

中子反应余核同核异能态研究

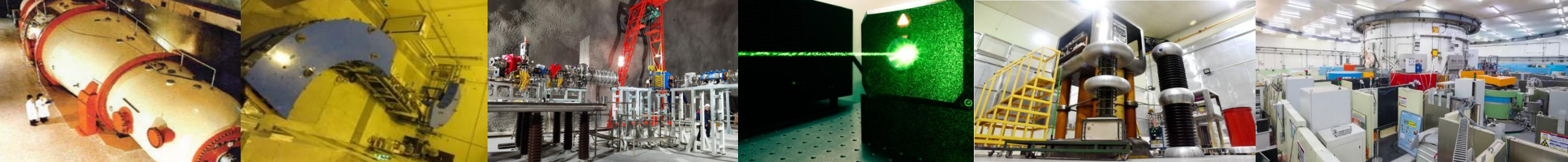
吴晓光

核数据全国重点实验室

中国原子能科学研究院

以身许国

敢为人先 严谨求实

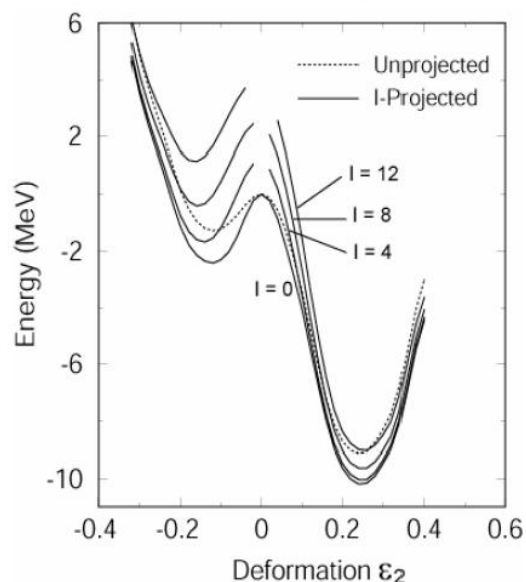


目录

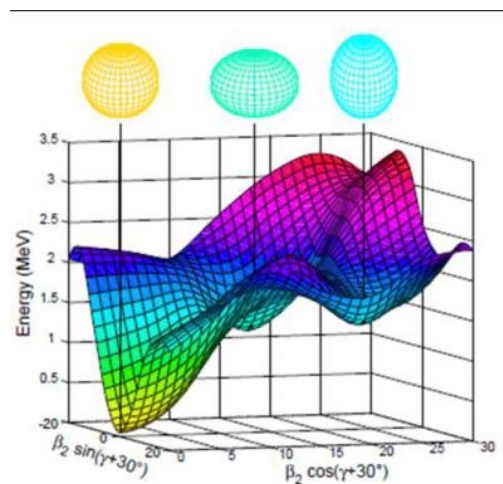
- * 原子核同核异能态研究背景介绍
- * ^{209}Bi 和 ^{175}Lu 中子反应余核同核异能态对截面精确测量的影响研究
- * 中子反应余核短寿命衰变离线测量
- * 基于散裂白光源的精细伽马谱学联合探测阵列建议

以身许国
敢为人先 严谨求实

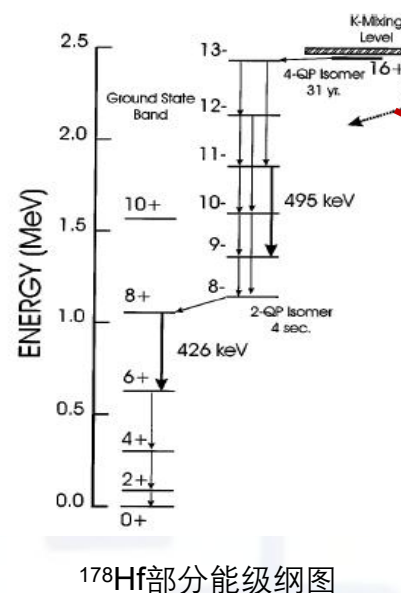
同核异能态：原子核的一种亚稳态，由核中的质子或中子激发形成



原子核同质异能态

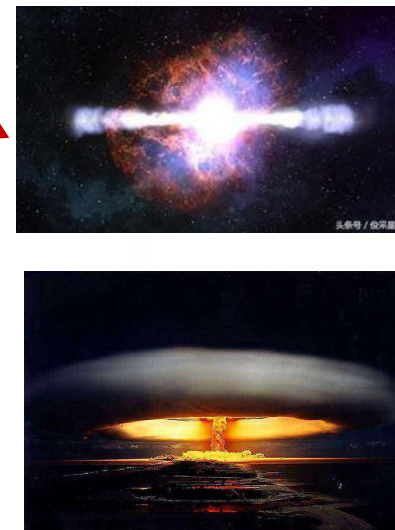


原子核形变研究



^{178}Hf 部分能级纲图

核能释放



同核异能态是核结构研究中的重要课题，也是探索原子核内部演化规律的关键探针，兼具基础科学价值与重要应用潜力，横跨核结构、核数据，核能开发，核天体、精密测量、核医学及核技术应用等多个学科，是连接微观核结构规律与宏观工程应用的重要桥梁。

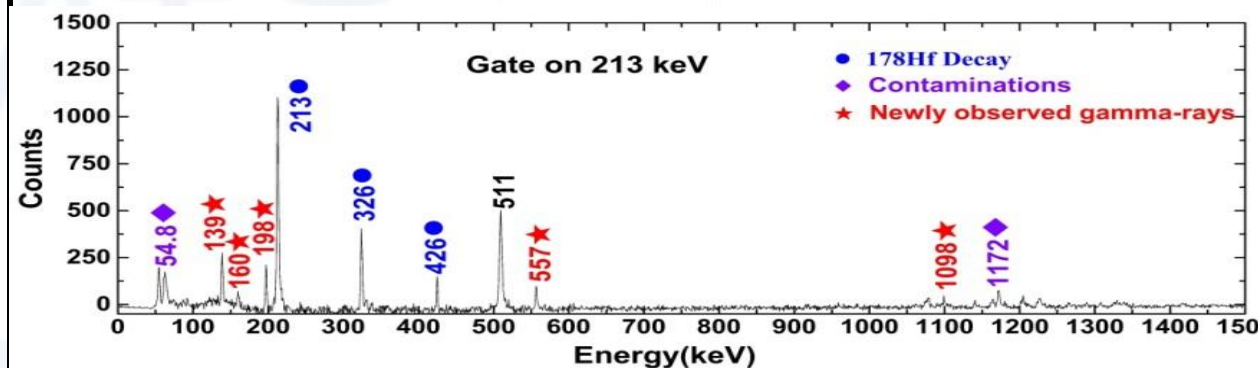
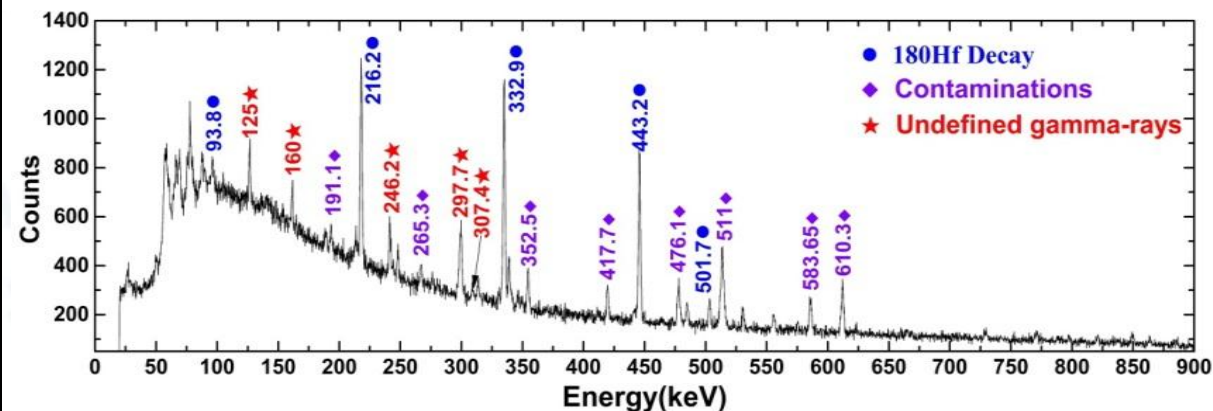
生成机制：

1, 热 / 共振中子俘获 (n, γ)：最主要的生成方式。靶核俘获中子形成复合核，退激过程中有一定概率布居到自旋 / 宇称与基态差异大、 γ 跃迁被量子选择定则禁戒的长寿命激发态，生成质量数 $A+1$ 的同核异能素。

