

70MeV~100MeV准单能中子参考辐射场研究

焦昕雨，李玮，刘毅娜，李春娟，罗幸琪，秦茜，李世垚，邓雪莹，王志强，骆海龙

中国原子能科学研究院 核技术综合研究所

中子计量与测试技术研究室

2025年7月24日

目 录

一 研究背景与国内外现状

二 实验装置与研究内容

三 准单能中子的产生

四 中子场参数测量

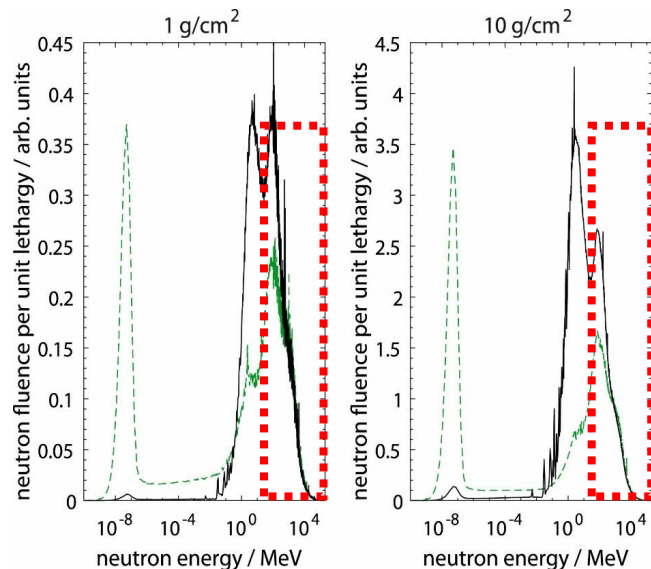
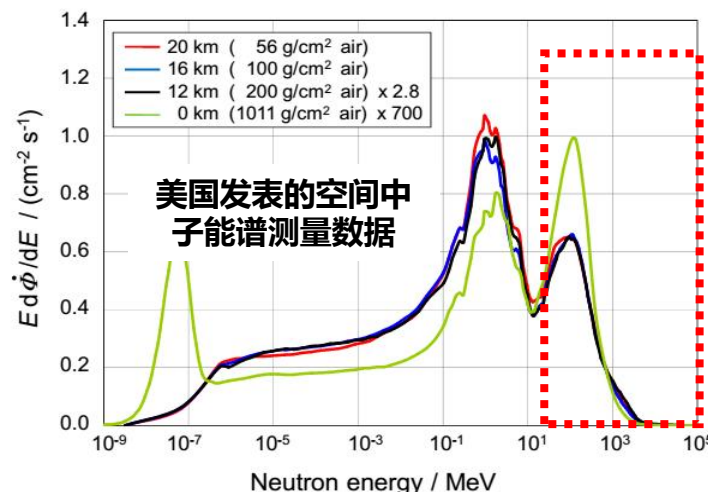
五 展望

探测器校准

空间环境、高能加速器周围的次级中子

探测器响应依赖计算，无实验校准

数据难以评价



GCR粒子在经屏蔽的ICRU球上打出的中子能谱

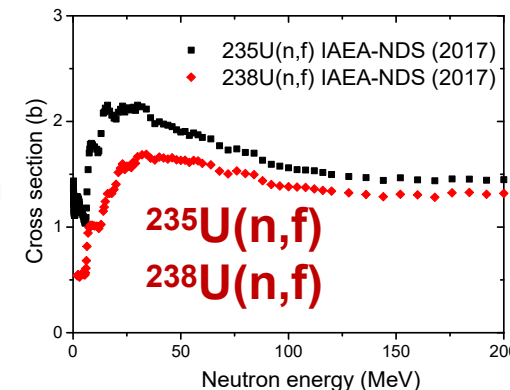
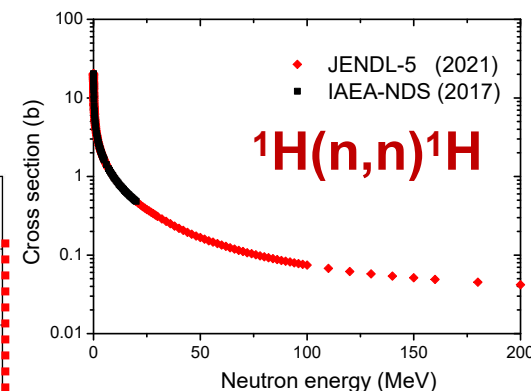
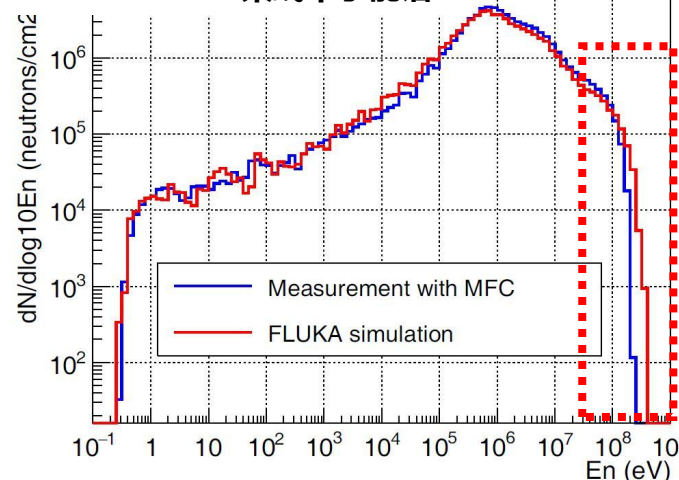
核数据

高能中子束流时间紧张

白光中子高能份额少

高能中子核数据少，不确定度大

CSNS back-n束线中子能谱



生物/器件效应与辐射防护

中子辐射效应
与能量强烈相关

高能中子效应
显著，不可忽略

生物/器件样品
不具备能量分辨能力

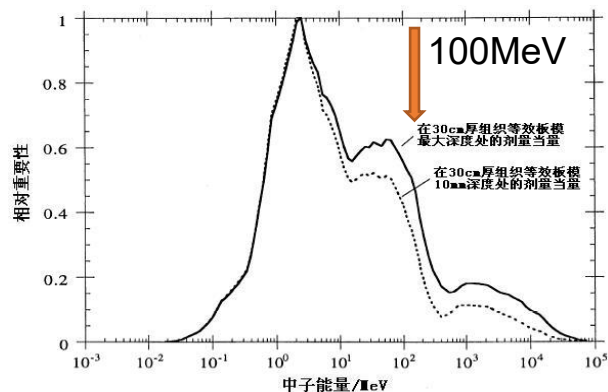
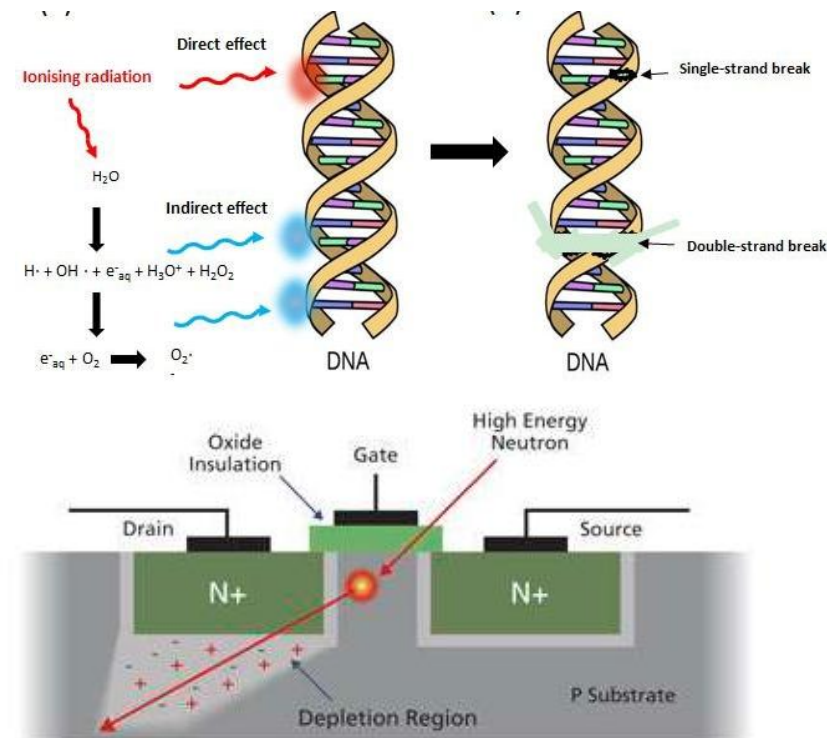
病人/医护人员
受照剂量评价

医院环境评价

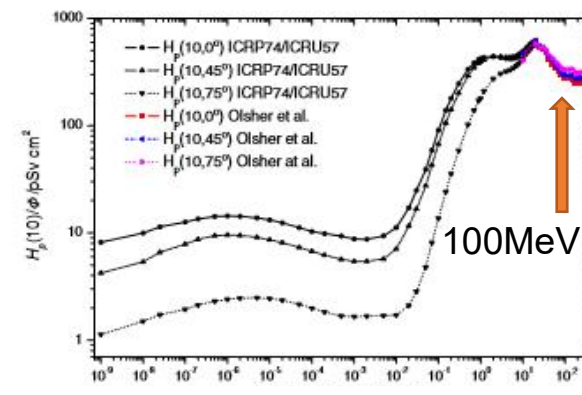
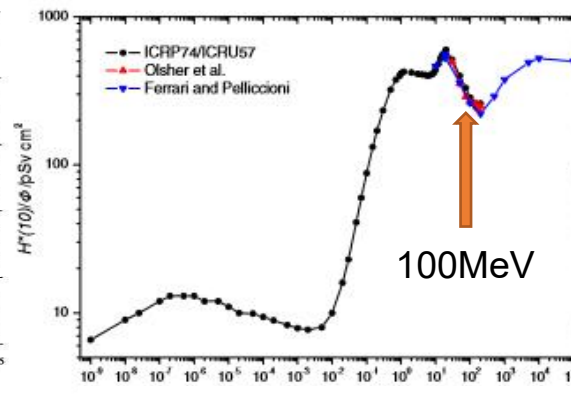
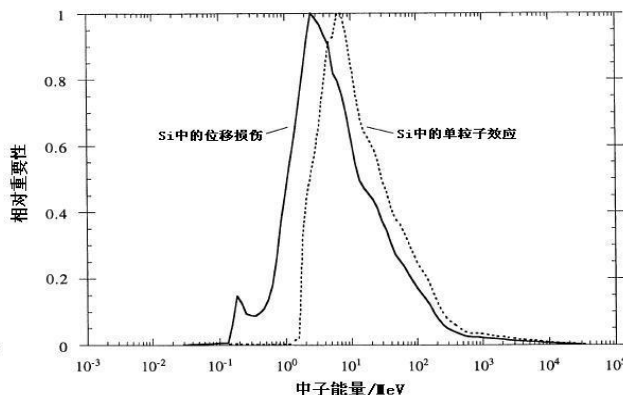
质子/重离子治疗

