



# $^{165}\text{Ho}(n, \gamma)^{166}\text{Ho}$ 长寿命态布居强度测量

---

钟 健| 深圳技术大学

张广鑫| 中山大学

胡世鹏| 深圳大学

吴晓光| 中国原子能科学研究院

蒋 伟| 中国散裂中子源

# 目录



## 01 $^{166}\text{Ho}$ 的特殊性与核医学应用的现实需求

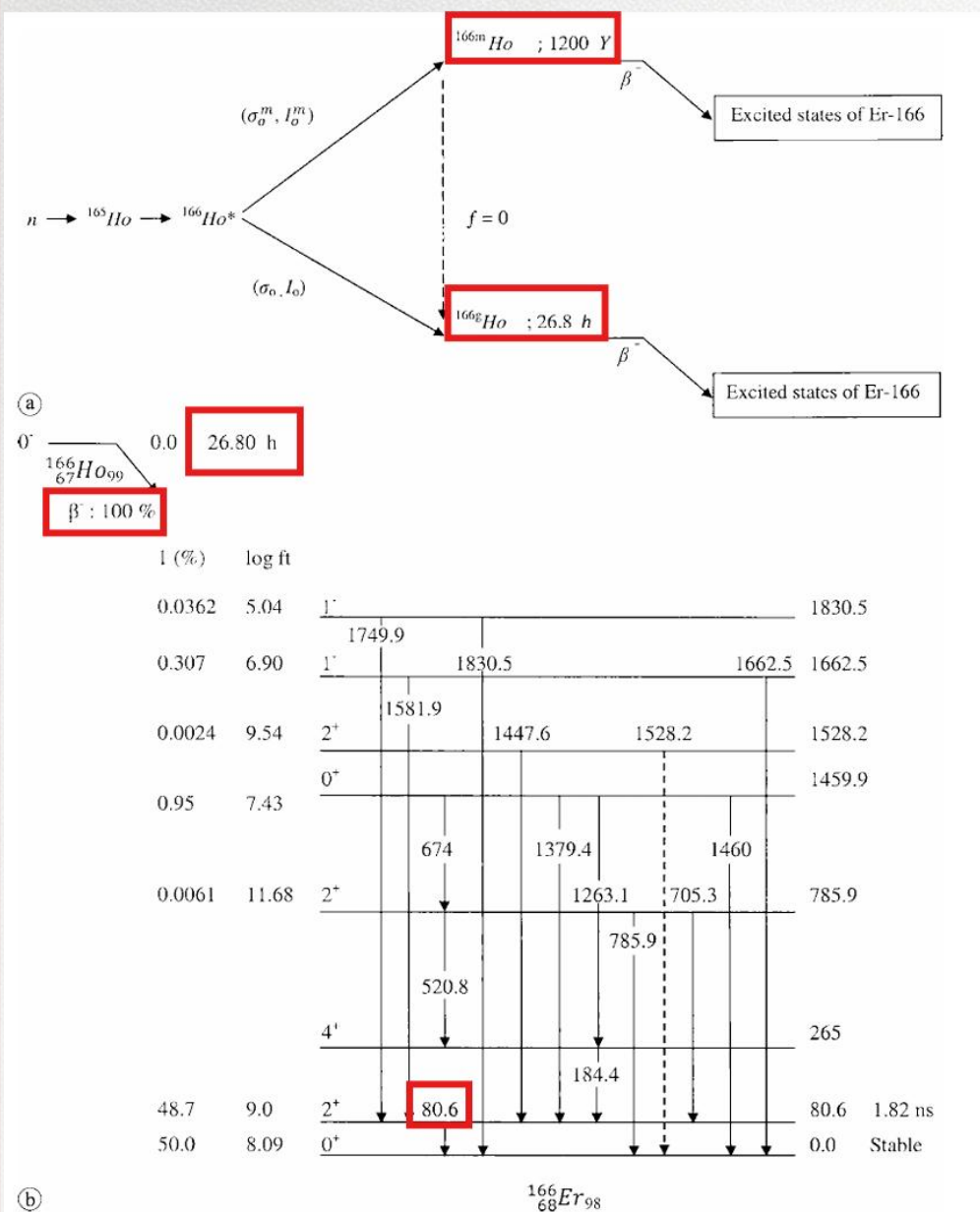


## 02 国内外研究现状



## 03 实验设想及束流估计

# 关于<sup>166</sup>Ho



## ${}^{166g}\text{Ho}$

<sup>166g</sup>Ho是优质的诊疗一体化核素，其基态核广泛用于肝癌、骨转移癌的靶向内照射治疗。具有以下优势：

- $\beta$ 放射性 ( $E_{\max} \approx 1.8\text{MeV}$ )：能有效杀死癌细胞
- 合适的半衰期 ( $T_{1/2} = 26.8 \text{ h}$ )：适合靶药制作和减少患者体内存在时间
- 合适的 $\gamma$ 射线 (80.6 keV)：可用于诊断

