



高精度裂变截面测量用TPC 探测器研制及实验进展

核物理与化学研究所
郑 普

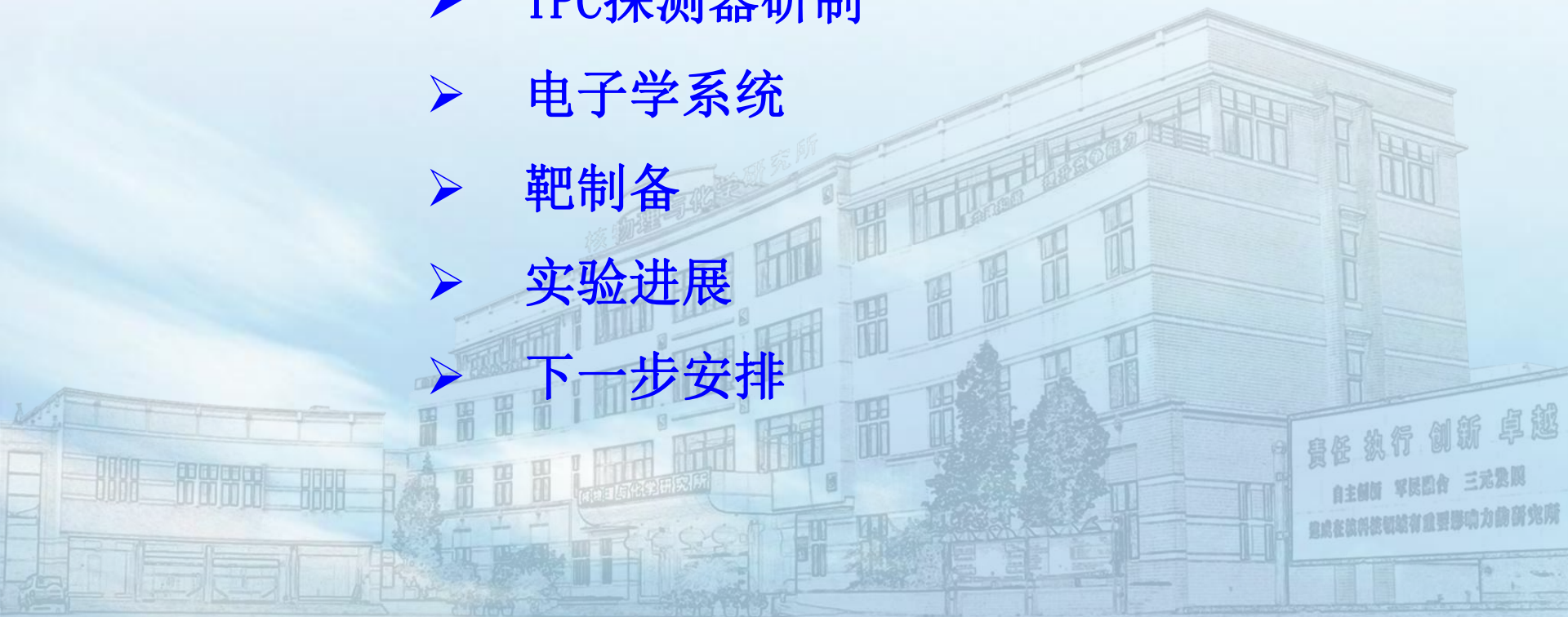
2022-11-11

责任 执行 创新 卓越
自主创新 军民融合 三元发展
建成在核科技领域具有重要影响力的研究所



目 录

- 引 言
- TPC探测器研制
- 电子学系统
- 靶制备
- 实验进展
- 下一步安排





引言

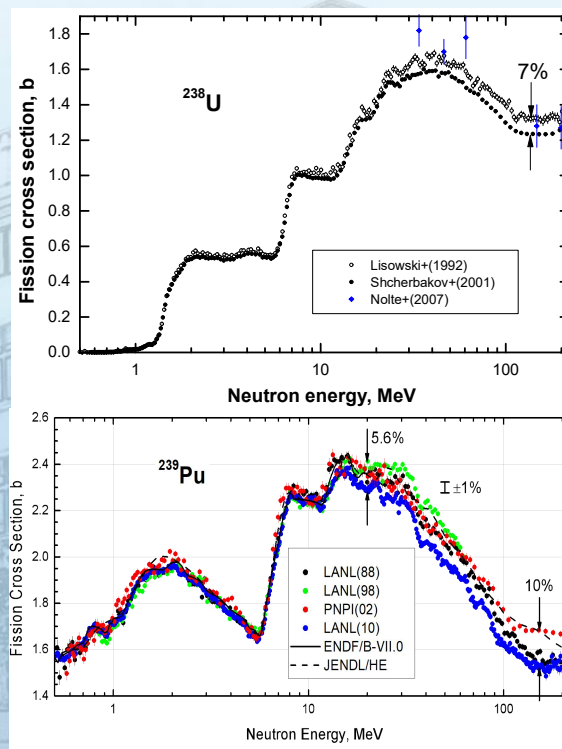
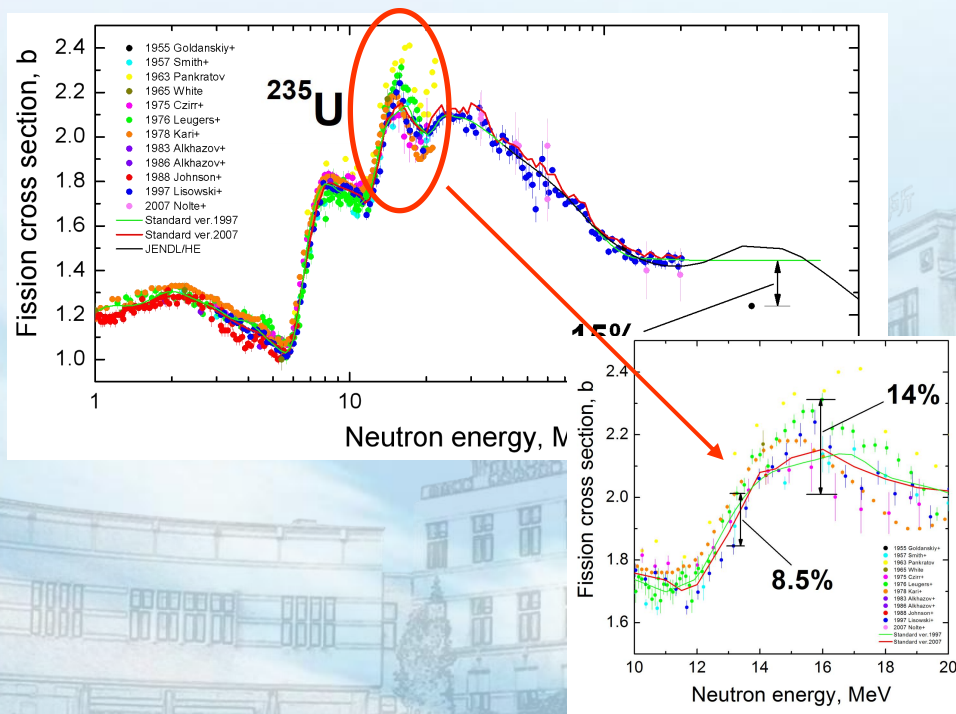
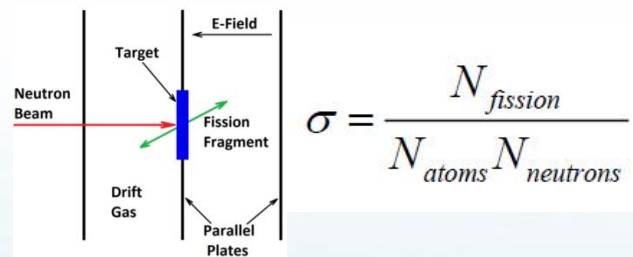
核反应堆、核素合成等领域对快中子区域的核参数非常敏感，对裂变截面等参数的精度有较高的要求，在反应堆系统设计中通过高精度的模拟软件对系统进行评估，而核数据的精度对模拟结果有较大的影响。反应截面不确定度对这些领域的影响已经有了详细的研究，结果表明，反应截面的不确定度要达到1%及以下。

LANL的Todd Bredeweg, Carol Burns等人在2013年9月13日的报告《武器科学计划与核物理集成》中就明确指出：裂变截面是中子源项的重要部分，期望 ^{239}Pu 和 ^{235}U 的裂变截面测量水平可以达到2% (2σ) 的水平，并要求改进对当前一些重要核素截面数据的评估。



引言

^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu 中子诱发裂变截面 (入射中子能量 $100\text{keV} \sim 14\text{MeV}$) 在过去50年使用裂变室进行过多次测量, 其不确定度在 $3\% \sim 5\%$, 其固有的不确定度使其很难达到更高精度。



创新卓越
三元发展
重要影响力研究所



引言

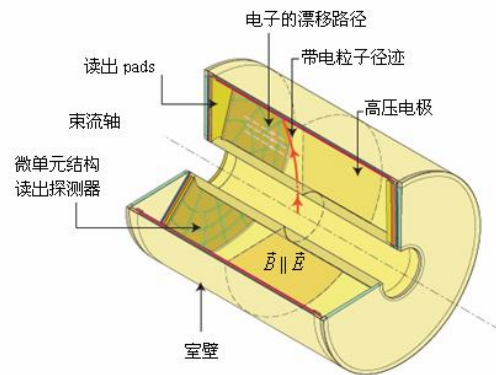
裂变室法截面测量不确定度的主要来源：

- 1、裂变碎片和 α 粒子及其他带电粒子甄别（1%）
- 2、靶核子数及分布（1.5%）
- 3、中子束流分布（0.7%）
- 4、相对测量时参考靶的截面不确定度（1%）