载人航天/登月

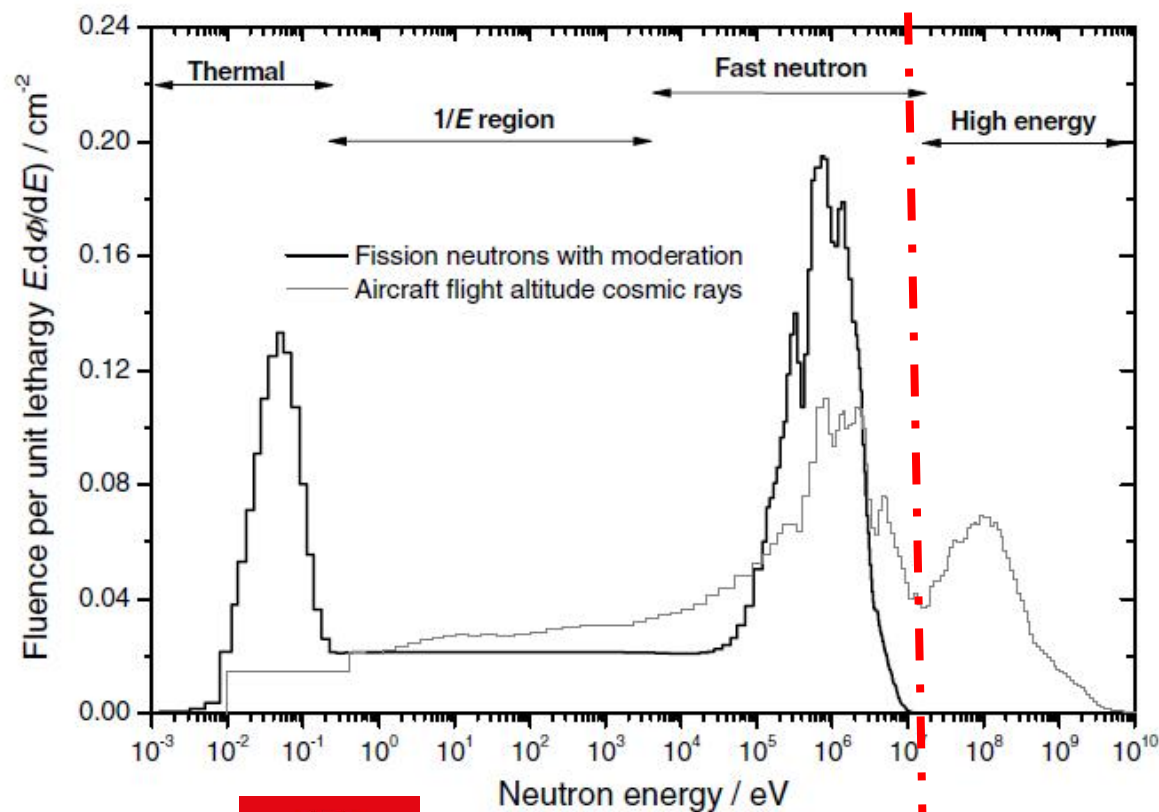
航天员剂量评价



生物、器件中子辐射损伤权重随中子能量的变化



中子注量转 $H^*(10)$ 、 $H_p(10)$ 转换系数随能量变化曲线



- 8529-1
- 8529-2
- 8529-3

国际计量局在其官方报告中将
20MeV以上高能中子场列为中子
计量领域未来两大挑战之一！

目前尚无20 MeV以上中
子参考辐射的相关标准

目录

一 研究背景与国内外现状

二 实验装置与研究内容

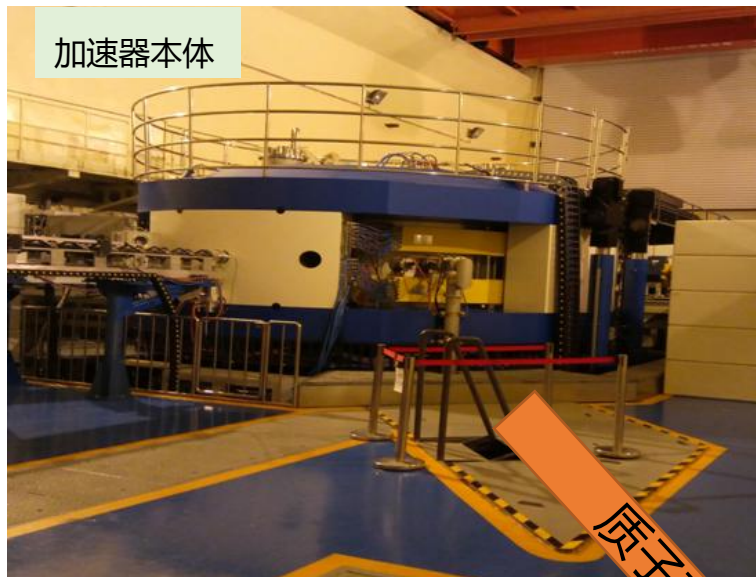
三 准单能中子的产生

四 中子场参数测量

五 展望

实验装置与研究内容

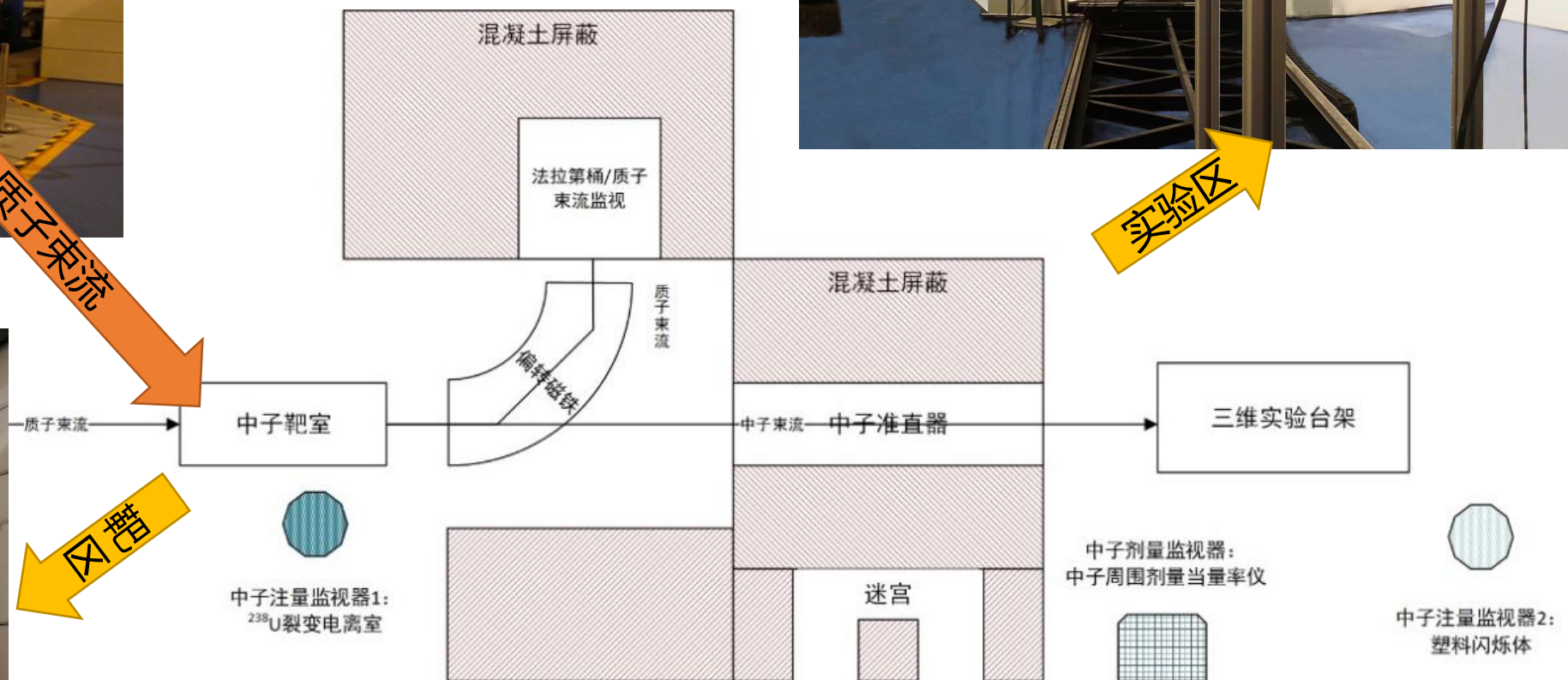
加速器本体



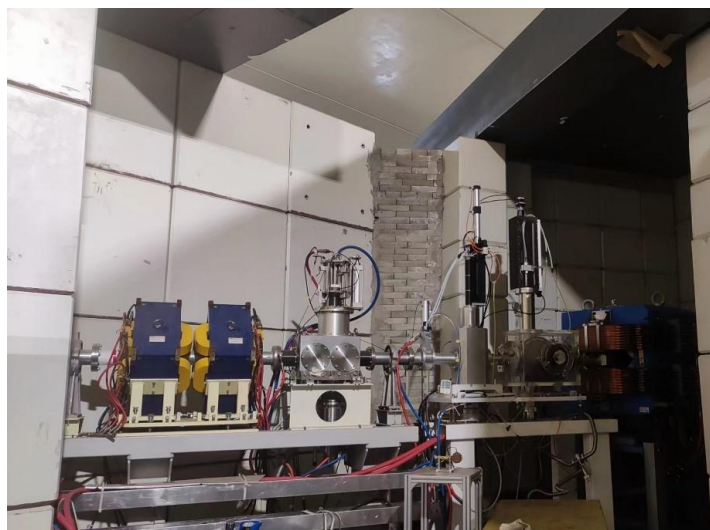
质子束流

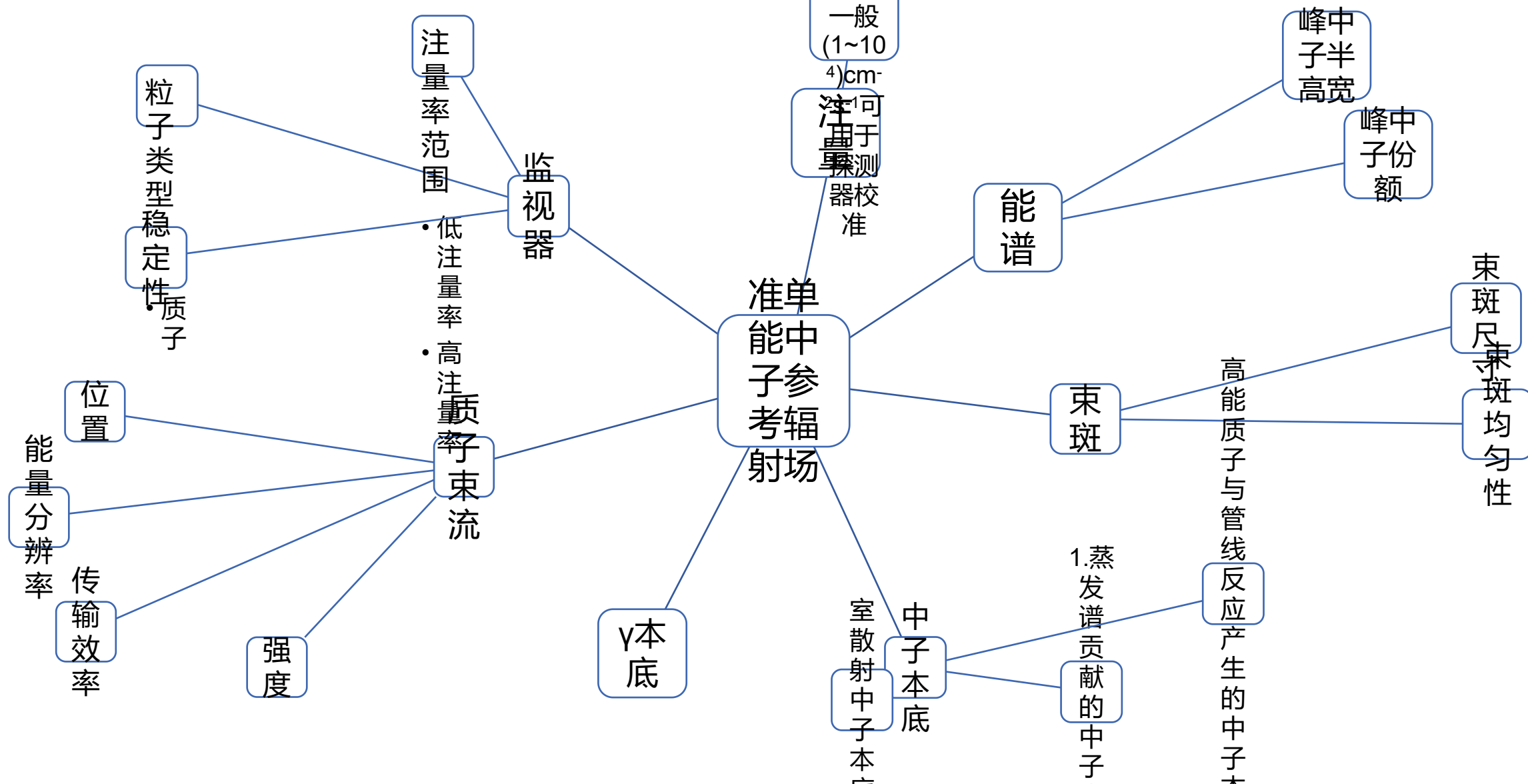


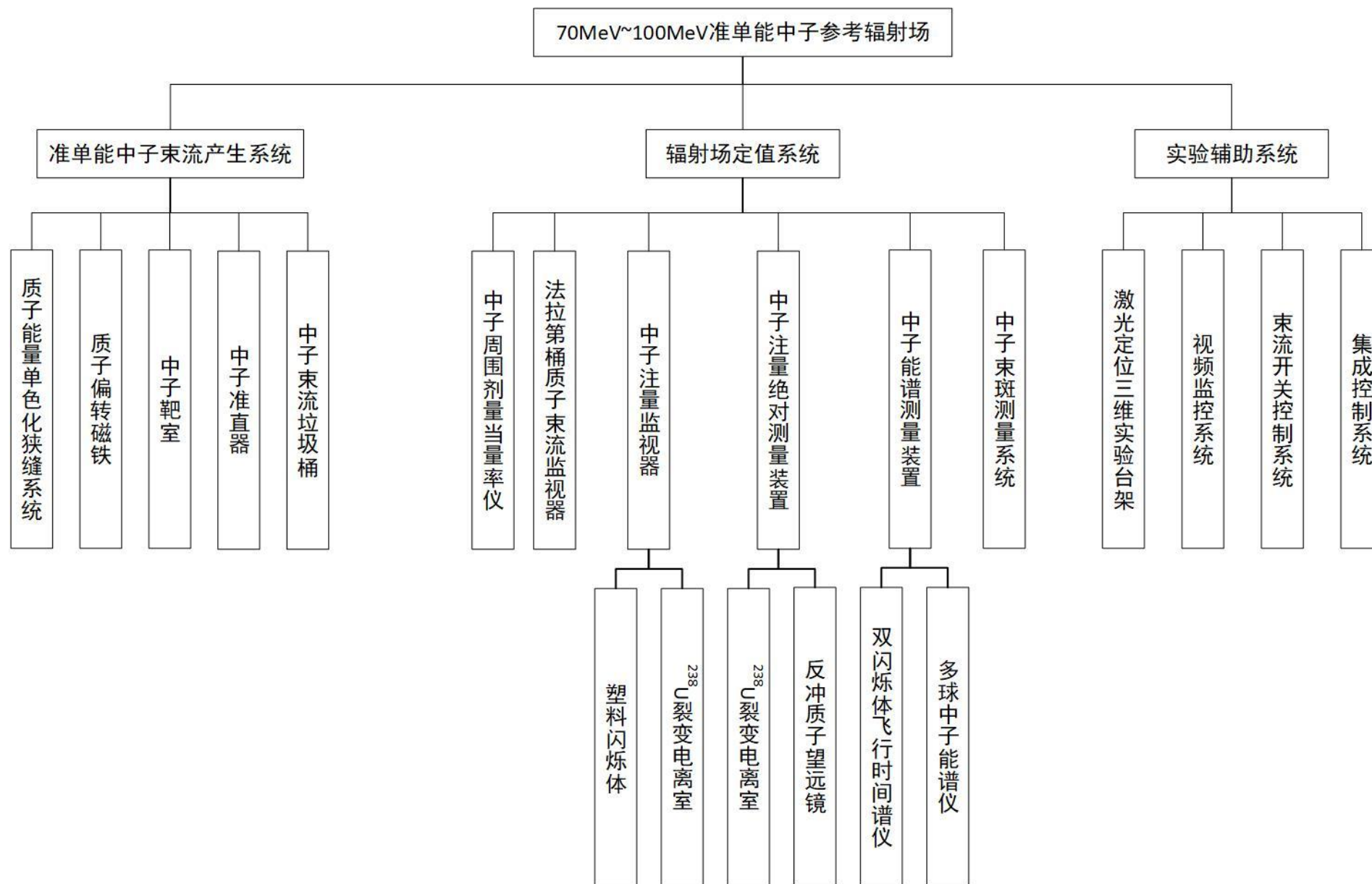
实验区



风槽







目 录

一 研究背景与国内外现状

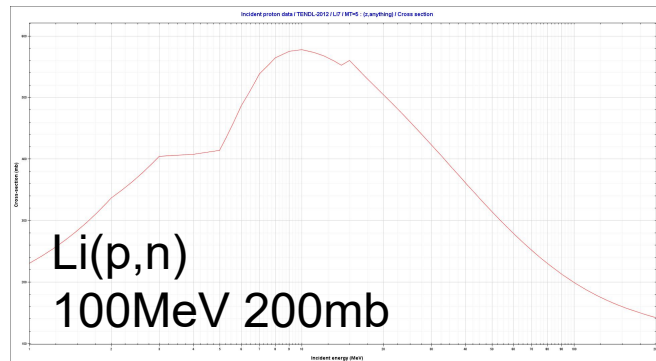
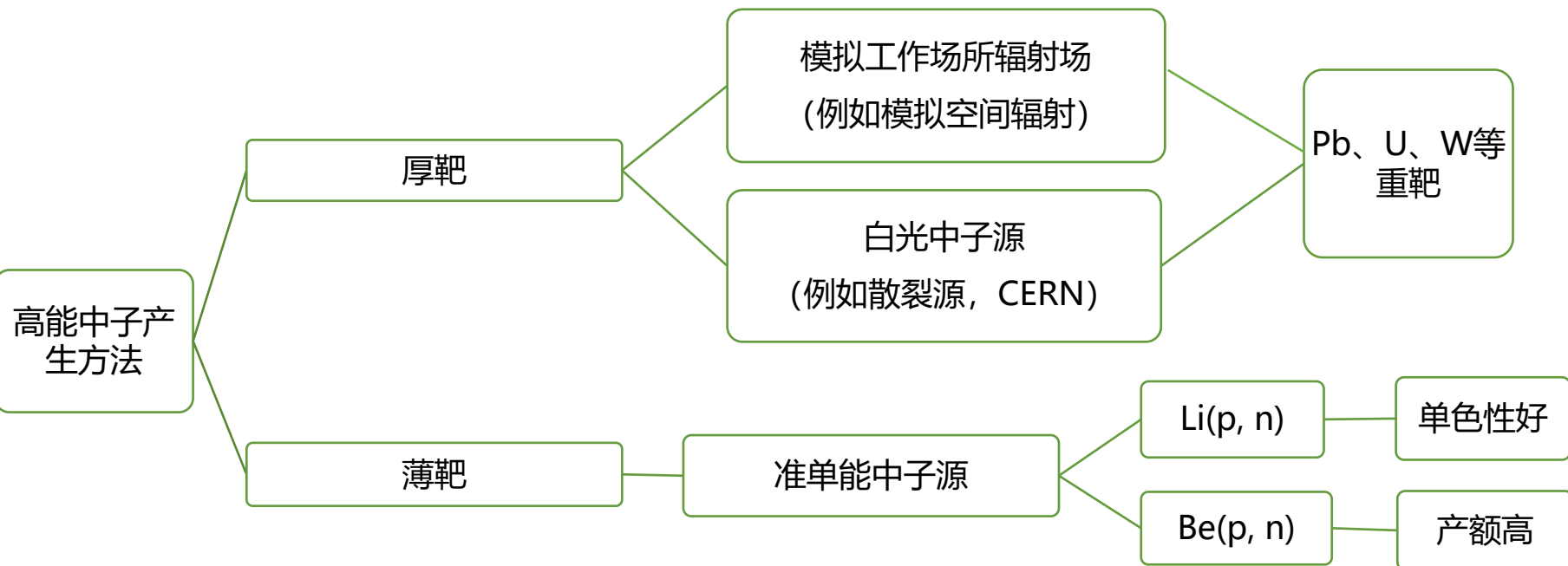
二 实验装置与研究内容

