

核物理主题数据: 实验、理论与应用专题

上海激光电子伽马源伽马活化数据的获取及应用*

杨宇萱¹⁾²⁾ 张岳^{2)†} 孙乾坤³⁾⁴⁾ 李志才²⁾⁶⁾ 王宏伟^{2)4)‡} 范功涛²⁾⁴⁾
赵维娟^{1)††} 郝子锐²⁾ 刘龙祥²⁾ 许杭华²⁾ 焦普²⁾⁷⁾ 金晟³⁾⁴⁾ 陈开杰⁵⁾
王振伟³⁾⁴⁾ 周梦蝶²⁾⁷⁾ 徐孟轲³⁾⁴⁾ 王向飞³⁾⁴⁾ 谌雨龙²⁾⁶⁾ 丁嘉文³⁾⁴⁾

1) (郑州大学物理学院, 郑州 450001)

2) (中国科学院上海高等研究院, 上海 201210)

3) (中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

4) (中国科学院大学, 北京 101408)

5) (上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210)

6) (南华大学核科学技术学院, 衡阳 421001)

7) (河南师范大学物理学院, 新乡 453007)

(2025年9月4日收到; 2025年10月20日收到修改稿)

伽马活化分析(光子活化分析)是一种有效的元素分析技术,特别是对原子序数较小的轻元素和一些对热中子活化分析不灵敏的元素具有优势,上海激光电子伽马源(Shanghai Laser Electron Gamma Source, SLEGS)光束线站的建成为在国内开展伽马活化分析及获取伽马活化数据提供了有利条件.伽马活化数据源于对光核反应生成的短寿命放射性核的退激发特征伽马射线的测量,从而得到母核的种类和活度等信息.伽马活化分析技术依赖于伽马源与低本底伽马射线测量装置,具有数据处理高效、结果分析便捷的特点.本文介绍了SLEGS束线站的伽马活化数据测量设备和伽马活化实验数据的获取及分析.基于伽马活化数据分析,对SLEGS束流流强测量及核天体物理中的光核反应开展了实验研究,对未来开展特征核素识别及科技考古等工作进行了展望,伽马活化数据的应用范围和涉及领域将日益扩大.本文提供了低本底伽马测量数据及部分伽马活化测量数据,本文数据集可在<https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00194>中访问获取.

关键词: 伽马源, 逆康普顿散射, 伽马活化, 低本底测量**DOI:** 10.7498/aps.75.20251208**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251208

1 引言

光子活化分析(photon activation analysis, PAA)是由加速器或同位素源产生的光子辐照样品的活化分析方法.对于兆电子伏特(MeV)以上能

量的光子活化分析也称为伽马活化分析(gamma activation analysis, GAA),其原理是主要基于 (γ, γ') , (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, (γ, p) 等光核反应使原子核激发与退激(即生成放射性核素),通过测量剩余核衰变释放的特征伽马射线或X射线能谱,以实现元素定性和定量分析.伽马活化分析是一种有效的元

* 国家自然科学基金(批准号: 12388102, U2441221, 12275338)、国家重点研发计划(批准号: 2022YFA1602404, 2023YFA1606901)和上海市东方英才领军项目(批准号: LJ2024080)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangyue2023@sari.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: wanghw@sari.ac.cn

†† 通信作者. E-mail: zwj@zsu.edu.cn

素分析技术,特别是对原子序数较小的轻元素和一些对热中子活化分析不灵敏的元素,例如碳、氟、锆、铟、铅等.伽马光子能量在10—30 MeV的巨偶极共振(giant dipole resonance, GDR)能区时,主要发生的是(γ, n)反应,也可能有其他反应道包括(γ, p)、($\gamma, 2n$)、(γ, α)等开放.早期用于伽马活化分析的伽马源通常来自电子束的韧致辐射,产生的是能量连续分布能谱^[1].近些年基于逆康普顿散射的激光电子伽马源,可以提供准单能的伽马光子,使得伽马活化的研究干扰性更小,更易于反应道的控制.伽马活化数据测量主要包括三个主要步骤:1)样品在线活化,采用合适的伽马源辐照样品,获得足够的活化放射性活度;2)样品离线测量,采用低本底高纯锗(high-purity germanium, HPGe)探测器测量放射性核衰变的特征射线;3)数据分析与应用,结合HPGe探测器能量刻度与效率刻度、伽马能谱信息、活化的光核反应截面数据等处理活化数据,得到研究结论.伽马活化分析自20世纪50年代建立以来^[2,3],经过70多年的发展,已在核技术领域形成一套完整独特的分析方法和手段,应用于工业过程控制、环境安全与检测、放射性药物研发、地质资源勘探、科技考古等应用领域.伽马活化数据经历同位素伽马源、韧致辐射伽马源^[4]、正电子飞行中湮灭伽马源等多种伽马辐射源的应用,已经建立了从轻元素到重元素的精准检测体系,在科研及生产生活中得到了广泛应用^[1,5].

上海激光电子伽马源(BL03SSID, <https://cstr.cn/31124.02.SSRF.BL03SSID>)光束线站作为上海光源线站工程(国家大科学装置基础设施十二五规划)^[6,7]的16条获批建设线站之一,于2018年10月开工建设,2021年12月底工艺验收,2022年初开始试运行,2023年初向国内外用户开放运行^[8-13].SLEGS束线站可提供0.66—21.7 MeV的准单能伽马束,为伽马活化数据测量和伽马活化分析技术研究提供了非常好的平台基础^[14,15],伽马活化分析技术的应用必将会获得更快速的发展机遇.在SLEGS束线站利用伽马活化分析技术,对伽马束流的通量进行监测^[16,17],以及利用伽马活化分析方法联合光中子在线测量方法测量同质异能态^{180m}Ta的截面,开展了核天体物理的实验研究^[18]、光核反应的医用同位素产生截面研究等^[19,20].本文详细介绍了基于激光康普顿散射伽马源的在线活化与离线测量平台的搭建及活化数据的测量和应用.SLEGS现阶段运行参数如表1所列.

表1 SSRF和SLEGS目前运行参数
Table 1. Operation parameters of SSRF and SLEGS.

Parameter	Value	Description
E-beam configuration/(ns·Bunch ⁻¹)	2	SSRF
E-beam energy/GeV	3.5	SSRF
E-beam current/mA	180—210	Topup mode
CO ₂ laser/ μ m	10.64	Continue mode
Laser pulse width/ μ s	50/950	On/Off
Laser power/W	1—140	100 W, average 5 W
γ beam energy/MeV	0.66—21.1, 21.7	20°—160°, 180°
γ beam spot/mm	1—25	Selected by collimator With fine collimator
Energy resolution	5%—15%	
Total flux/(γ ·s ⁻¹)	4.8×10^5 — 1.0×10^7 , 1.5×10^7	20°—160°, 180°

2 SLEGS伽马活化实验设计和数据获取

2.1 伽马在线活化

SLEGS采用外部引入10.64 μ m波长的连续CO₂激光与上海光源储存环的3.5 GeV电子束以20°—160°及180°的可变角度发生逆康普顿散射产生伽马束,通过精确调节激光与电子束碰撞角度实现伽马能量的连续可调(能量在0.66—21.1 MeV,通量在 4.8×10^5 — 1.0×10^7 Photons/s);而碰撞角度180°(21.7 MeV, 1.5×10^7 Photons/s)的夹角可获得最高能量和最大通量及最大极化度.SLEGS的活化实验布局如图1所示^[14,15].伽马活化法测量的光核反应数据主要包括伽马射线照射后产生的不稳定剩余核的退激特征伽马射线能谱,通过测量辐照后剩余核退激发射的特征伽马射线,解得核反应产额.基于此原理,SLEGS平台已实现光中子/光质子反应截面的精准测量.

SLEGS的伽马活化实验台位于上海光源实验大厅BL03 SSID光束线实验棚屋的束流出口处,实验布局设计考虑了以下几点.

1)束流准直.从相互作用点发出的激光康普顿散射(laser Compton scattering, LCS)伽马射线经过粗准直器、外准直器及可调节厚度的铜外置衰减器,实现对伽马束流的准直与衰减.为保证束流强度,活化实验采用直径为 $\Phi 2$ mm或 $\Phi 3$ mm的

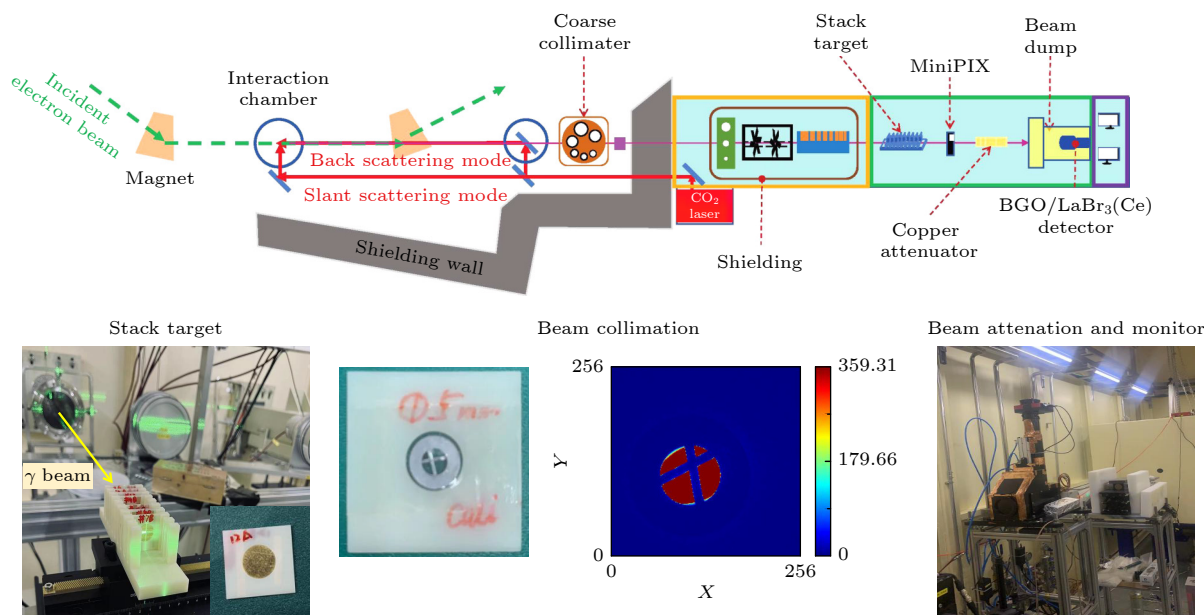


图 1 SLEGS 束线站伽马活化实验布局示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the SLEGS beamline and gamma activation experimental layout.