例如天然镱靶经 $^{175}\text{Lu}(n, \gamma)$ 反应生成 $^{176\text{m}}\text{Lu}$ 。

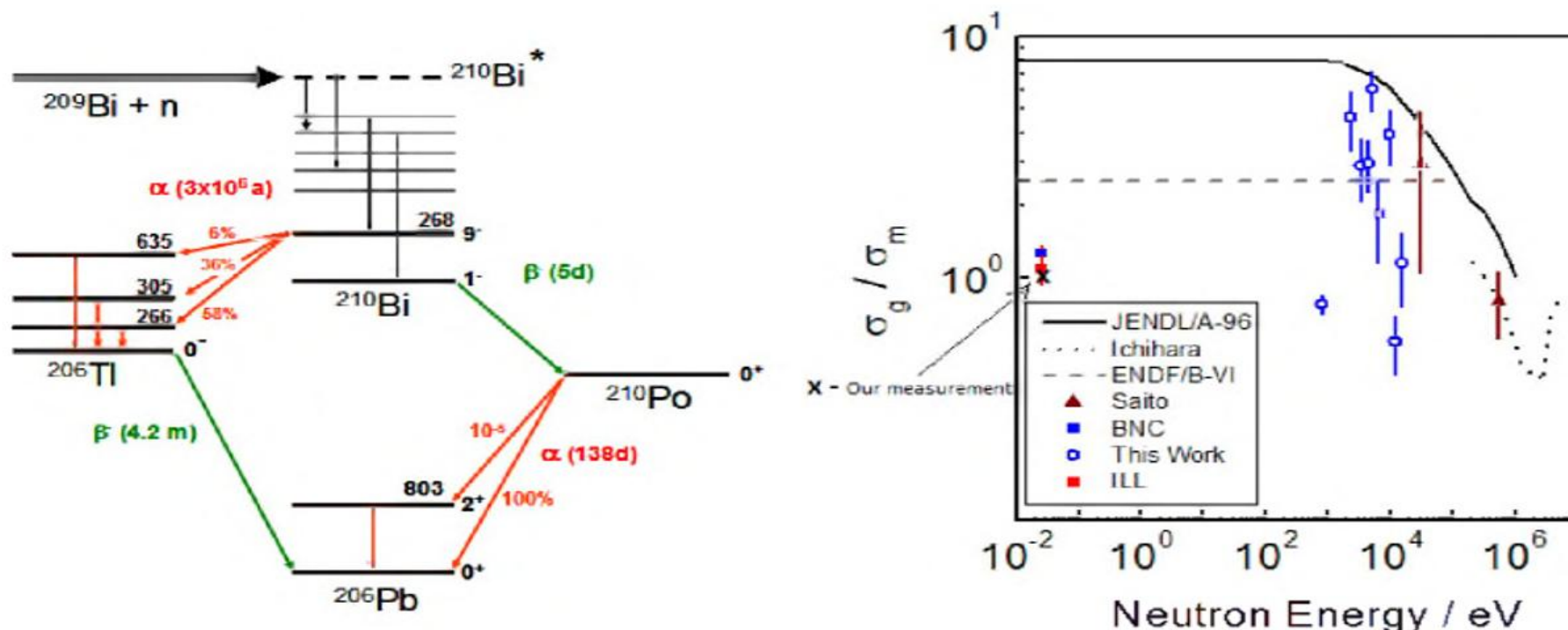
2, 快中子非弹性散射 (n, n')：快中子与靶核发生电磁相互作用，不发生核子交换，直接将靶核激发至同核异能态，产物与靶核为同一核素，仅处于激发态。

3, 快中子出射反应：更高能量的快中子可触发 $(n, 2n)$ 、 (n, p) 、 (n, α) 等反应，生成其他元素核素的同核异能态。



在散裂白光源上轰击天然Hf靶材料后测量得到伽马能谱
(2019年实验)

在核数据测量中的一些重要核素中子反应余核具有存在一定寿命的同核异能态（如 ^{209}Bi 和 ^{175}Lu 等），其独特的长寿命和特殊的量子态特性，在中子核反应截面测量中会引发复杂的干扰效应，特别是在不同中子核反应实验下干扰效应不同。这些干扰不仅影响实验数据的准确性，还对核数据库评估、核反应理论建模提出挑战，需要结合不同中子能量核反应实验条件对这些重要核素的同核异能态开展研究，以便在中子反应截面测量中得到更准确的测量值，并对相关核数据研究提供重要支撑。



209Bi中子反应余核同核异能态研究的意义：

1, 核反应理论与核数据库校验：

测量白光中子能区 $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)$ 反应的同核异能态 / 基态产额比 (m/g 分支比)，可检验复合核统计模型的能级密度、自旋截止参数，修正全球评价核数据库中该反应的显著偏差 (不同数据库结果差异可达 30%)。

2, 铅铋冷却反应堆的安全核心参数：

铅铋共晶 (LBE) 是第四代快中子反应堆、加速器驱动次临界系统 (ADS) 的主流候选冷却剂。 ^{210}gBi 衰变会生成高毒性 α 核素 ^{210}Po ，而 ^{210}mBi 以 α 衰变直接生成 ^{206}Tl ，不贡献 ^{210}Po 产额。m/g 分支比的测量精度直接决定 ^{210}Po 产额的预测准确性，是反应堆辐射安全评估、源项分析的关键输入量。

175Lu中子反应余核同核异能态研究的意义：

1, 天体核合成与年代学修正：

^{176}Lu 是恒星慢中子俘获过程 (s 过程) 的关键核素，也是 Lu-Hf 同位素定年法的衰变母核。恒星高温环境下， ^{176}mLu 与基态会通过热跃迁达到统计平衡，改变体系有效衰变常数与中子俘获截面；同核异能态的精确参数是修正重元素丰度计算、提升地质与宇宙年代定年精度的核心输入。

2, 中子活化诊断探针，核材料辐照安全评估：

^{176}mLu 半衰期适中 (3.66 小时)，特征 γ 射线清晰易测， $^{175}\text{Lu}(n,\gamma)^{176}\text{mLu}$ 反应可作为活化指示剂，用于反应堆、散裂中子源的热中子 / 共振中子注量测量与能谱刻度。

镧元素存在于部分稀土合金核材料与结构杂质中， ^{176}mLu 的生成截面与衰变特性，是评估材料辐照活化水平、反应堆退役剂量与辐射安全的重要基础数据。

Energy level diagram for $^{175}\text{Lu}+n$ and ^{176}Lu . The diagram shows the decay of $^{175}\text{Lu}+n$ (6293) to ^{176}Lu (0 keV, 3.76×10^{10} a) via a series of gamma decays (467 keV, 441 keV, 309 keV, 239 keV, 122.8 keV) and a beta decay (99.9% β^- , 0.09% ϵ). The ^{176}Lu state is labeled with spin 7^- and half-life 3.76×10^{10} a. The ^{176}Lu state is also shown with a 100% β decay (589 keV) to ^{176}Hf .

核物理研究所 Department of Nuclear Physics

不同中子能量，快中子与热中子，还有不同装置（n_TOF EAR2、CSNS Back- n、PNF）产生的中子谱形状不同，都会引起同核异能态分支随能量变化显著，同一核素在不同实验中的同核异能态分支比可相差 30 %，导致截面不连续。

A. Borella et al.: Measurements of the branching ratio of the $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210\text{g}}\text{Bi}/^{210\text{m}}\text{Bi}$ reactions at GELINA

565

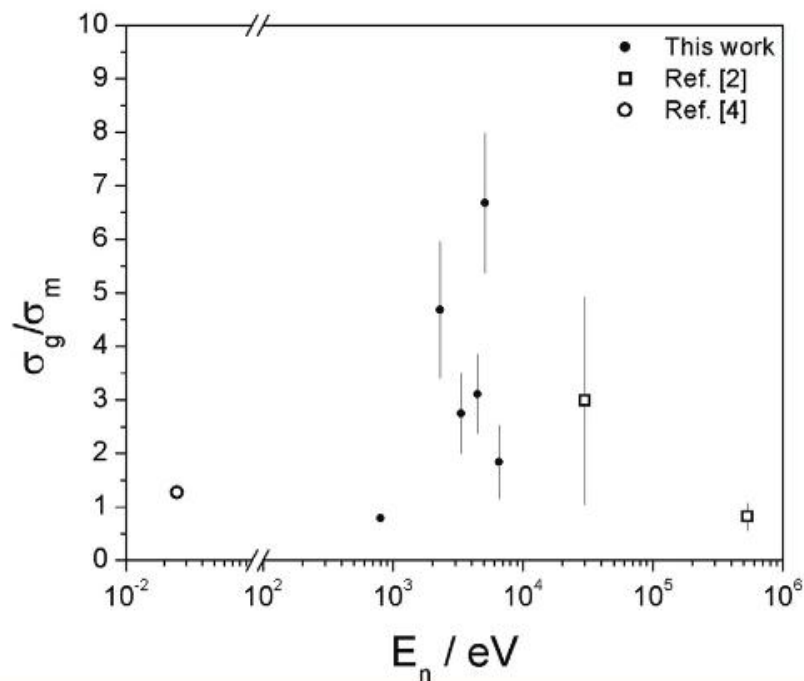
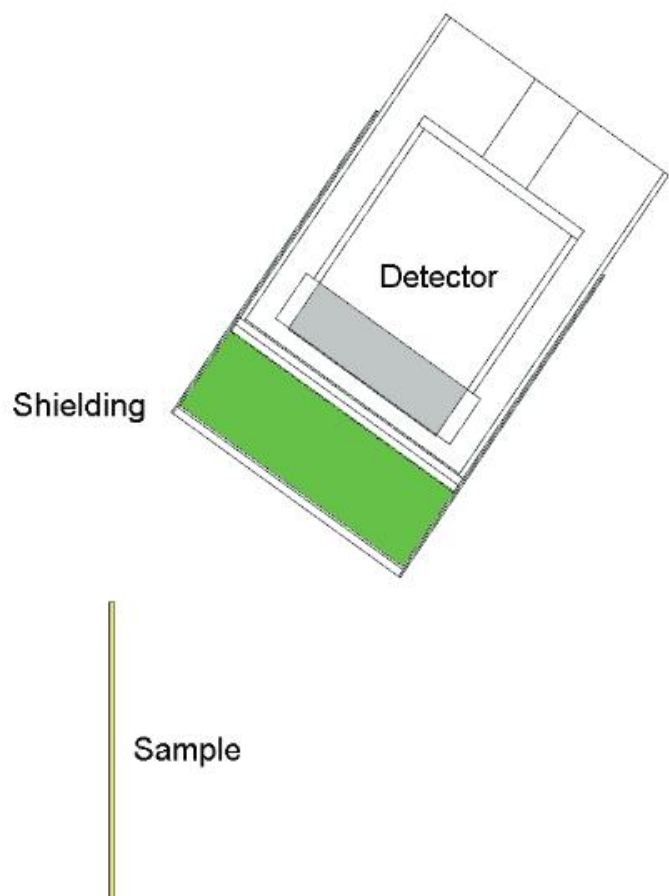


