



CEE实验外部飞行时间 探测系统研制进展

王泊覃

清华大学工程物理系

辐射物理与探测技术研究室



报告提纲

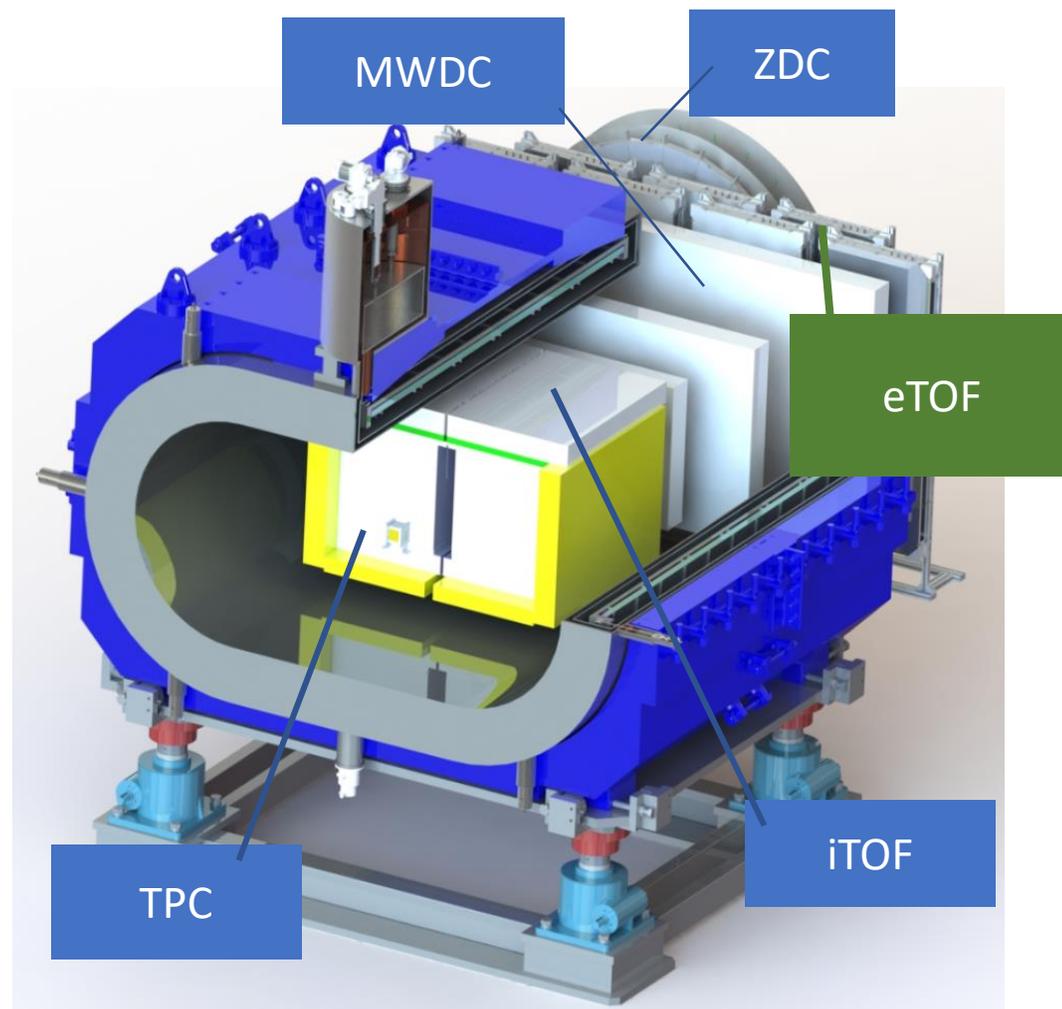
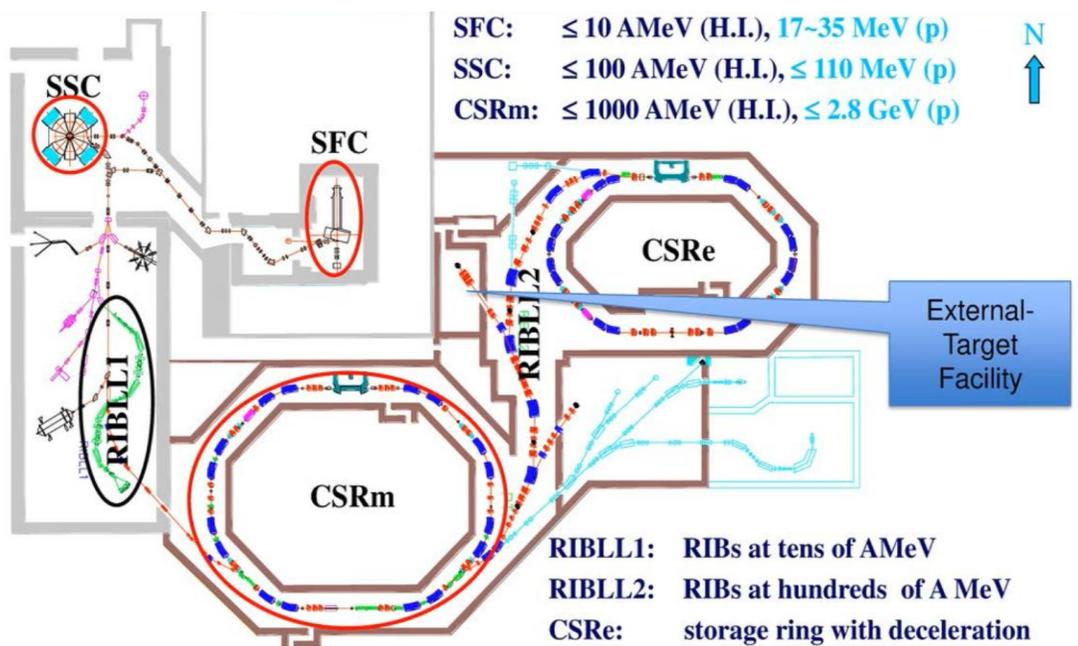
- 兰州重离子冷却储存环外靶实验（CEE）
- eTOF子系统
- 密封型MRPC探测器
- CEE-eTOF研制进展
- 总结与展望

CEE – eTOF 子系统课题组：

王义 韩冬 陈晓龙 王泊覃 郭宝鸿

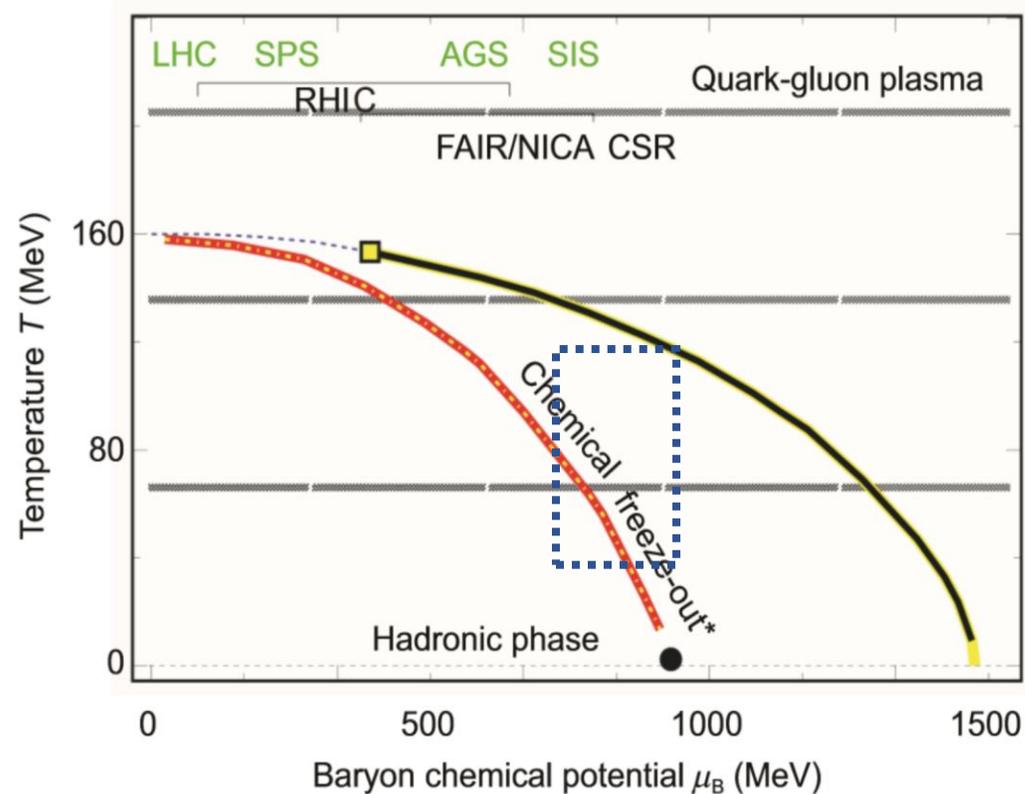
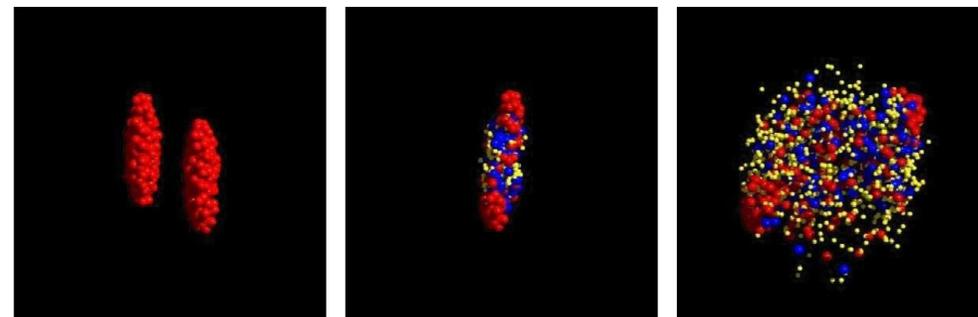
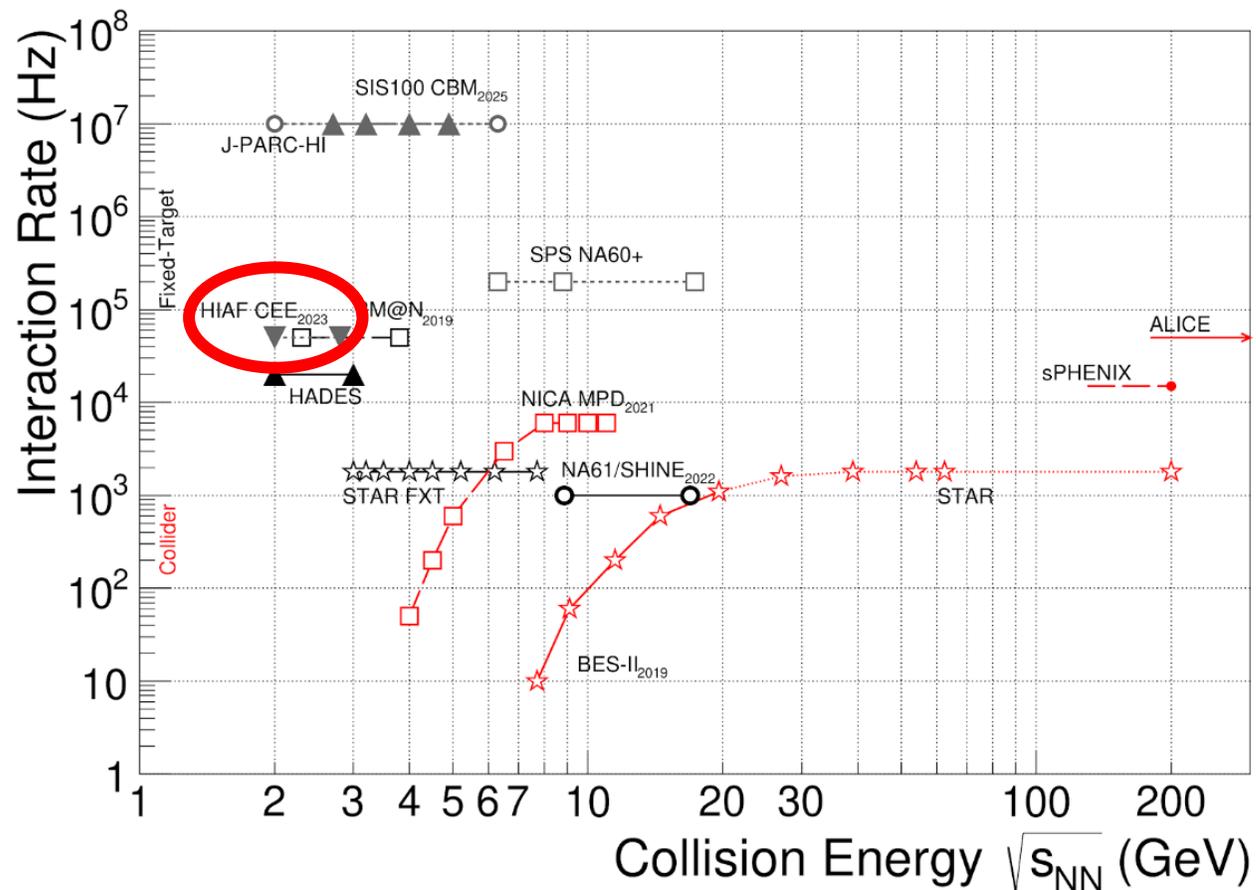
CEE实验

