

利用气泡探测器测量激光快中子

赵磊 徐妙华 张翌航 张喆 朱保君 姜炜曼 张笑鹏 赵旭 仝博伟 贺书凯 卢峰 吴玉迟 周维民
张发强 周凯南 谢娜 黄征 仲佳勇 谷渝秋 李玉同 李英骏

Laser fast neutron measured by bubble detector

Zhao Lei Xu Miao-Hua Zhang Yi-Hang Zhang Zhe Zhu Bao-Jun Jiang Wei-Man Zhang Xiao-Peng
Zhao Xu Tong Bo-Wei He Shu-Kai Lu Feng Wu Yu-Chi Zhou Wei-Min Zhang Fa-Qiang Zhou
Kai-Nan Xie Na Huang Zheng Zhong Jia-Yong Gu Yu-Qiu Li Yu-Tong Li Ying-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 222101 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181035

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181035>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[用于中国散裂中子源多功能反射谱仪的高气压多丝正比室探测器的研制](#)

Development of high-pressure multi-wire proportional chamber neutron detector for the China Spallation Neutron Source multipurpose reflectometer

物理学报.2018, 67(7): 072901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172618>

[二维多丝室探测器读出方法的优化](#)

Readout method for two-dimensional multi-wire proportional chamber

物理学报.2017, 66(7): 072901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.072901>

[用于反应堆中子/γ射线混合场测量的涂硼电离室性能](#)

Performances of a boron-lined ionization chamber used in neutron/γ-ray mixed field of reactors

物理学报.2012, 61(8): 082901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.082901>

利用气泡探测器测量激光快中子*

赵磊¹⁾ 徐妙华¹⁾ 张翌航²⁾³⁾ 张喆^{2)†} 朱保君²⁾³⁾ 姜炜曼²⁾³⁾ 张笑鹏⁵⁾
 赵旭⁵⁾ 仝博伟⁶⁾ 贺书凯⁷⁾ 卢峰⁷⁾ 吴玉迟⁷⁾ 周维民⁷⁾ 张发强⁷⁾
 周凯南⁷⁾ 谢娜⁷⁾ 黄征⁷⁾ 仲佳勇⁴⁾⁶⁾ 谷渝秋⁴⁾⁷⁾
 李玉同^{2)3)4)‡} 李英骏^{1)††}

1) (中国矿业大学(北京), 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

2) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190)

3) (中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

4) (上海交通大学, IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

5) (上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240)

6) (北京师范大学天文系, 北京 100875)

7) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900)

(2018年5月28日收到; 2018年9月26日收到修改稿)

在利用超强激光驱动中子源的研究和应用研究中, 中子源的产额及其角分布至关重要. 我们在星光 III 号激光装置上采用气泡探测器对强激光驱动的中子源的产额及其角分布进行了测量. 利用超强皮秒激光与碳氘薄膜靶相互作用产生高能氘离子束撞击次级碳氘靶, 通过氘-氘核反应产生准单能快中子. 实验发现中子束的发射具有一定的方向性, 在入射氘离子的传输方向上中子束具有更高的强度, 测量得到的中子束最大强度为 5.13×10^7 n/sr. 利用实验测量的氘离子能谱和角分布对中子束角分布进行了理论计算, 结果与实验测量基本一致.

关键词: 气泡探测器, 快中子, 角分布

PACS: 21.10.Gv, 21.45.Bc, 29.85.Fj

DOI: 10.7498/aps.67.20181035

1 引言

中子是电中性的, 它和原子中的电子之间具有很小的相互作用力, 所以中子具有非常强的穿透能力. 它的这一特性使其在辐照育种、中子掺杂等方面具有巨大的应用价值^[1-6]. 产生中子束的传统方法是核反应堆、散裂中子源及高能粒子加速器等^[7],

但是这些设备庞大, 而且造价和运行成本昂贵, 不利于中子源的广泛应用^[8]. 随着超强激光的发展, 基于超强激光的中子源应运而生^[9]. 这种中子源占用空间小, 具有较低的运行成本, 得到了快速的发展. 超短超强激光^[10]与等离子体相互作用通过聚变反应^[11]和光核反应^[12]都可以产生中子, 特别是聚变核物理能产生高通量的单能中子.

* 科学挑战计划(批准号: TZ2016005)、国家自然科学基金(批准号: 11520101003, 11535001, 11574390)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CBA01504)和中国科学院先导计划(批准号: XDB16010200, XDB07030300)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: z Zhang@iphy.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: ytli@iphy.ac.cn

†† 通信作者. E-mail: lyj@iphy.ac.cn

近年来,很多国内外实验室对激光与靶作用产生中子进行了实验研究. 2005年,李玉同等^[13]在Gekko XII激光装置上进行了泡沫靶产生中子实验,利用拍瓦激光与不同密度的泡沫靶(碳氘靶)相互作用,从而产生中子.通过中子能谱信息,首次提出并验证了泡沫靶中的高能离子“体加速”机制.该实验在激光能量为190 J的激光与1 mm厚的低密度碳氘靶相互作用,在靶前法线 13° 的方向测量得到的中子最高产额为 1.5×10^6 n/sr.

