



裂变截面测量用TPC进展

核物理与化学研究所
郑 普

2019-09-17

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

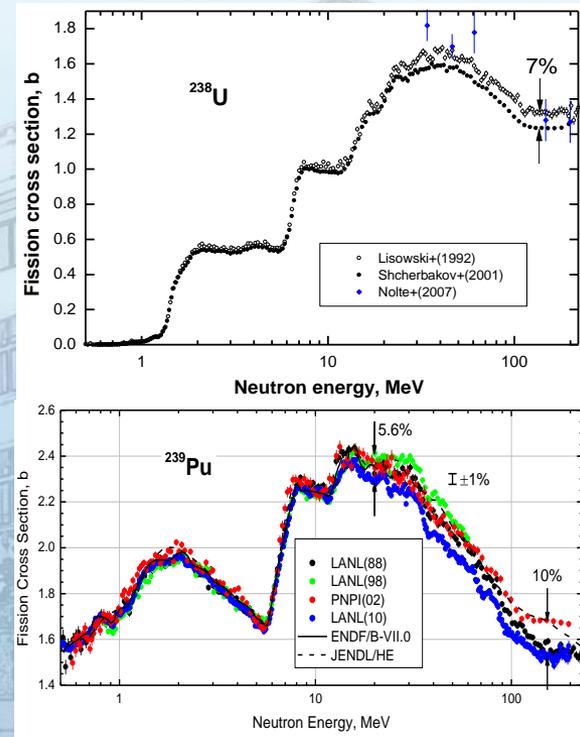
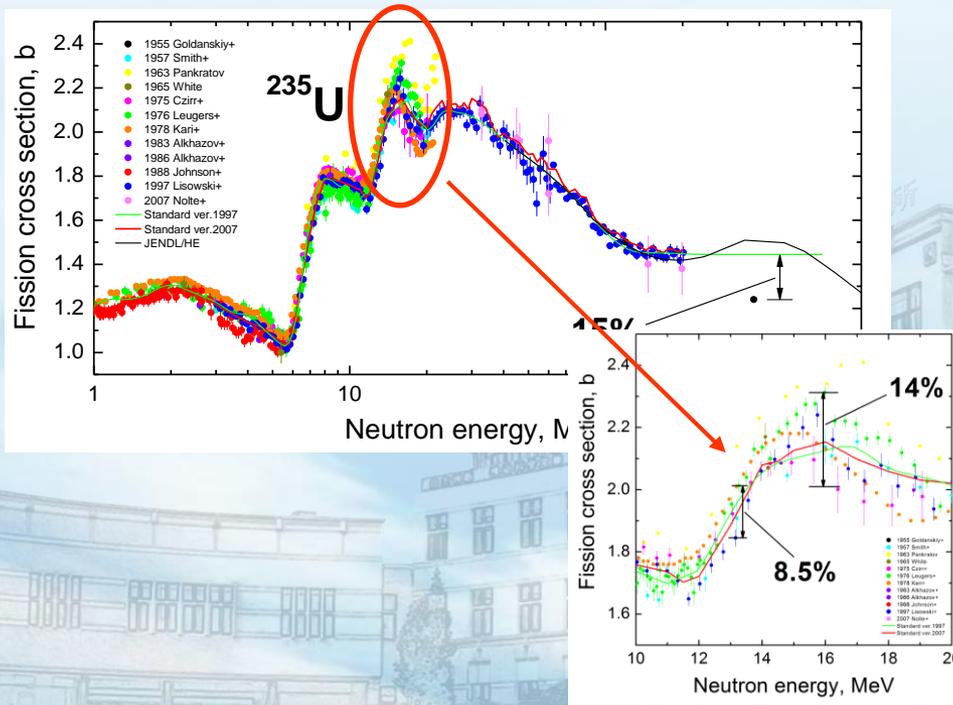
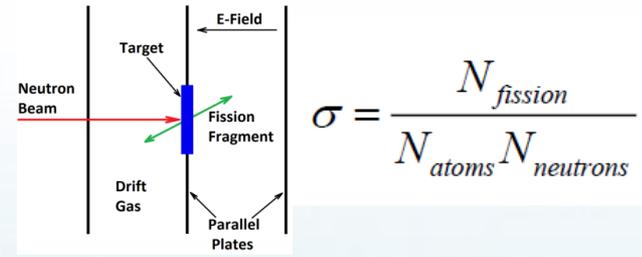
目 录

- 引 言
- 目 标
- 实验进展
- 靶与电子学



引言

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

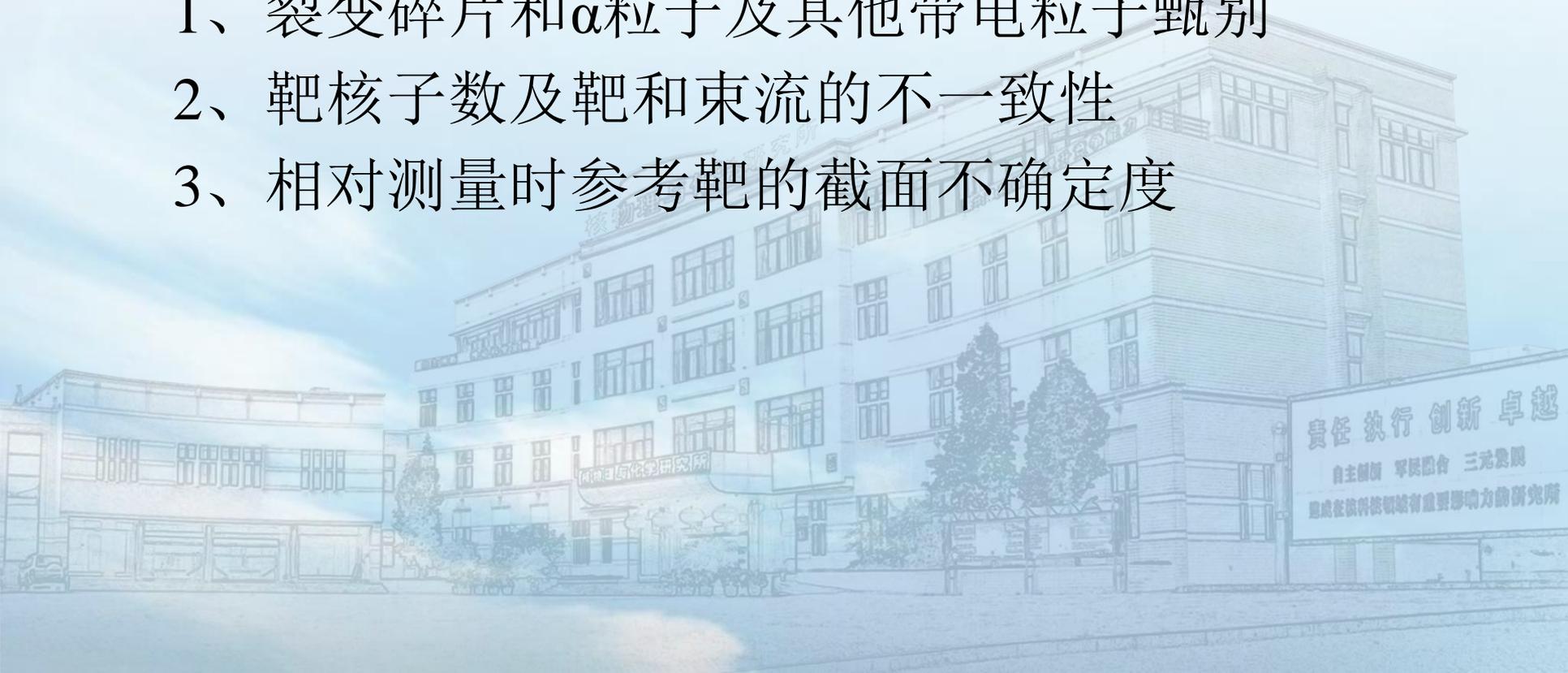


创新卓越
三元发展
重要影响力研究所

引言

截面误差主要来源:

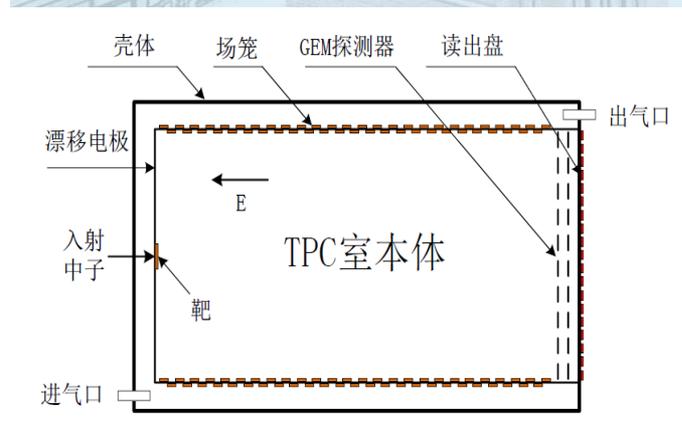
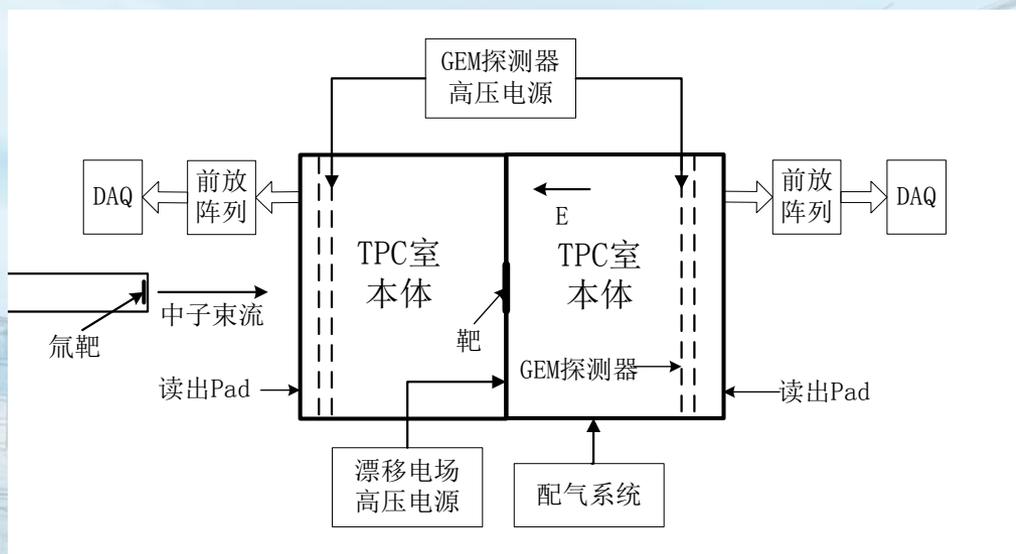
- 1、裂变碎片和 α 粒子及其他带电粒子甄别
- 2、靶核子数及靶和束流的不一致性
- 3、相对测量时参考靶的截面不确定度



引言

裂变TPC实验原理

入射中子与置于阴极的实验用靶发生裂变反应产生的裂变碎片分别在两个腔室中电离，电离信号被**GEM**读出探测器接收到，通过数据重建获得能量和径迹信息；实验用靶为含H材料时，可以测量反冲质子信号。有无入射中子时，均可测量衰变 α 信号。

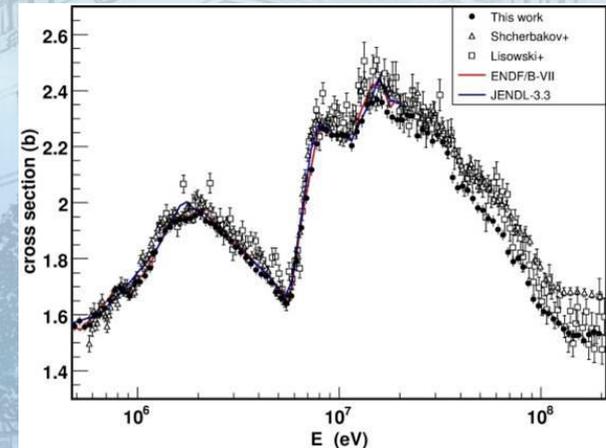
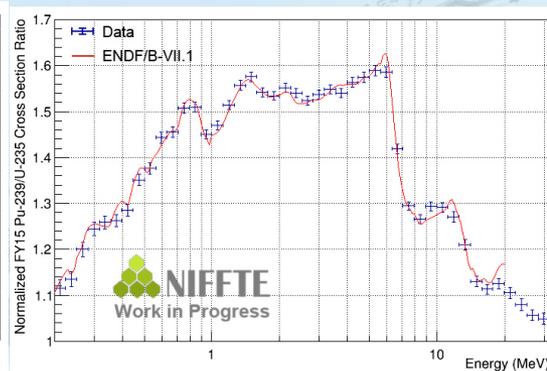
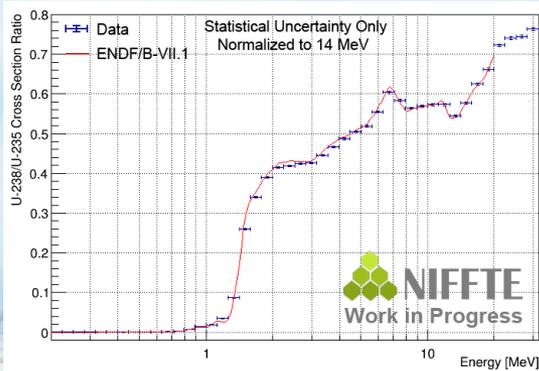


引言

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



High Precision Neutron-Induced Fission Cross Sections Using a Time Projection Chamber. Sixth International Conference on Fission and Properties of Neutron-rich Nuclei, 2016-11-06/ (Sanibel Island, Florida, United States)

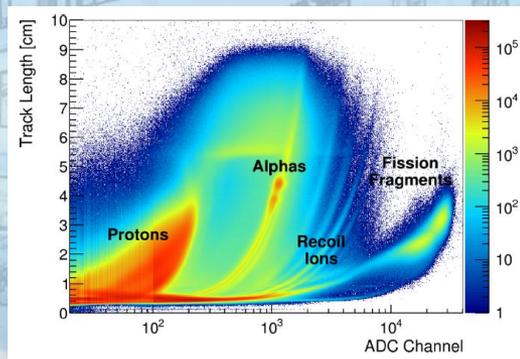
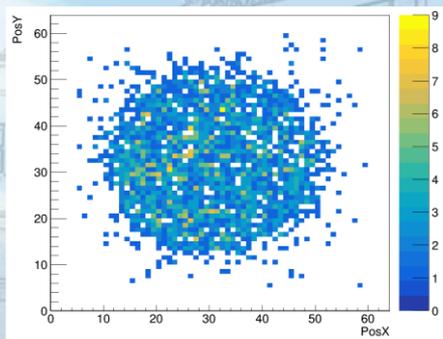
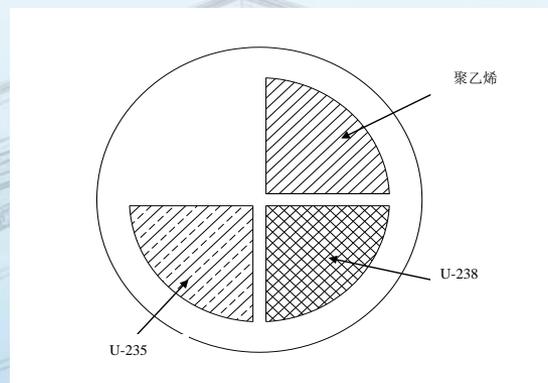
引言

在一块靶上不同区域分别镀上 ^{235}U 、 ^{238}U 和含H材料。精确测量靶上H核数后，可通过测量质子（H（n，n）反应，0.2%精度）来精确相对测量 ^{235}U 、 ^{238}U 的裂变截面。

