

文章编号: 1007-4627(2012)02-0139-06

# 中子引起氘核破裂反应的实验研究

阮锡超<sup>1,2</sup>, 欧阳晓平<sup>1</sup>, 周祖英<sup>2</sup>, 李霞<sup>2</sup>, 蒋婧<sup>2</sup>,  
黄翰雄<sup>2</sup>, 蒋顶悦<sup>2</sup>, 仲启平<sup>2</sup>, 任杰<sup>2</sup>, 唐洪庆<sup>2</sup>

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;

2. 中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413)

**摘要:** 对 25 MeV 中子引起氘核破裂反应的中子-中子准自由散射和 17.36 MeV 中子引起氘核破裂反应的中子-中子末态相互作用进行了细致的研究。首先, 以小于 5% 的不确定度, 精确测量了 25 MeV 中子-中子准自由散射出射的中子三重微分截面。实验数据用基于现实核子-核子势 (CD-Bonn, Argonne v18, Nijm I 和 II) 的理论计算配合 Monte-Carlo 模拟进行了分析。实验结果比基于 CD-Bonn 势的理论预言高 (16.0 ± 4.6)%, 进一步证实了目前的理论在中子-中子准自由散射方面还无法准确描述实验数据。其次, 通过运动学非完全测量, 精确测量了 17.36 MeV 中子引起氘核破裂反应在 0° 角附近出射的质子能谱, 用基于现实核子-核子势 (CD-Bonn, Bonn-B 和 Nijm I) 的理论计算以及 Monte-Carlo 模拟分析了所测得的质子能谱, 确定了中子-中子散射长度  $a_{nn} = (-16.8 \pm 0.6)$  fm。

**关键词:** 破裂反应; 准自由散射; 末态相互作用; 散射长度

**中图分类号:** O571.4; O571.54

**文献标志码:** A

## 1 引言

中子与氘核的反应 (nd 反应) 是三核子系统中最重要的反应之一, 因为没有库仑力的作用, 理论上可以得到精确的 Faddeev 方程<sup>[1]</sup>的解。尤其是最近 10 多年来, 基于各种现实核子-核子 (N-N) 势 (如 CD-Bonn<sup>[2]</sup>, Argonne v18<sup>[3]</sup>, Nijm I 和 II<sup>[4]</sup> 等), 理论上对描述中子与氘核反应取得了很大的进展, 不管是弹性道还是破裂道, 理论都能较好地描述实验数据, 计算的精度也不断提高, 因此也对实验提出了新的要求, 促进了实验的发展。

然而, 理论与实验仍然在某些方面存在较大的分歧<sup>[5]</sup>, 主要表现在: (1) 低能矢量分析本领之谜, 即在极化反应中, 很多观测量实验与理论存在严重分歧; (2) 空间星反常, 在空间星型几何下, nd 破裂反应的截面, 实验值与理论值存在较大分歧; (3) 中子-中子 (n-n) 准自由散射, 实验值也比理论预言的约大 15% ~ 20%; (4) n-n 散射长度  $a_{nn}$ , 利用不同反应和不同的运动学几何条件测得的  $a_{nn}$  差别仍

然较大。

本工作针对理论与实验间存在的问题, 在如下两个方面做了比较细致的实验研究。首先是 25 MeV 的 n-n 准自由散射实验研究, 以小于 5% 的精度, 精确测量了该反应出射中子的能谱, 以检验基于现实 N-N 势的三核子理论计算; 其次, 用运动学非完全测量测定了 17.36 MeV 中子引起氘核破裂时在 0° 角附近出射的质子能谱, 用于确定 n-n 散射长度  $a_{nn}$ 。

## 2 25 MeV n-n 准自由散射实验研究

n-n 准自由散射是一个很好的用来研究 n-n 相互作用的反应。由于无法得到自由中子靶, 因此 n-n 相互作用不能象 n-p 和 p-p 相互作用那样, 可以通过高精度的二体散射实验来研究, 所以 nd 破裂反应的 n-n 准自由散射就为我们提供了研究 n-n 相互作用的一个很好的选择。另外, 也可以用该反应检验基于现实 N-N 势的三核子系统的理论计算。

