

STCF电磁量能器研究进展

张云龙

核探测与核电子学国家重点实验室

中国科学技术大学

On Behalf of STCF Calorimeter Working group

2024年超级陶粲装置研讨会 兰州

2024年7月9日



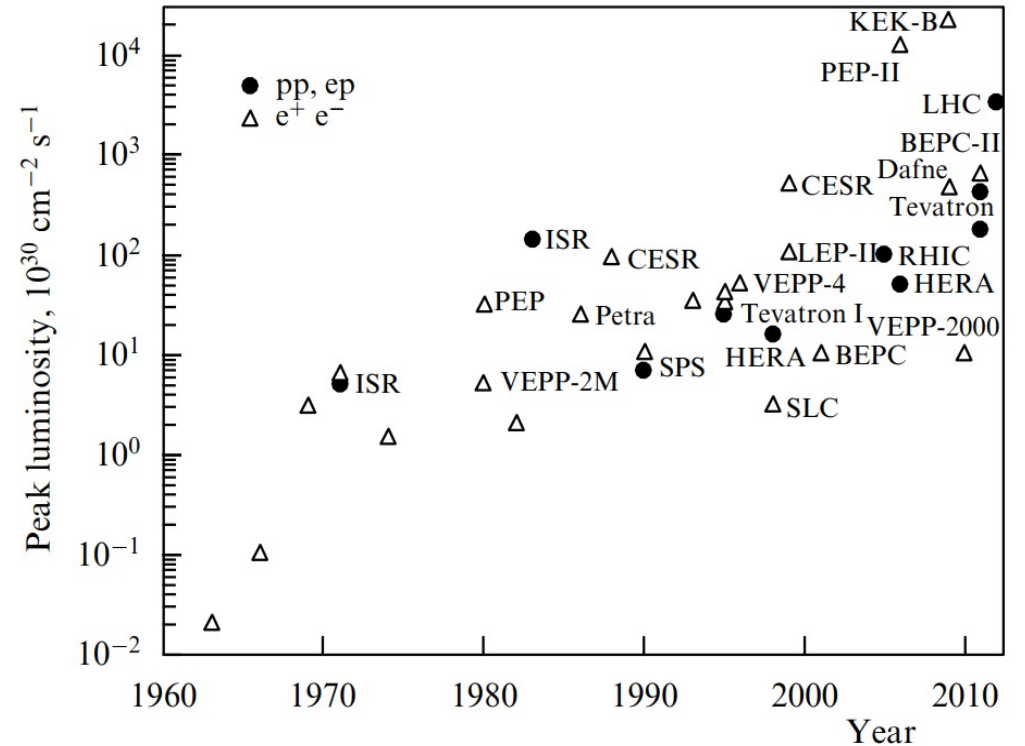
报告提纲

- 下一代高计数率、高精度电磁量能器
- STCF量能器进展
- 总结



高亮度实验

- 高亮度实验是粒子物理发展的一个重要方向
 - 高的物理事例率
 - 极高的本底事例率
 - 事例堆积、辐照剂量
- 这对量能器提出了**新的需求与挑战**
 - 在极高的（本底）事例率下实现高精度测量
 - MHz?
 - 量能器的抗辐射能力
 - 百 kRad?

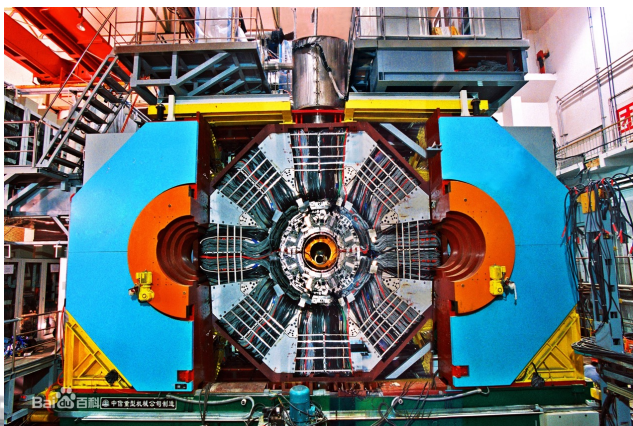


晶体量能器

- 晶体量能器能量分辨好、抗辐射性能优
- 是粒子物理实验电磁量能器的重要选择之一

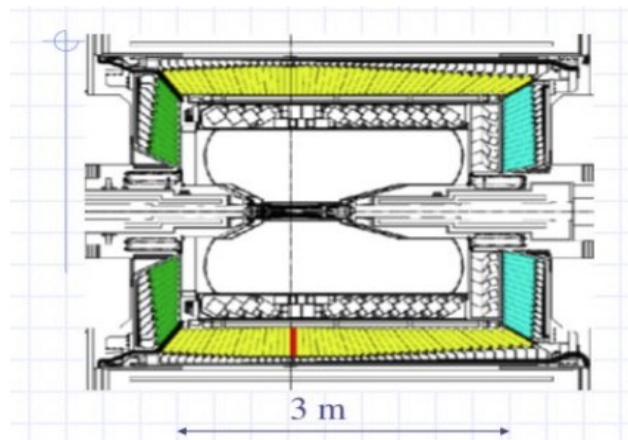
- BESIII 量能器

- CsI(Tl)全吸收型
- 能区: 20 MeV – 2 GeV
- 能量分辨: 优于2.5% @ 1 GeV
- 位置分辨: 6 mm @ 1 GeV



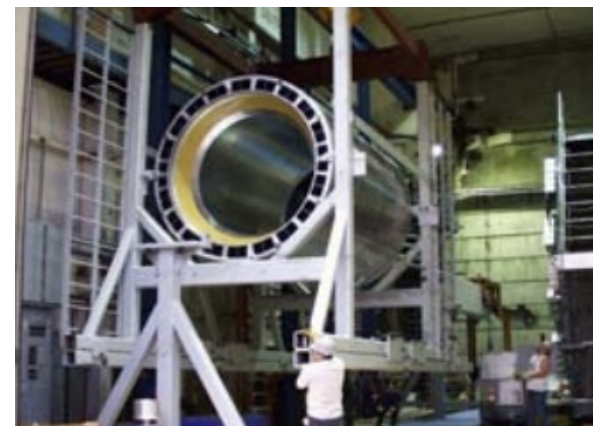
- BELLE 量能器

- CsI(Tl)全吸收型
- 能区: 20 MeV – 8 GeV
- 能量分辨: 优于2% @ 1 GeV
- 位置分辨: 6 mm @ 1 GeV



- Babar 量能器

- CsI(Tl)全吸收型
- 能区: 15 MeV – 8 GeV
- 能量分辨: 优于3% @ 1 GeV
- 角分辨: 4.16 mrad @ 1 GeV



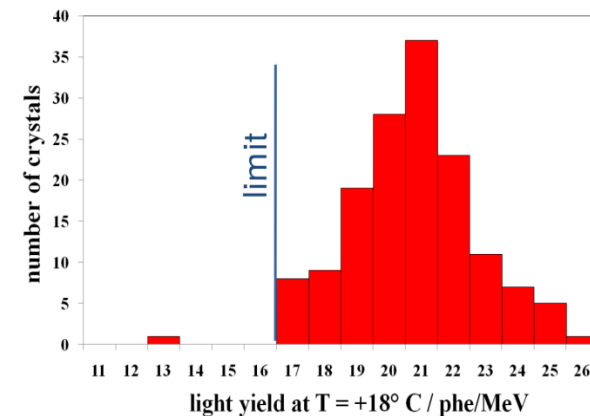
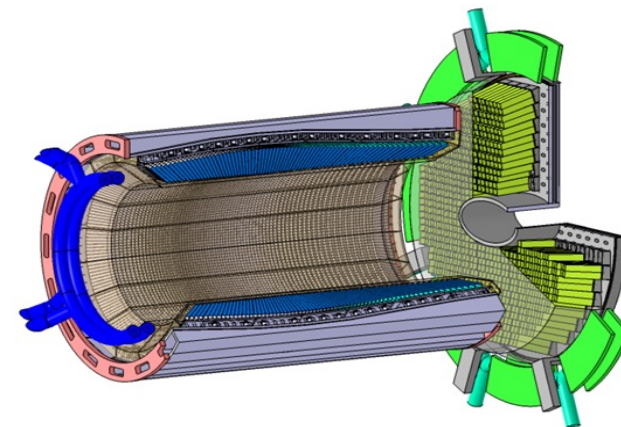
下一代高亮度实验晶体量能器的选择

- 下一代晶体量能器
 - 要求晶体具有更快的发光衰减时间
 - 更高的抗辐照能力

Crystal	Pure CsI	LYSO	GSO	YAP	PWO	BaF:Y
Density (g/cm ³)	4.51	7.40	6.71	5.37	8.30	4.89
Melting Point (°C)	621	2050	1950	1872	1123	1280
Radiation Length (cm)	1.86	1.14	1.38	2.70	0.89	2.03
Moliere Radius (cm)	3.57	2.07	2.23	4.50	2.00	3.10
Refractive index	1.95	1.82	1.85	1.95	2.20	1.50
Hygroscopicity	Slight	No	No	No	No	No
Luminescence (nm)	310	402	430	370	425 420	300 220
Decay time (ns)	30 6	40	60	30	30 10	600 1.2
Light yield (%)	3.6 1.1	85	20	65	0.3 0.1	1.7 4.8
Dose rate dependent	No	No	TBA	TBA	Yes	No
D(LY)/dT (%/°C)	-1.4	-0.2	-0.4	TBA	-2.5	TBA
Experiment	KTeV Mu2e				CMS ALICE PANDA	
单价	0.5	4	-	-	1 (参考)	1.3



- PANDA实验组选择了新型PWO (PWO II) 晶体作为其电磁量能器的灵敏探测单元
 - 相对光产额, 0.6, 比PWO高1.5倍
- PANDA组的一个关键技术攻关: 提高PWO II光产额
 - 两个大面积APD与PWO II晶体耦合
 - 量能器运行在-25度环境下, 光产额提高4倍
 - 最终实现了约100 pe/MeV水平



PWO II晶体光输出与剂量率存在依赖关系

PANDA有可能需要像CMS实验一样另建一套激光监测系统

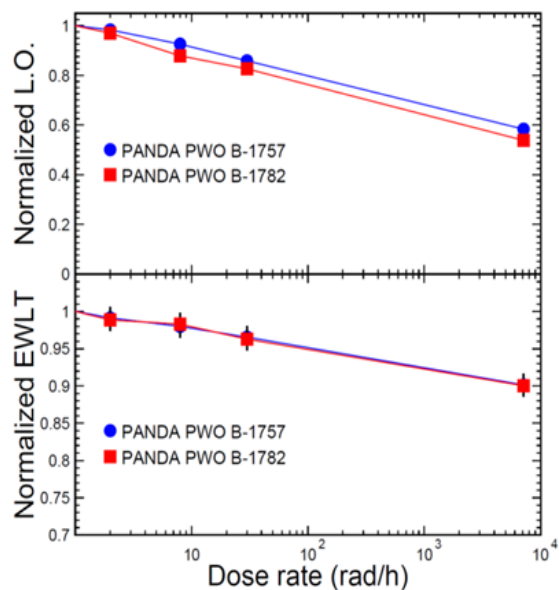
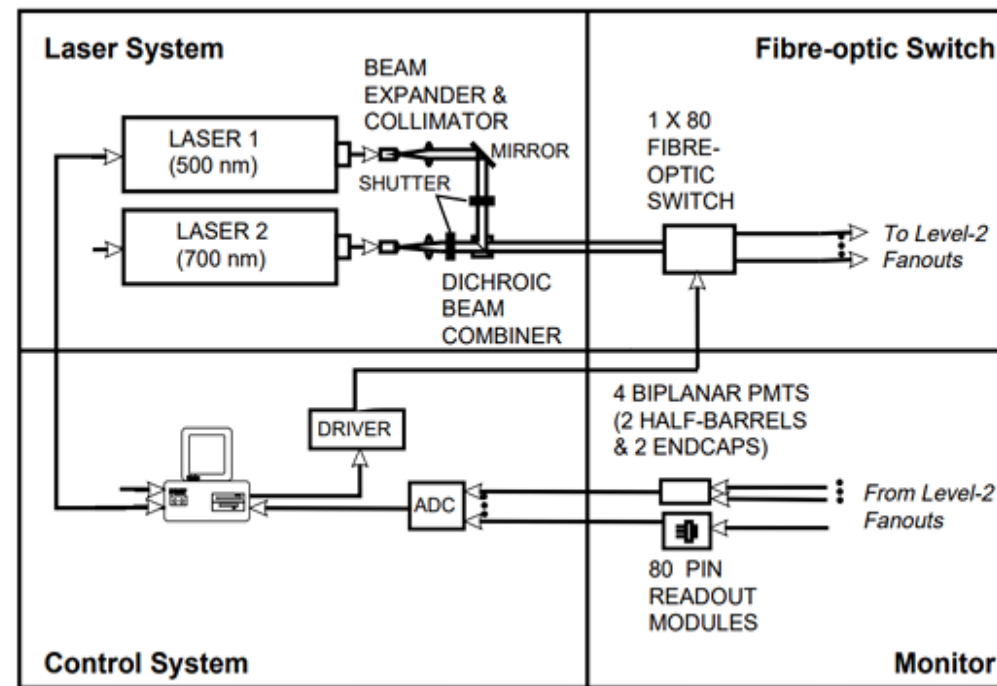


Figure 10. Normalized LO and EWL T as a function of the dose rate for PWO-II crystals

Table 2 LO and EWL T loss of PWO samples in equilibrium under different dose rates