2013年, Bang等^[14]使用拍瓦激光装置与氙团簇作用,其激光能量为120 J,脉宽为170 fs,通过控制激光的焦斑等参数来调节激光的聚焦功率密度,提高激光吸收效率.该实验中获得的最高中子产额为 1.6×10^7 /发.2013年Roth等^[15]在200 TW (10^{12} W) TRIDENT激光装置上进行了实验,激光强度高达 10^{21} W/cm².在高信噪比高强度的激光条件下,采用BOA加速机制(break-out afterburner)^[16]来获得氙离子,其动能高达170 MeV,通过 $^9\text{Be}(d,n)$ 与 $^9\text{B}(p,n)$ 核反应,产生中子的峰值能量为70 MeV,最高能量达到150 MeV,其产额更是高达 10^{10} /sr.该实验对靶后壳层加速机制(TNSA)^[17-19]与BOA两种加速机制下的中子产额及角分布进行了对比,BOA机制从产额上明显占有优势,并且具有明显的方向性,位于氙离子入射方向的中子产额约为法向产额的10倍.2015年,赵家瑞等^[20]通过设计的特殊K型靶,在神光II号装置上利用8路激光,分为两组,分别作用于两侧的靶,使得产生的氙等离子体在中心对撞,通过氙-氙核反应获得了 10^6 /发的中子.2015年, Klir等^[21]在PALS激光装置上进行了氙-氙核反应实验,激光能量为600 J,脉宽为300 ps,利用激光与碳氘靶相互作用^[22],从而产生中子,得到0.5—2 MeV的氙离子产额达到 2×10^{14} ,其中子产额为 2×10^9 /发.2016年,崔波等^[23]在绵阳星光III号激光装置上进行皮秒激光直接与碳氘靶相互作用实验,利用液体闪烁体探测器对中子产额及能谱进行测量,得到了各向同性的中子.

本实验通过激光与碳氘靶相互作用,利用TNSA加速机制产生高能的方向性较好的氙离子,将这部分氙离子与次级靶相互作用,诱导核反应发生,从而产生单能快中子^[24].实验中使用加拿大Bubble Technology Industries (BTI)公司BD-PND型号的气泡探测器对中子产额及其角分布进行了测量.

2 实验装置

本实验是在绵阳激光聚变中心星光III号激光装置上进行的.皮秒激光以 13° 角斜入射到主靶上,激光能量为100 J,脉宽为1 ps,聚焦焦斑直径是20 μm .此时对应的激光功率密度达到 3×10^{19} W/cm².

图1是实验布局图,双平面靶镶嵌在靶架上,两平面靶之间的距离为5 mm.在实验中用于产生高能氙离子束的CD薄膜靶的厚度均为10 μm ,大小为4 mm \times 4 mm.而次级靶采用两种厚度,一种为厚度2 mm的厚靶(大小为4 mm \times 4 mm),另一种为10 μm 的薄靶(大小为4 mm \times 500 μm).

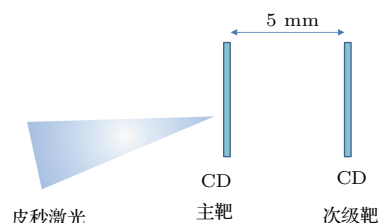


图1 平面靶示意图

Fig. 1. Schematic diagram of plane target.

本实验的主要探测设备为气泡探测器.气泡探测器是20世纪80年代发展起来的一种新型核辐射探测器,可以在任何场合中对中子进行监测^[25,26].该探测器是在硬弹性固体中均匀地加入过热液体微滴而成,当过热液体微滴受到辐射之后就会立即发生气化反应,形成目视可见的气泡^[27].气泡的个数和中子产额在一定情况下成线性关系^[28],所以由气泡个数可直接计算出中子产额.图2所示为BD-PND型号的气泡探测器,其中图2(a)和图2(b)分别是使用相机和读出仪拍摄实验前的气泡探测器,图2(c)是使用读出仪拍摄实验后的气泡探测器.

相对于闪烁体探测器^[29-31]和CR-39探测器^[32],气泡探测器有很多优点,它对X射线不敏感,且操作灵活,实验后对数据的处理也比较简便,极大地提高了实验效率.实验中使用了多个不同灵敏度的BD-PND型号的气泡探测器来探测氙-氙核反应的中子产额及其角分布.表1为本次实验所使用的气泡探测器的主要参数,方位是以薄膜靶法线方向为 0° ,顺时针方向为正方向.

