

微结构气体探测器 研究与应用

张志永

核探测与核电子学国家重点实验室
中国科学技术大学

NED2023, 湖北恩施

2023-08-11

目录

□ 微结构气体探测器

- § 气体探测器发展历程
- § 科学实验研究
- § 产业应用探索
- § 关键性能提升

□ 中科大MPGD研究与应用

- § MPGD技术研发
- § 支撑科学实验与应用

□ 总结与展望

目录

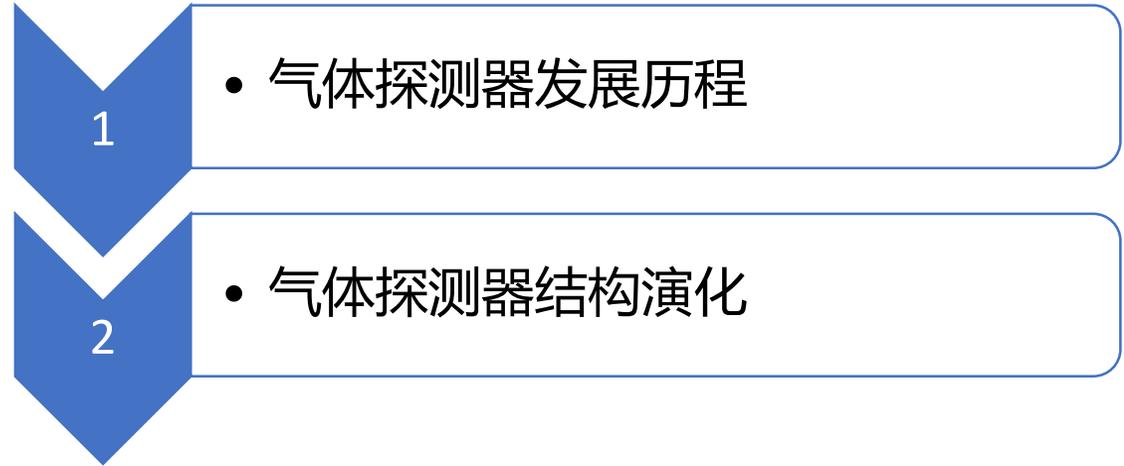
□ 微结构气体探测器

- § 气体探测器发展历程
- § 科学实验研究
- § 产业应用探索
- § 关键性能提升

□ 中科大MPGD研究与应用

- § MPGD技术研发
- § 支撑科学实验与应用

□ 总结与展望



气体探测器发展简史

□从静电计到电离室

§ The Curies 发现镭和钋, 1897-1908

§ Rutherford 发现 α 和 β 射线, 1897

§ Joseph John Thomson发现电子, 1897

□C.T.R. Wilson发明云室, 1927

§ Anderson利用云室发现正电子, μ 子, 1932

§ P. M. S. Blackett 发展了云室及相关技术, 1948

□D. Glaser发明气泡室, 1952

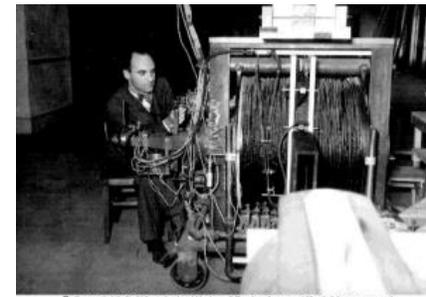
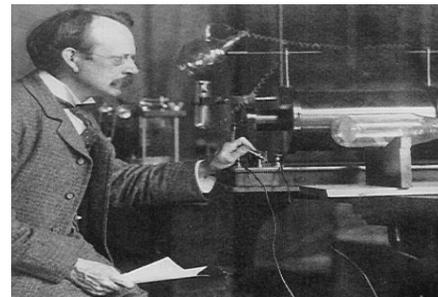
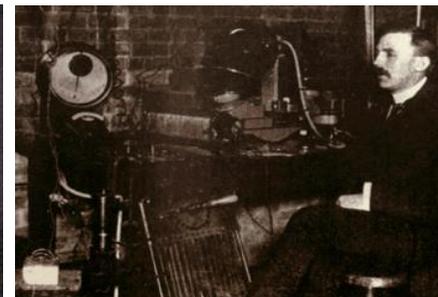
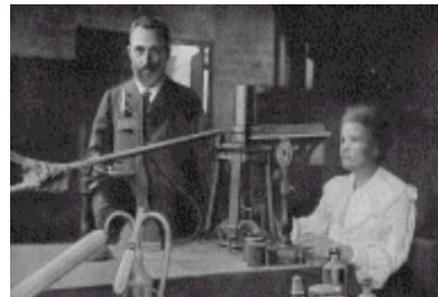
§ 发现 Ω^- , 中性流等, 1973

§ L.W. Alvarez发明氢气气泡室及数据处理, 1968

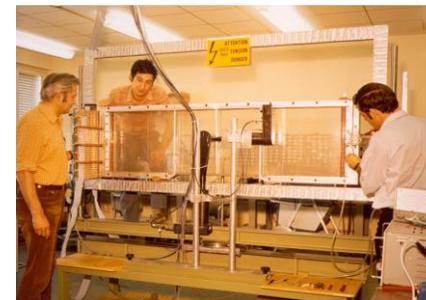
□G. Charpak发明多丝正比室, 1968

§ 发现了中间玻色子 W^\pm 和 Z^0

§ 实时测量粒子径迹, 开启了大科学实验的大门!

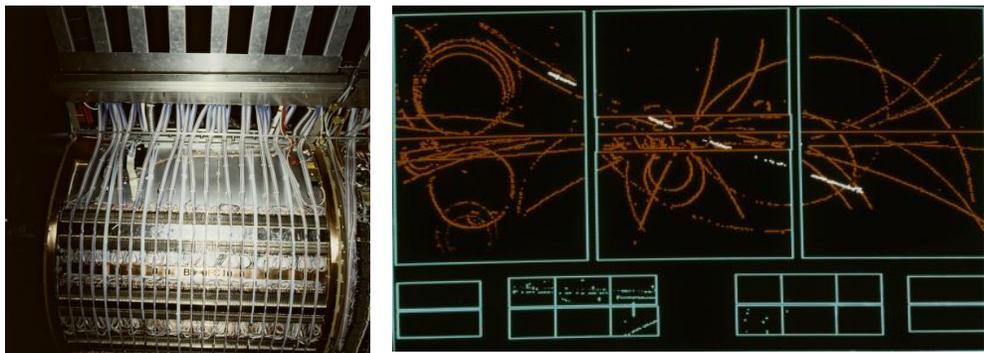


© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved. Commercial use or modification of this material is prohibited.

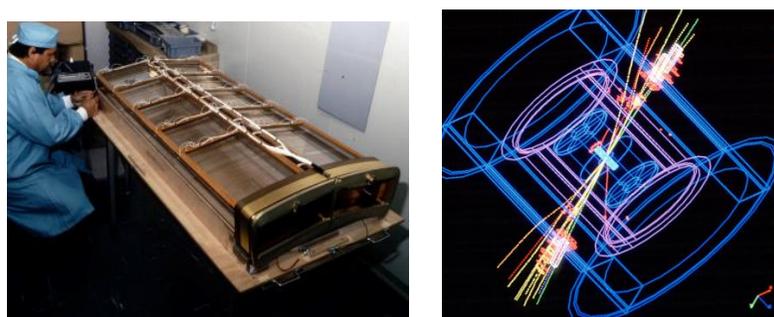


多丝正比室的广泛应用

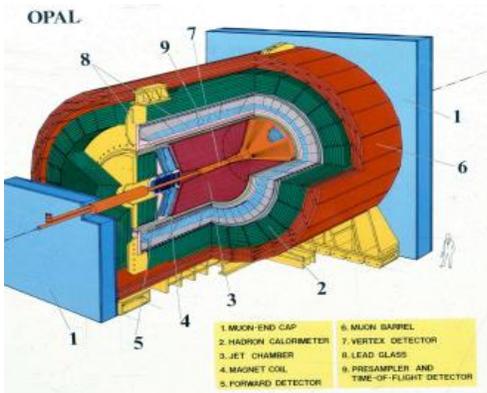
UA1, 中心径迹探测器, Discovery of W and Z



DELPHI 桶部RICH探测器



L3 缪子探测器



还远不止这些...

好用不贵，居家必备

微结构气体探测器, MPGD

Why MPGDs?

能量和亮度不断提升的大科学实验需求

□传统探测器问题:

- § 正离子积累 → 低计数率, 时间分辨差
- § 读出间距大 → 位置分辨差

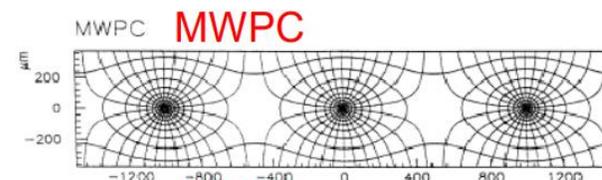
□得益于光蚀刻、薄膜沉积等技术发展:

- § 微雪崩结构 → 加速离子泄放
- § 窄电极间距 → 提高信号定位精度

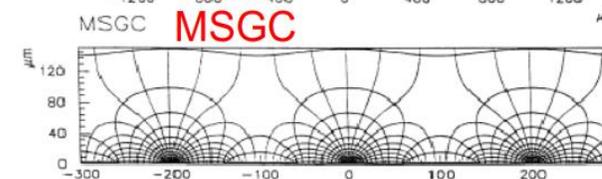


scale factor

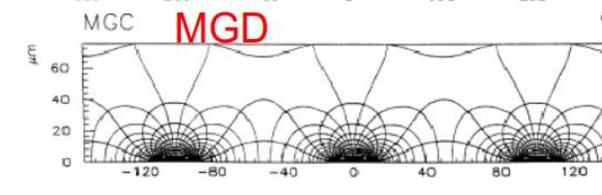
1



5



10



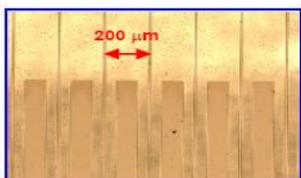
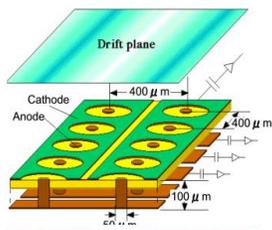
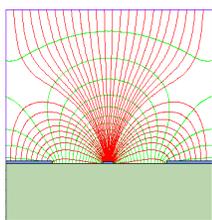
- 更高:** 高增益 ($>10^4$) $<100 \mu\text{m}$ 位置分辨
- 更快:** ns量级定时精度, $>\text{MHz}/\text{mm}^2$ 计数率
- 更强:** $<0.1\%$ 正离子反馈, 抗辐照损伤

微结构气体探测器主流技术

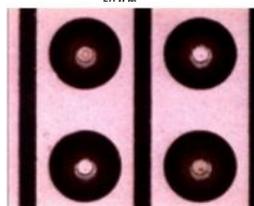


A. Oed
MSGC, 1988

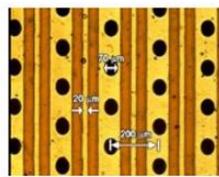
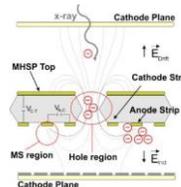
微条



MSGC



microPIC

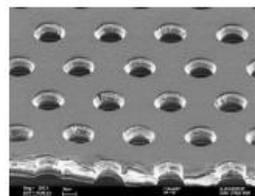
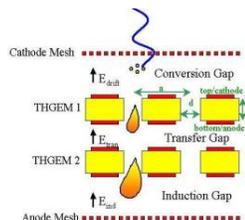
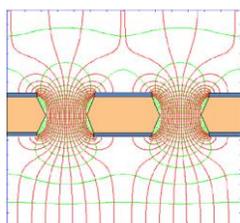


MHSP

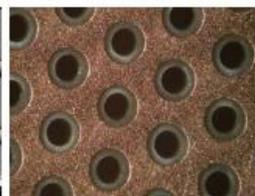


F. Sauli
GEM, 1997

微孔

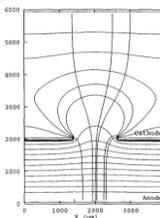


GEM



THGEM

微点、孔-条、微井、微槽

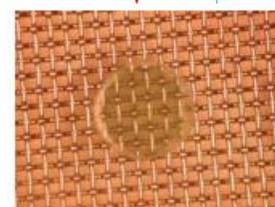
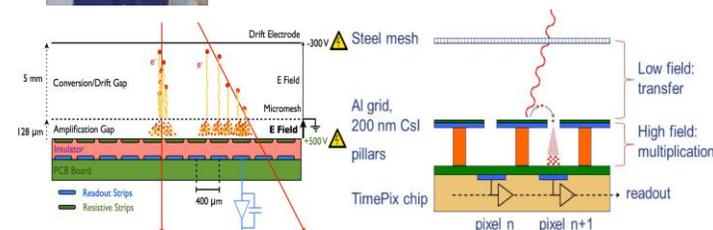


