



Detecting neutrons with less sensitivity to neutron emission energy and angular distribution: conceptual design of a novel gaseous scintillation neutron detector

陈建琪, 景俊升, 贡庸策
大湾区大学

chenjianqi@gbu.edu.cn

2024/11/17

第三届“粤港澳”核物理论坛, 深圳



➤ 中子探测方法

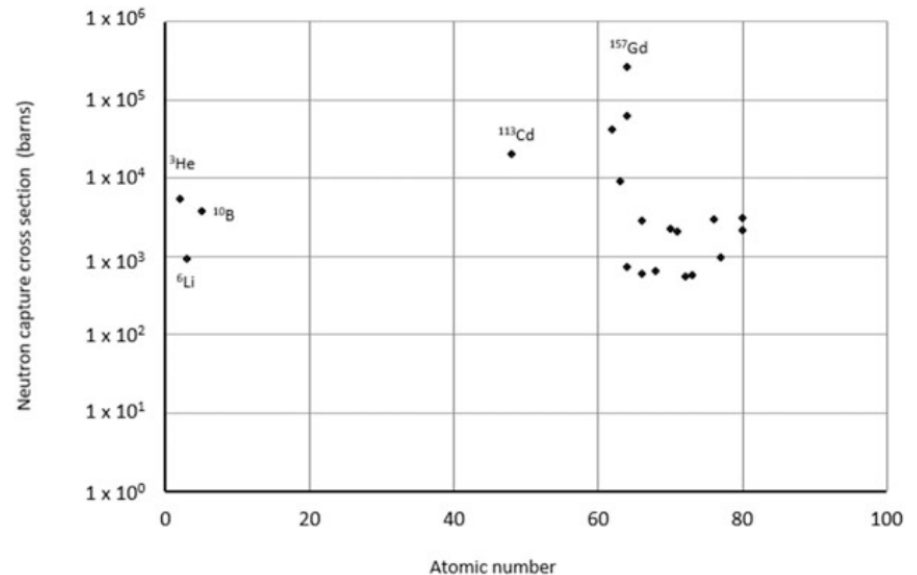
1st step: 中子转换为带电粒子

中子不带电，无法直接探测中子，需要核反应将中子“转换”为带电粒子。

2nd step: 探测带电粒子

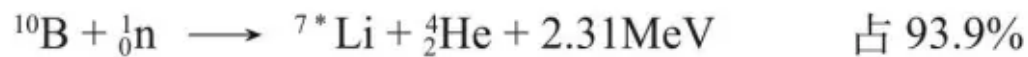
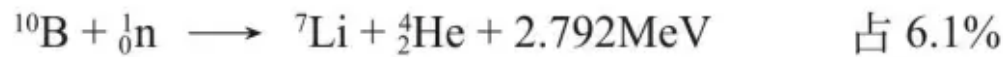
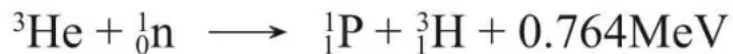
- 气体正比管和电离室
- 闪烁体探测器
- 半导体探测器

➤ 中子捕获截面超过500 barn的核



[Neutron Detectors for Scattering Applications[M]. Springer Nature, 2023]

- 适合于中子探测的核素主要有 ^3He ， ^{10}B ，和 ^6Li



^3He 管正比计数器



➤ 探测原理

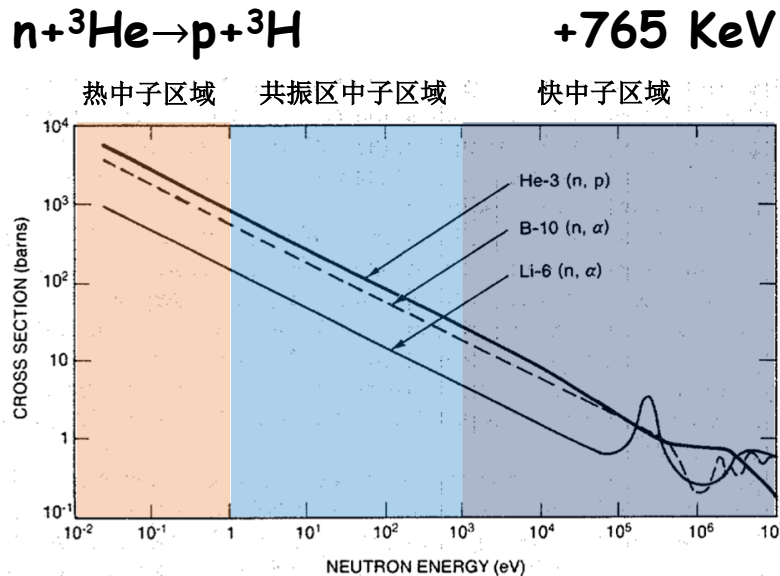
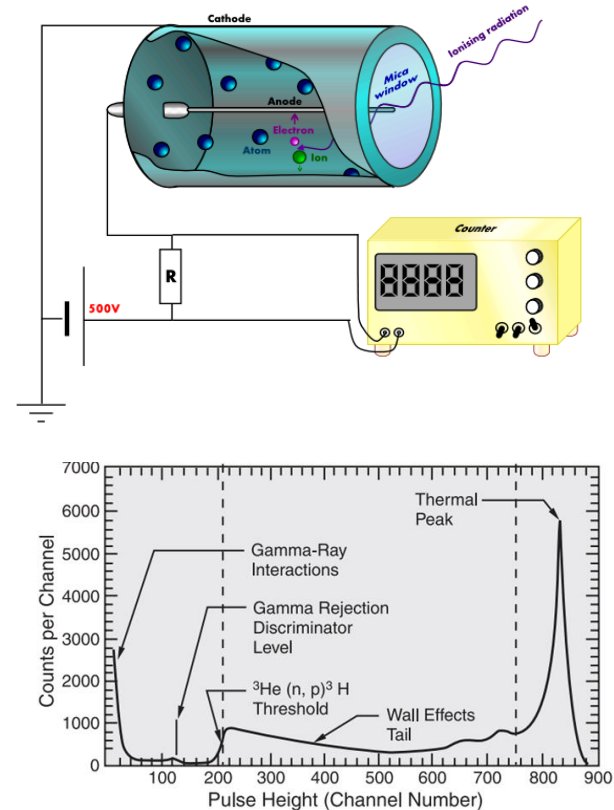


Fig. 13.4 $^3\text{He}(n,p)$, $^{10}\text{B}(n,\alpha)$, and $^6\text{Li}(n,\alpha)$ cross sections as a function of incident neutron energy (Ref. 7).

➤ 脉冲幅度谱



- ^3He 管探测器具有高的探测效率，良好的n/gamma分辨本领

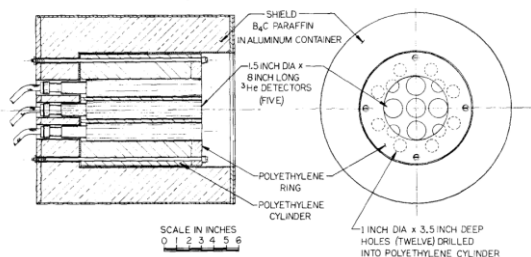
<http://large.stanford.edu/courses/2012/ph241/lam1/images/f1big.png>

<https://www.mirion.com/discover/knowledge-hub/articles/education/nuclear-measurement-fundamental-principle-neutron-detection-and-counting>

“聚乙烯+ ^3He ”探测器的应用

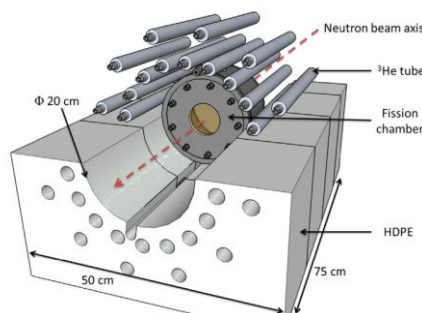


➤ 束流监测



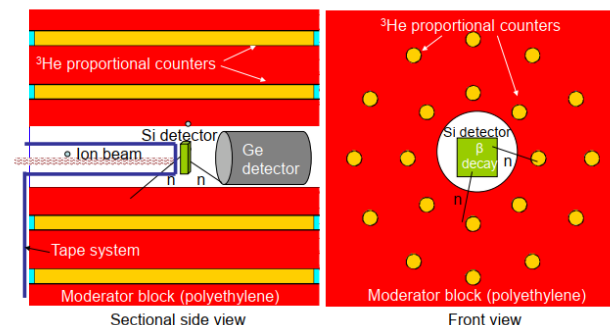
[NIM-A, 1969,72(2):161-166]

➤ 裂变中子多重数



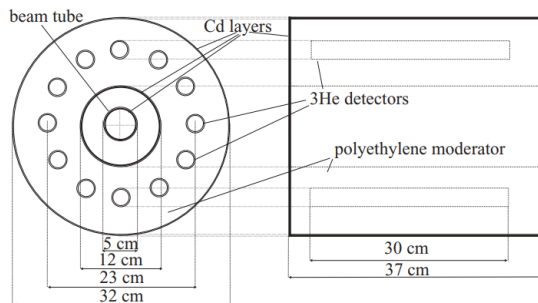
[NIM-A, 2014,99-105]

➤ β 缓发中子概率



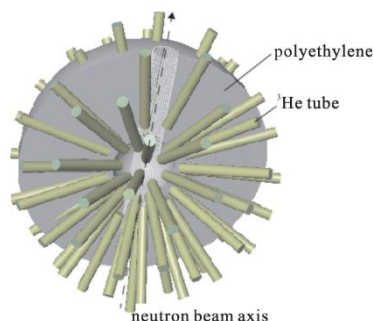
[NIM-A, 422.1-3, 1999: 43-46]

➤ (n, n') 截面



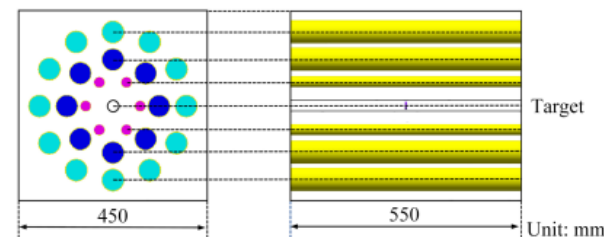
[Physical Review C 83.6(2011):064617]

