

用于核数据测量的中子探测技术

阮锡超

核数据重点实验室
中国原子能科学研究院

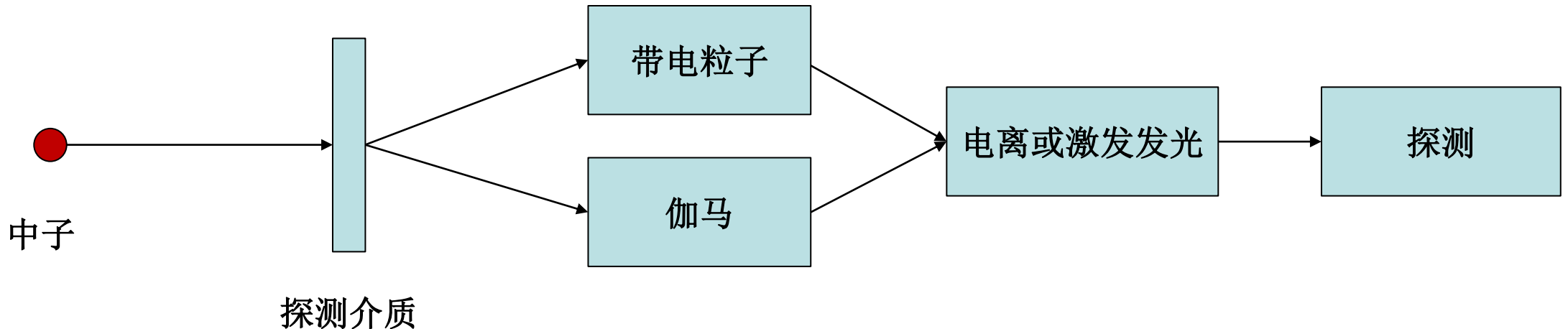
目录

- 中子探测技术简介
- 中子源参数测量技术
- 次级中子测量技术
- 低本底中子探测技术
- 小结

目录

- 中子探测技术简介
- 中子源参数测量技术
- 次级中子测量技术
- 低本底中子探测技术
- 小结

- 中子是电中性的，它在物质中不能像带电粒子那样能引起电离或激发，因而不能直接探测。
- 中子的探测比带电粒子和 γ 射线的探测要困难得多，主要是通过它与原子核相互作用产生带电粒子或 γ 来实现。



中子探测介质的重要条件:

- 反应道比较单一
- 反应截面准确: 效率准
- 反应截面相对平滑
- 材料易获得、易制作

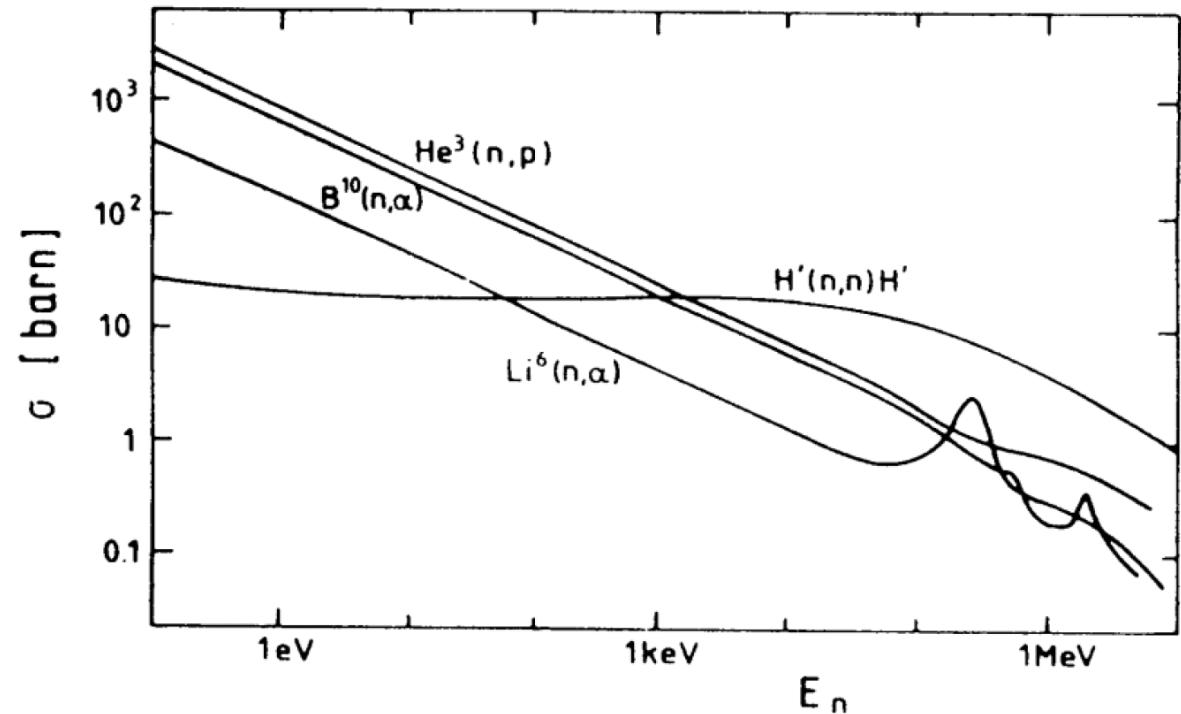


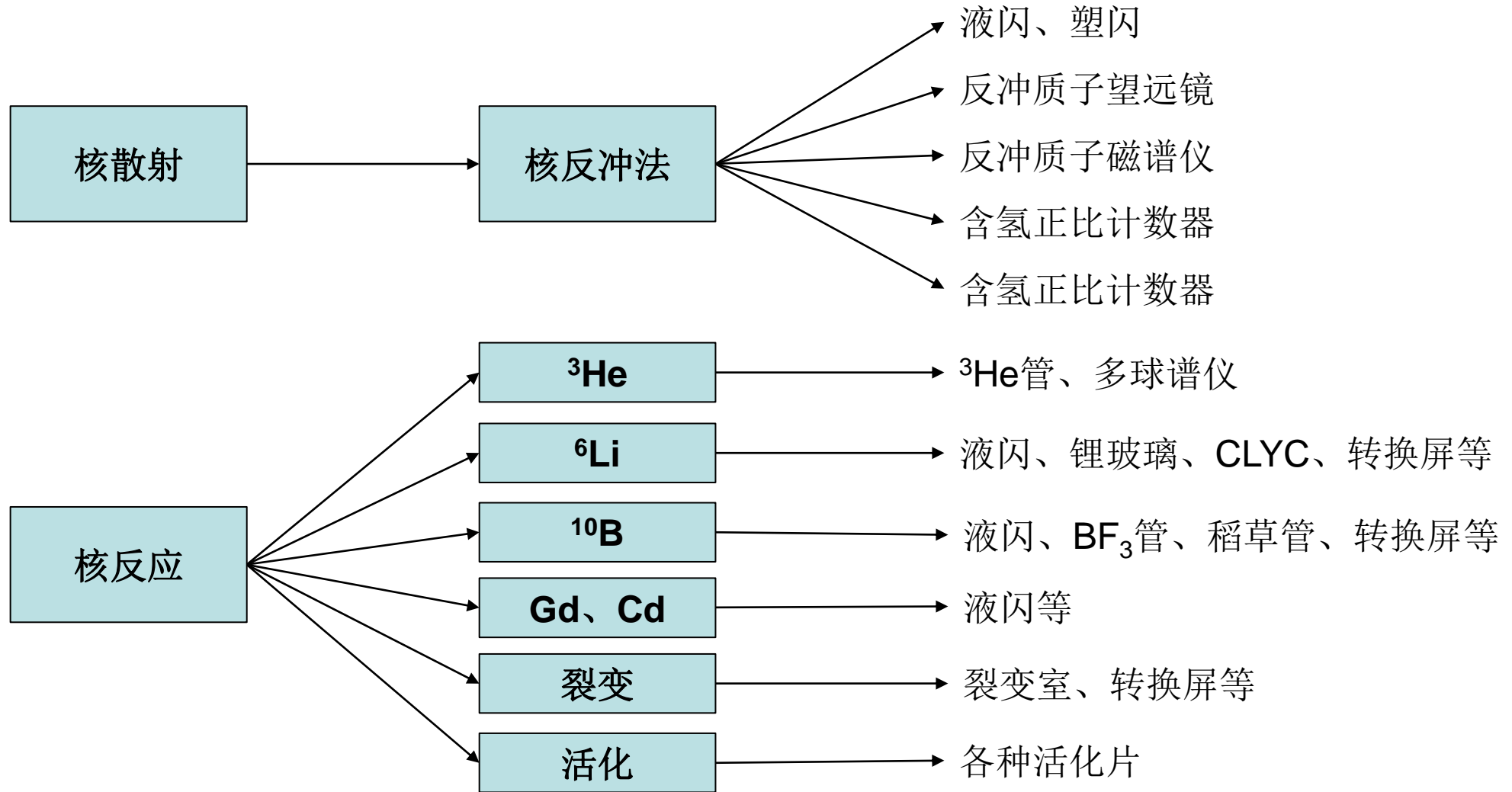
TABLE I. Cross section standards and reference data, release 2017.