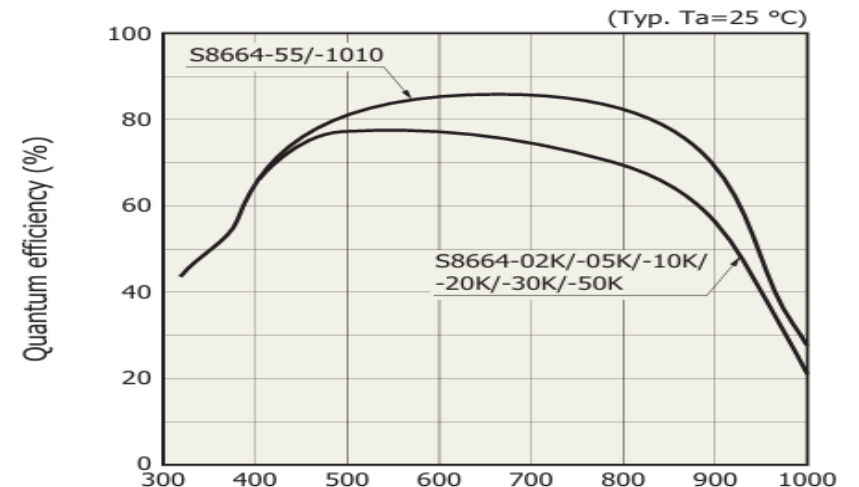
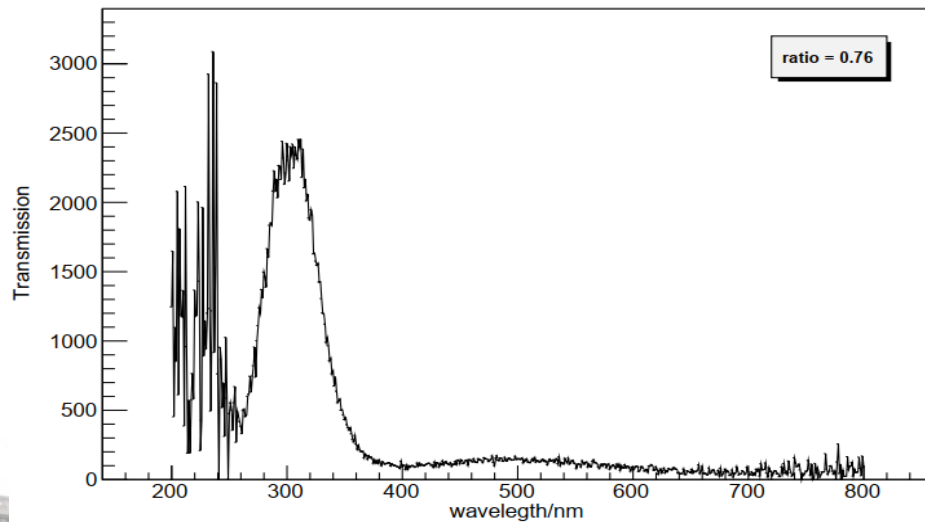
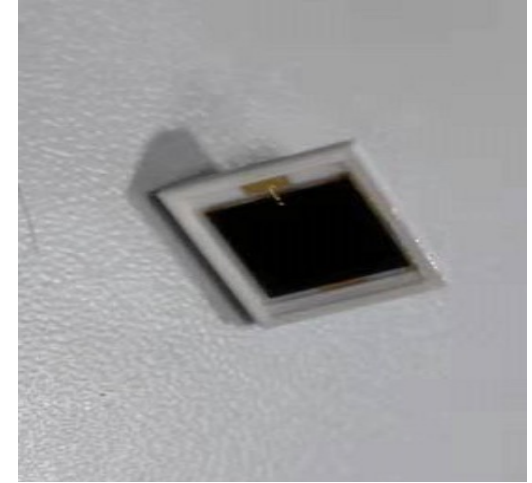
Samples	PWO B-1757	PWO B-1782
Initial LO (p.e./MeV)	12.0	13.2
Initial EWL T (%)	70.0	70.1
LO Loss (%)		
2rad/h	2	3
8rad/h	8	12
30rad/h	14	17
7160rad/h	42	46
EWL T Loss (%)		
2 rad/h	0.8	1.1
8 rad/h	2.0	1.7
30rad/h	3.4	3.7
7160rad/h	9.9	10.0



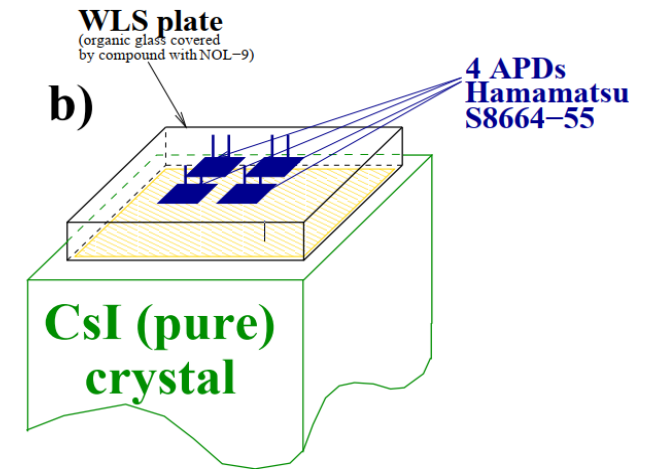
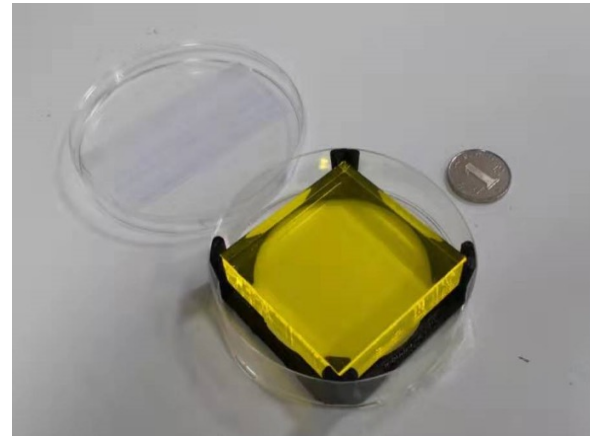
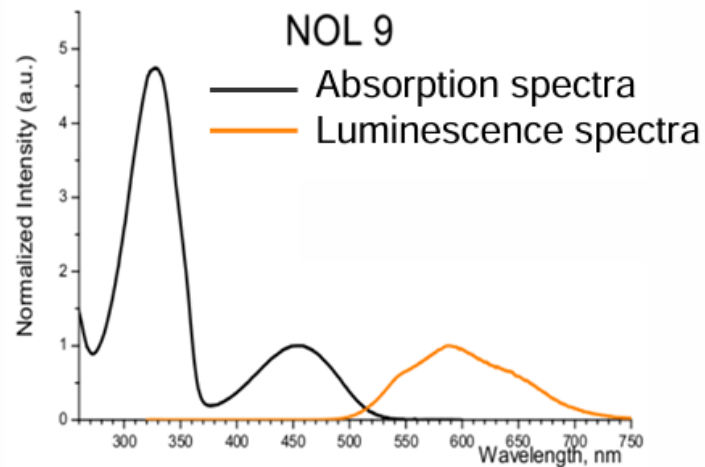
PWO II晶体光输出与剂量率的关系

CMS激光监测系统

- BELLE II 实验组选用了pCsI晶体开展了预研
- pCsI晶体光衰减时间：6ns (f), 30ns (s)
- 荧光产额：1.1 (f), 3.6 (s)
- 发光波段在310 nm附近，与常规APD的QE匹配度不好
 - QE~40%@310 nm

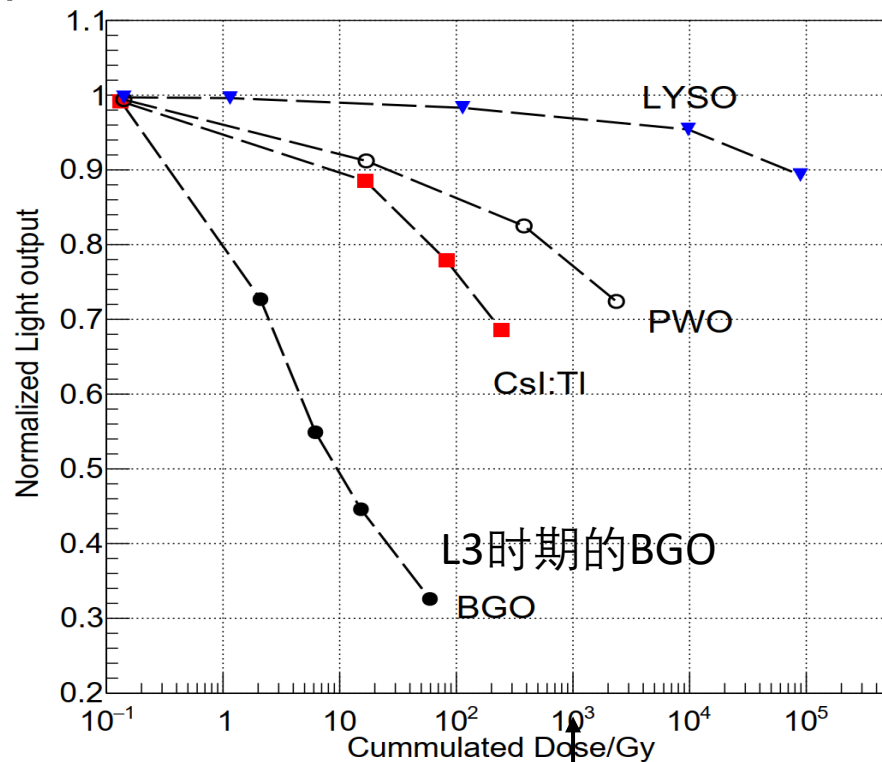
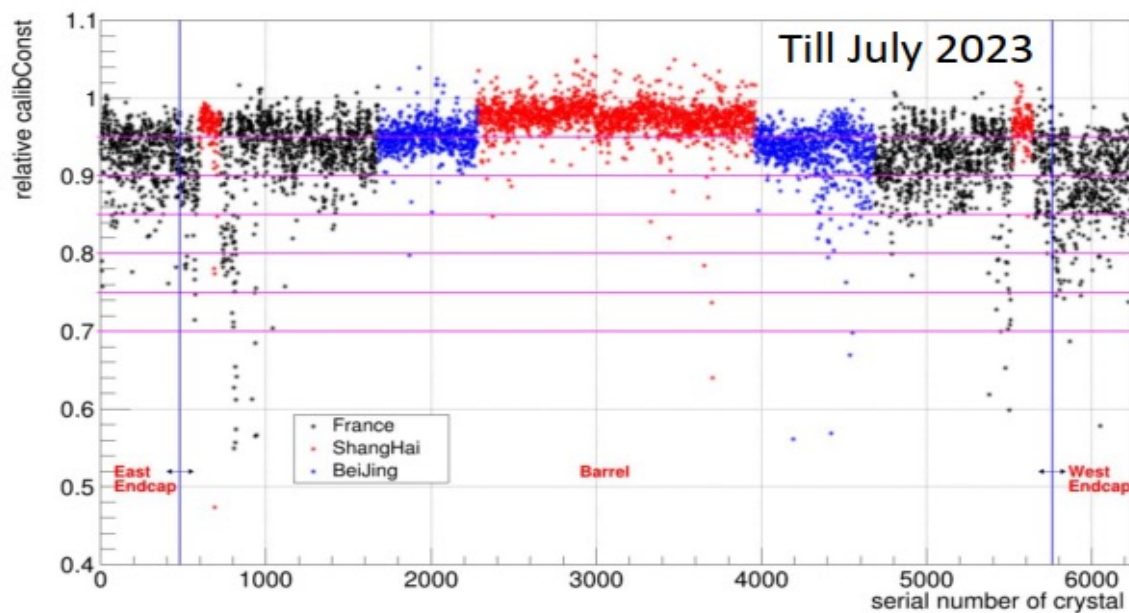


- BELLE II 实验组尝试了一种新型的波长位移材料, NOL-9
- 可以把 ~ 310 nm的荧光转换到588nm, 与APD更好匹配, 取得了很好的效果
- 光产额提高到 ~ 100 pe/MeV



晶体的抗辐射性能

- 晶体的抗辐射性能是下一代量能器面临的又一挑战
 - BESIII CsI(Tl)量能器运行15年的总剂量约为1-2 kRad
 - 光产额出现了不同程度的下降，大部分在10%以内
 - 下一代高亮度实验有可能达到100 kRad，光产额下降一半？

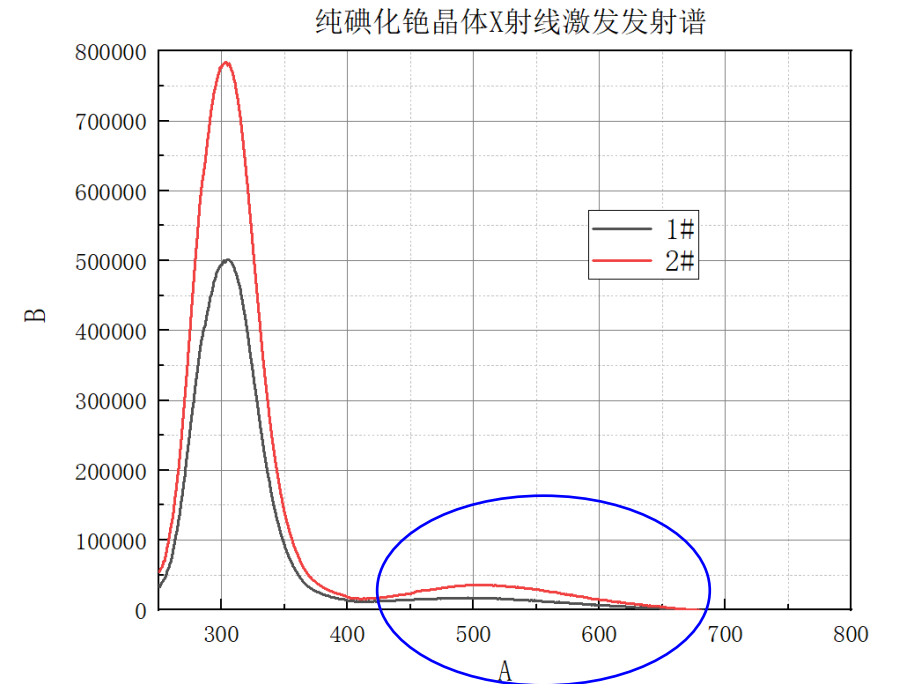


BESIII CsI (Tl) 晶体辐照损伤



pCsI晶体的抗辐射性能

- 对于pCsI晶体，影响抗辐射能力的因素
- 外源性
 - 原材料中的有害金属杂质
 - 原料处理过程中引入的水、氧等
- 内源性
 - 晶体生长过程中，温度梯度、下降速率的波动，会引起晶格畸变，产生点缺陷
- 这些缺陷一方面影响了pCsI晶体自身的抗辐射性，另一外缺陷发光，产生了慢成分（~us）



