

脉冲辐射领域的核探测技术 及快电子学发展趋势

中国工程物理研究院

核物理与化学研究所

流体物理研究所

激光聚变研究中心

2022年8月



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

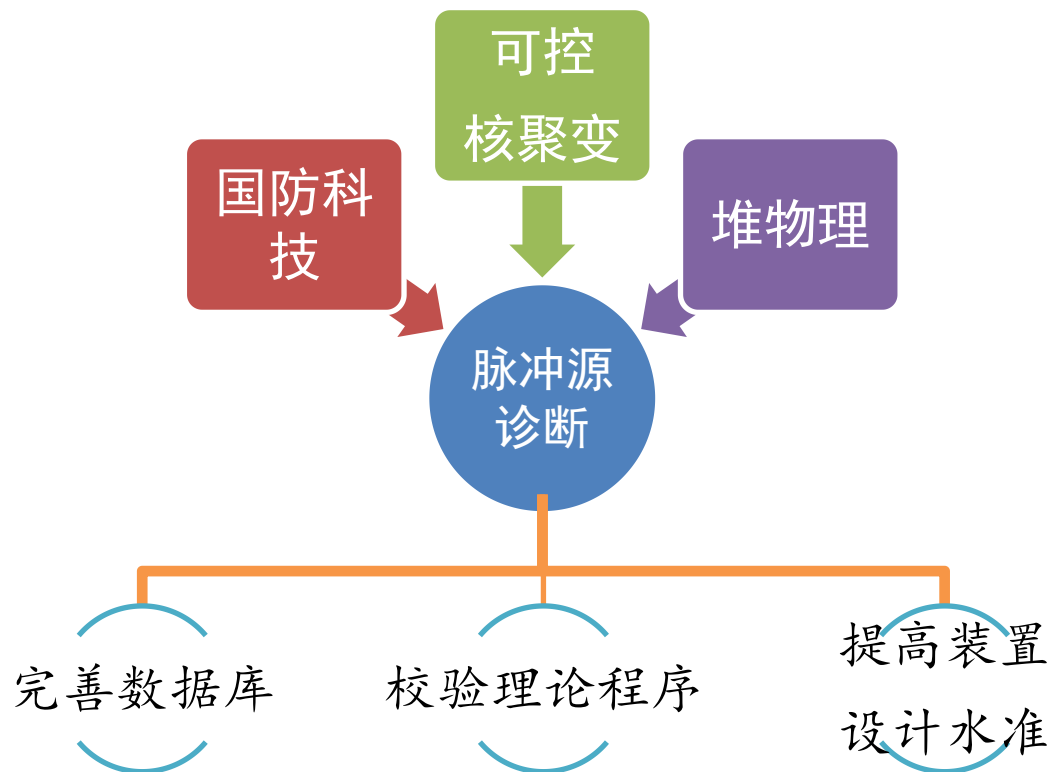
提纲

- 一. 研究背景与意义
- 二. 物理需求
- 三. 研究现状及进展
- 四. 未来畅想

脉冲源诊断

在国防科技、可控核聚变研究、堆物理研究等领域中，基于核探测技术的脉冲源诊断手段一直是不可或缺的。

核探测器与核电子学的测试精度和数据可靠性对校验理论程序和提高装置设计的科学置信度具有十分重要的意义。

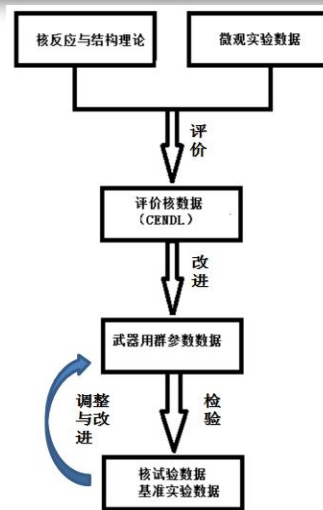
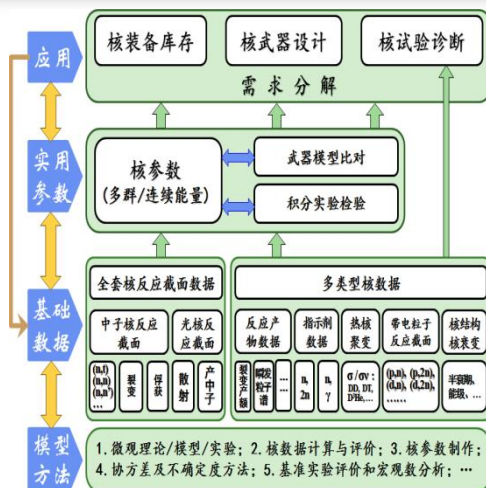
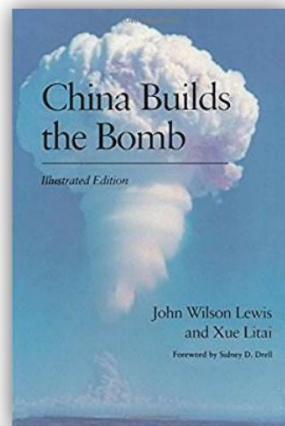


核参数是武器物理研究、反应源及乏燃料后处理必需的基本。核参数是脉冲辐射源设计和测技术研究的桥梁与纽带。

The diagram illustrates various nuclear reactions. A central 'Nucleus' (represented by a cluster of blue and red spheres) is the starting point for several reactions:

- Elastic Scattering:** A neutron (blue sphere) approaches a nucleus and bounces off without being absorbed.
- (n,p):** A neutron strikes a nucleus, resulting in a proton (red sphere) being emitted.
- Fission:** A neutron strikes a nucleus, causing it to split into two smaller nuclei and release additional neutrons.
- Capture:** A neutron is absorbed by a nucleus, forming a new, heavier nucleus.
- γ -rays:** A nucleus emits high-energy gamma rays (represented by blue arrows) after a reaction.

A large blue arrow on the right points towards the right, indicating the direction of the process or the flow of information.



二、物理需求

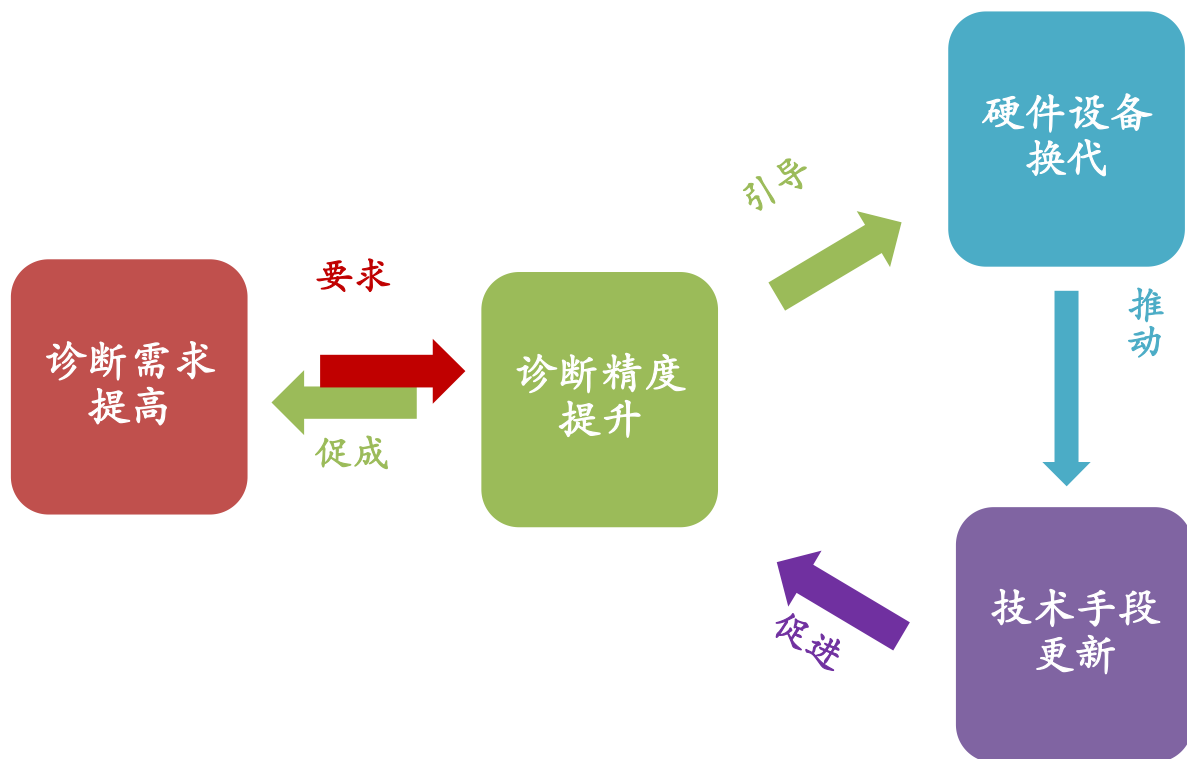


● 快脉冲高精度测量

诊断需求	诊断系统要求	诊断系统现状
时间响应	探测系统时间响应 $\ll$ 装置时间过程 飞行展宽、传输畸变可忽略 记录系统分辨率、带宽 $\gg$ 装置时间过程	探测系统时间响应 $\approx$ 装置时间过程 使用反卷积等手段对时间响应进行修正 记录系统时间性能 $\approx$ 装置时间过程
强度响应	探测系统强度 $\propto$ 装置发射产额 探测灵敏单元线性范围大覆盖数个量级 记录系统垂直分辨率大且本底噪声低	探测灵敏单元受辐照损伤、输出电荷影响 线性范围有限，且难以动态标定研究 单路记录系统覆盖动态范围约3个量级
空间响应	图像诊断系统空间分辨 $\ll$ 装置尺度 系统时间分辨 $<$ 装置动作过程（分幅） 记录系统垂直分辨率大且本底噪声低	空间分辨与灵敏度矛盾不可调和 超快装置使用条纹像仅能获得一维信息 记录系统覆盖动态范围约1.5个量级
能量响应	探测系统强度 $\propto$ 发射粒子注量 探测系统强度 $\propto$ 发射粒子能注量	介于两者之间，需要通过单粒子标定、 或模拟计算获得
粒子鉴别	探测系统只对中子、伽马射线中的一种 响应	介于两者之间、标定获得不同粒子的 能量响应曲线

是否存在足够完美的核探测技术？
是否存在足够强大的电子学仪器？

二、物理需求



新探测技术：快时间响应（亚ns~ns）、满足线性的灵敏度范围（ $10^5 \sim 10^8$ ）、高 γ/n 甄别及高信噪比（ $>20 \sim 50$ ）、能量响应模式二选一、传输系统畸变（ $<1\%$ ）；