必须选择新的测量方法：

更好的粒子甄别能力；
可以获得中子和靶核数及分布；
更低不确定度的参考靶。

因此，提出了以H作为参考靶的**TPC测量方法**。





引言

TPC（Time Projection Chamber，时间投影室）测量方法的优点：

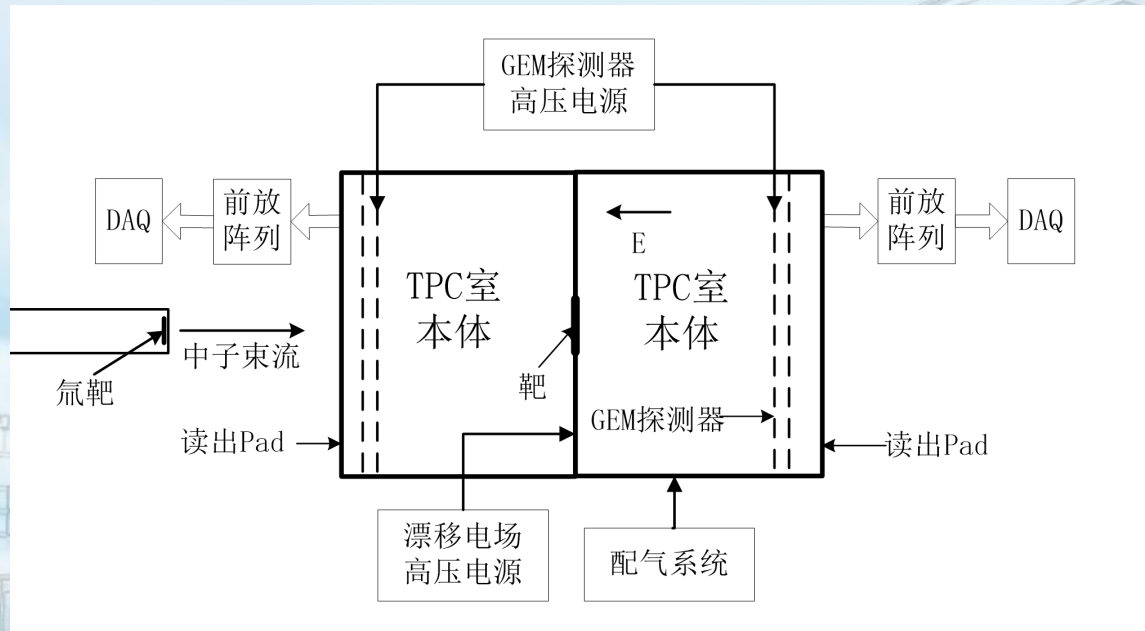
- 更好的粒子甄别（可以测量粒子的能量和径迹）；
- 可测量靶核和中子的分布（位置分辨约百 μm ）；
- 可使用H（n，n）截面（0.2%）作为标准截面（测量动态范围大）。



责任 执行 创新 卓越
自主创新 军民融合 三元发展
建成在核科技领域有重要影响力的研究所

测量原理

对于裂变TPC，待测量的核素靶片放置于TPC的中心，入射中子与样品发生反应，裂变碎片、 α 粒子、质子等通过径迹和能量进行粒子甄别。同时可进行靶和束流的不一致性测量。





测量原理

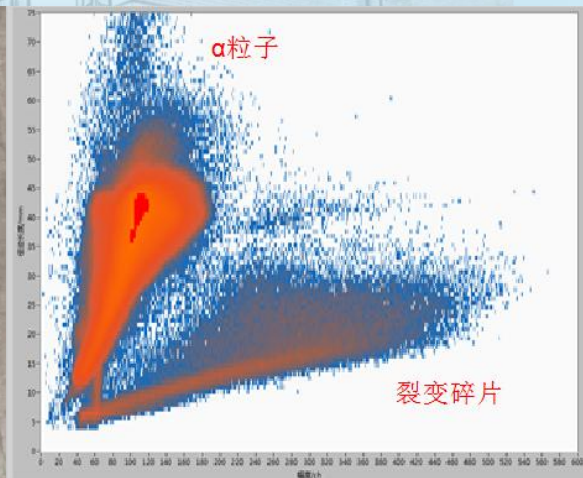
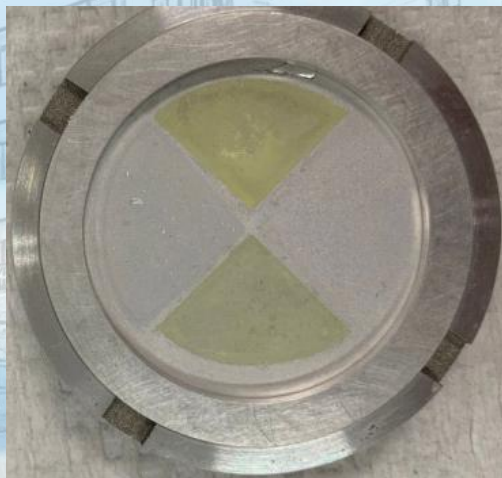
利用裂变TPC（Time Projection Chamber）探测系统测量裂变截面时：

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_H} = \frac{\varepsilon_H}{\varepsilon_x} \cdot \frac{\Phi_H}{\Phi_x} \cdot \frac{N_H}{N_x} \cdot \frac{\sum_{XY} (\Phi_{H,i} \cdot n_{H,i})}{\sum_{XY} (\Phi_{x,i} \cdot n_{x,i})} \cdot \frac{\omega_x}{\omega_H} \cdot \frac{C_x}{C_H}$$

σ —裂变截面； ε —探测效率； Φ —中子通量； N —靶核数；
 Φ_i —不同位置靶核子数； n_i —不同位置中子通量； ω —死时间修正； C —反应数

需要测量的主要物理量：

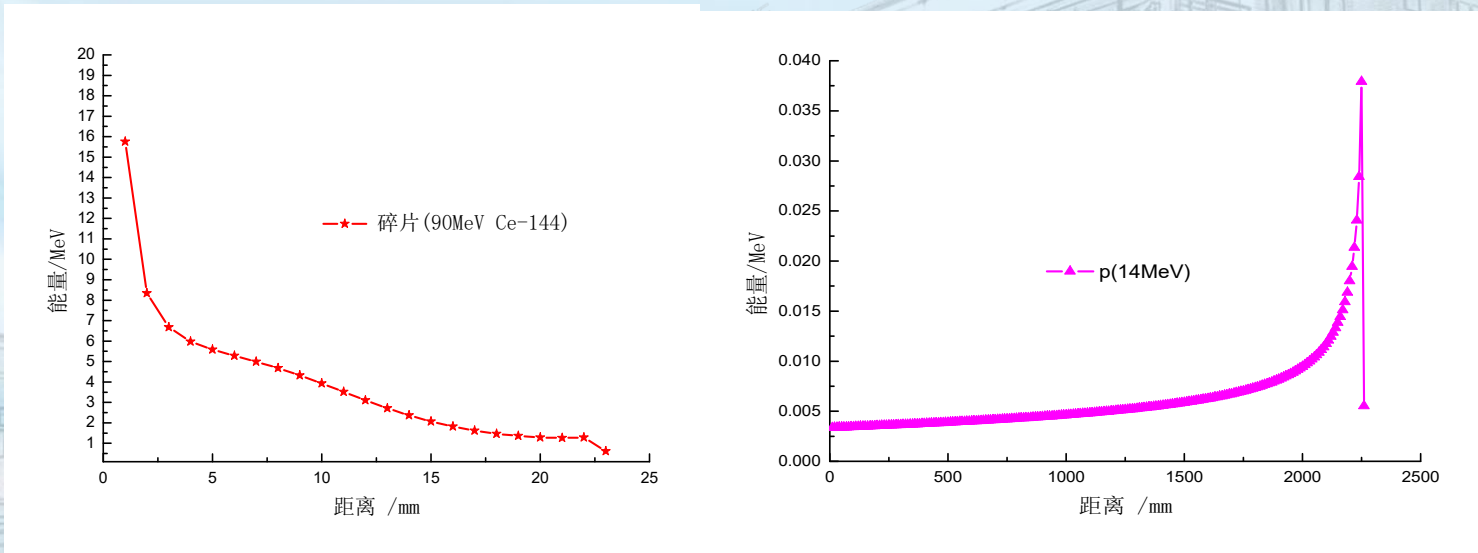
- 中子通量及分布
- 靶核数及分布
- 裂变事件数



带来的问题

1、超大的动态范围

在1atm下，14MeV的质子、10MeV的 α 粒子和裂变碎片（选择Ce-144，80MeV）在P10工作气体中，最小能损为3.4keV/mm（14MeV质子），最大能损约14MeV/mm（80MeV的Ce-144碎片），其动态范围约4000倍。



