

## 数据论文

## 70—250 keV 能区 D-D 聚变反应截面的实验测量\*

孙君杰# 郑普# 肖军 杨杰成 牟云峰 邓春风 韩子杰†  
鹿心鑫 蒋励 朱通华 娄本超

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 中子科学与技术全国重点实验室, 绵阳 621900)

(2025 年 12 月 1 日收到; 2026 年 1 月 26 日收到修改稿)

在中子发生器上开展了 70—250 keV 能区的 D-D 聚变反应截面测量实验. 本次实验使用了可同时对八个角度进行测量的靶室和氘代聚苯乙烯超薄靶, 使用表面钝化粒子注入平面硅 (passivated implanted planar silicon, PIPS) 半导体探测器测量聚变反应带电粒子产物, 使用皮安表测量靶流, 获得了 70—250 keV 能区中六个能点上的 D-D 聚变反应微分截面. 使用勒让德多项式对质心系微分截面进行拟合, 通过总截面计算公式计算出总截面数据. 基于本次实验获得的微分截面和总截面数据, 与历史实验数据和 ENDF/B-VIII.0 数据库的评价数据进行了比较. 通过总截面实验数据, 计算出天体物理  $S$  函数, 并与历史数据进行了比较. 本工作进一步丰富了 D-D 聚变反应截面的实验数据, 可以为标准大爆炸原子核合成 (standard Big Bang nucleosynthesis, SBBN) 理论的检验和聚变核参数数据评价提供更多的数据支持. 本文数据集可在 <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00243> 中访问获取.

**关键词:** 聚变反应, 截面, 勒让德多项式, 核合成**DOI:** 10.7498/aps.75.20251643**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251643

## 1 引言

氢核聚变反应是核聚变能源领域的主要放能反应, 也是核天体领域研究原初大爆炸核合成过程的重要核反应类型<sup>[1]</sup>. 聚变反应截面数据是聚变堆设计和运行中众多关键参数的计算基础, 也在等离子体理论研究中起到关键作用<sup>[2]</sup>. 在标准大爆炸原子核合成 (standard big bang nucleosynthesis, SBBN) 中, 重子与光子比  $\eta$  是唯一的自由参量<sup>[1,3]</sup>. 随着宇宙微波背景各向异性研究领域取得的进展, 反应率作为核素原初丰度准确测量的输入量, 可以实现对 SBBN 模型的检验<sup>[1,3]</sup>. 其中, 50—350 keV 能区的 D-D 聚变反应是最佳候选者<sup>[3-5]</sup>. 尽管中低能聚变反应截面的实验测量已经有八十多年的历

史, 但 2000 年以后仍不时有新实验数据公布, 也有新实验方法的探索.

核物理学的早期阶段便发现了 D-D 聚变反应和聚变中子、质子产物的各向异性. 很快, 学界便开始了 D-D 聚变截面的实验测量工作. 八十多年来, 已经使用过众多技术路径对 D-D 聚变反应截面进行测量. 这些实验按靶的类型可分为厚靶 (厚冰靶、厚氟化锆靶)、超薄靶 (氟化锆靶、氘代聚苯乙烯靶)、有窗气体靶、无窗气体靶、超音速喷射气体靶等, 按照源可以分为加速器源和 Z 箍缩源, 按能区可以分为低能、中能和高能. 当入射束流能量达到 MeV 级时, 实验所面临的问题与几百 keV 以下的中低能实验不同, 本文不涉及此类实验.

厚靶实验是最早开展的一类实验, 此类实验中截面计算公式为

\* 中子科学与技术全国重点实验室 (批准号: NST20250303) 资助的课题.

# 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: 2717246118@qq.com

$$\sigma(E) = \frac{1}{A} \frac{dN}{dE} \frac{dE}{dx}, \quad (1)$$

其中  $A$  为单位束流强度下的离子数与每立方厘米靶核数的乘积,  $dE/dx$  为束流离子的能量损失率,  $N(E)$  为能量  $E$  下的反应产物数目. 此类实验的不确定度主要来自于  $dE/dx$ . Bretscher 等<sup>[6]</sup> 使用厚冰靶开展了 D-D 聚变截面实验测量. 2024 年, Chadwick 等<sup>[7]</sup> 综述历史工作时指出, 即便在今天,  $dE/dx$  在 100 keV 附近的不确定度也不低于 20%. 历史上由于  $dE/dx$  的调整导致  $D(d, n)^3\text{He}$  截面数据修正 15%—30%,  $D(d, p)\text{T}$  截面数据修正 20%—60%<sup>[7]</sup>. Conner 等<sup>[8]</sup> 使用超薄铍靶和厚铍靶开展 D-T 聚变实验时发现, 在 15 keV 附近, 实验数据表现出了明显的束流背散射效应. 由此, 在低能区超薄靶的适用性也受到限制. Arnold 等<sup>[9]</sup> 使用 5—10  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  厚的 SiO 超薄膜研制了有窗气体靶, 并开展了 D-D 和 D-T 聚变截面测量. 与此同时, 牛津大学<sup>[10,11]</sup> 开始了无窗气体靶的技术探索. 1965—1970 年, 中国科学院近代物理研究所<sup>[12]</sup> 采用无窗气体靶技术开展了 D-D 和 D-T 聚变截面测量实验. 1979—1990 年, 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室<sup>[13–16]</sup> (Los Alamos National Laboratory, LANL) 使用最新研发的补偿型量热器、低温无窗气体靶等设备, 开展了 D-D 和 D-T 聚变截面测量实验. 此后, Krauss 等<sup>[17]</sup> 和 Greife 等<sup>[18]</sup> 也使用气体靶开展过中低能 D-D 聚变截面测量实验. 2006 年, Leonard 等<sup>[19]</sup> 以 p-D 弹性散射为参考截面, 测量了 110—650 keV 能区内的 D-D 聚变反应截面. 2013 年, Tumino 等<sup>[20]</sup> 使用特洛伊木马法开展了 D-D 截面测量实验. 刘东东等<sup>[21]</sup> 开展过低能 D-D 聚变反应中电荷屏蔽效应的研究. 2000—2012 年间, Bystritsky 等<sup>[22–24]</sup> 使用 Z 箍缩对极低能量下的 D-D 聚变截面进行了定性测量. 美国<sup>[25]</sup> 也有类似的研究. 周历波等<sup>[26]</sup> 汇总过 D-D 聚变反应截面的历史数据, 并使用  $R$  矩阵方法对  $^4\text{He}$  系统的反应截面进行评价. 韩旭等<sup>[27]</sup> 也使用  $R$  矩阵方法对 T-T 的反应截面数据进行了评价. 此外, 激光驱动惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 聚变反应速率的研究<sup>[28]</sup>, 为在 ICF 上开展极低能聚变截面研究提供了可能.