## ${}^{166m}\text{Ho}$

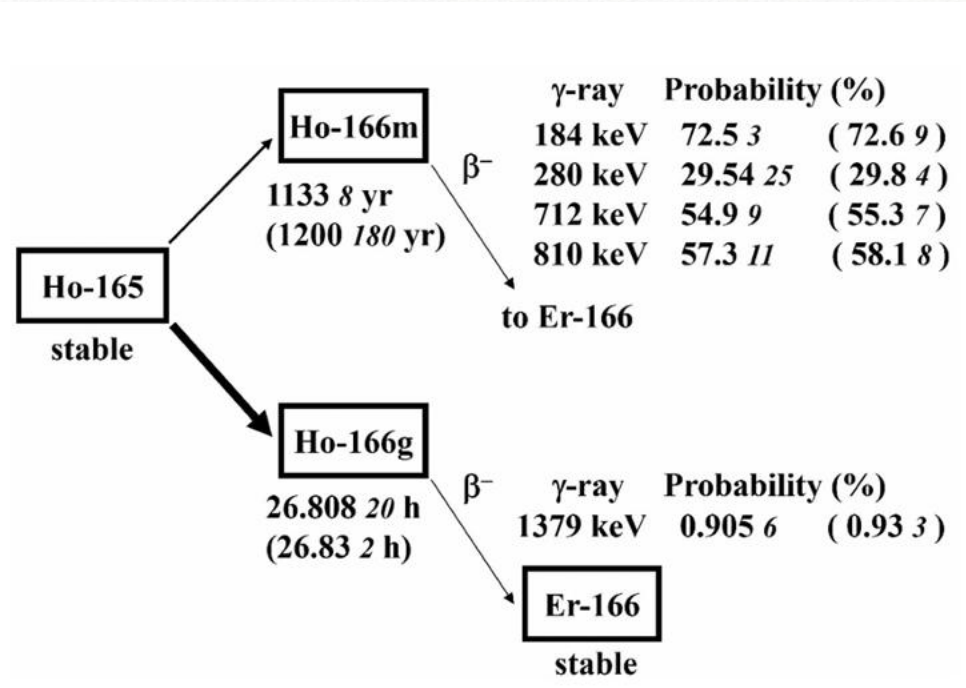
- 长半衰期 ( $T_{1/2} \approx 1200 \text{ y}$ )
- 增加患者体内长期辐射风险
- 对核数据及核废料处理具有重要影响

# 国内外前人研究进展

日本Nakamura团队 (2025, KUR堆)

采用石墨堆热中子活化法测量中子俘获截面，该工作修正了早年同质异能态的半衰期和截面偏差，为核数据基准提供了重要支撑。

## 实验结果



| 研究对象                      | 半衰期        | 测量射线                            | 测量时间                                                 | 关键成果                                    | 关键结论                                                                                                                                |
|---------------------------|------------|---------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $^{166\text{g}}\text{Ho}$ | 26.8 h     | 1379 keV                        | 冷却约7天后（让短寿命干扰衰减），进行40小时 $\gamma$ 谱测量                 | $\sigma_g = 61.2 \pm 0.6 \text{ barn}$  | $^{166\text{m}}\text{Ho}$<br>半衰期从1200±180年精确到1133±8年；<br>2.79±0.04 barn，比旧评价值（3.5 barn）低约20%；<br>$\sigma_g / \sigma_m \approx 21.9$ |
| $^{166\text{m}}\text{Ho}$ | 1200±180 y | 184 keV、280 keV、712 keV、810 keV | 冷却约4个月（等 $^{166\text{g}}\text{Ho}$ 完全衰变）后，进行约7天长时间测量 | $\sigma_m = 2.79 \pm 0.04 \text{ barn}$ |                                                                                                                                     |

