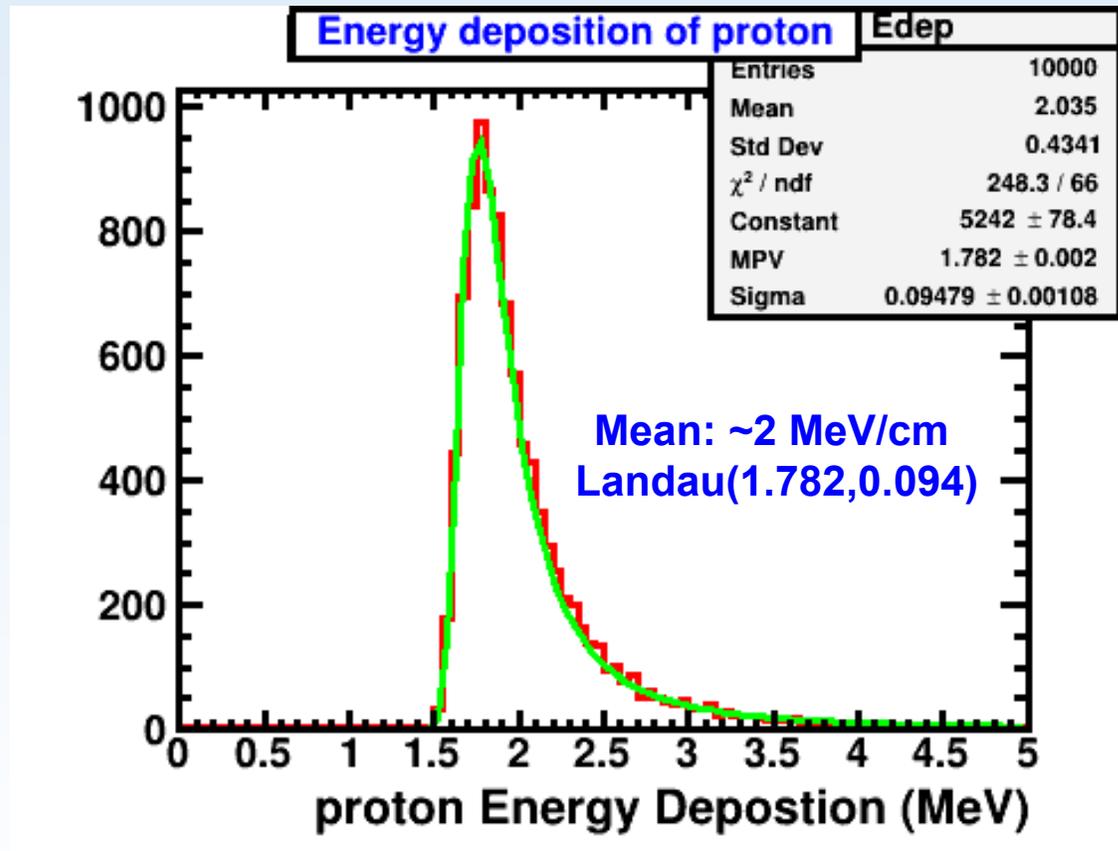
◆ 塑闪能量沉积

- ✓ 闪烁体尺寸设计为15cm×15cm，厚度为1cm
- ✓ 每个脉冲沉积能量：2MeV~20GeV
- ✓ 塑闪光产额：~100eV
- ✓ 考虑光衰减、反射、传输后的光收集效率：~0.05
- ✓ PMT光阴极量子效率以及光电子收集效率：~0.1
- ✓ **光电子数：100 PEs/mip**

- ◆ **平均每个脉冲包含100个质子，脉冲间隔410ns，PMT增益 10^5 ，阳极平均电流为：**

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{100 \times 10^9 \times 100 \times 10^5 \times 1.6 \times 10^{-19}}{410} = 0.4 \text{ mA}$$

- ✓ **PMT阳极平均电流：0.4 mA**



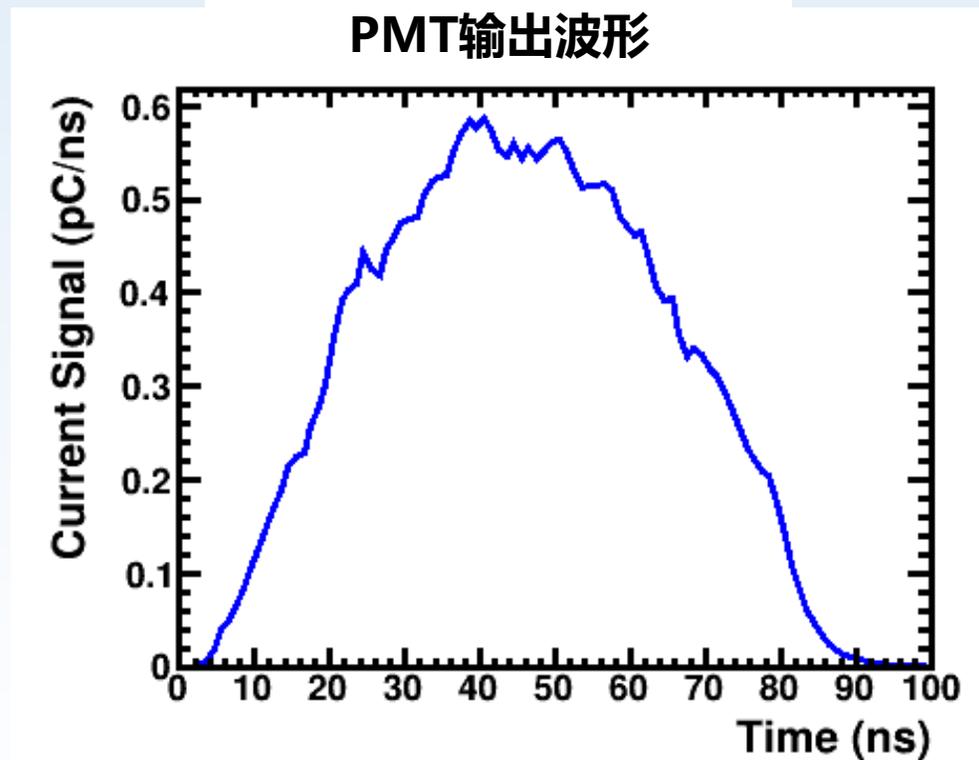
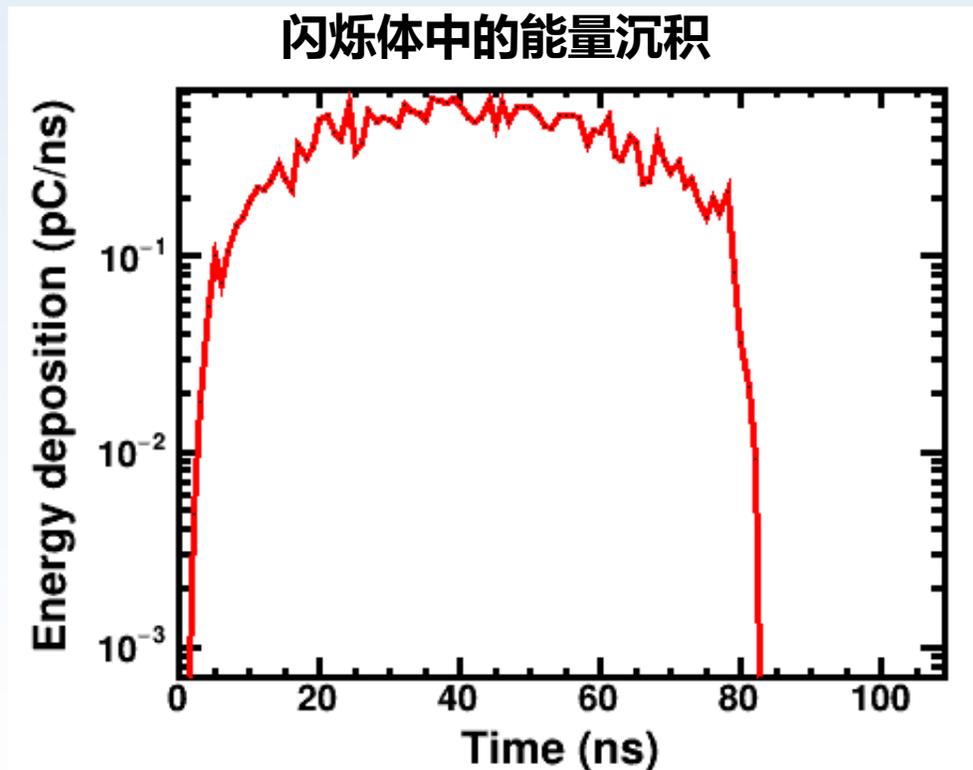
1.6 GeV质子在10mm塑闪内的能量沉积情况