- CSR External-target Experiment
- 对撞特征：重至U+U的打靶实验, 0.5 - 1.2 GeV/u 束流能量, 10^4 Hz反应率
- 外部飞行时间探测器 (eTOF)位于磁场外部, 束流线下游, 记录末态粒子达到时刻, 主要用于鉴别末态粒子种类。
- 采用多气隙阻性板室 (MRPC) 技术建造。



CEE的物理目标

- 研究QCD相图、核物质状态方程、超核产生等



TOF探测器的任务

- 参与粒子鉴别的飞行时间方法:

$$p = m_0 c \beta \gamma$$

$$m_0^2 = \frac{p^2}{c^2} \left(\frac{1}{\beta^2} - 1 \right) = \frac{p^2}{c^2} \left(\frac{c^2 t^2}{L^2} - 1 \right)$$

时间分辨直接影响粒子鉴别能力:

$$\sigma_{m^2} = \frac{2p^2}{Lc} \sigma_t$$

TOF探测器需要结合径迹探测器才能实现粒子鉴别, 对前向的大动量粒子鉴别, 需要扩展距离, 使用MWDC+eTOF来鉴别粒子

可实现动量高达1.6GeV的 π/K 分辨和高达2.7GeV的K/p分辨

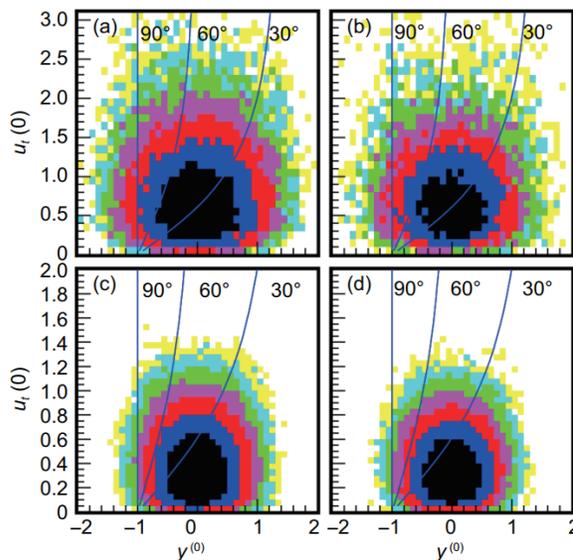
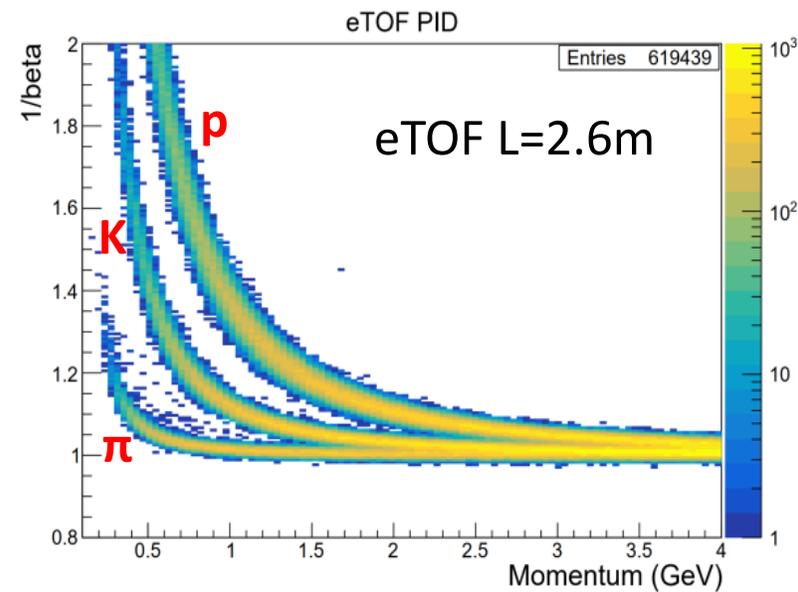
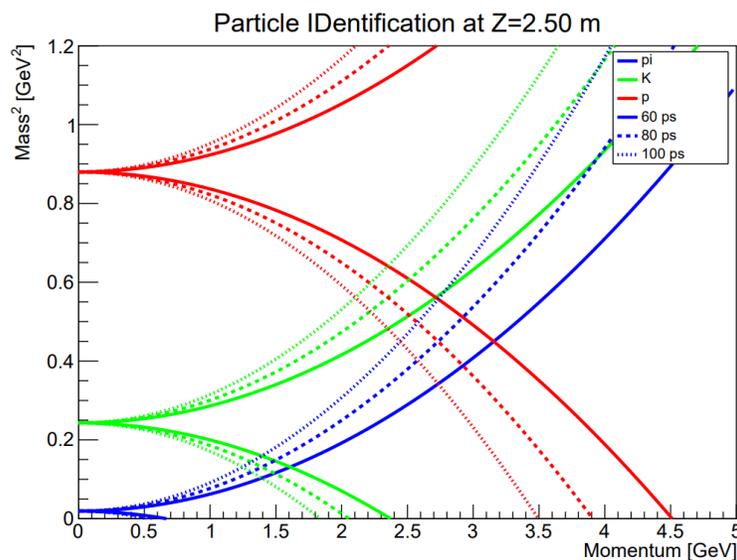
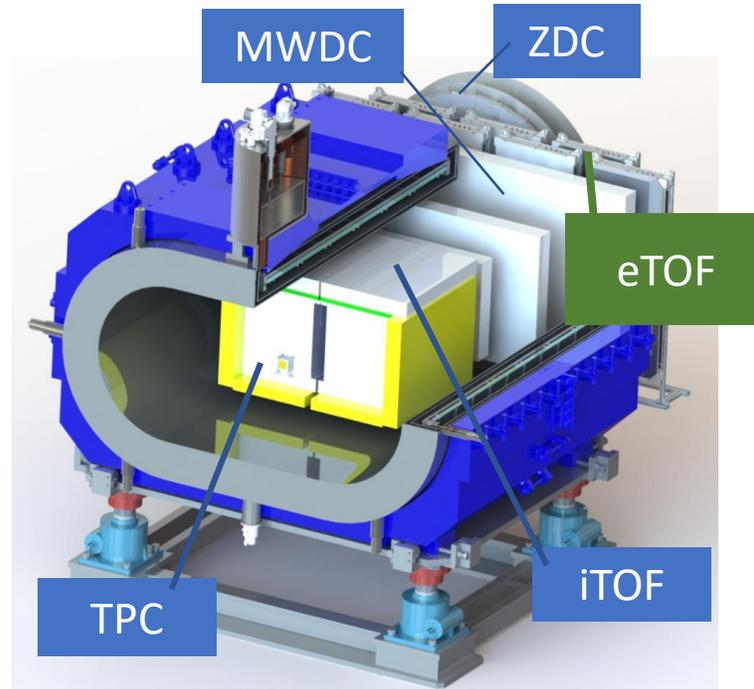


Figure 3 (Color online) The phase space distribution of the π^- (a), π^+ (b), proton (c) and deuteron (d) produced in the $^{124}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ reactions at 0.6 GeV/u. $y^0 = y_{\text{lab}}/y_{\text{cm}} - 1$ $u_t^{(0)} = p_t/m_0\beta\gamma_p$



