

# 双锥对撞点火实验中的交叉束能量转移 与背向受激布里渊散射\*

高凡<sup>1)</sup> 袁鹏<sup>1)†</sup> 黄浩彬<sup>1)</sup> 寇琦<sup>1)</sup> 贾青<sup>1)</sup>  
远晓辉<sup>2)3)</sup> 张喆<sup>3)4)5)</sup> 张杰<sup>2)3)4)</sup> 郑坚<sup>1)3)</sup>

1) (中国科学技术大学核科学技术学院, 合肥 230026)

2) (上海交通大学物理与天文学院, 激光等离子体教育部重点实验室, 上海 200240)

3) (上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

4) (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)

5) (松山湖材料实验室, 东莞 523808)

(2023年3月23日收到; 2023年6月6日收到修改稿)

在直接驱动激光聚变研究中, 激光辐照靶丸会激励起受激布里渊散射 (SBS) 和交叉束能量传递 (CBET) 等过程, 降低激光与靶丸的能量耦合效率以及激光辐照均匀性, 导致靶丸内爆品质下降. 本文使用一套基于光纤收集信号的背向散射诊断系统, 诊断了双锥对撞点火 (DCI) 实验中波长在 351 nm 附近的时间分辨背向散射光谱. 通过对比不同激光辐照条件下散射光谱的特征, 结合光谱强度与入射激光能量以及激光偏振态的相关性分析, 确认背向散射信号中包含了分别来自 CBET 和背向 SBS 过程的散射成分, 确认镜像激光束之间的偏振夹角对 CBET 的影响. 实验结果表明, 在当前 DCI 实验中, 在 351 nm 附近的背向反射率不高于 3%, 显著低于球对称辐照直接驱动中心点火方案的实验结果.

**关键词:** 双锥对撞点火方案, 交叉束能量转移, 背向受激布里渊散射

**PACS:** 52.38.-r, 52.38.Bv

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230442

## 1 引言

自 Nuckolls 等<sup>[1]</sup> 提出利用激光烧蚀对燃料进行球对称内爆压缩, 从而实现激光聚变中心点火的概念以来, 陆续出现了不少基于直接或间接驱动路线的激光聚变点火方案<sup>[2-7]</sup>. 2022 年末, 美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室在国家点火装置上, 采用间接驱动的方式, 历史性地实现了聚变输出能量超过激光输入<sup>[8]</sup>. 不同于美国劳伦斯利弗莫尔实验室采用的间接驱动中心点火方案, Zhang 等<sup>[9]</sup> 于

2020 年提出双锥对撞点火方案 (double-cone ignition, DCI), 该方案将燃料壳置于两个相向放置的金锥之中, 与中心点火方案相比, 降低了对压缩激光能量的要求; DCI 方案将中心点火方案中在时空上紧密耦合的内爆压缩、加热、点火这 3 个复杂的物理过程分解为近等熵压缩、混合加速、对撞预加热, 以及磁场引导快点火等 4 个紧密相连的物理过程, 规避了中心点火方案中燃料在减速阶段所面临的流体力学不稳定性给点火带来的巨大风险. 因此, DCI 在提高激光与靶丸能量耦合效率、降低流体力学不稳定性给点火带来的风险等方面都具有

\* 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类)(批准号: XDA25010200) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [yuanpeng@ustc.edu.cn](mailto:yuanpeng@ustc.edu.cn)

独特的优势,有望降低压缩激光和点火激光的能量要求,从而降低实现激光聚变点火的难度.

然而,无论采用何种驱动方式,激光聚变都面临着一个共同的重要挑战,即激光等离子体相互作用 (laser-plasma interactions, LPIs) 激励的各种参量不稳定性<sup>[10]</sup>. 在双锥对撞点火方案中,不可避免地使用多束激光辐照靶丸. 在这种激光辐照条件下, LPI 囊括性质不同的诸多参量不稳定性过程<sup>[10,11]</sup>: 单激光束可以激励受激布里渊散射 (SBS)、受激拉曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS) 以及双等离子体衰变 (two plasma decay, TPD) 不稳定性等; 多激光束则能够在等离子体中激励新的物理过程,如未被吸收的残余入射光与入射激光相互作用发生的交叉束能量传递 (CBET)、共用离子声波散射<sup>[12,13]</sup>等. SBS 与 CBET 在间接驱动和直接驱动激光聚变实验中都扮演了非常重要的角色,因而近年来受到极大关注<sup>[14–17]</sup>. Michel 等<sup>[18]</sup>发现从临界密度或者反射面来的散射光会成为 SBS 重要的种子源,并与泵浦光相互作用,在等离子体中形成类似光栅的结构,将大量的泵浦光能量转移至种子光<sup>[19]</sup>,极大降低了激光与靶丸的能量耦合效率. 不仅如此,实验发现 CBET 与 SBS 过程会影响激光的辐照均匀性,从而降低内爆品质<sup>[20]</sup>.