八十多年来, 学界持续不断地开展 D-D 聚变反应截面的实验测量, 为聚变物理、核天体物理积

累了丰富的实验数据, 也为检验 SBBN 提供了数据支撑. 此外, 核数据评价也需要丰富的实验数据. 因此, 测量 D-D 反应的截面数据, 具有十分重要的科学价值. 本工作基于中子发生器和超薄靶, 对 70—250 keV 能区内的 D-D 聚变反应截面进行了实验测量, 并将实验结果与历史数据、ENDF/B-VIII.0 数据库的评价数据进行了比较分析.

## 2 实验方法和实验测量

### 2.1 实验方法

当束流能量为  $E$  时, 实验室系微分截面的计算公式为

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = \frac{I_{\Omega}}{I_0 n \Omega}, \quad (2)$$

其中  $d\sigma(\theta)/d\Omega$  是实验室系  $\theta$  角度上的微分截面,  $I_{\Omega}$  为  $\theta$  角度上的带电粒子产物数量,  $I_0$  是入射到靶上的  $D^+$  数目,  $n$  为靶上单位面积上的靶核数,  $\Omega$  为探测器张成的立体角. 通过测量  $I_{\Omega}$ ,  $I_0$ ,  $\Omega$  和  $n$  四个物理量, 即可获得实验室系微分截面.

使用 SRIM 软件<sup>[29]</sup> 计算  $D^+$  束流穿过靶时的能量损失, 以束流在靶中间位置的能量作为平均能量.

### 2.2 实验测量

本实验使用中子发生器提供  $D^+$  束流, 其能量下限在 70 keV 附近. 离子源是钛金属材质, 在放电时会产生微量钛离子. 靶前端有分析磁铁, 可以排除束流中的  $D_2^+$  和  $D_3^+$  束流成分以及 Ti 的带电粒子成分. 使用直流分压器对中子发生器引出、聚焦和加速高压进行了标定, 离子源能量离散小于 100 eV. 实验专门设计了八角度靶室, 每个角度上使用海鹏里科技有限公司生产的钝化离子注入平面硅 (passivated implanted planar silicon, PIPS) 半导体探测器 (HPL-300) 对聚变反应带电粒子产物进行测量. 图 1 所示为靶室的装置结构图, 图中显示了八个测量位置的角度及靶的位置等结构信息. 使用 Keithley6485 皮安表测量靶流, 实验前对皮安表进行了标检, 标检结果显示其测量精度为 0.4%. 实验中向水冷装置加装去离子水, 对靶进行冷却. 在靶前设置了  $-100\text{ V}$  的抑制电场, 以抑制二次电子逃逸. 实验所用氘代聚苯乙烯靶, 经核磁

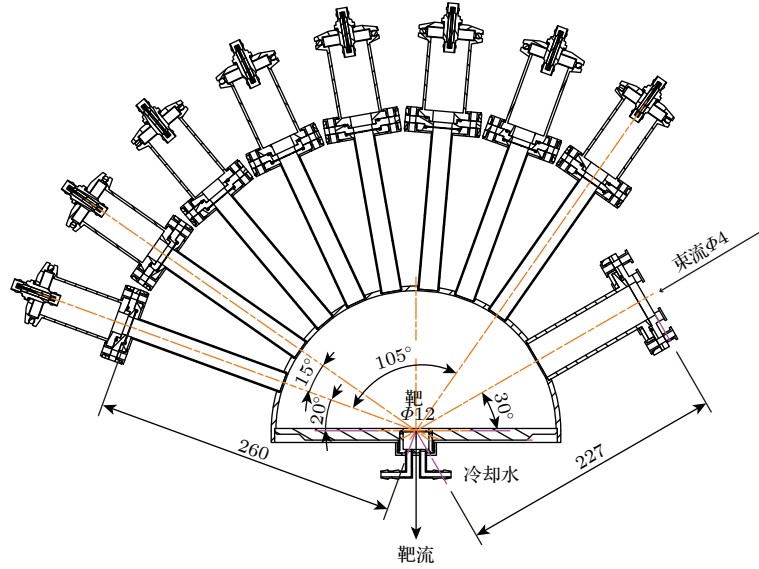


图 1 靶室的结构图

Fig. 1. Structure of the target chamber.

共振氢谱 (H nuclear magnetic resonance spectra, HNMR) 分析显示, 氘代率为 92.6%。使用原子力显微镜测量出氘代聚苯乙烯膜的厚度为 121 nm。

HPL-300 半导体探测器的能量分辨率  $\leq 21$  keV (@5.456 MeV), 有效灵敏区面积 300 mm<sup>2</sup>。实验中使用 Mesytec 公司的 MSI-8 前置放大器和 CAEN 公司的 DT5730 B 数采模块, 自主编制了数据获取系统。束流束斑大小为  $\Phi 4$  mm, 靶的有效区域大小为  $\Phi 12$  mm。实验中束斑位置有一些晃动, 但均在靶的有效区域内。每个能点的测量时间约 30 min, 平均束流强度约 285 nA, 束流积分值约 550  $\mu$ C。

图 2 所示为使用 6485 皮安表测量的一段 2000 s 时长的 D<sup>+</sup>束流强度。从图 2 可以看出, 在 2000 s 内, 束流强度的波动小于 10%。

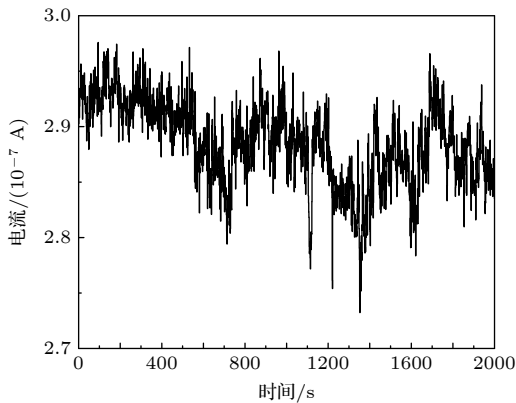


图 2 D<sup>+</sup>束流的强度

Fig. 2. D<sup>+</sup> beam intensity.

