

质子束--触发系统FLASH

方案设计

报告人:钱森

qians@ihep.ac.cn

报告时间: 20221228

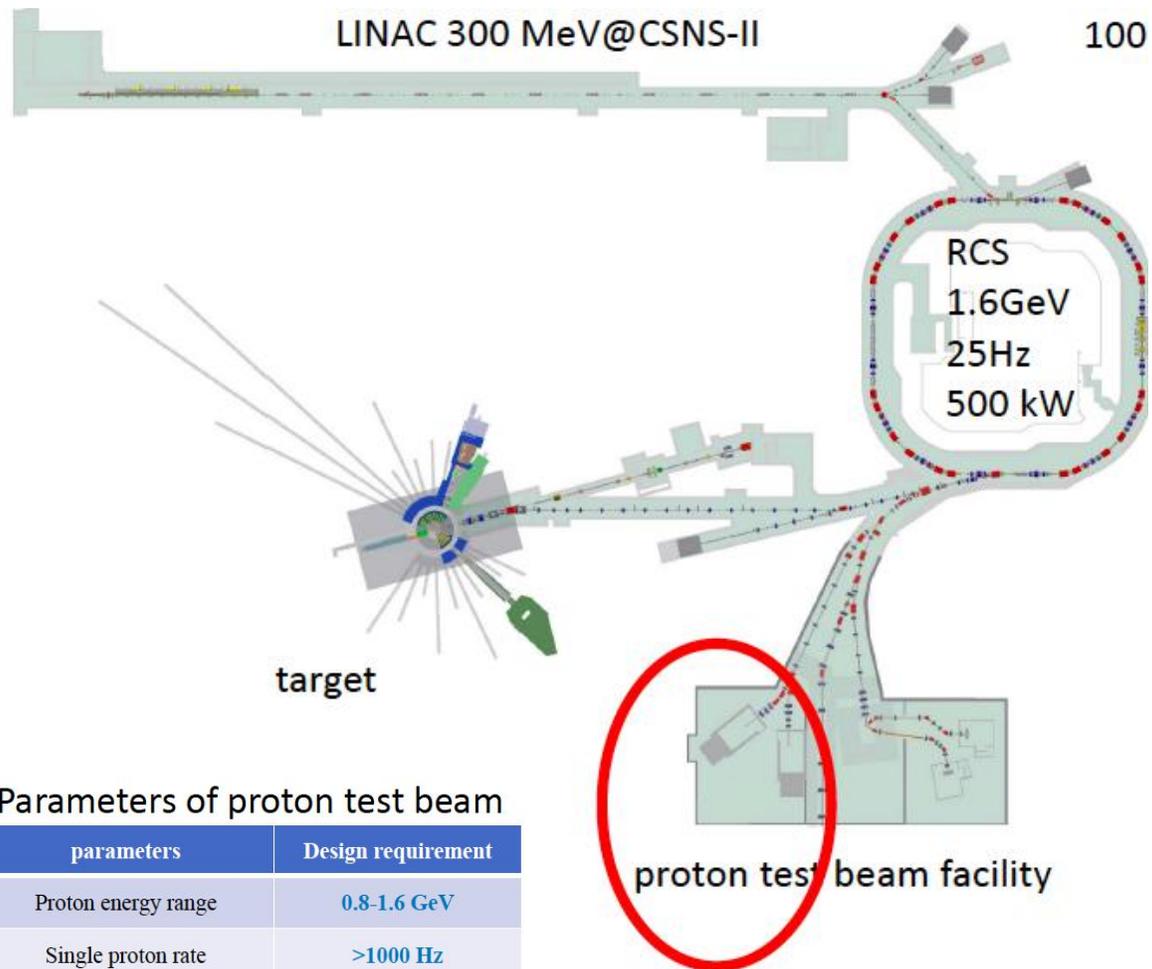


提纲

- 1. 背景需求;
- 2. 触发系统探测器设计;
- 3. 关键技术预研;
- 4. 小模型束流实验;
- 5. 升级计划;

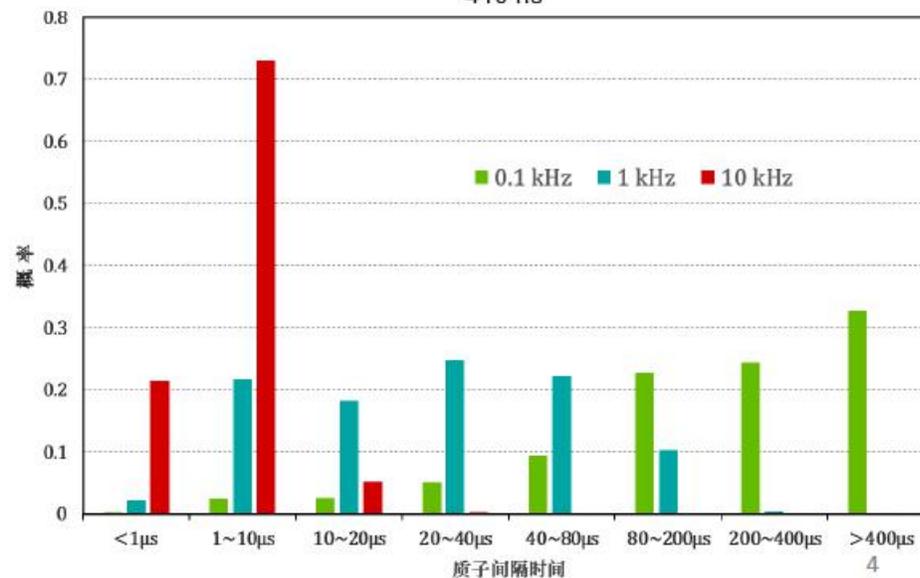
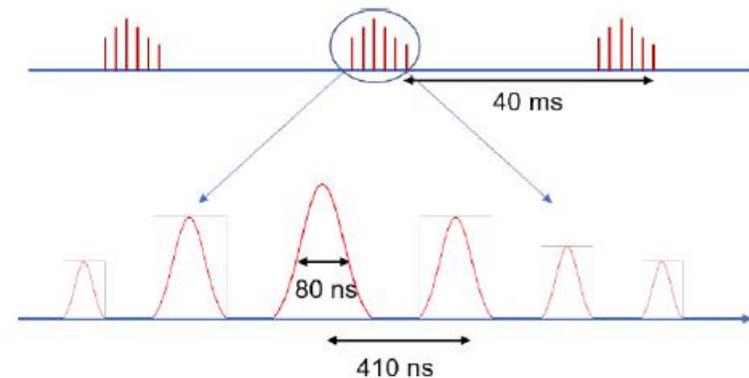


1. 背景需求-- (1) 质子束

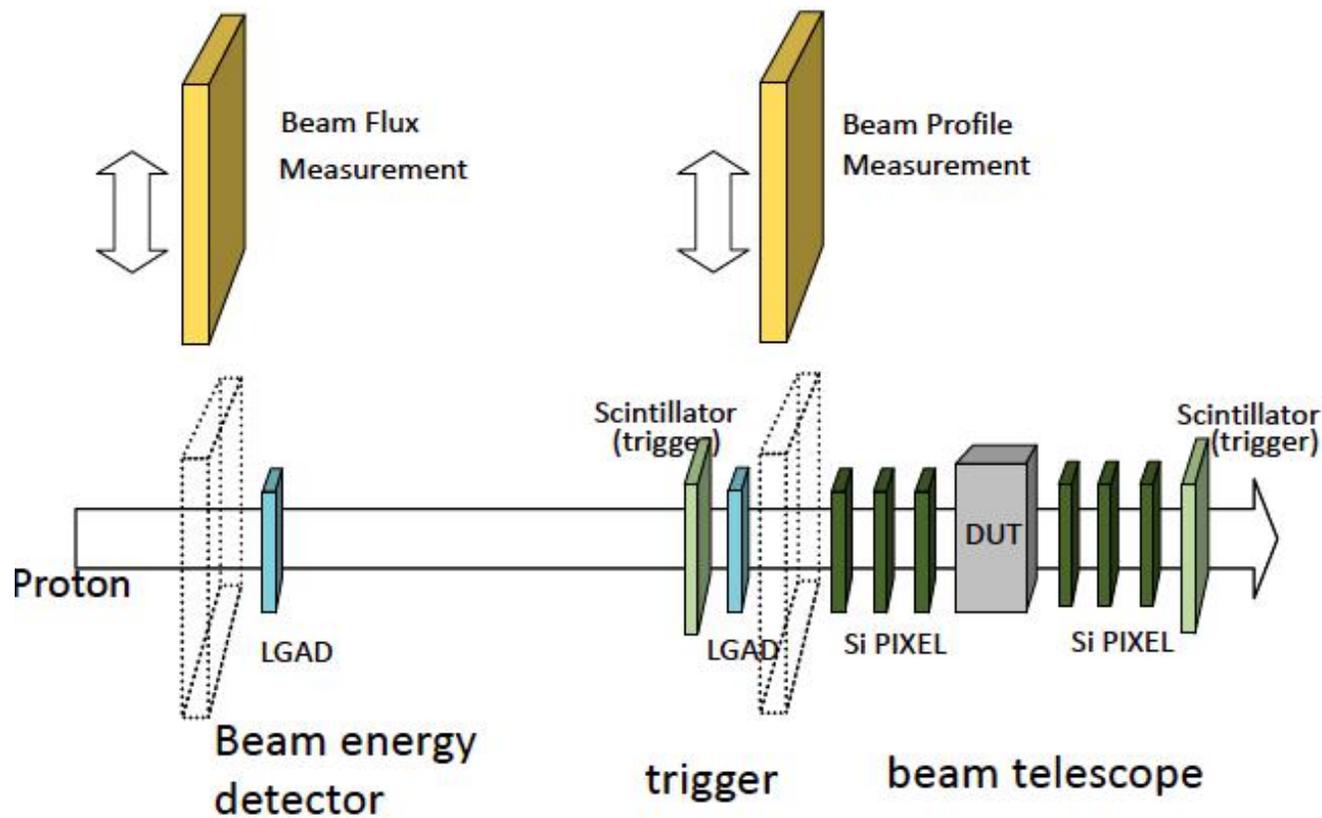
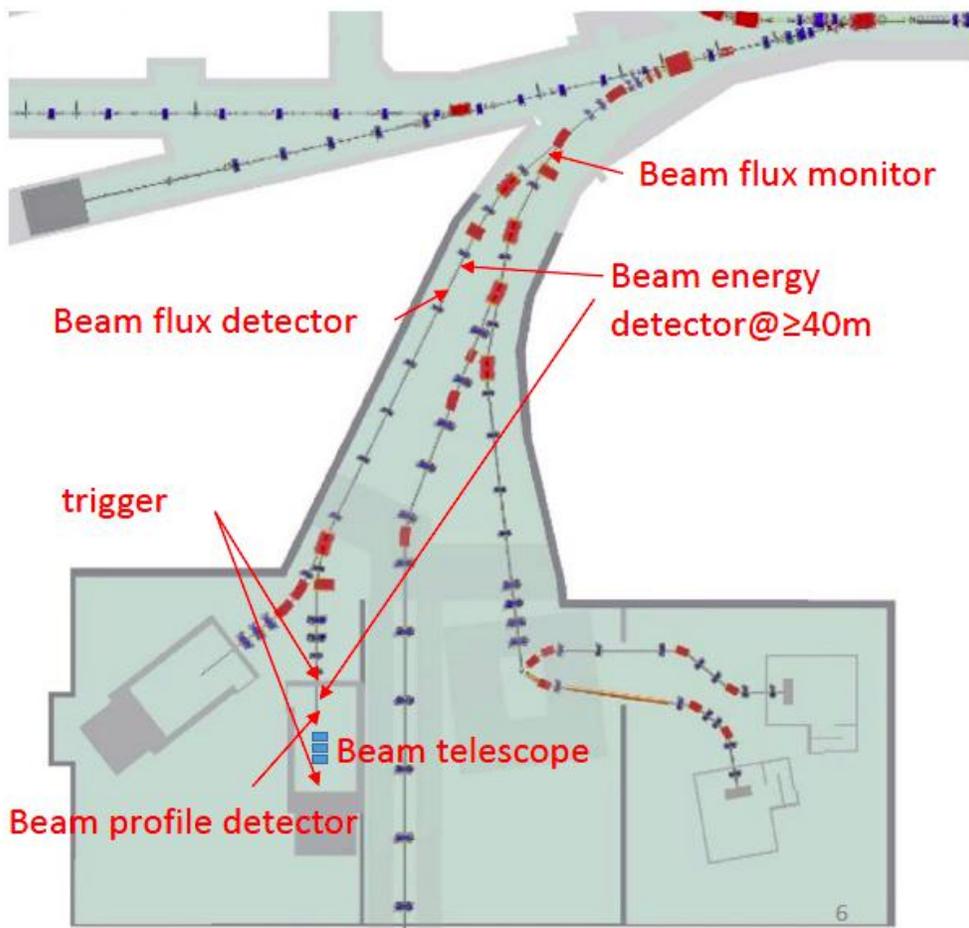