WELL

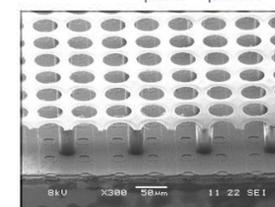
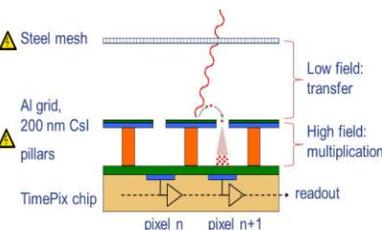


Y. Giomataris
Micromegas, 1996

微网



Micromegas

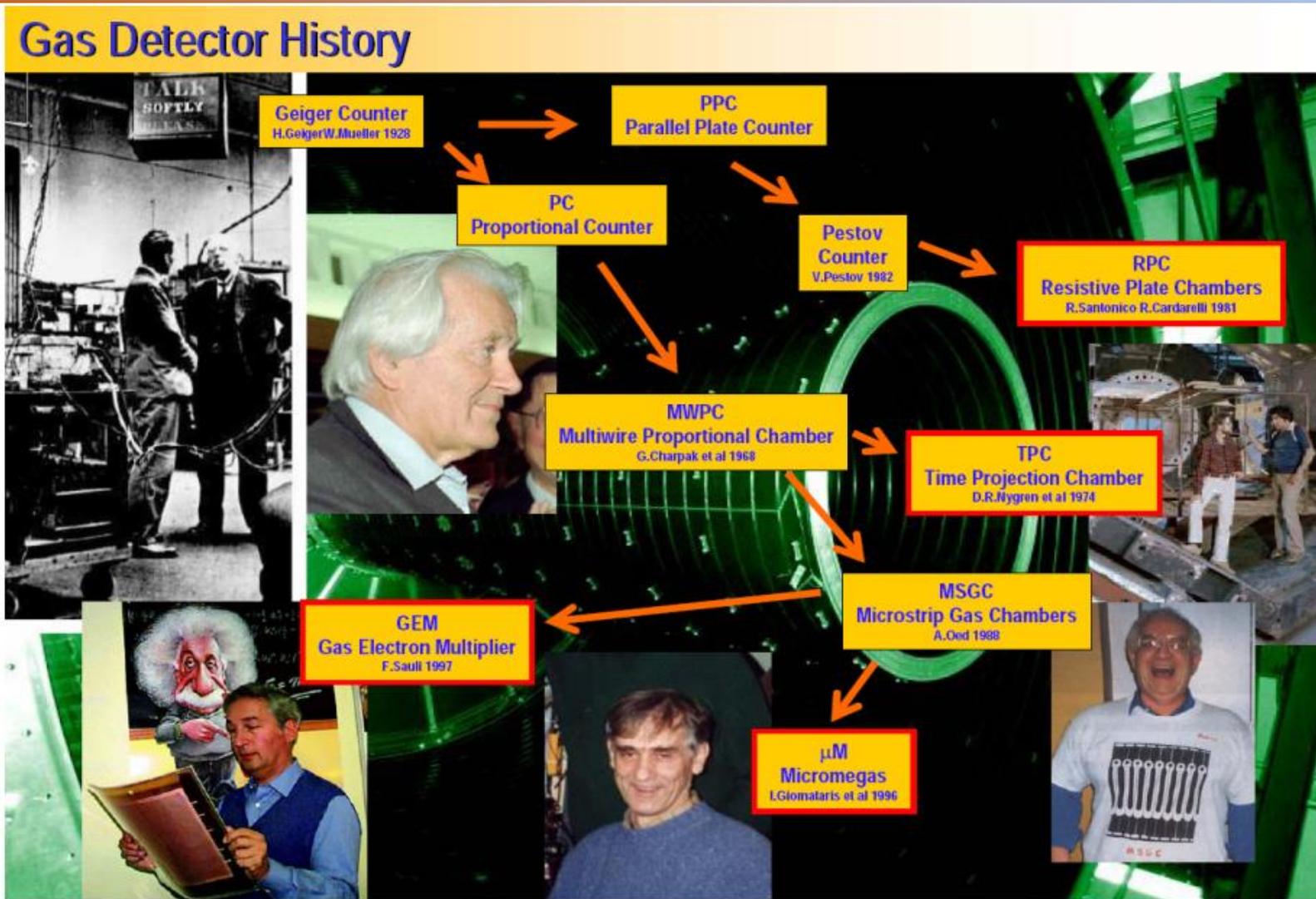


Ingrid

◆亚毫米电极、倍增结构：高计数率、高时空分辨、抗辐照、低离子和光子反馈

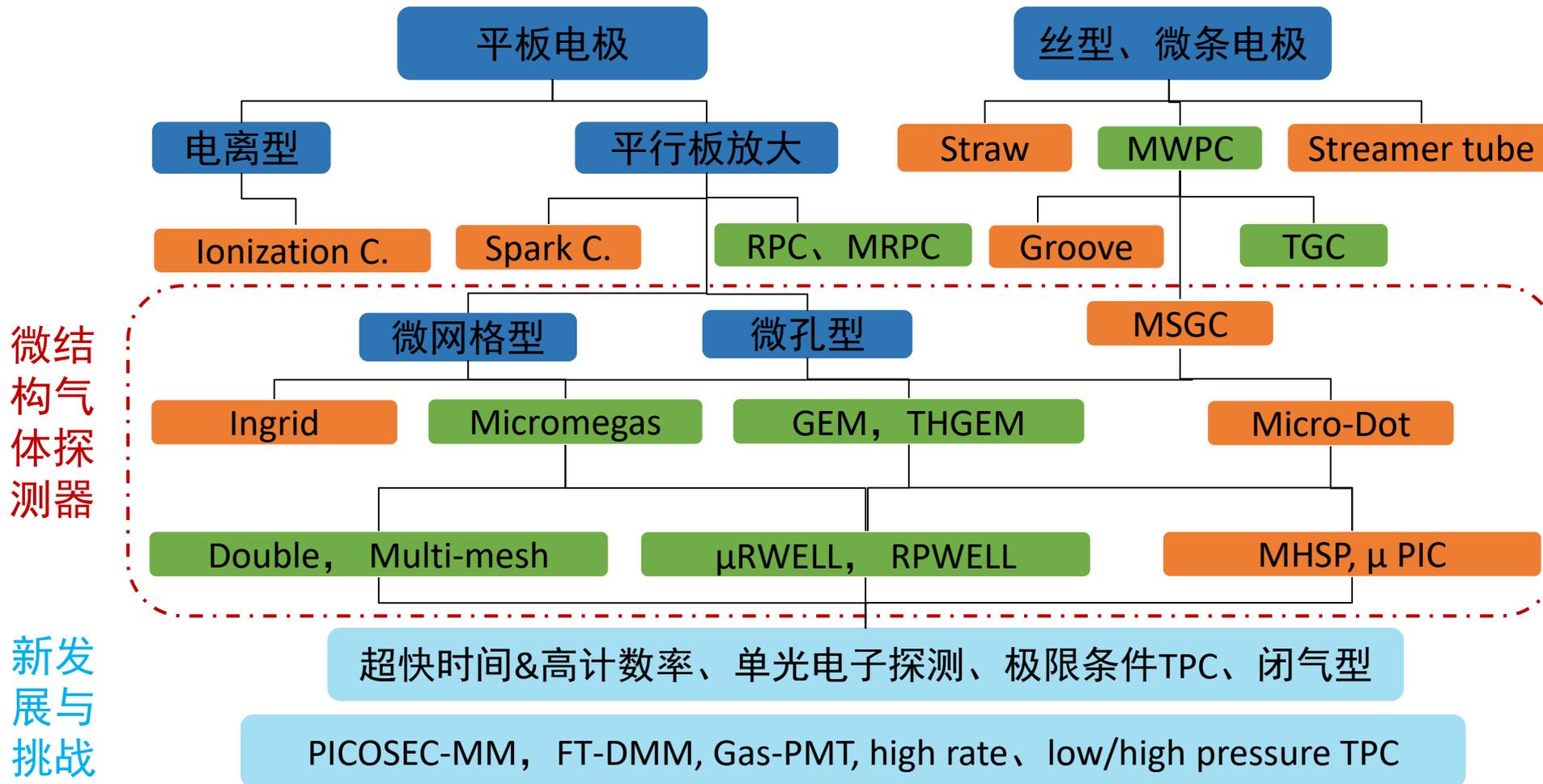
◆现代工业化加工技术：大面积、低造价

气体探测器的发展历程



M. Hoch, 2004 Wire Chamber Conference

气体探测器结构演化



目录

□ 微结构气体探测器

§ 气体探测器发展历程

§ 科学实验研究

§ 产业应用探索

§ 关键性能提升

□ 中科大MPGD研究与应用

§ MPGD技术研发

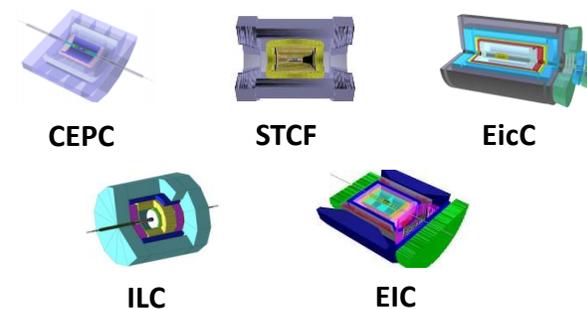
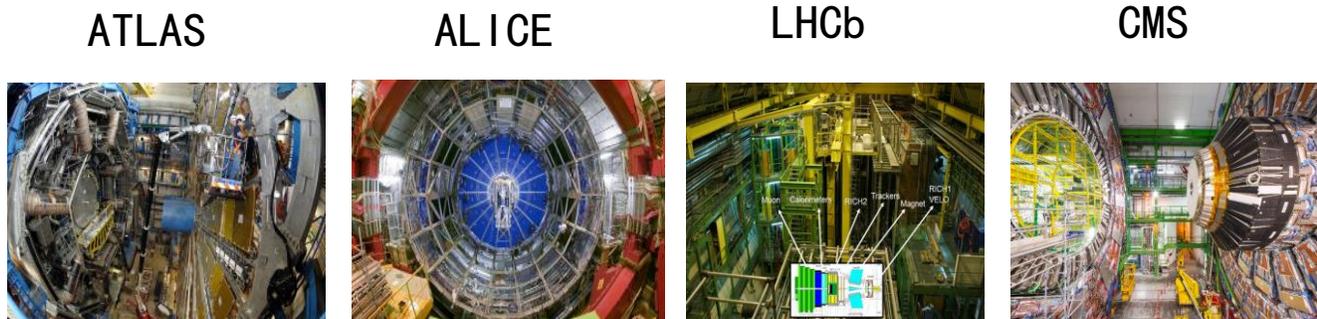
§ 支撑科学实验与应用

□ 总结与展望

粒子物理实验研究

大科学装置建设与升级

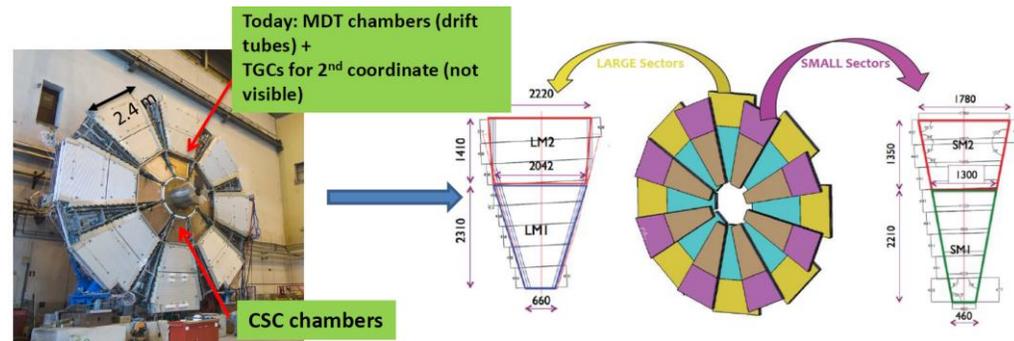
未来对撞机实验技术预研



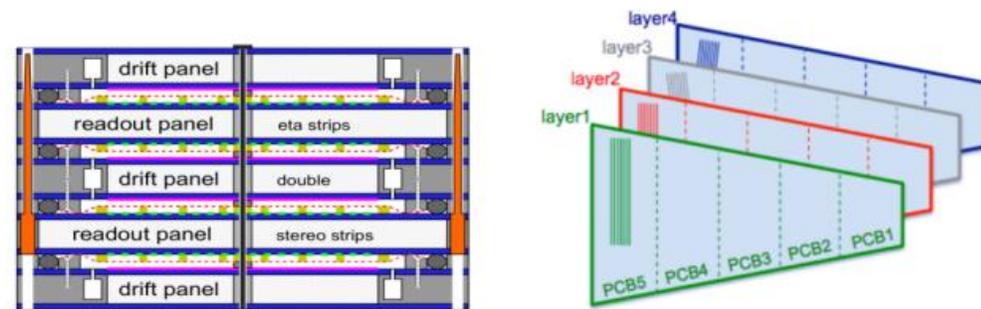
	顶点探测器	内径迹	粒子鉴别	强子量能器	缪子径迹	缪子触发
ATLAS	GOSSIP/ InGrid				1200 m ² MM	
ALICE		TPC (130 m ² GEM)	VHPMID (CsI THGEM)			
LHCb					GEM	
CMS				FCAL (GEM,MM)	1000 m ² GEM	