收稿日期: 2011-08-08; 修改日期: 2011-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10075079, 10975188); 中国核工业集团公司专项基金资助项目 (4160109)

作者简介: 阮锡超 (1972—), 男, 福建尤溪人, 研究员, 博士, 从事粒子物理与核物理研究; E-mail: ntcf@ciae.ac.cn

通过特定的几何设置,可利用 nd 破裂反应进行 n-n 准自由散射实验。在这种几何下,质子作为旁观者,反应前后的动量保持不变。因此要测量准自由散射中子的能谱,只能通过脉冲束加飞行时间方法来进行,从而导致了实验时束流强度难以提高。另外,同时测量两个中子的符合,探测效率也难以提高(最大~10%)。在此类实验中,还必须对 中子源进行屏蔽和准直,这样中子源与氘样品的距离就不可能很短,使得样品处的中子通量一般较低。加上反应本身的截面较低(三重微分截面为几个 mb/(sr<sup>2</sup>·MeV)),因此要得到高精度的实验数据相当困难。正因为如此,目前,高质量的 n-n 准自由散射实验数据还很少。本实验的目标是得到高精度的实验数据,以检验现有的理论计算。

### 2.1 实验装置和测量

本实验测量的装置如图 1 所示。25 MeV 中子由 T(d, n)<sup>4</sup>He 反应产生,脉冲化的氘束(能量为 8.8 MeV)与氘气体靶(大小为 φ10 mm×75 mm,充 2.2 大气压氘气)中的氘作用产生脉冲化的中子源,产生的中子在 0°方向被准直后,与一个大小为 φ20 mm×20 mm 的氟化聚乙烯(CD<sub>2</sub>)样品作用,用两个大小为 φ180 mm×100 mm 的 BC501A 液体闪烁体中子探测器置于与入射中子束成 ±42.2°、与 CD<sub>2</sub> 样品中心距为 80 cm 的位置探测两个准自由散射中子。为了精确确定准自由散射中子的能谱,采用了两种归一方法:(1)用一个大小为 φ100 mm×50 mm 的 ST451 液体闪烁体中子探测器置于 60° 散射角、与 CD<sub>2</sub> 样品中心距为 2.5 m 的位置测量 n-C 弹性散射,用 n-C 弹性散射微分截面作为归一;

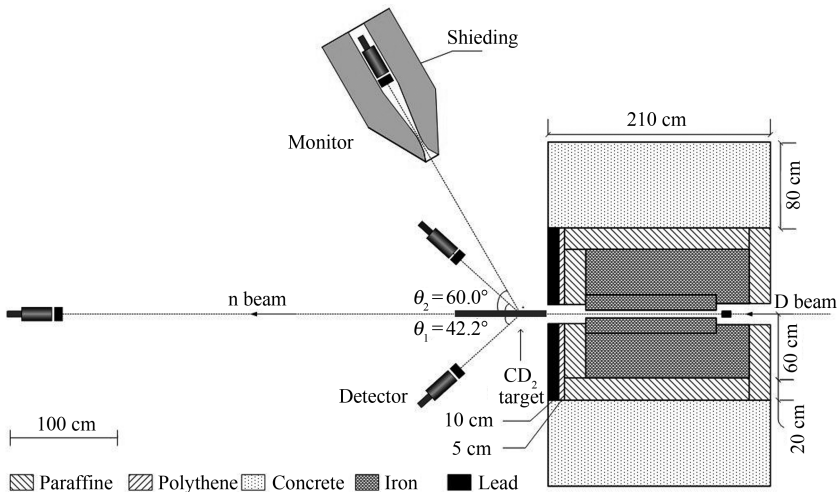


图 1 25 MeV n-n 准自由散射实验装置图

(2)在中子源与 CD<sub>2</sub> 样品间放一个聚乙烯薄膜,在 30°角方向用一个 ΔE-E 望远镜系统测量 n-p 散射的反冲质子,用 n-p 弹性散射微分截面来归一。两种归一结果互比较验证,以此精确确定准自由散射中子的能谱。