Neutron cross section standards	
Reaction	Standards incident neutron energy range
H(n,n)	1 keV to 20 MeV
³ He(n,p)	0.0253 eV to 50 keV
⁶ Li(n,t)	0.0253 eV to 1 MeV
¹⁰ B(n,α)	0.0253 eV to 1 MeV
¹⁰ B(n,α ₁ γ)	0.0253 eV to 1 MeV
C(n,n)	10 eV to 1.8 MeV
Au(n,γ)	0.0253 eV, 0.2 to 2.5 MeV, 30 keV MACS
²³⁵ U(n,f)	0.0253 eV, 7.8-11 eV, 0.15 MeV to 200 MeV
²³⁸ U(n,f)	2 MeV to 200 MeV
High energy reference fission cross sections	
Reaction	Reference incident neutron energy range
^{nat} Pb(n,f)	≈ 20 MeV up to 1 GeV
²⁰⁹ Bi(n,f)	≈ 20 MeV up to 1 GeV
²³⁵ U(n,f)	200 MeV to 1 GeV
²³⁸ U(n,f)	200 MeV to 1 GeV
²³⁹ Pu(n,f)	200 MeV to 1 GeV
Prompt γ-ray production reference cross sections	
Reaction	Reference incident neutron energy range
¹⁰ B(n,α ₁ γ)	0.0253 eV to 1 MeV
⁷ Li(n,n'γ)	0.8 MeV to 8 MeV
⁴⁸ Ti(n,n'γ)	3 MeV to 16 MeV
Thermal neutron constants	
Prompt fission neutron spectra (PFNS)	
Reaction	Reference outgoing energy range
²³⁵ U(n _{th} ,f)	0.00001 eV – 30 MeV
²⁵² Cf(sf)	0.00001 eV – 30 MeV

国际原子能机构推荐的 标准截面及参考截面

几乎所有的中子探测都依赖这些反应

Nuclear Data Sheets 148 (2018) 143–188



目录

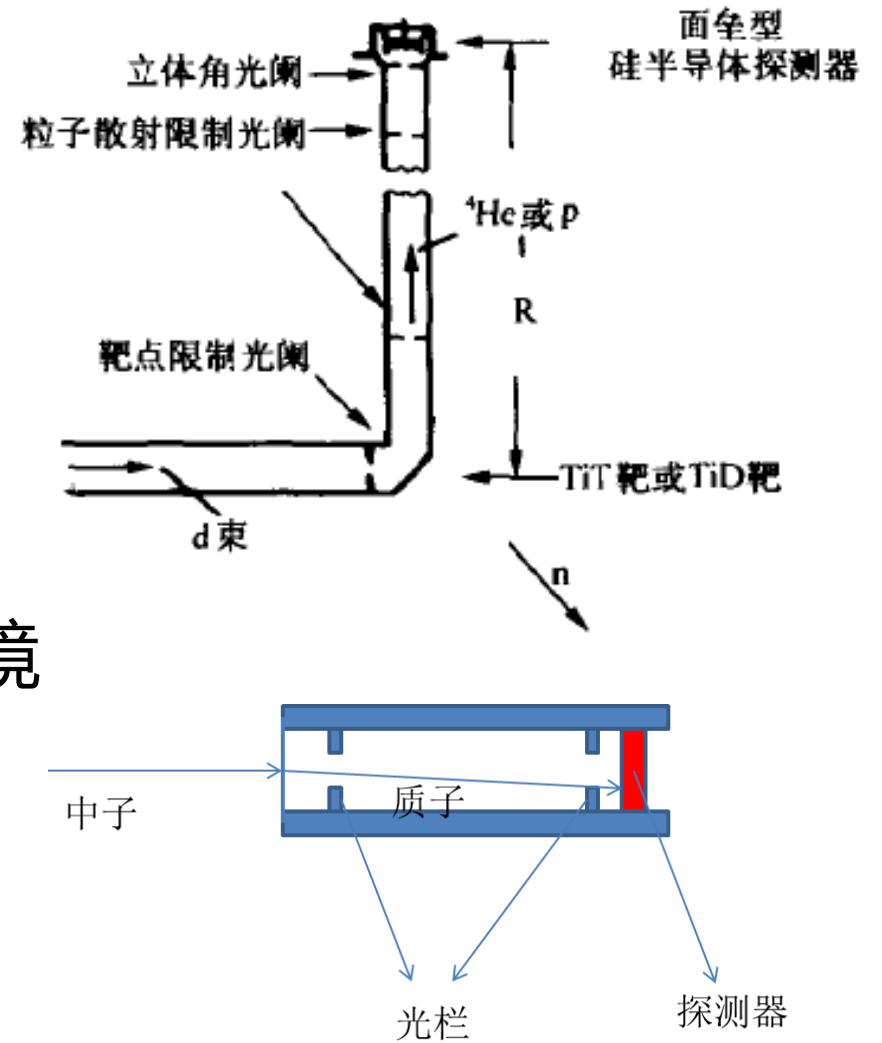
- 中子探测技术简介
- 中子源参数测量技术
- 次级中子测量技术
- 低本底中子探测技术
- 小结