中子通量可使用PE靶，利用H（n，n）反应来实现，分布采用工作气体中的H来实现。

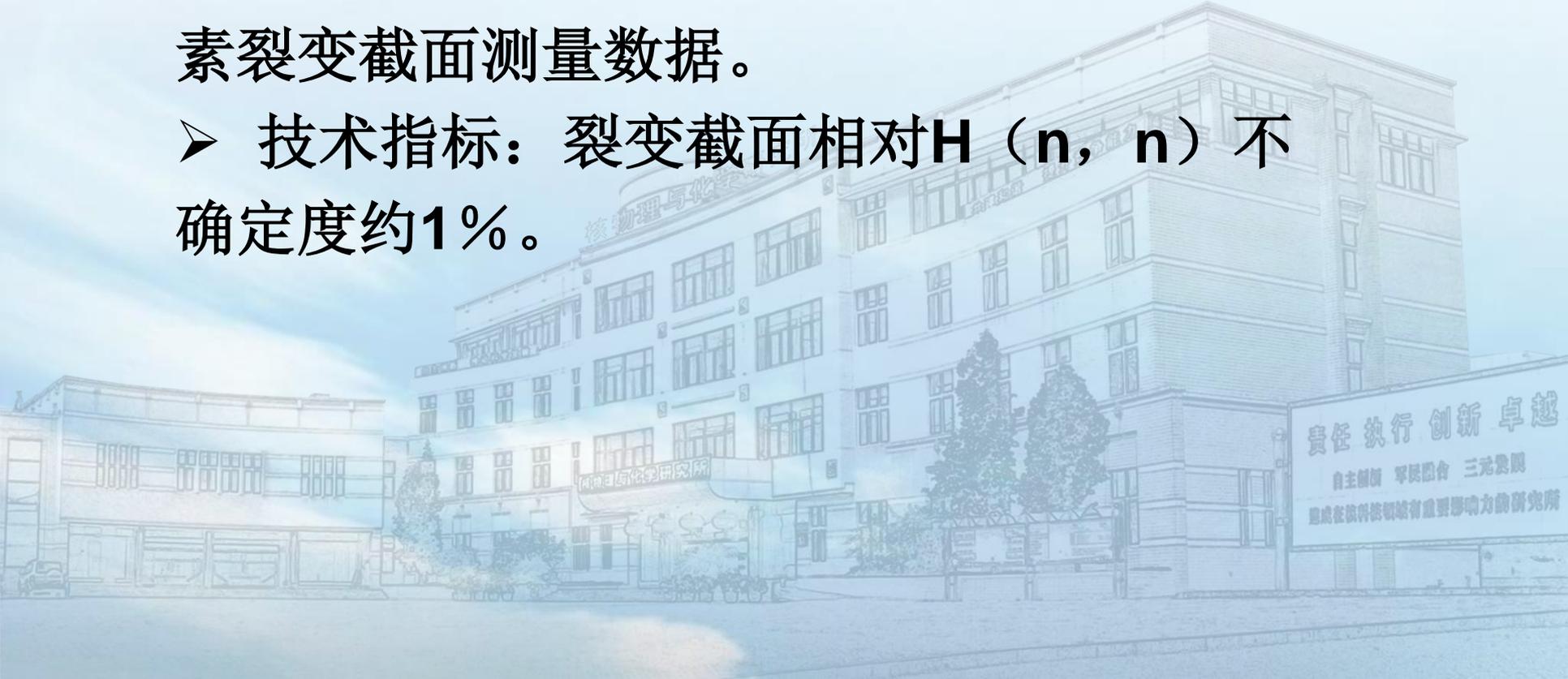
靶核数及分布通过测量 α 粒子来实现。

裂变事件数通过测量碎片来实现，需要实现碎片、 α 粒子、质子和其它反冲核的甄别。



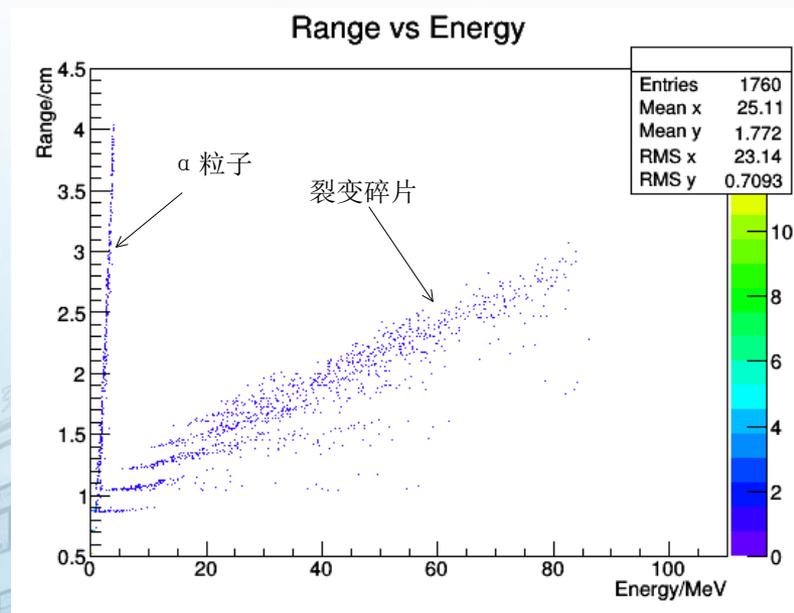
目标与技术指标

- 目标：利用裂变TPC获得入射中子在100keV~20MeV能区 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 等核素裂变截面测量数据。
- 技术指标：裂变截面相对 $H(n, n)$ 不确定度约1%。



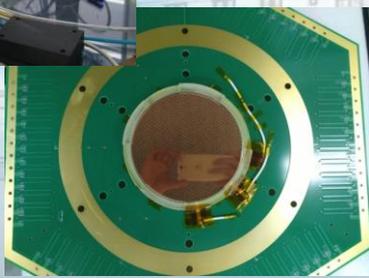
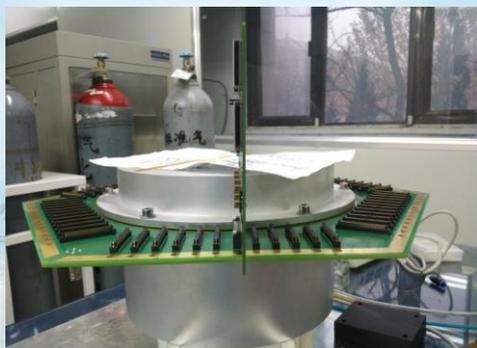
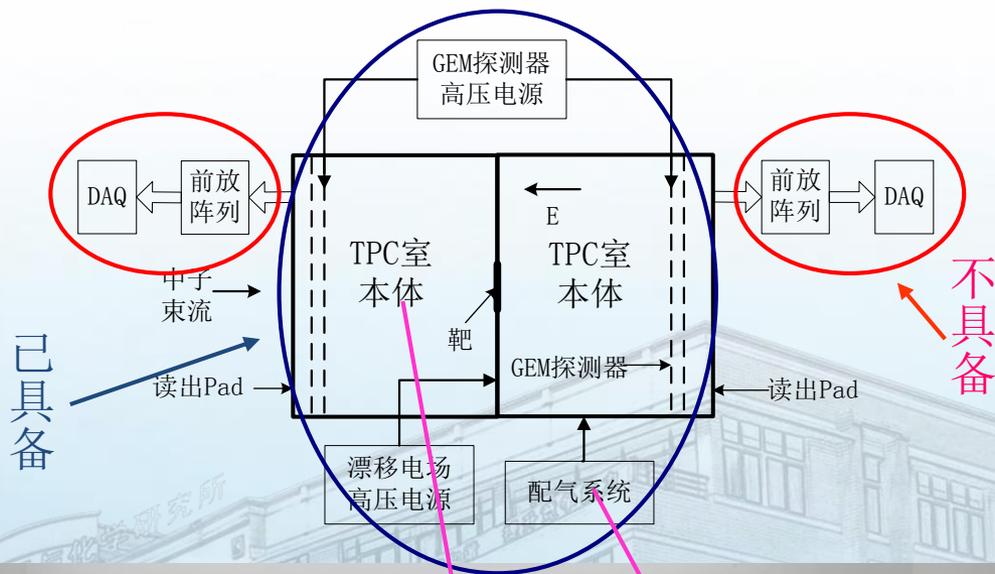
目前进展

使用**Geant4**软件完成带电粒子在工作气体中沉积能量，产生径迹。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。模拟了 α 粒子与裂变碎片的射程随能量的关系。