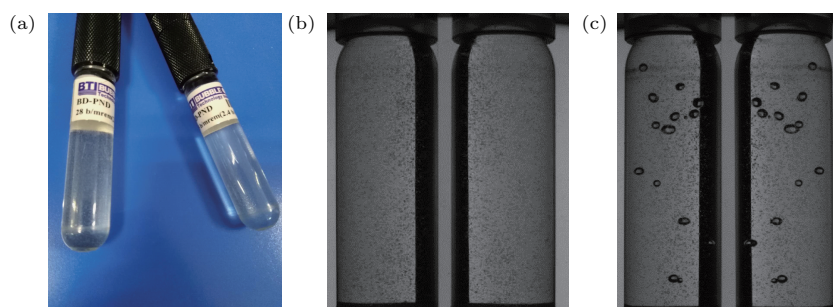


图2 BD-PND 型号气泡探测器 (a) 气泡探测器外观; (b) 实验前的气泡探测器; (c) 实验后的气泡探测器
 Fig. 2. The BD-PND bubble detectors: (a) The exterior of the bubble detectors; (b) the bubble detector before the experiment; (c) the detector after the experiment.

表1 气泡探测器的主要参数

Table 1. Main parameters of the bubble detector.

发次	方位/(°)	距离/cm	灵敏度/bub-mrem ⁻¹
071 (10 μm 靶)	35	17	24
	315	16	25
	330	11	35
072 (2 mm 靶)	5	30	36
	70	23	25
	290	24	22
076 (2 mm 靶)	355	30	35
	5	31	35
	45	22	25
076 (2 mm 靶)	270	19	22
	300	23	35
	315	24	24
	355	31	35

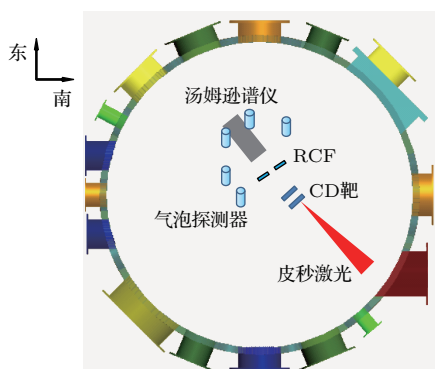


图3 靶室内探测器的布局示意图

Fig. 3. Layout of the experimental diagnostics in the target chamber.

气泡探测器不能直接放置在真空靶室内, 实验中的气泡探测器放在密封的金属壳(材料是Al, 厚度为2 mm)内, 然后再放置在靶室内, 其位置如图3所示. 为了同时测量氘离子的能谱信息, 在与靶后法线方向平行、距离次级靶85 mm的位置放

置了多通道汤姆孙谱仪^[33]. 谱仪采用8个针孔阵列, 可对以靶后法线方向为中心±4°内的离子束的能谱进行测量, 针孔直径均为60 μm. 高能氘离子束的角分布由放置在靶后法线方向上距离为70 mm的辐射变色薄膜(RCF)和多通道离子谱仪测量^[33].

3 实验结果与讨论

3.1 数据处理

皮秒激光与主靶相互作用, 通过TNSA加速机制产生高速运动的氘离子. 产生的氘离子再与次级靶相互作用, 发生D(d, n)核反应从而产生中子. 通过BD-PND型号气泡探测器测量得到气泡个数, 利用 $N = AS/(MR\Omega)$ 对实验数据进行处理: 其中 N 为每单位立体角内的中子产额, A 表示气泡探测器测量得到的气泡个数, S 表示气泡探测器相对于靶的横截面积, R 表示灵敏度, M 表示灵敏度为1 bub/mrem时气泡数与n/cm²的对应关系^[34], Ω 表示气泡探测器与氘-氘中子源所对应的立体角. 通过对测量的气泡数进行处理, 得到中子束的最大强度为 5.13×10^7 n/sr. 测量得到的中子角分布如图4所示, 其中, 071为10 μm的薄靶(大小为4 mm × 0.5 mm), 072和076为2 mm的厚靶(大小为4 mm × 4 mm). 相比较而言, 薄靶的中子产额远低于厚靶. 主要原因有两点: 一是薄靶的横向尺寸较小, 不足以覆盖整个加速离子束, 两侧有大量离子并未参与核反应; 二是薄靶的厚度较低, 高能离子穿过靶后, 能量并未完全沉积在靶内进行核反应. 图4中的红色圆圈和黑色空心圆圈为相同实验条件下两个发次的2 mm CD靶产生的中子束角分布的实验结果. 从图中可以看出, 在相同实验条件