实验中对两个准自由散射中子进行了符合测量。两个中子的符合时间为 3 个脉冲周期,除了两个中子各自的飞行时间谱外,还记录了两个中子到达两个探测器的时间差。这样,通过这种符合测量,可以非常干净地得到准自由散射事件,也可以同时测量相应的偶然符合本底(图 2)。另外,为了扣除空气中 N 的(n, 2n)反应引起的本底,还进行了无样测量。整个实验的有效束流时间大约 400 h,其

中本底测量时间约 50 h。

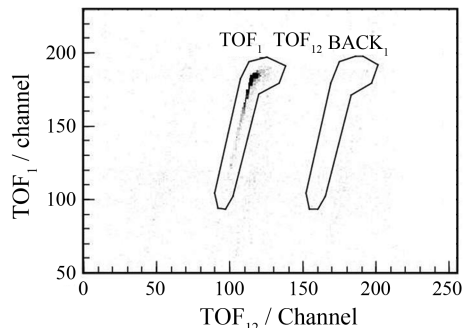


图 2 两个准自由散射中子到达两个探测器的飞行时间差与其中一个中子的飞行时间构成的二维谱中间的窗内是准自由散射效应,右边的窗内是相邻脉冲周期的偶然符合本底。

## 2.2 数据处理

从测量到的数据中扣除偶然符合本底和无样本本底后,就得到了纯准自由散射中子的能谱。实验测量时,由于中子源、样品和探测器都有一定的大小,需要对中子在样品中的注量衰减和多次散射及实验测量的有限几何效应进行修正。另外,由于脉冲束宽度、中子源能散、探测器厚度和电子学晃动等效应,会导致测量中子的时间分辨变坏,反映到中子能谱上就是能量分辨变坏。因此,测量数据无法直接与理论数据进行比较。为了解决这一问题,用基于现实 N-N 势的理论计算结果作为输入,对实验的物理过程进行了详细 Monte-Carlo 模拟。模拟是从入射氘开始的,考虑了入射氘在氘气体靶的入射窗和氘气中的能量损失以及能量歧离,然后模拟了中子的产生、中子与 CD<sub>2</sub> 样品的作用过程以及两个准自由散射中子被两个探测器探测的过程。这一模拟过程包含了源中子在气体靶材料中的散射与衰减、中子在 CD<sub>2</sub> 样品中的注量衰减、多次散射及有限几何修正等所有需要的修正。这样,模拟出来的中子能谱就包含了实验的几何条件以及各种主要因素,可以直接与实验测量的中子能谱进行比较。

## 2.3 结果与讨论

图 3 给出了实验测量结果与理论数据的比较。可以清楚地看到,实验与理论之间存在较大的分歧,我们的实验结果比基于 CD-Bonn 势的理论预言的数据大(16.0±4.6)%。这里给出的不确定度包括了统计、探测效率和归一等总不确定度。但是,当理论数据乘以 1.16 这个因子后,根据最小二乘法拟合的结果,得到  $\chi^2 = 0.73$ ,这说明理论预言与实验测量在形状上符合得很好。而且用 n-C(实验值比理论预言的大(12.0±6.8)% )和 n-p(实验值比理论预言的大(16.0±4.6)% )弹性散射归一的结果是一致的,这也证明了本实验的可靠性。

为了分析理论计算的不确定度,除了用 CD-Bonn 势外,还用 Argonne v18 势、Nijm I 和 II 势进行了分析。结果发现,用不同的核势分析,对结果基本没有影响,不同核势之间的数据差别不超过 1.5%。而 n-n 准自由散射的截面对 n-n 散射长度也不灵敏,每费米大约为 1.5%。因此不可能通过调节  $a_{nn}$  来解决这一分歧(本实验分析时用的  $a_{nn}$  为 -18.8 fm)。

另外,两家具有一定精度的实验也验证了这一结果。一个是 10.3 MeV 的实验<sup>[6]</sup>,其结果是实验值比理论预言的大 13%;另一个是 26 MeV 的实验<sup>[7]</sup>,其结果是实验值比理论预言的大 18%。可得出的结论:目前基于现有 N-N 势的三核子理论计算还无法正确描述 n-n 准自由散射的实验数据。

