



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

超快核辐射探测器关键技术研究

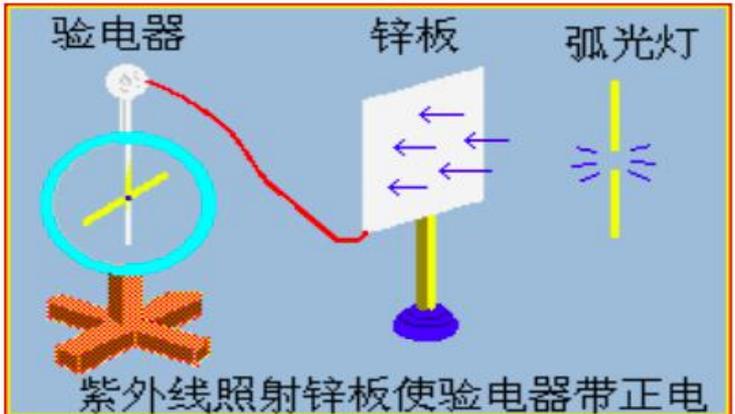
报告人：钱森

qians@ihep.ac.cn

第二十届全国科学计算与信息化会议，西宁，2023.7.9-14

1. 超快核辐射探测器概况；
2. 超快核辐射探测器关键技术；
3. 超快光电倍增管研制进展；
4. 基于超快FPMT的CTR测量；
5. 下一步展望；

1.1 光电倍增管PMT



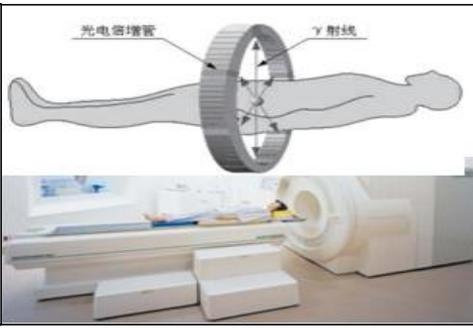
光电效应原理



国产光电倍增管全家福



分析仪器



医疗仪器

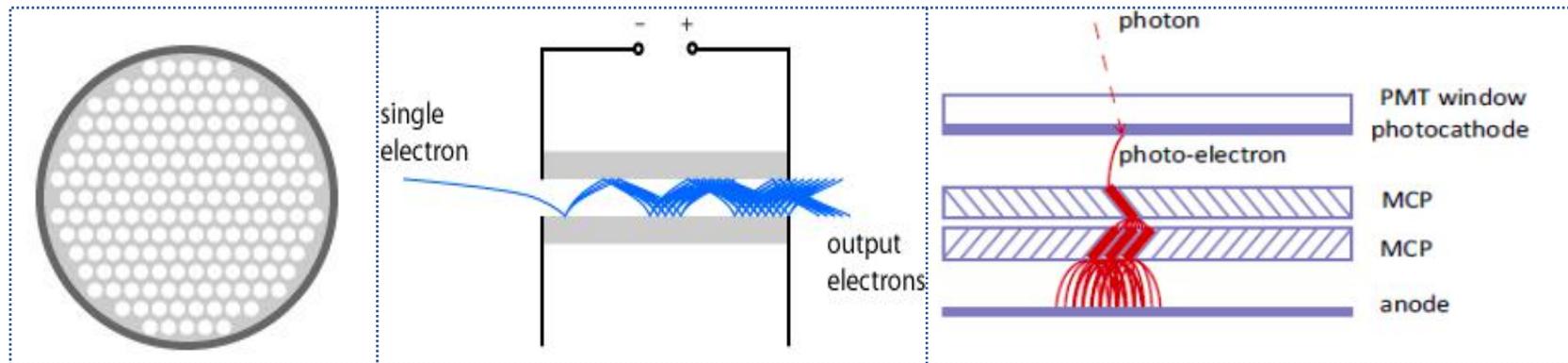
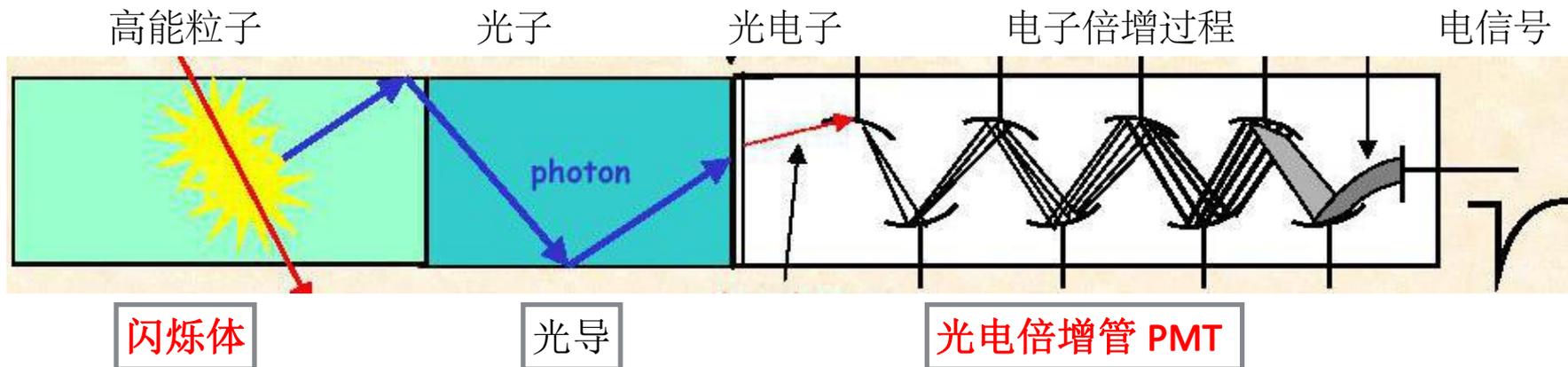


安检设备



高能物理

1.2. 核辐射探测器基本原理（硬件）



➤ 微通道板

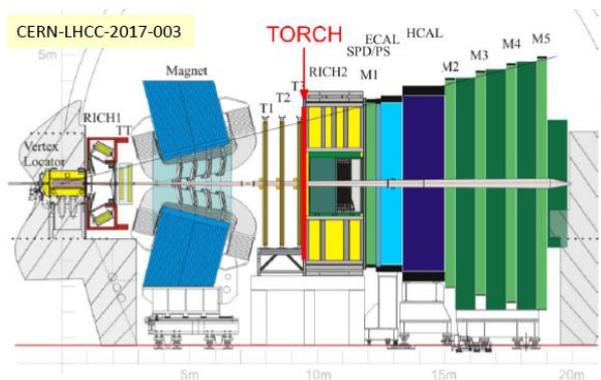
➤ 微通道板工作原理

➤ 微通道板光电倍增管工作原理

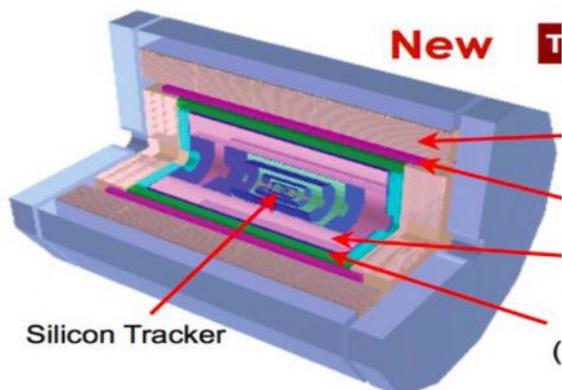
快时间分辨位敏型光电倍增管FPMT:

快时间分辨= 50ps@SPE ; 位敏型=8X8阵列阳极; 抗磁场特性; 单光子探测;

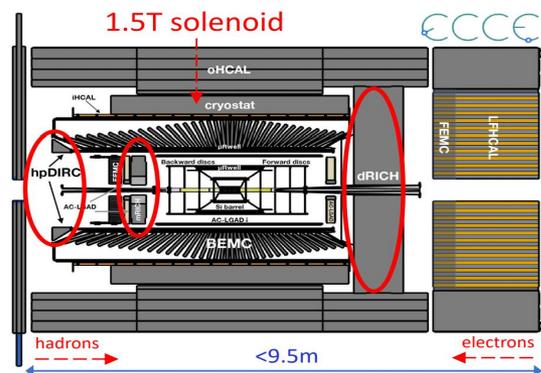
1.3 超快核辐射探测器应用 (1) ----粒子物理实验



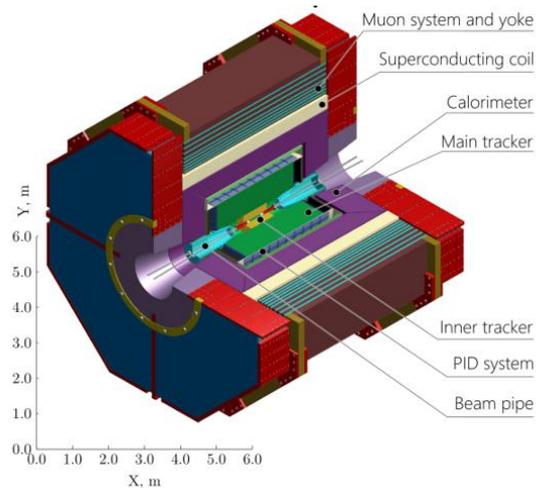
LHCb-TORCH探测器, 要求时间分辨达到~35ps, 以实现10GeV/c的K/P分辨



CEPC的探测器CDR中, 如果增加~50ps的TOF探测器, 可以提高K/p 判选效率10%



美国已批准建造的EIC中的 DualRICH 计划采用MA-MCP-PMT以实现<20 ps的TOF时间分辨



中科大正在筹建的超级陶粲装置, 其PID预研方案计划采用MCP-PMT, 要求时间分辨<100 ps

1.3 超快核辐射探测器应用（2） ---- 医疗影像设备

1980

BGO + PMT
无TOF



TOF-PET预研

2006

LYSO + PMT
TOF(~600ps)



第一台TOF-PET
(Philips)

2016

LYSO + SiPM
TOF(~400ps)



GE Discovery MI

2020



- 2020年西门子医疗的Biograph Vision “追光者”
- 全球第一TOF-PET分辨率214ps;

下一代TOF-PET?
极限在哪?

- 时间分辨~100 ps有效提升成像质量;
- 时间分辨<30 ps可实现直接成像;
- 时间分辨<10 ps有望实现动态成像;

.....

➢ 2022年赛诺联合为287ps;

➢ 2023年联影推出为190ps PET 芯片;

1.4 科技部重点研发专项对超快器件的支持

科技部 “稀土新材料” 重点专项2022年度 项目申报指南

2.4 超快稀土闪烁晶体及其关键制备技术（共性关键技术类）

研究内容：针对核医学成像和高能物理重大应用需求，开展新型超快稀土闪烁晶体材料设计与性能调控研究，探索超快闪烁发光新机制和材料新体系，突破超快稀土闪烁晶体材料制备和器件集成关键技术；研究超快稀土闪烁晶体与硅光电倍增管、超快光电倍增管等新型光电探测器件的匹配应用技术，开发基于超快稀土闪烁晶体的飞行时间—正电子发射断层扫描成像(TOF-PET)探测器、吉赫兹高重复频率 X 射线自由电子激光探测器等先进辐射探测器件。

考核指标：提出超快闪烁发光新机制并研制出新型超快闪烁材料；开发出光产额 ≥ 20000 光子/兆电子伏、衰减时间 < 10 纳秒和光产额 ≥ 2000 光子/兆电子伏、衰减时间 < 5 纳秒的超快稀土闪烁材料至少各 1 种，晶体尺寸 ≥ 2 英寸；研制出符合时间分辨率 < 100 皮秒的 TOF-PET 探测器、重复频率 ≥ 1 吉赫兹的 X 射线自由电子激光探测器至少各 1 款。申请发明专利 ≥ 10 项。

科技部
“基础科研条件与重大科学仪器设备研发”
重点专项2023年度项目
申报指南

2.17 伽马射线飞行时间阵列探测器（共性关键技术）

研究内容：开发伽马射线飞行时间阵列探测器，突破高时间分辨率、高空间分辨率的闪烁晶体阵列和光电传感器阵列的光学设计和制造工艺、高速时间信号提取和时间数字转换（TDC）等关键技术，开展工程化开发、应用示范和产业化推广，形成具有自主知识产权、质量稳定可靠的部件产品，实现在中小型动物 PET 和人体脑部 PET 等仪器中的应用。