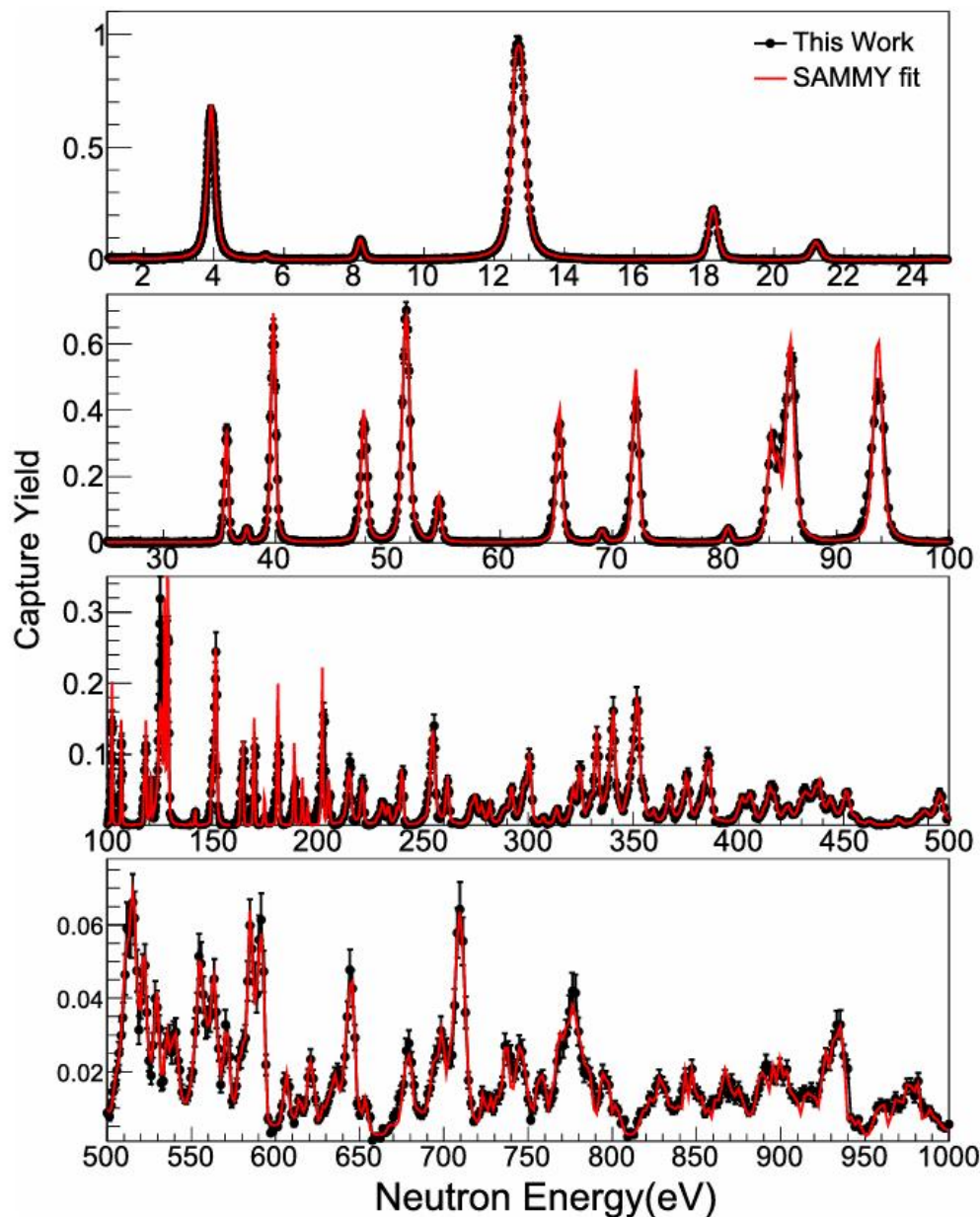
# 国内外前人研究进展

## 国内CSNS前期研究 (2026)

Wang等人在Back-n线站利用4 $\pi$ -BaF<sub>2</sub> GTAF装置，完成<sup>165</sup>Ho在1 keV内共振俘获产额测量，提取18个s-wave共振参数。

## 主要参数与结论

- 中子源：CSNS Back-n ES#2实验厅，飞行路径76 m
- 中子通量： $6.92 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (ES#2样品位置)
- 探测器：GTAf (Gamma Total Absorption Facility)，由40个BaF<sub>2</sub> 闪烁体组成的4 $\pi$ 球壳阵列 (内径20 cm，厚度15 cm)，用于全吸收 $\gamma$ 能谱测量
- 有效探测效率：约14.3%
- 材料：金属Ho靶，纯度99.5% (含0.5%天然Dy杂质)
- 束流时间：11小时
- 提取了**18个s-wave共振峰** (1 eV ~ 100 eV) 的共振参数
- 所有结果与ENDF/B-VIII.0库和Mughabghab的《Atlas of Neutron Resonances》评价数据高度一致，



# 思考

## 01 核药生产需求

反应堆不仅有热中子，还有超热中子，1/E区域的中子对核药生产 $^{166}\text{Ho}$ 有贡献，很有必要研究该区域的 $(n, \gamma)$ 反应特征。