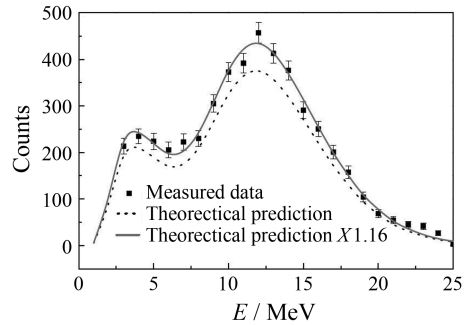


图 3 实验测量能谱与理论数据的比较

## 3 中子-中子散射长度实验研究

中子-中子散射长度  $a_{nn}$  是 N-N 相互作用的一个基本参量,然而,至今还不能给出其准确的实验值。由  $D(\pi^-, nn)\gamma$  反应确定的  $a_{nn}$  为  $(-18.5 \pm 0.5)$  fm<sup>[8]</sup>。在 1990 年以前由  $D(n, nn)p$  反应运动学完全测量得到的  $a_{nn}$  集中在  $-16.5$  fm<sup>[9]</sup>,在 1990 年以后波恩组的结果为  $(-16.2 \pm 0.3)$  fm<sup>[10]</sup>,而美国三角大学核物理实验室(TUNL)的结果则为  $(-18.7 \pm 0.6)$  fm<sup>[11-12]</sup>。两家的  $a_{nn}$  数据存在较大的分歧,但他们得到的  $a_{np}$  数据却符合得很好,因此他们之间  $a_{nn}$  的分歧仍然无法解释。另外,由  $D(n, nn)p$  运动学非完全测量得到的  $a_{nn}$  则集中在  $-15.5$  fm<sup>[13]</sup>。这些结果之间有较大的分歧。本实验的目的是利用运动学非完全测量来进行实验,以期通过精确测量来得到一些有用的信息和结论。

在 nd 破裂反应中,0°角附近出射的质子由于 n-n 末态相互作用,在能谱的高能端将形成一个明显的末态相互作用峰,而且这个峰的高度对  $a_{nn}$  灵敏(如图 4 所示)。本实验就是利用这一特点来确定  $a_{nn}$ 。从图 4 中可以看出,末态相互作用峰的高度大约只相差每费米 4%,因此要精确确定  $a_{nn}$ ,实验测量需要有很高的精度。其次,对  $a_{nn}$  灵敏的峰的宽度很窄,只有几百个 keV,因此实验测量要有很高的能量分辨才行。另外,理论数据是点截面的数据,而实验数据则包含了有限几何效应和能量分辨,因

此需要理论计算配合 Monte-Carlo 模拟, 才能去拟合实验数据, 从而确定  $a_{nn}$ 。

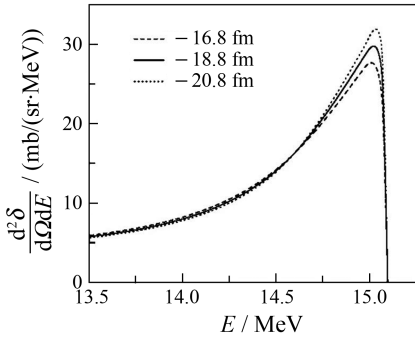


图 4 17.36 MeV nd 破裂反应 0°角出射质子谱与  $a_{nn}$  的关系

### 3.1 实验装置和测量

图 5 给出了本实验的装置图。由  $D(d, n)^3\text{He}$  反应产生 17.36 MeV 中子, 氘束能量为 15 MeV, 靶是氘气体靶, 大小为  $\phi 12\text{ mm} \times 42\text{ mm}$ , 充 4.2 大气压的氘气, 两端都用  $10\text{ }\mu\text{m}$  厚的 Harvar 膜封