考核指标：闪烁晶体长度 $\geq 20\text{mm}$ ，闪烁晶体截面边长 $\leq 2\text{mm}$ ，闪烁晶体阵列大小 $\geq 8 \times 8$ ，探测器长度方向分辨率 $\leq 5\text{mm}$ ，探测器阵列解码分辨率 $\leq 2\text{mm}$ ，TDC 分辨率（FWHM） $\leq 10\text{ps}$ ，全局时钟 jitter $\leq 5\text{ps}$ ，双探测器符合时间分辨率（FWHM） $\leq 100\text{ps}$ 。

项目完成时应通过可靠性测试，项目完成时应通过可靠性测试，平均故障间隔时间 ≥ 5000 小时；技术就绪度达到 9 级；至少应用于 2 类仪器。明确发明专利、标准和软件著作权等知识产权数量，具有自主知识产权；形成批量生产能力，经用户试用，满足用户使用要求。

有关说明：牵头申报单位须为具有相关部件产品研发、生产制造和市场销售基础和能力的企业。

关键词：飞行时间，光电传感，分子影像仪器

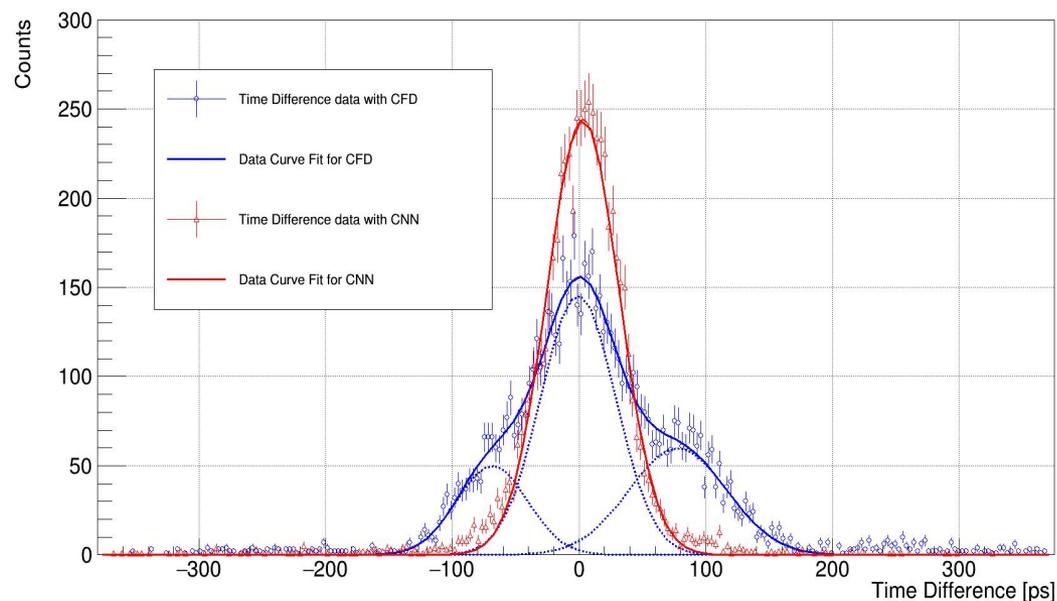
1. 超快核辐射探测器概况;

2. 超快核辐射探测器关键技术;

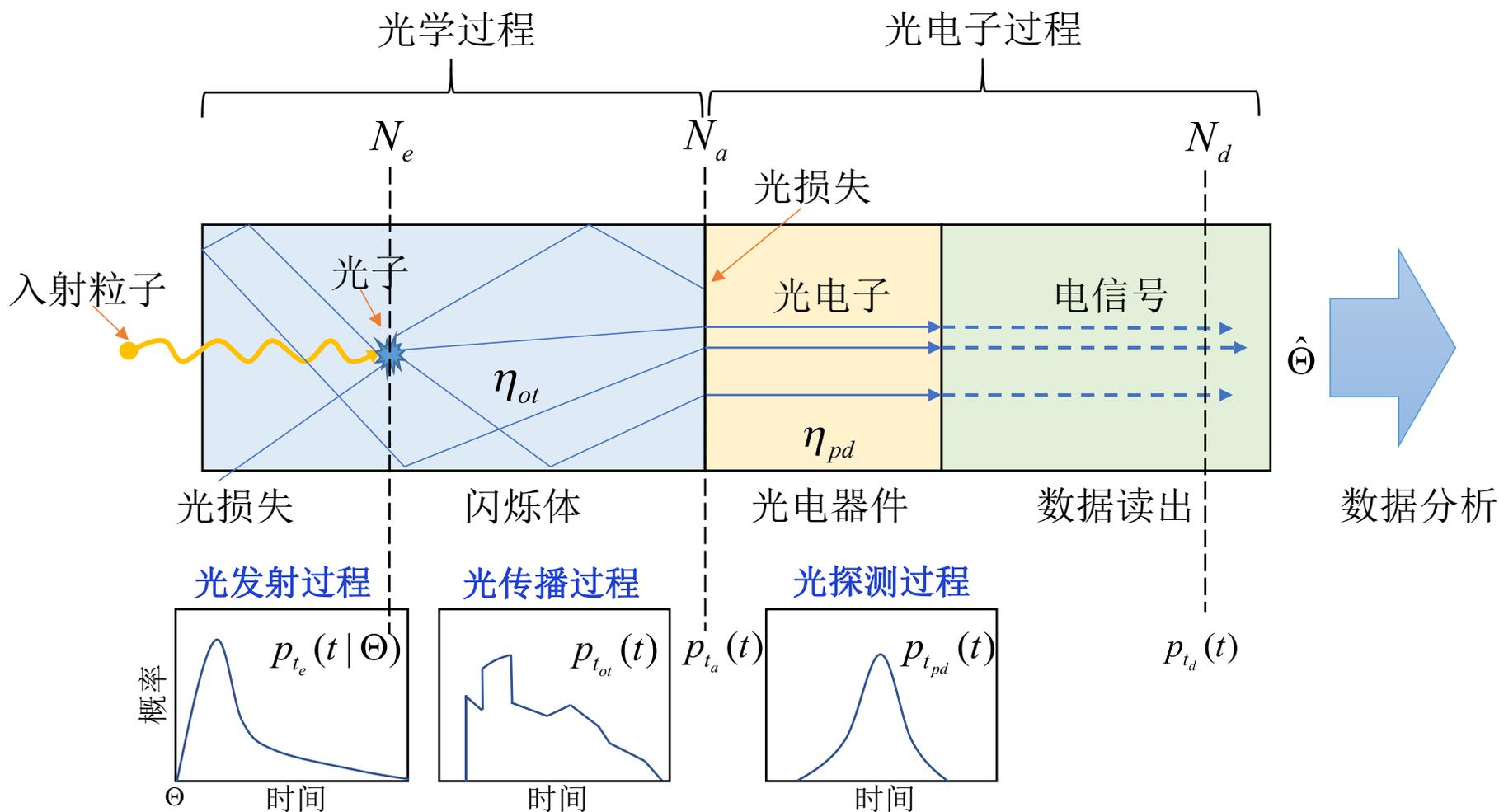
3. 超快光电倍增管研制进展;

4. 基于超快FPMT的CTR测量;

5. 下一步展望;

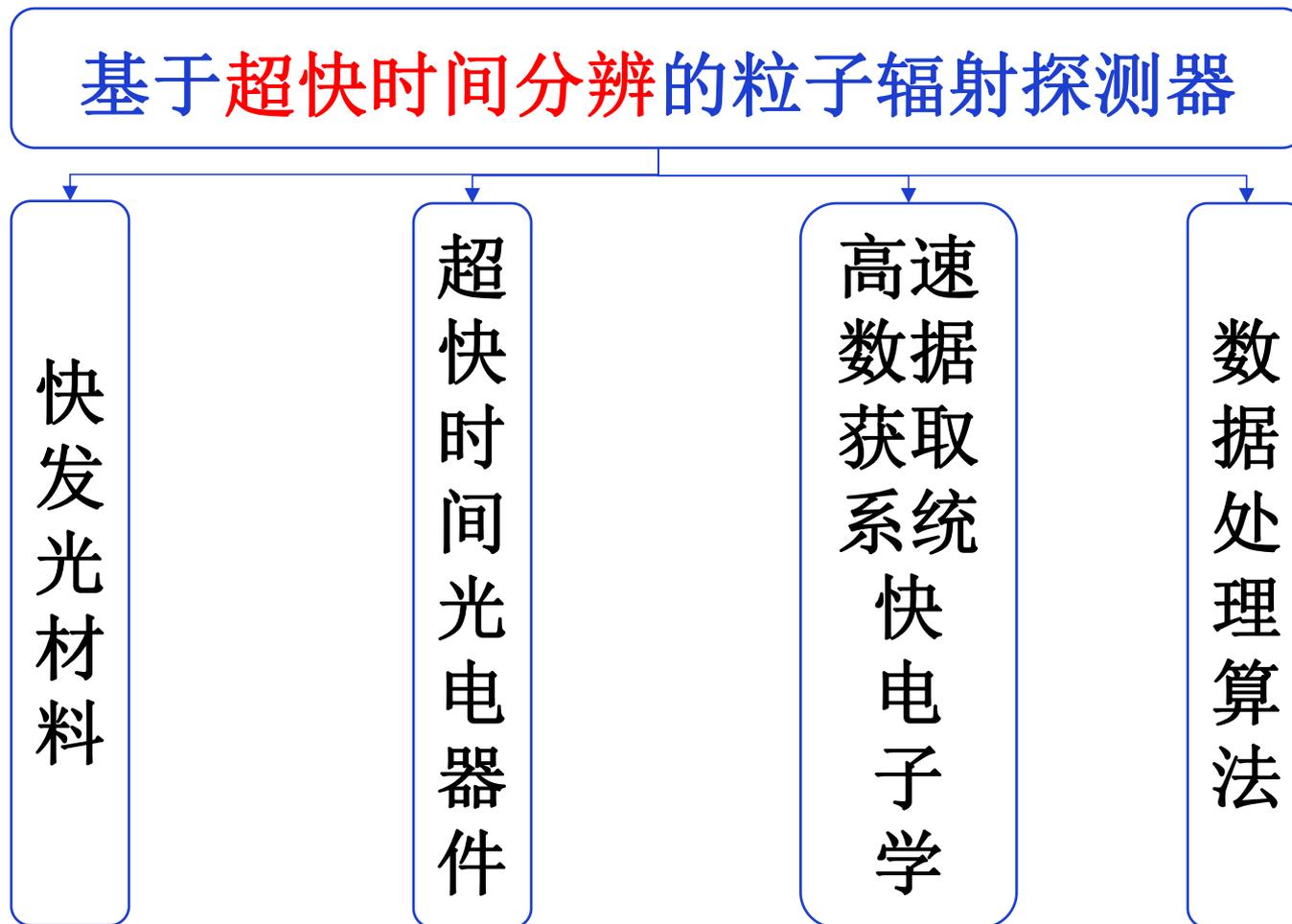


2.0 超快核辐射探测器----本证时间分辨分析



光发射过程（发光材料）、光传播过程（耦合方式）、光探测过程（光电器件）是影响粒子辐射探测器时间分辨的主要因素。

2.1 超快核辐射探测器----关键技术分析



2.2 关键技术①--快闪烁晶体现状

	BaF ₂	LYSO	CLYC:Ce	LaBr ₃	GAGG: Ce
光产额 (ph/MeV)	800/8000	30000	22000	60000	57000
衰减时间 (ns)	0.6/660	40	2/6600	25	80/258
原子序数 Z_{eff}	54	66	44	47	54.4
密度 (g/cc)	4.89	7.4	3.31	5.3	6.63
吸收长度 (mm)	25	12	12	22	-
能量分辨率 / %	12%	10%	4%	3%	6%
发光波长 (nm)	220/325	420	320/344	380	520
是否潮解	否	否	是	是	否

◆ LYSO和GAGG综合性能优异，但其衰减时间长，不利于粒子辐射探测器的时间性能提升。

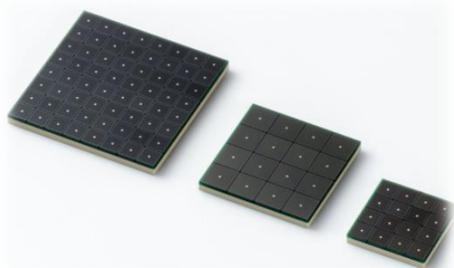
◆ 需要寻找具有更快发光机制的材料。

"Performance study of GAGG:Ce scintillator for gamma and neutron detection", Journal of Instrumentation 2020, Vol.15 ,C06031,