下实验结果的重复性是比较高的,这进一步验证了实验的稳定性,同时为单发实验结果的可靠性提供了支持.图中 0° 方向为薄膜靶的法线方向(即高能氦离子的入射方向).从图中可以看出,中子的产额具有一定的方向性,氦离子入射方向上的中子产额最大,约是靶平面方向上产额的2.4倍.需要指出的是,在Roth等^[15]的实验中,利用TNSA加速机制产生的离子驱动产生的中子并没有明显的方向性,其原因可能有两方面:一是Roth实验中使用一层 $50\ \mu\text{m}$ 厚的铜薄膜和两层 $50\ \mu\text{m}$ 厚的塑料薄膜对靶进行了保护,这对入射的质子束有一定的散射作用;二是Roth实验中在TNSA加速机制下大部分中子由高能质子和 ^9Be 的反应产生,其角度能量微分截面数据显示,当入射质子能量小于 $20\ \text{MeV}$ 且能量连续分布时,产生中子的角分布接近于各向同性,只有在质子更高能量时中子发射的各向异性才能体现出来.而本文中,中子主要由氦-氦核反应产生.其角度能量微分截面显示在入射氦离子能量小于 $4\ \text{MeV}$ 且能量连续分布时,其各向异性就已经体现出来了.

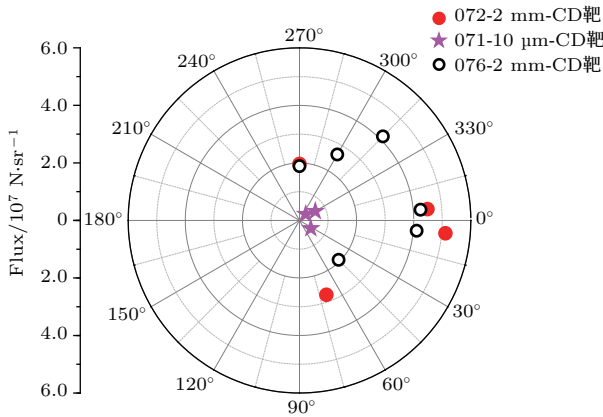


图4 应用气泡探测器测量得到的氦-氦核反应的中子角分布
Fig. 4. Neutron angular distribution obtained by deuterium-deuteron reaction.

3.2 理论验证

在质心坐标系下,氦-氦核反应的微分截面可以由下式得到:

$$\begin{aligned} & \frac{d\sigma_C}{d\Omega}(E_C, \theta_C) \\ &= \sum_{l=0}^{nl} \frac{2l+1}{2} a_l(E_C) P_l(\cos(\theta_C)), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\frac{d\sigma_C}{d\Omega}(E_C, \theta_C)$ 表示的是质心系中氦-氦核反应的微分截面, $P_l(\cos(\theta_C))$ 是勒让德多项式, $a_l(E_C)$

是多项式的系数, E_C 表示质心系下氦离子的入射能量, θ_C 表示质心坐标系中出射中子相对于入射氦离子的散射角度.核反应的微分截面可以在ENDF核反应标准数据库^[35]中查到,在ENDF中微分截面以勒让德多项式系数的形式给出.由于实验结果反映的是实验室参考系中的中子角分布,所以需要坐标系进行转换.

(2)和(3)式分别表示的是质心系和实验室系的角度和角分布微分截面的转换关系.

$$\begin{aligned} \cos(\theta_L) &= \frac{1 + \beta \cos(\theta_C)}{(1 + \beta^2 + 2\beta \cos(\theta_C))^{1/2}}, \quad (2) \\ \sigma_L(\theta_L) &= \frac{\gamma \cos(\theta_C) + (1 - \gamma^2 \sin^2(\theta_C))^{1/2}}{(1 - \gamma^2 \sin^2(\theta_C))^{1/2}} \\ &\quad \times \sigma_C(\theta_C), \quad (3) \end{aligned}$$

其中 $\beta = \sqrt{\frac{A(A+1-A')}{A'} \left(1 + \frac{1+A}{A} \cdot \frac{Q}{E_L}\right)}$,
 $\gamma = \sqrt{\frac{m_D m_n}{m_D m_{He}} \cdot \frac{E_C}{E_C + Q}}$, $A = \frac{m_D}{m_D}$, $A' = \frac{m_n}{m_D}$.
 θ_L 表示实验室坐标系中出射中子相对于入射氦离子的散射角度; E_L , E_C 分别表示实验坐标系和质心坐标系下氦离子的入射能量; m_D , m_n , m_{He} , Q 分别表示氦离子质量数、中子质量数、氦离子质量数以及氦-氦核反应释放的能量.利用上述关系,可以得到实验室系中氦-氦核反应生成中子的角分布微分截面.