细准直孔, 使靶上的束斑直径分别约为 4 mm 或 6 mm.

2) 靶点定位. 在实验棚屋内束线出口法兰后、靶位前方设置了硅像素探测器 (MiniPIX, 硅半导体厚度 500 μm , 256 \times 256 像素, 像素尺寸 55 μm), 配备集成三轴平移-旋转平台及定位靶 (借用平坦效率探测器 (FED) 阵列中的孔道) 用于束斑定位测量. 为准确照射到活化靶, 需要确定伽马束斑位置. 伽马束斑有两种测量方法, 一种是利用 MiniPIX 硅像素探测器, 测量同步辐射及韧致辐射伽马束的束斑, 由于伽马束是准直束流, 准直孔后 1—2 m 内可以认为是平行束, 准直孔的大小即是束斑大小; 二是利用伽马束斑监测器 (GSM) 测量有/无激光时的束斑位置, 相减后获得伽马束的束斑形状和尺寸. 伽马束斑位置测量用来在实验前确定束斑是否在活化靶上, 避免束流位置偏离, 由于上海光源每周二进行停机例行维护, 再次注入的电子束轨道会有变化, 因此每次实验前的伽马束斑位置校准是必须进行的确认工作.

3) 多靶辐照. 鉴于伽马束的高透射性, 设计了多层堆叠的可插拔靶架, 安装于具备三轴移动功能的活化台架上. 该设计不仅支持多种靶材及多片厚靶的同时在线辐照, 满足多样的光核反应实验需求, 也实现了对伽马束流的高效利用.

4) 流强监测. 在束线末端的伽马束吸收箱内配置了大尺寸 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器 ($\Phi 3'' \times 4''$) 或

BGO 探测器 ($\Phi 75 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$), 用于束流能谱和强度的在线监测并有效屏蔽本底. BGO 或 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器由 CAEN A1589 模块供电.

5) 数据记录. 探测器信号由 CERN DT5730B (8 通道, 采样率 500 MS/s) 数字化模块转换为数字信号, 随后由 CAEN CoMPASS 获取系统进行数据采集, 通常采用脉冲高度分析 (pulse height analysis, PHA) 模式以测量每个探测事件的信号脉冲幅度, 或者采用脉冲长门积分模式获得脉冲面积. 采集的数据直接以 CERN root 格式存储, 生成的 root 文件包含名为 Data_R 的 TTree 结构. 在数据的初步处理阶段, 重点使用三个主要 branches: Channel 用于标识 CERN DT5730B 的采集通道, Timestamp 记录事件的到达时间, 精度为 1 ps, Energy 则代表探测信号的脉冲幅度, 反映了伽马射线的能量信息. 该系统布局实现了伽马射线束流的精确准直、多靶同步活化以及高效实时监测, 从而为高精度光核反应实验提供了坚实的技术保障.

2.2 离线衰变测量

SLEGS 配置了两台 HPGc 低本底活化测量装置, 编号为 GEM-700200-P 及 GEM-50195-P, 均为 ORTEC 公司 1994 年制造的 P 型同轴高纯锗探测器 (参数如表 2 所列, 铝窗厚度为 1 mm, 因此探测下限在 50 keV 左右, 由于伽马活化退激的特征伽马射线较少, 特征峰明显, 因此低分辨 (如 $\sim 0.5\%$ @

1332 keV) 的 HPGe 探测器可以满足大部分的实验需求), 将原来的 35 L 液氮罐更换为 ORTEC 公司的 Möbius 液氮回凝制冷机及北京中智核安科技有限公司生产的液氮回凝制冷机 (LN-2), 可实现一年以上无停机连续运行, 探测器屏蔽均采用低本底铅砖组成, 可满足交替离线测量的需求 (由于用户样品活化产物测量时间较长, 探测阈值能量较低, 也可自行组建专用 HPGe 低本底测量系统). 离线测量布局如图 2 所示, 定制靶托可以准确约束活化靶片与 HPGe 的相对位置, 用来离线测量活化靶的退激伽马射线和 HPGe 的探测效率刻度.

放射性剩余核衰变产生的特征伽马射线进入 HPGe 探测器后, 探测器内部产生的光电信号由内置前置放大器放大, 输出信号经由 CAEN V1725S/V1730S 数字模块转为数字信号. CAEN CoMPASS 数据采集系统在脉冲高度分析 (PHA) 模式下记录每个事件的脉冲幅度. 采集的数据以 root 格式文

件存储, root 格式作为一种面向对象的数据存储格式, 广泛应用于高能物理和核物理领域, 具备高效的数据管理、绘图及统计分析功能, 便于复杂实验数据的提取与处理, 并可直接利用 CERN root 软件进行后续分析与处理.

由于 SLEGS 为直通型束线, 工作时储存环管路与束线站直接联通, 因此 SSRF 储存环的韧致辐射本底 (能谱呈指数衰减, 最大能量达 3.5 GeV) 会引起活化靶核的活化, 韧致辐射的贡献不可忽视. HPGe 探测器所测得的伽马能谱是 LCS 伽马射线和韧致辐射激发靶核产生的剩余核衰变谱, 与天然环境本底谱的叠加.

还有需要注意的一个问题是目标核半衰期的影响, 由于目标核的半衰期有的很长, 因此活化及离线测量都需要较长时间, 为了实验的紧凑, 通常对这类具有较长衰变半衰期的目标核采用多靶片轮换的工作模式, 而剩余的活化放射性在第二次测量使用时扣除会引入之前活化测量的误差, 因此放置超过 6 个半衰期后再次使用或使用新靶片能有效降低误差.

表 2 ORTEC P 型同轴高纯锗探测器参数
Table 2. ORTEC P-type coaxial high-purity germanium detector parameters.

ORTEC	GEM-50195-P	GEM-70200-P
晶体直径/mm	67.1	69.6
晶体长度/mm	65.5	90.1
晶体死层/ μm	700	700
铅窗厚度/mm	1.0	1.0
推荐高压/V	+2200	+2500
出厂分辨	1.69 keV@1.33 MeV (0.13%)	1.85 keV@1.33 MeV (0.14%)
目前分辨	4.53 keV@1.33 MeV (0.34%)	3.59 keV@1.33 MeV (0.27%)
探测效率	55.2%@1.33 MeV	74.2%@1.33 MeV
冷凝制冷	Möbius	LN-2

3 活化法测量光核反应截面

3.1 在线活化产额

上海光源储存环的多束团模式 (Topup 模式) 时间结构和激光时间结构如图 3(a) 所示, 电子在环内运行一周需要 1.44 μs , 共有 720 buckets, 间隔为 2 ns 填充 500 个电子束团, 激光器频率 1 kHz, 采用 50 μs 激光输出周期, 占空比为 5% 的光输出模式运行, 由于电子束流间隔仅为 2 ns, 对于

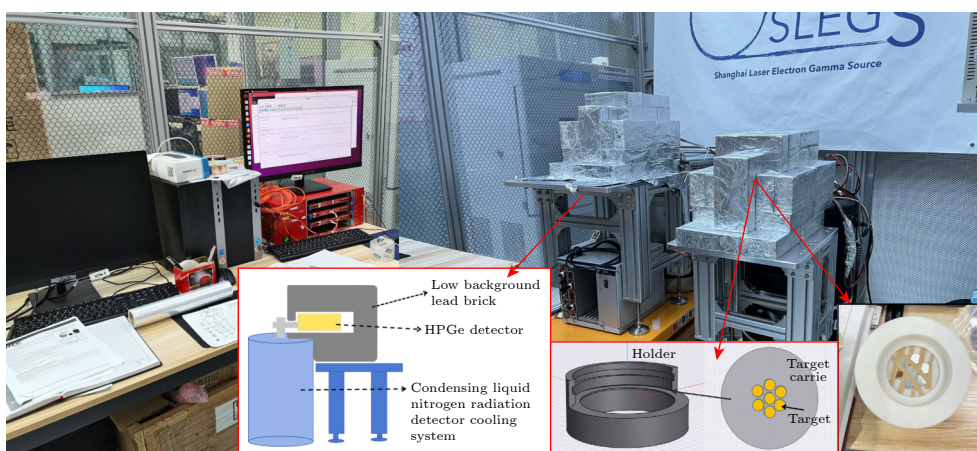


图 2 SLEGS 伽马活化离线测量布局示意图

Fig. 2. Schematic diagram of the offline activation layout at the SLEGS beamline.

光核反应在线活化, 计算产额时可认为电子束流为连续的, 可直接用连续电子束流的公式来计算^[21]; 因此着重考虑入射的脉冲激光对活化公式的应用, 入射激光的周期为 1 kHz, 时间结构如图 3(a) 所示 (T_i 为辐照时间, T_w 为等待时间, 或者称为冷却时间, T_m 为测量时间). SLEGS 目前采用的 CO₂ 激光属于长脉冲准连续激光, 激光脉冲宽度为 $t_p = 50 \mu\text{s}$, 无激光输出的间隔时间为 $t_i = 950 \mu\text{s}$, 激光脉冲周期为 $T = 1000 \mu\text{s}$, 如图 3(b) 所示.