三 准单能中子的产生

四 中子场参数测量

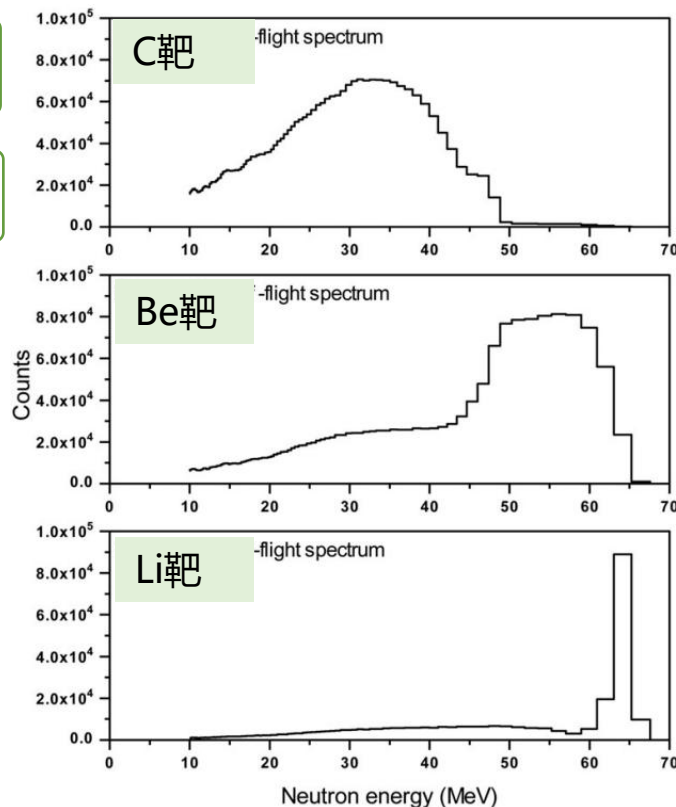
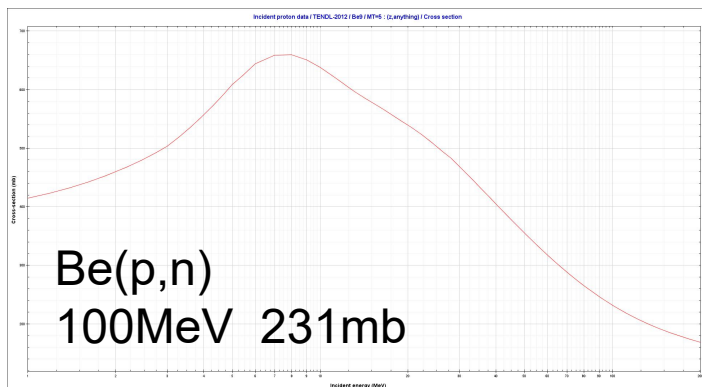
五 展望

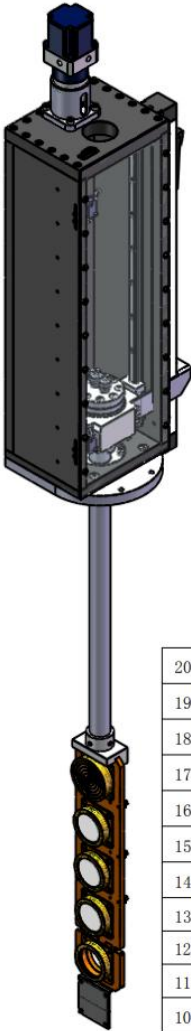
准单能中子的产生——中子靶室



核反应选取: ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$

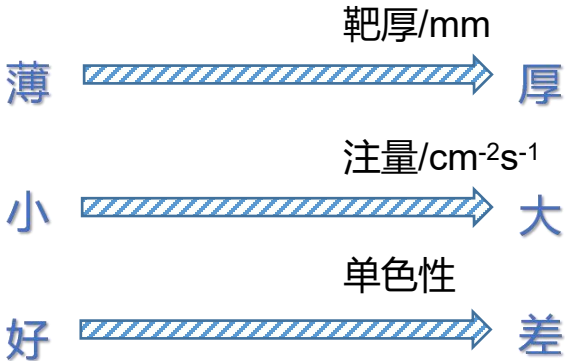
- ✓ 反应Q值较小 (1.6MeV) ——直接相互作用产生的中子能量与入射质子能量相当;
- ✓ ${}^7\text{Be}^*$ 第一激发态能低 (0.4MeV) ——中子单色性好, 即使有激发态 ${}^7\text{Be}$ 产生, 对中子能量分辨率的影响较小;



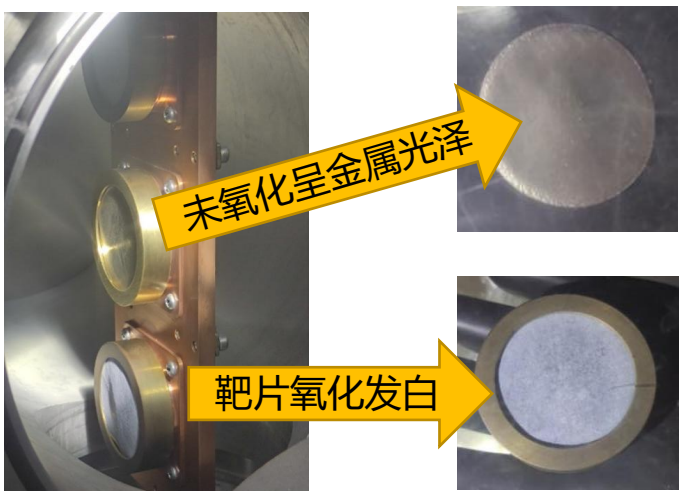


靶室设计依据:

- ① 中子单色性
- ② 中子注量



20	℃
19	℃
18	℃
17	℃
16	℃
15	℃
14	℃
13	℃
12	℃
11	℃
10	℃



靶材料选取：金属锂，天然丰度

- ✓ 高能质子会与C、O、F、N等元素也会反应产生不必要的本底中子，因此纯金属锂能够避免这些本底；
- ✓ 天然锂中⁷Li丰度为92.55%，可以不进行特殊富集；
- ✓ 金属锂化学性质活泼，需有保护气体防止氧化；

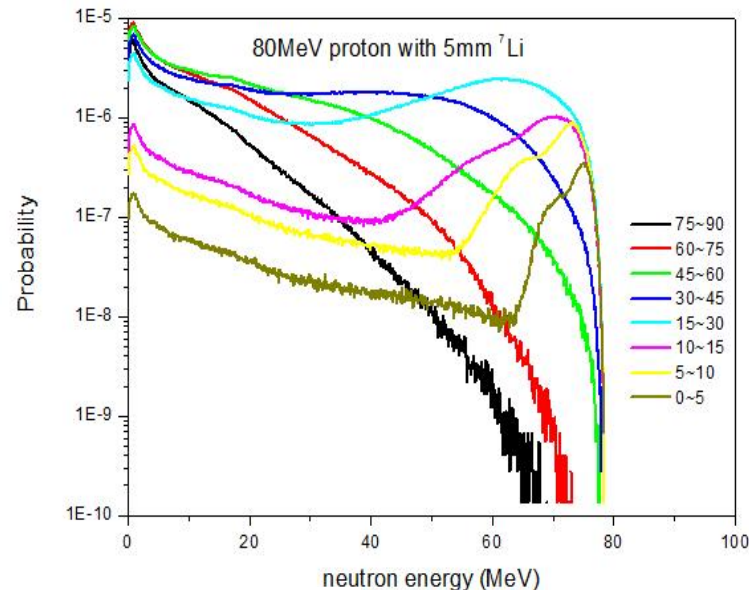
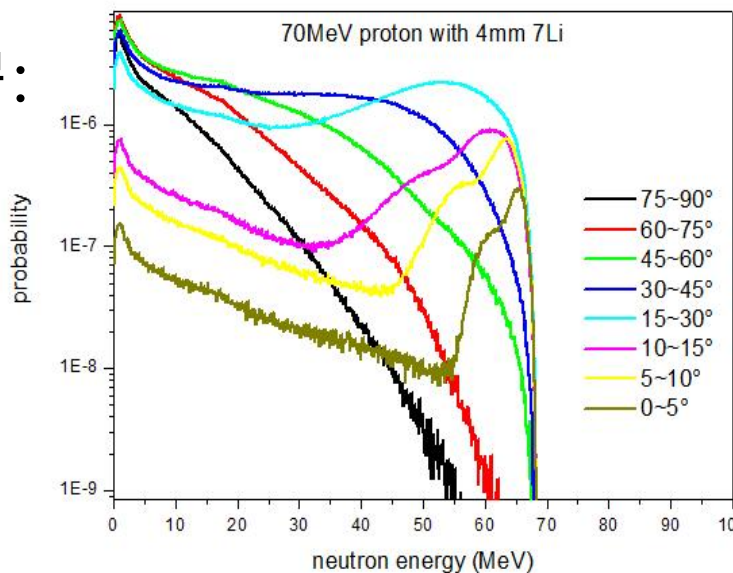
靶厚：不同入射质子能量对应不同靶厚

- ✓ 质子能量越高，(p,n)反应截面越小，产额越低，要达到同样注量率时靶越厚；靶内单位路径沉积能量越少，能量损失越小，质子能散越小，中子单色性越好；

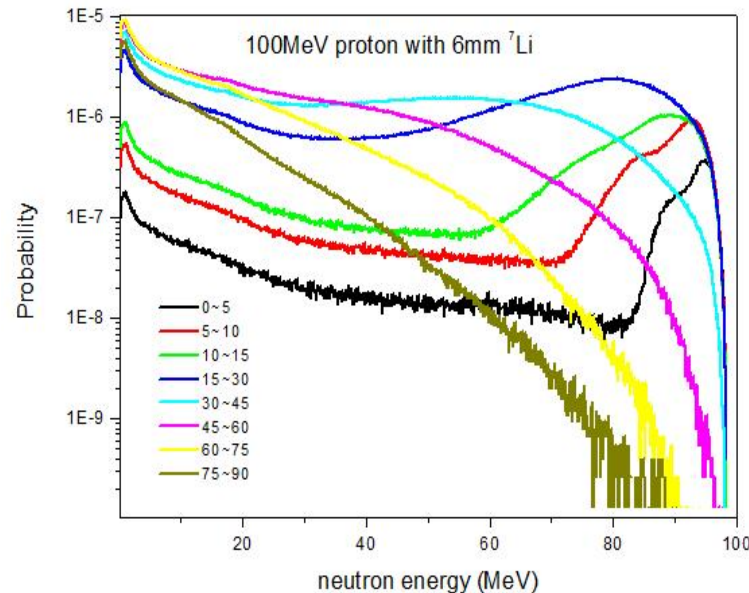
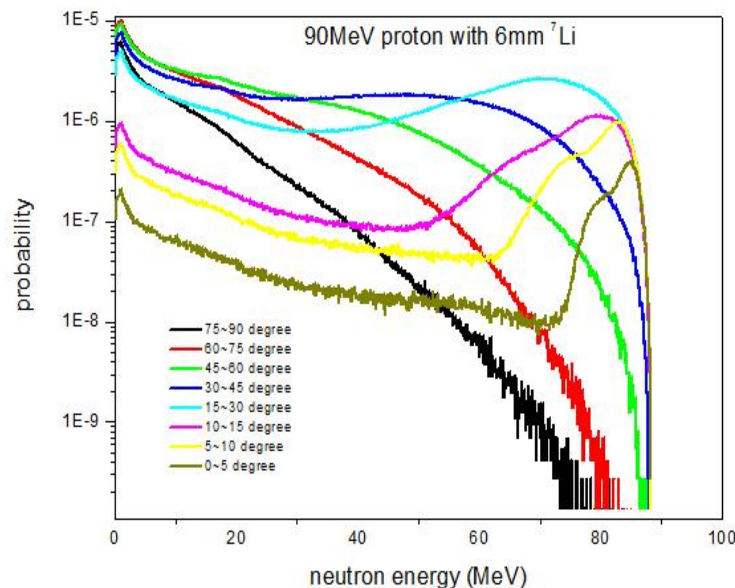
入射质子能量/MeV	靶厚/mm	质子能量损失/MeV
100	6	2.00
90	6	2.18
80	5	2.40
70	4	2.68

准直器设计依据:

