



中国医学科学院  
北京协和医学院

放射医学研究所

# 基于GEM的低放气率微腔TEPC研制

报告人：王海云

胡晨晨<sup>1</sup>，焦玲<sup>1</sup>，刘强<sup>1</sup>，祁辉荣<sup>2</sup>，张建<sup>2</sup>

1，中国医学科学院放射医学研究所

2，中国科学院高能物理研究所

第二十一届全国核电子学与核探测技术学术年会

日期：2023年08月11日

北京协和医学院校训

创新  
奉献  
严谨  
博精



# 目录

## 一. 背景及意义

## 二. 研究内容

2.1、不同结构的TEPC 对比

2.2、探测器腔室设计

2.3、内部模块与工艺处理

2.4、探测器组装搭建

## 三. 实验测试结果分析及讨论

3.1、密闭腔出气性测试结果

3.2、线能能谱测试结果

3.2、增益测试结果

3.3、 GEM TEPC与 球形TEPC性能对比

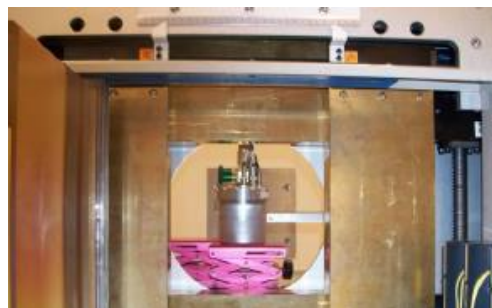
# 一、背景及意义

## ➤ TEPC (Tissue Equivalent Proportional Counters)

- 用于高注量率、混合辐射场监测 (微剂量学)
- 载人航天飞行器、空间站中X射线暴、太阳风等大剂量事件
- 放射治疗中高注量率辐射场监测
- 核应急事故现场高剂量辐射照射



航天飞行器中TEPC



重离子治疗束流中TEPC



质子治疗束流中TEPC

## ➤ 传统组织等效正比计数器 (TEPC)

- 丝型腔 (cm级) TEPC
- 所需气体密度低, 压力小
- 腔室较大
- 信号堆积

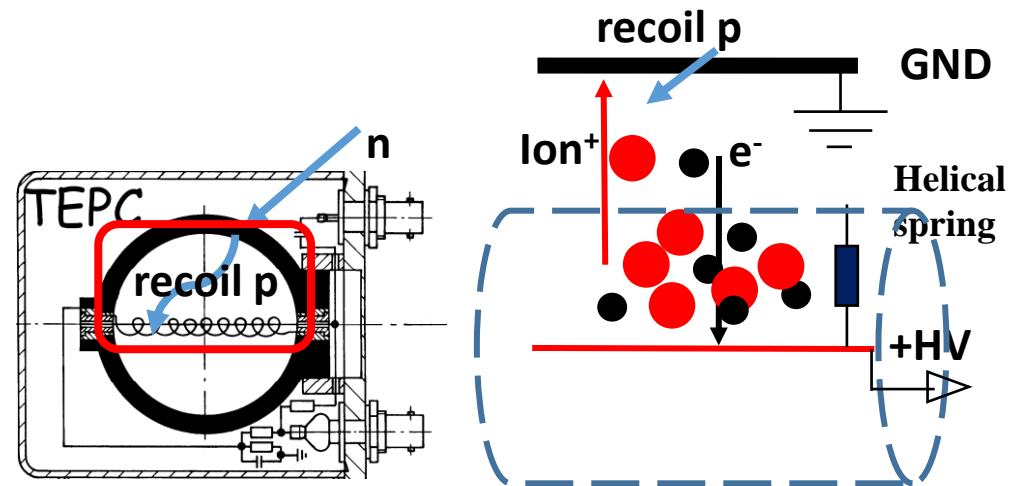


传统组织等效正比计数器TEPC

# 一、背景及意义

## ➤ 传统的组织等效正比计数器TEPC (Wired TEPC)

- 组织等效材料 (A150) + 组织等效气体 (TE-C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> or TE-CH<sub>4</sub>)
- 测量组织等效剂量 (cm尺度信号反映μm尺度剂量)
- 电子信号+离子信号 (慢)
- 结构复杂 (更细阳极丝<2.5μm), 小灵敏体难以实现
- 球形丝室结构限制高计数率



TEPC原理图

## ➤ 微结构组织等效正比计数器 (GEM-TEPC)

- 主动读出, 小灵敏腔体 (mm级)
- 电子信号读出, 死时间短、计数率高
- 相对<sup>3</sup>He等稀有气体成本低廉
- 测量依据 (组织等效/气体): Bragg-Gray空腔原理, Fano定理

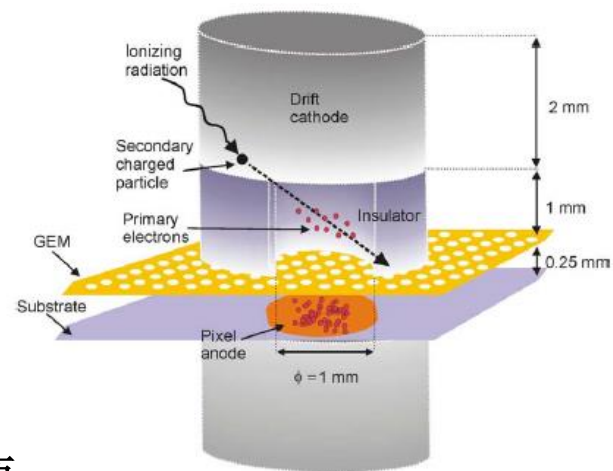
• 组织/气腔中能量沉积:  $E_m = \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx}\right)_m \rho_m \Delta X_m$        $E_g = \left(\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx}\right)_g \rho_g \Delta X_g$

• 组织等效可推导:

$$\rho_m \Delta X_m = \rho_g \Delta X_g$$



mm级灵敏体表征μm级组织内能量沉积分布



GEM-TEPC探测原理

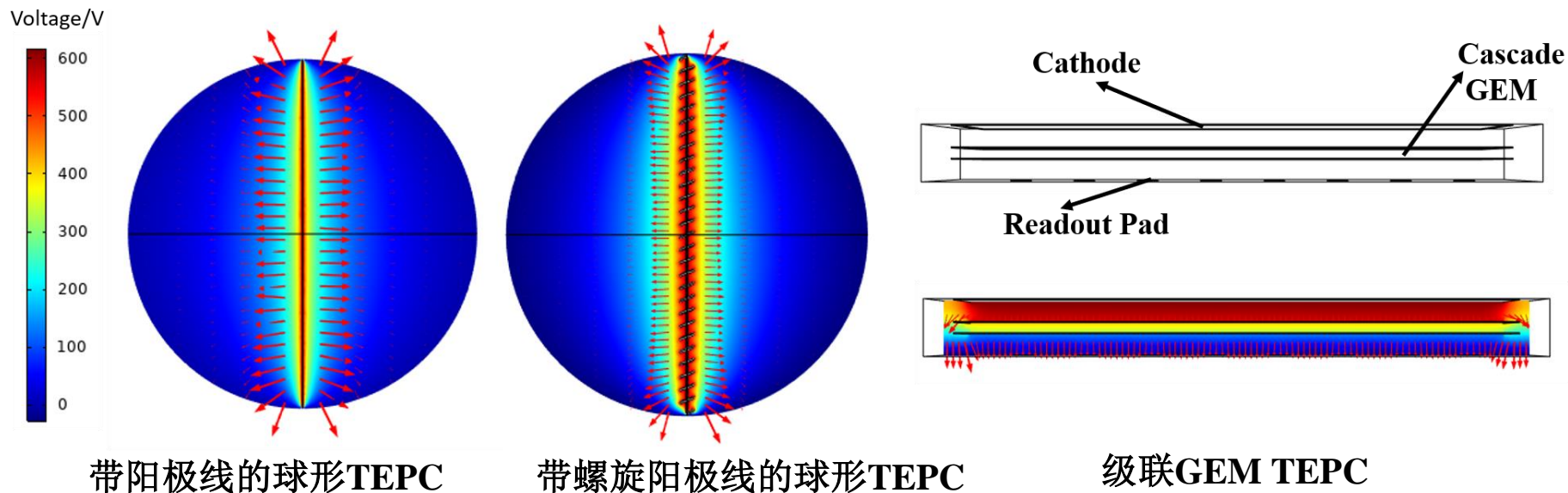
## 二、研究内容



### ➤ 1、两种不同结构的TEPC

- 球形TEPC与平面形TEPC电场均匀性对比

电压和电场分布示意图



带阳极线的球形TEPC

带螺旋阳极线的球形TEPC

级联GEM TEPC

- 球形TEPC中阳极线的两端可以发现电场的畸变
- 增加了螺旋线后，电场的不均匀性得到了改善
- 平面GEM TEPC的电场具有良好的均匀性：三个区域（漂移区、传输区和倍增区）分区清晰
- 各向同性辐射场中，正圆柱体和球体的E值（沉积能量期望值）相差不超过1.7%