	内径迹	粒子鉴别	强子量能器
ILC	TPC(MM,GE M, InGrid)		DHCAL (MM,GEM, THGEM)
CEPC	TPC(GEM,M M)	RICH(THGEM, MM,DMM)	DHCAL (GEM, THGEM,RPWELL)
STCF	C-μRWELL	RICH(THGEM, MM,DMM)	

ATLAS 缪子探测器：大面积Micromegas



- ◆ SW覆盖 $1.3 < \eta < 2.7$ 区域，预期计数率 $600 - 15k \text{ Hz/cm}^2$
- ◆ NSW MM总面积 1280 m^2 ，单个探测器达到 $\sim 2-3 \text{ m}^2$

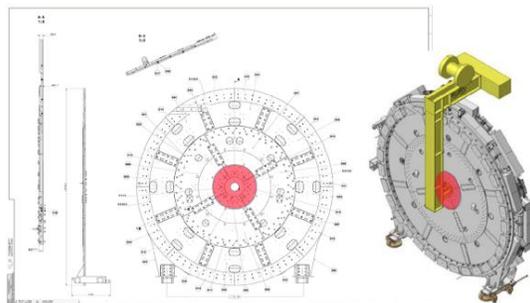


- ◆ 超出现有Bulk工艺能力 ($< 60 \text{ cm}$) 采用floating mesh
- ◆ 阻性电极采用阻性条，阻值为数 $10k\Omega/\text{cm}$

核与粒子物理实验仍是MPGD发展的核心驱动力！

极端条件实验需求

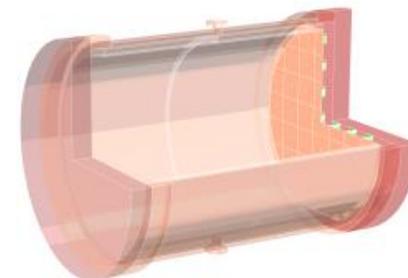
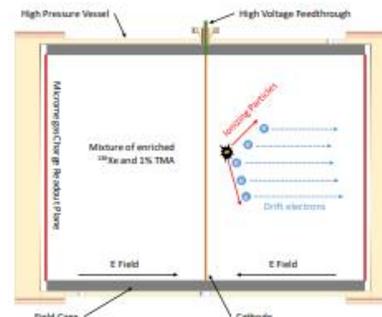
ATLAS Phase-II升级中
High- η tagger区域径迹测量
距离束流管只有25cm, 高达10MHz/cm²极端计数率



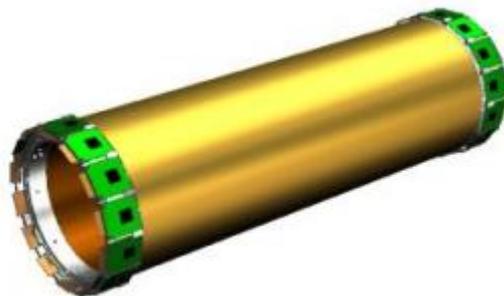
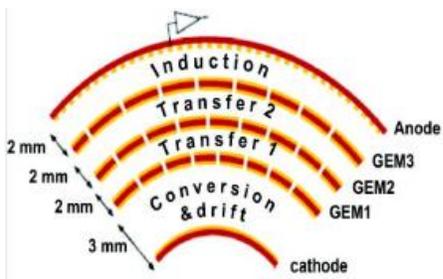
高亮度LHC升级中
高计数率下达到30皮秒分辨,
以应对超高的事例多重数



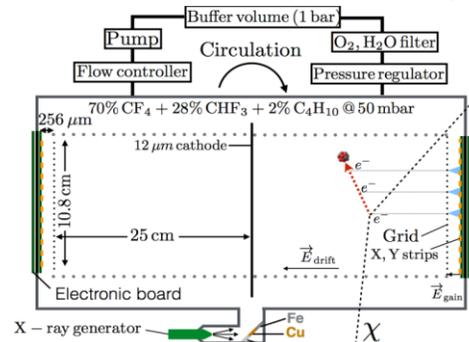
PandaX-III 读出高压**低本底**TPC
10bar Xe测量双贝塔衰变电子, 排除本底



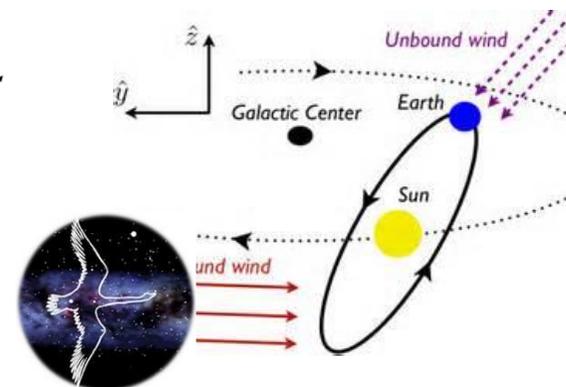
BES-III内径迹探测器
圆筒形GEM



MIMAC 低气压**低本底**TPC
50mbar 含氟气体探测暗物质方向性反冲核方向

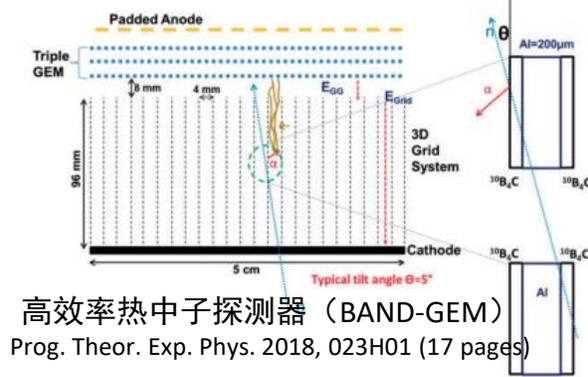
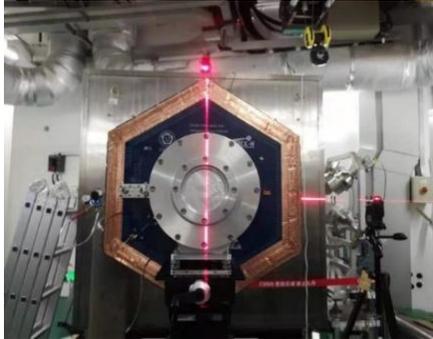


Y. Tao et al, NIMA Available online 4 May 2021, 165412



新型技术研究

成像型中子探测

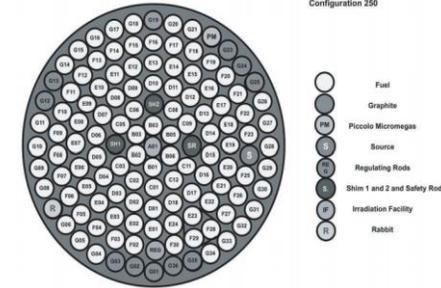
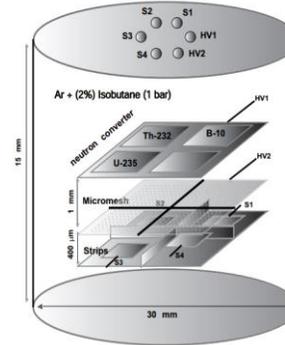


高效率热中子探测器 (BAND-GEM)
Prog. Theor. Exp. Phys. 2018, 023H01 (17 pages)

CSNS-Back-n 中子MTPC高颗粒度像素
读出TPC测量中子反应核数据

基于Micromegas的中子探测

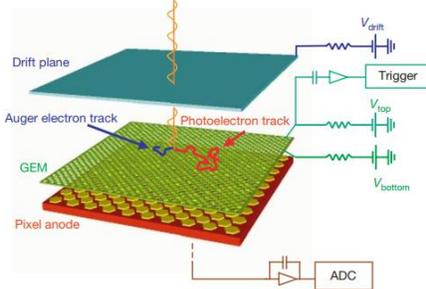
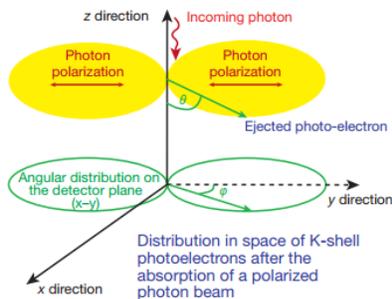
高辐照背景下宽中子能段, 用于ADS堆芯内部中子测量



中低能X射线偏振测量

keV能段X射线偏振测量的唯一手段

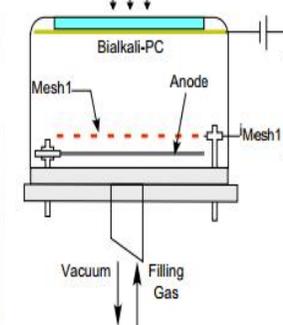
如eXTP/polor-2实验



Nature volume 411, pages662-665 (2001)

可见光灵敏gasPMT

单光电子测量、极低离子反馈率、无气体释放



目录

□ 微结构气体探测器

- § 气体探测器发展历程
- § 科学实验研究
- § 产业应用探索
- § 关键性能提升

□ 中科大MPGD研究与应用

- § MPGD技术研发
- § 支撑科学实验与应用

□ 总结与展望

1

- 医学成像、放射医疗射束检测

2

- X-ray荧光分析、痕量放射性检测、工业CT

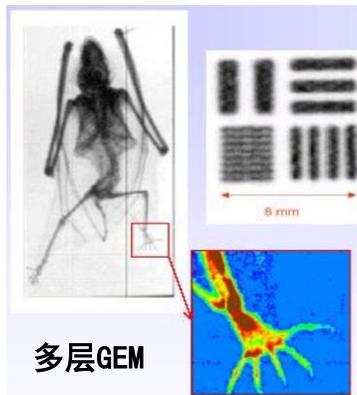
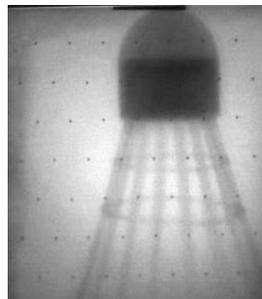
复杂多样化应用需求（医疗成像）

X射线成像

大面积高精度X-ray探测



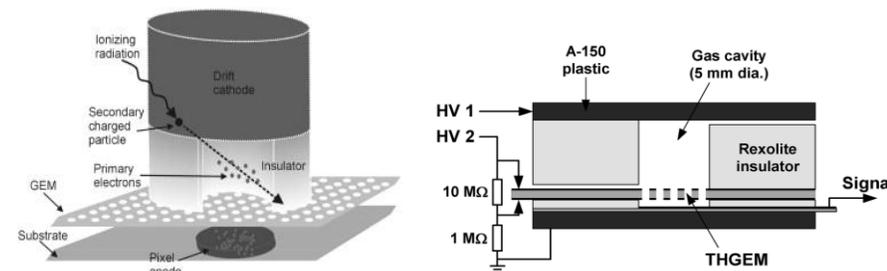
MicroMEGAS / X射线 (75KeV) 扫描图像



多层GEM

组织等效计数器用于微纳剂量学测量

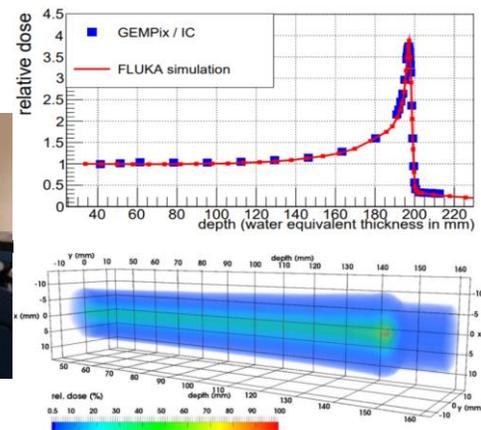
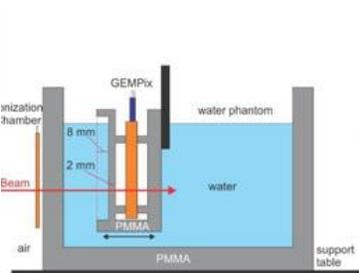
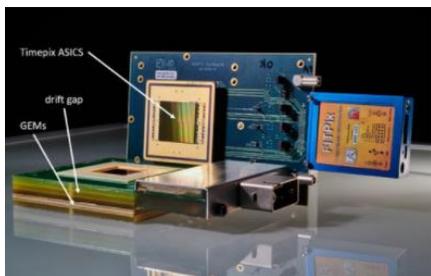
微体积、高能量线性测量



