

高能质子弱流测量探测器系统

报告人：吕游

散裂中子源科学中心

测试束流与先进探测技术研讨会

2025年8月15日、河南郑州



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences



中国散裂中子源

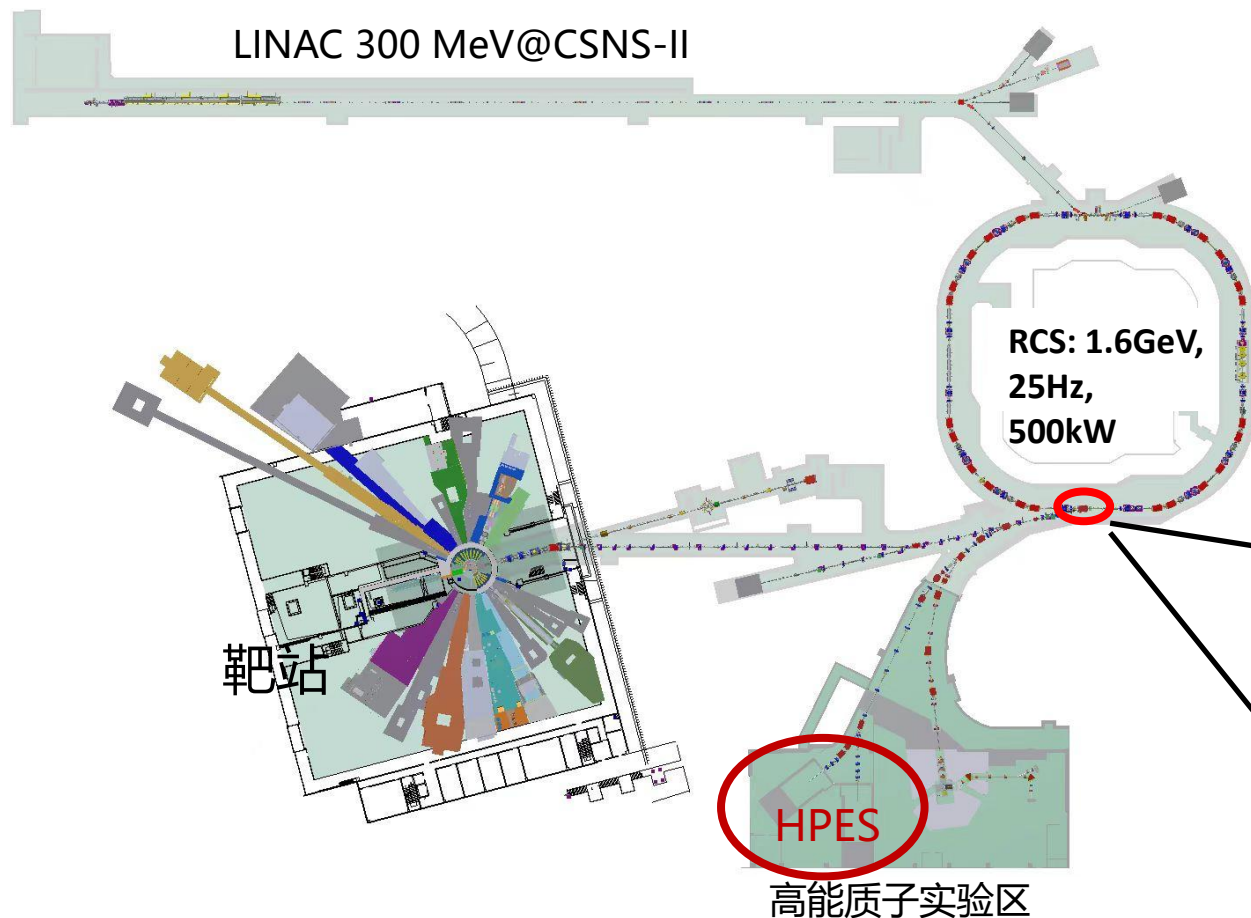
China Spallation Neutron Source

目录

- ◆ 背景介绍
- ◆ 技术方案
- ◆ 研究进展
- ◆ 总结

弱流测量探测器需求

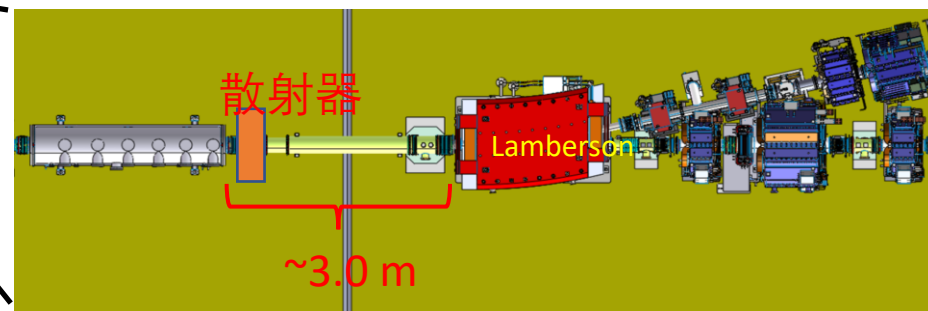
散裂二期 (CSNS-II) 将建设我国首个高能质子实验终端 (HPES)