1. 中子注量率测量

- 高压倍加器中子源：伴随粒子法



- 其它加速器中子源：反冲质子望远镜



1. 中子注量率测量

- 反应堆中子源：活化法、裂变室法
- 同位素中子源：锰浴法

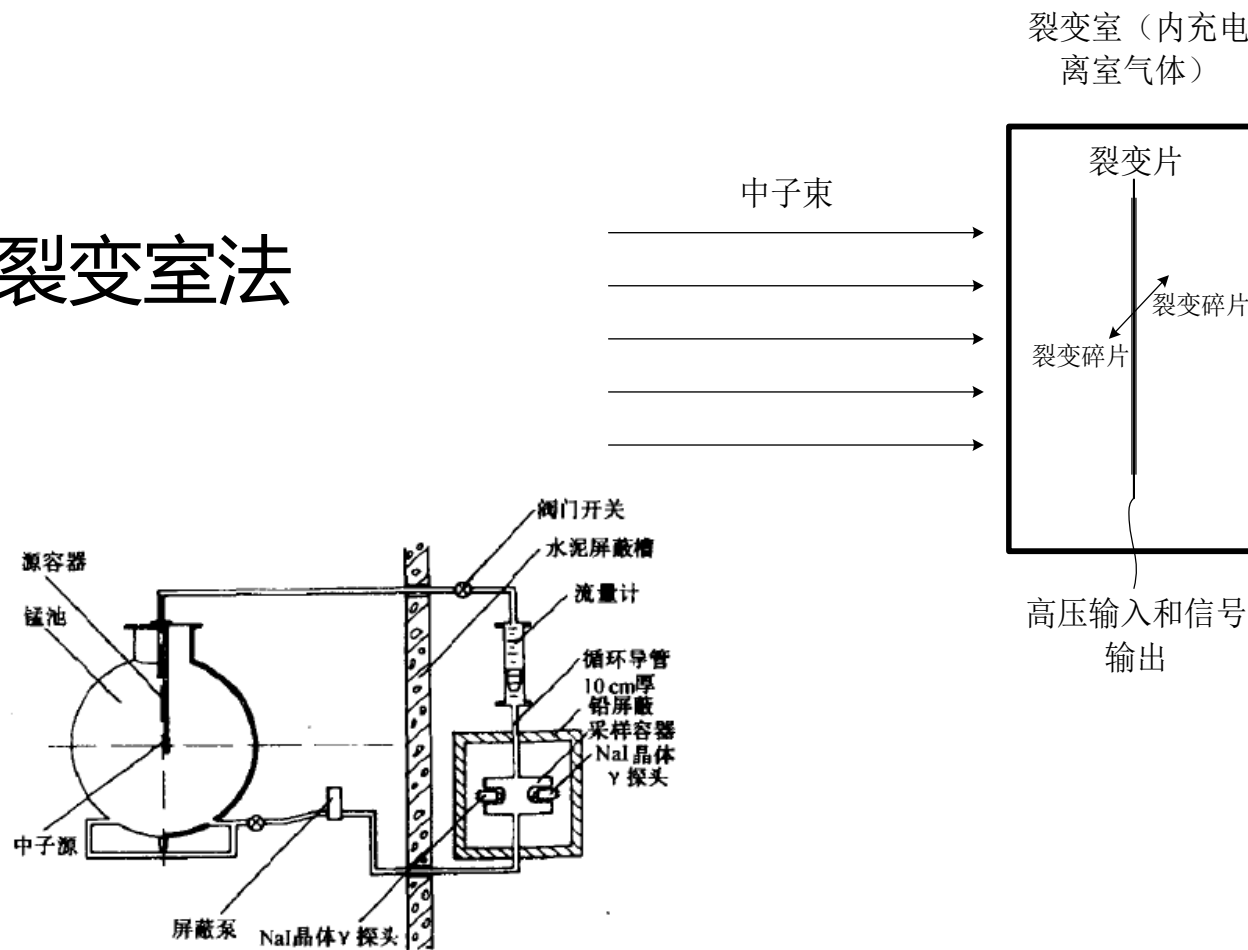


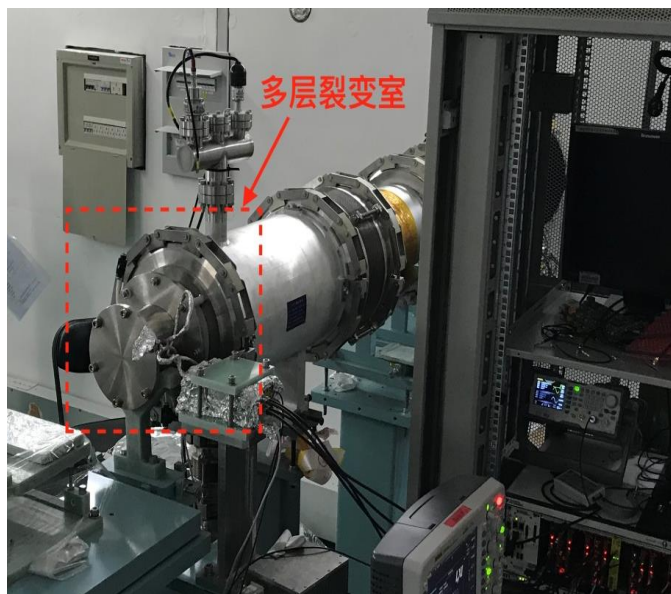
图 4.19 硫酸锰浴法测量装置示意图 [R077]

锰池直径：1m，不锈钢外壳

NaI 晶体尺寸： $\phi 40\text{mm} \times 40\text{mm}$

2. 中子能谱测量

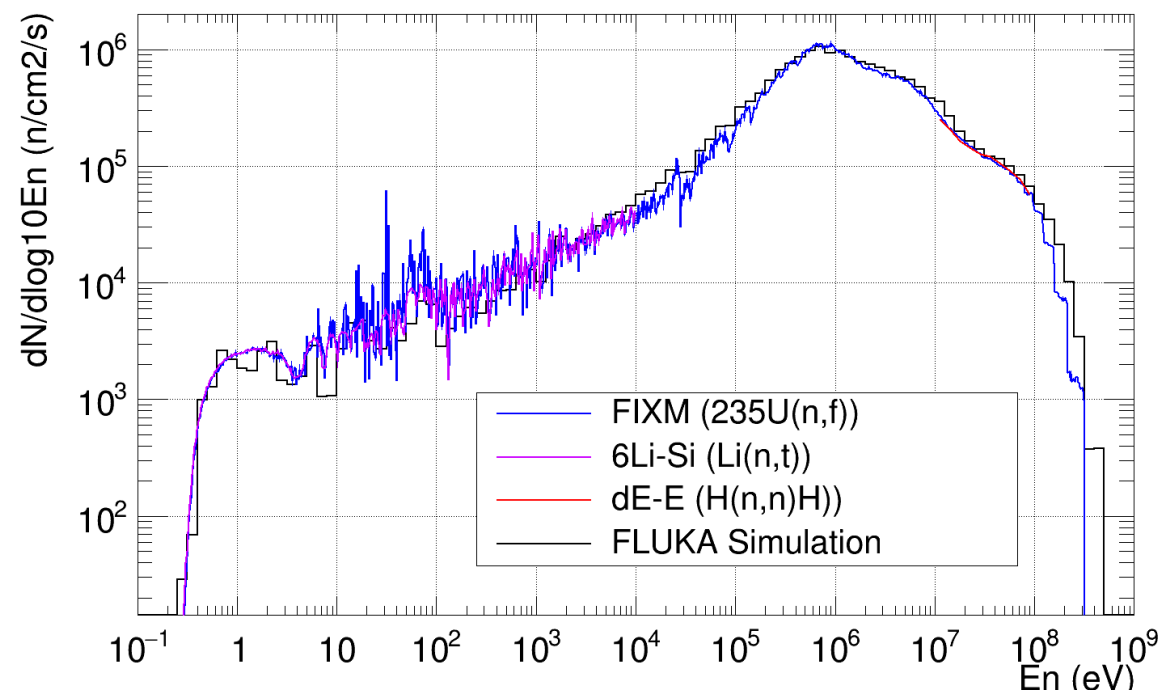
- 具备脉冲束的加速器中子源：飞行时间法 (CSNS back-n)