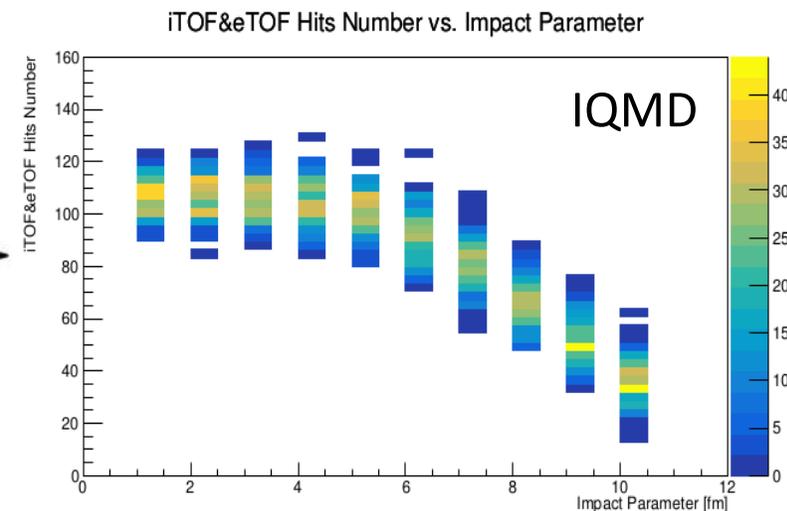
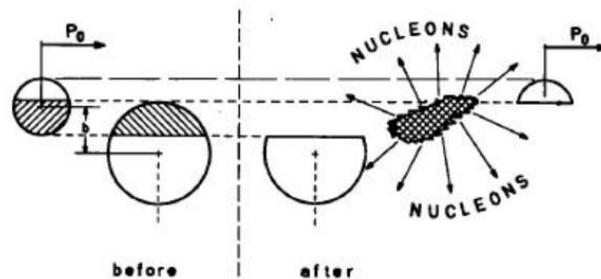
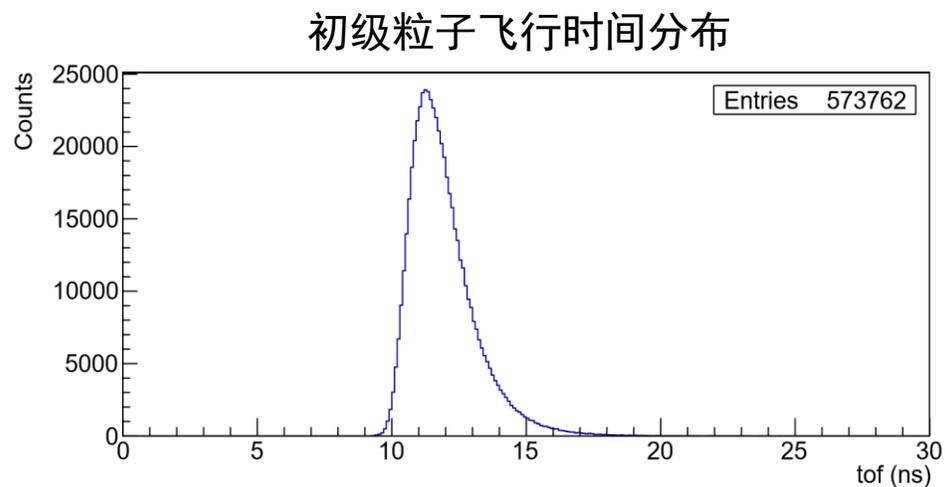
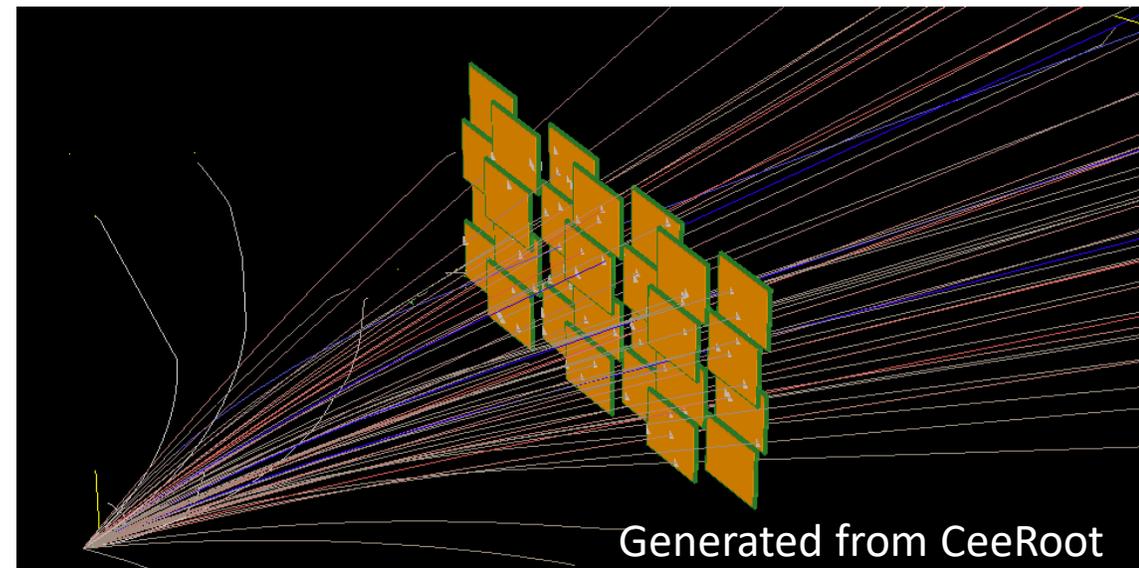
TOF探测器的任务

- 参与触发与事例判选

TOF系统作为时间测量系统，具有快读出特性，适合作为触发探测器

设置一定时间窗内的TOF信号数（多重性）阈值，可以作为数据采集的触发

TOF系统的接收多重性与**碰撞参数 b** 具有确定的关系

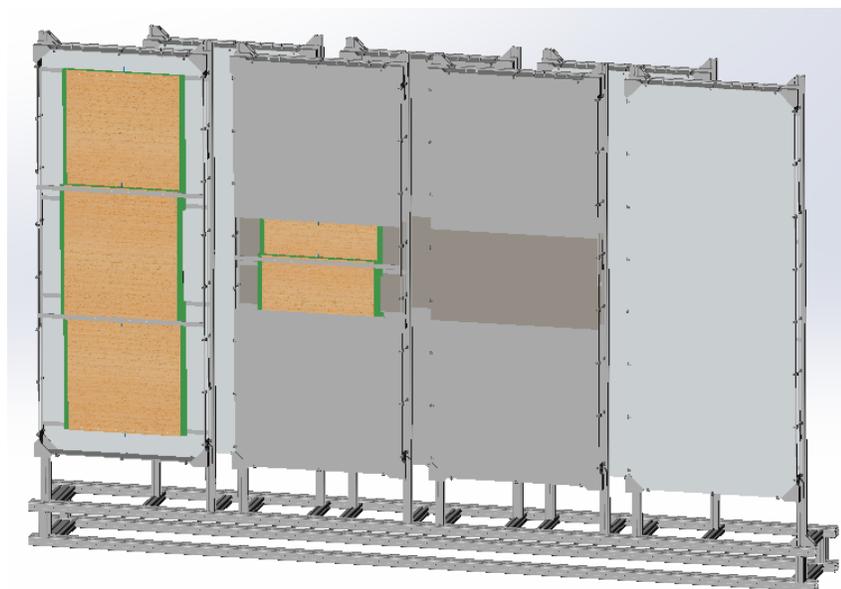
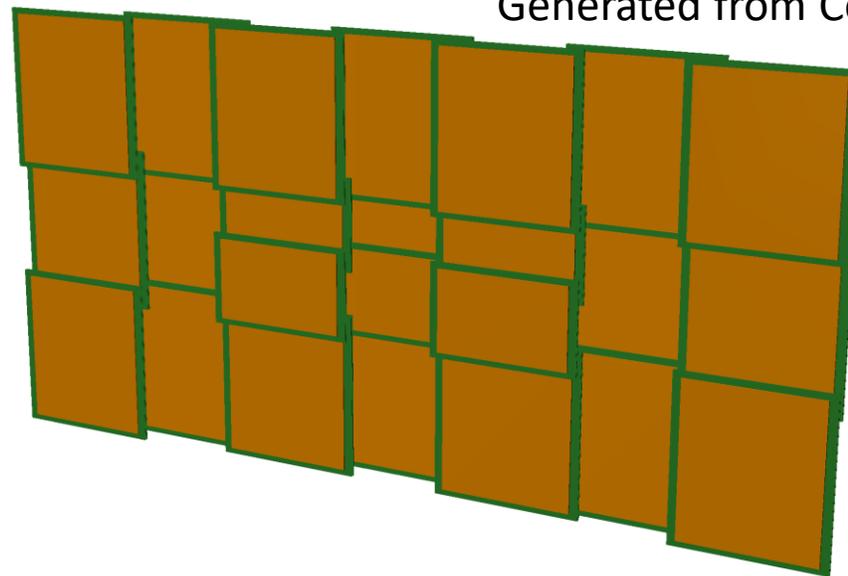


eTOF探测器构型

总体设计

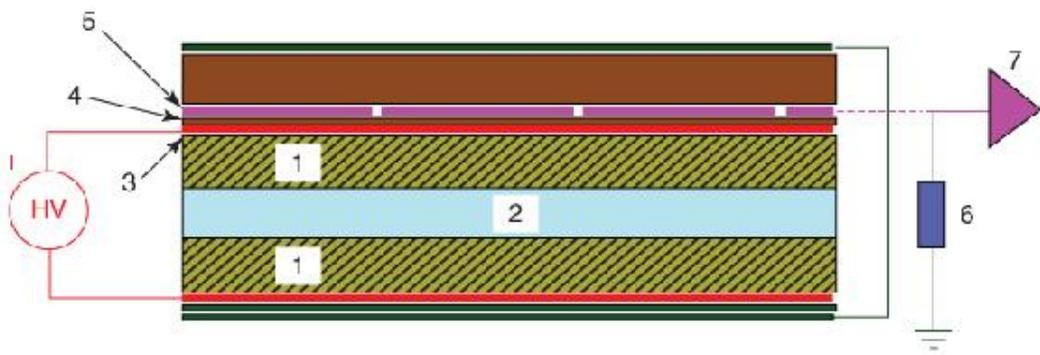
- 距离靶点2.6m
- 七列密封型MRPC探测器
- 每列形成一个模块
- 覆盖面积： $3.2\text{m} \times 1.6\text{m}$
- 读出单元面积： $48\text{cm} \times 1.7\text{cm}$
- 总机械尺寸： $367\text{cm} \times 240\text{cm} \times 45\text{cm}$
- 总读出道数：1344

Generated from CeeRoot



多气隙阻性板室 (MRPC)

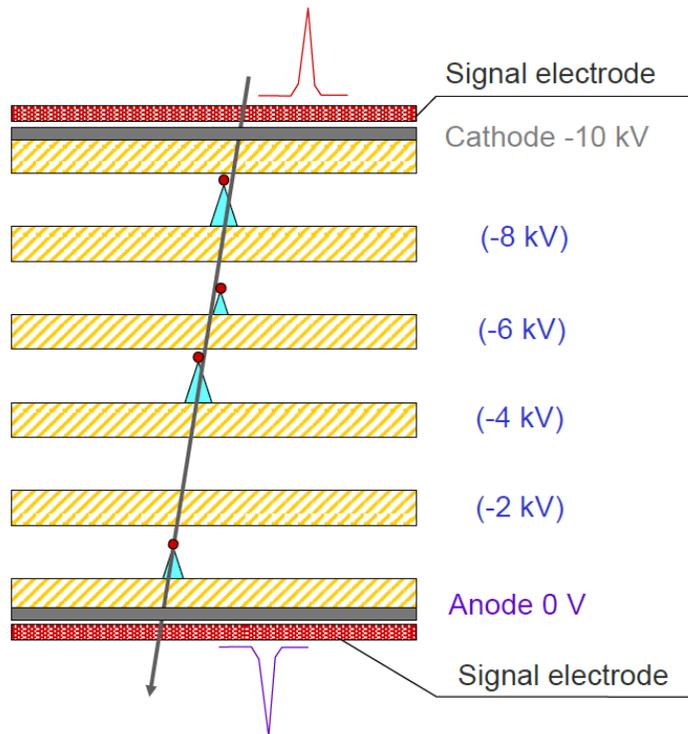
1981, Santonico和Cardarelli制造第一个现代意义上的**电阻板室 (RPC)** 探测器。