在实验室坐标系下,对应于厚的碳靶,单个氦离子射入靶后和相对静止的氦离子碰撞产生能量为 $E_n(E_L, \theta_L)$ 的中子的概率为

$$\begin{aligned} & P(E_n(E_L, \theta_L)) \\ &= \Delta\Omega \int_0^{E_{0,L}} \frac{d\sigma_L}{d\Omega}(E_L, \theta_L) n_d(x(E_L)) \\ &\quad \times \frac{dx}{dE_L}(E_L) dE_L, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\Delta\Omega$ 是接收中子的空间立体角, $\frac{d\sigma_L}{d\Omega}(E_L, \theta_L)$ 表示的是实验室系中氦-氦核反应的微分截面, $n_d(x(E_L))$ 表示的是靶上氦离子的密度, $\frac{dx}{dE_L}(E_L)$ 是氦离子行程对能量的导数(即氦离子每损失单位能量所对应的行程), $E_{0,L}$ 表示实验室系中入射氦离子的初始能量, E_L 是实验室系中入射氦离子的瞬时能量.图5为实验中通过汤姆孙谱仪测得的典型氦离子能谱,从图中可以看出,氦离子的截止能量约为 $4.2\ \text{MeV}$.在次级靶为薄靶情况下,角分布计算可以得到最大程度的简化.考虑到氦离子在

穿透 10 μm 的薄膜靶的过程中损失的能量较少, 以 4 MeV 的氘离子为例, 能量损失仅为 0.2 MeV 左右. 对这一很小的能量范围内的中子角分布截面分析发现其截面可近似认为相同, 因此角分布可以通过积分直接进行计算. 而对于厚靶来说, 可以看作是多个薄靶的组合, 可以在计算中将 (1) 式简化为:

$$P(E_n(\theta_L)) = \Delta\Omega A \int_0^{E_{0,L}} \frac{d\sigma_L}{d\Omega}(E_L, \theta_L) dE_L, \quad (5)$$

其中 A 为与角度无关的常数. 由于超强激光与薄膜靶相互作用加速得到的氘离子的能量是连续分布的, 而氘-氘核反应角分布的微分截面随着入射氘离子能量的增大是逐渐增大的, 为了简化计算, 我们分别取入射氘离子能量为 1 MeV 和 3 MeV 来进行计算.

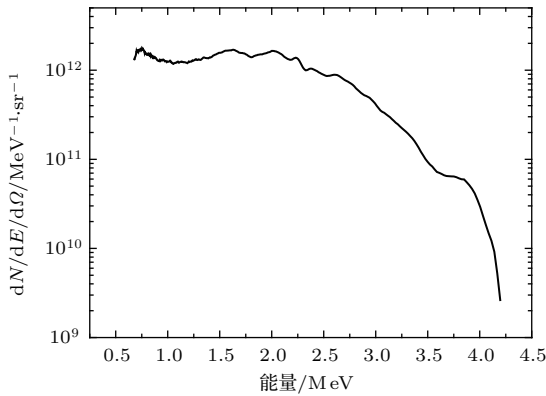


图5 汤姆孙谱仪测量的氘离子束能谱
Fig. 5. Energy distribution of the deuteron beam measured by the Thomson spectrometer.

图6给出了最终计算得到的实验室坐标系下中子的角分布概率, 图中 0° 对应于薄膜靶的法线方向, 即高能氘离子束的入射方向; 红色和浅绿色的线分别表示理论计算的氘离子能量为 1 MeV 和 3 MeV 时中子的角分布概率; 圆圈代表实验得到的中子强度, 其中红色圆圈是 10 μm 薄膜靶的中子产额缩小 10⁷ 倍得到的, 紫色、绿色的圆圈是 2 mm 厚靶的中子产额缩小 3 × 10⁷ 倍得到的. 上述计算是基于氘离子垂直入射的情况, 没有考虑氘离子的角分布. 实验中, 通过 RCF 和多通道离子谱仪测量得到的离子束的发散角约为 16°, 考虑到氘离子的角分布情况, 中子的发散角会在该计算结果的基础上有所展宽, 但中子角分布的趋势不会改变. 从图中可以看出, 紫色和绿色圆圈对应的厚靶产生的中子束

偏离了各向同性, 在入射氘离子的方向上获得的中子产额约为垂直方向上的 2.4 倍. 而红色圆圈对应的薄靶由于靶后有其他探测设备, 只测量了 3 个方位的中子产额, 其产额从靶平面方向到靶后法线方向也具有逐渐增大的趋势. 综合以上 3 发数据, 可以看出实验得到的中子角分布趋势与理论计算的基本一致. 这对氘-氘中子源在实际的应用中具有一定的参考意义.