Fig. 5. The obtained branching ratio as a function of neutron energy. The results of this work are compared with the results quoted in ref. [2] and ref. [4].

文章编号: 1007-4627(2024)04-1092-07

基于 TALYS 程序的 ^{175}Lu 中子俘获截面理论研究

杨雪^{1,2}, 黄美容^{1,2,*}, 张苏雅拉吐^{1,2}, 王德鑫^{1,2}, 利国^{1,2}

(1. 内蒙古民族大学物理与电子信息学院和核物理研究所, 内蒙古 通辽 028000;

2. 内蒙古自治区核与辐射探测联合实验室, 内蒙古 通辽 028000)

摘要: ^{175}Lu 中子俘获反应在核反应堆和重元素核合成过程中有着非常重要的作用。 ^{176}Lu 存在一个 122.8 keV 同质异能态 ($^{176\text{m}}\text{Lu}$), 使 $^{175}\text{Lu}(n, \gamma)^{176}\text{Lu}$ 反应截面的测量难度增加。为了研究该反应截面及其在 s-过程核合成中的影响, 采用 TALYS-2.0 程序计算了 0.01~20 MeV 能量范围内的 ^{175}Lu 中子俘获截面和生成 ^{176}Lu 基态、同质异能态的分截面, 并与 EXFOR 实验数据库以及 ENDF 评价数据库的数据进行比较。结果表明, 核能级密度模型与光子强度函数模型同时组合优化时, 计算结果与实验值符合较好。此外, 还计算了 0.01~100 keV 能量范围内的麦克斯韦平均截面, 并与 KADoNiS v0.3 数据库中的实验值进行比较, 在 $kT=30$ keV 时, 计算值与实验值符合较好, 相对偏差为 4.1%。研究表明, TALYS 程序可以较好地描述 $^{175}\text{Lu}(n, \gamma)^{176}\text{Lu}$ 反应截面, 为进一步优化参数和验证实验数据提供了参考, 对于研究 s-过程核合成具有重要意义。

4) $^{175}\text{Lu}(n, \gamma)^{176\text{m}}\text{Lu}$ 同质异能态反应截面远大于 $^{175}\text{Lu}(n, \gamma)^{176\text{g}}\text{Lu}$ 基态反应截面。在中子能量小于 0.5 MeV 时, 各评价数据库与实验值相符合, 高于 0.5 MeV 时, 各评价数据库与实验值均存在一定差异。

