

# 用于高强度热中子测量的Micromegas裂变室的优化

魏岐桢 贺三军 赵修良 叶彦希 肖新春

南華大學 | 核科學技術學院

2024年7月16日



# 目 录

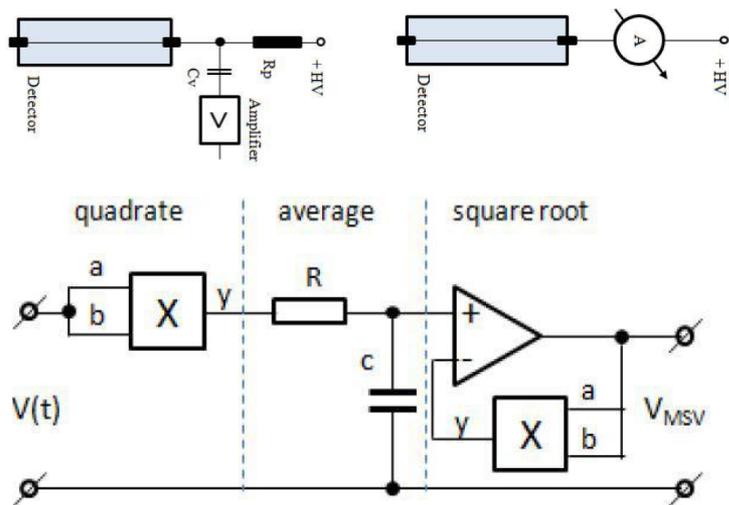
- 一、研究背景及意义
- 二、原理与方法
- 三、研究结果
- 四、总结与展望

## 反应堆中子注量率的监测

堆外中子注量率测量用于获得核反应堆功率及其变化信息，对反应堆的安全运行至关重要



“华龙一号”



裂变室的三种工作模式

- 反应堆中子注量率变化范围为**11个数量级**
- 系统繁琐、价格昂贵、关键设备依赖进口



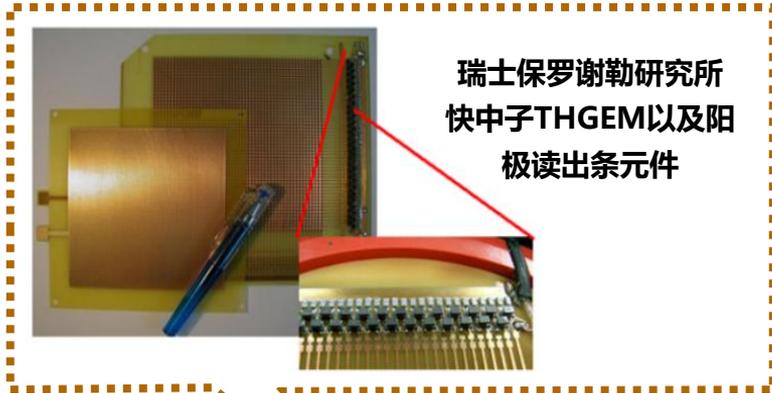
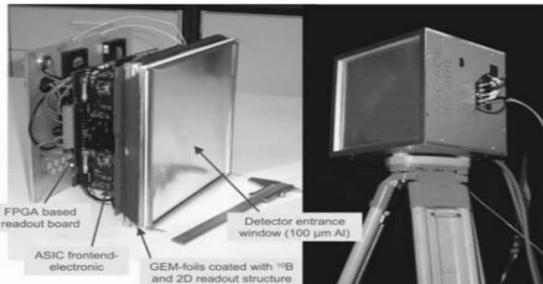
通过一个**无需切换工作模式**的探测器来实现宽量程的测量

# 一、研究背景及意义



微结构气体探测器 结合热中子敏感材料的微结构气体探测器是一种新型的中子测量技术手段

国外已经开展了相关的研究  
德国海德堡大学多层涂硼GEM探测器



2000

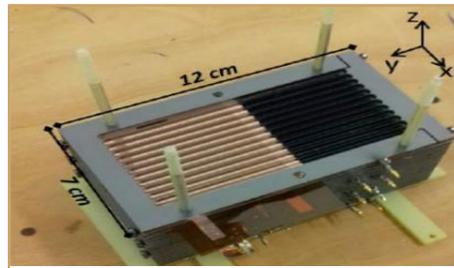
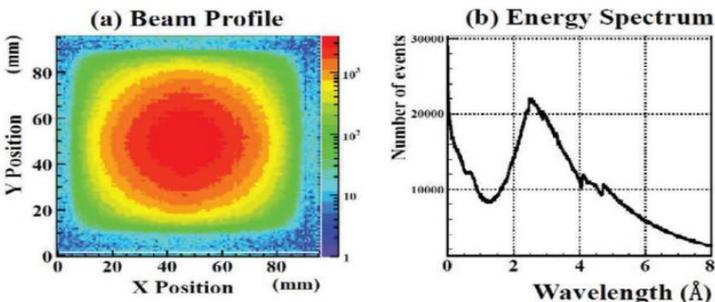
2005