### 3 测量结果及数据分析

本实验对 <sup>3</sup>He<sup>2+</sup>, <sup>3</sup>H<sup>+</sup>和 <sup>1</sup>H<sup>+</sup>三种带电粒子产物进行测量。图 3 所示为入射 D<sup>+</sup>束流能量为 130 keV 时, 实验室系 50°和 155°上测量的带电粒子反应产物和束流散射能谱, 测量时长约 30 min。由于反应产物在小角度上能量相对较高, 故小角度上设置的阈值高, 大角度上设置的阈值低。

数据处理中需将通过 (2) 式计算出的实验室系微分截面转换为质心系微分截面, 再使用勒让德多项式进行拟合。核反应中实验室系和质心系相关参数转换的非相对论理论, 最早可追溯到 1949 年 Carlson 等<sup>[30]</sup>向 LANL 提交的年度报告。此后, Fowler 和 Brolley<sup>[31]</sup>在其综述文章中完整引述了该理论。中国原子能科学研究院编写的《加速器单能中子源常用数据手册》采用的即是该理论。本工作也使用该理论进行相关计算。

对于 D-D 聚变, 仅使用勒让德多项式的偶数项对微分截面角分布数据进行拟合, 即  $\frac{d\sigma(\theta_{cm})}{d\Omega} = \sum_{n=0} A_{2n} P_{2n}(\cos \theta_{cm})$ 。当束流能量小于 1.5 MeV 时, 仅使用 P<sub>0</sub>, P<sub>2</sub> 和 P<sub>4</sub> 三项<sup>[32]</sup>。拟合中以  $\chi$  值作为判断依据。其中  $\chi$  值的定义式为

$$\chi = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_{Exp} - \sigma_{Leg})^2}, \quad (3)$$

在质心系中, 总截面的计算公式为

$$\sigma = 2\pi \int_0^\pi \frac{d\sigma(\theta_{cm})}{d\Omega} \sin \theta_{cm} d\theta_{cm}, \quad (4)$$

其中  $\theta_{\text{cm}}$  为质心系角度,  $d\sigma(\theta_{\text{cm}})/d\Omega$  为质心系微分截面,  $\sigma$  为总截面.

通过理论计算, 将实验室系的角度和微分截面转换为质心系的对应结果. 质心系中微分截面与角度的关系, 及微分截面实验数据与勒让德多项式拟合曲线的比较结果, 如图 4 所示.

表 1 为各能点上 D(d, n)<sup>3</sup>He 和 D(d, p)T 两

个反应道的勒让德多项式拟合系数.

本实验的误差主要包括带电粒子反应产物统计不确定性、靶流不确定性、靶核数不确定性和立体角不确定性四项. 使用以下公式计算误差:

$$\delta_j^2 = \sum_{i=1}^4 \left( \frac{\partial \delta}{\partial x_i} \right)^2 \delta_{x_i}^2, \quad (5)$$

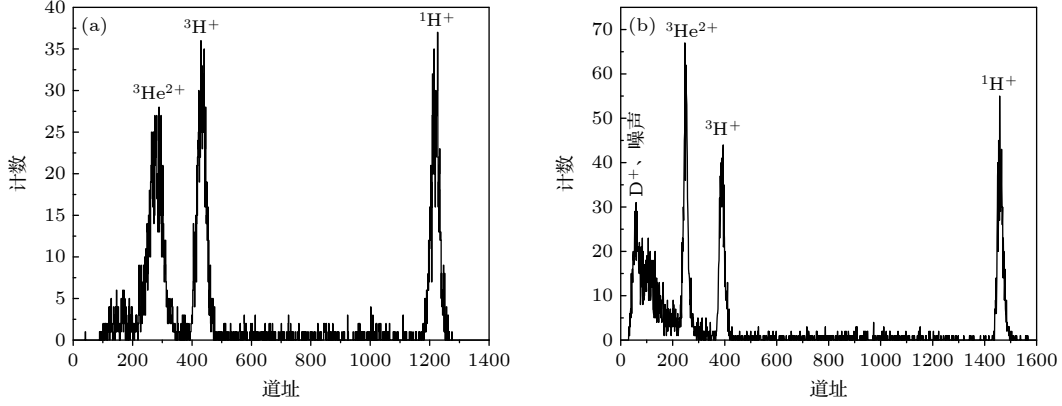


图 3 D-D 聚变反应带电粒子产物能谱 (a) 50°测量结果; (b) 155°测量结果

Fig. 3. Energy spectrum of D-D fusion reaction charged particle products: (a) Measured at 50°angle; (b) measured at 155°angle.

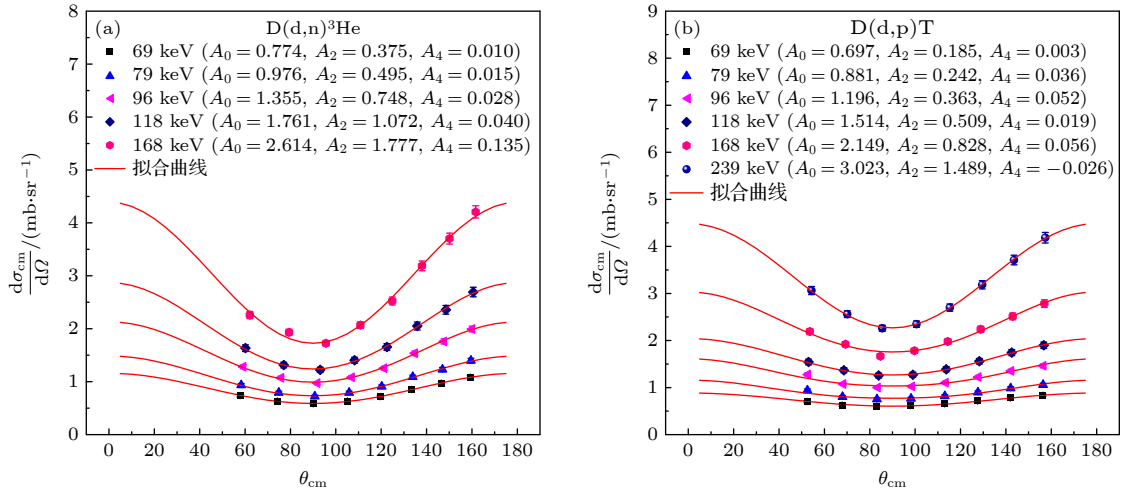


图 4 质心系 D-D 聚变反应微分截面实验数据及实验数据与勒让德多项式拟合结果的比较 (a) 中子反应道; (b) 质子反应道  
Fig. 4. Experimental differential cross-sections of D-D fusion reaction in center-of-mass frame measured by this experiment, and comparison between experimental data and the Legendre polynomial fitting results: (a) Neutron reaction channel; (b) proton reaction channel.

表 1 D-D 聚变反应微分截面勒让德多项式拟合系数

Table 1. Legendre polynomial fitting coefficients of D-D fusion reaction differential cross-sections.