➤ $(n, 2n)$ 截面



[强激光与粒子束, 2017, 29(12): 149-154]

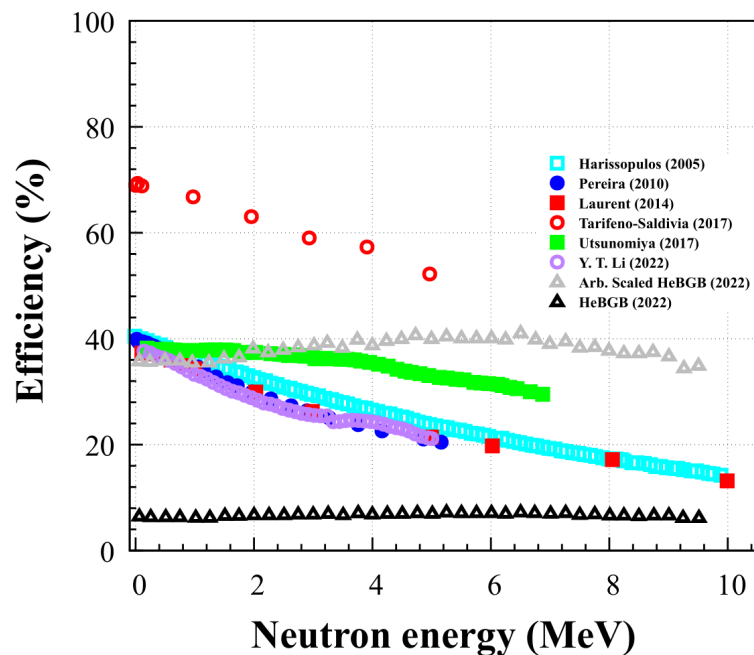
➤ (γ, n) 截面



[核技术, 2020, 43(11): 9]

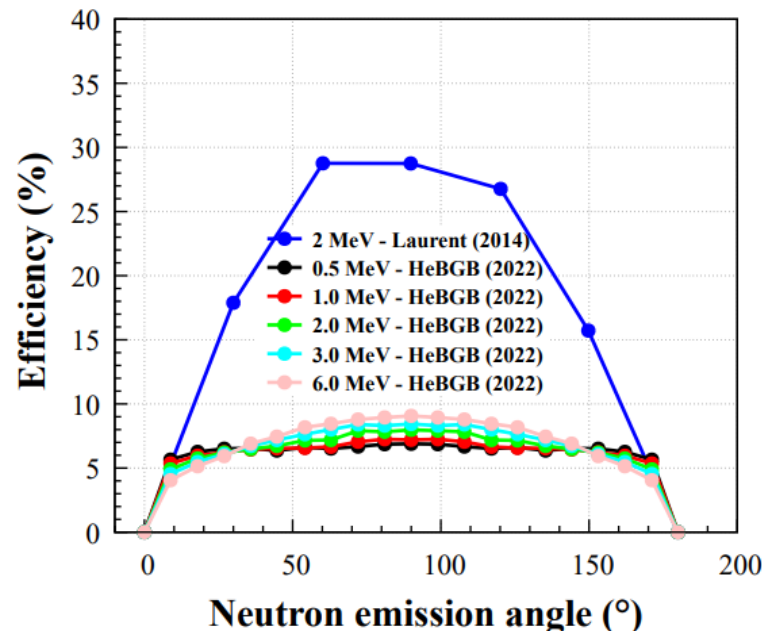
- “聚乙烯+ ^3He 管”阵列探测器在核物理研究领域具有广泛应用

➤ 探测效率vs出射中子能量



[Journal of Instrumentation 17.05 (2022): P05004.]

➤ 探测效率vs出射中子角度



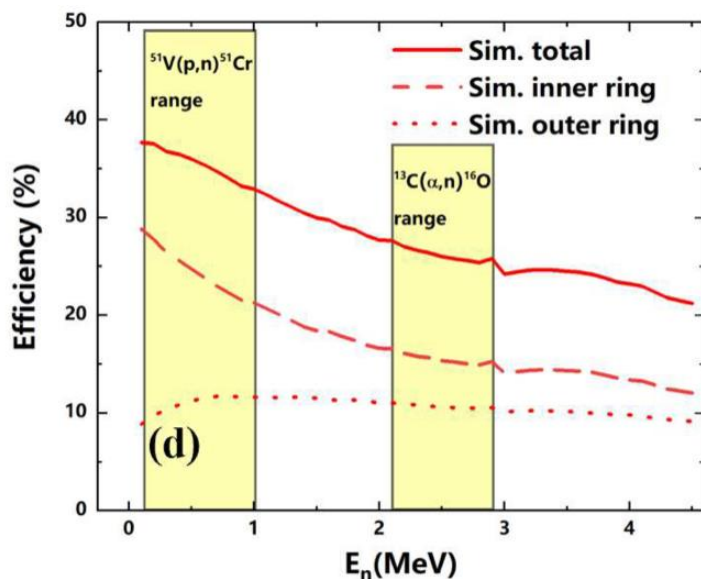
[NIM-A 745 (2014): 99-105.]

- 大多数“聚乙烯+ ^3He 管”阵列探测器在1 MeV以上能区探测效率随中子能量增高显著下降(大多数材料在1 MeV以上弹散的截面下降), HeBGB探测器的特殊设计使得其在0-9 MeV能区具有较好的平坦度~1.17, 但探测效率仅有7%。
- “聚乙烯+ ^3He 管”探测器的探测效率对出射中子的角分布敏感, HeBGB探测器相较具有较宽的角度不敏感区间, 但角度不敏感区间随能量变化显著。

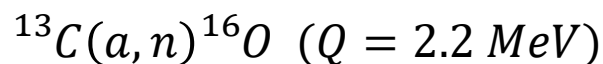
实验需求-例子: $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 测量



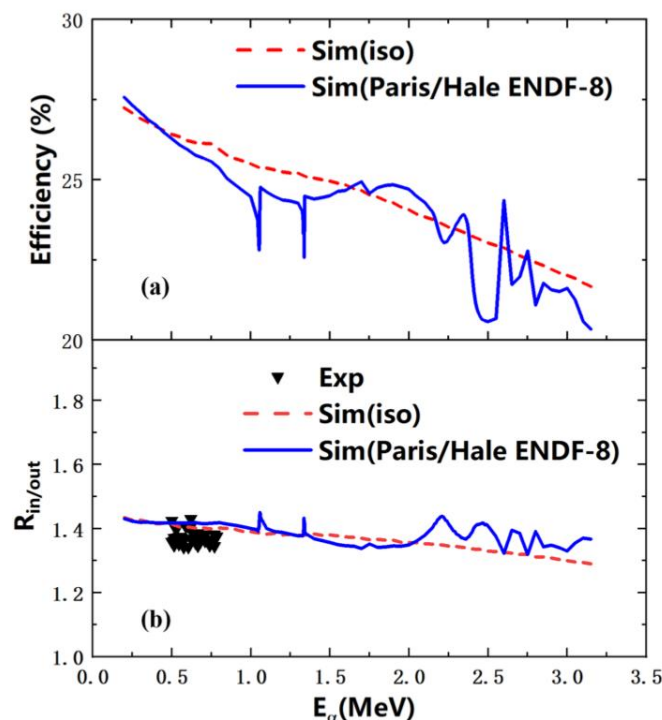
➤ 探测效率vs出射中子能量



$$E_{\alpha} = 300 - 800 \text{ keV}$$



➤ 探测效率vs出射中子



➤ 不确定分析

G4 模拟	效率外推	中子角分布	HPGe刻度	总的不确定度
2.5%	2.5%	1.5%	1.5%	5%



➤ 低探测效率

- ^3He 管无法实现 4π 全空间覆盖，部分中子会从 ^3He 管间隙逃逸。
- 不少比例的热中子被聚乙烯中的氢吸收，而非进入 ^3He 管。

➤ 效率能量依赖

- 聚乙烯中C和H的中子弹性散射截面在快中子区有明显的下降，依赖中子能量。

➤ 效率角度依赖

- 慢化距离沿角度并不均匀
- ^3He 管无法实现 4π 全空间覆盖，部分中子会从 ^3He 管间隙逃逸。



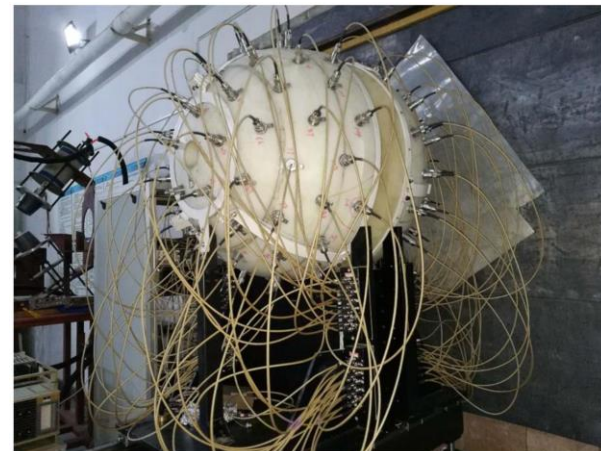
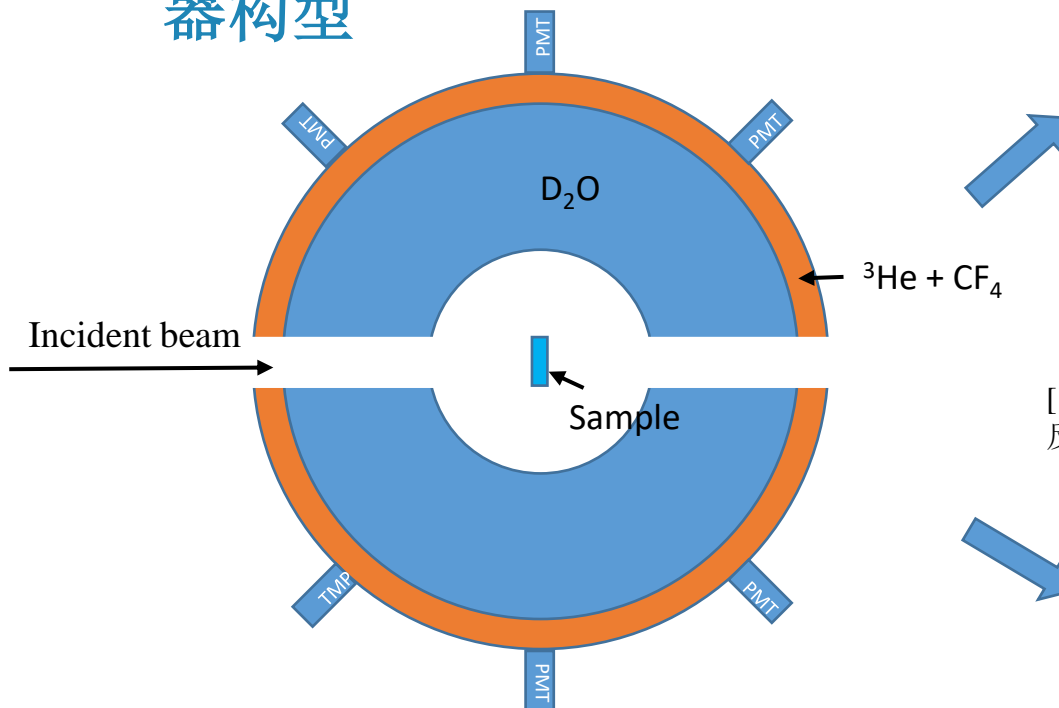
期望新的探测器：