目前,直接驱动激光聚变中 CBET 与 SBS 的实验研究主要在美国的 OMEGA 激光装置上开展<sup>[21–23]</sup>. 而 DCI 由于其非球对称的靶构型,激光辐照方式与传统的直接驱动中心点火方案不同,等离子体状态与能量耦合情况也不同,因此 OMEGA 等装置上的结果只能作为参考,对 DCI 位形下的 CBET 与 SBS 进行诊断是十分必要的. 我们为神光 II 升级装置<sup>[24]</sup>上的 DCI 集成实验<sup>[25]</sup>设计了一套利用光纤取样镜面散射光的背向散射诊断系统,

并利用此诊断系统对 DCI 集成实验中 SBS 波段内的背向散射信号开展了系统性的实验研究,通过对散射信号特征与入射激光能量以及位形的相关分析,可认为在 DCI 集成实验中,发生了 CBET 与 SBS 两种过程,且 CBET 份额高于 SBS.

## 2 诊断系统与实验安排

### 2.1 神光 II 升级装置与 DCI 实验打靶位形

DCI 神光 II 升级装置具有 8 束纳秒加热激光束,激光入射方向与竖直方向有 50° 夹角,环向上靶室上下各均匀分布 4 束,为了防止对穿,上下半球的激光束在环向上错开 45° 排布. 8 束激光编号由 #1—#8, 排布如图 1(a) 所示. 在 DCI 正式实验中,双锥靶上下放置, #1, #3, #5, #7 束激光辐照上锥, #2, #4, #6, #8 束激光辐照下锥,上 4 束激光焦斑叠合在上锥冠顶下方 150 μm 处. 每一束激光采用连续相位板进行匀滑,焦斑直径 700 μm,能量约为 1.75 kJ,单束激光的峰值靶面功率密度约为  $1.8 \times 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>,激光工作波长为 351 nm.

实验中采用的双锥靶构形如图 1(b) 所示. 烧蚀壳层被置于张角为 100° 的金锥当中,锥口相距 100 μm 正对放置. 实验采用了多种壳层结构与材料,如 45 μm 厚的聚对二甲苯 (C<sub>16</sub>H<sub>16</sub>), 45 μm 厚的氯代聚对二甲苯 (C<sub>16</sub>H<sub>14</sub>Cl<sub>2</sub>) (下文称 CHCl 靶), 由 15 μm 厚的聚对二甲苯和 30 μm 厚的氘代聚苯乙烯 ((C<sub>8</sub>D<sub>8</sub>)<sub>n</sub>) 构成的分层靶.

CBET 与发生相互作用的两个激光束之间的偏振夹角有关,我们给出 DCI 打靶位形下上四束激光偏振情况. 如图 2(a) 所示,长的紫色箭头代表各束激光传输方向,紫色箭头上小箭头代表该光束的偏振方向. #5, #7 路激光的具体偏振情况见

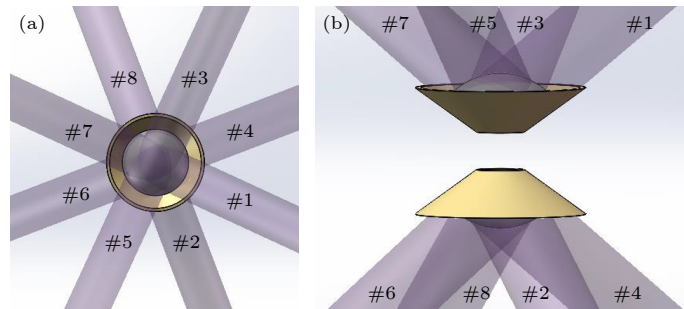


图 1 神光 II 升级激光打靶辐照示意 (a) 激光辐照俯视图; (b) 激光辐照侧视图

Fig. 1. Schematic diagram of Shenguang IIU laser irradiation configuration: (a) Top view of laser irradiation; (b) side view of laser irradiation.