- ① 中子单色性
- ② 中子注量
- ③ 中子本底
- ④ γ 本底

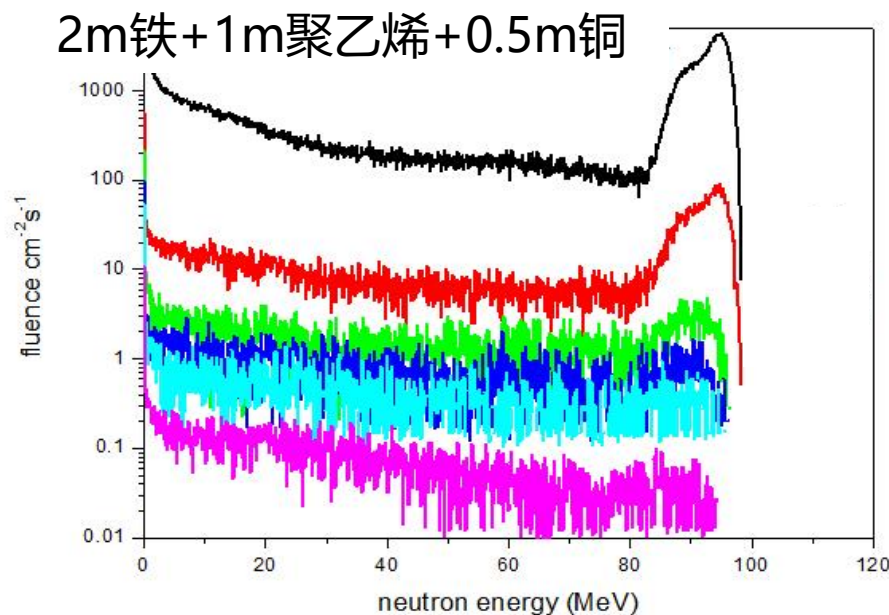
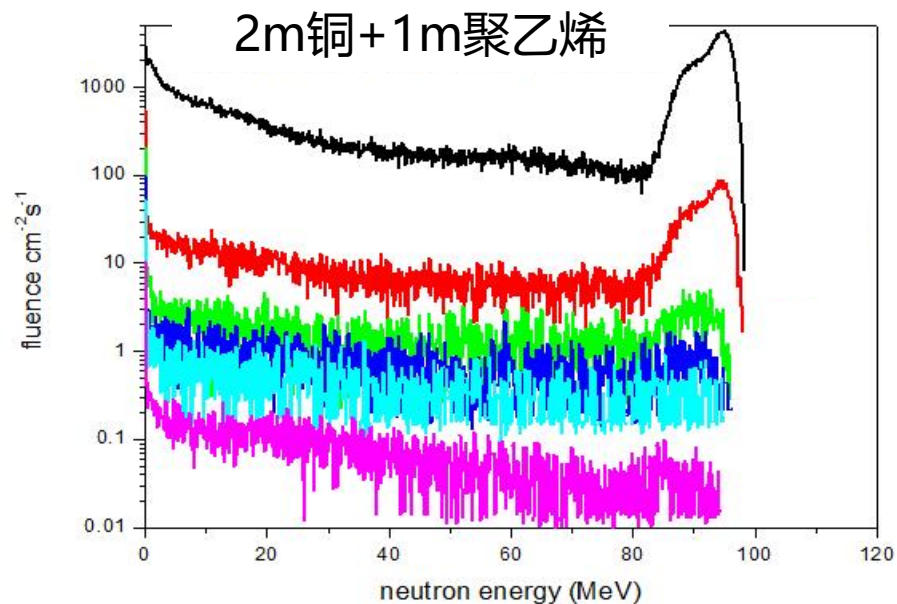
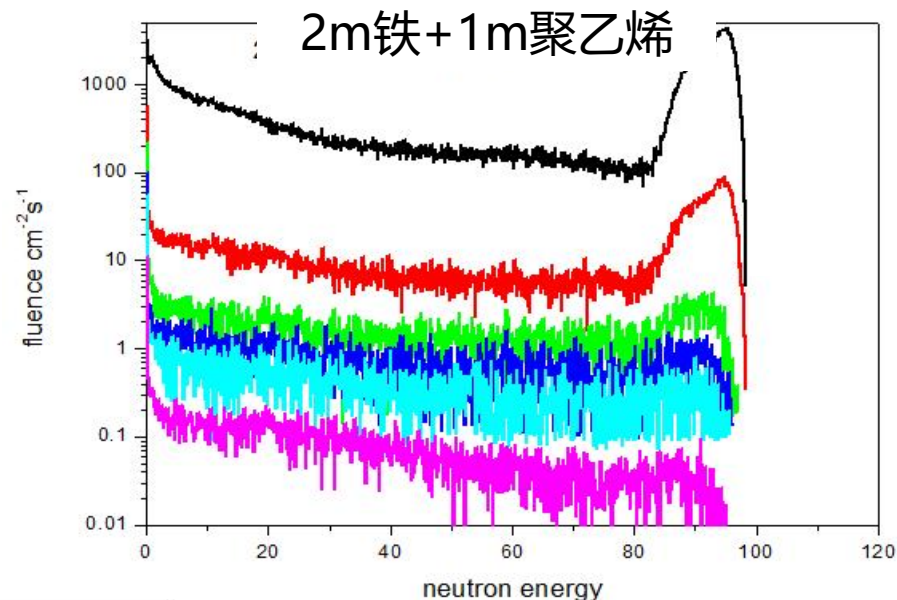
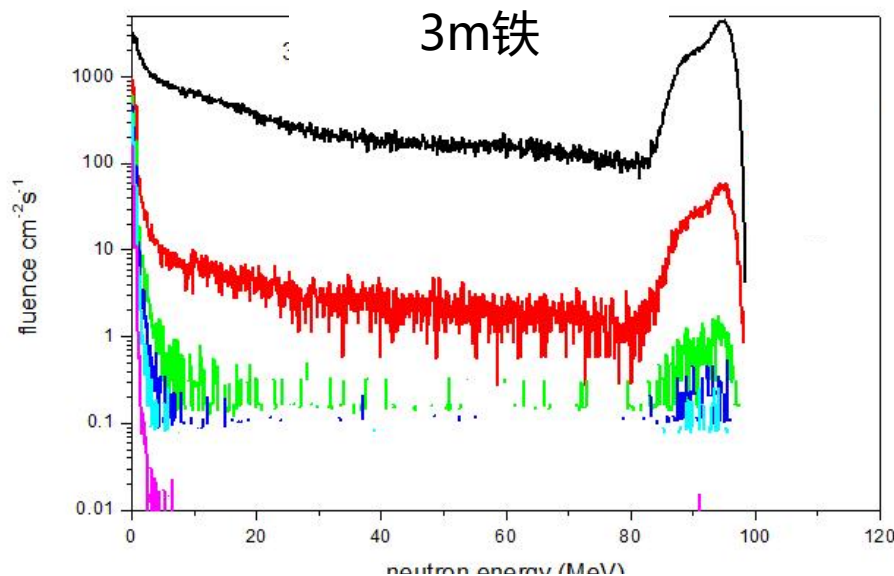
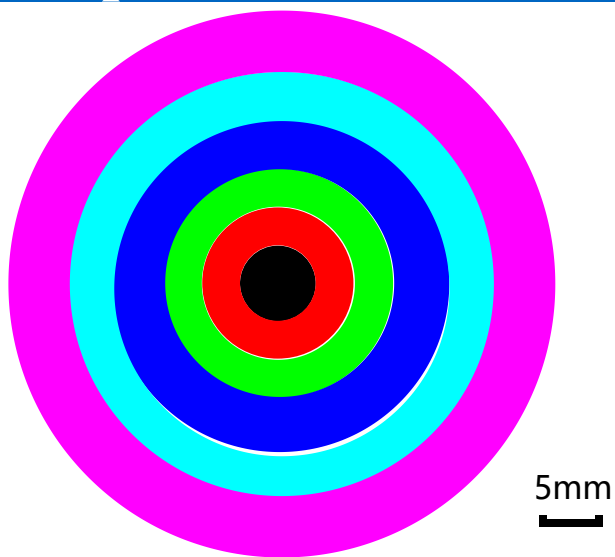


为了使得峰中子份额达到50%，FWHM小于15MeV，准直器开口处中子出射角应小于5°。



根据实验现场情况，设计准直器长度3m，开口直径15cm。此时开口角度为1.8°，出口处中子注量率约为 $10^4 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \mu\text{A}^{-1}$ 。

准单能中子的产生——中子准直器



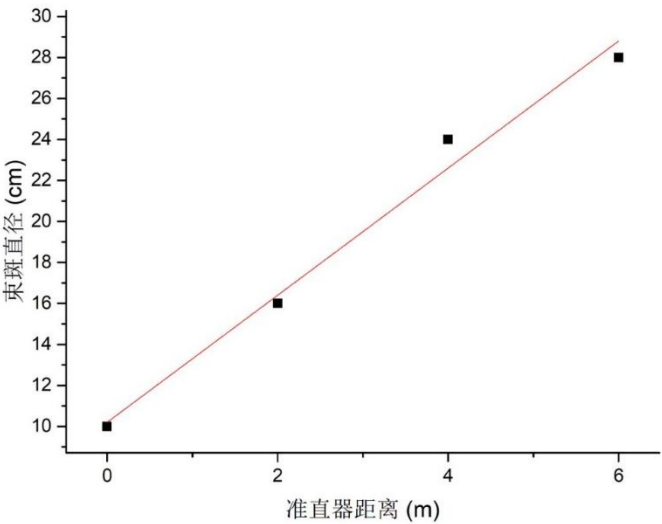
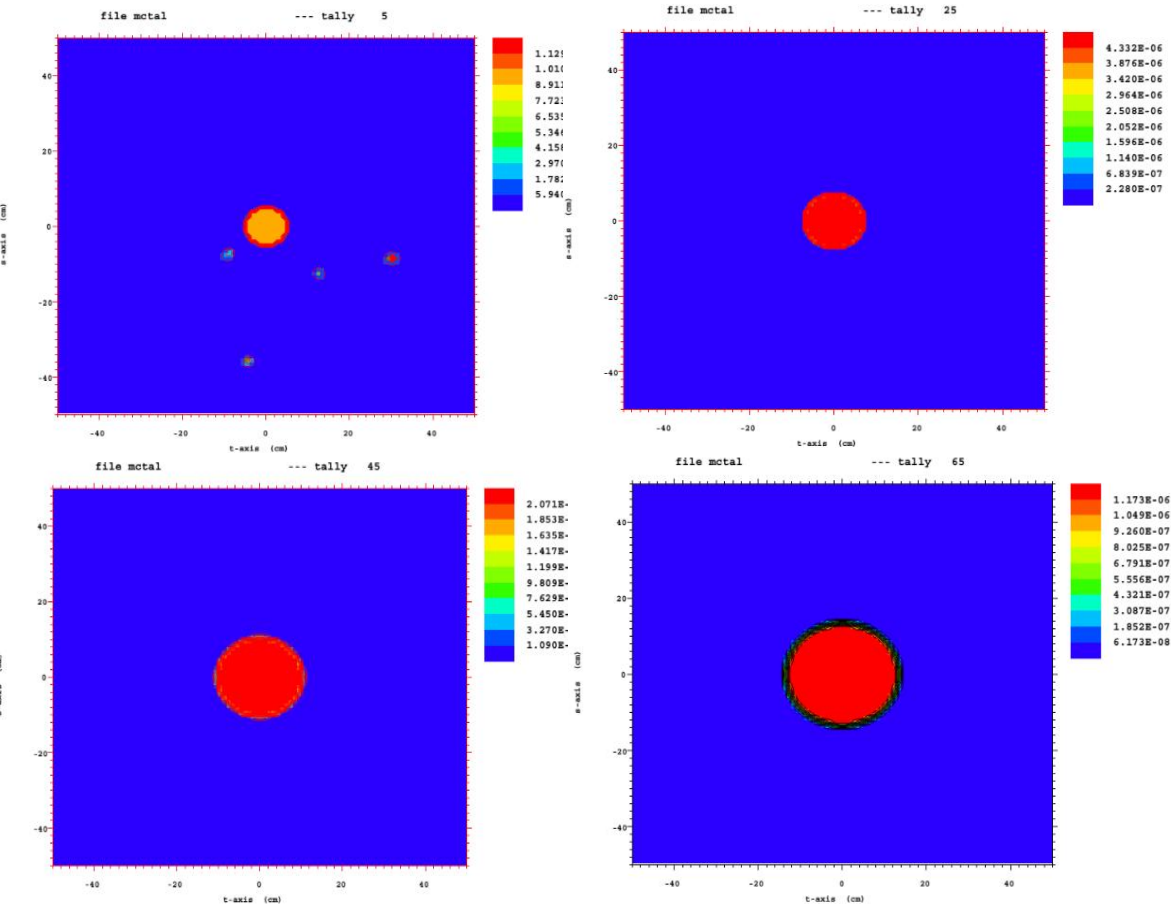
通过中子与重核 (Fe、Cu等) 发生非弹性散射使其能量迅速下降, 再通过聚乙烯进一步慢化。同时避免(n,xn), (n, γ) 等反应产生的次级中子和 γ 射线对辐射场的影响。

4种不同准直器辐射场相关参数比较 ($E_p=100\text{MeV}$, Li靶靶厚为6mm)

准直器组成	记录区域	中子注量率/ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	注量率衰减比例	$H^*(10)/\text{mSv h}^{-1}$	剂量当量衰减比例	峰中子比例
铁	束上	5.47E+05	100.00%	719.00	100%	50.29%
	束外	1.14E+04	2.08%	13.00	1.80%	
铁+聚乙烯	束上	5.38E+05	100.00%	711.00	100%	50.32%
	束外	1.37E+04	2.56%			
铜+聚乙烯	束上	5.34E+05	100%			50.21%
	束外	1.35E+04	2.52%			
铁+聚乙烯+铜	束上	5.37E+05	100%	710.00	100%	50.27%
	束外	1.37E+04	2.56%	18.10	2.55%	
准直器组成	记录区域	光子注量率/ $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	注量率衰减比例	$H^*(10)/\text{mSv h}^{-1}$	剂量当量衰减比例	光子/中子
铁	束上	4.79E+04	100%	983.00	100%	8.77%
	束外	5.63E+00	0.01%	0.06	0.01%	0.05%
铁+聚乙烯	束上	4.78E+04	100%	981.00	100%	8.89%
	束外	3.00E+02	0.63%	4.15	0.42%	2.18%
铜+聚乙烯	束上	4.78E+04	100%	981.00	100%	8.94%
	束外	1.71E+03	3.59%	51.20	5.22%	12.74%
铁+聚乙烯+铜	束上	4.78E+04	100%	981.00	100%	8.89%
	束外	2.22E+02	0.22%	1.12	0.12%	0.12%

束上中子注量最强，
光子比例最低，束
外衰减比例最高

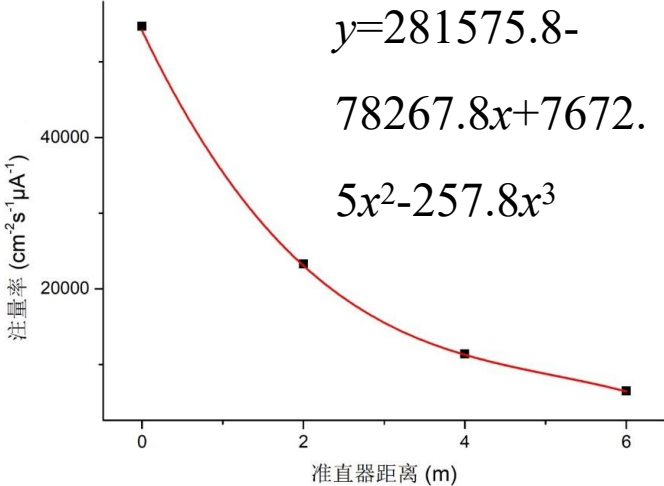
采用MCNP5计算了3m铁准直器出口处不同位置下的中子注量率和束斑尺寸。



束斑直径计算结果：束斑直径与距准直器出口距离呈线性关系。

中子注量率并不按照常见的“距离反平方”法则衰减，可能受到准直器散射的影响。

距准直器出口距离/m	单位质子流强注量率/ $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \mu\text{A}^{-1}$
0	$5.47\text{E}+04$
2	$2.33\text{E}+04$
4	$1.14\text{E}+04$
6	$6.50\text{E}+03$