En在[0.1, 10] MeV区间，高探测效率，同时效率不依赖中子能量和中子出射角度的分布。

新探测器设计的灵感



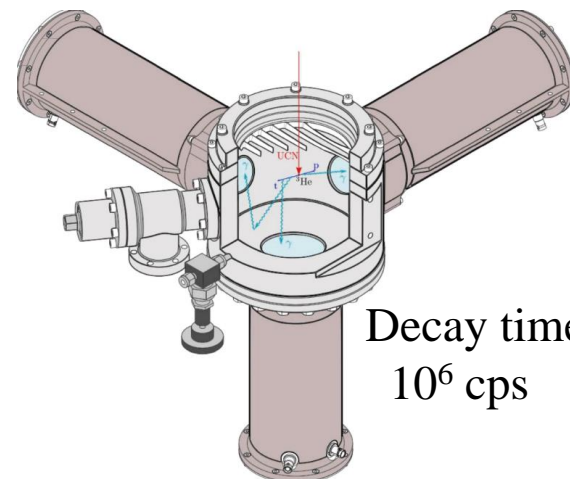
➤ 重水慢化 “ $^3\text{He} + \text{CF}_4$ ” 闪烁探测器构型



[陈建琪, 博士论文, 基于直接中子法测量 $^{93}\text{Nb}(n, 2n)^{92g+m}\text{Nb}$ 反应截面的实验研究]

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{capt} \times \varepsilon_{lum} \times \varepsilon_{coll}$$

- 应用重水慢化快中子
- $n + ^3\text{He} \rightarrow p + t$ ($Q = 0.764 \text{ MeV}$)
- 质子和氚电离激发 CF_4 发光
- 产生的光被周边PMTs符合测量(Maj-3)

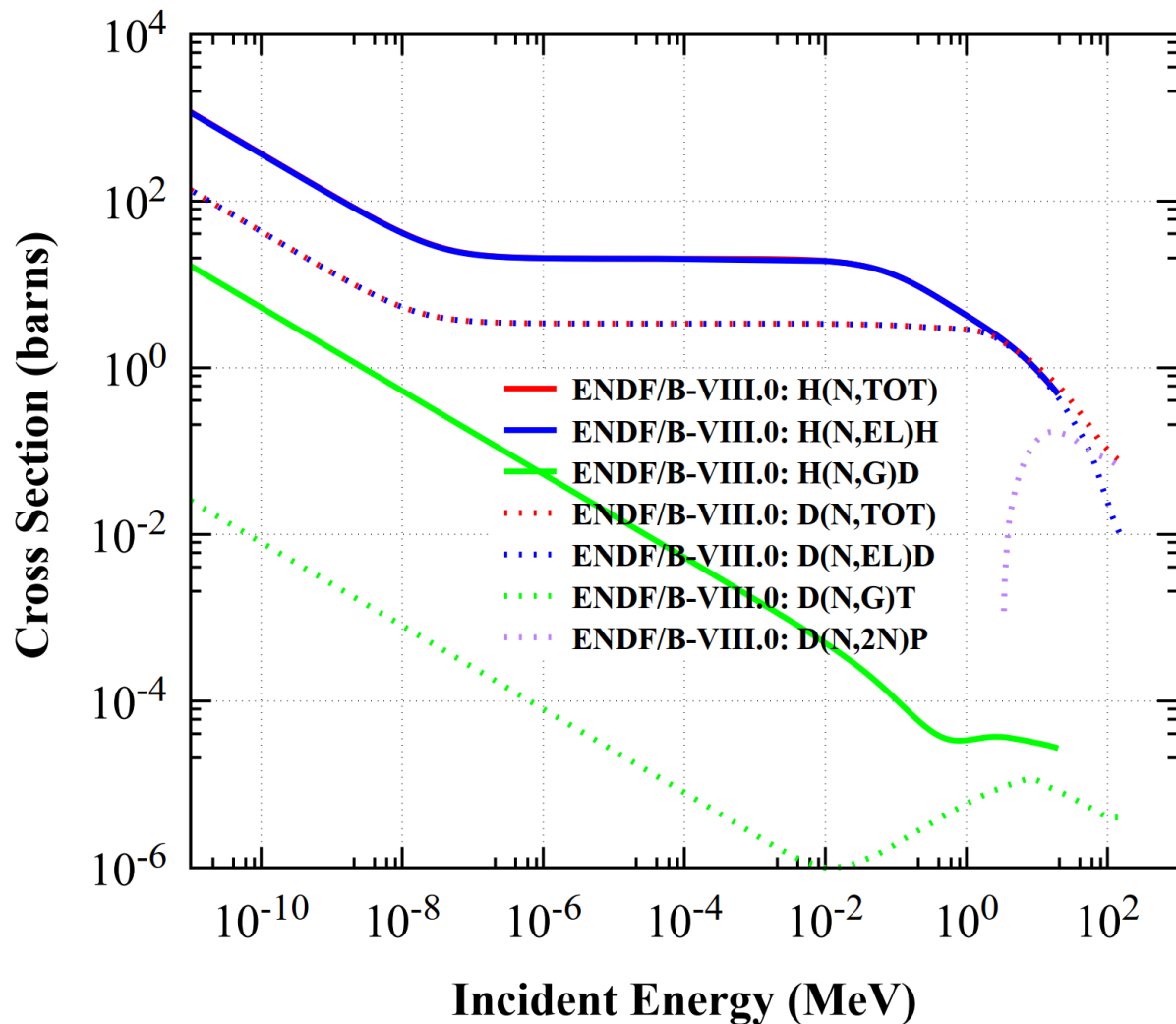


[William PhD thesis neutron to hidden neutron oscillation in ultracold neutron beam]

为什么选择重水？



➤ H和D的激发函数



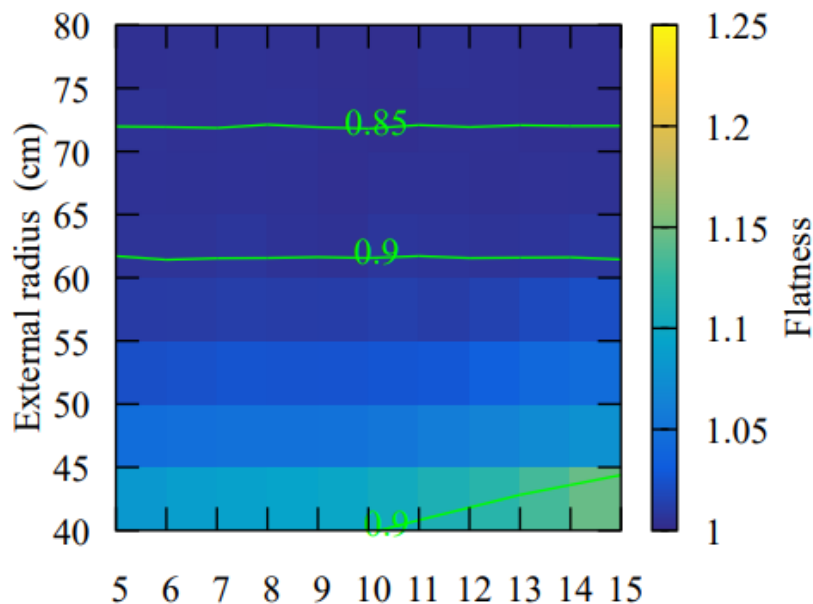
- **弹散截面**：D 比H有更大平坦的区域
- **(n, γ) 反应截面**：D 的 (n, γ) 反应截面比H的 (n, γ) 低 2-3 数量级，降低了中子吸收的比例。
- **(n, 2n) 反应截面**：当 $E_n > 3$ MeV 时，可以打开 D 的 (n, 2n) 反应道，可以有效地增加中子，平衡由于弹散截面下降导致的中子数降低。

确定最优构型



➤ $E_{max} = 1 \text{ MeV}$

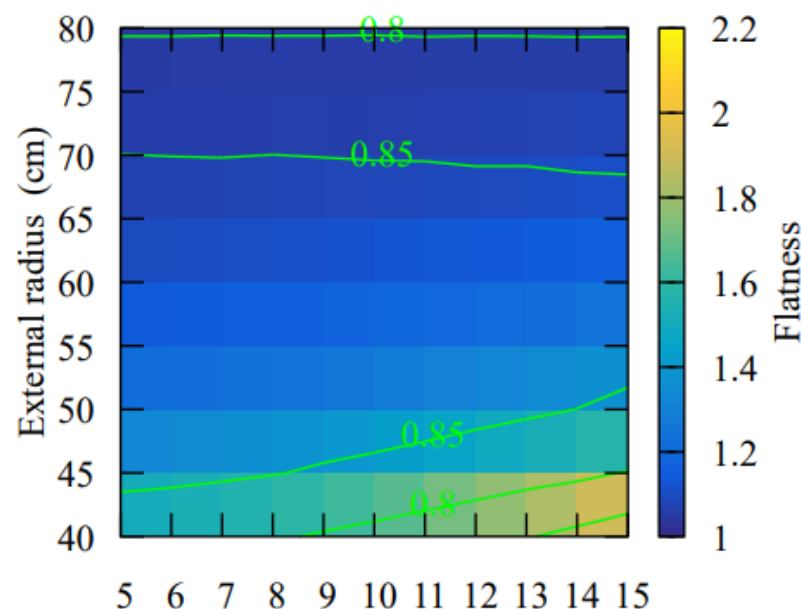
$E_{max} = 1.0 \text{ MeV}$



Inner radius (cm) [Courtesy: 景俊升]