D(d, n) <sup>3</sup> He					D(d, p)T				
$E_d/\text{keV}$	$A_0/(\text{mb} \cdot \text{sr}^{-1})$	$A_2/(\text{mb} \cdot \text{sr}^{-1})$	$A_4/(\text{mb} \cdot \text{sr}^{-1})$	$\chi/\text{mb}$	$E_d/\text{keV}$	$A_0/(\text{mb} \cdot \text{sr}^{-1})$	$A_2/(\text{mb} \cdot \text{sr}^{-1})$	$A_4/(\text{mb} \cdot \text{sr}^{-1})$	$\chi/\text{mb}$
69	0.774	0.375	0.010	0.005	69	0.697	0.185	0.003	0.009
79	0.976	0.495	0.015	0.011	79	0.881	0.242	0.036	0.013
96	1.355	0.748	0.028	0.016	96	1.196	0.363	0.052	0.019
118	1.761	1.072	0.040	0.021	118	1.514	0.509	0.019	0.004
168	2.614	1.777	0.135	0.044	168	2.149	0.828	0.056	0.030
					239	3.023	1.489	-0.026	0.016

其中  $\delta_j$  为第  $j$  个角度上的微分截面的不确定度,  $\delta_{x_i}$  为要素  $x_i$  的不确定度. 对于总截面, 其不确定度为

$$\delta_T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \delta_j^2}, \quad (6)$$

其中  $\delta_T$  为总截面的不确定度. 对于本实验, 束流强度  $I_0$  的误差为 0.4%, 单位面积上的靶核数  $n$  的误差为 1.03%, 探测器张成的立体角  $\Omega$  的误差为 2.24%. 实验数据误差分析的结果, 如表 2 所列.

分别选取 D(d, n)<sup>3</sup>He 和 D(d, p)T 反应道的三个微分截面数据, 与中国科学院近代物理研究所<sup>[33]</sup> 使用无窗气体靶测量到的相近能量的数据进行比

较, 结果如图 5 所示. 其中,  $\Delta$  值为本实验数据与近代物理研究所数据的差值占本实验数据的比例.

表 2 D-D 聚变反应实验数据误差分析

Table 2. Error analysis of D-D fusion reaction experimental data.

D(d, n) <sup>3</sup> He			D(d, p)T		
$E_d/\text{keV}$	$I_\Omega/\%$	$\delta_T/\%$	$E_d/\text{keV}$	$I_\Omega/\%$	$\delta_T/\%$
69	1.89—2.55	3.34	69	2.15—2.51	3.42
79	1.88—2.60	3.37	79	2.17—2.55	3.44
96	1.22—1.73	2.91	96	1.42—1.71	2.95
118	2.22—3.27	3.73	118	2.65—3.23	3.86
168	1.16—1.80	2.92	168	1.43—1.83	2.99
			239	1.03—1.39	2.78

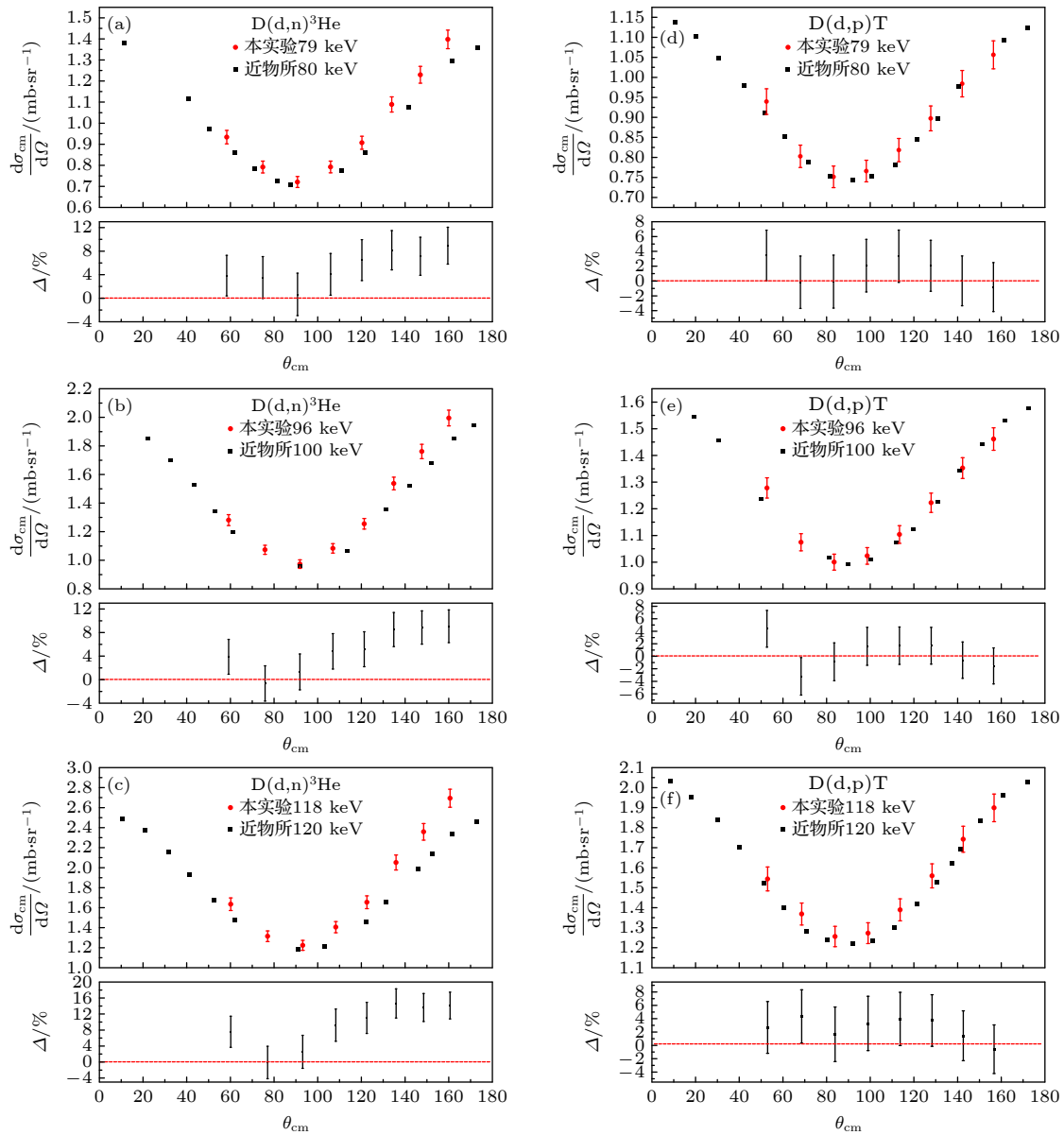


图 5 本实验测量的微分截面实验数据与近物所实验数据的比较 (a)–(c) 中子反应道; (d)–(f) 质子反应道

Fig. 5. Experimental differential cross-sections measured by this experiment compared with the data of China Institute of Modern Physics: (a)–(c) The data of neutron reaction channel; (d)–(f) the data of proton reaction channel.