## 二、研究内容



### 2、腔体设计（密闭腔）

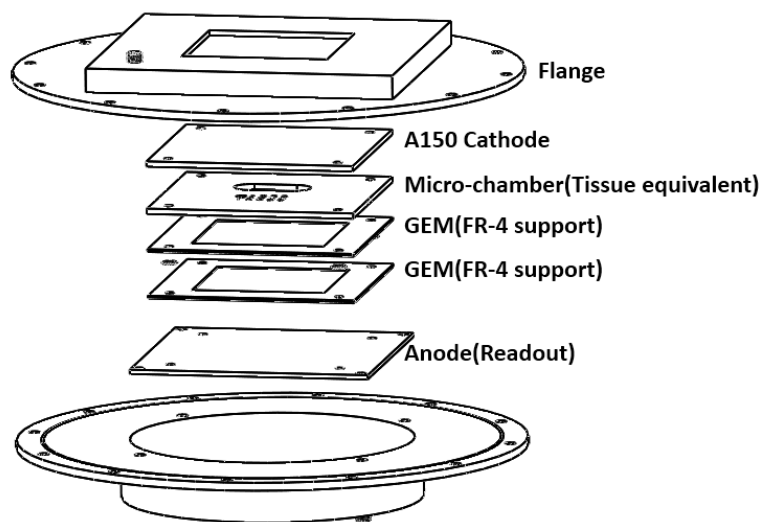
2.1 闭气式/流气式腔体设计，三版设计（流气式→闭气式→闭气带支架式）

2.2 接口、信号馈通（19\*2航插信号端子，多芯屏蔽）

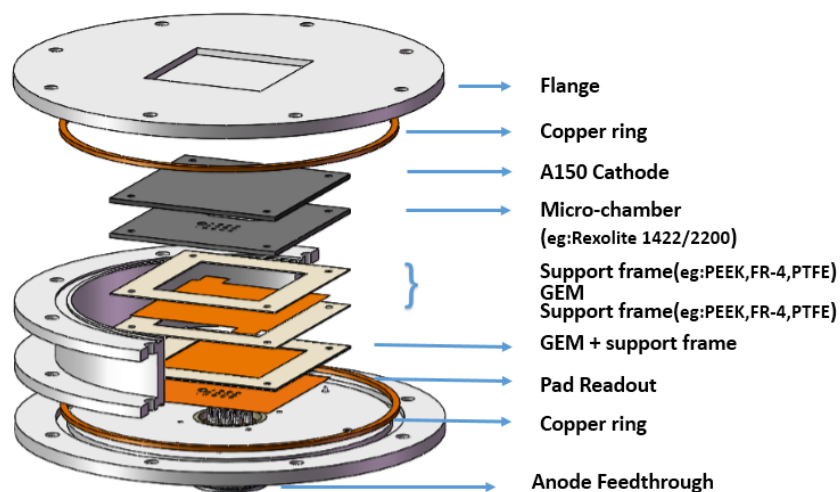
2.3 级联GEM模块（双层级联实现分压）

2.4 供压模块（GEM与HV双路供压，便于实验过程中电压调节）

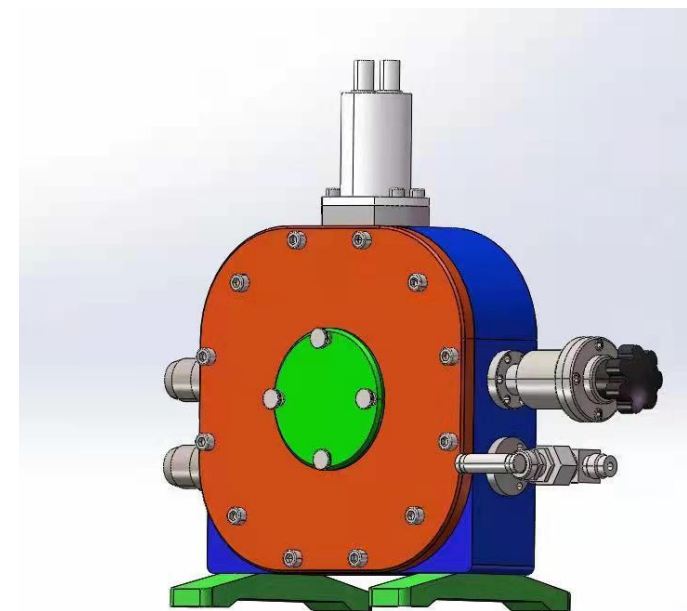
2.5 读出电路pcb板设计



流气式腔体内部细节



闭气式腔体内部细节



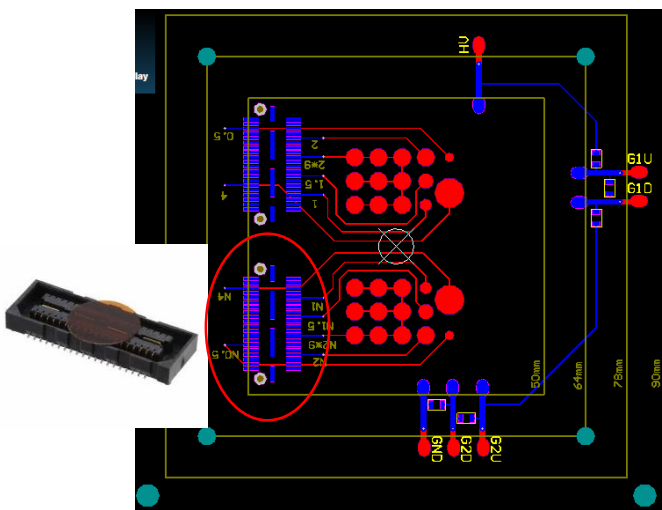
闭气式（带支架）腔体外部细节

# 二、研究内容

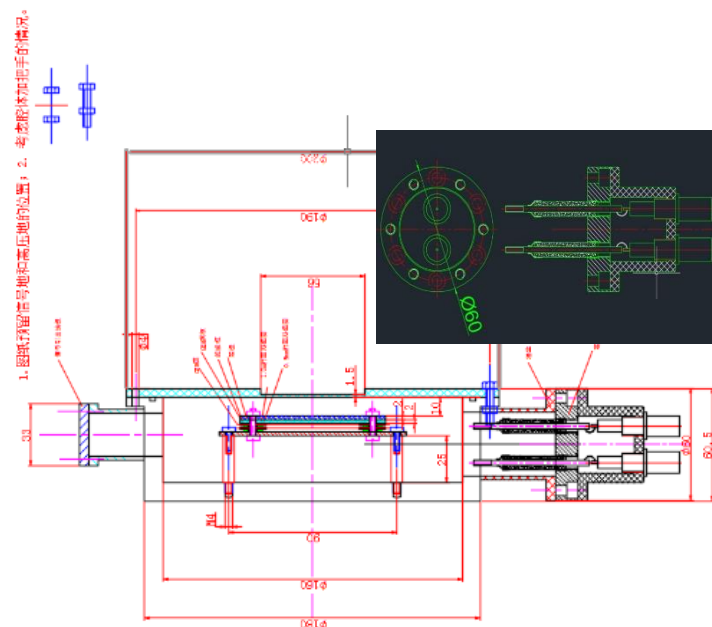


## 2、腔体设计（高压及读出）

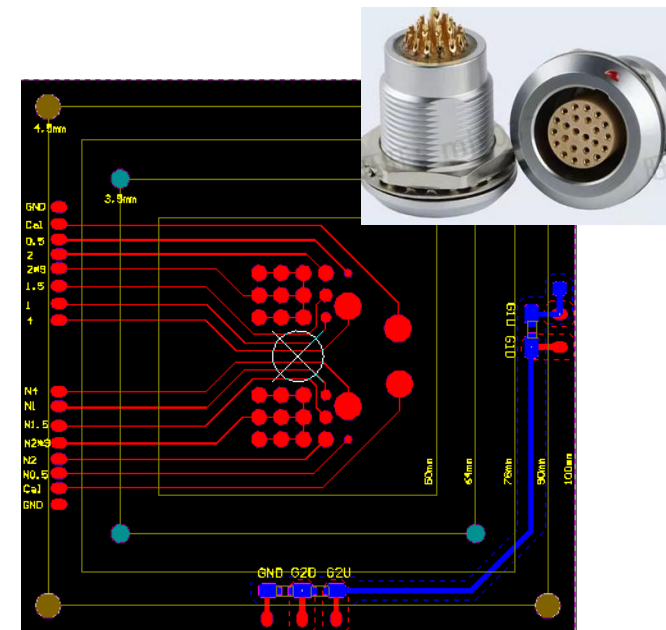
- 2.1 闭气式/流气式腔体设计，三版设计（流气式→闭气式→闭气带支架式）
- 2.2 接口、信号馈通（19\*2航插信号端子，多芯屏蔽）
- 2.3 级联GEM模块（双层级联实现分压）
- 2.4 供压模块（GEM与HV双路供压，便于实验过程中电压调节）
- 2.5 读出电路pcb板设计改进



PCB设计与信号引出头（第一版）  
单路供压

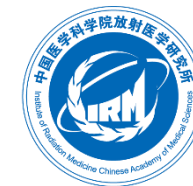


供压模块设计



PCB设计与信号引出头（最终版）  
双路供压

## 二、研究内容



### 3、GEM-TEPC内部材料选材与工艺处理

#### 3.1 腔室材料(Rexolite 1422、 Rexolite 2200)

- 材料采购、加工
- 肥皂、蒸馏水去污
- 超声波洗涤
- 出气性能测试



腔室板加工完成

腔室材料出气参数对比

种类	TML* (%)	CVCM** (%)
<b>Rexolite 1422</b> (热固性交联苯乙烯共聚物)	1.95	0.01
<b>Rexolite 2200</b> (玻璃纤维增强的热固性交联苯乙烯共聚物)	0.70	0.01

\*TML - Total Mass Loss.

\*\*CVCM - Collected Volatile Condensable Material

#### ➤ 腔体设计尺寸:

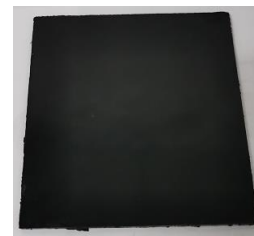
- 2×φ2mm, 校准腔室(正圆柱腔室)
- 9×φ2mm, 阵列腔室
- φ0.5/1.0/1.5/2/4mm, 对比腔室
- 无壁信号与有壁信号对比

#### 3.2 A-150组织等效阴极材料



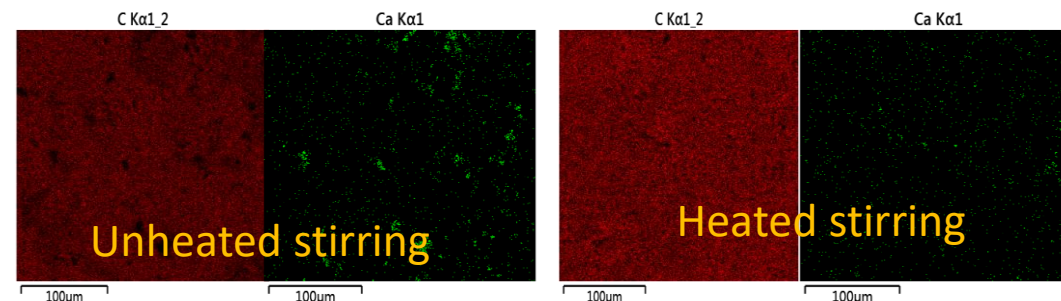
##### Unheated stirring:

- 马弗炉180°C加热
- 送入热压机15MPa压制
- 样品均匀性较差



##### Heated stirring:

- 180°C开炼混料
- 送入热压机15MPa压制
- 均匀性提升, 开炼混料成分易变



C、Ca元素EDS测试分布



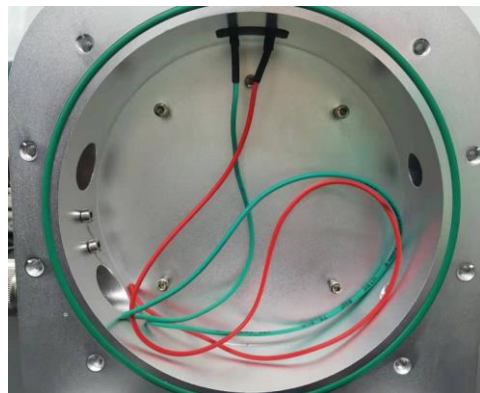
## 二、研究内容



### 3、GEM-TEPC内部模块与工艺处理

#### 3.3外部腔体:

- 真空密封; 机械强度高;
- 静电屏蔽需具有导电性;
- 高Z材料会屏蔽掉低能光子
- 选择铝制材料:
- 氢渗透率低 (比不锈钢小 $10^5$ )
- 高度抛光
- 组织等效性好于高Z金属



