

黑腔中等离子体相互作用的流体力学现象观测

黎航 杨冬 李三伟 况龙钰 李丽灵 袁铮 张海鹰 于瑞珍 杨志文 陈韬 曹柱荣 蒲昱东 缪文勇
王峰 杨家敏 江少恩 丁永坤 胡广月 郑坚

Observation of hydrodynamic phenomena of plasma interaction in hohlraums

Li Hang Yang Dong Li San-Wei Kuang Long-Yu Li Li-Ling Yuan Zheng Zhang Hai-Ying Yu
Rui-Zhen Yang Zhi-Wen Chen Tao Cao Zhu-Rong Pu Yu-Dong Miao Wen-Yong Wang Feng
Yang Jia-Min Jiang Shao-En Ding Yong-Kun Hu Guang-Yue Zheng Jian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 235201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181391

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181391>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激波冲击V形界面重气体导致的壁面与旋涡作用及其对湍流混合的影响

Effect of vortex/wall interaction on turbulent mixing in the Richtmyer-Meshkov instability induced by shocked V shape interface

物理学报.2017, 66(23): 235201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.235201>

冲击加载下“V”形界面的失稳与湍流混合

Instability and turbulent mixing of shocked “V” shaped interface

物理学报.2016, 65(24): 245202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.245202>

激波与SF₆球形气泡相互作用的数值研究

Numerical investigations on the interaction of shock waves with spherical SF₆ bubbles

物理学报.2015, 64(1): 015201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.015201>

掺杂对CH样品Rayleigh-Taylor不稳定性增长的影响

Experimental investigation on the influence of the dopant ratio on ablative Rayleigh-Taylor instability growth

物理学报.2014, 63(23): 235203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.235203>

柱面内爆驱动金属界面不稳定性的数值模拟研究

Simulation study of interface instability in metals driven by cylindrical implosion

物理学报.2014, 63(15): 155201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.155201>

黑腔中等离子体相互作用的流体力学现象观测*

黎航¹⁾²⁾ 杨冬¹⁾²⁾ 李三伟¹⁾ 况龙钰¹⁾²⁾ 李丽灵^{1)†} 袁铮^{1)‡} 张海鹰¹⁾
于瑞珍¹⁾ 杨志文¹⁾ 陈韬¹⁾ 曹柱荣¹⁾ 蒲昱东¹⁾ 缪文勇¹⁾ 王峰¹⁾
杨家敏¹⁾ 江少恩¹⁾²⁾ 丁永坤¹⁾²⁾ 胡广月²⁾ 郑坚²⁾

1)(中国工程物理研究院, 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2)(中国科学技术大学, 中国科学院基础等离子体重点实验室, 合肥 230026)

(2018年7月19日收到; 2018年10月16日收到修改稿)

激光间接驱动惯性约束聚变实验中, 黑腔内情况复杂, 在激光烧蚀和辐射烧蚀等的驱动下, 光斑区、冕区、纯辐射烧蚀区、射流区的多种等离子体以不同规律运动. 发展了X光双能段窄能带的时间分辨成像方法, 用以观测黑腔内多种等离子体的运动情况. 在真空黑腔中观测到清晰的射流, 分析了射流产生机制及其速度; 在黑腔中充气, 能有效消除射流和抑制冕区等离子体运动, 但两种物质界面处可能会出现流体力学不稳定性等现象, 分析了界面处的压力平衡关系和密度陡变情况.

关键词: 黑腔, 等离子体, 流体力学现象, X光双能段窄能带

PACS: 52.30.Ex, 52.50.Dg, 52.57.Fg, 52.70.La

DOI: 10.7498/aps.67.20181391

1 引言

激光间接驱动惯性约束聚变(ICF)中, 黑腔内情况复杂, 在激光烧蚀和辐射烧蚀等的驱动下, 光斑区、冕区、纯辐射烧蚀区、射流区的多种等离子体以不同规律运动. 真空黑腔中金等离子体快速汇聚于腔中心, 阻碍激光的进一步注入; 相邻的两团金等离子体相互挤压产生射流, 这将形成不均匀的等离子体辐射源, 不利于均匀辐照腔中心的靶丸. 在黑腔中充气能有效抑制冕区等离子体运动和消除射流, 而气体和金等离子体界面可能出现流体力学不稳定性等现象. 对这些复杂流体力学现象的观测, 需要时间、空间、能谱的高分辨诊断^[1-3].