➤ $E_{max} = 10 \text{ MeV}$

$E_{max} = 10.0 \text{ MeV}$



Inner radius (cm) [Courtesy: 景俊升]

软件: MCNPX; 中子源位置: 探测器中心; 出射角度: 各向同性;

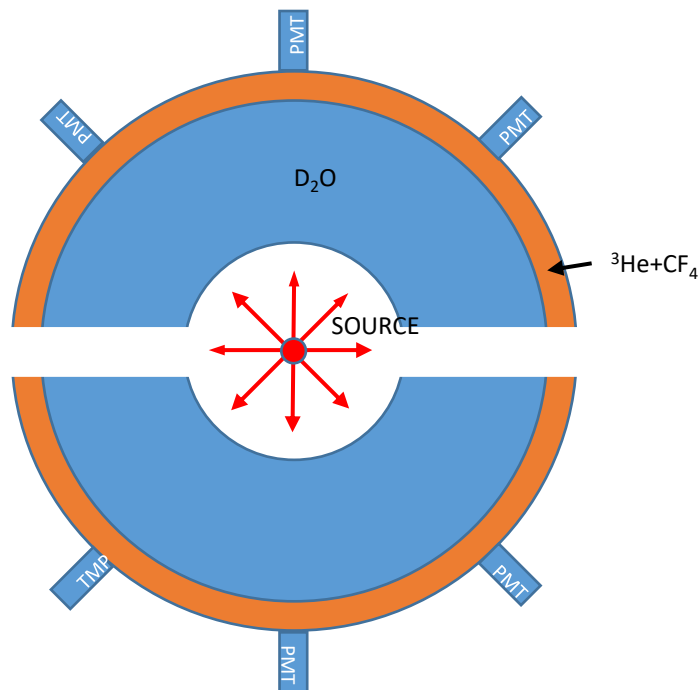
$E_n = \{0.01, 0.1, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0\} \text{ MeV}$

- 平均探测效率 $\varepsilon_{av}(E_{max}) = \frac{1}{\text{Num}(E_i)} \sum_{E_i \leq E_{max}} \varepsilon(E_i)$
- 平坦度 $F(E_{max}) = \frac{\text{Max}(\varepsilon(E_i))}{\text{Min}(\varepsilon(E_j))}$

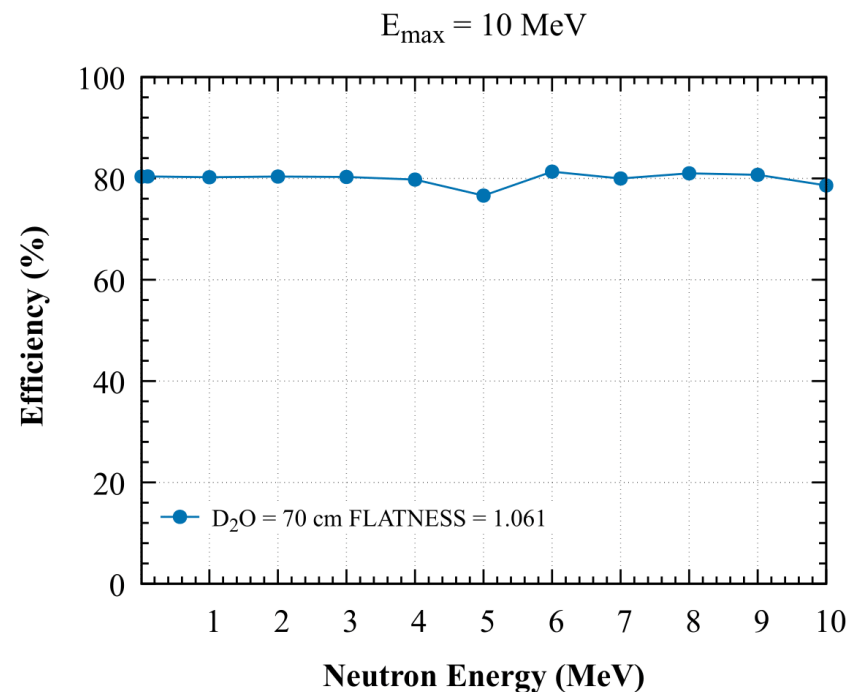
探测效率 @ $D_2O_{th} = 70\text{ cm}$



➤ 探测器构型示意图



➤ 探测效率 vs 中子能量



• $E_n = \{0.01, 0.1, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0\} \text{ MeV}$

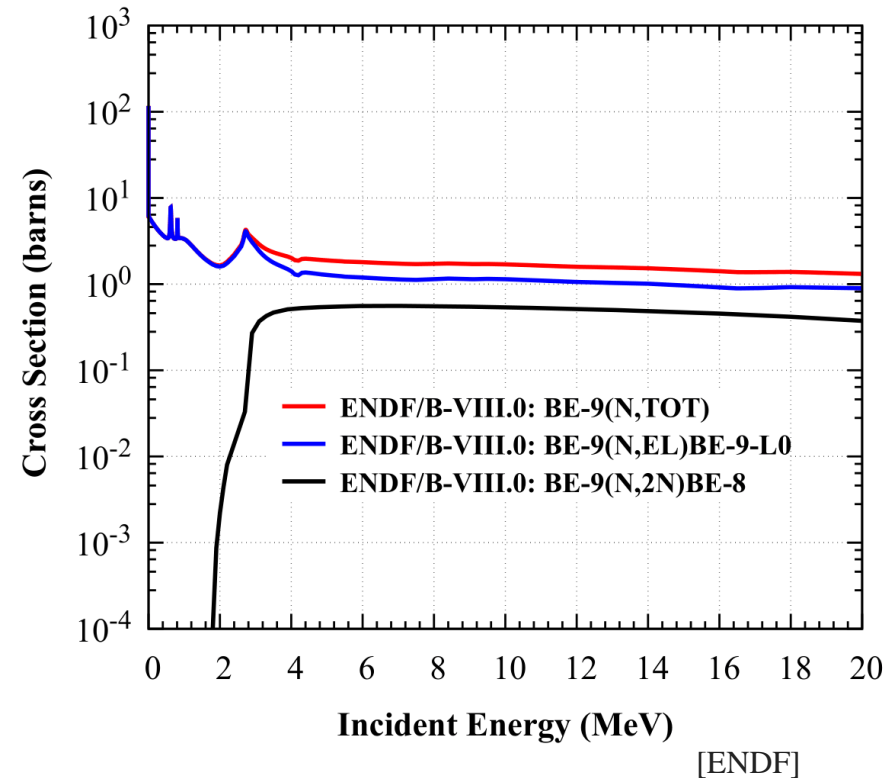
[Courtesy: 景俊升]

• 中子各向同性出射

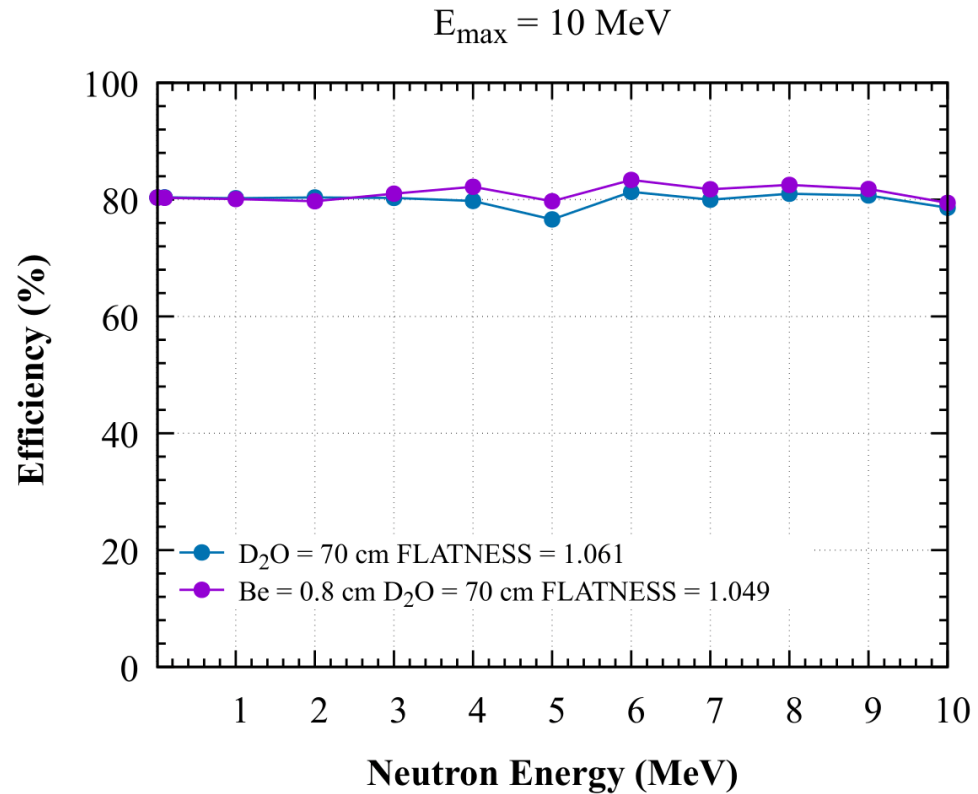
• 构型参数: $\phi_{in} = 20\text{ cm}$, $\phi_{out} = 160\text{ cm}$, $\phi_{ch} = 8\text{ cm}$, ^3He 厚度 3.2 cm