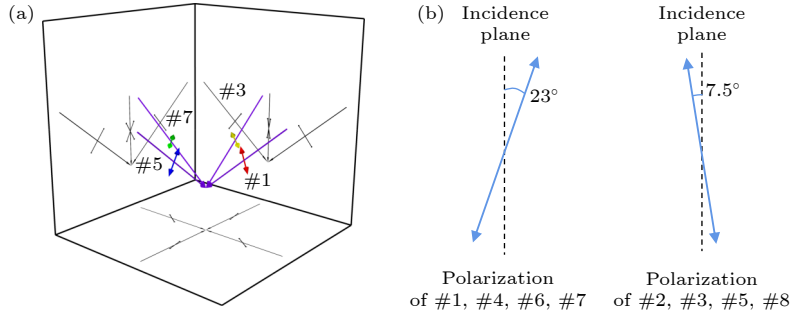


图 2 激光偏振示意图 (a) 上四路激光偏振示意图; (b) 沿激光传输方向偏振示意图

Fig. 2. Laser polarization diagram: (a) Diagram of the polarisation of the upper four lasers; (b) diagram of the polarisation along the direction of laser transmission.

表 1 #5, #7 路激光偏振情况  
Table 1. #5, #7 laser beam polarization.

诊断窗口	靶型	激光入射角/(°)	偏振方向			
			与入射面夹角/(°)	与靶面法向夹角/(°)	与镜像光束偏振夹角/(°)	反射光与镜像光束偏振夹角/(°)
#5背散 (#3镜面反射方向)	双锥靶	50	7.5	40.6	81.2	15
#7背散 (#1镜面反射方向)	双锥靶	50	23	45.2	89.7	46

表 1. 可以看到, 这两束激光的偏振方向在 DCI 双锥靶打靶位形下与其对向光束偏振方向之间的夹角不同. 在入射激光束与其对向激光束的反射光之间可能发生 CBET, 作为参考, 在表 1 中分别给出了镜面反射情况下 #5 路、#7 路激光与其对向光束的偏振方向夹角, 在实验中, 由于等离子体的存在, 具体情况更为复杂.

## 2.2 背向散射光诊断系统

如图 3(a) 所示, 基频光由伺服反射镜反射进入靶室, 经过连续相位板匀滑后由倍频晶体倍频至三倍频. 三倍频激光再经过楔形透镜、防溅射板等光学元件<sup>[26]</sup>, 最终辐照到双锥靶上. 该诊断系统利用光纤收集被伺服反射镜镜面所散射的背向散射光, 通过耦合了光谱仪的条纹相机对散射信号进行采集, 最终给出背向散射的条纹光谱图. 在集成实验中利用两根收光光纤分别对 #5 路、#7 路最后一块伺服反射镜镜面中心区域进行收光. 图 3(b) 是一发典型结果, 背向散射信号在三倍频波段主要由在时间上分开的三部分信号组成. 信号 A 来自激光在三倍频晶体后表面的反射光, 其信号总计数记为  $C_A$ , 信号 B 来自激光在楔形透镜、防溅射板等器件表面上的杂散光, 信号 C 来自靶点处的正背向散射, 其信号总计数记为  $C_C$ . 背向散射份额  $R_{BS}$  则可以通过下式给出<sup>[27]</sup>:

$$R_{BS} = \frac{E_{BS}}{E_{target}} = \frac{E_{BS}}{TE_{laser}} \propto \frac{C_C/T}{TC_A/R} = \frac{R}{T^2} \frac{C_C}{C_A}, \quad (1)$$

其中  $T$  为主、次防溅射板、楔形透镜和三倍频晶体近靶点侧表面的透过率,  $R$  为三倍频晶体后表面反射率,  $E_{BS}$  为靶点处产生的正背向散射光能量,  $E_{target}$  为辐照到靶点的该路三倍频激光能量. 根据终端光学组件内相关元件的透过率、反射率标定数据计算得出  $R/T^2 = 3.2$ , 结合信号 A、信号 C 的计数比, 便可以给出背向散射光的份额. 同时, 利用条纹相机的高速扫描档位对背向散射光谱的时间行为开展更加细致的实验研究.

分析实验数据时, 误差主要来源于以下几个方面: 计算背向散射光份额时, 信号 A 与信号 C 的计数由于选取区域带来的数据处理误差; 谱仪-条纹相机系统对于相同能量的响应不同、终端光学组件由于使用带来的损伤导致的透射率、反射率变化和由于采用光取样而激光光斑的不均匀带来的系统误差.