铝制腔体

#### 3.4真空导线 (低放气、高屏蔽)

- 外层为Kapton 绝缘膜
- 内层导体为镀银的铜丝



真空导线

#### 3.5真空插头 (高密封性、低串扰)

- 航插气密测试
- 航插焊接

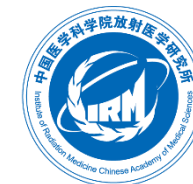


真空插头

#### 3.6 GEM装配材料(FR-4、PTFE、PEEK、Ceramic)

- 材料采购、加工
- 肥皂、蒸馏水去污
- 超声波洗涤
- 出气性能测试

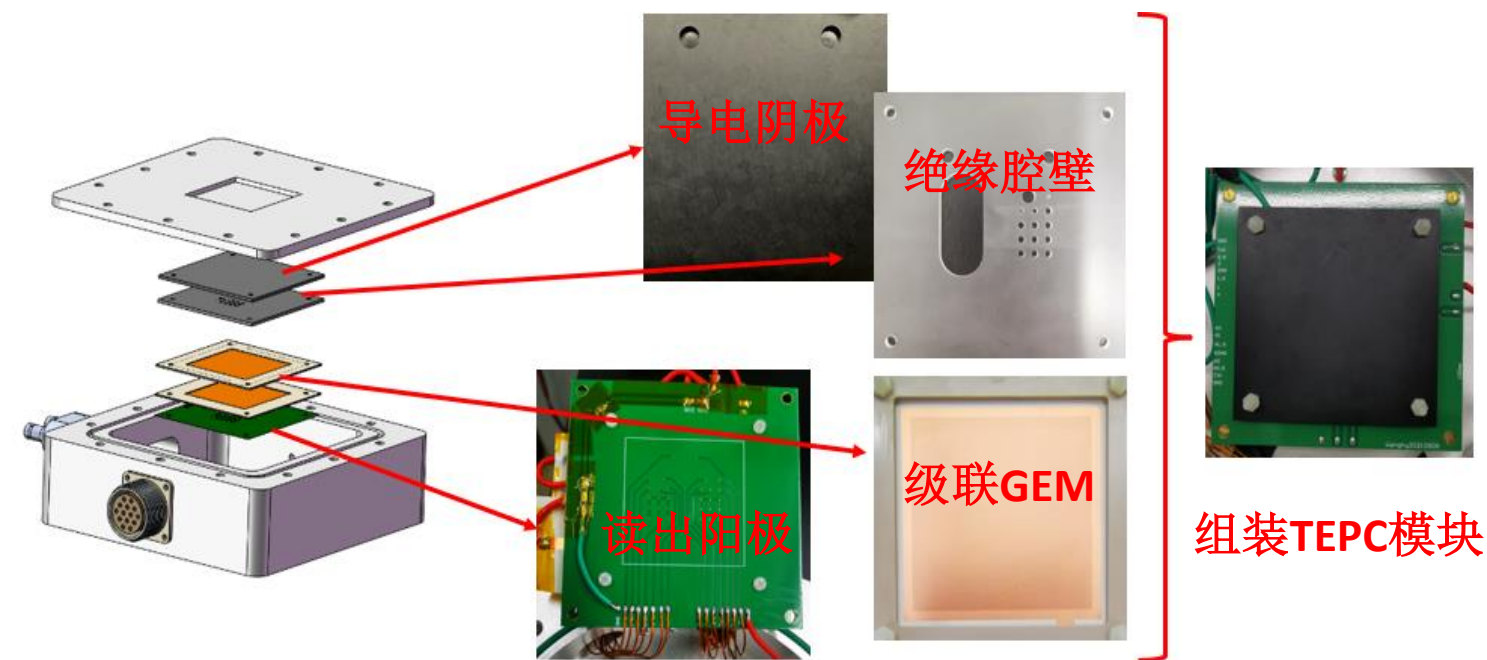
## 二、研究内容



### 4、平面形GEM TEPC的设计组装搭建

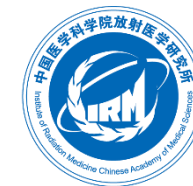
#### ➤ 基于标准GEM的平面结构:

- 敏感区域为 $5 \times 5 \text{cm}^2$
- 工作气体: TE- $\text{C}_3\text{H}_8$  ( $\text{C}_3\text{H}_8$  54.89%,  $\text{CO}_2$  39.6%,  $\text{N}_2$  5.51%)
- 工作气压: 54.72kPa ( $\sim 2\mu\text{m}$ )
- 整个探测器组成: 屏蔽壳、导电阴极、绝缘腔壁、级联GEM和读出阳极
- 探测区域: 分为漂移区、传输区和倍增区
- 个区域的间隙为2mm
- 探测器的内侧装有一个 $^{241}\text{Am}$ 的 $\alpha$ 源, 放在阴极层顶部的一个0.5毫米深的孔中
- 15个圆柱形空腔, 单pad读出
- 2mm的腔体用于探测器的校准
- $3 \times 3$ 个直径为2毫米的圆柱形腔体用来比较能量沉积的一致性, 或者被串联起来以提高探测灵敏度