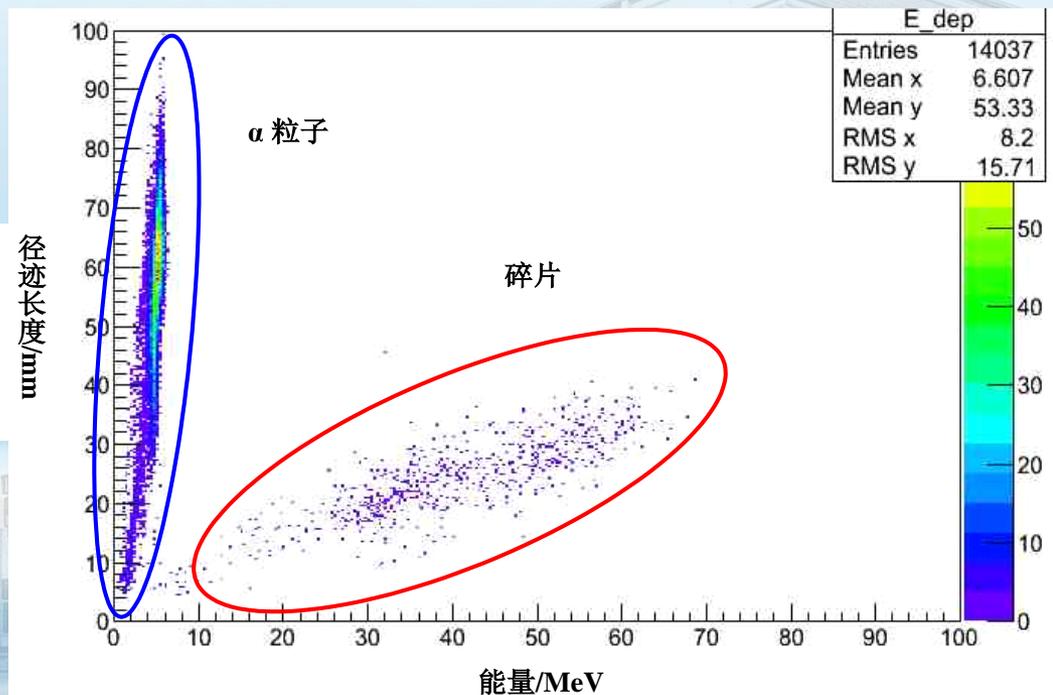
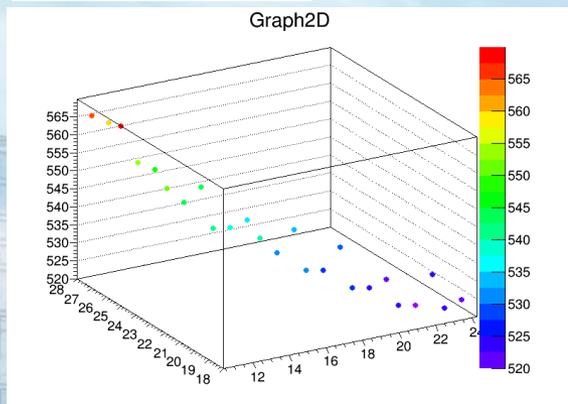
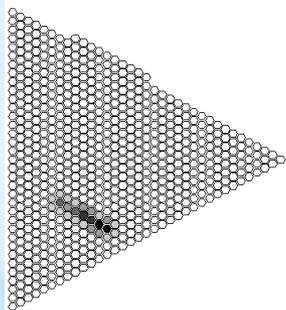
目前进展

课题组建立了TPC探测器原理样机，由配气仪、TPC流气室、电子学系统组成。TPC流气室由阴极（放置靶片）、场笼、读出探测器、读出pad组成。读出探测器采用GEM探测器，由两层GEM膜组成，放大倍数约30倍。读出pad直径150mm，由边长2mm的正六边形组成，共约4600路。



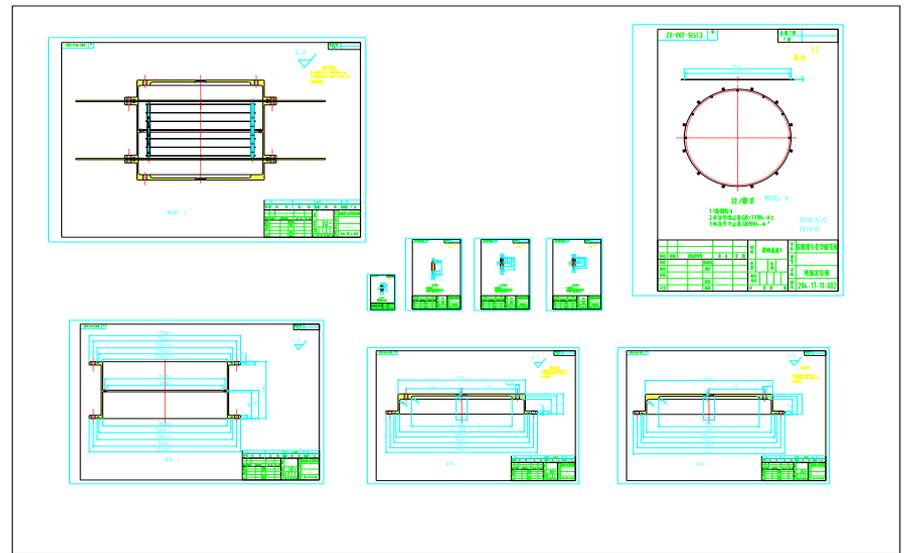
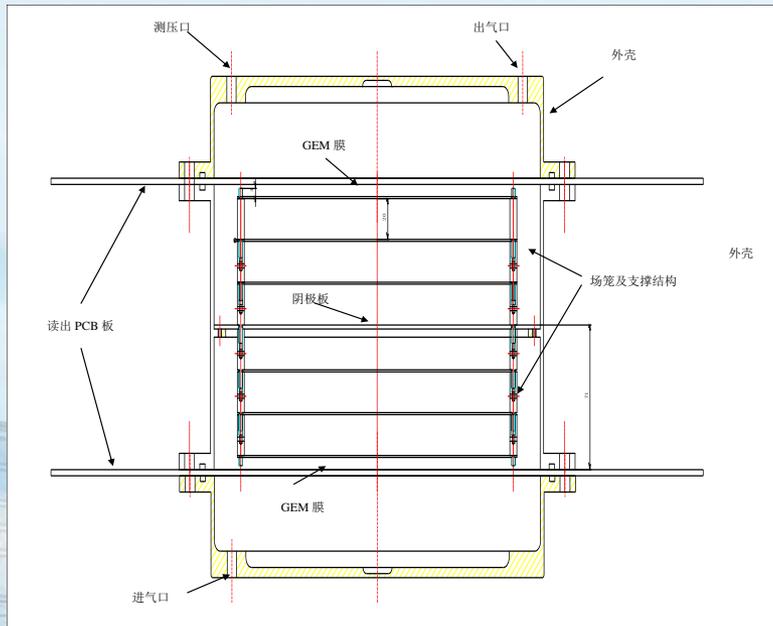
目前进展

使用部分电子学系统（动态范围100: 1），对TPC探测器的部分性能进行的实验测试，获得了Cf-252裂变碎片与 α 粒子的甄别能力。但未能获得质子径迹，因为质子能损太小可能在阈值以下。



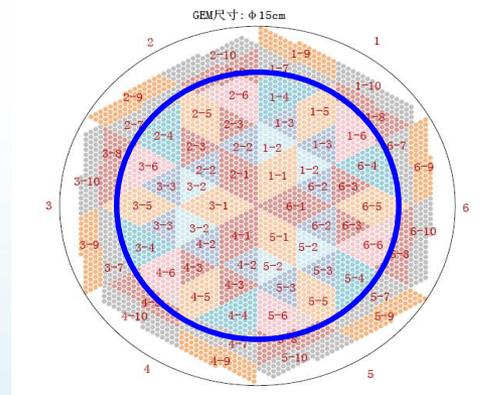
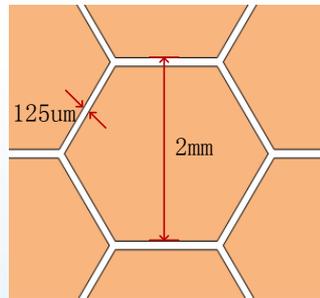
探测器设计