用于中子能谱测量的多层裂变电离室



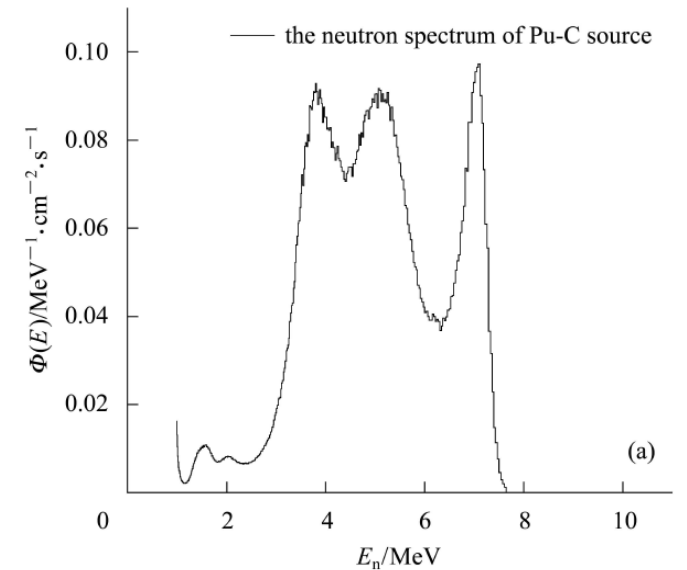
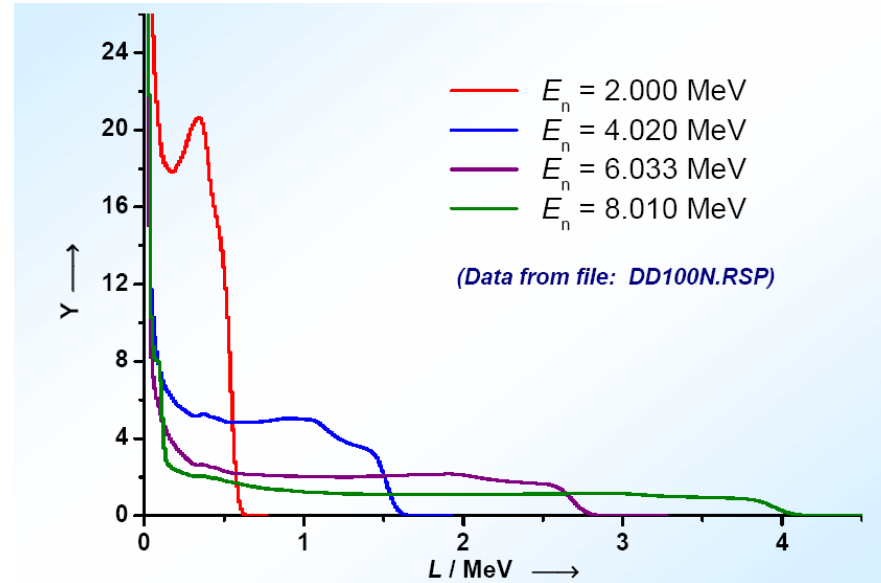
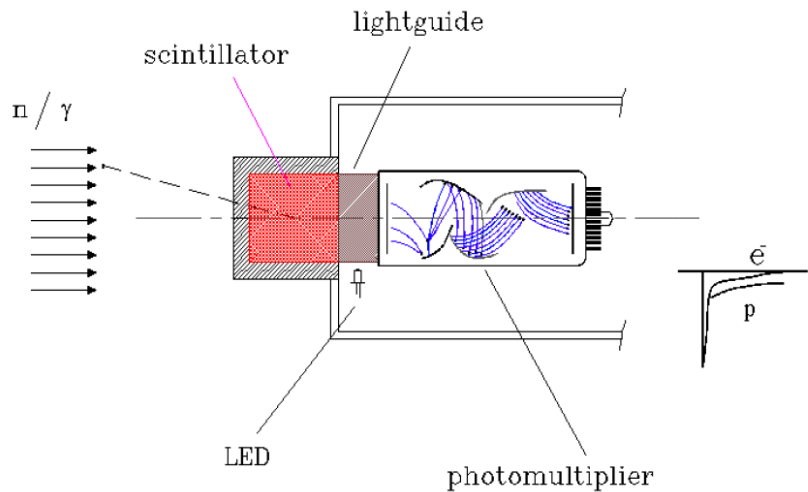
用于中子能谱测量的Li-Si探测器