散裂二期布局

◆ 弱流测量探测器系统

- ✓ 引出束调试：测量从环散射器引出质子束的个数，用于调束。
- ✓ 终端流强测试：测量到达实验终端的质子流强，标定终端流强。

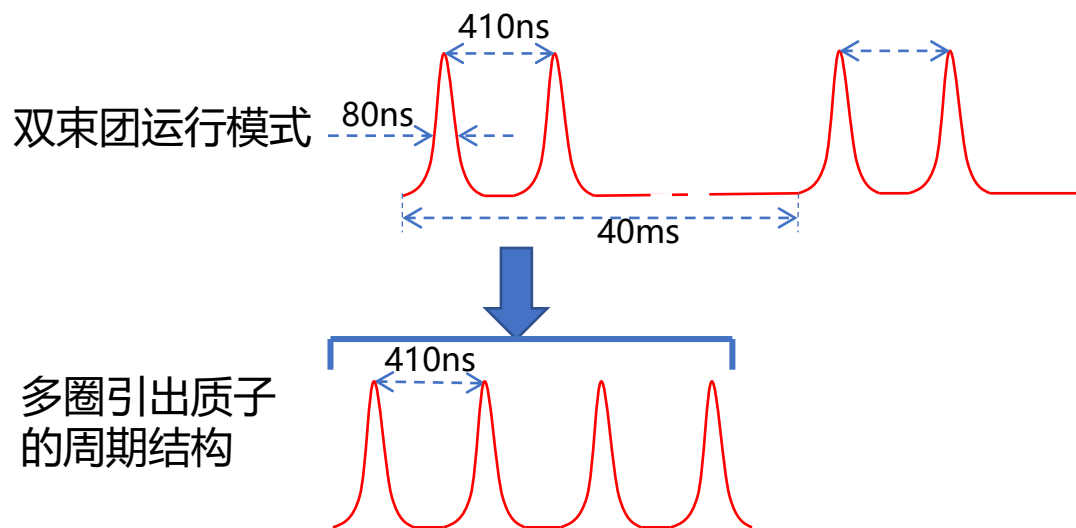


高能质子束线引出段

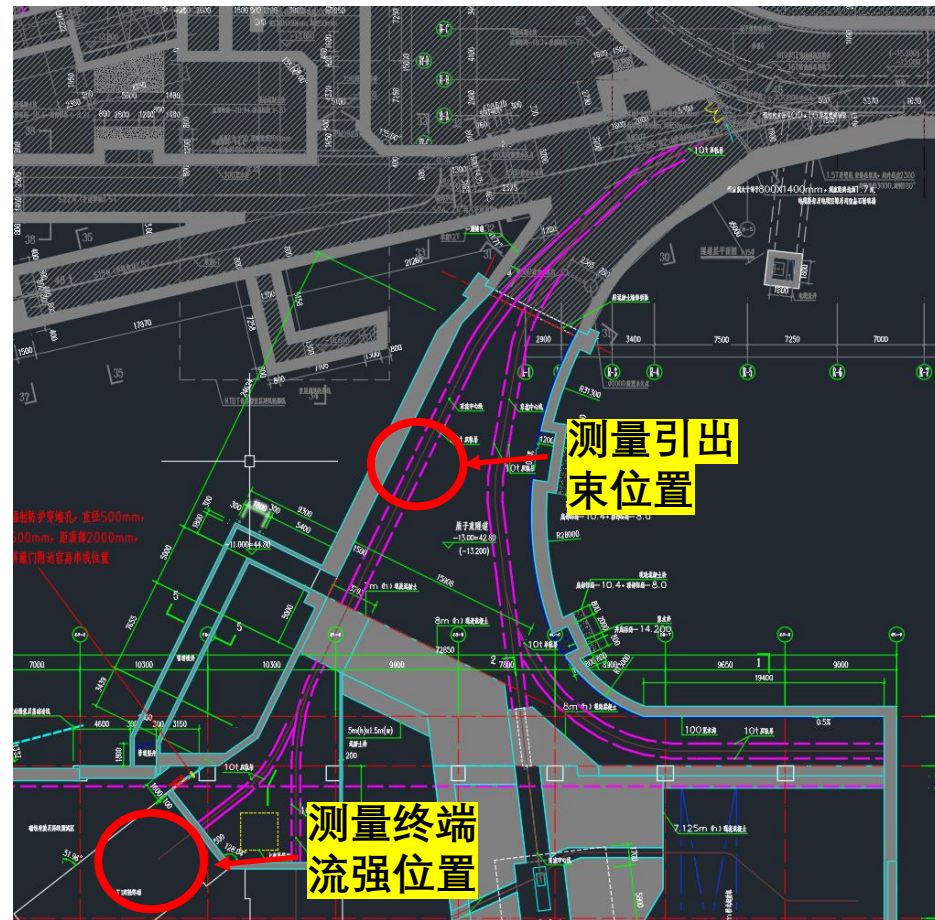
运行工况

◆ 引出束调试：RCS环内质子束流被引出前的1-1.5ms，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），经过偏转磁铁、准直器后到达探测器。

- ✓ 微脉冲宽度：80ns
- ✓ 微脉冲重复频率：410ns
- ✓ 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



◆ 终端流强测试：1.6GeV、准单粒子束。



探测器方案

◆ 探测器系统组成

• 闪烁体+PMT探测器

- ✓ 高效率(>97%), 快响应(~ns)
- ✓ 双闪烁体探测器符合测试, 提升动态范围、降低本底干扰
- ✓ 多打拿极读出PMT, 提升动态范围

• 读出电子学

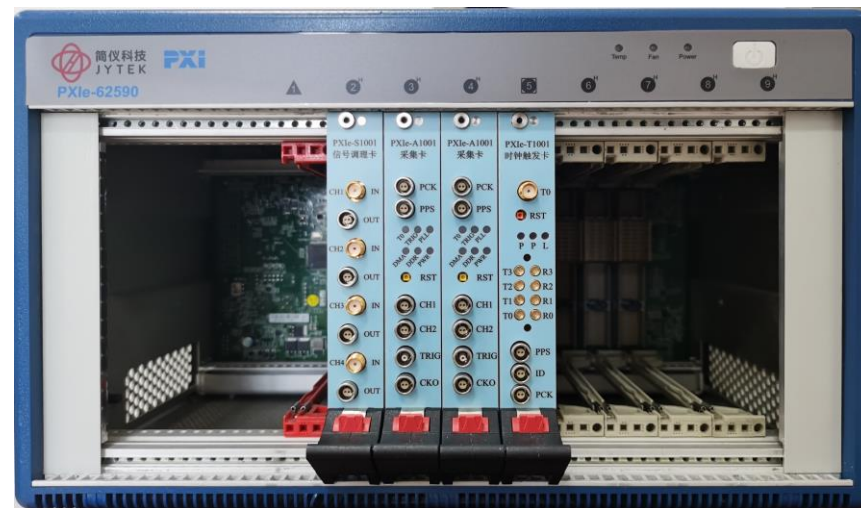
- ✓ 波形采样读出电子学方案, 记录探测器信号波形。
- ✓ 根据信号波形面积, 计算入射到探测器粒子个数。



国产塑闪(昊唐SP-101)



国产PMT(北方夜视N-2019)