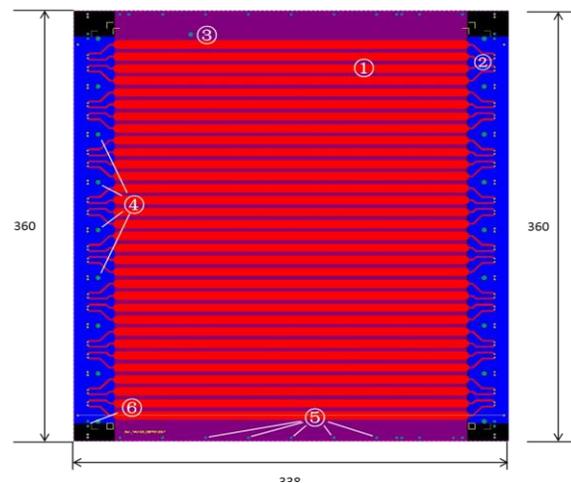
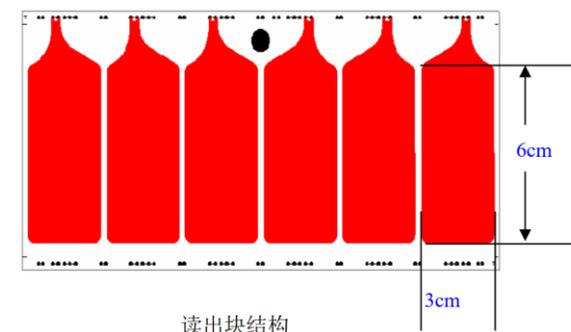
- 平行板结构（时间分辨提升到ns以下）；
- 使用阻性材料作为电极（具有“自猝熄”机制，放电限制在局部；对快信号透明）；
- 易于建造大面积的探测器。

作为触发和 μ 子探测器在物理实验（BaBar、ARGO-YPJ、ATLAS、CMS等）中获得了成功的应用。

1996, 由M.C.S. Williams小组首次提出了**多气隙电阻板室 (MRPC)** 探测器设计。



窄气隙->更高电场->更好时间分辨
窄气隙->限制流光->提高计数率
多气隙->保证了宽气隙相当的效率

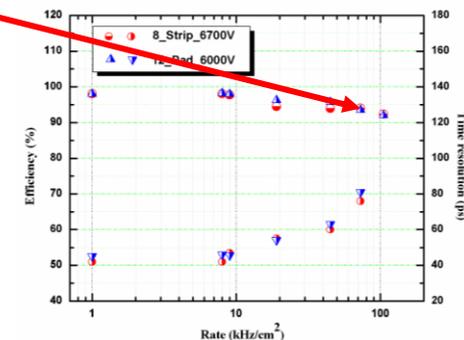
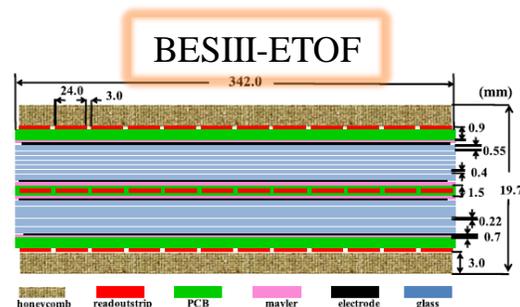
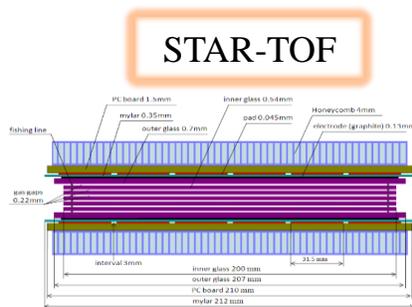
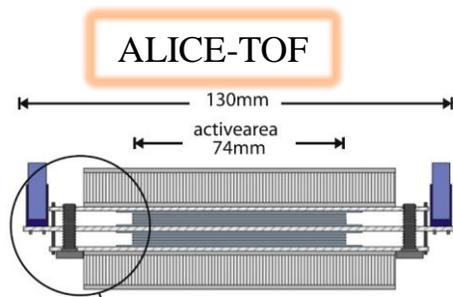
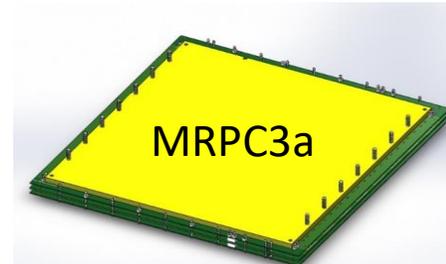


物理实验中的MRPC

MRPC因其优秀的时间分辨率作为定时探测器在物理实验中获得了广泛的应用。

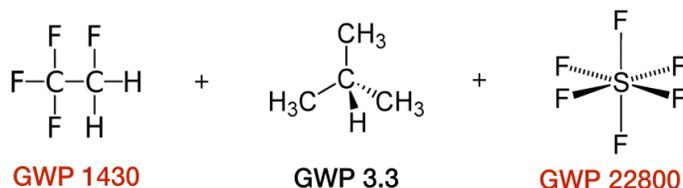
MRPC向高计数率应用发展

	ALICE	STAR	BESIII	FOPI	HADES	HARP	BM@N	CBM
灵敏面积(cm)	120 x 7.4	18.6 x 6.0	0.5 x (9.2+14.8) x 32.8	90 x 4.6	不定	193 x 10.6	35.1 x 16.0	33 x 27.6
总探测面积(m ²)	141	50	1.33	5	8	10	/	120
读出单元 (cm)	3.7 x 2.5	6.0 x 3.1	(9.1~14.1) x 2.4	90 x 0.164	不定	10.4 x 2.9	16 x 1.0	27 x 1.0
气隙(mm)	10 x 0.25	6 x 0.22	12 x 0.22	8 x 0.22	4 x 0.27	4 x 0.3	12 x 0.22	10 x 0.25
工作气体(C ₂ H ₂ F ₄ /C ₄ H ₁₀ /SF ₆)	90/5/5	95/5/0	90/5/5	85/15/5	98.5/1/0.5	90/5/5	98/0/2	95/5/5
工作场强(kV/cm)	104	106	111	109	111	100	114	110
探测效率	> 99%	> 95%	95%	99%	97%	99%	95%	97%
时间分辨率(ps)	50	60	60	60	66	100	65	60
实验最高计数率(Hz/cm ²)	50	200	0.02	50	700	1	5000	30k
计数率能力(Hz/cm ²)/对应效率	1600/80%	500/98%	/	100/99%	1200/70%	2000/97%	6000/95%	70k/93%



MRPC的应用挑战

- MRPC工作气体的温室效应千倍于CO₂
- 传统MRPC放置于流气盒，需要高气体流量。
 - 气体系统长期存在漏气情况。CMS实验中900L/h的泄露率带来巨大的成本和环境影响！
 - 高计数率环境下存在气体污染效应（陈晓龙博士报告）
- 需要一种更加高效的气体密封设计！



标准气体：氟利昂/异丁烷/六氟化硫 90/5/5



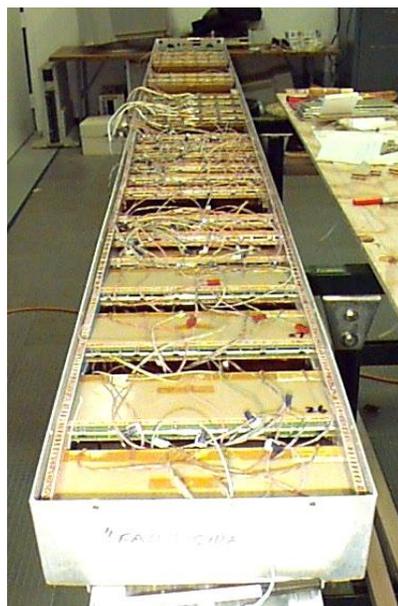
生态环境部：氢氟碳化物削减计划
将纳入国家方案

21世纪经济报道 2小时前

263评论

仕净环保	内蒙古霍宁碳素有限责任公司	脱硫脱氟改造项目	1,380.00	是
------	---------------	----------	----------	---

国内外对氢氟碳化物的管控



STAR TOF模块

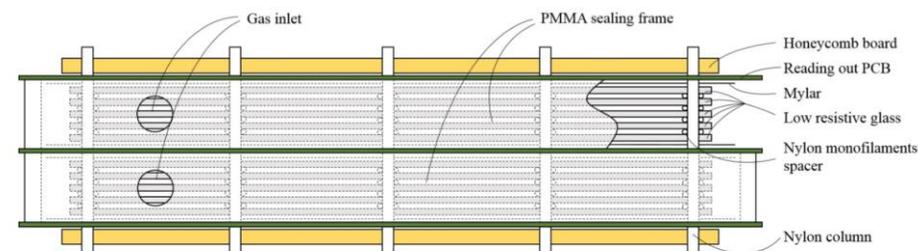
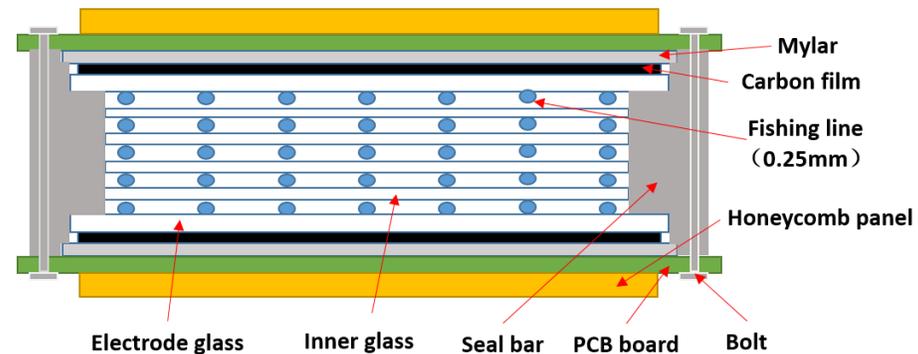


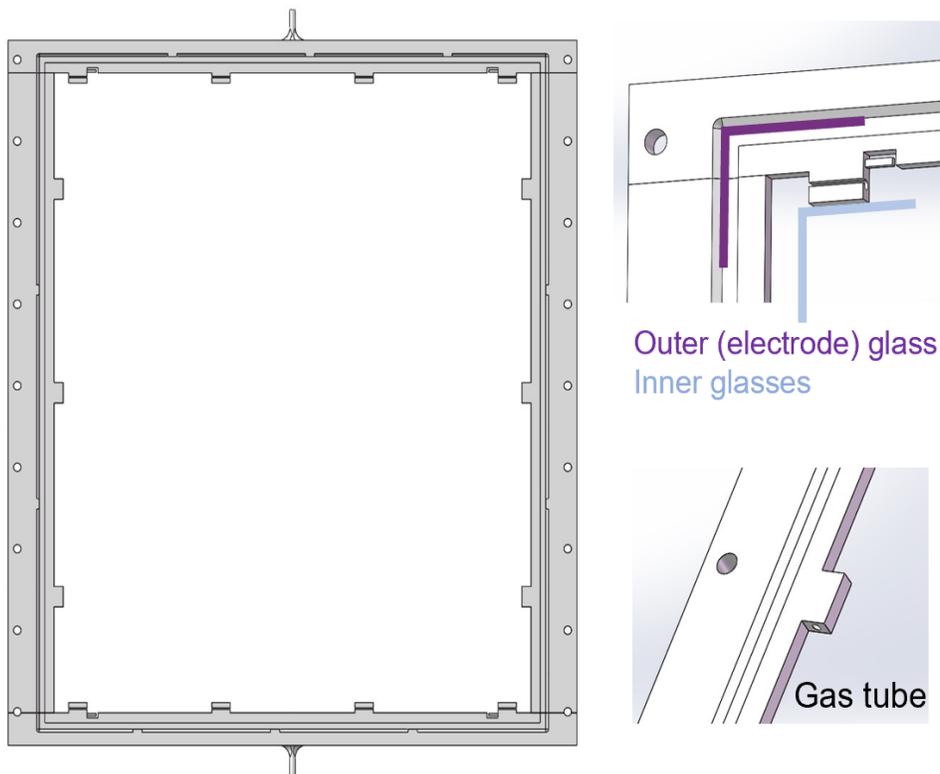
Figure 3. The sectional sketch of the double-stack MRPC prototype with the self-sealed structure.



