

## 核物理主题数据: 实验、理论与应用专题

## 核天体物理实验数据评价: 现状与挑战\*

南威克<sup>1)</sup> 柳卫平<sup>1)2)3)†</sup> 陈洁<sup>1)</sup>

1) (南方科技大学物理系, 深圳 518055)

2) (中国原子能科学研究院, 核物理研究所, 北京 102413)

3) (锦屏深地前沿科学及暗物质四川省重点实验室, 凉山 615000)

(2025 年 9 月 1 日收到; 2025 年 11 月 6 日收到修改稿)

核反应率数据库是天体核合成与恒星演化建模的关键输入量, 直接影响各类核天体物理过程的计算精度与物理可信度. 近年来, 高分辨  $4\pi$  探测器阵列、新型气体探测器、 $\gamma$ -带电粒子符合测量等先进实验技术在关键核天体物理反应研究中得到广泛应用; 同时, 锦屏深地核天体物理实验平台等地下低本底设施也取得了一系列重要进展. 这些新的低能区实验测量结果, 相较于传统数据库依赖的经验外推或者理论计算, 为关键核反应天体环境温度区间的热核反应率评估提供了更直接的约束, 也为未来数据库的持续优化提供了新的实验支撑. 本文系统回顾了当前主流核反应率数据库——REACLIB, STARLIB, BRUSLIB 等的建库目标、数据结构与典型应用, 梳理了它们在数据库覆盖、拟合方式与误差评价等方面的特征. 这些数据库在推动核反应网络计算标准化进程中发挥了重要作用. 在此基础上, 结合当前核反应率数据库特点, 在元数据存储结构、数据库更新, 以及人员组织形式等方面提出若干方法, 并强调了前沿实验进展对先进数据库构建的重要性.

**关键词:** 核天体物理, 核反应率数据库, 恒星核合成, 地下实验**DOI:** 10.7498/aps.75.20251189**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251189

## 1 引言

在 20 世纪中叶, 核天体物理作为一门交叉学科逐渐兴起, 试图回答“恒星从何处获得能量”, “元素如何在宇宙中合成”等一系列基础性问题, 并推动我们持续努力从宇宙学、星系演化和核物理的角度来理解化学元素的分布<sup>[1]</sup>. 该领域与众多不同且互补的研究方向紧密相连(如图 1 所示), 在理解各类宇宙问题中都发挥着不可替代的作用. 早期的理论研究者, 如 Hans Bethe 和 Fred Hoyle, 通过构建一系列核反应链条, 从理论上揭示了恒星内部能量产生机制和轻元素向重元素的演化路径<sup>[2]</sup>. 然而, 尽管这些模型提供了宇宙演化的重要框架, 其

预测的准确性却严重依赖于反应网络中各个核反应率的输入. 对于带电粒子诱发的核反应, 感兴趣能区通常远低于库仑势垒, 反应截面极小, 是实验室最难测量的物理量之一<sup>[3]</sup>.

在 20 世纪 50—80 年代, 伴随大型加速器的建设与关键实验技术的持续革新, 实验核物理进入快速发展阶段. 1950 年代, 中子飞行时间法测量在 Harwell 电子直线加速器上成体系地开展, 实现了共振参数与截面的系统化获取<sup>[4]</sup>; Caltech 的 Kellogg 静电加速器则积累了大量低能带电粒子反应率数据<sup>[5]</sup>. 自 1965 年起, Brookhaven 的高通量反应堆 (HFBR) 提供稳定的堆基中子束, 为核数据测量与材料研究提供重要平台<sup>[6]</sup>. 1967 年, CERN 建成 ISOLDE 装置并向用户提供在线放射性离子

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12435010, 11490560, 12475120)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2022YFA1602301) 和锦屏深地前沿科学及暗物质四川省重点实验室开放课题 (批准号: YLDC-ZBA-Z2025459) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuwp@sustech.edu.cn

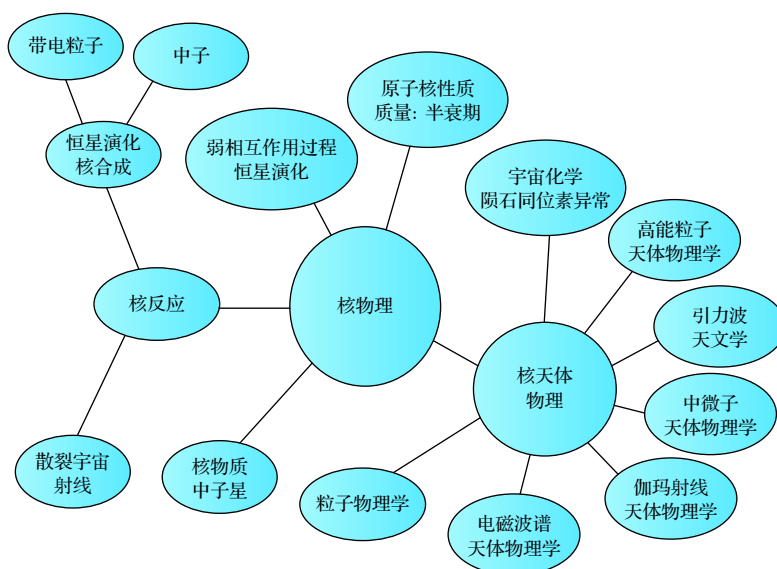


图 1 核天体物理与其他主要物理学领域之间可能联系的示意图展示

Fig. 1. Diagrammatic presentation of possible connections of nuclear astrophysics with other major fields of physics.

束, 系统性地拓展了对远离稳定带短寿命核素的实验研究窗口<sup>[7]</sup>. 随后, 伯克利的 SuperHILAC 与 Bevatron 联合运行形成复合加速器 Bevalac, 再到 GSI 的 UNILAC 相继投运, 并结合 SHIP 分离器的应用, 推动了深度非弹性散射、核转移、聚变-蒸发以及裂变/准裂变等复杂反应机制的系统研究, 同时实现了多种短寿命与超重核素的分离与鉴别<sup>[8]</sup>. 与此并行, 核天体物理实验逐步建立起以活化法和中子飞行时间法为基础的中子俘获测量体系<sup>[9-11]</sup>, 为 s 过程反应率的评估奠定了关键实验基础. 这些实验结果多散见于各类期刊文章之中, 记录格式五花八门, 有的以表格列出, 有的仅附在图像中, 且部分数据点未标明误差信息, 缺乏统一的结构与标准<sup>[12]</sup>.

1967 年, 在冷战阴影下, 国际合作仍悄然推进. 1967 年 8 月, 国际原子能机构 (IAEA) 牵头组织了“四中心”协调会议 (美国、苏联、OECD/NEA 欧洲数据银行及 IAEA/NDS), 启动跨机构核反应数据的试交换, 并以穿孔卡片等介质进行初步实践. 1969 年, “四中心”在莫斯科/奥布宁斯克会议上正式达成 EXFOR (EXchange FORmat) 交换格式协议; 1970 年起以磁带开展定期数据交换, 并于 1971 年实现常态化运作. 正如 19 世纪 Lockyer 创办 Nature 以搭建科学交流平台, EXFOR 的诞生同样是一种“元科学”的进步: 它不只关心研究内容本身, 更致力于保障科研成果的可访问性、可验证性与可复用性. 自此, 核反应实验数据不再停留在分散的论文与附图之中, 而能以统一的交换格式

与可追溯的数据结构进入理论建模者、工程设计者乃至天体物理学家的“工具箱”. EXFOR 以严谨的字段体系与完整的书目信息系统化编录实验核反应数据, 大幅提升了数据共享与复用的效率<sup>[13]</sup>.

然而, EXFOR 所采用的实验数据交换格式虽在保留原始点列与实验细节方面具备独特优势, 却并不直接适用于天体物理中的数值建模需求. 对使用者而言, 其数据结构复杂、缺乏温度网格上的反应率输出, 也未提供便于调用的函数化表达, 难以直接嵌入恒星演化或核合成网络的计算流程. 于是, 一系列以反应率为核心目标的数据库体系应运而生, 它们不再强调逐点实验数据的保留, 而是根据恒星演化与核合成网络模拟的需求, 提供在温度网格上整合出的核反应率形式, 包括可插值的拟合函数 (如 REACLIB)<sup>[14]</sup> 与分温度点的核反应率表格 (如 STARLIB, BRUSLIB)<sup>[3,15,16]</sup>. 部分数据库还提供不确定度传播所需的信息结构, 使其更适用于网络计算中关键核反应的灵敏度分析. 这类“反应率导向型数据库”的发展, 不仅标志着核数据服务对象的拓展和结构设计的转变, 也反映了实验数据精细保真与建模效率之间长期存在的张力. 理解其设计理念、建构方式与适用范围, 对于评估核反应率的可靠性与适用性至关重要. 下文将重点介绍 REACLIB<sup>[14]</sup>、STARLIB<sup>[16]</sup> 等典型数据库的内容特征与其在天体物理研究中的应用, 并结合当前核天体物理研究进展, 探讨核反应率数据库所面临的挑战.