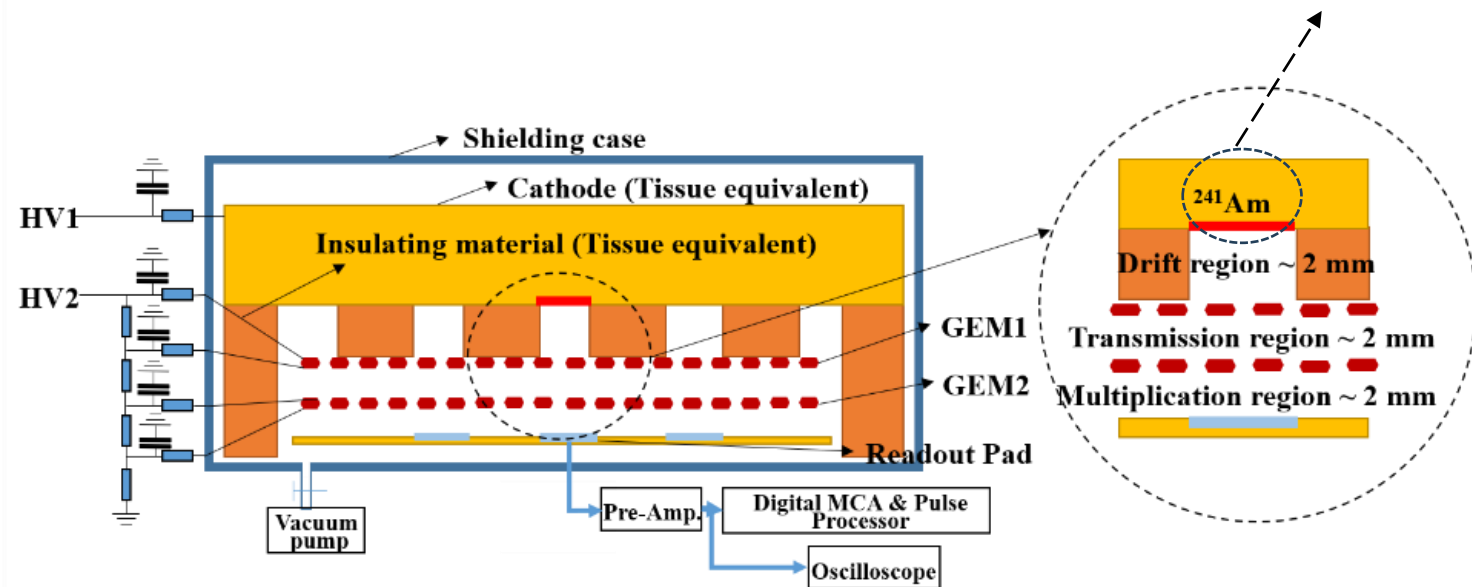


级联GEM TEPC的不同组件

### 三、实验测试

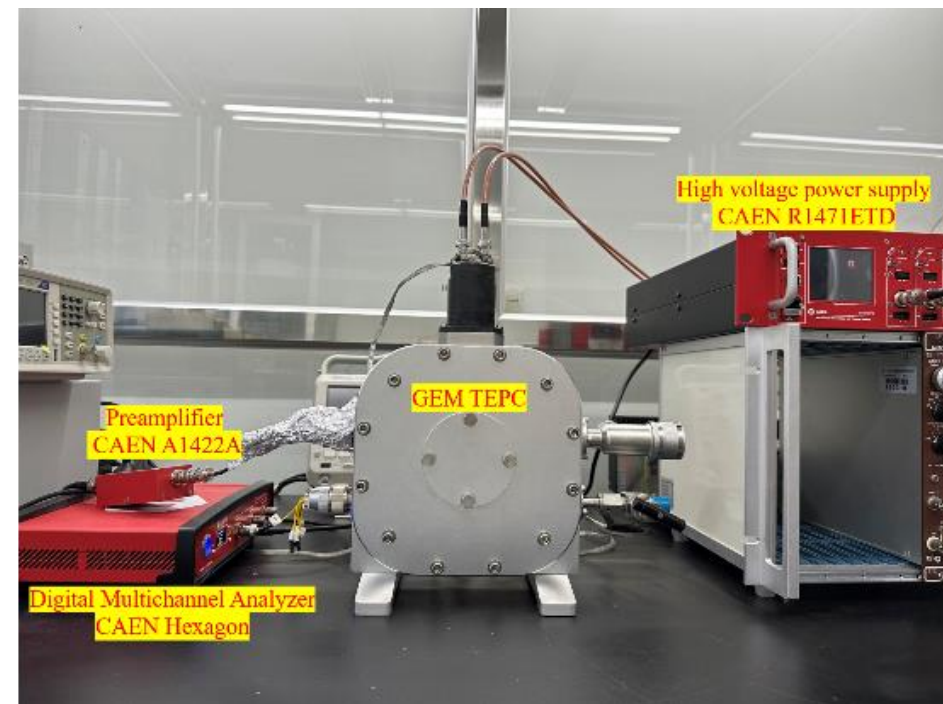


## GEM TEPC的实验测试



GEM-TEPC工作原理图

- 级联的GEM TEPC由CAEN R1471ETD提供负的高电压
- 前端使用CAEN A1422A电荷敏感前置放大器，增益为90 mV/MeV
- 后端使用CAEN Hexagon数字多通道分析仪
- 从前置放大器输出的信号也可以用示波器观察。

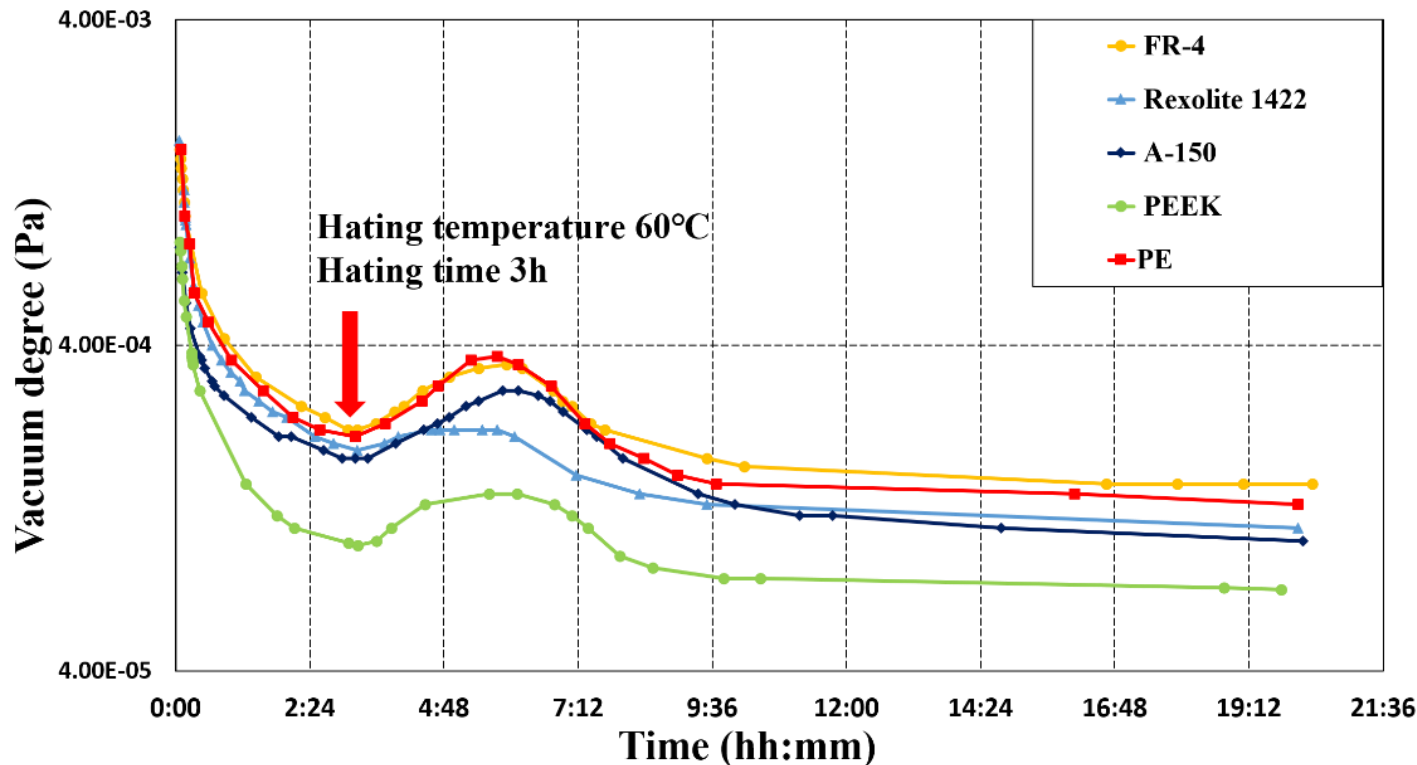


GEM-TEPC实验测试图

# 三、实验测试



## ➤ 1、密闭GEM TEPC的出气性测试结果



- 不同材料放气率随时间与温度的改变而变化
- 在整个测试过程中，真空室持续抽真空
- 抽气3小时后，真空室以60°C的温度加热3小时
- 真空度越低，材料的放气率越低，越适合在密封室中应用

**Outgassing rate:**

**PEEK < A150 < Rexolite1422 < PE < FR4**

- PEEK材料取代FR4基材，作为GEM膜支撑结构
- 绝缘组织等效材料Rexolite1422作为腔室室壁材料
- 可导电组织等效材料A150作为探测器阴极材料

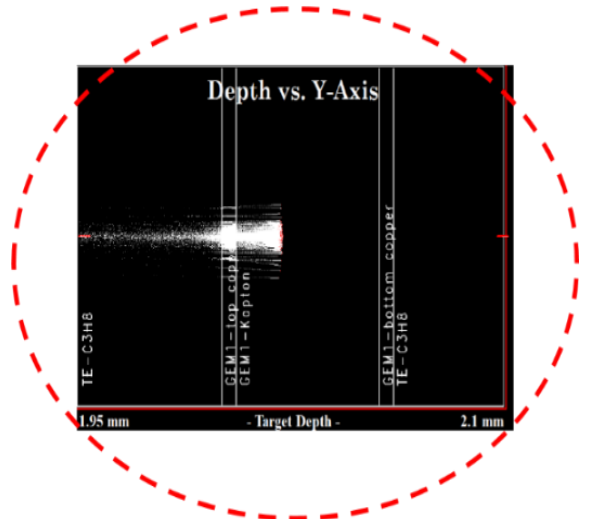
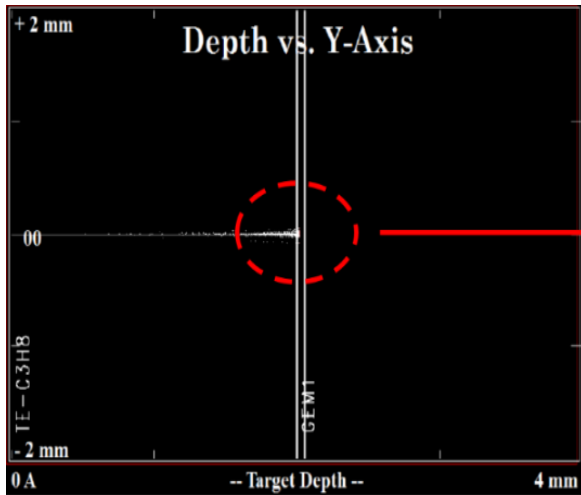
Experimental studies of the cascaded GEM TEPC and spherical TEPC for the radiation detection in microdosimetry, JINST, 2023