装。反应靶也是氘气体靶, 大小为  $\phi 10\text{ mm} \times 14\text{ mm}$ , 充 21 个大气压的氘气, 两端用  $75\text{ }\mu\text{m}$  厚的 Kapton 膜封装。在反应靶之后是一组  $\Delta E_1-\Delta E_2-E$  望远镜系统, 用于测量末态相互作用的质子和 n-d 散射的散射氘, 其中散射氘用于截面的绝对归一,  $\Delta E_1-\Delta E_2-E$  望远镜系统用石墨作为外壳材料, 以屏蔽中子与周围物质作用产生的带电粒子干扰。对整个反应靶系统和望远镜系统都进行了冷却(约  $-15\text{ }^\circ\text{C}$ ), 这样一方面可以增加靶厚, 另外也能改善 Si 探测器的能量分辨和延长其使用寿命。因为整个望远镜系统在强中子场中工作, 性能容易变坏, 通过冷却和间歇性工作(夜间和周末不工作), 可以延长其使用寿命。为了监视系统的稳定性, 整个实验过程中用  $^{241}\text{Am}$   $\alpha$  源对 E 探测器进行了监测。反应靶中心与中子源中心以及与 E 探测器前的光栏的距离分别为 90 和 91 mm, 光栏直径为 10 mm, 决定了探测的有效立体角。

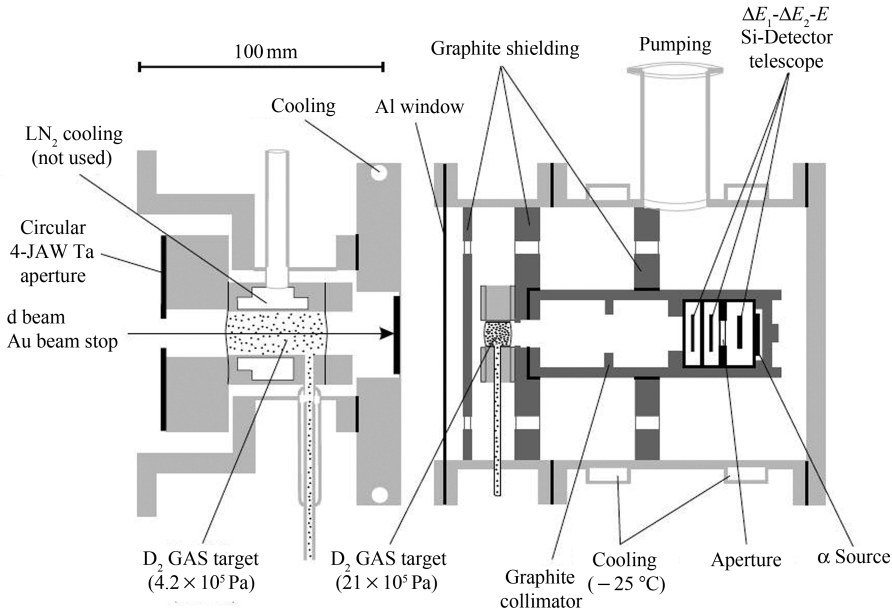


图 5 实验装置图

实验测量采用了 3 个探测器的三重符合来鉴别粒子和减少偶然符合本底, 为进一步减少偶然符合本底, 还测量了时间谱  $t_{12}$  和  $t_{13}$ 。用它们组成的二维谱来挑选真事件。实验对反应靶中有氘气和无氘气以及中子源靶中有氘气和无氘气都进行了测量, 通过测量来正确扣除相应的本底。另外, 由中子穿过 Kapton 膜时通过 n-p 散射而降低能量, 再引起反应

靶中的氘核破裂而引起的本底是无法通过实验测量来直接扣除的, 因此用数值计算配合 nd 破裂截面以及迭代的方法对这部分本底进行了修正。

### 3.2 对实验数据的理论分析

在得到本底修正后的质子能谱后, 用基于现实 N-N 势的理论数据作为 Monte-Carlo 模拟的输入, 对实验的物理过程进行了 Monte-Carlo 模拟。模拟



从入射氧开始，考虑了氧在入射窗和气体中的能量损失以及能量和角度歧离，然后模拟了中子的产生、中子与反应靶中的氧反应产生末态相互作用质子和产生散射氧的过程，以及质子和散射氧被望远镜系统探测的过程。这里考虑了产生的带电粒子在气体、Kapton 膜以及  $\Delta E_1$  和  $\Delta E_2$  中的能量损失和能量歧离。另外，由于探测器的能量分辨以及其它未知因素引起的能量展宽，对 Monte-Carlo 模拟出来的质子能谱用一个附加的高斯函数进行了展宽，以使得模拟谱在形状上能很好地再现实验数据。