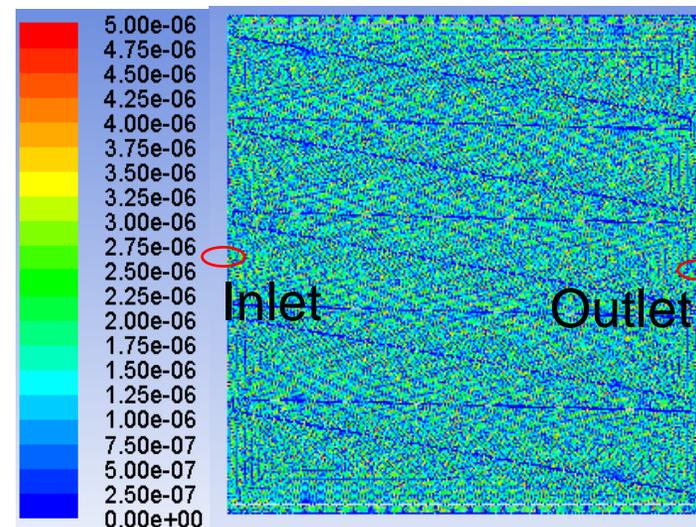
清华课题组开展的MRPC密封设计研究

密封型MRPC

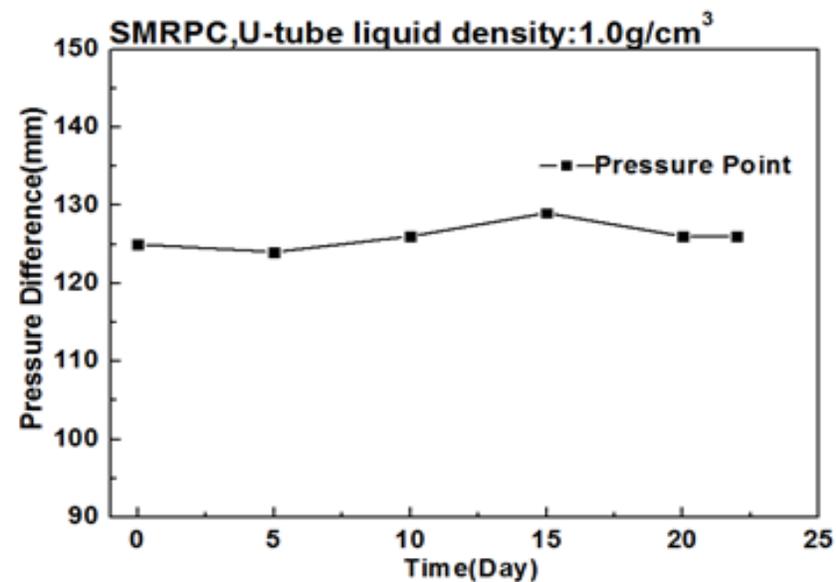
- 关键技术：3D一体打印密封框，与最外层电极玻璃粘接形成密闭腔室
- 耐高压±10kV，长期X光照射稳定性



- 使用ANSYS Fluent 仿真气隙流场，验证气体交换特性



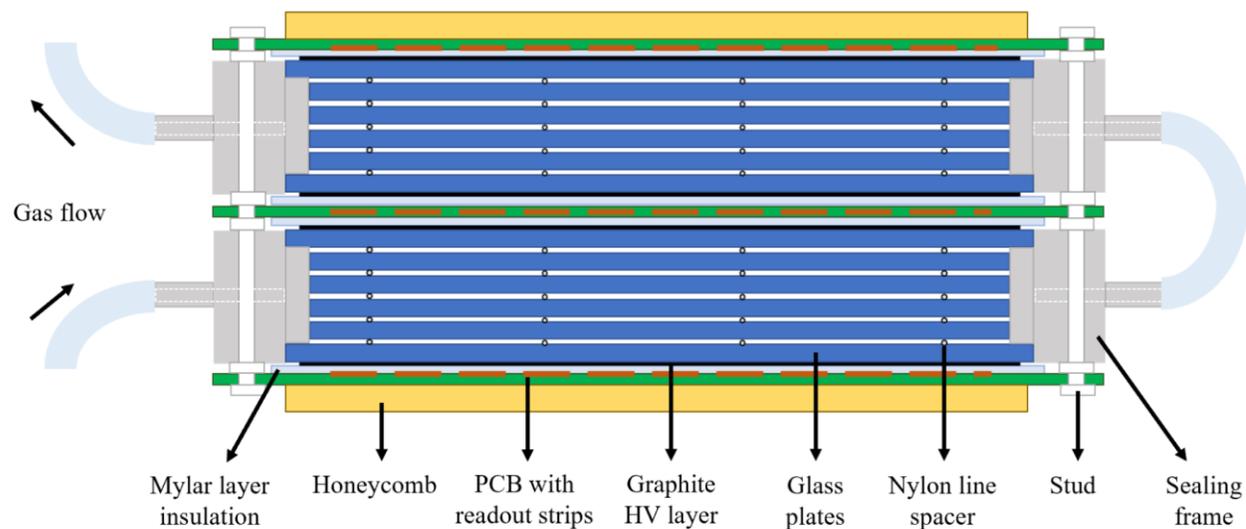
- 实验开展气密性测试



eTOF探测器设计

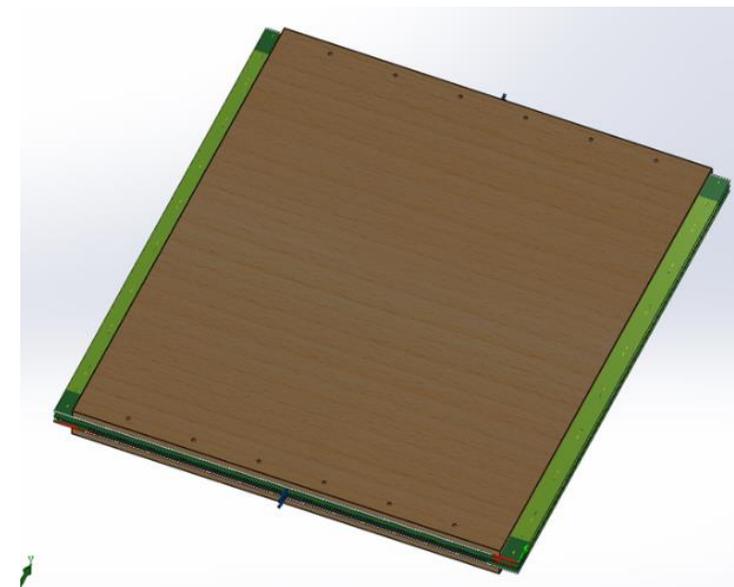
探测器设计

类别	大尺寸SMRPC	小尺寸SMRPC
结构	2室×5气隙	
数目	18	6
灵敏面积(mm ²)	480×560	480×280
读出条数目	32	16
读出条宽度	1.5+0.2 cm	1.5+0.2 cm
气隙宽度	0.25mm	



特征指标

效率	>95%
系统时间分辨	60 ps
工作场强	~110 kV/cm
气体体积	~700 mL
工作气体流量	< 20 mL/min
差分阻抗	~38 Ω

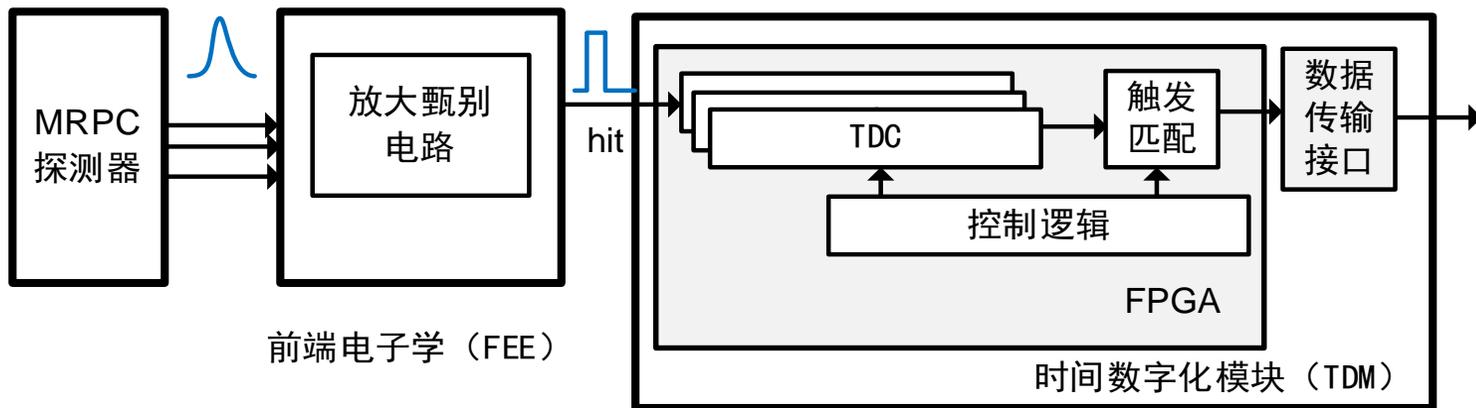
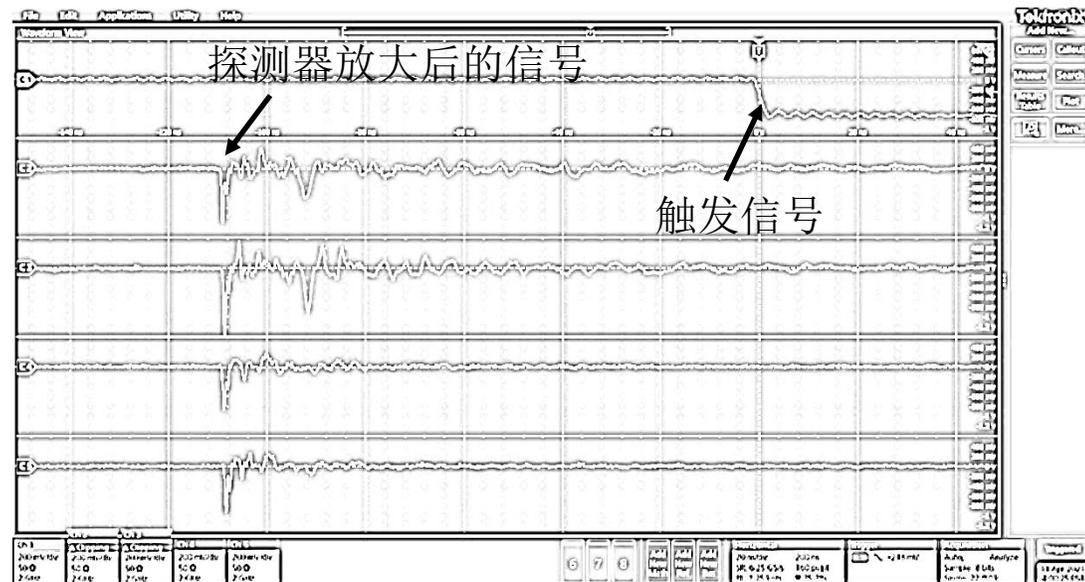