TPC探测器的正式实验机的研制包括TPC外壳、阴极板、场笼（柔性PCB板与支撑件围成）、GEM膜及读出PCB板。

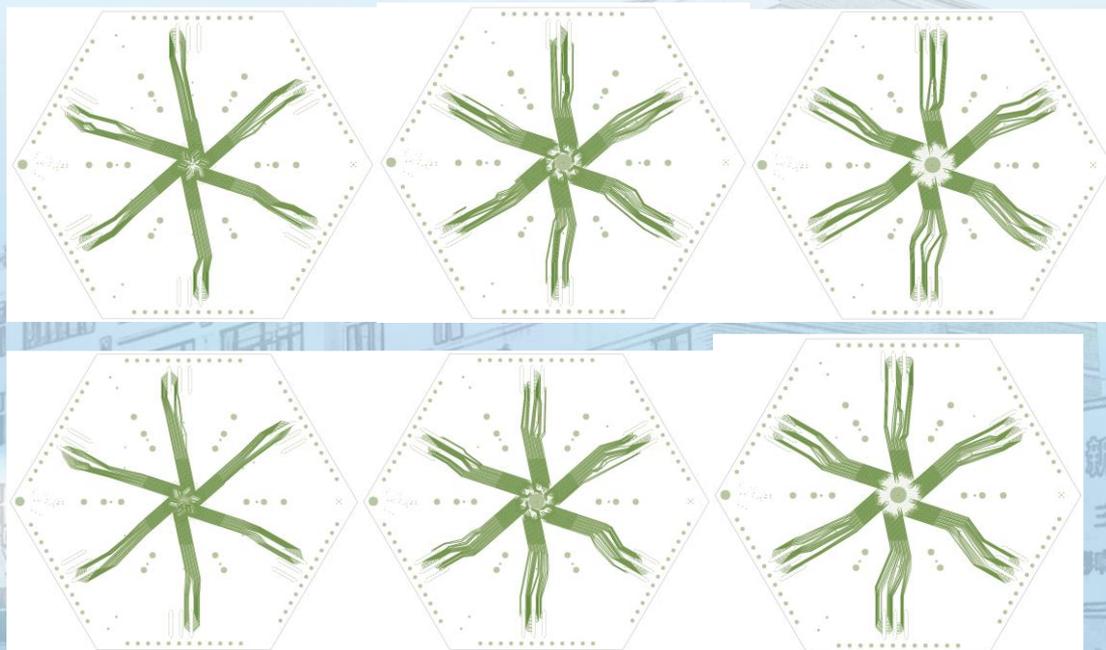


探测器设计

Pad形状如右图所示，Pad之间的间隙为 $125\mu\text{m}$ 。pad覆盖面积为 $\phi 15\text{cm}$ 的圆形。下图为部分图层的pad引线。在 1atm 的P10气体下，碎片的射程约 20mm 。

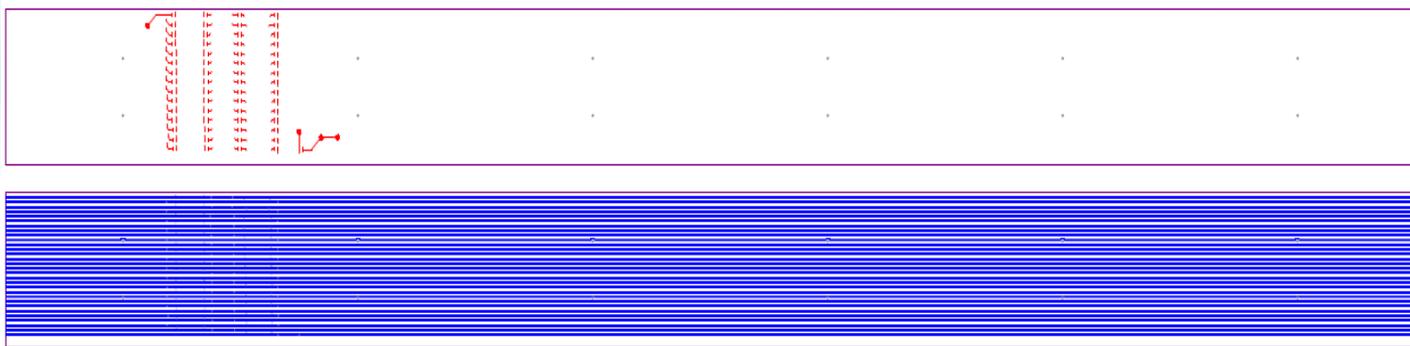


读出板使用SAMTEC的ERM8-100-05.0-L-DV-TR接插件，其中第5排针提供前放电源。前放板与数采电路使用SAMTEC的HDLSP-035-1000差分信号线相连。



探测器设计

围成场笼的柔性PCB板如图所示，场笼尺寸为 $\Phi 240\text{mm} \times 65\text{mm}$ ，对应的PCB板长度为 $\pi * 240\text{mm}$ ，宽度为65mm，柔性板为间隔2mm的宽2mm铜条组成，每两片铜条间连接5M Ω 电阻。



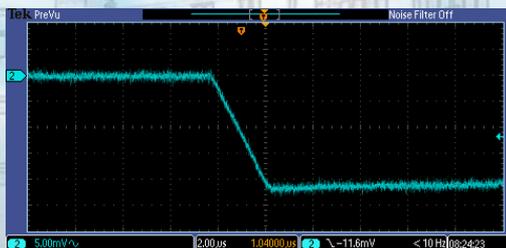
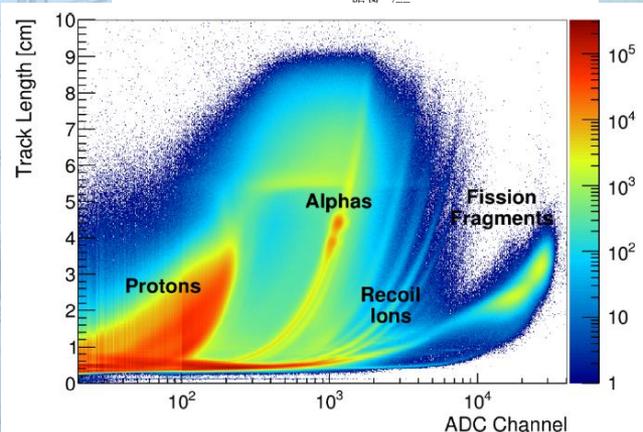
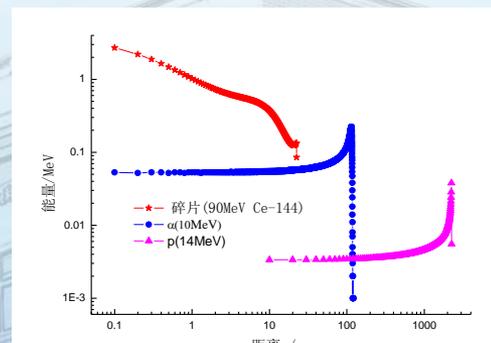
电子学要求

测量系统技术指标

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。对于工作气体和靶底衬的结构材料（Ar、Al、C），20MeV入射中子与其发生弹性散射，反冲核最大能量分别为（2.05MeV、2.755、5.68MeV），在工作气体中的最大能损分别为（0.7MeV、0.85MeV、1.43MeV）。

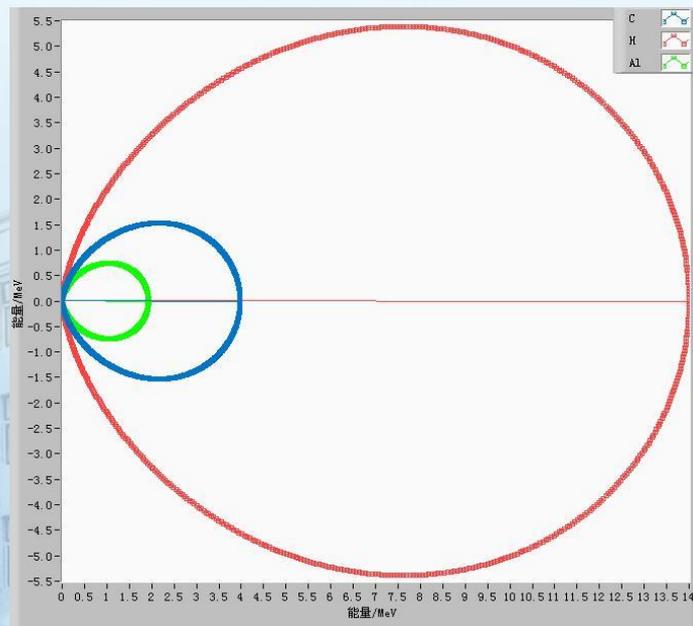
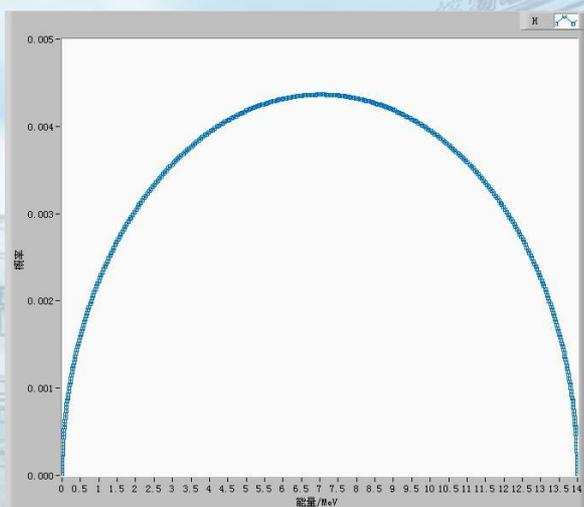
目前ASIC芯片动态范围约2000倍，还不能全覆盖。在沿中子方向进行质子、 α 粒子和碎片测量时，在正常测量质子信号时，碎片产生信号会饱和，因此需要在设计前放芯片时加入保护，使饱和信号不影响前放正常使用。