对于图像处理所带来的误差, 采用多次处理的方法, 计算得到误差约为 4.3%. 对于谱仪-条纹相机的响应误差, 通过统计多发以入射激光能量归一化的 A 区域 (见图 3(b)) 总计数, 得到该响应误差约为 4.7%. 由于无法在每个发次后都对终端光学组件进行标定, 在计算散射份额时使用了实验前靶场给出的标定结果. 在实验过程中终端光学组件的

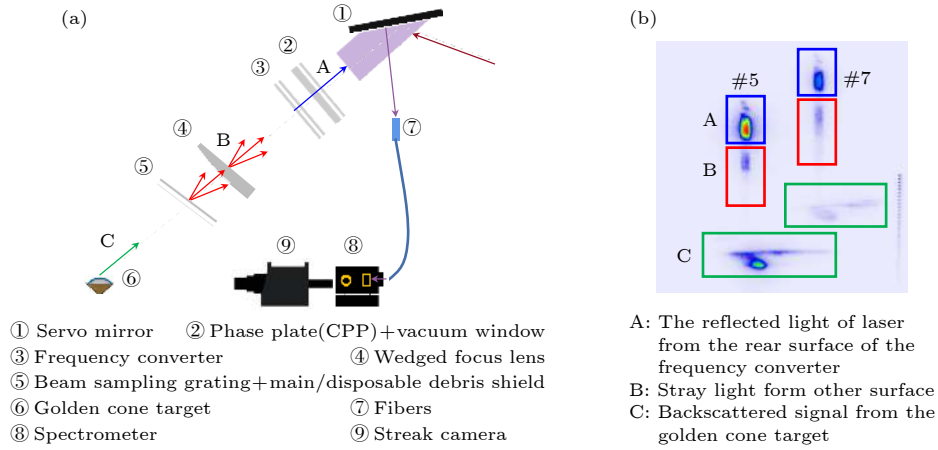


图3 背向散射诊断示意 (a) 激光光路光学元件组成与诊断设备; (b) 诊断系统典型结果

Fig. 3. Schematic diagram of backscatter diagnosis: (a) Composition and diagnosis equipment of optical elements of laser optical path; (b) typical results of diagnostic system.

透过率逐渐降低, 因此我们计算的背向散射份额实际上代表着该发次下的背向散射份额下限. 考虑光纤取样带来的误差, 估计整套系统的误差约为 15%<sup>[27]</sup>. 该套诊断系统得出的背向散射光份额与集成实验中全口径背向散射系统得到的结果趋势相同, 大小基本一致, 这证明了该套诊断系统的可行性.

### 3 实验结果和分析

图4 为一幅典型时间分辨背向散射光谱图以及 DCI 实验中的典型激光波形, 这发实验结果使用了条纹相机的 11 ns 扫描档位采集了靶点处的正背向散射信号 (图3(b) 中的信号 C). 图中 -2 ns, -1.2 ns 与 -0.4 ns 时的信号分别为激光第一、第二和第三个预脉冲对应的背向散射信号. 在主脉冲加载期间, 背向散射谱呈现出“双峰”特征. 其中“蓝峰”信号的波长差在 0—2 Å, 持续时间较长; “红峰”信号的波长差在 2—4 Å, 持续时间较短.

通过对比实验来辅助判断这两部分信号的来源. 图5 为分别加载 #1/#3 路、#1/#3/#5 路、#1/#7 路及 #1/#3/#5/#7 路时诊断到的 #7 路背向散射谱. 激光仅加载 #1/#3 路时, 背向散射光谱在 0 Å 附近有一明显信号. 当加载激光从 #1/#3 路变为到 #1/#3/#5 时, 背向散射谱的强度以及光谱时间演化行为基本一致, 据此排除了该信号来自 #3 路、#5 路侧向散射的可能, 进而判断出该信号来自 #1 路激光的反射光. 而当仅加载 #1/#7 路激光时, 背向散射谱中 #1 路反射光部分的信号强度成量级增长, 可认为发生了 CBET 过程, #1 路

激光的反射光被 #7 路激光放大. 此外, 在加载 #1/#7 路激光时, 还出现了一个波长变化较长 (-2—2 Å) 的信号, 该信号仅在 #7 路激光开启时出现, 判断该信号为 #7 路激光激励的 SBS 信号.

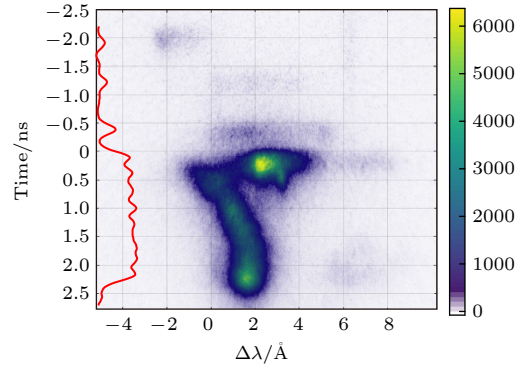


图4 典型背向时间分辨散射光谱与激光波形 (红色曲线)  
Fig. 4. Typical time-resolved backscattering spectrum and laser waveform (red line).