2007

2011

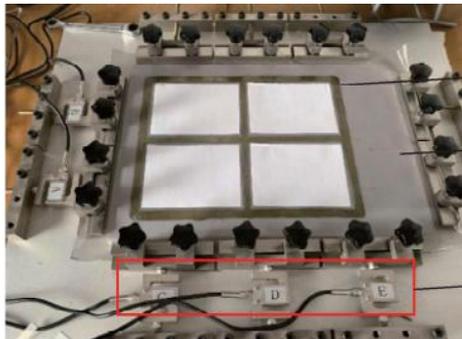
2017

日本KEK  
中子束流位置分辨与能量分辨  
替代<sup>3</sup>He探测器

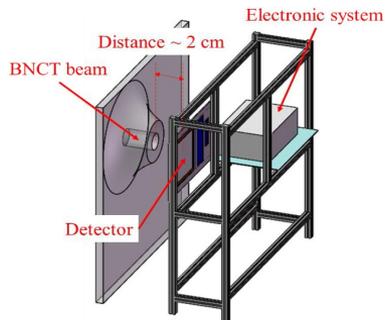


意大利BAND-GEM探测器

# 一、研究背景及意义



中国原子能科学研究院利用光蚀刻技术制作了多通道Bulk Micromegas探测器



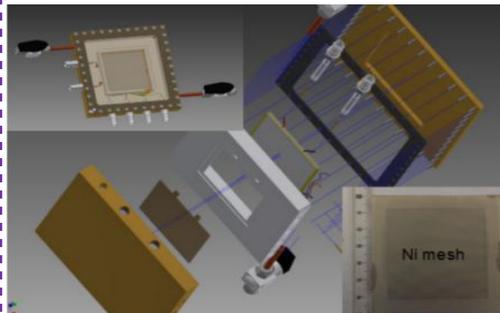
中国科技大学用于BNCT束流监测的基于Micromegas大面积高计数率中子探测器

2018

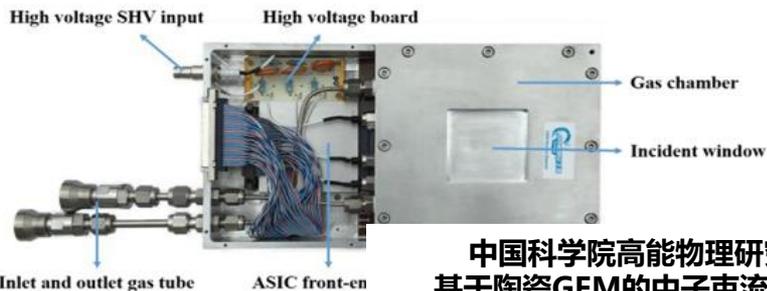
2020

2023

今



法国CEA Micromegas探测器结构



中国科学院高能物理研究所基于陶瓷GEM的中子束流监测器

在宽量程中子注量率测量方面具有天然优势 (大面积实现低量程+多个像素点阵高计数率读出实现高量程)

### 新型寬量程裂變室原理

#### 探測器設計

#### 探測器測試

#### 多通道響應原理

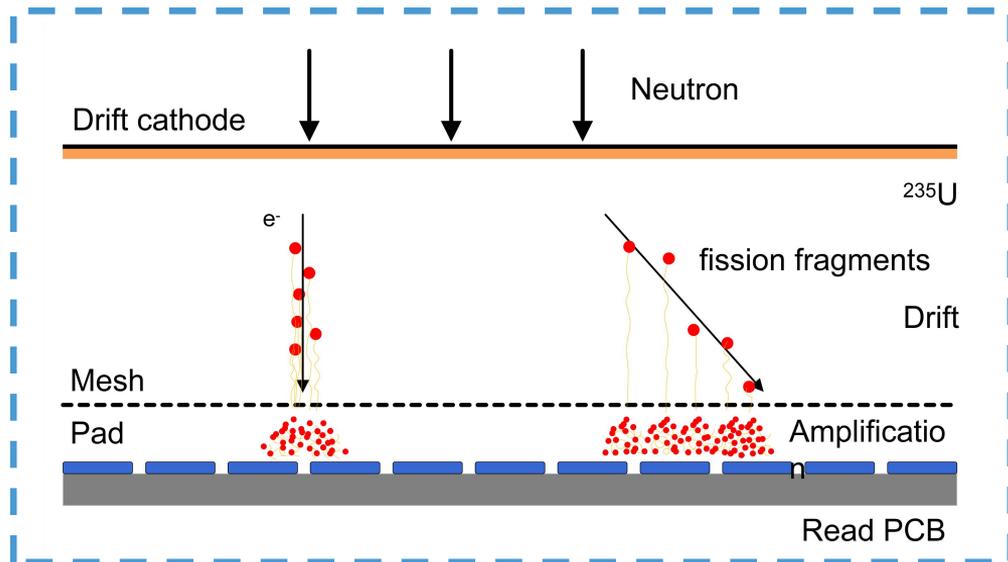
#### 裂變碎片的響應徑迹

#### 建模與仿真

#### 參數化模擬仿真

### □ 原理示意圖

- $^{235}\text{U}$ 是常用的裂變反應材料
- 核裂變釋放出的能量遠大於 $\gamma$ 射線能量，（對 $\gamma$ 射線不敏感），常用於強 $\gamma$ 本底環境中的中子通量測量



- 基於Micromegas的裂變室通過在陰極上鍍 $\text{U}_3\text{O}_8$ 實現
- 利用像素讀出方式，一個探測器相當於多個微型探測器組合，通過擴展像素單元來**拓寬計數量程**