在激光周期 $t_p = 50 \mu\text{s}$ 范围内的 LCS 伽马光子, 在整个辐照期间均存在的加速器储存环电子束的韧致辐射伽马光子, 时间上可以认为是均匀分布的, 能量分布是指数衰减, 最大能量与电子束能量一样为 3.5 GeV. 伽马光子与原子核发生反应, 放射性剩余核的产额明显增加, 在 $t_e = 950 \mu\text{s}$ 时间范围内, LCS 伽马光子停止产生, 韧致辐射伽马光子仍然继续存在, 前面的脉冲快速产生的核素在后面的时间里会衰变, 因此放射性剩余核产额边衰减边缓慢增加, 激光周期周而复始. 脉冲辐照活化公式推导参考文献^[21]. 在 SLEGS 参数下进行计算, 以 ¹⁹⁷Au 为例 (如图 3(b) 所示), 半衰期为 6.167 d, 红色的线为传统连续辐照活化公式计算的产额变化, 蓝色的线为脉冲辐照活化公式计算的产额, 这两种方式计算结果差异非常小, 可以忽略不计, 因此可采用连续激光的公式, 辐照结束后的

产额为

$$N = N_0 \varphi_0 \sigma (1 - e^{-\lambda T_i}) / \lambda, \quad (1)$$

其中 T_i 为辐照时间, $\varphi_0 = \frac{\varphi_1 t_p + \varphi_b t_e}{t_p + t_e}$, t_e 为电子韧致辐射伽马束辐照时间, N_0 是靶核数, σ 是样品靶核反应截面, φ_1 是辐照靶上的伽马光子通量, 脉冲激光的模式与剩余核的半衰期是影响产额变化的重要参数. 基于 SLEGS 的激光脉冲模式, SLEGS 开展的活化平台测量的核反应剩余核的半衰期从几分钟到几天不等. 生成的放射性核素通常以几种方式退激: β^+ 衰变 (伴随 511 keV 湮灭辐射), β^- 衰变 (连续能谱), 电子俘获 (EC) 后发射特征 X/伽马射线. 停止辐照后, 剩余核停止生成并持续衰变, 测量放射性剩余核衰变产生的特征伽马射线, 此时在 HPGe 低本底探测谱仪开始探测到的有效特征伽马射线的个数满足指数衰变规律 (测量时间从 T_m 开始):

$$N_\gamma = N I_\gamma \eta f_s e^{-\lambda T_w} (1 - e^{-\lambda T_m}), \quad (2)$$

其中 T_w 为辐照结束到 HPGe 离线测量计数开始所经过的冷却时间; T_m 为离线测量时间; λ (1/s) 是衰变常数; 半衰期 $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ (s); η 为 HPGe 的探测效率; f_s 为衰减因子. 从产额计算公式可以看出, 剩余核的产额在辐照 3 个半衰期后就逐渐趋近饱和, 因此对于目标核的活化时间通常不超过 3 个半衰期.

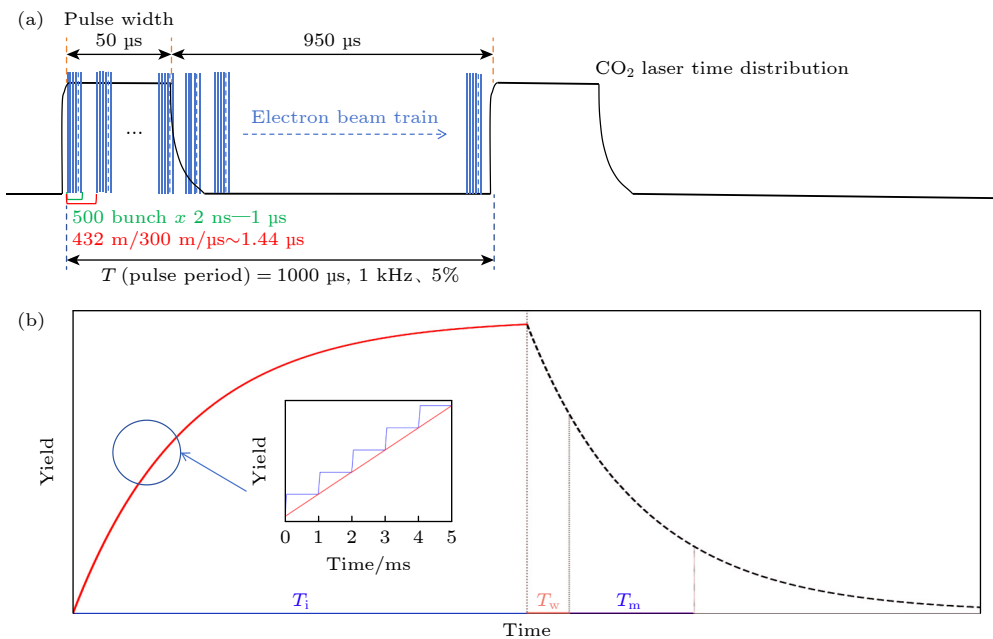


图 3 (a) SLEGS 的束流时间分布谱与 (b) 伽马活化时间谱示意图

Fig. 3. (a) Schematic diagram of the beam time distribution spectrum and (b) gamma activation time spectrum of SLEGS.

3.2 伽马离线测量

天然本底辐射主要由环境中的天然放射性核素(如 ^{40}K , 铀钍衰变系核素及其子体, ^{208}Tl , $^{210,212}\text{Pb}$, $^{220,222}\text{Rn}$, $^{226,228}\text{Ra}$ 等)、宇宙射线及其次级粒子以及探测器及周边材料中固有的放射性杂质共同构成. 对于高纯锗探测器系统而言, 本底噪声主要来源可归为四类: 一是环境放射性贡献, 包括氡 (Rn) 及其子体的衰变辐射、天然放射性核素衰变产生的伽马射线以及由自发裂变和 (α, n) 反应产生的中子; 二是探测器和屏蔽材料中残留的放射性杂质; 三是宇宙射线及其诱发的中子等次级粒子; 四是电子学系统的噪声干扰. 这些因素共同决定了探测系统的本底水平, 是开展低本底实验需要重点研究和控制的关键因素.

SLEGS 设计并搭建了两套低本底屏蔽室, 主要采用低本底铅来屏蔽, 铅主要含有 ^{210}Pb (半衰期 22 a), 其衰变路径为 $^{210}\text{Pb} \xrightarrow{\beta^-} ^{210}\text{Bi} \xrightarrow{\beta^-} ^{210}\text{Po} (\alpha)$, 普通铅活度范围 250—2500 Bq/kg. SLEGS 采用约 120 Bq/kg 的低本底铅砖, 能够有效屏蔽环境天然伽马射线本底. 在无屏蔽、50 mm 含 Sb(2%) 的普通铅砖、50 mm 低本底铅砖、100 mm 低本底铅砖四种情况下进行本底测量, 结果显示, 铅砖对天然本底的屏蔽有很好的效果, 随着低本底铅砖厚度增加, 屏蔽效果也愈加显著, 低本底铅砖对 500 keV 以下的伽马射线有很好的屏蔽作用; 50 mm 厚的低本底铅砖获得 60 keV—3 MeV 能区的本底计数约为 12/s; 100 mm 厚低本底铅砖获得 60 keV—3 MeV 能区的本底计数约为 5.2/s. 图 4 显示了

LEGS HPGe(GEM-70200-P) 探测器在 100 mm 铅砖屏蔽后 93 h 时间内测得的天然本底能谱图. 在离线测量活化反应靶衰变特征伽马射线前中后, 需要对 HPGe 探测器进行能量刻度和效率刻度. 使用 $^{57,60}\text{Co}$, ^{137}Cs , ^{241}Am , ^{152}Eu 标准刻度源, 以及利用硅酸钷闪烁晶体 (LYSO) 中的 ^{176}Lu 衰变和氯化钾中 ^{40}K 对 HPGe 探测器进行能量刻度, 效率刻度采用标准刻度源来完成. 针对低能区刻度, 特别选用含有 40.12, 121.78 keV 等 7 个特征峰的 ^{152}Eu 源与 ^{57}Co 源 (122.06 keV) 组合, 以精确校准探测器灵敏区死层和屏蔽端窗的吸收效应 (SLEGS 使用的 ORTEC HPGe 采用 1 mm 厚度的铝窗, 因此决定了 HPGe 的探测器的下限在 40 keV 左右); 对于中高能区, 则选用 ^{137}Cs 源 (661.66 keV) 和 ^{60}Co 源 (1173.23, 1332.49 keV), 用于刻度中高能段的探测效率, 同时验证康普顿平台响应及高能逃逸峰的修正. 标准刻度源的活度不确定度 $\leq 3\%$, 并已根据各自半衰期修正至实验测量时间点. 测量过程中获取系统死时间严格控制在 3% 以下, 刻度结果已进行相应死时间修正, 最终通过上述多能量点校准与严格的操作规范, 确保了效率刻度的准确性和可靠性 [14,15].

3.3 伽马能谱解卷积处理

伽马活化测量需要入射伽马能谱解卷积来得到单能伽马截面, 对于 20 MeV 以下的伽马束能量, 入射伽马能谱和流强可以通过束流监测器来同时获得. SLEGS 采用大尺寸 BGO 或者 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$

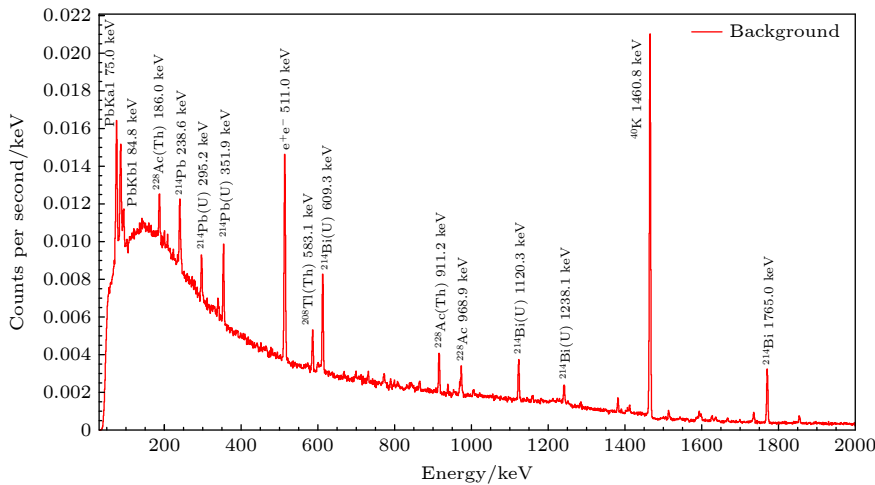


图 4 低本底屏蔽后测量天然本底能谱图 (93 h)

Fig. 4. Natural background energy spectra after shielding (93 h).

闪烁体直接在线实时监测伽马束流能谱及流强, BGO 直径 76 mm, 长度 200 mm, 用 3" 的 PMT 读出, LaBr₃(Ce) 直径 76.2 mm (3"), 长度 101.6 mm (4"), 同样采用 3" 的 PMT 读出, 由于 BGO/LaBr₃(Ce) 晶体较长, 同时 3" PMT 的读出计数率不高, 因此使得大尺寸 BGO/LaBr₃(Ce) 晶体的直接读出面临束流高计数率的挑战, 测试中发现, 超过 10⁵/s 的伽马束流强度时, BGO/LaBr₃(Ce) 探测器的输出信号即出现饱和堆积, 信号幅度增大变形, 波形采样不完全, 但读出信号道数却降低, BGO/LaBr₃(Ce) 探测器的输出线性被严重破坏. 经过多次尝试与验证, SLEGS 采用在 BGO/LaBr₃(Ce) 探测器前增加几十到上百毫米厚度的无氧铜衰减块来降低进入到 BGO/LaBr₃(Ce) 中的伽马数量, 无氧铜为中等质量数材料, 相对于重质量数铅材料来说, 有利于降低束流散射与减少低能 X 射线的产生, 这同样会对 BGO/LaBr₃(Ce) 的计数率降低有益. 由于入射伽马束流经过衰减才进入到束流检测探测器 BGO/LaBr₃(Ce) 中, 因此实际伽马能谱要经过解谱还原到衰减前的能谱, 这需要刻度过的 BGO/LaBr₃(Ce) 探测器响应函数. 2023 年在中国原子能科学研究院小串列加速器上利用质子俘获反应完成了 BGO/LaBr₃(Ce) 探测器响应函数的刻度, 详细信息参见文献 [22].