## 2 面向理论建模的核天体物理核反应数据库

REACLIB(Reaction Library) 是核天体物理领域中最先使用的热核反应率数据库之一, 其构建理念最早可追溯至 Fowler 等<sup>[17]</sup>于 1967 年开创性提出的带电粒子反应率表. 该表首次系统整合了天体环境中重要核反应的数据, 对恒星核合成建模产生了深远影响. 然而, 受限于实验装置的灵敏度、束流强度及核素制备难度, 实验数据往往仅覆盖实际建模所需数据空间的一小部分. 因此 REACLIB 数据库既包含实验汇编结果<sup>[17-21]</sup>, 也包括基于壳模型和统计模型(如 NON-SMOKER 代码)<sup>[22]</sup>计算得到的理论预测值, 涵盖质子、 $\alpha$ 、 $n$  诱发的绝大多数稳定和不稳定核反应. 反应率以标准化七参数公式进行表达(见(1)式), 便于在大规模网络计算中直接调用:

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

2000 年以来, 为了将大量新的实验与理论结果及时被纳入热核反应数据库, 以便于不同小组在特定时间点进行模型结果的对比, 美国联合核天体物理研究所(JINA)在 REACLIB 反应率库的基础上更新和发展了一个新的热核反应公用数据库, JINA REACLIB<sup>[14]</sup>. 该数据库的更新以“基于当时可获得文献资料选取最优反应率”为核心标准, 并对现有的实验和理论数据进行充分评估, 以解析函数形式给出所有反应率, 并与文献数值拟合精度优于 5%. 目前, REACLIB V1.0 已经提供了针对氢燃烧与氦燃烧环境的一套更新的反应率库, 后续计划扩展至 s 过程与 r 过程相关的反应率更新, 同时考虑在七参数表达式的基础上增加两个额外项以实现更高的精度和准确性<sup>[14]</sup>.

相对于 REACLIB 数据库的参数化格式, BRUSLIB 数据库<sup>[15,23]</sup>以表格形式提供反应率数据. 该数据库由两个主要部分构成: 第 1 部分以 NACRE<sup>[3]</sup>和 NACRE II<sup>[24]</sup>为核心, 整合了 Iliadis 等<sup>[25]</sup>, 以及 Bao 等<sup>[26]</sup>针对辐射俘获的实验汇编, 给出了一系列具有天体物理意义的核反应率; 第 2 部分则是采用 HF(Hauser-Feshbach) 反应模型,

在  $Z$  从 8 到 110 的核素范围内, 依赖一致的核结构与反应输入, 计算得到大约 10 万个热核反应率, 覆盖  $(n, \gamma)$ ,  $(p, \gamma)$ ,  $(\alpha, \gamma)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(p, \alpha)$ ,  $(\alpha, p)$  等常见反应道及其逆过程. 为确保全库的一致性与可移植性, BRUSLIB 在理论部分采用全局统一的微观核模型链来预测所需的核结构与反应输入(能级密度、 $\gamma$  强度函数、配分函数等), 并在全核素范围内统一光学势<sup>[27,28]</sup>与相关参数设定, 为实验数据稀缺核区的网络计算提供连续、可直接调用的输入.

与此同时, STARLIB<sup>[16]</sup>作为下一代通用型核反应率数据库, 与 JINA REACLIB, BRUSLIB 共同构建了当前核天体物理研究的主要数据库体系<sup>[14]</sup>. 与其他数据库相比, STARLIB 除了以表格形式提供反应率外, 还建立了一种定量定义反应率不确定度的新方法<sup>[29,30]</sup>. 在处理热核反应率不确定度时, 总反应率常常包含多个贡献源, 解析误差传播方法很快就会失效, 而通常文章报告的“上下限”只是作者根据经验猜测不确定性的来源, 并不具备统计学上的意义<sup>[16]</sup>. STARLIB 数据库的构建则是基于一种核物理输入量的物理动因概率分布的蒙特卡罗方法. 在蒙特卡罗抽样技术中, 会为计算反应率所涉及的每个量指定特定的概率密度函数: 共振强度采用对数正态分布; 分宽度上限采用 Porter-Thomas 分布. 在为每个输入量选择了概率密度函数之后, 总反应率及其不确定度即可采用标准蒙特卡罗技术给出. STARLIB 通常采用对数正态分布对反应率进行描述, 并提供一个定量指标 (Anderson-Darling 检验统计量), 用以评估对数正态分布近似的可靠性. 最终给出的反应率上下限和推荐值具有严格的统计定义<sup>[29-32]</sup>, 其推荐反应率  $x_{\text{med}}$ , 不确定度 f.u. 与上下限  $x_{\text{low}}$ ,  $x_{\text{high}}$  满足:

$$x_{\text{med}} = \sqrt{x_{\text{low}} \cdot x_{\text{high}}}, \quad \text{f.u.} = \sqrt{\frac{x_{\text{high}}}{x_{\text{low}}}}. \quad (2)$$

天体物理网络计算关心的核反应温度、推荐核反应率和不确定度被整理为 3 列数据, 构成了 STARLIB 的基本表格结构, 便于直接嵌入模型代码或者与其他数据库进行对比. 这种不确定度的定量估计对于真实模拟恒星现象中的能量产生和核合成过程至关重要<sup>[16]</sup>. 研究发现, 几乎所有反应的热核反应率均发生显著变化<sup>[31]</sup>, 这些变化主要源于全新的蒙特卡罗反应率计算方法<sup>[29]</sup>, 以及近年来获得的新的核物理数据<sup>[32]</sup>.

3 个核天体物理研究的主要数据库 REACLIB, BRUSLIB 以及 STARLIB 的特点归纳见表 1. 其中, REACLIB 解析核反应率形式的优势, 在于对低激发态密度反应的适用性. 比如, 从直接俘获到低激发态共振态, 或不同共振之间的跃迁常常不具备平滑性, 而采用表格插值方法时往往难以准确再现这些“突变点”特征<sup>[15]</sup>. 与此同时, 拟合参数在物理约束下的取值, 使得其适用温度范围得以超出拟合区间, 并具备一定的“物理合理性”<sup>[36,37]</sup>. 在实验数据方面, BRUSLIB 数据库所覆盖的 NACRE, 则对之前 CF88 汇编<sup>[21]</sup>所涉及超过一半的反应率进行认真评估和重新编制, 还包含了一些天体物理意义上具有特殊意义的不稳定核素, 如  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{22}\text{Na}$  和  ${}^{26}\text{Al}$  等, 其 HF 理论计算则更适用于高激发态密度的稳定核素. STARLIB 给出的核反应率不确定度, 相较于 BRUSLIB 的数值上下限, 具备严格的统计意义. 其反应率概率密度函数在基于蒙特卡罗抽样的全局敏感度分析中可以被直接调用, 从而便于开展网络计算中的关键反应敏感性研究.

除此之外, 一些针对特定反应的项目与大规模理论计算的数据集也在逐步发展, 并作为补充资料被广泛使用. 比如 KADoNiS 项目<sup>[38]</sup>整合了 Bao 等<sup>[26,39]</sup>与 Beer 等<sup>[40]</sup>关于热中子俘获截面的评估结果, 结合后续实验数据, 并提供便捷的网络访问接口. 而自 KADoNiS 项目停止更新近 10 年之后, 全新的在线数据库 ASTRAL(ASTrophysical Rate and rAw data Library)<sup>[41]</sup>被建立, 用于天体物理计算. 该数据库汇集了基于活化法和飞行时间法实验测量结果的中子俘获截面数据, 与 KADoNiS v0.3 数据库<sup>[42]</sup>相比存在一定差异. 这些变化大多源于金参考截面的修订<sup>[43]</sup>, 但也有部分核素是首次通过实验测量获取数据, 从而代替之前的理论估计(如  ${}^{36}\text{Ar}$  和  ${}^{38}\text{Ar}$ ). 与此同时, 基于核反应计算程序 TALYS 理论计算的数据库 TENDL-astro<sup>[44]</sup>则着眼于评估不同反应模型的影响(如能级密度、 $\gamma$  强度函数、光学模型等), 以更全面地研究模型不

确定性.

### 3 现代核天体物理前沿研究进展与核反应率数据库

天体物理核反应率数据库的先进性在很大程度上依赖于前沿实验技术的发展与测量数据的不断更新. 近年来, 高分辨  $4\pi$  立体角探测器阵列、新型气体探测器、超导螺线管、冷靶反冲动量谱仪(COLTRIMS)<sup>[45]</sup>,  $\gamma$ -带电粒子符合测量等多种先进实验技术得以广泛应用, 显著地拓展了对核天体物理关键核反应的研究能力. 与此同时, 随着深地实验的快速发展, 在极低本底环境下实现天体物理关键核反应的直接测量已成为可能, 这在伽莫夫能区实验核反应率数据的获取开辟了新的机遇. 这些前沿核天体物理实验结果的不断涌现, 使得在以往仅能依赖 REACLIB 等数据库进行理论外推的能区, 逐渐具备了实验数据锚点. 本节将综述近年来在核天体物理实验测量技术与研究方法上的若干新进展, 并介绍当前研究的前沿热点——深地核天体物理实验的发展态势. 此外, 还将概述关键核反应的最新实验测量结果及其与 REACLIB 等数据库理论计算结果的对比情况, 介绍反应率数据变化对天体模型中的潜在影响, 为直观了解传统核反应率数据库理论外推的不确定性提供参考.

#### 3.1 核天体物理实验方法与探测技术前沿

##### 3.1.1 新型大立体角 $\gamma$ 探测器

随着数字化采集系统(DAQ)的飞速发展, 现代核物理实验已能同时高效处理成百上千通道的探测器信号, 并支持复杂的触发逻辑与精确的时间分辨分析. 近年来, 其在核物理实验中的普及最终催生了  $4\pi$  模块化  $\gamma$  探测器阵列的发展. 而实验上  $\gamma$  全吸收谱测量的可行性, 则进一步为采用  $\beta$ -Oslo 方法开展一系列放射性重离子中子俘获截面研究奠定基础<sup>[46]</sup>.

表 1 3 种主要核反应率数据库的表达方式与特点

Table 1. Expression methods and characteristics of three major nuclear reaction rate databases.

数据库	数据格式	数据库特点
REACLIB	七参数解析表达式	解析形式统一, 适用于大规模恒星演化与核合成网络(如XNet <sup>[33]</sup> , MESA <sup>[34]</sup> , Kepler <sup>[35]</sup> ), 通常不直接提供反应率不确定度信息.
BRUSLIB	表格化(温度 vs. 核反应率)	包含基于实验的汇编(如NACRE/NACREII)与大规模Hauser-Feshbach(HF)预测两部分; 在质量数 $>40$ , 且位于接近稳定核素带区域的复合核研究中更为可靠 <sup>[15]</sup> .
STARLIB	表格化(温度 vs. 核反应率 vs. 反应不确定度)	提供特定温度下每个反应率的概率密度函数, 严格定义反应率不确定度 <sup>[29]</sup> , 便于开展核反应的蒙特卡罗全局敏感度分析 <sup>[16]</sup> .