在OMEGA等美国高功率激光实验室^[4-6], 通常采用分幅相机来观测这些流体力学现象. 在神光III原型激光装置上八束并打 $\phi 1.0 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 半腔靶^[7], 利用分幅相机在黑腔注入口观测到了清晰的“车轮辐条”状射流结构, 但注入口只有 $\phi 0.65 \text{ mm}$, 小于腔直径, 因此看不到内壁的激光打

击点. 为了在神光III原型装置上观测到清晰的射流形成全过程, 对黑腔结构和对应的诊断设备等进行了改进, 同时观测到了金等离子体准黑体辐射的Planck谱和M带能段的激光打击点及射流发展全过程.

2 X光分幅相机的双能段窄能带设计

OMEGA等激光装置采用分幅相机配接平面镜和滤片实现窄能带设计(FXI)^[8], 但这种方式安装调试较复杂. 在神光III原型激光装置上巧妙利用典型金等离子体发射谱、滤片透过率和分幅相机的能谱响应组合^[9-12], 设计一种简便的双能段窄能带X光分幅相机诊断方案, 如图1所示, 在时间分辨分幅相机多针孔成像基础上, 针对典型金等离子体发射谱和分幅相机的金微带和微通道板(MCP)能谱响应特点, 分别选配了 $1.5 \mu\text{m}$ 的Al和 $3 \mu\text{m}$ 的Ti作为滤片, 所测主要为峰值 0.8 keV 和 2.5 keV 左右的窄能段X光, 分别突出了金等离子体准黑体辐射的Planck谱和M带的能段.

* 国家自然科学基金(批准号: 11435011, 11775204, 11505170, 11405160, 11305160)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lililing_2007@tsinghua.org.cn

‡ 通信作者. E-mail: yuanzh8406@126.com

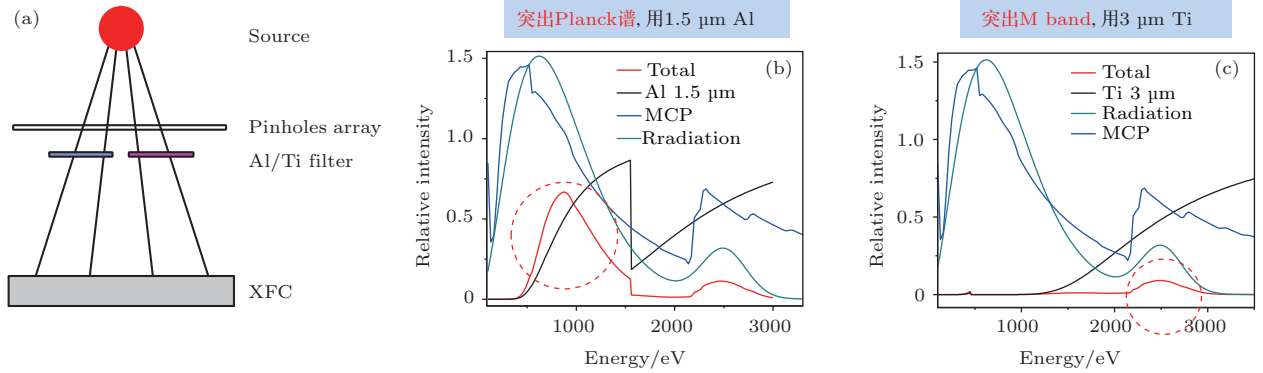


图1 X光分幅相机的双能段窄能带设计 (a) 成像结构; (b) 突出 Planck 谱的能段选择; (c) 突出金 M 带的能段选择; 在时间分辨分幅相机多针孔成像基础上, 针对黑腔中典型金等离子体发射谱(青色线)和分幅相机的金微带和 MCP 能谱响应(蓝色线)特点, 分别选配了 1.5 μm 的 Al 和 3 μm 的 Ti 作为滤片(黑色线), 所测主要为峰值 0.8 keV 和 2.5 keV 左右的窄能段 X 光, 分别突出了黑腔中金等离子体准黑体辐射的 Planck 谱和 M 带的能段(红色线)