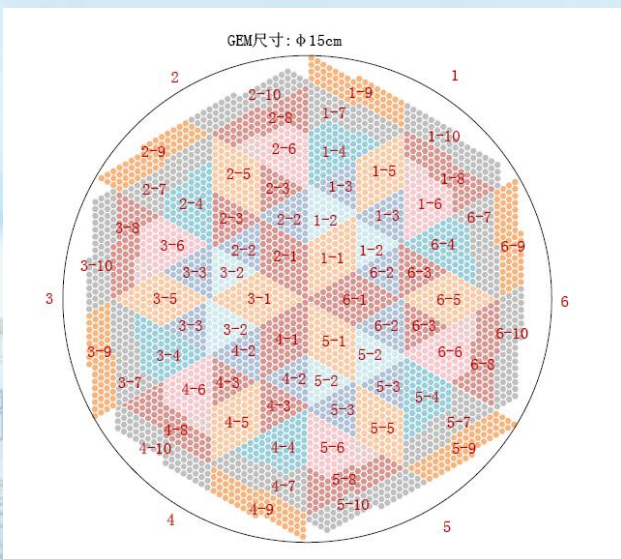


带来的问题

2、高密度的电子学系统

Pad尺寸为2mm的正六边形，覆盖整个 α 粒子径迹情况下，单面约4600路，双面总规模约9200路。

对电子学的要求：前放集成度高、功耗小（10mW）、动态范围大（>2000:1）、噪声小、可波形保持；数采电路采样精度14bit，采样率不低于50MCPS。



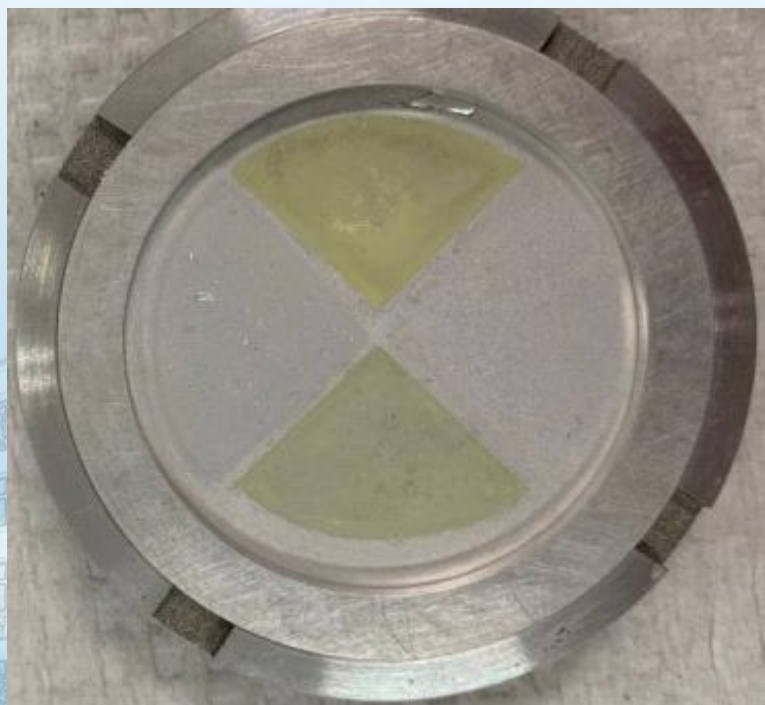
行创新卓越
军民融合 三元发展
科技有重要影响力的研究所



带来的问题

3、超薄底衬的分区靶

在直径30mm的区域镀上U-235、U-238、Pu-239和含氢材料。靶底衬厚度不大于 $1\mu\text{m}$ 。

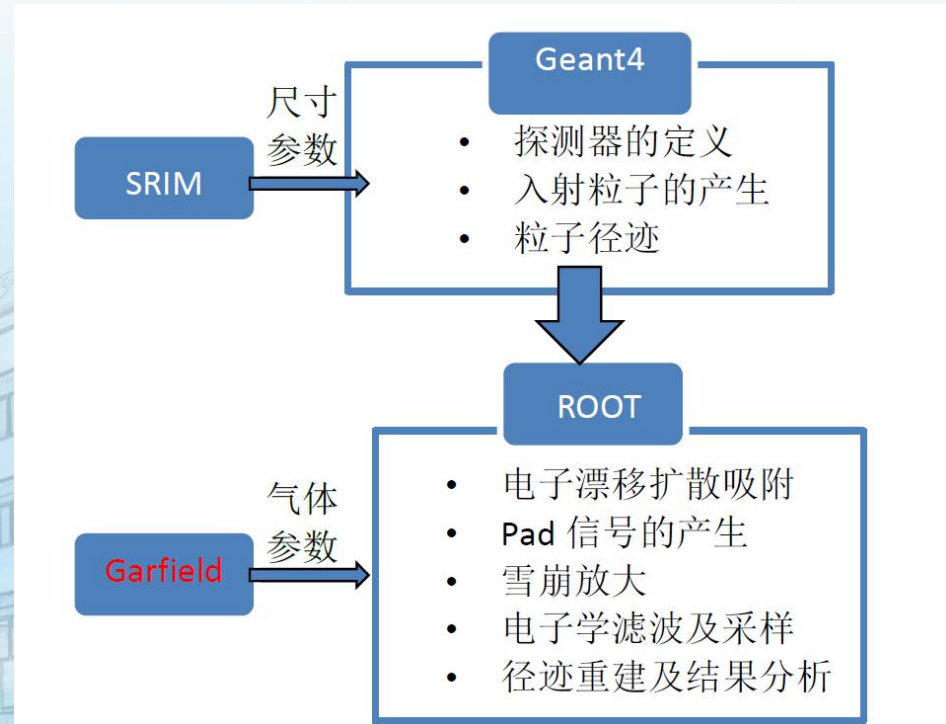


责任 执行 创新 卓越
自主创新 军民融合 三元发展
建成在核科技领域有重要影响力的研究所

探测器研制

1、模拟计算

对探测器进行了全模拟。使用 **Geant4** 软件完成探测器结构的绘制，粒子的产生及其在工作气体中沉积能量，产生径迹；使用 **ROOT** 软件完成电子在气体的漂移、扩散、吸附、在读出 **pad** 上产生信号，对信号滤波成型和采样量化，对径迹进行重建及结果分析。其中 **SRIM** 软件模拟给出探测器尺寸，**Garfield** 模拟给出气体的参数信息，包括漂移速度、扩散及吸附系数。

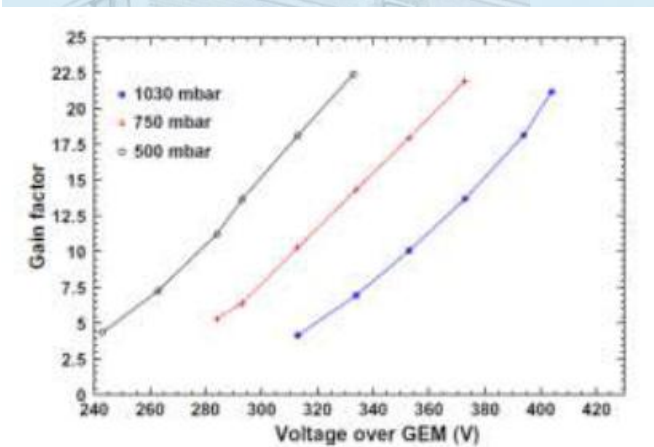
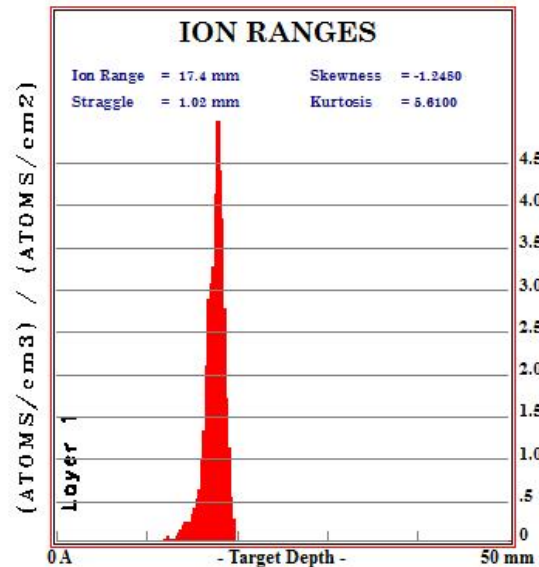
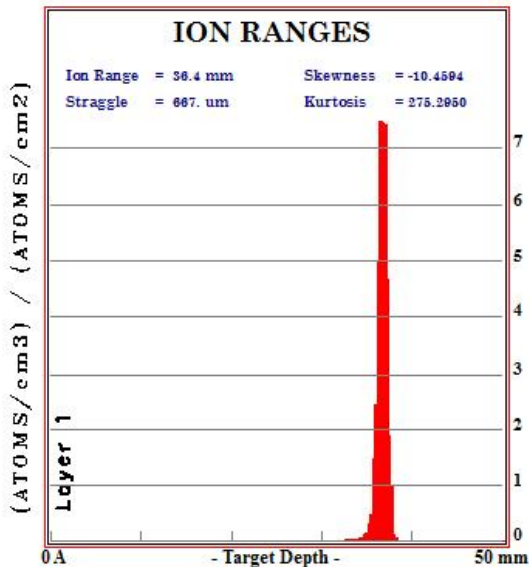




探测器研制

粒子的产生与初级电离	模拟用的物理包	QGSP_BIC_HP
	电离室尺寸	Φ 150mm×65mm
	粒子产生位置	漂移极正中心
	裂变碎片粒子类型与数目	基于 U-235 裂变核分布抽样
	裂变碎片粒子能量	轻核: 0-100MeV 平均分布 重核: 0-70MeV 平均分布
	Alpha 粒子数目	与裂变碎片产生概率一致
	Alpha 粒子能量	在 0-5MeV 内平均分布
气体属性与次级电离	单次产生的粒子数	1 个 (设定裂变碎片和 alpha 粒子的产生概率相同)
	工作气体	Ar:CH ₄ (90:10)
	气压	1 atm
	平均电离能	28eV
	漂移电场	130V/cm

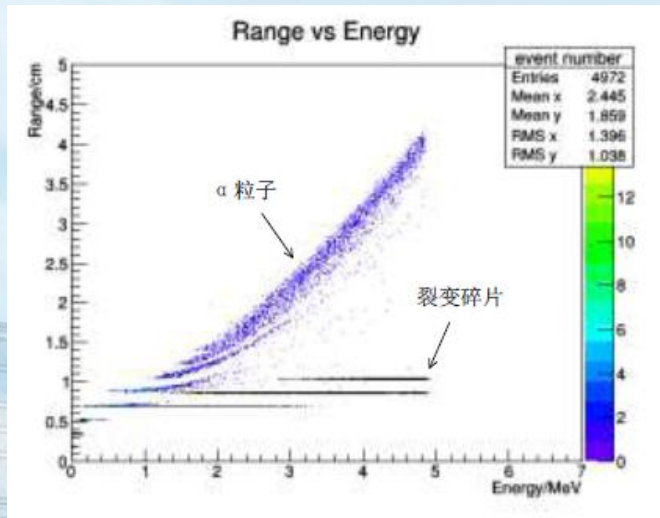
信号读出与重建	漂移速度	5.45172cm/us
	吸附系数	0.0014379cm ⁻¹
	横向扩散系数	0.060492cm/ \sqrt{cm}
	纵向扩散系数	0.036227 cm/ \sqrt{cm}
信号读出与重建	读出 pad 尺寸	边对边 2mm 的六边形,
	pad 时间信息	pad 电子的平均漂移时间
	pad 能量信息	pad 电子数
	pad 电流信息	某时刻 pad 与 GEM 膜之间的电子数
	pad 与 GEM 之间的距离	1mm



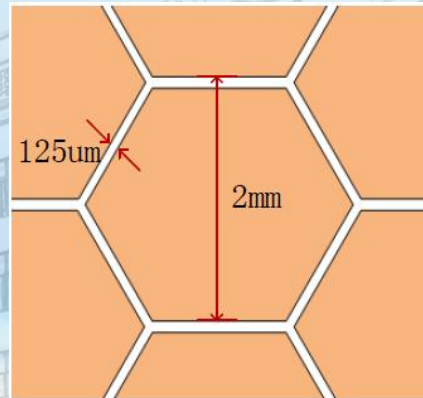
探测器研制

2、读出探测器

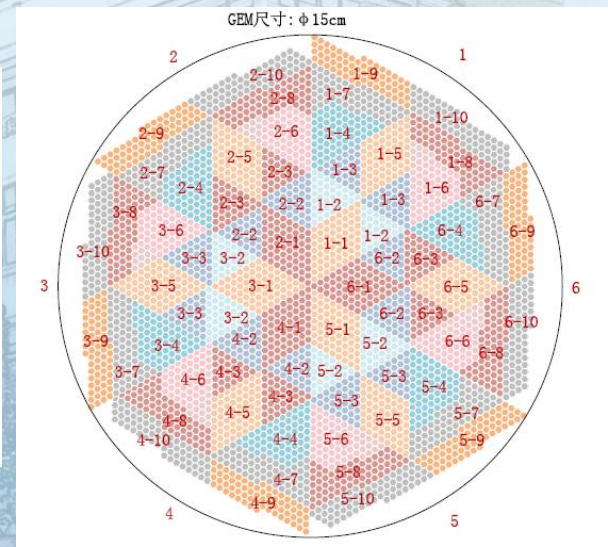
粒子出射角度各向同性，**pad** 形状采用六边形，保证每个**pad** 形状相同。模拟了四种**pad** 尺寸（1mm、2mm、3mm、4mm）的甄别效果。碎片能量与 α 粒子的能量均为0~5MeV 均匀分布，同时裂变碎片的能量要小于5MeV需要在靶内损失足够的能量，此时裂变碎片的方向应该接近与靶平面平行。**pad** 尺寸越小，甄别效果越好，**pad** 为1mm 时使得读出密度过大，为工程实现带来困难。综合考虑，**pad** 尺寸选为2mm。