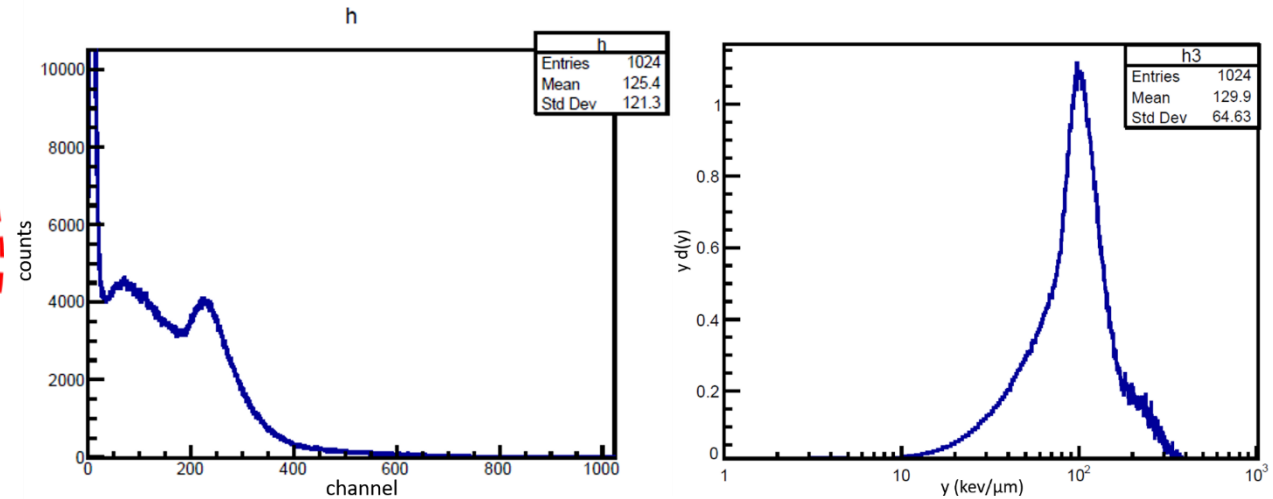
# 三、实验测试



## 2、线能能谱测试结果



SRIM模拟计算腔体内能量沉积



多道能谱与线能能谱图 (y d(y) v.s. y)

- $^{241}\text{Am}$ 源: 5.486 MeV (85.2%), 5.443 MeV (12.8%)
- 模拟结果显示,  $\alpha$ 粒子 (5.486 MeV) 射程2.02mm, 在2mm漂移区能量沉积是176 keV
- 表明大部分粒子在54.72kPa下停留在第一层GEM膜内

- 线能能谱对应的 $\alpha$ -edge为132 keV/ $\mu\text{m}$
- 一般, 小于10 keV/ $\mu\text{m}$ 为低LET粒子, 大于10 keV/ $\mu\text{m}$ 为较高LET粒子
- TEPC可提供关于不同类型辐射的能量沉积的定量和定性信息

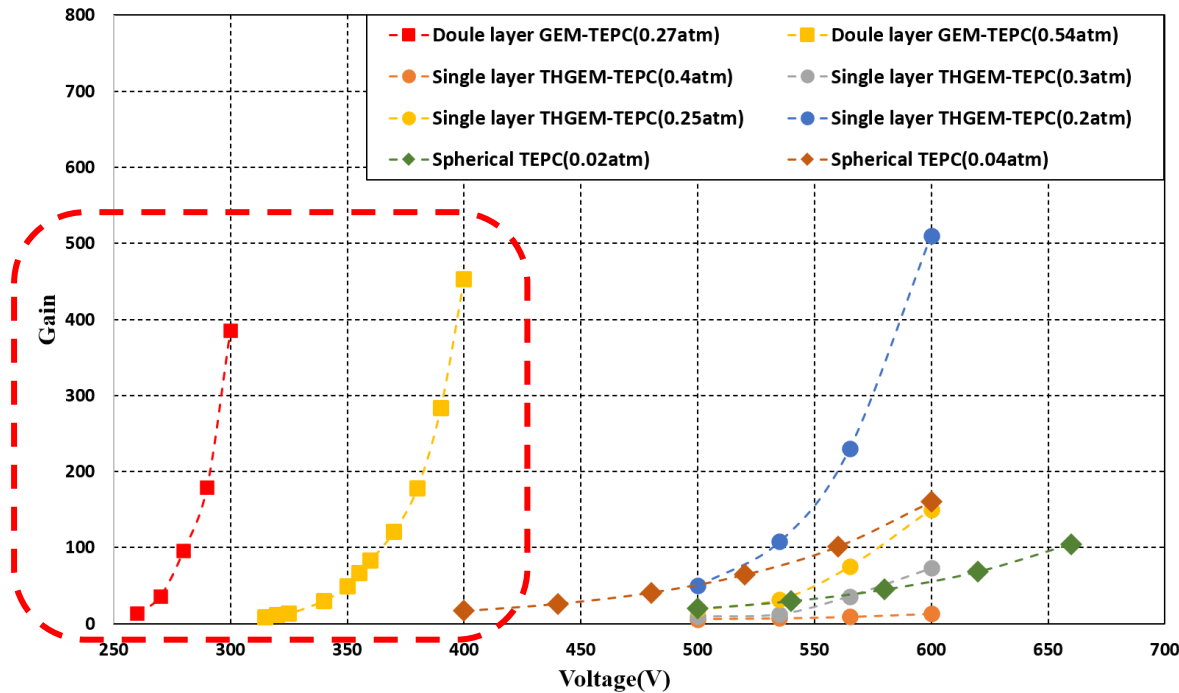


# 三、实验测试

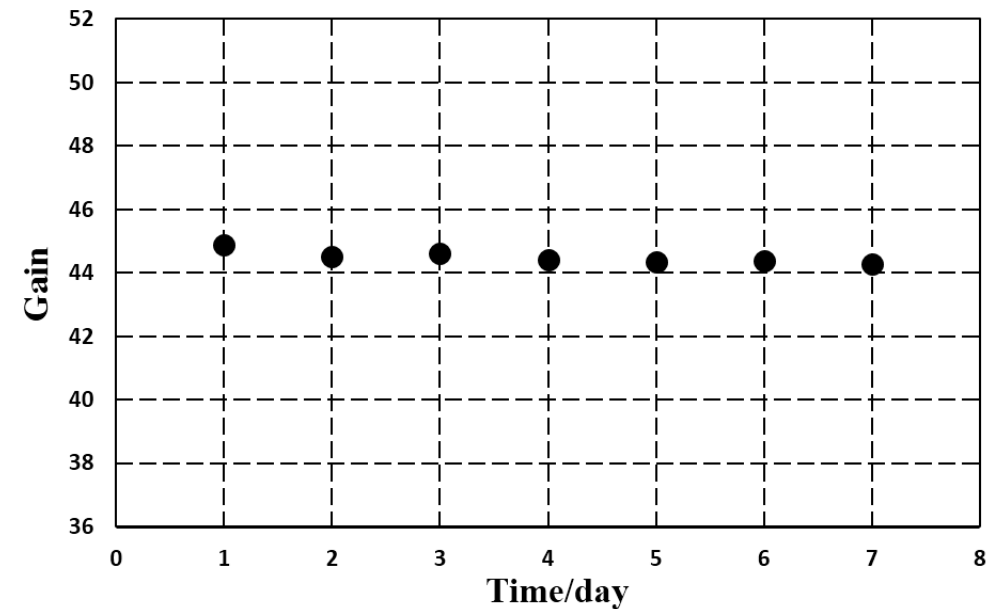


## 3、增益测试结果

不同结构的TEPC在改变工作压力时的的气体增益曲线



增益随时间的变化



- 不同工作压力下的增益曲线表明工作气压越低，气体增益越高。
- 随着工作电压的增加，基于GEM或THGEM的TEPC的增益明显增加，而球形TEPC的增益即使在较低的气体压力下增加缓慢
- 结果表明，即使级联式GEM TEPC的工作电压相对较低，它仍然可以在适当的压力下实现高的气体增益