Fig. 1. Dual narrow-band design of X-ray framing camera: (a) The imaging structure; (b) the quasi blackbody radiation Planck spectrum of gold plasma is highlighted; (c) the M-band of gold plasma is highlighted. Based on time-resolved X-ray framing camera, using the typical gold plasma emission spectrum (green line), the gold microstrip MCP response spectrum (blue line), and the 1.5 μm Al and 3 μm Ti filter transmittance spectrum (black line), the two narrow-band X-ray peaks (red line) at 0.8 keV and 2.5 keV are highlighted. 0.8 keV indicates Planck spectrum of gold plasma and 2.5 keV indicates M-band of gold plasma respectively.

3 真空黑腔中的射流观测

为了观测真空黑腔的射流运动, 在神光 III 原型激光装置上采用八束对打在真空黑腔的同一环面上, X 光分幅相机(XFC)相对腔轴成 20° 角方向观测黑腔内等离子体运动, 实验排布示意图 2. 两侧各四路激光分别从上下注入口同步注入黑腔, 八路主激光为 1 ns 方波, 波长 351 nm, 每束能量 0.8 kJ. 黑腔尺寸 $\phi 1.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$, 注入口放大到与腔直径同为 1.0 mm, 腔壁为厚 2 μm 的金薄壁, 外有 0.1 mm 的 CH 支撑. 针孔阵列配 X 光分幅相机相对腔轴成 20° 夹角方向通过注入口测量等离子体径向运动图像, 以避免腔口等离子体对激光打击点的遮挡. XFC 采用 5 倍放大, 空间分辨 20 μm, 时间分辨 0.1 ns [13-15].

实验结果见图 3, 图示强度为金等离子体的自发光, 与等离子体的温度、密度分布及观测方向相关 [1, 2], 而 X 光双能段窄能带的时间分辨成像方法能通过观测不同能区 X 光分布来区分不同等离子体. 观测到的腔壁上激光光斑发光尺寸约 200 μm, 相邻激光打击点直线距离约 383 μm, 前期亮斑为激光打击点; 后期亮纹为打击点间的等离子体间相互作用挤出宽度约 70 μm 的射流; 最终亮芯为在中心堆积的等离子体. 0.8 keV 的 X 光在激光打击点和金壁再发射区域都有分布, 初期发光主要是打击

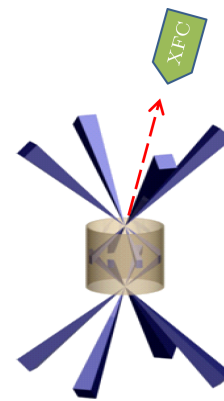


图2 真空黑腔的射流观测实验排布

Fig. 2. Experimental arrangement of the jet observation in vacuum hohlraum.

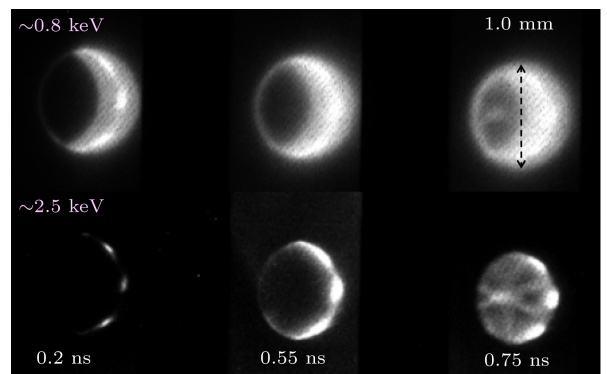


图3 真空黑腔中等离子体演化过程的分幅图像

Fig. 3. Images of plasma evolution in vacuum hohlraum observed by XFC.

点的初次发射, 后期金壁再发射也变强, 且可见聚心的等离子体和不明晰的射流, 射流不明显可能是因为金壁再发射远大于射流发光, 0.8 keV 的后期 X 光图像体现了辐射场在 Planck 谱能段的均匀性. 2.5 keV 的 X 光集中于激光打击点和射流等, 金壁再发射没有该能段的光, 激光打击点和射流聚心可见清晰细致的微观结构.