pad 为2mm 时模拟计算的甄别效果



pad 形状

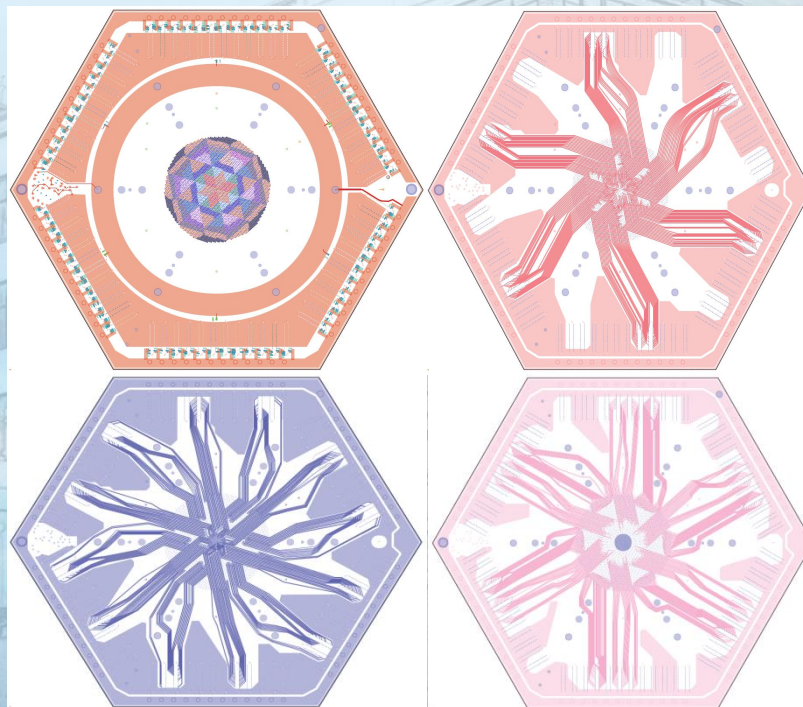
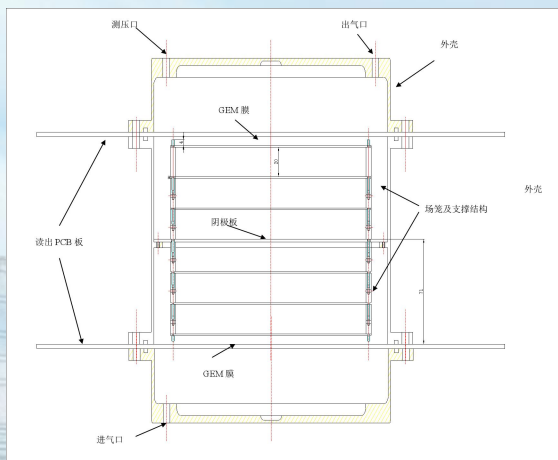
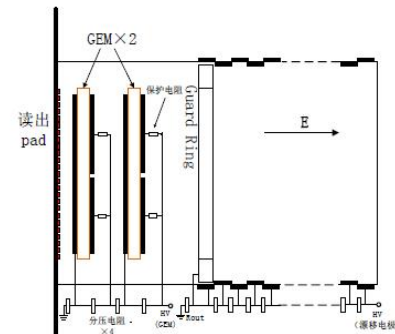
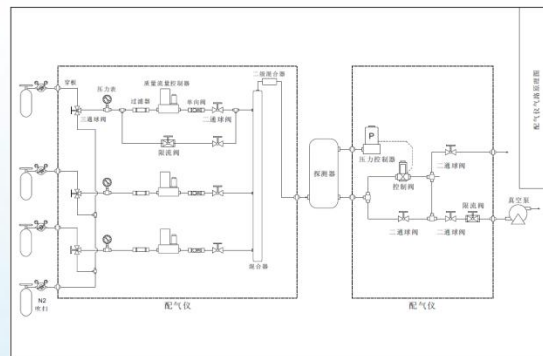


pad 分布

探测器研制

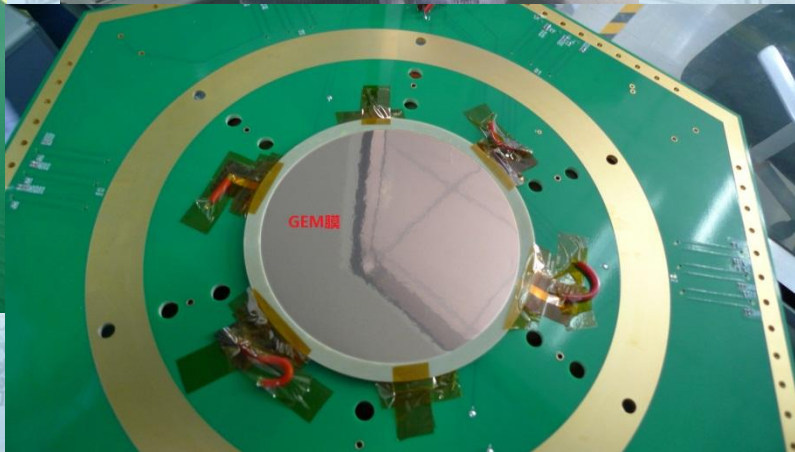
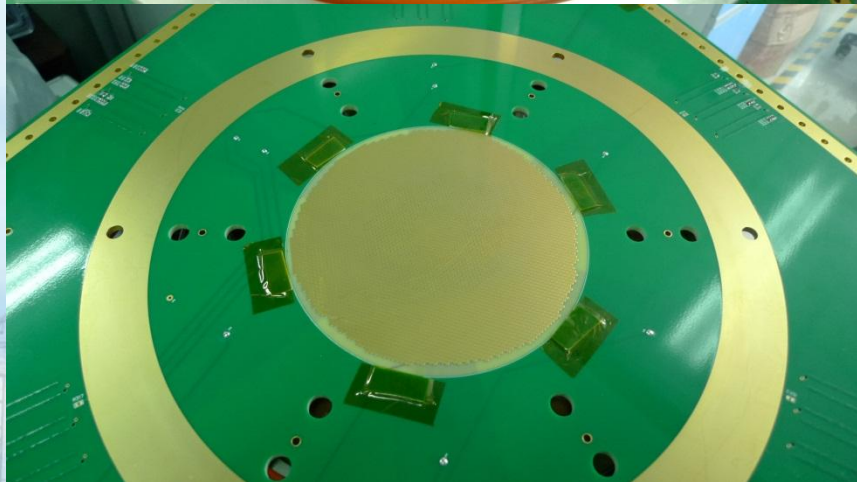
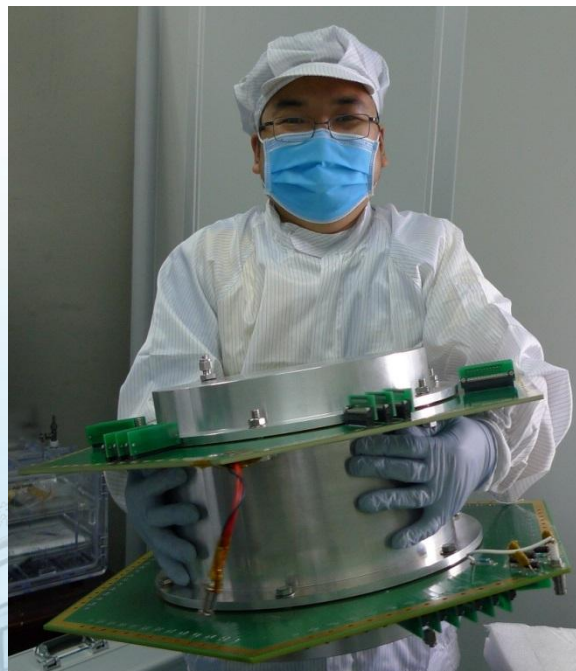
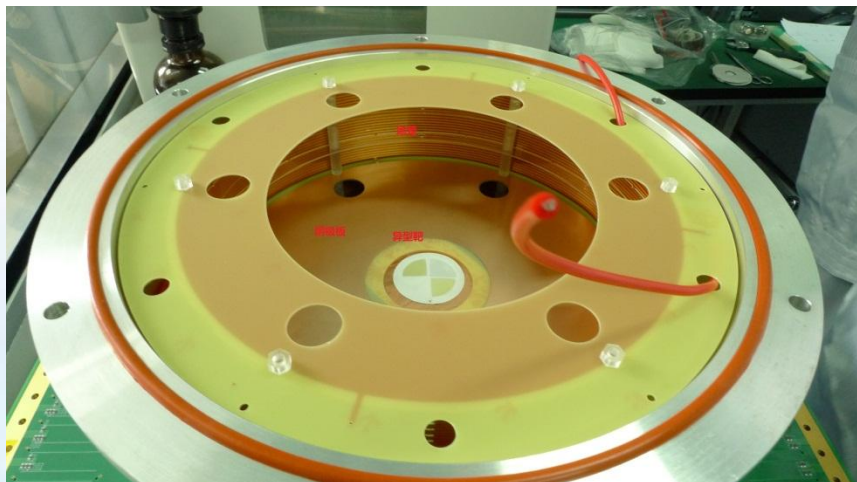
3、整体设计