## 02 能量分辨能力缺失

反应堆中子为连续热谱，无法实现对单一共振能量的独立测量，导致无法精准解析各共振峰的布居强度差异。

## 03 核产物区分困难

缺乏瞬发 $\gamma$ 射线的高分辨测量手段，无法有效区分不同共振对应的退激路径，难以厘清同质异能态与基态的生成机制。

## 04 应用实验依据空白

目前尚无“通过共振筛选策略生产 $^{166g}\text{Ho}$ ”的直接实验数据支撑，这直接制约了该同位素在核医学领域的产业化应用探索。

# CSNS Back n优势

## 01 优异的中子能量分辨率

反角白光中子流强高，基于束流测量、TOF和解谱程序，可以实现中子能量的精准测量。

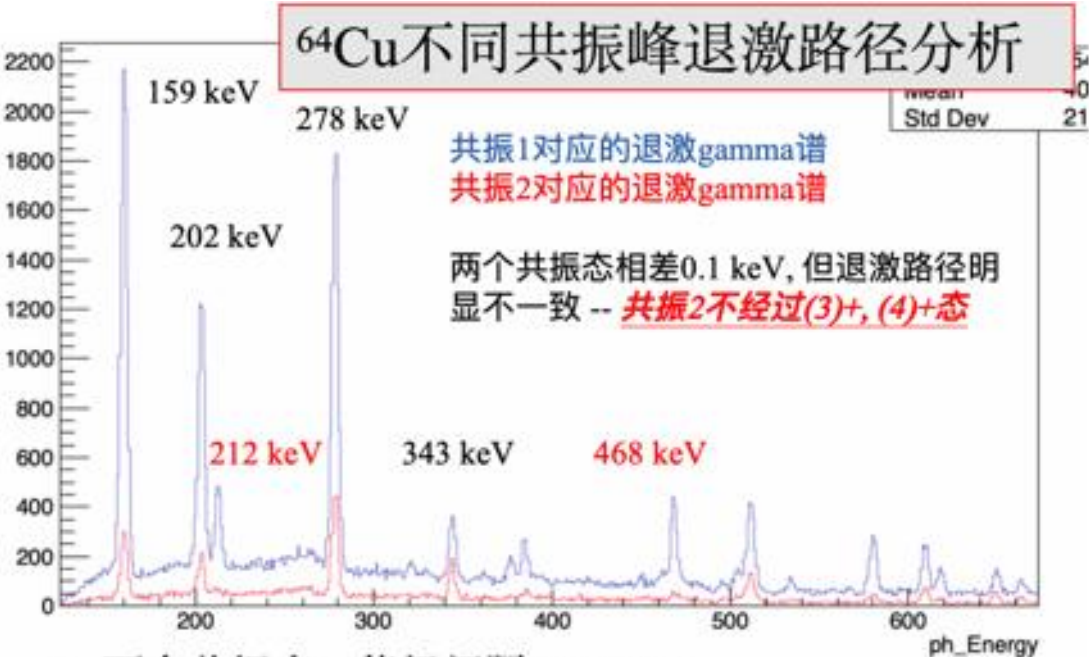
## 02 前期研究工作

Back n 上已经开展了大量的  $(n, \gamma)$  反应截面测量，包括  $^{165}\text{Ho}(n, \gamma)^{166}\text{Ho}$ ，为后续精细研究提供了很好的参照。