- 增益稳定性测试 (54.72 kPa)
- 7天 (168小时) 的增益一致性优于97.8%
- 4天 (96小时) 的相对增益变化小于1%

### 三、实验测试



#### ➤ 4、GEM TEPC与球形TEPC参数对比

平面形GEM-TEPC与传统球形TEPC（市面现有产品）性能参数对比

TEPC structure	Planar GEM TEPC	Spherical TEPC
Chamber diameter	<b>2mm</b>	<b>5.69cm</b>
Multiplier module	<b>Cascaded GEM</b>	<b>Anode wire</b>
High voltage module	<b>Double channels, negative high voltage</b>	<b>Single channel, positive high voltage</b>
Operating voltage /V	<b>350V (<math>V_{GEM}</math>)</b>	<b>600V</b>
Arc-over voltage/V	<b>&gt;400V</b>	<b>680V</b>
Gas pressure/kPa	<b>54.72</b>	<b>1.97</b>
Working gas	<b>TE-C3H8 (C3H8 54.89%, CO2 39.6%, N2 5.51%)</b>	
Diameter/ $\mu\text{m}$	<b>2</b>	
Cathode material	<b>A-150 tissue equivalent material</b>	



# 感谢各位老师 敬请批评指正

王海云  
[wanghaiyun@irm.cams.ac.cn](mailto:wanghaiyun@irm.cams.ac.cn)

# BACKUP



## Sample Report

Batch ID:	am2 - 202209161020	Count Date:	2022-9-16 10:20:5
Group:	A	Count Minutes:	5.00
Device:	S5-XLB	Count Mode:	Simultaneous
Batch Key:	849	Operating Volts:	1410
Selected Geometry	Swipe/Smear		

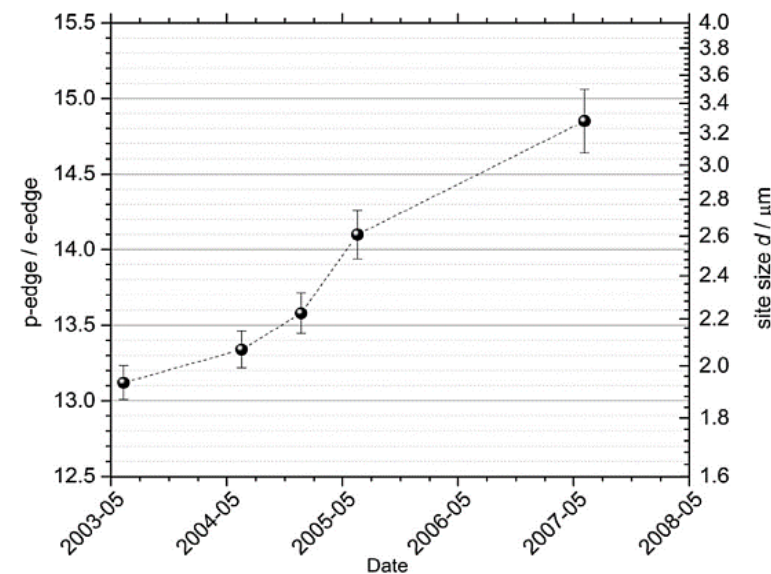
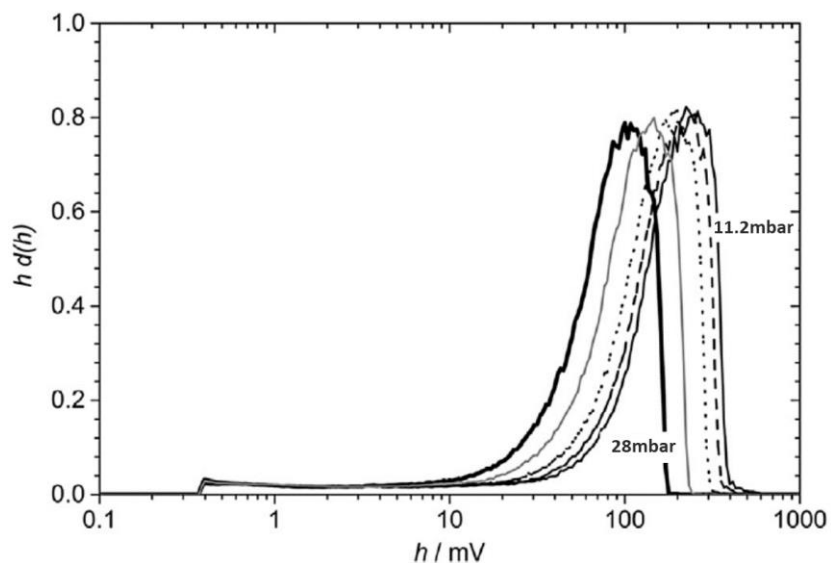
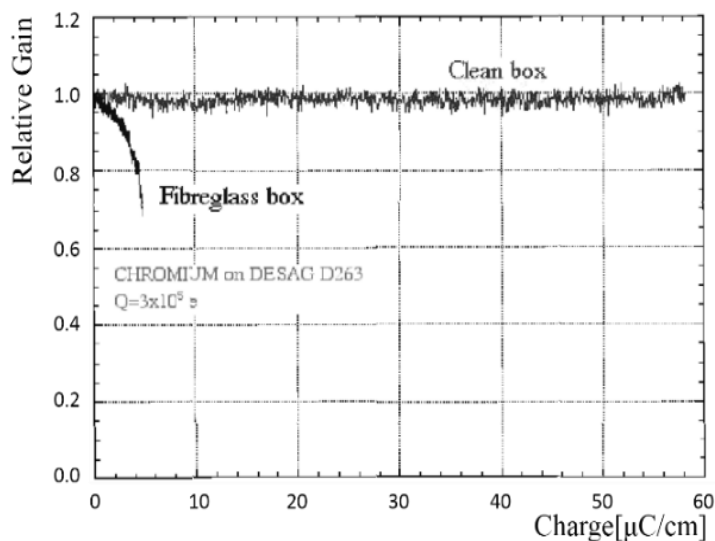
<u>Sample ID</u>	<u>Sample Type</u>	<u>Alpha (cpm)</u>	<u>Unc</u>	<u>Beta (cpm)</u>	<u>Unc</u>
20220916102053-A6	Unknown	341503.60	261.34	36480.80	85.42