PMT阳极信号波形模拟

◆ 考虑闪烁体荧光衰减时间 (3.3ns) 的影响, 不考虑PMT的渡越时间分散 (<1ns)

✓ 10000次事例按照抛物线的时间结构分布到达的原始信号(脉宽80ns)。

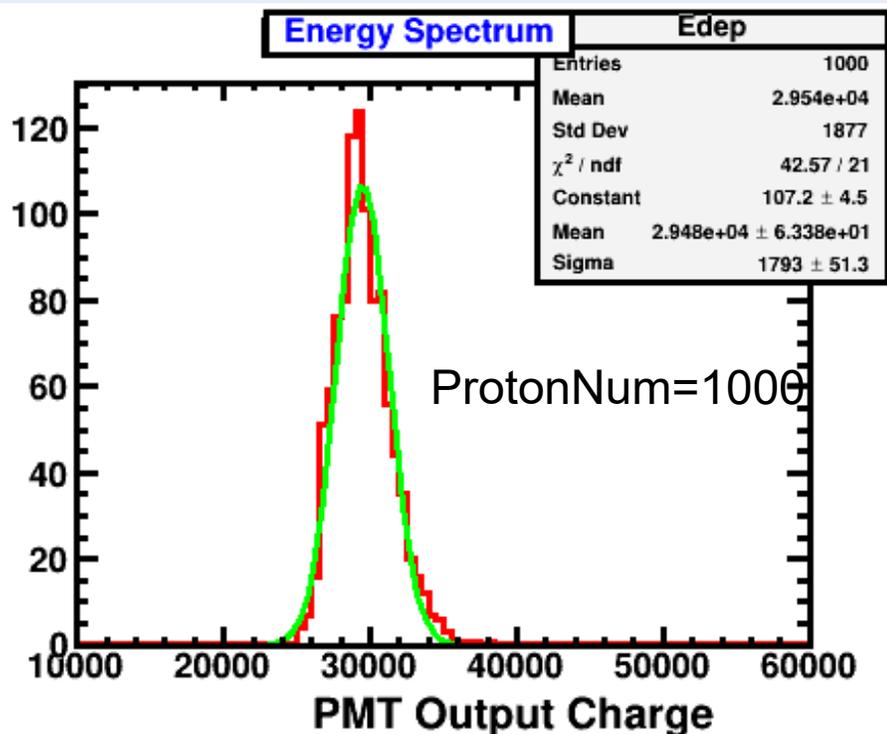
✓ 束流时间结构: $f(t) = -x(x-80)$



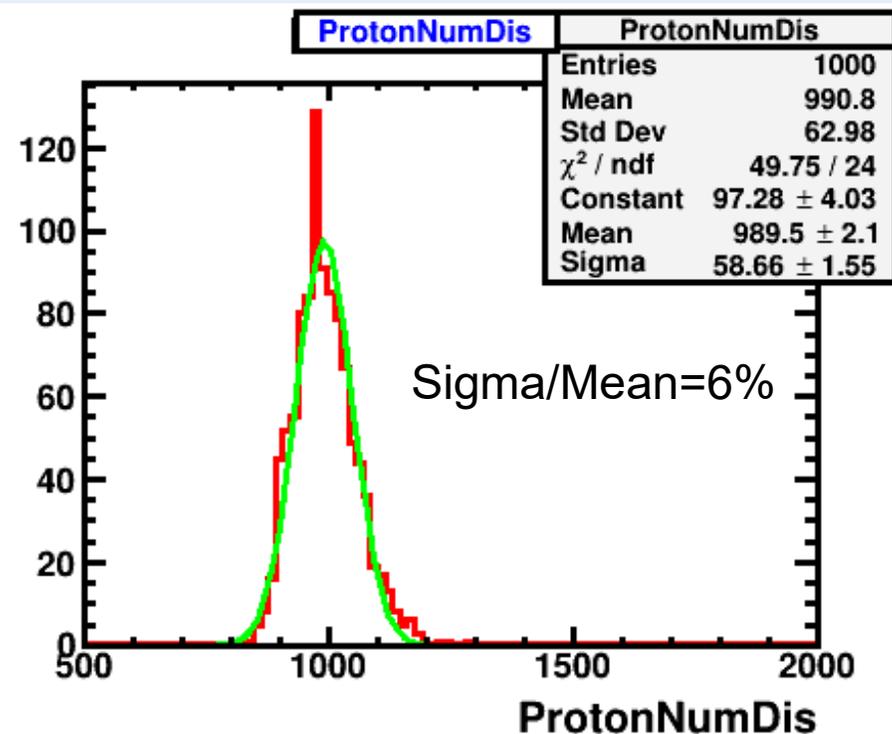
束流脉宽时间远高于闪烁体荧光衰减时间, 原始信号波形主要取决于束流脉冲时间结构

流强重建估计

- Step1: 模拟样本事例: 78603个质子事例按照抛物线的时间结构分布
- Step2: 从样本事例中随机抽取一定事例ProtonNum(单个脉冲包含的质子个数)
- Step3: 对塑闪的发光过程、PMT的光电转换过程、PMT的倍增过程进行泊松抽样
- Step4: 计算探测器信号波形面积, 得到PMT输出电荷量, 并反推出质子事例数



单个脉冲包含1000个质子的能谱分布



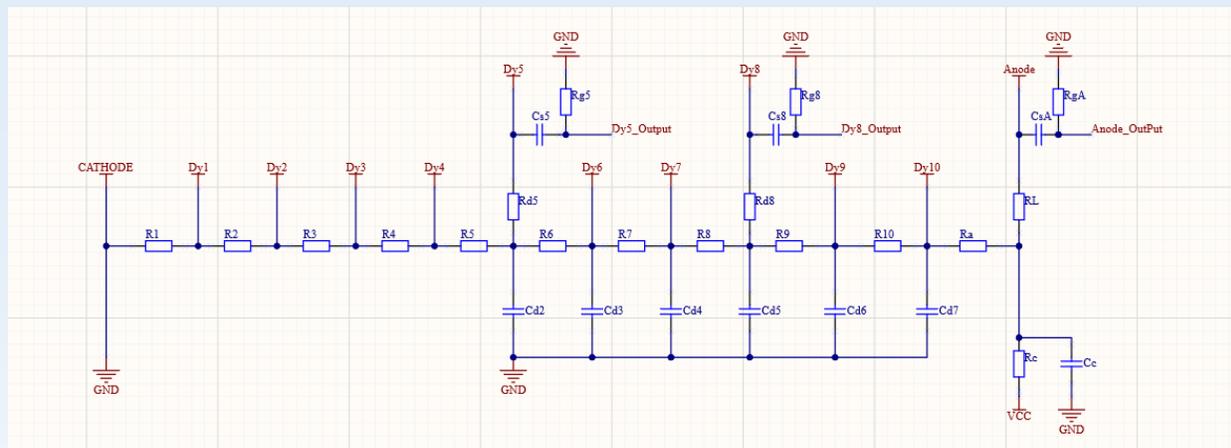
流强重建分布

对于单个脉冲包含1000个质子的事例, 流强重建精度能够达到6%

多打拿极读出PMT方案

◆ 探测器参数

- ✓ 动态范围@30000倍 (0.3mip-10000mip)
- ✓ 电子学动态范围约为100倍, PMT动态范围要达到约300倍
- ✓ PMT分压电路方案、读出信号的打拿极位置需要进行优化研究