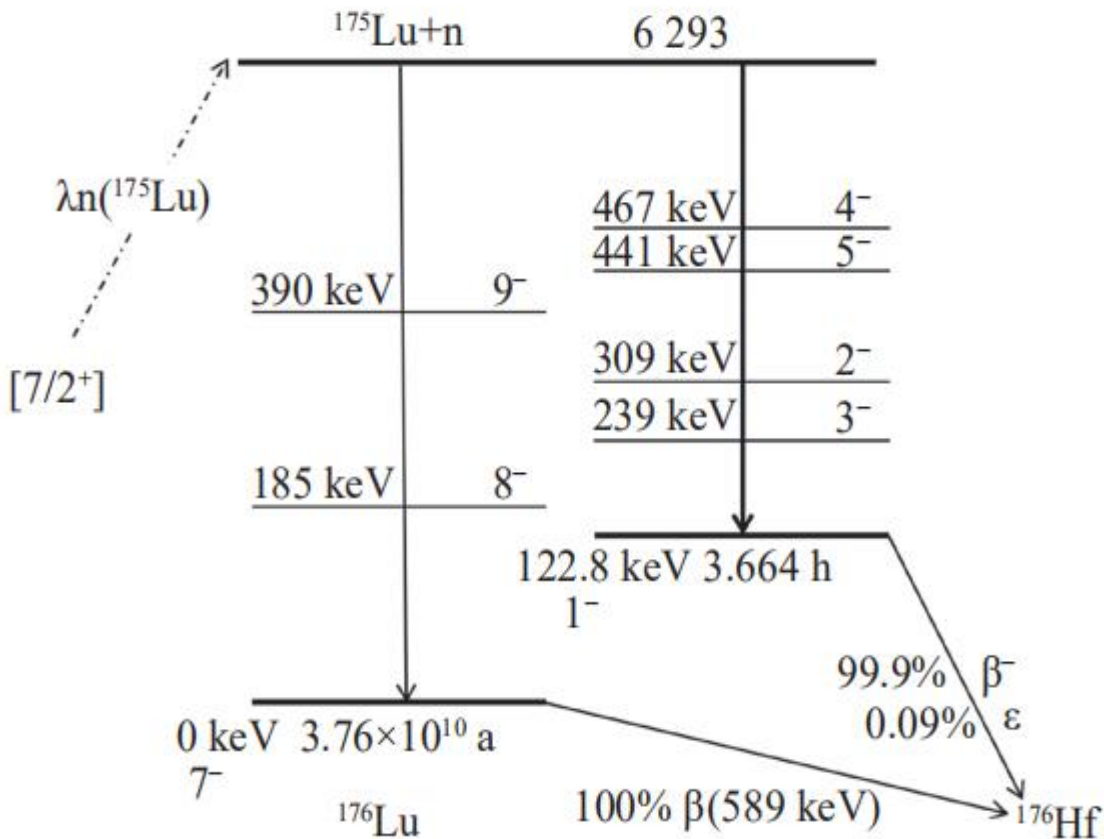


图 2 ^{176}Lu 的部分能级纲图

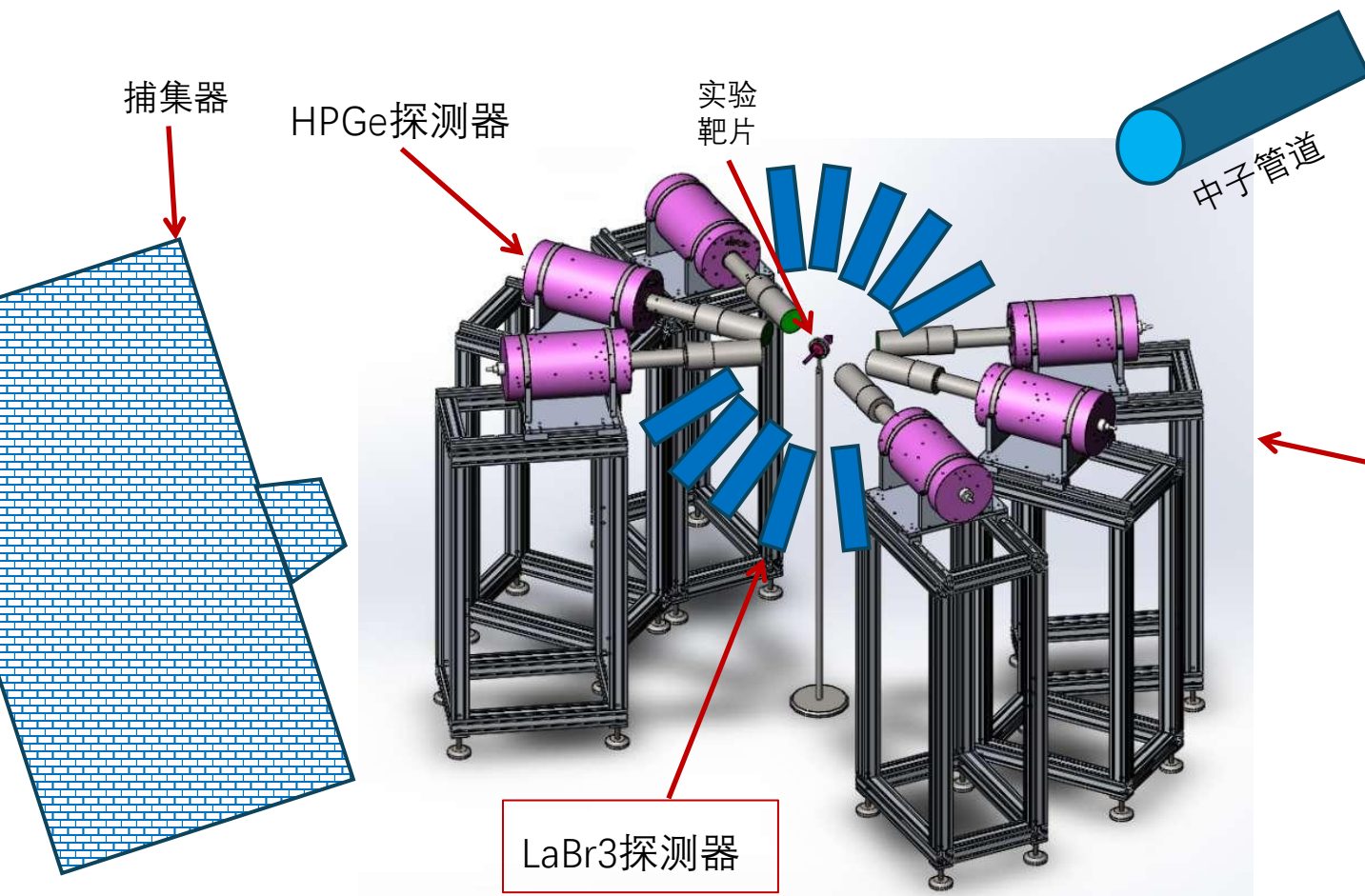
- 需同时考虑同核异能态分截面对总截面的贡献，例如： $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{Bi}$ 反应中， ^{210}Bi 存在两种衰变路径（基态和同核异能态）
- 在白光中子测量等实验中子反应不同能量下会产生很多寿命不等的同核异能态，这些同核异能态发射的伽马射线会对测量产生干扰，影响精确测量。例如： $^{209}\text{Bi}(n,\gamma)^{210}\text{Bi}$, $(n,3n)^{207}\text{Bi}$, $(n,4n)^{206}\text{Bi}$, $(n,7n)^{206}\text{Bi}$ 等
- 不同中子能量下的核反应生成同核异能态的分支比是不同的，需要测量针对不同能量分别测量收入核数据库。
- 中子共振吸收通过角动量选择 和能级密度竞争，改变同核异能态分支比，尤其在重核的中能区（1 eV–100 keV）
- 不同中子核反应条件下会出现一些以往没有发现的同核异能态，对相应的精确截面测量也会有影响。

在本项目中计划在白光源上利用在束伽马谱学技术结合中子飞行时间法开展不同中子能量下 ^{209}Bi 和 ^{175}Lu 中子反应余核的同核异能态研究,测量其在不同中子能量核反应实验条件下出现的同核异能态,结合核谱学及核结构研究方法给出其同核异能态在该中子核反应条件下能级纲图的位置及其退激路径,分支比等,进而给出在不同中子核反应实验条件下其同核异能态分截面在中子反应总截面的占比。解决 ^{209}Bi 和 ^{175}Lu 这2个重要核素核数据测量中缺失同核异能态的分支截面导致影响总截面测量值的问题,并进一步解决同核异能态对这些重要核素在核数据库评估及核反应建模等方面的影响,为核数据研究提供重要支撑。

(1) 建立在束快时间符合测量系统，用于进行同核异能态的在束瞬发伽马谱学测量，同时结合中子飞行时间进行不同中子能量的ns级时间开窗分析。在散裂中子源反角白光中子实验终端上安装调试探测阵列，相应的需要准备好不同厚度的 ^{209}Bi 和 ^{175}Lu 靶材料，进行在束中子反应瞬发伽马谱学实验，取得实验数据并进行分析，找到不同中子核反应实验条件下出现的同核异能态，并给出其同核异能态在该中子核反应条件下能级纲图的位置及其退激路径，分支比等核结构信息。

(2) 通过测量得到同核异能态在 ^{209}Bi 和 ^{175}Lu 在不同中子能量下余核能级纲图的位置及其退激路径，分支比等核结构信息，给出在不同中子核反应实验条件下其同核异能态分截面在中子反应总截面的占比，并进一步分析同核异能态对这些重要核素在核数据库评估及核反应建模等方面的影响。

计划在散裂白光中子源上开展 ^{209}Bi 和 ^{175}Lu 中子反应余核的同核异能态研究，实验装置设计图如下:

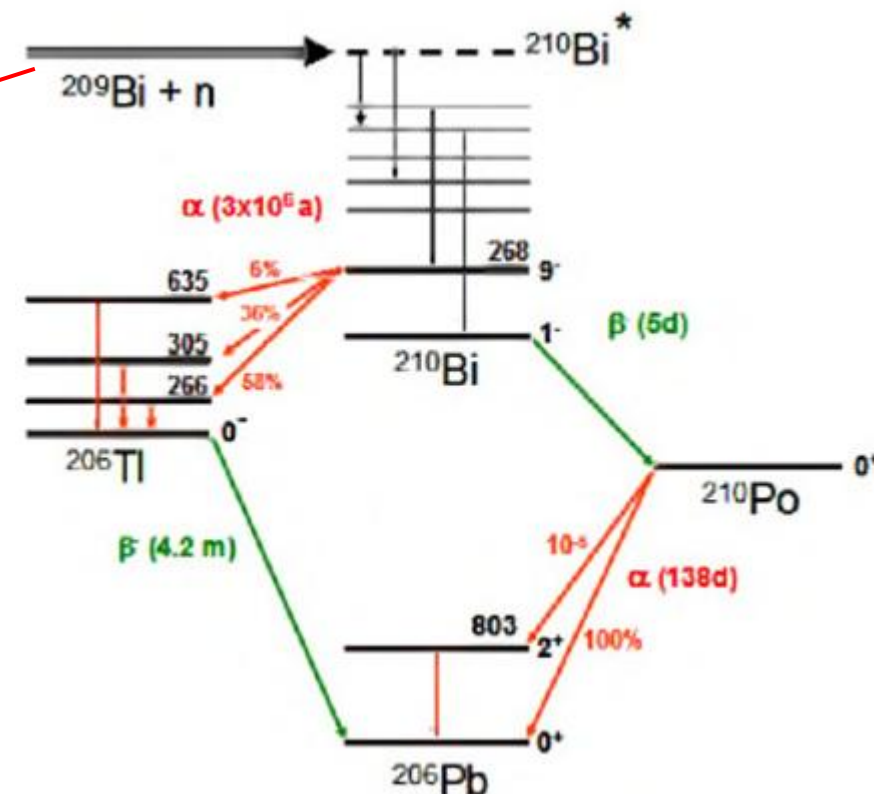
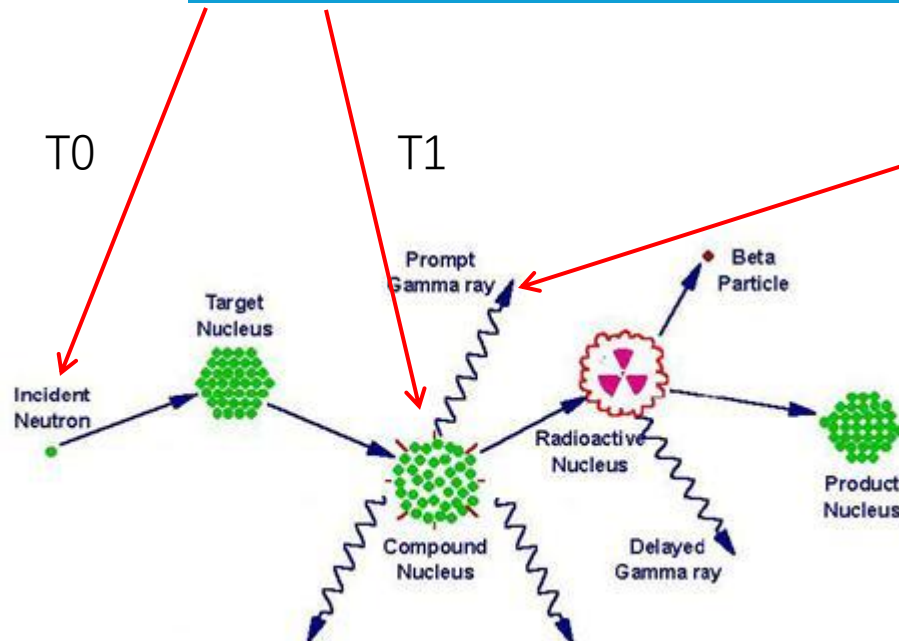