Parameters of proton test beam

parameters	Design requirement
Proton energy range	0.8-1.6 GeV
Single proton rate	>1000 Hz
Proton current	$>2 \times 10^6$ n/cm ² /s



1. 背景需求-- (2) 质子束探测器



1. 背景需求-- (3) 触发系统FLASH

触发探测器

触发探测器可以分为:

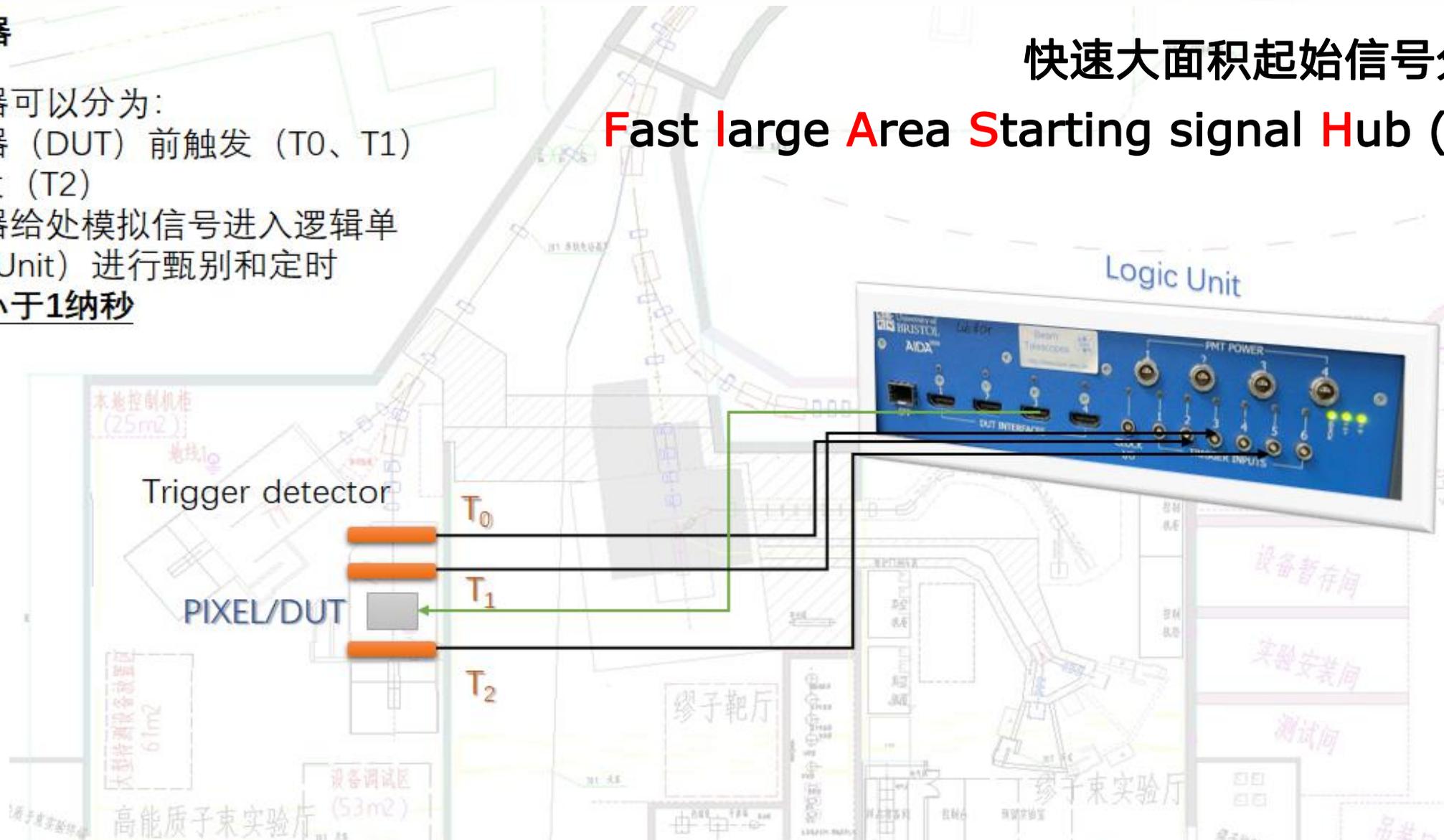
待测探测器 (DUT) 前触发 (T0、T1)

DUT后触发 (T2)

所有探测器给处模拟信号进入逻辑单元 (Logic Unit) 进行甄别和定时

时间分辨小于1纳秒

快速大面积起始信号分发器,
Fast large Area Starting signal Hub (FLASH)



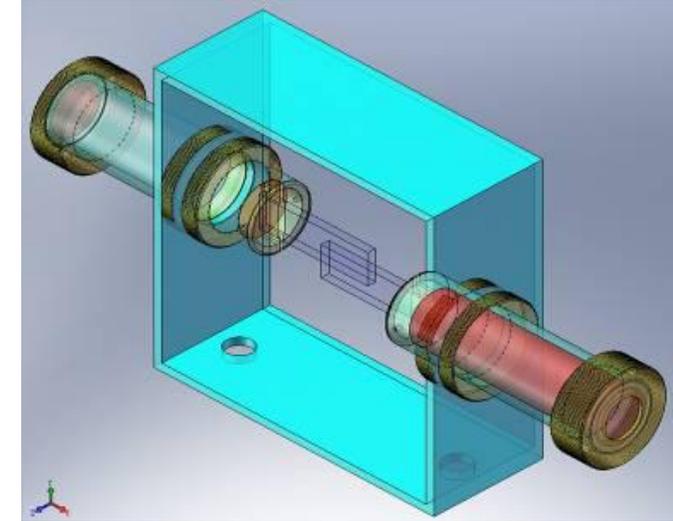
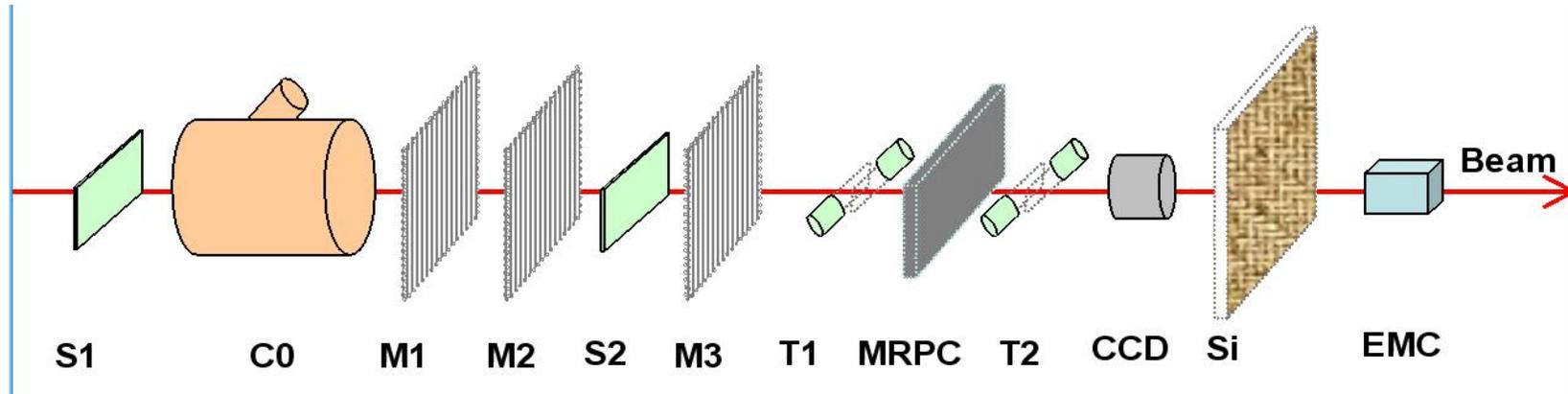
1. 背景需求-- (4) 触发系统FLASH参数表