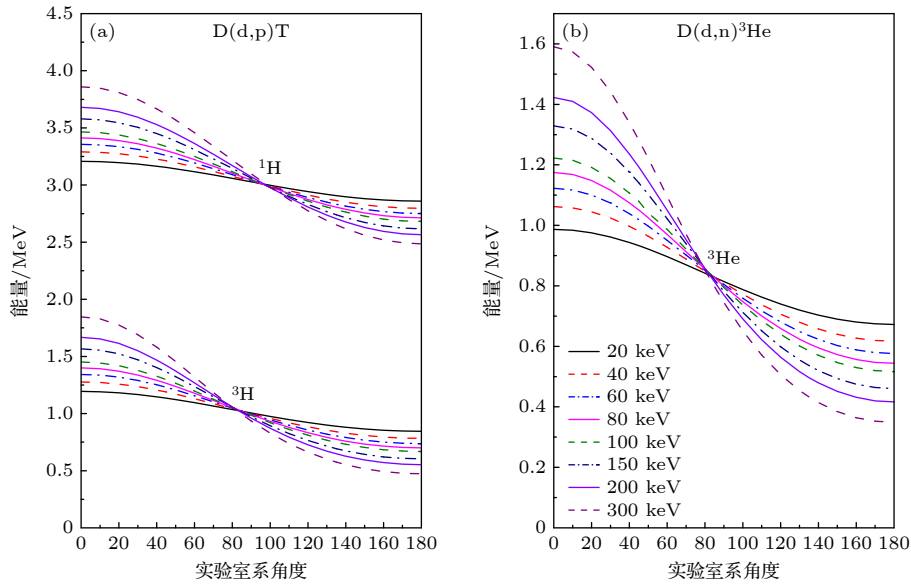


图 6 不同束流能量下, 带电粒子产物的角度能量关系 (a) 质子反应道; (b) 中子反应道

Fig. 6. Angle-energy relationships of different energies: (a) The proton reaction channel; (b) the neutron reaction channel.

从图 5 可以看出, 对于  $D(d, p)T$  反应道, 本实验测量的结果与中国科学院近代物理研究所测量的结果非常接近. 而对于  $D(d, n)^3\text{He}$  反应道, 本实验在大角度上的测量结果, 系统性地高于中国科学院近代物理研究所的数据. 从图 3(b) 还可看出,  $155^\circ$  能谱图中  $^3\text{He}^{2+}$  峰与电子学噪声及束流散射峰非常接近. 这主要是因为在在大角度上带电粒子反应产物的能量较低. 各角度上带电粒子反应产物能量与入射束流能量之间的关系, 如图 6 所示. 其数据取自《加速器单能中子源常用数据手册》.

从图 6 可知, 入射束流能量越高, 带电粒子反应产物能量的各向异性越明显. 入射束流能量越高, 大角度处  $^3\text{He}^{2+}$  峰受束流散射峰的影响越大. 且固体靶的束流散射效应强于气体靶. 从图 5(a)—(c) 可以明显看出该现象. 也正是因为该效应, 本实验未能测量到 239 keV 能点上的  $D(d, n)^3\text{He}$  微分截面.

## 4 讨论部分

根据 (4) 式, 可以求解出  $D(d, n)^3\text{He}$  和  $D(d, p)T$  的总截面. 将本实验测量的实验数据与历史数据进行比较, 如图 7 所示. 本文所有数据集 (包括两个反应道的微分截面数据和总截面数据) 均以 txt 格式在科学数据银行 (<https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00243>) 中给出.

Krauss 等 [17] 分别使用无窗气体靶和超音速喷射气体靶开展了实验, 故有两套实验数据. 本实验中, 由于束流散射效应的影响, 导致  $D(d, n)^3\text{He}$  反应道的微分截面略高. 由此测量出的  $D(d, n)^3\text{He}$  总截面与 Leonard 等 [19] 的数据相近.

为了更好地研究历史实验数据, 现将历史实验数据与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比值进行比较. 当入射束流能量低于库仑位垒时, 常使用 Gamow 理论公式描述束流能量  $E$  与反应截面  $\sigma$  之间的关系:

$$\sigma = \frac{C}{E} \exp(-D/E^{1/2}), \quad (7)$$

其中  $C$  和  $D$  为参数. 由此, 转换为如下公式:

$$\ln(\sigma E) = \ln C - D/E^{1/2}, \quad (8)$$

在低能区, 使用线性拟合能较好地描述 ENDF/B-VIII.0 评价数据, 在能量相对较高的能区线性拟合不再适用. 近些年学界常使用多参数公式对截面曲线进行参数化处理 [34,35]. Gaganov [35] 利用六参数公式对 6—350 keV 能区内的截面数据进行了参数化, 其结果与 ENDF/B-VIII 数据库评价数据之间的偏差仅为 0.5%. 历史实验数据与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比值如图 8 所示.

从图 8 可知, ENDF/B-VIII.0 评价数据受 Brown 等获得的数据 [13–16] 影响较大. 对此, Chadwick 等 [7] 的文章中也有论述. Arnold 等 [9] 的实验使用了有窗气体靶, 其实验数据略低于 ENDF/B-VIII.0 评价

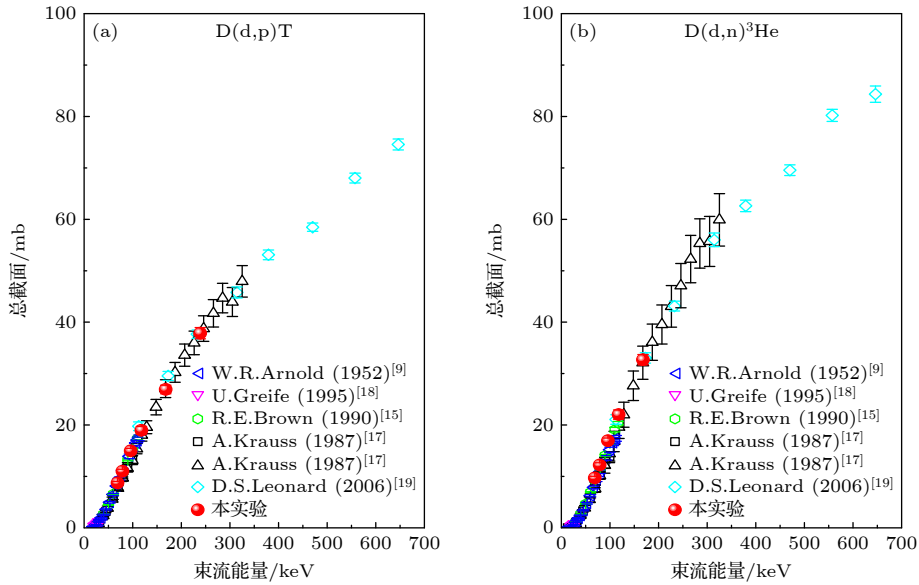


图 7 本实验测量的总截面实验数据与历史数据的比较 (a) 质子反应道; (b) 中子反应道

Fig. 7. Total cross sections measured in this experiment compared with historical results: (a) The proton reaction channel; (b) the neutron reaction channel.