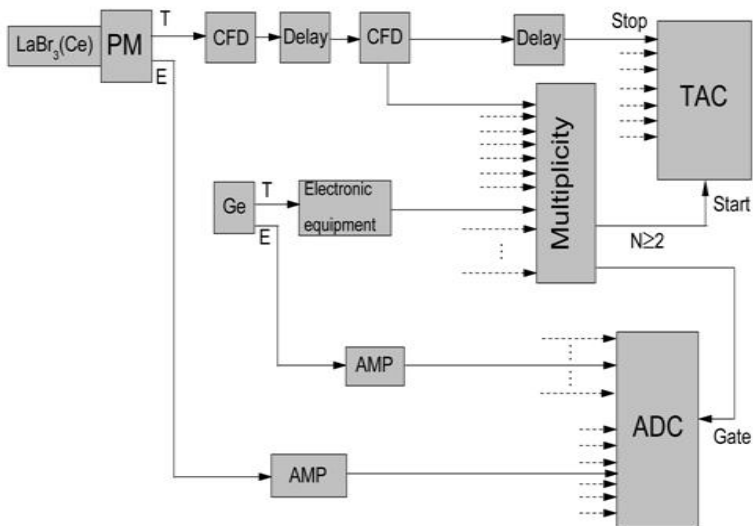
中国散裂中子源

关键技术: 不同中子能量反应条件下同核异能态与基态的分支比测量

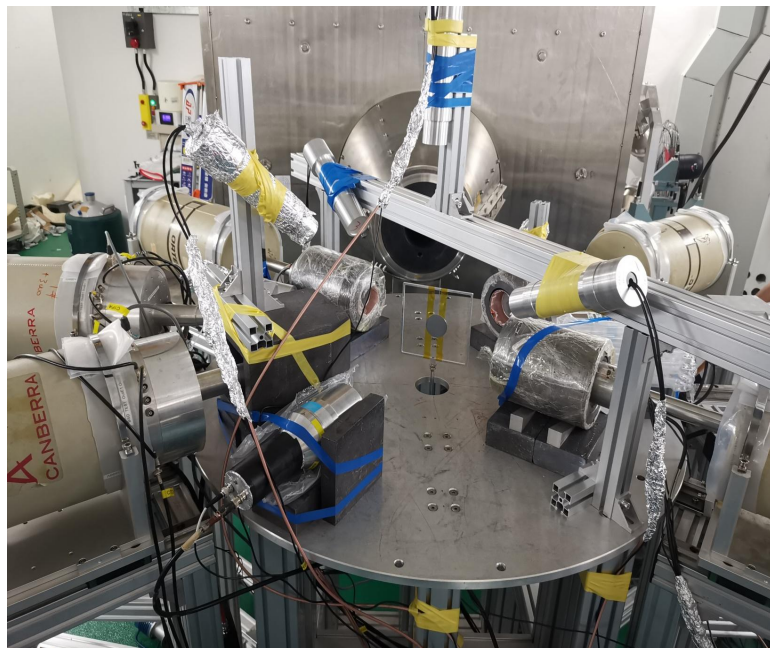
解决途径: 建立在束快时间符合测量系统, 利用中子飞行时间开窗对目标核发射的瞬发特征伽马进行分析, 得到不同中子能量下反应余核同核异能态和基态的分支比, 衰变路径等核结构信息, 进而给出其同核异能态分截面在中子反应总截面的占比。

DAQ (在束快时间符合测量系统)



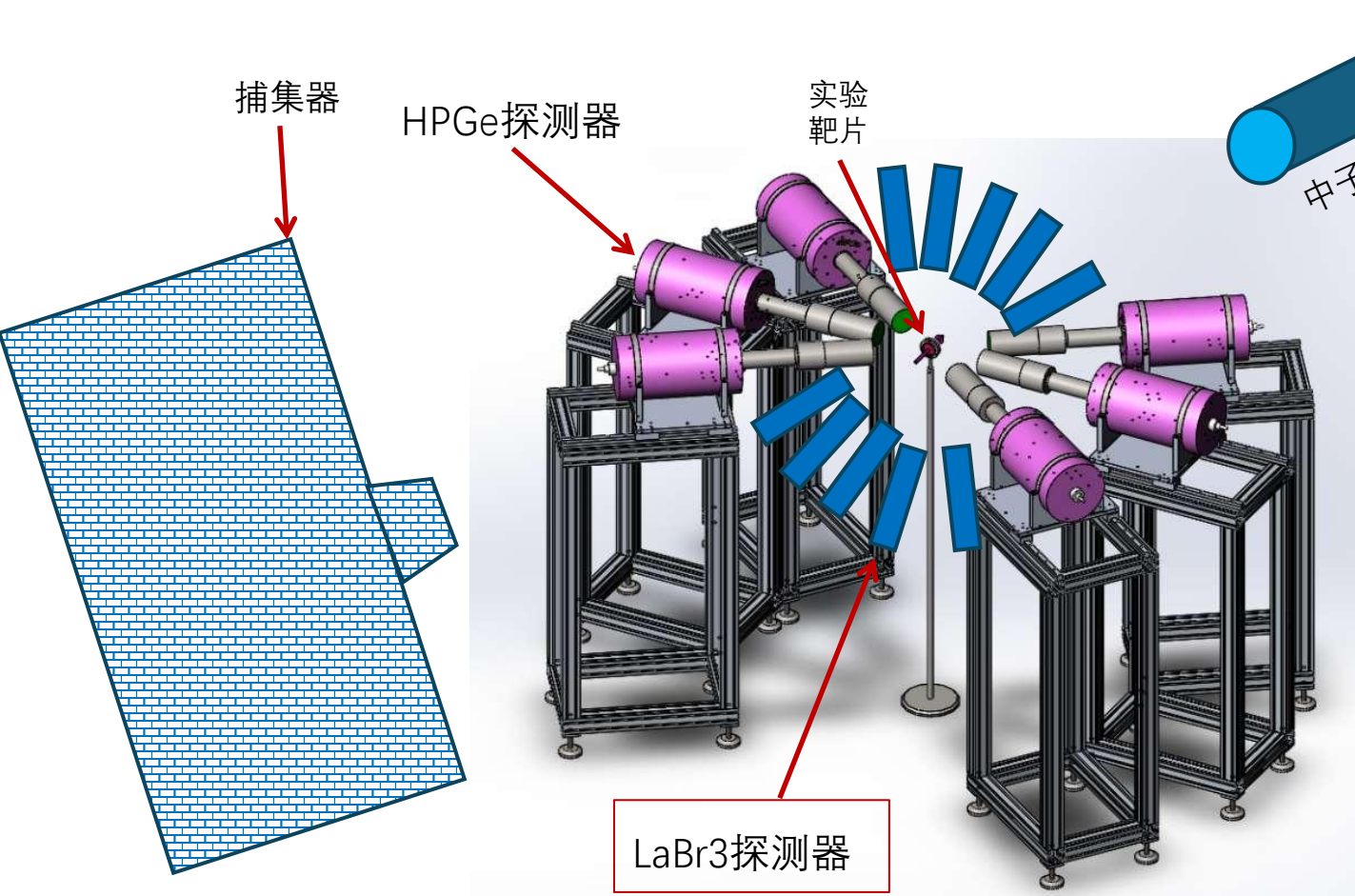


在束快时间符合测量系统
示意图:



1, 利用组建成的在束快时间符合测量系统进行 ^{209}Bi 和 ^{175}Lu 中子反应余核在束测量实验, 实验步骤包括靶片安装与定位, 标准源刻度, 标准金靶的标定实验, 空靶的本底测量实验, 放入实验靶后经过不断调试束斑大小和束流强度后进行在束测量累积实验数据。

2, 利用 ROOT, RADWARE 和 GASPWARE等在束核谱学分析软件对实验数据进行分析, 找到 ^{209}Bi 和 ^{175}Lu 中子反应余核的同核异能态, 并给出其同核异能态在该中子核反应条件下能级纲图的位置及其退激路径, 分支比等核结构信息, 利用这些核结构信息得到同核异能态分截面在总截面中的占比。