在传统的 Oslo 方法中, 实验利用核反应 (如  $(p, p')$ ,  $(d, p)$ ,  $(^3\text{He}, \alpha)$  等) 激发原子核, 最终得到末态核  $E_x$ - $E_\gamma$  矩阵.  $\beta$ -Oslo 方法则采用  $\beta$  衰变的方法布居到目标核的高激发态, 从  $E_x$ - $E_\gamma$  矩阵 (见图 2(c)) 出发求解初代  $\gamma$  射线谱, 最终得到核能级密度 (NLD) 与  $\gamma$  射线强度函数 (gSF). 国际上, Spyrou 等<sup>[47]</sup> 近期使用  $\beta$ -Oslo 方法开展了  $^{59}\text{Fe}$  中子俘获截面研究. 天体环境中 Fe 及其同位素的反应路径见图 2(a), 现有研究表明  $^{59}\text{Fe}(n, \gamma)^{60}\text{Fe}$  热核反应率是天体物理网络计算银河系中长寿期放射性同位素  $^{60}\text{Fe}$  和  $^{26}\text{Al}$  比值的重要输入. 实验时, 包含基态 ( $J^\pi = 1^+$ ) 和同核异能态 ( $J^\pi = 4^+$ ) 的  $^{60}\text{Mn}$  放射性束被注入到面垒型 Si 探测器,  $\beta$  衰变剩余核发射的  $\gamma$  加合谱由 SuN (Summing NaI(Tl)) 探测器探测, 其中  $^{60}\text{Fe}$  部分能级见图 2(b). 实验所得的 gSF 相较于之前的测量结果具有显著的低能增益效应, 这导致  $^{59}\text{Fe}(n, \gamma)^{60}\text{Fe}$  反应的 Maxwell 平均截面 (MACS) 比天体物理模型常用的理论推荐值 (NON-SOMKER)<sup>[22]</sup> 高出 1.5—2 倍, 这一结果反而加大了天文观测值与网络计算预测结果的差异, 提示着大质量恒星模型可能存在问题.

与此同时, 国内研究团队已经成功研制多种配置的大型模块化 BGO 探测器阵列 (LAMBDA), 并提出了一种在地面实验室抑制  $\gamma$  射线探测本底的方法<sup>[48]</sup>. 当结合 mA 量级的高强度束流, 这种低本底  $\gamma$  探测器阵列使在地面实验室研究多种天体物理相关的捕获反应成为可能.

### 3.1.2 新型气体探测器

多重取样电离室 (MUSIC), 活性靶时间投影

室 TPC(AT-TPC), 微结构气体探测器 (MPGD) 等新型气体探测器<sup>[49-51]</sup>, 由于具备高灵活可调性、高探测效率以及轨迹重建能力等若干优点, 已被成功应用于核结构及核天体物理关键反应研究.

2018 年, 在 TRIUMF 的 ISAC 装置上,  $^{11}\text{Be}$  的  $\beta$  延迟质子发射被活性靶时间投影室原型机 (pAT-TPC) 首次直接测得, 并明确了衰变通过  $^{11}\text{B}$  的一个窄共振 ( $\Gamma = 12(5)$  keV,  $J^\pi = (1/2^+, 3/2^+)$ ) 进行<sup>[52]</sup>. 这个 193 keV 能量附近的窄共振正好处于  $^{10}\text{Be}(p, \alpha)^7\text{Li}$  Gamow 窗口内, 因此对反应率起主要贡献. 基于更新的  $^{10}\text{Be}(p, \alpha)^7\text{Li}$  反应率, 核心塌缩超新星 (CCSNe) 中  $^{10}\text{Be}$  的产额只有采用 REACLIB 反应率计算结果的 1/33<sup>[53]</sup>.

另一项进展是对  $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$  反应的研究. 该反应是 X 射线暴核合成流中最关键的几个反应之一. 通过将其天体物理模型计算结果与 X 射线暴的观测特征进行比较, 可以揭示中子星系统的性质. 现有研究表明模型计算对若干反应 (包括  $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$ ) 的热核反应速率高度敏感. 2020 年, Hu 等<sup>[54]</sup> 报道了用 AT-TPC 进行  $^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$  反应的首次直接测量, 其结果在广泛温度范围内比先前的间接测量高出数个数量级; 然而, 近期使用 MUSIC 研究该反应低能激发函数的实验显示, 新的反应率比此前直接测量高出约 4 倍, 从而使 X 射线暴核合成流的  $^{22}\text{Mg}$  等待点通过  $(\alpha, p)$  反应被直接绕过.

除此之外, 利用逆反应  $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$  对核天体物理“圣杯反应” $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  的低能反应截面进行研究<sup>[55]</sup>, 通过逆运动学方法开展  $^{14}\text{C}$  质子非弹性散

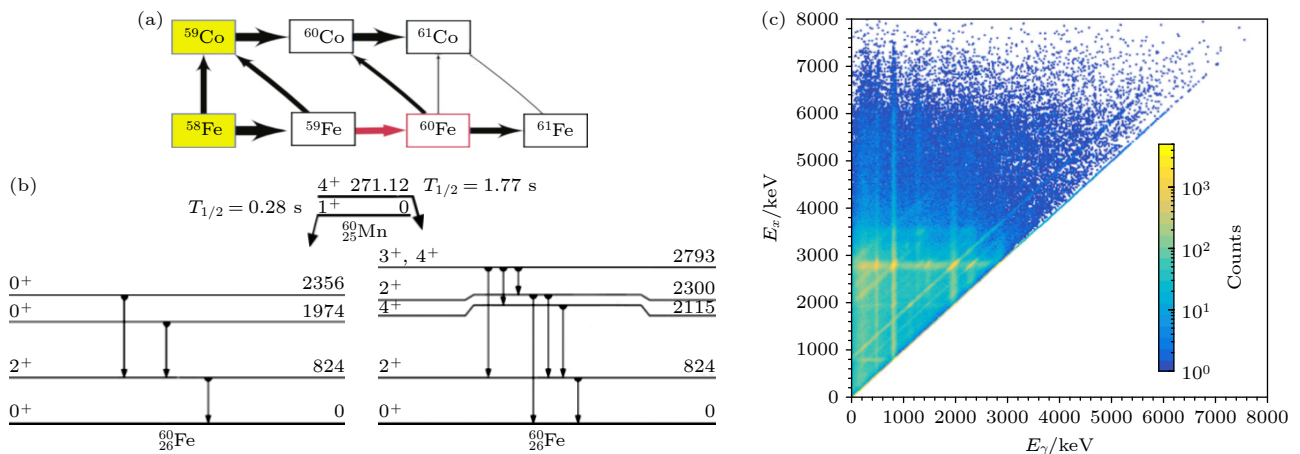


图 2  $^{60}\text{Mn}$  衰变至  $^{60}\text{Fe}$  的部分能级示意图以及  $E_x$ - $E_\gamma$  矩阵<sup>[47]</sup>

Fig. 2.  $E_x$ - $E_\gamma$  matrix and partial level scheme for  $^{60}\text{Fe}$  populated following the  $\beta$  decay of  $^{60}\text{Mn}$ <sup>[47]</sup>.

射和  $^{12}\text{Be}$  单中子拾取反应的直接核反应测量<sup>[56]</sup>等前沿课题,均已依托 AT-TPC 的全轨迹重建能力实现高精度测量,预期将为氢燃烧后碳氧丰度比精确定量,以及 CNO 循环相关核反应的研究提供重要约束。

### 3.1.3 超导螺线管

阿贡国家实验室 ATLAS 装置的 HELIOS 谱仪,至今已开展大量不稳定核束流的核反应研究.相较于传统的质谱仪,HELIOS 利用超导螺线管提供的强磁场,使轻带电粒子在磁场中沿螺旋轨道传播,能量与初始发射角度解耦,从而能用简单的几何关系重建反应运动学.近期,在该装置上测得的  $^{15}\text{C}$  放射性束的 (p, d) 与 (d, t) 单中子转移反应角分布数据,被用以提取  $^{15}\text{C}$  基态谱因子 (SF) 和渐进归一系数 (ANC). 利用得到的 SF 与 ANC, 计算了天体物理感兴趣能区的  $^{14}\text{C}(n, \gamma)^{15}\text{C}$  反应截面及其反应率. 新结果比最近的直接测量结果低 20%—25% (见图 3), 并导致 AGB 星内区  $^{14}\text{N}$  和  $^{15}\text{N}$  丰度分别增大大约 1.83 倍和 2.00 倍, 将为后续涉及不稳定核的系统性核天体物理反应研究提供重要参考. 这一成果是将传统放射性束核结构研究数据应用于天体物理关键反应截面研究的典型示例. 得益于 ATLAS 装置、北京放射性离子束装置 (BRIF) 以及稀有同位素束设施 (FRIB) 等平台上正在开展的放射性束流实验, 未来可望获得更多高精度实验数据, 从而优化和验证核反应率数据库, 为核天体物理建模提供更可靠的数据支持<sup>[57]</sup>.

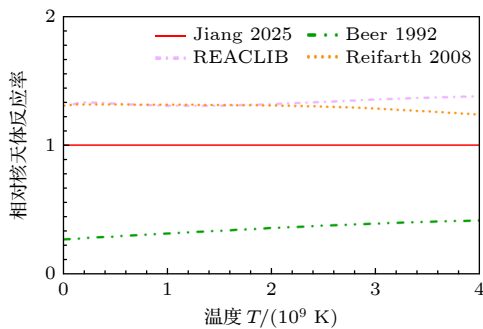


图 3 现有的  $^{14}\text{C}(n, \gamma)^{15}\text{C}$  核反应率数据与间接测量新结果的比较<sup>[52]</sup>

Fig. 3. Ratio of previous  $^{14}\text{C}(n, \gamma)^{15}\text{C}$  reaction rates to the new indirect measurement results<sup>[52]</sup>.