SLEGS 采用 LaBr₃(Ce) 探测器作为在束能谱和流强测量设备, 其测量的复合能谱如图 5(a) 中黑色实线所示. 该能谱呈现为 LCS 伽马能谱 (图 5(a) 中红色实线表示) 与轫致辐射能谱 (图 5(a) 中蓝色实线) 的叠加特征. 由于实验采用在线活化-离线衰变的测量方法, 观测到的剩余衰变产额实际上包含了 LCS 和轫致辐射两种机制的共同贡献, 因此需要对原始能谱即 LCS 伽马能谱和轫致辐射伽马能谱的叠加能谱 (图 5(a) 中黑色实线表示), 进行精确解谱处理. 入射伽马射线能谱分布 n_γ 的解析通过结合 Geant4 模拟的探测器响应函数 R_f 实现. 伽马能谱解谱方法可参考文献 [22]. 图 5(b) 展示了能谱重建的关键步骤, 蓝色实线代表探测器原始测量数据, 红色虚线为基于响应矩阵的蒙特卡罗模拟重建结果, 二者吻合度验证了解谱算法的可靠性. 图 5(b) 中绿色实线表示的能谱显示了解析得到的入射伽马能谱分布, 其能谱强度分布为后续核反应截面计算提供了精确的输入谱数据. 通过衰减法可得到靶前的流强如图 5(b) 所示, 在确定流强与束

流能量时需要这些伽马能谱信息.

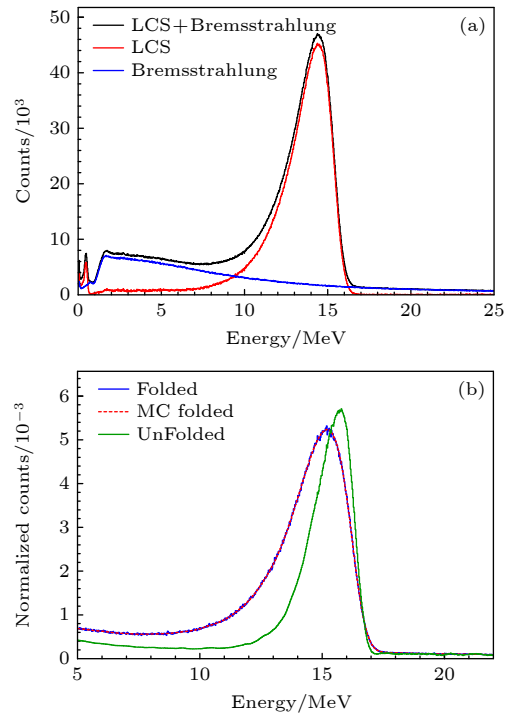


图 5 (a) LaBr₃(Ce) 探测器测量伽马束能谱 (黑实线)、LCS 伽马能谱 (红实线) 与轫致辐射 (Brem) 伽马能谱 (蓝实线); (b) 实测能谱 (蓝实线) 与蒙特卡罗重建谱 (红虚线)、解谱得到的入射伽马能谱 (绿实线)

Fig. 5. (a) The measured gamma beam spectrum by the LaBr₃(Ce) detector (black solid line), LCS gamma spectrum component (red solid line); Bremsstrahlung (Brem) gamma spectrum (blue solid line). (b) Measured spectrum (blue solid line), Monte Carlo reconstruction (red dashed line); unfolded true γ -ray spectrum (green solid line).

3.4 准单能光核反应截面计算

光核反应截面的定义如下:

$$\int_{S_n}^{E_{\max}} n_\gamma(E_\gamma) \sigma_{\gamma n}(E_\gamma) dE_\gamma = \frac{N}{N_t N_\gamma \xi g}, \quad (3)$$

其中 $n_\gamma(E_\gamma)$ 表示入射伽马射线的归一化能量分布; $\sigma_{\gamma n}(E_\gamma)$ 为待确定的单能截面; S_n 是靶核的中子分离能; N 为剩余核的产额; N_γ 表示入射到靶上的伽马射线数量; N_t 是单位面积内的靶核数量; 参数 $\xi = (1 - e^{-\mu t})/(\mu t)$ 用于校正靶材自吸收效应, 其中 μ 表示伽马射线衰减系数, t 为靶厚度; 参数 g 表示入射伽马射线通量中高于 S_n 能区的比例:

$$g = \frac{\int_{S_n}^{E_{\max}} n_\gamma(E_\gamma) dE_\gamma}{\int_0^{E_{\max}} n_\gamma(E_\gamma) dE_\gamma}, \quad (4)$$

N_γ 是通过 BGO(或 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$) 探测器获取的测量参数. 数据分析程序会重建入射到靶上的伽马射线能谱, 该过程产生 N_γ 和归一化能量分布, 这些数据对确定单能截面至关重要.

单能近似截面是截面的加权平均值, 其权重由入射伽马射线的归一化能谱定义. 本节概述提取单能截面的算法. 单能近似截面可表示为

$$\sigma_f = D\sigma, \quad (5)$$

其中 σ_f 是单能近似截面数组, 每个元素对应离散束流能量 (E_γ) 处的测量截面; σ 是单能截面数组. 矩阵 D 由从 S_n 到 E_{\max} 的入射伽马射线归一化能谱分布组成. (6) 式是 (5) 式的展开形式, D 的行数 N 对应离散束流能量个数, 列数 M 对应 S_n 到 E_{\max} 能谱区间数.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_N \end{pmatrix}_f = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & \dots & D_{1M} \\ D_{21} & D_{22} & \dots & D_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{N1} & D_{N2} & \dots & D_{NM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_M \end{pmatrix}. \quad (6)$$

采用迭代展开法提取单能截面 σ , 初始值 σ (例如设为 $[1, 1, 1, \dots, 1]I$), 记为 σ^0 , 代入 (5) 式得到 σ_f^0 , 根据 σ_{exp} 与 σ_f^0 的差值更新 σ^0 , 得到 σ^1 :

$$\sigma^1 = \sigma^0 + (\sigma_{\text{exp}} - \sigma_f^0). \quad (7)$$

注意 $\sigma^0(M)$ 的维度远大于 σ_{exp} 和 $\sigma_f^0(N)$ 的维度, 应用 (7) 式需将后两者的维度扩展至 M . 后续迭代

步骤:

$$\sigma_f^i = D\sigma^i, \quad (8)$$

$$\sigma^{i+1} = \sigma^i + (\sigma_{\text{exp}} - \sigma_f^i). \quad (9)$$

每次迭代记录 σ_{exp} 与 σ_f^{i+1} 间的 χ^2 值, 当 χ^2 收敛时停止迭代 [14,15,23].

4 伽马活化数据的分析与应用

SLEGS 已经建立伽马活化数据测量实验平台, 开展了基于伽马活化方法的 SLEGS 伽马束流强监测和校准工作, 以及利用伽马活化方法开展核天体物理相关的实验研究, 未来可以进一步开展特征核素识别、科技考古等工作的初步探索.

4.1 伽马活化数据用于伽马束流强监测

图 6 显示了利用 ^{197}Au 和 ^{64}Zn 的光中子核反应测量的伽马束流强度值 [14,15], 与 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 探测器在线测量做了对比, 伽马活化法测量的束流强度精度在 10% 以内, 主要误差来自待测目标核光核反应截面的测量精度和 HPGe 探测器的效率刻度误差和测量误差. 因此短寿命核的伽马活化法测量流强具有快速数据处理的优势, 常用于在线测量的监测和校准 [16,17].

4.2 伽马活化数据用于核天体物理研究

宇宙中重元素的核合成是核天体物理学的未解问题之一. 大多数重元素在恒星核合成中通过中子捕获过程形成, 中子俘获速率远长于 β^- 衰变的

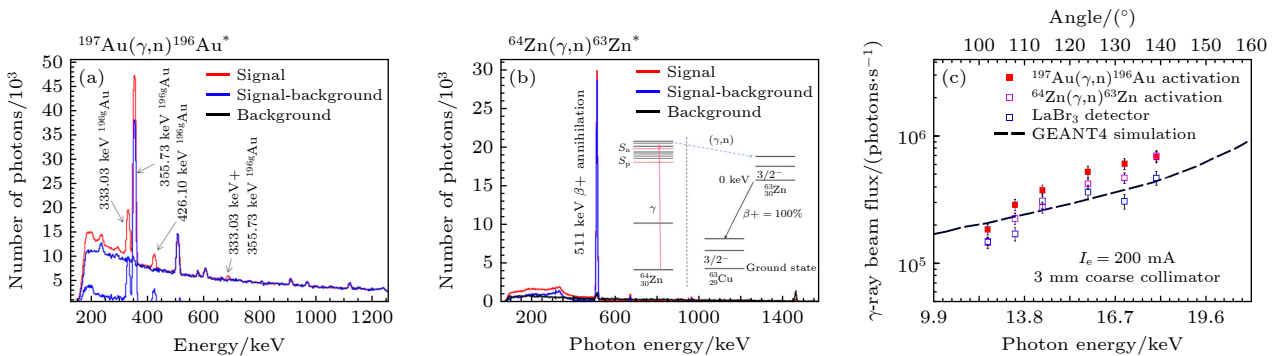


图 6 (a) 伽马活化 ^{197}Au 靶的离线测量谱; (b) 伽马活化 ^{64}Zn 靶的离线测量谱; (c) ^{197}Au , ^{64}Zn 活化测量与 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 直接测量、Geant4 模拟流强结果对比

Fig. 6. (a) Offline measurement spectrum of the gamma-activated ^{197}Au target; (b) offline measurement spectrum of the gamma-activated ^{64}Zn target; (c) comparison of γ -ray beam flux results obtained from the ^{197}Au , ^{64}Zn direct detection using $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ scintillators, and Geant4 simulation results.