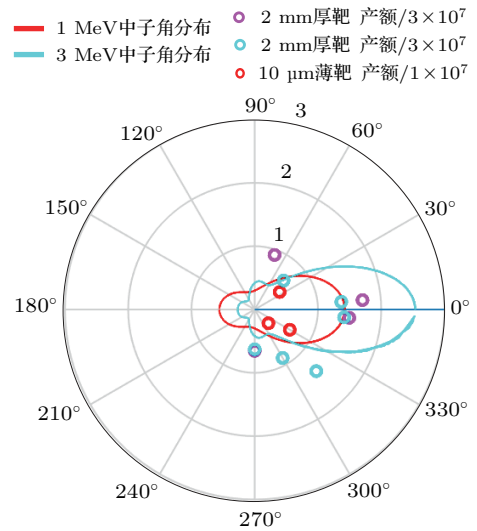


图6 实验测得的中子角分布和理论计算结果的对比图. 图中红线和绿线分别代表入射氘离子能量为 1 MeV 和 3 MeV 时计算得到的中子角分布; 红色、紫色、绿色的圆圈分别代表 071 发薄靶、072 和 076 发厚靶的中子产额, 其缩小倍数分别为 1 × 10⁷, 3 × 10⁷, 3 × 10⁷

Fig. 6. Comparison of the experimental results of the neutron angular distributions and the calculated neutron distributions. The red line and the green line represent the neutron angular distributions when 1 MeV and 3 MeV deuterons are incident on the target. The red, purple and green circles represent the neutron yield of 071 thin target, 072 and 076 thick targets respectively. The yields were reduced by 1 × 10⁵, 5 × 10⁵ and 5 × 10⁵ respectively in the purpose of comparison.

4 结 论

本文利用强激光与碳氘薄膜靶相互作用产生的高能氘离子束撞击碳氘靶获得中子束. 利用气泡探测器对氘-氘核反应产生的中子的产额和角分布进行了测量. 实验结果表明, 中子束的角分布呈现出了各向异性, 在入射氘离子束入射方向上的中子产额要高于垂直方向上的产额. 这一角分布与理论计算结果是基本一致的. 实验中获得的中子束的最大强度为 5.13 × 10⁷ n/sr.