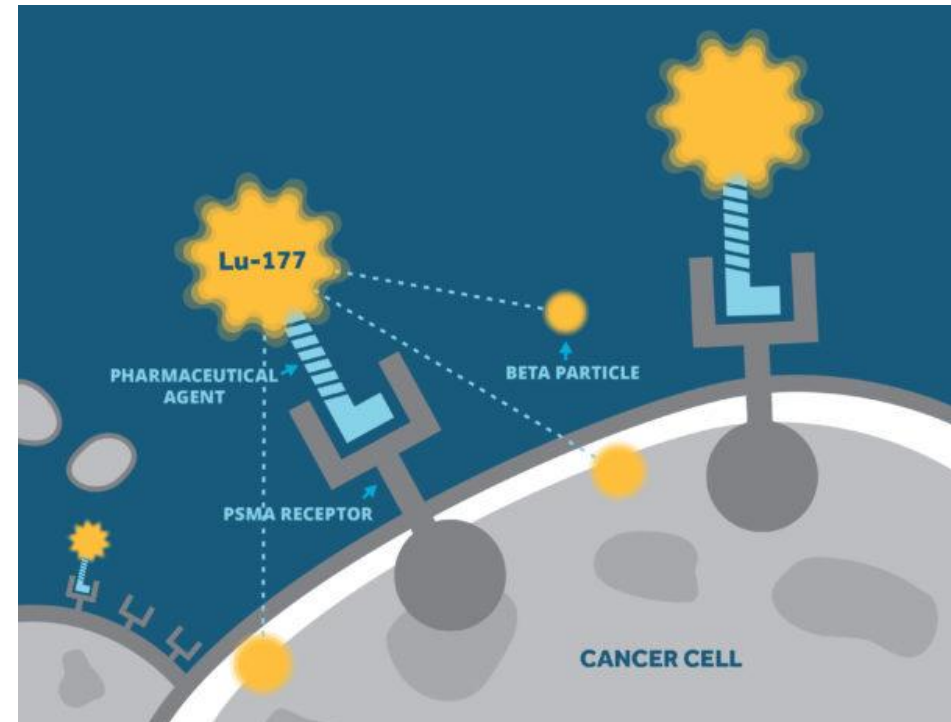
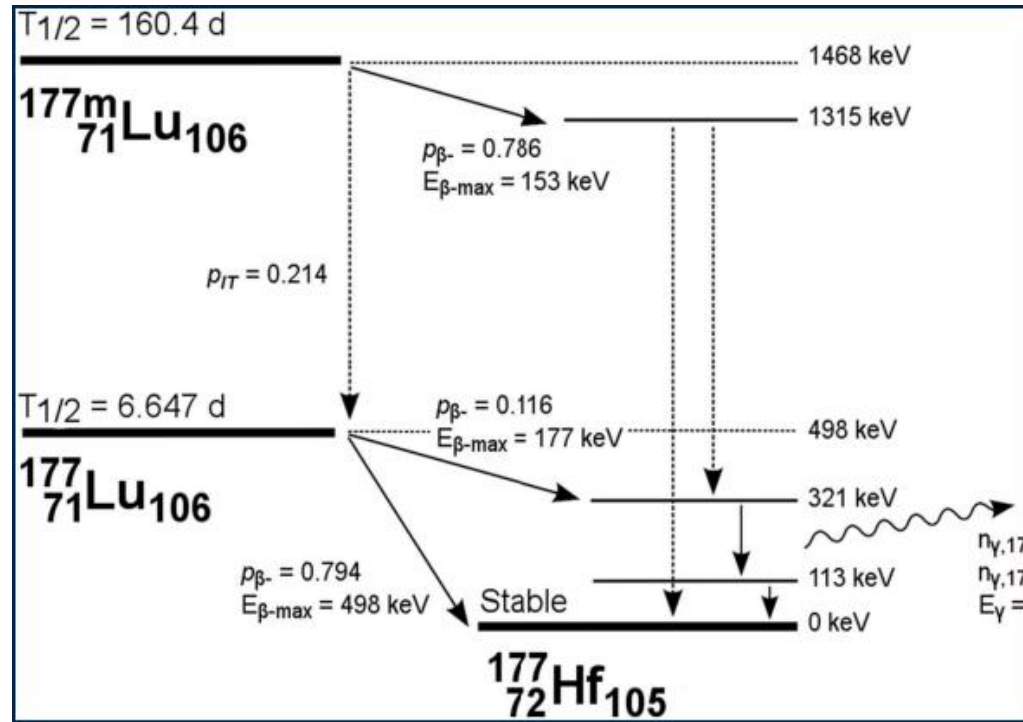


本项目联合中山大学、深圳大学及深圳技术大学共同开展研究。计划在供束期间，于束流捕集器内布置一些样品（例如：天然Lu,Yb,Ni等），利用白光中子诱发产生短寿命同核异能态和衰变产物核。研究团队将充分利用实验间隙，将辐照后的样品迅速转移至本项目自主搭建的多单元高效率伽马探测阵列，开展短时间高效率的衰变测量，并进行相关同核异能态和衰变研究。该方案会显著提升束流时间利用率，更有望产出更为丰富的研究成果。

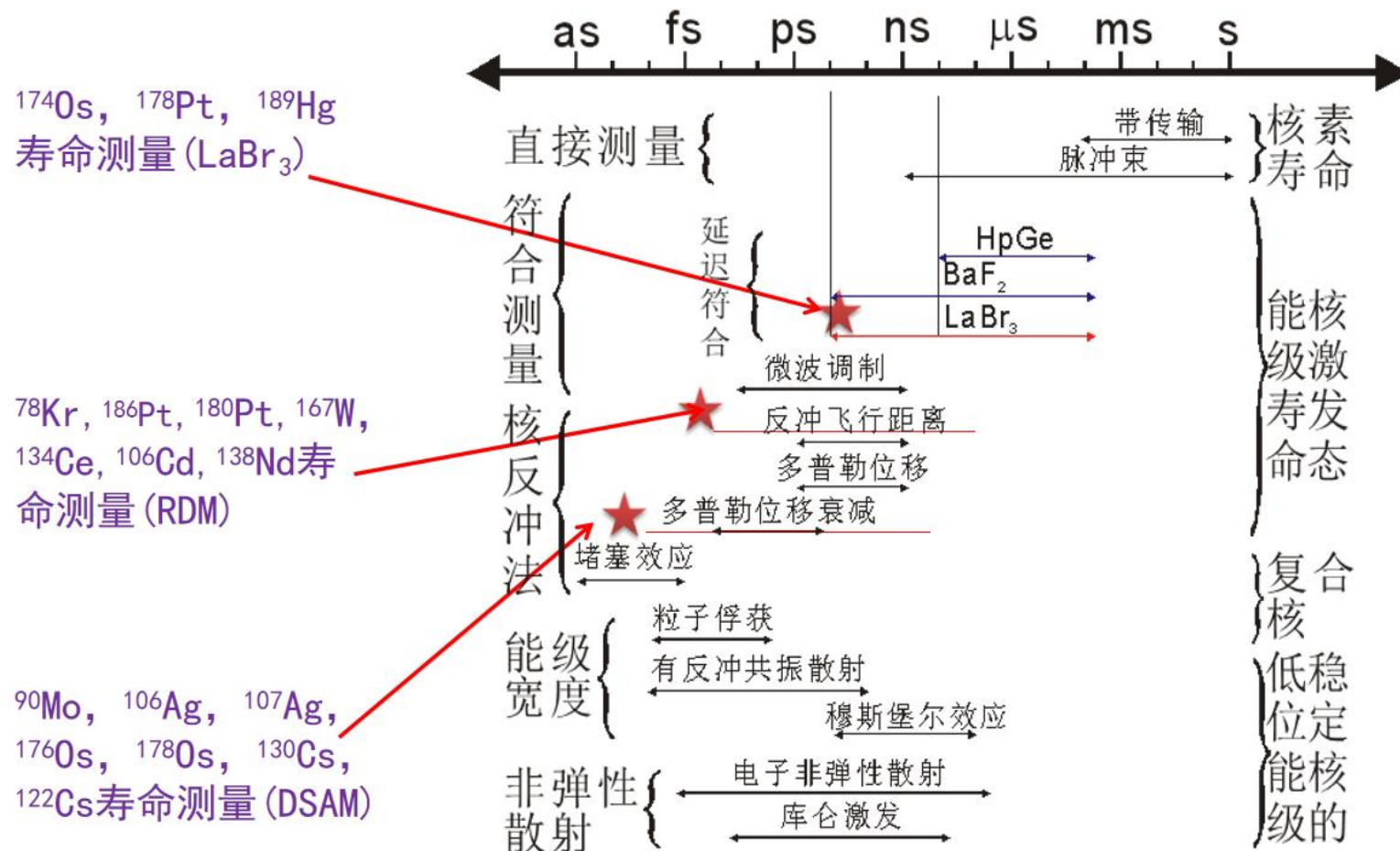
^{177}Lu 医用同位素研究探讨

目前反应堆直接辐照生产的 ^{177}Lu 中，长寿命的 $^{177\text{m}}\text{Lu}$ 是主要放射性杂质，会增加患者长期辐射负担，也是制约核素纯度提升的核心因素。