## 二、原理与方法 — 基于Micromegas的裂变室



新型宽量程裂变室原理

探测器设计

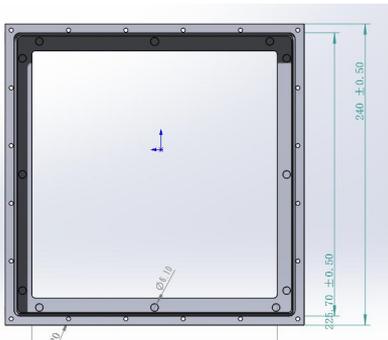
探测器测试

多通道响应原理

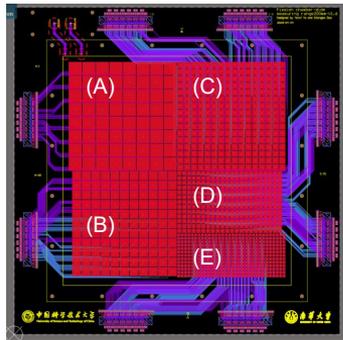
裂变碎片的响应径迹

建模与仿真

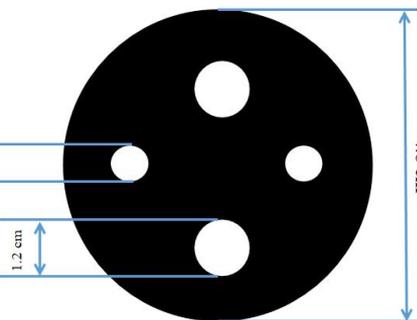
参数化模拟仿真



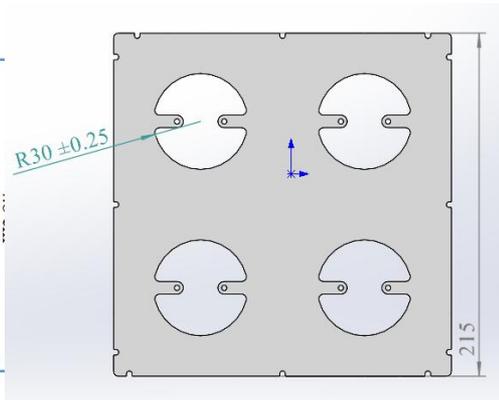
(a) 探测器框架设计图



(b) 阳极读出板设计图



(c) 铀镀片结构示意图



(d) 涂<sup>235</sup>U的漂移阴极示意图

### 1. 框架设计:

主框架: 240 mm × 240 mm × 15 mm ,  
225.75mm × 225.75 mm × 14 mm , 主框四周均匀的分布有20个直径6.5mm的孔, 2个高压口、1个进气口和1个出气口。底框: 底框的尺寸为 240 mm × 240 mm × 12 mm。高压框: 44 mm × 59 mm × 15 mm。

### 2. 阳极像素读出板的设计:

300 mm × 300 mm, 有效面积为200 mm × 200 mm; 采用了非阻性读出的方式, 设计了不同pad大小的5个区, 方便后续测试。

### 3. 漂移阴极的设计:

嵌入式的漂移阴极框搭配现有铀片, 通过在铝框上挖四个对应于现有铀片形状的孔用于测量探测器阳极读出的5个区域, 方便后续测量探测器计数量程。

新型宽量程裂变室原理

探测器设计

探测器测试

多通道响应原理

裂变碎片的响应径迹

建模与仿真

参数化模拟仿真

### □ 计数量程分析 (A、B、C 区域)



$$\Phi_{max} = C_{max} / \eta$$

$\Phi_{max}$  为计数量程上限 (脉冲模式下中子通量密度测量上限),  $C_{max}$  为探测器计数率上限,  $\eta$  为热中子探测灵敏度。

区域	A	B	C
总计数 (n)	986	1145	1311
净计数 (n)	744	740	749
单个pad平均计数 (n)	75	55	38
单个pad热中子灵敏度 (cps/s)	0.00219	0.00161	0.00110
计数量程上限(n.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )	4.57 × 10 <sup>8</sup>	6.21 × 10 <sup>8</sup>	9.09 × 10 <sup>8</sup>