为慢中子俘获过程, 即 s 过程, 中子俘获速率远短于 β^- 衰变的为快中子俘获过程, 即 r 过程, r 过程可在核 β^- 衰变链中连续俘获数个中子, 从而生成丰中子核素, 通常在爆炸性天体环境中进行. 由于 r 过程中有大量不稳定核素参与, 在实验室难以直接测量, 因此非常依赖理论计算. 在实验室测量相关逆反应过程的截面, 是约束核模型, 进而提高理论预测能力的关键途径. 此外在核素图 β 稳定线上方有一些比铁重、丰度低、稳定但缺中子的核素 (从 ^{74}Se 到 ^{196}Hg), 被称为 p 核. 其丰度通常比丰中子核素低 10—100 倍. 在核天体物理模型计算中, p 核由于被临近的短寿命核隔离开, 无法通过 s 过程或 r 过程的连续中子俘获过程合成. 它们主要由已有的 s 或 r 过程通过质子捕获或光核反应 (如 (γ, n) , (γ, p) , (γ, α)) 等生成, 然后通过 β 衰变、内转换或中子诱发 α 释放等过程生成. 大多数情况下, p 核是通过不稳定的母核经一系列核反应生成的稳定丰质子核素 [24–26]. 了解 p 核的来源, 对深入理解核合成和核天体物理学具有重要意义.

p 过程是通过快速质子俘获和光致蜕变的平衡, 合成比铁重的富质子核素的核合成过程. p 过程网络中相关核反应的反应速率的实验数据十分匮乏. 与 p 过程相关的大多数反应速率测量主要集中在稳定核素的中子辐射俘获反应研究, 利用细致平衡原理测得的 (n, γ) 俘获速率可计算得到对应的 (γ, n) 光核反应速率. 在求解过程中, 也需要考虑目标核激发态对 (n, γ) 速率的贡献. 然而, 这些测量仅覆盖了 p 过程计算需求中的极少一部分, 远远不能满足完整的核反应数据需求. 此外, 这些实验数据一般只涉及目标核的基态反应率, 而在真实的恒星环境中, 目标核可能存在激发态, 且激发态核对整个反应速率有显著贡献. 因此, 必须对实验室获得的基态反应率进行修正, 加入激发态贡献的校正因子, 才能正确反映恒星中的真实反应速率. 尽管如此, 这些大量的实验数据依然非常重要, 因为它们有助于验证和校准理论模型所使用的各种核物理参数, 提升理论预测的可靠性. 且光核反应作为探测电磁物理量的最佳探针, 在核合成的宏观与微观描述中具有重要地位, 为核合成模型计算提供约束. 许多 (γ, n) 的 GDR 反应截面已被直接测量 [27,28], GDR 能区对应的是核子的集体激发态, 而 p 过程关注的光核反应能量主要接近粒子发射阈值的低能区, 而非高能 GDR 区域. 目前很多

中子阈值以上的 (γ, n) 反应利用平坦效率探测器进行了直接测量 [29], 这对于更准确地理解和建模 p 过程中的反应速率非常重要.

恒星内部光致核反应的反应速率由以下积分公式描述:

$$\lambda_{(\gamma,j)}(T) = \int_0^\infty c n_\gamma(E, T) \sigma_{(\gamma,j)}(E) dE, \quad (10)$$

其中, c 为光速 (单位为 cm/s), $n_\gamma(E, T)$ 为温度 T 下的光子能量分布 (单位为 $\text{cm}^{-3} \cdot \text{erg}^{-1}$), $\sigma_{(\gamma,j)}(E)$ 为光核反应截面 (单位为 cm^2), E 为光子能量 (单位为 MeV), j 为发射粒子类型 (如 n, p, α). 其中光子分布 $n_\gamma(E, T)$ 遵循普朗克黑体辐射谱 $n_\gamma(E, T) = \frac{8\pi E^2}{(hc)^3} \frac{1}{e^{E/kT} - 1}$, 反应阈值的积分下限受光核反应阈值能量 E_{thr} 约束, 当 $E < E_{\text{thr}}$ 时 $\sigma_{(\gamma,j)}(E) = 0$ 截面行为在巨偶极共振 (GDR) 能区, 截面 $\sigma_{(\gamma,j)}(E)$ 呈洛伦兹峰, 在阈值附近满足 $\sigma_{(\gamma,n)}(E) = \sigma_0 \sqrt{\frac{E - E_{\text{thr}}}{E_{\text{thr}}}}$ ($E \approx E_{\text{thr}}$), 天体物理重点能量窗口在阈值能量 E_{thr} , 有效能量 $E_{\text{eff}} \approx E_{\text{thr}} + kT/2$.

p 核中, 有四个核素 (^{92}Mo , ^{94}Mo , ^{96}Ru , ^{98}Ru) 丰度比现有模型计算的偏高, 此丰度异常暂时无合理的解释. 科学界普遍认为, p 过程主要发生 II 型超新星爆炸期间的氧氖剧烈燃烧节点, 温度在 T_9 (GK) = 2—3. 钼 (Mo) 和钌 (Ru) p 核素同位素也能够爆炸中高温 ($T_9 \geq 3.5$) 条件下高效产生, 测量其伽莫夫窗口的光核反应截面对于解释这些特异性同位素的起源具有重要意义. 目前 p 核的光核实验反应截面只有 ^{92}Mo 有伽马活化测量数据, 其他 p 核的 (γ, n) , (γ, p) 反应的活化测量数据仍极度匮乏. 由于 p 核丰度均较低, 除了 ^{92}Mo 的丰度较高, 为 14.649%, 其他 p 核的丰度都在百分之几或千分之几, 同位素靶获得困难, 且伽莫夫窗口能量范围内截面低, 给实验测量带来巨大的挑战. $^{96}\text{Ru}(\gamma, n)^{95}\text{Ru}$, $^{96}\text{Ru}(\gamma, p)^{95}\text{Tc}$ 光中子和光质子反应道的伽莫夫窗口如图 7 所示.

基于 SLEGS 平台 GAA 实验方法, 开展了针对 p 核反应截面测量. 利用高通量且能量调节灵活的伽马射线束流, 有效提升了光核反应截面的测量灵敏度和准确度. 以天然钌 (Ru) 为靶材 (其中 ^{96}Ru 和 ^{98}Ru 的自然丰度分别为 5.54% 和 1.87%), 采用堆栈厚靶结构, 初步测量了关键 p 核素 $^{96}\text{Ru}(\gamma, n)^{95}\text{Ru}$, $^{96}\text{Ru}(\gamma, p)^{95}\text{Tc}$ 和 $^{98}\text{Ru}(\gamma, n)^{97}\text{Ru}$ 的

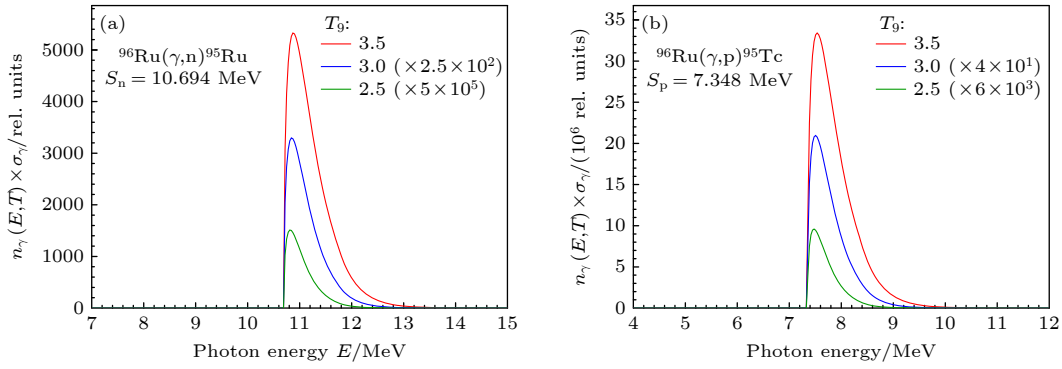


图 7 靶核基态伽莫夫窗口 (a) $^{96}\text{Ru}(\gamma, n)$; (b) $^{96}\text{Ru}(\gamma, p)$

Fig. 7. Gamow window on the ground state of target nucleus: (a) $^{96}\text{Ru}(\gamma, n)$; (b) $^{96}\text{Ru}(\gamma, p)$.

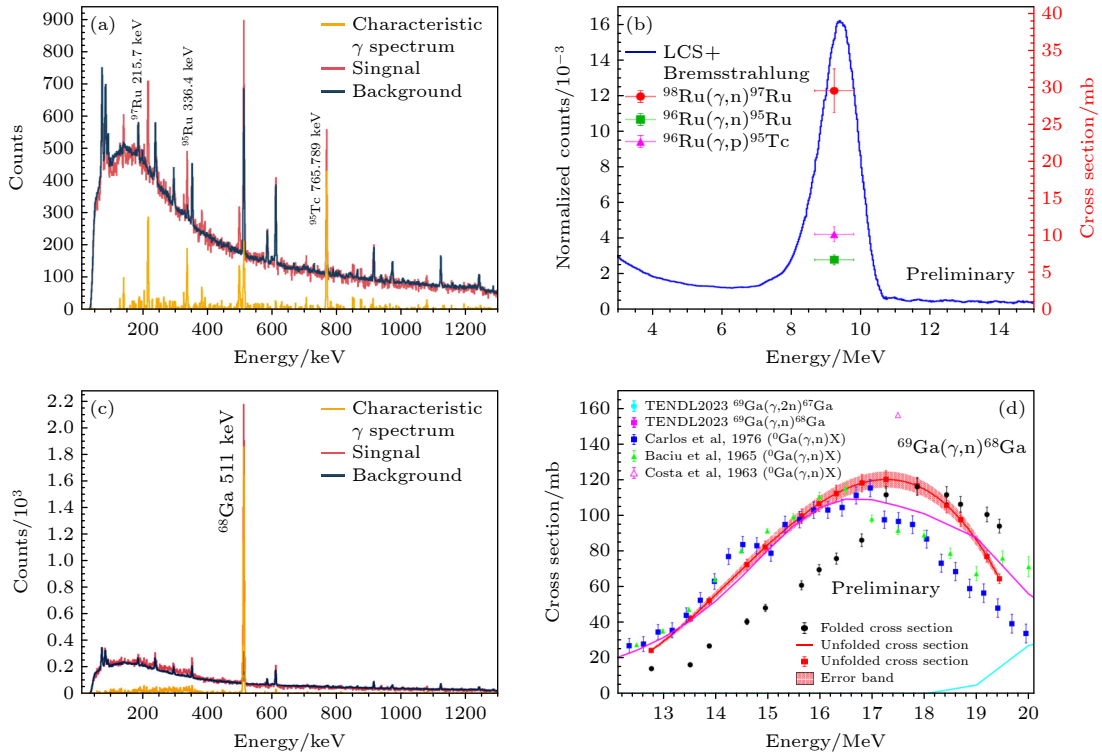


图 8 核天体物理相关的活化截面测量 (a), (b) ^{96}Ru ; (c), (d) ^{69}Ga

Fig. 8. Activation cross section measurement of ^{96}Ru ((a), (b)) and ^{69}Ga ((c), (d)) in nuclear astrophysics.