对TPC探测器的机械结构、读出探测器、供气系统、GEM和场笼的供电等进行了整体设计，研制了用于高精度裂变截面的TPC探测器。





探测器研制

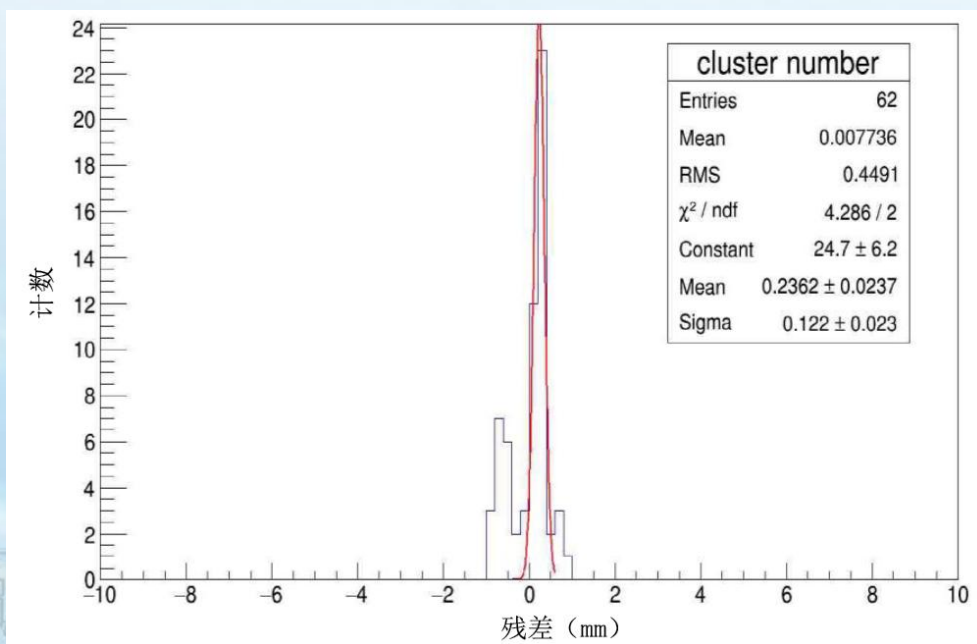


行 创新 卓越
军民融合 三元发展
最有重要影响力的研究所



探测器研制

使用 ^{241}Am 源的alpha粒子测定了系统的位置分辨，当GEM电压为300V时，xy平面的残差分布如下图，高斯拟合结果为 $\sigma=122\mu\text{m}$ ，即xy平面的位置分辨为 $122\mu\text{m}$ 。



责任执行 创新卓越
自主创新 军民融合 三元发展
建成在核科技领域有重要影响力的研究所

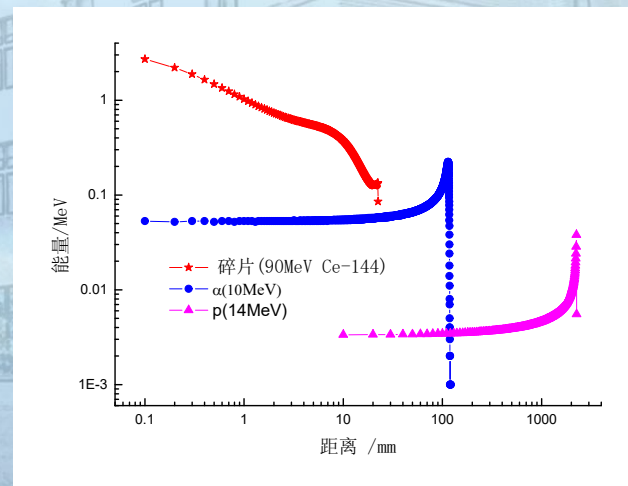
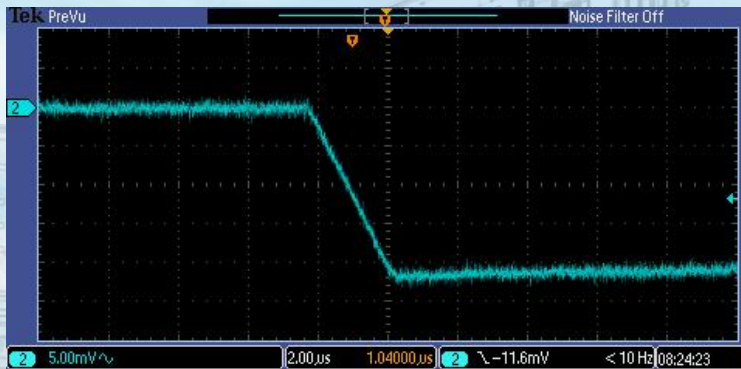
电子学系统

1、技术指标要求

在1atm下，14MeV的质子、10MeV的 α 粒子和裂变碎片（选择Ce-144，90MeV）在P10工作气体中，最小能损为3.4keV/mm（14MeV质子），最大能损约14MeV/mm（90MeV的Ce-144碎片），其动态范围约4000倍。考虑到大能量碎片可以通过能量进行粒子甄别，可适当降低电子学系统动态范围，因此提出2000: 1的动态范围。

不同出射方向的粒子，其脉冲宽度表征Z方向的径迹长度，因此需要进行波形采集。

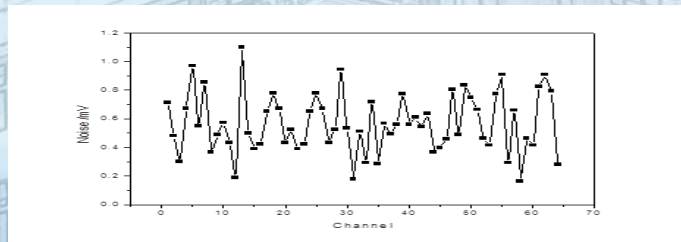
电子漂移速度约为5cm/ μ s，因此采样率最低50MCPS可满足采样需求。



电子学系统

2、前放性能测试

对TPC探测器的ASIC前放进行了性能测试，其噪声水平约 $0.15fC@1pC$ （对应噪声电压 $0.3mV$ ），动态范围约 $6000:1$ 。加上数采电路后，噪声约 $0.6mV$ ，动态范围约 $3000:1$ 。功耗约 $10mW/Ch$ ，不需要制冷。



电子学噪声

责任 执行 创新 卓越
自主创新 军民融合 三元发展
建成在核科技领域有重要影响力的研究所



电子学系统

参数	值
极性	负
通道数	64
输入动态范围	50fC, 100fC, 500fC, 1000fC
增益	2mV/fC, 4mV/fC, 20mV/fC, 40mV/fC
成型时间	80ns, 160ns, 240ns, 320ns
差分输出电压	2V _{p-p}
共模电压	0.9V
功耗	10mV/Ch
成形时间	80ns, 160ns, 240ns, 320ns
电子学噪声	2000e@1pC

责任 执行 创新 卓越
自主创新 军民融合 三元发展
建成在核科技领域有重要影响力的研究所

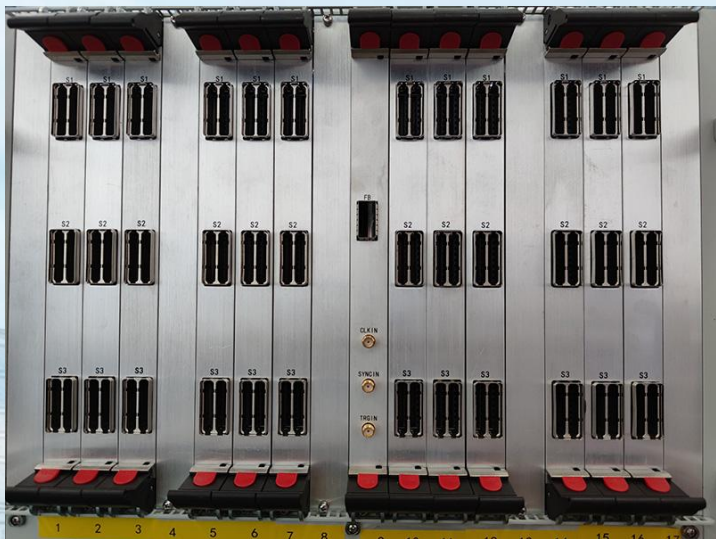


电子学系统

3、数采电路

数采电路总通道数约**9200**路，采样率**50MCPS**，采样位数**14**位。

系统从硬件角度可分为两部分，前端数据采集和后端控制接收。前端数采使用标准**6U**机箱，数据发送卡用于同步触发信号的输入和数据的输出。每张数采卡共有**128**对差分信号输入，数采卡与发送卡间通过高速背板通讯，实现数据交换和命令控制。数据发送卡兼顾接收外部触发、时钟、同步信号的接收和分发工作。