通常认为, 射流的产生机制与碰撞、磁场等因素有关, 而具体哪一种机制主导需要看热压与磁压的比值 β [16-19]. 该实验中, 黑腔金等离子体电子温度约为 2 keV, 密度约 $0.2n_c$ 即 $1.8 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, 热压为 $P = 0.2n_c \times kT = 1.8 \times 10^{27} \text{ m}^{-3} \times 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 2.3 \times 10^7 \text{ K} (2 \text{ keV}) = 5.7 \times 10^{11} \text{ Pa}$; 磁场约 100 T [20], 磁压约 $4 \times 10^9 \text{ Pa}$, β 约为 140, 因而金射流的产生应该由碰撞主导. 美国麻省理工学院的 Li 等 [20] 用质子沿腔轴方向穿过黑腔, 非常细致地观测了射流, 发现射流里有 $3 \times 10^8 \text{ V/m}$ 的角向向外强电场, 以及角向电子压力梯度.

根据理想气体绝热稀疏膨胀的解析模型, 冕区前沿物质边界膨胀速度是声速的 3 倍, 而射流前沿是声速的 4 倍 [6,20,21]. 原型黑腔实验条件下, 金等离子体冕区电子温度约 2 keV, 金原子量 197, 电离度 $Z = 40T_e^{0.2} = 40 \times (2 \text{ keV})^{0.2} = 46$ [22], 声速

$$\begin{aligned} C_s &= \sqrt{\frac{Z \times T_e}{m_i}} = \sqrt{\frac{46 \times 2 \text{ keV}}{m_i \times c^2}} \times c \\ &= \sqrt{\frac{46 \times 2 \text{ keV}}{197 \times 931 \text{ MeV}}} \times c \\ &= 212 \text{ km/s}, \end{aligned}$$

实测射流速度约 $0.5 \text{ mm}/0.6 \text{ ns} = 833 \text{ } \mu\text{m}/\text{ns}$, 约为 3.9 倍声速.

4 充气黑腔中两种物质界面处的流体力学不稳定性和压力平衡关系

为了研究充气对黑腔射流的影响, 设计了一种充气黑腔. 黑腔尺寸 $\phi 1.4 \text{ mm} \times 1.4 \text{ mm}$, LEH 1.4 mm, 内充 0.40—0.73 atm (1 atm = 101325 Pa) 的 C_5H_{12} 气体以抑制等离子体的聚心运动. 八束激光打击在黑腔同一环面上, 八路激光为 0.5 ns 烧膜预脉冲加 2 ns 方波主脉冲, 总能量 8 束 \times (40 J 预脉冲 + 800 J 主脉冲) = 6720 J, 波长 351 nm, 焦斑 0.5 mm. XFC 采用双能段窄能带诊断, 在靶室上极点通过注入口沿腔轴方向观测.

用 XFC 观测到的真空腔和充气腔中的等离子体运动情况对比如图 4 所示, 两种充气压力下的等离子体演化过程对比如图 5 所示. 可见黑腔充气后消除了射流, 抑制了等离子体的聚心运动, 气压增高后抑制效果更强; 冕区前沿可见清晰的 $\text{C}_5\text{H}_{12}/\text{Au}$ 界面, 甚至后期在 C_5H_{12} 的抑制下 Au 冕区前沿可见密度堆积; 冕区前沿尖端和冕区中一些丝状结构可能是由于流体力学不稳定性引起的, 更轻的气体等离子体压更重的金等离子体时, 界面会出现瑞利-泰勒不稳定性, Li 等 [23,24] 用质子成像也观测到疑似的该流体力学不稳定性; 靠近注入孔的腔壁附近可见一环 0.8 keV 左右的 X 光, 2.5 keV 左右能段观测不到, 这是辐射烧蚀的较低温等离子体发出的, 和二维辐射流体程序模拟的结果一致; 八个光斑的不一致可能是因为激光功率不平衡和充气管的影响.