新电子学：高采样率、带宽（10Gsample/s、2GHz）、高有效位（10~12bit）、高回传速率（ms~s）、一维、二维记录

★亟待发展快响应、高精度的通用/专用诊断系统

二、物理需求

● 核参数测量

诊断需求	诊断系统普适要求	单一诊断系统响应现状
时间响应	定时精度~100ps	定时精度~亚ns
能量响应	能量分辨<1%, 覆盖能量范围keV~100MeV	能量分辨在较窄的能量范围内可达1%
探测效率	探测效率~100%	带电粒子可达、中性粒子~10%
空间覆盖	空间覆盖~100%	空间覆盖~50%
粒子鉴别	带电粒子/中子多种粒子全鉴别	在不同的系统中鉴别不同的粒子

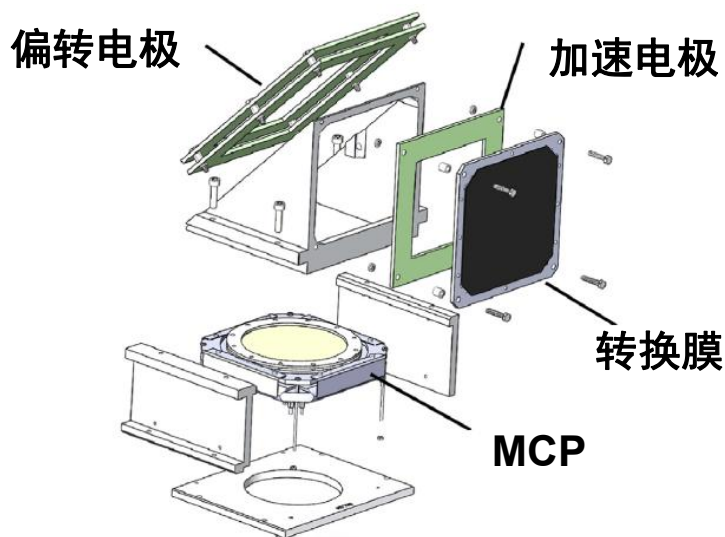
核参数测量目前采用不同的测试系统测量不同的反应道，未来是否可能一次实验测量多个反应道以减少不同反应道之间的不确定度，或者像高能物理实验CERN的LHC一样，一次打靶在线监测所有产物？

长时间运行是否存在足够稳定的电子学仪器？10万以上ch的数据是否有集成度更高的电子学设备或更简单的数据处理方法？



● 裂变产额探测器技术

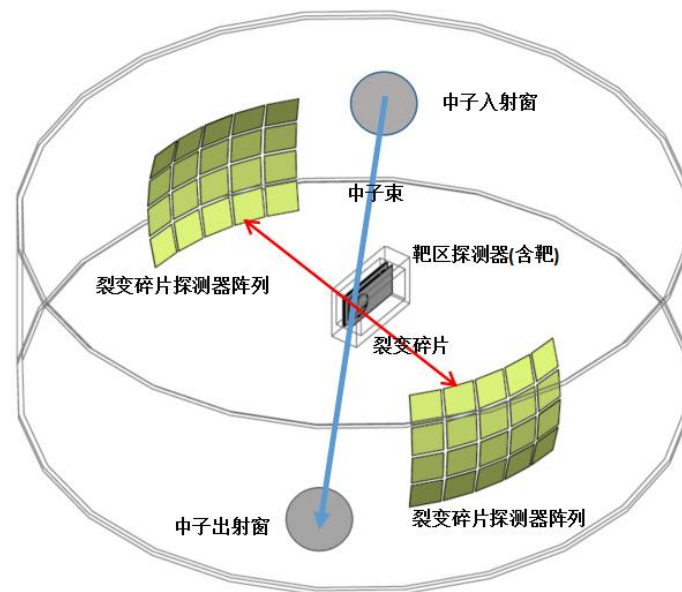
- 难点
 - 高分辨（对标国际水平1u）
 - 高效率（谷区产额测量）



飞行时间测量单元

● 解决途径

- 高分辨（飞行时间分辨控制在百皮秒量级），能量测量（分辨控制在1%以内）
- 多单元探测器阵列



测量裂变产额的探测器阵列



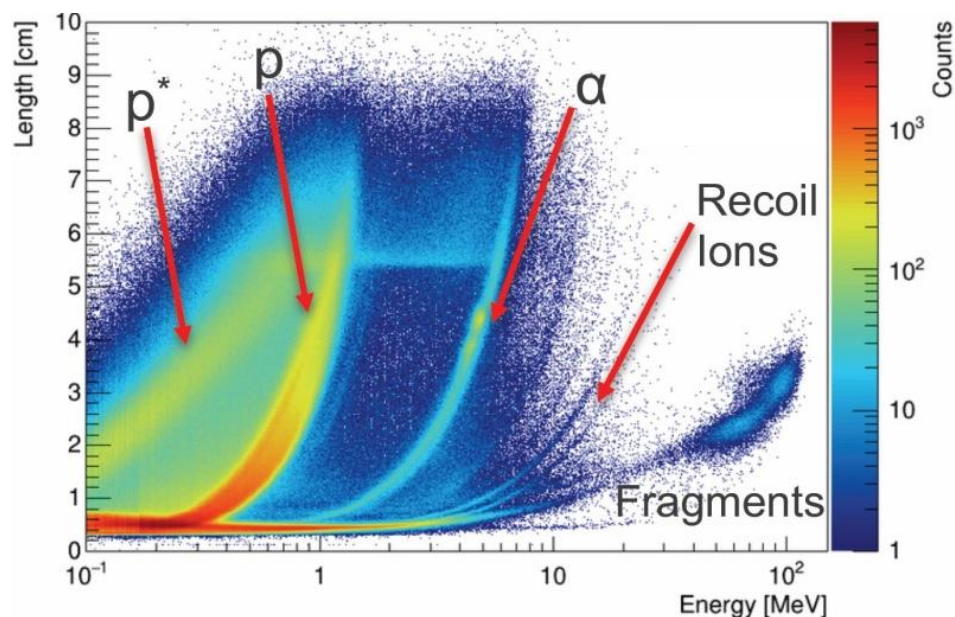
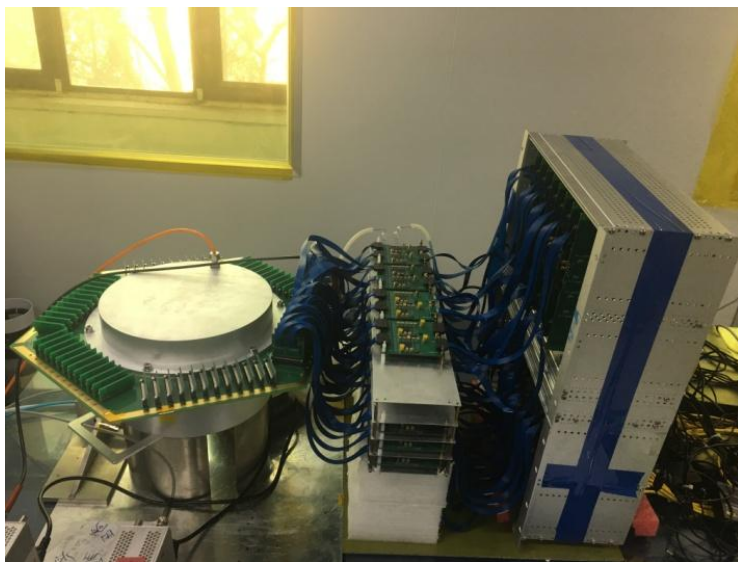
● 高精度裂变截面探测器技术

● 难点

- 裂变信号甄别
- 参考截面
- 靶核子数定量

● 解决途径

- 具有粒子甄别能力的TPC（大动态范围的电子学系统）
- $^1\text{H}(n, n')$ 为参考反应
- 4π α 粒子测量定靶核子数





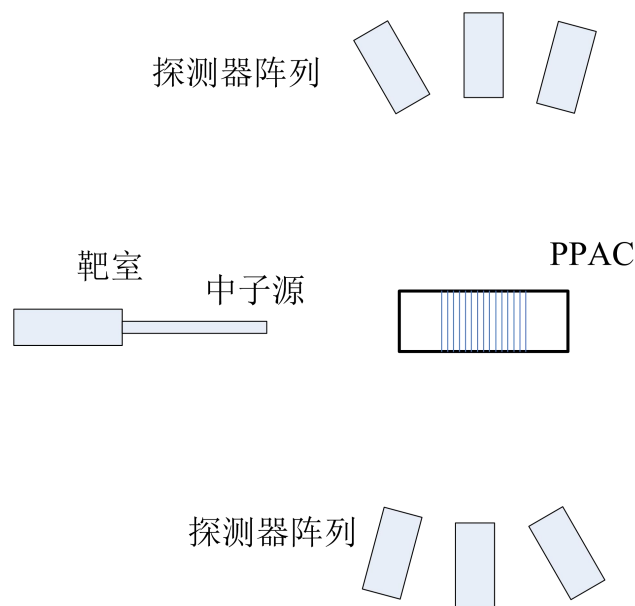
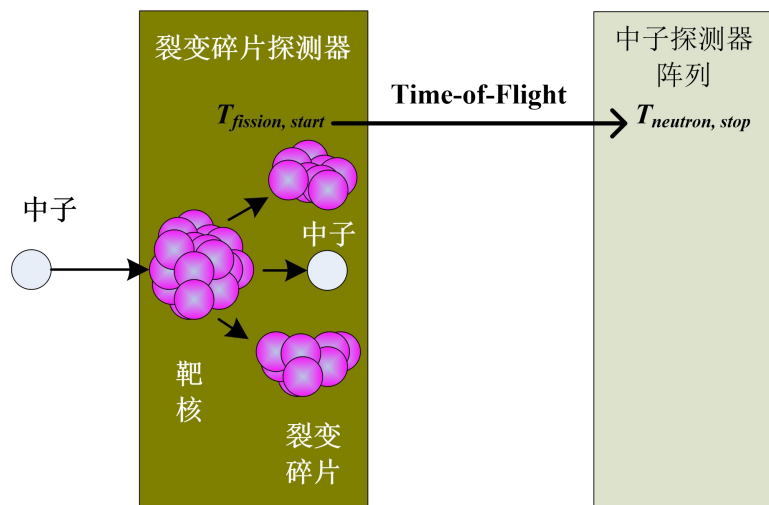
● 裂变瞬发中子谱探测器技术