M. Farahmand et al., 2003; Soo Hyun Byun et al., 2009

高颗粒度像素读出GEMpix

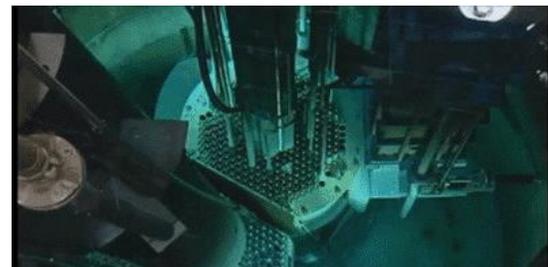
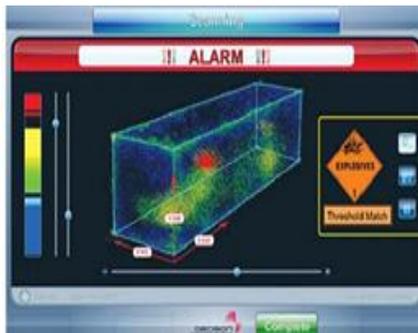
测量治疗质子束入射深度



复杂多样化应用需求（工业技术领域）

缪子成像研究

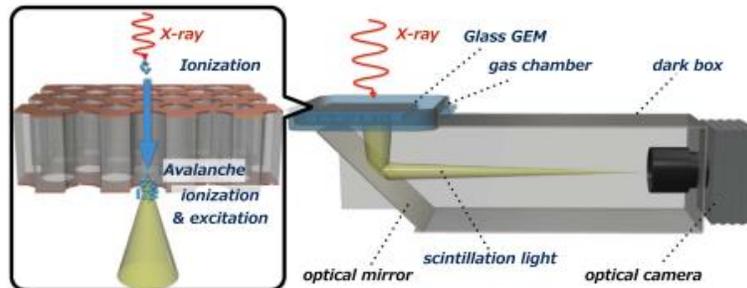
大面积径迹探测，测量散射角度和透射吸收



核电安全运行及核燃料监测、
国防装备监测、二氧化碳地质封存监测、大型文化遗址无损考古、
地质灾害监测等

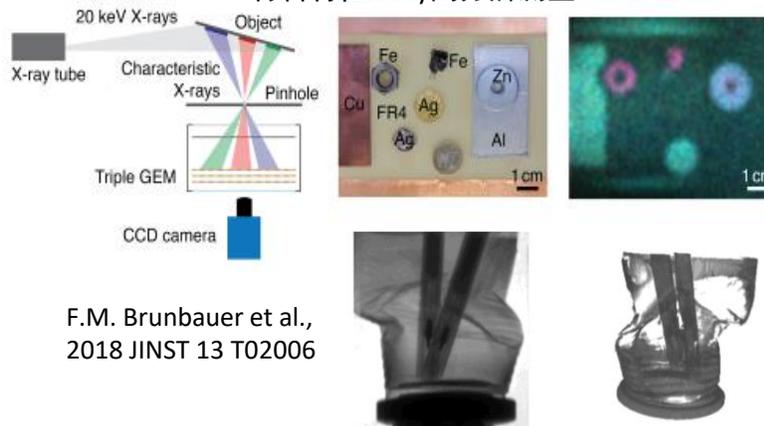
基于MPGD高流强束流监测

商用CCD相机光读出方法替代电荷读出



光读出X-ray “彩色” 和3D成像

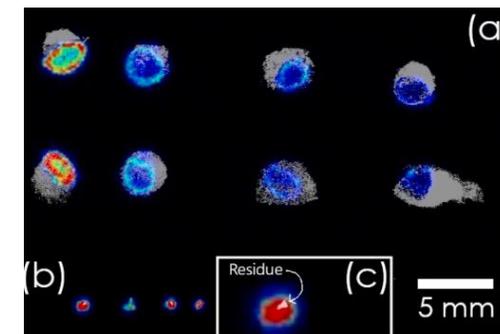
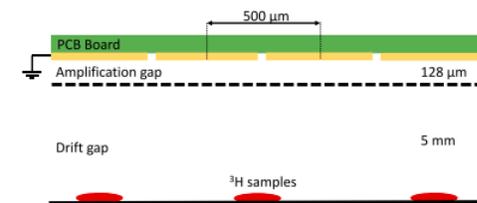
材料特征X-ray高分辨测量



F.M. Brunbauer et al.,
2018 JINST 13 T02006

基于MM的痕量放射性活度测量

3D径迹+能量多维信息测量



目录

□ 微结构气体探测器

- § 气体探测器发展历程
- § 科学实验研究
- § 产业应用探索
- § 关键性能提升

□ 中科大MPGD研究与应用

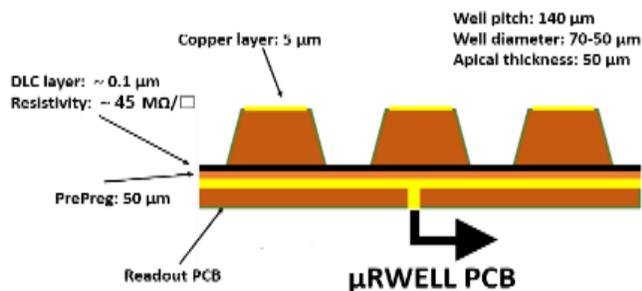
- § MPGD技术研发
- § 支撑科学实验与应用

□ 总结与展望



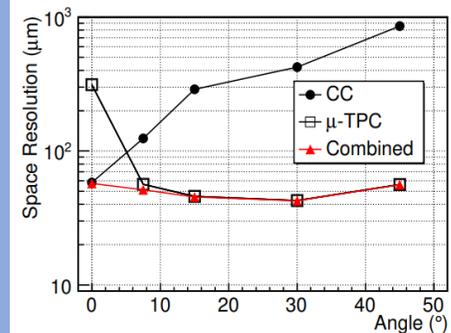
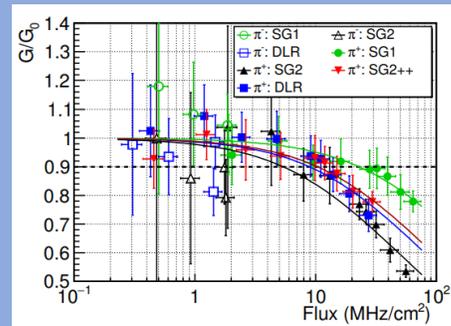
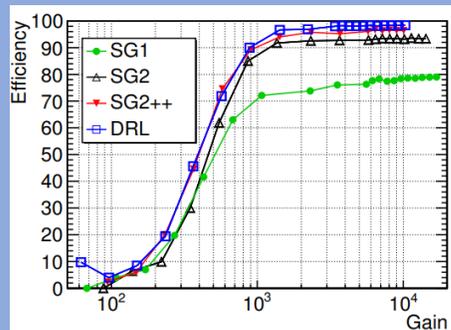
紧凑型结构: μ RWELL

- ◆ 井型概念很早就已出现
catWELL: F. Bartol et al., 1996
WELL, R. Bellazzini et al., 1999
- ◆ 得益于阻性电极(DLC)发展
RPWELL, A. Rubin et al., 2013
 μ RWELL, G. Bencivenn et al., 2015



近年来快速发展:
98%探测效率, $>10\text{MHz}/\text{cm}^2$
计数率, $<50\ \mu\text{m}$ 位置分辨

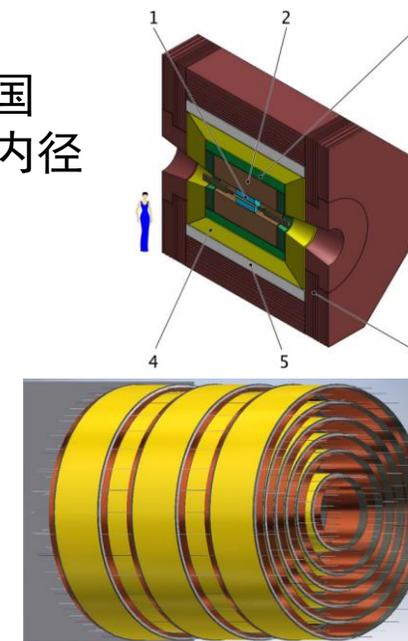
Y. Zhou, et al., NIM-A, 927(2019) 31-36
G. Bencivenni et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1498 012003



- 单级替代多级 (Vs GEM, THGEM)
- 取消电极张力 (Vs MM)
- 结构紧凑、易于大面积制作
- 可刚可柔、低质量、特殊形状

Cylindrical μ RWELL

- 下一代陶浆工厂 (中国 STCF 和俄罗斯 SCTF) 内径迹的共同选择
- EIC桶部 Tracker 概念设计方案



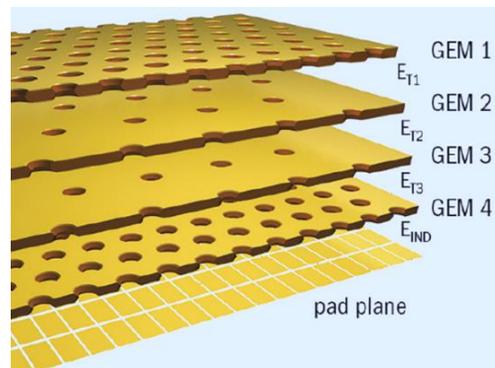
低离子反馈：Q-GEM、GEM+MM、MHSP

高计数率TPC

ALICE 探测器升级, ILD, CEPC 预研等

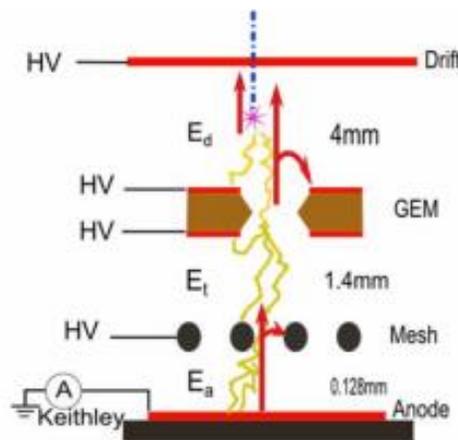
- 降低离子空间电荷对漂移电场的影响
- 高事例率连续读出 (non-gating)

ALICE-TPC



Quadruple GEM, IBF < 1%

CEPC-TPC



Gain \times IBF ~ 5 , IBF $\sim 0.1\%$

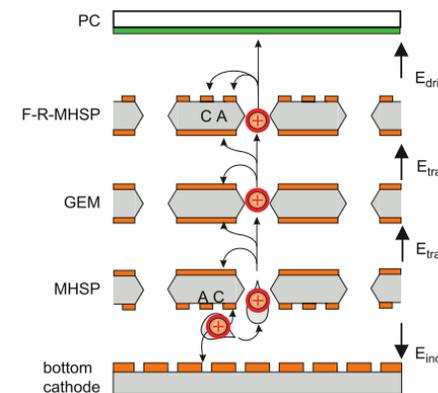
气体光电探测

	几何结构	抗磁干扰	大面积	位置灵敏	造价
传统型	受限	弱	难	弱	高
气体型	灵活	强	易	强	低

- UV light: CsI, $\sim \text{mC}/\text{cm}^2$
- Visible light: Bi-alkali, $\sim \mu\text{C}/\text{cm}^2$!