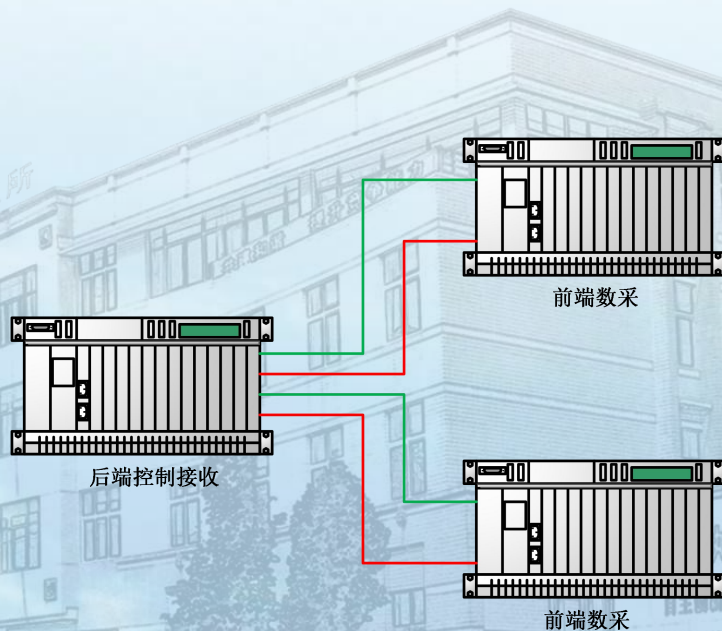




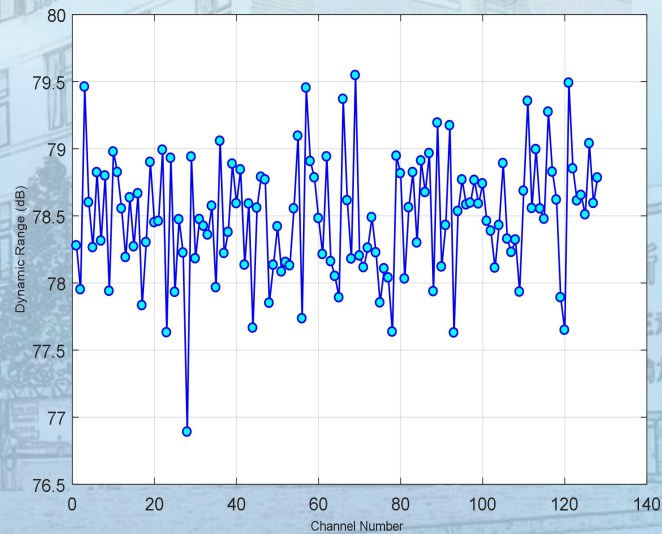
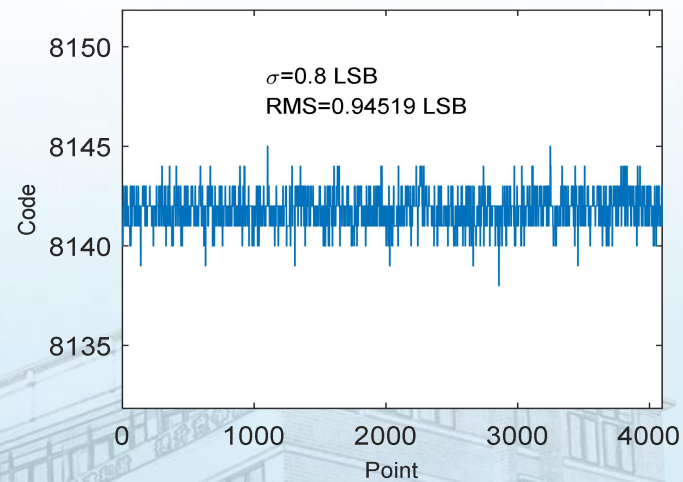
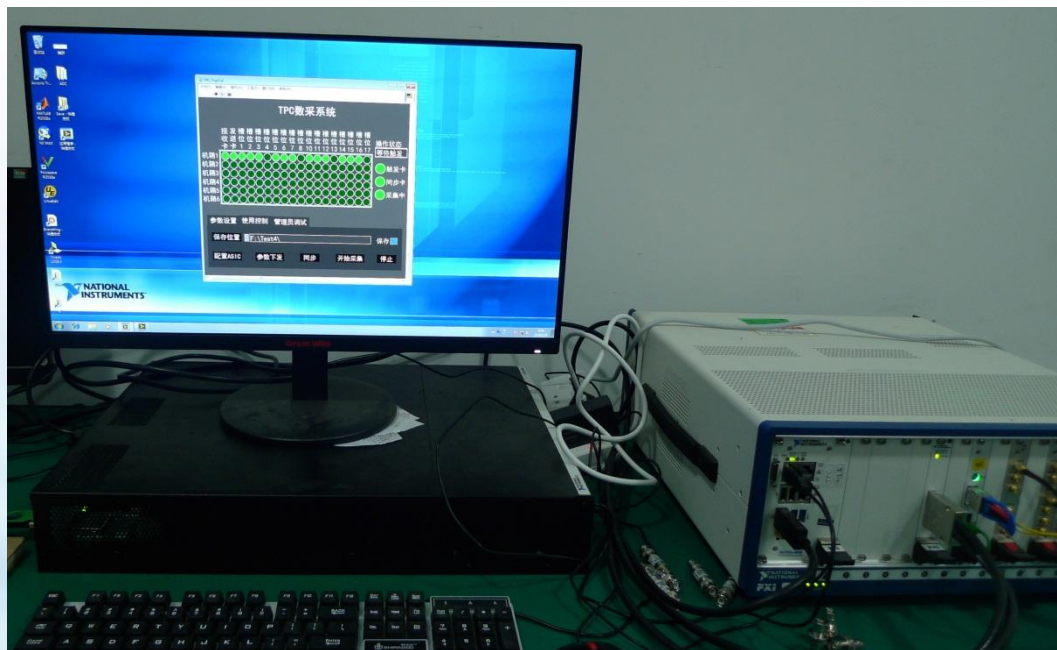
电子学系统

3、数采电路

后端控制接收机箱使用NI PXIe-1095标准机箱，机箱内插接有时钟卡、同步卡、触发卡、数据接收卡和存储控制器。



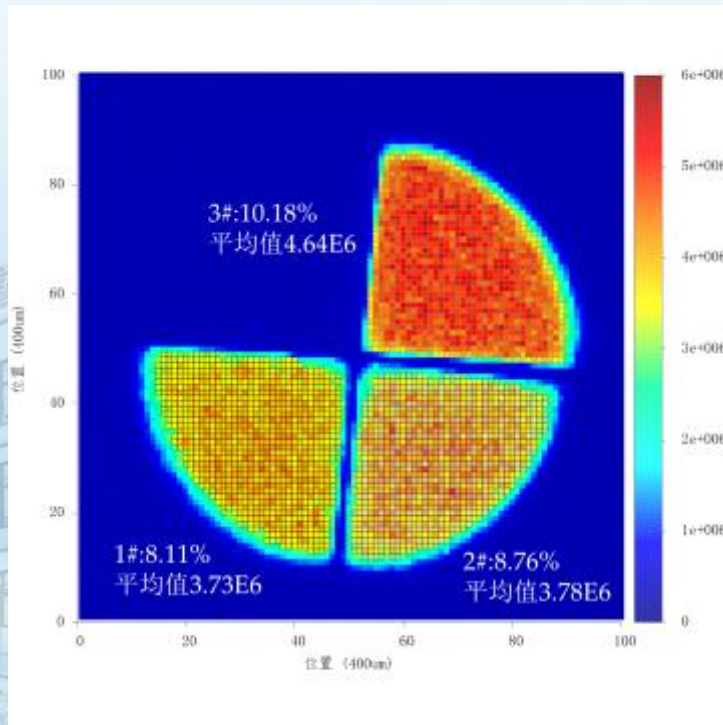
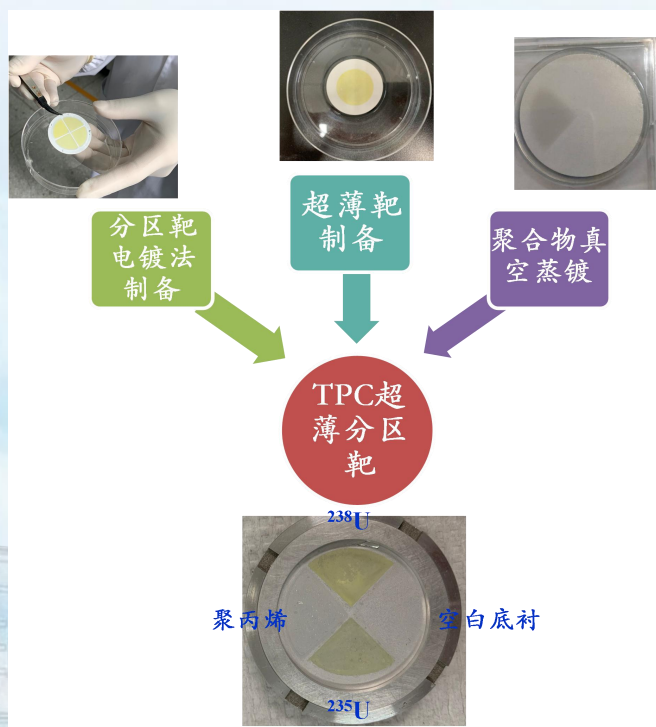
电子学系统



实验用靶制备

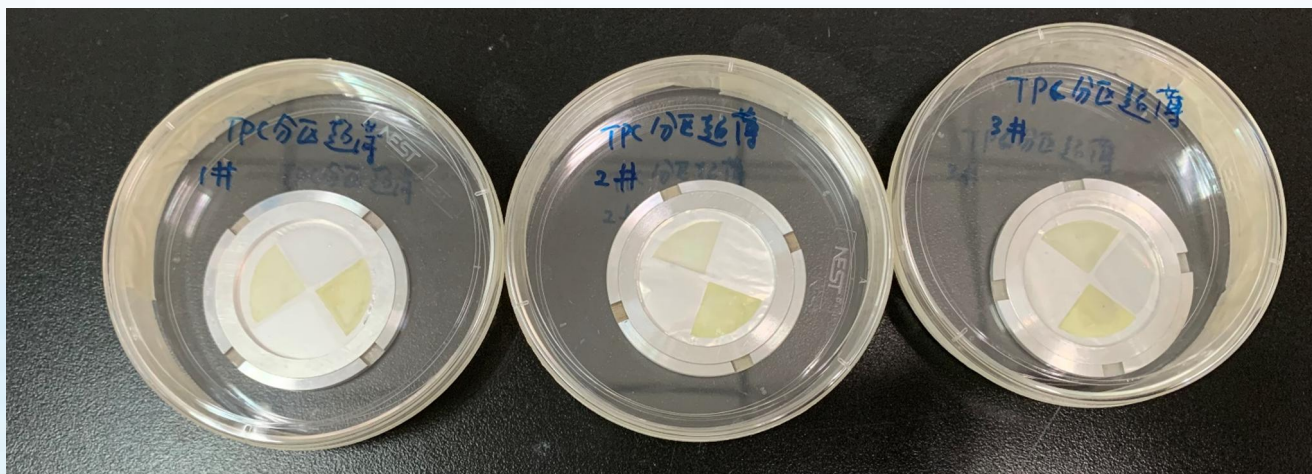
全电镀工艺的多元素靶件制备工作包含模拟计算、特种电镀装置的设计与加工以及工艺研究。

国内首次完成TPC超薄分区靶件的制备，镀层不均匀性达到8%左右。





实验用靶制备



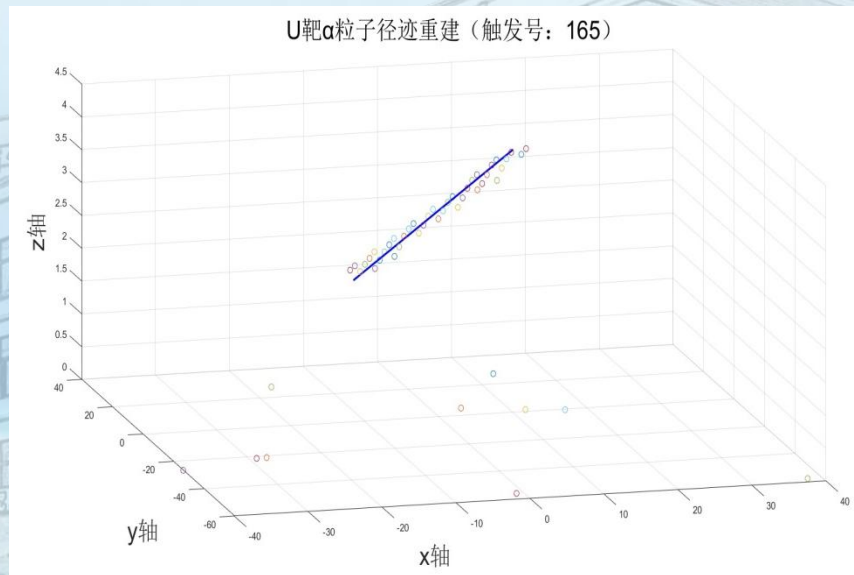
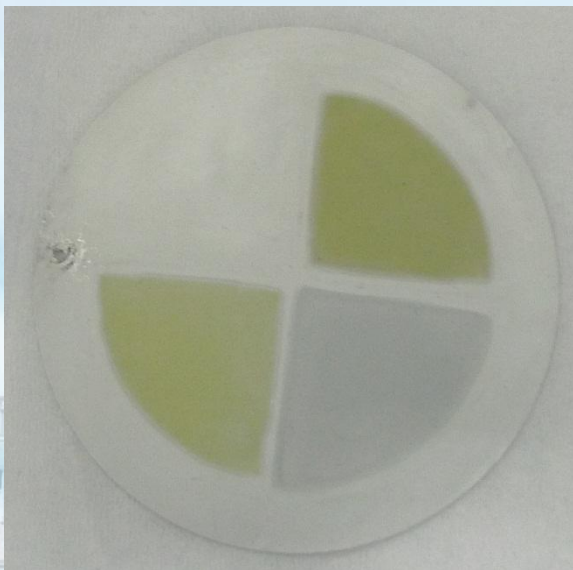
超薄分区靶，含 ^{235}U 、 ^{238}U 和含氢材料
(硬脂酸甘油酯)