离线测量的衰变伽马谱和核反应截面数据 (如图 8(a) 和图 8(b) 所示). 图 8(b) 中蓝色曲线表示激光与电子束碰撞角度为 88° 时的入射 LCS 伽马能谱分布, 在伽莫夫能量窗口范围内, 此截面数据为卷积入射伽马能谱分布的准单能截面数据, 为满足核天体物理反应率计算的精度要求, 需要在伽莫夫窗口能区开展了一系列测量以解出单能截面数据, 更多精细测量正在计划中.

此外, 基于堆栈靶活化实验设计, 对 $^{69}\text{Ga}(\gamma, n)^{68}\text{Ga}$ 反应截面进行了系统测量, 图 8(c) 和图 8(d) 为核 $^{69}\text{Ga}(\gamma, n)^{68}\text{Ga}$ 截面的初步测量结果. 通过实

验测量的 $^{69}\text{Ga}(\gamma, n)^{68}\text{Ga}$ 实验反应截面数据约束 TALYS-2.0^[30] 模型的伽马强度函数和核能级密度参数来计算反应率. 基于修正洛伦兹模型 (SMLO) 的偶极子伽马射线强度和 Gogny-Hartree-Fock-Bogolyubov 能级密度模型进行计算的 1.5—10 GK 下的 $^{69}\text{Ga}(\gamma, n)^{68}\text{Ga}$, $^{69}\text{Ga}(\gamma, p)^{68}\text{Zn}$ 和 $^{69}\text{Ga}(\gamma, \alpha)^{65}\text{Cu}$ 反应速率如图 9 中的点所示. 对核天体网络的计算中, 反应速率采用 REACLIB^[31] 格式进行参数化, 表达形式将温度依赖的反应速率采用指数函数和一组参数来描述, 使用经验参数化公式表达从而进行核天体网络计算, 如图 9 中不同颜色的线条

表 3 反应 $^{69}\text{Ga}(\gamma, n)^{68}\text{Ga}$, $^{69}\text{Ga}(\gamma, p)^{68}\text{Zn}$ 及 $^{69}\text{Ga}(\gamma, \alpha)^{65}\text{Cu}$ 推荐的 REACLIB 参数
Table 3. Recommended REACLIB parameters for $^{69}\text{Ga}(\gamma, n)^{68}\text{Ga}$, $^{69}\text{Ga}(\gamma, p)^{68}\text{Zn}$ and $^{69}\text{Ga}(\gamma, \alpha)^{65}\text{Cu}$.

Reaction	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	拟合误差/%
(γ, n)	100.0	-100.0	-100.0	24.17343	-8.81476	0.86009	-6.64832	9.07
(γ, p)	-99.9999995	-95.31730	47.22335	99.99999997	-8.88088	0.44241	-13.29059	0
(γ, α)	-100.0	-87.00958	34.26290	100.0	-11.21949	0.70231	-7.09431	0.10

所示.

$$N_A \langle \sigma v \rangle = \exp \left[a_0 + a_1 T_9^{-1} + a_2 T_9^{-1/3} + a_3 T_9^{1/3} + a_4 T_9 + a_5 T_9^{5/3} + a_6 \ln(T_9) \right], \quad (11)$$

其中, T_9 是以 10^9 K (GK) 为单位的温度, a_0 到 a_6 是通过拟合实验及理论计算反应率得到的参数, 如表 3 所列. 使用这些参数进行的拟合结果与反应率在 1—10 GK 的温度范围内高度吻合, $^{69}\text{Ga}(\gamma, n)^{68}\text{Ga}$, $^{69}\text{Ga}(\gamma, p)^{68}\text{Zn}$ 和 $^{69}\text{Ga}(\gamma, \alpha)^{65}\text{Cu}$ 拟合误差分别为 9.07%, 0 和 0.1%. 通过测量的实验数据对 TALYS-2.0 代码中的内嵌模型参数进行约束后, 得到了一个经过优化的截面计算结果, 进而计算反应速率, 这为覆盖关键温度范围的反应速率计算提供了坚实的基础, 从而提高了对 p 过程网络计算中该核反应道的反应速率的准确预测能力. 实验结果对于提高反应速率模型的准确性具有重要意义.

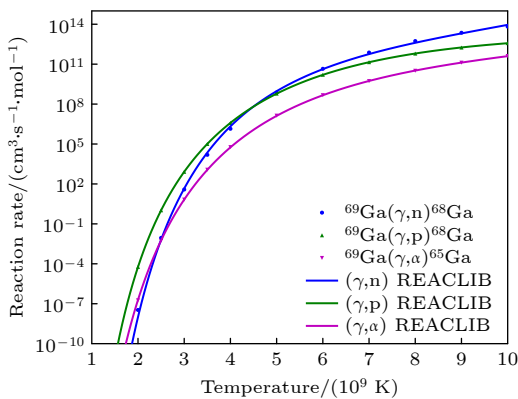


图 9 ^{69}Ga 的核天体反应率
Fig. 9. Astrophysical reaction rates of ^{69}Ga .

4.3 伽马活化数据用于特征核素识别与应用

伽马活化分析是考古和古生物学中常用于特征元素定性及定量分析的核技术手段之一, 通过高能伽马光子轰击文物样品, 利用光核反应生成放射性核素, 再通过检测特征伽马射线或 X 射线能谱确定元素种类与含量 [1,32,33], 具有以下特点: 1) 非破坏性, 可对珍贵文物进行无损分析; 2) 灵敏度高,

对轻元素 (如碳、氮、氧) 及中重元素均有良好检测能力, 部分元素检测限可达 $10^{-6} - 10^{-13} \text{ g/g}$; 3) 多元素同步检测, 一次照射可同时分析多种元素, 减少样品前处理工作量等技术优势. 因此既适用于文物材质分析, 如测定陶瓷、青铜器、玻璃、化石等文物中的微量元素, 辅助产地溯源与工艺研究; 也适用于年代学研究, 结合其他技术 (如释光技术), 分析文物受热历史或埋藏环境等. 伽马活化分析优于中子活化分析, 无需中子源, 避免了长期放射性残留风险, 且对轻元素检测更优; 优于 X 射线荧光分析, 由于穿透深度大, 适合厚样品或复杂基体分析. 但伽马活化分析在科技考古中仍然具有一定的局限性, 主要体现在伽马源设备成本高、具有辐射安全风险、轻元素灵敏度不足、样品适用性约束等方面. 尽管如此, 对于需要多元素同步分析且对样品完整性要求较高的研究中 (如珍贵青铜器产地溯源、古代玻璃成分解析), GAA 或 PAA 仍是不可替代的重要技术. 实际应用中需结合文物类型、分析目标及实验室条件, 综合选择最适配的分析方法. 目前该技术在考古学、文物保护领域已逐步普及, 为研究古代技术、贸易网络及环境变迁提供了重要科学依据.

GAA 是一种高精度的多元素放射性分析技术, 常用于痕量元素检测. 如美国爱达荷大学加速器中心的研究人员对全球多地咖啡样本进行 GAA 分析, 作为评估非法毒品中痕量元素与种植土壤关联性的初步研究. 研究显示, 不同产地的咖啡含有差异化的痕量元素浓度, 咖啡样本中的元素组成与当地土壤样本中的元素构成高度吻合, 同时对比研究显示 GAA 检测数据与 X 射线共振荧光 (XRF) 实验结果完全吻合. 因此, 这些元素含量或许能成为追踪咖啡来源的“指纹”, 未来利用 GAA 技术追踪非法毒品来源具有广阔的应用前景 [34,35].

4.4 伽马活化数据的未来应用展望

GAA 可视为传统的中子活化分析 (NAA) 与

带电粒子活化分析 (CPAA) 的补充技术^[36-38]. 中子活化分析利用反应堆或者加速器产生的中子进行检测, 尽管中子活化分析在许多情况下能提供更高的检测灵敏度, 但仍有若干具有迫切分析需求的元素和材料对 NAA 不敏感, 可通过 GAA 来解决, 例如轻元素、镍、锆、铅、铋等. 此外, GAA 在活化过程中对基体吸收问题的敏感度远低于 NAA. 特别是对于硼、镉及稀有元素等基体, 由于其热中子吸收截面过大而无法用 NAA 分析, 却可以通过 GAA 进行检测. 纯仪器非破坏性分析可以频繁开展, 几乎任何材料基体都能被分析. 然而, 伽马束的角度分布可能导致通量梯度急剧变化, 这需要通过良好的束流监测来补偿非均匀性, 从而确保对靶材剂量分布的准确理解.

GAA 已在许多科学领域取得突破性应用: 轻元素 (碳、氮、氧、氟、磷) 的分析研究; 工业废料处理 (如电子废弃物); 高科技材料开发 (例如半导体、非氧化物陶瓷); 法医学鉴定 (如私酿威士忌) 等. SLEGS 光束线站的建成, 为国内开展伽马活化研究提供了非常好的实验条件.

5 结 论

自 2023 年 SLEGS 运行开放以来, 主要开展了核物理^[23,39-41]、核天体物理等基础研究和伽马辐照、伽马成像、伽马活化等应用研究. SLEGS 的伽马能量覆盖了光核反应的弹性散射与非弹性散射 (即核荧光共振)、矮共振和大部分的巨共振能区. 建设有核共振荧光谱仪^[42]、平坦效率谱仪^[43,44]、中子飞行时间谱仪^[45] 以及轻带电粒子谱仪, 可以开展多种实验方法及探测器技术的研究, 也正在建设正电子束平台^[46]、伽马成像平台、伽马活化平台以及 2 套低本底高纯锗谱仪^[14,15]. 伽马活化平台也可以开展伽马活化方法与其他实验方法的联合实验研究, 如光中子测量与伽马活化的同时开展. 基于 SLEGS 的伽马活化方法可对伽马束流量、医用同位素光核反应截面、核天体物理关键相关的光核反应截面等开展研究, 将为我国光核反应截面数据库^[47,48] 建设和医学应用等方面作出重要贡献.