需要更加严格的原料提纯，更加精确的生长工艺控制，以提高pCsI晶体的抗辐射性能

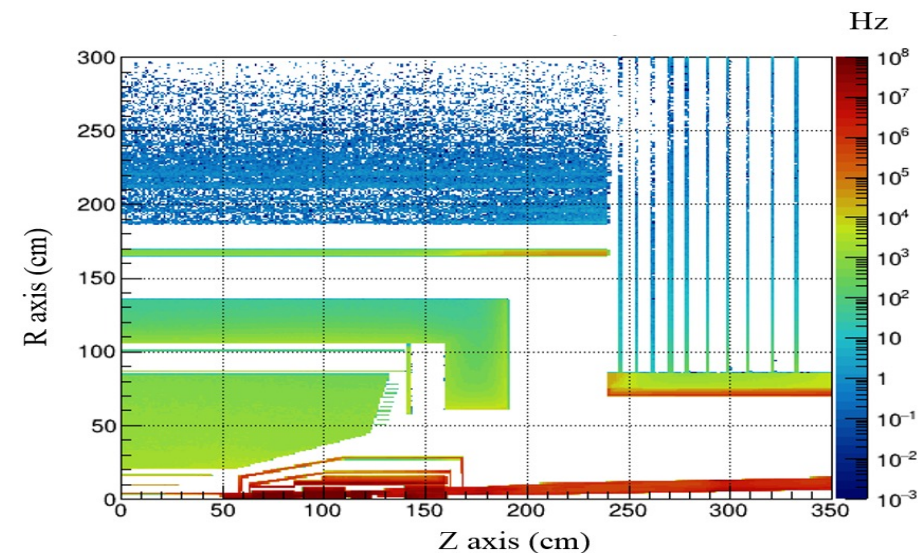
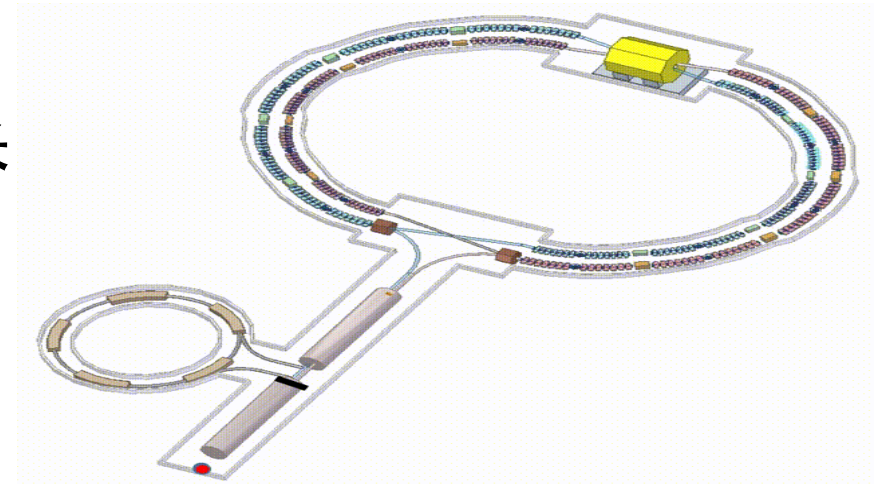


超级陶粲装置 (STCF)

Super Tau-Charm Facility

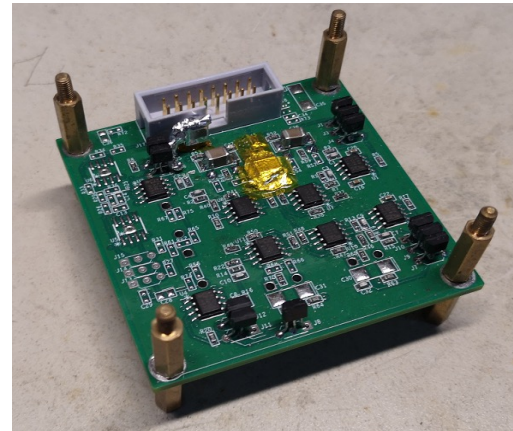
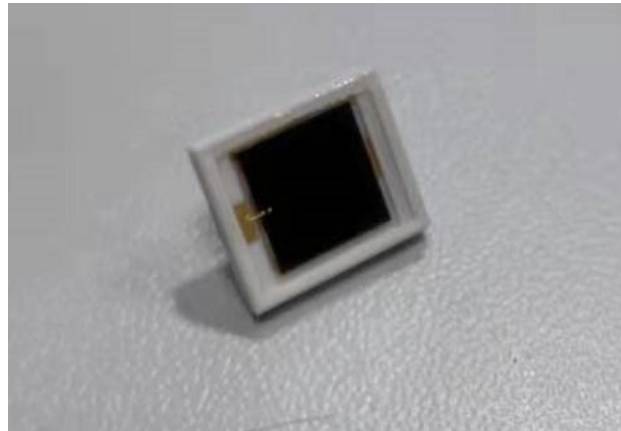
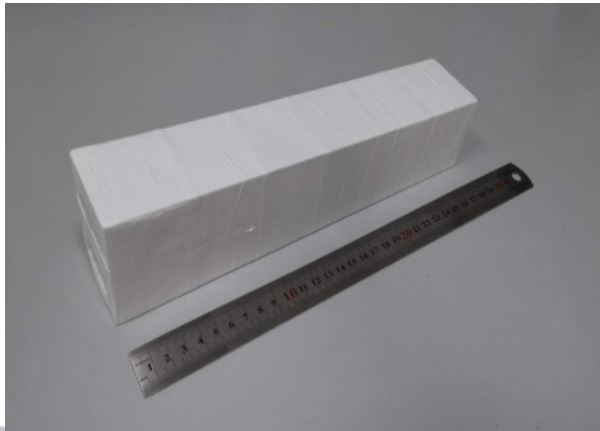
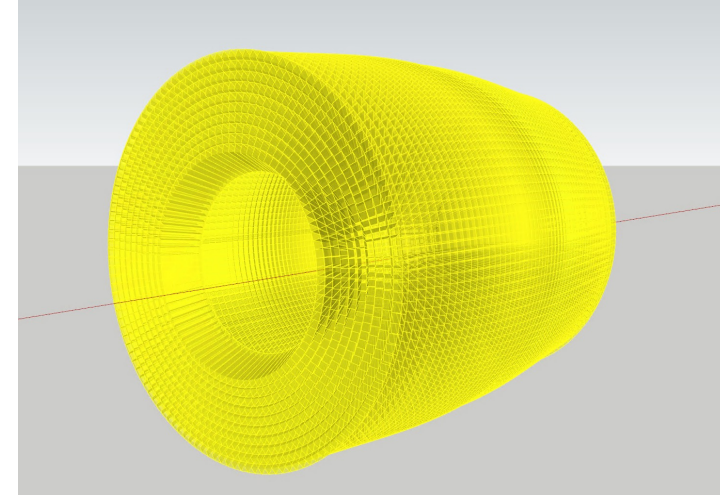
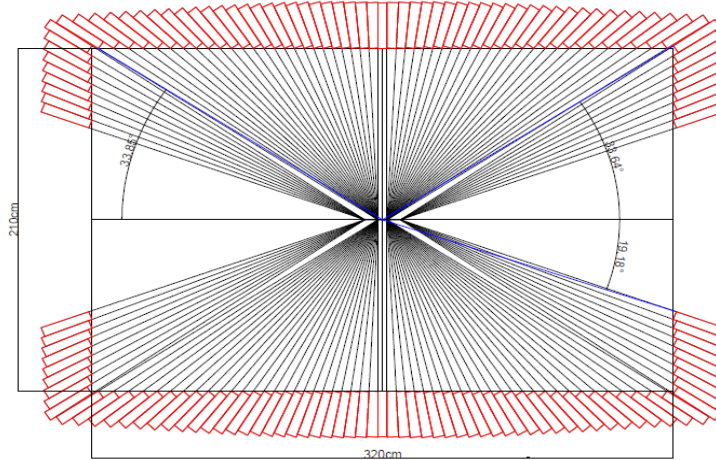
- ◆ 对称型双环对撞机： 注入器~300米， 对撞主环~800米
- ◆ 质心能量： 2-7 GeV,
亮度： $> 0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ @ 4 GeV
- ◆ 具有进一步提升亮度和实现极化束流的潜力

- High Event Rate: ~ MHz background event rate
- Precise Energy Resolution: $< 2.5\%$ @ 1 GeV
- Good Position Resolution: ~ 5 mm @ 1 GeV
- Good Time Resolution: 300 ps @ 1 GeV



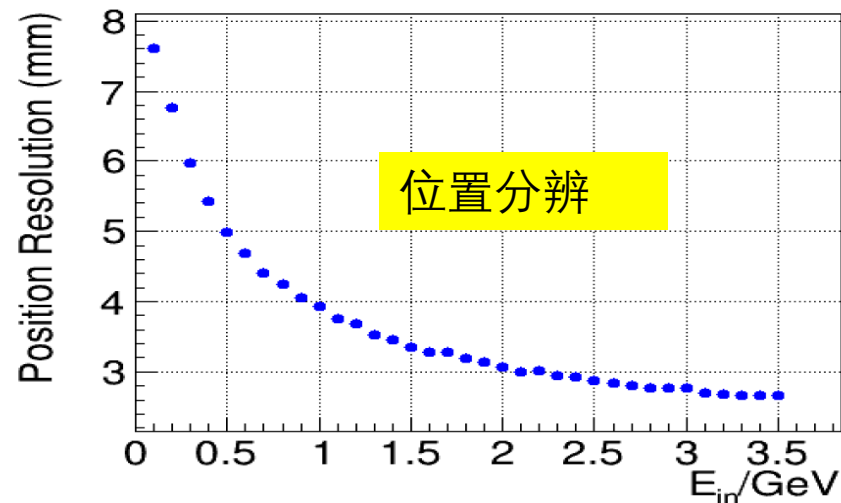
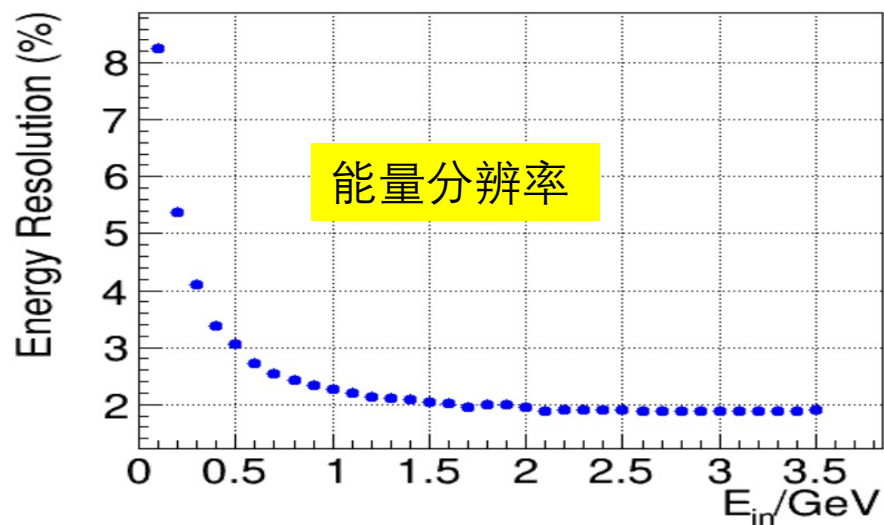
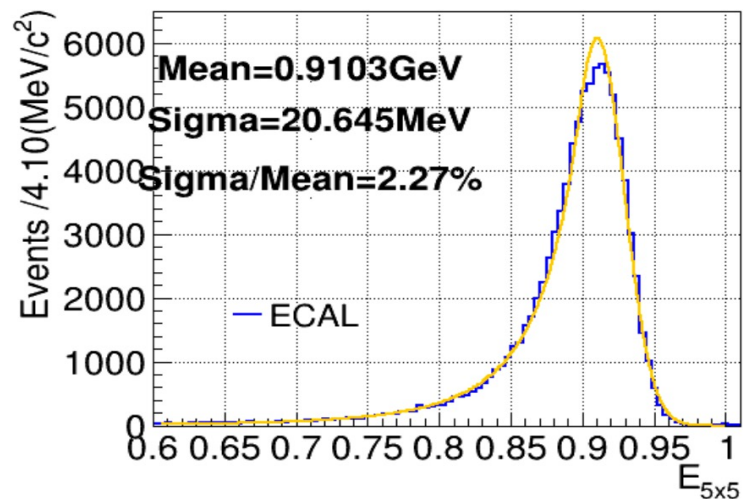
电磁量能器回顾