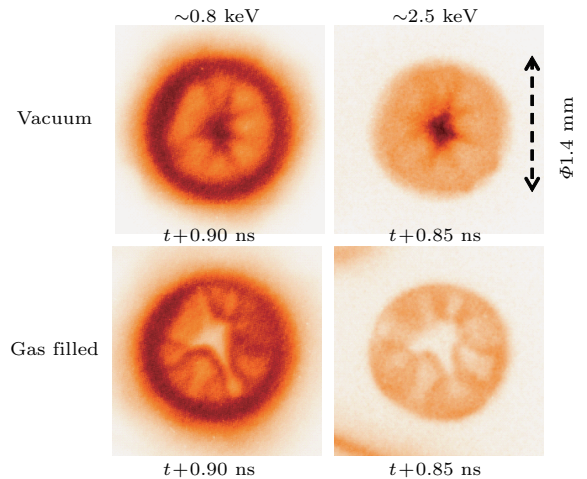


图 4 真空腔和充气腔中的等离子体运动情况对比
Fig. 4. Comparison of the plasma movement in vacuum hohlraum and gas-filled hohlraum.

假设 Au 等离子体运动到腔径一半时和 C_5H_{12} 等离子体达到压力平衡, 可估算 $\text{C}_5\text{H}_{12}/\text{Au}$ 界面处两种物质的等离子体压力平衡关系: 上文已算出 Au 等离子体热压 $5.7 \times 10^{11} \text{ Pa}$; C_5H_{12} 等离子体热压为原始气压 0.4 atm、密度压缩倍数 4、离化粒子增加倍数 48 和温度提升量 2 keV/300 K 的乘积, 即 $6.0 \times 10^{11} \text{ Pa}$; 由此估算可见两种物质的等离子体压力基本平衡.

Au 原子量 197, 电离度为 46, 即电离出 47 个离子; C_5H_{12} 分子量 $12 \times 5 + 1 \times 12 = 72$, C_5H_{12} 全电离出 $(6 + 1) \times 5 + (12 + 1) = 48$ 个离子, 与 Au 的离子数接近; 等压等温条件下, 相同离子数的质量比 $(197/47)/(72/48) = 2.8$ 倍, 即出现了密度陡变.