利用不同  $a_{nn}$  的理论计算数据，模拟得到相应的能谱，然后用最小二乘法拟合方法去拟合实验数据，就可以确定实验测量的  $a_{nn}$ 。图 6 给出了基于 CD-Bonn 势的不同  $a_{nn}$  的理论数据模拟出来的谱与实验测量谱的比较以及最小二乘拟合的结果。根据拟合结果，得到  $a_{nn} = -(16.8 \pm 0.6)$  fm。

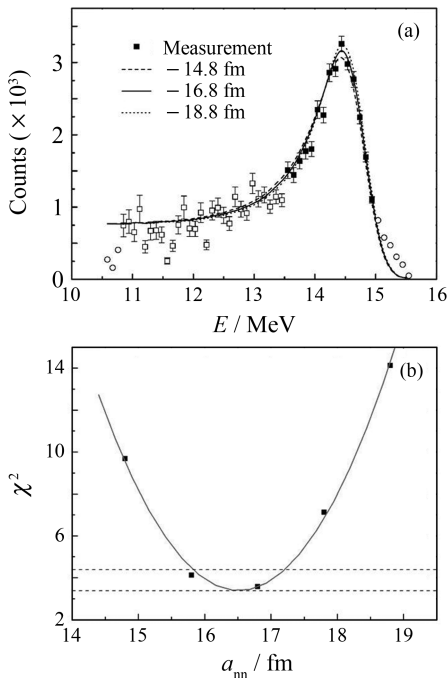


图 6 基于 CD-Bonn 势的理论数据拟合实验数据的结果

(a) 模拟谱与实验谱的比较，实心点是拟合区域，即对  $a_{nn}$  灵敏的区域，空心点是非拟合区域；(b) 最小二乘法拟合的结果。

### 3.3 结果与讨论

实验确定的  $a_{nn}$  为  $(-16.8 \pm 0.6)$  fm，这与用  $D(\pi^-, nn)\gamma$  反应确定的  $a_{nn} = (-18.5 \pm 0.5)$  fm 相比，仍有较大的分歧，与 TUNL 的实验数据相比也存在分歧，而与 Bonn 大学的数据以及先前的运

动学非完全测量数据结果则比较一致。这说明利用不同的反应以及不同的实验室之间在确定  $a_{nn}$  上仍可能存在系统上的偏差，需要做进一步的研究。

本实验在本底扣除方面做得比较仔细，因此用理论数据模拟出来的能谱不需做任何归一就能很好地符合实验测量值，这与以前的实验相比有很大的进步。先前的实验在做理论分析时通常模拟出来的能谱需要在低能平台处(对  $a_{nn}$  不灵敏的区域)归一到实验数据，然后再进行拟合<sup>[13-15]</sup>。

为了分析理论分析引起的不确定度，除了用 CD-Bonn 势分析外，本工作还用 Bonn-B 势和 Nijm I 势做了分析，得到的  $a_{nn}$  分别为  $(-16.3 \pm 0.7)$  和  $(-16.6 \pm 0.7)$  fm，这说明了用基于现实 N-N 势的 3 核子理论进行分析，由于采用不同的核势引起的不确定度较小，应该小于 0.5 fm。

## 4 总结

本工作针对 nd 破裂反应研究存在的问题，对 25 MeV n-n 准自由散射和 n-n 散射长度做了比较细致的研究。首先，以小于 5% 的不确定度精确测量了 25 MeV n-n 准自由散射中子的能谱，用基于现实 N-N 势的 3 核子系统理论计算与 Monte-Carlo 模拟相结合，对实验数据进行了分析，进一步证实了在 n-n 准自由散射中，目前的理论还无法准确描述实验。实验数据比理论预言的数据要大约 15%~20%。其次，利用 17.36 MeV nd 破裂反应的运动学非完全测量，本工作精确测量了 nd 破裂反应在  $0^\circ$  角附近出射的质子能谱，用基于现实 N-N 势的 3 核子系统理论计算和 Monte-Carlo 模拟对实验数据进行了分析，得到 n-n 散射长度  $a_{nn} = (-16.8 \pm 0.6)$  fm。通过研究进一步证实了在 nd 破裂反应研究中目前存在的问题。从这些理论与实验间存在的分歧来看，还需从两方面对 nd 破裂反应进行深入的研究。