- 纯碘化铯晶体
 - 晶体数: 8670
- 雪崩光二极管
 - 大面积阵列拼装
- 电荷灵敏方案, 波形采样读出



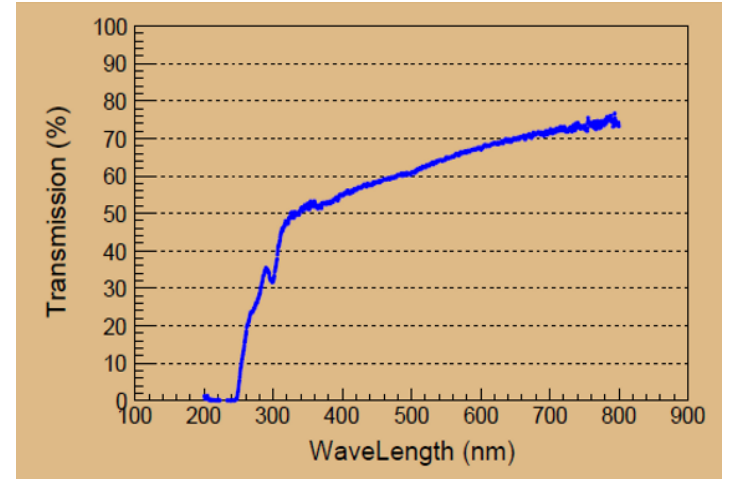
电磁量能器性能

- 能量分辨率优于2.5% @ 1 GeV
- 位置分辨优于5 mm @ 1 GeV

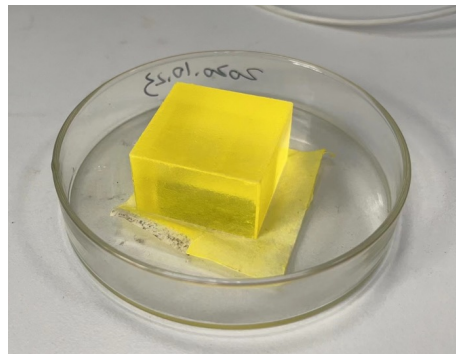
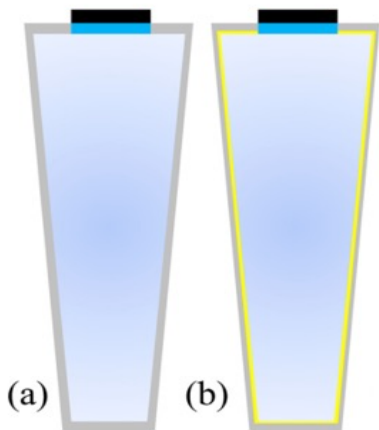


新的尝试

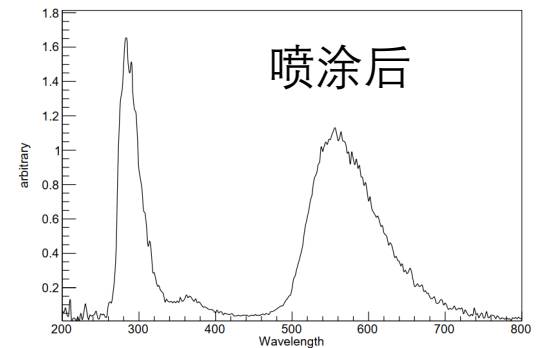
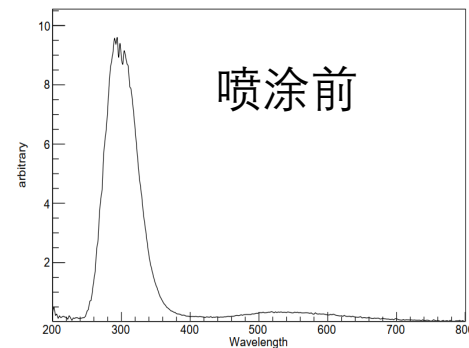
- 对于大尺寸晶体，晶体的荧光**自吸收效应**不能忽略
 - ~30%@310nm
 - ~70%@600nm
- 可以把晶体表面喷涂NOL波长位移材料，在荧光光子第一次与晶体表面作用时就被转换
 - 模拟结果显示，光产额可以提高近2倍



28cm长pCsl晶体荧光传输效率



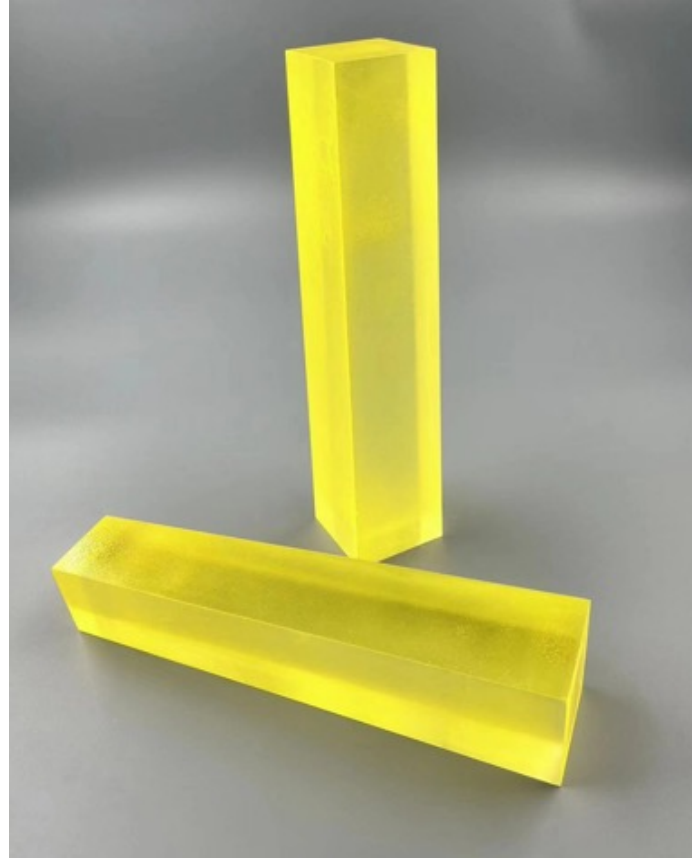
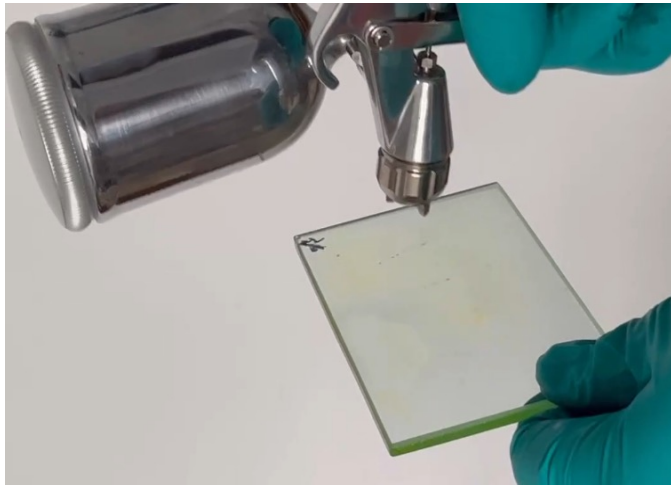
pCsl喷涂尝试



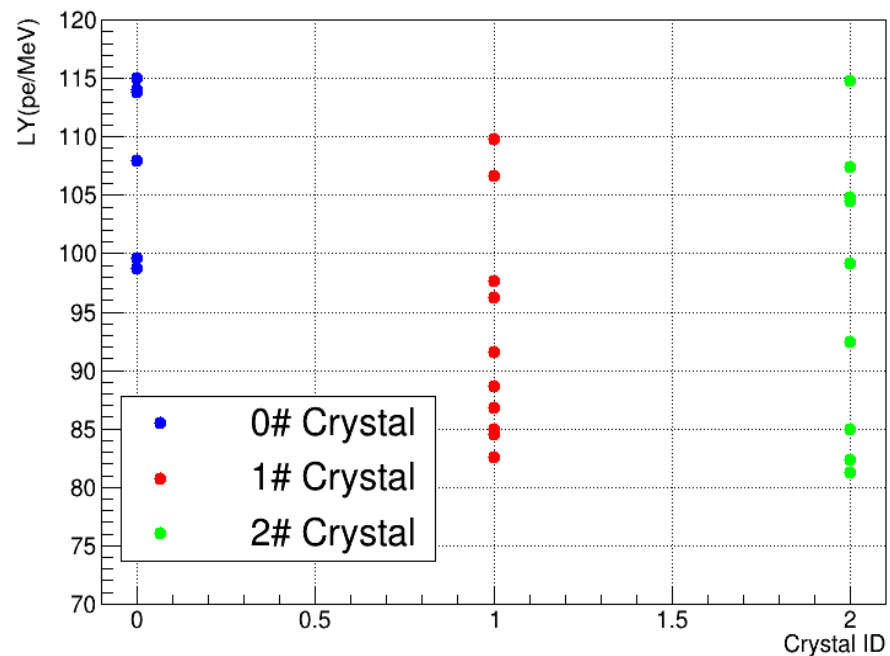
长波段光子大量增加

pCsl晶体荧光产额

- 利用喷枪摸索喷涂工艺
- 把WLS材料喷涂在晶体表面
 - 玻璃、小晶体、大晶体



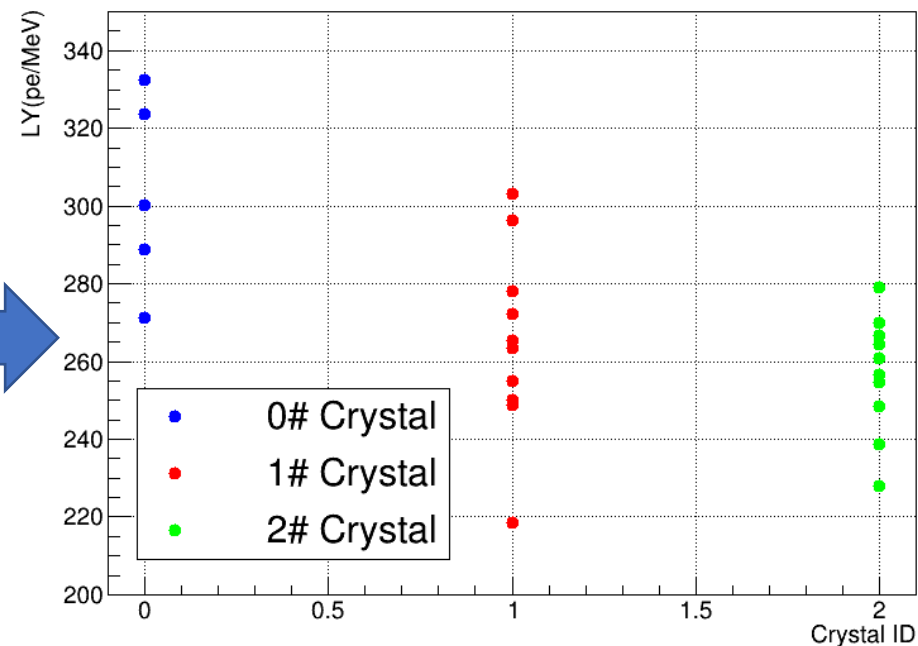
pCsI晶体荧光产额



喷涂WLS前

0#型号晶体平均光产额: 108.2 pe/MeV
1#型号晶体平均光产额: 92.4 pe/MeV
2#型号晶体平均光产额: 98.7 pe/MeV

喷涂
前后



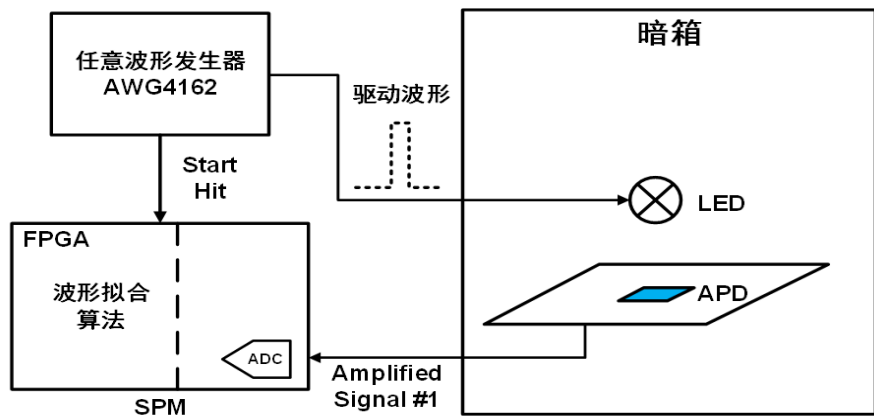
喷涂WLS后

0#型号晶体平均光产额: 302.8 pe/MeV
1#型号晶体平均光产额: 265.7 pe/MeV
2#型号晶体平均光产额: 256.7 pe/MeV

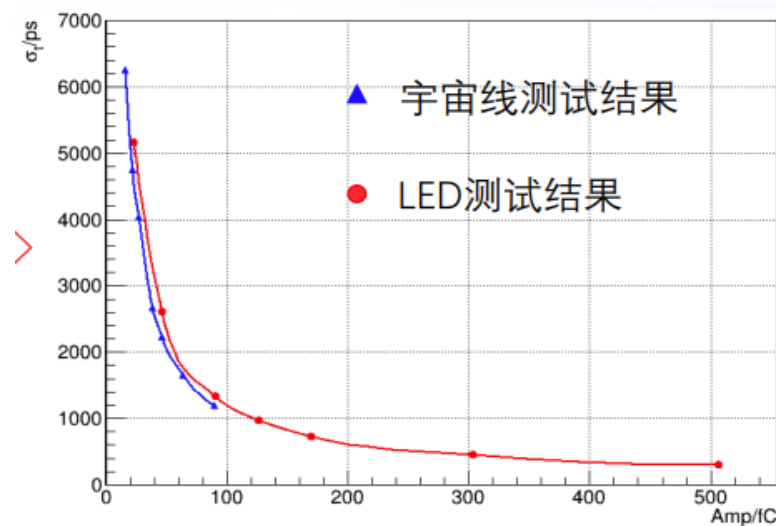
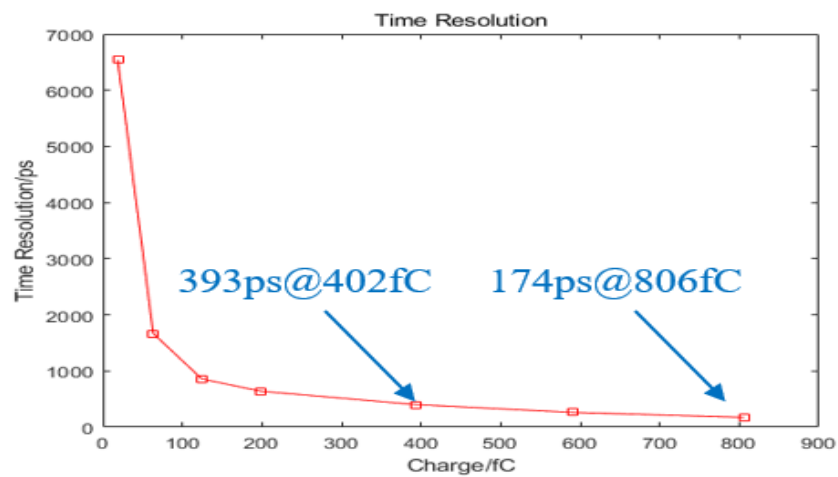
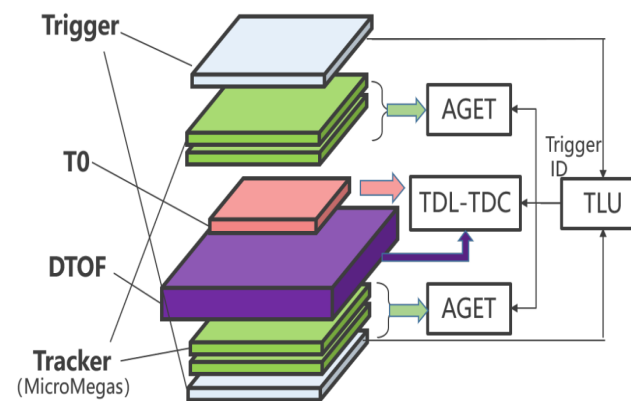