责任 执行 创新 卓越
自主创新 军民融合 三元发展
建成在核科技领域有重要影响力的研究所



实验进展-靶核数及分布测量

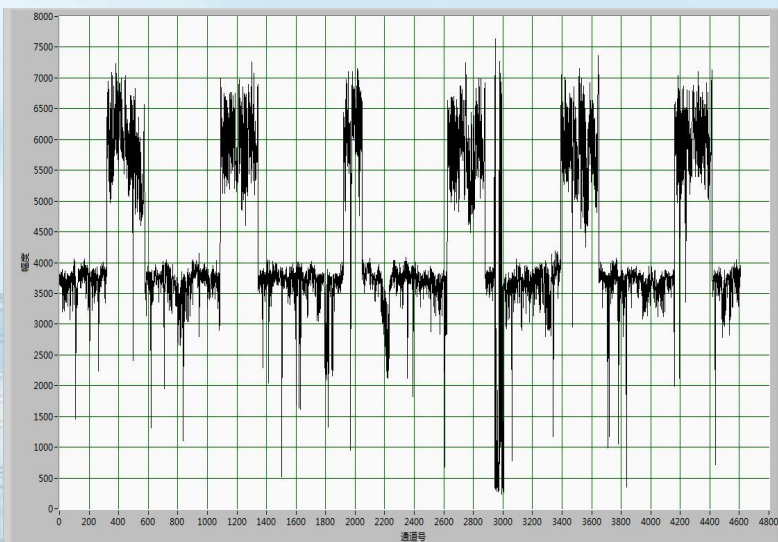
将实验用靶（U靶）放置于TPC探测器阴极，测量 α 粒子信号，通过准确的同位素丰度获取需要的靶核数。同时，根据 α 粒子的径迹起点，得出 α 粒子的二维位置分布，既靶核的二维位置分布。



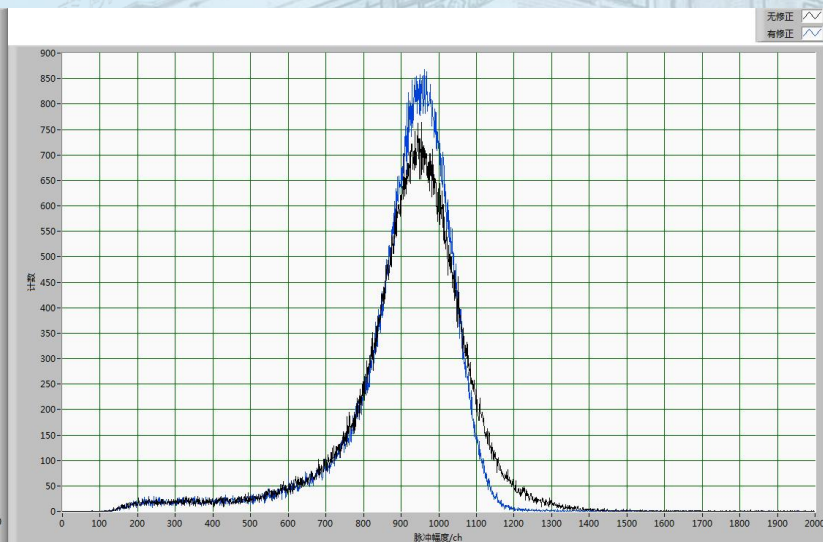


实验进展-靶核数及分布测量

在径迹重建时，发现 α 粒子径迹上的部分pad的信号幅度异常，经分析认为是ASIC前放的增益不一致引起的，因此将信号发生器的输出信号分为64通道，每通道连接2pf的电容，给每张板子的所有通道注入电荷，通过数采系统进行信号采集，并获取脉冲波形的幅度作为修正系数。



修正系数

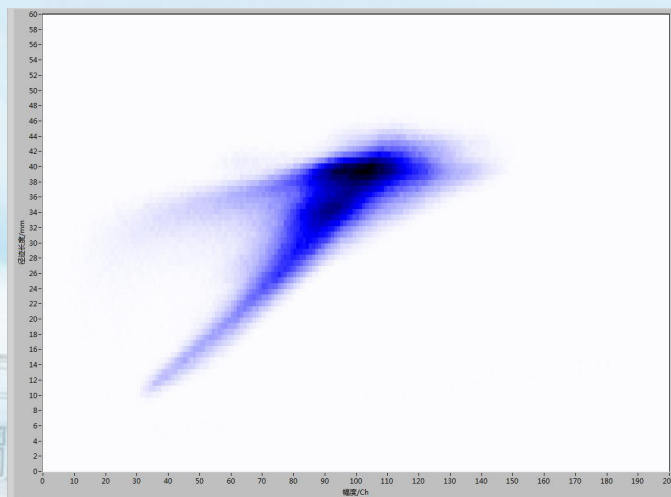


有无修正时的能谱

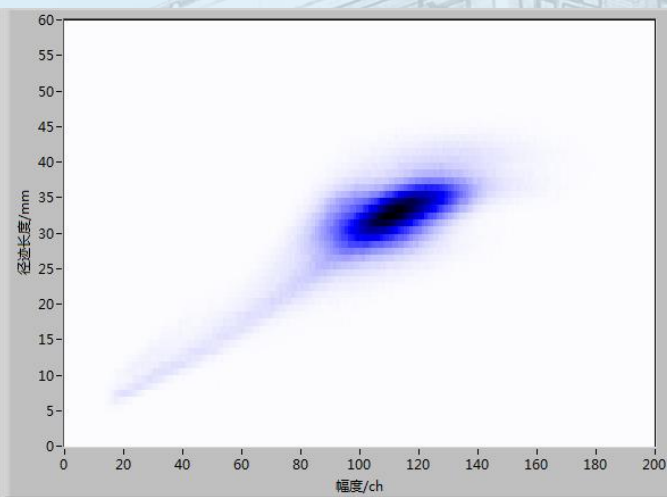


实验进展-靶核数及分布测量

当 α 粒子垂直于pad的方向入射时，由于投影面积很小，读出的pad数较少，使得径迹的重建比较困难，难以准确的重建粒子的径迹。为了获得准确的 α 粒子数，同时提高裂变碎片与 α 粒子甄别的效果，使用信号的弹道亏损效应进行修正。



无修正



有修正

执行 创新 卓越

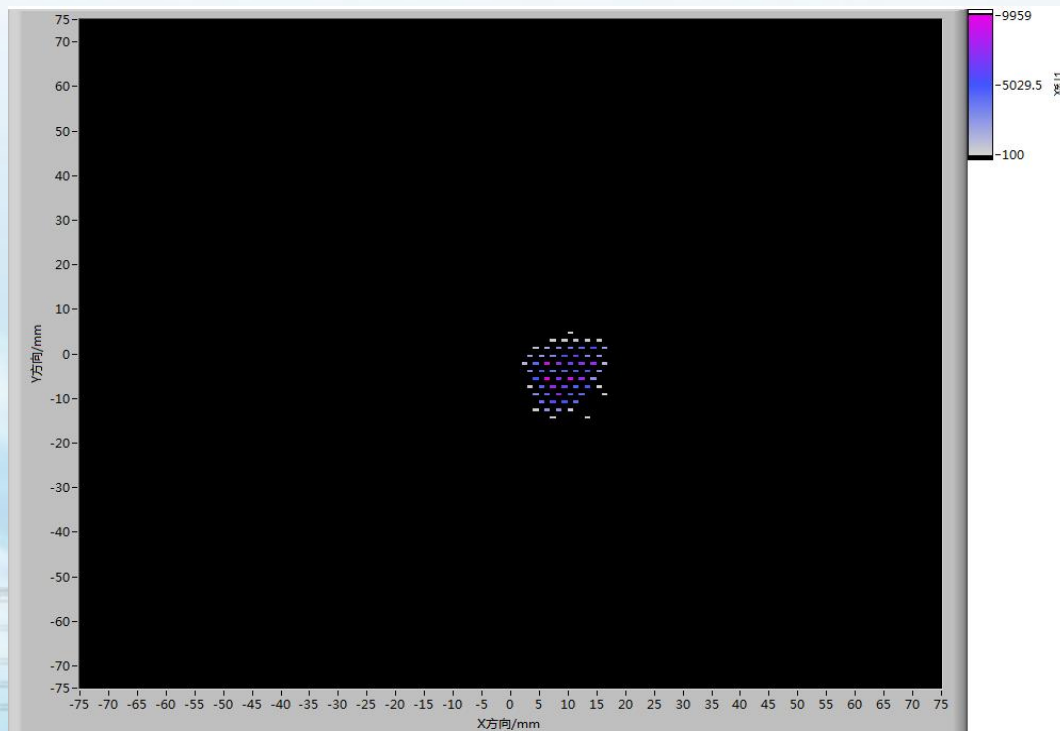
创新 军民融合 三元发展

中国科学院核物理研究所



实验进展-靶核数及分布测量

对数据进行了预处理，得到带电粒子径迹起点的pad编号，将其进行二维位置统计，获得 α 粒子二维分布图。



U-235靶核二维分布图



实验进展-质子数及分布测量

使用两片厚度约 $8\mu\text{m}$ 的铝箔将高纯聚乙烯膜（半径约15cm的1/4圆）夹在中间，铝箔用压环固定，将压环固定于TPC探测器内阴极板上。将TPC探测器移至PD300大厅，放置于束线II的 0° 角方向，阴极板中心位置距离氘靶约30cm。