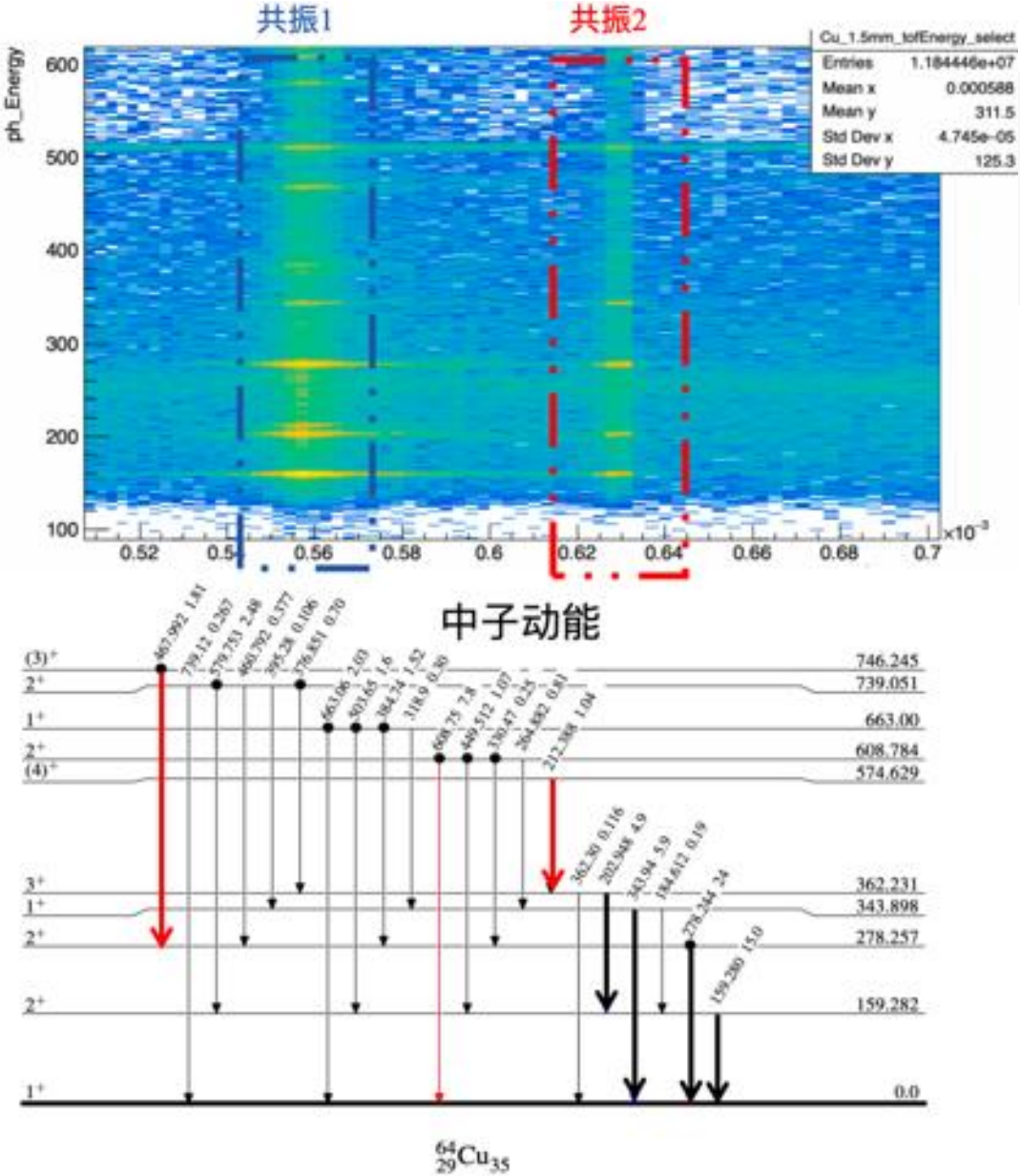
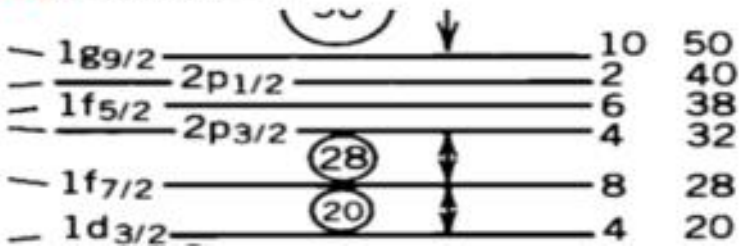
## 03 远离本底影响

若要研究超热中子和热中子区的  $(n, \gamma)$  反应，可以大大降低连续共振区和gamma flash的影响，高能量分辨率的高纯锗探测器可以正常工作。