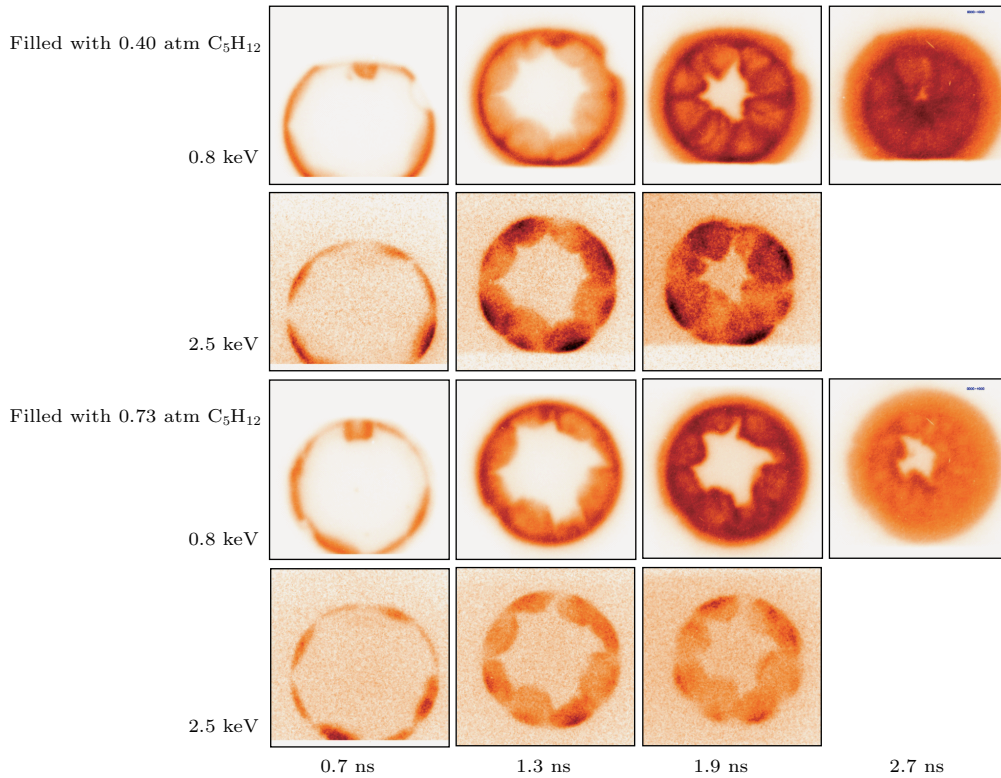


图5 两种充气压力下的等离子体运动情况对比

Fig. 5. Comparison of the plasma movement under different pressures.

5 结 论

惯性约束聚变黑腔中等离子体情况复杂,在激光烧蚀和辐射烧蚀的驱动下,光斑区、冕区、纯辐射烧蚀区、射流区的多种等离子体以不同规律运动.在神光III原型激光装置上巧妙利用典型金等离子体发射谱、滤片透过率和分幅相机的能谱响应组合,设计了一种简便的双能段窄能带X光时间分辨成像方法,分别突显0.8 keV和2.5 keV,即金等离子体准黑体辐射的Planck谱和M带能段,观测真空和充气条件下黑腔内多种等离子体的运动情况.在真空黑腔中观测到清晰的金等离子体射流,分析了其产生机制主要由碰撞而非磁场主导,验证了其速度与解析公式计算的四倍声速相符.充气能有效消除射流和抑制冕区等离子体运动,而两种物质界面处出现了可能由流体力学不稳定性引起的冕区前沿尖端和冕区中一些丝状结构等现象,分析了界面处的压力平衡关系和密度陡变情况.

感谢靶制备和神光III原型激光装置运行的同事为实验提供的帮助,感谢赵益清、李志超等的指导!

参考文献

- [1] Atzeni S, Meyer-ter-Vehn J 2004 *The Physics of Inertial Fusion* (Oxford: Clarendon Press) p131
- [2] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Phys. Plasmas* **11** 339
- [3] Li H, Pu Y D, Jing L F, Lin Z W, Chen B L, Jiang W, Zhou J Y, Huang T X, Zhang H Y, Yu R Z, Zhang J Y, Miao W Y, Zheng Z J, Cao Z R, Yang J M, Liu S Y, Jiang S E, Ding Y K, Kuang L Y, Hu G Y, Zheng J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 225204 (in Chinese) [黎航, 蒲昱东, 景龙飞, 林雄伟, 陈伯伦, 蒋炜, 周近宇, 黄天晖, 张海鹰, 于瑞珍, 张继彦, 缪文勇, 郑志坚, 曹柱荣, 杨家敏, 刘慎业, 江少恩, 丁永坤, 况龙钰, 胡广月, 郑坚 2013 物理学报 **62** 225204]
- [4] Glenzer S H, Alley W E, Estabrook K G, de Groot J S, Haines M G, Hammer J H, Jadaud J P, Macgowan B J, Moody J D, Rozmus W, Suter L J, Weiland T L, Williams E A 1999 *Phys. Plasmas* **6** 2117
- [5] Foster J M, Wilde B H, Rosen P A, Perry T S, Fell M, Edwards M J, Lasinski B F, Turner R E, Gittings M L 2002 *Phys. Plasmas* **9** 2251
- [6] Li C K, Seguin F H, Frenje J A, Rosenberg M, Petrasso R D, Amendt P A, Koch J A, Landen O L, Park H S, Robey H F, Town R P J, Casner A, Philippe F, Betti R, Knauer J P, Meyerhofer D D, Back C A, Kilkenny J D, Nikroo A 2010 *Science* **327** 1231
- [7] Cao Z R, Li S W, Jiang S E, Ding Y K, Liu S Y, Yang J M, Zhang H Y, Yang Z H, Li H, Yi R Q, He X A 2010