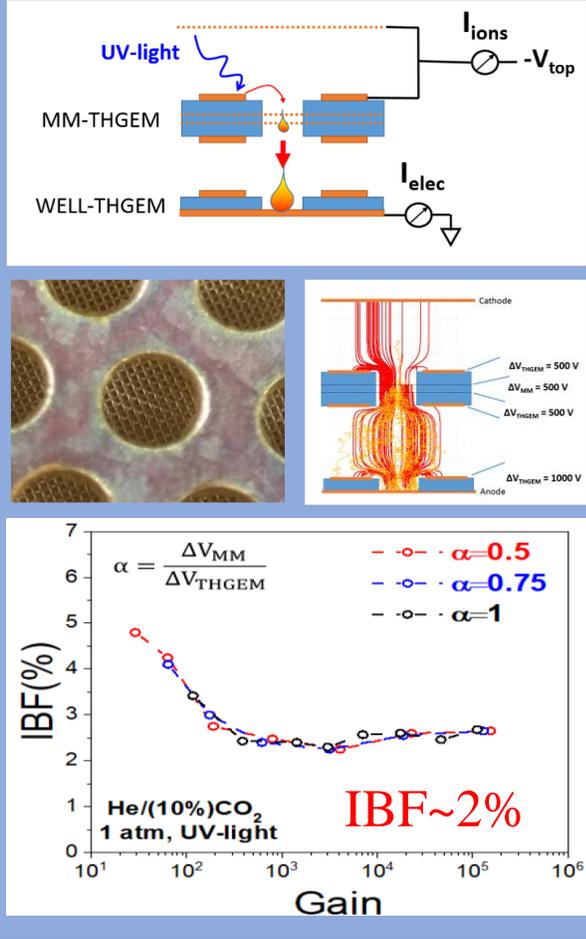
现行方案中的最好水平:
F-R-MHSP_GEM_MHSP
IBF: $\sim 0.03\%$

A. Lyashenko et al., NIM A
598(2009) 116-120

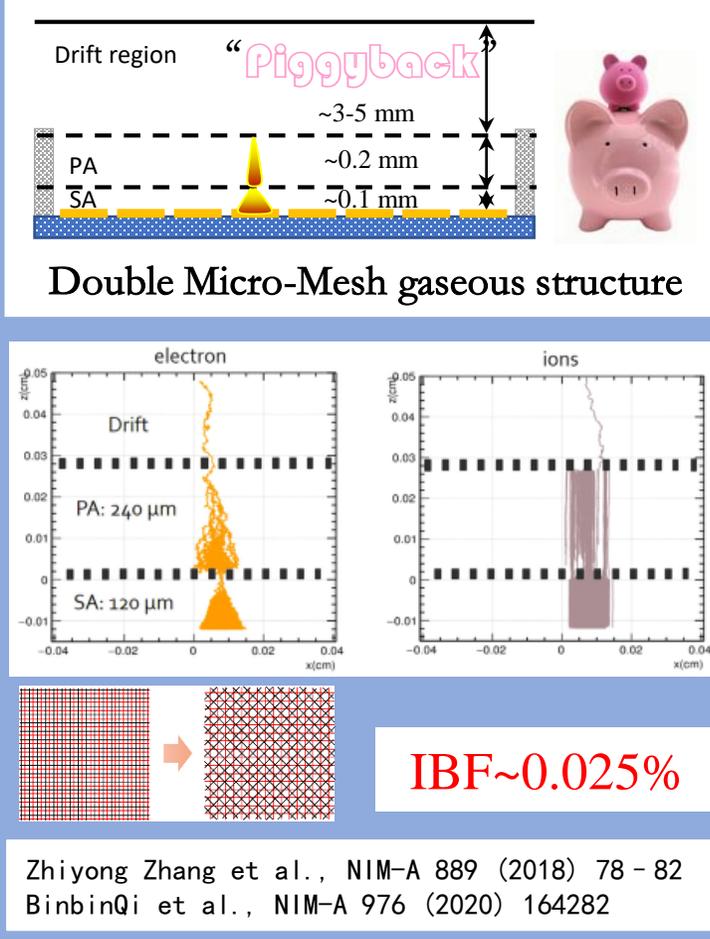


低离子反馈：MM-THGEM、DMM、TMM

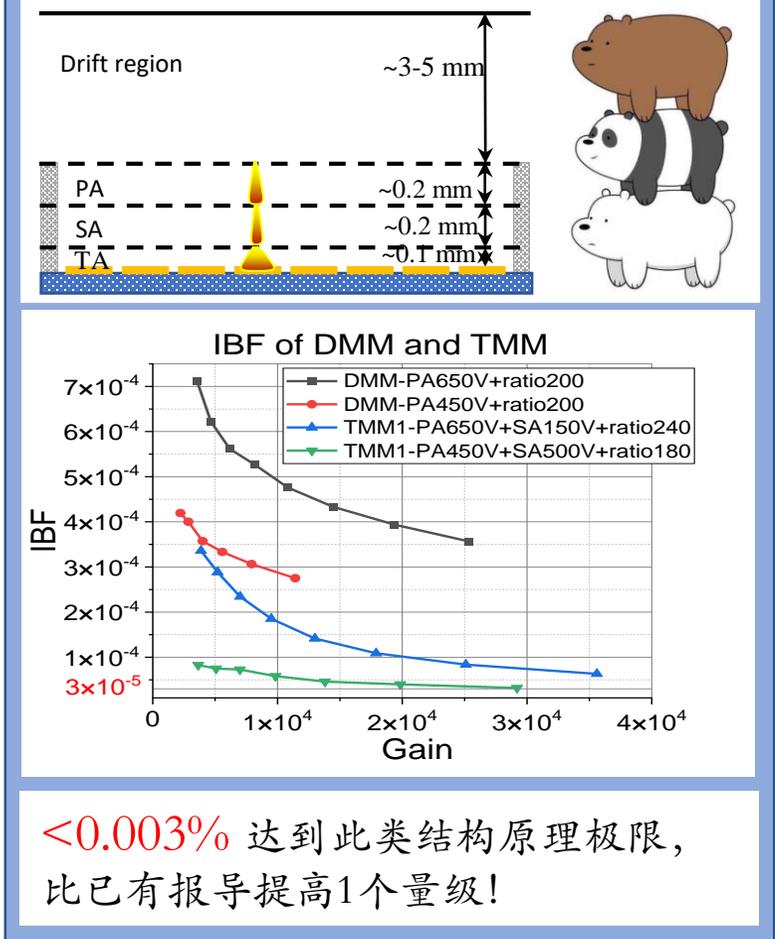
MM-THGEM



DMM



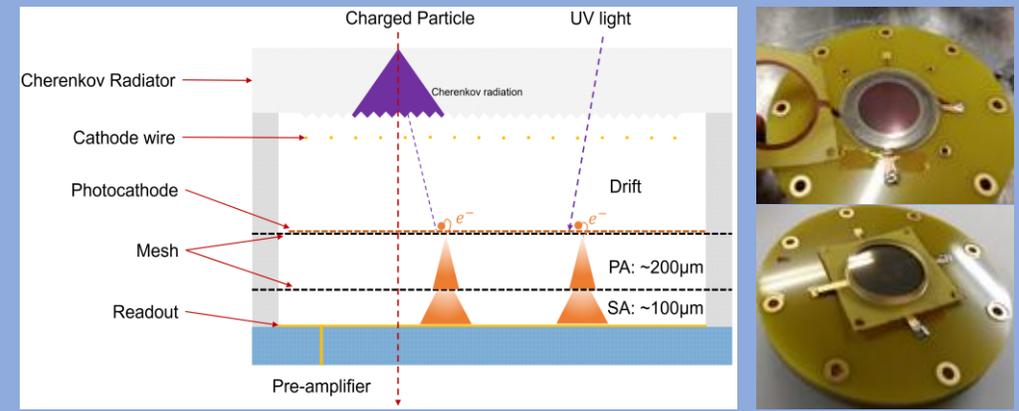
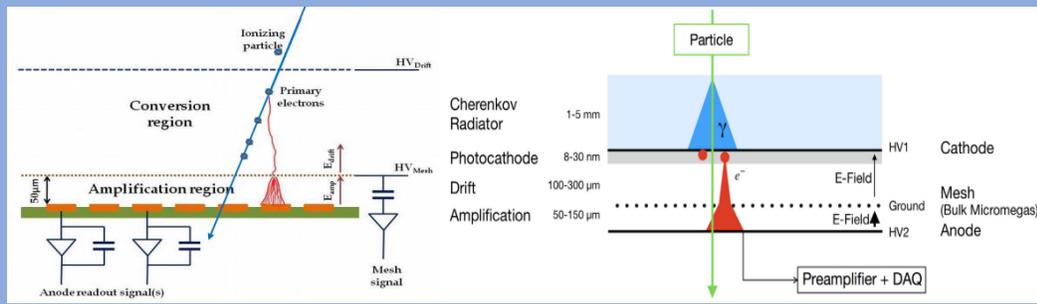
TMM



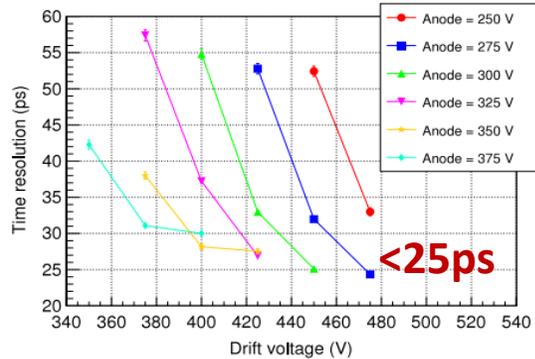
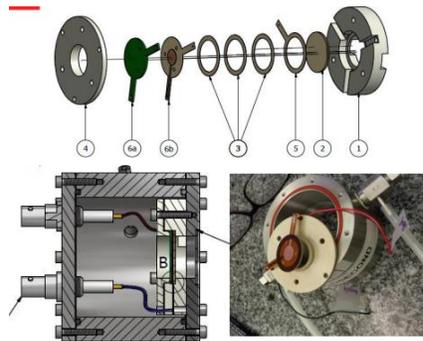
快时间测量：PICOSEC-MM、FT-DMM

PICOSEC-MM

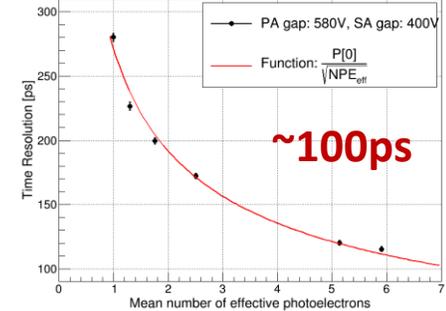
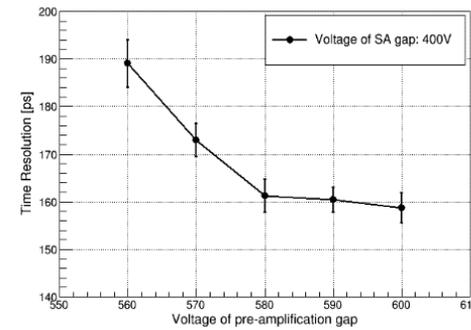
FT-DMM