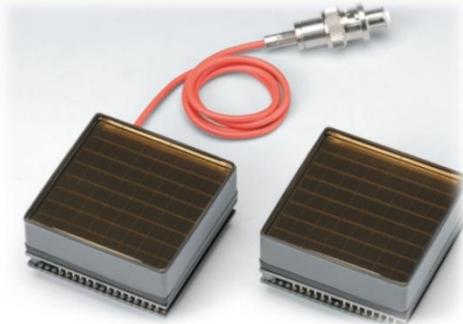
"Piled-up neutron-gamma discrimination system for CLLB using CNN", Journal of Instrumentation,2022 JINST 17 T08001;

"Study on the Optimized ER of Scintillator Detectors Based on SiPMs and LYSO:Ce",Journal of Instrumentation,2022 JINST 17 T09010;

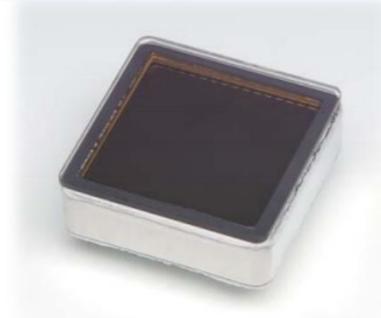
2.2 关键技术②--超快光电器件现状



SiPM



Dynode -PMT



MCP -PMT(FPMT)

	SiPM	Dynode-PMT	MCP-PMT (FPMT)
时间分辨	~100 ps	~200 ps	~40 ps
位置分辨	可扩展阵列	8×8	64×64
增益	$10^5 \sim 10^6$	$10^6 \sim 10^7$	$10^6 \sim 10^7$
探测效率	30~50%	20~30%	20~30%
抗磁场特性	好	差	好

“Performance of the 8-in. R5912 photomultiplier with super bialkali photocathode”, Journal of Instrumentation,,2015.Vol.10 ,T08001 ,

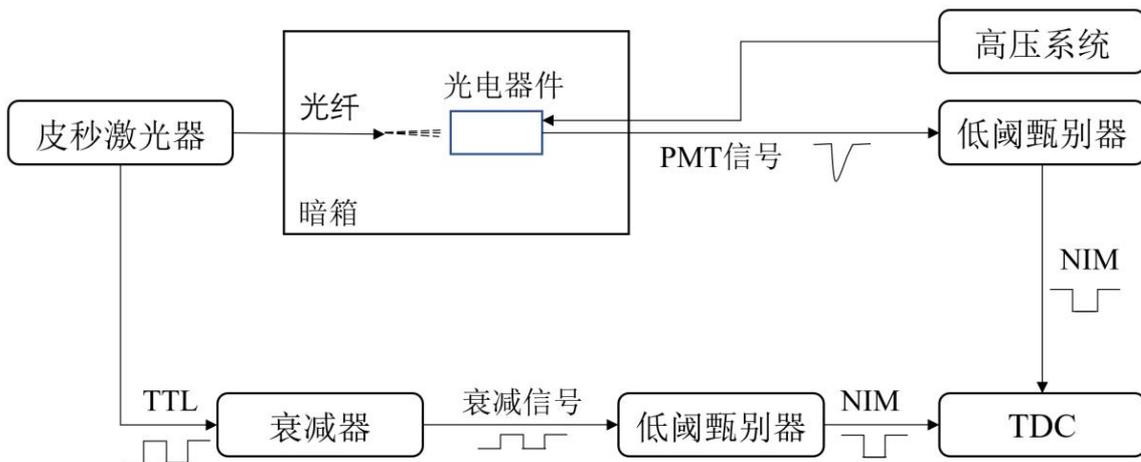
“A performance evaluation system for photomultiplier tubes”,Journal of Instrumentation,, 2015. Vol.10 ,P03023 ,

“R&D of a fast timing electronics board for testing SiPMs” Journal of Instrumentation, 2020, Vol.15, C07004,

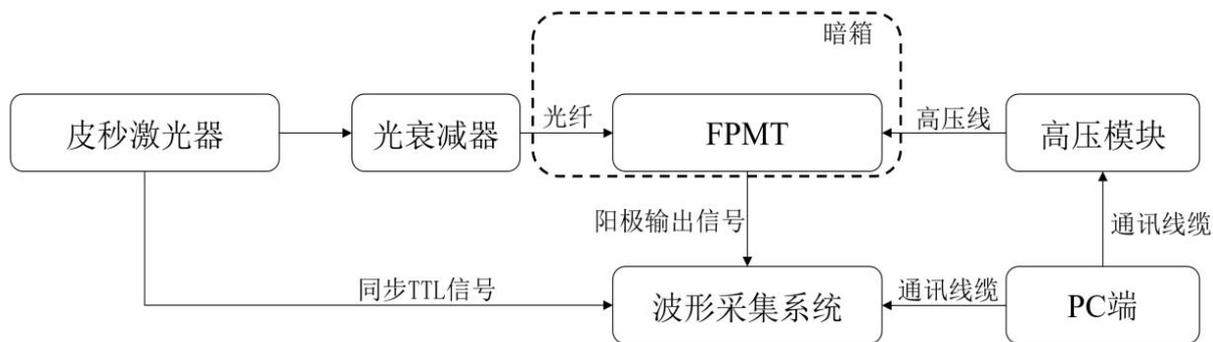
“Performance of the 20-inch dynode-PMT high quantum efficiency”, Journal of Instrumentation, 2020, Vol.15 ,T06005,

“Study on the stability of 20 inch PMT based on microchannel plate”, Journal of Instrumentation, 2021, JINST_004T_0221,

2.2 关键技术③--数据获取系统现状



传统数据获取系统原理

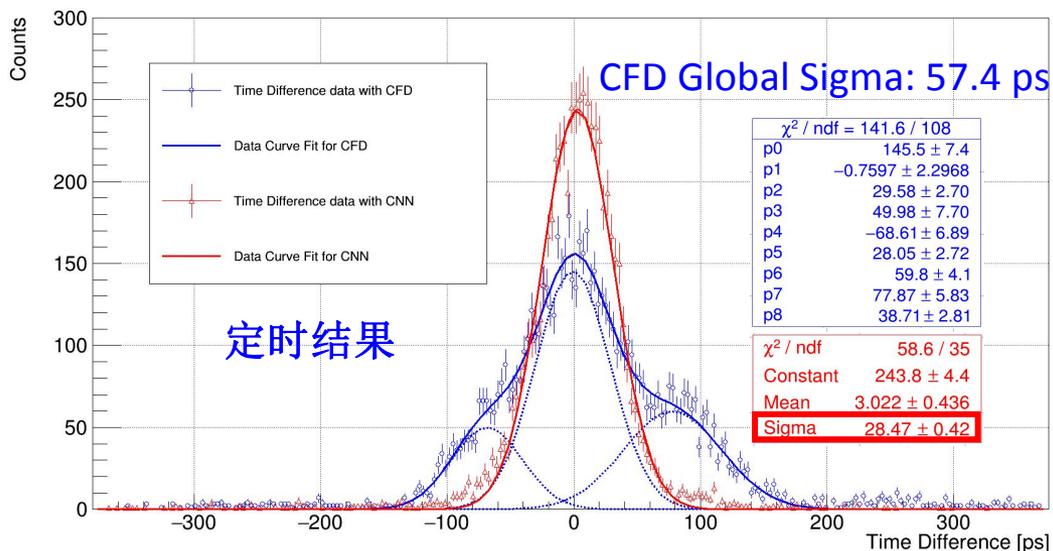
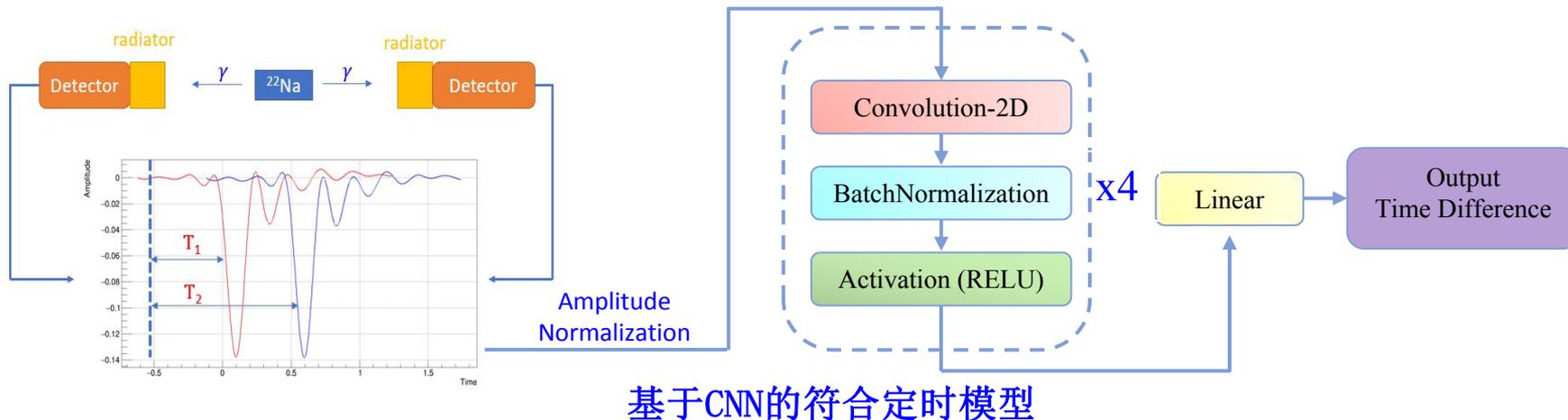


基于波形采样技术的数据获取原理

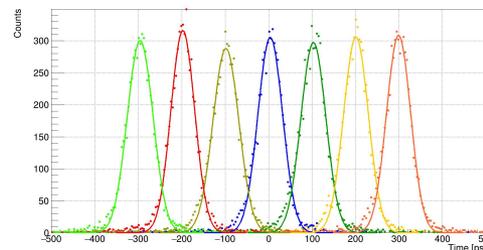
- ◆ 结构复杂
- ◆ 测试精度差
- ◆ 每个器件只能进行一个参数测量
- ◆ ...

- ◆ 结构简单
- ◆ 测试精度高
- ◆ 可以基于波形获取时间、幅度、能量等信息
- ◆ ...