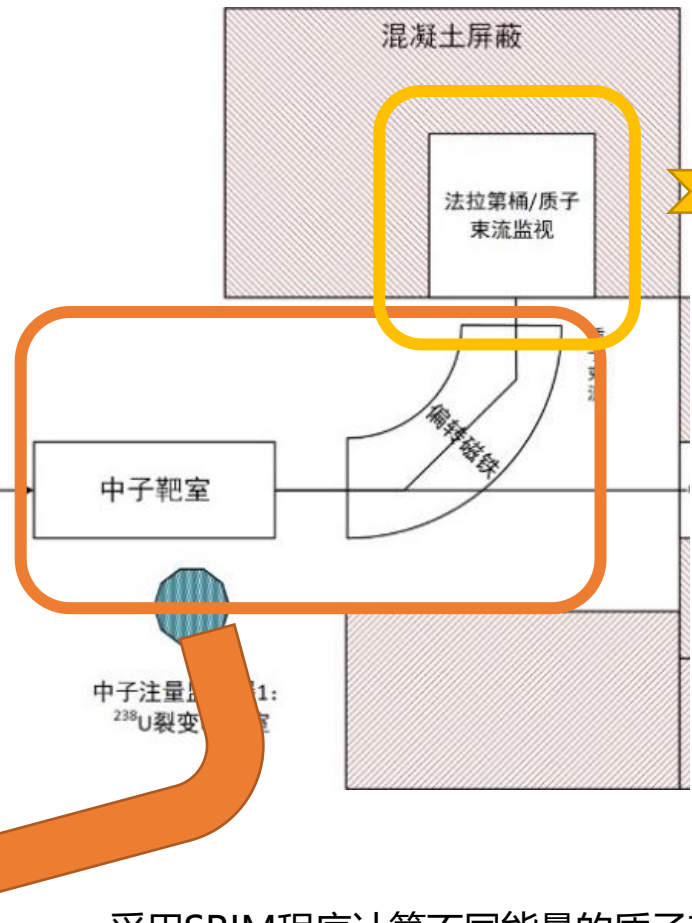
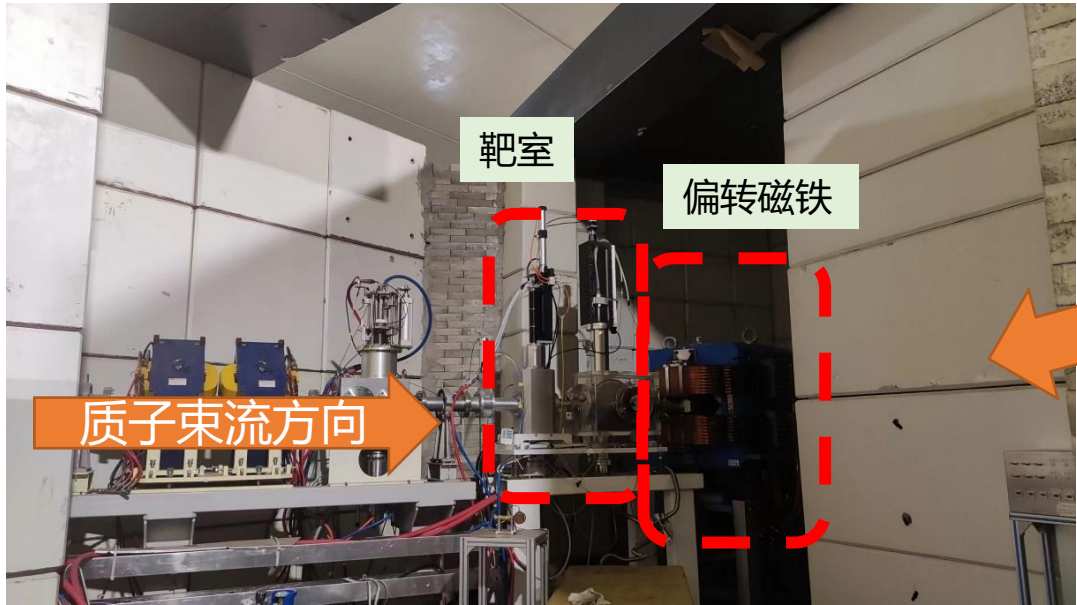
100MeV中子经过3mFe准直器之后产生的缓发 γ 核素分析

核素	生成概率	半衰期	核素	生成概率	半衰期
^{47}Ca	9.43E-07	4.5d	^{53}V	5.55E-04	1.5m
^{48}Ca	4.62E-07	长寿命	^{54}V	8.96E-05	49.8s
^{49}Ca	6.51E-09	8.7m	^{55}V	2.75E-06	6.5s
^{49}Sc	3.63E-05	57.1m	^{56}V	1.30E-07	216ms
^{50}Sc	1.24E-06	1.7m	^{55}Cr	7.69E-04	3.5m
^{51}Sc	1.43E-07	12.4s	^{56}Cr	3.61E-05	5.9m
^{51}Ti	3.54E-05	5.76m	^{57}Cr	9.11E-07	21.1s
^{52}Ti	8.39E-06	1.7m	^{56}Mn	3.33E-02	2.6h
^{53}Ti	4.10E-07	32.7s	^{57}Mn	1.03E-03	1.4m
^{54}Ti	1.30E-08	1.5s	^{58}Mn	7.93E-05	3s
^{52}V	2.02E-03	3.7m	^{59}Fe	2.53E-04	44.5d

在实验过程中，使用手持式 γ 剂量率仪对实验区的剂量进行测量。准直器出口及其延伸线上的剂量较高，根据照射时间的不同，停束10分钟后剂量可到数十至数百 $\mu\text{Sv/h}$ 。而距离准直器出口及其延伸线20cm以上距离时（垂直于准直器出口延伸线的方向），剂量与本底水平相当或略高于本底水平，一般在零点几 $\mu\text{Sv/h}$ 至1 $\mu\text{Sv/h}$ 。



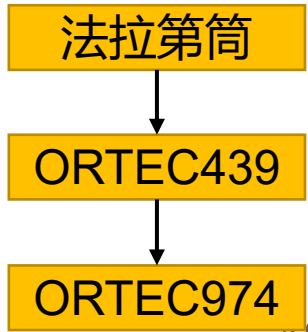
准单能中子的产生——偏转磁铁和质子监视器



束上石墨束流垃圾桶：PTB
偏转磁铁：TIARA、RCNP、CYRIC、NAC

采用SRIM程序计算不同能量的质子在Cu中的射程

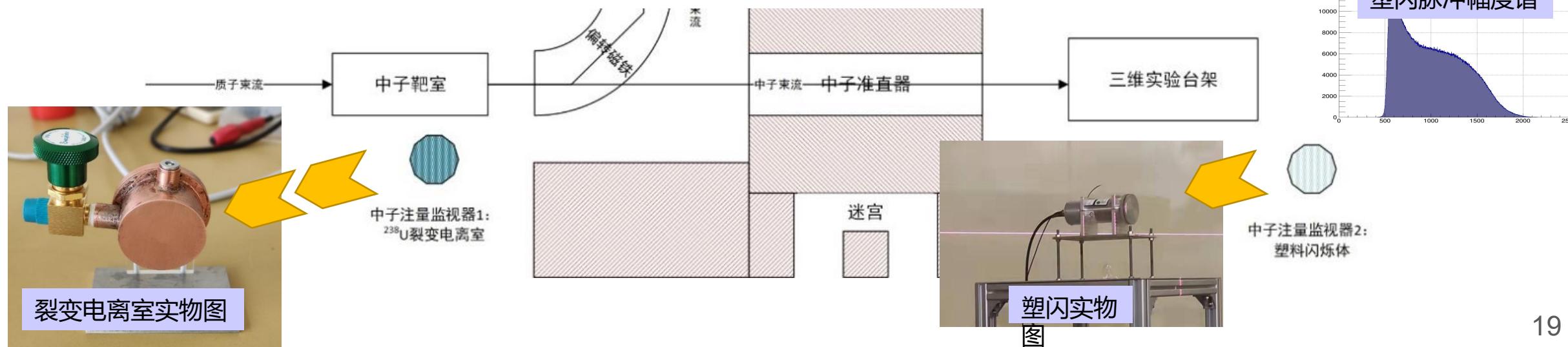
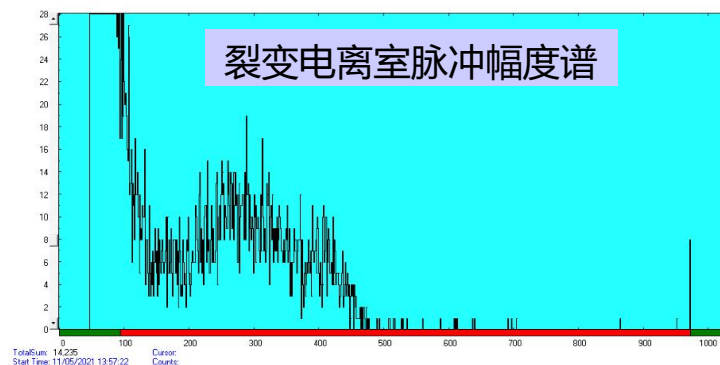
质子能量/MeV	Cu中射程/mm
70	7.09
80	8.95
100	13.21



准单能中子的产生——中子监视器

^{238}U 裂变电离室：靶室周围，天然铀，双面镀靶，镀层有效区直径为25mm，质量厚度约为 $200\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。

塑料闪烁体：实验区后端，EJ212，直径2英寸，厚5mm。



目录

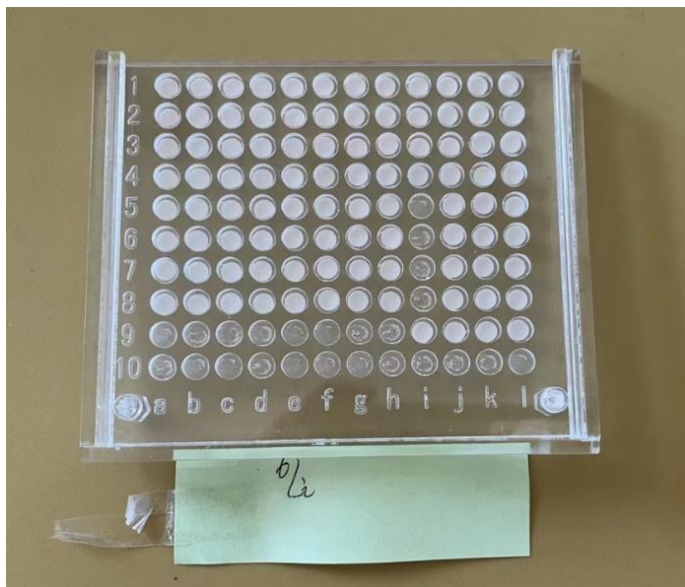
一 研究背景与国内外现状

二 实验装置与研究内容

三 准单能中子的产生

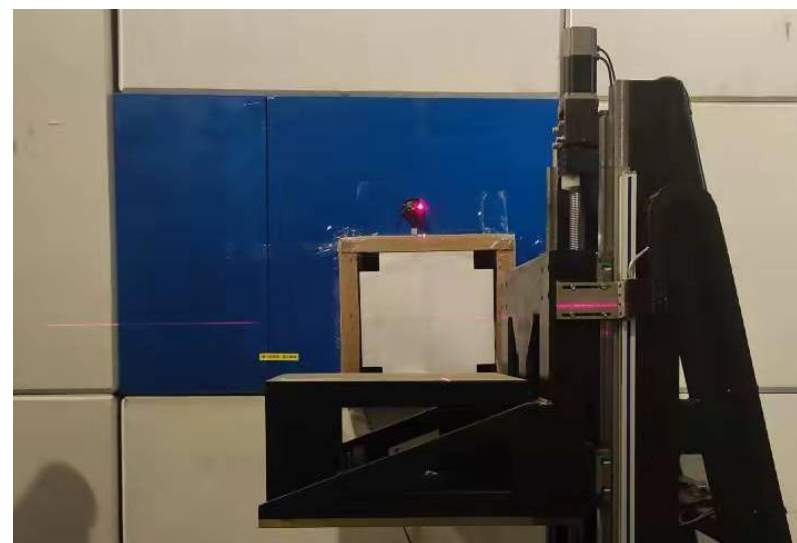
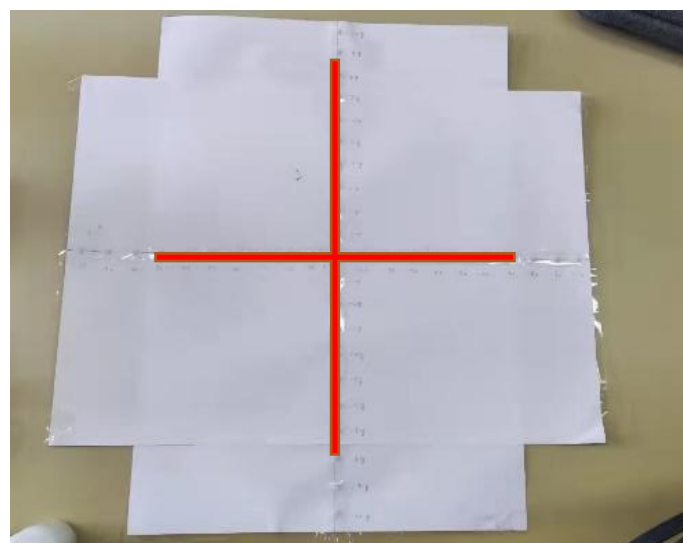
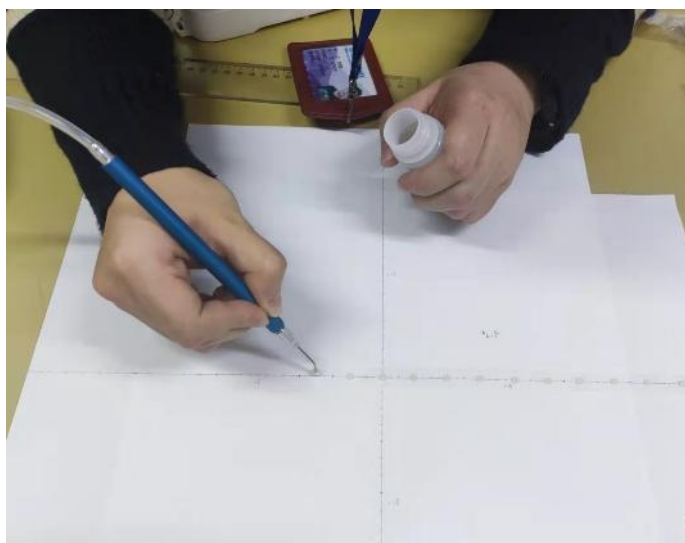
四 中子场参数测量

五 展望



采用 $^6\text{Li}/^7\text{Li}$ 热释光探测器对中子束斑分布进行测量。

$^6\text{Li}/^7\text{Li}$ 探测器分别粘在A3纸的正反两面，整体呈十字型。X轴和Y轴每隔20mm布置一对探测器，每个轴上共布置21对探测器。以XY交点为坐标0点，则探测器覆盖-20cm~+20cm的范围。将热释光探测器放置于距准直器出口30cm的位置处，探测器交点与束斑中心对齐，所在XY平面垂直于束流方向。



取⁶Li/⁷Li探测器各4片，在不进行任何照射的情况下对其进行天然本底本底测量，用相对标准偏差表示本底不均匀性。经照射的TLD扣除天然本底后的测量结果如右图所示。

项目		天然本底测量结果			平均值	标准差	相对标准偏差
⁷ Li	60680	59020	60104	58604	59602	957	1.6%
⁶ Li	105008	108044	115892	107708	109163	4687	4.3%

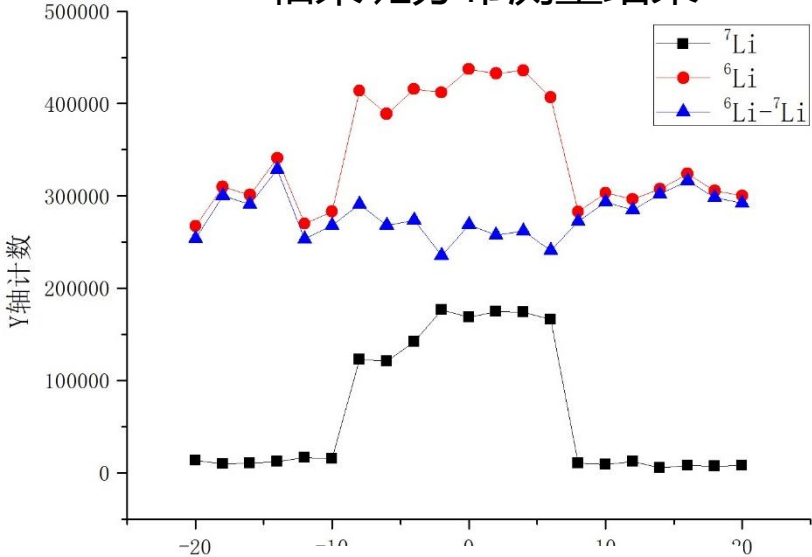
⁶Li和⁷Li测量结果形状无明显差异。这可能是由于辐射场低能中子本底较强，高能信号被低能中子信号淹没。辐射场低能中子主要来源于墙壁、地面以及周围物体的散射，因此低能中子分布较为均匀，与束斑大小的相关性较小。