• 难点

- 极弱信号
- 强本底

• 解决途径

- 高性能液闪探测器阵列
- 高抑制的PPAC



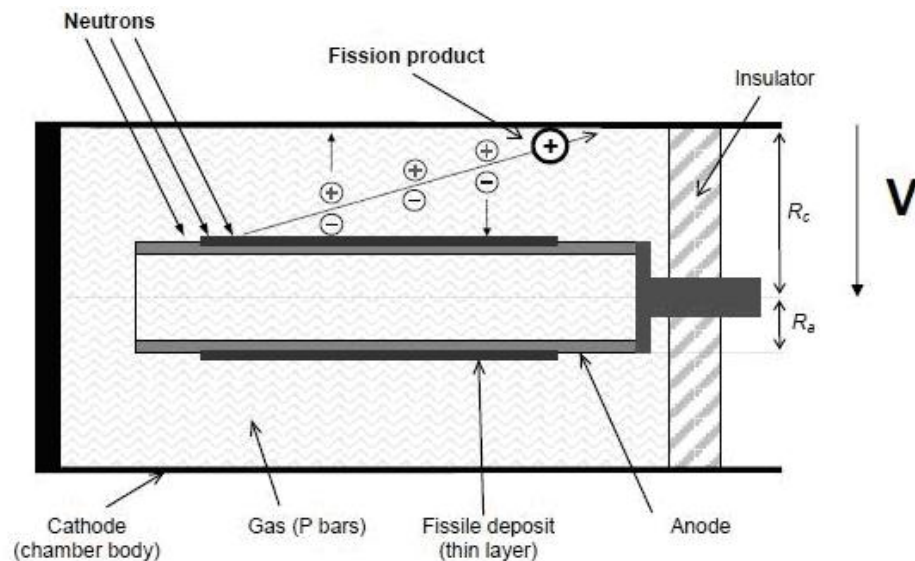
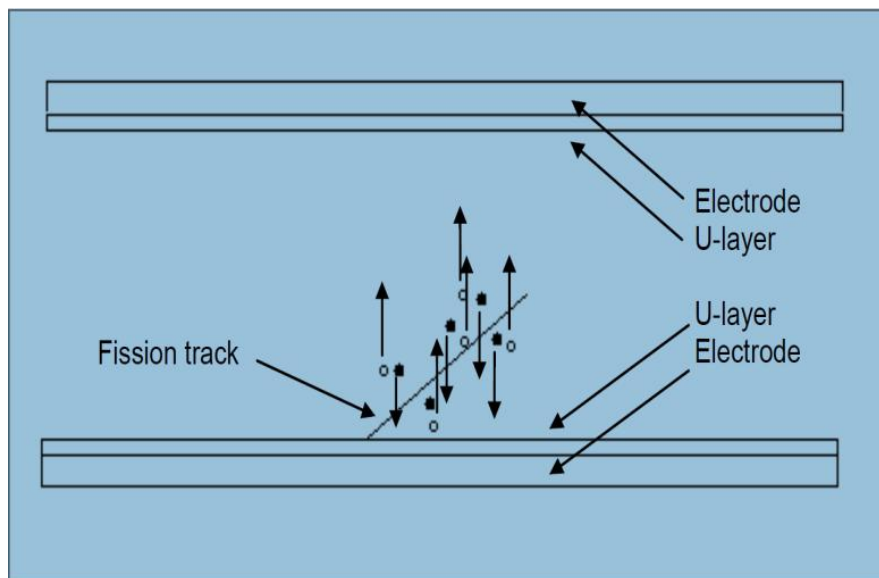
● 裂变电离室探测器技术

• 难点

- 工艺的一致性
- 工艺的稳定性
(超小、超大、高温)

• 解决途径

- 结构设计的合理性
- 材料的优化

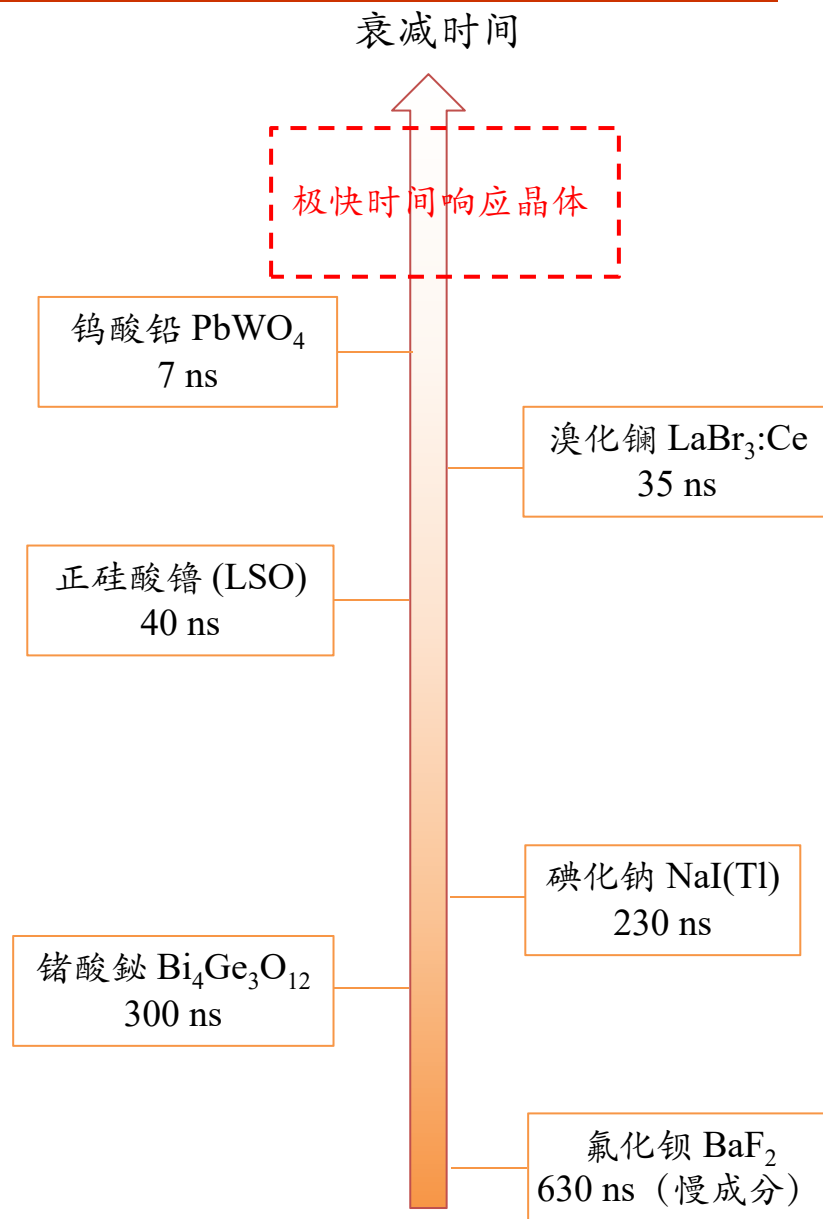


三、研究现状及进展

● 晶体

- 混合辐射场中的 γ 时间谱诊断
 - 缺乏兼具快时间响应(<3ns)与高 γ/n 甄别(>0.5)的无机闪烁体
- 中子、伽马成像诊断
 - 缺乏兼具高光产额(>10⁴/MeVee)与快时间响应的闪烁体

	光产额 ph/MeV	衰减时间 ns	密度 g/cm ⁻³	发光 波长 nm	潮解
碘化钠 NaI(Tl)	40,000	230	3.67	415	有
锗酸铋 Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	8,200	300	7.13	480	无
氟化钡 BaF ₂	8400	630/0.9	4.89	300/220	无
钨酸铅 PbWO ₄	120/80	7	8.28	360/10	无
正硅酸镱 (LSO)	30,000	40	7.40	420	无
溴化镧 LaBr ₃ :Ce	61,000	35	5.30	370	有



新晶体: Yb: YAG

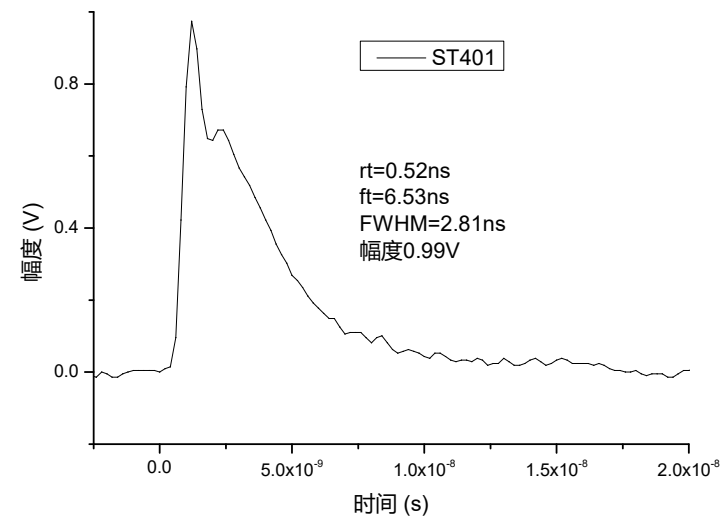
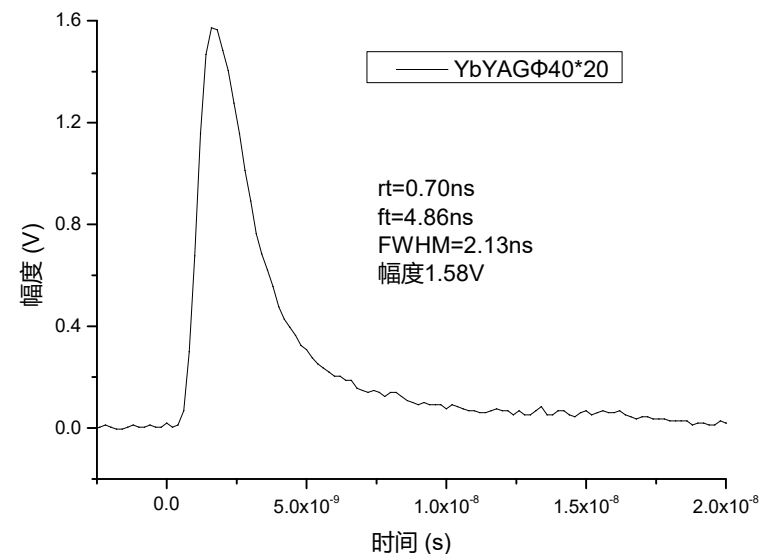
- 光学参数:

- 衰减时间: 1.2 ns
- γ/n 甄别能力: 0.62
- 光产额: ~ 1000 photons/MeVee

- 应用价值:

- 超快的时间响应, 优秀的 γ/n 甄别比

★有利于在 γ 、 n 混合场中进行 γ 时间谱诊断



新晶体: LYSO:Ce

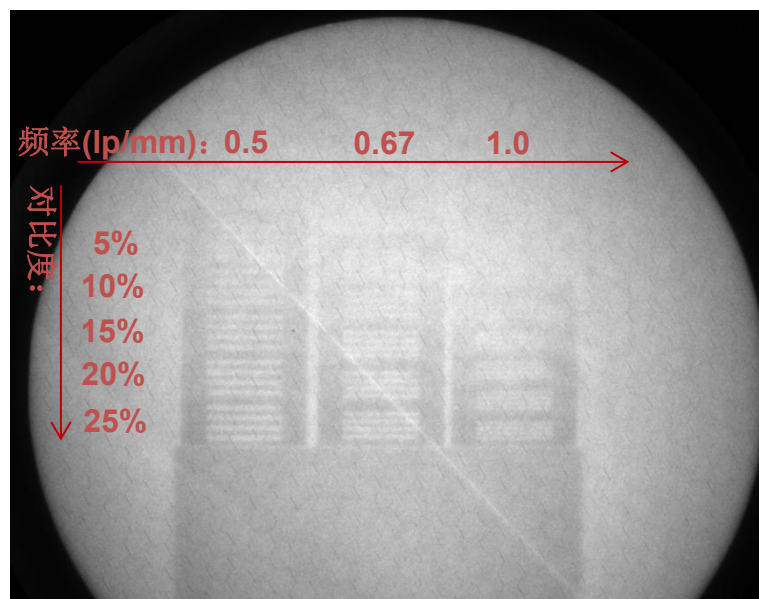
- 光学参数:

- 衰减时间: 40 ns
- 光产额: ~ 32000 photons/MeVee

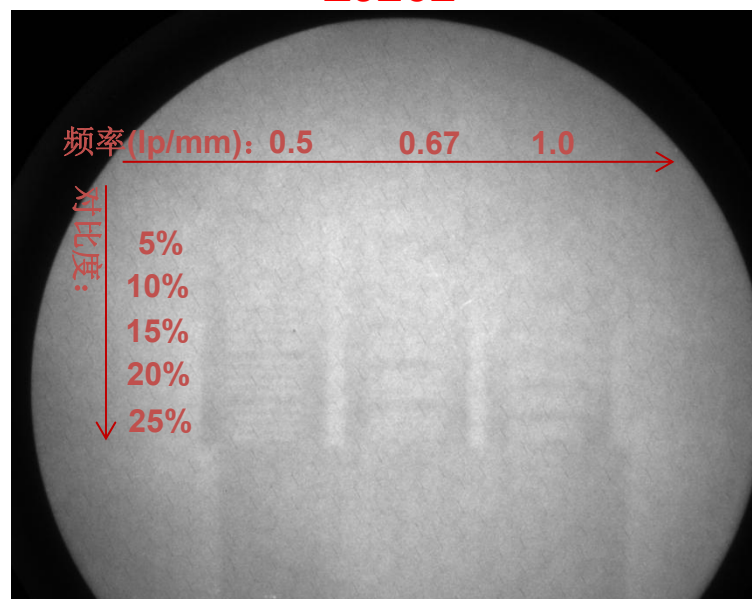
- 应用价值:

- 高光产额, 快时间响应特征

LYSO:Ce



EJ262



钴-60伽马照相LYSO Vs. EJ262: 灵敏度提升16倍, 信噪比提升4倍。

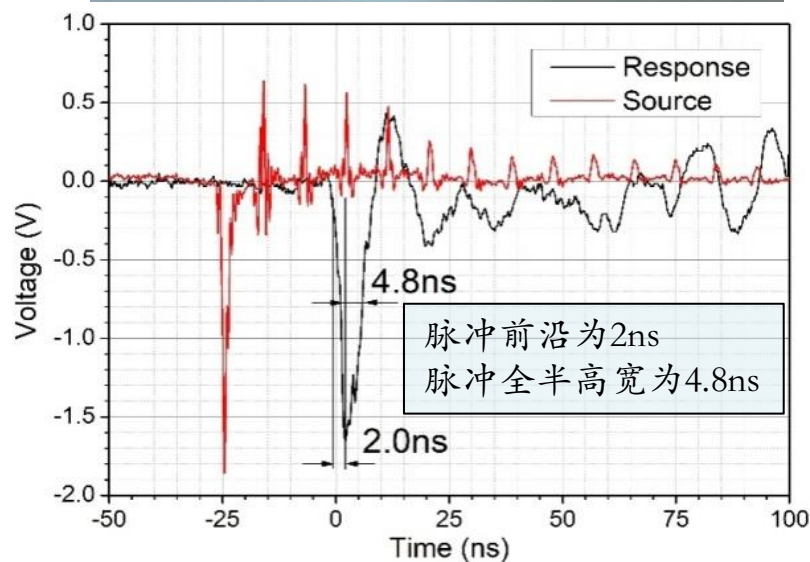
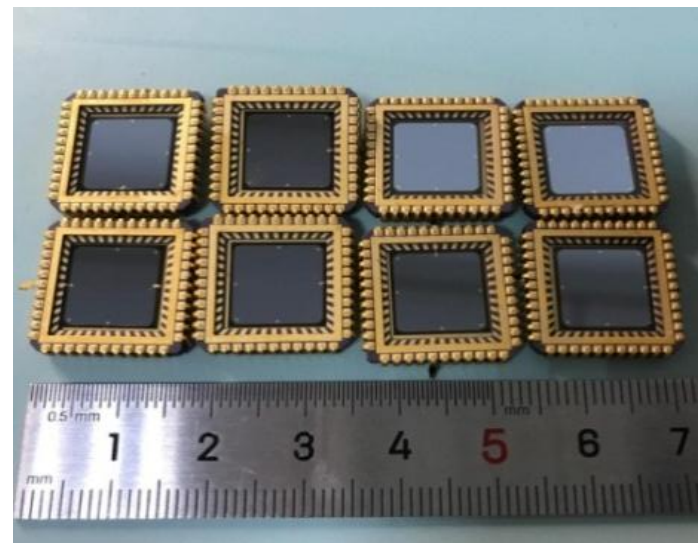
新探测器：电流型SiC

- 探测器直特征参数：
 - 快时间响应：信号上升时间~2ns
 - 优秀的能量分辨： $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$ 特征峰能量分辨达到2.4%
 - 极低的暗电流：30kV/mm电场强度下，暗电流<4nA
 - 高信噪比：极薄的灵敏层（~30um）=>极低的环境本底干扰

- 应用价值：

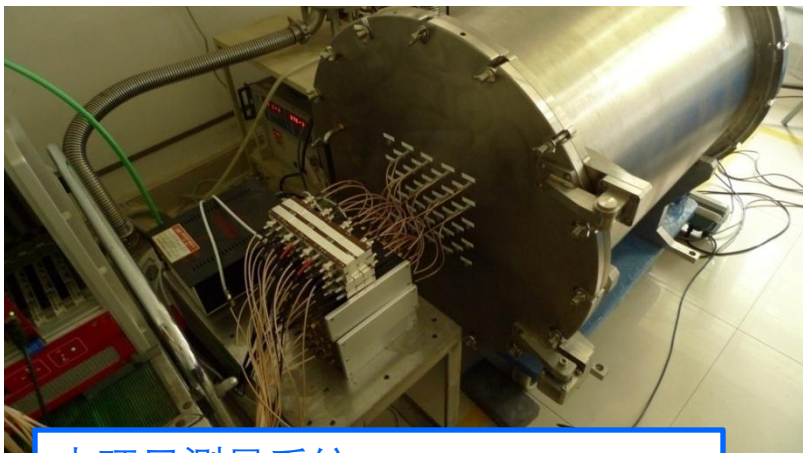
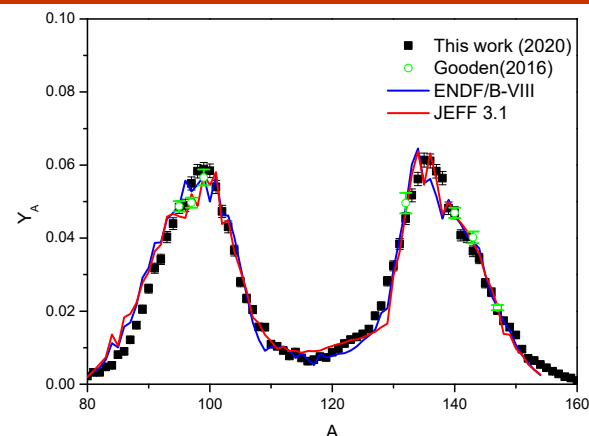
- 优秀的能量分辨与信噪比

★有利于降低产额诊断中的本底干扰



裂变产额探测器

➤ ^{238}U 裂变产额: ^{95}Zr 、 ^{99}Mo 、 ^{144}Ce 、 ^{147}Nd 等峰区产物产额相对标准不确定度 3%~5%



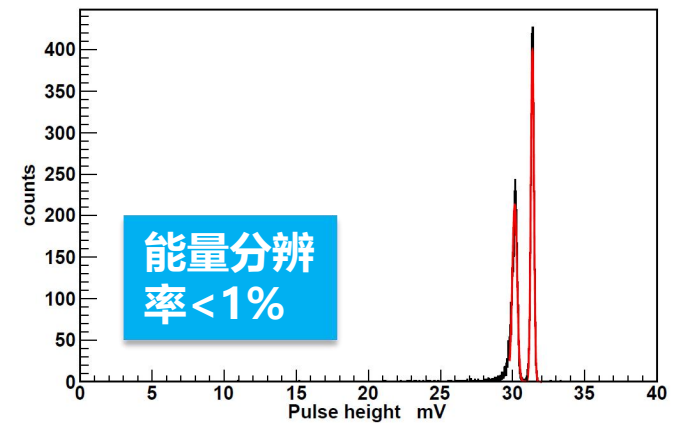
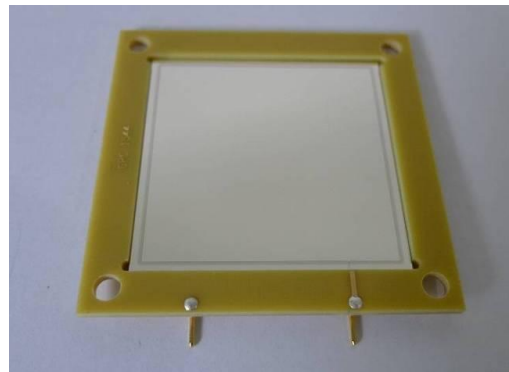
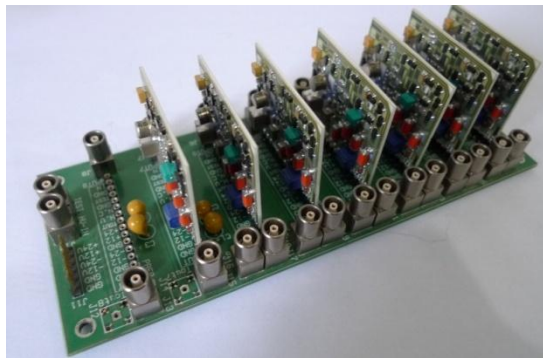
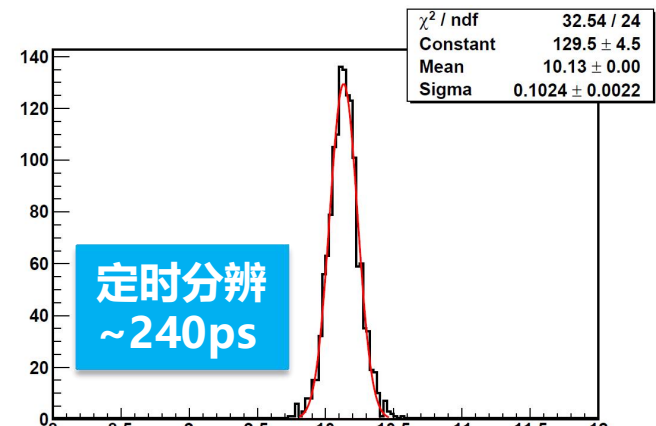
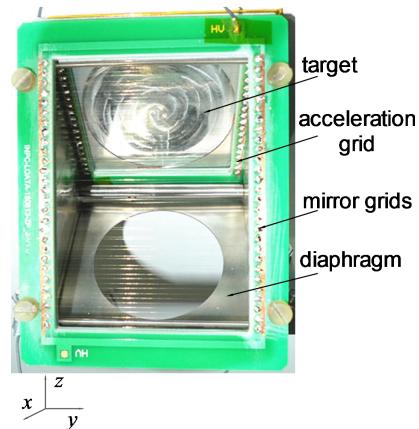
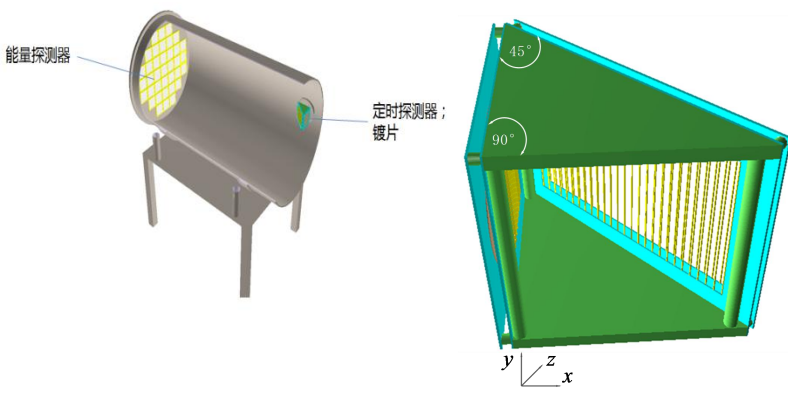
本项目测量系统