参数类型	参数名称	参数值
探测器设计参数	计数率上限	10kHz
	灵敏区面积	10cm*10cm
	探测器数量	3组
	电子学通道	2CH X 3组
	质子能量测量区间	0.8~1.6GeV
	触发系统符合时间分辨	<1ns
	光电倍增管单光子时间分辨	< 100ps

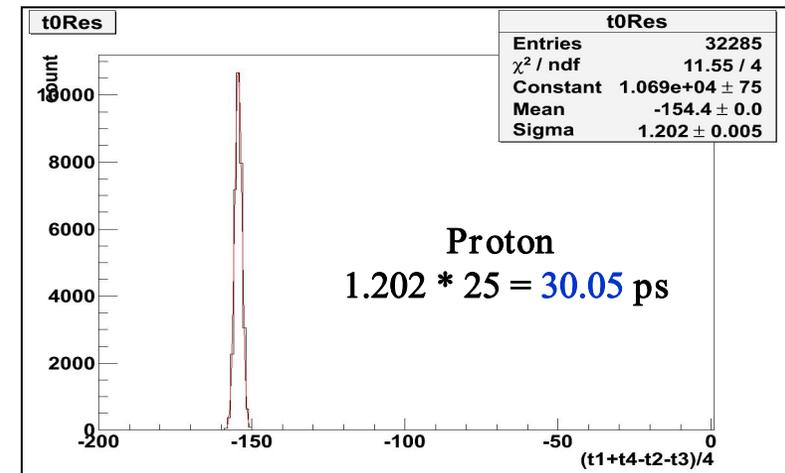


2. 探测器设计-- (1) 现有案例: 2011-IHEP-E3-T0

方案1: PMT + BC420 + TDC = 30ps@1GeV Proton

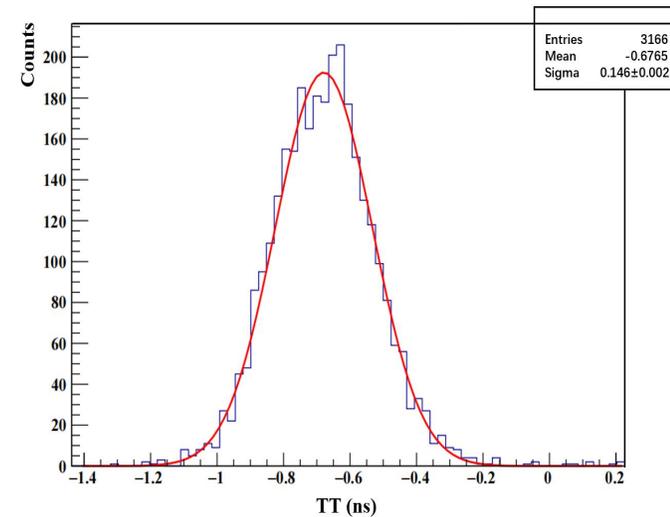
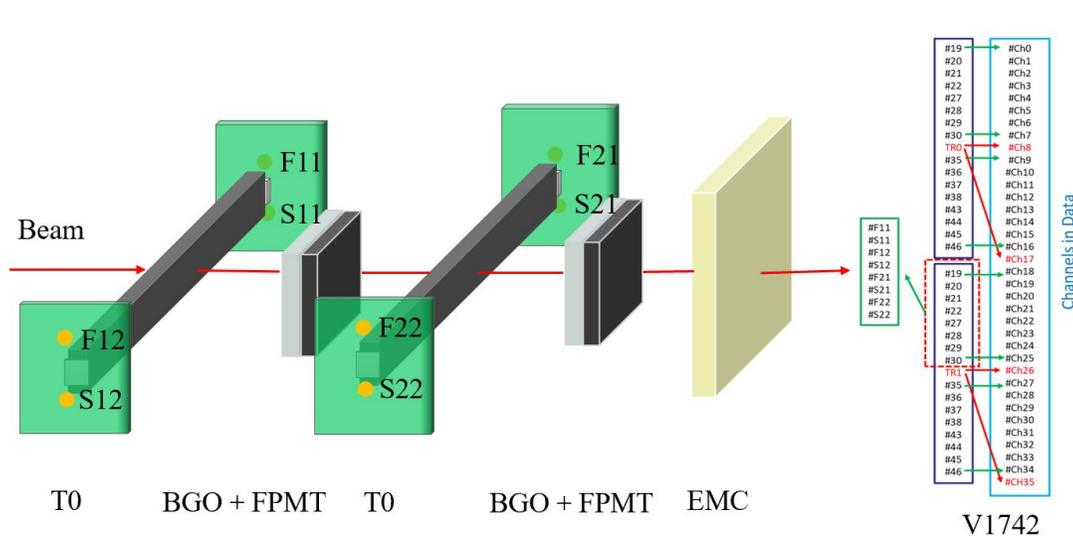
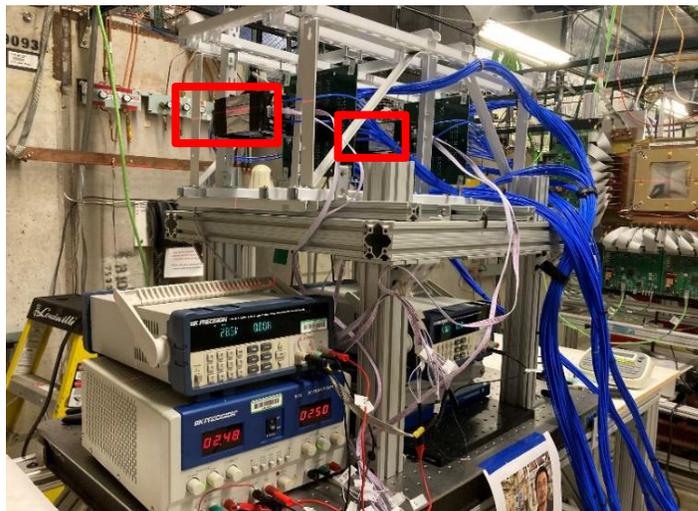


Type	USTC-ETOF	MICE-TOF	USTC-T0	IHEP-T0
PMT	H6533	R4998	H2431-50	H6533
Scintillator	BC420	BC420	BC420	BC420
DAQ subsystem	CAMAC	VME	VME	VME
QDC (LSB / fC)	2249A(250)	V1724(Flash)	V792(35)	V965(25)
TDC (LSB / ps)	C414(100)	V1290(25)	V1290(25)	V1290(25)
particle	Beam-e	Beam- μ	Cosmic- μ	Cosmic- μ
Sigma (ps)	76	45	46	41.6



2. 探测器设计-- (1) 现有案例: 2021-IHEP-E3-T0

方案1: SiPM + BC420 + FADC = 150ps@120GeV Proton



$$\sigma\left(\frac{(t_1+t_2-t_3-t_4)}{4}\right)=146.0 \text{ ps}$$

2022年6月份, 在费米120GeV质子束进行束流实验,
采样卡采样率为5GS/s, 还可以进一步改善结果!