# 核应急中基于GEM的低放气率微腔TEPC研制

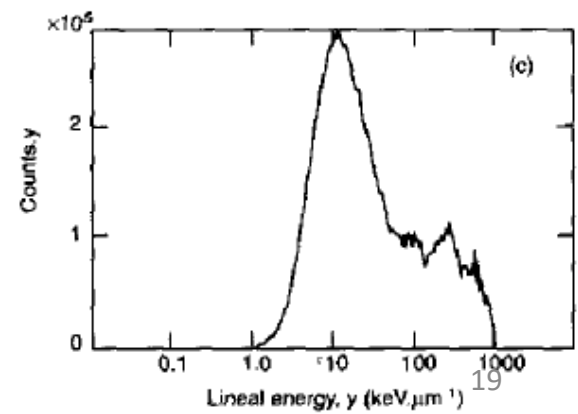
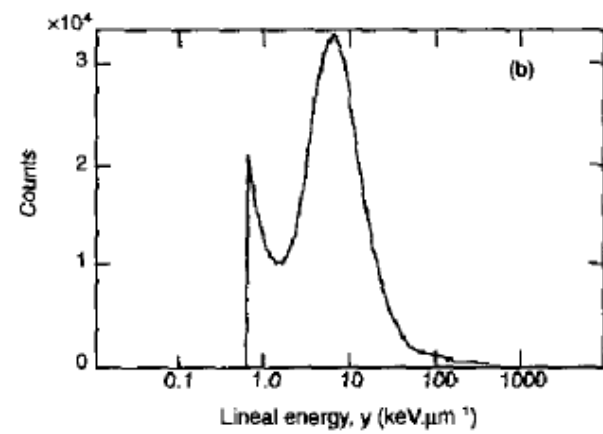
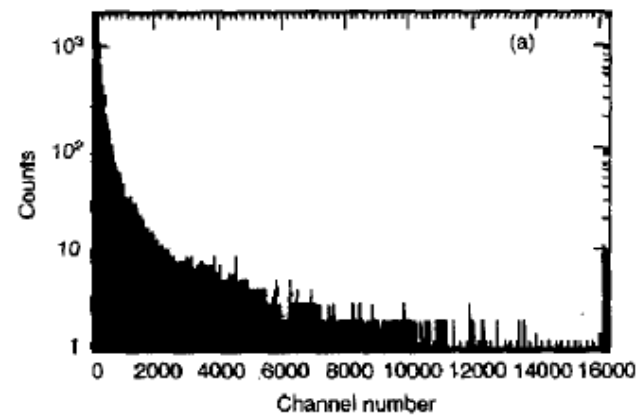
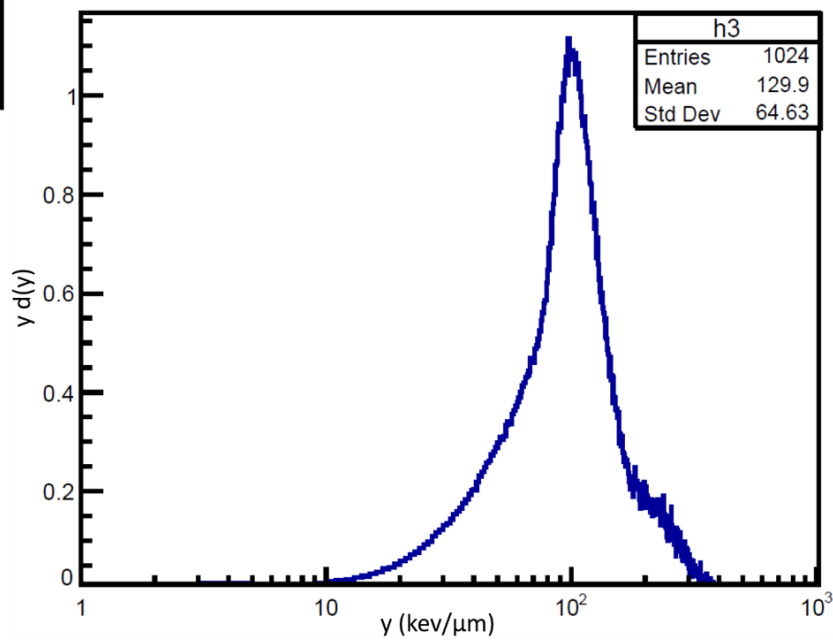
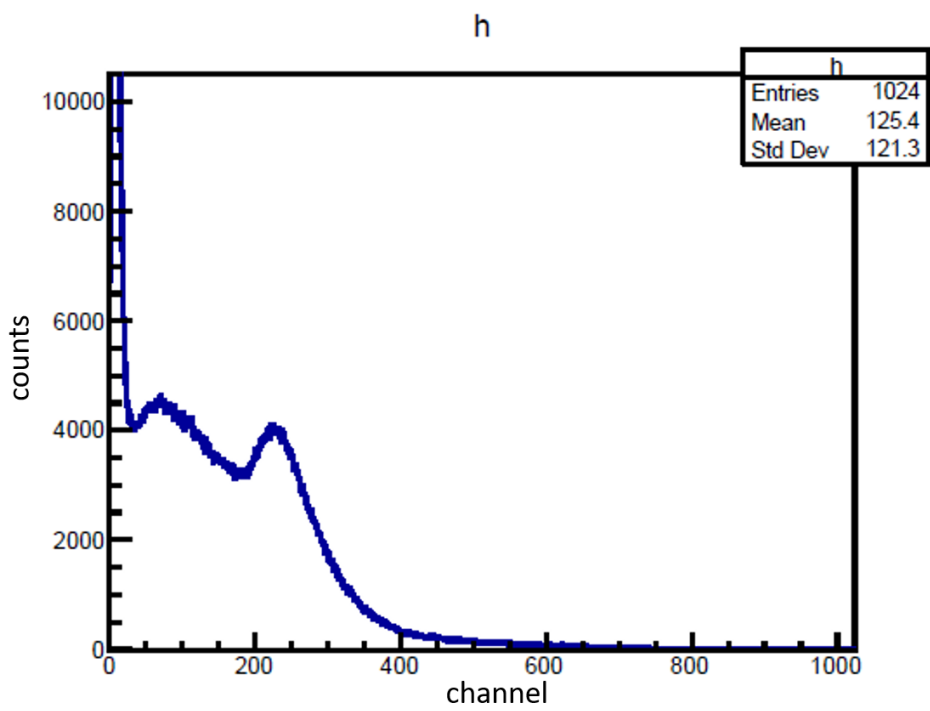


## ➤ 密闭探测器现存问题:

- 内部材料放气影响工作气体成分
- 探测器增益恶化
- 测量能谱发生畸变
- 导致剂量计算发生偏差







# 用于核应急中子剂量检测的GEM-TEPC研究——测量原理



## 传统的组织等效正比计数器TEPC (Tissue Equivalent Proportional Counter)

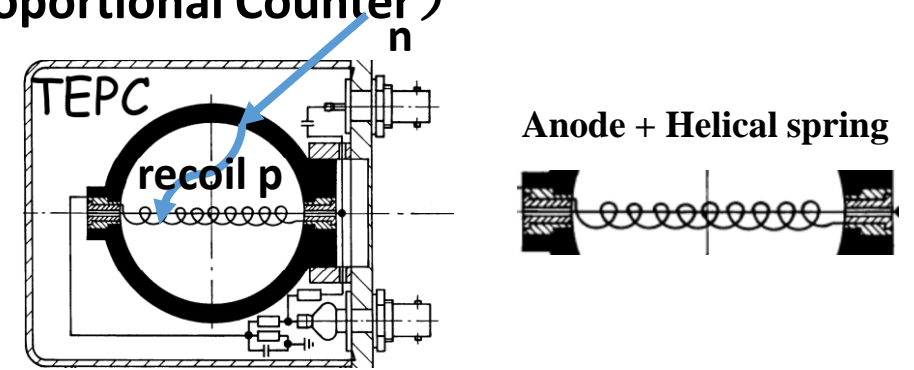
测量依据 (组织等效/气体): Bragg-Gray空腔原理, Fano定理

组织/气腔中能量沉积:

$$E_m = \left( \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx} \right)_m \rho_m \Delta X_m \quad E_g = \left( \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx} \right)_g \rho_g \Delta X_g$$

组织等效, 则质量阻止能力相同:  $\left( \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx} \right)_m = \left( \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx} \right)_g$

➡  $\rho_m \Delta X_m = \rho_g \Delta X_g$  ➡ cm量级灵敏体表征μm级组织内能量沉积分布



## 微剂量测量:

线能  $y = \varepsilon/l$ ,  $\varepsilon$ -小体积元 (等效组织) 内能量沉积,  $l$ -小体积元弦长均值

传能线密度  $LET = E/L$ ,  $E$ -带电粒子能量,  $L$ -粒子平均径迹长度

传能线密度  $LET$ : 非随机量, 受能量截止, 带电粒子沿径迹能损的平均值

线能  $y$ : 随机量, 受体积元几何条件约束, 径向 ( $r$ ) 上能量沉积涨落