基于电阻、电容的分压电路原理图

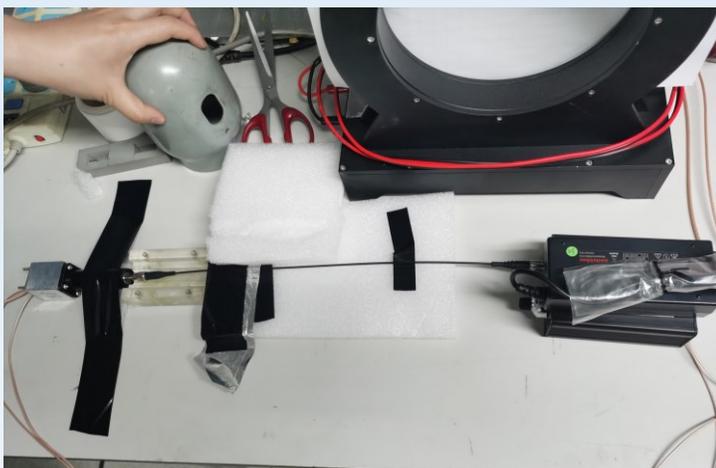
| 读出电极 | 增益 | 动态范围 | 信号幅度(事例同时到达) | 信号幅度(脉宽80ns) |
|-------|-------|-----------------|-------------------|-------------------|
| 阳极 | 1E6 | 0.2mip-20mip | 1.6pC/ns-160pC/ns | 0.12pC/ns-12pC/ns |
| 第8打拿极 | 6.5E4 | 3.1mip-310mip | 1.6pC/ns-160pC/ns | 0.12pC/ns-12pC/ns |
| 第5打拿极 | 1000 | 200mip-20000mip | 1.6pC/ns-160pC/ns | 0.12pC/ns-12pC/ns |