- Acta Phys. Sin.* **59** 7170 (in Chinese) [曹柱荣, 李三伟, 江少恩, 丁永坤, 刘慎业, 杨家敏, 张海鹰, 杨正华, 黎航, 易荣清, 何小安 2010 物理学报 **59** 7170]
- [8] Budil K S, Perry T S, Bell P M 1996 *Rev. Sci. Instrum.* **67** 485
- [9] Dewald E L, Rosen M, Glenzer S H, Suter L J, Girard F, Jadaud J P, Schein J, Constantin C, Wagon F, Huser G, Neumayer P, Landen O L 2008 *Phys. Plasmas* **15** 072706
- [10] Rochau G A, Bailey J E, Chandler G A, Nash T J, Nielsen D S, Dunham G S, Garcia O F, Joseph N R, Keister J W, Madlener M J, Morgan D V, Moy K J, Wu M 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 10E323
- [11] Yuan Z, Liu S Y, Xiao S L, Cao Z R, Li H, Wang L W 2009 *Acta Phot. Sin.* **38** 2495 (in Chinese) [袁铮, 刘慎业, 肖沙里, 曹柱荣, 黎航, 王丽伟 2009 光子学报 **38** 2495]
- [12] Riodel M S, Dejus R J 2004 *AIP Conference Proceedings* **705** 784
- [13] Yuan Z, Dong J J, Li J, Chen T, Zhang W H, Cao Z R, Yang Z W, Wang J, Zhao Y, Liu S Y, Yang J M, Jiang S E 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 095202 (in Chinese) [袁铮, 董建军, 李晋, 陈韬, 张文海, 曹柱荣, 杨志文, 王静, 赵阳, 刘慎业, 杨家敏, 江少恩 2016 物理学报 **65** 095202]
- [14] Li H, Song T M, Yang J M, Zhu T, Lin Z W, Zheng J H, Kuang L Y, Zhang H Y, Yu R Z, Liu S Y, Jiang S E, Ding Y K, Hu G Y, Zhao B, Zheng J 2015 *Phys. Plasmas* **22** 072705
- [15] Li H, Li S W, Zhou J Y, Zhang H Y, Cao Z R, Yi R Q, Liu S Y, Ding Y K 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 699 (in Chinese) [黎航, 李三伟, 周近宇, 张海鹰, 曹柱荣, 易荣清, 刘慎业, 丁永坤 2009 强激光与粒子束 **21** 699]
- [16] Nilson P M, Willingale L, Kaluza M C, Kamperidis C, Minardi S, Wei M S, Fernandes P, Notley M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 255001
- [17] Zhong J Y, Li Y T, Wang X G, Wang J Q, Dong Q L, Xiao C J, Wang S J, Liu X, Zhang L, An L, Wang F L, Zhu J Q, Gu Y A, He X T, Zhao G, Zhang J 2010 *Nat. Phys.* **6** 984
- [18] Ma Y Z, Xu B B, Ge Z Y, Gan L F, Meng L, Wang S W, Kawata S 2018 *Phys. Plasmas* **25** 042706
- [19] Guo H Y, Wang L F, Ye W H, Wu J F, Zhang W Y 2017 *Chin. Phys. B* **26** 125202
- [20] Li C K, Seguin F H, Frenje J A, Petrasso R D, Amendt P A, Town R P J, Landen O L, Rygg J R, Betti R, Knauer J P, Meyerhofer D D, Soures J M, Back C A, Kilkenny J D, Nikroo A 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 205001
- [21] Zel'dovich Ya B, Raizer Yu P 2002 *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena* (Mineola, NY: Dover) p522
- [22] Schneider M B, Hinkel D E, Landen O L, Froula D H, Heeter R F, Langdon A B, May M J, McDonald J, Ross J S, Singh M S, Suter L J, Widmann K, Young B K, Baldis H A, Constantin C, Bahr R, Glebov V Y, Seka W, Stoeckl C 2006 *Phys. Plasmas* **13** 112701
- [23] Li C K, Seguin F H, Frenje J A, Rosenberg M J, Rinderknecht H G, Zylstra A B, Petrasso R D, Amendt P A, Landen O L, MacKinnon A J, Town R P J, Wilks S C, Betti R, Meyerhofer D D, Soures J M, Hund J, Kilkenny J D, Nikroo A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 025001
- [24] Li C K, Ryutov D D, Hu S X, Rosenberg M J, Zylstra A B, Se'guin F H, Frenje J A, Casey D T, Johnson M G, Manuel M J E, Rinderknecht H G, Petrasso R D, Amendt P A, Park H S, Remington B A, Wilks S C, Betti R, Froula D H, Knauer J P, Meyerhofer D D, Drake R P, Kuranz C C, Young R, Koenig M 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 235003