➤ ⁹Be 激发函数



➤ 探测效率 vs 中子能量

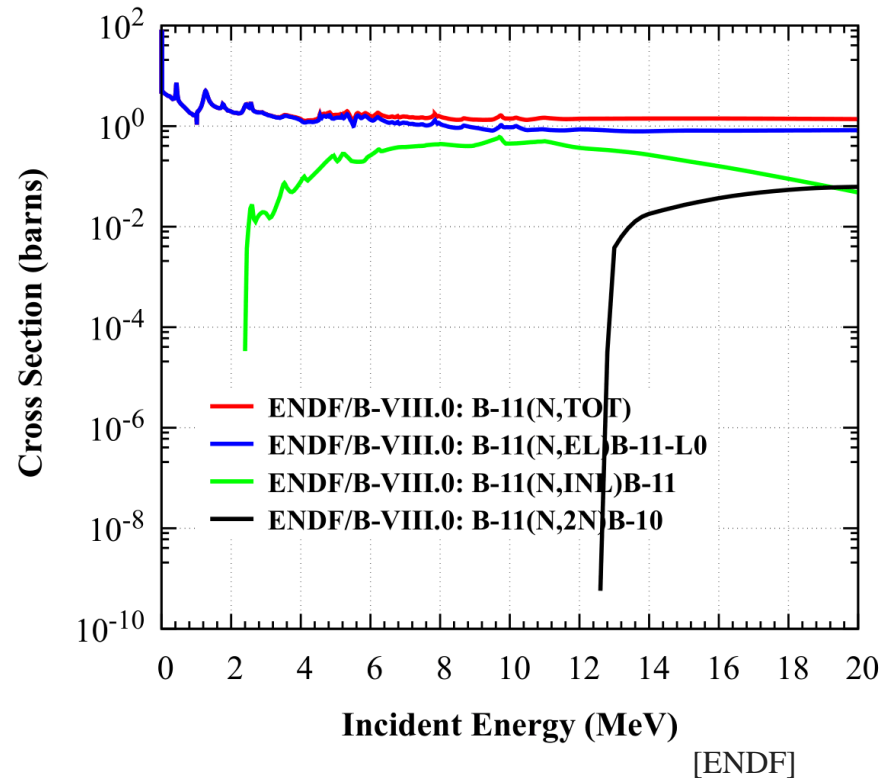


[Courtesy: 景俊升]

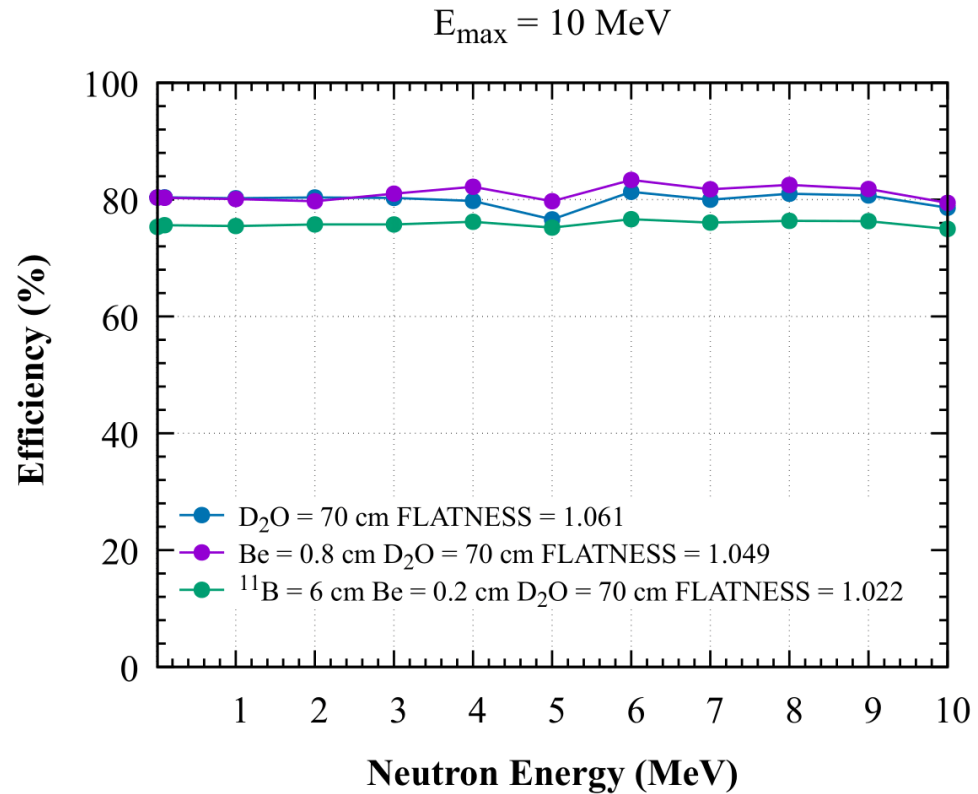
- 在重水内侧增加 0.8 cm Be 后, 效率曲线有所提升, 但在 5 MeV 处的小“凹陷”仍然存在。



➤ ^{11}B 激发函数



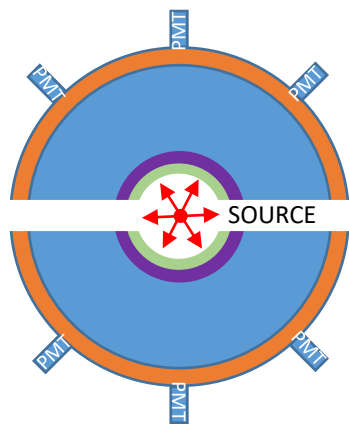
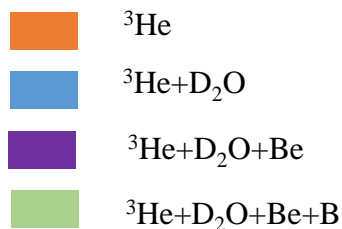
➤ 探测效率 vs 中子能量



[Courtesy: 景俊升]

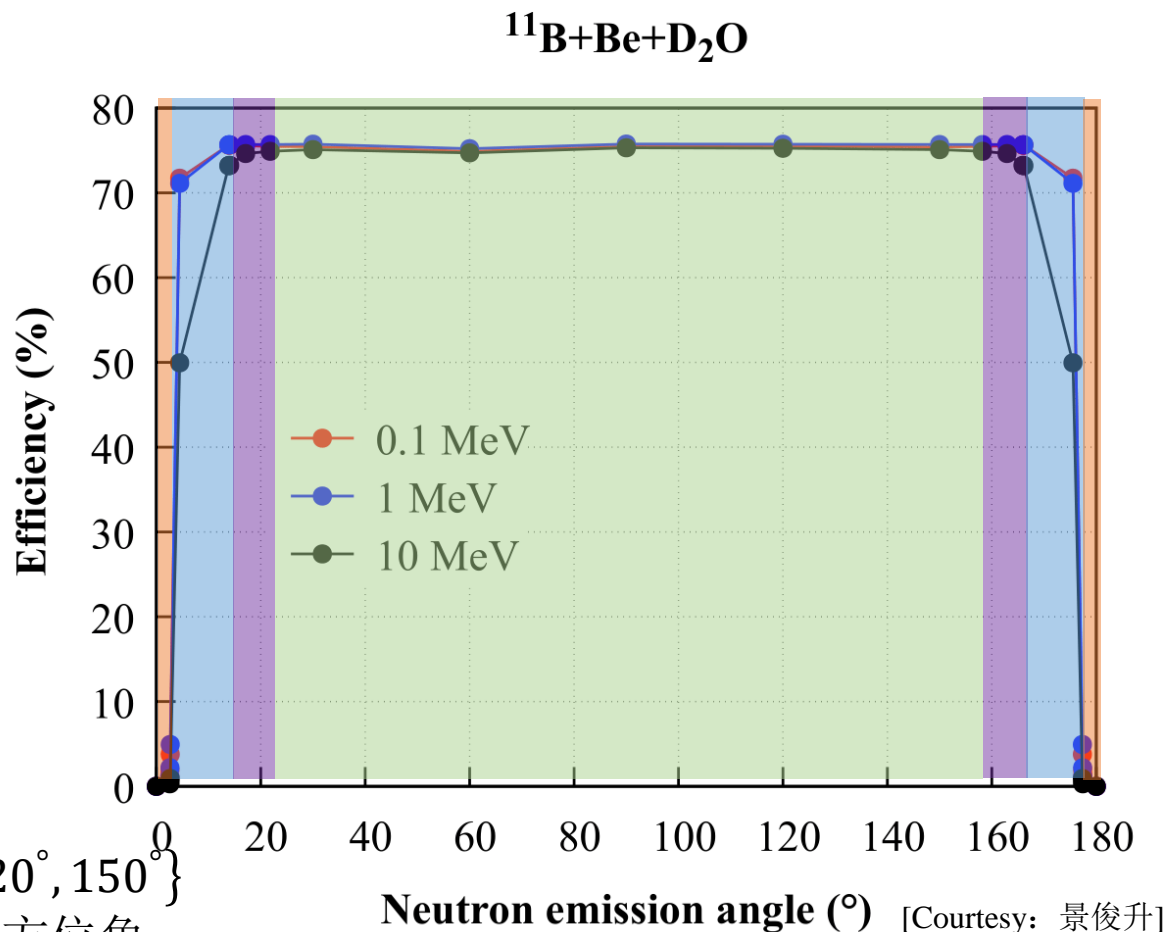
- 在重水内侧，增加0.8 cm的Be和6 cm的 ^{11}B 后，探测效率降至75%，平坦度有显著提升，达到1.02。