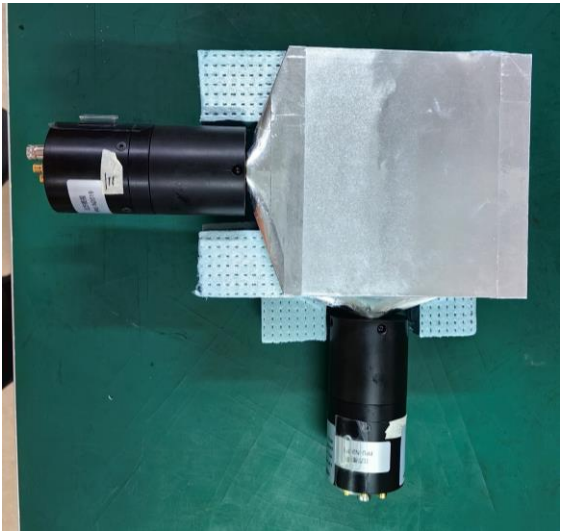
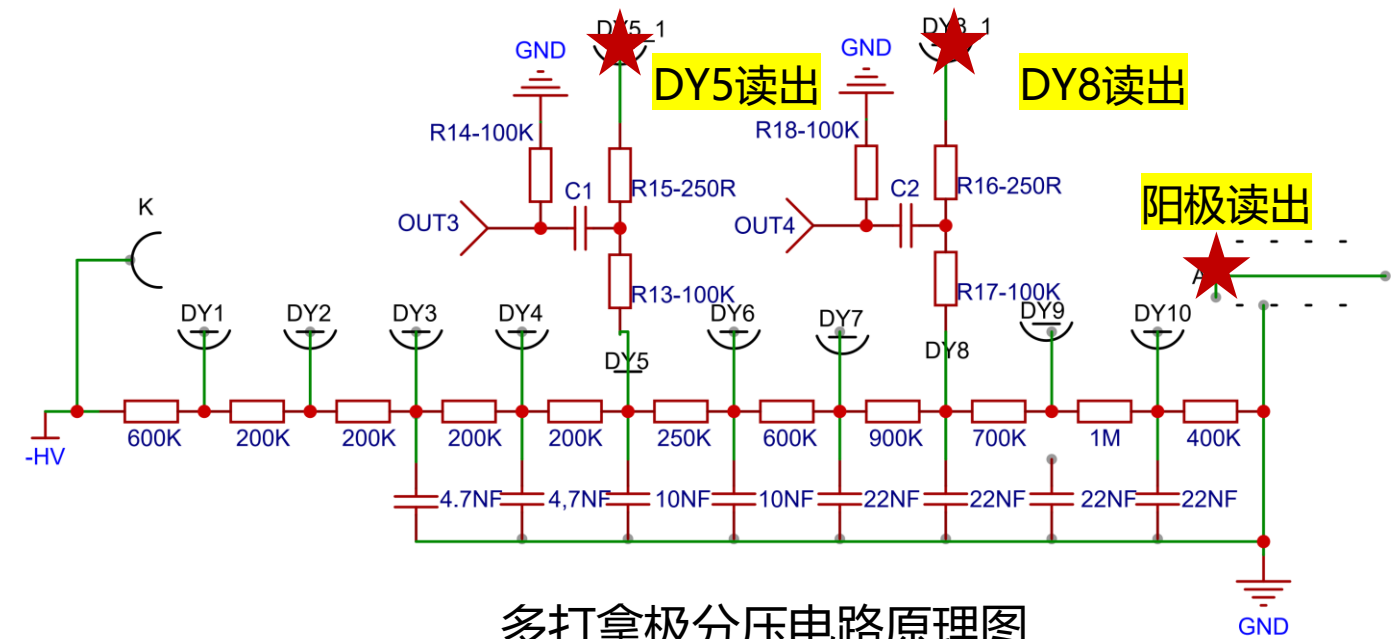
中科采象读出电子学(1GHz)

多打拿极读出分压电路

◆多打拿极读出方案:

- 采用阳极、DY8、DY5读出方案
- 不同打拿极具有不同增益，负责不同的动态范围测量

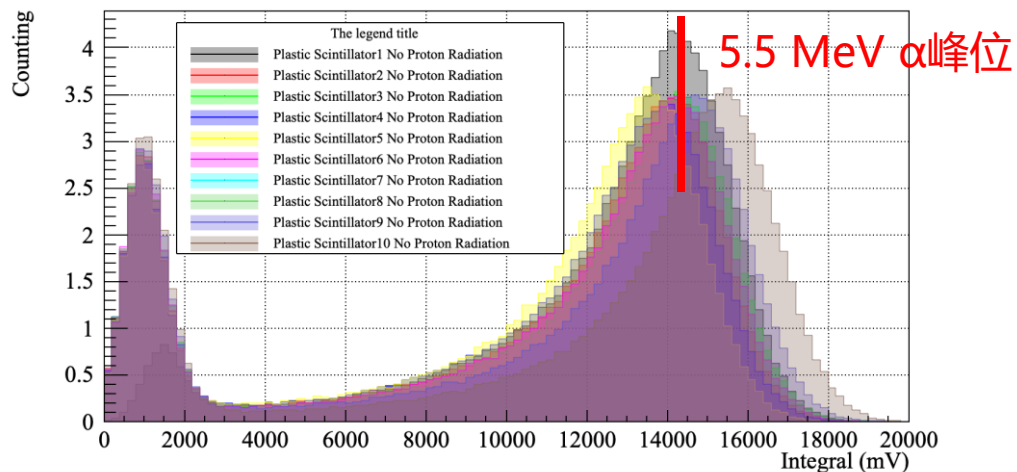
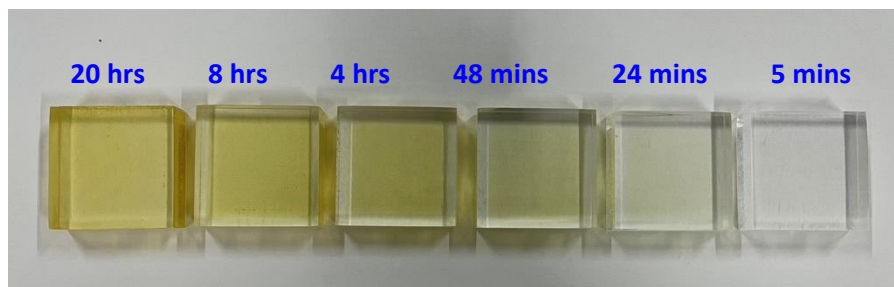
读出电极	增益	动态范围
阳极	1E6	0.5mip-25mip
第8打拿极	6.5E4	6mip-300mip
第5打拿极	1000	200mip-10000mip