读出电路

- 中国科技大学电子学团队开发
- NINO FEE + FPGA TDM 路线
- 时间精度目标好于 25 ps

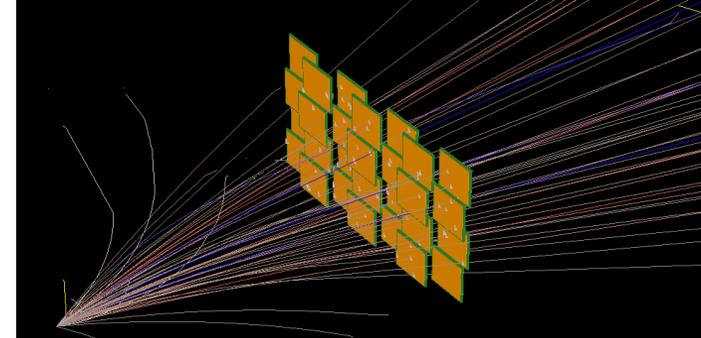
MRPC信号特征

- Differential signal
- amplitude: ~ 10 mV
- Rise time: 100~500 ps
- FWHM: 500ps~1 ns
- Fall time: ~ 500 ps
- Output resistance: $\sim 38 \Omega$
- Max channel rate: 3kHz
- Dynamic range: 40-500 fC



软件模拟

- CeeROOT: <https://gitee.com/CEESM/CeeRoot>
- 粒子产生器 => 探测器几何 => 相互作用 => 数据处理



Create_eTOF.C

Add material to *media.geo*

Define gas gap as sensitive volume

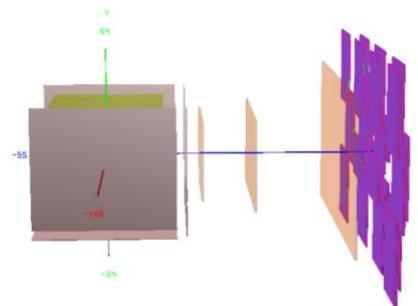
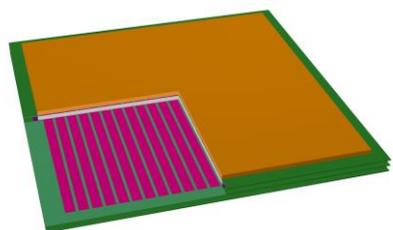
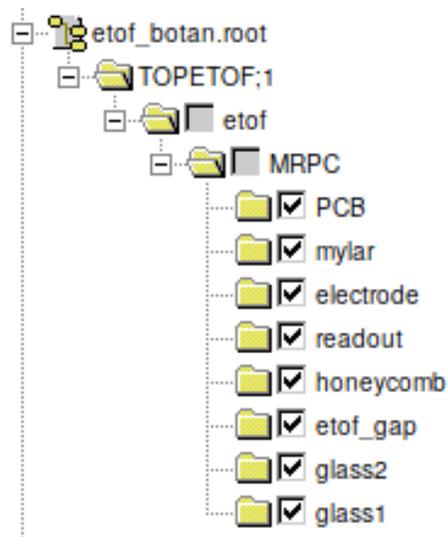
run_sim.C