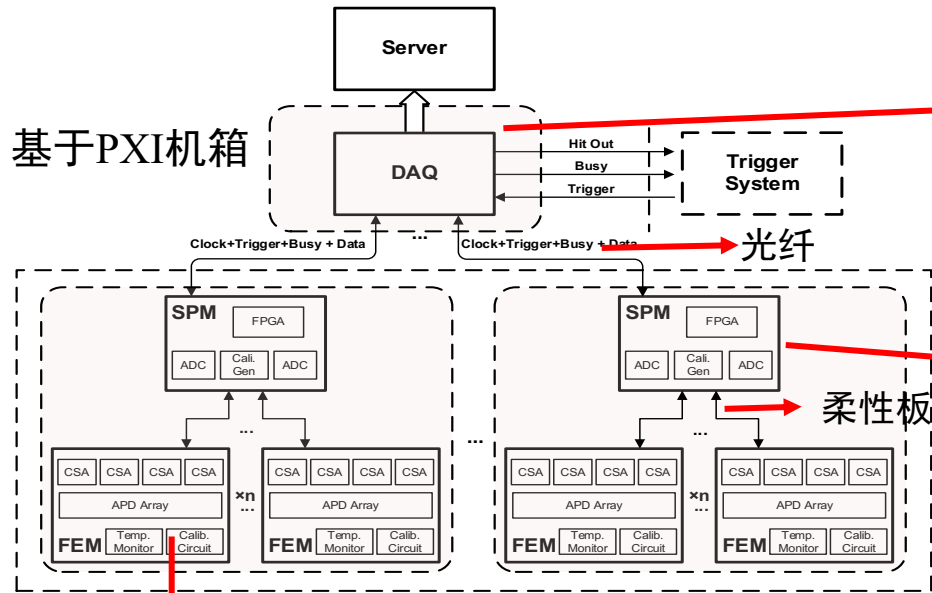
时间性能

• LED测试

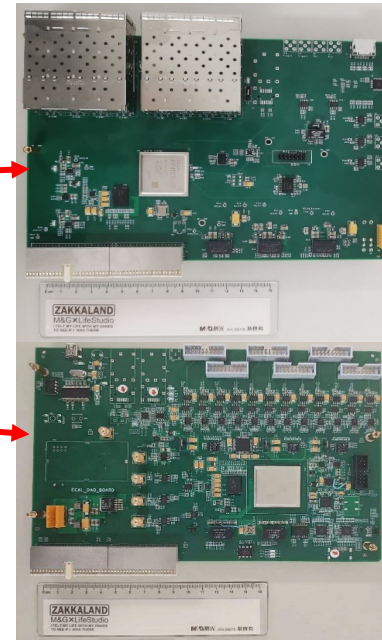


• 宇宙线测试





读出电子学原理样机系统

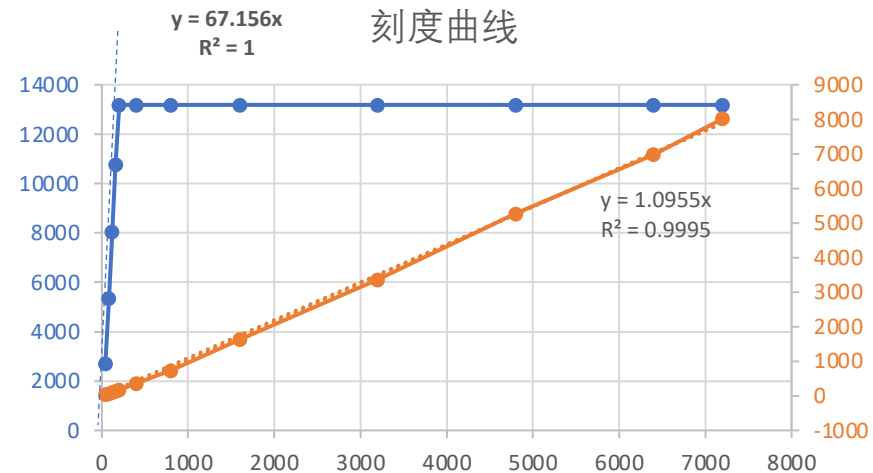


- 数据汇总模块(DAQ)
 - ◆ 分发系统时钟
 - ◆ 接收信号处理模块数据
 - ◆ 数据打包
 - ◆ 与其他系统通信

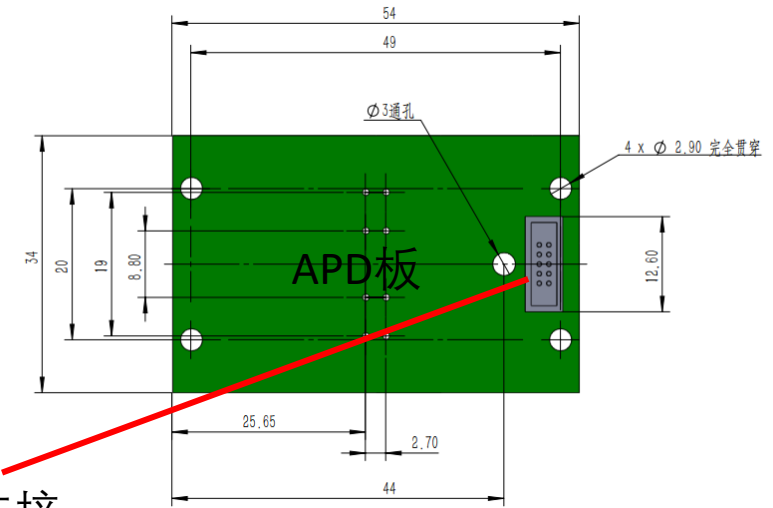
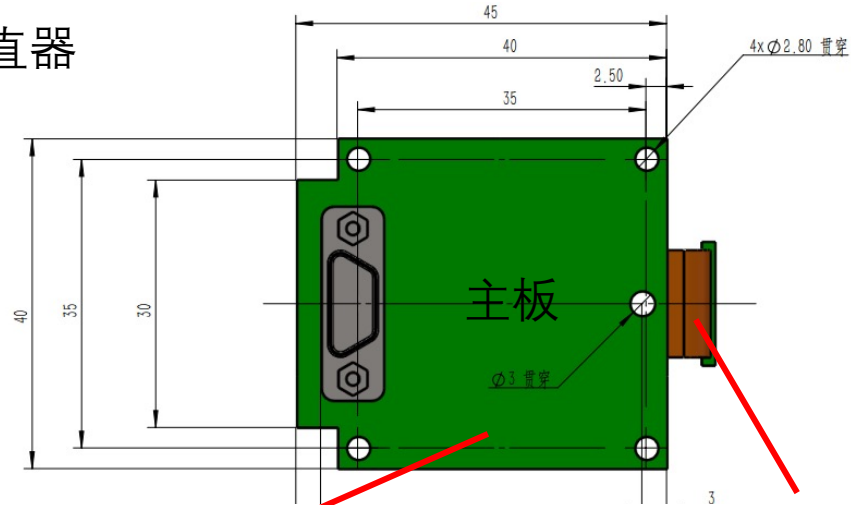
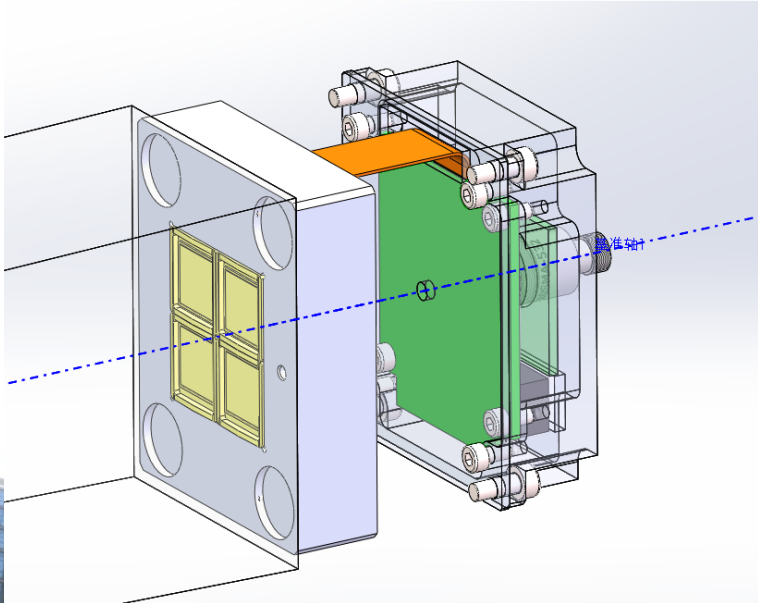
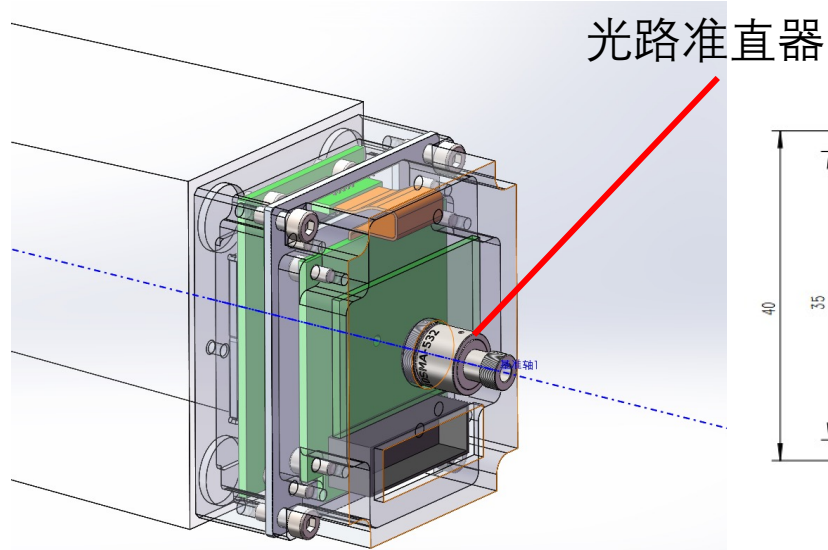
- 信号处理模块(SPM)
 - ◆ 接收前端数据
 - ◆ 波形数字化
 - ◆ 提取能量时间信息
- V2改版计划(SPM)
 - ◆ 差分信号输入
 - ◆ 更改连接器
 - ◆ 添加温度监控
 - ◆ 添加高压监控



- 前端模块(FEM)
 - ◆ 双层结构
 - ◆ 4 APD-CSA 通道
 - ◆ 高低增益
- V2改版计划(FEM)
 - ◆ 差分信号输出
 - ◆ 更改连接器
 - ◆ 改为三层结构
 - ◆ 添加温度传感器

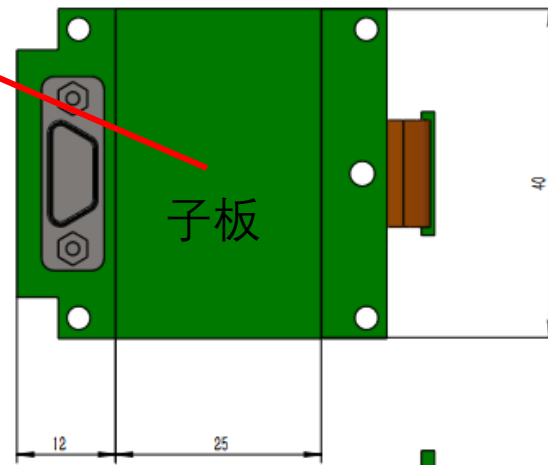


机械设计—前端模块



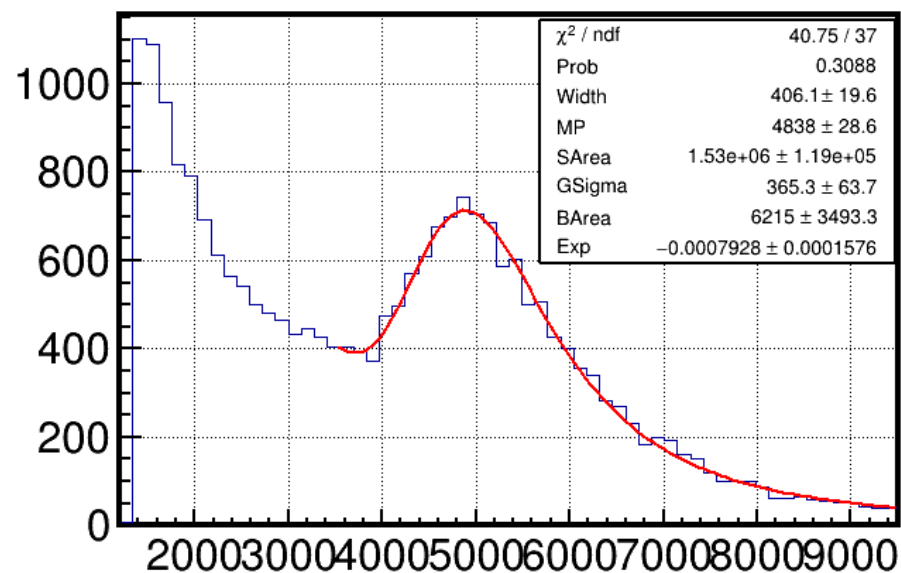
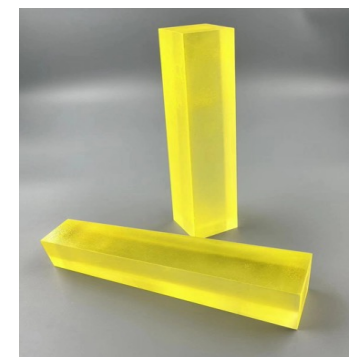
排针连接