- 探测器分辨
 - 飞行时间分辨 240ps
 - 能量分辨 1%
- 根据探测器分辨估计:
 - $\Delta A = 1.3 \sim 1.9$ ($A = 80 \sim 160$)
- 总效率 1.5%



SPIDER@LANL

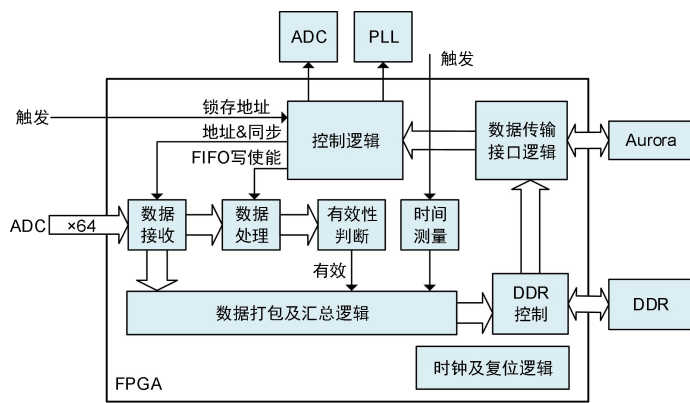
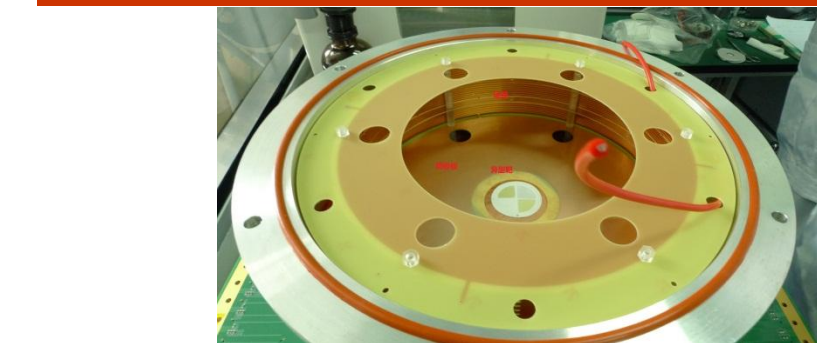
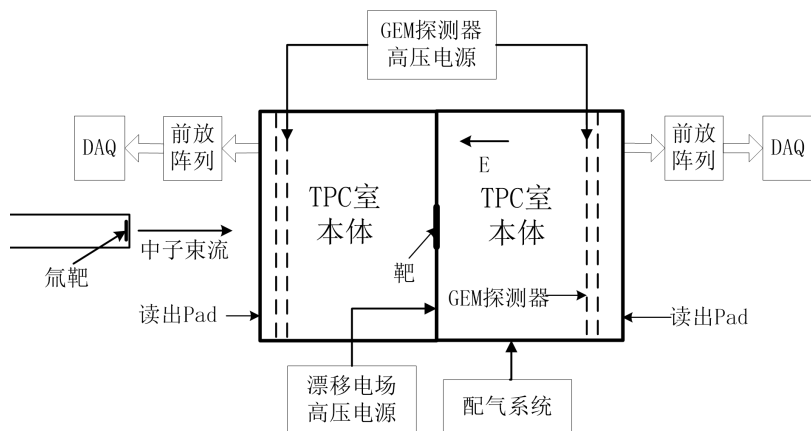
- 探测器分辨
 - 飞行时间分辨 250ps
 - 能量分辨 1.1%
- 根据探测器分辨估计:
 - $\Delta A = 1.2$ ($A = 107$), 1.7 ($A = 141$)
- 带电粒子束刻度: $\Delta A = 1.8u(^{90}\text{Zr})$
- 设计总效率 1%



裂变截面探测器

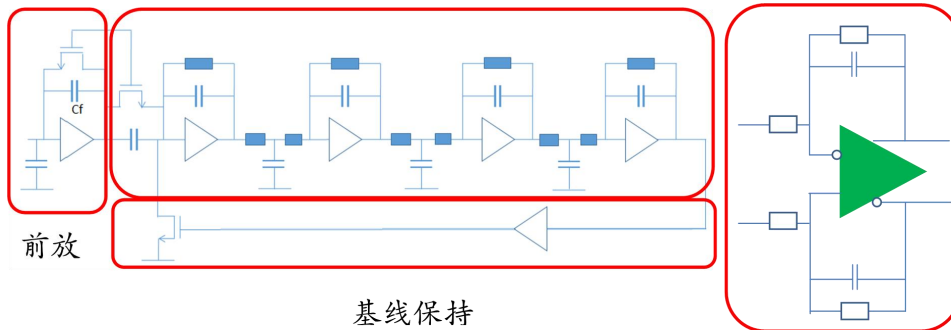


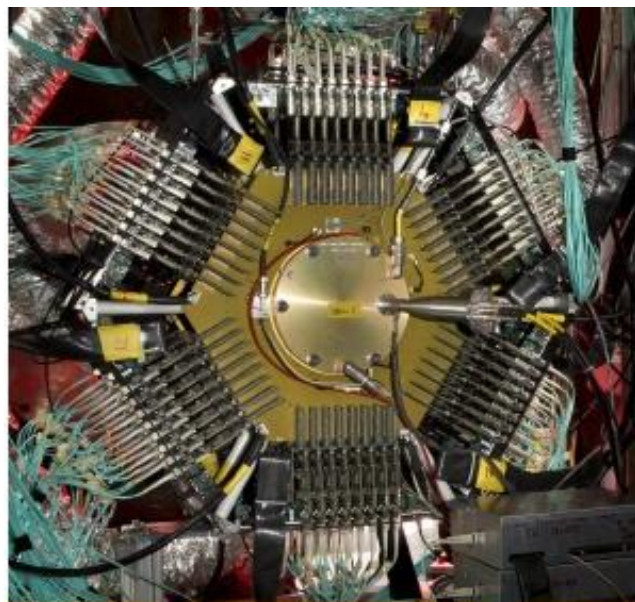
核物理与化学研究所
INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS AND CHEMISTRY



高阶成型

全差分输出

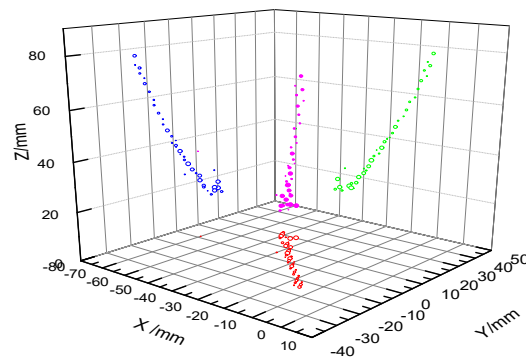




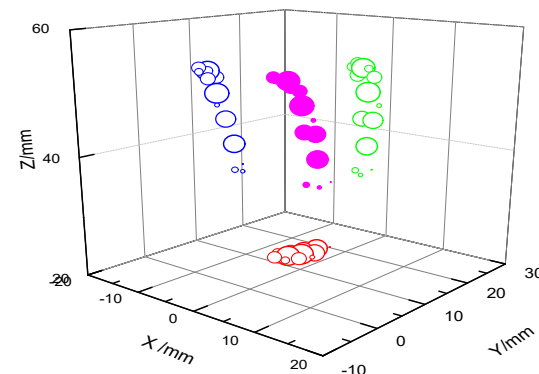
TPC@LANL

共计6000路信号
噪声4400e,动态范围
2000: 1

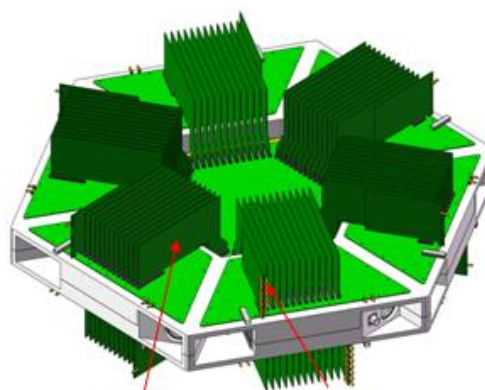
$^{239}\text{Pu}(n,f)/^{235}\text{U}(n,f)$ 截面比测量不确定度实现1%



质子信号的三维径迹

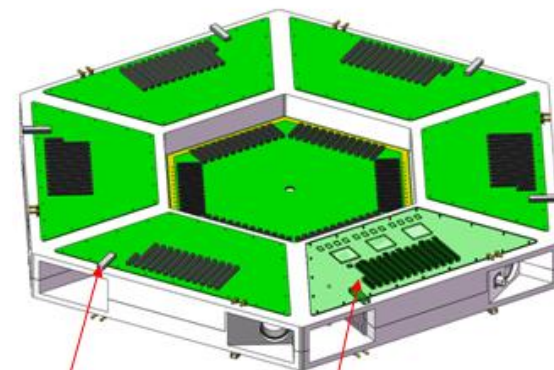


裂变碎片的三维径迹



数据采集卡

同步控制



光口

信号处理板

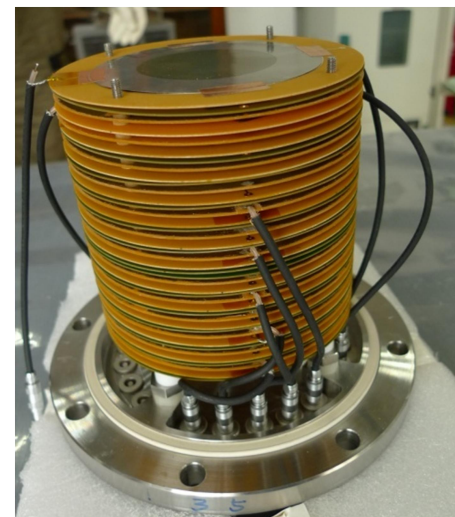
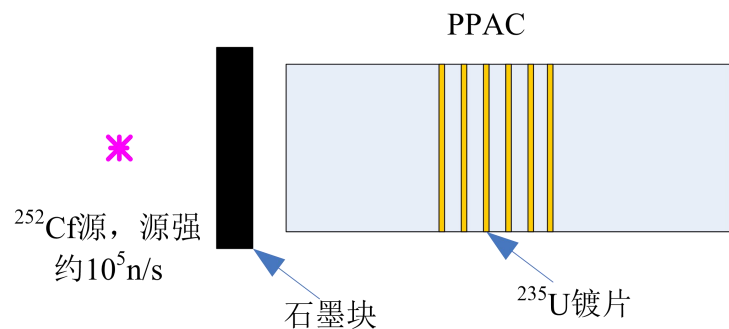
电子学团队设计的数采系统