2.2 关键技术④--AI算法现状



➤ 对比CFD定时结果(57.4 ps)，CNN定时有将近50%提升(28.5 ps)。



➤ 不同标签数据定时结果无偏且均匀。

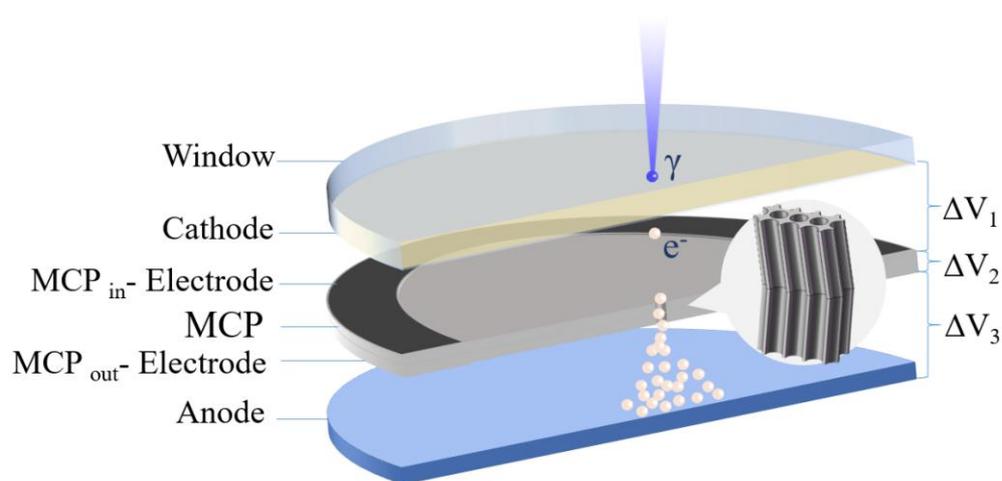
1. 超快核辐射探测器概况；

2. 超快核辐射探测器关键技术；

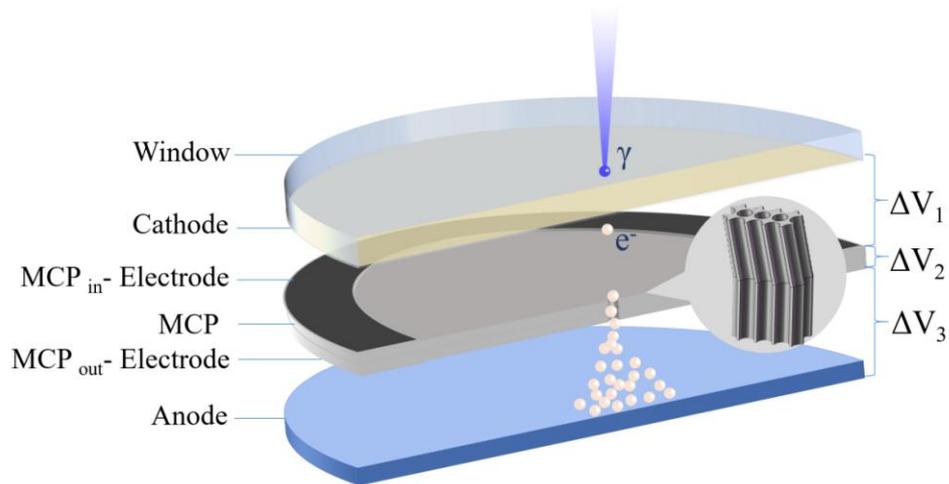
3. 超快光电倍增管研制进展；

4. 基于超快FPMT的CTR测量；

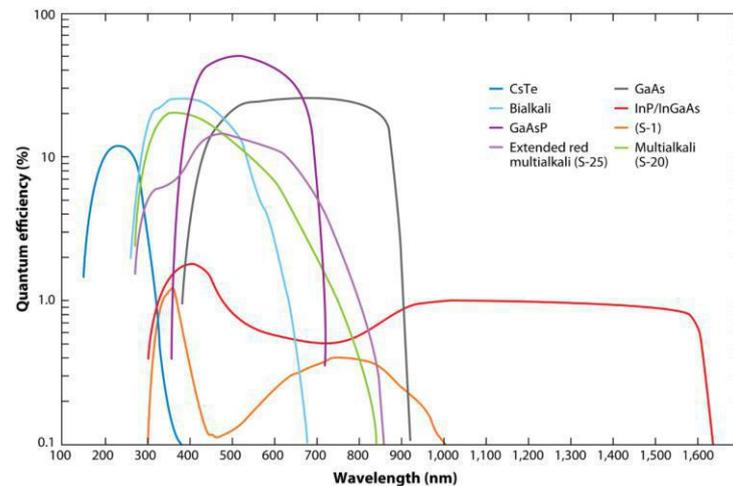
5. 下一步展望；



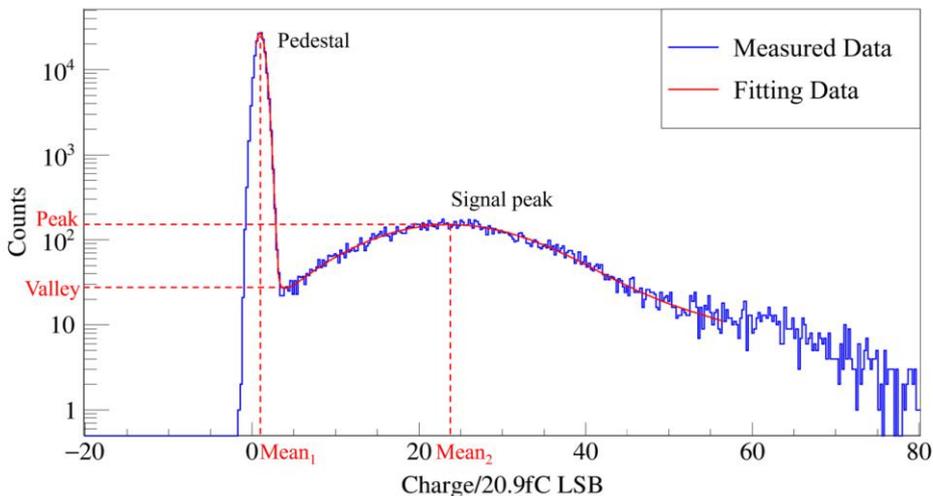
3.1 FPMT探测原理与关键参数(1)



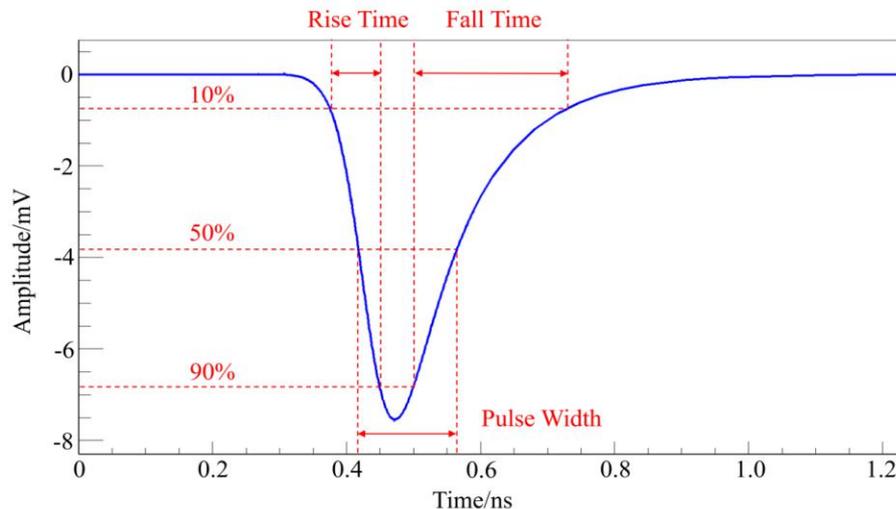
FPMT基本结构



FPMT量子效率 (QE)

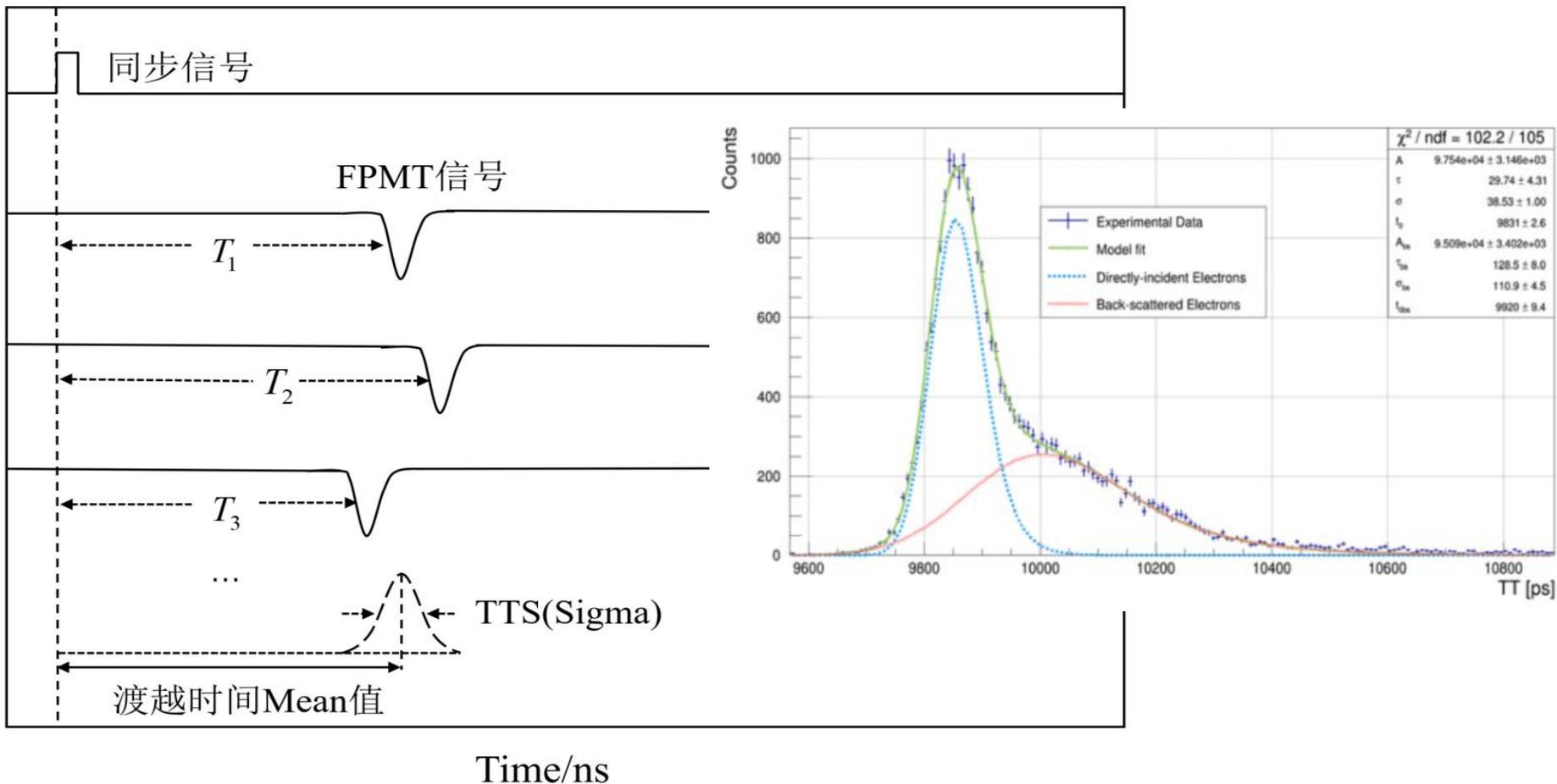


FPMT单光子谱 (获得增益、峰谷比)



FPMT典型波形 (RT、FT、PW)

3.1 FPMT探测原理与关键参数(2) --TTS

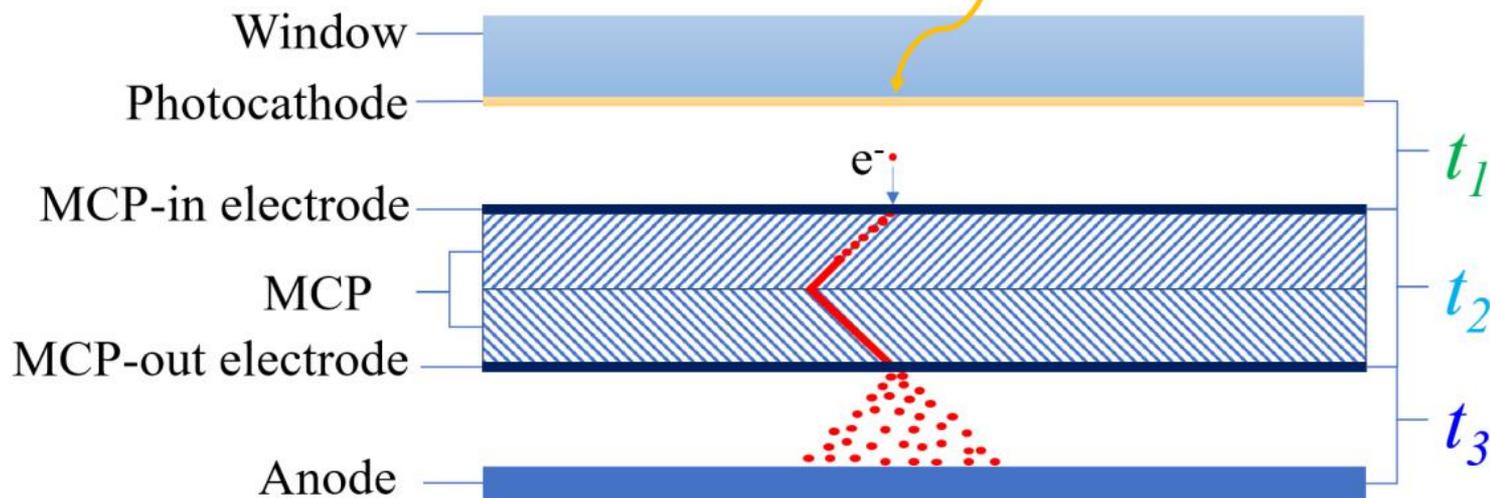


渡越时间分辨 (TTS)：表征FPMT时间分辨能力的参数，影响粒子辐射探测器的最关键参数

3.1 FPMT探测原理与关键参数(3)

电子在FPMT中的漂移特性 γ

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{t_1}^2 + \sigma_{t_2}^2 + \sigma_{t_3}^2}$$