⁶Li与⁷Li的差值在水平线上下浮动，虽然本次测量结果难以直接反应中子束斑分布，但是参考⁷Li测量结果可得到γ分布：

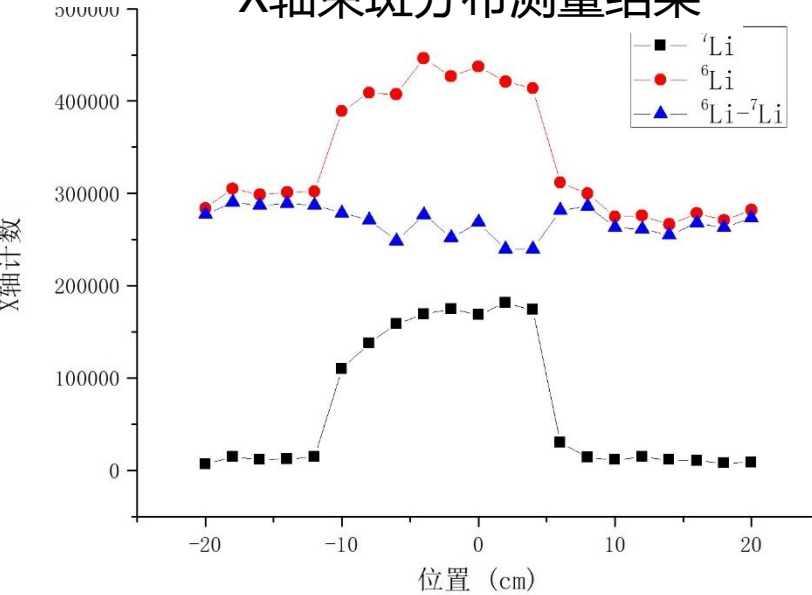
- 1.测量位置处X轴和Y轴束斑宽度测量结果均为18cm；
- 2.距离每增加10cm束斑直径增大大约1cm。

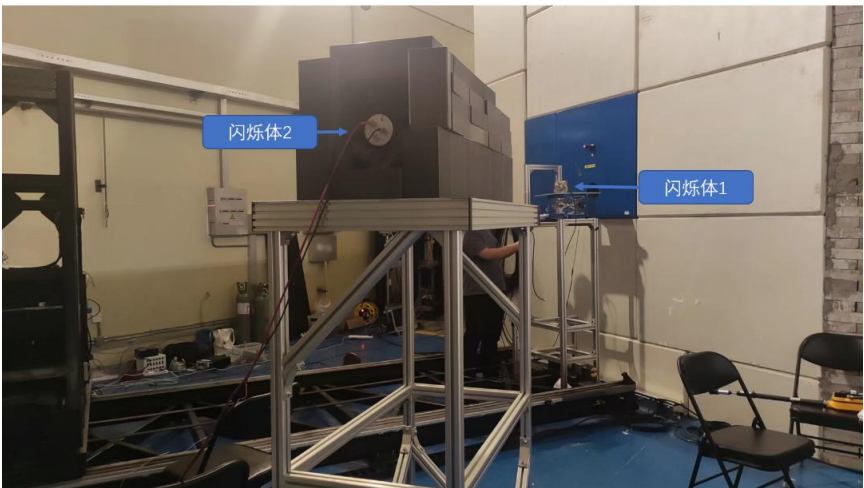
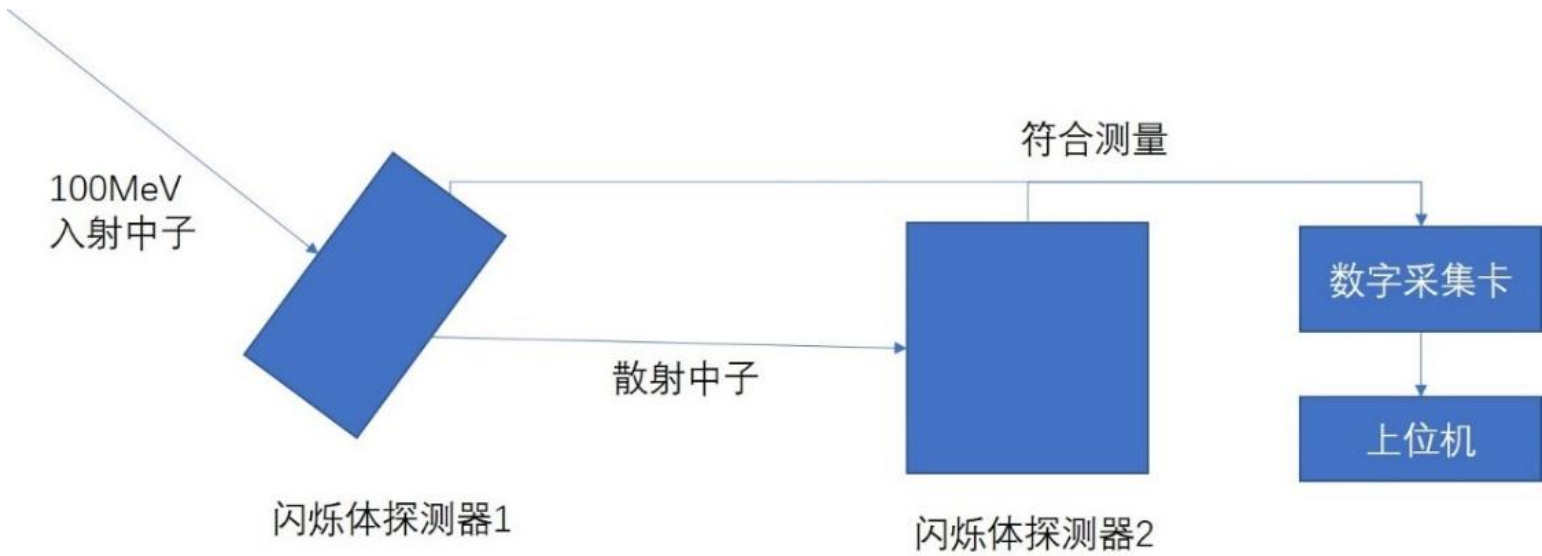
后续考虑使用聚乙烯+二维探测器的方法测量高能中子束斑分布。

Y轴束斑分布测量结果



X轴束斑分布测量结果





散射中子能量 $E_{ns} = \left(\frac{72.306l}{t_n}\right)^2$

源项中子能量 $E_n = \frac{E_{ns}}{\cos^2(\theta)}$

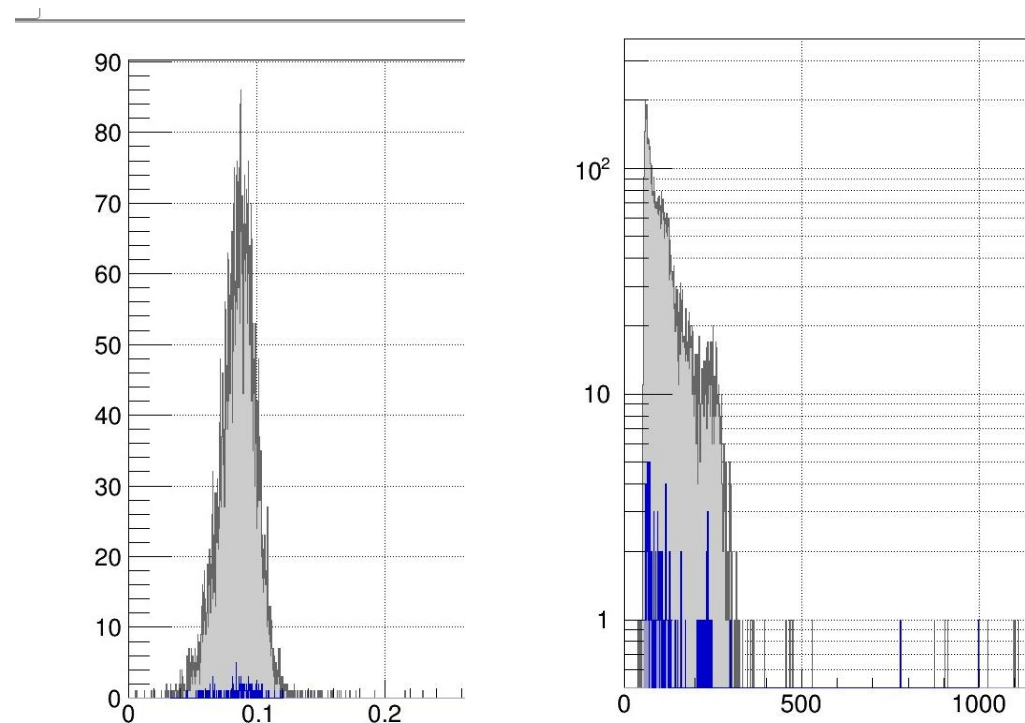
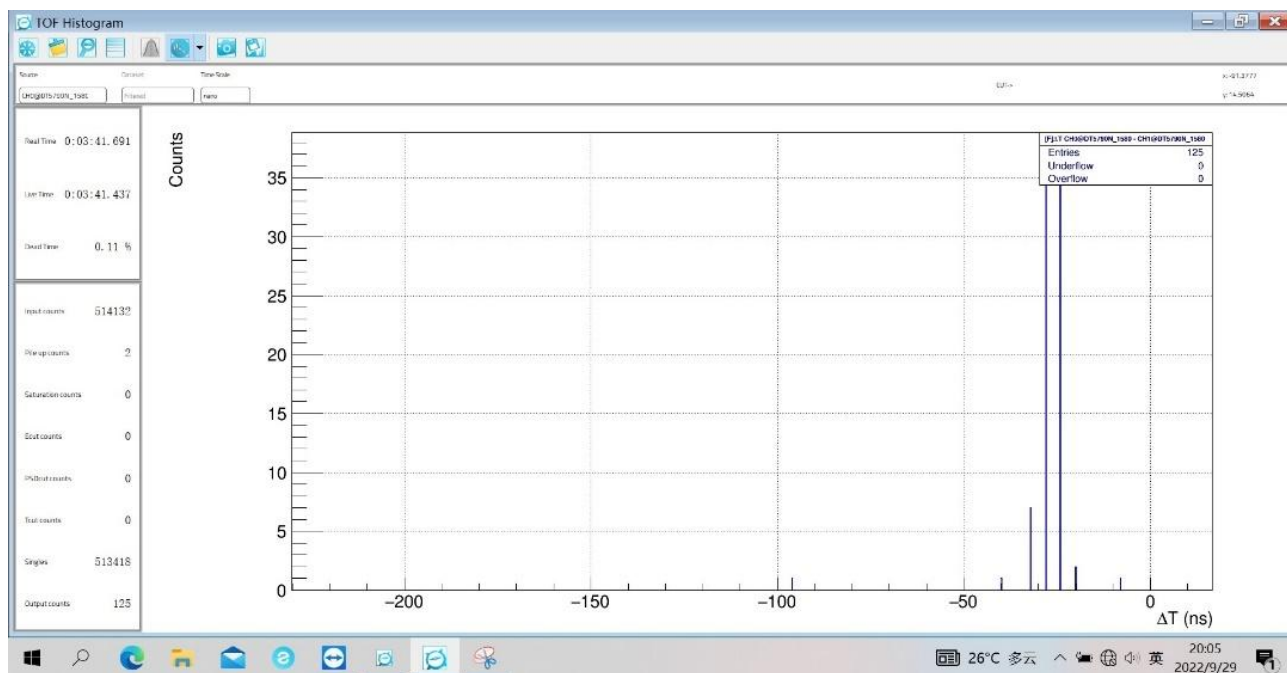
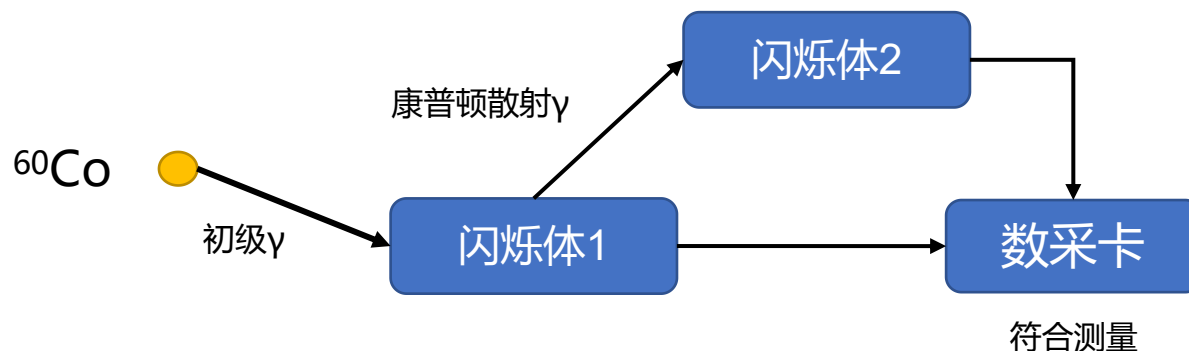
散射中子能量/MeV	50	45	40	35
3m飞行时间/ns	30.63	32.29	34.24	36.61

- ✓ 闪烁体探测器1：BC501A， $\phi 2'' \times 1''$
- ✓ 闪烁体探测器2：BC501A， $\phi 5'' \times 5''$
- ✓ 闪烁体1和闪烁体2之间的距离约3m，闪烁体与束线夹角约为60°
- ✓ 闪烁体探测器2作为开门探测器，选取适当的符合时间窗，周围采用含硼聚乙烯砖屏蔽，减少偶然符合本底
- ✓ 数字采集卡：CEAN DT5790，采样频率250MHz

时间零点:

由于两个闪烁体尺寸、光电倍增管渡越时间、信号线长度、数字采集卡本身的时间差异等问题，飞行时间谱的绝对时间0点并不在数采卡显示的0点处。

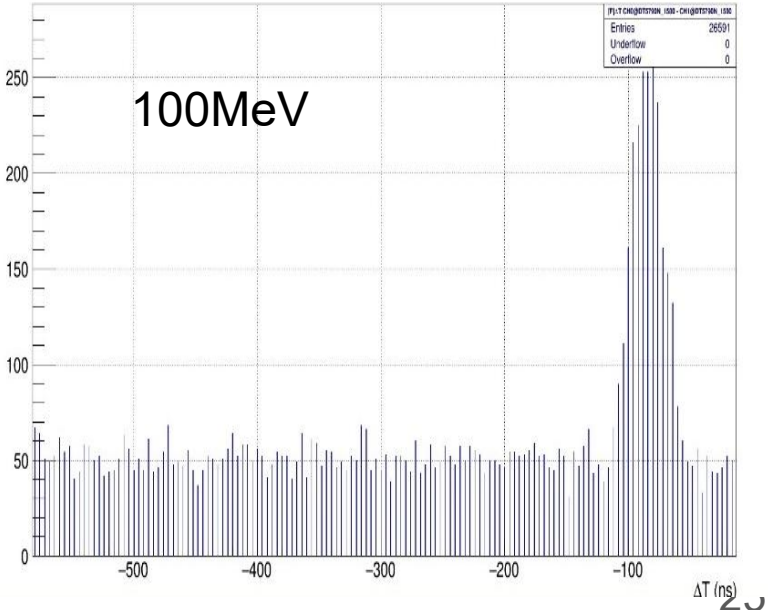
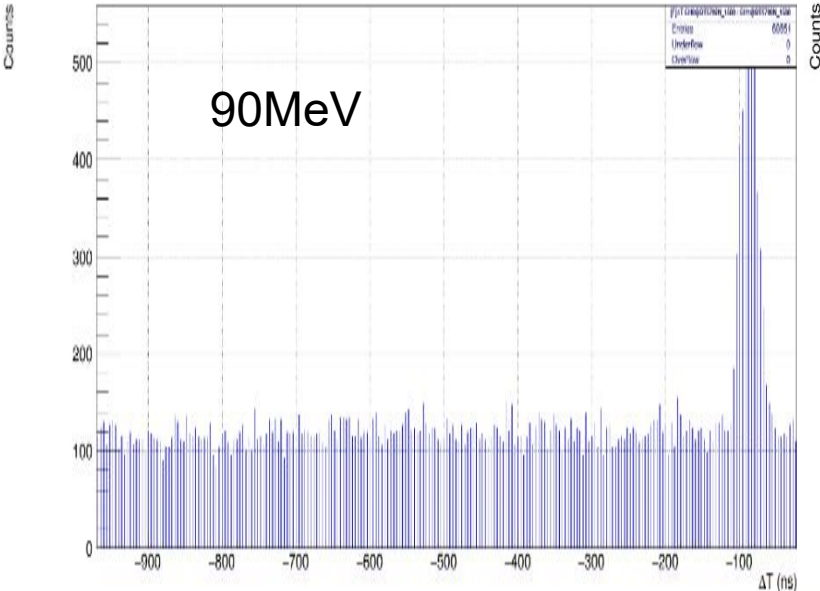
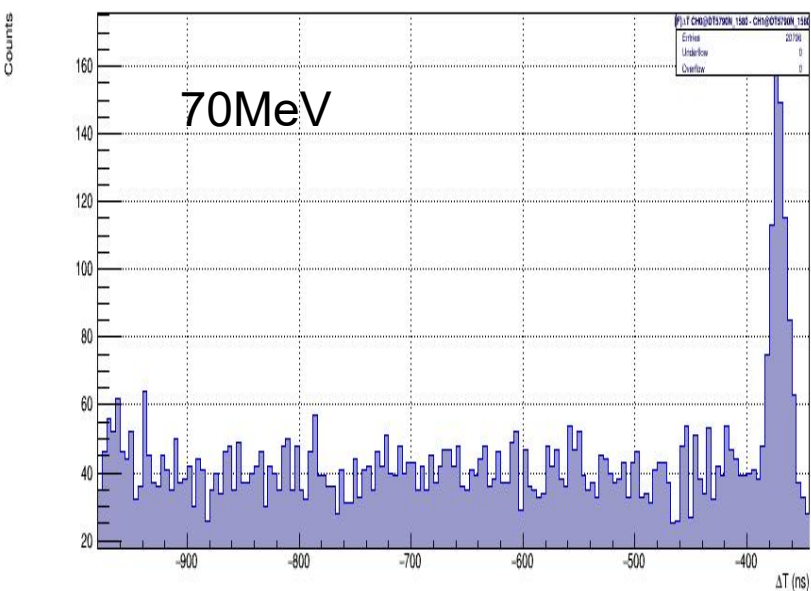
测得的飞行时间零点为-32ns。



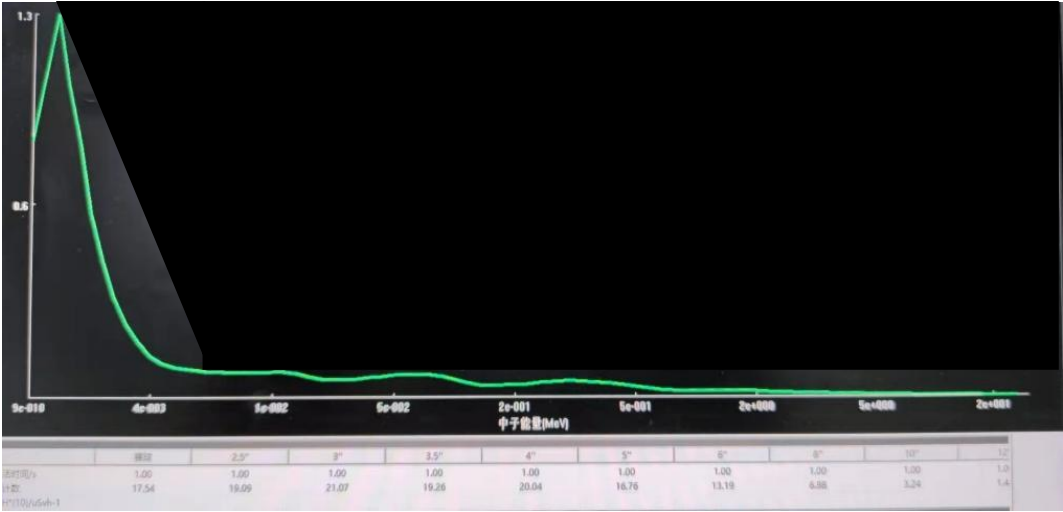
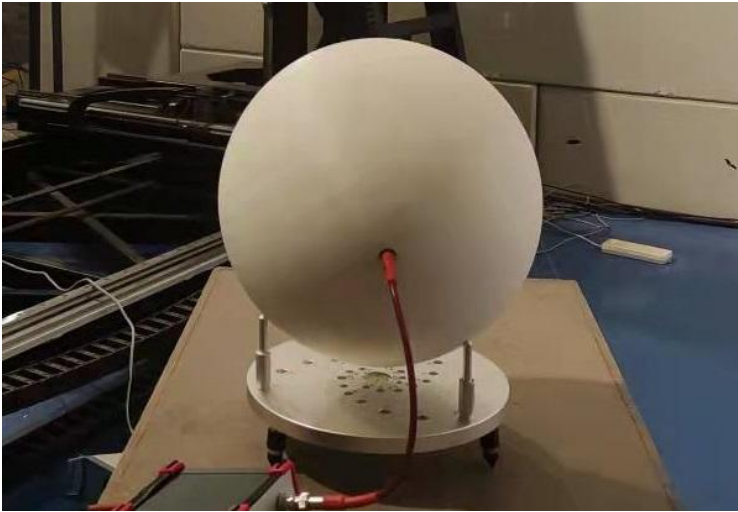
监视器计数情况

中子能量	70MeV	90MeV	100MeV
角度	57	57	59
距离/m	3.46	3.00	3.00
监视器计数	862219 (有靶)	163949 (有靶1)	190433 (有靶1)
监视器计数	393646 (空靶)	143559 (有靶2)	331990 (有靶2)
监视器计数	-	32652 (空靶1)	41460 (空靶)
监视器计数	-	249049 (空靶2)	-

飞行时间谱



采用多球测量束外中子能谱



每个尺寸的球进行3次测量，每次测量200s，共进行33次测量。再将这些计数对监视器计数进行归一得到归一计数，并将其输入实验室自编解谱软件进行解谱。从解谱结果可以看出，束外中子绝大对数为低能中子，几乎没有高能中子的成分。

球尺寸/英寸	计数
12	1.44
10	3.24
8	6.86
6	13.19
5	16.06
4	20.04
5	17.46
3.5	19.26
3	21.07
2.5	19.09
裸球	17.54



Nuclear Data

IAEA Nuclear
Data Services
Home Page

STANDARDS 2017

HOME
Nuclear Data Sheets
148 (2018) 143-188
Neutron Standards
Data in the ENDF-6
Formatted Files,
presentation by V.G.
Pronyaev, December
2019

STANDARDS 2006

STD 2006
Technical Report

Downloads

Codes and Programs
Test cases
Most recent calculations

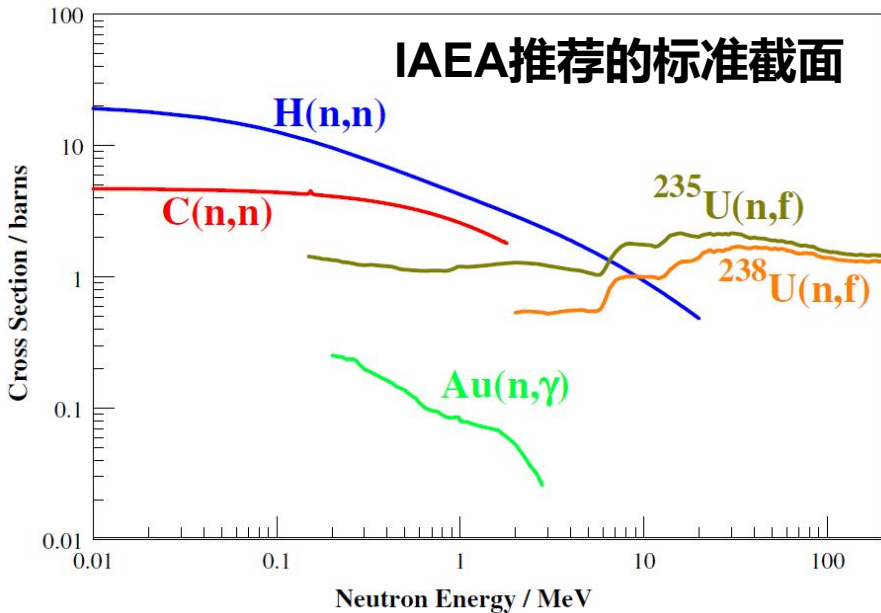
Documents

Documents and Reports

IAEA NEUTRON DATA STANDARDS (2017)

A.D. Carlson, et al., [Nuclear Data Sheets 148 \(2018\) 143-188](#)

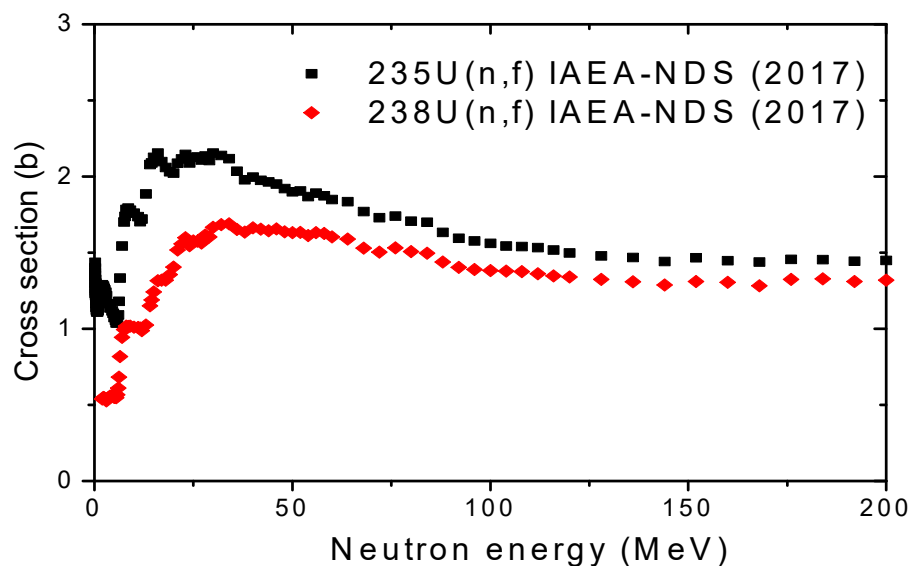
#	Reaction	Energy Range	ENDF-6 form data
1	H(n,n)	Standard range: 1 keV to 20 MeV	std17-001_H_001.ei
2	³ He(n,p)	Standard range: 0.0253 eV to 50 keV	std-002_He_003.i
3	⁶ Li(n,t)	1e-5 eV to 4 MeV (Standard range: Thermal - 1 MeV)	std17-003_Li_006.e
4	¹⁰ B(n,α);(n,α ₁)γ	1e-5 eV to 1 MeV (Standard range: Thermal - 1 MeV)	std17-005_B_010.ei
5	^{nat} C(n,n)	up to 6.45 MeV (Standard range: 1keV - 1.8 MeV)	std17-006_C_000.ei
6	¹⁹⁷ Au(n,γ)	2.5 keV to 2.8 MeV (Standard range: Thermal, 200keV - 2.5MeV)	std17-079_Au_197.endf
7	²³⁵ U(n,f)	150 eV to 200 MeV (Standard range: Thermal, 150keV - 200MeV)	std17-092_U_235.endf
8	²³⁸ U(n,f)	0.5 to 200 MeV (Standard range: 2 - 200MeV)	std17-092_U_238.endf
9	Thermal Neutron Constants: nubar, (n _{th} ,f), (n _{th} ,el), (n _{th} ,g) cross sections for fissile targets ²³³ U, ²³⁵ U, ²³⁹ Pu, ²⁴¹ Pu. Total nubar ²⁵² Cf(sf).	0.0253 eV (2200 m/s)	Standards2017_TNC.txt
10	¹⁹⁷ Au(n,γ)	MACS (30 keV) = 620(11) mb	
11	²³⁵ U(n,f)	Integral from 7.8 eV to 11 eV = 247.5(3.3) b*eV	



中子注量率绝对测量方案

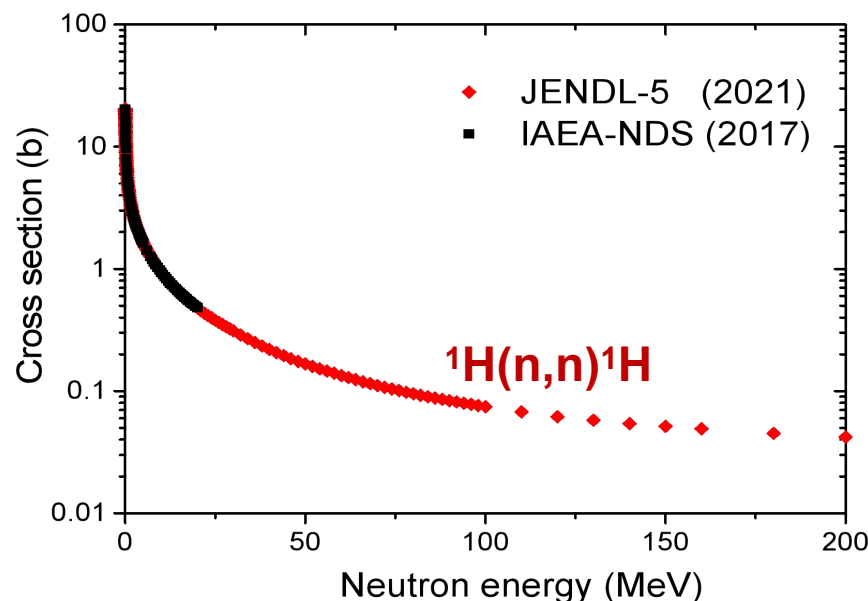
方案一： ^{238}U 裂变电离室

- ✓ $^{238}\text{U}(n,f)$ 是IAEA推荐的标准截面
- ✓ 对 γ 射线不敏感
- ✓ 对低能中子不敏感
- ✓ 制作简单，使用方便，可靠性好



方案二：反冲质子望远镜

- ✓ $^1\text{H}(n,p)^1\text{H}$ 在150 MeV以下可用透射法测量，不确定度小
- ✓ 硅+闪烁体形成 $\Delta E - E$ 符合，减少偶然符合本底
- ✓ 光阑限制测量立体角
- ✓ 聚乙烯中H原子个数容易定准