# 64Cu新现象

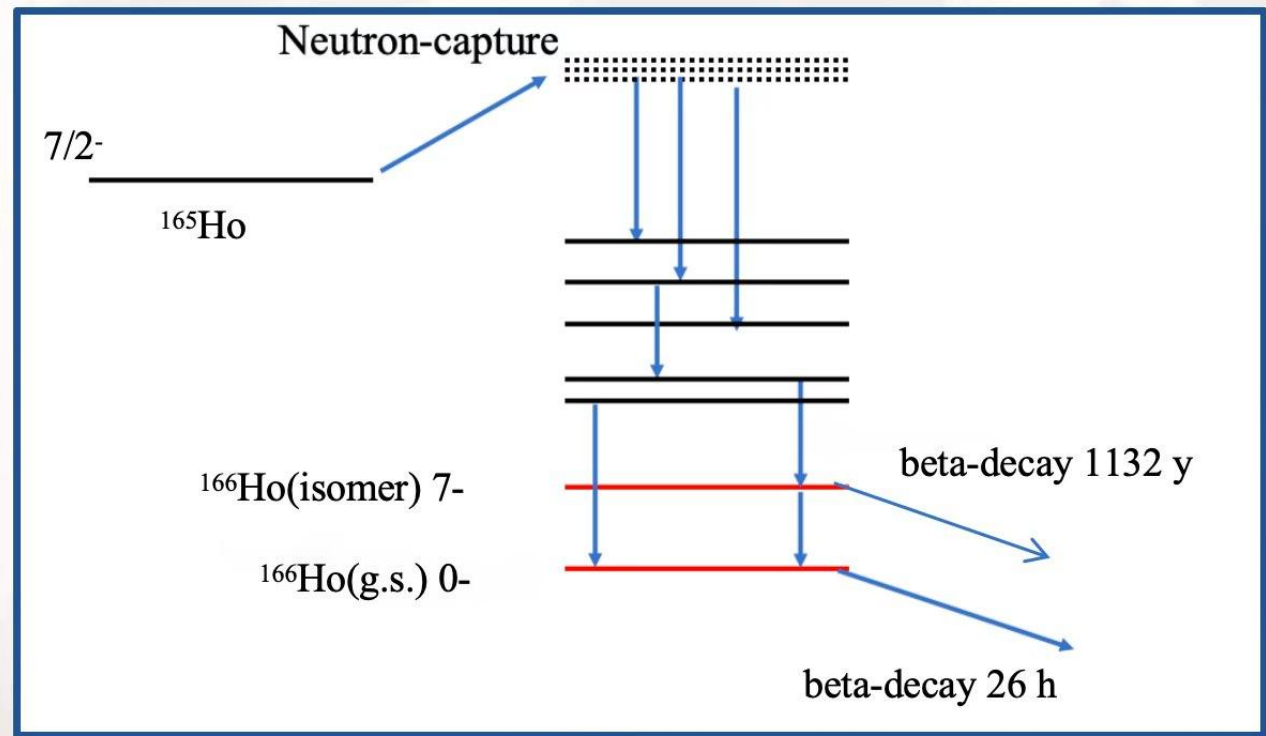


- 两个共振态, 能级间隔<0.1 keV
- $^{63}\text{Cu}$ 基态 $3/2^-$ ,  $^{64}\text{Cu}$ 共振态可能是 $2^-$ 或者 $3^-$ 态, 但退激路径有明显差异!
- 中子组态不一样?
- 质子 $p_{3/2}$ \*中子 $p_{3/2}$ 只能形成 $0^{++}$ --- $3^{++}$ 的多重态, 质子 $p_{3/2}$ \*中子 $f_{5/2}$ 才能形成 $4^{++}$ ?



# $^{165}\text{Ho}(n, \gamma)^{166}\text{Ho}$ 退激路径及布居强度研究

- $^{165}\text{Ho}(n, \gamma)^{166}\text{Ho}$ 中子俘获反应
- 热中子和超热中子区（ $1/E$ 区域）
- 高纯锗探测器测量退激 $\gamma$ 射线
- 统计直接馈入 $^{166g}\text{Ho}$ 和 $^{166m}\text{Ho}$ 的 $\gamma$ 射线强度比  $I_g/I_m$
- 比较不同中子共振峰的 $I_g/I_m$ ，比较 $I_g/I_m$ 与 $\sigma_g/\sigma_m$ ，寻找是否存在 $I_g/I_m > \sigma_g/\sigma_m \approx 21.9$ ，为生产更高纯度的 $^{166g}\text{Ho}$ 核药提供实验依据。



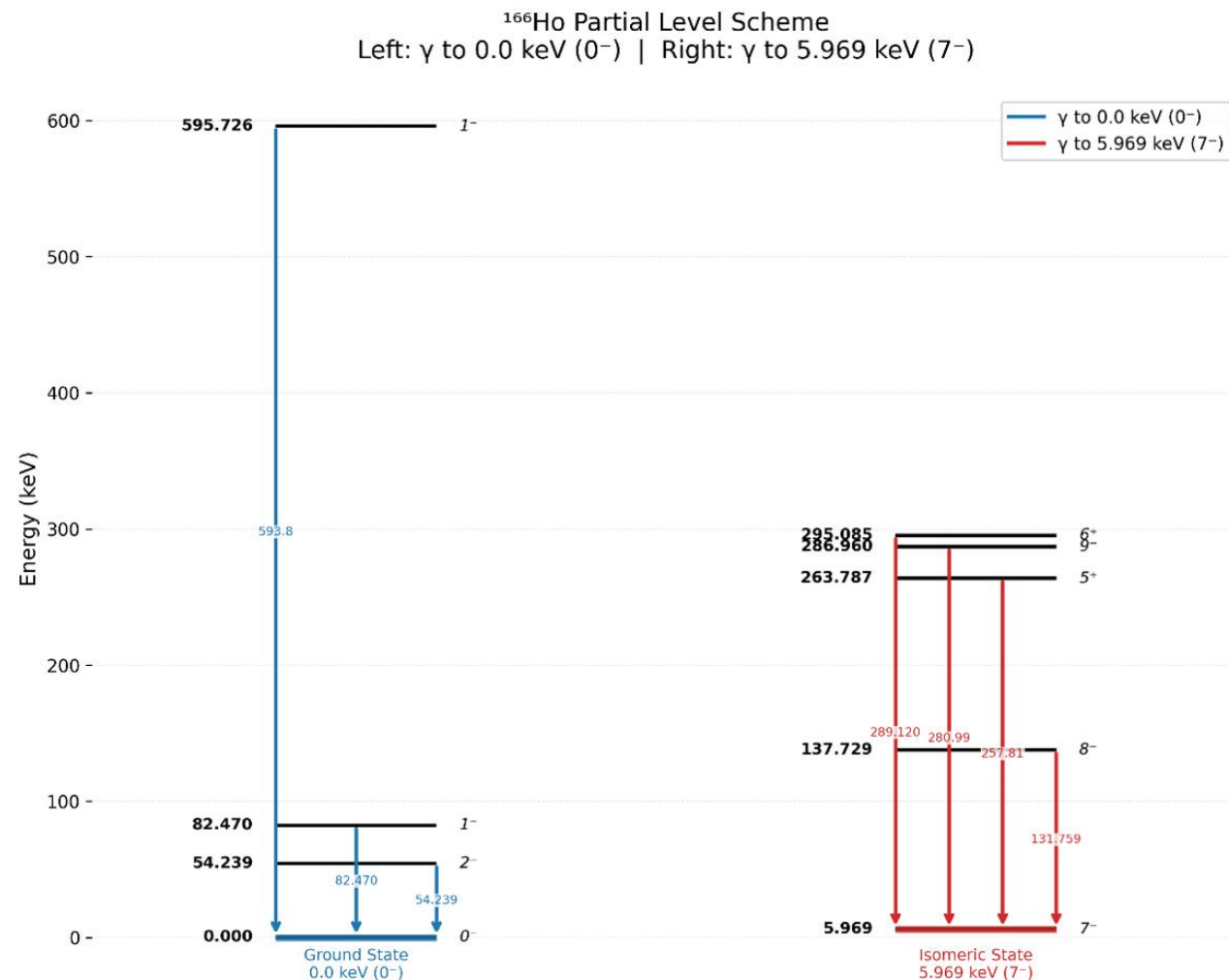
# $^{165}\text{Ho}(n, \gamma)^{166}\text{Ho}$ 退激路径及布居强度研究