PMT各读出极参数

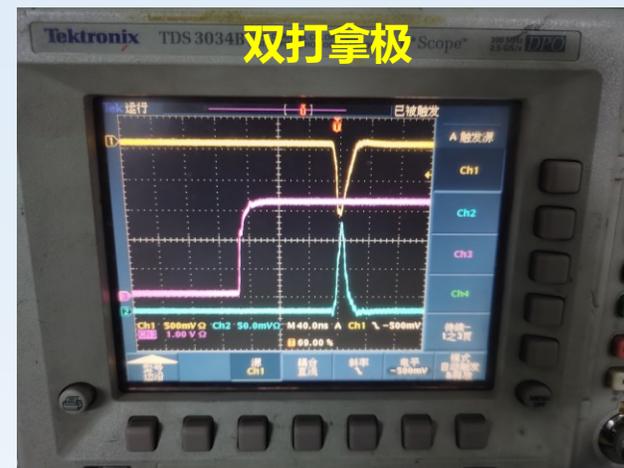
多打拿极读出PMT小型样机测试



双打拿极读出PMT



LED测试照片



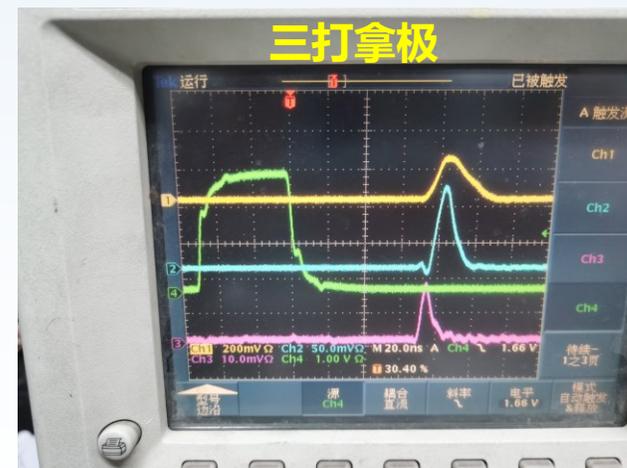
典型的信号波形



三打拿极读出PMT

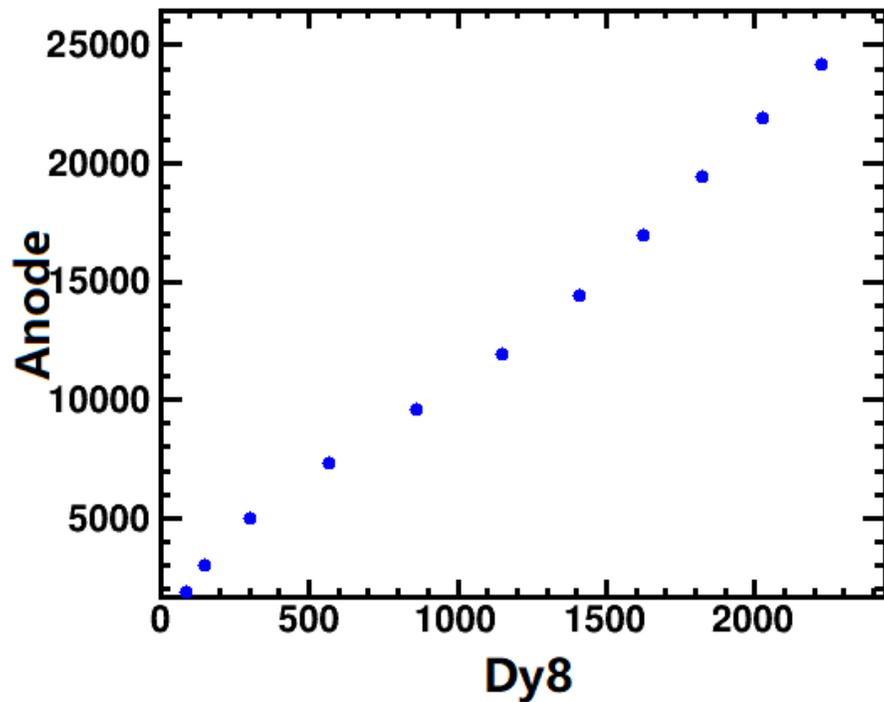


LED测试照片

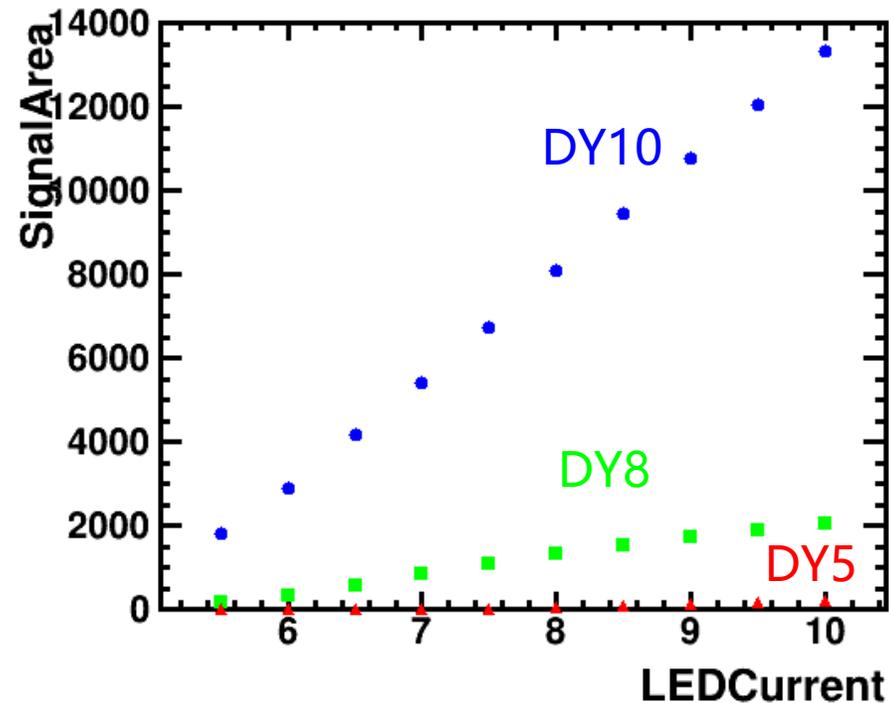


典型的信号波形

动态范围测试结果



双打拿极读出PMT

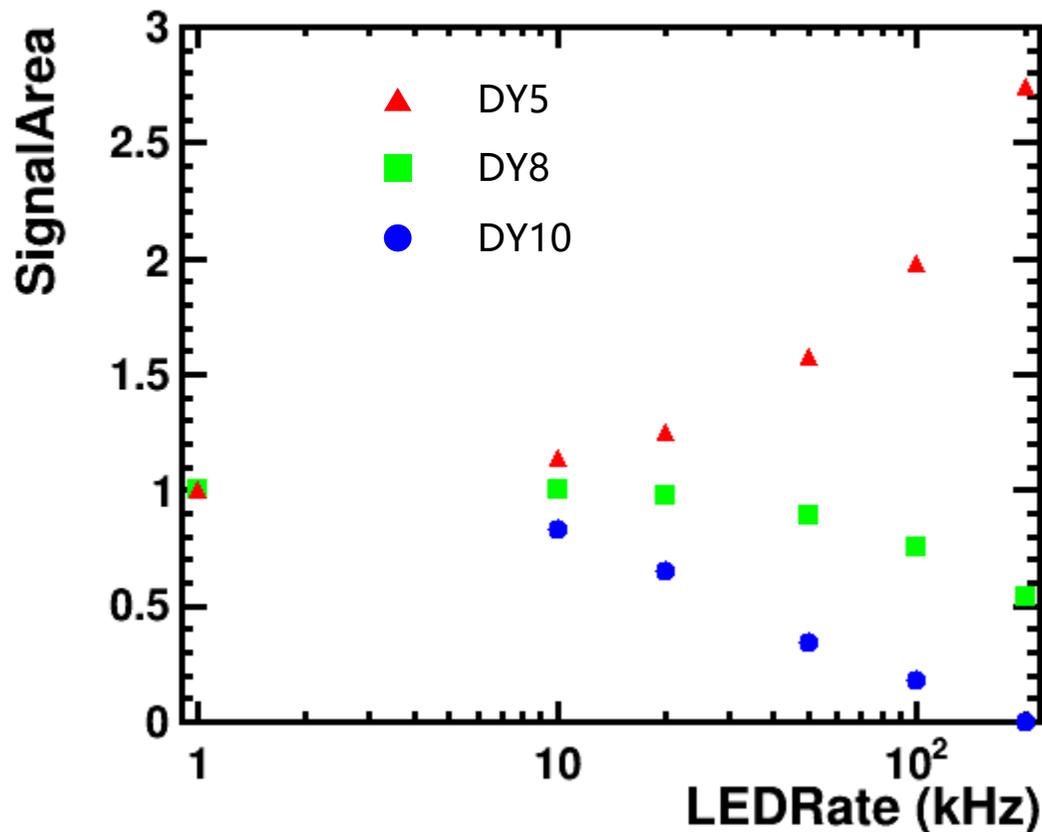
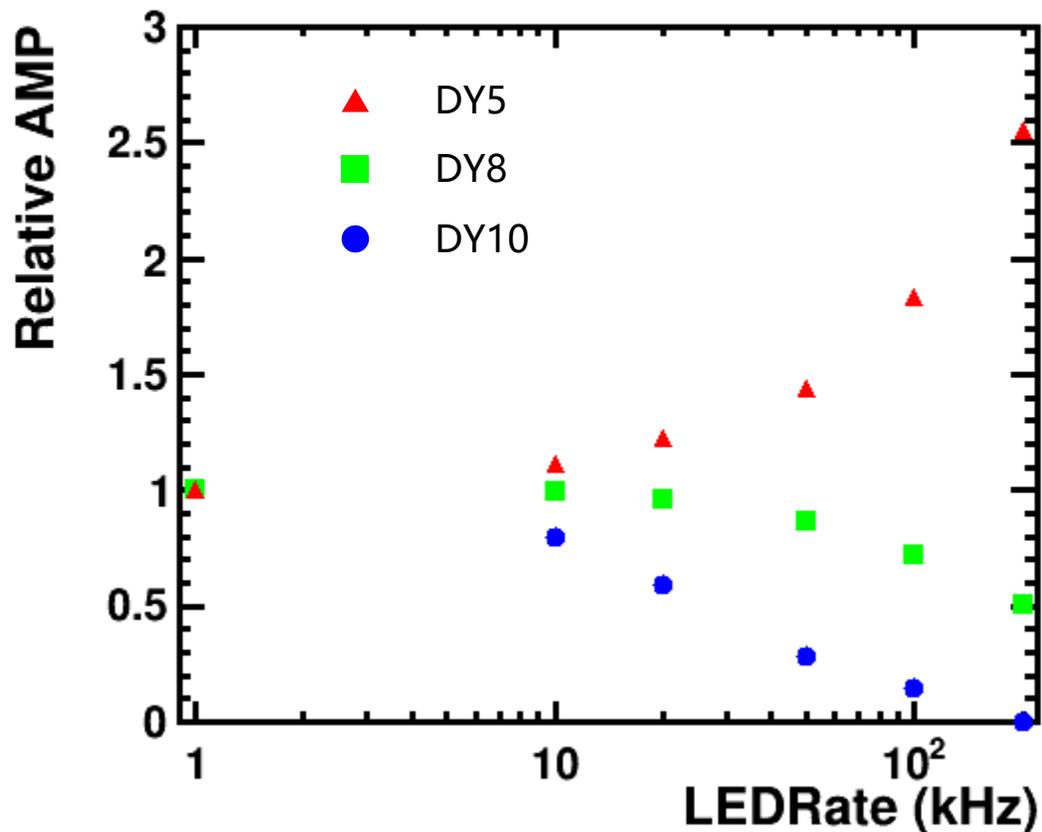


三打拿极读出PMT

- ◆ 双打拿极读出PMT，信号幅度较小时，阳极信号的面积与Dy8信号面积比值约为15倍，信号幅度较大时，约为10倍。
- ◆ 三打拿极读出PMT，DY10信号面积约为DY8信号面积的6倍，DY8信号面积约为DY5信号面积的10倍。