方案一： ^{238}U 裂变电离室

结构材料：黄铜/紫铜

结构形式：平板电离室，平板间距20mm

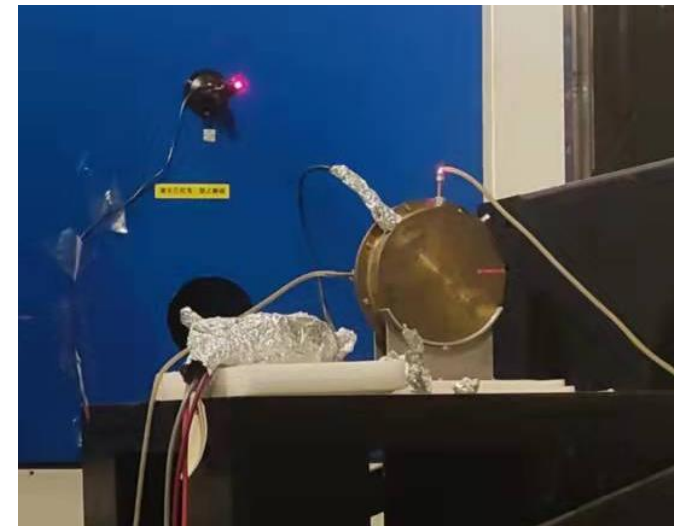
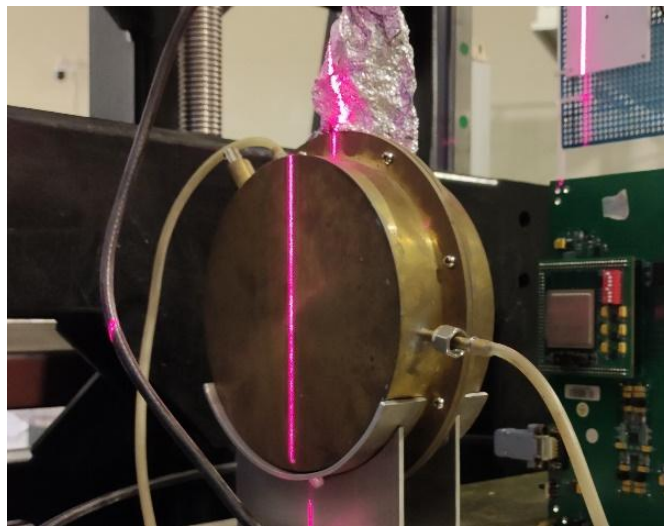
电极形式：外壳接地，靶片高压

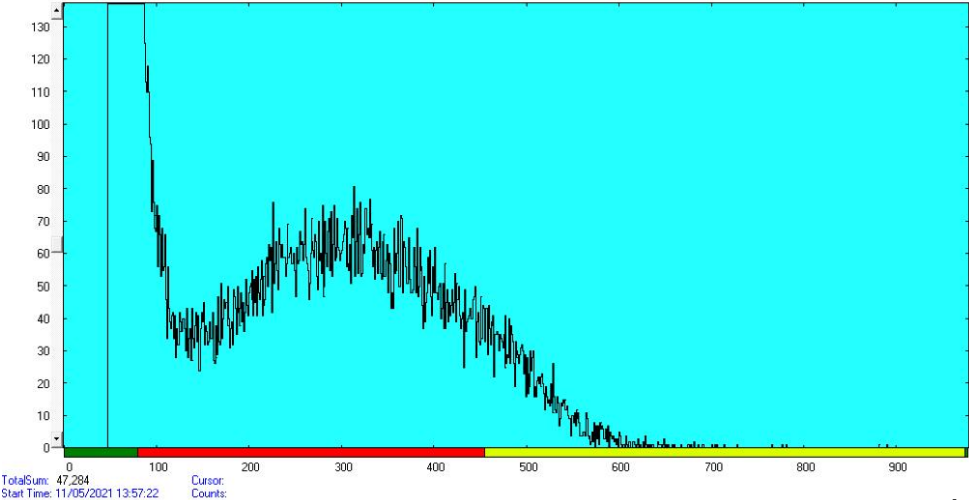
绝缘材料：陶瓷

靶片底衬：直径150mm，厚0.3mm

靶材料：天然铀

靶区尺寸：直径10cm





裂变电离室测量结果与理论计算比较

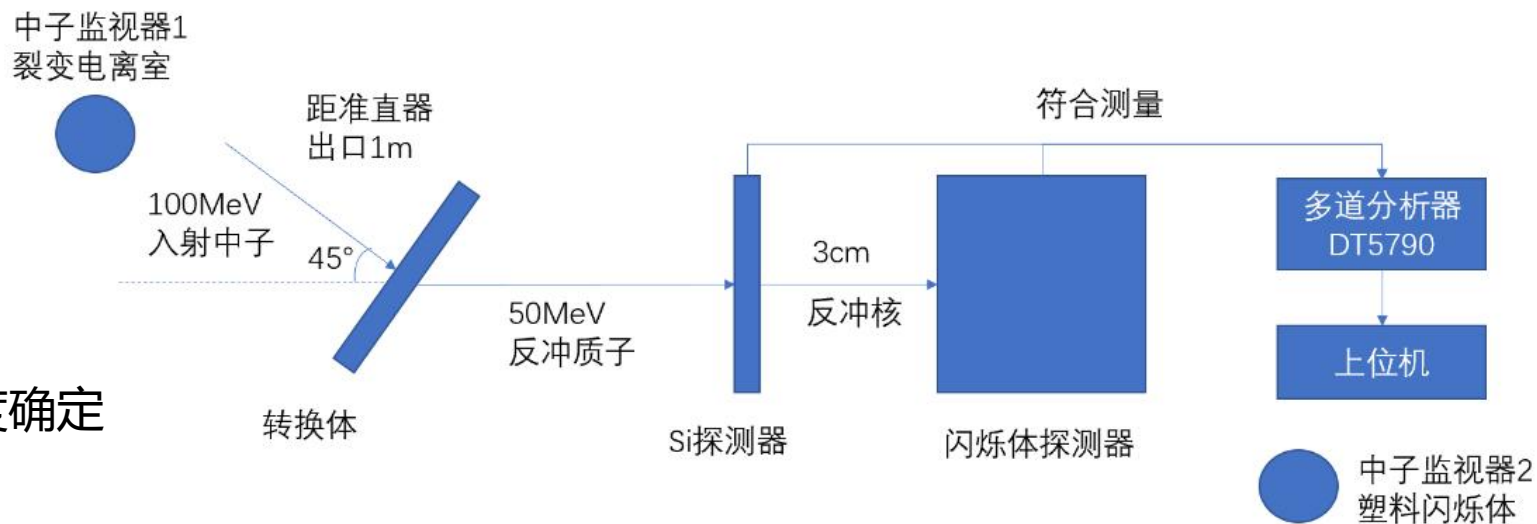
项目	单位束流强度中子注量/cm ² μA ⁻¹
理论计算结果	3.83E+04
裂变电离室实际测量结果	4.87E+04
裂变电离室与理论计算值的相对误差	27.4%

裂变电离室测量结果

中子能量/MeV	有靶/空靶	有效测量次数	中子注量率范围/cm ² s ⁻¹ μA ⁻¹	中子注量率平均值/cm ² s ⁻¹ μA ⁻¹	相对标准偏差	效应中子注量/cm ² s ⁻¹ μA ⁻¹
100	有靶	10	7.65E+04~8.53E+04	7.94E+04	4.05%	4.87E+04
	空靶	11	2.90E+04~3.23E+04	3.07E+04	3.09%	
90	有靶	13	9.32E+05~9.67E+04	9.50E+04	1.28%	6.31E+04
	空靶	12	3.04E+04~3.35E+04	3.17E+04	3.70%	
80	有靶	16	9.28E+04~1.24E+05	1.08E+05	8.23%	7.14E+04
	空靶	12	3.31E+04~4.45E+04	3.63E+04	8.92%	
70	有靶	13	7.22E+04~1.14E+05	9.75E+04	12.01%	4.63E+04
	空靶	13	4.80E+04~5.26E+04	5.12E+04	2.38%	

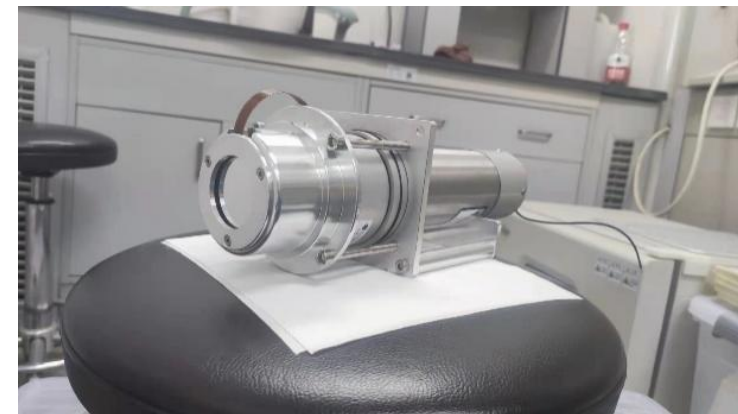
方案二：反冲质子望远镜

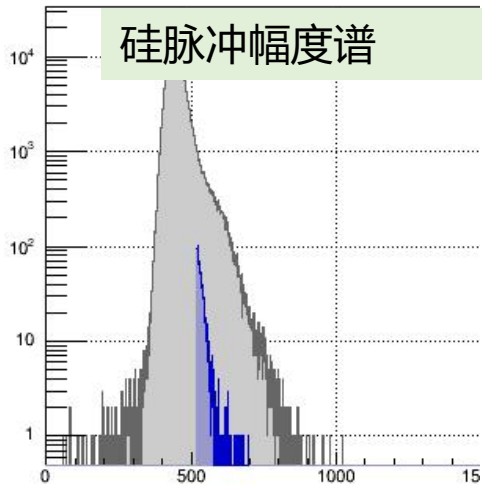
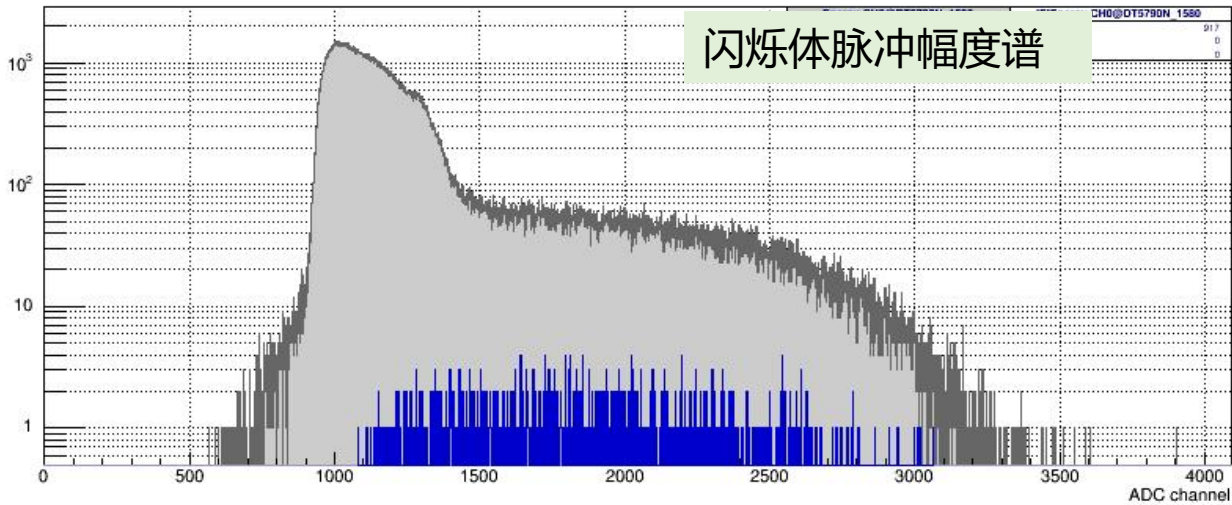
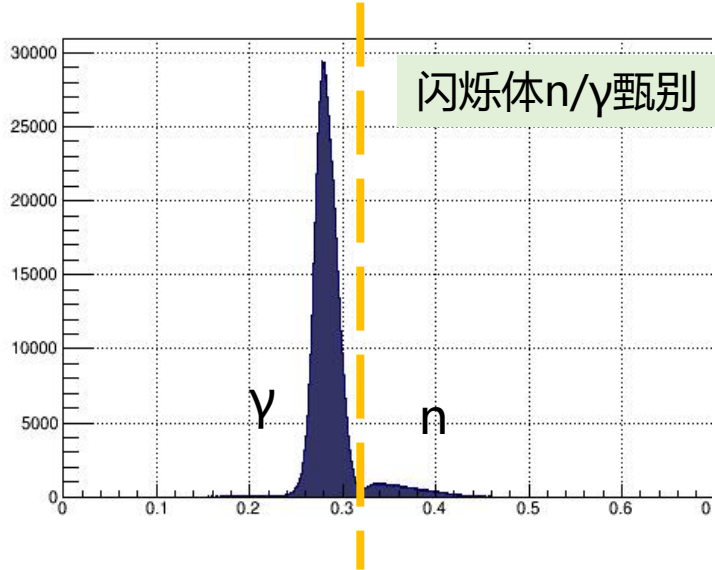
- ✓ 硅+闪烁体形成 $\Delta E - E$ 符合
- ✓ 光阑限制测量立体角
- ✓ 通过转换体（聚乙烯）尺寸、密度确定氢原子个数



主要设计参数：

- ① 硅探测器尺寸 -> 直径与闪烁体相当 -> 厚度在信号大小与质子能量损失之间平衡
- ② 硅探测器衬底形式 -> 透射型环状衬底 -> 减少质子能散和能量损失
- ③ 闪烁体探测器尺寸 -> 足以使50MeV质子全部沉积 -> n/γ甄别
- ④ 转换体尺寸 -> 望远镜响应 -> 探测效率 -> 均匀性
- ⑤ 硅与闪烁体之间的距离 -> 立体角 -> 探测效率





PRT中子注量测量结果

中子能量/MeV	测量距离/cm	中子注量率/cm ⁻² s ⁻¹ μA ⁻¹
100	27.3	5.34E+04
70	25.8	5.57E+04

PRT与裂变电离室、理论计算的比较

PRT与理论计算值的相对误差	19.3%
FC与理论计算值的相对误差	27.4%
FC与PRT相对误差	6.4%

目录

- 一 研究背景与国内外现状
- 二 实验装置与研究内容
- 三 准单能中子的产生
- 四 中子场参数测量
- 五 展望

1. 飞行时间测量中子能谱

由于论文进行过程中100MeV质子回旋加速器脉冲化改造尚未完成，因此准单能中子参考辐射场能谱测量主要采用多球和双闪烁体飞行时间的方法进行。在未完成脉冲化改造前，可通过提高数采卡采样频率、适当增加测量距离、增加束外闪烁体屏蔽等方式，提高测量能量分辨率和信噪比。

2. 辐射场稳定性

由于辐射场束流的不稳定，质子束斑大小、束斑位置的不确定均有可能使得质子没有完全打在Li靶上，而是有部分打在周围材料上（例如靶架），造成中子能谱的变化，从而造成监视器的不稳定，进而影响中子注量测量结果。后续仍然需要对辐射场具体情况进行分析，通过聚焦缩小束斑尺寸等方法改进束斑位置不稳定对辐射场中子测量产生的影响。

3. 束斑分布测量

为了减少低能中子本底的影响，可以采用聚乙烯转换体+GEM二维气体探测器的方法测量高能中子束斑分布。

谢 谢