- 希望在白光中子轰击Lu样品后，在反应余核短寿命同核异能态测量中找到更短时间更适用的 $^{177\text{m}}\text{Lu}$

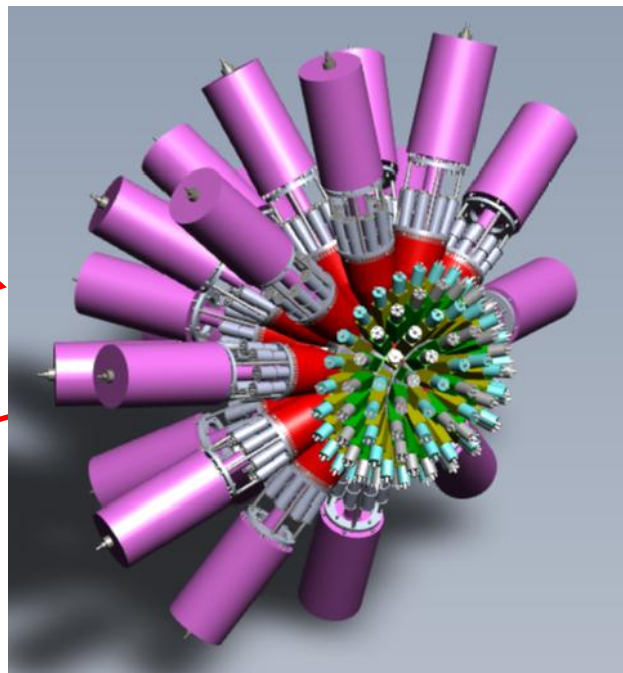
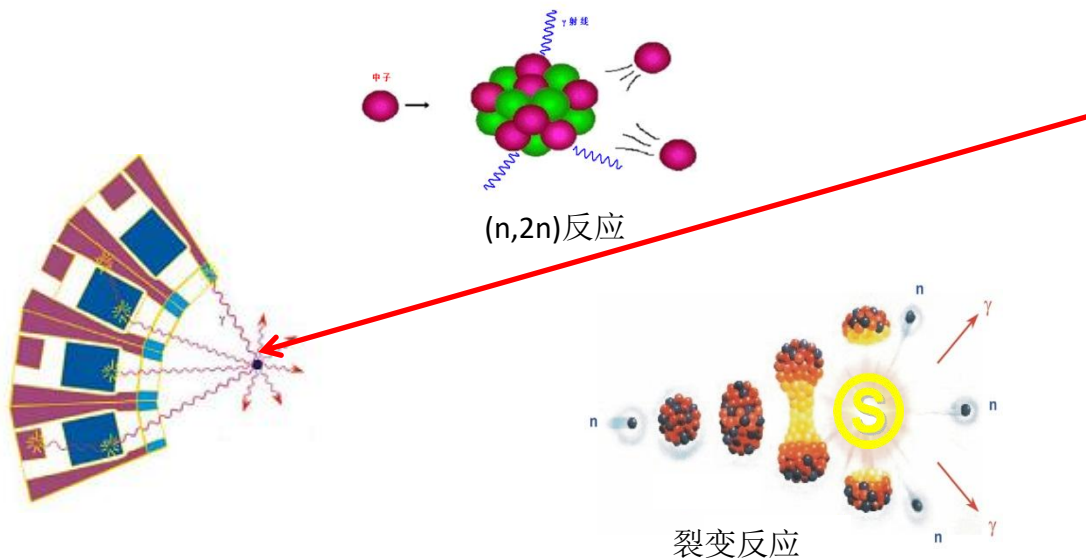
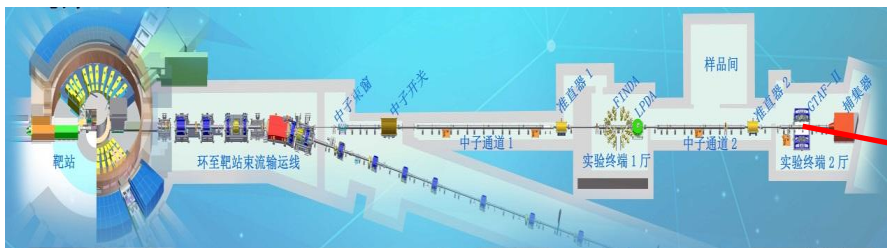


- 1, 本项目是新批项目，首次申请。
- 2, 申请人所在课题组有多年原子核激发态寿命测量及同核异能态研究基础，有丰富的在束伽马谱学实验技术及核谱学分析能力，参与中国散裂中子源反角白光中子源终端建设，特别是在高纯锗等伽马谱学测量探测上有丰富经验。适合并且有能力在白光上利用在束伽马谱学技术结合中子飞行时间法开展本项目的研究工作，与提案申请高度契合。



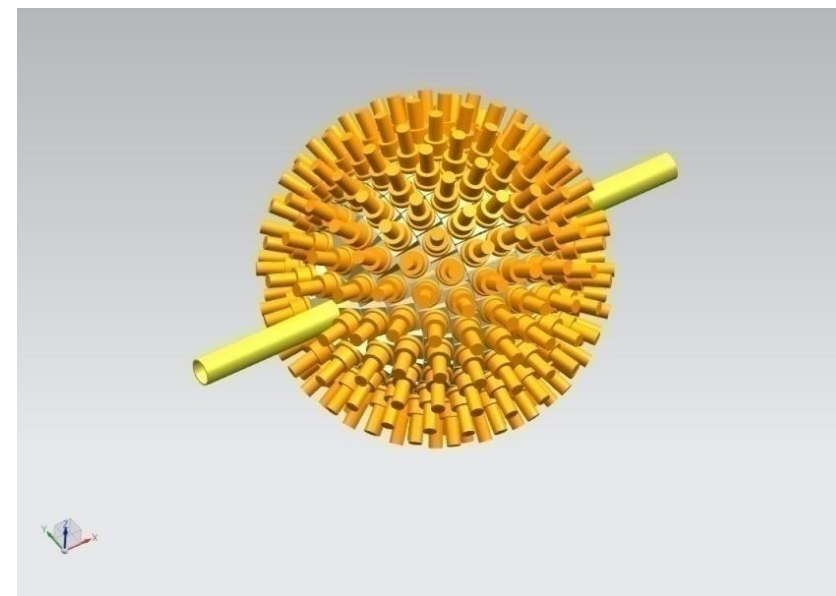
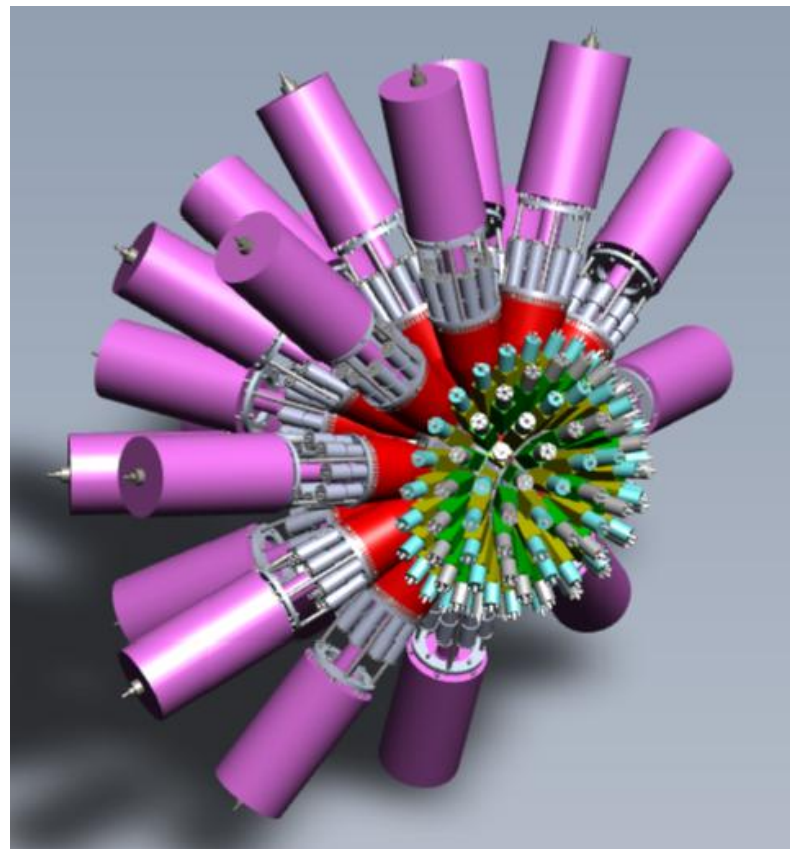
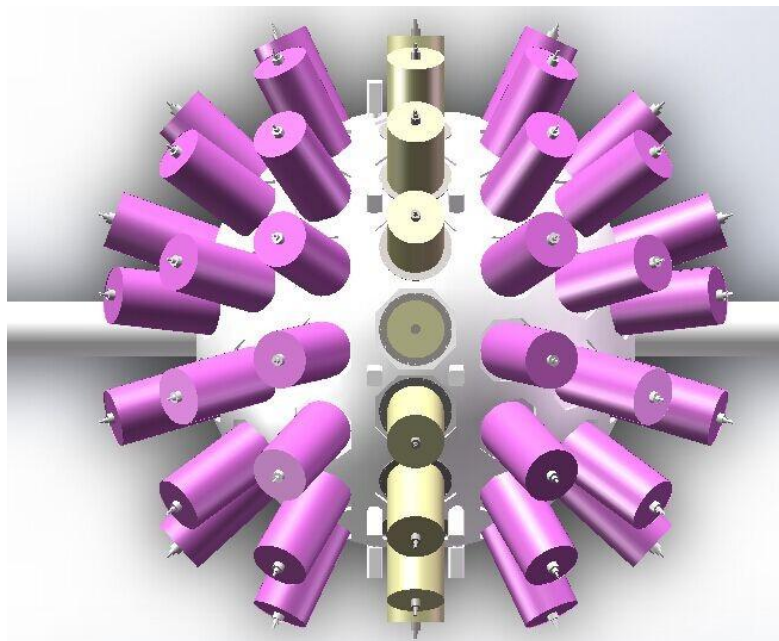
建设基于散裂白光源的精细伽马谱学联合探测阵列建议

建议建设由同轴型高纯锗，平面型高纯锗和LaBr₃探测器组成的联合伽马探测阵列，进行更宽能量，更高探测效率，更多探测单元的多参数多路瞬时关联测量，以便取得更丰富更好的研究成果。例如可开展：产额和产额能量关系测量（具体可应用在裂变产额的电荷分布等测量中）；关键核中子反应截面和激发函数测量（具体可应用在一些重要核素的 $(n,2n)$ 截面瞬发伽马测量中，例如铀和钚的中子反应截面测量），同核异能态研究，核天体物理研究，以及在束瞬发伽马中子活化分析等