All modules and magnet added

IQMD U+U, 500MeV/u

10^4 events

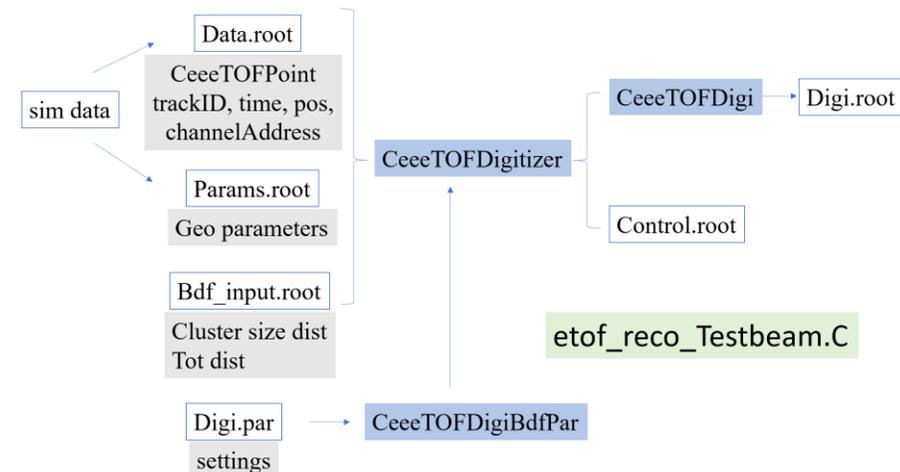
To .root & params.root files



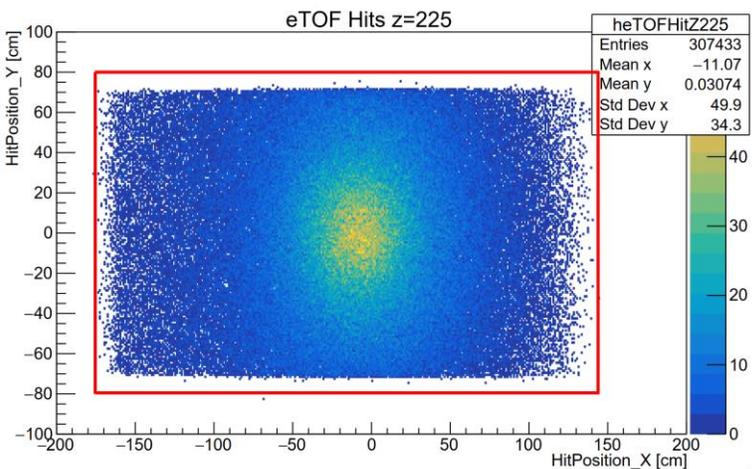
Get CeeTOFPoint Class

Point-level analysis

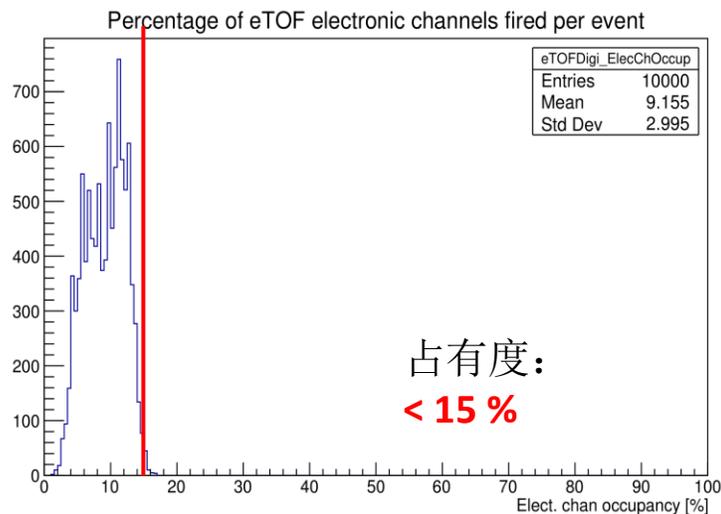
Hit-level analysis using digitizer



eTOF特征与参数

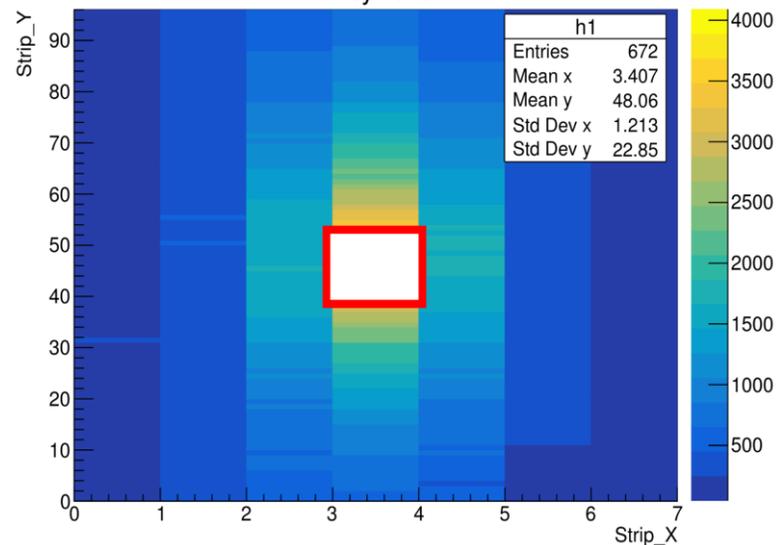


接收范围3.2m×1.6m

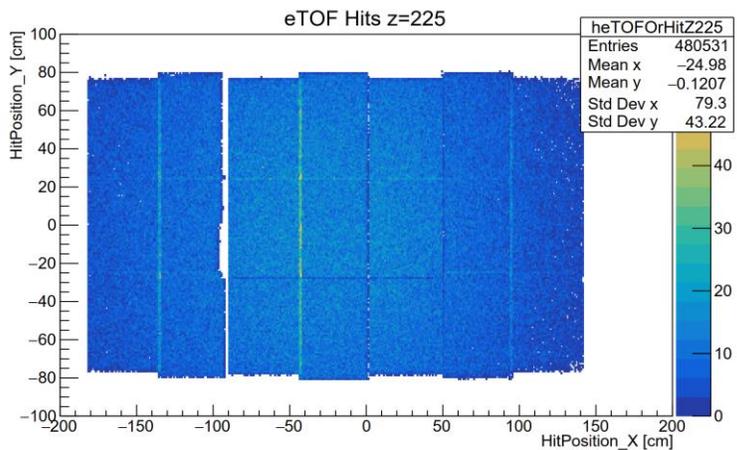


占有度：
< 15 %

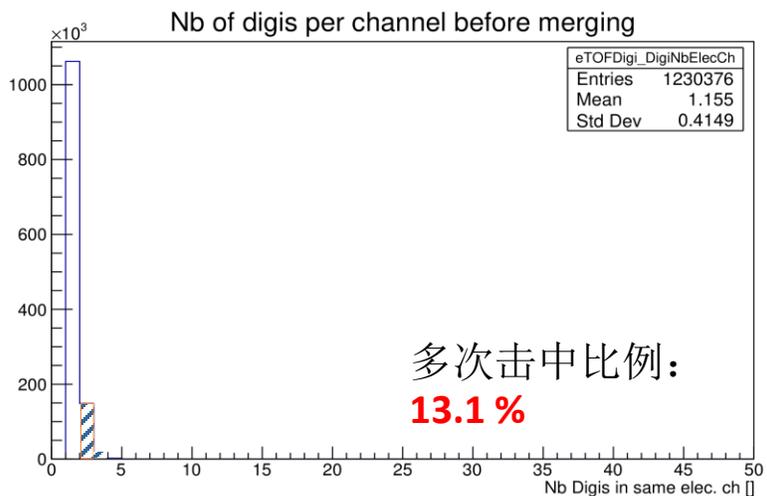
电子学计数率：
sy vs. sx



排除束流区域，最大道计数率：**3 kHz**
每个bin代表一个条，共7列*96条=672条
双端读出，共1344道

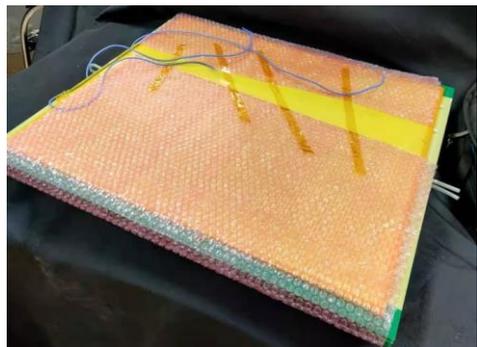


实际构型达到98%以上的接受度

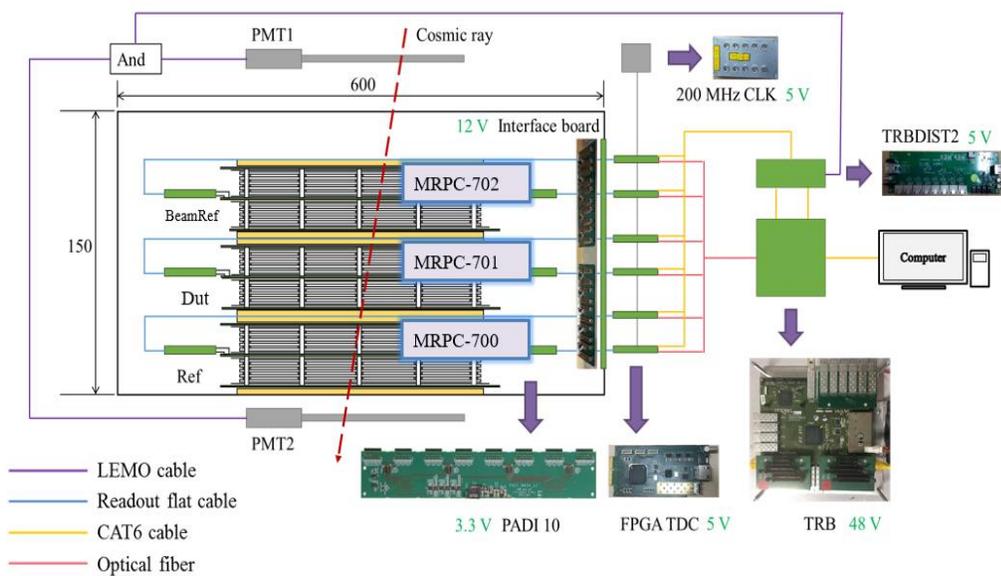


多次击中比例：
13.1 %

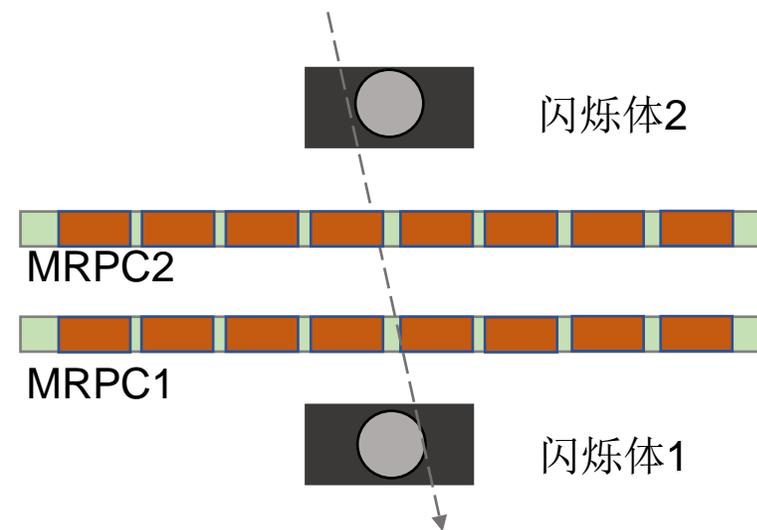
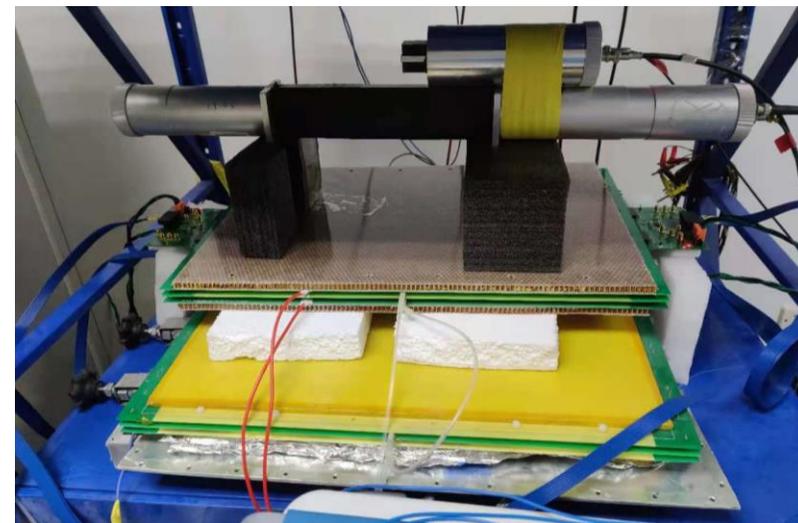
原理样机的宇宙线测试



两种尺寸原理样机生产

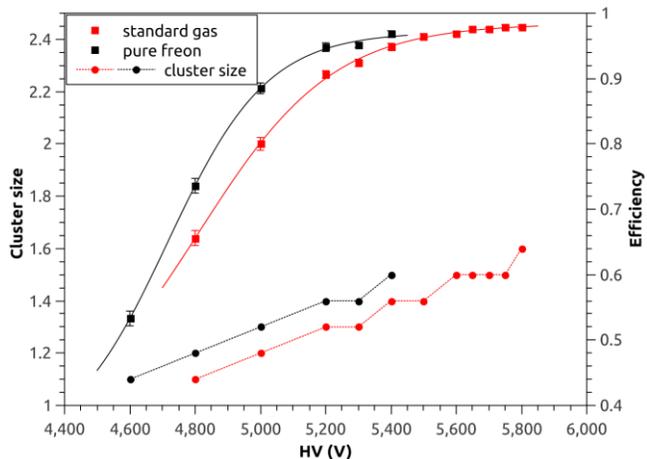


CBM-TRB宇宙线测试系统

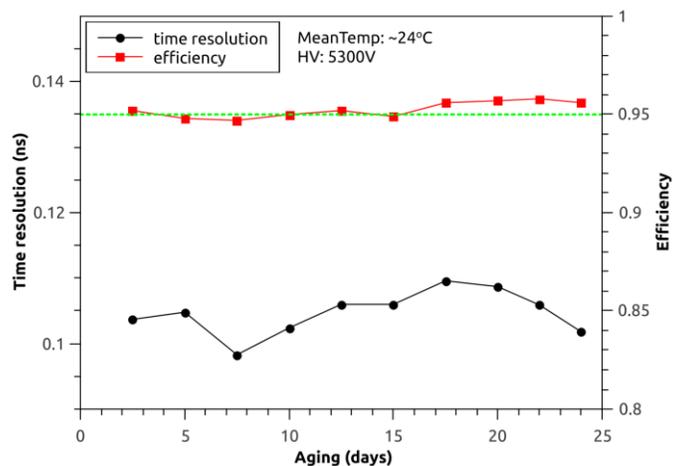


联合调试系统

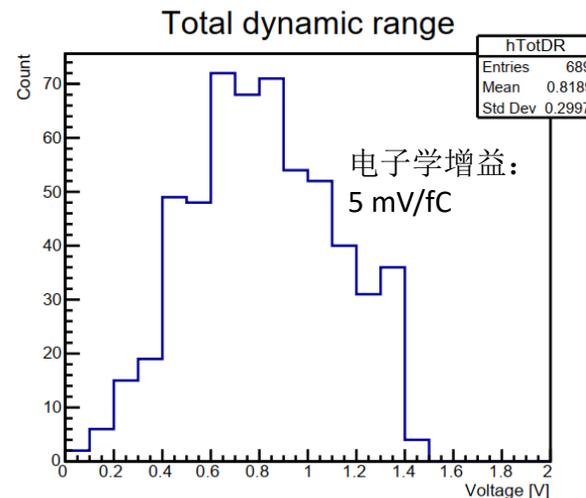
原理样机性能



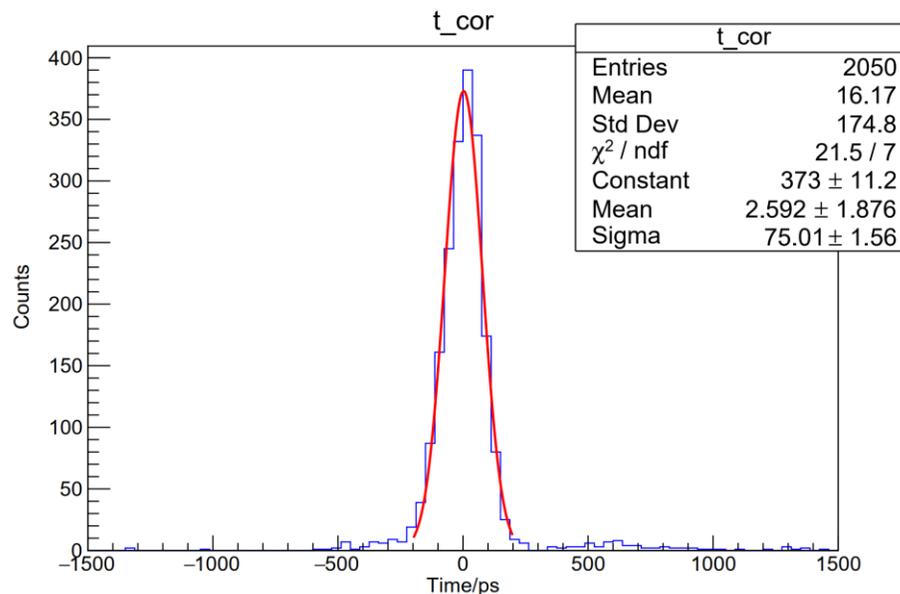
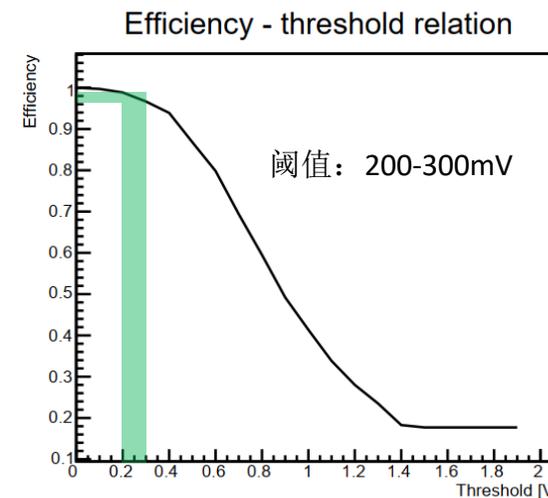
工作电压扫描。工作点效率>97%