- ◆ 切伦科夫光电转换电信号
- ◆ 克服电离位置和电子漂移扩散造成的信号时间抖动



J. Bortfeldt, et al., NIM-A, 903 (2018) 317-325



X. Wang et al., NIM-A, 1055 (2023) 168529

目录

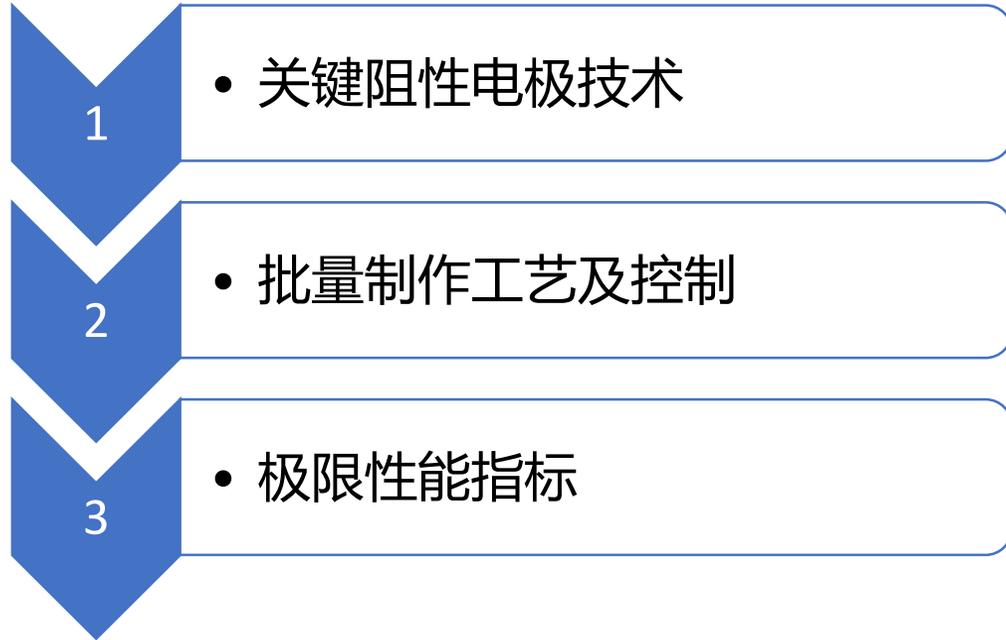
□ 微结构气体探测器

- § 气体探测器发展历程
- § 科学实验研究
- § 产业应用探索
- § 关键性能提升

□ 中科大MPGD研究与应用

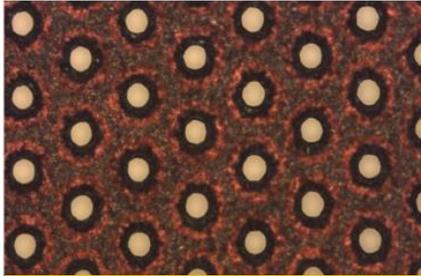
- § MPGD技术研发
- § 支撑科学实验与应用

□ 总结与展望



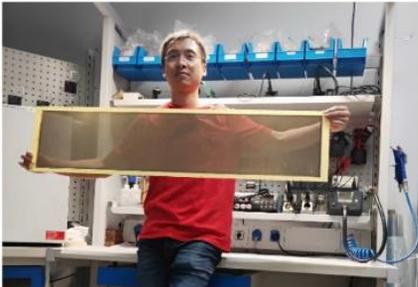
阻性电极关键技术

Eraldo Oliveri
CERN



DLC-无铜-THGEM
材料特征X-ray分析成像

Ming Shao
USTC



DLC-
THGEM

Fabio Sauli
CERN



DLC-GEM的X-ray
成像

Yongjie Sun
USTC



DLC-
MRPC

Ioannis Giomataris
Saclay



阻性ACHINO
用于暗物质探测器

Piotr Gasik
TUM



DLC-
THGEM

Giovanni Bencivenni
LNF-INFN



DLC-
 μ RWELL

Piet Verwilligen
INFN - Sezione di Bari



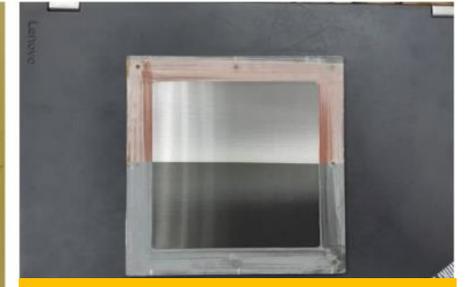
DLC-
FTM

Mauro Iodice
INFN Roma Tre



DLC-
Micromegas

Pollacco Emmanuel
Saclay

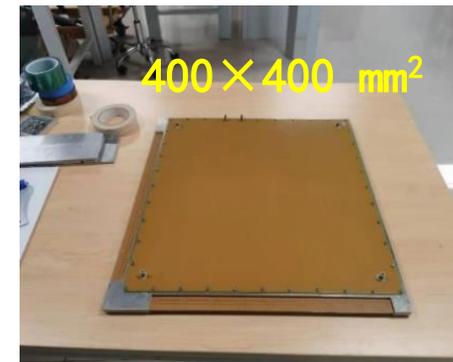
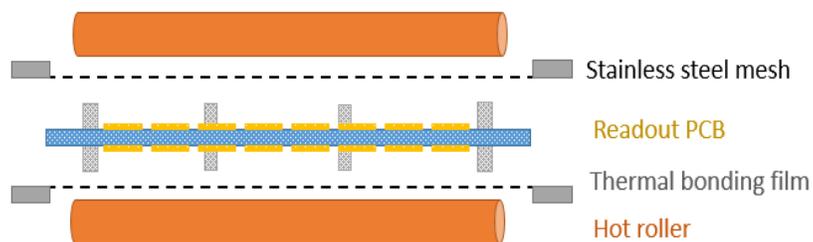


DLC dark mesh Micromegas
for optical readout

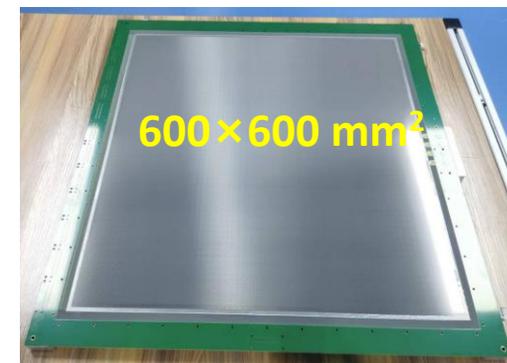
中科大与中科院兰州化学物理研究所合作研发DLC在国际国内MPGD研究中应用

热压接Micromegas研发

□自主研发热压接技术，实现工艺和设备的研制，具备大面积批量化探测器制造能力



- 无刻蚀, 无污染
- 易于在实验室进行
- 易于开发新型MPGD
- $\Phi 0.5-1\text{mm}$ 支撑结构, $\sim 1\text{cm}$ 间距
 - 易于清洗, 利于大面积稳定性
 - 支撑死区小于1%



极限性能指标

□ X射线测试 (5.9 keV)

§ 增益: $\sim 10^5$ (Ar+7%CO₂)

§ 能量分辨: $\sim 15\%$ (FWHM)

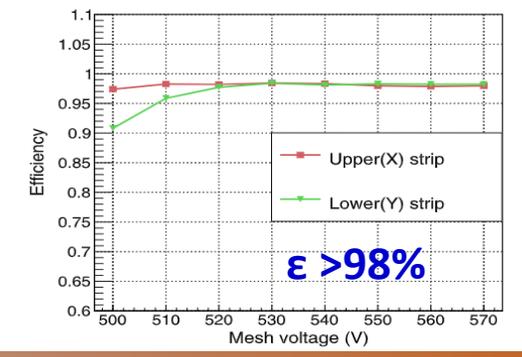
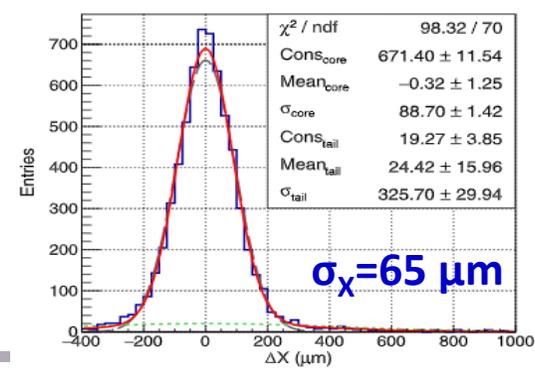
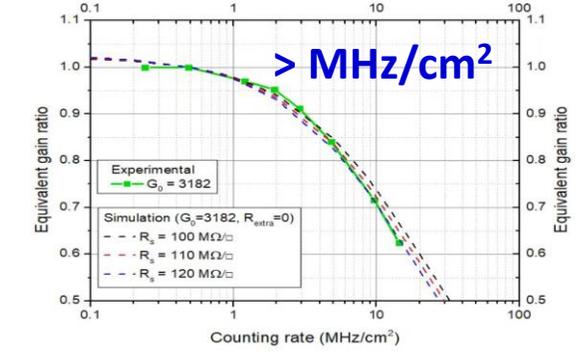
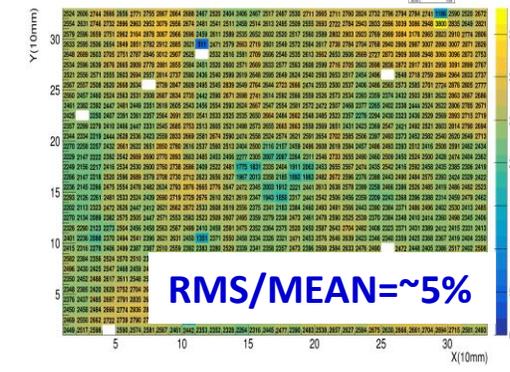
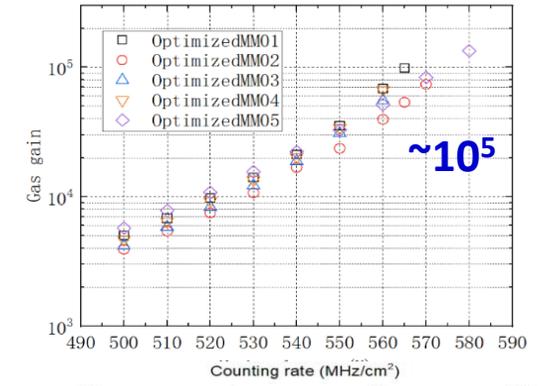
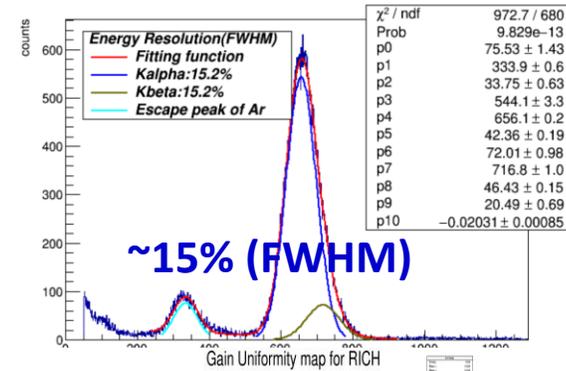
§ 增益均匀性: $\sim 5\%$ for 30×30 cm²

§ 高计数率: $> \text{MHz/cm}^2$

□ 电子束流 (5GeV)

§ 探测器效率: $> 98\%$

§ 位置分辨: $65 \mu\text{m}$



目录

□ 微结构气体探测器

- § 气体探测器发展历程
- § 科学实验研究
- § 产业应用探索
- § 关键性能提升

□ 中科大MPGD研究与应用

- § MPGD技术研发
- § 支撑科学实验与应用

□ 总结与展望

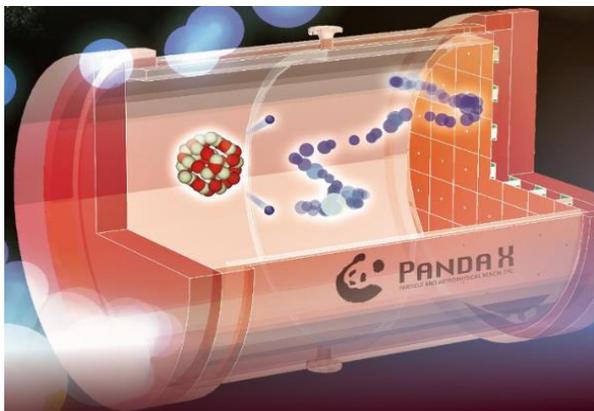
1

- 支撑物理实验研究：PandaX-III、未来对撞机技术预研、散裂中子源中子探测实验、MeGaT

2

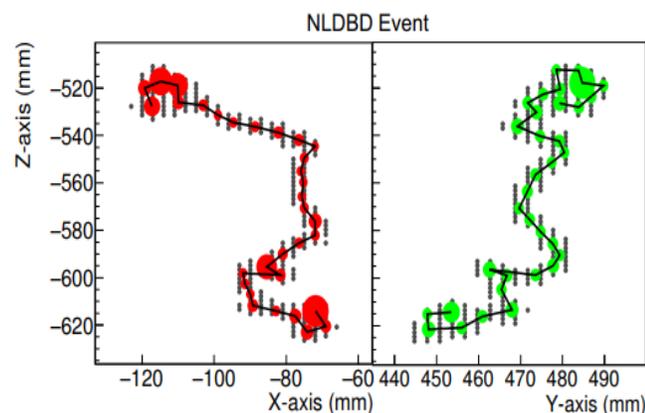
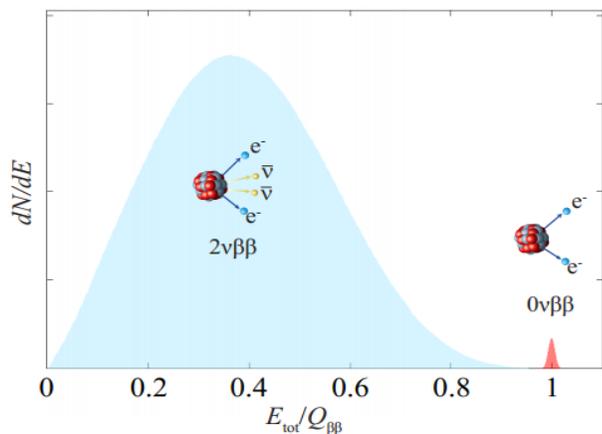
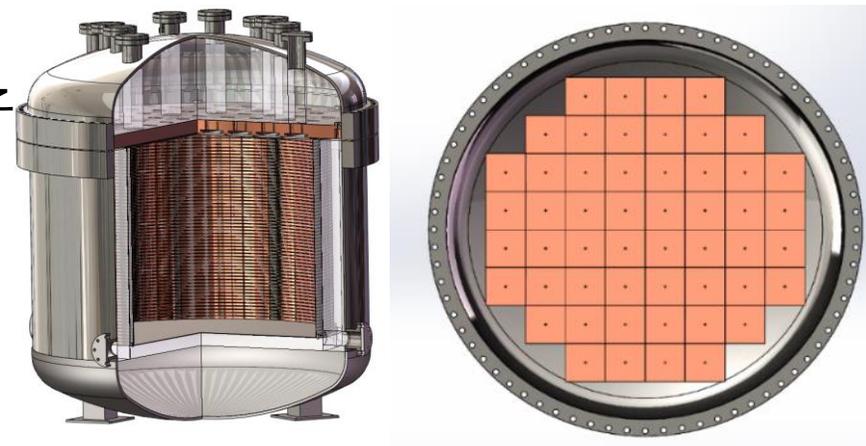
- 应用技术研究：缪子成像、放射医疗强流中子/质子束测量、痕量级放射性检测

PandaX-III 实验



科学意义

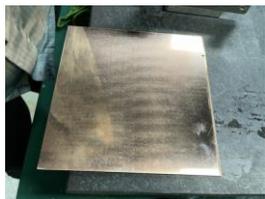
- § 中微子是否是自身的反粒子
- § 轻子数守恒问题
- § 中微子绝对质量