2. 探测器设计-- (2) 关键核心器件选择

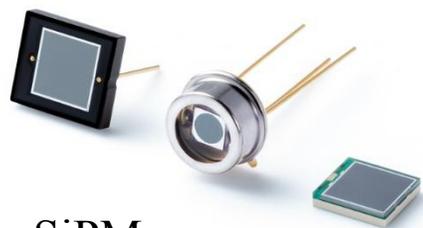
构建方案: **闪烁体 + 光电探测器**

目标时间分辨需小于1ns; 有效面积10cmX10cm



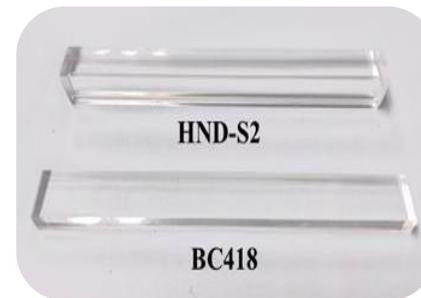
PMT

- 高增益
- 低暗噪声
- 快响应时间
- 高工作电压
- 对磁场敏感
- 抗震性不好
- 抗辐照能力强



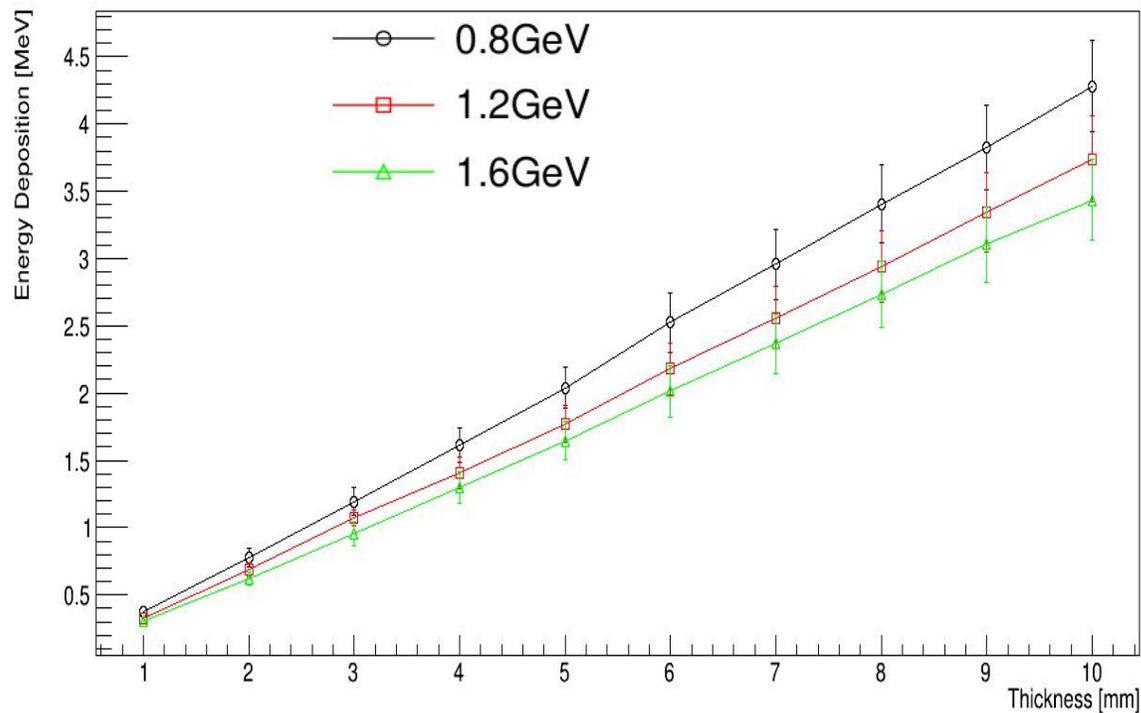
SiPM

- 高增益
- 高量子效率
- 快响应时间
- 工作电压较低
- 对磁场不敏感;
- 较高暗噪声计数率
- 对温度敏感
- 抗辐照能力差



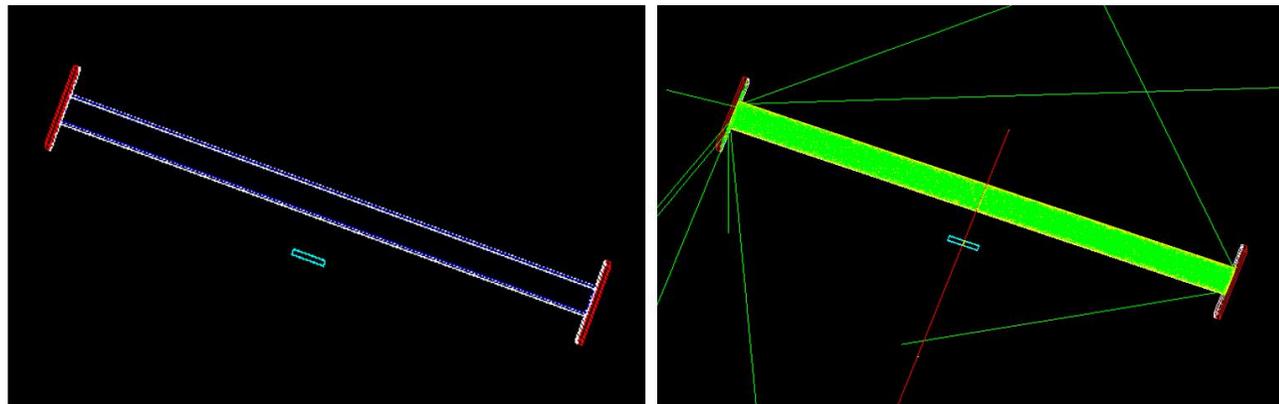
参数	BC404	BC418	BC420	BC422	EJ204
光产额(%蒽)	68	67	64	55	68
上升时间(ns)	0.7	0.5	0.5	0.4	0.7
衰减时间(ns)	1.8	1.4	1.5	1.6	1.8
脉宽(FWHM, ns)	2.2	1.2	1.3	1.3	2.2
峰值波长 (nm)	408	391	391	370	408
光衰减长度 (cm)	160	100	110	8	160

2. 探测器设计-- (3) 关键核心器件需求模拟



Geant4模拟塑料闪烁体厚度对能量沉积的影响

- 1.6GeV质子束在塑闪中的能量沉积 < 0.1%，要求厚度不能超过5mm；



Geant4模拟探测器的几何结构和塑料闪烁体对入射电子的响应

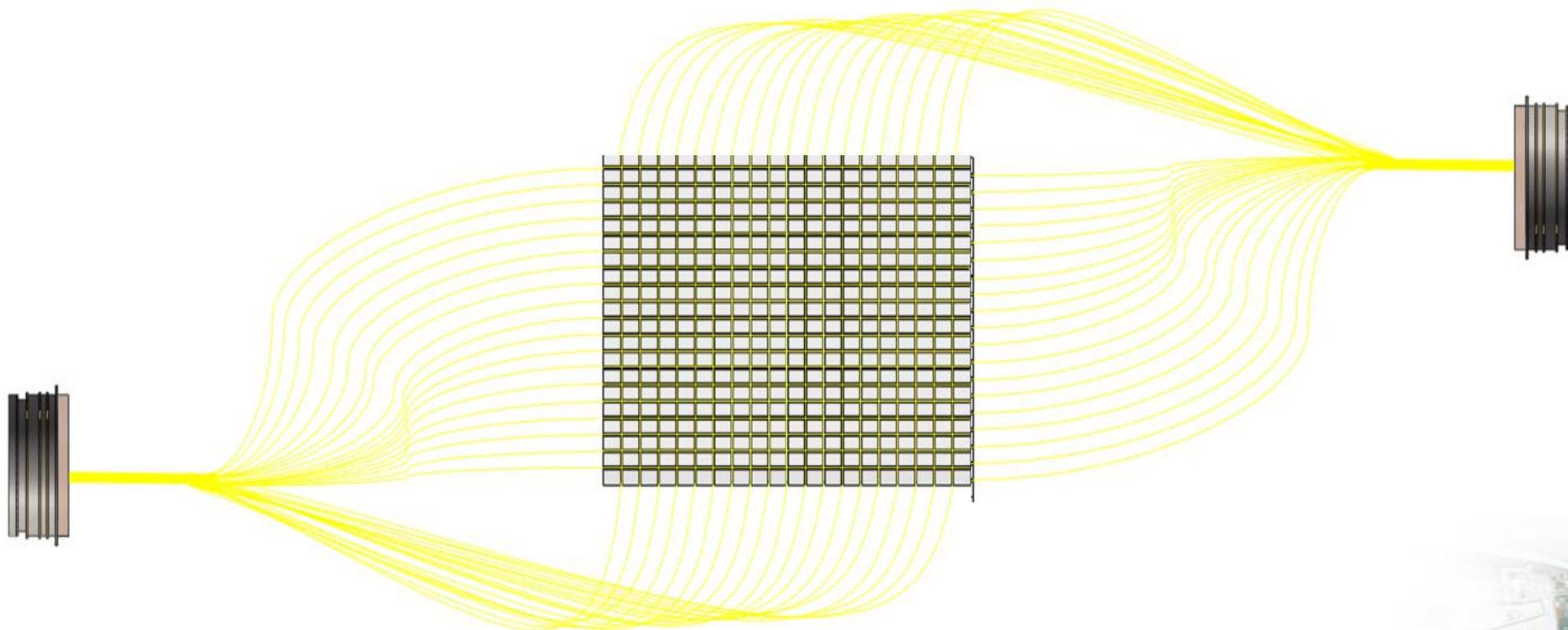
- 塑闪的长度和宽度影响质子能量沉积产生光子的时间分辨和光输出大小；塑闪不能太大，否则影响光输出时间分辨。

体积(mm ³)	光子数目
100×10×5	1224
70×10×5	1315
30×10×5	1473
10×10×5	1596



2. 探测器设计-- (4) 探测器方案

方案：方形开槽塑闪 **PS** + 耐辐照石英光纤 **Fiber** + 超快光电倍增管 **FPMT**
+ 可编程高压电源模块 **HV** + 波形采样 **FADC** + 快速逻辑符合触发板 **Trigger**



3. 探测器关键预研-- (1) 方形快速塑闪PS

快速塑闪，圣戈班BC420性能满足，价格垄断、供货周期较长；

ITEM 编号	MFR 制造商	PART NO. 型号	DESCRIPTION 描述	QTY 数量	Unit Price 单价	Total Price 总价
1	Saint-Gobain Crystal	BC-420	BC-420, Size:100mm*100mm*5mm, Diamond Milled	0	\$630	\$0
2	Saint-Gobain Crystal	BC-420	BC-420, Size:100mm*100mm*5mm, Diamond Milled	10	\$277	\$2,770

注：闪烁体材料起订量为\$2000。

Total Ex-works:	\$2,770
Export Documents & Handling:	\$100
Freight & Insurance:	\$400
Total CIP Beijing USD:	\$3,270
含税含国内运费人民币报价:	¥27,885