### 3.1.4 $\gamma$ -带电粒子符合测量技术与多通道 R-矩阵分析方法

$\gamma$ -带电粒子符合测量技术是核物理研究中的

一项重要工具. 该技术通过同时测量目标事件的  $\gamma$  射线与带电粒子发射, 能够有效地增强对特定核反应的选择性, 从而提高能量分辨率和减少本底干扰. 然而, 由于  $\gamma$  探测器探测效率限制, 低能直接核反应截面骤降以及本底干扰等问题, 该方法目前仍然难以将若干核天体关键反应直接测量推进到伽莫夫能区. 近年来, 一系列间接方法<sup>[58-60]</sup>被用以研究这些天体物理关键反应的复合核共振参数. 采用这些间接方法, 低能直接测量面临的库仑势垒抑制效应被直接绕过, 极大地提高了相关复合核的产额, 进而得以使用  $\gamma$ -带电粒子符合等传统实验方法对各出射道信息 (激发函数、角分布等) 进行精确测量. 另一方面, 多通道 R-矩阵分析方法的成熟, 使得从不同出射道信息出发, 综合评价复合核共振参数成为可能. 以  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  为例, 近年来其主要的实验进展来自间接测量技术: 20 世纪 90 年代初的  $^{16}\text{N}$   $\beta$ -延迟  $\alpha$  粒子发射实验测量显著降低了 E1 组分的不确定性, 而转移反应测量在 2000 年初大幅降低了 E2 组分的不确定性. deBoer 等<sup>[60]</sup> 结合这些间接测量数据与高低能直接测量数据, 进行多通道 R-矩阵分析, 综合考虑不同数据集并给出最符合物理规律的拟合, 最终使得  $S$  (300 keV) 外推不确定性降低到 20%.

与此同时, 多通道 R-矩阵分析方法也被用于极低库仑势垒能区  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  熔合反应共振参数研究. 该反应直接影响着吸积型中子双星 X 射线超级暴点火深度与温度关系, 并且在高质量恒星演化, Ia 型超新星等众多恒星燃烧场景起重要作用. 2018 年, Tumino 等<sup>[59]</sup> 采用特洛伊木马方法 (THM) 首次对  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  熔合反应在伽莫夫窗口能区进行实验研究, 并给出 4 个出射道  $p_0, p_1, \alpha_0, \alpha_1$  激发函数. 其后续多通道 R-矩阵分析提取的复合核  $^{24}\text{Mg}$  一系列共振参数, 成为  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  熔合反应在伽莫夫窗口内存在强烈共振的直接证据. THM 实验最终得到的  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  熔合反应天体物理  $S^*$  因子见图 4 中的黑色虚线. 相较于 REACLIB 的统计模型外推结果, 新数据预计在 0.4 GK 以下时  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  反应率将增大 800 倍, 最终使得 Ia 型超新星的点燃曲线向更低的中心密度移动. 然而, 考虑库仑相互作用的扭曲波玻恩近似 (DWBA) 给出的  $S^*$  因子与 Tumino 等采用平面波近似 (PWA) 的结果在趋势上截然相反, 经库仑修正给出的  $S^*$  因子在伽莫夫能区内远低于推荐平均值<sup>[21]</sup>.

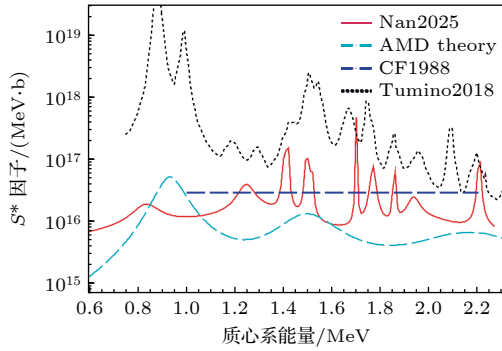


图 4  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  熔合反应天体物理  $S^*$  因子、TTIK 实验<sup>[58]</sup>、数据库编评数据<sup>[21]</sup>、特洛伊木马方法 (THM) 实验数据<sup>[59]</sup>、反对称分子动力学模型计算结果分别用红色实线、深蓝色点划线、黑色虚线、淡蓝色点划线表示

Fig. 4. Astrophysical  $S^*$  factor of the  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  fusion reaction, the results from TTIK experiments<sup>[58]</sup>, evaluated database data<sup>[21]</sup>, THM (Trojan horse method) experimental data<sup>[59]</sup>, and AMD (antisymmetrized molecular dynamics) calculations are represented by the red solid line, dark blue dash-dotted line, black dashed line, and light blue dash-dotted line, respectively.

为了进一步研究复合核  $^{24}\text{Mg}$  的共振参数与出射道分支比, 近期, 厚靶逆运动学方法 (TTIK)<sup>[61,62]</sup> 被用于研究  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  熔合反应在伽莫夫能区的各出射道激发函数<sup>[63]</sup>. 结合  $\gamma$ -带电粒子符合测量技术与多通道 R-矩阵分析方法, 天体物理  $S^*$  因子被独立给出<sup>[58,64]</sup>(见图 4). 从图 4 可知道, 天体物理感兴趣能区内, 不同实验与理论模型推荐的  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  熔合反应  $S^*$  因子仍存在显著差异, 不同间接测量方法的分歧甚至高达几个量级. 然而现有的数据库评价在低能外推时仍普遍使用无共振假设的低能外推<sup>[21]</sup>, 对于伽莫夫能区存在显著低能共振的情形, 这一简化必然导致反应率评估不再准确. 另一方面, 多通道 R-矩阵分析方法提取得到的共振参数, 通过 Breit-Wigner 公式直接计算所得的  $S^*$  因子确实可能系统性偏低, 因为其并未包含非共振贡献和潜在的干涉效应.

### 3.2 深地核天体物理实验

由于部分关键核反应在低能区常伴随高度复杂的共振结构, 而现有数据库通常依赖高能实验数据的经验外推, 或采用缺乏特定共振信息的统计模型计算, 这使其难以为天体物理网络计算提供可靠的数据来源. 基于此背景, 依托地下实验室极低本底环境, 在天体物理感兴趣能区内对关键反应进行高分辨直接测量已成为核天体物理研究的前沿热点.

#### 3.2.1 深地核天体物理实验简介

核天体物理所关注的恒星内部平稳燃烧过程, 多发生于相对低温、低密度的天体环境中. 其相关核反应的能量范围, 即伽莫夫能区远低于库仑势垒, 因此反应截面极小, 尤其在伽莫夫峰附近仅达皮靶至飞靶量级, 对应的探测计数率极低, 从每小时几个计数到最极端情况每年几个计数不等. 在地面实验条件下, 这类极弱信号常被宇宙线本底淹没, 难以实现精确测量. 得益于岩层对宇宙射线的天然屏蔽, 深地实验室在近几十年逐渐发展为开展高灵敏度核天体物理实验的重要平台.

目前, 主要有 3 个实验设施用于深地核天体物理研究: 意大利格兰萨索 (Gran Sasso) 的 LUNA 项目<sup>[65]</sup>、美国桑福德 (Sanford) 的 CASPAR 项目<sup>[66]</sup>, 以及中国锦屏的 JUNA 平台<sup>[67,68]</sup>. 其中, LUNA 作为地下核天体物理研究的先驱, 自 20 世纪 90 年代建立以来已运行 30 余年. 在此期间, LUNA 团队系统开展了多种天体环境下的关键核反应研究, 涵盖了大爆炸核合成 (BBN)、质子-质子链、渐进巨星分支 (AGB) 星中的碳氮氧循环与氦钠循环, 以及 s 过程等. 近期, LUNA 合作组又安装了 LUNA MV 装置, 计划专注于一系列恒星氦燃烧和碳燃烧过程中关键核反应研究; CASPAR 于 2018 年开始全面运行, 是美国唯一的地下加速器实验平台. 目前与圣母大学等科研机构保持紧密合作, 致力于测量原始恒星燃烧反应与恒星中子源反应; JUNA 位于中国锦屏地下实验室 (CJPL-II) A1 实验大厅, 岩层覆盖达 2400 m, 是世界上最深的核天体物理实验平台. CJPL-II A1 实验厅在 2020—2021 年间对外提供临时使用条件, 使得 JUNA 合作组顺利实施第一阶段实验 (JUNA Run-1). 目前合作组已在低能区完成多个关键反应的直接测量. 这些成果覆盖恒星氢/氦燃烧周期中的一系列关键核反应截面数据, 显著突破了长期依赖理论模型外推的局限, 为数据库的改进和天体物理网络计算提供了更可靠的数据支撑.

#### 3.2.2 国外深地核天体物理实验进展

LUNA 所采用的实验技术是利用高强度稳定离子束进行直接测量实验, 这种方法十分适合研究两类天体物理场景: 第 1 类是恒星平稳燃烧阶段, 温度为 0.01—0.1 GK; 第 2 类是温度相对较高 (最高可达 1 GK) 的爆炸性燃烧, 例如 BBN、新星, 或

者超新星爆发 (SN) 前或者过程中发生的核反应阶段. 表 2 为近年来 LUNA 完成的主要核反应研究列表, 主要涉及氢燃烧阶段的 CNO 循环, s 过程中子源相关反应, 以及 BBN. 得益于新安装的 3.5 MV 单端加速器, LUNA 计划致力于更高温度的天体物理场景, 氢燃烧的后续阶段—氦燃烧与碳燃烧, 以及 Ia 型超新星中的爆炸性碳燃烧. 在未来的 5 年内, 将重点研究碳燃烧点火反应  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  融合反应, 其反应速率决定了大质量恒星的最终演化结果——白矮星或是核心塌缩型超新星; 以及 s 过程中子源反应—— $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  和  $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ , 其后续 s 过程将影响铁峰之后约一半元素的生产.