指标要求

- § 工作在10 bar Xe (1% TMA)
- § 低本底材料
- § 52个 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ MMs
- § X-Y 两维条读出
- § 3% 能量分辨 @ 2.5 MeV

低本底高分辨TPC读出探测器研制



1. 衬板校平



2. PCB粘合



3. 表面抛光



4. 阻性电极



5. 布置垫片



6. 压接制作



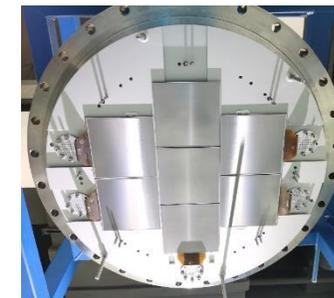
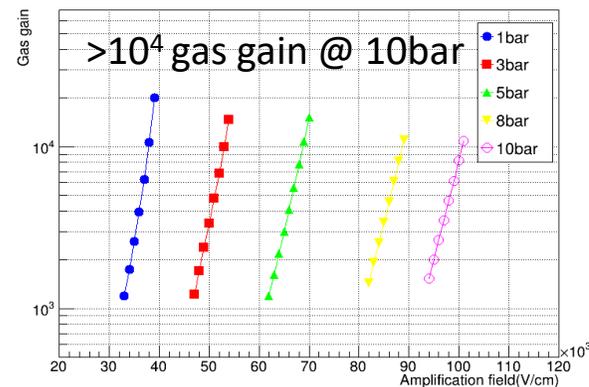
7. 显微视检



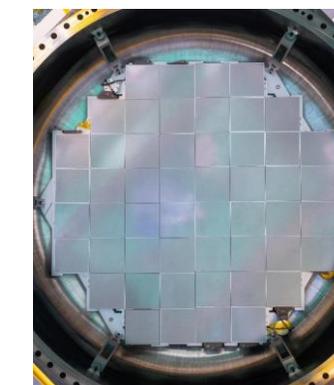
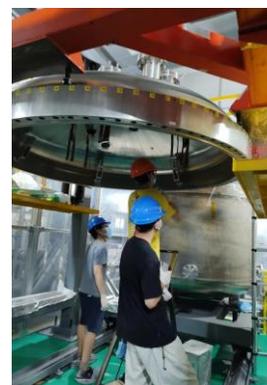
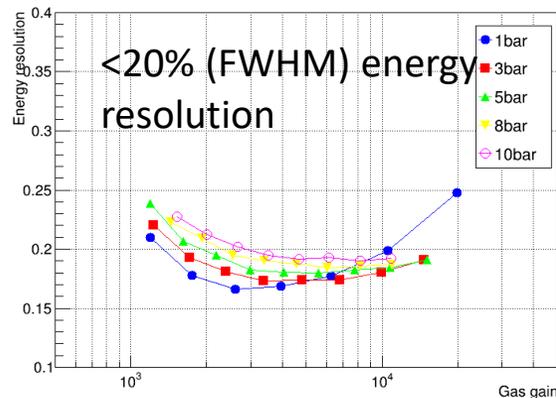
8. 耐压测试



9. 气室组装



7个探测器小型TPC样机



52个探测器工程样机

建成之后，将会是国际上首个基于MPGD技术的无中微子双贝塔衰变事例搜寻实验，其放射性本底与径迹测量精度等关键指标达到世界先进水平

下一代对撞机实验预研 (CEPC&STCF)

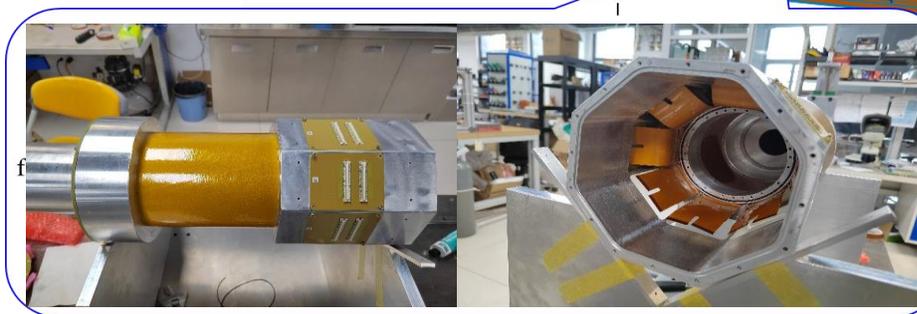
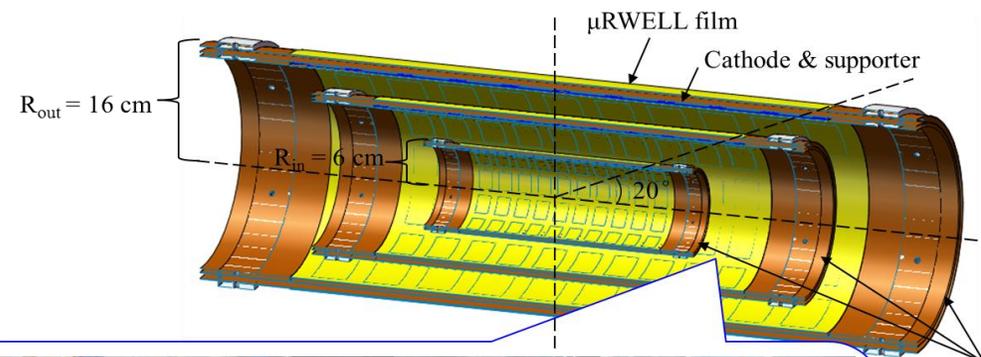
▣ STCF-RICH、CEPC-RICH、STCF内径迹等技术预研

§ 液体 (C_6F_{12}) 和气体 (CF_4 & C_3F_8) 辐射体用于低-高动量的强子鉴别

§ THGEM (CsI) + Micromegas 作为切伦科夫光电探测器



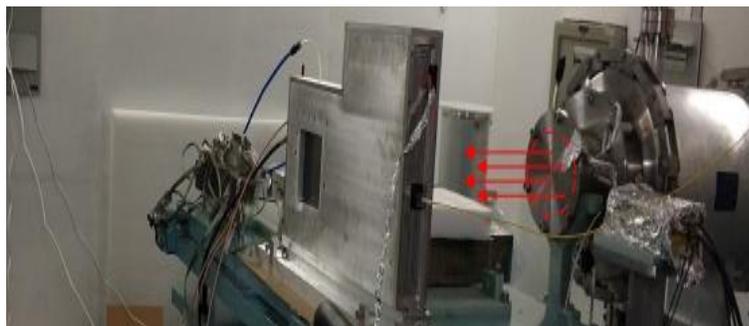
见张慧斌报告



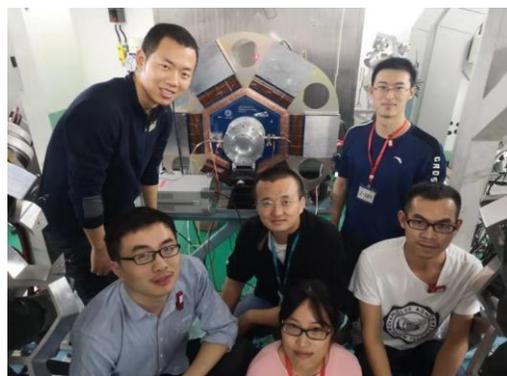
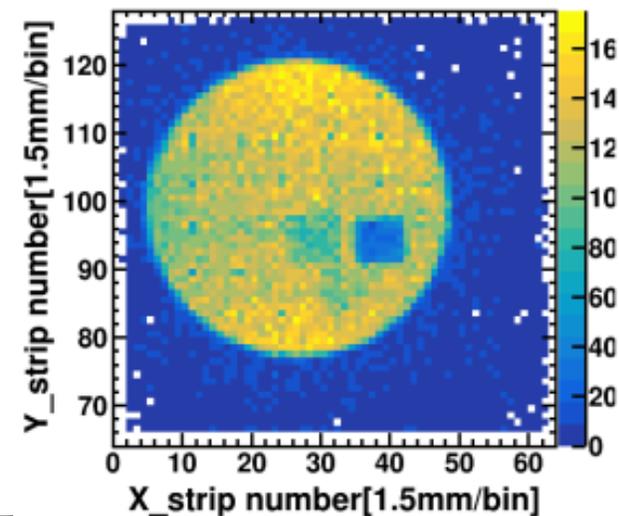
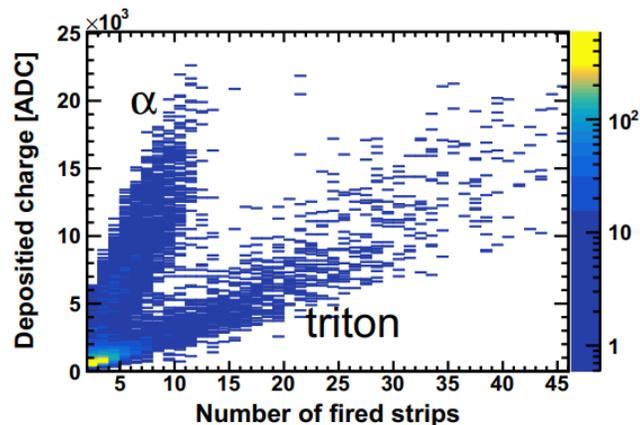
3 layers of cylindrical μ RWELL detector

中国散裂中子源Back-n中子实验

□ CSNS back-n实现两维束斑测量，并开展中子共振成像测量



Binbin Qi et al., NIM-A, 957 (2020) 163407.
Keqing Gao et al., 2021 JINST 16 P02036.



□ MTPC: 基于 TPC
中子反应截面测
量

见樊瑞睿老师报告

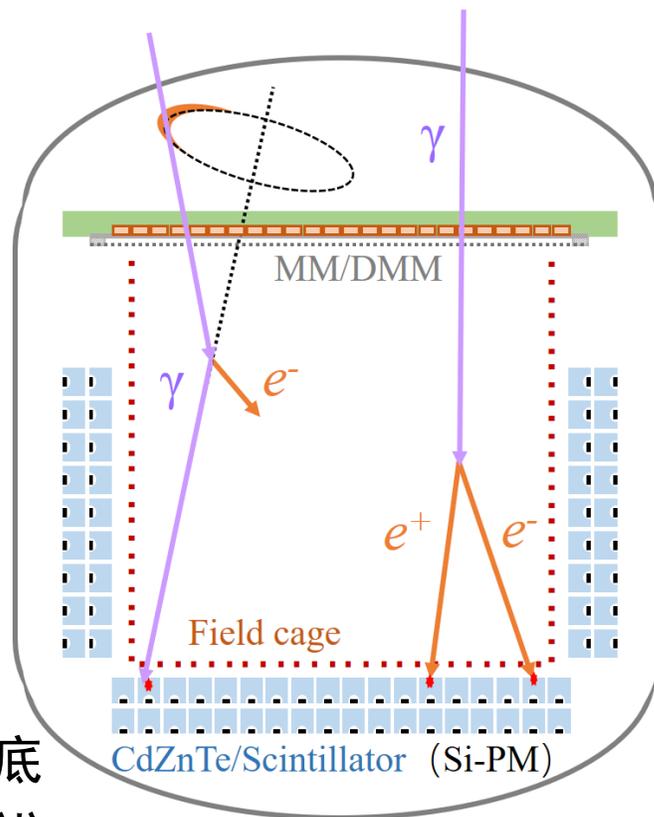
国重实验室团队成功开展原型多功能时间投影室探测器第一次中子束流实验, 2020/03, <http://sklpde.usc.edu.cn/2020/0309/c7107a414221/page.htm>.
国重实验室团队成功开展原型多用途时间投影室探测器第二次中子束流实验, 2021/02, <http://sklpde.usc.edu.cn/2021/0217/c7107a470852/page.htm>.
Weihua Jia, You Lv, Zhiyong Zhang et al., 1035 (2022) 167157.