中检维康给出的BC420报价

国产的两个选择：

- ①：高能科迪，快速塑闪，已经拿到样品，可以开展对比测试；
- ②：中核261厂，正在联系样品；

ST-1422 亚毫微妙塑料闪烁体材料：

PBD+ 淬灭剂

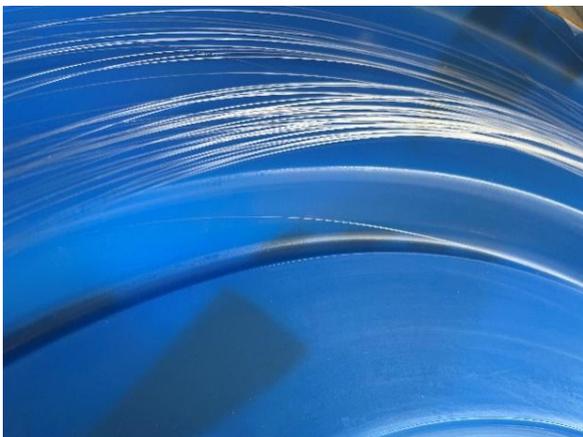
用途及特性：

这种闪烁体主要的特点是发光衰减时间非常短。<1.0 ns其发光效率比较低，用于超快时间的测量。

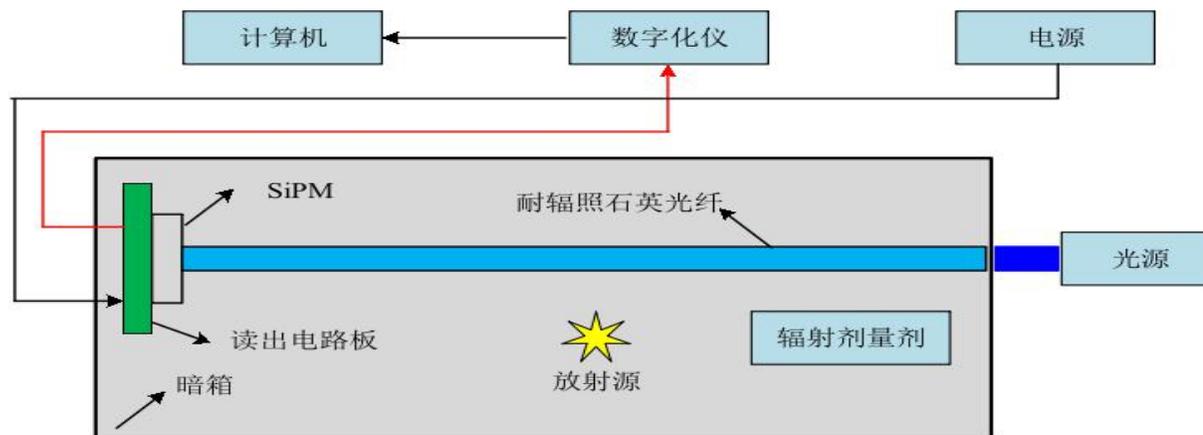
中核261厂的快速塑闪性能

3. 探测器关键预研-- (2) 耐辐照石英光纤Fiber

硅酸盐石英光纤+稀土掺杂 (Ti^{4+} 和 Ce^{3+}) =耐辐照石英光纤



- 研究表明稀土掺杂有源光纤在面临相同条件高能射线和粒子(如质子、电子、X和 γ 射线等)辐射下，其辐射诱导损耗比非稀土掺杂的无源光纤大1000倍以上。
- 哈尔滨工程大学，纤维集成光学实验室，具有成熟的耐辐照光纤加工测试技术。
- 光纤长度超过100m，光纤芯直径为12.5 μm ，包层直径为125 μm ，在辐照剂量 ≥ 500 Gy条件下，作为耐辐射光纤进行应用。



3. 探测器关键预研-- (3) 超快光电倍增管FPMT

进口Photek210 与 国产单阳极FPMT



	HV/V	gain	P/V	幅度(SPE)	TTS @SPE	TTS @MPE
Photek 210	-4700	2.9E6	2.0	93.2mV	43.5ps	10.3ps
5004	-2750	2.8E6	6.3	44.2mV	26.6ps	7.4ps
5011	-3176	1.75E6	18.6	35.72mV	30.3ps	8.0ps



3. 探测器关键预研-- (4) 可编程高精度模块高压电源HV

针对FPMT的MCP升降压要求，需要可编程缓慢控制梯度高压的加载。

- 高压模块：0-3000V（1-5V 调节），按要求设置升降高压步长、保持时间等实现对PMT的超压保护、过载保护等。

- 方案1：可编程高压模块



- 天津尔特尔新技术有限公司；
- 供给LHAASO的高压电源模块；

- 方案2：可编程低压-高压模块



- 四川大学核所；
- 高压模块0-2000V（0-5V 调节）

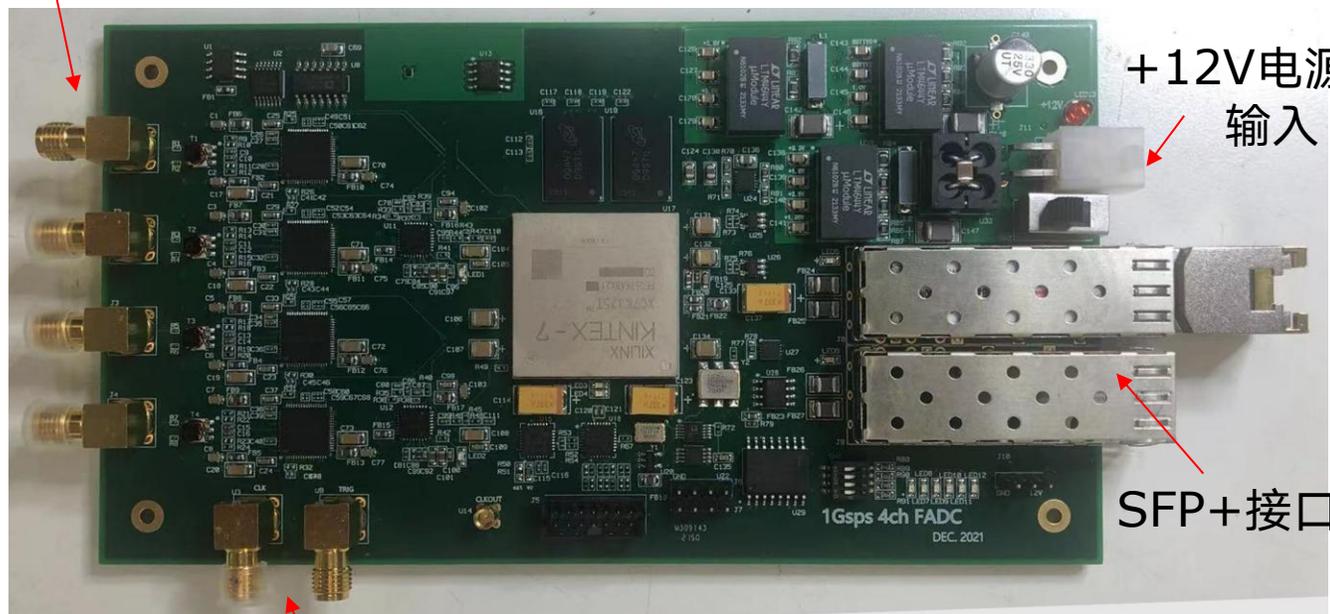
3. 探测器关键预研-- (5) 电子学读出板FADC

JUNO用FADC 数据采集卡++, 给用户 提供探测器波形信号, 供离线分析使用

■ 性能参数

- 采用国产自研ADC芯片, 模拟带宽 300MHz,
- 支持4通道同步采样, 采样率1Gsp/s,
- 转换精度14bits, ENOB>9.8bits@100MHz,
- 输入阻抗50欧姆, 交流耦合,
- 支持外部同步时钟及同步触发,
- 支持多种触发方式,
- 板载2GB DDR3内存,
- 2路SFP+接口, 支持网络/光纤读出, 最高连续传输数据率可达13.2Gbps。