➤ 最优构型



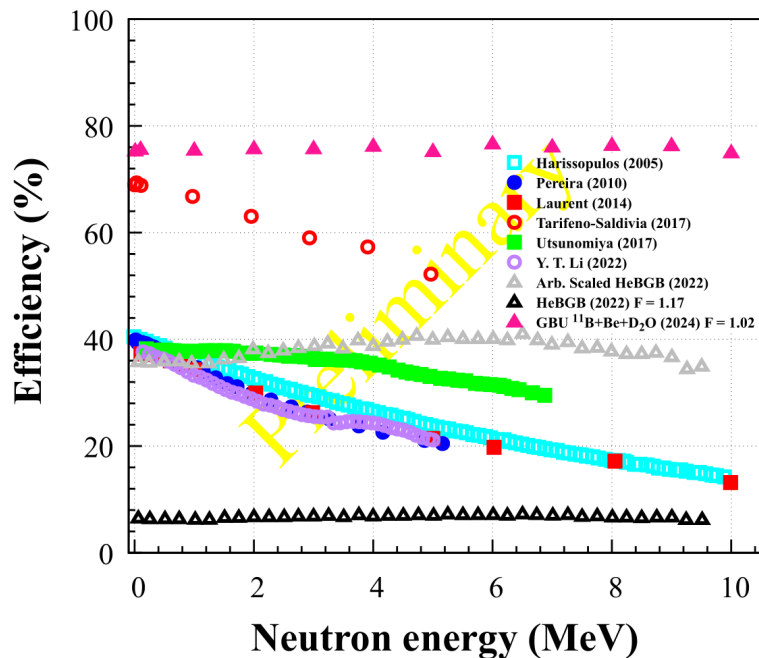
中子能量: $\{0.1, 1, 10\}$ MeV
中子出射角: $\{30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ\}$
和对应束流孔道不同材料的方位角。
运行次数: 10^7

➤ 探测效率 vs 中子出射角



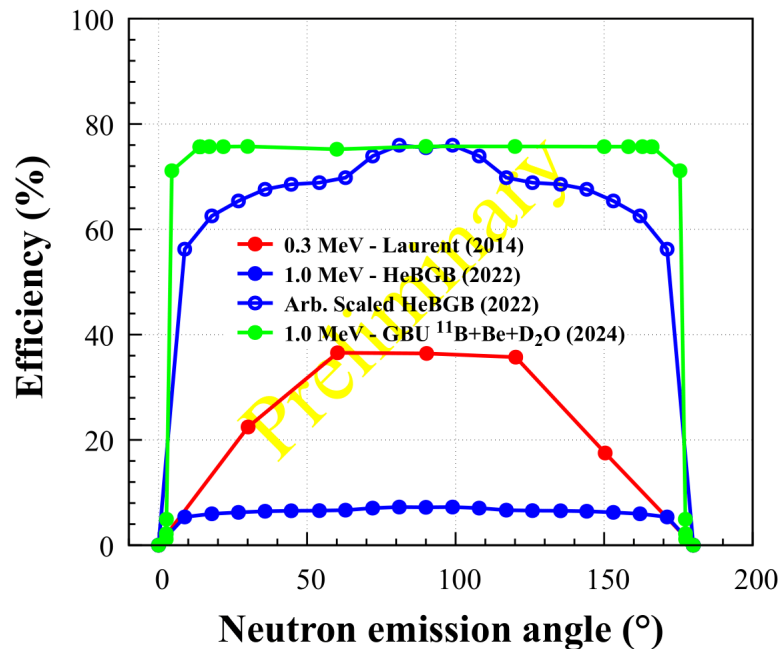
- 角度平坦度区间: $[16^\circ, 164^\circ]$
- 平坦区间与出射中子能量几乎无关

➤ 效率 vs 中子能量



[Courtesy: 景俊升]

➤ 效率 vs 中子出射角度

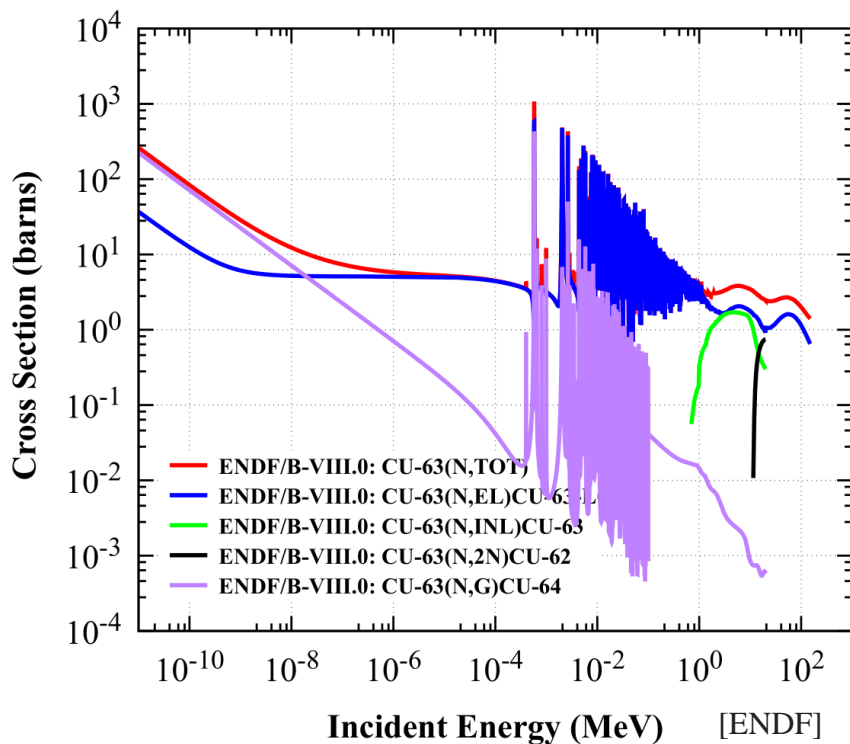


[Courtesy: 景俊升]

- 重水慢化的“ $\text{CF}_4 + {}^3\text{He}$ ”气体闪烁探测器 (6 cm ${}^{11}\text{B}$ +0.2 cm Be+70 cm+2.8 cm ${}^3\text{He}$) 具有更优的平坦度, 能够达到1.02, 探测效率能够达到75%。
- 重水慢化的“ $\text{CF}_4 + {}^3\text{He}$ ”气体闪烁探测器具有更宽的角度不依赖区间。

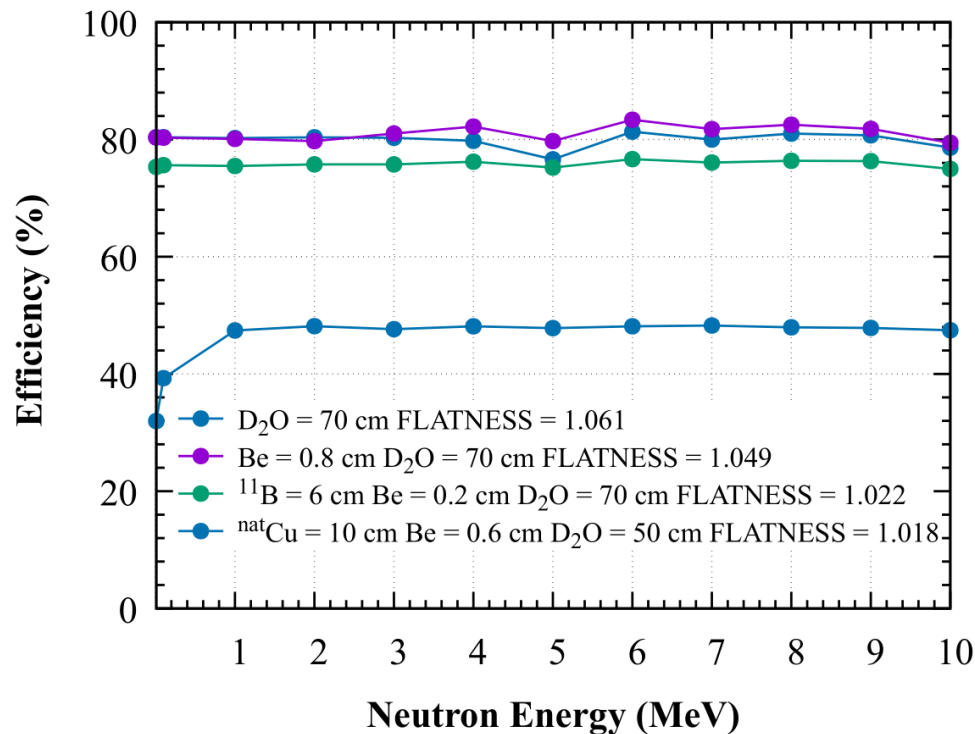


➤ ^{63}Cu 激发函数



➤ 效率 vs 中子能量

$E_{\max} = 10 \text{ MeV}$

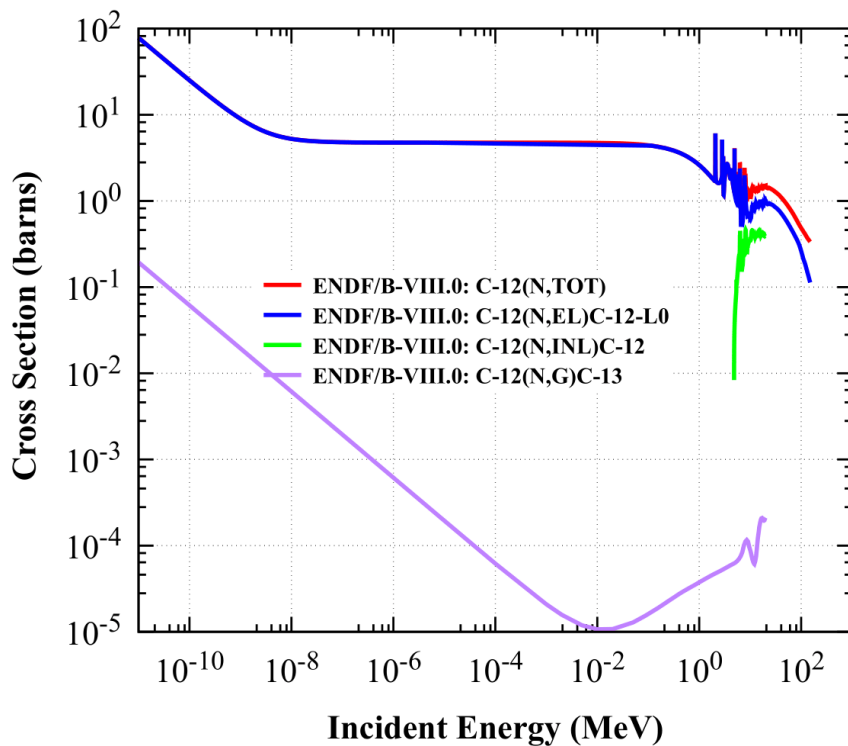


[Courtesy: 景俊升]