电子漂移速度约为5cm/ μ s，因此采样率最低40MSPS可满足采样需求。



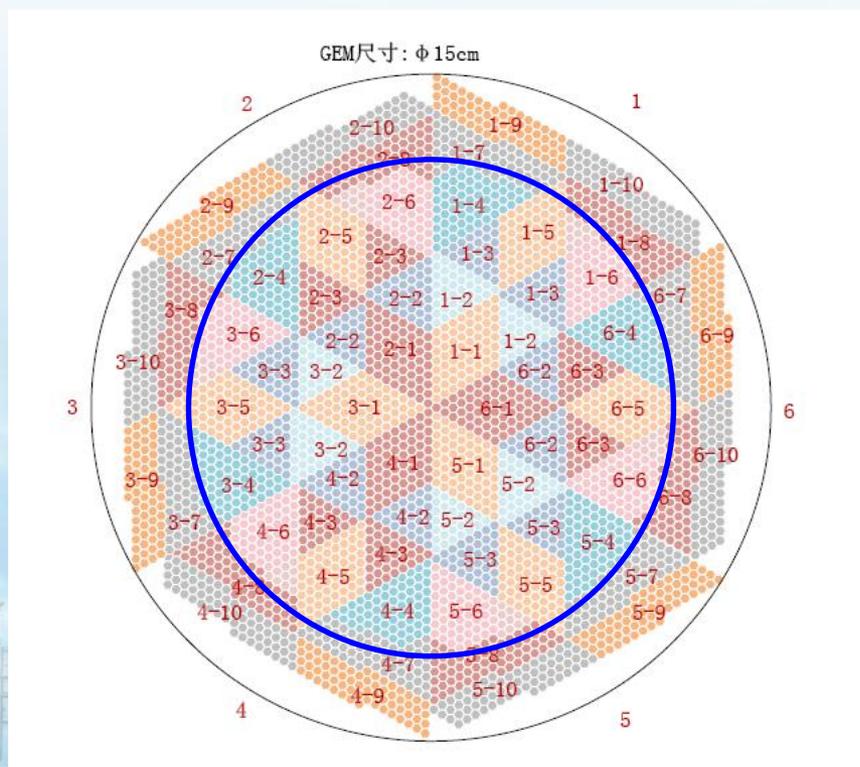
沿中子方向进行质子、 α 粒子和碎片测量时，在正常测量质子信号时，碎片信号会饱和，可能会打火影响前放正常使用。因此希望前放动态范围尽量大、噪声尽量低。

中子与镀在Al膜上的PE靶会产生三种反冲核。在白光源上C的反冲核影响尤其大。对于14MeV的入射中子，反冲核概率分布如下图，能量角度分布如右图所示。需要根据能量及径迹长度将其分开。



电子学要求

裂变TPC探测器的读出电子学系统需要电子学通道数约7680路（双面，覆盖 4π 立体角）。



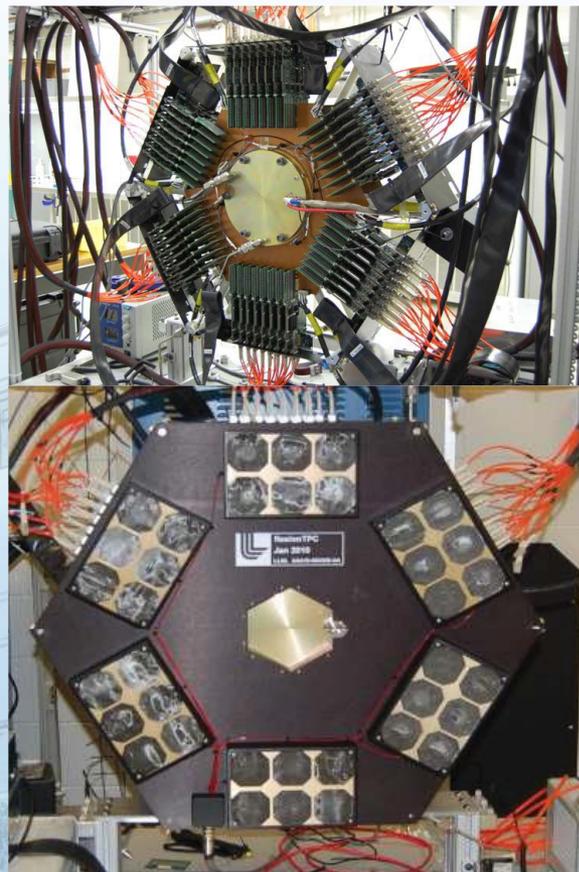
电子学要求

NIFFTE项目组的电子学系统

研制的电子学系统性能：动态范围
0.7fC~2.8pC，**0.9~1.75ADC @4096**，
增益约**4000**。噪声水平约**4400e**。

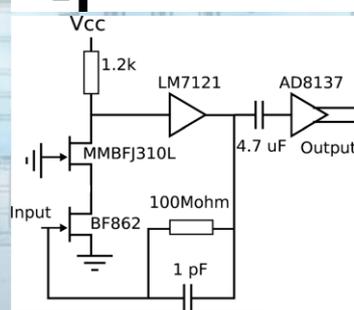
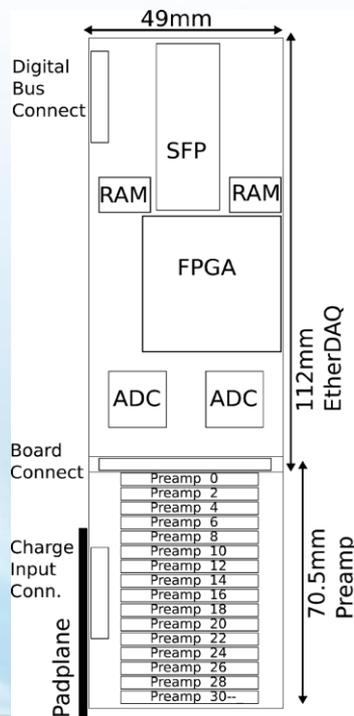
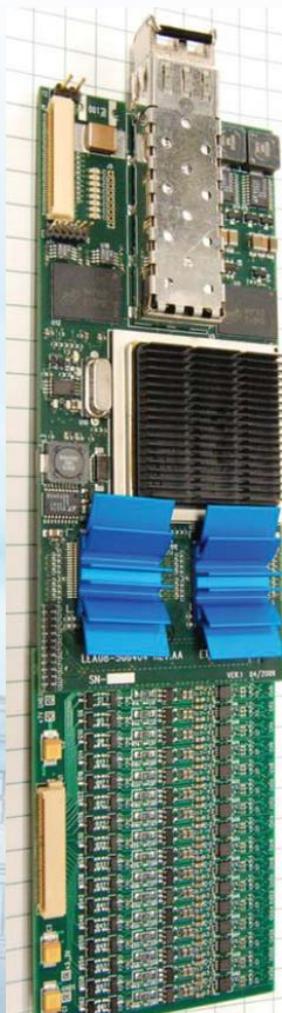
对于**5952路**电子学，总功率约**3.1kW**，
其中数字电路部分**2.4kW**，模拟电路部分
650W。背板后由**36个**风扇组成散热系统。

Channel Count	5952
Sampling Speed	up to 62.5 MHz
Cooling	Forced Air
Card Width	<50 mm
Space	40-50 Liters, Entire System
Dynamic Range	>2000
Max Signal Size	$\approx 10^7$ Electrons
Magnetic Field	None
Radiation Environment	Mild, Neutrons
Trigger	Self and Forced
Sampling	Synchronous Across all Channels
Sustained Data Rate	100 MB/s