当等离子体特征梯度标长远大于激光波长, 离子声波的阻尼显著且以朗道阻尼为主, 可采用稳态对流增益模型来描述 SBS 的增益<sup>[28]</sup>:

$$G_{\text{SBS}} \approx \frac{1}{8} \frac{\omega_0}{c} \frac{n_e}{n_c} \frac{v_0^2}{v_{\text{te}}^2} \frac{\omega_{\text{IAW}}}{v_{\text{IAW}}} L, \quad (2)$$

其中,  $v_{\text{IAW}}$  为离子声波朗道阻尼,  $v_{\text{te}}$  为电子热速度,  $L$  为等离子体密度梯度标长,  $v_0$  为电子在激光光场中的抖动速度. 从 (2) 式可以看出, SBS 的增益因子与泵浦光强 ( $\propto v_0^2$ ) 成正比, 和电子热速度成反比. 因此, 增强泵浦光 (#7) 会使 SBS 效应增强, 而上四路整体激光能量的升高会使电子温度提升, 电子热速度增大, 使 SBS 增益降低.

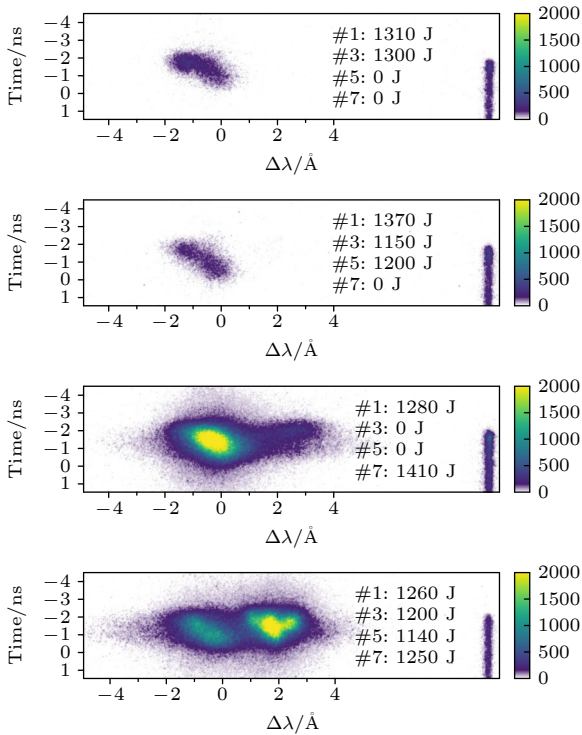


图 5 对比实验的背向散射光谱

Fig. 5. The results of the experiments with different laser conditions.

首先利用靶场标称激光能量与激光信号计数  $C_A$  计算出其信号计数对应的能量. 再将其与各路激光能量的关系进行统计, 其结果如图 6 所示. 从图 6 可以直观看出, 这部分信号能量有随 #7 路激光能量增强而变大的趋势. 由于 #7 路激光能量与该信号本身成正相关, #5 路激光与 #7 路激光同源, 因此使用 #1 与 #3 两路激光能量和代表整体的辐照能量. 计算得出 SBS 能量与 #1, #3 路能量之和的相关系数为 -0.54, 与 #7 路能量相关系数为 0.69. 因此, 该信号与 #7 路激光强度有很强的正相关性, 与 #1, #3 光强有着较强的负相关性, 这与上述 SBS 的稳态对流增益理论是定性一致的. 这为我们判断该信号为 SBS 信号提供了佐证.

经过上述分析, 我们认为在主脉冲加载期间, 波长在 351 nm 附近的背向散射信号至少来自两个过程: 持续时间较长的“蓝峰”信号是镜像光束 #1 路激光的反射光与 #7 路激光经由 CBET 效应放大得到的信号; 持续时间较短的“红峰”信号是 #7 路激光激励的 SBS 信号. 以此物理图像为基础, 将 #5 和 #7 路背向散射信号分为 SBS 信号和 CBET 信号分别进行处理, 其结果如图 7 所示.