通过查找文献和对比NNDC的能级跃迁信息，得到直接馈入 $^{166g}\text{Ho}$ 和 $^{166m}\text{Ho}$ 的 $\gamma$ 射线的能量值，分别为：

- $^{166g}\text{Ho}$ : 54 keV、82 keV、594 keV
- $^{166m}\text{Ho}$ : 131 keV、258 keV、281 keV、289 keV

以上射线是重点测量对象，其中部分射线能量较低，需要借助小平面型高纯锗探测器进行测量。

除以上射线外，所有共振退激射线，均测量记录，寻找其退激路径。



# 束流时长申请与估算依据

申请总时长 (Total)

198小时

| 实验项目    | 时长(h) | 任务说明                 |
|---------|-------|----------------------|
| 设备安装与调试 | 24    | 探测器冷却、刻度标定及靶体系统安装调试  |
| 本底测量    | 20    | 空靶环境本底、宇宙线及束流本底基线采集  |
| 正式在束采集  | 154   | 核心物理数据获取，满足实验统计量精度要求 |



## 01. 探测效率等效换算 (Wang et al. 2026)

基于前期BaF<sub>2</sub> 探测器(14%效率)需11小时获取完整共振统计的基准，本实验HPGe阵列效率约1%。经效率反比换算： $11\text{h} \times (14\%/1\%) \approx 154\text{h}$ ，以确保数据具备足够的统计显著性。



## 02. 实验规范与流程冗余

设备调试预留24小时，覆盖低温系统冷却、探测器能量刻度及束流光学准直；本底测量20小时为核谱学实验的标准前置步骤，用于准确扣除环境本底对能谱解析的干扰。



## 加速器运行功率

170 kW (满功率稳定运行模式)



## ES#2 中子通量

$6.92 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (靶室中心位置)