### 结论:

随着pad密度的增大, 计数量程上限也随着增大, 但是假计数会随着增加

新型寬量程裂變  
室原理

探測器設計

探測器測試

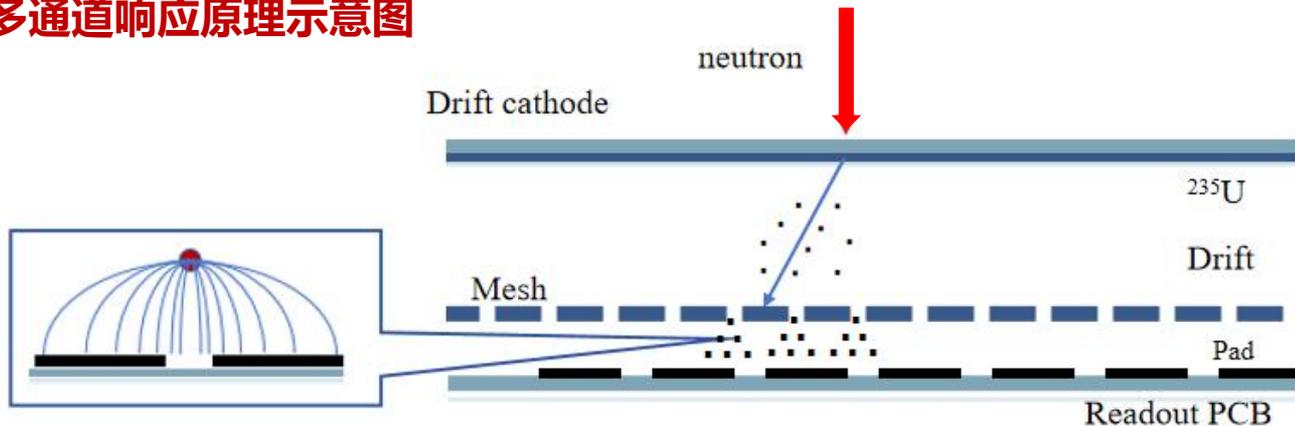
多通道響應  
原理

裂變碎片的  
響應徑迹

建模與仿真

參數化模擬  
仿真

### 多通道響應原理示意圖



- 裂變碎片在氣體中運動徑迹的發散，電離電子、倍增電子的橫向擴散
- 電離電子、倍增電子在運動過程中就會產生感應信號<sup>[1]</sup>

像素點分布過密會使得一個入射中子引起多個像素點產生信號感應，造成**多通道響應**，**制約計數率的提高**



**降低多通道響應造成的重復計數**  
(a)使得初級電子、倍增電子更集中  
(b)優化單個pad大小和pad布局

[1] .S. Ramo. 1939

新型寬量程裂變  
室原理

探測器設計

探測器測試

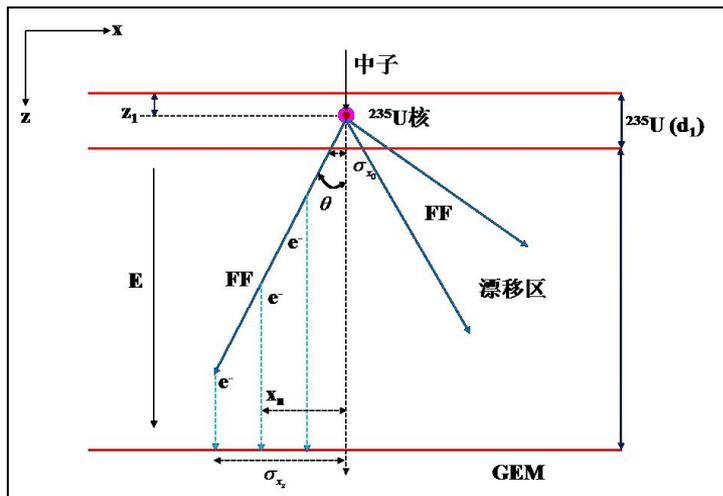
多通道響應  
原理

裂變碎片的  
響應徑迹

建模與仿真

參數化模擬  
仿真

## 裂變碎片的遷移

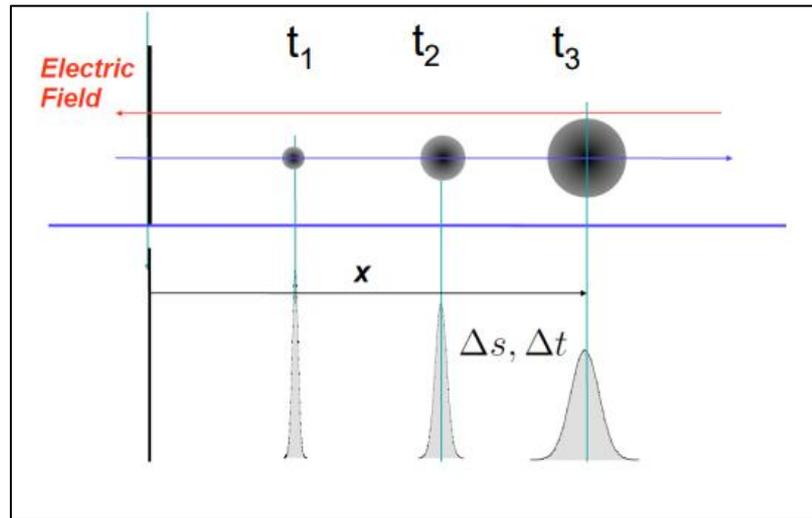


響應徑迹與氣體種類份額、**漂移區大小**等參數有關

## 電子的橫向擴散

經時間t後在距離原點x處的單元dx中發現電

$$\text{荷的量: } \frac{dN}{N} = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} dx$$



電荷在擴散效應下在不同時刻的空間  
分布( $t_3 > t_2 > t_1$ )

通過改變**探測器的參數**以及**工作條件**來減小帶電粒子的橫向運動範圍

新型寬量程裂變室原理

探測器設計

探測器測試

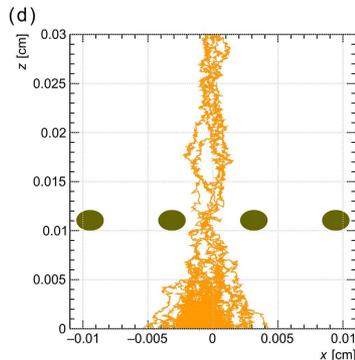
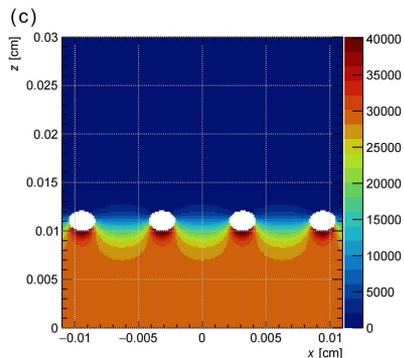
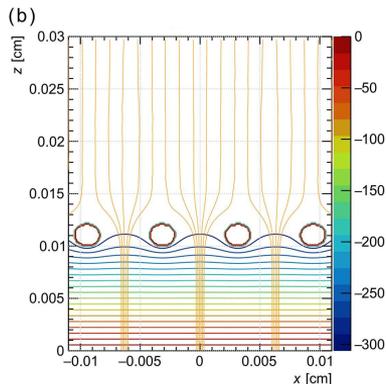
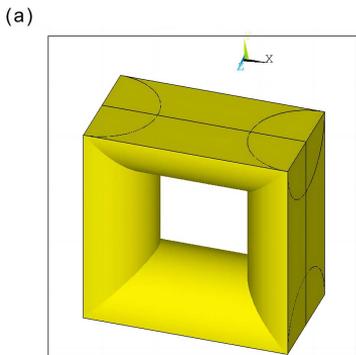
多通道響應原理

裂變碎片的響應徑迹

建模與仿真

參數化模擬仿真

### □ 模擬建模



基于Micromegas裂變室的物理模型

### Geant4模拟中子与 $^{235}\text{U}$ 反应:

- ◆ QGSP\_BIC\_HP物理包, 0.0253 eV的热中子,  $1 \times 10^8$ 个垂直探测器入射的中子, 转化层 $\text{U}_3\text{O}_8$ , 其中,  $^{235}\text{U}$ 丰度为90%