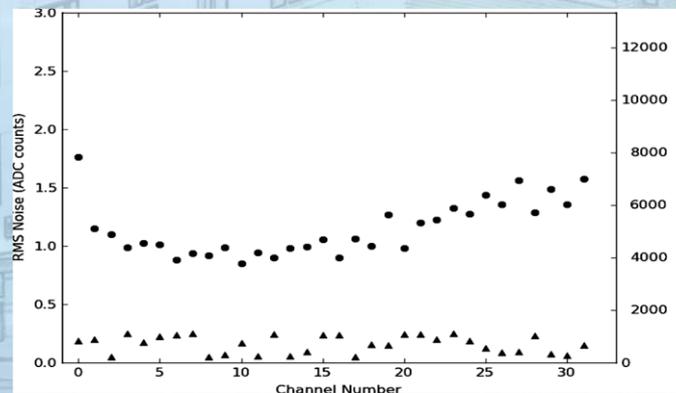
电子学要求

NIFFTE项目组的电子学系统



每块板卡有**32路**，尺寸为**2"×7"**，集成度较低。由于前面接的MicroMegas读出探测器易打火，因此前放容易烧坏。

ADC Texas Instruments ADS5272
FPGA Xilinx Virtex-5 XC5VLX110T
RAM two Micron MT48H16M32LF



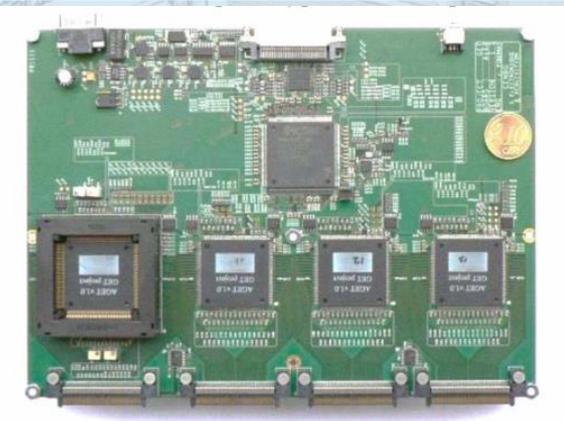
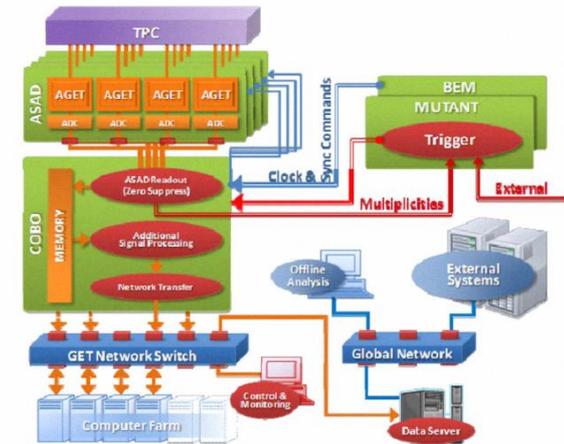
行创新卓越
军民融合 三元发展
科技有重要影响力的研究所

电子学要求

AGET通用电子学系统

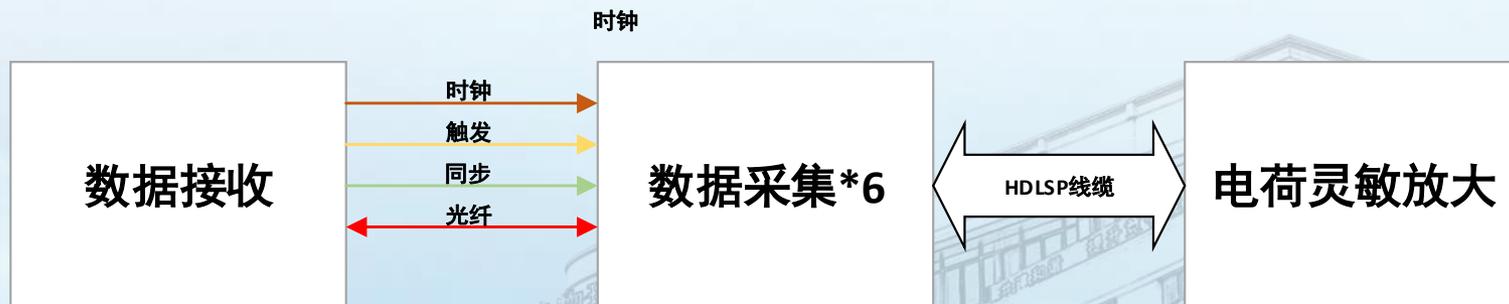
Parameter	Value
Polarity of detector signal	Negative or Positive
Channels number	64
Input dynamic range	120 fC, 240 fC, 1 pC, 10 pC Adjustable per channel
Output dynamic range	2 V p-p (differential)
I.N.L	< 2%
Resolution	< 850 e- (Gain: 120 fC; Peaking Time: 200 ns, C _{detector} < 30 pF)
Peaking Time	50 ns to 1 μs (16 values)
SCA time bin number	512 or 2x256 cells
Sampling frequency	1 MHz to 100 MHz
Readout frequency	25 MHz
Multiplicity signal	Analog "OR" of 64 discriminator outputs
Threshold value	4-bit DAC/channel + 4-bit DAC
Channel readout mode	Hit, selected or all
Test	1 among 64 channels or all
Power consumption	< 10 mW / channel @ 3.3 V

前放噪声太大导致动态范围（能测量到的最大信号与最小信号幅度之比）不够，无法测到高能质子产生的信号。



电子学系统研制

系统由三部分构成，第一部分为电荷灵敏放大，第二部分为数据采集子系统，第三部分为数据接收子系统。系统整体架构如下图所示：

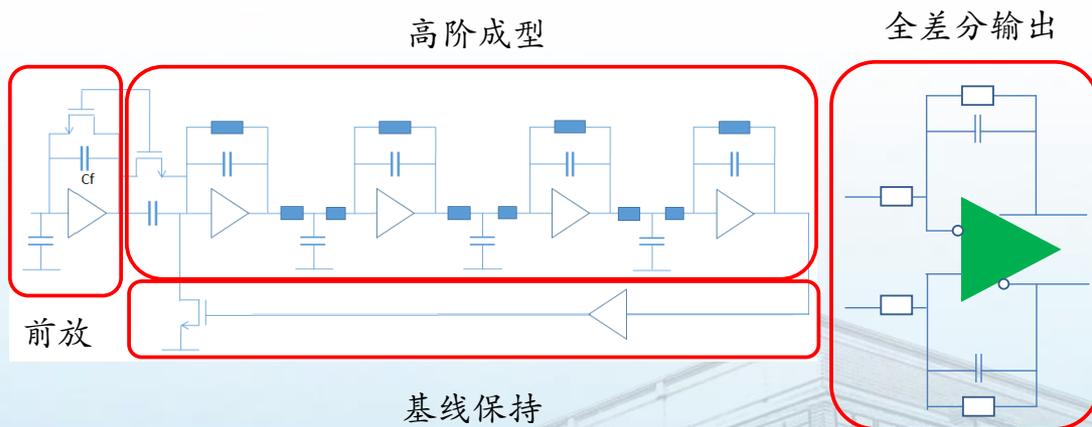


电荷灵敏放大部分由清华大学邓智课题组负责，放大器输出信号通过HDLSP线缆与数据采集板卡连接，每板卡有128路输入，每机箱有12张数采板卡，六个机箱共9216路数采通道。数采机箱通过光纤与上位机实现数据通信。上位机通过时钟、触发、同步三个信号控制数据的同步采集。

在**2019年11月**完成**18张**板子的调试。
在**2020年5月**完成全部的电子学系统研制。

电子学系统研制

前端ASIC芯片包括电荷灵敏前放、放大、CR-RC成形和全差分输出，其结构如图所示。每张前放板为64通道，板上放置两颗芯片，可驱动2m长高密度差分电缆（SAMTEC-HDLSP）连接至ADC。