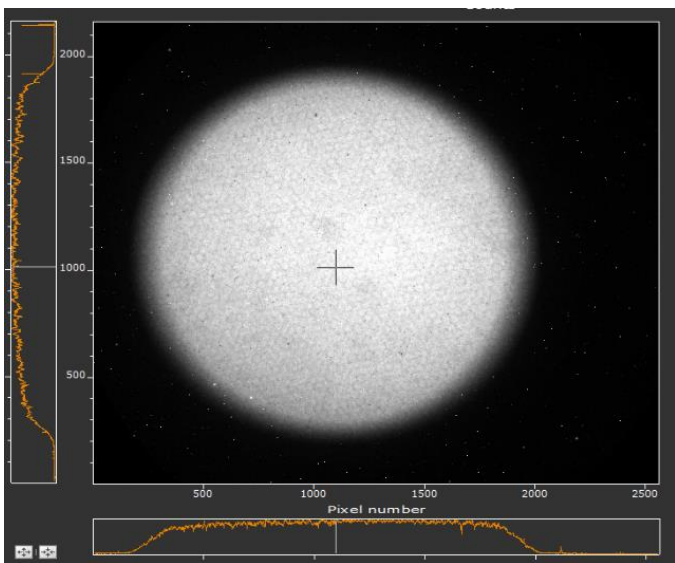
Back-n中子能谱结果

2. 中子能谱测量

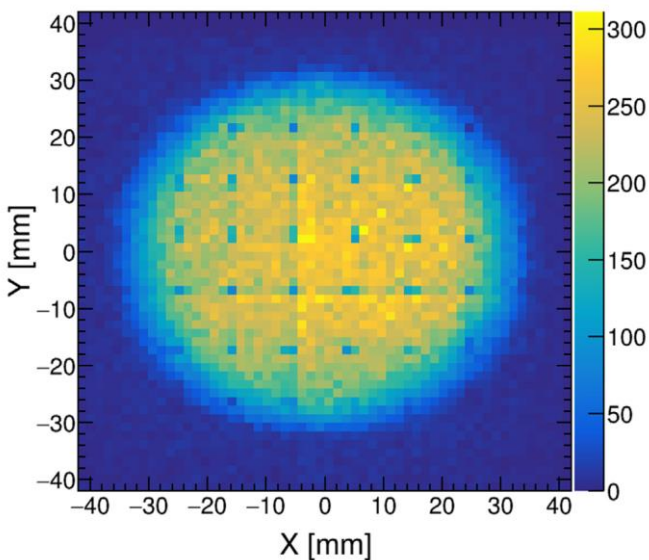
- 不具备脉冲束的中子源：反冲质子解谱、阈探测器法、多球能谱仪等



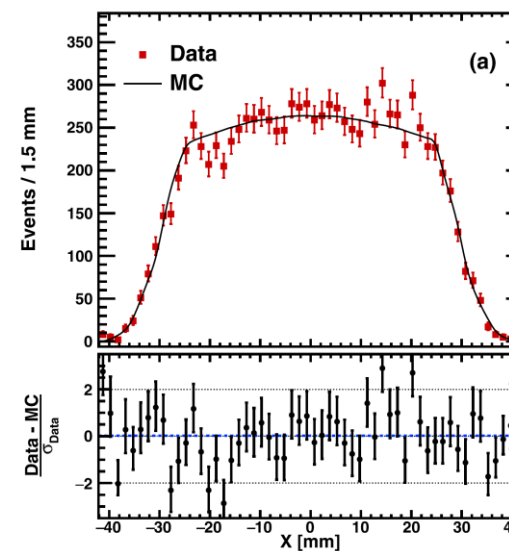
3. 束流剖面测量 (CSNS Back-n)



闪烁转换体+CMOS测得的束斑 (实验厅2, $\Phi 60$ mm束斑)



MicroMegas探测器测得的束斑 (实验厅1, $\Phi 60$ mm束斑)



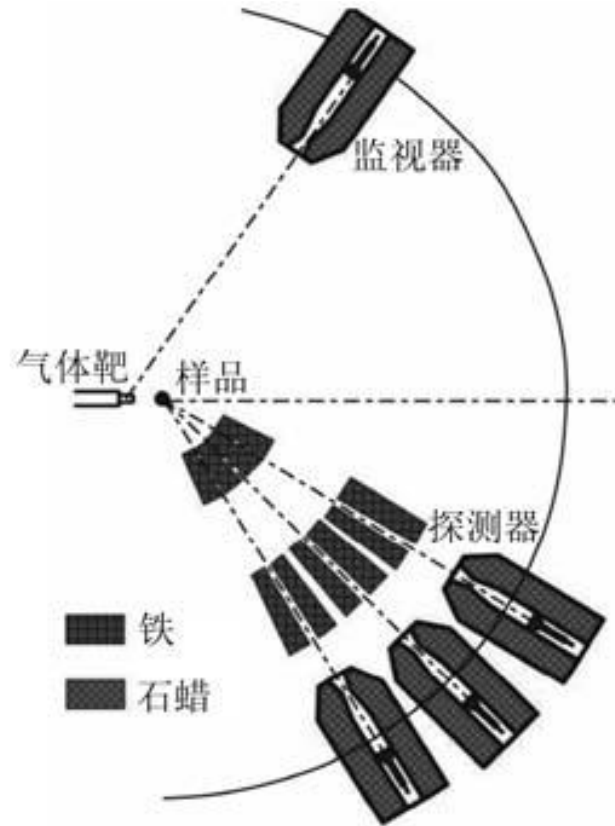
束斑均匀性测量结果与模拟结果的比较

目录

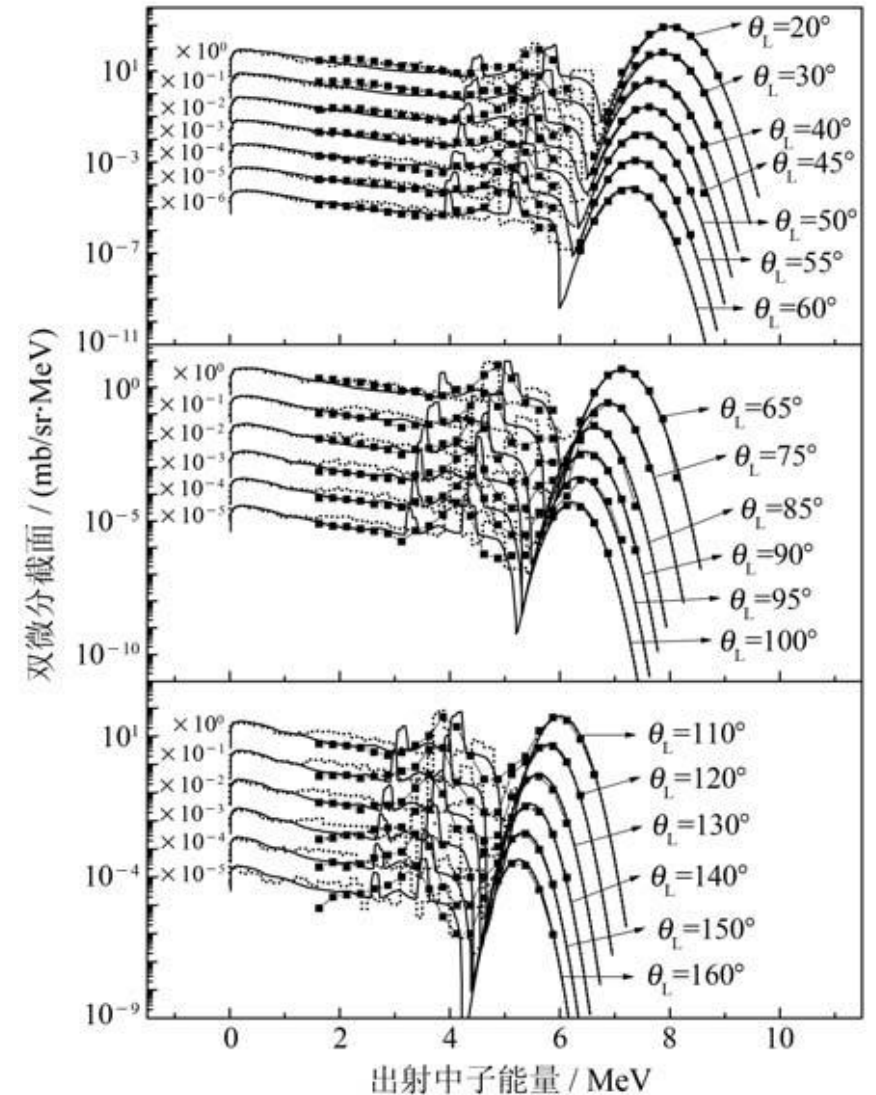
- 中子探测技术简介
- 中子源参数测量技术
- 次级中子测量技术
- 低本底中子探测技术
- 小结