表 2 近 5 年以来 LUNA 关键核反应研究及其对应天体场景

Table 2. Research on key nuclear reactions in LUNA and their corresponding celestial scenarios in the past 5 years.

核反应	天体场景	参考文献
$^2\text{H}(\text{p}, \gamma)^3\text{He}$	BBN	[69]
$^6\text{Li}(\text{p}, \gamma)^7\text{Be}$	原恒星, 宇宙射线和 BBN	[70]
$^{12,13}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{13,14}\text{N}$	CNO 循环起始反应	[71]
$^{17}\text{O}(\text{p}, \gamma)^{18}\text{F}$	CNO 循环	[72]
$^{22}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{26}\text{Mg}$ , $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$	s 过程	[73,74]

CASPAR 一期实验运行到 2021 年左右, 当时为了开挖深地中微子实验 (DUNE) 所需的巨大地下洞穴而暂停. 其主要研究内容包括高效全吸收  $\gamma$  谱仪 (HECTOR) 的测试实验  $^{27}\text{Al}(\text{p}, \gamma)^{28}\text{Si}$ , 原始恒星燃烧反应  $^{10}\text{B}(\alpha, n)^{13}\text{N}$ , 以及 s 过程中子源相关反应  $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$ ,  $^{22}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{26}\text{Mg}$ . 在其代表性成果  $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$  课题中, 主导  $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$  反应速率的 472 keV 和 569 keV 共振强度被首次直接测量, 使其热核反应率在恒星氢燃烧温度范围内降低了  $46^{+6}_{-11}\%$  [75]. 2025 年 7 月, CASPAR 成功点燃加速器离子源, 标志着 CASPAR 深地实验的重新启动.

### 3.2.3 JUNA 实验进展

在国内, 锦屏地下实验室 (CJPL) 的 JUNA 平台已成功开展多项关键反应直接测量, 主要包括宇宙长寿命放射性核素  $^{26}\text{Al}$  生成反应  $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$  [76], 恒星中子源反应  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  [77], 钙元素合成重要反应  $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$  [78], 氟超丰相关反应  $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$  [79], 氦同位素丰度相关反应  $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$  [80], 以及核天

体物理圣杯反应  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ . 这些覆盖恒星氢/氦燃烧周期中的关键核反应截面数据直接测量成果, 将为核数据评价的完善提供重要实验支持, 从而推动天体物理核反应网络模拟的精确化.

以  $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$  与  $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$  为例, 前者对于研究银河系核合成标志性特征 1.809 MeV  $\gamma$  射线至关重要. 在约 0.1 GK 的天体物理温度下,  $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应速率主要由 92 keV 的共振俘获过程主导. 在 JUNA Run-1 实验期间, 合作组对该共振进行精确测量, 推荐的全新  $^{25}\text{Mg}(\text{p}, \gamma)^{26}\text{Al}$  反应率在约 0.1 GK 温度下比 REACLIB 数据库采用的反应率数据高约 2.4 倍 [81], 见图 5(b). 这表明大质量恒星 Mg-Al 循环中将生成更多的  $^{26}\text{Al}$ , 进而极大地提高了银河 1.809 MeV  $\gamma$  特征线的产生率. 图 5(a) 为 JUNA 合作组针对原初恒星钙丰度产生的突破反应  $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$  天体物理能区直接测量结果 [78]. 225 keV 新共振的发现使得最新热核反应率比 NACRE 推荐值高出 7.4 倍. 恒星模型计算结果表明, 氢燃烧过程中突破反应比之前预计更加强烈, 并可能揭示在超低金属丰度恒星 SMSS0313-6708 中观测到的钙的起源.

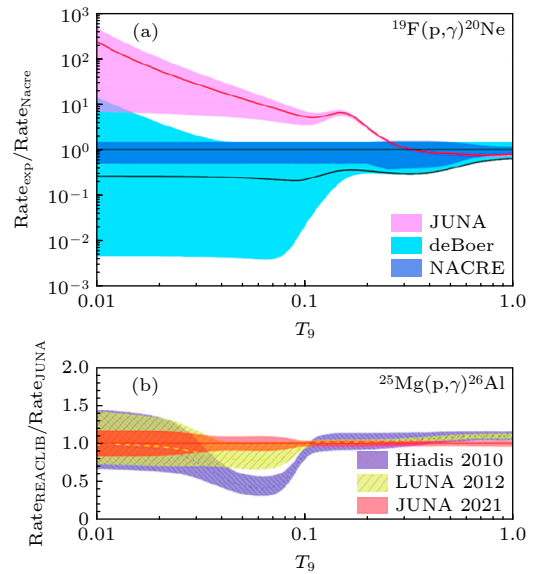


图 5 JUNA 合作组在天体物理感兴趣能区对关键核反应

的直接测量结果 [76,78]  
Fig. 5. The JUNA collaboration's direct measurement results of key nuclear reactions in the astrophysically relevant energy region [76,78].

JUNA Run-1 实验已经展现了在地下实验室中开展核天体物理反应的良好前景. 在 2025 年底即将恢复运行的 JUNA Run-2 中, 计划将使用更

多的束流时间, 更高的束流强度 (约 1 emA), 更耐辐照的实验靶, 以及效率更高的探测器阵列, 将测量能量推进到更低能区, 并覆盖更宽的 Gamow 窗口 [82]. JUNA Run-2 将包含 3 类实验计划: 1) 在 Run-1 的基础上, 把圣杯反应  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  与中子源反应  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  的测量推进到更低能区; 2) 开展新的中子源反应  $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$  与中微子产生反应  $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$  的测量; 3) 针对其他放射性辐射俘获核天体物理反应开展研究. 持续拓展高灵敏低本底探测手段, 在深地实验室开展关键核反应截面于伽莫夫能区的直接测量, 将为构建高精度、可溯源的反应率数据库提供更坚实的实验支撑.

### 3.3 核天体物理关键核反应实验测量与数据库收录

随着核反应探测技术与实验研究方法不断进步, 国内外对核天体物理关键核反应的测量也得到一系列进展. 然而主流的核反应率数据库更新仍存在一定的滞后, 比如 JINA REACLIB 数据库的最近一次更新仍停留在 2021 年 6 月; BRUSLIB 的 NACRE-II 数据库收录数据只截止到 2013 年; STARLIB 需要对核物理量进行概率密度函数的构建, 其涉及的关键核反应仍相对有限. 近年来若干

重要核天体物理反应实验测量及核反应率数据库收录情况见表 3, 其中大量最新测量结果尚未被及时收录, 这一滞后可能对核天体物理相关研究与理论建模产生潜在影响.

## 4 当前核反应率数据库面临的挑战

REACLIB, STARLIB 以及 BRUSLIB 至今仍是天体物理网络计算的首选数据来源. 然而, 随着天体物理网络计算对反应率精度要求的提升, 这些数据库仍面临若干挑战. 一方面, 尽管这些核反应率数据库显著降低了网络建模的使用门槛, 但在数据库单元结构, 数据拟合方式上仍存在优化空间; 另一方面, 实验前沿的突破为传统上只能依赖数据库经验外推或统计模型理论计算的能区提供了实验数据锚点, 然而, 目前核反应率数据库在吸纳和整合最新实验成果方面仍存在滞后, 新数据多以零散形式出现, 尚未实现系统化整合. 本节将围绕现有数据库的优化空间, 以及国际数据库维护的组织形式与改进方向进行简要探讨.

### 4.1 数据库单元结构优化方案探讨

上游评估 (如 NACRE/NACRE II、个别专题评述) 一般会对大量实验细节与分歧进行“吸收与

表 3 近年来若干核天体物理关键核反应实验测量及数据库收录

Table 3. Measurement and database inclusion of several key nuclear reactions in nuclear astrophysics in recent years.

核反应	实验技术	核反应率数据库收录	参考文献
$^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$	地下实验直接测量	REACLIB未更新	[76]
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$	地下实验直接测量	REACLIB未更新	[74,77]
$^{19}\text{F}(p, \gamma)^{20}\text{Ne}$	地下实验直接测量	REACLIB未更新	[78]
$^{19}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$	地下实验直接测量	REACLIB未更新	[79]
$^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$	地下实验直接测量	REACLIB未更新	[75,80]
$^2\text{H}(p, \gamma)^3\text{He}$	地下实验直接测量	REACLIB未更新	[69]
$^{12, 13}\text{C}(p, \gamma)^{13, 14}\text{N}$	地下实验直接测量	REACLIB未更新	[71]
$^{59}\text{Fe}(n, \gamma)^{60}\text{Fe}$	$\beta$ -Oslo方法	REACLIB未更新	[47]
$^{22}\text{Mg}(\alpha, p)^{25}\text{Al}$	MUSIC, AT-TPC	REACLIB未更新	[54,83]
$^{14}\text{C}(n, \gamma)^{15}\text{C}$	超导螺线管	REACLIB未更新	[57]
$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$	THM, TTIK	REACLIB未更新	[58,59]
$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$	ANC	REACLIB未更新	[84,85]
$^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ , $^{22}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{26}\text{Mg}$	转移反应, 直接测量	REACLIB未更新	[86]
$^{39}\text{K}(p, \gamma)^{40}\text{Ca}$	转移反应	STARLIB, REACLIB	[87]
$^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$	镜像核, 转移反应	STARLIB	[88]
$^9\text{Be}(n, \gamma)^{10}\text{Be}$	活化法+AMS	REACLIB	[89]
$^{30}\text{Si}(p, \gamma)^{31}\text{P}$	直接测量	REACLIB	[90]

处理”,但 REACLIB 作为面向网络计算的终端核反应率数据库,通常只保留拟合后的反应率七参数,而不携带核物理实验与数据分析的相关细节.在 REACLIB 里很难直接看到该七参数是基于哪些实验/评估、采用了何种外推假设.如果模型温度恰好位于阈值或者窄共振附近,或要做高温(低温)外推,缺少这些信息就难以判断是否越界使用.另一方面,活化法中子俘获需要产物半衰期、 $\gamma$ 射线分支比等核结构量.一旦这些被新版核结构数据库修订,上游评估会“回到原始数据重算 MACS”.然而如果只有 REACLIB 的终端条目而无具体分析细节,就很难快速重建并替换相关核反应率.与此同时,对于高精度、敏感性或者需要溯源的研究,缺少实验与数据分析细节的缺失,就会成为网络计算建模的实质性限制.