共计9000路信号
噪声2000e,动态范围2000: 1

裂变瞬发中子谱探测器



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

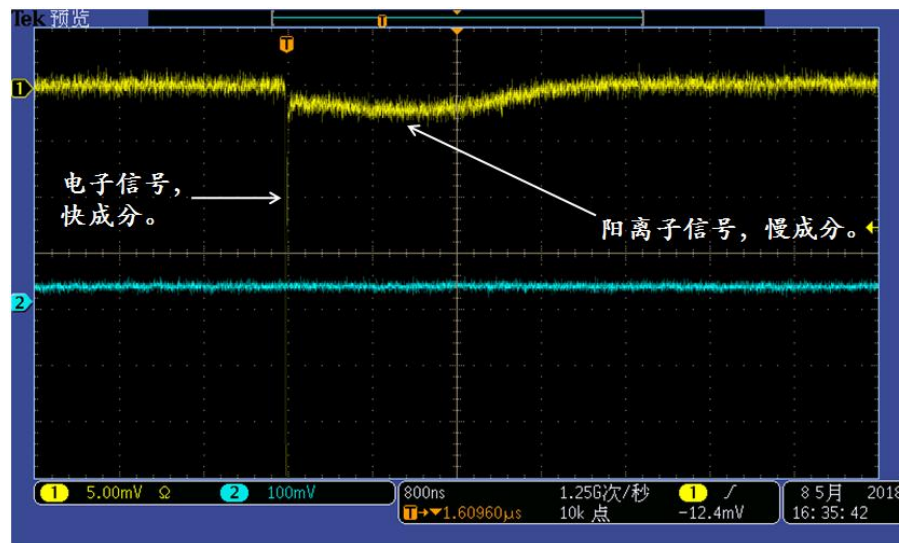
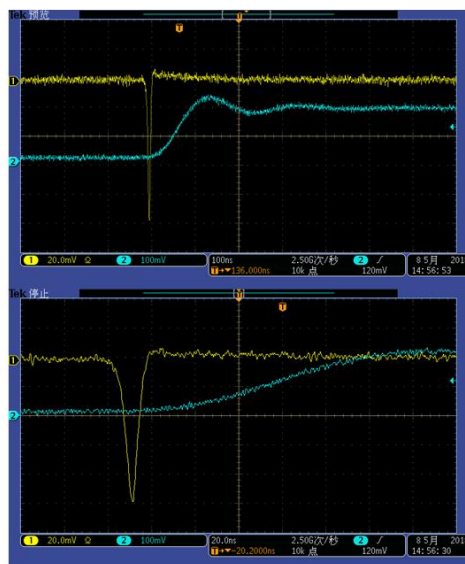


金硅面垒, 蓝色信号

铝膜电极

cf源

PPAC信号输出
黄色信号

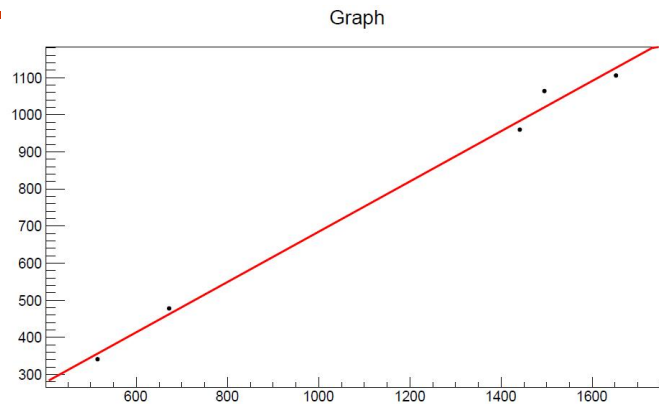


信号上升时间约为10ns, 最快可以达到5ns。满足预先设计的指标要求(20ns以内)

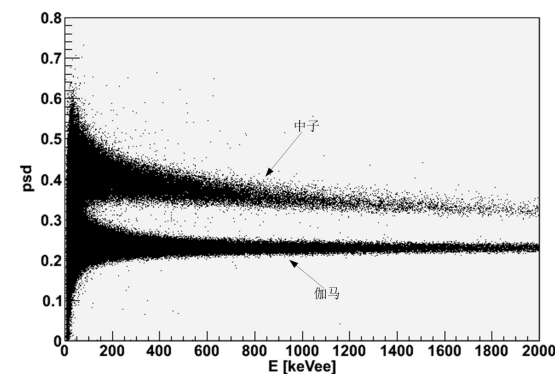
裂变瞬发中子谱探测器



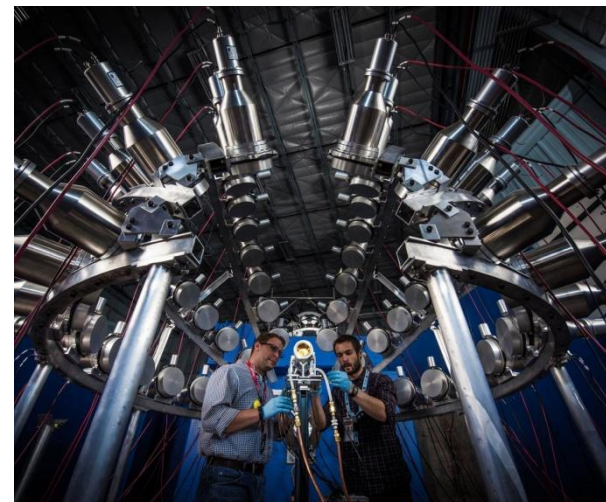
核物理与化学研究所
INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS AND CHEMISTRY