1. 次级中子微分及双微分截面测量

$$\sigma_{\Omega,E} = \frac{d^2\sigma}{d\Omega dE}$$



HI-13 串列加速器上的飞行时间谱仪



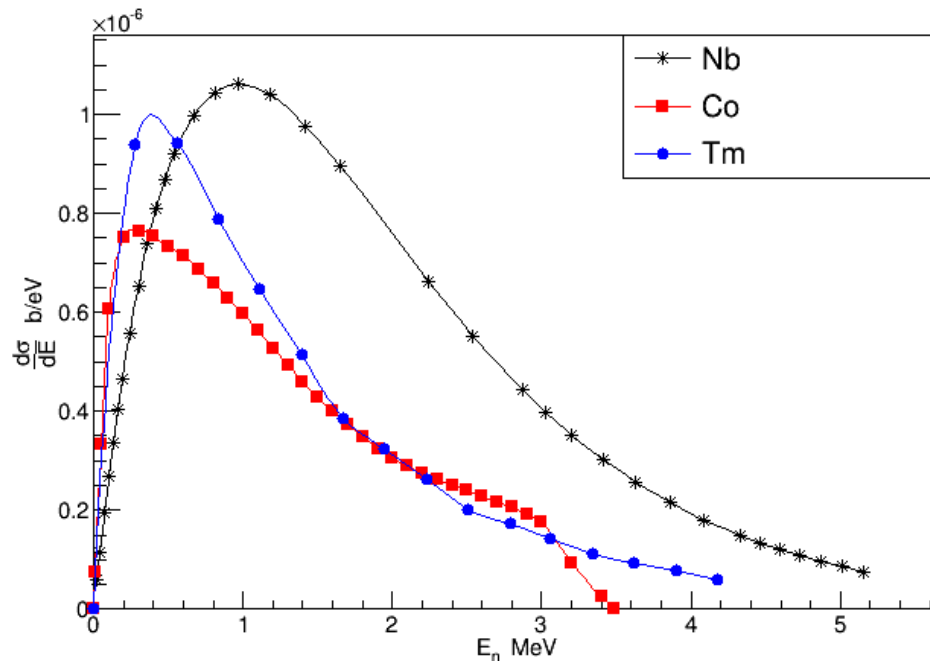
2. (n,2n)反应截面测量 (直接中子法)

- 大部分(n,2n)反应截面基于活化法测量获得;
- 当(n,2n)反应产物核为长寿命核或稳定核时 (如 $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92g}\text{Nb}$ 、 $\text{D}(n,2n)$ 等) , 活化法无能为力, 必须发展新的测量方法。

方法	优点	缺点
活化法	简单、当产物核活度容易测量且纲图准确时可以获得高精度数据	不适合所有核素
直接中子法	直接对出射的两个中子进行测量, 不需要理论修正, 实用性广	本底控制难
瞬发伽马射线法	能量分辨好, 本底干扰小	需要理论修正, 会引进额外不确定度
替代反应法	可实现不稳定核素的测量	需要理论修正, 会引进额外不确定度

Key issues for neutron detector:

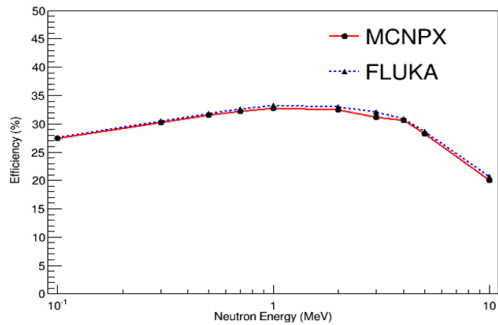
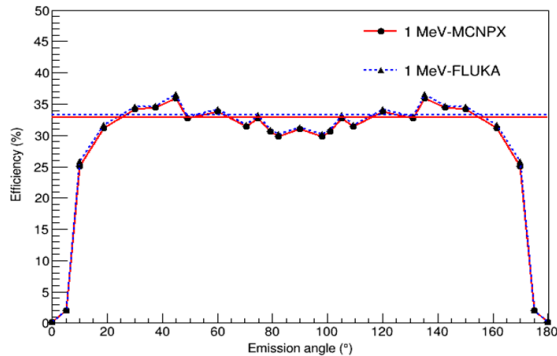
- High detection efficiency
- Low background
- Detector special and energy response are smooth.



Neutron spectra from
(n, 2n) reaction for
different nuclei

For this purpose, a spherical ^3He detection array was designed and developed.

Spherical



Barrel

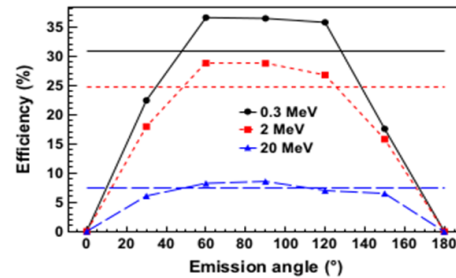


Fig. 6. Efficiency of the counter as a function of neutron emission angle relative to the beam axis for three monoenergetic neutron sources. The horizontal line represents the efficiency for an isotropic source at the same energy.

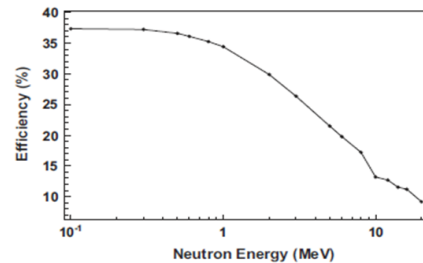
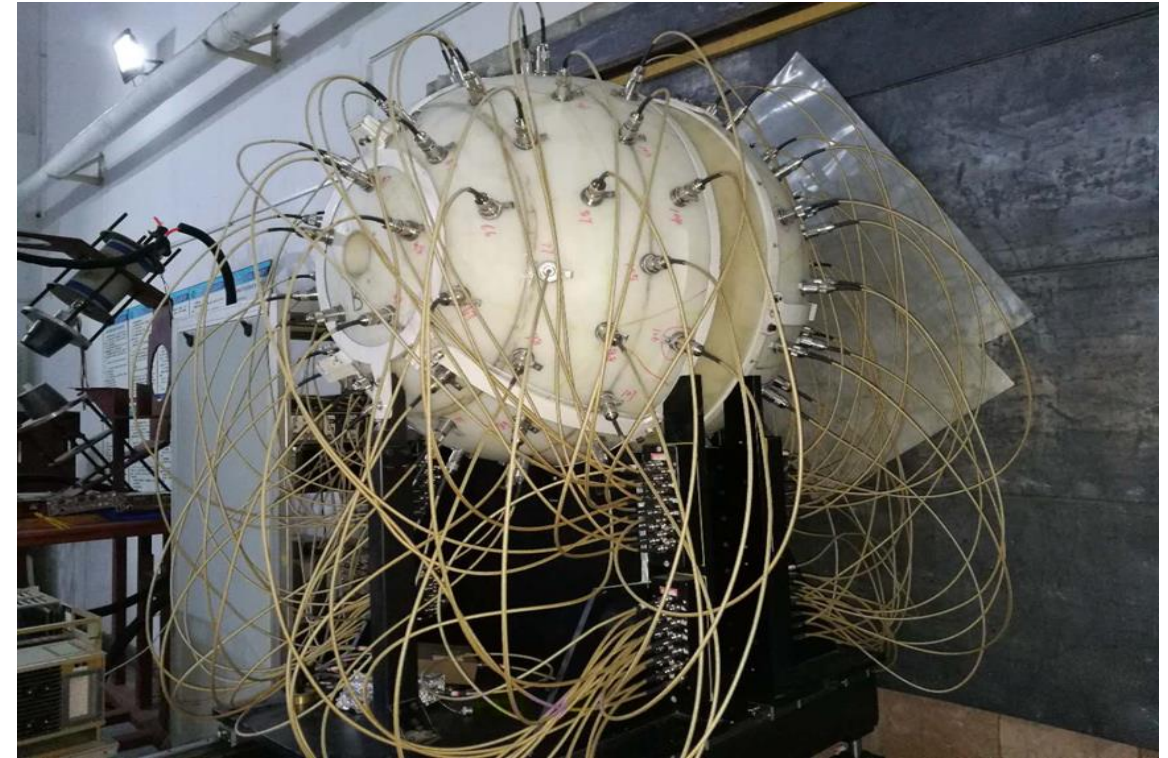