增益线性测试结果

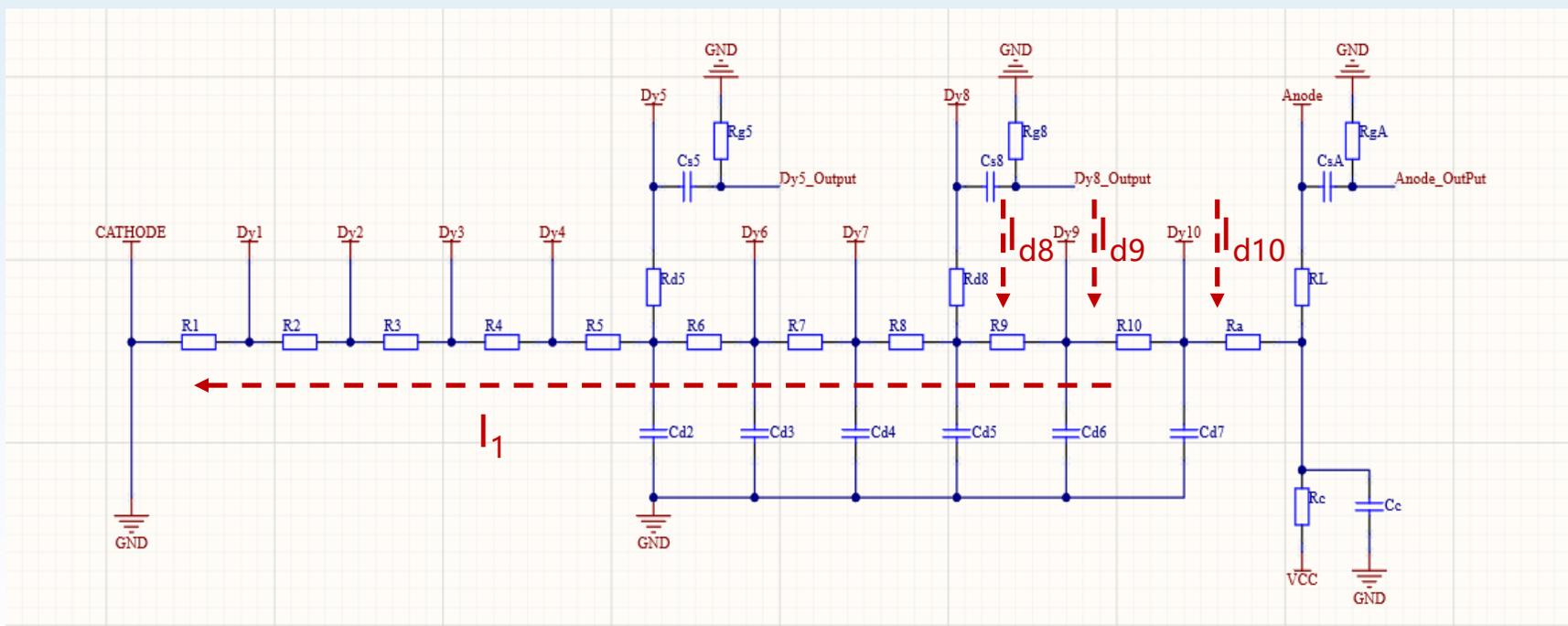
信号幅度 vs. 计数率



随着LED发光频率的增加，探测器DY8、DY10的信号幅度显著下降，DY5的信号幅度明显上升

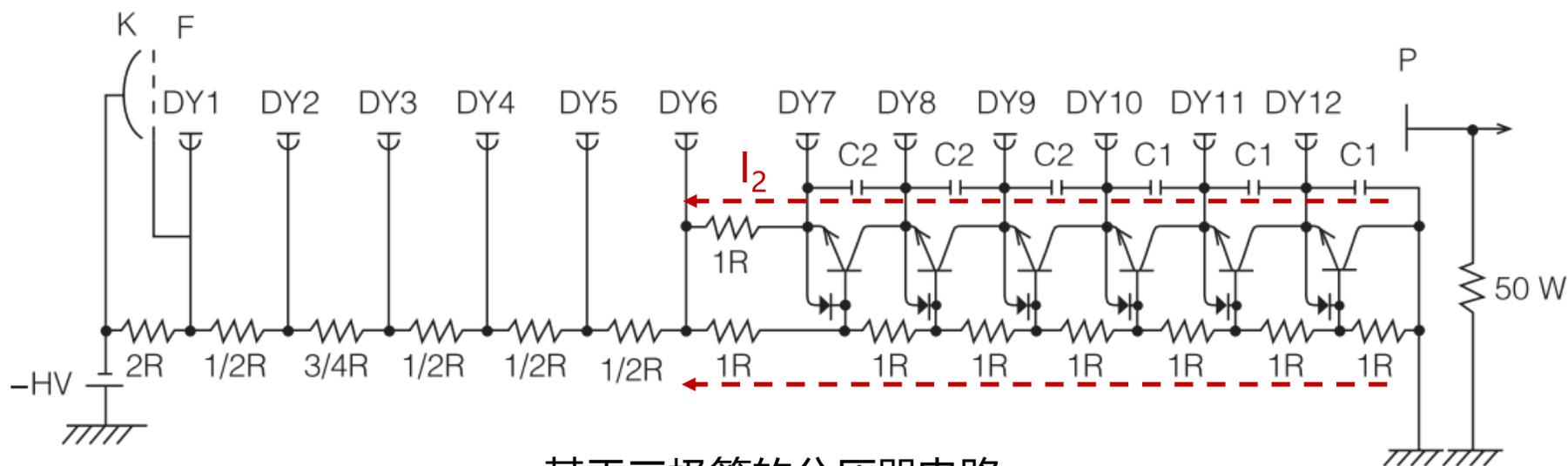
当前电阻、电容分压电路存在的问题

1. 单个脉冲有大量粒子入射时，会在后几个打拿极上产生大量的电荷。
2. 电荷通过分压电路泄放，泄放时间跟耦合电容和分压电阻相关。
3. 当电荷泄放不及时，会导致后面几个打拿极的分压下降，增益降低，前面级数的分压升高，增益升高。
4. 一般来说当分压器原始电流为阳极电流的数十倍时(~ 50 倍)，该效应可以忽略。



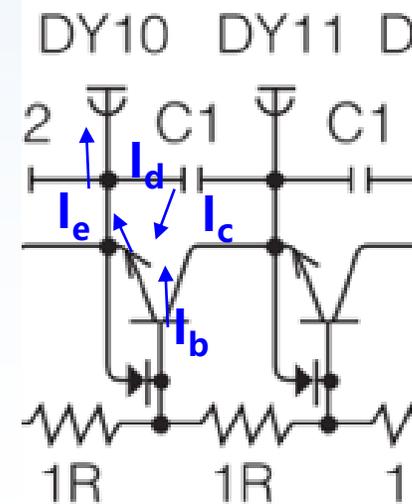
- ◆ 为了实现大动态范围，多打拿极读出PMT的阳极在单个脉冲入射质子束较多时，打拿极上会有较大电流(mA)，普通的基于电阻、电容的分压电路方案难以满足其应用需求。