### ANSYS和Garfield++模拟电子的漂移:

- ◆ 采用400目的金属丝、直径0.21、孔间距0.63、开孔率0.44。

通过研究带电粒子迁移机制比较  
选取最优探测器参数和工作条件

### 中子诱发裂变到裂变产物电离电子的全过程: Geant4 GarfieldInterface<sup>[1]</sup>

新型宽量程裂变室原理

探测器设计

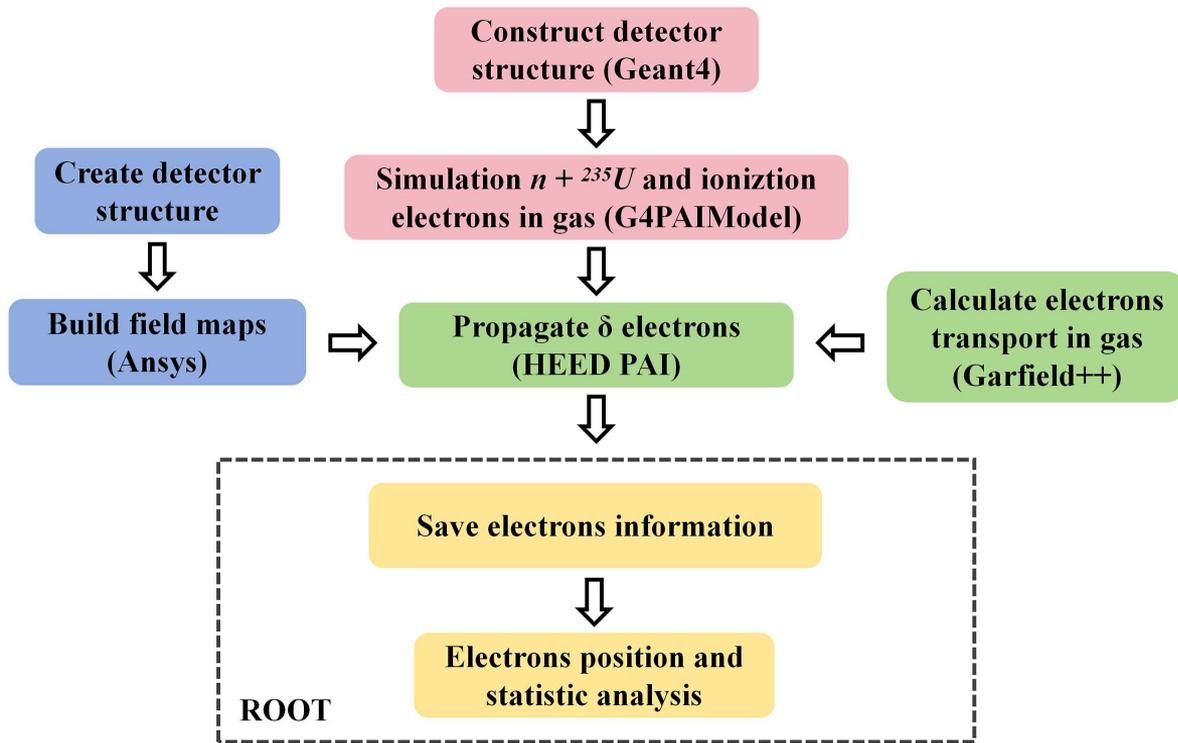
探测器测试

多通道响应原理

裂变碎片的响应径迹

建模与仿真

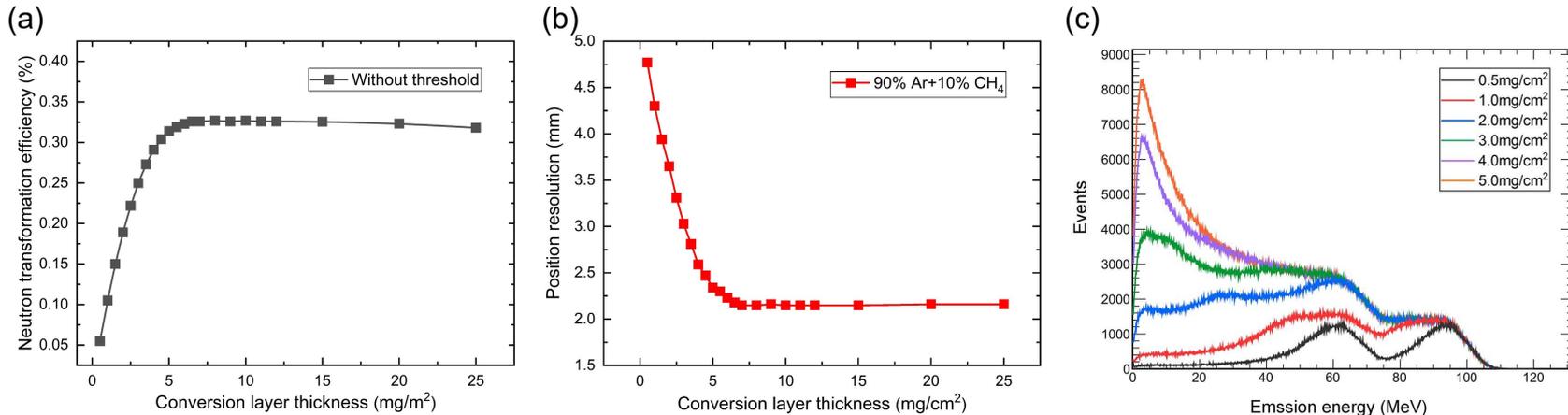
参数化模拟仿真



基于Geant4Garfield++的模拟流程图

[1] D. Pfeiffer, et al. 2019

#### 转化层厚度对转化效率和初级电子位置分布的影响

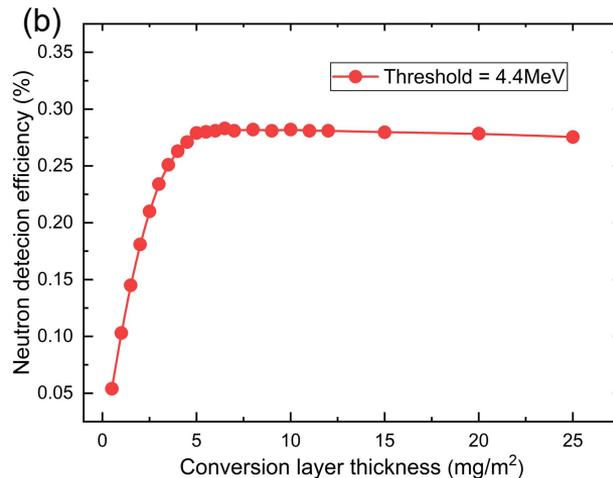
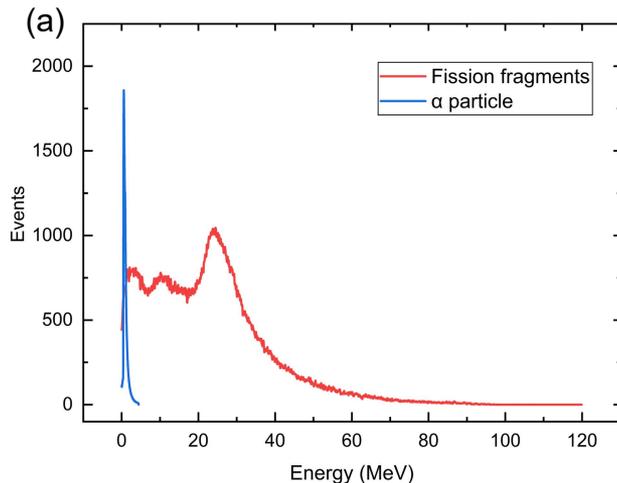