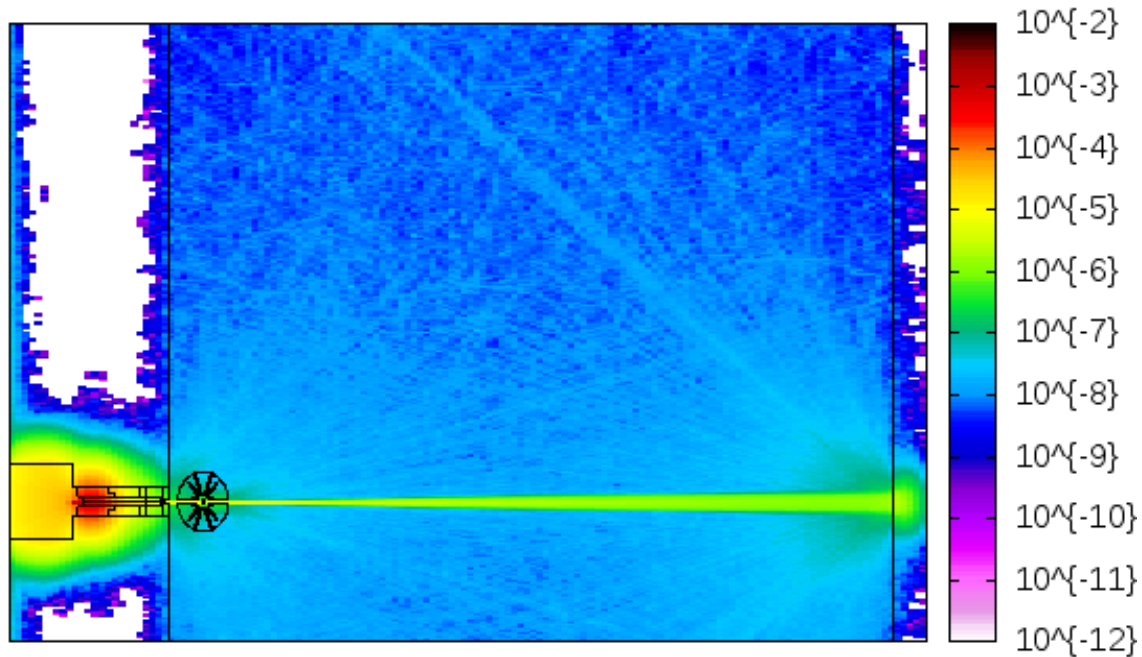
Fig. 3. Simulated neutron detection efficiency of the counter as a function of neutron energy. Calculated points are connected by linear segments for clarity.



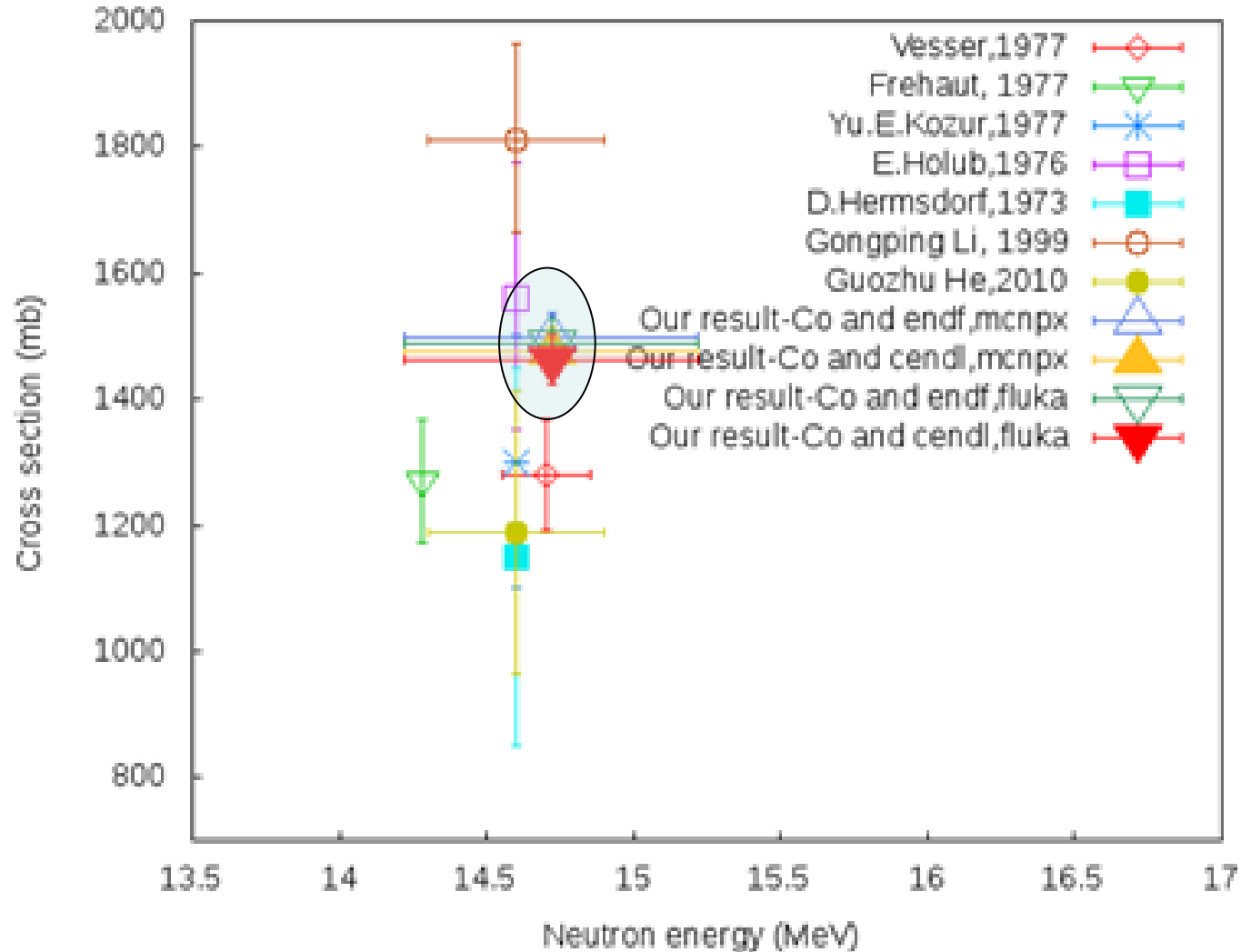
Picture of the detection array (110 ^3He counter)

Background control and determination:

- (1) Pulsed beam ($2 \mu\text{s}$ width, 1 kHz);
- (2) Shielding system;
- (3) Relative measurement;
- (4) Carbon sample was used to estimate accidental coincidence background.