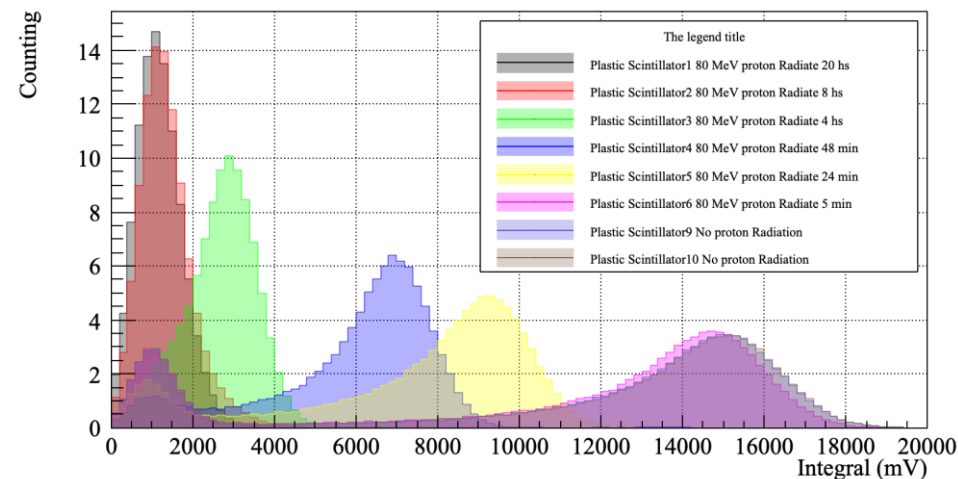
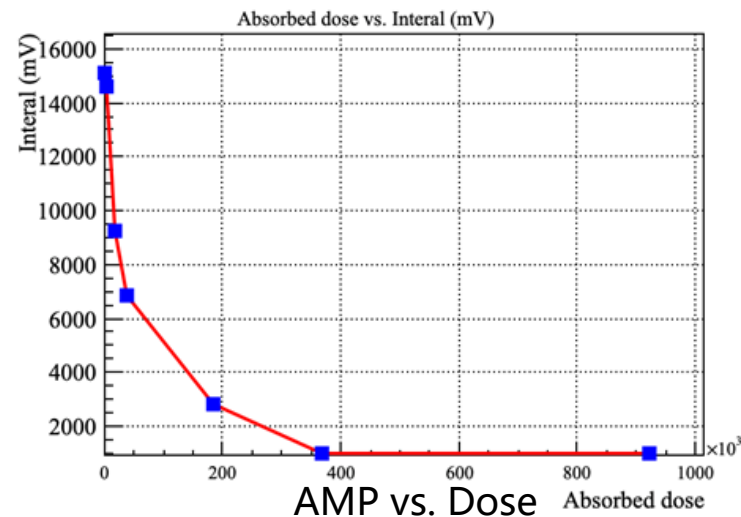
探测器照片

塑闪辐照测试

- 80MeV的质子对塑闪进行辐照测试研究，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。



辐照前



辐照后

Zhang Y, Fan R, Yu Y, et al. Radiation hardness study of BC408 plastic scintillator under 80 MeV proton beam irradiations[J]. NIM. B, 2024, 548: 165247.

LED光源测试

◆ 搭建LED光源测试平台，测量PMT性能：

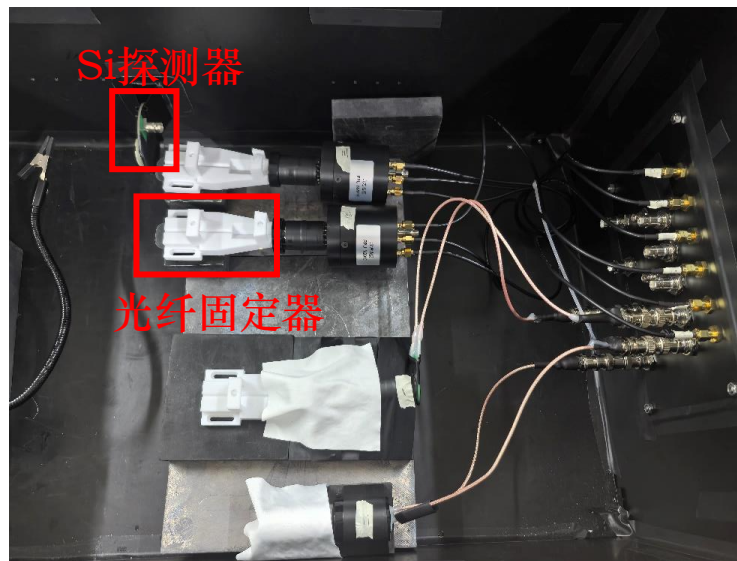
- CAEN SP5601 LED光源：单光子、增益测试
- 发光二极管+积分球：动态范围测试
- Si探测器：在线监测光源光强



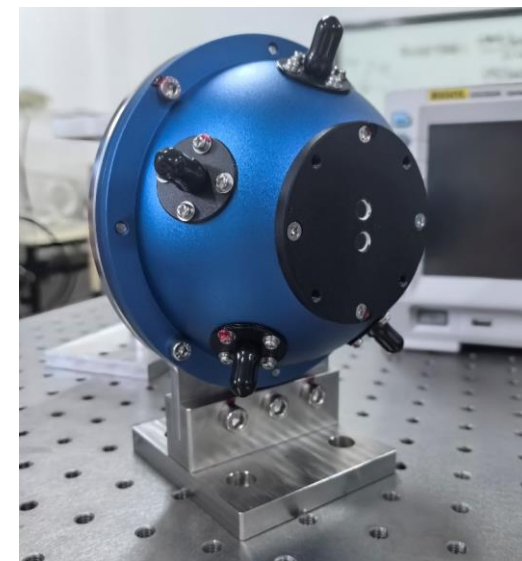
CAEN SP5601 LED光源



屏蔽暗盒



暗盒内部

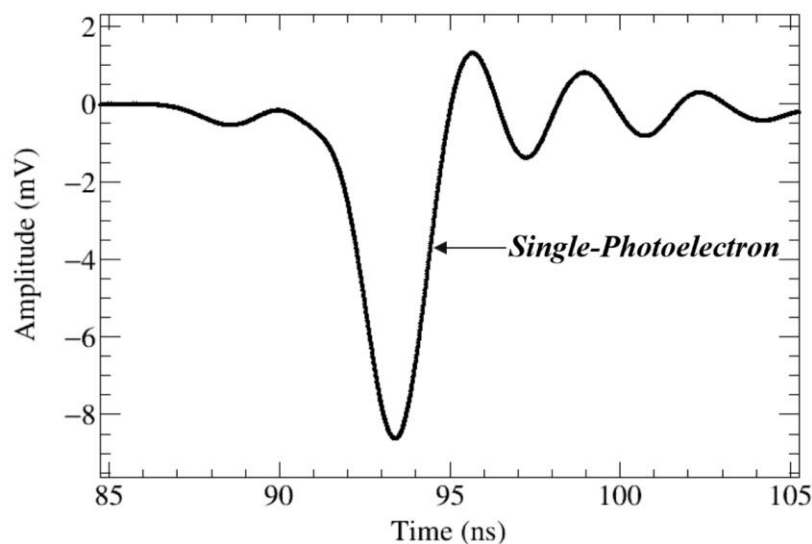


LED用积分球

单光子响应、增益刻度

◆ 测量PMT的单光子响应:

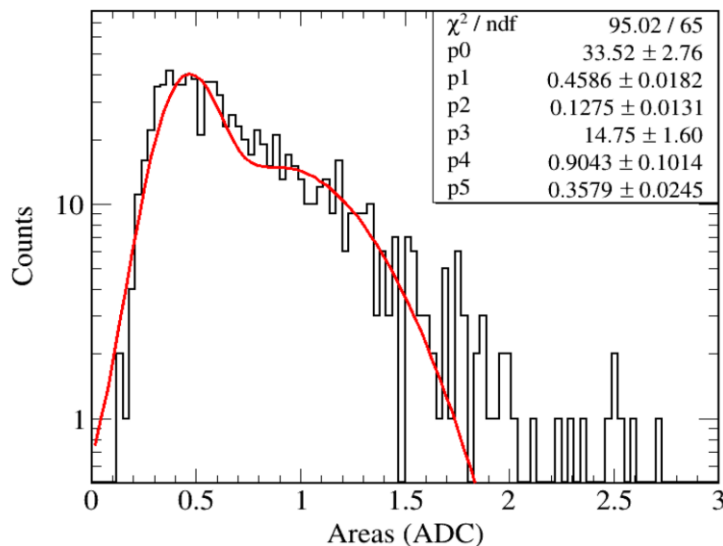
- 固定LED发光频率1kHz, 降低光强使得PMT响应约为发光频率的1/10。



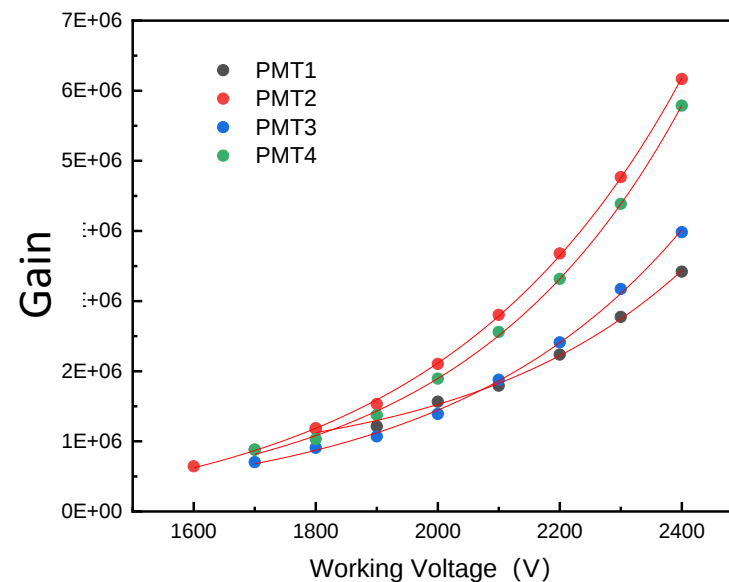
典型单光子信号波形

◆ 刻度PMT增益:

- 测试不同工作电压下的PMT单光子能谱计算增益: $\sim 10^6$



单光子能谱

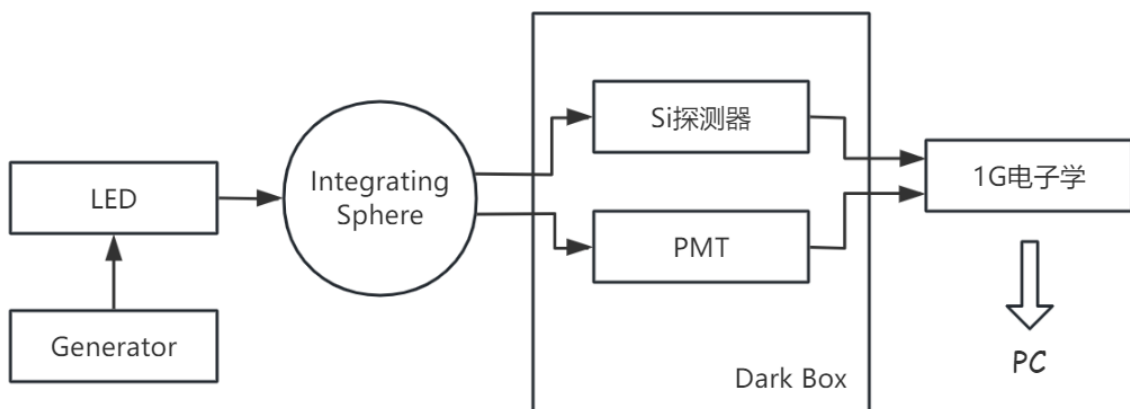


增益曲线

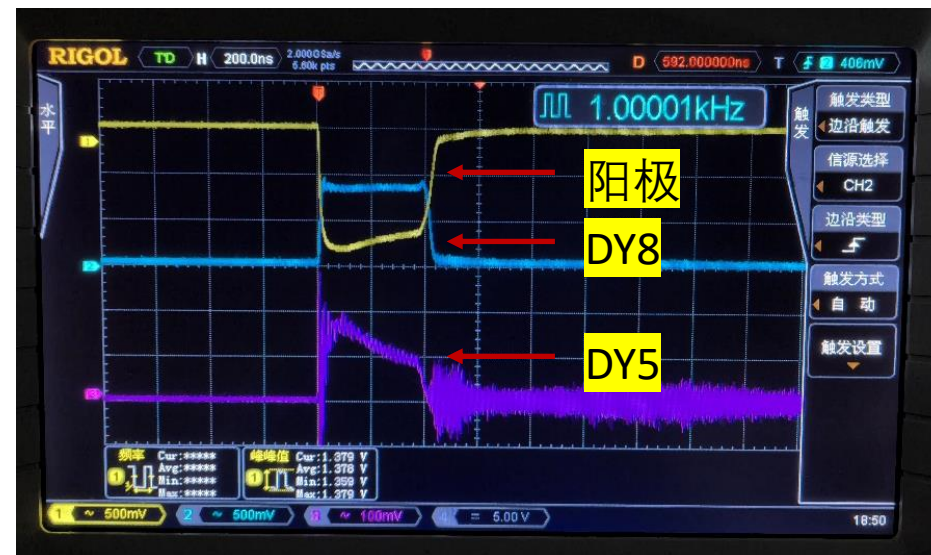
PMT线性工作范围测试

◆ 结合Si探测器和LED光源，标定PMT的线性工作范围。

- 调节LED光强，改变入射到PMT的光子数。
- 使用Si探测器监测LED光强，标定到达PMT的光子数。
- 测试PMT三个打拿级输出（阳极、Dy8、Dy5）信号线性范围。



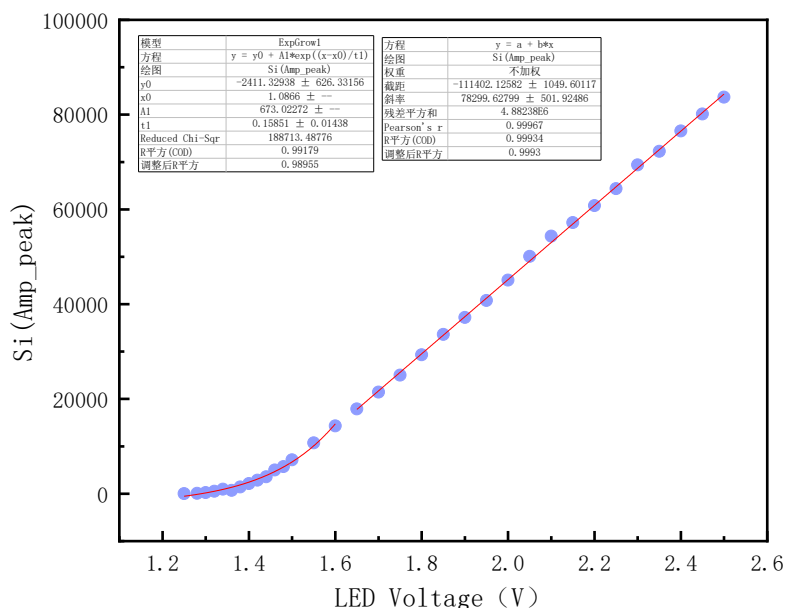
PMT动态范围测试原理图



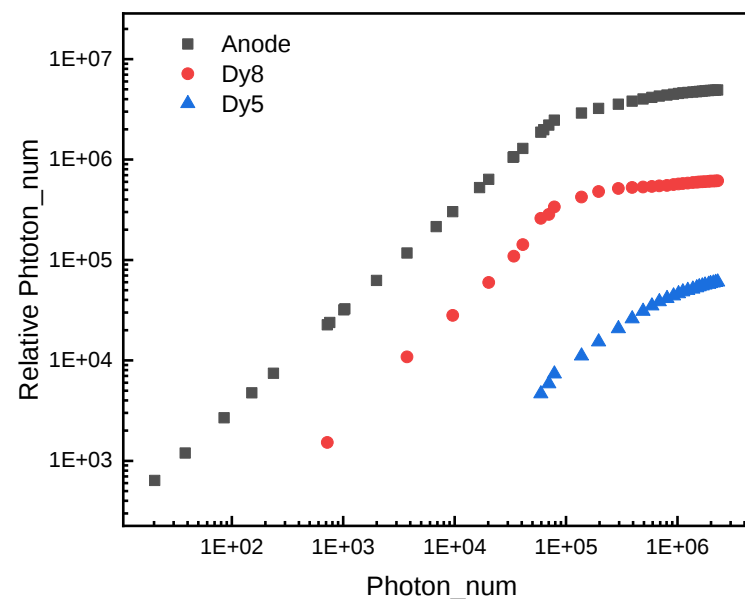
典型PMT信号波形

线性范围结果

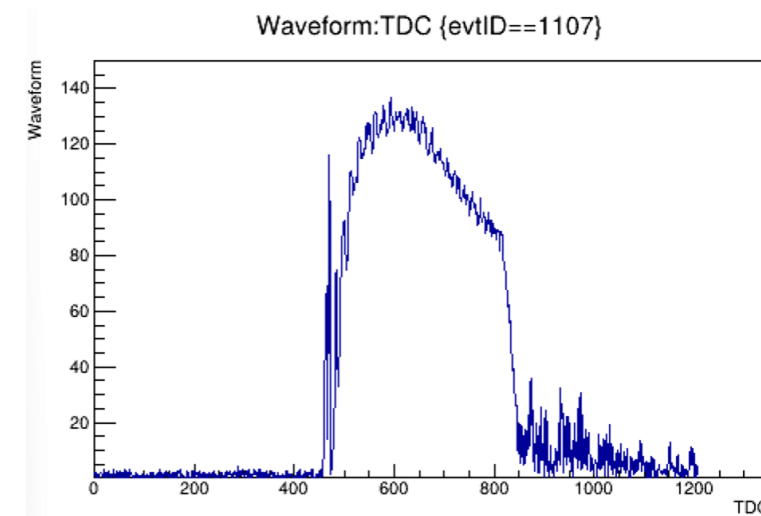
- PMT工作电压：1600V，阳极、DY8的线性范围能够覆盖单光子-6e4个光子。
- 光子数进一步增大时，阳极和DY8信号出现明显的饱和现象，DY5信号线性相对较好。
- DY5信号线性不如预期，其主要原因是分压回路中电流过大，PMT打拿极工作电压变化，目前仍在优化分压电路方案。