前端输入接口



+12V电源
输入

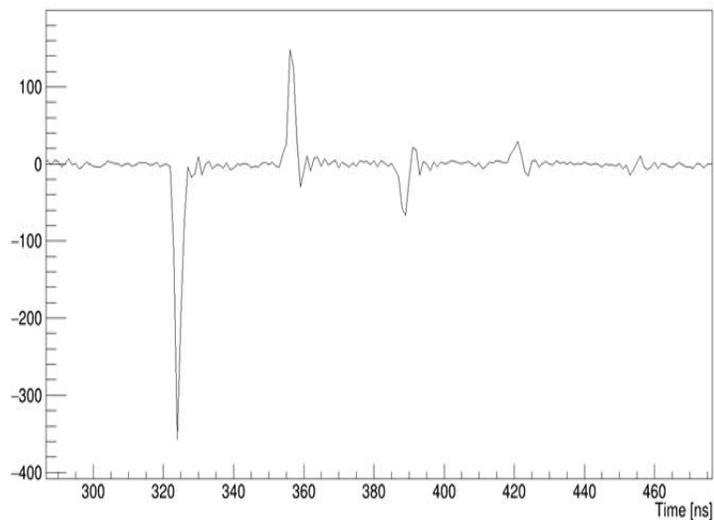
SFP+接口

时钟触发接口

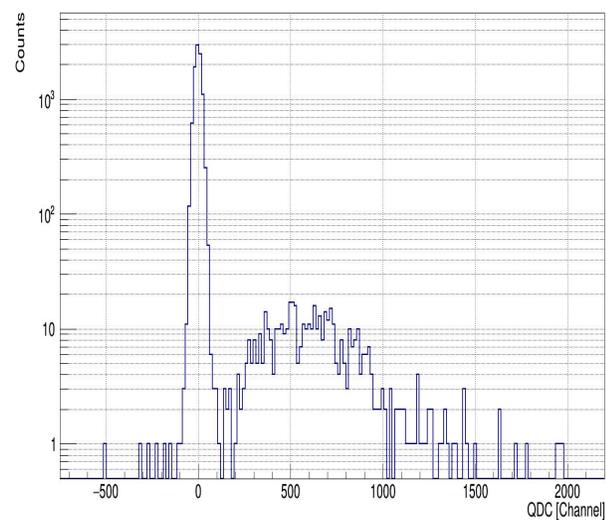
人员: 胡俊

PS光源; FPMT+空base 使用 高采样示波器/波形采样板 对比数据

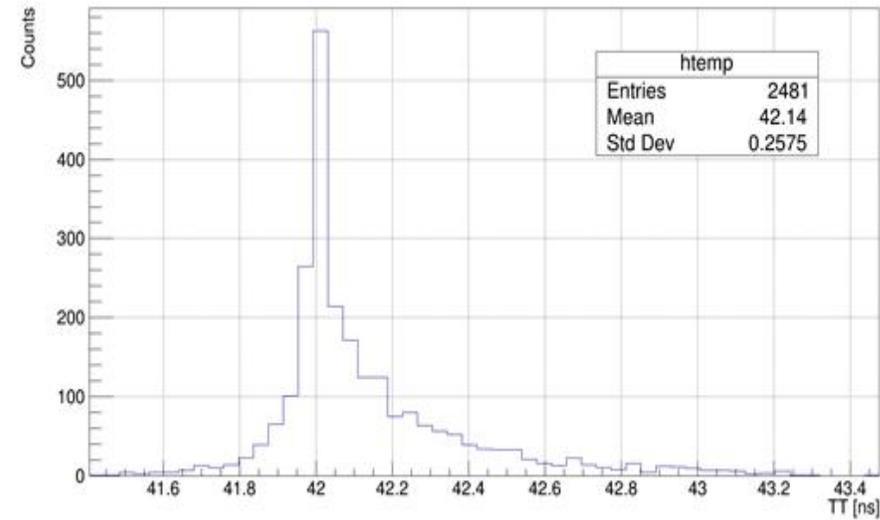
典型波形



SPE谱



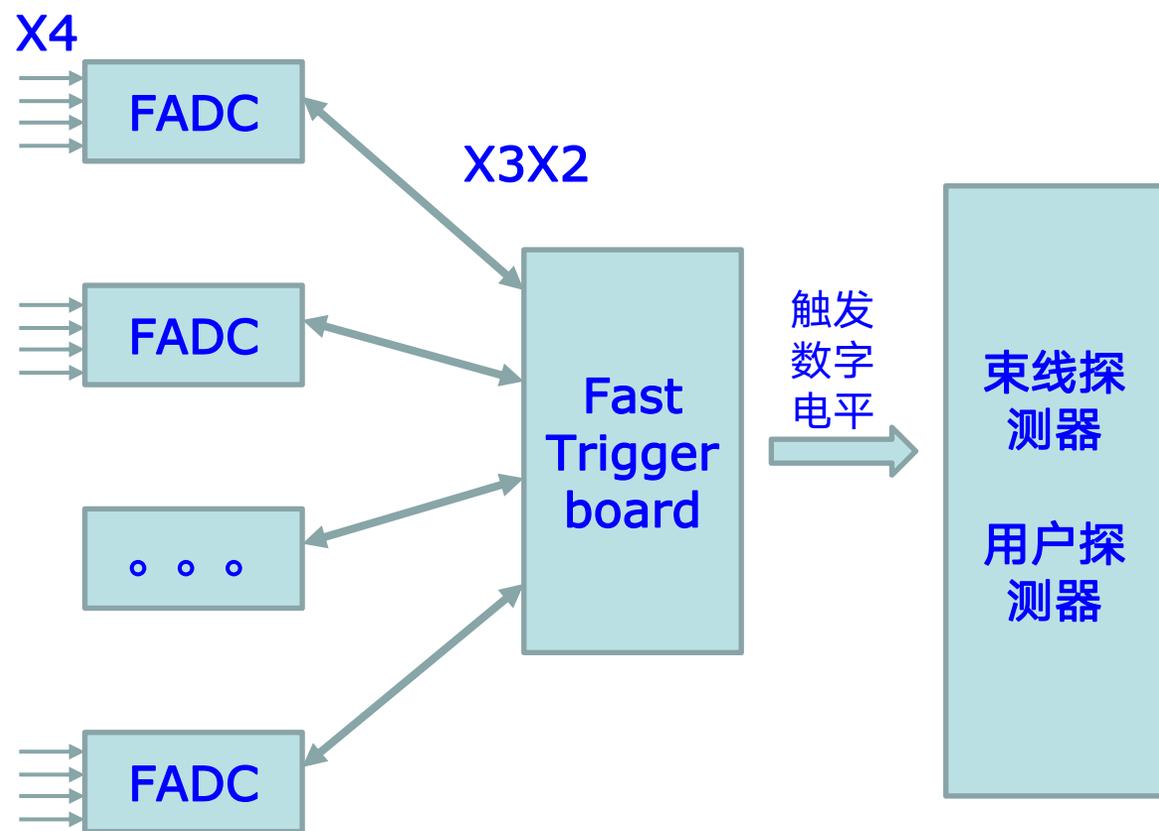
50%恒比定时



	HV/V	gain	P/V	幅度(SPE)	RT	TTS@SPE[Sigma]	预估CTR[FWHM]
示波器结果	-1700	5.9E6	19	46 mV	441 ps	59 ps	196 ps
波形采样板结果	-1700	-	7	~7 mV	1.6 ns	258 ps	856 ps

- 对于1.6ns上升时间的信号，1G采样的波形采样板也可以实现258 ps的单光子TTS

3. 探测器关键预研-- (6) 快速逻辑符合触发板Trigger



■ 主要功能

- 为前端FADC模块采样提供公共时钟和同步信号；
- 汇总所有FADC模块的原始波形数据；
- 在FPGA内实现所有通道的快速逻辑符合；
- 输出最终的触发信号。

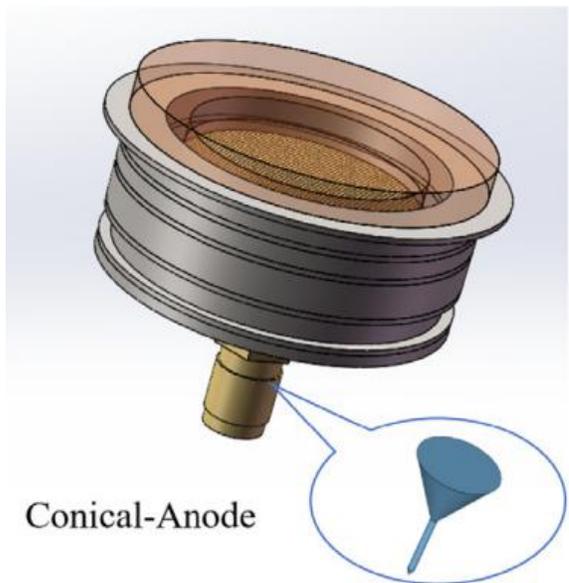
■ 设计参数

- 输入通道数：8CH；
- 输出通道数：8CH；
- 单通道传输数据率>6.6Gbps
- 板载内存4GByte
- 板载高精度温补晶振，稳定性±0.3ppm，老化率±1ppm
- 同步精度<300ps
- 触发延迟<2us