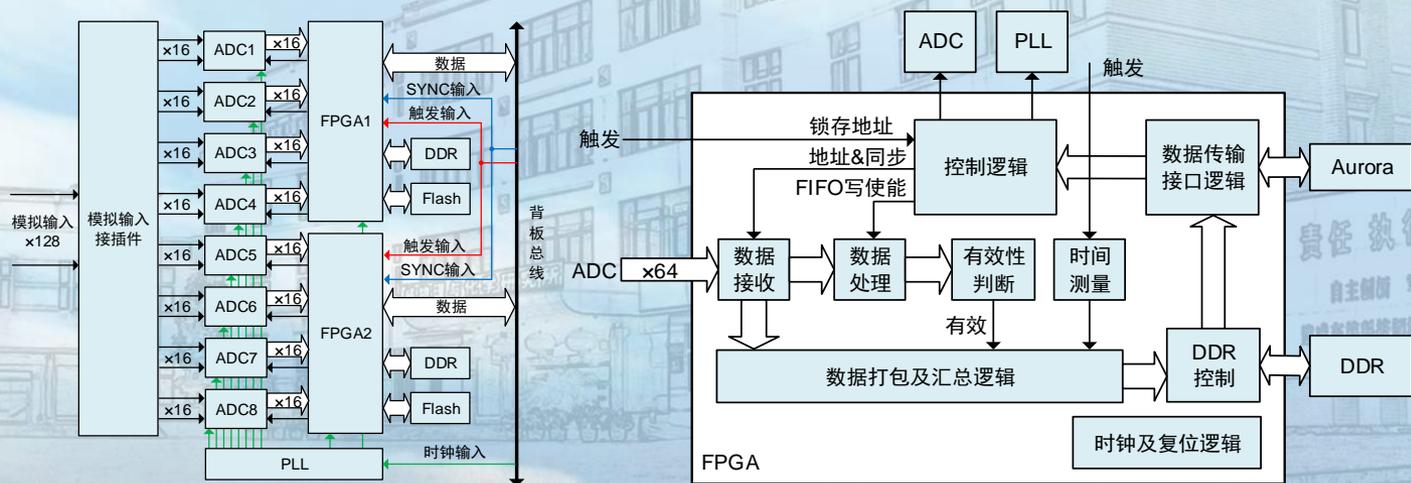


参数	值
极性	负
通道数	32
输入动态范围	50fC, 100fC, 500fC, 1000fC
增益	2mV/fC, 4mV/fC, 20mV/fC, 40mV/fC
成型时间	80ns, 160ns, 240ns, 320ns
差分输出电压	2V _{p-p}
共模电压	0.9V
功耗	10mV/Ch
成形时间	80ns, 160ns, 240ns, 320ns
电子学噪声	2000e@1pC

数采研制方案

数采机箱采用6U机箱，每个机箱插接12张数采卡，每张数采卡可接收128路信号输入。数据发送卡接收并打包12张数采卡采集得到的信号，使用40G光纤回传数据至后端。同时，数据发送卡把接收到的时钟、触发、同步信号通过背板路由至各数采卡。

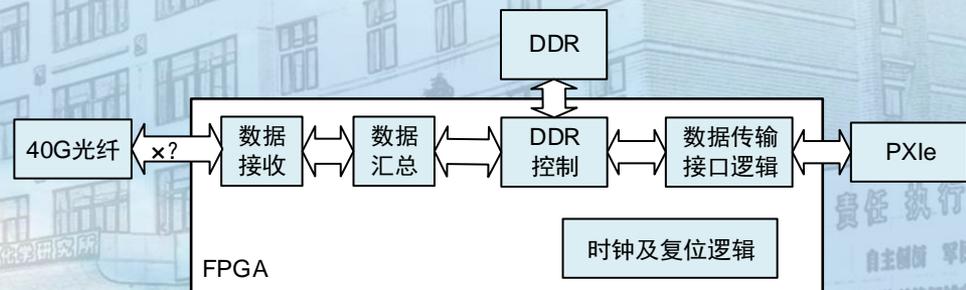
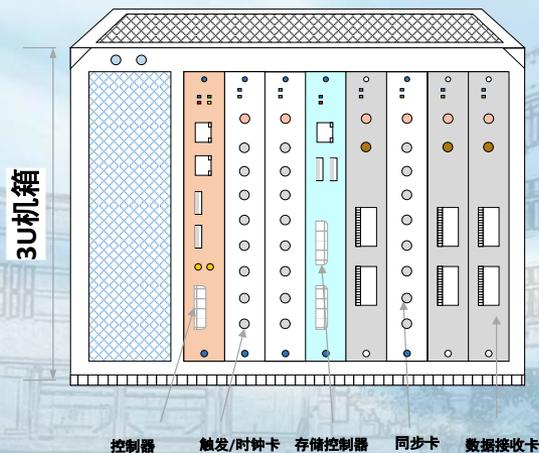
数据采集卡采用ADC实现核信号的数字化，每片ADC有16路输入通道，单卡8片ADC共128路输入通道，分别由2片FPGA控制。硬件框图和功能框图见下图：



数据接收研制方案

数据接收机箱负责数据的接收和存储。数据接收卡接收回传的数据，通过存储控制器把数据存储至硬盘阵列。触发/时钟/同步卡把输入信号分为多路再分发至各机箱。机箱控制器负责整个系统的控制，通过数据接收卡与各数采机箱建立通讯。

单块数据接收卡用于接收汇总2个机箱的数据，其逻辑整体框架如图所示。两个数据发送卡输出的数据经40G光纤传输至数据接收卡，并经令牌环结构进行汇总。其中汇总后数据用DDR缓存，之后通过PXIe送至存储控制器存储于本地。



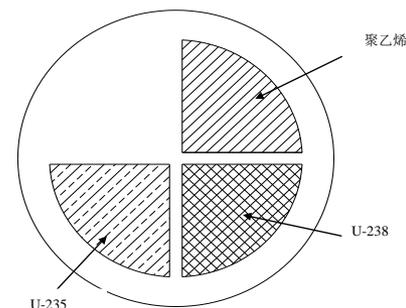
实验用靶

靶需求

需要普通厚度底衬(50 μm ~100 μm Al)镀片, 超薄底衬(1 μm 以下 Al或C)镀片各至少1片, 考虑各镀片均多制作一片备用, 共需要普通厚度底衬镀片2片、超薄底衬镀片2片。镀片采用高纯核素制备, 同位素丰度99.9%以上。镀层厚度50 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ~200 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。

靶片按照直径20mm, 质量厚度200 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 来计算, 质量628 μg 。根据半衰期计算 α 粒子计数率, 在中子通量 $1\text{E}6\text{n}/\text{s}\cdot\text{cm}^2$ 情况下, 计算反应率, 如下表所示。对于14MeV中子, 距离中子源约20cm处, 通量约 $1\text{E}7\text{n}/\text{s}\cdot\text{cm}^2$; 对于白光源, 在55m靶站处, 中子通量约 $2\text{E}7\text{n}/\text{s}\cdot\text{cm}^2$ 。

	628	μg	原子数	T-year	A-alpha	中子截面			1.00E+06 n/s*cm ²
						100keV	20MeV	典型	
U5	235	1.609E+18	7.04E+08	50.23	1.57	1.93	1.5	2.413	
U8	238	1.588E+18	4.70E+09	7.43	2.18E-05	1.352	0.5	0.794	
Pu9	239	1.582E+18	2.41E+04	1.44E+06	1.526	2.297	1.9	3.005	





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

谢谢!



不确定度预估

- ✓ 由于**TPC**探测器对带电粒子探测效率约**100%**，几何效率可计算得出，其不确定度可以忽略；
- ✓ $^1\text{H}(n, n')$ 标准截面在**14MeV**处不确定度约**0.2%**；
- ✓ 通过模拟计算，由入射中子和靶片（**10%**的不均匀时）的不均匀性引起的不确定度不到**0.1%**；
- ✓ 通过**TPC**探测裂变材料的衰变 α 粒子来确定总的靶核子数，由于**TPC**探测器可探测准 **4π** 方向的带电粒子，有可能做到**0.4%**的不确定度；
- ✓ 对于**H**核子数，可采用厚薄两种不同的靶片，厚片通过称重的方法获得质量，通过测量**14MeV**中子入射两块靶产生的质子数获得质量比，最终获得实验用薄靶的质量，进而算出核子数，因此需要用到高纯**PE**或**PP**材料，不确定度有可能做到**0.4%**；
- ✓ 对于反应数，靶底衬（**n, α** ）反应和衰变 α 等由甄别引起的不确定度，从前期实验看，有可能小于**0.1%**，本底计数、中子能散引起的不确定度有可能小于**0.1%**。

因此相对于**H**，总的不确定度有可能做到小于**1%**。