$$\sigma_{t_1} = \sqrt{\frac{m_e L}{2e}} \times \frac{\sigma_E}{E^{3/2}}$$

$$\sigma_{t_2}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{d_i}^2}{(1+a_i)^2} \left(\frac{2m v_{i-1}}{eV} \right)^2$$

$$\frac{dV_a}{dt} = \frac{e}{C(V_a - V_0)} N$$

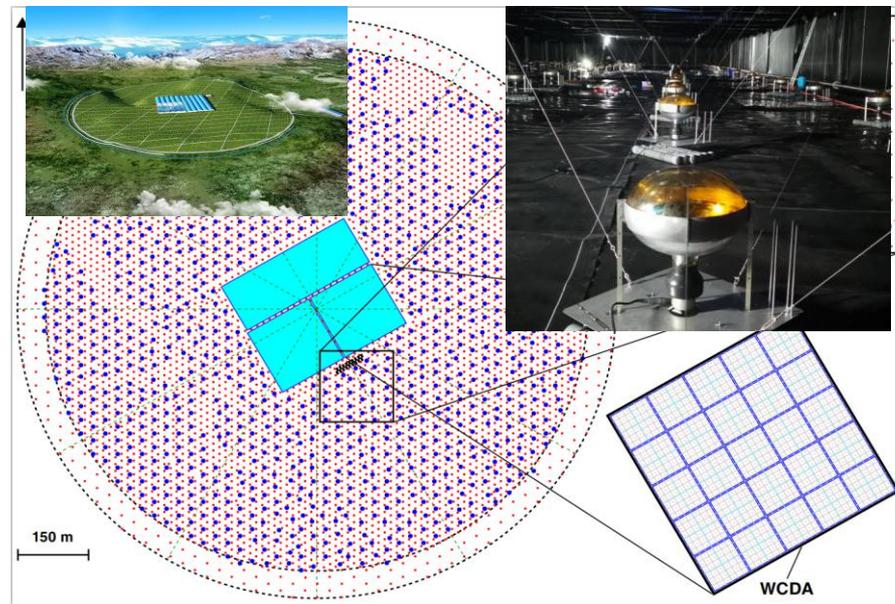
◆ FPMT的整体时间性能受到电子在FPMT中的漂移特性的影响。

3.2 大科学装置LPMT技术积累（1）

- 大亚湾中微子实验（DayaBay）：《Science》2012年度十大科学突破；
 - 江门中微子实验（JUNO）：《Science》将是中国粒子物理学家革命性的工作；
 - 高海波宇宙线观测站（LHAASO）：开启“超高能伽马天文学”时代；
- 20吋高探测效率光电倍增管（LPMT）是大科学装置JUNO和LHAASO的核心器件，**价格可控、性能达标**产品的成功研发，关系到上述两个大科学装置的成功建设！



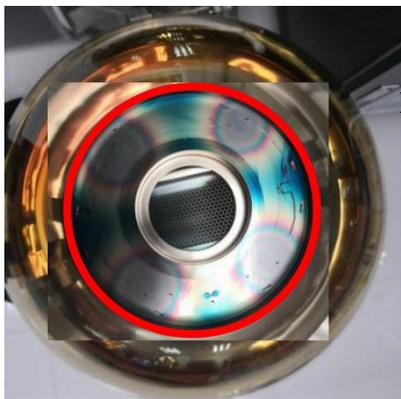
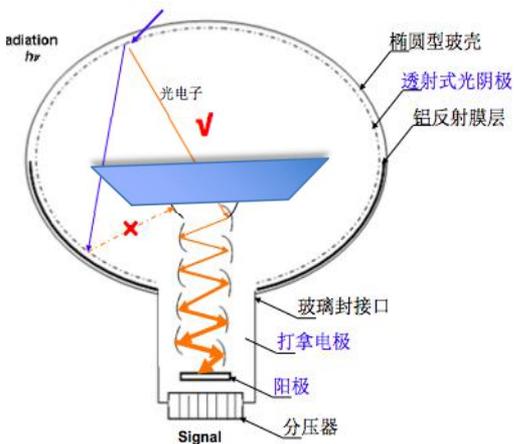
JUNO： 20吋PMT： 国产15000只， 75%



LHAASO： 20吋PMT： 国产2700只， 100%

3.2 大科学装置LPMT技术积累 (2)

传统Dynode-PMT



① MCP组件探测单光子

量子效率QE=20%

② QE=30%

• PMT问世以来, QE始终停留在20%左右无法提升? 工艺, 材料, 原理等限制?

收集效率CE=70%

③ CE=100%

• ALD镀膜技术, 在保证MCP开口比不变的情况下, 提高MCP收集效率CE,

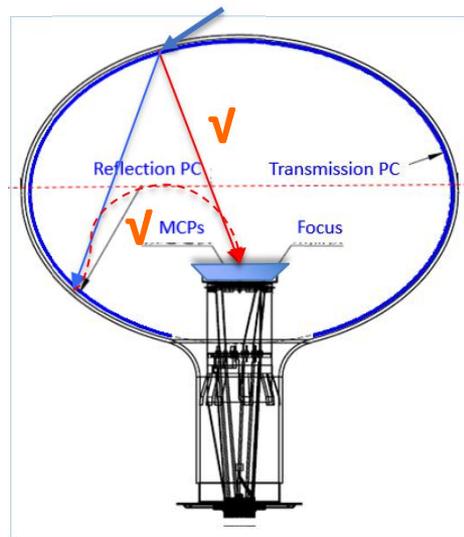
探测效率DE=14%

④ DE=30%

• 提高2倍探测效率, 如何标定。

⑤ 低放射性大面积玻壳

新型MCP-PMT



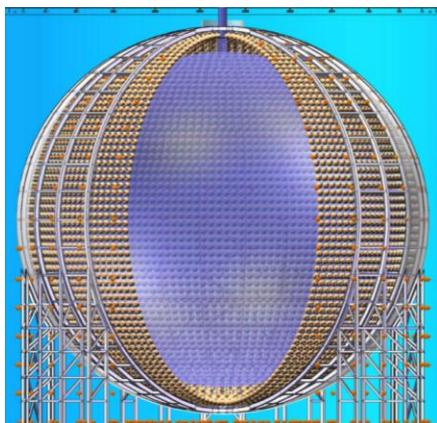
⑥ 低售价 (2万) : 远低于2009年启动预研方案向滨松的询价;

3.3 FPMT研制历程（1）--路线图

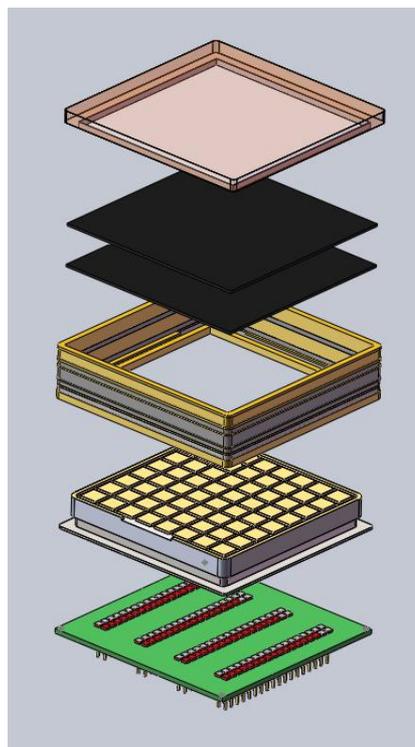
中国科学院高能物理研究所（IHEP）+ 北方夜视科技（南京）研究院有限公司（NNVT）



20英寸 大面积MCP-PMT



江门中微子实验(JUNO)



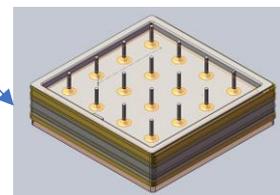
FPMT 设计



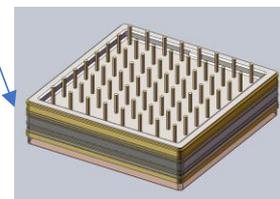
single



2×2



4×4



8×8

◆ MCP-PMT的成功研制推动了FPMT的国产化进程。

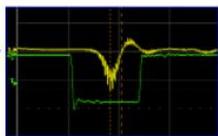
3.3 FPMT研制历程（2）--联合实验室



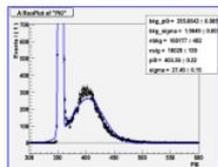
- 联合NNVT，在江苏省成立院士工作站，建立“光电探测联合实验室”，
- 实验室主任：王贻芳院士；



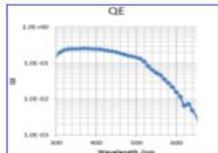
光电器件性能标定实验室 (IHEP)



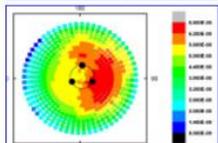
- 阳极信号上升时间-- Anode Pulse Rise Time;
- 前/后脉冲信息--Pre/Late/After Pulse;
- 暗计数率-- Dark Count



- 单光电子谱--The Single Photoelectron Spectrum;
- 分压器设计--The voltage distribution (BASE) ;
- 最佳工作高压--The Supply voltage;
- 典型高压增益曲线--Typical Gain Characteristic;
- 阳极暗电流--Anode Dark Current



- 光谱响应曲线--Spectral Response;
- 峰值波长曲线--Wavelength of Maximum Response;
- 阴极灵敏度--Cathode Sensitivity: Luminous(2856K);
- 光阴极量子效率--Quantum efficiency with λ



- 光阴极有效面积--Photocathode efficiency Area;
- 光阴极均匀性--Photocathode efficiency Uniform;
- 碱源安装布局--The position of the Sb, K, Cs;

Others

- 线性--The linearity of the PMT
- 抗磁场性能--Magnetic characteristics;
- 时间性能--Transit Time Spread (FWHM)

- 可以完成光电倍增管所有参数的精确标定和测试;
- 是“核探测与核电子学国家重点实验室”重要组成的专业实验室;
- 2009-2019年为中微子实验成功研制20吋LPMT并实现产业化。
- 2021加入中科院可靠性保障中心，为电真空器件专业实验室;
- 2022年由高能所和北方夜视联合建立“光电探测联合实验室”;
- 2023年将完成光电倍增管国家测试标准CNAS认证;