针对现有核反应率数据库,可以考虑加入主要数据来源的文献链接并对各个核反应进行元数据的说明.这种说明主要包含两个方面,即实验细节

与适用范围标注.前者包括相关实验的靶厚与同位素丰度、探测器屏蔽、束流能散、探测器类型/几何/效率标定、误差分解等;而后者则侧重于给出核反应率数据有效温区、最大/均方残差、外推假设、是否包含恒星激发态修正等,其中适用范围的缺失容易导致反应率数据的越界使用或与“逆反应”不一致<sup>[22]</sup>.

这种元数据描述与文献链接的思路在核物理数据库 EXFOR 中也已有所体现.EXFOR 库能够完整地存储实验条件、数值数据及参考文献.由于其最初的设计目标是支持国际核数据中心之间的可靠数据交换,因此采用了固定宽度字符和层级嵌套的文本格式,在程序解析时通常需要一定的预处理步骤.事实上,近期已有研究<sup>[91]</sup>提出将 EXFOR 数据转换为 JSON 或 YAML 等现代数据格式的想法,以提升其程序可访问性和可扩展性.借鉴这种新型的元数据组织思路,核反应率的元数据可按照如下 JSON 存储示例进行构建:

```

reaction: "18O(p, g)19F"
projectile: "p"
target: "18O"
product: "19F"
reaction_type: "radiative_capture"
source:
  reference: "Sallaska, A. L. et al., ApJS 207, 18 (2013)"
  adopted_from: "Buckner, M. Q. et al., Phys. Rev. C 86, 065804(2012)"
related_links:
  - "https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013ApJS..207...18S"
  - "https://doi.org/10.1103/PhysRevC.86.065804"
method:
  evaluation_type: "Monte Carlo"
  uncertainty_distribution: "lognormal"
  data_origin: "STARLIB v6.5 (July 2013)"
experimental_setup:
  laboratory: "Laboratory for Experimental Nuclear Astrophysics (LENA), USA"
  accelerator:
    name: "LENA 1 MV single-ended accelerator"
    beam_energy_keV: [50, 215]
    current_uA: 250
    energy_uncertainty_keV: 1.0
  target:
    composition: "Ta2O5 on Ta backing"

```

```

isotope_enrichment: "99.3% 18O"
thickness_keV: 18.0
detection_system:
  detectors:
    - type: "HPGe"
      relative_efficiency: "135%"
    - type: "NaI(Tl)"
      segments: 16
    - type: "Plastic scintillator paddles"
      role: "Cosmic-ray muon veto"
reaction_rate_data:
  columns: ["T_GK", "low_rate", "median_rate", "high_rate", "lognormal_mu",
    "lognormal_sigma", "Anderson-Darling"]
  data:
    - [0.010, 2.92e-24, 4.97e-24, 8.79e-24, -5.364e+01, 5.49e-01, 7.33e+00]
    - [0.011, 2.58e-23, 4.22e-23, 7.34e-23, -5.149e+01, 5.18e-01, 1.12e+01]
    - [0.012, 1.72e-22, 2.68e-22, 4.47e-22, -4.964e+01, 4.78e-01, 1.63e+01]
    - [0.015, 1.71e-20, 2.32e-20, 3.31e-20, -4.519e+01, 3.40e-01, 2.10e+01]
    - [0.020, 4.82e-18, 6.04e-18, 7.72e-18, -3.964e+01, 2.40e-01, 6.73e+00]
    - [0.050, 9.35e-11, 1.23e-10, 2.06e-10, -2.259e+01, 8.58e-01, 1.07e+03]
    - [0.100, 2.44e-04, 3.24e-04, 4.35e-04, -8.031e+00, 3.05e-01, 6.39e+00]
    - [0.200, 3.39e-01, 4.51e-01, 6.03e-01, -7.97e-01, 2.90e-01, 2.95e-01]
    - [0.500, 1.30e+01, 1.71e+01, 2.27e+01, 2.842e+00, 2.79e-01, 2.91e-01]
    - [1.000, 6.92e+01, 8.17e+01, 9.82e+01, 4.412e+00, 1.79e-01, 1.13e+01]
    - [3.000, 2.80e+03, 3.23e+03, 3.77e+03, 8.086e+00, 1.53e-01, 7.12e+00]
    - [5.000, 6.60e+03, 7.73e+03, 9.35e+03, 8.968e+00, 1.80e-01, 2.77e+01]
    - [10.000, 2.03e+04, 2.46e+04, 2.97e+04, 1.011e+01, 1.90e-01, null]
temperature_range_GK: [0.01, 10.0]
usage_notes:
  - "Rates are valid for stellar environments with T = 0.01 – 10 GK."
  - "Monte Carlo method provides lognormal uncertainty quantification."

```

## 4.2 核反应率的拟合优化

在关键的核天体物理网络计算中, 对反应率精度的要求通常较高. 以 s 过程为例, 相关核反应的反应率精度要求在 5% 以内, 而部分瓶颈和分支点涉及的核素的反应精度要求在 1% 以内<sup>[26]</sup>. 这不仅要求高精度的实验测量数据, 同时也对数据评价方法提出严格的要求. 现有的主流数据库中 NACRE 与 REACLIB 为了优化拟合结果, 针对已有数据分别给出多参数拟合思路. 其中 NACRE 通常把直接俘获与各类共振分开建模, 最后求和得

到总反应率; REACLIB 则直接采用七参数指数式, 见 (1) 式, 尽管允许对同一反应给出多组参数, 但是目前通常不显示标注每项的有效温区和残差.

周勇等<sup>[92]</sup>曾使用 REACLIB 和 NACRE 给出的公式拟合了大量的实验数据, 发现对于某些核反应两者的拟合精度仍不能满足核天体物理网络计算的要求. 为改进拟合效果, 对拟合反应率较敏感的  $T^{7/3}$  等若干项被添加到拟合公式, 对包含多共振的特定反应 (比如  ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ ) 具有较高的拟合精度. 事实上, 反应率数据库优化拟合的呼吁一直存在. 例如, 现行数据库所采用的反应率拟合函

数在特定温度区间内可能产生显著偏差, 建议未来的数据库更新不仅应当细化温度分区, 还应探索更灵活的拟合形式——增加对反应率温度依赖、更复杂的拟合模型(更多参数或非指数型的补充项)以捕捉如低能共振、电子屏蔽、干扰项等影响. 然而, 这些讨论大多停留在白皮书、需求报告或是在会议上被提出, 而非已经被数据库官方采纳全库更新. 由此可见, 未来在核反应率数据库建设中, 如何统筹分段拟合策略与拟合公式背后的物理机制建模, 将成为提高反应率可靠性与物理解释力的重要研究方向.

### 4.3 更新速度与组织方式

当前主流核反应率数据库在更新节奏与数据覆盖范围方面仍存在明显不足. 一方面, 已有数据库对新实验数据的响应普遍滞后, 难以及时反映最新测量进展, 致使部分关键反应率仍长期依赖理论模型外推, 影响反应率在高精度天体物理模拟中的可靠性. 在组织机制上, 国际主要数据库多由欧美研究机构主导构建, 组织规模普遍较小, 依赖少量核心成员维持更新. 以 REACLIB 为例, NSAC-ND (2023) 报告指出, 该库作为由密歇根州立大学管理的小型项目, 其维护能力受限, 曾出现长达数年的更新停滞. 此外, 美国核天体物理数据工作整体缺乏长期、系统的标准化协调机制. 该现状不仅影响了数据共享效率, 也限制了对快速增长的实验数据的吸收与整合能力.

值得注意的是, 当前主流数据库体系中尚缺乏由中国科研团队主导的公共反应率数据库平台. 尽管近年来国内在实验方面取得诸多进展, 例如锦屏地下实验室核天体物理实验平台 (JUNA) 成功测量了多个关键反应, 但这些成果尚未系统融入国际数据库框架. 未来若能推动数据评估、拟合与发布等方面的自主能力建设, 将有助于提升我国在核天体物理数据生态中的贡献度和影响力.

## 5 总结与展望

核天体物理反应率数据库作为连接核物理实验、理论建模与天体演化模拟的桥梁, 近年来在数据覆盖度、计算效率与可获取性方面取得了显著进展. 以 REACLIB, NACRE, STARLIB 与 BRUSLIB 为代表的“反应率导向型数据库”, 在 XNet, MESA

等主流演化与核合成网络中发挥了重要作用, 极大降低了建模门槛. 然而, 在数据库单元标注、实验条件溯源、数据库更新速度等关键方面仍存在亟待解决的问题. 为进一步提升数据库的科学性和先进性, 可以考虑系统记录实验条件, 补充元数据细节; 借助 JUNA, LUNA-MV 等地下加速器平台, 逐步用实验数据替代高不确定度的理论外推, 为瓶颈反应率提供高可信锚点, 显著降低天体演化与核合成模拟的不确定性; 同时, 加强中国数据评价团队与核天体物理工作者在数据库更新与维护中的参与度, 提升更新效率, 物理消除元素丰度计算中的核物理输入量不确定度. 为满足核天体物理前沿研究对精确反应率的需求, 针对关键反应实验数据的实时更新与系统评价, 既是现代核天体物理数据库发展的重要机遇, 也是一项亟待解决的挑战. 展望未来, 随着地下实验平台的持续建设、理论模型的不确定度收敛、实验分析方法的不断改进, 我国应积极参加核天体物理数据库建设的国际合作, 认真发掘我国新产生的核天体物理实验数据, 并与核天体物理数值模拟的科学家合作, 开发更适应的数据评价格式, 与国际核天体物理数据评价团队形成合力, 探索利用人工智能, 得出复杂实验数据的真实权重, 在未来切实减小核物理数据不确定度对天体演化数值模拟中带来的丰度不确定性.