LED相对光强 vs. LED工作电压



PMT线性范围测试结果

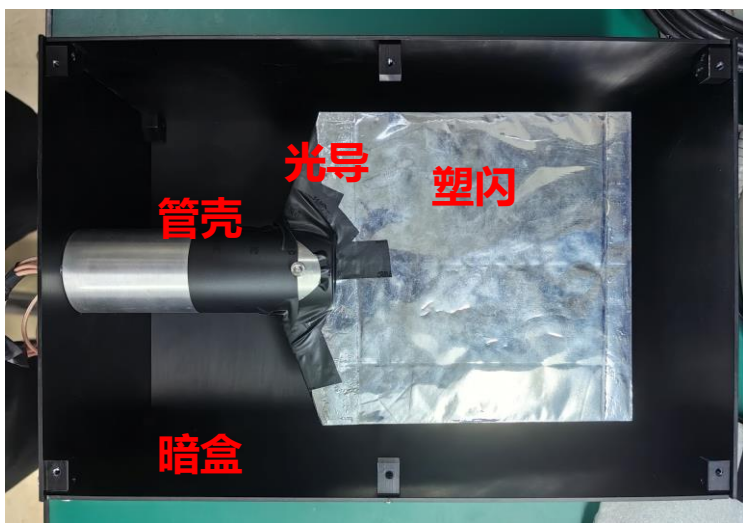


DY5典型信号

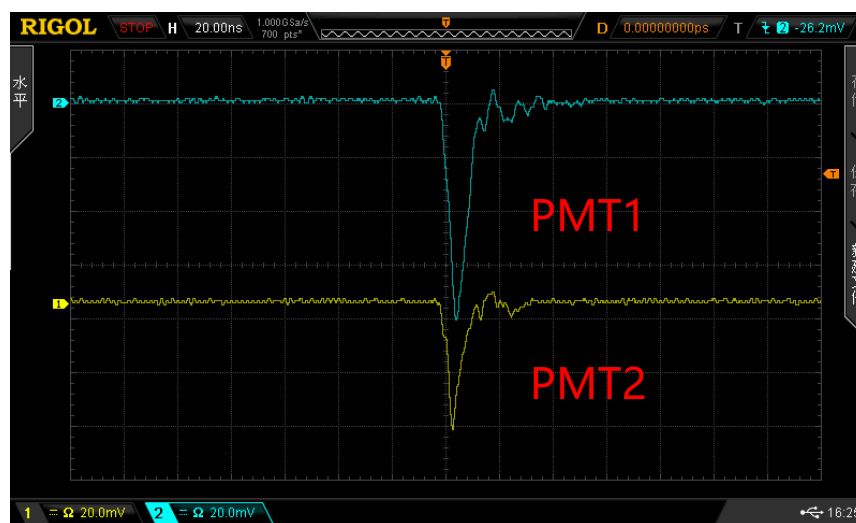
宇宙线测试

◆ 实验室使用两个塑闪+PMT探测器符合测试

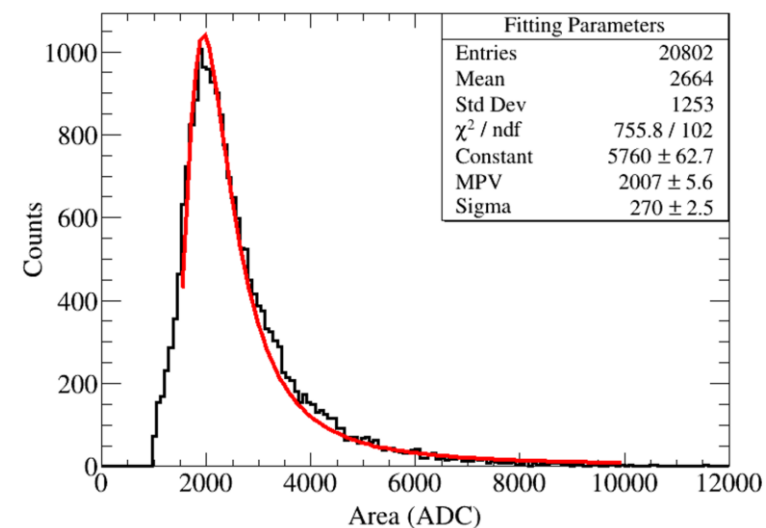
- 宇宙线信号波形
- 宇宙线能谱



实验设置



宇宙线信号波形

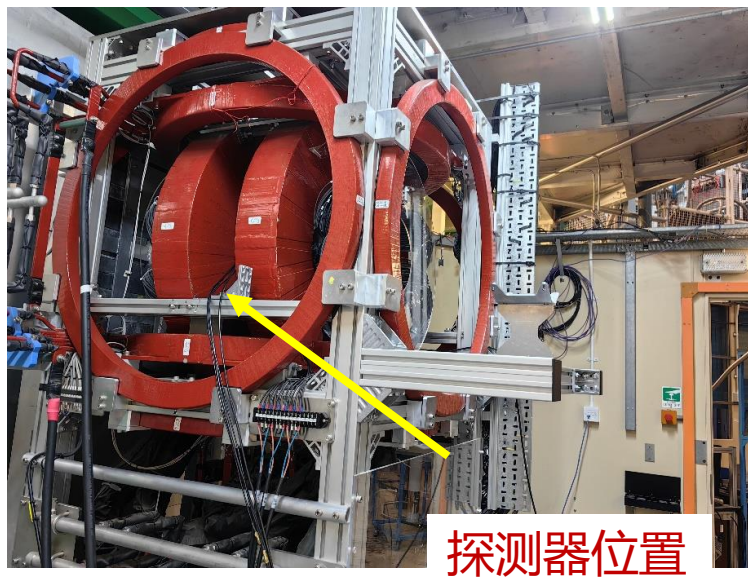


宇宙线能谱

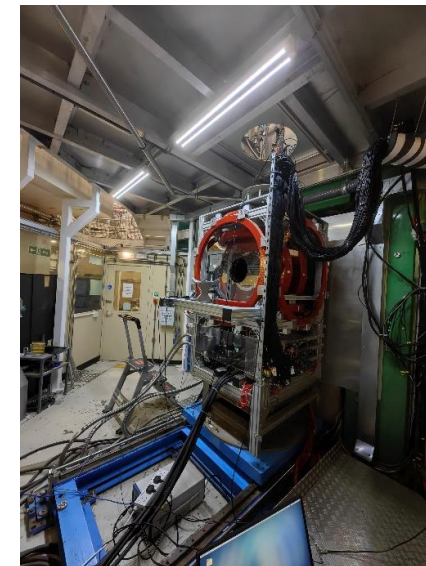
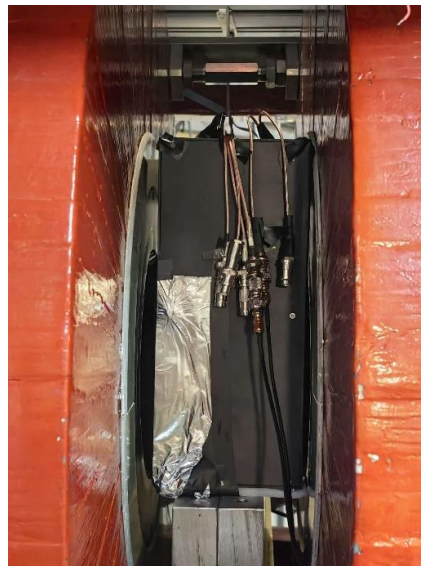
表面缪子束流实验