基于三极管的分压电路设计

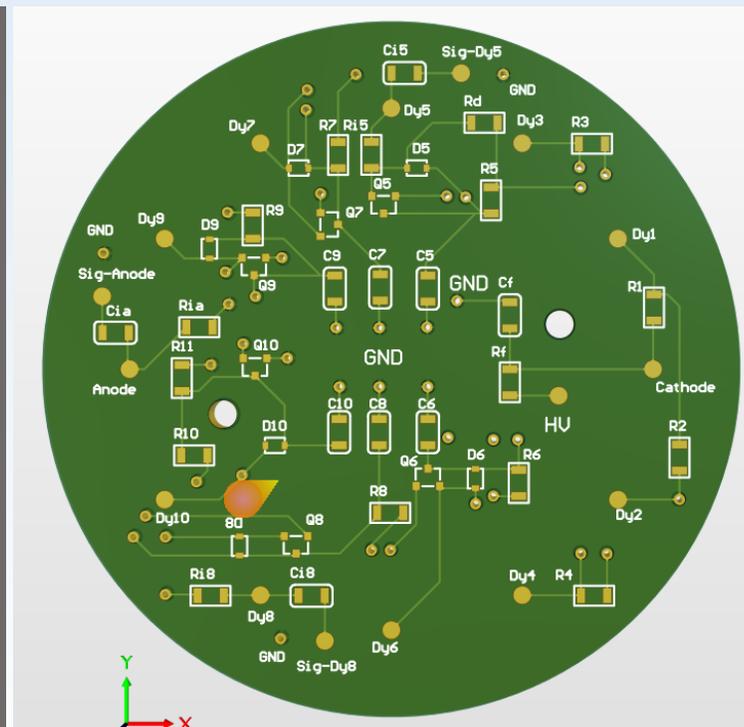
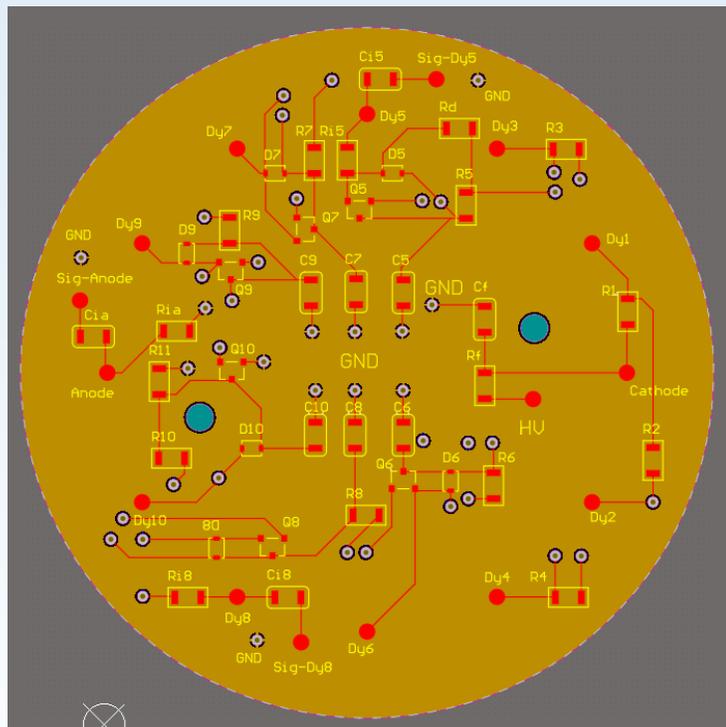


基于三极管的分压器电路

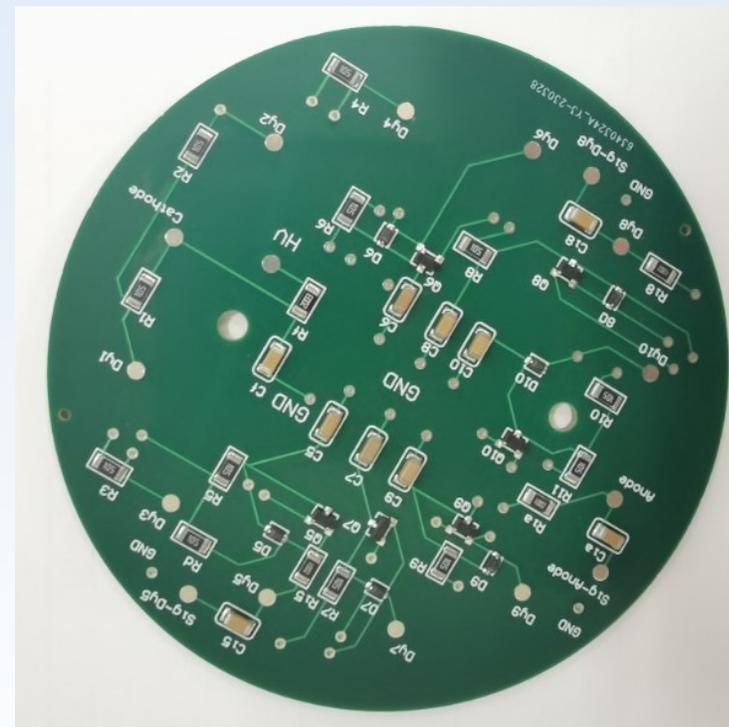
1. 流入分压电路的电流是对应打拿极电流的 $1/h_{fe}$ ，其中 h_{fe} 为三极管的电流增益。
2. 三极管的放大倍数足够大，使得打拿极上的电荷尽可能的经过三极管泄放，而流入分压电路的电流尽可能小。
3. 晶体管要有好的频率特性。



基于三极管分压电路PCB设计



PCB设计图



PCB实物图

◆ PCB板已经加工完成，有待进一步测试

小结

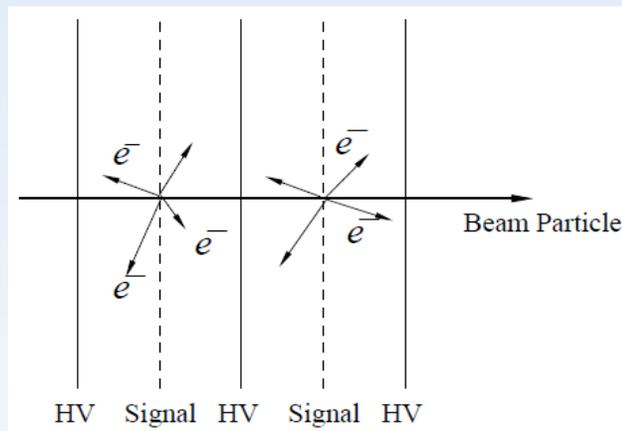
1. 高能质子束线脉冲重复频率快(410ns), 流强监测探测器需要较快的时间响应, 并且具有极高的动态范围(0.3-10000 mip)。
2. 对塑闪的辐照损伤效应进行了研究, 评估了塑闪用于高能质子流强刻度系统的可行性。
3. 研制了基于塑闪+多打拿极读出PMT的探测器样机, 使用LED光源对样机的动态范围、增益线性进行了测试研究。当前PMT样机的动态范围只能达到60, 增益线性差。

◆下一步工作

1. 需要寻找一款阳极电流足够大的PMT(十mA量级)。
2. 考虑电子学的动态范围, 探测器的动态范围要达到300, 当前设计方案探测器的动态范围只能达到60左右, 动态范围需要进一步提升。
3. 当前的设计方案存在探测器增益线性差的问题, 需要对分压电路进行优化设计和进一步的测试。

二次电子发射监测器 (SEEM)