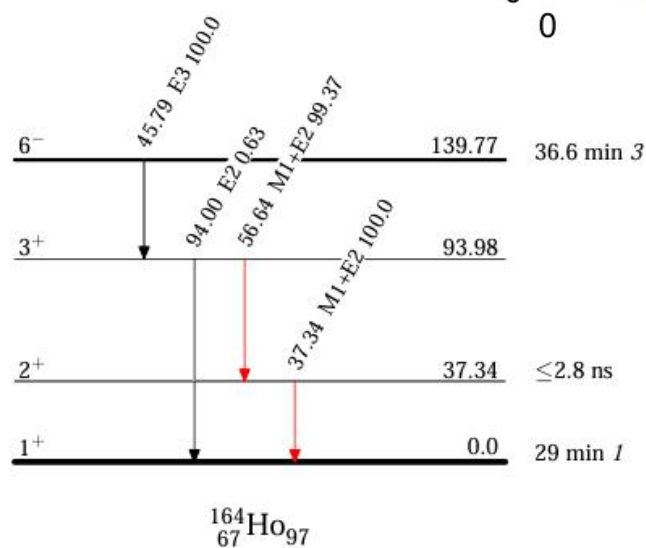
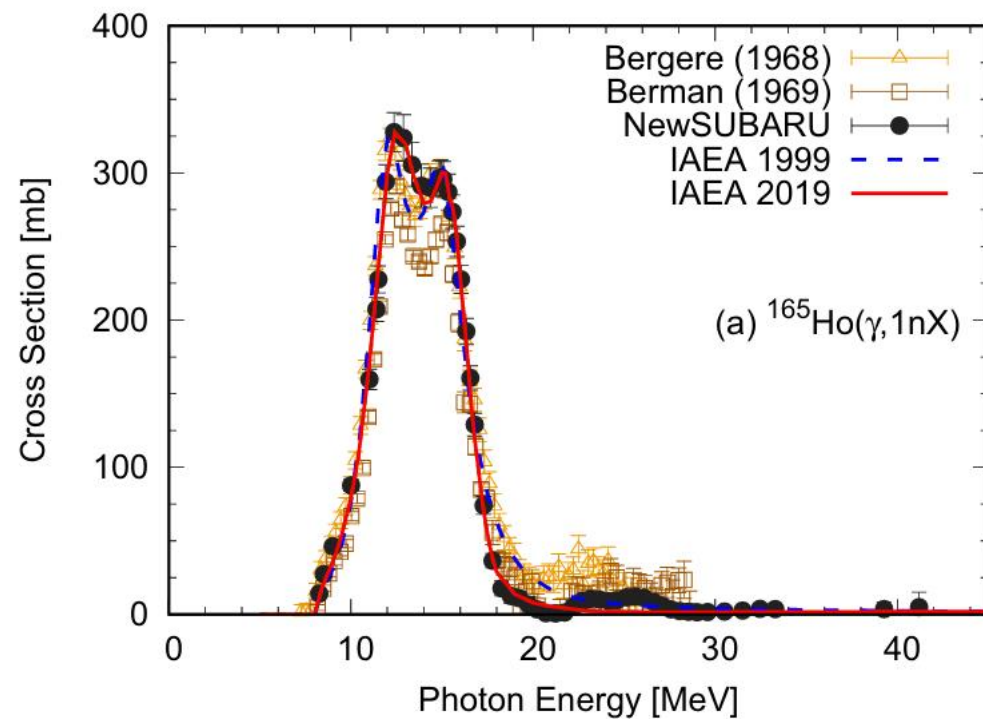


## 数据可靠性保障

散裂成熟可靠的数据获取系统

# 扩展： $^{165}\text{Ho}(\gamma, n)^{164}\text{Ho}$ 退激路径及布居强度研究

- $^{165}\text{Ho}(\gamma, n)^{164}\text{Ho}$ 光核反应截面存在双峰劈裂现象
- 理论拟合认为双峰劈裂与母核的长短轴形变有关
- 实验上认为双峰劈裂可能是解谱导致的。
- $^{164}\text{Ho}$ 存在双长寿命同质异能态
- 比较不同光子能量下， $^{165}\text{Ho}(\gamma, n)^{164}\text{Ho}$ 反应对 $^{164}\text{Ho}$ 不同长寿命态的布局强度 $I_g/I_m$ ，通过 $I_g/I_m$ 研究 $^{165}\text{Ho}$ 和 $^{164}\text{Ho}$ 的形变等核结构信息。



# 创新点



## 基础研究：填补共振区测量空白

在1 eV – 1 keV能区，实现共振测量  $^{165}\text{Ho}(\text{n}, \gamma)^{166}\text{Ho}$  中子俘获反应后  $^{166\text{g}}\text{Ho}$ 和 $^{166\text{m}}\text{Ho}$ 的布居比，为核结构模型验证提供关键实验依据。



## 应用导向：支撑医用同位素生产

提出“共振筛选辐照”新思路，为低杂质、高纯度医用 $^{166}\text{Ho}$ 的工业化制备提供直接的实验支撑与技术路径。



## 理论贡献：完善核评价数据库

补充  $^{165}\text{Ho}(\text{n}, \gamma)^{166}\text{Ho}$  中子俘获反应的共振退激 $\gamma$ 核数据，为核评价数据库的更新与完善提供重要的实验输入。

# 七、总结与致谢

## 01 研究总结

本实验旨在填补 $^{165}\text{Ho}$ 共振区长寿命态布居比的实验空白，兼具核医学应用价值与基础核物理科学意义。方案依托CSNS Back-n成熟的束流与探测系统，技术路线具备高可行性，束流时长换算依据充分，为实验开展奠定了坚实基础。

## 02 致谢与展望

诚挚感谢CSNS Back-n线站工作人员的技术支持，以及合作组的通力协作。本研究的顺利推进离不开各方的支持，恳请各位评审专家批评指正并予以支持！