Shielding system



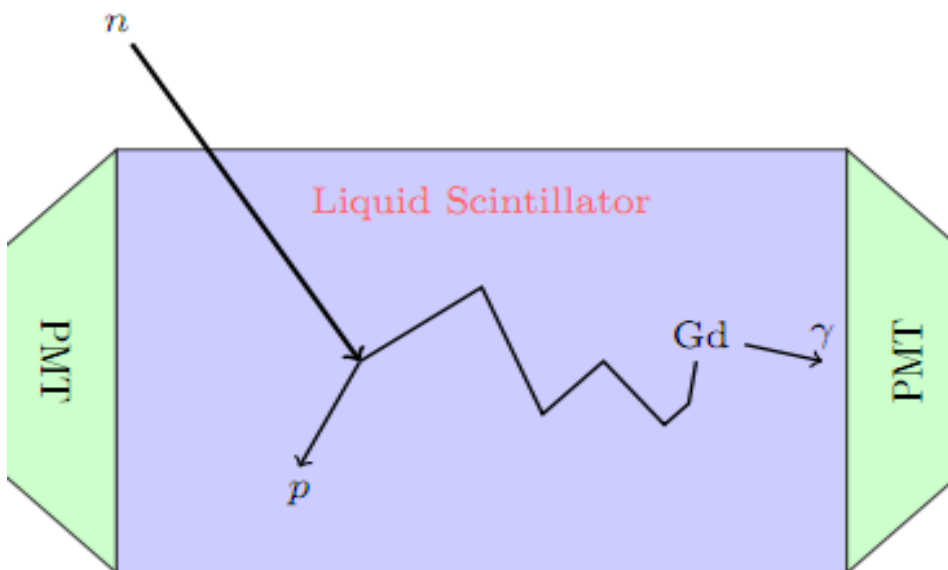
The system has been developed and used to measure the $^{93}\text{Nb}(n,2n)$ cross section. Good and consistent result has been obtained.

目录

- 中子探测技术简介
- 中子源参数测量技术
- 次级中子测量技术
- 低本底中子探测技术
- 小结

1. 锦屏深地实验室快中子本底测量探测器样机 (任杰硕士论文)

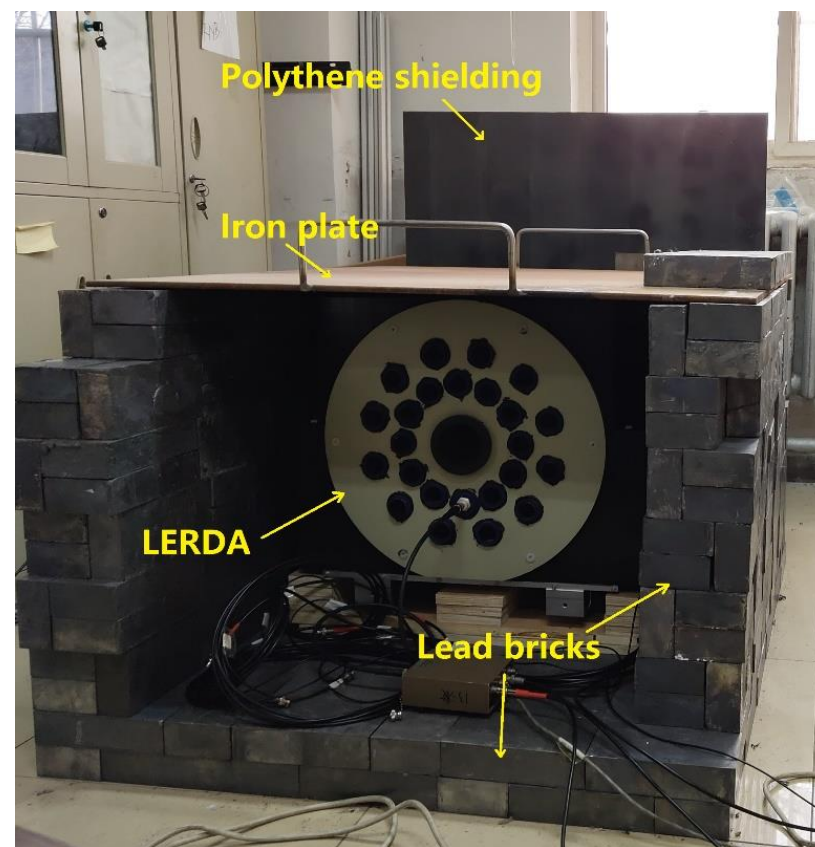
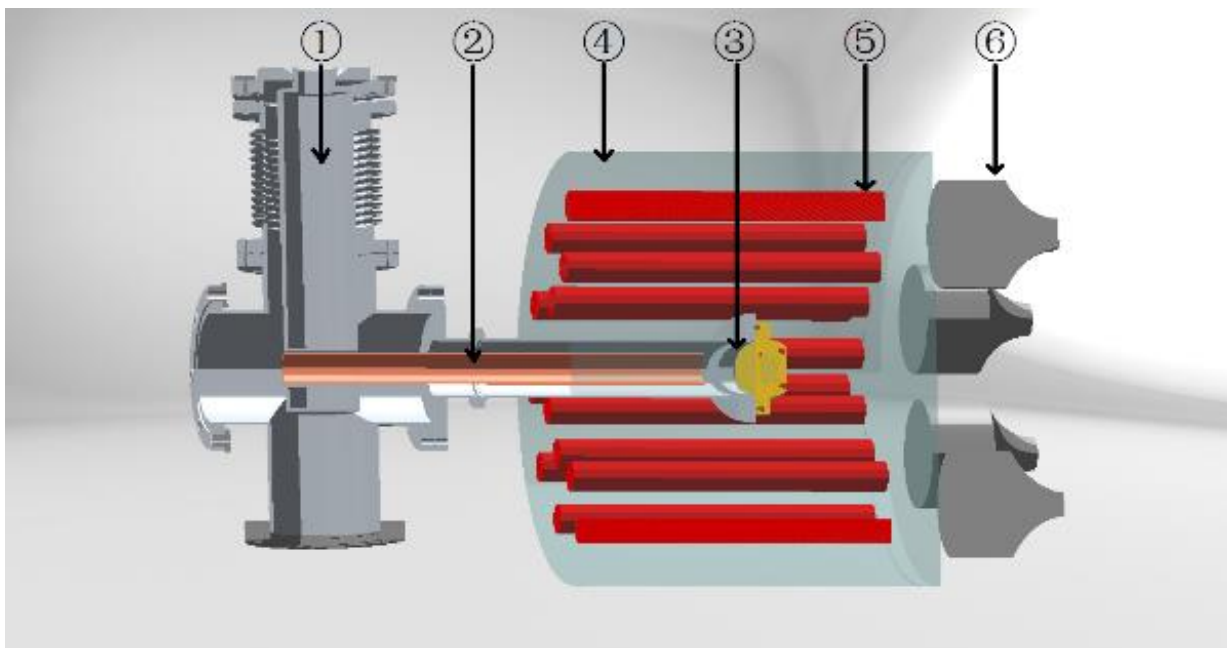
- Gd-LS
- 快-慢符合测量



2. JUNA (α, n)反应截面测量探测器LERDA (黄翰雄报告)

塑料闪烁体中插入 ^3He 管

快-慢符合测量



目录

- 中子探测技术简介
- 中子源参数测量技术
- 次级中子测量技术
- 低本底中子探测技术
- 小结

- 中子探测在核物理基础研究、核数据测量、核技术应用、中子散射技术等领域中发挥着至关重要的作用。
- 近年来中子探测技术得到了飞速发展，各种新型探测技术不断出现，但基本原理没变。
- 本报告侧重介绍了与核数据测量相关的中子探测技术，望能抛砖引玉，共同探讨中子探测技术的发展。

***Thank you for your
attention!***