◆ 束流实验条件

- 束流实验位置位于ISIS-TS1缪子束线的Chronus终端
- 束流粒子为**脉冲表面缪子**，单束团，脉冲宽度：42ns @FWHM
- 准直器为 $\Phi 24\text{mm}$ (束斑尺寸)
- 探测器位于uSR谱仪的样品处
- 电子学为束扩组6.4G的波形采样电子学，采样时间宽度为10 μs



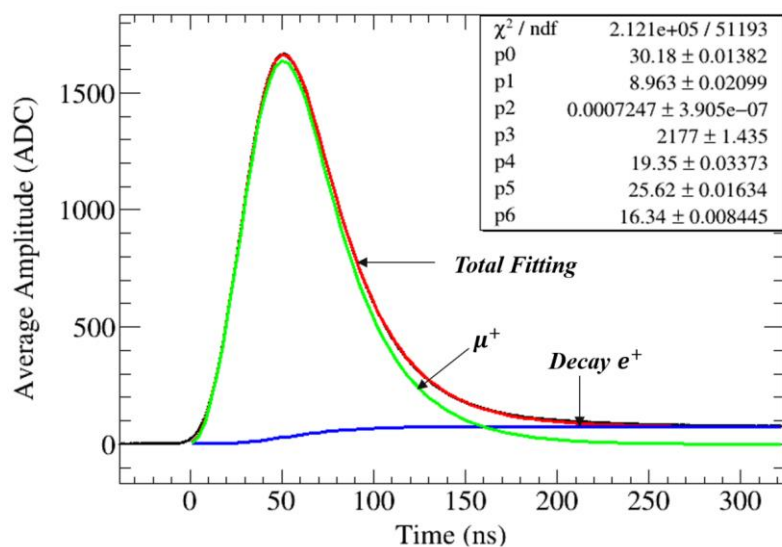
探测器位置



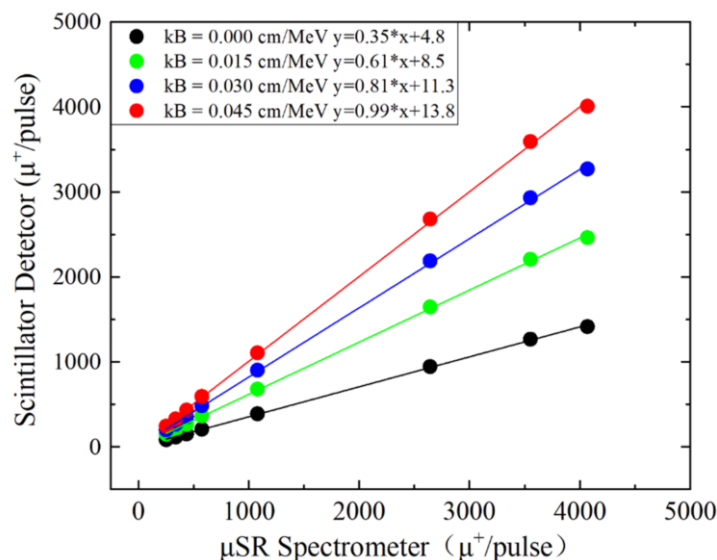
探测器照片

束流实验结果

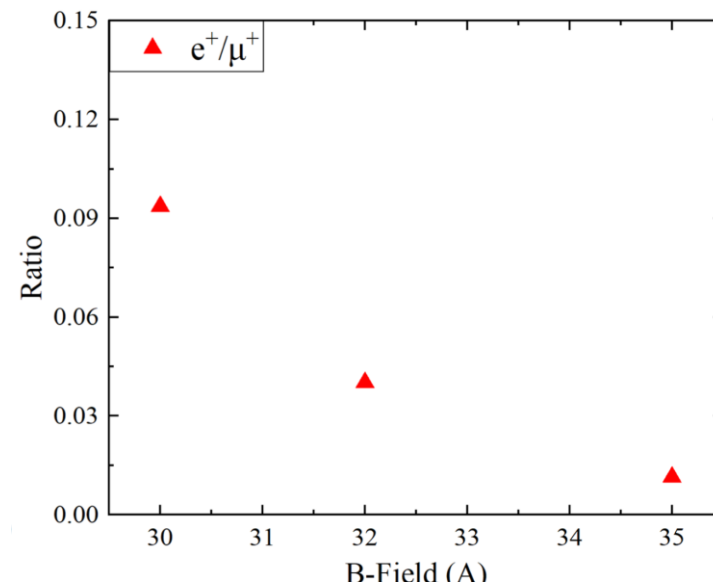
- 使用脉冲形状甄别方法区分信号中的缪子、衰变正电子成分，根据缪子信号成分的面积计算缪子束流流强。
- 改变缪子束流流强，测量不同条件下的缪子流强并与uSR测试结果对比，二者呈现良好的线性关系。
- 脉冲表面缪子在塑闪内部需要考虑Birks效应，当Birks系数为0.045 cm/MeV时，塑闪结果与uSR测试结果一致。
- 改变束流中本底正电子含量，塑闪探测器对本底正电子测试结果与预期一致。



探测器阳极信号波形



塑闪结果 vs. uSR测试结果



束流本底电子结果

Zhang M, Liu J, Fan R, et al. Direct measurement of pulsed surface muon beam intensity using plastic scintillator detector and current shape discrimination method[J]. NIM A, 2025: 170871.

总结

- 根据高能质子弱流测试需求，研制了基于闪烁体+PMT+波形采样的探测器系统。
- 使用质子束流、LED光源、宇宙线、缪子束流对探测器性能进行了验证性测试。
- 辐照测试结果表明塑闪能够用于高能质子流强测试，但不能进行长时间监测。
- LED测试结果表明探测器的线性范围能够达到1-6e4个光子，缪子束流测试结果表明探测器线性范围能够达到1-5000个缪子/pulse。
- 正在进一步优化PMT分压电路方案。