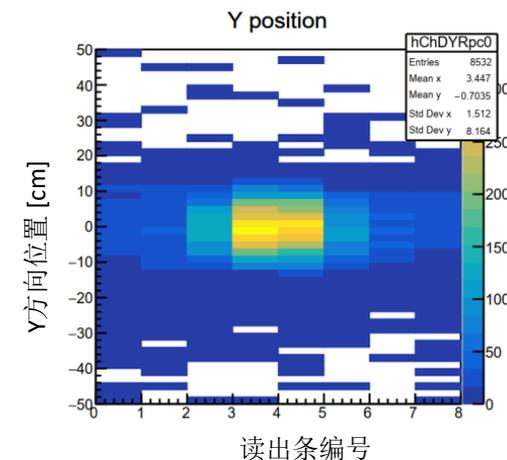
24天的长期工作稳定性，气体流量低至**1mL/min**



工作场强下的动态范围，确定合适的电子学阈值

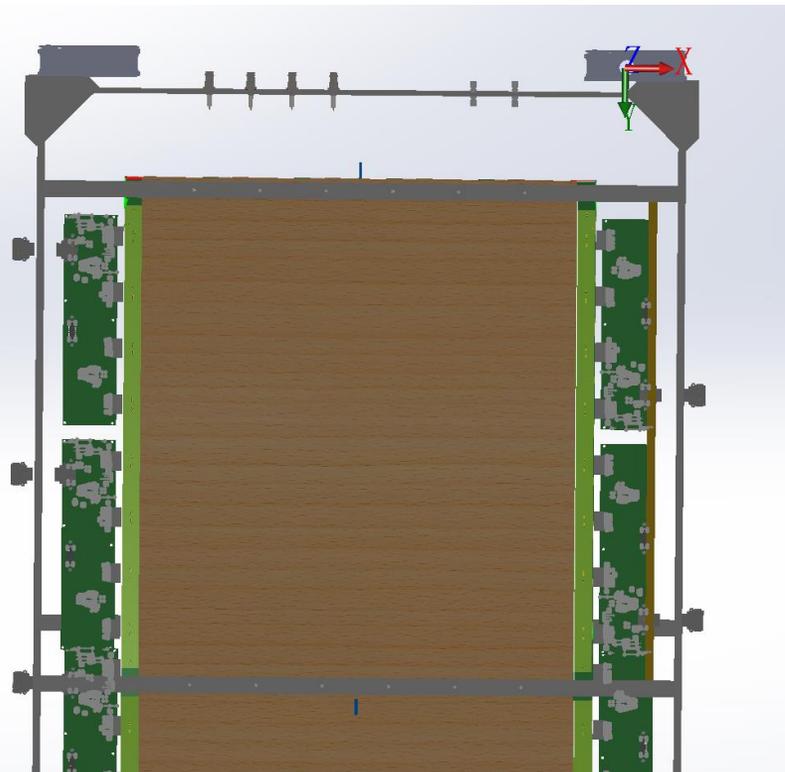


校正后的时间分辨，单探测器+读出电路为**53ps**



探测器实现沿条方向位置重建

工程样机进展

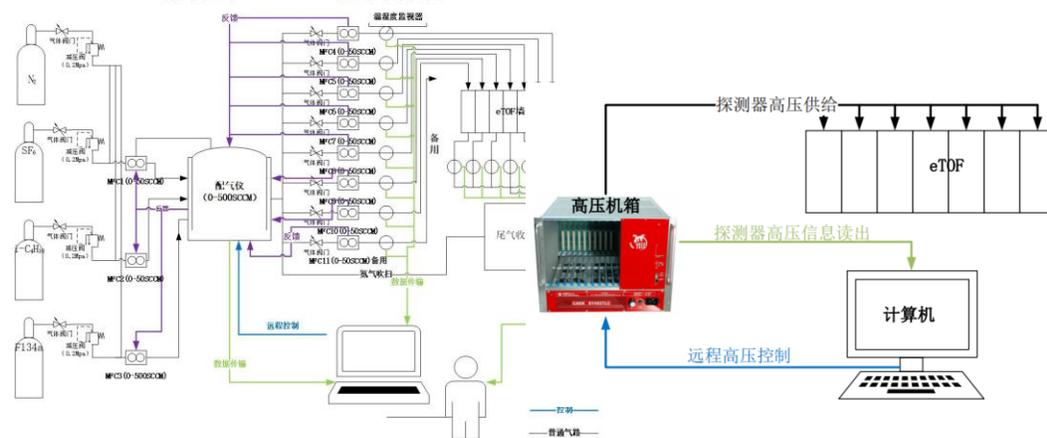


工程样机模块的安装设计，包括电子学安装、线缆引出、屏蔽和散热设计等



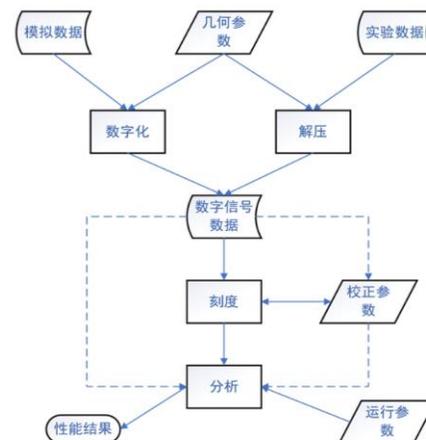
工程样机模块组装，正在进行稳定性测试
模块MRPC灵敏面积0.8 m²，在10mL/min流量下稳定工作，是国际同面积下最低！

清华大学CEE eTOF气路系统方案



气体和高压系统设计

CEE eTOF子系统CeeRoot软件框图



数据分析程序和慢控接口开发

总结与展望

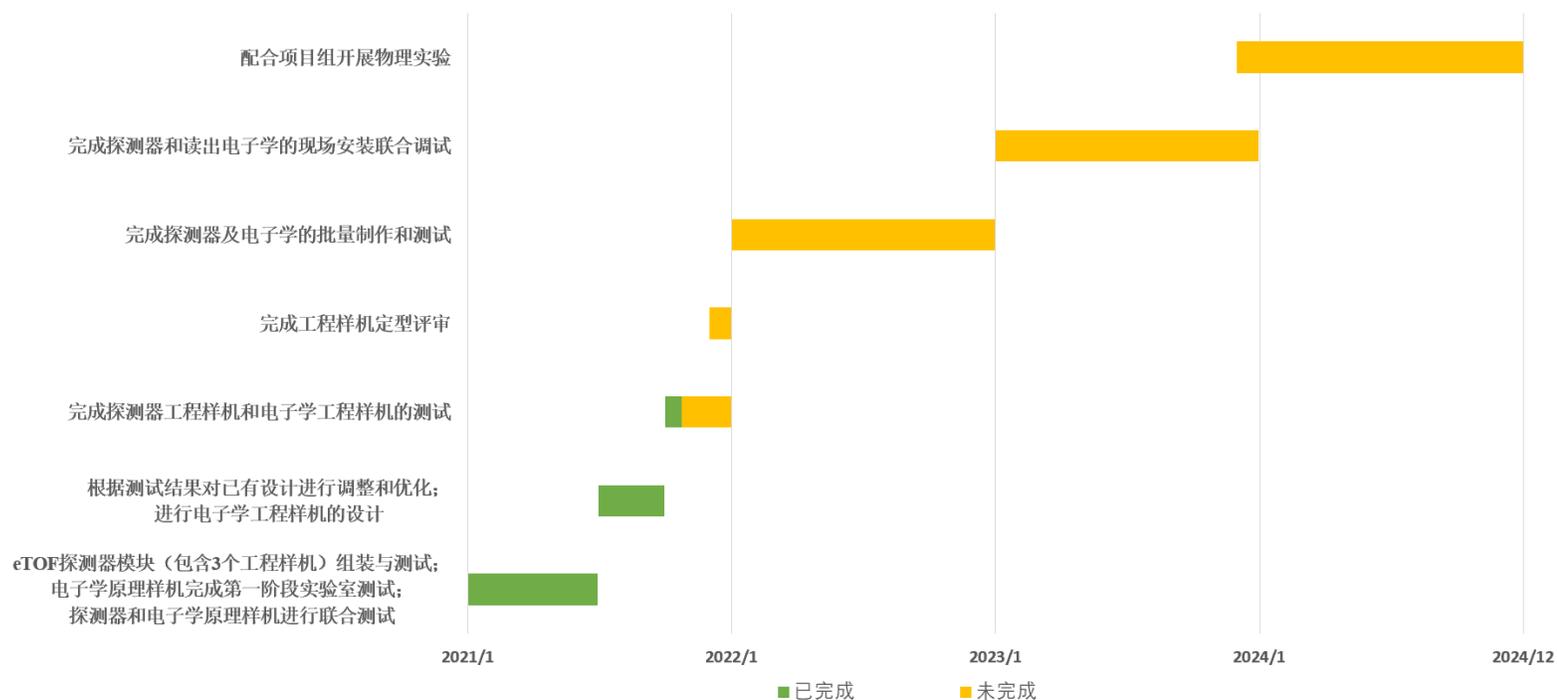
- CEE实验作为重离子打靶实验，旨在研究QCD相图、核物质状态方程等课题
- eTOF参与粒子鉴别、触发任务，系统时间分辨需达到60ps
- eTOF采用密封型MRPC技术搭建

• 已达成指标

对前角区带电粒子探测的有效覆盖
探测器长期稳定运行
探测效率>97%
时间分辨好于60ps
占有度满足设计要求
得到计数率、簇团大小等运行参数

• 下一步计划

不断优化探测器设计和工艺
eTOF探测器模块化安装与调试
束流实验



谢谢!