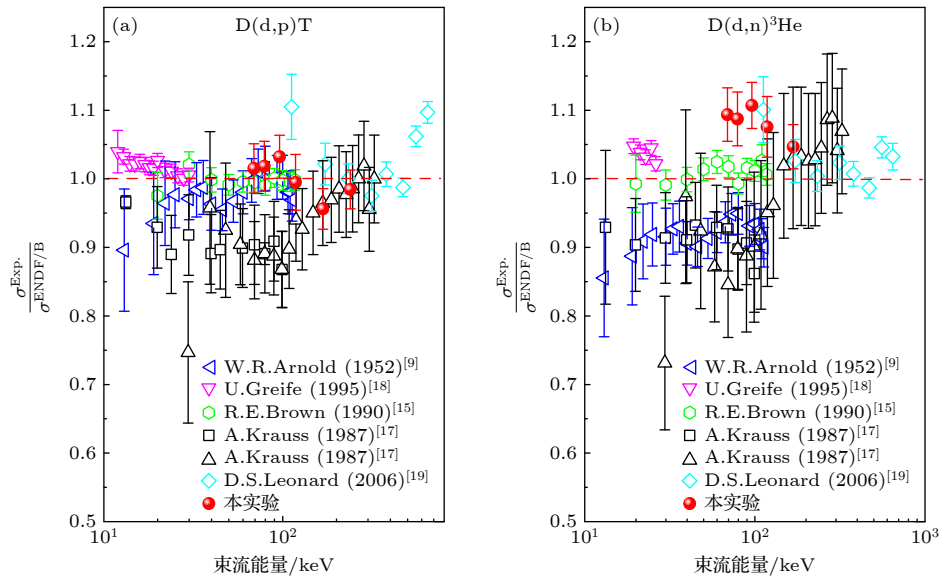


图 8 历史实验数据与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比值 (a) 质子反应道; (b) 中子反应道

Fig. 8. Ratios between total cross section results of historical experiments and ENDF/B-VIII.0 evaluation database: (a) The proton reaction channel; (b) the neutron reaction channel.

数据, 数据质量远优于早期固体靶数据<sup>[7]</sup>. Krauss 等<sup>[17]</sup>  $D(d, p)T$  和  $D(d, n)^3He$  两个反应道的实验数据都与 ENDF/B-VIII.0 评价数据相差  $\pm 10\%$  左右. 本实验的  $D(d, p)T$  反应道数据与 ENDF/B-VIII.0 评价数据较为吻合,  $D(d, n)^3He$  反应道数据比 ENDF/B-VIII.0 评价数据大  $5\% - 10\%$ .

在聚变物理和核天体物理中, 为了排除原子核的库仑效应, 常使用  $S(E)$  函数表示.  $S(E)$  函数与截面  $\sigma$  之间的关系式为<sup>[33]</sup>

$$\sigma(E_{cm}) = S(E_{cm})/E_{cm} \exp(-2\pi\eta), \quad (9)$$

其中  $\eta = Z_1 Z_2 e^2 / \hbar v$ ,  $Z_1$  和  $Z_2$  为弹核与靶核的核电荷数;  $v$  为弹核的质心系速度;  $E_{cm}$  为质心系总能量. 对于 D-D 聚变,  $S(E)$  函数与截面  $\sigma$  之间的关系式为<sup>[15]</sup>

$$S = 0.5\sigma E \exp(44.402E^{-1/2}), \quad (10)$$

其中  $E$  为实验室系中的能量 (keV),  $\sigma$  为总截面 (b). 通过 (10) 式, 计算出历史实验数据的  $S(E)$  函

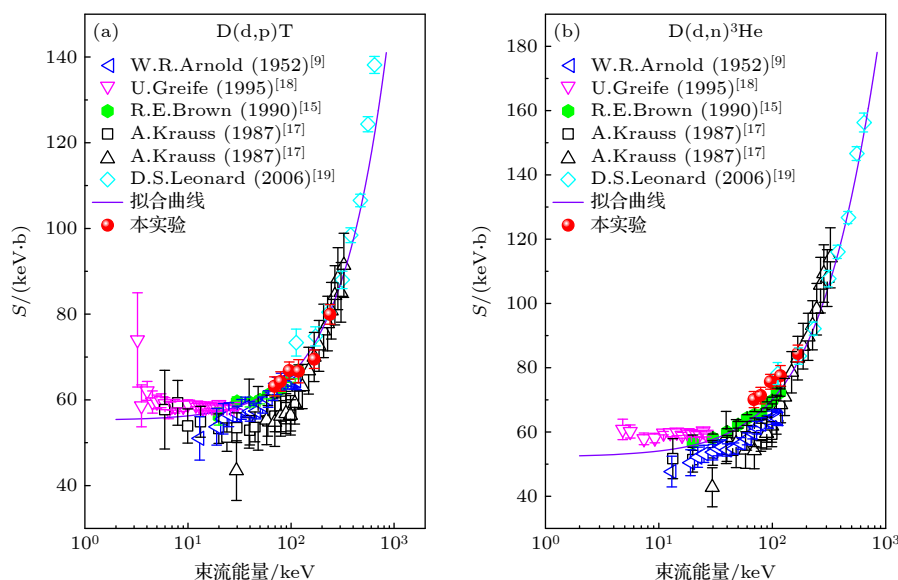


图 9 实验数据  $S(E)$  函数与拟合值的比较 (a) 质子反应道; (b) 中子反应道

Fig. 9. Historical experimental  $S(E)$  functions compared with the fitting curves: (a) The proton reaction channel; (b) the neutron reaction channel.

数进行比较分析. 图 9 所示为历史实验数据的  $S(E)$  函数与拟合曲线的比较.  $S(E)$  函数的拟合曲线公式取自文献 [36,37]. 由于本实验能区相对较窄, 实验能点较少, 数据统计不确定度 2%—3%, 故对 Pisanti 等 [36] 的拟合结果影响不大.