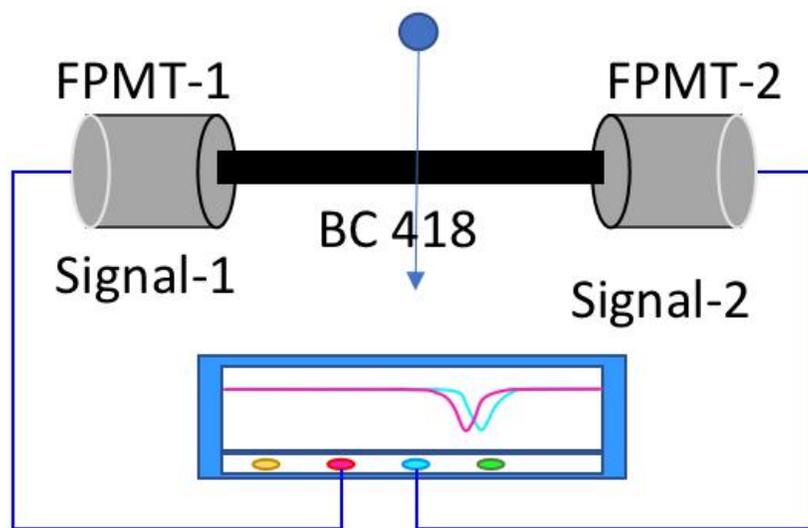


4. 小模型束流实验-- (1) 实验准备

FPMT



人员：马丽双，吴琪



人员：华哲浩

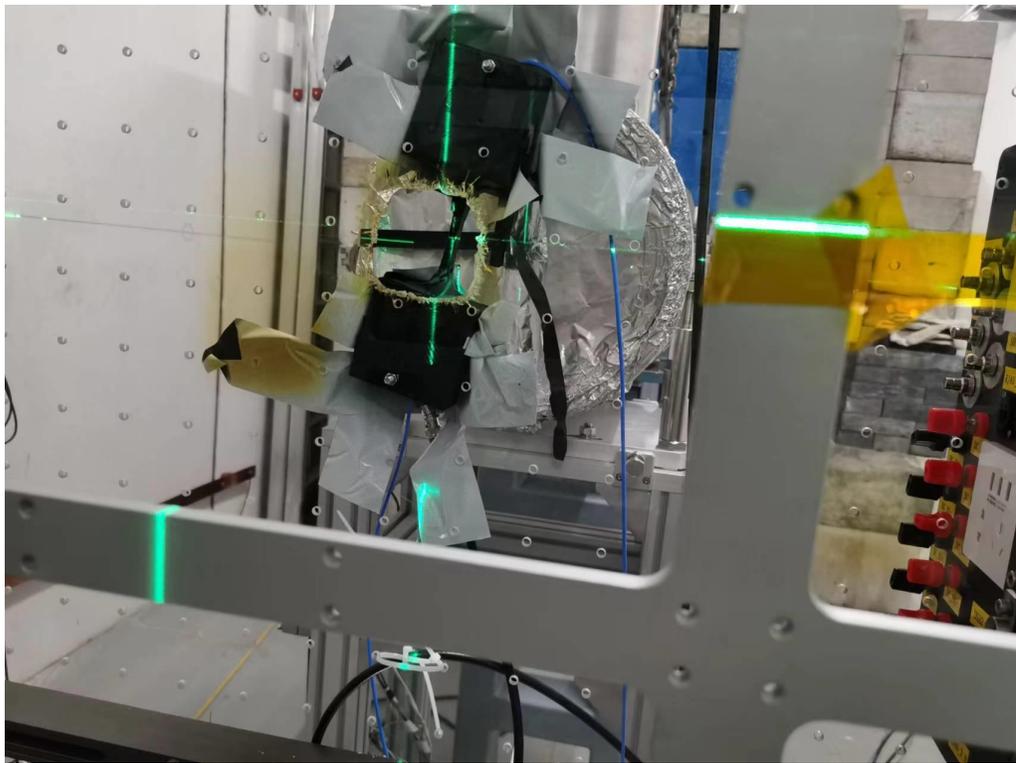
1GHz 高速采样板



人员：胡俊，宋瑞强



4. 小模型束流实验-- (2) 现场测试



测试时间 11月10日

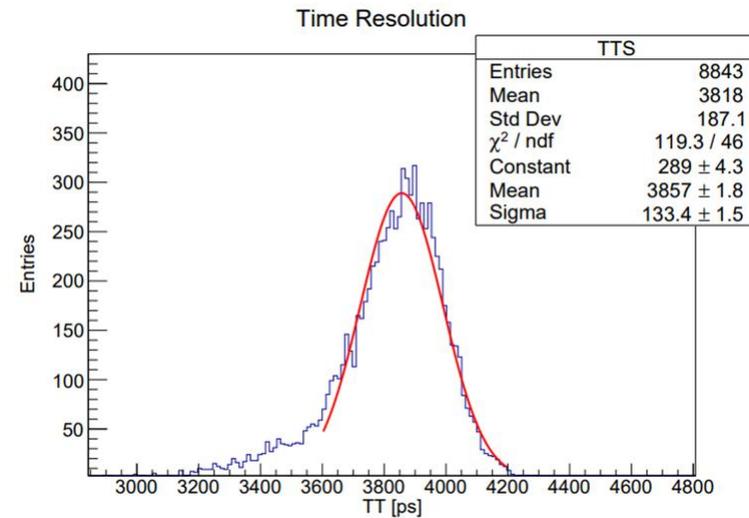
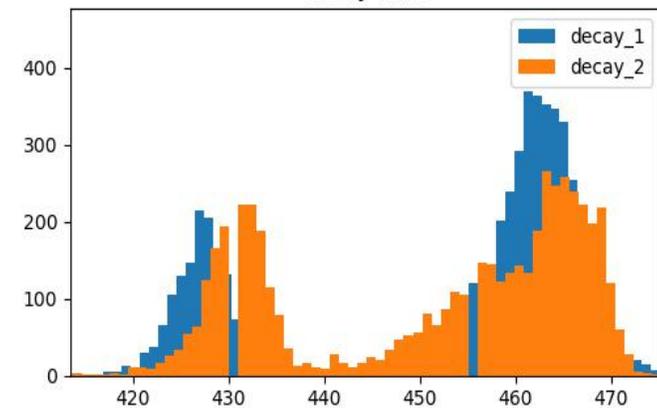
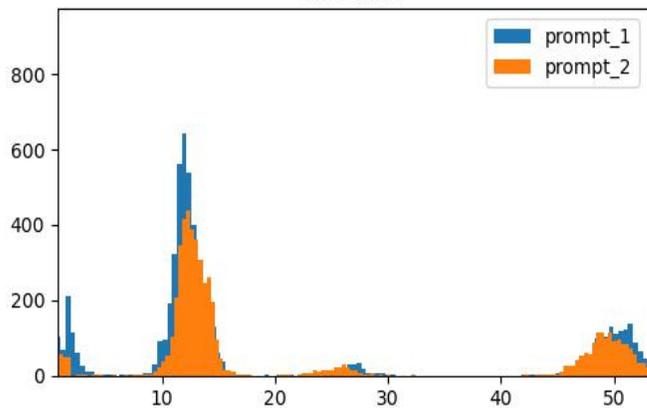
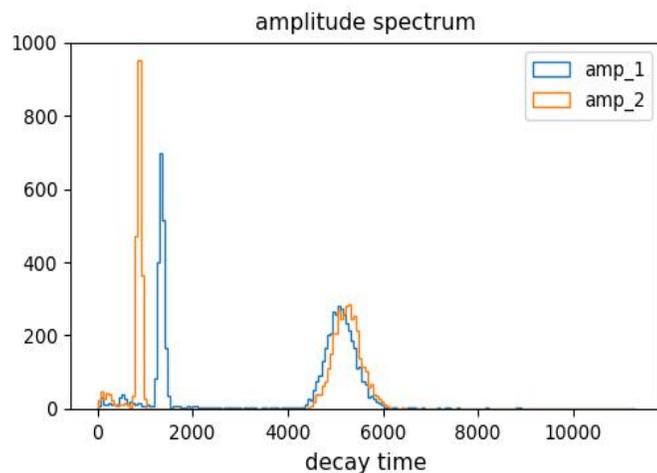
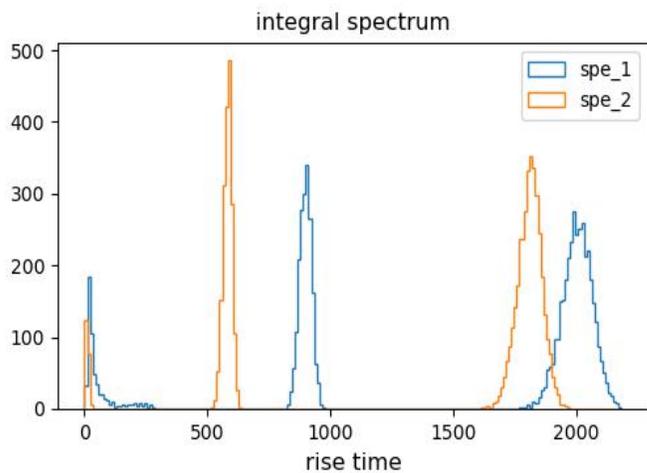
无降能片，质子能量最高80MeV

末级束斑大小20mm

时值北京疫情管控，学生宋瑞强，在散裂樊瑞睿、谭志新、易晗帮助下完成束流实验，表示感谢！



4. 小模型束流实验-- (3) 测试结果



----事例筛选，保留10ns上升沿的数据：

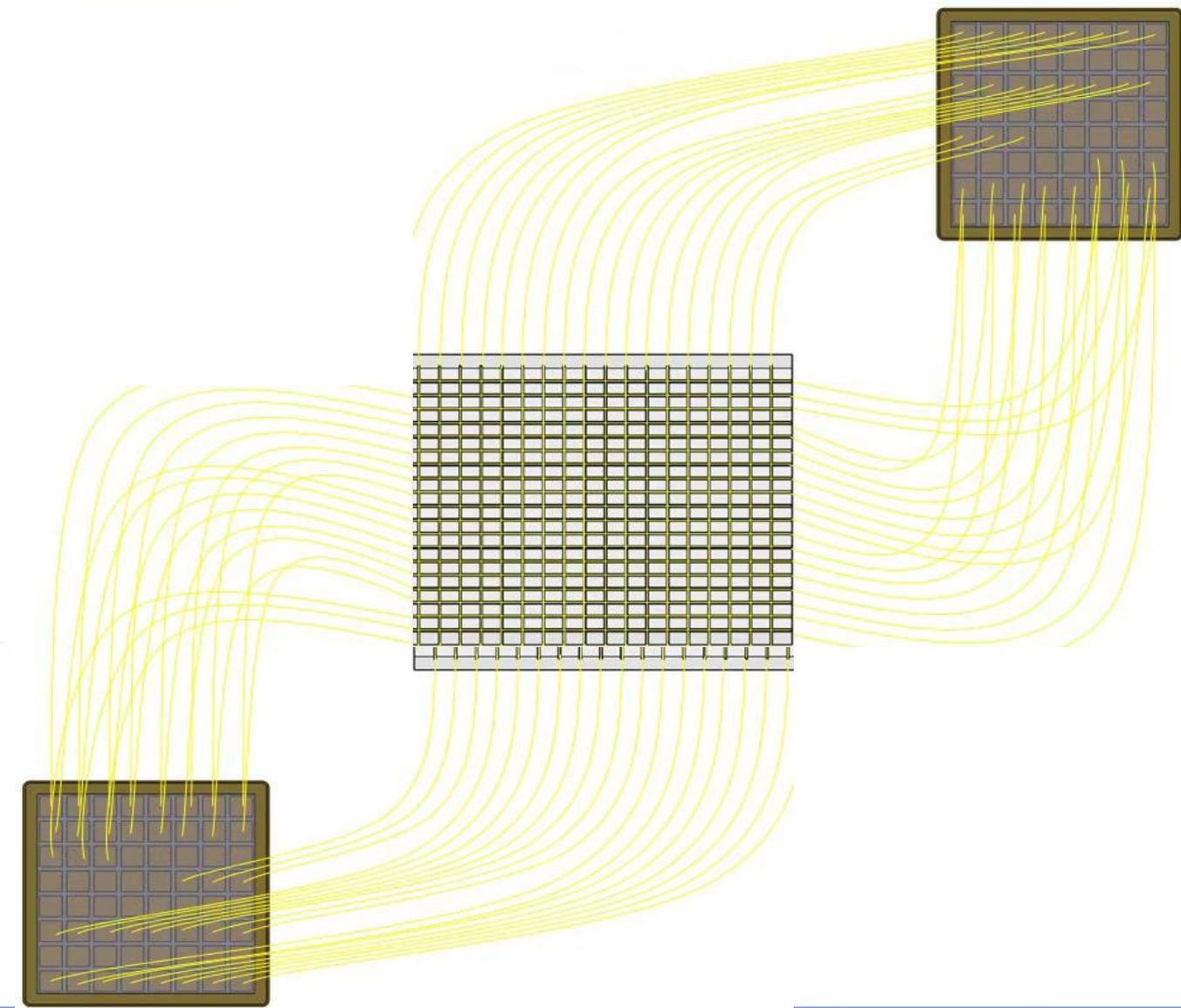
Coincidence time jitter~133 ps

Single tube Time jitter ~93 ps

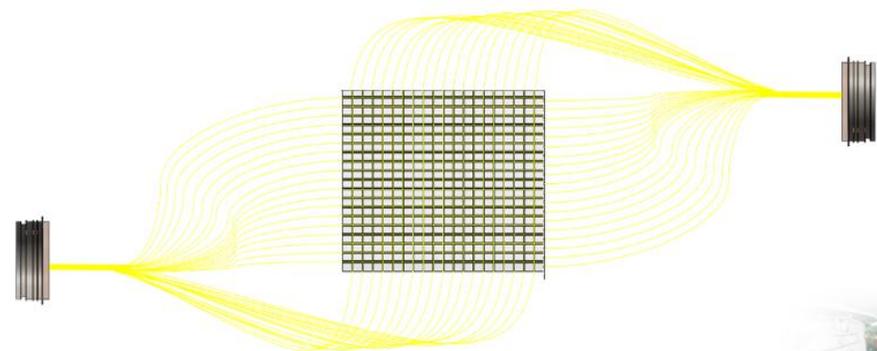
阈值过低会出现能谱上多光子谱，总体波形上升时间在存在两个分布10ns和50ns，衰减时间存在430ns和470ns；

	HV/V	gain	RT	FT	Width	TTS @SPE
5011	-3176	1.75E6	161ps	369ps	381.5ps	30.3ps
5003	-3400	1.25E6	172.6ps	432ps	385ps	26.5ps