### 参考文献 (References):

- [1] FADDEV L D. Soviet Physics JETP, 1961, **12**: 1014.
- [2] MACHLEIDT R, SAMMARRUCA F, SONG Y. Phys Rev C, 1996, **53**: 1483.
- [3] WIRINGA R B, STOKS V G J, SCHIAVILLA R. Phys Rev C, 1995, **51**: 38.

- [4] STOKS V G J, KLOMP R A M, TERHEGGEN C P F, *et al.* Phys Rev C, 1994, **49**: 2950.
- [5] GLÖCKLE W, WITALA H, HÜBER D, *et al.* Phys Rep, 1996, **274**: 107.
- [6] LÜBCKE W. Neutron-neutron Quasi-free Scattering at 10.3 MeV [D]. Germany: University of Bochum, 1992.
- [7] SIEPE A, DENG J, HUH N V, *et al.* Phys Rev C, 2002, **65**: 034010.
- [8] MACHLEIDT R, SLAUS I. J Phys G, 2001, **27**: 69.
- [9] SLAUS R I, AKAISHI Y, TANAKA H. Phys Rep, 1989, **173**: 267.
- [10] HUH N V, WATZOLD L, WEBER C, *et al.* Phys Rev C, 2000, **63**: 014003.
- [11] GONZALES T D E, SALINA F, CHEN Q, *et al.* Phys Rev Lett, 1999, **83**: 3788.
- [12] GONZALEST D E, SALINAS M F, TORNOW W, *et al.* Phys Rev C, 2006, **73**: 034001.
- [13] TORNOW W, WITALA H, BRAUN R T. Few-Body Systems, 1996, **21**: 97.
- [14] SHIRATO S, SAITOH K, KOORI N. Nucl Phys A, 1973, **215**: 277.
- [15] HAIGHT R C, GRIMES S M, ANDERSON J D. Phys Rev C, 1977, **16**: 97.

## Experimental Study of Neutron Induced Deuteron Breakup Reactions

RUAN Xi-chao<sup>1, 2, 1)</sup>, OUYANG Xiao-ping<sup>1</sup>, ZHOU Zu-ying<sup>2</sup>, LI Xia<sup>2</sup>, JIANG Jing<sup>2</sup>, HUANG Han-xiong<sup>2</sup>,  
JIANG Ding-yue<sup>2</sup>, ZHONG Qi-ping<sup>2</sup>, REN Jie<sup>2</sup>, TANG Hong-qing<sup>2</sup>

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The neutron-neutron (n-n) quasi-free scattering (QFS) at 25.0 MeV and n-n final state interaction (FSI) at 17.4 MeV in the nd breakup reaction were studied in this work. First, the absolute breakup cross section was measured with an accuracy of  $< 5\%$  in the n-n QFS. The measured data was analyzed by Monte-Carlo simulation based on modern realistic N-N potentials (CD-Bonn, Argonne v18, Nijm I and II). The measured data exceeds the theoretical prediction based on CD-Bonn by  $(16.0 \pm 4.6\%)$ . Second, the proton emission spectrum around  $0^\circ$  was measured in the nd breakup reaction at 17.4 MeV with kinematical incomplete setup. The data was analyzed by Monte-Carlo simulation based on CD-Bonn. The n-n scattering length determined in this work was  $a_{nn} = (-16.8 \pm 0.6)$  fm.

**Key words:** breakup reaction; quasi-free scattering; final state interaction; scattering length

**Received date:** 8 Aug. 2011; **Revised date:** 18 Oct. 2011

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10075079, 10975188); Special Foundation from China National Nuclear Corporation(4160109)

1) E-mail: ntof@ciae.ac.cn