从图 9 可知, 在 20—100 keV 能区, Brown 等的实验数据与拟合曲线最为吻合. 本实验的  $D(d, p)T$  反应道  $S(E)$  函数数据与拟合曲线较为吻合,  $D(d, n)^3He$  反应道  $S(E)$  函数略高于拟合曲线. Greife 等 [18] 所测的两个反应道的数据均高于拟合曲线. Greife 等将  $S(E)$  函数实验数据高出 Bosch 和 Hale [38] 汇编  $S(E)$  函数的部分视为电荷屏蔽效应. 通过与 Brown 等数据的比较, Greife 等可能高估了极低能区的电荷屏蔽效应.

## 5 结论

本文报道了对 D-D 聚变反应开展的一次新的截面数据测量工作. 本实验基于中子发生器, 对 70—250 keV 能区内的 D-D 聚变反应微分截面和总截面进行测量. 使用勒让德多项式拟合了质心系微分截面, 获得了拟合系数, 将总截面数据与历史数据、ENDF/B-VIII.0 评价数据进行了比较. 本实验测量到的  $D(d, p)T$  反应道总截面实验数据与评价数据较为吻合, 而  $D(d, n)^3He$  反应道总截面实验数据略高于评价数据. 根据总聚变截面实验数据

计算出  $S(E)$  函数, 并与历史数据进行了对比, 讨论分析了本实验数据对拟合曲线的影响. 文中分析获知, ENDF/B-VIII.0 评价数据受 Brown 等实验数据的影响较大, 基于 Greife 的实验数据计算出的电荷屏蔽效应可能偏高. 后续研究中将探索抑制束流散射效应的方法以获得更佳的实验数据, 也将开展 10 keV 附近的低能实验和 1.0 MeV 以上的高能实验.

## 数据可用性声明

支撑本研究数据的数据集可在科学数据银行 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00243> 访问获取.

## 参考文献

- [1] He J J 2020 *Chin. Sci. Bull.* **65** 4047 (in Chinese) [何建军 2020 科学通报 **65** 4047]
- [2] Sun Y W, Qiu Z Y, Wan B N 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 175202 (in Chinese) [孙有文, 仇志勇, 万宝年 2024 物理学报 **73** 175202]
- [3] Tumino A, Spatà R, Spitaleri C, Mukhamedzhanov A M, Typel S, Pizzone R G, Tognelli E, Degl'Innocenti S, Burjan V, Kroha V, Hons Z, Cognata M L, Lamia L, Mrazek J, Piskor S, Prada Moroni P G, Rapisarda G G, Romano S, Sergi M L 2014 *Astrophys. J.* **785** 96
- [4] Tytler D, Burles S, Lu L M, Fan X M, Wolfe A, Savage B D 1999 *Astron. J.* **117** 63
- [5] Smith M S, Kawano L H, Malaney R A 1993 *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **85** 219
- [6] Bretscher E, French A P, Seidl F G P 1948 *Phys. Rev.* **73** 815

- [7] Chadwick M B, Paris M W, Hale G M, Lestone J P, Alhumaidi S, Wilhelmly J B, Gibson N A 2024 *Fusion Sci. Technol.* **80** 9
- [8] Conner J P, Bonner T W, Smith J R 1952 *Phys. Rev.* **88** 468
- [9] Arnold W R, Phillips J A, Sawyer G A, Stovall E J, Tuck J L 1954 *Phys. Rev.* **93** 483
- [10] McNeill K G, Keyser G M 1951 *Phys. Rev.* **81** 602
- [11] Moffatt J, Roaf D, Sanders J H 1952 *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **212** 220
- [12] 1st Research Group, 1st Research Division (Institute of Modern Physics, Academia Sinica) 1985 *High Energy Phys. Nucl. Phys.* **9** 723 (in Chinese) [中国科学院近代物理研究所一室一大组 1985 高能物理与核物理 **9** 723]
- [13] Jarmie N, Brown R E, Hardekopf R A 1984 *Phys. Rev. C* **29** 2031
- [14] Jarmie N, Brown R E 1985 *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. B* **10/11** 405
- [15] Brown R E, Jarmie N 1990 *Phys. Rev. C* **41** 1391
- [16] Jarmie N, Brown R E, Hale G M 1987 *Phys. Rev. C* **35** 1999
- [17] Krauss A, Becker H W, Trautvetter H P, Rolfs C 1987 *Nucl. Phys. A* **465** 150
- [18] Greife U, Gorris F, Junker M, Rolfs C, Zahnow D 1995 *Z. Phys. A: At. Nucl.* **351** 107
- [19] Leonard D S, Karwowski H J, Brune C R, Fisher B M, Ludwig E J 2006 *Phys. Rev. C* **73** 045801
- [20] Tumino A, Spitaleri C, Mukhamedzhanov A M, Typel S, Aliotta M, Burjan V, Gimenez del Santo M, Kiss G G, Kroha V, Hons Z, Cognata M La, Lamia L, Mrazek J, Pizzone R G, Piskor S, Rapisarda G G, Romano S, Sergi M L, Spartà R 2013 *J. Phys. Conf. Ser.* **436** 012073
- [21] Liu D D, Wang Z H, Zhou Y S, Fang K H, Wang T S 2014 *Nucl. Tech.* **37** 100518 (in Chinese) [刘东东, 王正海, 周钰珊, 方开洪, 王铁山 2014 *核技术* **37** 100518]
- [22] Bystritsky V M, Grebenyuk V M, Parzhitski S S, Pen'kov F M, Sidorov V T, Stolupin V A, Bulgakov T L, Mesyats G A, Sinebryukhov A A, Sinebryukhov V A, Chaikovskiy S A, Luchinsky A V, Makhlin V I, Ratakhin N A, Sorokin S A, Bystritskii VIT M, Filipowicz M, Wozniak J, Gula E 2000 *Laser Part. Beams* **18** 325
- [23] Bystritskii V M, Bystritsky V M, Chaikovskiy S A, Filipowicz M, Grebenyuk V M, Gula E, Makhlin V I, Mesyats G A, Parzhitski S S, Pen'kov F M, Ratakhin N A, Sinebryukhov V A, Sorokin S A, Stolupin V A, Volkov E N, Wozniak J 2001 *Phys. At. Nucl.* **64** 855
- [24] Bystritsky V M, Bystritskii Vit M, Dudkin G N, Filipowicz M, Gazi S, Huran J, Kobzev A P, Mesyats G A, Nechaev B A, Padalko V N, Parzhitskii S S, Pen'kov F M, Philippov A V, Kaminskii V L, Tuleushev Yu Zh, Wozniak J 2012 *Phys. At. Nucl.* **75** 53
- [25] Lattuada D, Barbarino M, Bonasera A, Bang W, Quevedo H J, Warren M, Consoli F, De Angelis R, Andreoli P, Kimura S, Dyer G, Bernstein A C, Hagel K, Barbui M, Schmidt K, Gaul E, Donovan M E, Natowitz J B, Ditmire T 2016 *Phys. Rev. C* **93** 045808
- [26] Zhou L B, Ye T, Wang J, Sun W L 2022 *Chin. J. Comput. Phys.* **39** 631 (in Chinese) [周历波, 叶涛, 王佳, 孙伟力 2022 *计算物理* **39** 631]
- [27] Han X, Ye T, Chen Z P, Ying Y J, Guo H R, Zu T J 2026 *Acta Phys. Sin.* **75** 020111 (in Chinese) [韩旭, 叶涛, 陈振鹏, 应阳君, 郭海瑞, 祖铁军 2026 *物理学报* **75** 020111]
- [28] Shen G, Zhong B, Wu Y, Wang J Guo 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 015201 (in Chinese) [沈刚, 袁斌, 吴勇, 王建国 2023 *物理学报* **72** 015201]
- [29] Ziegler J F, Ziegler M D, Biersack J P 2010 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect B* **268** 1818
- [30] Carlson B, Goldstein M, Rosen L, Sweeney D 1949 *The Conservation of Energy and Momentum in Nuclear Reactions* Los Alamos National Laboratory LA-723
- [31] Fowler J L, Brolley J E 1956 *Rev. Mod. Phys.* **28** 103
- [32] Chagnon P R, Owen G E 1956 *Phys. Rev.* **101** 1798
- [33] Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences 1989 *Measurement of Light Nuclear Reaction Cross-sections* (Beijing: Science Press) pp31–37 (in Chinese) [中国科学院近代物理研究所 1989 轻核反应截面测量 (北京: 科学出版社) 第 31—37 页]
- [34] Li X Z, Wei Q M, Liu B 2008 *Nucl. Fusion* **48** 125003
- [35] Gaganov V V 2025 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **567** 165819
- [36] Pisanti O, Mangano G, Miele G, Mazzella P 2021 *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **4** 1
- [37] Mossa V, Stöckel K, Cavanna F, Ferraro F, Aliotta M, Barile F, Bemmerer D, Best A, Boeltzig A, Brogini C, Bruno C G, Cacioli A, Chillery T, Ciani G F, Corvisiero P, Csedreki L, Davinson T, Depalo R, Di Leva A, Elekes Z, Fiore E M, Formicola A, Fülöp Zs, Gervino G, Guglielmetti A, Gustavino C, Gyürky G, Imbriani G, Junker M, Kievsky A, Kochanek I, Lugaro M, Marcucci L E, Mangano G, Marigo P, Masha E, Menegazzo R, Pantaleo F R, Patricchio V, Perrino R, Piatti D, Pisanti O, Prati P, Schiavulli L, Straniero O, Szücs T, Takács M P, Trezzi D, Viviani M, Zavatarelli S 2020 *Nature* **587** 210
- [38] Bosch H S, Hale G M 1992 *Nucl. Fusion* **32** 611