近些年随着激光康普顿散射伽马源技术和探测技术的发展, 伽马活化数据测量准确度有了进一步的提高, 未来的发展将会聚焦于以下方面: 1) 智能化、多技术融合与工业应用深化, 结合蒙特卡罗

仿真与机器学习算法, 优化束流配置、提升元素识别精度, 降低背景噪声干扰; 2) 实现样品批量辐照、测量全流程集成, 减少人工干预, 提高分析效率; 3) 实现多探测器融合应用与能谱解析, 如采用溴化镧+锗酸铋组合技术, 解决单一探测器在高低能段的探测效率瓶颈, 实现全谱段元素同步分析; 4) 配合先进的数据处理方法 (如降噪预处理、后处理算法) 提升特征峰提取可靠性, 减少伪峰影响. 尽管有了长足的发展, 但是伽马活化分析技术的挑战依旧在, 仍需解决复杂样品下的元素干扰、小型化设备成本控制及远程运维等问题, 未来将更依赖人工智能 (artificial intelligence, AI) 与多学科交叉创新^[49].

数据可用性说明

本研究成果的数据集可在科学数据银行 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00194> 中访问获取.

感谢上海同步辐射光源加速器运行部及束线工程部的大力支持.

参考文献

- [1] Segebade C, Berger A (Meyers R A (Ed.)) 2008 *Photon Activation Analysis* (Hoboken: Wiley)
- [2] Segebade C, Starovoitova V N, Borgwardt T, Wells D 2017 *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **312** 443
- [3] Gaudin A M, Pannell J H *Anal. Chem.* **23** 1261
- [4] Erhard M A 2013 *Ph.D. Dissertation* (Dresden: Dresden University of Technology)
- [5] Avino P, Capannes G, Lopez F, Rosada A 2013 *Sci. World J.* **458793** 1
- [6] Tai R Z, Zhao Z T 2022 *J. Phys.: Conf. Ser.* **2380** 012004
- [7] Tai R Z, Zhao Z T 2024 *Nucl. Sci. Tech.* **35** 137
- [8] Wang H W, Fan G T, Liu L X, Cao X G, Li W, Zhang Y, Hu X R, Li X X, Wang J W, Lu T S, Huang B S, Hao Z R, Kuang P, Huang Y H 2020 *Nucl. Phys. Rev.* **37** 53 (in Chinese) [王宏伟, 范功涛, 刘龙祥, 曹喜光, 李薇, 张岳, 胡新荣, 李鑫祥, 王俊文, 鲁同所, 黄勃松, 郝子锐, 匡攀, 黄玉华 2020 原子核物理评论 **37** 53]
- [9] Wang H W, Fan G T, Liu L X, Xu H H, Shen W Q, Ma Y G, Utsunomiya H, Song L L, Cao X G, Hao Z R, Chen K J, Jin S, Yang Y X, Hu X R, Li X X, Kuang P 2022 *Nucl. Sci. Tech.* **33** 87
- [10] Liu L X, Wang H W, Fan G T, Xu H H, Zhang Y, Hao Z R, Li A G 2024 *Nucl. Sci. Tech.* **35** 111
- [11] Hao Z R, Fan G T, Wang H W, Liu L X, Xu H H, Utsunomiya H, Cao X G, Xu B J, Song L L, Hu X R, Li X X, Yang Y X, Kuang P 2021 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **1013** 165638
- [12] Hao Z R, Fan G T, Wang H W, Xu H H, Liu L X, Song L L, Hu X R, Li X X, Kuang P, Jin S 2022 *Nucl. Instrum.*

Methods Phys. Res. B 519 9

- [13] Xu H H, Fan G T, Wang H W, Utsunomiya H, Liu L X, Hao Z R, Wu H L, Song L L, Zhang Q L, Jiang B C, Hu X R, Li X X, Kuang P, Yang Y X, Jin S 2022 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **1033** 166742
- [14] Yang Y X, Zhang Y, Zhao W J, Wang H W, Fan G T, Xu H H, Liu L X, Hao Z R, Li Z C, Jin S, Chen K J, Jiao P, Zhou M D, Wang Z W 2024 *Nucl. Phys. Rev.* **41** 433 (in Chinese) [杨宇萱, 张岳, 赵维娟, 王宏伟, 范功涛, 许杭华, 刘龙祥, 郝子锐, 李志才, 金晟, 陈开杰, 焦普, 周梦蝶, 王振伟 2024 原子核物理评论 **41** 433]
- [15] Yang Y X, Zhang Y, Li Z C, Hao Z R, Jin S, Chen K J, Wwang Z W, Sun Q K, Fan G T, Xu H H, Liu L X, Zhao W J, Wang H W 2025 *Nucl. Sci. Tech.* **36** 80
- [16] Li Z C, Yang Y, Cao Z W, Li X X, Yuan Y, Zhao Z Q, Fan G T, Wang H W, Luo W 2023 *Nucl. Sci. Tech.* **34** 170
- [17] Li Z C, Yang Y X, Luo W, Fan G T, Wang H W, Liu L X, Hao Z R, Xu H H, Li X X, Yuan Y, Zhang Y, Jin S, Chen K J, Jiao P, Zhou M D, Wang Z W, Sun Q K, Ye S, Xu R R, He C Y 2025 *Nucl. Instr. and Meth. B* **559** 165595
- [18] Zhang H, Zhang L Y, He J J, Ma Y G 2025 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **55** 250005 (in Chinese) [张昊, 张立勇, 何建军, 马余刚 2025 中国科学: 物理学 力学 天文学 **55** 250005]
- [19] Pang X, Sun B H, Zhu L H, Lu G H, Zhou H B, Yang D 2023 *Nucl. Sci. Tech.* **34** 187
- [20] Yang Y X, Zhao W J, Cao X G, Wang H W, Fan G T, Liu L X, Xu H H, Hu X R, Li X X, Hao Z R, Jin S, Chen K J, Ma Y G 2024 *Radiat. Phys. Chem.* **218** 111599
- [21] Sun Z J 2018 *Nucl. Sci. Tech.* **29** 155
- [22] Liu L X, Utsunomiya H, Fan G T, Xu H H, Wang H W, Hao Z R, Zhang Y, He C Y, Jiao P, Ye S, Jin S, Chen K J, Yang Y X, Sun Q K, Wang Z W, Li Z C, Zhou M D, Lu X, Yang C, Lu F, Cao X G 2024 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A* **1063** 169314
- [23] Hao Z R, Fan G T, Wang H W, Liu L X, Xu H H, Zhang Y, Yang Y X, Jin S, Chen K J, Li Z C, Jiao P, Sun Q K, Zhou M D, Ye S, Wang Z W, Shen W Q, Ma Y G 2025 *Sci. Bull.* **70** 2591
- [24] Arnould M, Goriely S 2003 *Phys. Rep.* **384** 1
- [25] Rayet M, Arnould M, Hashimoto M, Prantzos N, Nomoto K 1995 *Astron. Astrophys.* **298** 517
- [26] Travaglio C, Röpke F, Gallino R, Hillebrandt W 2011 *Astrophys. J.* **739** 93
- [27] Dietrich S S, Berman B L 1988 *At. Data Nucl. Data Tables* **38** 199
- [28] Vogt K, Mohr P, Babilon M, Bayer W, Galaviz D, Hartmann T, Hutter C, Rauscher T, Sonnabend K, Volz S, Zilges A 2002 *Nucl. Phys. A* **707** 241
- [29] Goko S, Utsunomiya H, Goriely S, Makinaga A, Kaihori T, Hohara S, Akimune H, Yamagata T, Lui Y W, Toyokawa H, Koning A J, Hilaire S 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 192501
- [30] Koning A, Hilaire S, Goriely S 2023 *Eur. Phys. J. A* **59** 131
- [31] Rauscher T, Thielemann F K 2000 *At. Data Nucl. Data Tables* **75** 1
- [32] Reimers P, Lutz G J, Segebade C 1977 *J. Radioanal. Chem.* **39** 93
- [33] Borgwardt T C 2018 *Proceedings: 1st International Electronic Conference on Geosciences, (IECG 2018)* **564** 1
- [34] Sun Z J, Wells D P, Segebade C, Maschner H, Benson B 2013 *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **296** 293
- [35] Sun Z J, Okafor K, Isa S 2017 *Appl. Radiat. Isot.* **127** 173
- [36] Sun Y M, Xu X, Tang W Y, Chang Y, Lu J B, Zhao L, Liu Y M 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 082801 (in Chinese) [孙远明, 许旭, 唐婉月, 常艺, 陆景彬, 赵龙, 刘玉敏 2019 物理学报 **68** 082801]
- [37] Sun X J, Zhou F Q, Song Y L, Li Y, Ji P F, Chang X Y 2019 *Chin. Phys. Lett.* **36** 112501
- [38] He S K, Qi W, Jiao J L, Dong K G, Deng Z G, Teng J, Zhang B, Zhang Z M, Hong W, Zhang H, Shen B F, Gu Y Q 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 225202 (in Chinese) [贺书凯, 齐伟, 矫金龙, 董克攻, 邓志刚, 滕建, 张博, 张智猛, 洪伟, 张辉, 沈百飞, 谷渝秋 2018 物理学报 **67** 225202]
- [39] Li Z C, Hao Z R, Sun Q K, Shen Y L, Liu L X, Xu H H, Zhang Y, Jiao P, Zhou M D, Yang Y X, Jin S, Chen K J, Wang Z W, Ye S, Li X X, Ma C W, Wang H W, Fan G T, Luo W 2025 *Nucl. Sci. Tech.* **36** 34
- [40] Zhou M D, Hao Z R, Sun Q K, Liu L X, Xu H H, Zhang Y, Jiao P, Li Z C, Luo W, Yang Y X, Jin S, Chen K J, Ye S, Wang Z W, Wang Y T, Wei H L, Fu Y, Yu K, Wang H W, Fan G T, Ma C W 2025 *Phys. Rev. C* **111** 054612
- [41] Jiao P, Hao Z R, Sun Q K, Liu L X, Xu H H, Zhang Y, Zhou M D, Li Z C, Luo W, Yang Y X, Jin S, Chen K J, Ye S, Wang Z W, Wang Y T, Wei H L, Fu Y, Yu K, Wang H W, Fan G T, Ma C W 2025 *Nucl. Sci. Tech.* **36** 66
- [42] Kuang P, Song L L, Cheng K J, Wang H W, Liu L X, Fan G T, Xu H H, Hu X R, Li X X, Hao X R, Yang Y X, Jin S 2023 *Nucl. Phys. Rev.* **40** 2022040 (in Chinese) [匡攀, 宋龙龙, 陈开杰, 王宏伟, 刘龙祥, 范功涛, 许杭华, 胡新荣, 李鑫祥, 郝子锐, 杨宇萱, 金晟 2023 原子核物理评论 **40** 2022040]
- [43] Hao Z R, Fan G T, Liu L X, Wang H W, Zhang Y, Hu X R, Li X X, Wang J W, Kuang P, Ge S Y 2020 *Nucl. Tech.* **43** 110501 (in Chinese) [郝子锐, 范功涛, 刘龙祥, 王宏伟, 张岳, 胡新荣, 李鑫祥, 王俊文, 匡攀, 戈松雨 2020 核技术 **43** 110501]
- [44] Hao Z R, Liu L X, Zhang Y, Wang H W, Fan G T, Xu H H, Jin S, Yang Y X, Li Z C, Jiao P, Chen K J, Sun Q K, Wang Z W, Zhou M D, Ye S, Xu M K, Wang X F, Shen Y L 2025 *Nucl. Sci. Tech.* **36** 183
- [45] Chen K J, Liu L X, Hao Z R, Ma Y G, Wang H W, Fan G T, Cao X G, Xu H H, Niu Y F, Li X X, Hu X R, Yang Y X, Jin S, Kuang P 2023 *Nucl. Sci. Tech.* **34** 47
- [46] Jin S, Hao Z R, Liu L X, Chen K J, Yang Y X, Xu H H, Zhang Y, Sun Q K, Wang Z W, Fan G T, Wang H W 2025 *Nucl. Sci. Tech.* **34** 78
- [47] Liu P, Zhang H Y, Wu X F, Xu R R, Tao X, Tian Y, Jin Y L, Wang J M, Zhang Z, Ge Z G, Shu N C 2024 *Ann. Nucl. Energy* **208** 110745
- [48] Xie J C, Tao X, Xu R R, Tian Y, Xing K, Ge Z G, Niu Y F 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 082501 (in Chinese) [谢金辰, 陶曦, 续瑞瑞, 田源, 邢康, 葛智刚, 牛一斐 2025 物理学报 **74** 082501]
- [49] Mirani F, Calzolari D, Formenti A, Passoni M 2021 **4** 185