测试结果显示，自研探测器
能量分辨、线性、n/γ甄别均
良好。



立体角为 4π 的7.7%
PPAC上升时间约5ns
VS
5~8ns@美、日、法



LANL的Chi-Nu project



小型平板裂变电离室



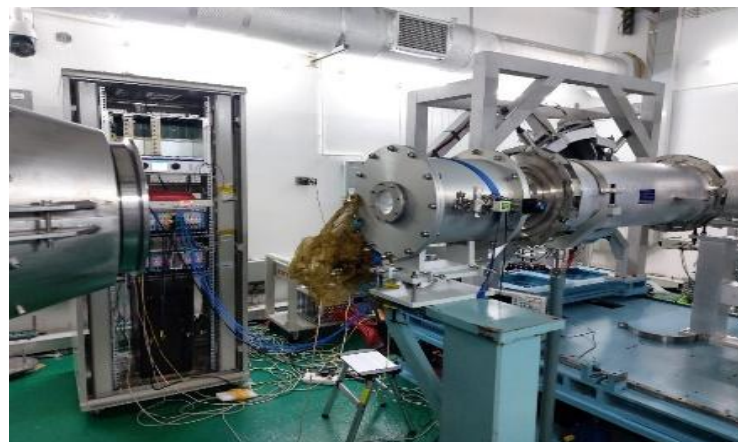
圆筒裂变电离室



微型管状裂变电离室



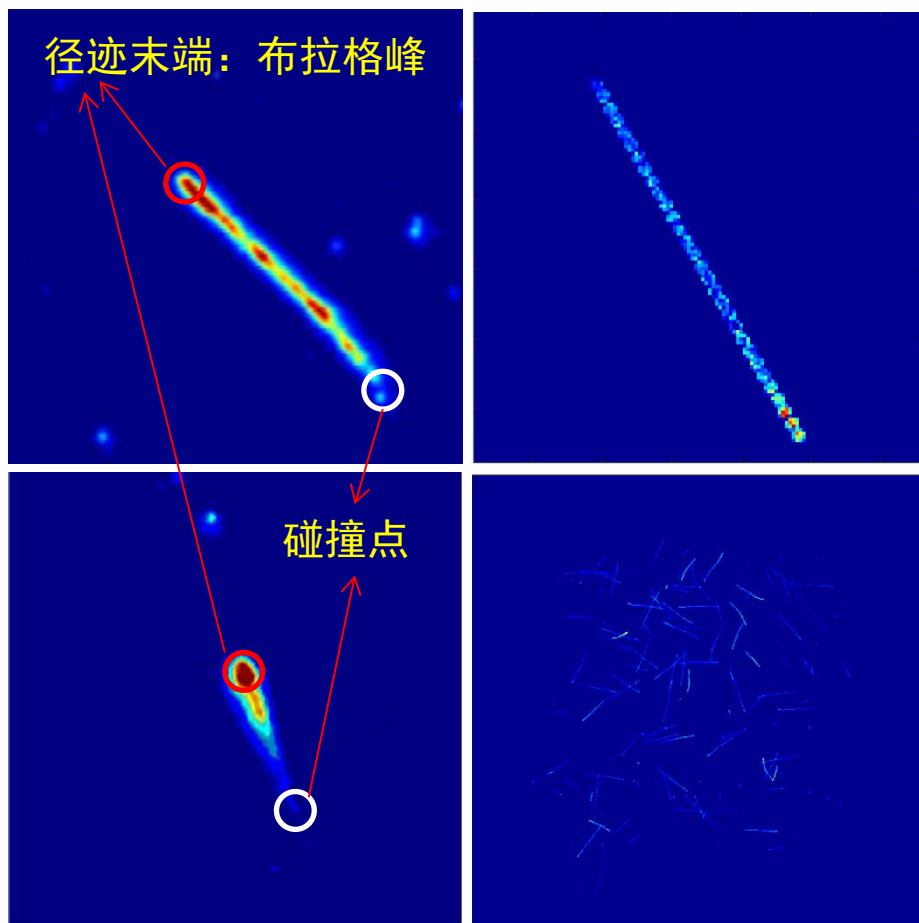
耐高温微小型平板裂变电离室



安装在Back-n束线上的多层裂变室

1. 超高空间分辨率快中子成像技术

- 新探测器：10 μm 级液闪毛管阵列
- 原理：记录反冲质子径迹，通过径迹识别的方法实现10 μm 级的超高空间分辨率。



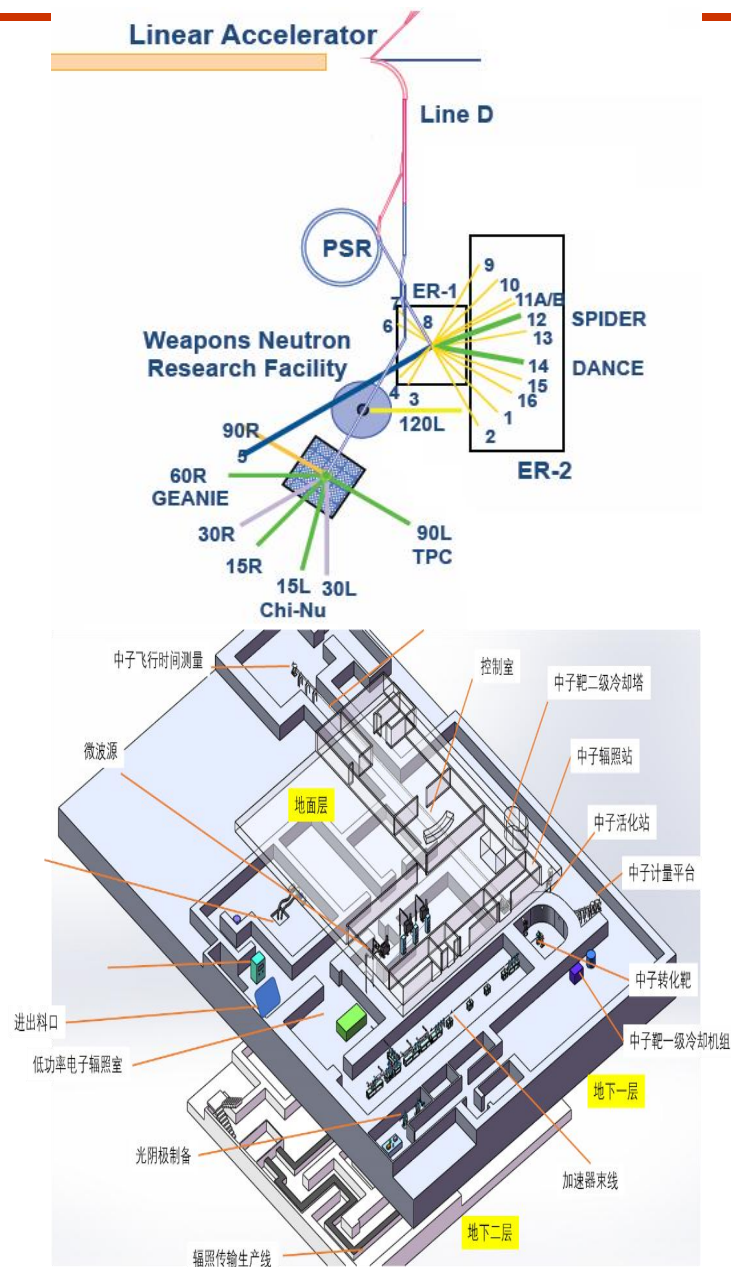
反冲质子径迹实验（左）和模拟（右）



10 μm 级液闪毛细管阵列研制

2. 核参数探测器技术

- 基于白光中子源的高精度裂变截面及全截面探测器，中子能区覆盖热中子~几十MeV，快中子区铀系裂变核裂变截面测量不确定度达1%
- 裂变产能曲线探测器，峰区产物产额测量不确定度小于2~3%（最好至1%），谷区产物产额不确定度小于5%
- 低能区裂变瞬发中子能谱/伽马探测器，中子测量上阈12MeV以上，下限小于1MeV，瞬发伽马0.3~7MeV，不确定度小于10%
- 高精度半衰期谱仪和特征 γ 射线发射率谱仪，半衰期不确定度小于0.5%（最好至0.1%），主要特征 γ 射线发射率不确定度小于2~3%（最好至1%）
- 俘获截面探测器、非弹截面探测器，截面不确定度小于5~10%（建立基于HPGe探测器阵列和BGO 4π 球（类GEANIE）的(n,Xn)截面测量技术）
- 带电粒子活化截面探测器，截面不确定度不大于10%。



3. 50MA装置聚变等离子体状态与聚变速率~~诊断~~ 核物理与化学研究所 INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS AND CHEMISTRY

- 中子产额绝对测量

宽动态范围 (10^6 – 10^{19}) ——多种探测技术相互配合;

强韧致辐射本底下中子产额的实时在线绝对测量;

- 聚变中子时间谱测量

超快闪烁体 (数十 ps) + 光学条纹相机系统

超快光电导探测器 (数十ps) + 高带宽示波器

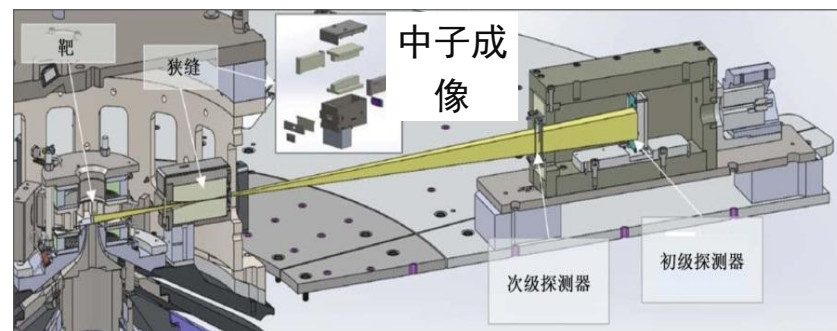
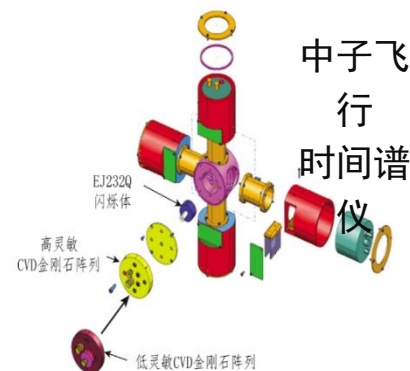
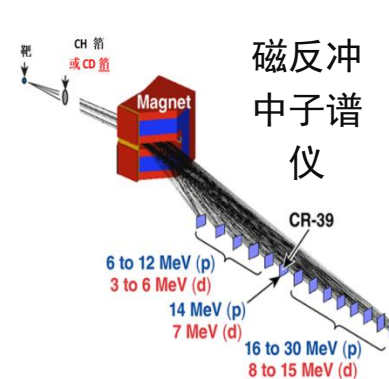
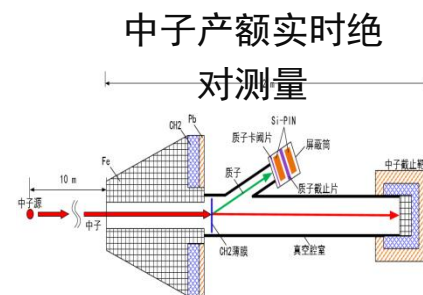
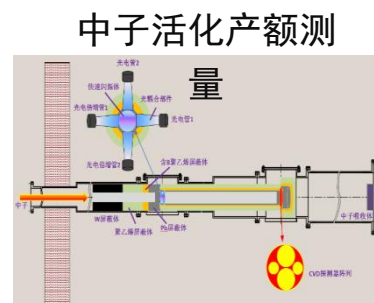
- 中子能谱测量

中子飞行时间谱仪

磁反冲中子谱仪

- 中子成像

高空间分辨 ($<20 \mu\text{m}$) 编码孔成像技术



4. X射线/伽马能谱诊断技术

- X射线晶体谱仪

高质量衍射晶体制备；

晶体衍射效率及记录介质的标定（绝对强度测量）；
时间分辨晶体谱仪测量系统（门控MCP、条纹相机系统）；

- 多层膜反射镜谱仪

膜层表面粗糙度、平整度、稳定性和抗辐照能力、…

- 透射光栅谱仪

工艺、衍射效率标定、…

- 韧致辐射能谱测量

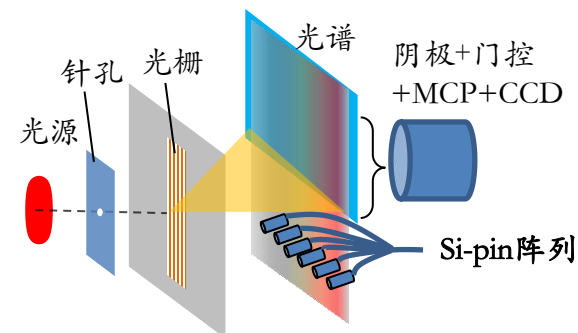
磁谱仪（谱仪结构设计、记录介质、…）

组合滤片方法（滤片设计、记录介质、谱反解技术、…）

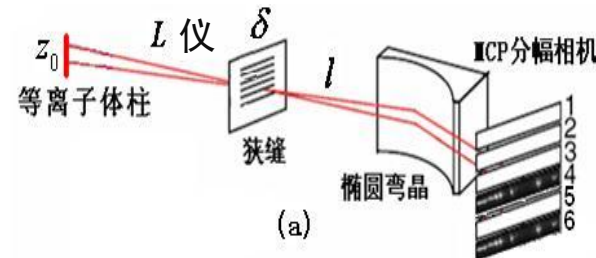
衍射晶体



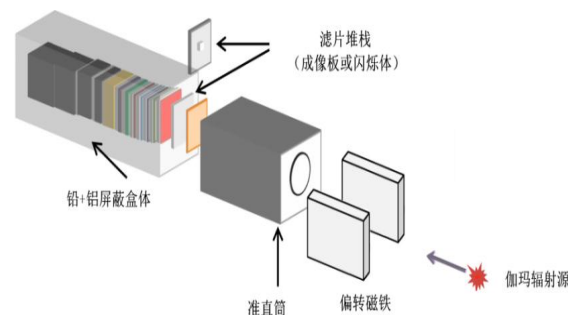
透射光栅谱仪



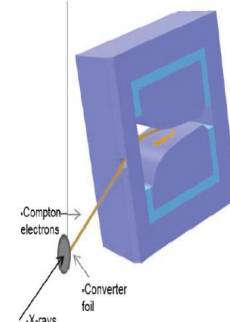
时间分辨晶体谱



滤片堆栈谱仪



磁谱仪



5. X射线/伽马高速成像技术



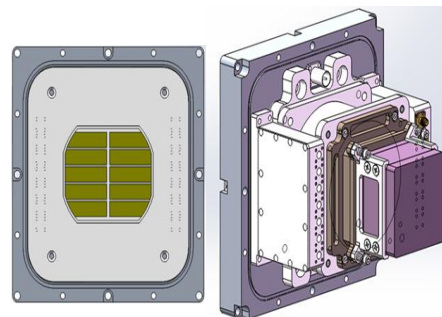
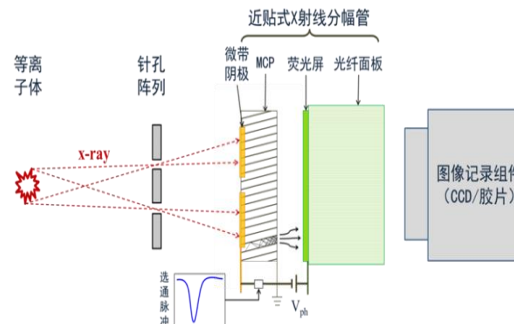
核物理与化学研究所
INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS AND CHEMISTRY