## DATA PAPERS

**D-D fusion reaction cross-section measurement in  
70–250 keV energy range\***

SUN Junjie<sup>#</sup> ZHENG Pu<sup>#</sup> XIAO Jun YANG Jiecheng MOU Yunfeng  
DENG Chunfeng HAN Zijie<sup>†</sup> LU Xinxin JIANG Li  
ZHU Tonghua LOU Benchao

(National Key Laboratory of Neutron Science, Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chinese Academy of  
Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

( Received 1 December 2025; revised manuscript received 26 January 2026 )

**Abstract**

An experimental measurement of the D-D fusion reaction cross-sections in the energy range of 70 to 250 keV is carried out at the neutron generator. A fusion reaction chamber with eight angles and a thin deuterated polystyrene target are used in the experiment. The passivated implanted planar silicon (PIPS) detectors are used to detect the products of charged-particle fusion reactions, and a high-precision digital electrometer is employed to measure the beam current from the target.

The differential cross-sections at six energies in the energy range are measured. The Legendre polynomials are used to fit the experimental differential cross-sections in the center-of-mass frame. According to the fitting results, the integral cross-sections at different energies are extracted. The differential and integral cross-sections at different energies are compared with historical experimental results and the evaluation data from the ENDF/B-VIII.0 database. Then, calculations of the astrophysical  $S(E)$  function are performed using the experimental integral cross-section data and compared with historical results. The results of this experiment further enrich the experimental data on D-D fusion reaction cross-sections, providing stronger data support for accurate calculation of the reaction rates in the standard Big Bang nucleosynthesis model and for the evaluation of fusion nuclear parameter data. The datasets presented in this paper, including a brief introduction to the experimental setup, the differential cross-section data, and the integral cross-section data, are openly available at <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00243>.

**Keywords:** fusion reaction, cross-section, Legendre polynomial, nucleosynthesis

**DOI:** [10.7498/aps.75.20251643](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251643)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251643](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251643)

\* Project supported by the National Key Laboratory of Neutron Science (Grant No. NST20250303).

<sup>#</sup> These authors contributed equally.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [2717246118@qq.com](mailto:2717246118@qq.com)



## 70—250 keV能区D-D聚变反应截面的实验测量

孙君杰 郑普 肖军 杨杰成 牟云峰 邓春风 韩子杰 鹿心鑫 蒋励 朱通华 娄本超

### D-D fusion reaction cross-section measurement in 70–250 keV energy range

SUN Junjie ZHENG Pu XIAO Jun YANG Jiecheng MOU Yunfeng DENG Chunfeng HAN Zijie  
LU Xinxin JIANG Li ZHU Tonghua LOU Benchao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 090103 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251643

CSTR: 32037.14.aps.75.20251643

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251643>

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

#### 原子核融合反应研究进展

Research progress of nuclear fusion reactions

物理学报. 2026, 75(2): 090103 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251346>

#### 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 ( $\gamma$ , 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R矩阵理论的氘氘反应截面数据评价

Evaluation of T+T reaction cross sections based on R-matrix theory

物理学报. 2026, 75(2): 082501 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251280>

#### 采用薄靶方法测量低能电子致Al, Ti, Cu, Ag, Au元素K壳层电离截面与L壳层特征X射线产生截面

Measurements of K-shell ionization cross sections and L-shell X-ray production cross sections of Al, Ti, Cu, Ag, and Au thin films by low-energy electron impact

物理学报. 2022, 71(17): 173402 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220162>

#### 非均匀混合下氘氘聚变反应速率的理论研究

Investigation on the fusion reaction rate of deuterium and tritium under heterogeneous mixing

物理学报. 2023, 72(1): 015201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221197>

#### 基于R矩阵理论的气体分子弹性碰撞截面计算及其与绝缘强度关联分析

R-matrix theory based calculation of elastic cross-sections of gas molecules and analysis of its correlation with insulation strength

物理学报. 2024, 73(24): 243402 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241355>