参考文献

- [1] Perkins L J, Logan B G, Rosen M D, Perry M D, Rubia T D, Ghoniem N M, Ditmire T, Springer P T, Wilks S C 2002 *Nucl Fusion* **40** 1
- [2] Zhang F Q, Yang J L, Li Z H, Zhong Y H, Ye F, Qin Y, Chen F X, Ying C T, Liu G J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 583 (in Chinese) [章法强, 杨建伦, 李正宏, 钟耀华, 叶凡, 秦义, 陈法新, 应纯同, 刘广均 2007 物理学报 **56** 583]
- [3] Mason T E 2006 *Phys. Today* **59** 44
- [4] Yang F, Fan S K, Ding D Z, Wu Y T, Ren G H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 113301 (in Chinese) [杨帆, 潘尚可, 丁栋舟, 吴云涛, 任国浩 2011 物理学报 **60** 113301]
- [5] Strobl M, Manke I, Kardjilov N, Hilger A, Dawson M, Banhart J 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** 341
- [6] Womble P C, Schultz F J, Vourvopoulos G 1995 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Sect. B* **99** 757
- [7] Chen H S 2016 *Mod. Phys.* **1** 1 (in Chinese) [陈和生 2016 现代物理知识 **1** 1]
- [8] Wei J 2007 *Mod Phys.* **19** 22 (in Chinese) [韦杰 2007 现代物理知识 **19** 22]
- [9] Bodner S E, Colombant D G, Gardner J H, Lehmburg R H, Obenschain S P, Phillips L, Schmitt A J, Sethian J D 1998 *Phys. Plasmas* **5** 1901
- [10] Zhu B, Gu Y Q, Wang Y X, Liu H J, Wu Y C, Wang L, Wang J, Wen X L, Jiao C Y, Teng J, He Y L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1100 (in Chinese) [朱斌, 谷渝秋, 王玉晓, 刘红杰, 吴玉迟, 王磊, 王剑, 温贤伦, 焦春晔, 滕建, 何颖玲 2009 物理学报 **58** 1100]
- [11] Tarasenko V F, Lomaev M I, Sorokin D A, Nechaev B A, Padalko V N, Dudkin G N 2016 *Matter Radiat. Extrem.* **1** 207
- [12] Jiao X J, Shaw J M, Wang T, Wang X M, Tsai H, Poth P, Pomerantz I, Labun L A, Toncian T, Downer M C, Hegelich B M 2017 *Matter Radiat. Extrem.* **2** 296
- [13] Li Y T, Sheng Z M, Ma Y Y, Jin Z, Zhang J, Chen Z L, Kodama R, Matsuoka T, Tampo M, Tanaka K A, Tsutsumi T, Yabuuchi T, Du K, Zhang H Q, Zhang L, Tang Y J 2005 *Phys. Rev. E* **72** 066404
- [14] Bang W, Dyer G, Quevedo H J, Bernstein A C, Gaul E, Donovan M, Ditmire T 2013 *Phys. Rev. E* **87** 023106
- [15] Roth M, Jung D, Falk K, Guler N, Deppert O, Devlin M, Favalli A, Fernandez J, Gautier D, Geissel M, Haight R, Hamilton C E, Hegelich B M, Johnson R P, Merrill F, Schaumann G, Schoenberg K, Schollmeier M, Shimada T, Taddeucci T, Tybo J L, Wagner F, Wender S A, Wilde C H, Wurden G A 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 044802
- [16] Yin L, Albright B J, Hegelich B M, Fernandez J C 2006 *Laser Part. Beams* **24** 291
- [17] Macchi A, Borghesi M, Passoni M 2013 *Rev. Mod. Phys.* **85** 751
- [18] Wilks S C, Langdon A B, Cowan T E, Roth M, Singh M, Hatchett S, Key M H, Pennington D, MacKinnon A, Snavely R A 2001 *Phys. Plasmas* **8** 542
- [19] Snavely R A, Key M H, Hatchett S P, Cowan T E, Roth M, Phillips T W, Stoyer M A, Henry E A, Sangster T C, Singh M S, Wilks S C, MacKinnon A, Offenberger A, Pennington D M, Yasuike K, Langdon A B, Lasinski B F, Johnson J, Perry M D, Campbell E M 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2945
- [20] Zhao J R, Zhang X P, Yuan D W, Chen L M, Li Y T, Fu C B, Rhee Y J, Li F, Zhu B J, Li Y F, Liao G Q, Zhang K, Han B, Liu C, Huang K, Ma Y, Li Y, Xiong J, Huang X, Fu S Z, Zhu J Q, Zhao G, Zhang J 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 044802
- [21] Klir D, Krasa J, Cikhardt J, Dudzak R, Krousky E, Pfeifer M, Rezac K, Sila O, Skala J, Ullschmied J, Velyhan A 2015 *Phys. Plasmas* **22** 093117
- [22] Ellison C L, Fuchs J 2010 *Phys. Plasmas* **17** 113105
- [23] Cui B, He S K, Liu H J, Dai Z H, Yan Y H, Lu F, Li G, Zhang F Q, Hong W, Gu Y Q 2016 *High Pow. Las. Part. Beam* **28** 66 (in Chinese) [崔波, 贺书凯, 刘红杰, 戴曾海, 闫永宏, 卢峰, 李纲, 张发强, 洪伟, 谷渝秋 2016 强激光与粒子束 **28** 66]
- [24] Davis J, Petrov G M, Petrova T, Willingale L, Maksimchuk A, Krushelnick K 2010 *Plasma Phys. Contr. F* **52** 045015
- [25] Zhang G Y, Ni B F, Li L, Tian W Z, Wang P S, Huang D H, Zhang L Z, Liu C S, Liu L K, Li D H 2005 *Nucl. Tech.* **28** 663 (in Chinese) [张贵英, 倪邦发, 李丽, 田伟之, 王平生, 黄东辉, 张兰芝, 刘存兄, 刘立坤, 李德红 2005 核技术 **28** 663]
- [26] Lewis B J, Smith M B, Ing H, Andrews H R, Machraf R, Tomi L, Matthews T J, Veloce L, Shurshakov V, Tchernykh I, Khoshooniy N 2012 *Radiat. Prot. Posim.* **150** 1
- [27] Che X H, Zhao Y H, Guo S L, Zhu T C, Wang Y L, Fan Z J, Zhou P D 1991 *Nucl. Tech.* **14** 394 (in Chinese) [彻秀红, 赵玉华, 郭士伦, 朱天成, 王玉兰, 樊中钧, 周培德 1991 核技术 **14** 394]
- [28] Olsher R H, Mclean T D, Mallett M W, Romero L L, Devine R T, Hoffman J M 2007 *Radiat. Prot. Dosim.* **126** 326
- [29] Yang J B, Huang H, Liu Z, Wang Q B, Wang X 2016 *Sci. Technol. Eng.* **16** 89 (in Chinese) [杨剑波, 黄红, 刘志, 王琦标, 王旭 2016 科学技术与工程 **16** 89]
- [30] Zhang G G, Ouyang X P, Zhang J F, Wang Z Q, Zhang Z B, Ma Y L, Zhang X P, Chen J, Zhang X D, Pan H B, Luo H L, Liu Y N 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2165 (in Chinese) [张国光, 欧阳晓平, 张建福, 王志强, 张忠兵, 马彦良, 张显鹏, 陈军, 张小东, 潘洪波, 骆海龙, 刘毅娜 2006 物理学报 **55** 2165]
- [31] Zhang X D, Qiu M T, Zhang J F, Ouyang X P, Zhang X P, Chen L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 232502 (in Chinese) [张小东, 邱孟通, 张建福, 欧阳晓平, 张显鹏, 陈亮 2012 物理学报 **61** 232502]
- [32] Lengar I, Skvar J, Ili R 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B* **192** 440
- [33] Zhang Y H, Zhang Z, Zhu B J, Jiang W M, Cheng L, Zhao L, Xu M H, Li Y J, Zhang X P, Zhao X, Yuan X H, Tong B W, Zhong J Y, He S K, Lu F, Wu Y C, Zhou W M, Zhang F Q, Zhou K N, Xie N, Huang Z, Gu Y Q, Li Y T 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 093302
- [34] Ing H, Noulty R A, Mclean T D 1997 *Radiat. Meas.* **27** 1
- [35] E N D F Incident-Deuteron Data <http://t2lanl.gov/nis/data/endl/endlfvii-d.html> [2018-8-11]