责任执行 创新卓越
自主创新 军民融合 三元发展
建成在核科技领域有重要影响力的研究所

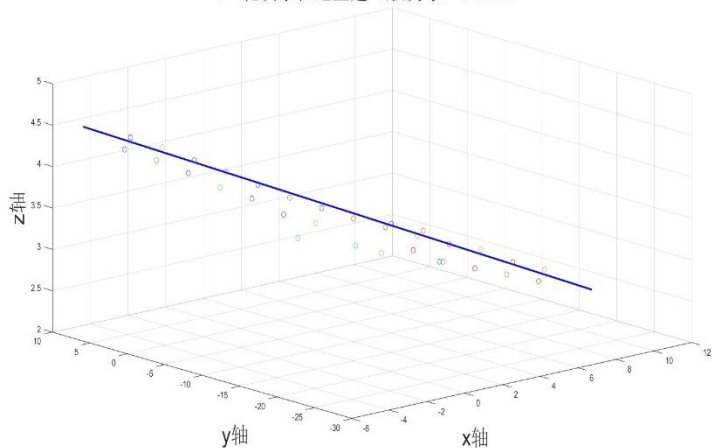


实验进展-质子数及分布测量

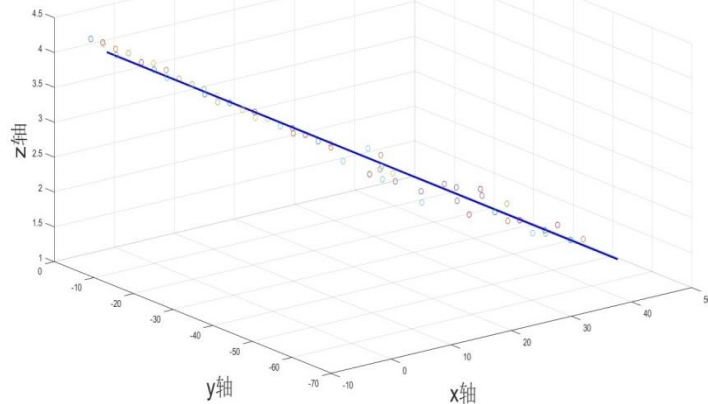
使用**Ar (90%) + CF₄ (10%)**，气压**100kPa**。

使用**DD**中子源进行质子测量。从径迹的起点和长度推测，径迹为质子或宇宙射线。

PE靶质子径迹重建 (触发号: 12598)



质子径迹

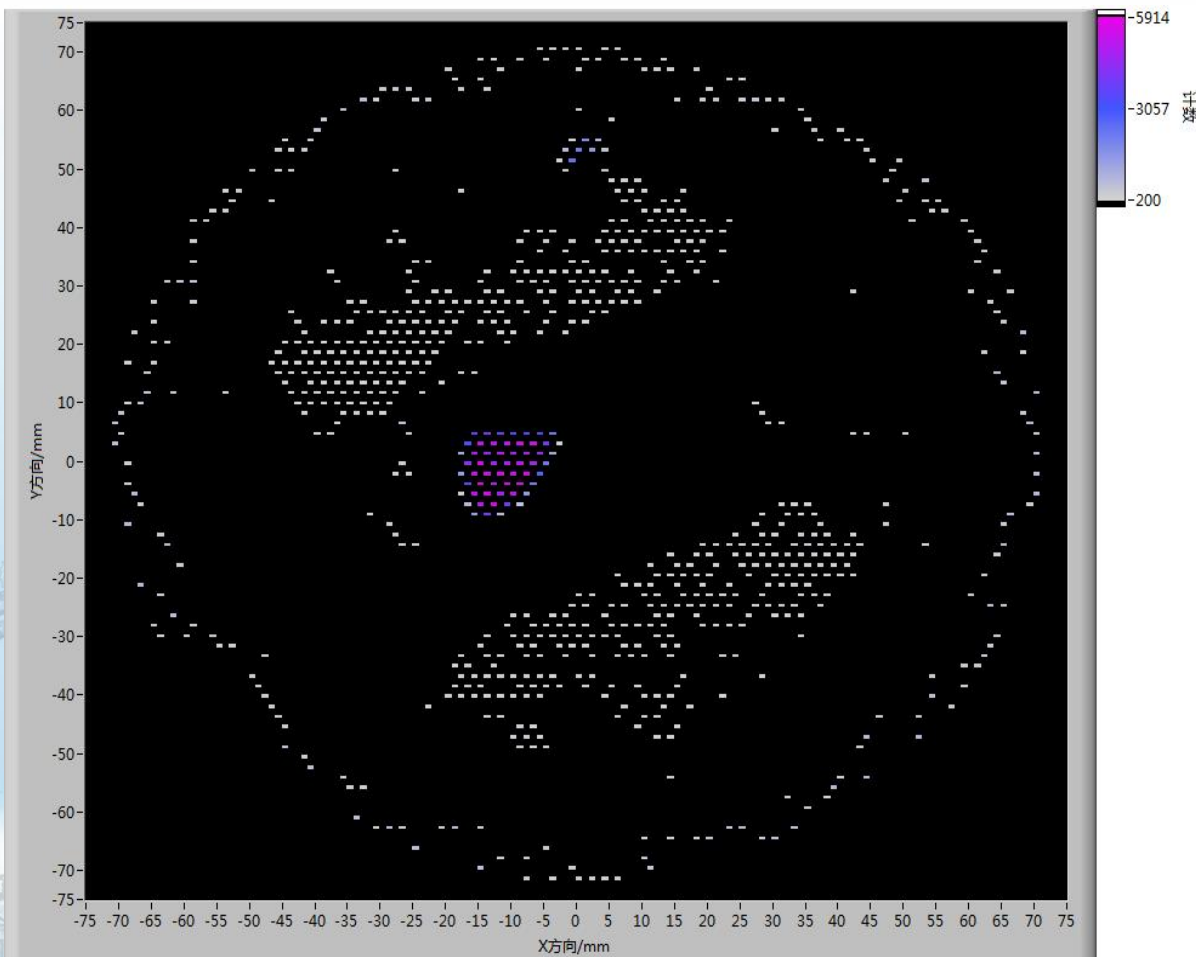


宇宙射线径迹



实验进展-质子数及分布测量

中心偏左下部位有一高计数区间，接近1/4圆，此处与放置PE膜位置重合，为PE膜上出射质子的径迹起点。在直径约150mm的圆上近似一圈的径迹起点为阴极外围PCB板（阴极板为PCB板，中间为直径150mm的铝板）上的H与入射中子反应生成的质子。其余部位为宇宙射线引起的径迹。

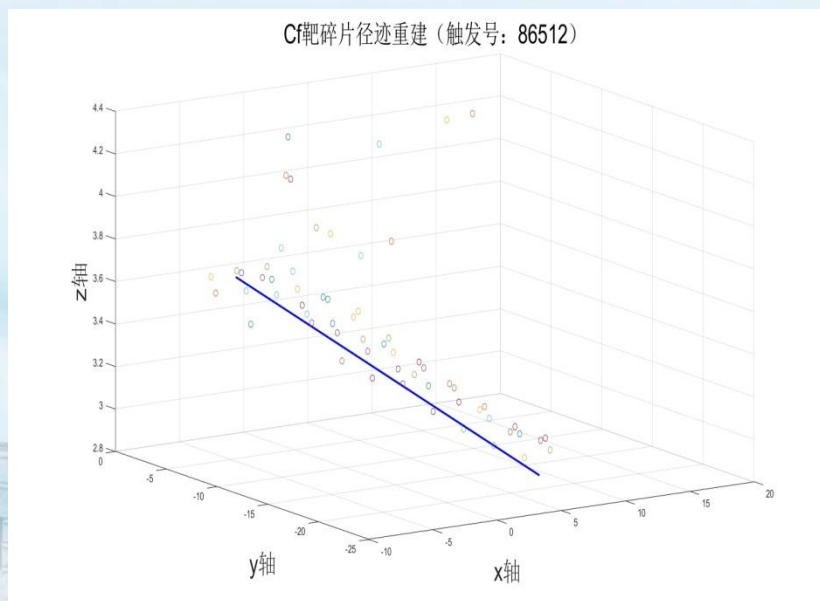


质子靶核二维分布图

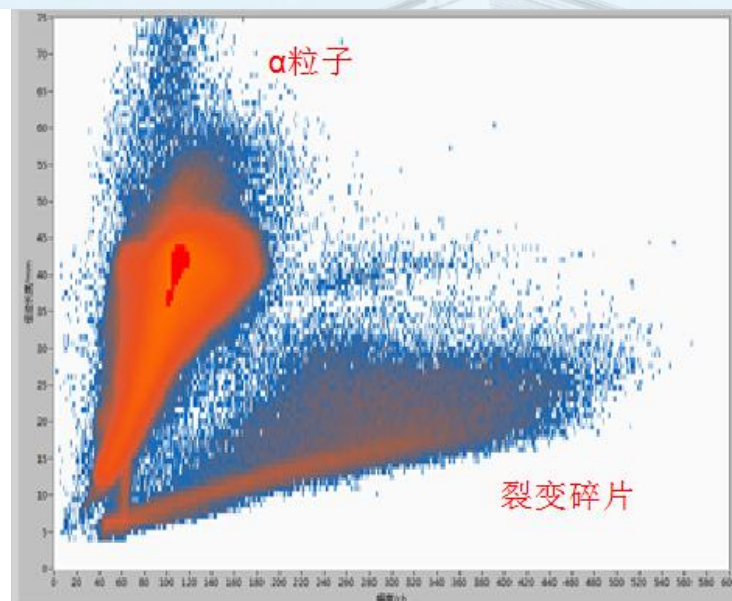


实验进展-能量-长度二维分布

将**Cf-252**镀片置于**TPC**探测器阴极中心，进行裂变碎片与 **α** 粒子甄别实验。使用**P10**气体气压控制在**100kPa**。



碎片径迹



碎片与 α 粒子的能量-径迹长度二维分布图



下一步安排

➤ 探测系统性能优化

1. 改变阴极板结构和信号引出方式，提高信噪比，为下一步白光源上提取时间信号做准备；
2. 增加电磁屏蔽外壳，降低干扰；
3. 将阴极输出、**GEM**输出信号通过差分前放送入数采系统进行脉冲幅度采集，替代pad信号进行总脉冲幅度测量，提高能量分辨。

➤ 实验测量

在白光源上进行快中子能区（**100keV~20MeV**）**U、Pu**的高精度裂变截面测量。

➤ 数据分析

1. 优化径迹重建程序，准确获取粒子径迹长度、**dE/dx**和起点；
2. 不确定度的分析。



核物理与化学研究所
INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS AND CHEMISTRY

谢谢!