#### 结论:

- 当转化层厚度为**7mg/cm<sup>2</sup>**时，热中子转化效率达到了最大值**0.33%**;
- 当转化层厚度达到**7mg/cm<sup>2</sup>**时，初级电子横向位置分布范围达到最小值;
- 转化层厚度增大，转化效率也增大，但是裂变碎片的出射能谱逐渐变软，在低能区域与<sup>235</sup>U的α衰变发出的α粒子能谱重叠

#### □ 探测效率的阈值修正与 $\alpha$ 甄别

$^{235}\text{U}$ 半衰期为 $7.1 \times 10^8$  a,  $\alpha$ 粒子: 56% 4.401 MeV、12% 4.365 MeV



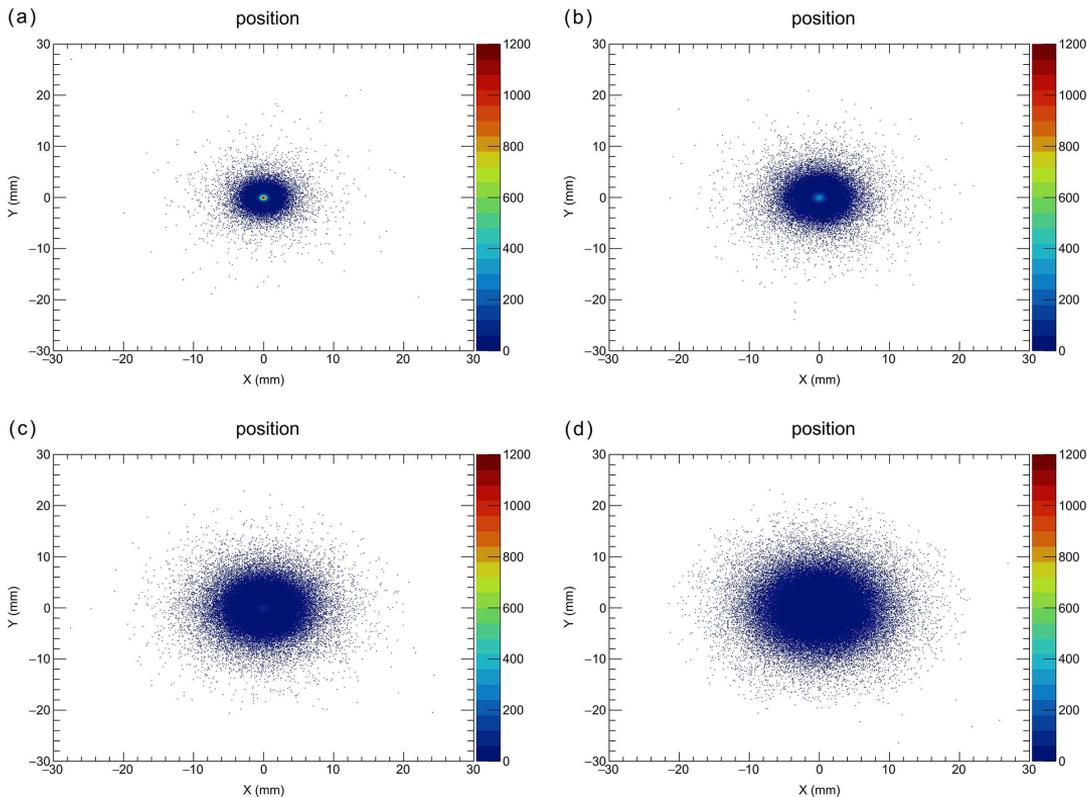
#### 结论:

- 阈值为4.4MeV时, 可排除所有的 $\alpha$ 粒子干扰
- 最佳转化层厚度为5  $\text{mg}/\text{cm}^2$ , 中子探测效率为0.28%