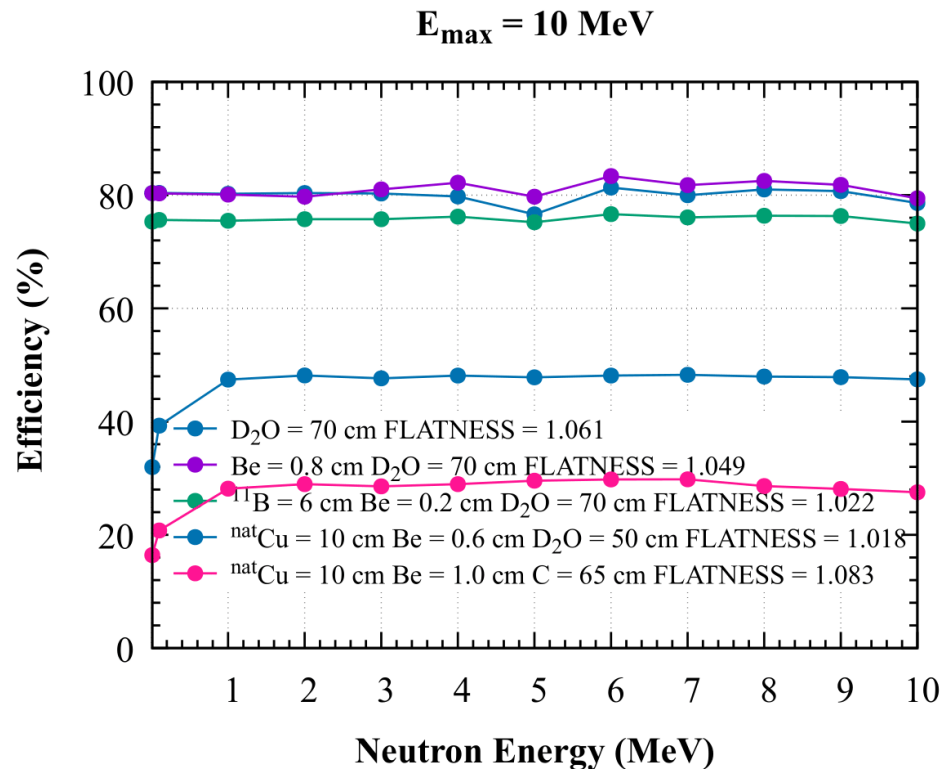
- 应用 $10 \text{ cm } ^{\text{nat}}\text{Cu}$ 替换 $6 \text{ cm } ^{11}\text{B}$ 后, 探测效率降至 50%, 效率曲线的平坦度在 1 MeV 以下区间明显变差, 在 1 MeV 以上区间有很好的平坦度。



➤ C 激发函数曲线



➤ 效率vs中子能量



[Courtesy: 景俊升]

- 在应用Cu替代 ^{11}B 的基础上，再应用65 cm厚的C(石墨)替代70 cm厚的重水，探测效率降至30%，效率平坦度在1 MeV以下区间依然较差，在1 MeV以上区间有很好的平坦度。



➤ 优势

- 高的探测效率 75%(光产生和收集的效率还未考虑)
- 效率不依赖出射中子能量, $[0.1, 10]$ MeV能量区间的平坦度: 1.02
- 效率不依赖出射中子角分布, 角度不依赖区间: $[16^\circ, 164^\circ]$

➤ 劣势

- 体积巨大 ($6\text{ cm }^{11}\text{B} + 0.2\text{ cm Be} + 70\text{ cm D}_2\text{O} + 2.8\text{ cm }^3\text{He}$ (约275 L)@4 atm)), 造价高昂。
- 两个替代构型($10\text{ cm }^{\text{nat}}\text{Cu} + 0.6\text{ cm Be} + 50\text{ cm D}_2\text{O}$ and $10\text{ cm }^{\text{nat}}\text{Cu} + 1.0\text{ cm Be} + 65\text{ cm C}$) 探测效率较低, 且在 $E_n < 1\text{ MeV}$ 区间平坦度差。

➤ 现状

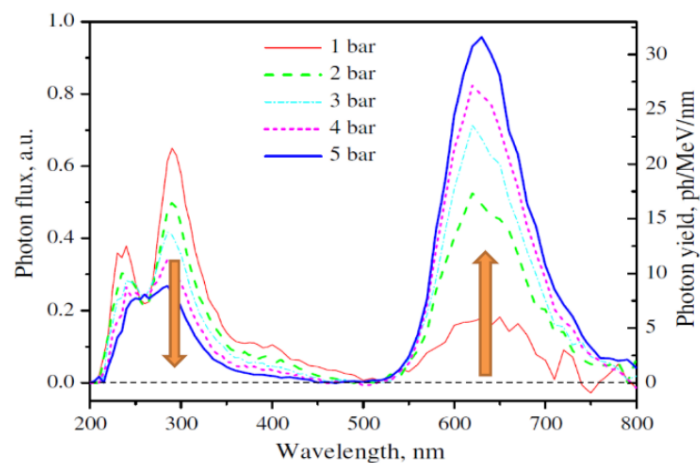
- 混合气体气压最优比例, n/Gamma 分辨, 机械加工, 气体封装的密闭性, 稳定性等因素还未考虑。

下一步工作计划



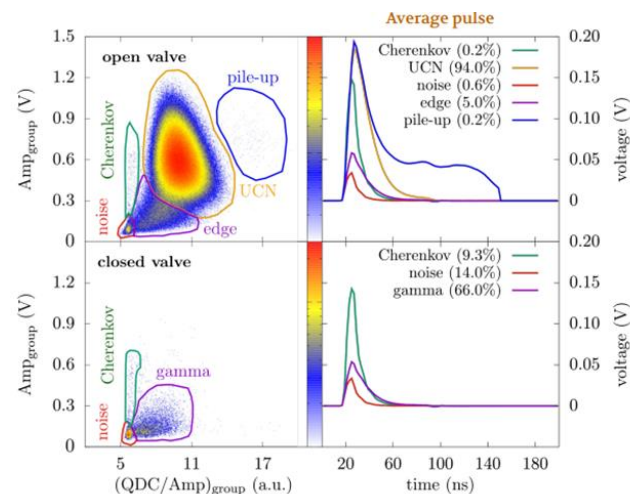
4 atm ^3He
1-2 atm CF_4

[J. Res. Nat. Inst. Standards Tech. 113, 69 (2008)]



Light Yield : 1000 photon/MeV

[祁辉荣, COUSP2024 CONFERENCE]



[William Master Thesis]

➤ 特任研究员

聘期3年。特任研究员A类综合年薪不低于40万元，特任研究员B类综合年薪不低于30万元。课题组会根据应聘人的工作表现，比如发表文章，申请到项目或研究上有重要突破，发放一定的绩效和奖励。

➤ 博士后

聘期2年。A类博士后综合年薪不低于45万元（含地方政府资助），B类博士后综合年薪不低于40万元。根据科研工作业绩表现，提供相应的科研绩效奖励。与清华大学深圳研究院和中国科学技术大学联合招聘，博士后出站颁发联合培养学校博士后证书。

➤ 访问学生

联系方式: chenjianqi@gbu.edu.cn

微信: weichenjian7



大湾区大学物质科学学院
SCHOOL OF PHYSICAL SCIENCES
GREAT BAY UNIVERSITY

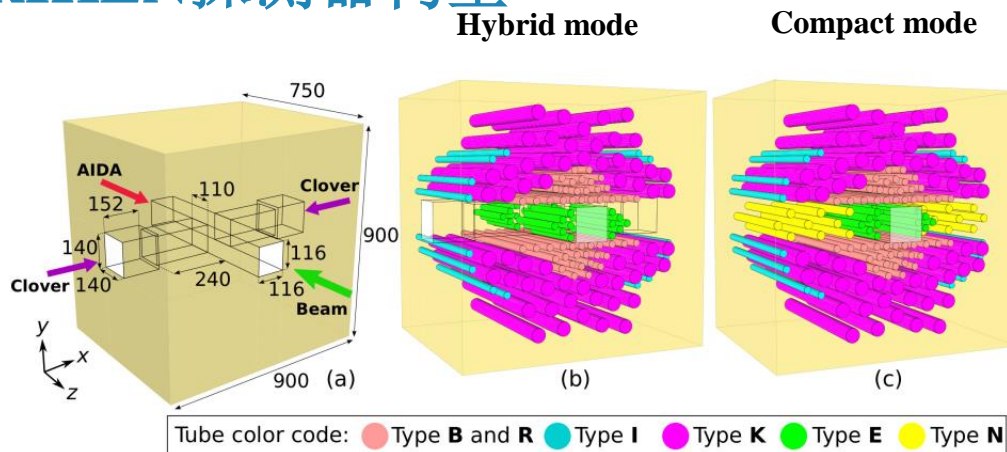
敬请批评指正！
欢迎大家来大湾区大学做客



典型例子：BRIKEN探测器

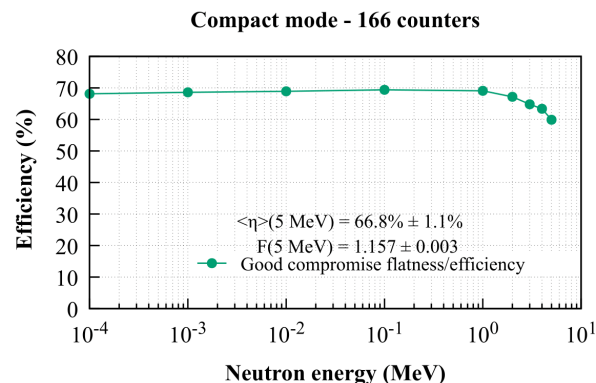
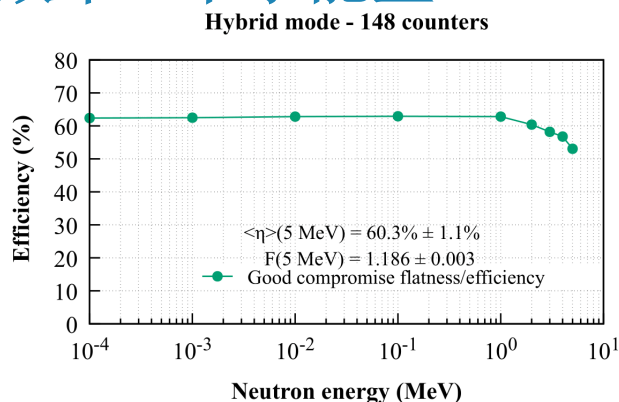