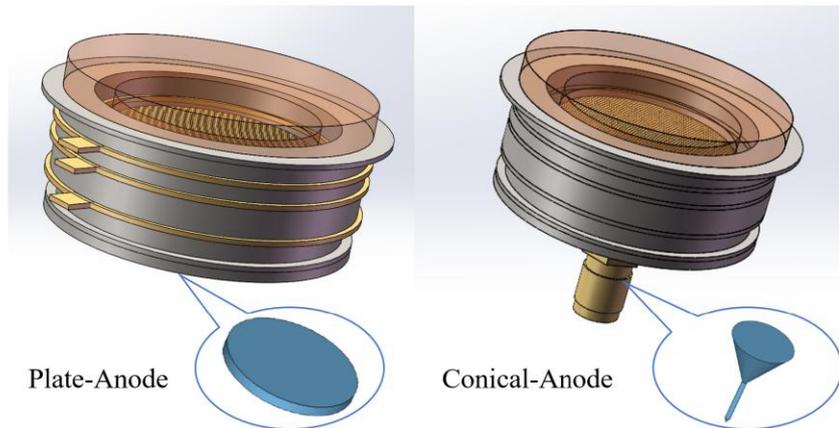
3.3 FPMT研制历程（3）--样品

- 研制出8X8阳极超快位敏型光电倍增管，单光子时间分辨40ps，多光子时间分辨10ps；
- 开发出多个管型的超快光电倍增管，积极拓展在非高能物理领域的应用；

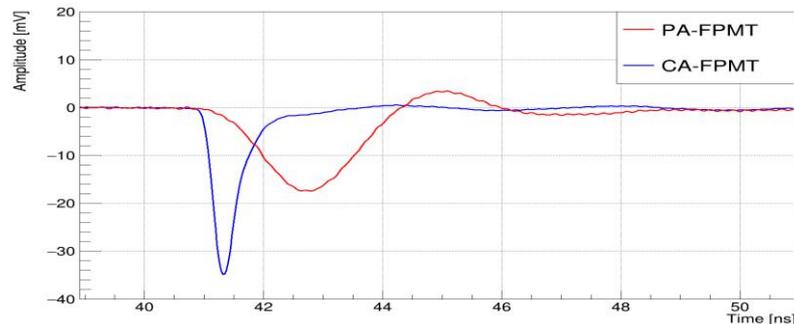


3.4 FPMT性能 (1) --单阳极

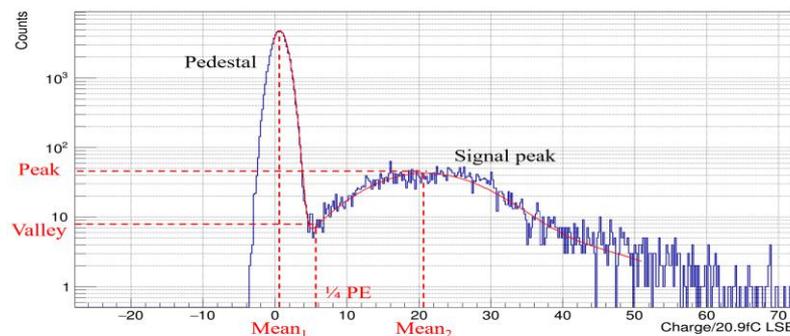
➤ Anode Optimization



➤ Waveform comparison

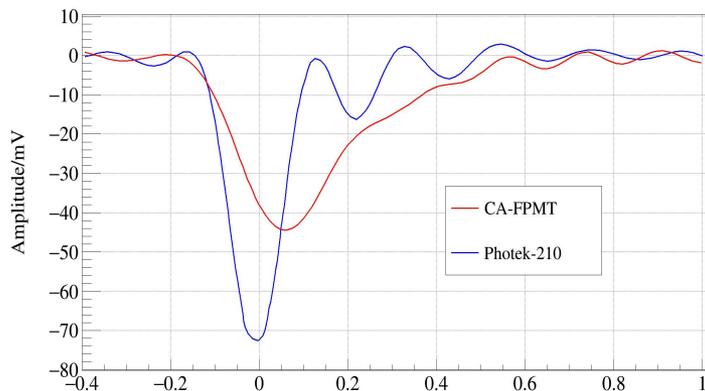


➤ SPE Spectrum

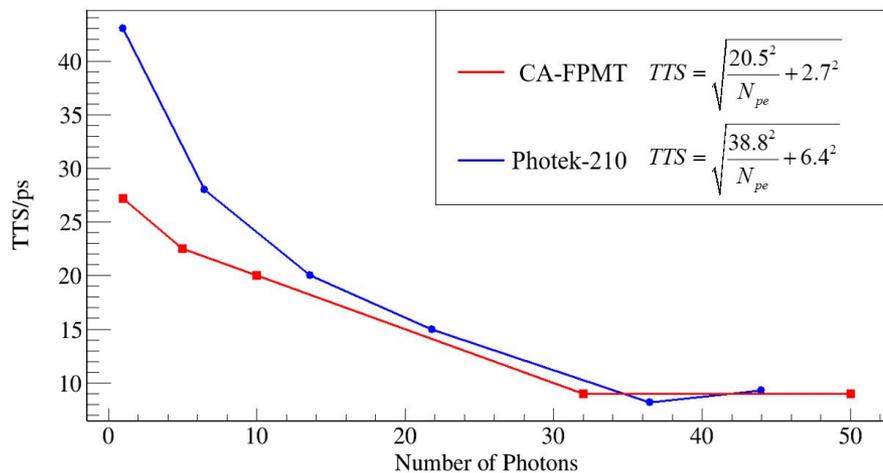


	HV/V	Gain	P/V	Amp(SPE)	RT	FT	Width	TTS@SPE	TTS@MPE
Photek 210	-4700	2.9E6	2.0	93 mV	96 ps	350 ps	190ps	45 ps	10 ps
Plate-Anode	-2000	1.9E6	28.8	7 mV	1.4 ns	1.4 ns	1.8 ns	70 ps	25 ps
Conical-Anode	-3181	2.6E6	6.3	53 mV	150 ps	420 ps	330 ps	27 ps	5 ps

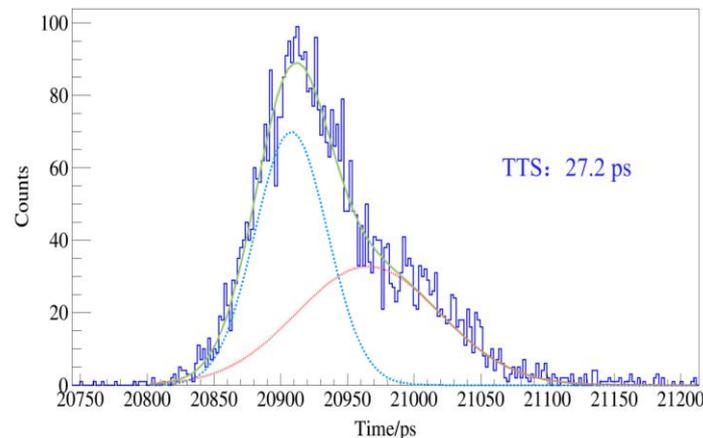
3.4 FPMT性能 (1) --单阳极



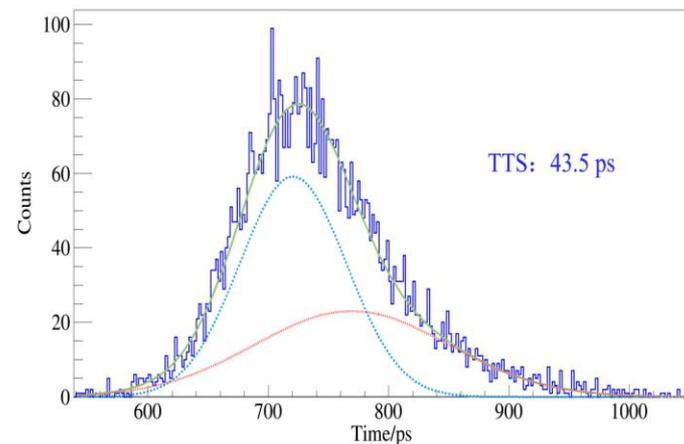
➤ FPMT波形对比



➤ FPMT的TTS随探测到的电子数的变化



➤ CA-FPMT单光子TTS

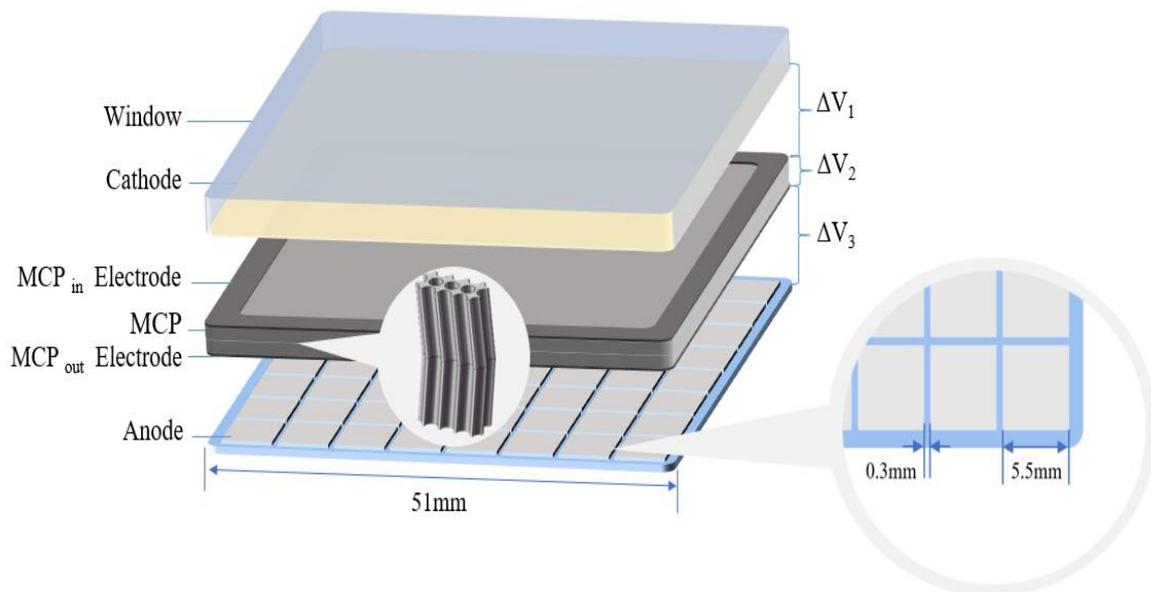


➤ Photke-210 单光子TTS

◆ CA-FPMT的时间分辨已经优于商用产品，时间性能达到国际水平。

3.4 FPMT性能（2）--4X4, 8X8阳极

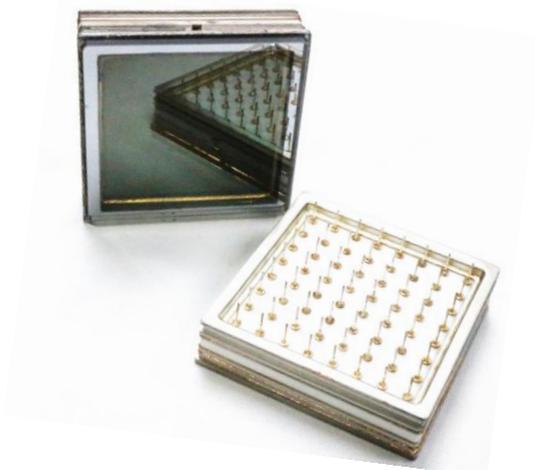
➤ 8×8阳极FPMT基本结构



- ◆ 外结构呈方形，外尺寸 $51 \times 51 \text{mm}^2$
- ◆ 阳极划分为 8×8 阳极，具备位置分辨
- ◆ 像素尺寸为 $5.5 \times 5.5 \text{mm}^2$
- ◆ 同样采用双片MCP结构保证增益