柔性板连接

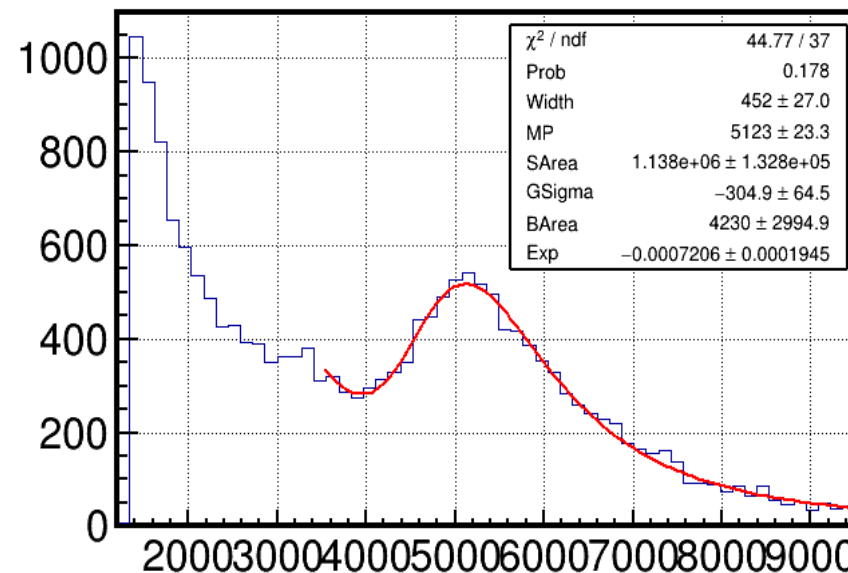
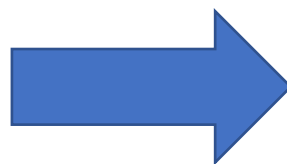


- 由三个组件构成
 - 主板——CSA电路
 - 子板——增益求和
 - APD板——放置APD

- 封装前，对晶体光产额的抽测，与年初结果基本一致
 - 分别为300 pe/MeV和320 pe/MeV
 - 应该是环境温度造成的



#0-1: 300.1 pe/MeV

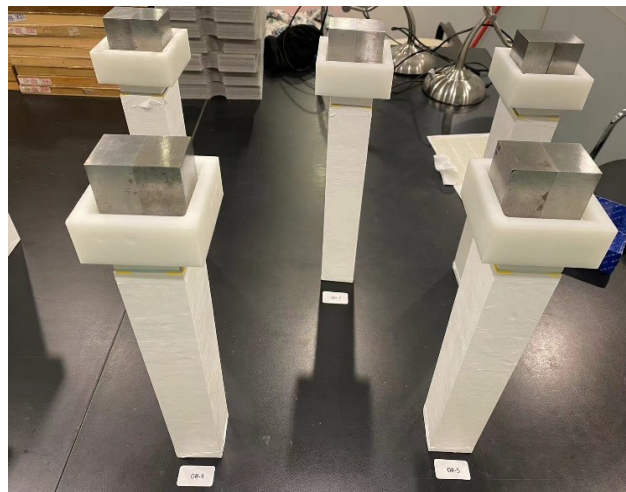
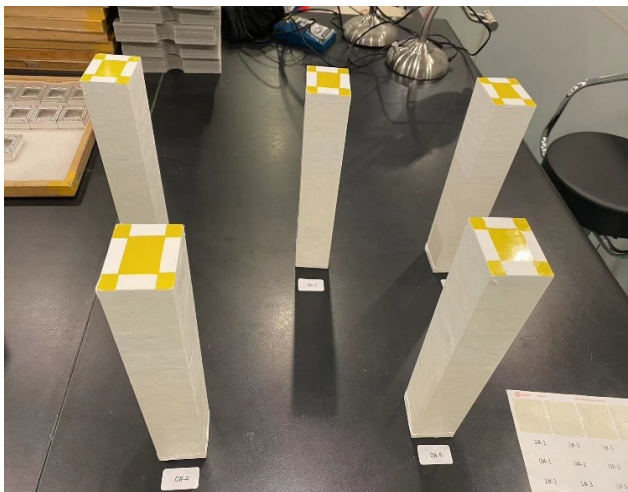
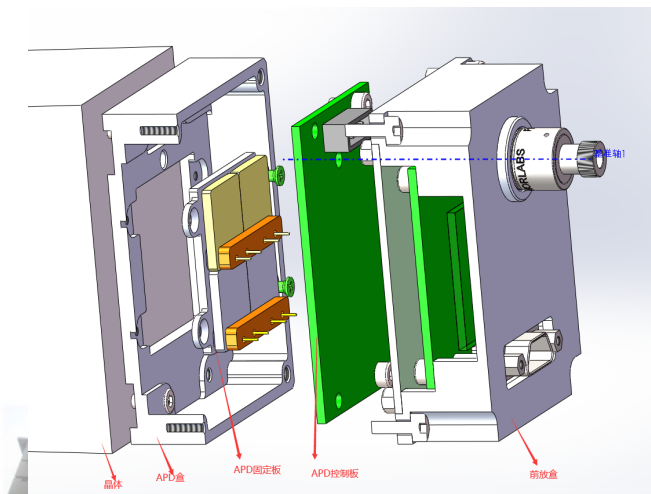
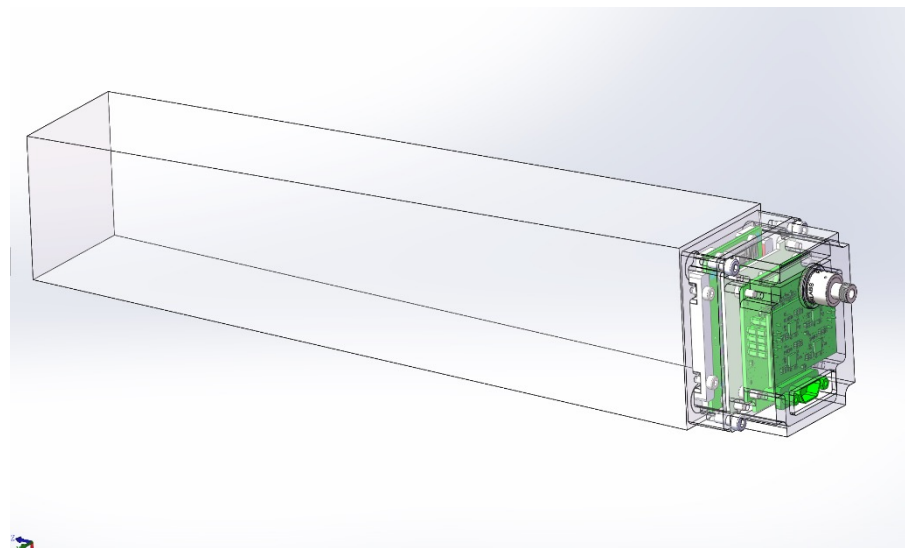


#0-1(复测): 319.6 pe/MeV



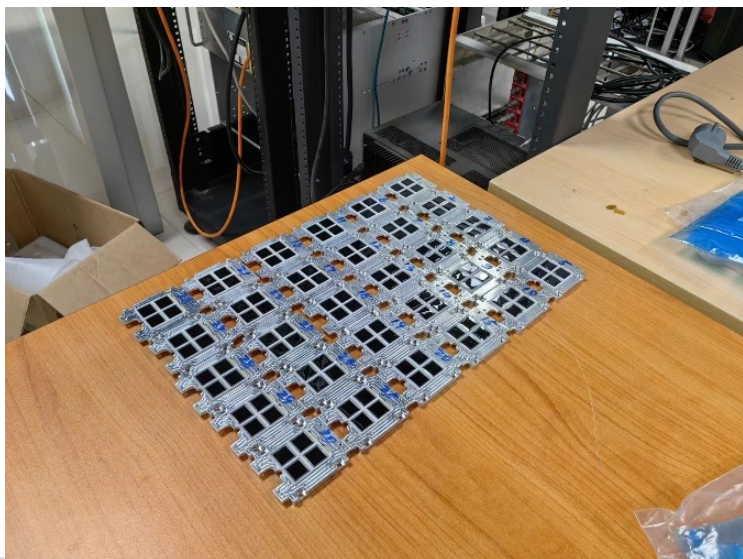
- 晶体的封装

- 晶体表面包裹一层镀铝的mylar膜 (Al-Mylar) 进行电磁屏蔽
- Al-Mylar与前放盒良好接触
- 封装后的晶体, 初步结果显示光产额下降 <math><10\%</math>
 - 耦合面部分区域粘接前放盒导致