➤ BRIKEN探测器构型



^3He 总体积:
(约275 L)@4 atm

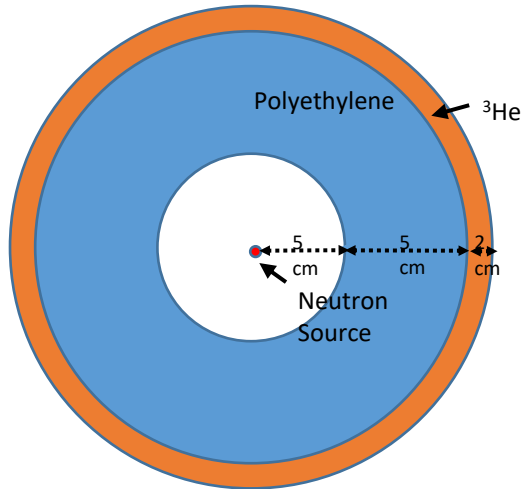
➤ 探测效率vs中子能量



[The BRIKEN collaboration, Jinst, 2017, 12]

- “聚乙烯+ ^3He 管”阵列探测器在1 MeV以下能区，探测效率几乎不随中子能量变化，1 MeV以上，探测效率随能量升高显著降低。

➤ Geometry



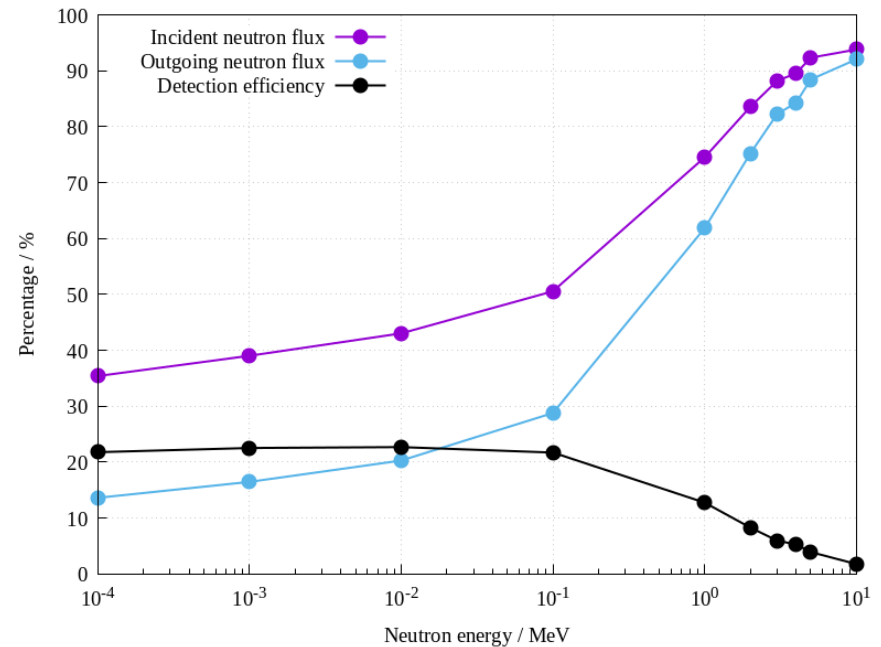
$$N_{\text{det}} = \int N_{\text{inc}}(E) \cdot \sigma(E) dE$$

$$E_i = \{10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 1, 2, 3, 4, 5, 10\} \text{ MeV}$$

Direction: isotropic emission

Run number: 200000

➤ Detection efficiency

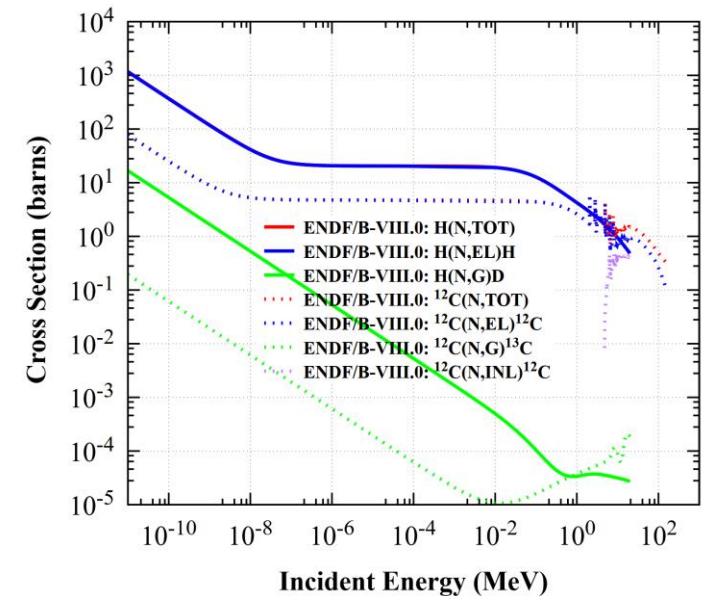
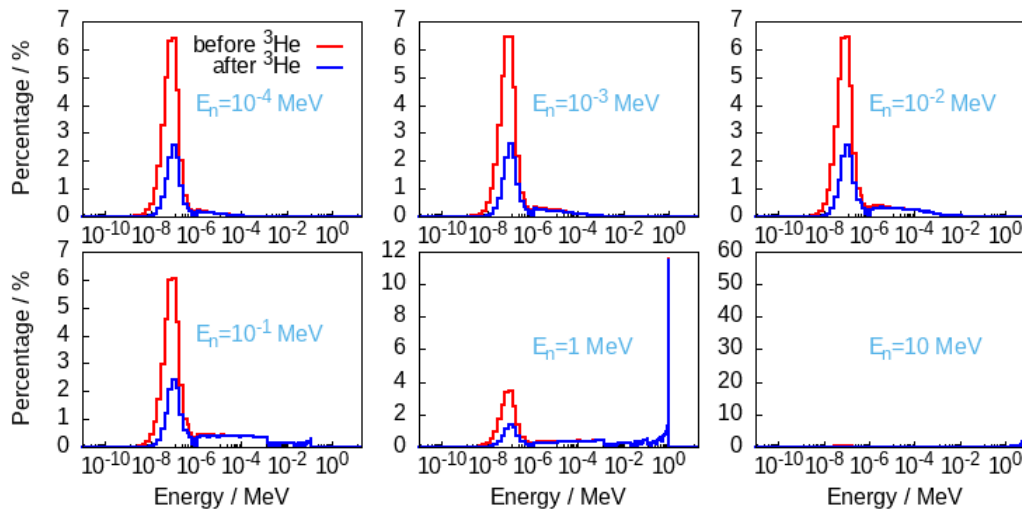


- Leaking neutron increase with the increasing neutron energy.
- When $E_n > 1\text{MeV}$, detection efficiency drops apparently.



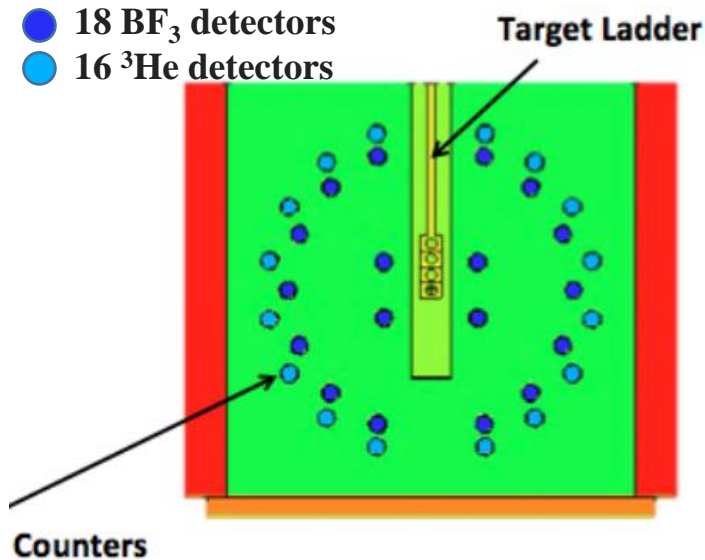
➤ Geometry

Neutron energy spectrum before and after ^3He region

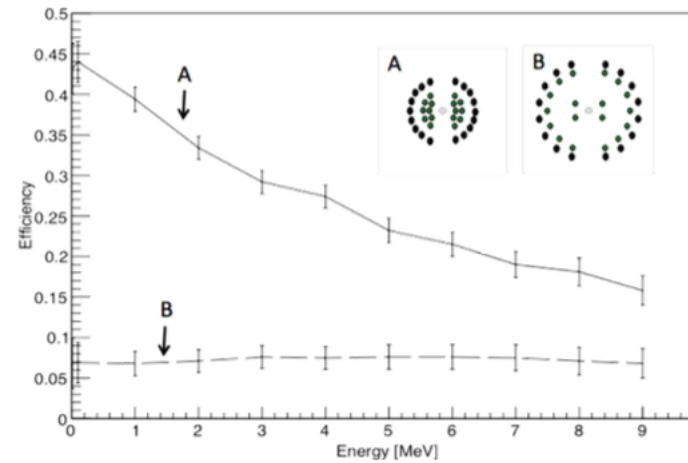


- $E_n < 1\text{MeV}$, incident neutron spectrum small difference in thermal neutron region.
- $E_n > 1\text{MeV}$, great difference.

➤ HeBGB detector configuration



[Journal of Instrumentation 17.05 (2022): P05004]



[Zach Meisel, IAEA technical meeting on (alpha, n) nuclear data]

Type	Manufacturer	Pressure [atm]	Sensitive Length [in]	Length [in]	Diameter [in]
^3He	Baker Hughes	4.00	14.00	16.19	1.00
BF_3	Reuter-Stokes	0.723	12.25	14.44	1.00