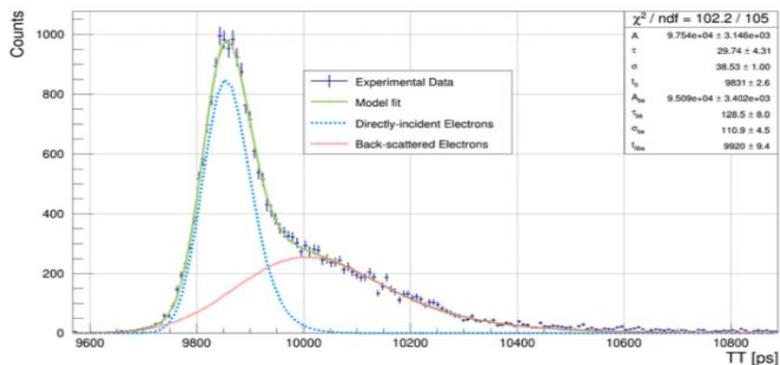
➤ 4×4 阳极FPMT



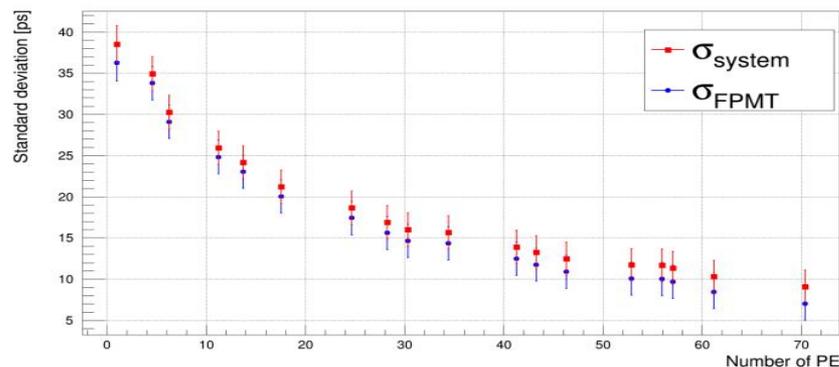
➤ 8×8 阳极FPMT

3.4 FPMT性能 (2) --8X8阳极

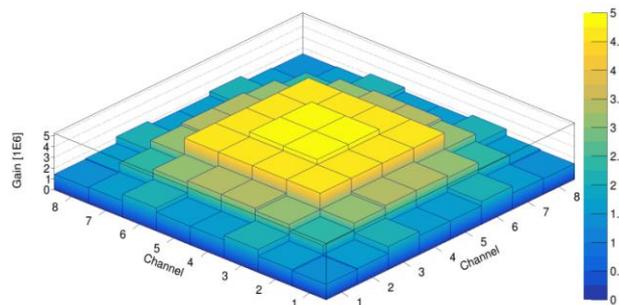
➤ TTS Spectrum



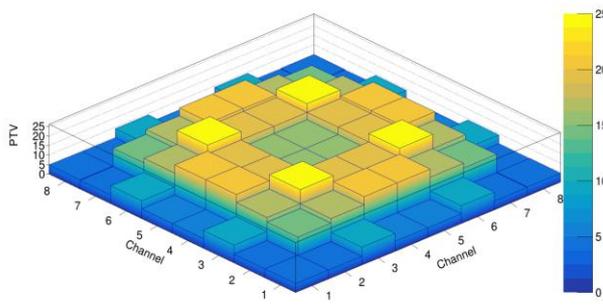
➤ TTS Variation with light intensity



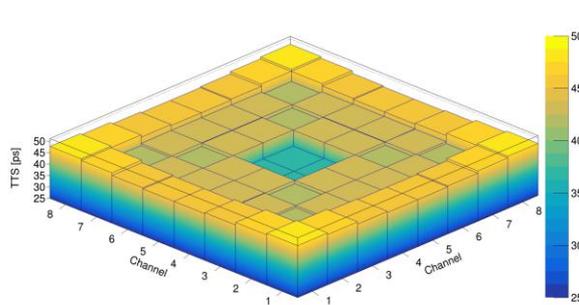
➤ Uniformity of Gain



➤ Uniformity of P/V



➤ Uniformity of TTS

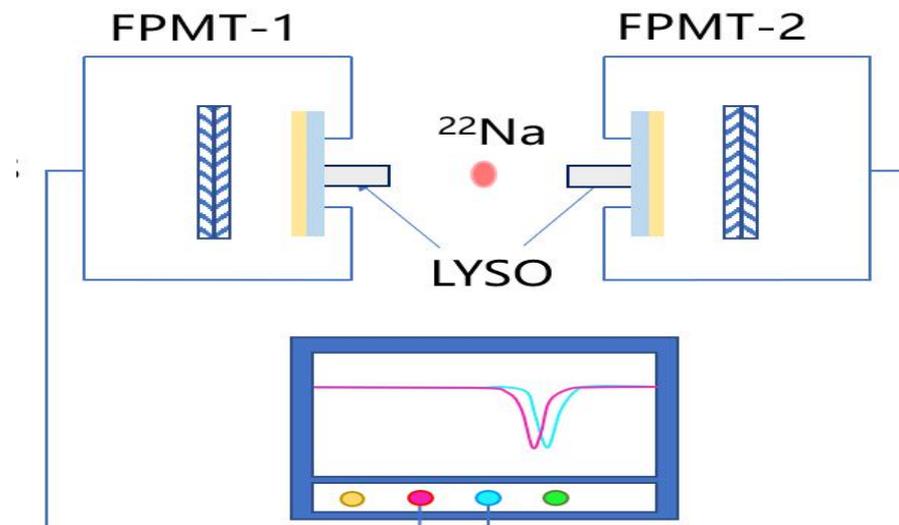


	HV/V	Gain	P/V	Amp(SPE)	RT	FT	Width	TTS@SPE	TTS@MPE
Photek-253	-2600	1.2E7	11.2	113 mV	490 ps	1.1 ns	~1ns	45 ps	16 ps
8*8 Anodes	-1500	3.9E6	18.6	45 mV	334 ps	660 ps	~900ps	40 ps	10 ps

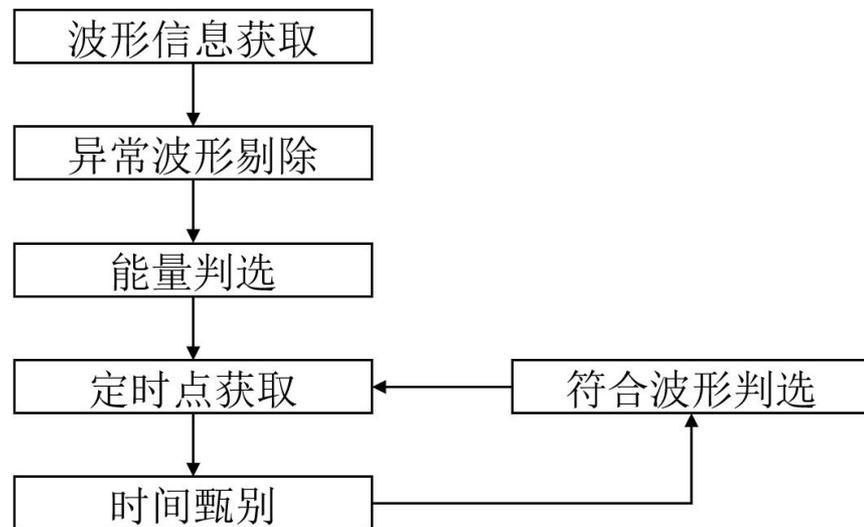
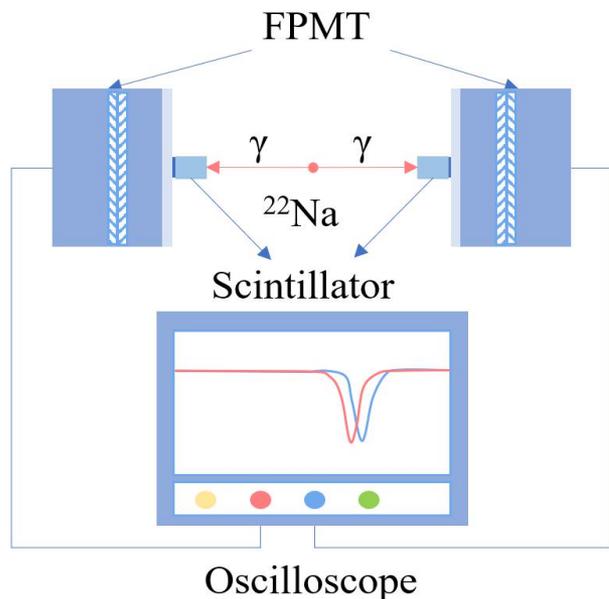
1. 超快核辐射探测器概况;
2. 超快核辐射探测器关键技术;
3. 超快光电倍增管研制进展;

4. 基于超快FPMT的CTR测量;

5. 下一步展望;



4.1 符合时间分辨原理



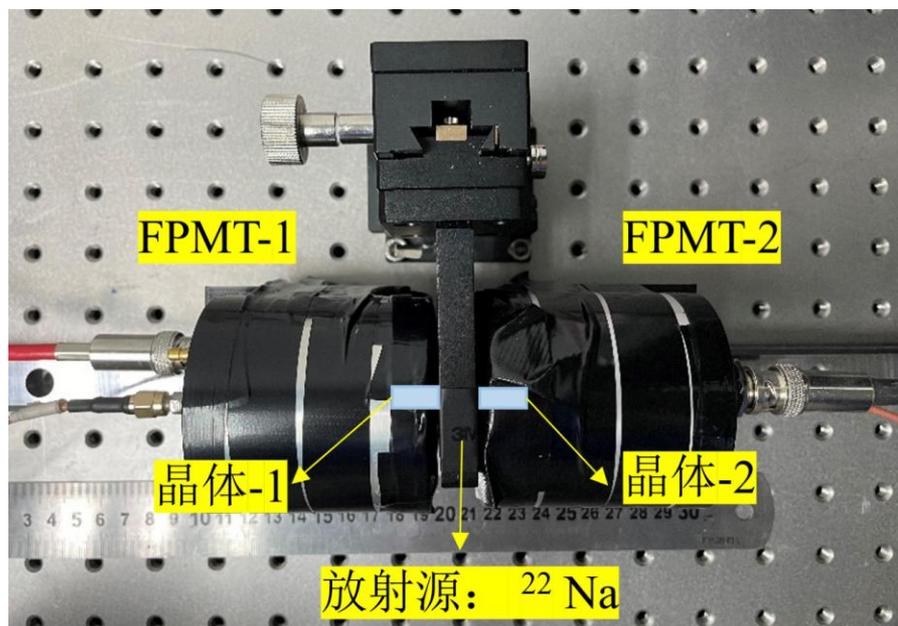
➤ FPMT耦合晶体符合时间分辨原理

➤ 符合时间分辨测试流程

◆ 以粒子辐射探测器在TOF-PET中的应用为例，进行其的时间特性（符合时间分辨，CTR）研究。

◆ 采用 ^{22}Na 放射源，采用FPMT+晶体作为TOF-PET的探测单元进行符合时间分辨的研究。

4.2 基于单阳极FPMT的CTR (1) --装置

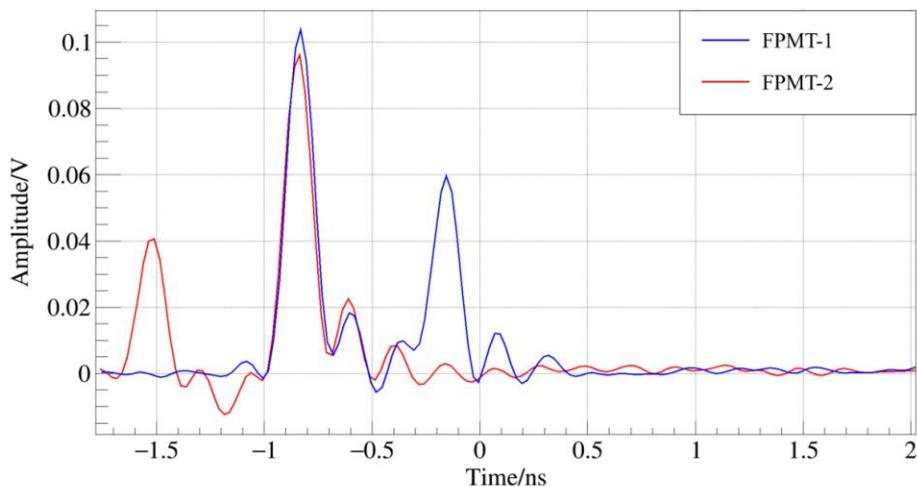


- ◆ 选取两块具有代表性的晶体;
- ◆ 尺寸为 $3 \times 3 \times 5 \text{mm}^3$
- ◆ 闪烁晶体: LYSO

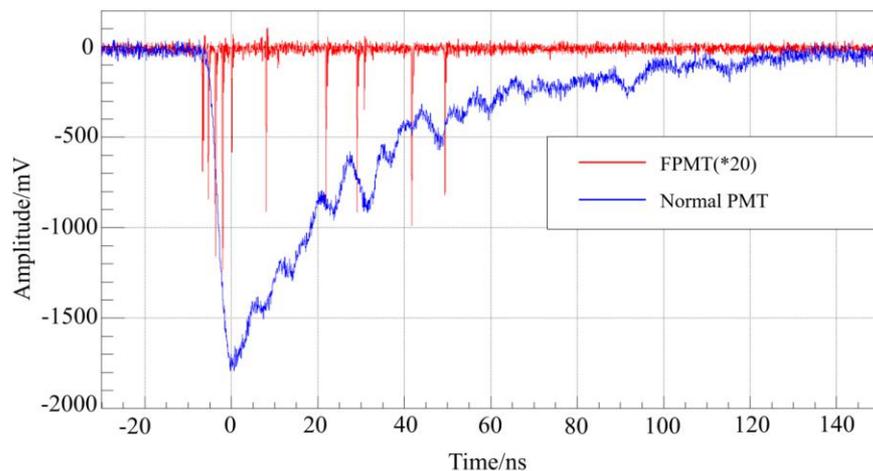
➤ 单阳极FPMT耦合晶体的CTR测试装置

FPMT	增益	PTV	幅度 (SPE)/mV	RT/ps	FT/ps	PW/ps	TTS @SPE/ps	TTS @MPE/ps
FPMT-1	1.8×10^6	10.9	23.3	111	176	195	29	10
FPMT-2	2.0×10^6	4.0	38.6	104	278	178	45	10