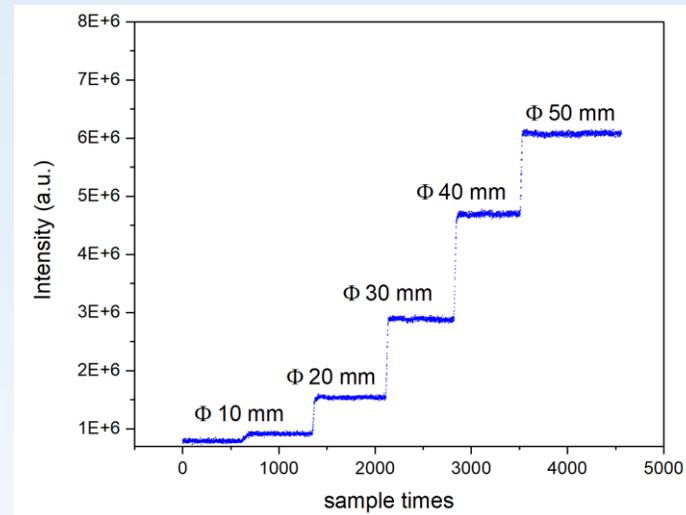
原理:



实物: 用于APEP流强监测



70MeV质子注量率随束斑变化:

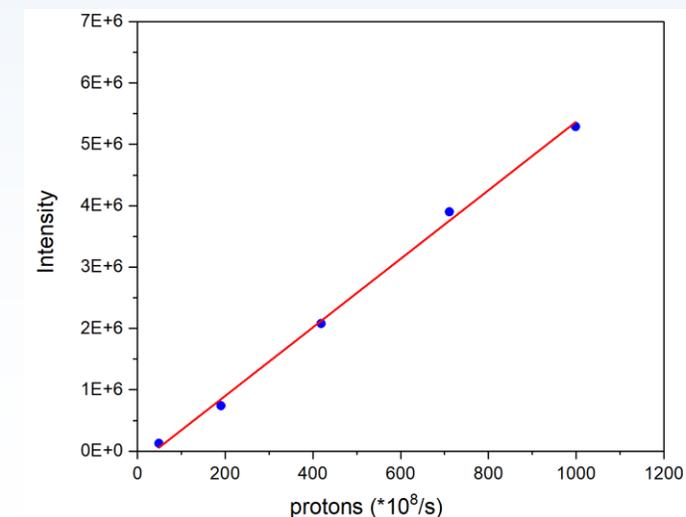
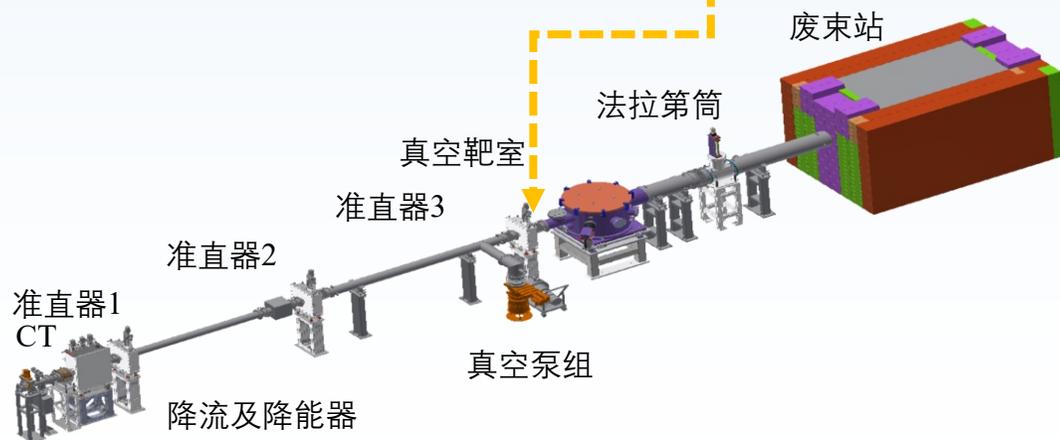


铝膜对质子的二次电子发射系数:

$$\varepsilon = 38.26 E_{eq}^{-1/2}$$

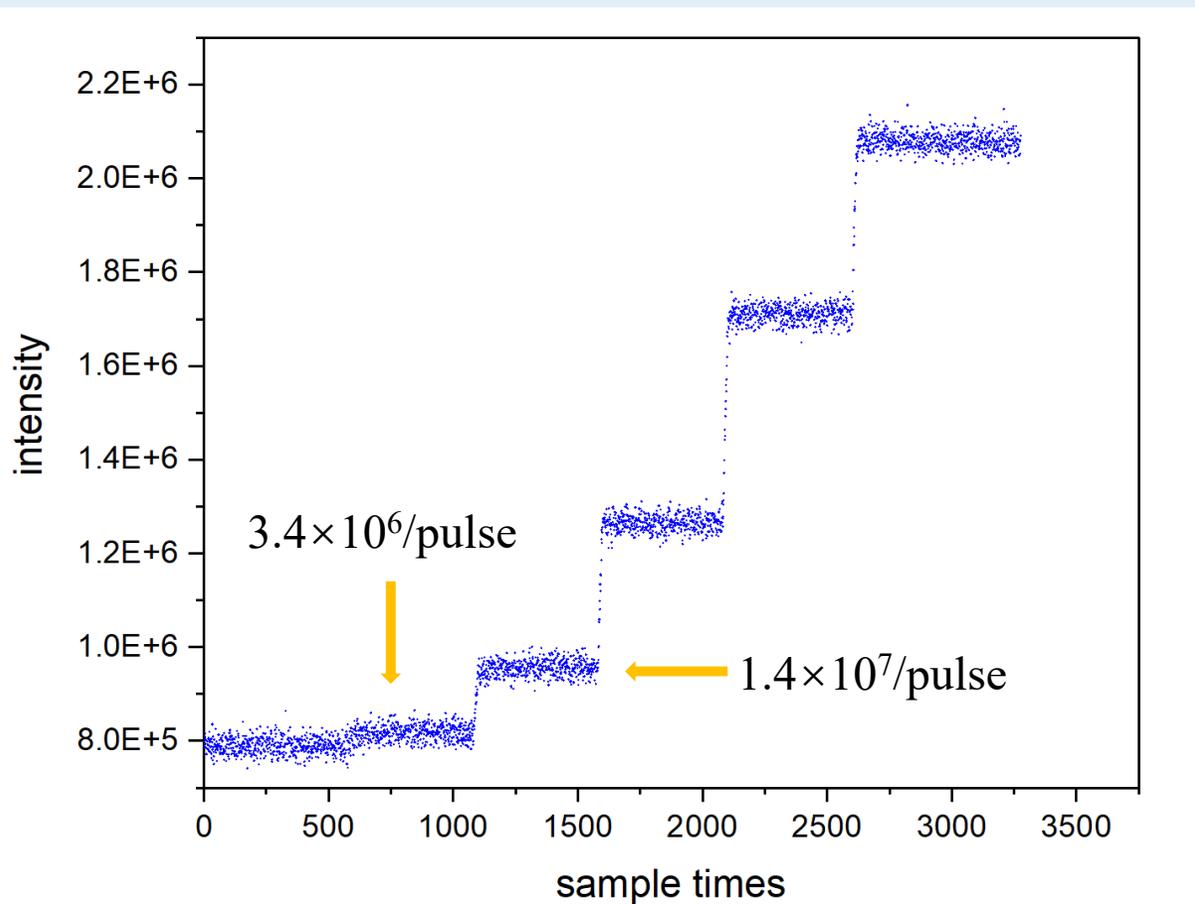
APEP束流参数:

能量 10~80 MeV
 通量 $10^5 \sim 10^{11}$ p/cm²/s
 束斑 10×10
 ~50×50 mm²

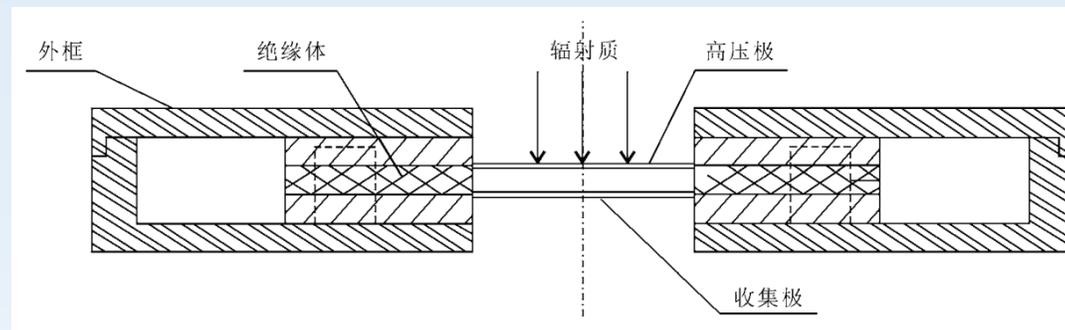


透射电离室TIC

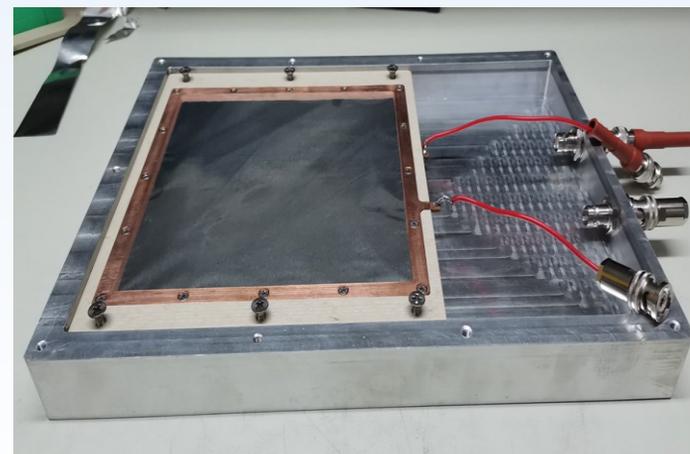
10MeV质子注量率随束斑变化:



原理:



实物: 用于APEP流强监测



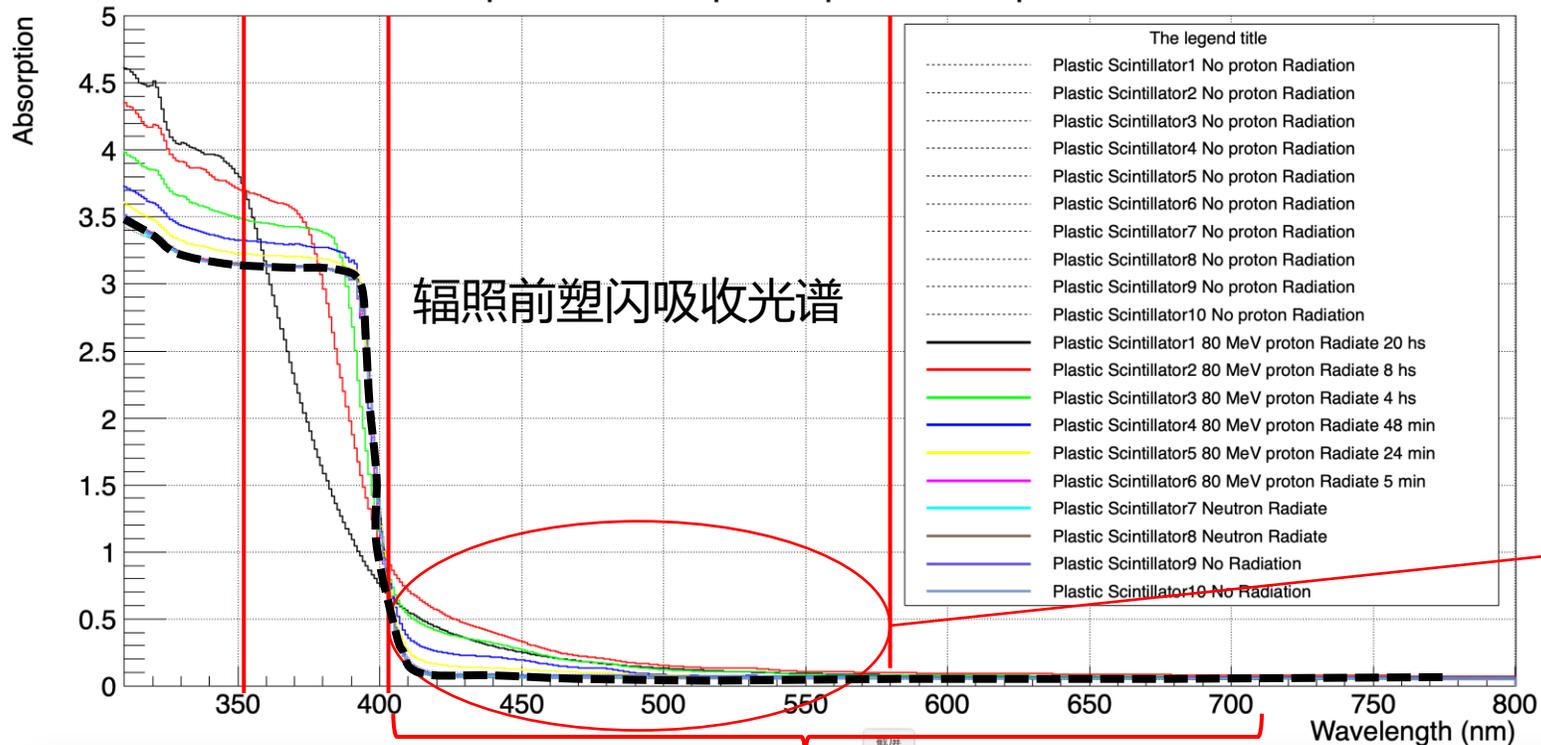
适用于大气环境: 需APEP测试噪声和信号强度

谢谢！

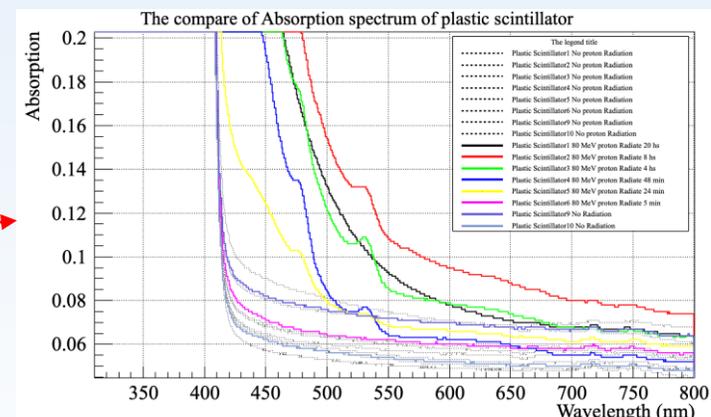
BACKUP

辐照前后吸收光谱

The compare of Absorption spectrum of plastic scintillator



可见光能区 (大于400 nm), 蓝光和蓝绿光吸收增加, 允许绿、黄、橙、红光能透过。叠加以后, 塑闪呈现黄色。



可见光能区

- ◆ 300~350 nm: 辐照时间越长, 吸光度越大。
- ◆ 350~400 nm: 辐照时间越长, 吸光度越小。
- ◆ >400 nm: 样品辐照时间低于 8 小时, 辐照越长, 吸光度越大, 但辐照 20 小时样品吸光度要小于辐照 8 小时样品吸光度。