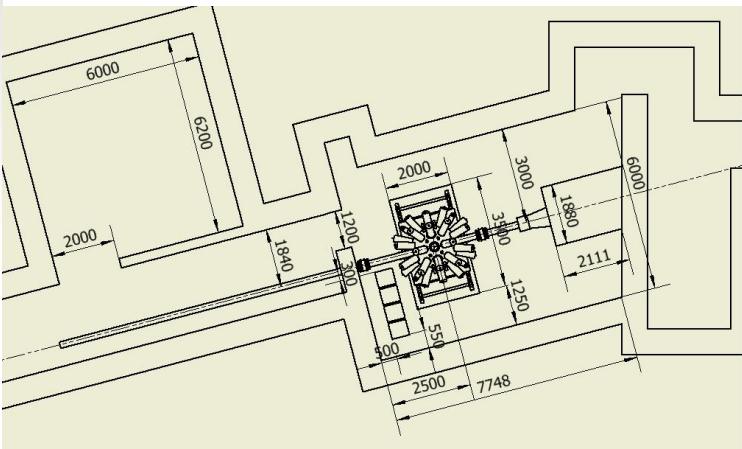
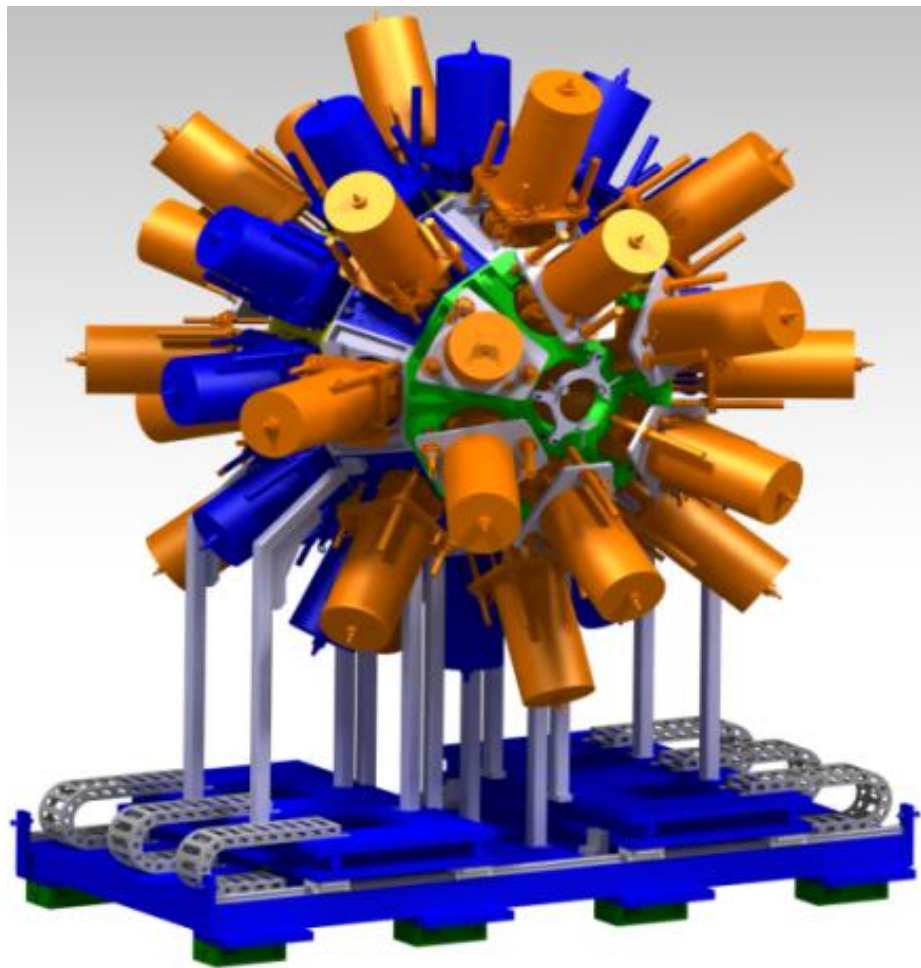


高纯锗探+闪烁体
联合伽马探测阵列概念设计图

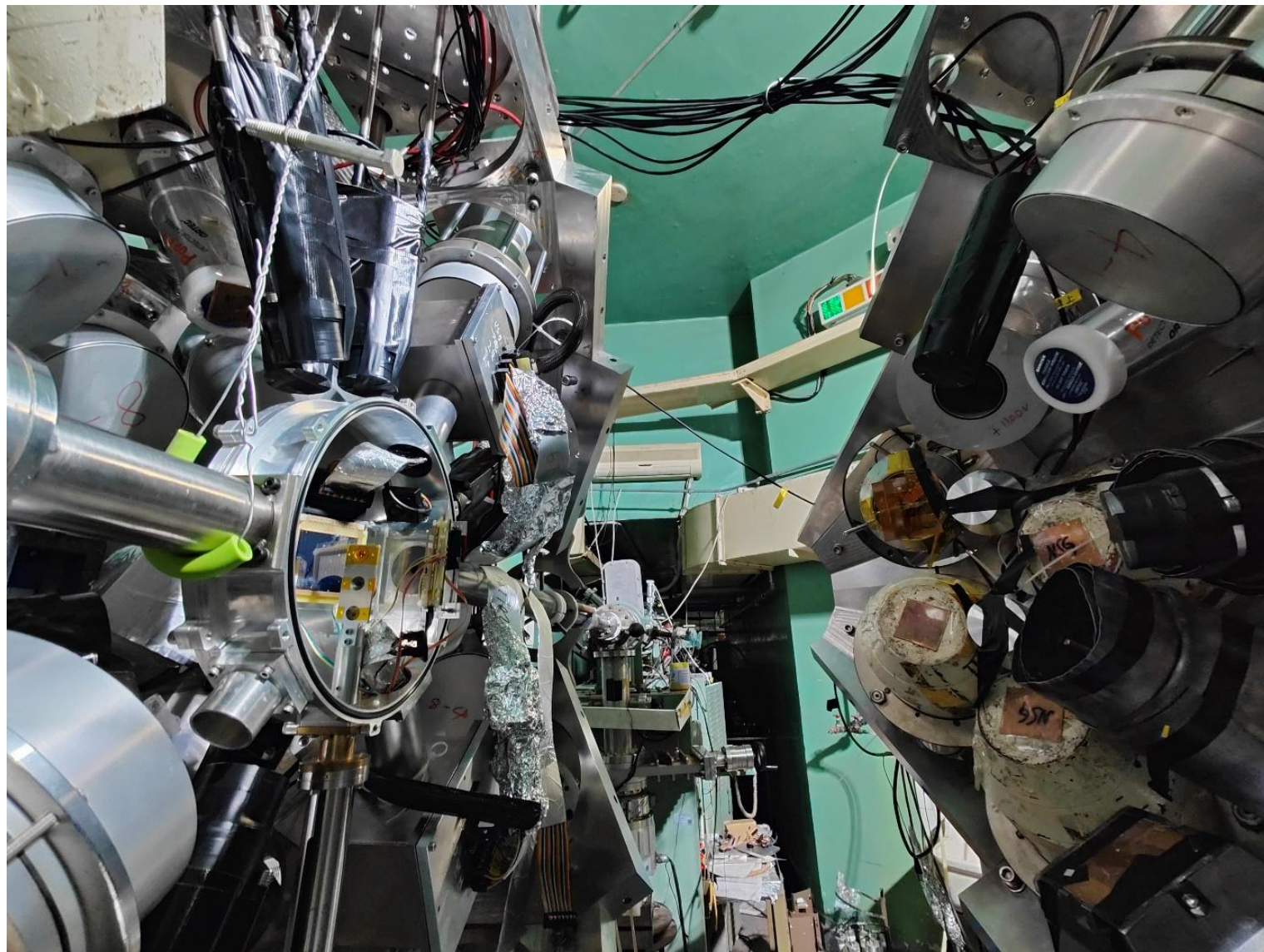
探测阵列概念图：



基于白光源终端的联合阵列安装思路：



CIAE串列在束伽马终端联合伽马探测阵列



- 同核异能态是核结构研究的关键探针，兼具重要基础科学价值与广阔应用潜力，是当前核物理前沿热点方向。
- 本项目利用在束伽马谱学技术，结合核谱学及核结构研究方法给出更全面精确的中子反应余核结构信息，特别是其同核异能态在该中子核反应条件下能级纲图的位置及其退激路径，分支比等。
- 本项目将解决 ^{209}Bi 和 ^{175}Lu 测量中缺失同核异能态的分支截面导致影响总截面测量值的问题，并进一步解决同核异能态对这些重要核素在核数据库评估及核反应建模等方面的影响，为核数据研究提供重要支撑。
- 本项目将同时开展中子反应余核短寿命同核异能态和衰变子核的离线测量，进而开展相关核结构，核数据，核医学等研究工作。
- 提出建设基于散裂白光源的精细伽马谱学联合探测阵列的建议

Thank you for your attention!



China Institute of Atomic Energy