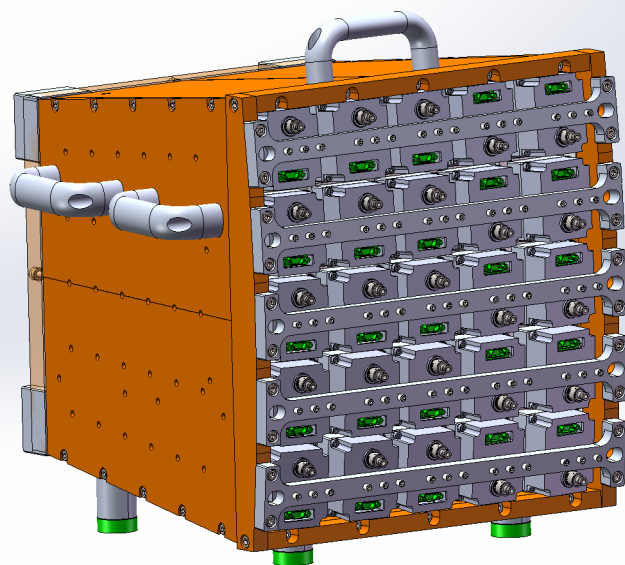


样机读出电子学集成、测试

- 完成样机初版电子学系统的组装
 - 进行了批量测试

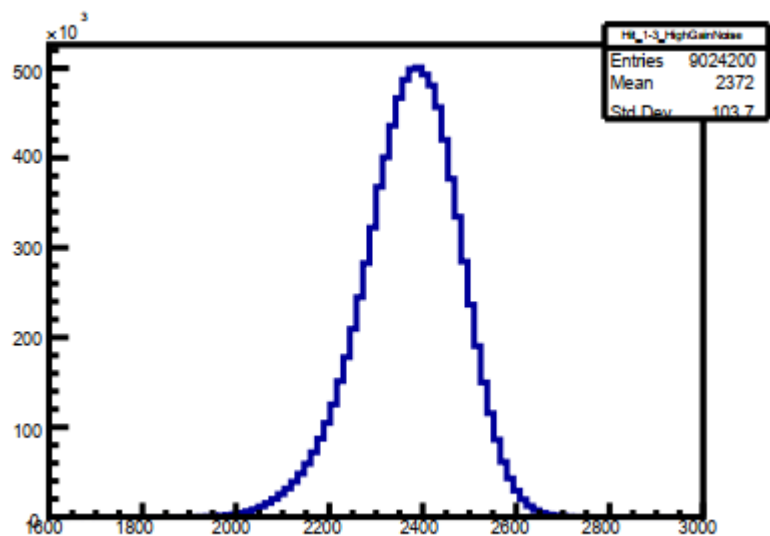


●样机总体机械设计与加工

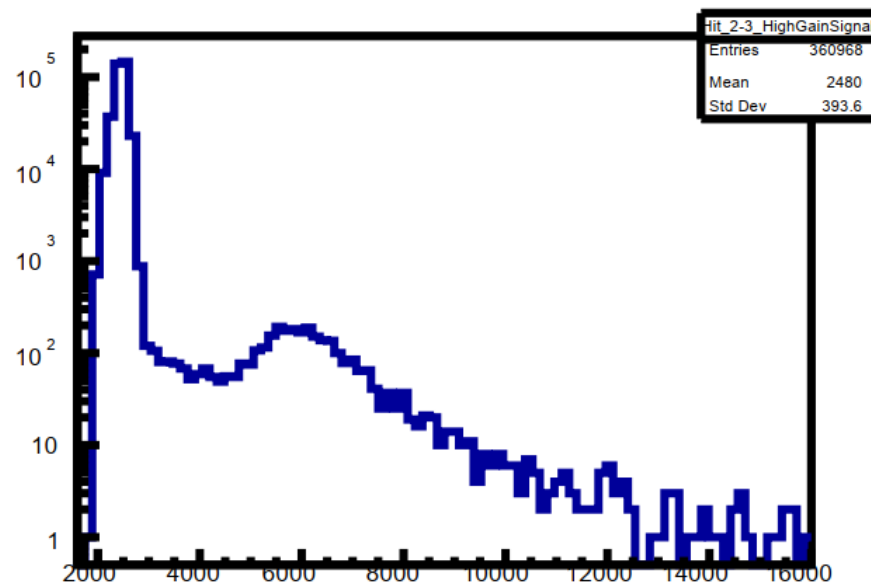


pCsI晶体荧光产额

- 台基宽度在正常水平
- MIPs信号清晰可见



台基



MIPs谱

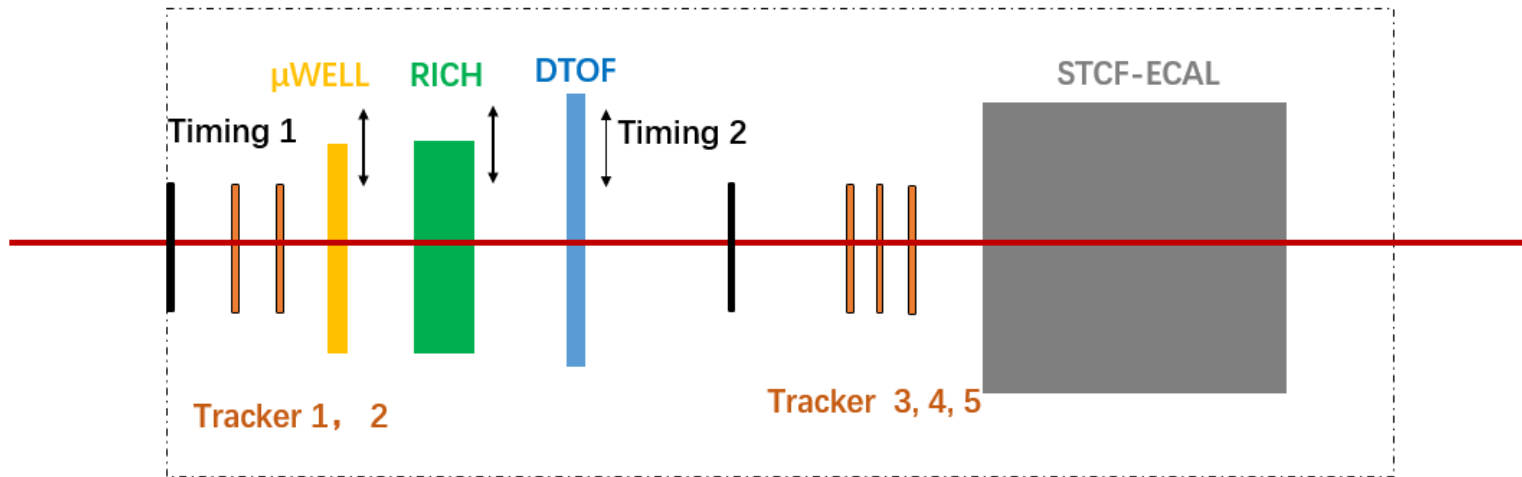


束流测试准备

PS: 7.31 – 8.13

Schedule Runs 2.0.1 :: Status 2024-05-17 17:30 (UTC)

Calendar Months /		February			March			April				May				June				July				August									
Weeks (Mon-Mon)		CW 08	CW 09	CW 10	CW 11	CW 12	CW 13	CW 14	CW 15	CW 16	CW 17	CW 18	CW 19	CW 20	CW 21	CW 22	CW 23	CW 24	CW 25	CW 26	CW 27	CW 28	CW 29	CW 30	CW 31	CW 32	CW						
Weeks (Wed-Wed)		Week 08	Week 09	Week 10	Week 11	Week 12	Week 13	Week 14	Week 15	Week 16	Week 17	Week 18	Week 19	Week 20	Week 21	Week 22	Week 23	Week 24	Week 25	Week 26	Week 27	Week 28	Week 29	Week 30	Week 31	Week 32							
T8	Main	IRRAD CHARM 236d																															
T8	Main	SHIP 19d			CMS BRIL 7d		LHC ECAL 7d		PAN 14d		STRAW TRACKER RD 7d		RE44 HERD 7d		VLAST 14d		E+BOOST 14d		OREO 7d		CALICE SCW AHCAL 14d		MPGD CAL 14d		CMS BRIL 7d		STCF ECAL & PID 14d						
T9	Main																																
T9	Parasitic																																
T9	Io Beam																																



- 下一代高亮度对撞实验，电磁量能器面临着两大挑战
 - 在极高的计数率下实现高精度测量
 - 量能器的抗辐照性能
- 基于快发光晶体的技术路线，国际上的进展
 - PANDA实验组基于PWO II晶体，在-15度环境下实现了~100 pe/MeV的光产额
 - BELLE II组，基于pCsl晶体，采用新型波长位移材料实现了~100 pe/MeV的光产额
- STCF量能器基于pCsl晶体开展了前期预研
 - 通过晶体表面喷涂WLS材料，实现大于200pe/MeV的光产额
 - 时间分辨在100 MeV时优于0.8 ns
 - 完成了5*5阵列样机的研制，下个月在CERN开展束流测试



总结

- 下一代高亮度对撞实验，电磁量能器面临着两大挑战
 - 在极高的计数率下实现高精度测量
 - 量能器的抗辐照性能
- 基于快发光晶体的技术路线，国际上的进展
 - PANDA实验组基于PWO II晶体，在-15度环境下实现了~100 pe/MeV的光产额
 - BELLE II组，基于pCsl晶体，采用新型波长位移材料实现了~100 pe/MeV的光产额
- STCF量能器基于pCsl晶体开展了前期预研
 - 通过晶体表面喷涂WLS材料，实现大于200pe/MeV的光产额
 - 时间分辨在100 MeV时优于0.8 ns
 - 完成了5*5阵列样机的研制，下个月在CERN开展束流测试

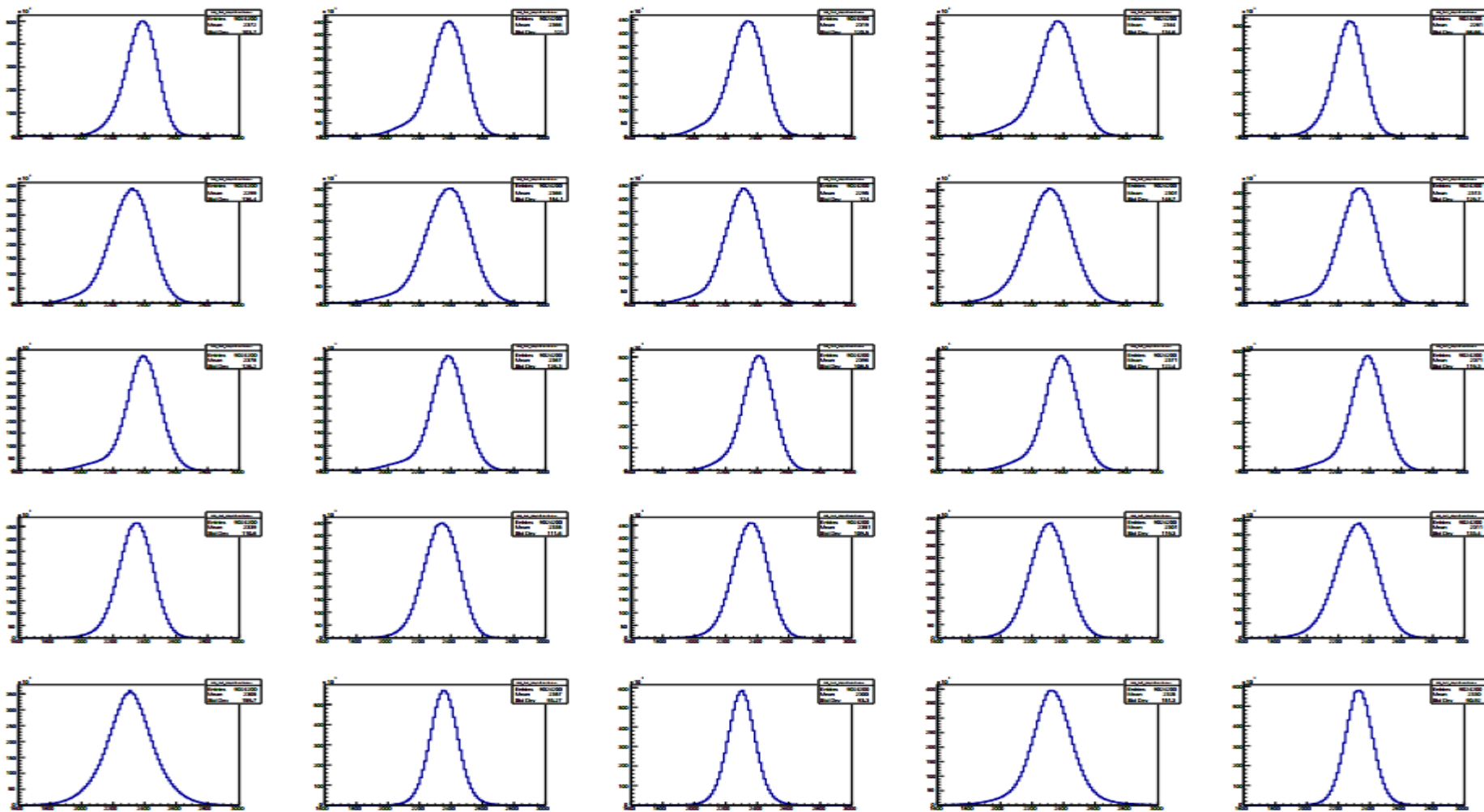
谢谢!