Laser fast neutron measured by bubble detector*

Zhao Lei¹⁾ Xu Miao-Hua¹⁾ Zhang Yi-Hang²⁾³⁾ Zhang Zhe^{2)†} Zhu Bao-Jun²⁾³⁾
 Jiang Wei-Man²⁾³⁾ Zhang Xiao-Peng⁵⁾ Zhao Xu⁵⁾ Tong Bo-Wei⁶⁾ He Shu-Kai⁷⁾
 Lu Feng⁷⁾ Wu Yu-Chi⁷⁾ Zhou Wei-Min⁷⁾ Zhang Fa-Qiang⁷⁾ Zhou Kai-Nan⁷⁾ Xie Na⁷⁾
 Huang Zheng⁷⁾ Zhong Jia-Yong⁴⁾⁶⁾ Gu Yu-Qiu⁴⁾⁷⁾ Li Yu-Tong^{2)3)4)‡} Li Ying-Jun^{1)††}

1) (State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

2) (Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

3) (School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

4) (Collaborative Innovation Center of IFSA (CICIFSA), Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

5) (School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

6) (Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

7) (Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang, 621900, China)

(Received 28 May 2018; revised manuscript received 26 September 2018)

Abstract

Neutron source has broad application prospects in crystallography, neutron irradiation, neutron therapy for cancer, and so on. As a new scheme to produce bright pulsed neutron source, the laser-driven neutron has attracted wide interest. In recent years, laser driven neutron sources have been extensively studied and the great progress has been made. Short pulsed laser driven neutron sources could be a compact and relatively cheap way to produce quasi-monoenergetic neutrons. The yields and the angular distributions of the laser-driven neutron sources are important in the research of laser-driven neutron sources and relevant applications. We conduct experimental investigation of this respect by using the XingGuang-III high intense laser facility, which delivers synchronized picosecond and nanosecond laser pulses. The picosecond laser energy is 100 J, the pulse width is 1 ps, and the focusing spot diameter is 20 μm . At this time, the corresponding laser power density reaches $3 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$. A high-energy deuterium ion beam is produced by focusing the picosecond laser on a deuterated polyethylene foil, and the deuterium ion beam is incident on a secondary deuterated polyethylene planar target to activate the D-D reaction to obtain the neutron beam. In the experiment, the neutron yield and its angular distribution are measured by the different-sensitivity BD-PND bubble detectors, which are placed in the target chamber around the target. The emission of the neutron beam is found to be non-uniform. A maximum intensity of $5.13 \times 10^7 \text{ n/sr}$ is observed in the forward direction. The angular distribution of the neutron beam is theoretically calculated by taking into account the energy-angle cross section, the angular and energy distribution of the incident deuterium ion beam. The probability of the neutron energy-angle distribution in the laboratory system is obtained by the coordinate transformation from the probability in the center of mass frame. The results show good agreement with the experimental measurements. This experiment has a certain reference value in the practical application of D-D reaction neutron source.

Keywords: bubble detector, fast neutron, angular distribution

PACS: 21.10.Gv, 21.45.Bc, 29.85.Fj

DOI: 10.7498/aps.67.20181035

* Project supported by the Science Challenge Project, China (Grant No. TZ2016005), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11520101003, 11535001, 11574390), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CBA01504), the Pilot Program of Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. XDB16010200, XDB07030300).

† Corresponding author. E-mail: zzhang@iphy.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: ytli@iphy.ac.cn

†† Corresponding author. E-mail: lyj@iphy.ac.cn