### 三、研究结果 — 裂变碎片的径迹和初级电子位置



#### 裂變碎片距離出射面0.5、1、2、4mm的位置分布

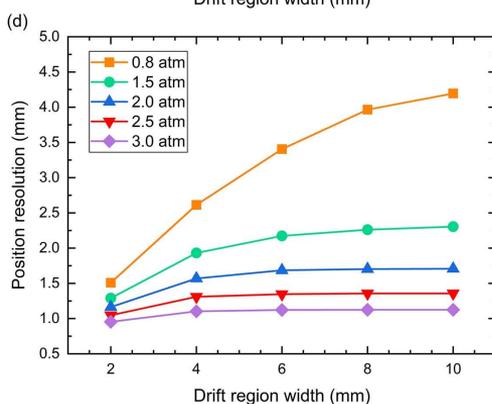
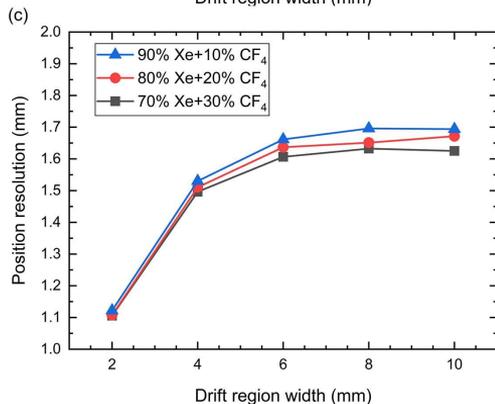
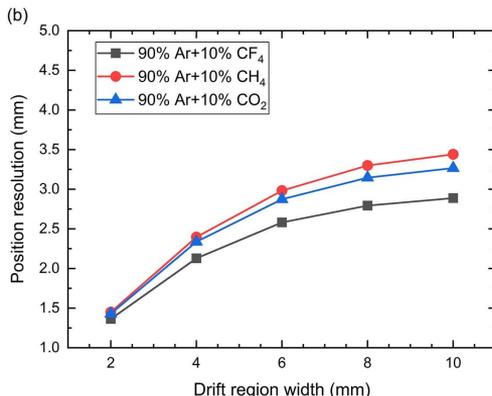
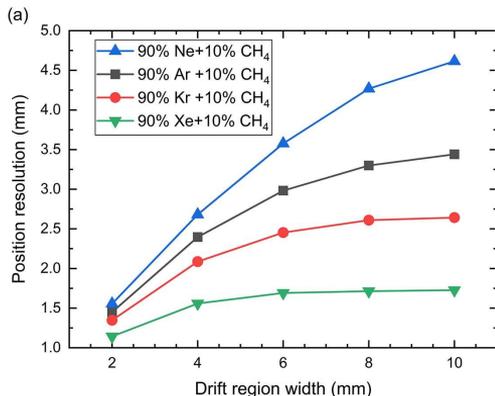


#### 结论:

- 随着裂变碎片在气体中穿行的距离越远，裂变碎片的发散程度越大

出射面的距离 (mm)	FWHM (mm)
0.0	0.003
0.5	0.935
1.0	1.832
2.0	3.536
4.0	6.471

## □ 初级电子位置分布



## 结论:

- 惰性气体的成分和气压的大小对初级电子位置分布影响较大
- 高原子序数的惰性气体和高气压能使惰性气体具有较大核外电子密度和较小电离能
- 所以可以通过填充Xe或者增加气压减小初级电子的横向位置分布范围

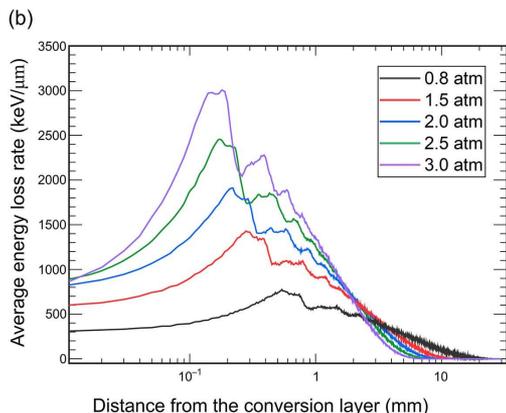
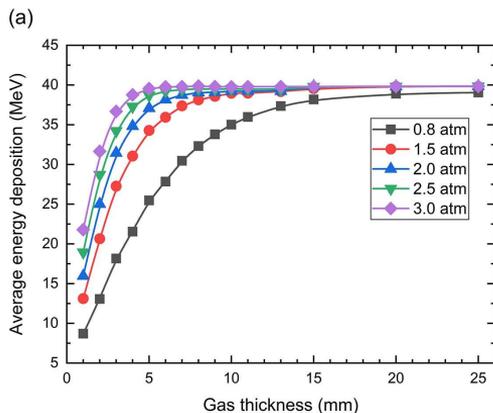
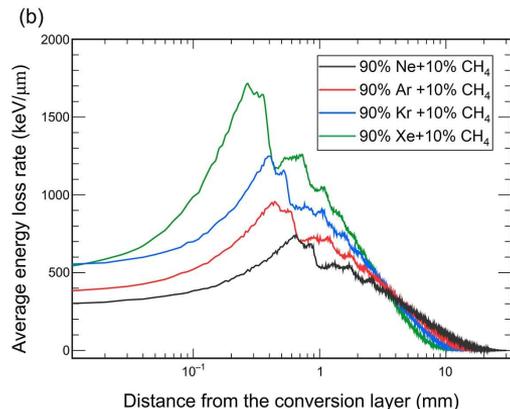
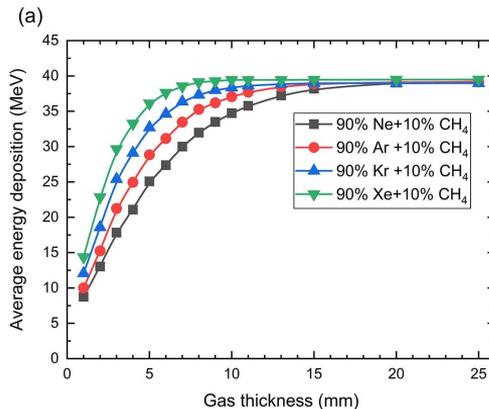
本工作对不同气体成分、比例和不同气压下的中子位置分辨率进行模拟