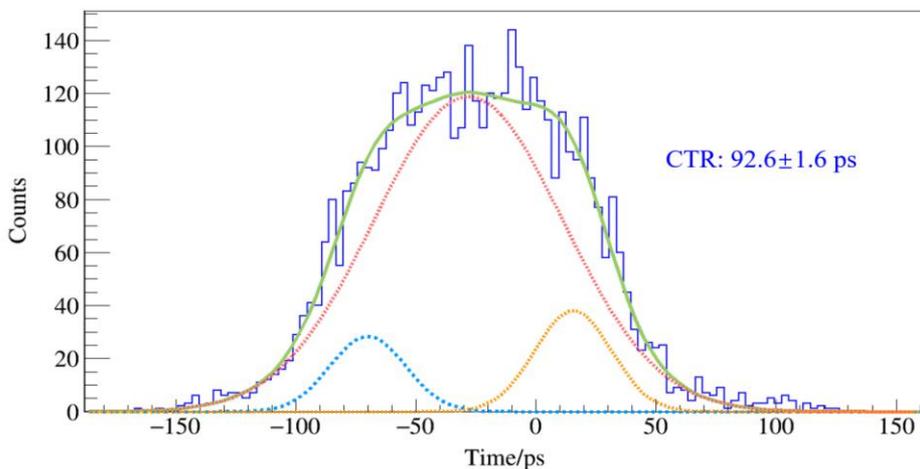
4.2 基于单阳极FPMT的CTR (2) --LYSO



➤ FPMT耦合LYSO晶体的典型符合波形



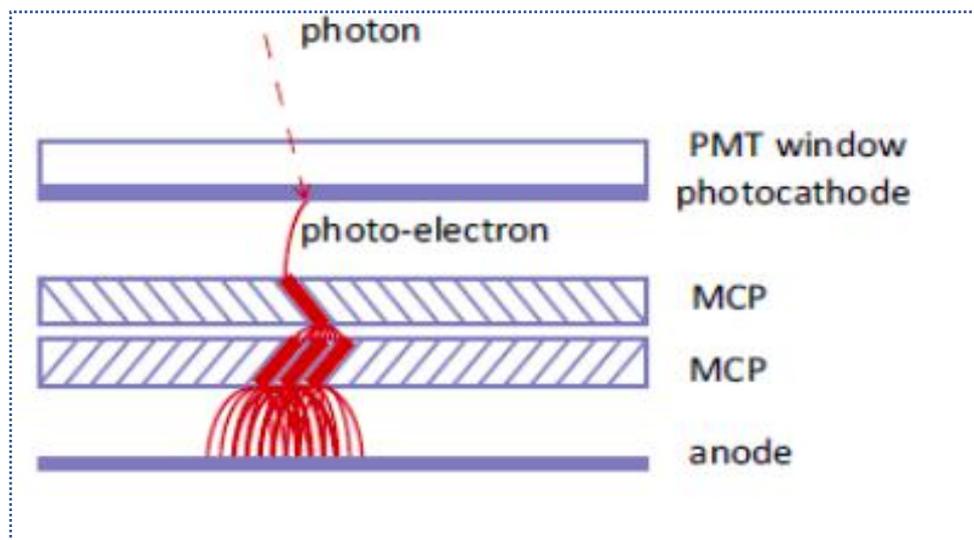
➤ FPMT/PMT耦合LYSO晶体的典型波形



➤ FPMT耦合LYSO晶体的CTR结果

- ◆ 主峰的FWHM即为FPMT耦合LYSO晶体测试得到的CTR，
- ◆ 即 $CTR = 92.6 \pm 1.6$ ps，好于SiPM耦合LYSO的测试结果。

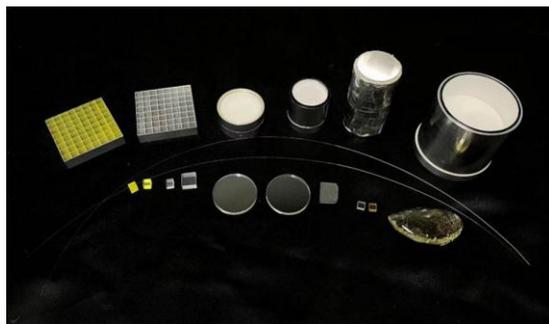
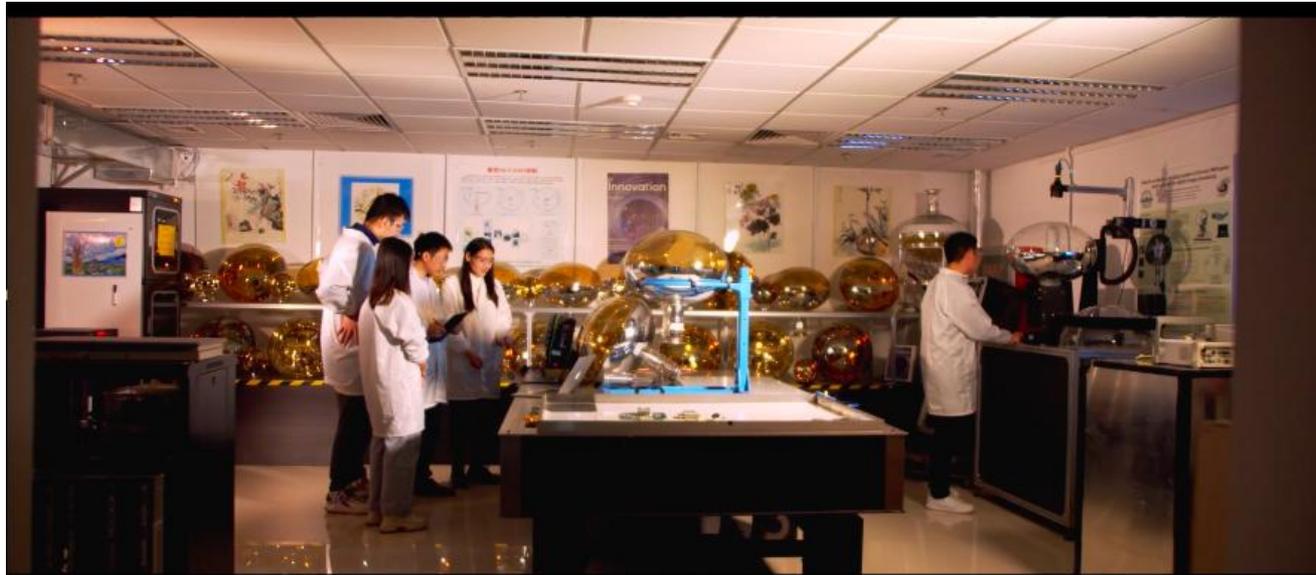
1. 超快核辐射探测器概况；
2. 超快核辐射探测器关键技术；
3. 超快光电倍增管研制进展；
4. 基于超快FPMT的CTR测量；
5. 下一步展望；





The PMT Family in NNVT in China

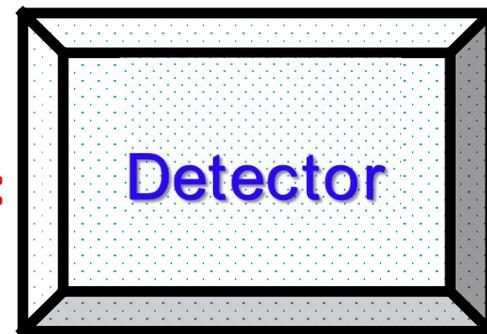
工欲善其事必先利其器 = Work must first of its profits



+

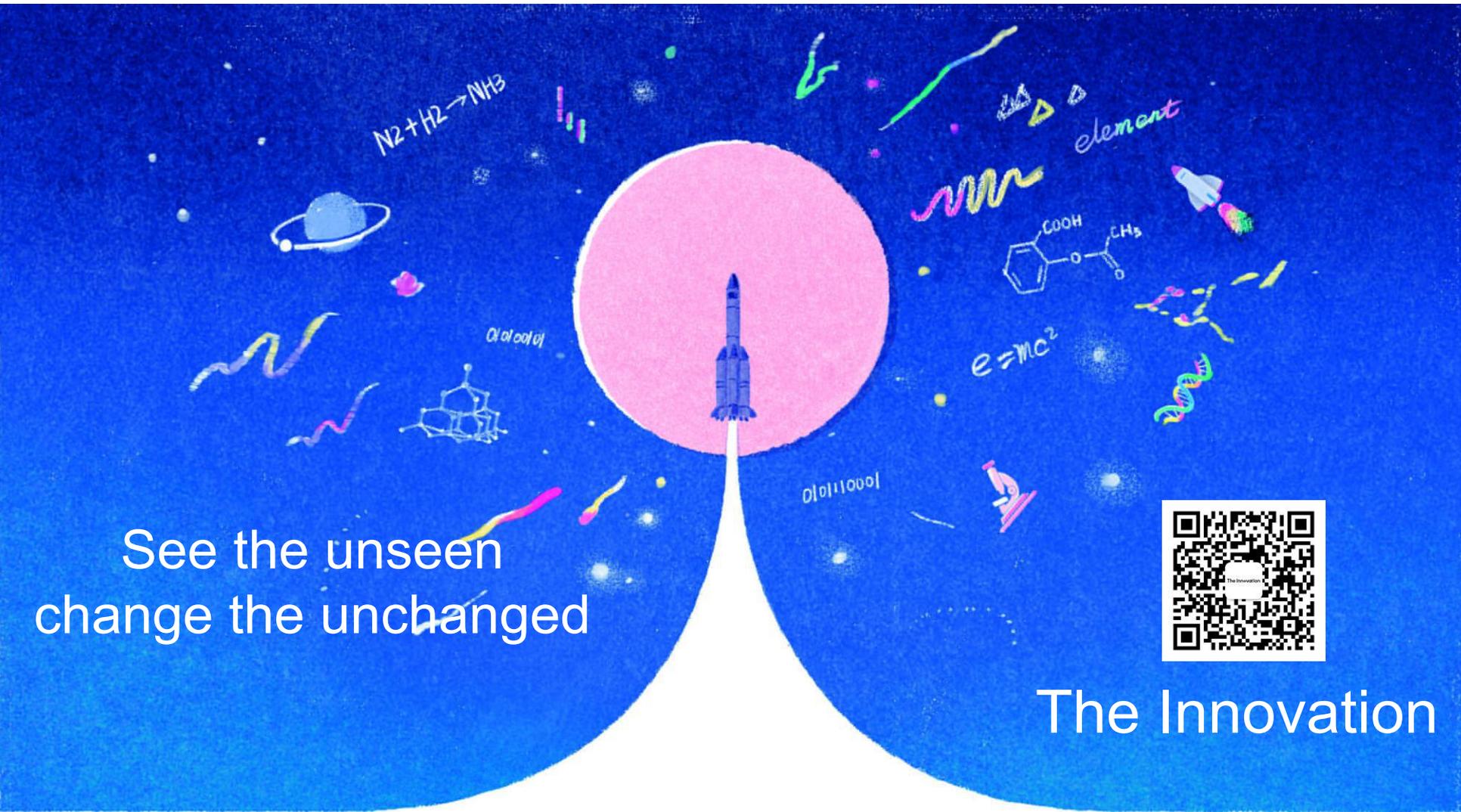


=



- 1. 2009-2019年，合作组在“大科学装置中微子实验用核心器件”为需求牵引，十年磨一剑，成功研制20吋大面积微通道板型光电倍增管，并联合北方夜视，成功产业化。
- 2. 2020年起，合作组在成功研制LPMT基础上，保持研究队伍的稳定性，自筹经费（人才、企业），针对“卡脖子”核心器件，开展超快位敏型光电倍增管的研发工作。
- 3. 经过2年多的预研工作，单阳极光电倍增管的性能已经整体达到国际市场最好水平的产品，部分指标实现超越。
- 4. 研究工作具有明确的研究目标和应用场景：
 - 研制位敏型多阳极FPMT，应用于医疗成像TOF-PET，实现符合时间分辨100ps的目标，解决PET机PMT长期依赖进口、价格昂贵、受制于人的问题。
 - 为全球大科学装置提供时间测量用位敏FPMT，参与国际合作，实现共赢。

THANKS



See the unseen
change the unchanged



The Innovation