图 7(a) 显示 #5, #7 路背向散射总份额大小为 1%—3%, 而在相似的激光靶面功率密度条件下, OMEGA 装置上中心点火方案的背向散射份额约为 10%—20%<sup>[23]</sup>. 可推测 DCI 方案的背向散射份额低的原因可能有两个: 一是由于传统的直接驱动方案中, 激光束光轴通过球对称靶丸的球心, 而 DCI 方案的激光辐照方式更接近于斜入射; 二是 DCI 方案使用金锥简化了传统的球对称辐照, 并将压缩与加热两个物理过程分离, 因而能够充分控制压缩过程中的不稳定性过程的发展, 提高激光-靶丸耦合效率. 因此, 当前 DCI 方案的背向散射份额显著小于传统中心点火方案. 对比图 7(b) 中 #5 和 #7 路背向散射的 SBS 份额, 其大小基本接近. 出现明显差别的是两路的 CBET 份额, #5 路 CBET 份额系统性大于 #7 路 CBET 份额. 离子声波耦合方程有如下的形式<sup>[10]</sup>:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c_s^2 \nabla^2\right) \tilde{n}_e = -\frac{Zn_0 e^2}{m_i m_e c^2} \nabla^2 (\mathbf{A}_0 \cdot \mathbf{A}_s), \quad (3)$$

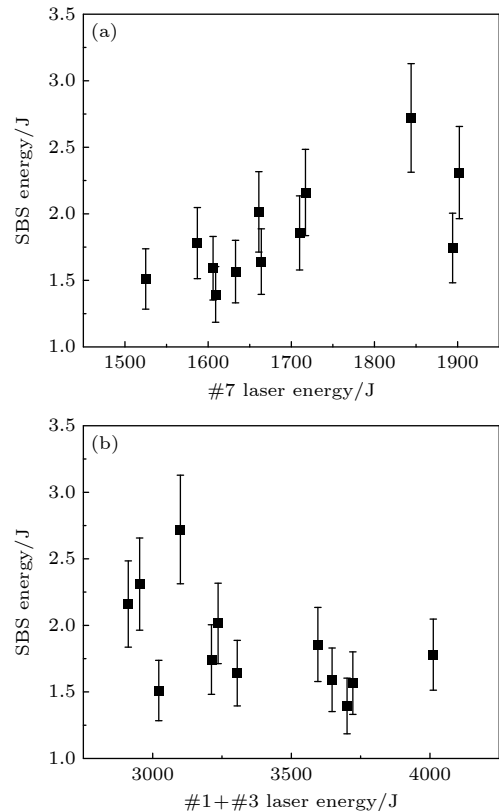


图 6 SBS 能量与各路激光能量关系 (a) 与 #1 路激光能量的关系; (b) 与 #1+#3 路激光能量之和的关系

Fig. 6. Relation between SBS energy and laser energy: (a) Relationship with #1 way laser energy; (b) relationship with the sum of #1+ #3 way laser energy.

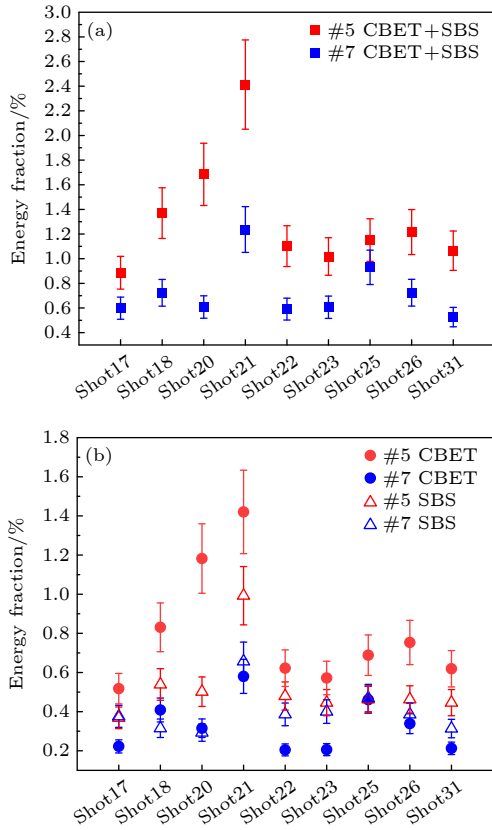


图 7 #5, #7 路三倍频波段背向散射统计 (a) 三倍频波段背向散射总份额; (b) CBET 份额与 SBS 份额  
 Fig. 7. Statistics of #5 and #7 Channels: (a) Total triplet-band backscattered energy fraction; (b) CBET and SBS energy fraction.

其中  $A_0, A_s$  分别代表泵浦光和种子光的矢量势,  $\tilde{n}_e$  代表等离子体的密度扰动. 从耦合方程中可以看到, 泵浦光和种子光的偏振夹角所影响的有质动力项  $\nabla^2(A_0 \cdot A_s)$  在参量放大过程中起着至关重要的作用. 由于 #5, #7 背向散射诊断的其他实验条件一致, 因此可认为 CBET 份额的不同是这两路激光与其对向激光的偏振方向夹角不同所导致的, 这与上述理论定性一致.