### 参考文献

- [1] Pagel B 1980 *Nature* **286** 744
- [2] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, Hoyle F 1957 *Rev. Mod. Phys.* **29** 547
- [3] Angulo C, Arnould M, Rayet M, Descouvemont P, Baye D, Willain C L, Coc A, Barhoumi S, Aguer P, Rolfs C, Kunz R, Hammer J W, Mayer A, Paradellis T, Kossionides S, Chronidou C, Spyrou K, Innocenti S D, Fiorentini G, Ricci B, Zavatarelli S, Providencia C, Wolters H, Soares J, Grama C, Rahighi J, Shotton A, Rächti M L 1999 *Nucl. Phys. A* **656** 3
- [4] Werrison A W, Wiblin E R 1951 *Nature* **167** 346
- [5] Fowler W A 1969 *Eng. Sci.* **32** 8
- [6] Cease R P 2001 *Hist. Stud. Phys. Biol. Sci.* **32** 41
- [7] Catherall R, Andreatza W, Breitenfeldt M, Dorsival A, Focker G J, Gharsa T P, Giles T J, Grenard J L, Locci F, Martins P, Marzari S, Schipper J, Shornikov A, Stora T 2017 *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **44** 094002
- [8] Burkard K H, Dumanski W, Kirchner R, Klepper O, Roeckl E 1976 *Nucl. Instrum. Methods* **139** 275
- [9] Macklin R L, Gibbons J H, Inada T 1963 *Phys. Rev.* **129** 2695
- [10] Macklin R L, Gibbons J H, Inada T 1963 *Nature* **197** 369
- [11] Lovell A C B, Wilson A, Wiblin D V M 1951 *Nature* **167** 476
- [12] Zerkov V V, Pritychenko B 2018 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **888** 31
- [13] Otuka N, Dupont E, Semkova V, Pritychenko B, Blokhin A I,

- Aikawa M, Babykina S, Bossant M, Chen G, Dunaeva S, Forrest R A, Fukahori T, Furutachi N, Ganesan S, Ge Z, Gritzay O O, Herman M, Hlavac S, Kato K, Lalremruata B, Zhuang Y 2014 *Nucl. Data Sheets* **120** 272
- [14] Cyburt R H, Amthor A M, Ferguson R, Meisel Z, Smith K, Warren S, Heger A, Hoffman R D, Rauscher T, Sakharuk A, Schatz H, Thielemann F K, Wiescher M 2010 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **189** 240
- [15] Aikawa M, Arnould M, Goriely S, Jorissen A, Takahashi K 2005 *Astron. Astrophys.* **441** 1195
- [16] Sallaska A L, Iliadis C, Champagne A E, Goriely S, Starrfield S, Timmes F X 2013 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **207** 18
- [17] Fowler W A, Caughlan G E, Zimmerman B A 1967 *Ann. Rev. Astr. Astro.* **5** 525
- [18] Fowler W A, Caughlan G R, Zimmerman B A 1975 *Ann. Rev. Astr. Astro.* **13** 69
- [19] Harris M J, Fowler W A, Caughlan G R, Zimmerman B A 1983 *Ann. Rev. Astr. Astro.* **21** 165
- [20] Caughlan G R, Fowler W A, Harris M J, Zimmerman B A 1985 *At. Data Nucl. Data Tables* **32** 197
- [21] Caughlan G R, Fowler W A, 1988 *At. Data Nucl. Data Tables* **40** 283
- [22] Rauscher T, Thielemann F K 2000 *At. Data Nucl. Data Tables* **75** 1
- [23] Xu Y, Goriely S, Jorissen A, Chen G L, Arnould M 2013 *Astron. Astrophys.* **549** 106
- [24] Xu Y, Takahashi K, Goriely S, Arnould M, Ohta M, Utsunomiya H 2013 *Nucl. Phys. A* **918** 61
- [25] Iliadis C, D'Auria J M, Starrfield S, Thompson W J, Wiescher M 2001 *Astrophys. J.* **134** 151
- [26] Bao Z Y, Beer H, Käppeler F, VOSS F, WISSHAK K 2000 *At. Data Nucl. Data Tables* **76** 70
- [27] Koning A J, Delaroche J-P 2003 *Nucl. Phys. A* **713** 231
- [28] Demetriou P, Grama C, Goriely S 2002 *Nucl. Phys. A* **707** 253
- [29] Longland R, Iliadis C, Champagne A E, Newton J R, Ugalde C, Coc A, Fitzgerald R 2010 *Nucl. Phys. A* **841** 1
- [30] Iliadis C, Longland R, Champagne A E, Coc A, Fitzgerald R 2010 *Nucl. Phys. A* **841** 31
- [31] Iliadis C, Longland R, Champagne A E, Coc A 2010 *Nucl. Phys. A* **841** 323
- [32] Iliadis C, Longland R, Champagne A E, Coc A 2010 *Nucl. Phys. A* **841** 251
- [33] Hix W R, Thielmann F K 1999 *Astrophys. J.* **511** 862
- [34] Paxton B, Smolec R, Schwab J 2019 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **243** 10
- [35] Woosley S E, Heger A 2007 *Phys. Rep.* **442** 269
- [36] Wagoner R V 1969 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **162** 247
- [37] Woosley S E, Fowler W A, Holmes J A, Zimmerman B A 1978 *At. Data Nucl. Data Tables* **22** 371
- [38] Dillmann I, Heil M, Käppeler F, Plag R, Rauscher T, Thielemann F-K 2006 *Proceedings of the International Conference on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics* Notre Dame, IN, USA, September 4–9, 2005 p123
- [39] Bao Z Y, Käppeler F 1987 *At. Data Nucl. Data Tables* **36** 411
- [40] Beer H, Voss F, Winters R R 1992 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **80** 403
- [41] Vescovi D, Reifarth R, Lorenz E, Elbe A 2023 *EPJ Web Conf.* **279** 11011
- [42] Dillmann I, Plag R, Käppeler F, Rauscher T 2010 *Proceedings of the Scientific Workshop on Neutron Measurements, Theory and Applications-Nuclear Data for Sustainable Nuclear Energy* Geel, Belgium, April 28–30, 2009 p55
- [43] Reifarth R, Erbacher P, Fiebiger S, Göbel K, Heftrich T, Heil M, Käppeler F, Klapper N, Kurtulgil D, Langer C 2018 *Eur. Phys. J. Plus* **133** 424
- [44] Rochman D, Koning A, Goriely S, Hilaire S 2025 *Nucl. Phys. A* **1053** 122951
- [45] Wu Y J, Meng T M, Zhang X W, Tan X, Ma P F, Yin H, Ren B H, Tu B S, Zhang R T, Xiao J, Ma X W, Zou Y M, Wei B R 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 240701 (in Chinese) [吴怡娇, 孟天鸣, 张献文, 谭旭, 马蒲芳, 殷浩, 任百惠, 屠秉晟, 张瑞天, 肖君, 马新文, 邹亚明, 魏宝仁 2024 物理学报 **73** 240701]
- [46] Yang G C, Hua L M, Lu F, Su J, Li Z H, Jin S L, Shen Y P, Guo B 2022 *Nucl. Sci. Tech.* **33** 68
- [47] Spyrou A, Richman D, Couture A, et al. 2024 *Nat. Commun.* **15** 9608
- [48] Song L Y, Wang L, Su J, et al. 2025 *Nucl. Sci. Tech.* **36** 213
- [49] Xu J Y, Yang L S, Li Q T, Ye Y L, Han J X, Bai S W, Gao J 2020 *Atom. Energy Sci. Technol.* **54** 1068 (in Chinese) [许金艳, 阳黎升, 李奇特, 叶沿林, 韩家兴, 白世伟, 高见 2020 原子能科学技术 **54** 1068]
- [50] Lu F H, Tang S W, Fu S W, Yan D, Ma P, Yang H B, Yu Y H, Zhang X H, Wang S T, Zhang Y J, Fang F, Liu T Q, Xu Y F, Li Z, Liu X M, Wei X B, Sun Z Y 2024 *Nucl. Phys. Rev.* **32** 460 (in Chinese) [卢奋华, 唐述文, 傅圣威, 闫锋, 马朋, 杨海波, 余玉洪, 章学恒, 王世陶, 张永杰, 方芳, 刘拓琦, 徐颖锋, 李治, 刘相满, 魏啸宝, 孙志宇 2024 原子核物理评论 **32** 460]
- [51] Fan S N, Wang B, Qi H R, Liu M, Zhang Y L, Zhang J, Liu R G, Yi F T, Ouyang Q, Chen Y B 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 122901 (in Chinese) [范胜男, 王波, 祁辉荣, 刘梅, 张余炼, 张建, 刘荣光, 伊福廷, 欧阳群, 陈元柏 2013 物理学报 **62** 122901]
- [52] Ayyad Y, Olaizola B, Mittag W, et al. 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 082501
- [53] Sieverding A, Randhawa J S, Zetterberg D, deBoer R J, Ahn T, Mancino R, Martínez-Pinedo G, Hix W R 2022 *Phys. Rev. C* **106** 015803
- [54] Hu J, Yamaguchi H, Lam Y H, et al. 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 172701
- [55] Gai M 2022 *EPJ Web Conf.* **260** 01005
- [56] Ayyad Y, Bazin D, Bonaiti F, et al. 2025 *Front. Phys.* **13** 1539148
- [57] Jiang Y, He Z, Luo Y, Xin W, Chen J, Li X, Shen Y, Guo B, Li G, Pang D, Ma T, Nan W, Kajino T, Liu W 2025 *Astrophys. J.* **989** 231
- [58] Nan W K, Wang Y B, Su J, Sheng Y D, deBoer R J, Zhang Y Q, Song L Y, Cao F Q, Chen C, Dong C, Li Y J, Li Z H, Lian G, Nan W, Shen Y P, Song N, Yan S Q, Zeng S, Guo B, Liu W P 2025 *Phys. Lett. B* **862** 139341
- [59] Tumino A, Spitaleri C, La Cognata M, Cherubini S, Guardo G L, Gulino M, Hayakawa S, Indelicato I, Lamia L, Petruscu H, Pizzone R G, Puglia S M R, Rapisarda G G, Romano S, Sergi M L, Spartá R, Trache L 2018 *Nature* **557** 687
- [60] deBoer R J, Görres J, Wiescher M, Azuma R E, Best A, Brune C R, Fields C E, Jones S, Pignatari M, Sayre D, Smith K, Timmes F X, Uberseder E 2017 *Rev. Mod. Phys.* **89** 035007
- [61] Wang Y B, Qin X, Wang B X, Liu W P, Li Z H, Bai X X, Lian G, Guo B, Zeng S, Su J, Li Y J, Jiang C 2009 *Chin. Phys. C* **33** 181
- [62] Qin X, Wang Y B, Bai X X, Guo B, Jiang C, Li Y J, Li Z H, Lian G, Su J, Wang B X, Zeng S, Liu W P 2008 *Chin. Phys. C* **32** 957
- [63] Nan W K, Wang Y B, Sheng Y D, Su J, Zhang Y Q, Song L