### 三、研究结果 — 裂变碎片的径迹和初级电子位置



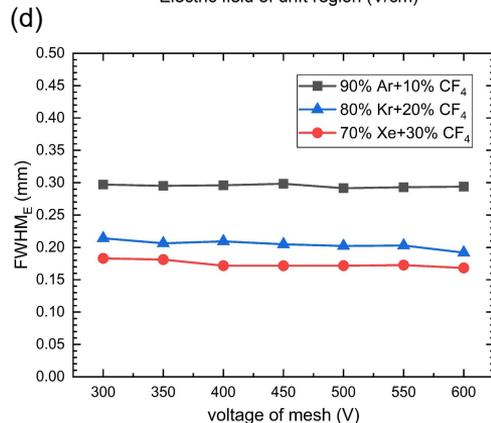
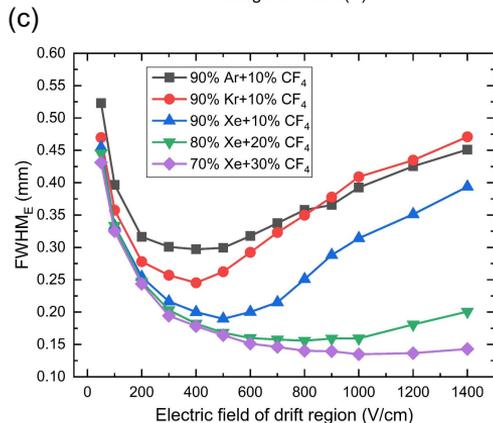
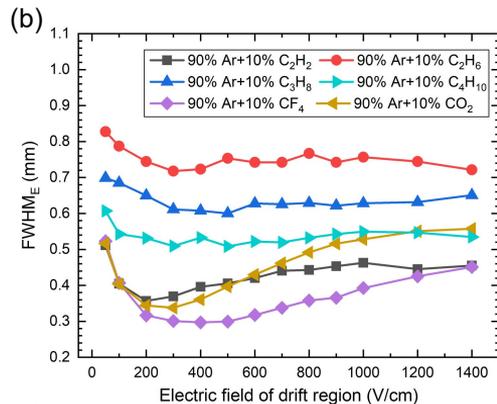
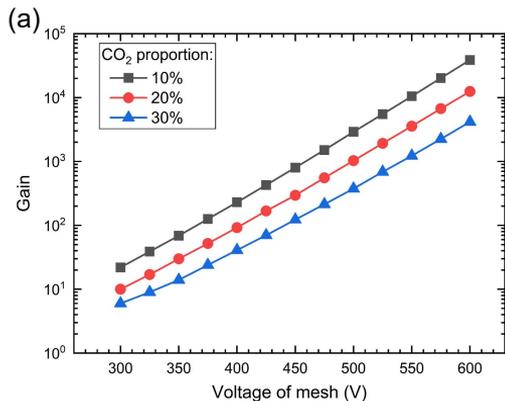
#### 不同惰性气体成分和不同压强下的平均能量沉积和能量损失率

- 选取Xe作为工作气体时，漂移区距离选择为2 mm，能量沉积平均值为22.85 MeV
- 而选择Ar作为工作气体，漂移区距离需要增加到4 mm才能达到基本相同的能量沉积



- 当气压为3 atm时，4 mm 气体厚度时的能量沉积平均值达到了38.76 MeV，裂变碎片的能量完全沉积在气体中

## □ 电子的横向扩散



### 结论:

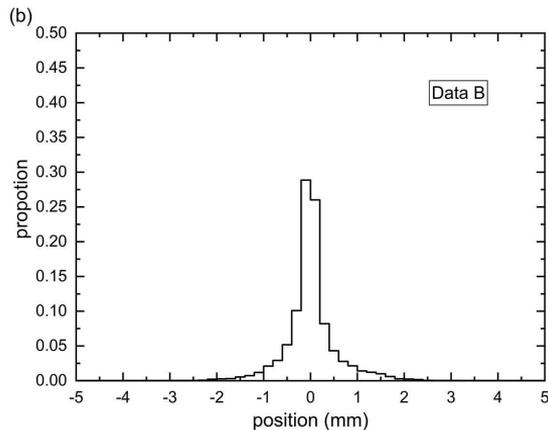
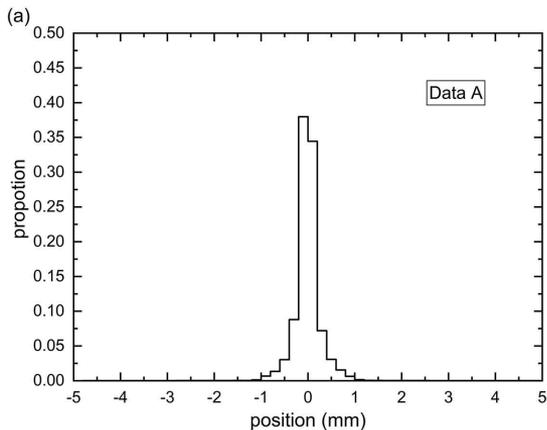
- 猝灭气体对电子横向扩散的影响远远大于惰性气体;
- 猝灭气体含量越大电子横向扩散越小;
- 漂移区电场的大小对电子横向扩散的影响较大, 倍增区电场对电子横向扩散无影响;

### 最佳探测器参数:

70%Xe和30%CF<sub>4</sub>、漂移区电场为1000V/cm、漂移区宽度为2mm

## □ 电子在电极上的位置分布

通过 *Geant4 GarfieldInterface* 模拟中子诱发<sup>235</sup>U裂变，电离电子漂移至阳极的全过程



(a) 最佳参数:

**70%Xe+30%CF<sub>4</sub>**，漂移区场强为**1000V/cm**，漂移区宽度为**2mm**；电子在电极上分布集中在**-1mm~1mm**

(b) 常用参数:

**70%Ar+30%CO<sub>2</sub>**，漂移区场强为**400V/cm**，漂移区宽度为**4mm**；电子在电极上分布集中在**-2mm~2mm**

**最佳参数有效的减小了电离电子到达阳极时的位置分布范围**

### □ 总结

- 填充原子序数较大惰性气体Xe或增加气体压强可以有效地减小初级电子位置分布的范围;
- 当填充的惰性气体为Xe, 漂移区宽度为2mm时, 裂变碎片平均沉积能量达22.85MeV, 与在4mmAr中的平均能量沉积相当;
- 当填充气体为70%Xe和30%CF<sub>4</sub>、漂移区电场为1000V/cm, 此时电子的横向扩散最小;
- 填充气体为70%Xe+30%CF<sub>4</sub>, 漂移区宽度为2mm, 漂移区电场强度为1000V/cm为最理想的探测器参数, 此时电离电子到达阳极时的位置分布集中在-1mm ~ 1mm。

### □ 展望:

- 对pad大小和布局进行深入研究, 寻找最优的pad分布, 进一步减小多通道响应问题, 以达到最大的计数量程上限;



谢谢大家!

欢迎各位专家批评指正!

汇报人：魏岐桢

2024年7月16日