#### 4 总 结

本工作为神光 II 升级装置上的 DCI 集成实验发展了一套简单、可靠的背向散射诊断系统, 该诊断系统通过光纤取样反射镜镜面的散射光诊断散射信号, 并采用相对测量的方式给出背向散射份额. 实验结果表明, 在当前 DCI 实验条件下, 351 nm 附近的背向散射份额仅在 1%—3% 的水平. 通过对比实验以及背向散射信号与激光能量的相关性,

判断出背向散射包含了 CBET 和 SBS 两种过程. 最后通过 #5 路、#7 路背向散射光谱中 CBET 份额的差异印证了光束间偏振夹角对与 CBET 效应的影响, 为后续大型激光聚变装置的设计提供参考.

#### 参考文献

- [1] Nuckolls J, Wood L, Thiessen A, et al. 1972 *Nature* **239** 139
- [2] McCrory R L, Regan S P, Loucks S J, et al. 2005 *Nucl. Fusion* **45** S283
- [3] Lindl J 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
- [4] Craxton R S, Anderson K S, Boehly T R, et al. 2015 *Phys. Plasmas* **22** 110501
- [5] He X T, Li J W, Fan Z F, Wang L F, Liu J, Lan K, Wu J F, Ye W H 2016 *Phys. Plasmas* **23** 82706
- [6] Molvig K, Schmitt M J, Albright B J, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 255003
- [7] Betti R, Zhou C D, Anderson K S, Perkins L J, Theobald W, Solodov A A 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 155001
- [8] Clery D 2022 *science. adg* **378** 1154
- [9] Zhang J, Wang W M, Yang X H, et al. 2020 *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* **378** 20200015
- [10] Kruer W L 1988 *The Physics of Laser Plasma Interactions* (New York: Addison-Wesley Publishing Company) p88
- [11] Kirkwood R K, Moody J D, Kline J, et al. 2013 *Plasma Phys. Control. Fusion* **55** 103001
- [12] Qiu J, Hao L, Cao L, Zou S 2021 *Matter Radiat. at Extremes* **6** 65903
- [13] Neuville C, Tassin V, Pesme D, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 235002
- [14] Kritcher A L, Zylstra A B, Callahan D A, et al. 2022 *Phys. Rev. E* **106** 25201
- [15] Froula D H, Igumenshchev I V, et al. 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 125003
- [16] Williams E A, Cohen B I, Divol L, et al. 2004 *Phys. Plasmas* **11** 231
- [17] Turnbull D, Colaitis A, Follett R K, et al. 2018 *Plasma Phys. Control. Fusion* **60** 54017
- [18] Michel P, Rozmus W, Williams E A, Divol L, Berger R L, Glenzer S H, Callahan D A 2013 *Phys. Plasmas* **20** 56308
- [19] Randall C J, Thomson J J, Estabrook K G 1979 *Phys. Rev. Lett.* **43** 924
- [20] Kirkwood R K, Michel P, London R, et al. 2011 *Phys. Plasmas* **18** 56311
- [21] Seka W, Edgell D H, Knauer J P, et al. 2008 *Phys. Plasmas* **15** 56312
- [22] Igumenshchev I V, Edgell D H, Goncharov V N, et al. 2010 *Phys. Plasmas* **17** 122708
- [23] Igumenshchev I V, Seka W, Edgell D H, et al. 2012 *Phys. Plasmas* **19** 56314
- [24] Zhu J Q, Zhu J, Li X C, et al. 2018 *High Power Laser Sci. Eng.* **6** e55
- [25] Zhang Z, Yuan X H, Zhang Y H, Liu H, Fang K, Zhang C L, Liu Z D, Zhao X, Dong Q L, Liu G Y, Dai Y, Gu H C, Li Y T, Zheng J, Zhong J Y, Zhang J 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 155201 (in Chinese) [张喆, 远晓辉, 张翌航, 刘浩, 方可, 张成龙, 刘正东, 赵旭, 董全力, 刘高扬, 戴羽, 谷昊琛, 李玉同, 郑坚, 仲佳勇, 张杰 2022 *物理学报* **71** 155201]
- [26] Qiao Z F, Lu X Q, Zhao D F, Zhu B Q 2008 *Chin. J. Lasers* **9** 1328 (in Chinese) [乔战峰, 卢兴强, 赵东峰, 朱宝强 2008 *中国激光* **9** 1328]

[27] Zhao C, Yuan P, Li X Y, DCI Joint Research Team 2023 *Acta Opt. Sin.* **43** 1114001 (in Chinese) [赵闯, 袁鹏, 李欣焱, 郑坚, DCI 联合研究团队 2023 *光学学报* **43** 1114001]

[28] Gong T 2005 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [龚韬 2015 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]