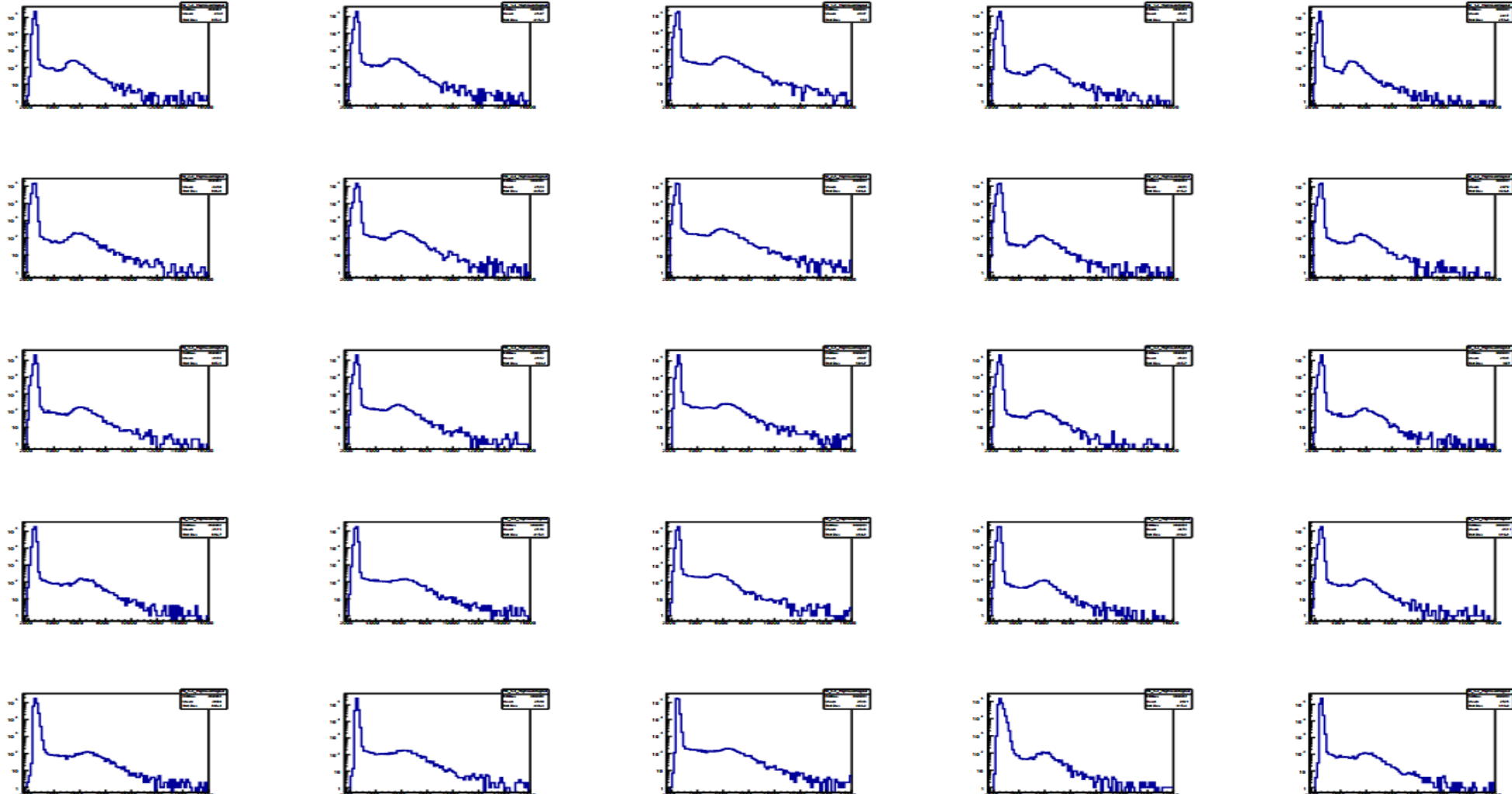
backup



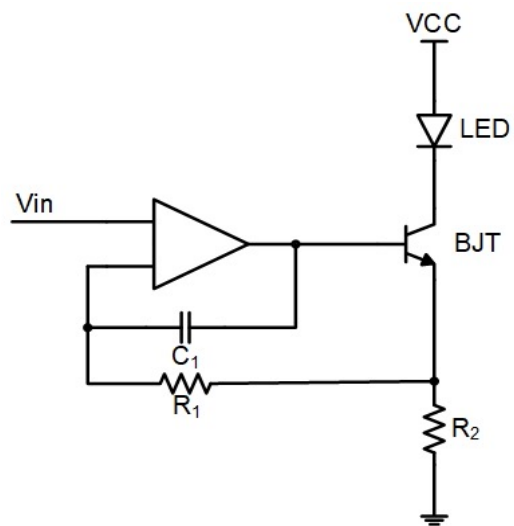
台基



MIPs

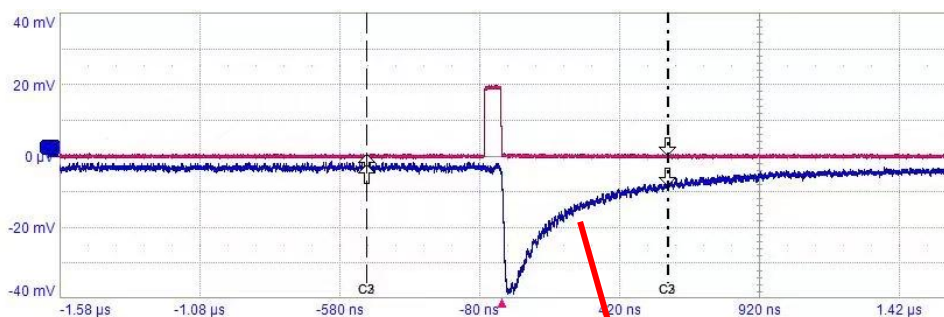


LED驱动电路设计

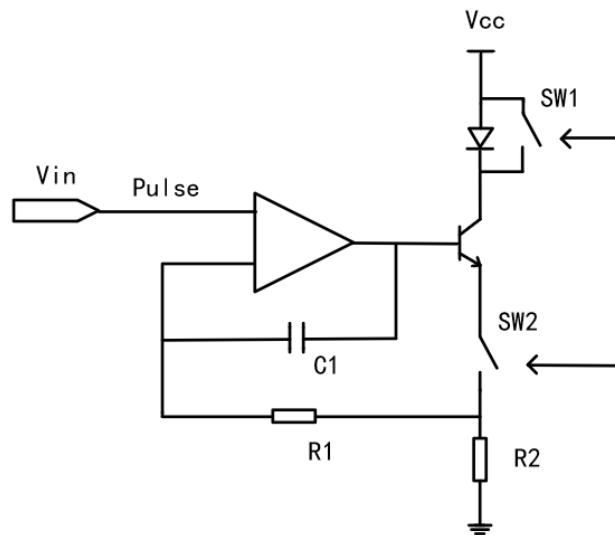


LED猝灭驱动电路

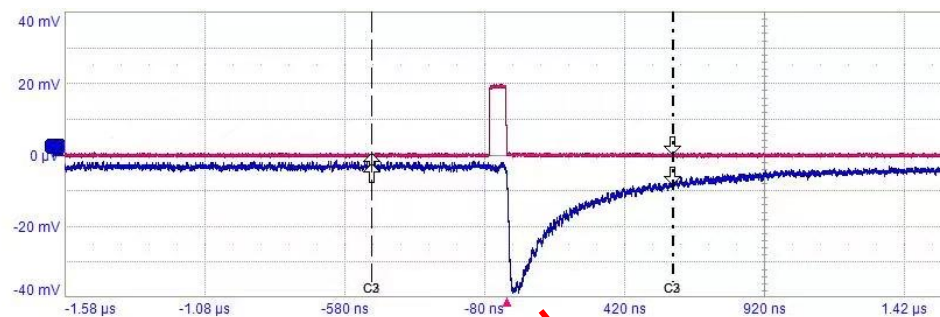
- LED驱动电路：
 - 发光时间过长
 - 控制LED猝灭



光纤LED发光时间过长

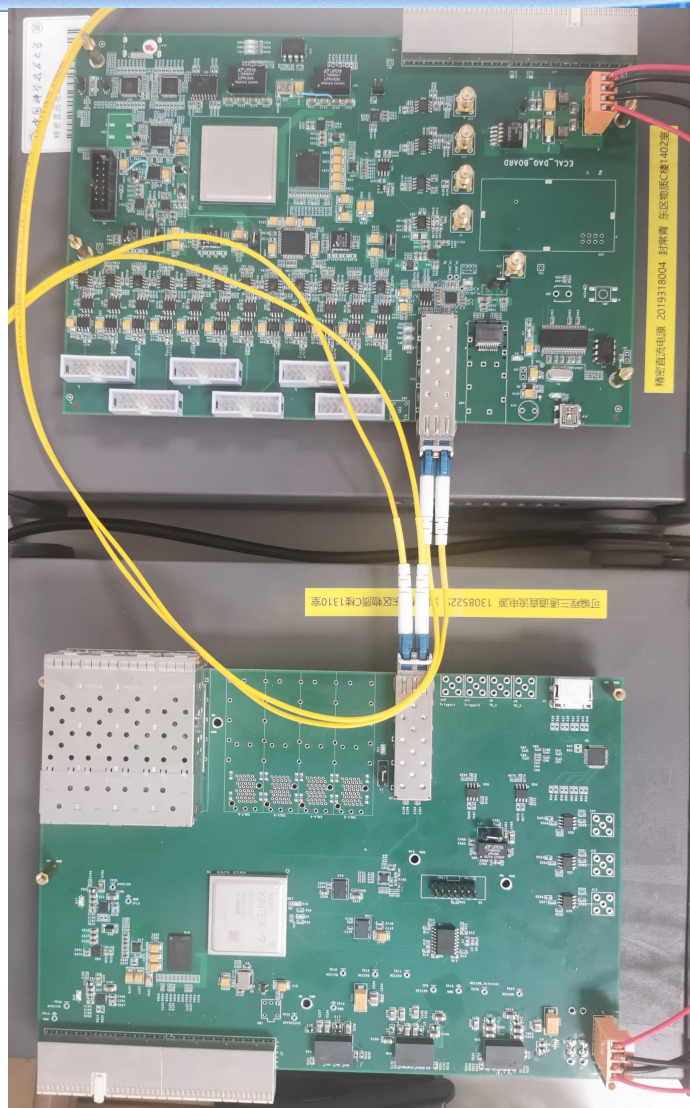
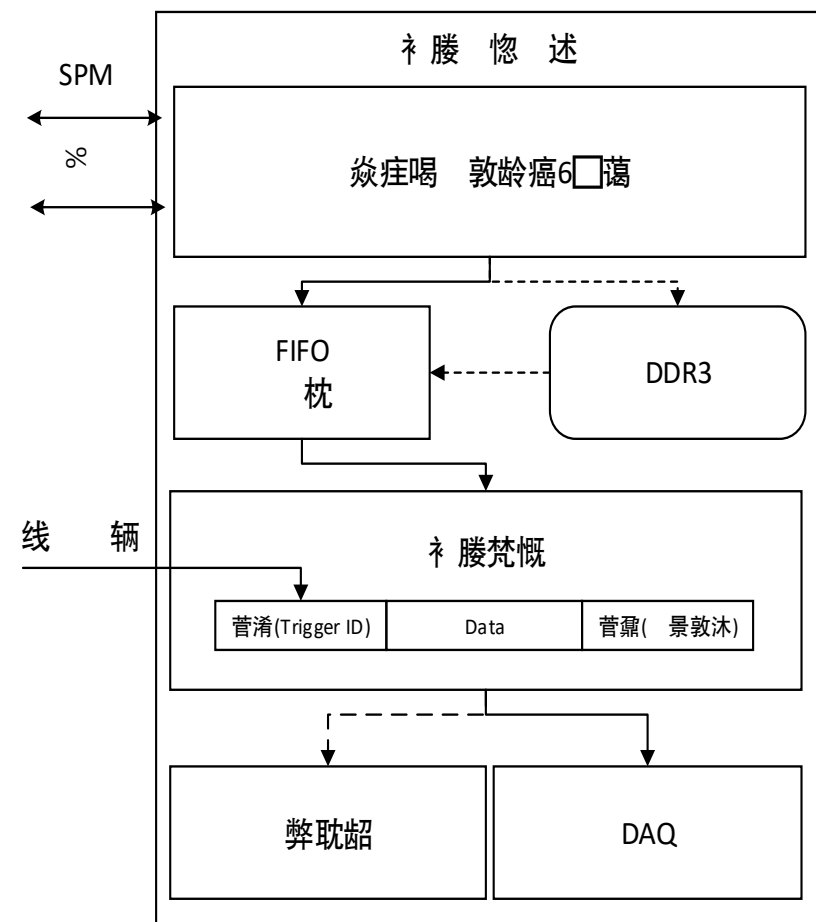


- LED驱动电路计划：
 - 3月调试驱动电路
 - 4月设计LED驱动板
 - 5月调试LED驱动板



设想的猝灭LED发光波形





目前进展:

- 电源供电正常
- 通过高速收发接口和SPM进行数据传输测试
- 可以正常下发时钟
- 可以通过网线发送配置命令和读取数据
与上位机的传输速率最快966Mbps

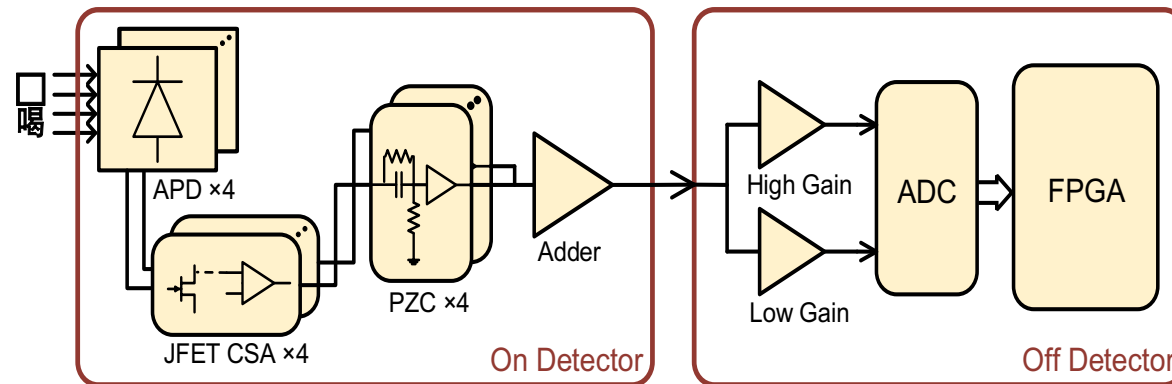
接下来的工作:

- 定义状态信息等数据传输格式
- DAQ联调
- 板上增加差分时钟输入并测试DDR3功能

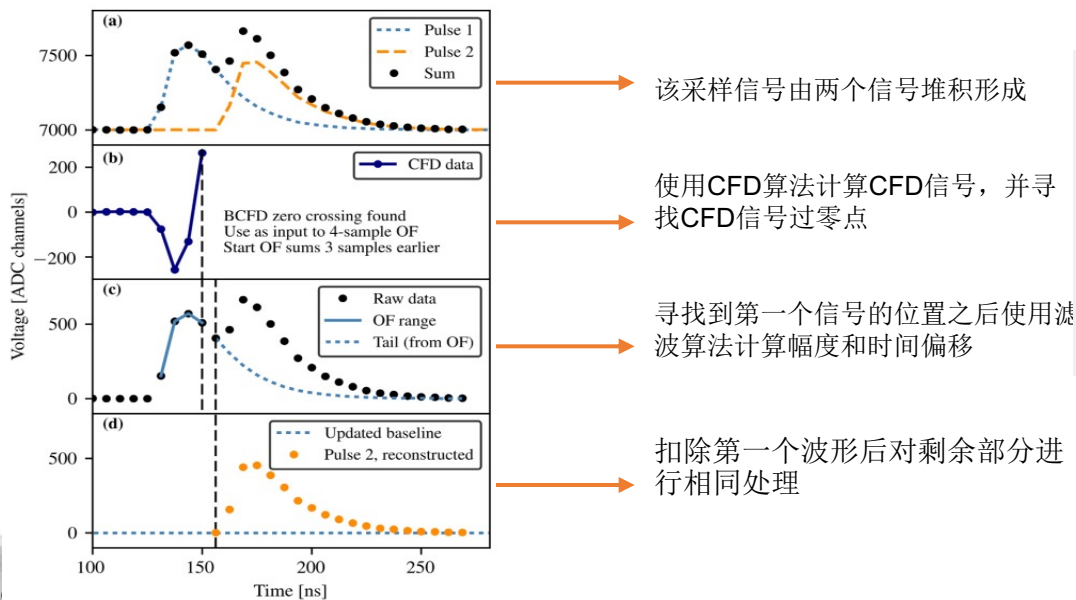


本底抑制算法研究

➤ 为了减小本底引起的信号堆叠，舍去模拟成形电路部分



➤ 发展了流水线的本底/信号时间、幅度拟合提取算法

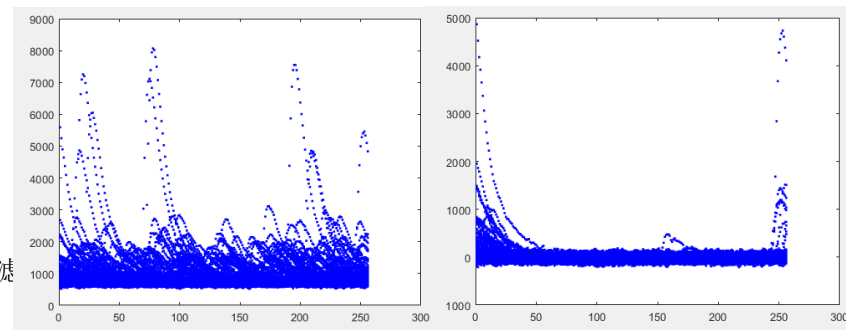


该采样信号由两个信号堆积形成

使用CFDF算法计算CFDF信号，并寻找CFDF信号过零点

寻找到第一个信号的位置之后使用滤波算法计算幅度和时间偏移

扣除第一个波形后对剩余部分进行相同处理



Before

After