新一代空间MeV伽马射线望远镜：MeGaT 实验

□ TPC技术+CdZnTe量能器

§ $100 \times 100 \times 80 \text{ cm}^3$

§ 3-10 bar 高压运行



□ TPC测量电子3D径迹

§ 提供散射平面限制，压低本底

§ 低能电子散射实现最优角分辨

§ 实现伽马偏振测量

□ 预期性能指标

§ 宽能量范围：0.3MeV-100 MeV

§ 高角度分辨 (PSF) :

2° @MeV, 0.5° @100 MeV

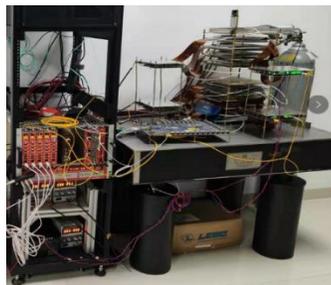
高分辨缪子成像装置及实验

样机设计:



第一代:

6层15cm×15cm
2D读出Micromegas
100微米分辨

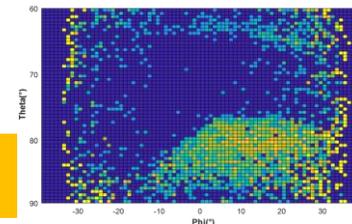
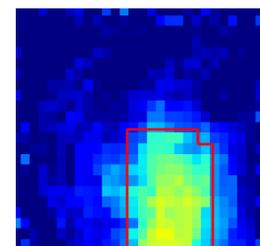
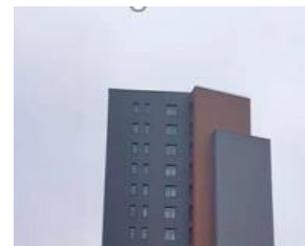
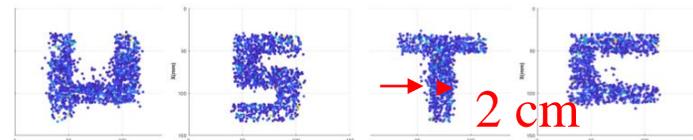


第二代:

8层40cm×40cm
2D 读出Microemgas
100微米分辨



μ STC: μ (muon) Scattering tomography & Transmission imaging facility

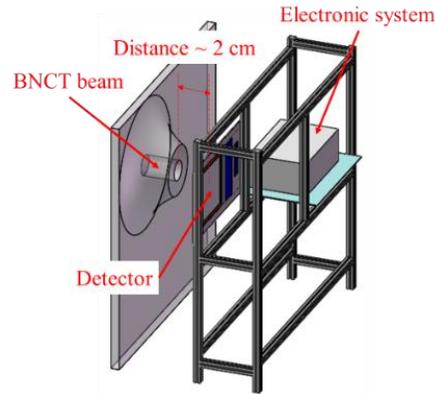


见王宇老师报告

Yu Wang, Zhiyong Zhang, Shubin Liu et al., IEEE TNS, vol. 69, no. 1, pp. 78–85, Jan. 2022.

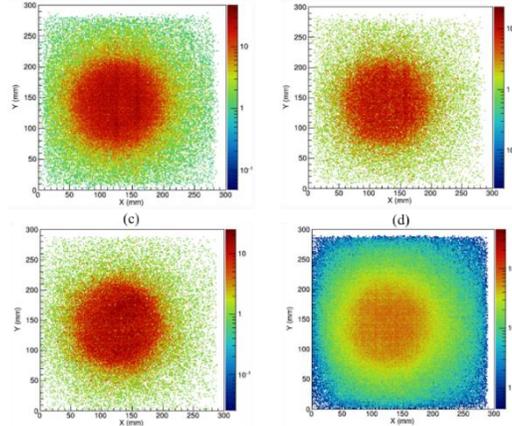
硼中子俘获治疗 (BNCT) 中子束检测

□ 联合中国原子能科学研究院：实现满功率反应堆BNCT中子束流在线检测

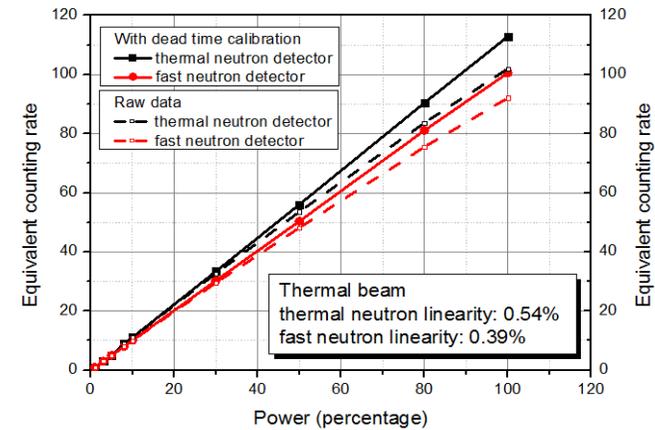


(a) 热中子和超热中子成分 (b) 超热中子成分 (c)

快中子成分 (d) 伽马分量



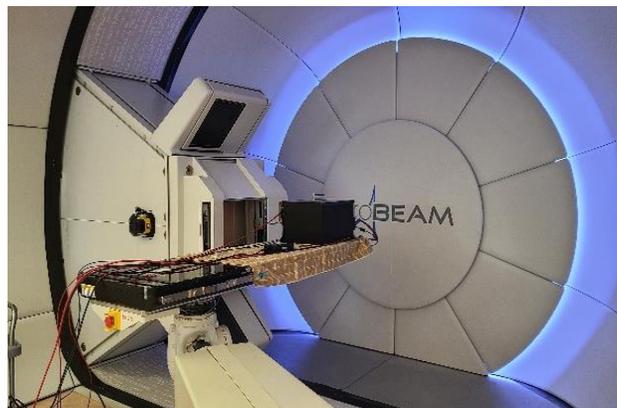
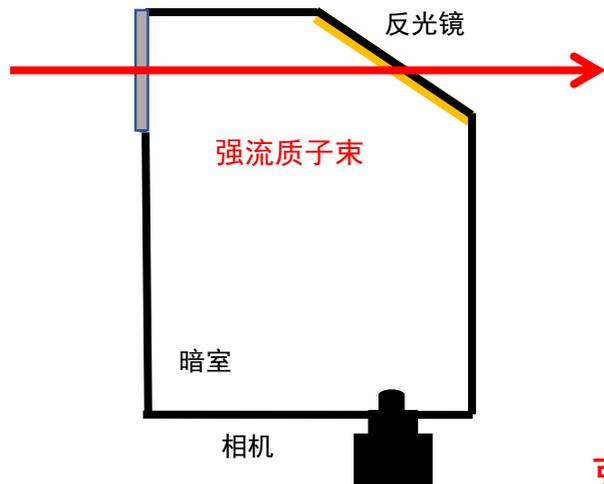
束流线性度测量



Zhujun Fang, Zhiyong Zhang*, NIM-A, A 1053 (2023) 168361.

光电读出Micromegas检测强流质子束

□ 联合合肥质子医学中心：实现质子铅笔束束斑尺寸、位置和流强测量

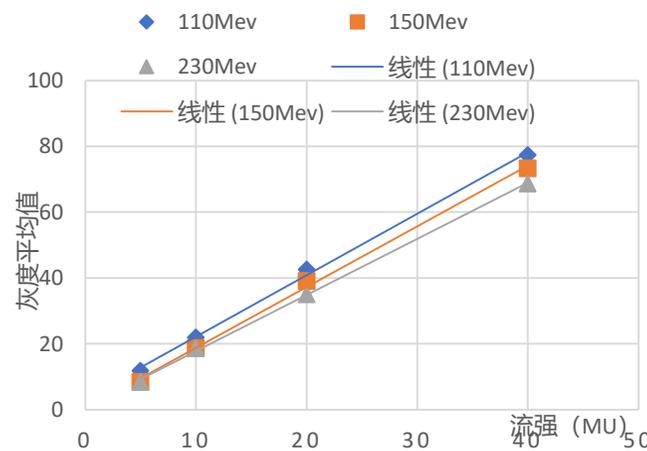
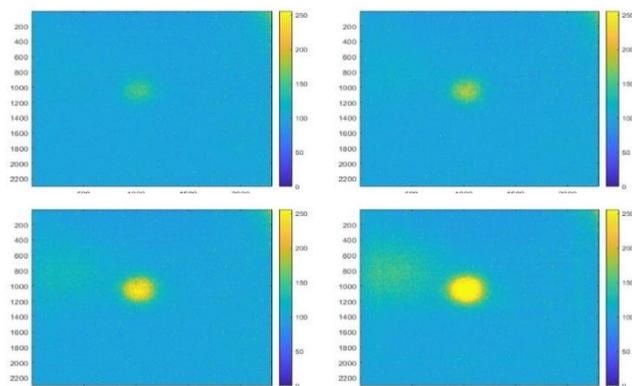


束斑成像

质子束流强监测实验

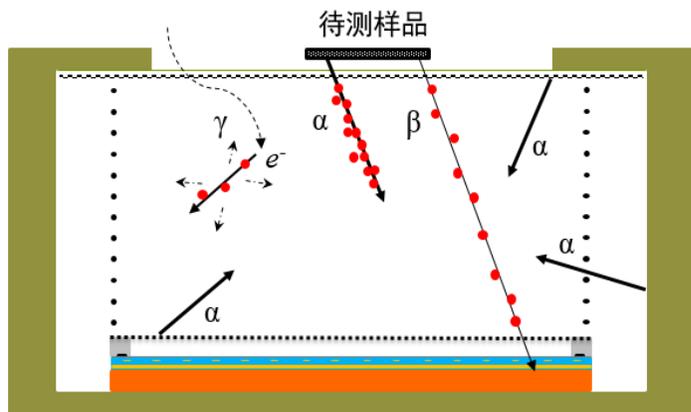
质子流强测量线性

与进口商业设备测试对比



痕量 α 、 β 污染检测

多维度信息测量，
实现极低本底辐射计数、 α 能谱和污染分布成像



无屏蔽条件下， α 本底计数率
对标国外商业产品
降低30倍以上。

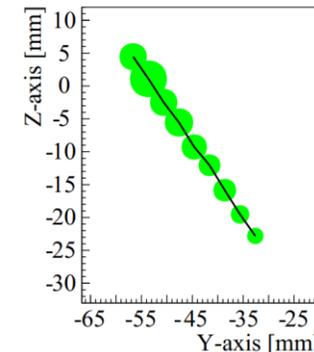
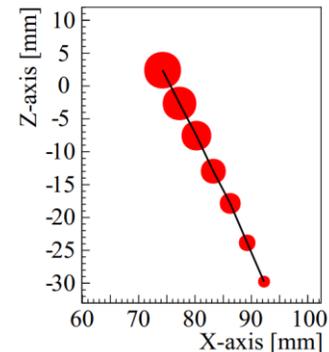
见黄增轩报告



Samples	Lead content	Remaining events (48h)
Nothing	0	1
5052 aluminum-magnesium alloy sheet	0	1
H62 brass sheet	0	1
Lead-free solder	0	1
Tin-lead solder	70%	7
Lead sheet	100%	10

Jiang Pan, Zhiyong Zhang, Changqing Feng et al., Review of Scientific Instruments 93, 013303 (2022).

见张文铭报告



Haiyan Du, Chengbo Du, Ke Han et al., arXiv:2208.03046v1

目录

□ 微结构气体探测器

- § 气体探测器发展历程
- § 科学实验研究
- § 产业应用探索
- § 关键性能提升

□ 中科大MPGD研究与应用

- § MPGD技术研发
- § 支撑科学实验与应用

□ 总结与展望

总结与展望

RD51是欧洲核子中心（CERN）2007成立的致力于MPGD研究、生产和应用的国际研究合作组：来自31个国家，89个机构
约450个参与成员



2017年国内先进气体探测器合作组成立
2021年第十届先进气体探测器研讨会在线
参会人数**超过200人**

2024年，第8届国际微结构气体探测器会议（2年1次）将首次在中国（中科大）举办

- 广泛合作，联合攻关，区域重心向亚洲转移；
- 追踪微纳加工先进技术，突破探测器性能极限；
- 从粒子物理延伸到多学科领域；
- 从单一探测技术到多类型技术复合；



MPGD
USTC HEFEI
2024

The 8th International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors
Oct. 14th - Oct. 18th 2024 USTC·Hefei, China

Log in Sign up

Countdown 430 days

Register Submit paper

总结与展望

□ 科学实验与应用驱动下，不断突破极限性能

§ 数 m^2 的大面积、 >10 MHz/cm 2 计数率 (μ RWELL)、10微米量级极限位置分辨、 $<30ps$ 超快定时 (MRPC、PICOSEC-MM)、 $>10^6$ 高增益和 $<0.01\%$ 的极低离子反馈 (DMM&TMM)

□ 从物理研究延伸到产业应用

§ 核安全、核医疗成像等应用潜力有待开发

□ 中科大团队多年来专注于MPGD技术研究

§ 主流MPGD研制与新型结构开发

§ 为科学研究与应用提供技术支撑

§ 标准化设计研制，降低非专业研究者使用门槛

总结与展望

□ 科学实验与应用驱动下，不断突破极限性能

§ 数 m^2 的大面积、 >10 MHz/ cm^2 计数率 (μ RWELL)、10微米量级极限位置分辨、 $<30ps$ 超快定时 (MRPC、PICOSEC-MM)、 $>10^6$ 高增益和 $<0.01\%$ 的极低离子反馈 (DMM&TMM)

□ 从物理研究延伸到产业应用

§ 核安全、核医疗成像等应用潜力有待开发

□ 中科大团队多年来专注于MPGD技术研究

§ 主流MPGD研制与新型结构开发

§ 为科学研究与应用提供技术支撑

§ 标准化设计研制，降低非专业研究者使用门槛

谢谢!