# Cross beam energy transfer and backward stimulated Brillouin scattering in double-cone ignition experiment\*

Gao Fan<sup>1)</sup> Yuan Peng<sup>1)†</sup> Huang Hao-Bin<sup>1)</sup> Kou Qi<sup>1)</sup> Jia Qing<sup>1)</sup>  
Yuan Xiao-Hui<sup>2)3)</sup> Zhang Zhe<sup>3)4)5)</sup> Zhang Jie<sup>2)3)4)</sup> Zheng Jian<sup>1)3)</sup>

1) (*School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

2) (*Key Laboratory for Laser Plasmas, Ministry of Education, School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

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

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

5) (*Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China*)

( Received 23 March 2023; revised manuscript received 6 June 2023 )

## Abstract

In the research of direct-drive laser fusion, laser irradiation of a target pellet can stimulate various laser plasma instabilities, such as stimulated Brillouin scattering (SBS) and cross-beam energy transfer (CBET), which significantly reduce the energy coupling efficiency between the laser and target pellet as well as the laser irradiation uniformity, leading the implosion quality to degrade. In the double-cone ignition (DCI) scheme of laser fusion scheme, the diagnosis of SBS and CBET is important owing to the different target configurations and oblique incident laser irradiation from the traditional spherically symmetric direct-drive central ignition scheme. In this paper, a simple and reliable backscattering diagnostic system is developed and applied to the diagnosis of the time-resolved backscattering spectrum at wavelength near 351 nm in a DCI experiment on the Shenguang-II upgrade (SG-IIU) facility. We use the system to carry out an experimental study of the SBS process and CBET process in DCI.

The backscattering diagnostic system collects the backscattered light signal through the scattered light by reflector mirror via an optical fiber. The signal is dispersed by a spectrometer and then recorded by a streak camera. The signal contains both the laser reference signal from the frequency doubling crystal and the backscattered light. With the help of the reference signal, the diagnostic system can reliably give the energy fraction of backscattered light. The experimental results show that the energy fraction of backscattered light around 351 nm is not higher than 3%, which is significantly lower than the experimental result of the spherically symmetric irradiation direct-drive central ignition scheme.

By analyzing the correlation between the backscattered signal and the laser irradiation conditions and combining the results of a set of comparative experiments, we determine that the backscattered signal contains both CBET and SBS. There is a significant difference in the CBET fraction between the backscattered signal of the #5 laser and the backscattered signal of the #7 laser. By combining the polarisation state of the laser beams, we confirm that this phenomenon is related to the polarisation angle between the laser beams. This finding provides a reference for designing subsequent large-scale laser fusion devices.

**Keywords:** double-cone ignition scheme, cross beam energy transfer, backward stimulated Brillouin scattering

**PACS:** 52.38.-r, 52.38.Bv

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230442

\* Project supported by the Strategic Priority Research Program (A) of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA25010200).

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



## 双锥对撞点火实验中的交叉束能量转移与背向受激布里渊散射

高凡 袁鹏 黄浩彬 寇琦 贾青 远晓辉 张喆 张杰 郑坚

## Cross beam energy transfer and backward stimulated Brillouin scattering in double-cone ignition experiment

Gao Fan Yuan Peng Huang Hao-Bin Kou Qi Jia Qing Yuan Xiao-Hui Zhang Zhe Zhang Jie Zheng Jian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 175203 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230442

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230442>

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

双锥对撞点火机制2020年冬季实验中的瑞利-泰勒不稳定性分析

Analytical studies of Rayleigh-Taylor instability growth of double-cone ignition scheme in 2020 winter experimental campaign  
物理学报. 2022, 71(3): 035204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211172>

皮秒激光驱动下的背向受激布里渊散射的光谱结构

Spectral structures of backward stimulated Brillouin scattering driven by a picosecond laser  
物理学报. 2021, 70(19): 195202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210568>

水中受激拉曼散射的能量增强及受激布里渊散射的光学抑制

Enhanced stimulated Raman scattering by suppressing stimulated Brillouin scattering in liquid water  
物理学报. 2019, 68(4): 044201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181548>

超音速高密度喷流对撞过程中的高效能量转移

Efficient energy transition from kinetic to internal energy in supersonic collision of high-density plasma jets from conical implosions  
物理学报. 2022, 71(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220361>

水体参数对受激布里渊散射阈值及增益的影响

Influence of water parameters on threshold value and gain coefficient of stimulated Brillouin scattering  
物理学报. 2021, 70(15): 154205 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210326>

非线性效应对前向受激布里渊散射分布式传感的影响

Influence of nonlinear effects on forward stimulated Brillouin scattering distributed sensing  
物理学报. 2022, 71(15): 154206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220313>