5. 升级计划-- (1) 方案

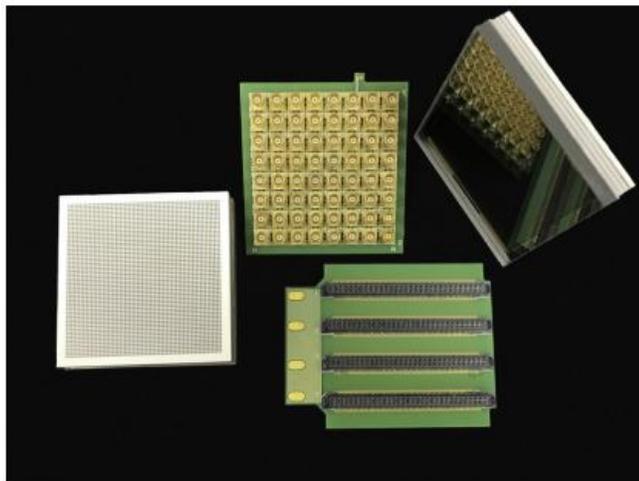


- 多阳极M-FPMT 替换 单阳极FPMT:
- 在保持时间分辨不变的前提下, X-Y两维光纤分别独立读出, 提供1mm的位置分辨;
- 波形采样, 获取电荷得到能量沉积信息; 获取时间分辨, 给出触发信息;
- **具有时间分辨的阵列BPM;**

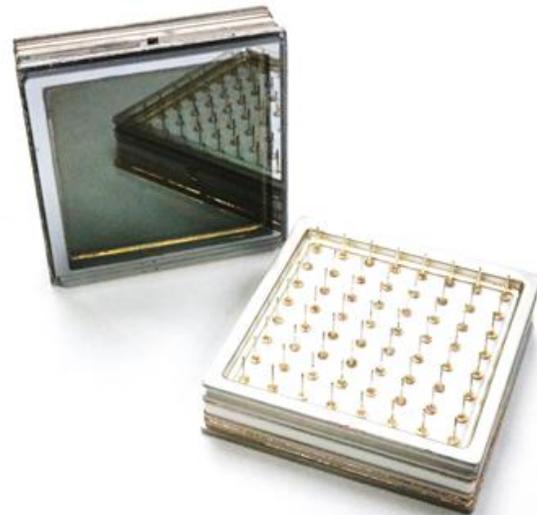


5. 升级计划-- (2) 多阳极光电倍增管

Photek 253



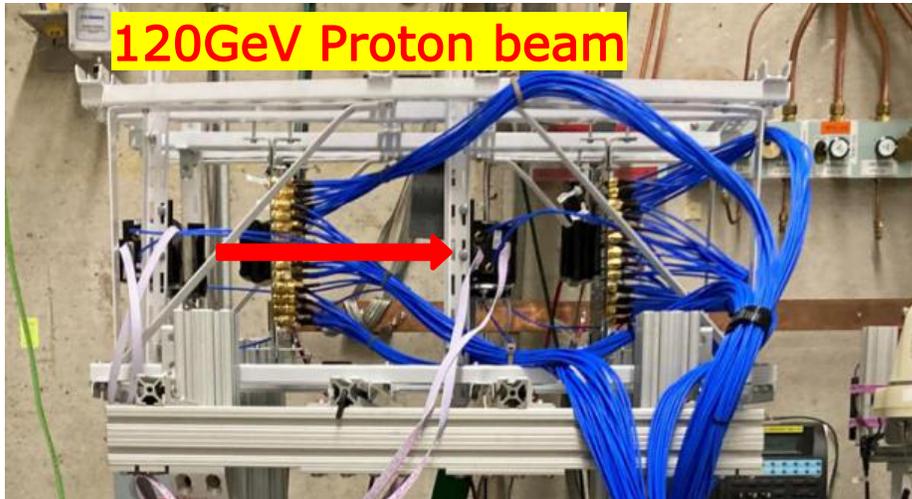
多阳极FPMT



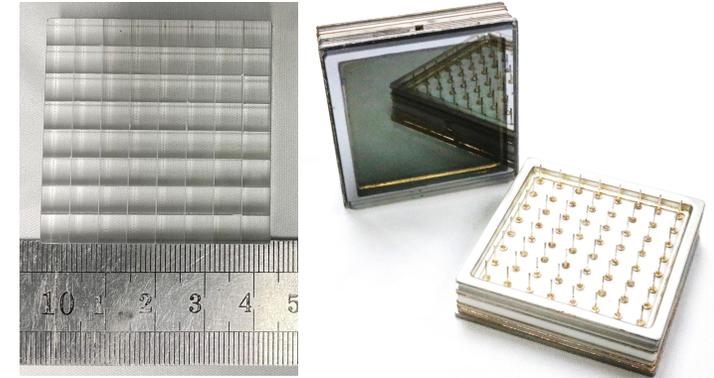
	HV/V	Gain	P/V	Amp(SPE)	RT	FT	Width	TTS@SPE	TTS@MPE
Photek-253	-2600	1.2E7	11.2	113 mV	490 ps	1.1 ns	~1ns	45 ps	16 ps
8*8 Anodes	-1500	3.9E6	18.6	45 mV	334 ps	660 ps	~900ps	40 ps	10 ps



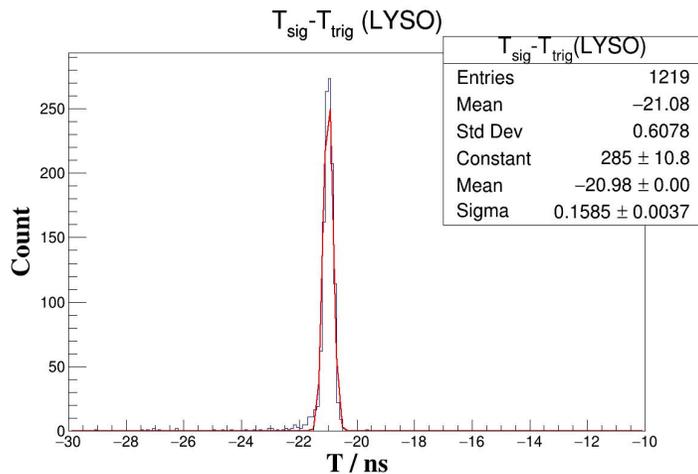
5. 升级计划-- (3) 位敏FLASH 小模型束流实验



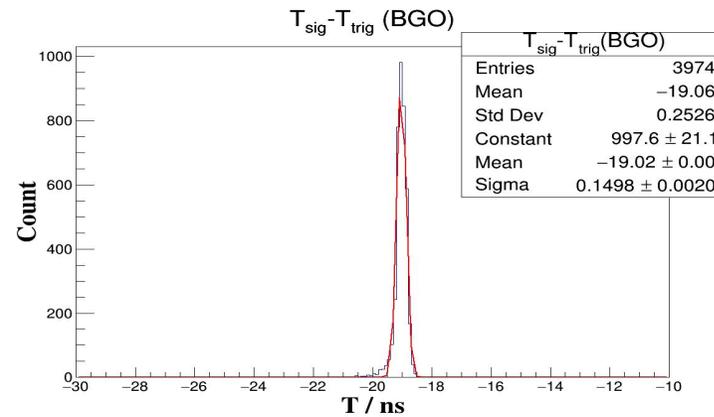
- Beam: 120GeV Proton (Fermi)
- Crystal: LYSO & BGO
- PMT: 8*8 FPMT
- DAQ: CAEN V1742 ~50ps;
- Date: June, 2022



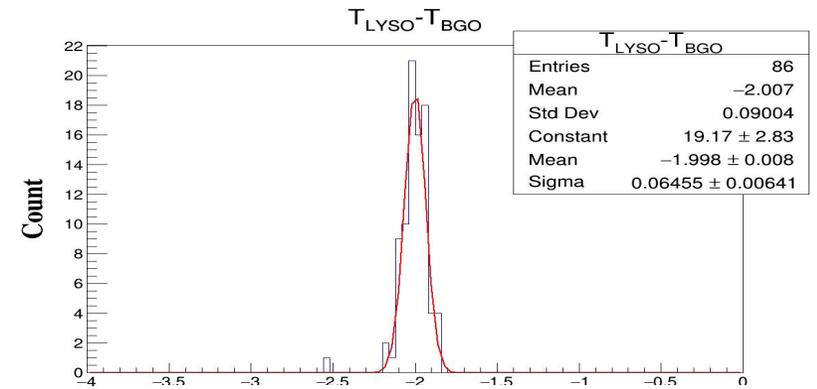
阵列晶体(BGO&LYSO)耦合多阳极FPM



➤ LYSO Time Resolution
Sigma: 158.5 ps



➤ BGO Time Resolution
Sigma: 149.8 ps



➤ LYSO & BGO
Coincidence Time jitter ~64 ps
Single tube Time jitter ~45ps

6. 总结-- (1) 触发系统FLASH参数表

参数类型	参数名称	参数值
探测器 设计 参数	计数率上限	10kHz
	灵敏区面积	10cm*10cm
	探测器数量	3组
	电子学通道	2CH X 3组
	质子能量测量区间	0.8~1.6GeV
	触发系统符合时间分辨	<1ns
	PMT单光子时间分辨	< 100ps
模块 高压 电源	电压范围	-3KV
	纹波	$\leq 100\text{mV}$, V _{pp}
	调节	可编程
	输出稳定度	<0.05%
	时漂/小时	<0.05%
	通道	$\geq 2\text{CH}/1\text{台}$

参数类型	参数名称	参数值
FADC 波形 采集卡 参数	FADC采样率	1Gsp/s
	采样窗宽度	可调整, 16-2048ns
	ADC位数	14bit
	死时间	<128ns
	动态范围	1.5V
	存储深度	>2GB
	通道数	$\geq 2\text{CH}/1\text{块}$
逻辑 符合 触发板	输入通道数	8ch
	输出通道数	8ch
	单通道传输数据率	>6.6Gbps
	同步精度	<100ps
	触发延迟	<2us
	板载内存	4GByte

6. 总结-- (2) 关键器件来源

部件	进口型号	进口价格	国产单位	具体负责人
超快光电倍增管	Photek 210	15万/只	北方夜视+高能所	马丽双
高压电源	CERN-DT	5万/台/4ch	天津森特尔LHAASO用外置高压电源; 四川大学核所低压-高压模块电源	韩纪锋
耐辐照光纤	?		哈尔滨工程大学	朱瑶
快速塑闪	圣戈班 BC418/422	5000/片	261, 高能科迪	华哲浩
信号符合系统	AIDA-2020	4万/台	高能所	胡俊
波形采样电子学	CAEN=DT5742	6万/8ch	高能所	胡俊
数据获取软件 控制软件集成			高能所	张银鸿



THANKS