- X射线分幅相机

高空间分辨, $\sim 10 \mu\text{m}$

高时间分辨, $\sim 100 \text{ ps}$

X射线分幅相机

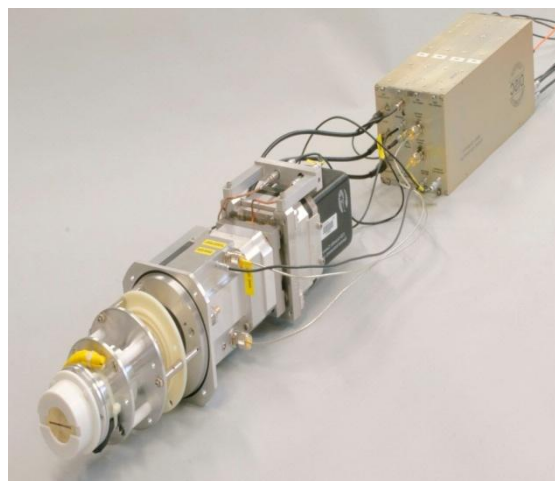


- X射线条纹相机

高时间分辨, $< 1 \text{ ps}$

线性输出动态范围 > 100

X射线条纹相机



- X射线背光照相技术

X射线背光源要求足够的强度

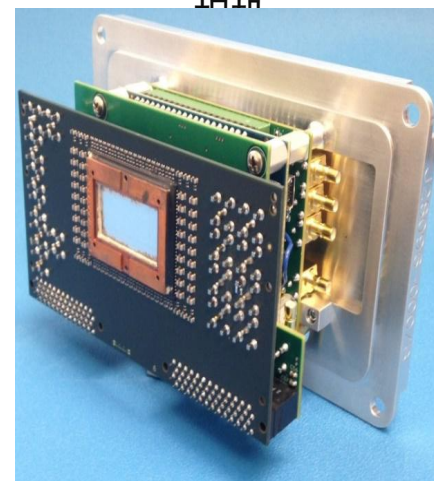
高空间分辨, $< 10 \mu\text{m}$

- 单视线高时间分辨X射线探测器

单一视线, ns级时间分辨

快速读取, 多幅成像, 趋近X射线摄影

Hybrid CMOS单视线X射线



- 微通道板型光电倍增器

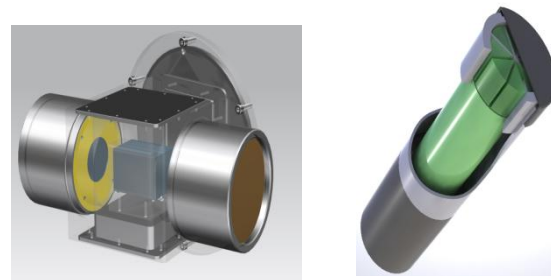
大灵敏度面积：25–40mm²；

快时间响应：脉宽~100ps；

高时间分辨：TTS<30ps；

快门控响应速度：门控上升时间小于3ns。

中子飞行时间谱仪

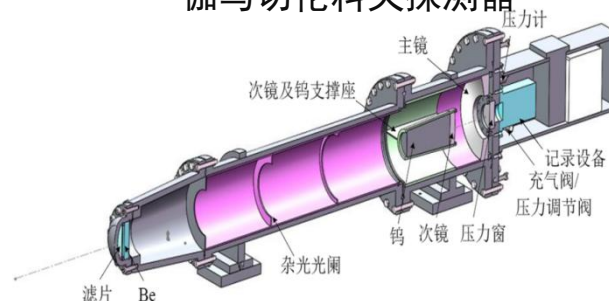


- 脉冲展宽型超快响应探测器

超快时间分辨：<20ps；

阴极类型：质子响应，X光响应，可见光响应。

伽马切伦科夫探测器



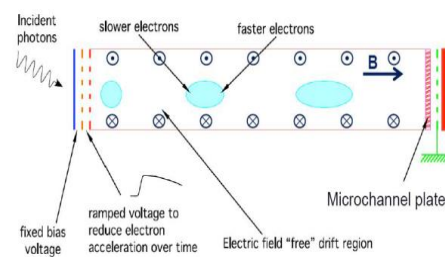
- 快响应门控光电倍增器（非MCP型）

门控响应速度：小于10ns；

增益：大于10⁵；

时间响应：脉宽2ns。

脉冲展宽型超快响应探测器



7. 高空间分辨中子/伽马成像探测器

- 低光串扰高空间分辨阵列中子探测器

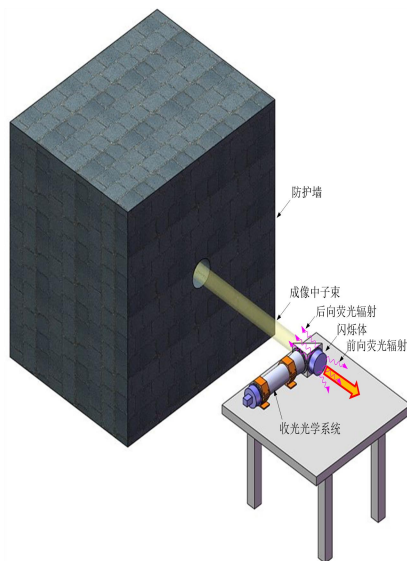
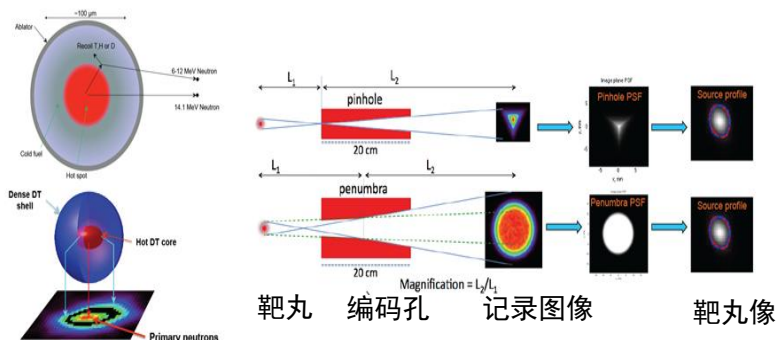
成像单元直径：小于 $100\text{ }\mu\text{m}$ ；

阵列探测器有效直径： $\geq \phi 150\text{mm}$ ；

阵列探测器厚度：大于 150mm ；

荧光余晖： 100ns 衰减5个量级。

中子/伽马成像原理



成像探测系统



成像探测器

8. 低中子本底脉冲质子探测技术

• 低中子本底质子探测器

探测器本底干扰甄别能力：能够有效甄别中子、伽马，x光，杂散光等本底信号；

数据获取模式：即时采集；

中子/质子甄别能力： $10^6:1$ ；

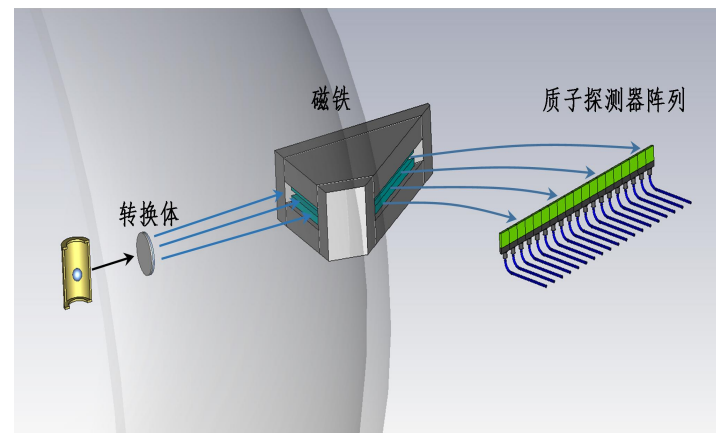
质子探测效率：100%；

质子数量测量不确定度：好于5%；

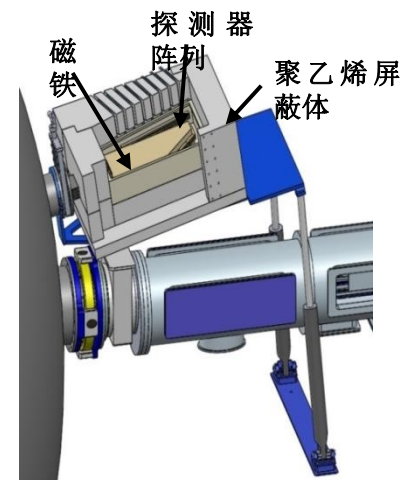
探测器抗中子辐射耐性：中子损伤阈值大于 $2 \times 10^9 / \text{cm}^2$ ；

信号记录系统抗中子辐射耐性：中子损伤阈值大于 $2 \times 10^{10} / \text{cm}^2$ 。

反冲质子磁谱仪原理



质子探测器阵列



反冲质子磁谱仪

9. 强辐射场复杂环境自动样品转运技术



• 自动样品转运技术

取样品数量：~50；

取样时间：单一样品小于5min，
全部样品小于60min；

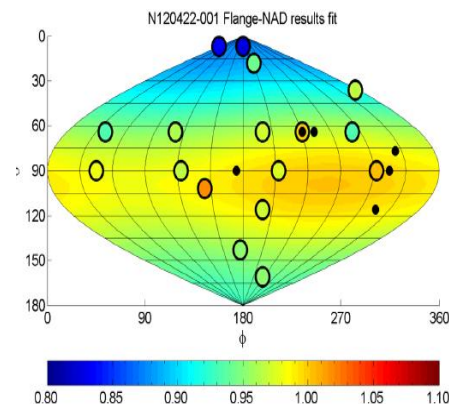
可操作最小取样空间： $1 \times 1 \times 1\text{m}$ ；

运输路径可通过最小空间：

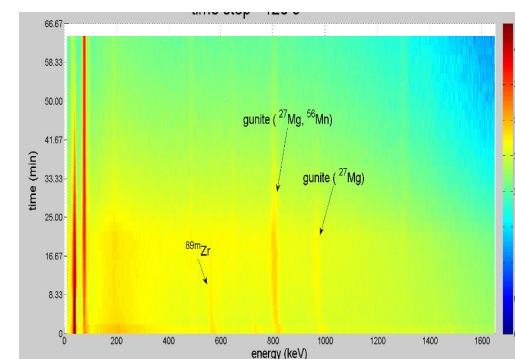
$1.5 \times 1.5 \times 1.5\text{m}$ ；

全自动样品运送，拆卸，安装。

高增益实验中子产额各项异性



在线系统



在线测量伽马本底严重



铸国防基石 做民族脊梁

谢谢！