- Y, Shen Y P, Cao F Q, Chen C, Dong C, Li Y J, Li Z H, Lian G, Nan W, Wang Q, Song N, Yan S Q, Zeng S, Fan Q W, Zhang H, Zhu M H, Guo B, Liu W P 2024 *Nucl. Sci. Tech.* **35** 208
- [64] Nan W K, Wang Y B, Shen Y P, Li Y J, Guo B, Liu W P 2025 *Nucl. Phys. Rev.* **42** 199 (in Chinese) [南威克, 王友宝, 谌阳平, 李云居, 郭冰, 柳卫平 2025 原子核物理评论 **42** 199]
- [65] Broggini C, Bemmerer D, Cacioli A, Trezzi D 2018 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **98** 55
- [66] Robertson D, Couder M, Greife U, Strieder F, Wiescher M 2016 *EPJ Web Conf.* **109** 09002
- [67] Liu W P, Li Z H, He J J, et al. 2016 *Sci. China Phys. Mech. Astron.* **59** 642001
- [68] Liu W P 2023 *Chin. Phys. Lett.* **40** 060401
- [69] Mossa V, Stöckel K, Cavanna F, et al. 2020 *Nature* **587** 210
- [70] Piatti D, Chillery T, Depalo R, et al. 2020 *Phys. Rev. C* **102** 052802(R)
- [71] Skowronski J, Boeltzig A, Ciani G F, et al. 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 162701
- [72] Pantaleo F R, Boeltzig A, Best A, et al. 2021 *Phys. Rev. C* **104** 025802
- [73] Piatti D, Masha E, Aliotta M, et al. 2022 *Eur. Phys. J. A* **58** 194
- [74] Ciani G F, Csedreki L, Rapagnani D, et al. 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 152701
- [75] Dombos A C, Robertson D, Simon A, Kadlecsek T, Hanhardt M, Görres J, Couder M, Kelmar R, Olivás-Gomez O, Stech E, Strieder F, Wiescher M 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 162701
- [76] Su J, Zhang H, Li Z H, et al. 2022 *Sci. Bull.* **67** 125
- [77] Gao B, Jiao T Y, Li Y T, et al. 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 132701
- [78] Zhang L Y, He J J, deBoer R J, et al. 2022 *Nature* **610** 656
- [79] Zhang L Y, Su J, He J J, et al. 2022 *Phys. Rev. Lett.* **127** 152702
- [80] Wang L H, Su J, Shen Y P, et al. 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 092701
- [81] Straniero O, Imbriani G, Strieder F, et al. 2013 *Astrophys. J.* **763** 100
- [82] Liu W P, Guo B, An Z, et al. 2024 *Nucl. Sci. Tech.* **35** 217
- [83] Randhawa J S, Ayyad Y, Mittig W, et al. 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 202701
- [84] Nan W, Shen Y P, Guo B, et al. 2024 *Phys. Rev. C* **109** 045808
- [85] Shen Y P, Guo B, deBoer R J, et al. 2022 *Phys. Rev. Lett.* **124** 162701
- [86] Wiescher M, deBoer R J, Görres J 2023 *Eur. Phys. J. A* **59** 11
- [87] Longland R, Dermigny J, Marshall C 2018 *Phys. Rev. C* **98** 025802
- [88] Mohr P, Longland R, Iliadis C 2014 *Phys. Rev. C* **90** 065806
- [89] Wallner A, Bichler M, Coquard L, et al. 2019 *Phys. Rev. C* **99** 015804
- [90] Dermigny J, Iliadis C, Champagne A, Longland R 2020 *Phys. Rev. C* **102** 014609
- [91] Okumura S, Schnabel G, Koning A 2024 *EPJ Web Conf.* **292** 12003
- [92] Zhou Y, Li Z H, Zhang H Q 2015 *Atom. Energy Sci. Technol.* **11** 1921 (in Chinese) [周勇, 李志宏, 张海黔 2015 原子能科学技术 **11** 1921]

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

## Evaluation of experimental data in nuclear astrophysics: Status and challenges\*

NAN Weike<sup>1)</sup> LIU Weiping<sup>1)2)3)†</sup> CHEN Jie<sup>1)</sup>

1) (*Department of Physics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China*)

2) (*Institute of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

3) (*Jinping Deep Underground Frontier Science and Dark Matter Key Laboratory of Sichuan Province, Liangshan 615000, China*)

( Received 1 September 2025; revised manuscript received 6 November 2025 )

### Abstract

Nuclear reaction rate databases serve as essential inputs for nucleosynthesis and stellar evolution modeling, directly influencing the accuracy and physical reliability of calculations in various nuclear astrophysics processes. This work comprehensively reviews the major reaction rate databases i.e. REACLIB, STARLIB, and BRUSLIB, highlighting their objectives, data structures, and representative applications, and discussing their coverage, fitting methods, and uncertainty evaluation. These databases have been instrumental in advancing the standardization of nuclear reaction network calculations. However, although these databases have significantly lowered the barrier to performing network modeling, there remains substantial room for improvement in aspects such as database unit structures, update mechanisms, and organizational frameworks. For example, detailed information on the underlying nuclear physics experiments or data analyses is often not included in REACLIB. Therefore, enhancing the stored metadata deserves careful consideration, as it can significantly improve the reliability of astrophysical modeling. At the same time, the advancement of nuclear astrophysics reaction rate databases depends heavily on continuous progress at the experimental frontier. In recent years, innovative experimental techniques, such as novel  $4\pi$  high-resolution detector arrays and  $\gamma$ -charged particle coincidence measurements, have been widely applied to studies of key nuclear astrophysics reactions, significantly expanding research capabilities. To meet the demands of cutting-edge astrophysical studies for accurate reaction rates, the real-time updating and systematic evaluation of experimental data for key reactions present both an important opportunity and an urgent challenge for the development of modern databases. Several important achievements of the JUNA Collaboration at the Jinping underground nuclear astrophysics facility are also presented in this paper, where low-background experiments are conducted. Compared with traditional extrapolations used in databases, these new low-energy measurements are found to provide more direct constraints on key reactions in nuclear astrophysics and crucial experimental support for continuously optimizing databases in the future.

**Keywords:** nuclear astrophysics, nuclear reaction rate database, stellar nucleosynthesis, underground experiment

DOI: [10.7498/aps.75.20251189](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251189)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251189](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251189)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12435010, 11490560, 12475120), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2022YFA1602301), and the Jinping Deep Underground Frontier Science and Dark Matter Key Laboratory of Sichuan Province, China (Grant No. YLDC-ZBA-Z2025459).

† Corresponding author. E-mail: [liuwp@sustech.edu.cn](mailto:liuwp@sustech.edu.cn)

## 核天体物理实验数据评价：现状与挑战

南威克 柳卫平 陈洁

### Evaluation of experimental data in nuclear astrophysics: Status and challenges

NAN Weike LIU Weiping CHEN Jie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 020101 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251189

CSTR: 32037.14.aps.75.20251189

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251189>

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

两个系列铍反射层临界基准实验的一致性分析与核数据检验

Consistency analysis and nuclear data validation for two series of beryllium reflector critical benchmark experiments

物理学报. 2025, 74(6): 062801 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241685>

态选择电荷交换实验测量以及对天体物理软X射线发射模型的检验

Experimental measurement of state-selective charge exchange and test of astrophysics soft X-ray emission model

物理学报. 2021, 70(8): 080702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201685>

HI-13串列加速器上不稳定核 $^{85}\text{Sr}(n, \gamma)$ 截面的替代反应法测量

Measurement of  $^{85}\text{Sr}(n, \gamma)$  cross sections of unstable nuclei in HI-13 tandem accelerators by surrogate-reaction method

物理学报. 2025, 74(13): 132501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250214>

中高能重离子碰撞与核物质状态方程研究

Intermediate/high-energy heavy-ion collisions and nuclear matter equation of state

物理学报. 2025, 74(11): 112101 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241650>

原子核 $\beta$ 衰变寿命经验公式

An empirical formula of nuclear  $\beta$ -decay half-lives

物理学报. 2024, 73(6): 062301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231653>

低密度铝铁金等离子体辐射不透明度数据库

Database of radiation opacity of low-density aluminum, iron and gold plasmas

物理学报. 2025, 74(12): 125202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250301>