SPECIAL TOPIC—Thematic data in nuclear physics: Experimental, theoretical and applied research

Acquisition and application of Shanghai Laser Electron Gamma Source gamma activation data*

YANG Yuxuan¹⁾²⁾ ZHANG Yue^{2)†} SUN Qiankun³⁾⁴⁾ LI Zhicai²⁾⁶⁾
 WANG Hongwei^{2)4)‡} FAN Gongtao²⁾⁴⁾ ZHAO Weijuan^{1)††} HAO Zirui²⁾
 LIU Longxiang²⁾ XU Hanghua²⁾ JIAO Pu²⁾⁷⁾ JIN Sheng³⁾⁴⁾
 CHEN Kaijie⁵⁾ WANG Zhenwei³⁾⁴⁾ ZHOU Mengdie²⁾⁷⁾ XU Mengke³⁾⁴⁾
 WANG Xiangfei³⁾⁴⁾ CHEN Yulong²⁾⁶⁾ DING Jiawen³⁾⁴⁾

1) (*School of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*)

2) (*Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China*)

3) (*Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

4) (*University of Chinese Academy of Science, Beijing 101408, China*)

5) (*School of Physical Science and Thchnology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China*)

6) (*School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China*)

7) (*School of Physics, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China*)

(Received 4 September 2025; revised manuscript received 20 October 2025)

Abstract

Gamma activation analysis (GAA) is a powerful elemental analysis technique, particularly suitable for light elements and those insensitive to thermal neutron activation. The establishment of the Shanghai Laser Electron Gamma Source (SLEGS) beamline has provided a unique platform in China for conducting advanced gamma activation studies using quasi-monochromatic gamma beams and obtaining high-precision nuclear data. In this paper, the gamma activation data measurement method and experimental setup developed at the SLEGS beamline are systematically presented, while demonstrating its specific applications and significant achievements in beam diagnostics and nuclear astrophysics research. This study is conducted at the SLEGS beamline. The SLEGS generates tunable quasi-monochromatic gamma beams in an energy range of 0.66–21.7 MeV through the inverse Compton scattering mode of a 3.5 GeV electron beam and a 10.64 μm CO₂ laser. The experimental procedure begins with the online irradiation of target samples such as natural abundance Au, Zn and Ru/Ga, thereby generating radioactive nuclei through photonuclear reactions. During irradiation, beam monitoring is conducted using LaBr₃(Ce) or BGO detectors in conjunction with spectral unfolding. Subsequently, offline γ -ray spectroscopy is performed on the activated samples using shielded HPGe detectors. Based on these measurements, the reaction cross-sections are ultimately determined by analyzing characteristic gamma peaks, beam parameters, and detector efficiency data.

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12388102, U2441221, 12275338), the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2022YFA1602404, 2023YFA1606901), and the Shanghai Oriental Talents-Leading Project, China (Grant No. LJ2024080).

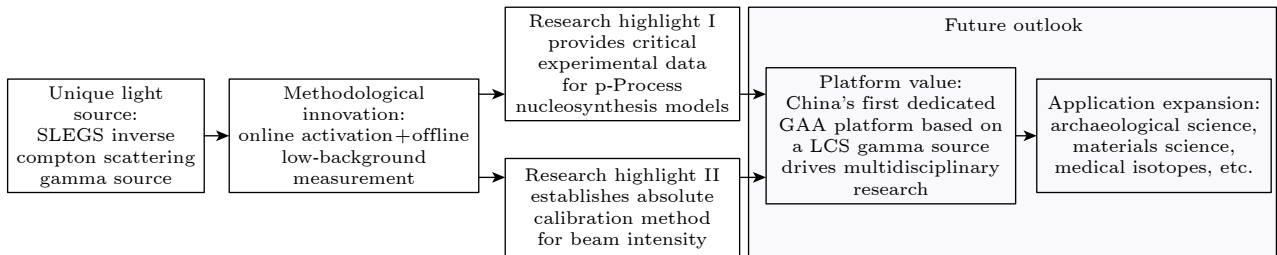
† Corresponding author. E-mail: zhangyue2023@sari.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: wanghw@sari.ac.cn

†† Corresponding author. E-mail: zwj@zzu.edu.cn

Absolute calibration of SLEGS gamma beam intensity is successfully achieved using $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{196}\text{Au}$ and $^{64}\text{Zn}(\gamma, n)^{63}\text{Zn}$ reactions. The measured results agree with online monitor data and Geant4 simulations within an uncertainty of 10%, thereby validating activation as a reliable beam diagnostic tool. Key photonuclear reaction cross-sections relevant to p-process nucleosynthesis are measured. Using natural abundance Ru targets, preliminary quasi-monoenergetic cross-section data are obtained for $^{96}\text{Ru}(\gamma, n)^{95}\text{Ru}$, $^{96}\text{Ru}(\gamma, p)^{95}\text{Tc}$ and $^{98}\text{Ru}(\gamma, n)^{97}\text{Ru}$ reactions. Systematic measurements of the $^{69}\text{Ga}(\gamma, n)^{68}\text{Ga}$ monoenergetic reaction cross-section are performed. The experimental data constrain parameters in the TALYS nuclear reaction model, enabling the calculation of $^{69}\text{Ga}(\gamma, n)$, (γ, p) , and (γ, α) reaction rates over 1.5–10 GK temperature range. REACLIB-format parameters are derived for astrophysical network calculations. These experimental results provide crucial constraints for understanding the origin of *p*-nuclei.

This study successfully establishes a comprehensive and reliable gamma activation data acquisition and analysis platform at the SLEGS beamline of Shanghai Synchrotron Radiation Facility. Experimental results show that this platform can not only accurately calibrate gamma beam parameters, but also conduct cutting-edge basic research in nuclear astrophysics, especially in measuring the critical yet challenging photonuclear reaction cross-sections of the p-process. The obtained datasets are crucial for nuclear databases and astrophysical models. Looking ahead, the SLEGS gamma activation platform will broaden its applications to a wider range of fields including characteristic nuclide identification, archaeometry, materials science, and medical isotope production. Low-background gamma data and partial gamma activation data are provided, which can be accessed in the dataset at <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00194>.



Keywords: gamma source, inverse compton scattering, gamma activation, low background measurement

DOI: [10.7498/aps.75.20251208](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251208)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251208](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251208)

上海激光电子伽马源伽马活化数据的获取及应用

杨宇萱 张岳 孙乾坤 李志才 王宏伟 范功涛 赵维娟 郝子锐 刘龙祥 许杭华 焦普 金晟 陈开杰 王振伟
周梦蝶 徐孟轲 王向飞 湛雨龙 丁嘉文

Acquisition and application of Shanghai Laser Electron Gamma Source gamma activation data

YANG Yuxuan ZHANG Yue SUN Qiankun LI Zhicai WANG Hongwei FAN Gongtao ZHAO Weijuan
HAO Zirui LIU Longxiang XU Hanghua JIAO Pu JIN Sheng CHEN Kaijie WANG Zhenwei
ZHOU Mengdie XU Mengke WANG Xiangfei CHEN Yulong DING Jiawen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 020108 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251208

CSTR: 32037.14.aps.75.20251208

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中子诱发伽马产生截面测量中的谱分析技术

Spectral analysis techniques in measuring neutron-induced gamma production cross-section

物理学报. 2024, 73(7): 072901 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231980>

探测器高能伽马效率刻度用放射性核素⁵⁶Co的衰变数据

Decay data of radionuclide ⁵⁶Co for high-energy gamma efficiency calibration of detectors

物理学报. 2025, 74(19): 190601 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250743>

基于变分自编码器的伽马单中子出射反应截面实验数据离群点研究

Outliers identification of experimental (γ , n) reaction cross section via variational autoencoder

物理学报. 2025, 74(8): 082501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241775>

基于微波-电子康普顿背散射的环形正负电子对撞机束流能量测量方案

Circular electron-positron collider beam energy measurement scheme based on microwave-electronic Compton backscattering

物理学报. 2021, 70(13): 131301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202081>

极强激光场驱动超亮伽马辐射和正负电子对产生的研究进展

Research progress of ultrabright γ -ray radiation and electron-positron pair production driven by extremely intense laser fields

物理学报. 2021, 70(8): 085202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202224>