Observation of hydrodynamic phenomena of plasma interaction in hohlraums*

Li Hang¹⁾²⁾ Yang Dong¹⁾²⁾ Li San-Wei¹⁾ Kuang Long-Yu¹⁾²⁾ Li Li-Ling^{1)†}
 Yuan Zheng^{1)‡} Zhang Hai-Ying¹⁾ Yu Rui-Zhen¹⁾ Yang Zhi-Wen¹⁾ Chen Tao¹⁾
 Cao Zhu-Rong¹⁾ Pu Yu-Dong¹⁾ Miao Wen-Yong¹⁾ Wang Feng¹⁾ Yang Jia-Min¹⁾
 Jiang Shao-En¹⁾²⁾ Ding Yong-Kun¹⁾²⁾ Hu Guang-Yue²⁾ Zheng Jian²⁾

1) (*Laser Fusion Research Center, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

2) (*Basic Plasma Key Laboratory of Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 19 July 2018; revised manuscript received 16 October 2018)

Abstract

In indirect-drive inertial confinement fusion (ICF), laser beams are injected into a high-Z hohlraum and the laser energy is converted into intense X-ray radiation, which ablates a capsule located in the center of the hohlraum, and thus making it implode. To achieve high implosion efficiency, it is required that the hohlraum inner wall plasma movement, which will block further laser injection through the laser entrance hole (LEH), be suppressed. Evolution of hohlraum radiation nonuniformity caused by the plasma movement will result in implosion asymmetry which will prevent the ignition from happening. Therefore it is very important to study the hydrodynamic movement of high-Z plasma in ICF experiment.

In ICF hohlraum, various plasmas of laser spots, corona, radiation ablation and jets move in different ways driven by laser ablation and X-ray radiation ablation, which is hard to observe and study. An X-ray dual spectral band time-resolved imaging method is developed to clearly observe the motion of various plasmas in hohlraum. Based on the time-resolved X-ray framing camera, using the typical gold plasma emission spectrum, the gold microstrip MCP response spectrum, and the 1.5 μm Al or 3 μm Ti filter transmittance spectrum, the two narrow-band X-ray peaks at 0.8 keV and 2.5 keV are highlighted. The 0.8 keV X-ray shows the Planck spectrum of gold plasma, and 2.5 keV X-ray indicates the M-band of gold plasma.

In the vacuum hohlraum, jets are observed clearly, which are verified to be 4 times the sound speed experimentally. The generation mechanism of gold plasma jets in the ICF hohlraum is mainly due to collision rather than magnetic field, because it is estimated that thermal pressure is much bigger than magnetic pressure. In the gas-filled hohlraum, low-Z C_5H_{12} gas can effectively eliminate high-Z gold jets and suppress the high-Z gold coronal plasma movement. The interface between the low-Z and high-Z substance is observed clearly, and gold plasma is accumulated obviously in the later period at the interface. Moreover, spike and filamentous structure occur at the interface between the two substances, which is probably caused by the hydrodynamic instability. The 0.8 keV rather than 2.5 keV X-ray is observed around inner wall, which originates from the low-temperature plasma driven by radiation ablation and is predicted by simulation code. Furthermore, the pressure balance between the two substances and the density steepness at the interface are also analyzed.

Keywords: hohlraum, plasma, hydrodynamic phenomena, X-ray dual spectral band

PACS: 52.30.Ex, 52.50.Dg, 52.57.Fg, 52.70.La

DOI: 10.7498/aps.67.20181391

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11435011, 11775204, 11505170, 11405160, 11305160).

† Corresponding author. E-mail: lililing_2007@tsinghua.org.cn

‡ Corresponding author. E-mail: yuanzh8406@126.com