

## 静态真空对超声喷流气体团簇制备的实验研究\*

王龙<sup>1)3)</sup> 郭尔夫<sup>1)3)</sup> 韩纪锋<sup>2)3)†</sup> 刘建波<sup>1)3)</sup>李永青<sup>1)3)</sup> 周荣<sup>1)3)</sup> 杨朝文<sup>1)3)</sup>

1) (四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

2) (四川大学原子核科学技术研究所, 成都 610064)

3) (辐射物理及技术教育部重点实验室, 成都 610064)

(2014年5月11日收到; 2014年6月9日收到修改稿)

研究了靶室静态真空对超声喷流气体团簇产生和制备的影响. 通过瑞利散射方法测量了不同静态真空度下超声喷流氙团簇的尺度和密度参数, 发现在喷嘴出口附近团簇尺度和密度受静态真空度的影响较小; 在距离喷嘴较远处, 氙气团簇存在同氢气团簇类似的自限制效应, 验证了自限制效应在团簇制备、输运过程中的重要作用. 该结果对于建造基于激光聚变原理的桌面中子源具有较大的参考意义, 可据此简化真空装置以降低运行和维护成本.

**关键词:** 激光聚变, 桌面中子源, 超声喷流团簇, 静态真空度

**PACS:** 36.40.-c, 52.40.Mj, 52.50.Jm, 47.40.Ki

**DOI:** 10.7498/aps.63.203601

## 1 引言

团簇是由几个乃至上万个原子、分子或离子通过物理或化学结合力组成的相对稳定的微观或亚微观聚集体, 其物理和化学性质随所含的原子数目而变化, 具有既不同于微观粒子又有别于固体材料的特殊性. 1999年, Ditmire等<sup>[1]</sup>用超短超强激光束照射大尺度氙团簇, 结果发现团簇可吸收高达95%的激光能量, 引发氙氙聚变并观测到聚变中子. 由于该装置紧凑, 团簇源制备装置简单, 具有制备桌面中子源的巨大潜力, 且制备的桌面中子源无放射性, 因此, 该方向迅速成为了一个研究的热点课题. 2011年, 中国工程物理研究院激光聚变中心利用超短超强激光与 $CD_4$ 团簇相互作用, 测量到了 $10^3$ 的聚变中子产额<sup>[2]</sup>. 2011年, Willingale等<sup>[3]</sup>在激光强度为 $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup>的条件下, 观测到每发 $10^4$ 的聚变中子.

激光聚变实验一般在真空靶室中开展, 一方面

真空环境对激光的损耗较小, 另一方面真空环境是制备大尺度团簇的必要条件. 因此, 激光聚变实验装置需要设计专门的真空靶室系统以及复杂的机械泵、分子泵等系统来提供真空.

传统的关于团簇形成的理论认为, 低温高背压的气体通过微型喷嘴进入真空环境中, 发生绝热膨胀进而降温, 在降温过程中气体原子或分子通过范德瓦耳斯力结合在一起形成团簇<sup>[4,5]</sup>. 喷嘴内外存在较大的气压差是产生团簇的一个基本要求, 但现有文献大多在较高真空条件下<sup>[6-8]</sup>研究团簇的空间分布、大小、密度等<sup>[9-11]</sup>, 缺少静态真空环境对团簇制备影响的数据. 本文围绕这一目的, 详细研究了靶室静态真空对团簇源制备的影响.

## 2 实验装置及方法

团簇源装置放置在一个真空靶室中, 真空靶室通过一套机械泵和分子泵系统提供真空, 靶室上方

\* 国家自然科学基金(批准号: 11275133)和国家磁约束聚变能发展研究专项(批准号: 2014GB125004)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: hanjf@scu.edu.cn

接有真空规管用于实时监测系统的静态真空度, 系统静态真空可达到  $3 \times 10^{-4}$  Pa. 团簇靶室系统以及尺度测量系统如图 1 所示.

真空靶室下方装有一放气阀直接同空气相连, 放气阀的阀门开口大小可精细调节, 通过调节放气阀的开口大小可改变系统的静态真空. 当要求静态真空度在  $0.1 \text{ Pa} - 3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$  区间时, 系统需同时打开分子泵和机械泵, 通过精细调节放气阀的开口来调节真空度; 当要求静态真空度在  $0.1 \text{ Pa} - 9.9 \times 10^4 \text{ Pa}$  之间时, 关闭分子泵系统, 只打开机械泵系统, 同样通过调节放气阀开口来调节. 基于此原理, 可产生从  $3 \times 10^{-4} - 9.9 \times 10^4 \text{ Pa}$  之间的静态真空, 用于研究静态真空度对团簇制备的影响.

团簇的产生基于超声喷流原理. 钢瓶中的气体通过喷嘴高速喷入真空靶室, 在膨胀降温过程中产生团簇. 此实验中选择的喷嘴喉口直径为  $0.3 \text{ mm}$ , 喷嘴的打开通过 Parker 公司的 S99 系列电磁阀及驱动器来实现, 喷气持续时间从  $0.2 \text{ ms}$  到数秒准连续可调.

团簇的测量基于瑞利散射原理. 瑞利散射诊断光源采用准连续脉冲激光器, 激光器输出波长  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , 脉冲频率从  $1 - 10 \text{ kHz}$  可调, 脉冲宽度小于  $20 \text{ ns}$ . 本次实验选定激光频率为  $4.5 \text{ kHz}$ , 约  $0.2 \text{ ms}$  给出一次瑞利散射信号. 从喷嘴喷出的气体形成的团簇与垂直喷气方向进入的准直激光束发生瑞利散射, 靶室正上方的光电倍增管 (PMT) 收集  $90^\circ$  散射角处的光信号, 将其转变为电信号, 经后端电子学线路输入到示波器及计算机中处理. 在 PMT 前方放置了干涉滤光片以便只测量  $532 \text{ nm}$  的散射光, 并可以有效地减少因杂散光进入光阴极而产生的本底干扰. 通过调节喷嘴与激光束的距离, 可得到距离喷嘴不同位置处的团簇尺度分布. 同时, 为减小激光强度不稳带来的误差, 在激光进入真空靶室前, 通过快响应的光敏探头采集入射窗处的反射光, 测量此反射光的强度, 对团簇瑞利散射信号强度进行归一化处理, 可消除激光功率变化引起的瑞利散射信号强度的变化.

### 3 喷嘴出口附近的实验结果

实验的喷气时间选择为  $20 \text{ ms}$ , 每次喷气可测量得到约 90 个信号, 将所有有效信号的平均值作

为该次喷气的瑞利散射信号的幅度, 方差作为瑞利散射信号的误差 [12].

实验测量了 Ar 团簇在轴向距离  $2 \text{ mm}$  处的瑞利散射信号在不同静态真空度下的幅度, 得到不同背压下瑞利散射信号与静态真空度的关系如图 2 所示.

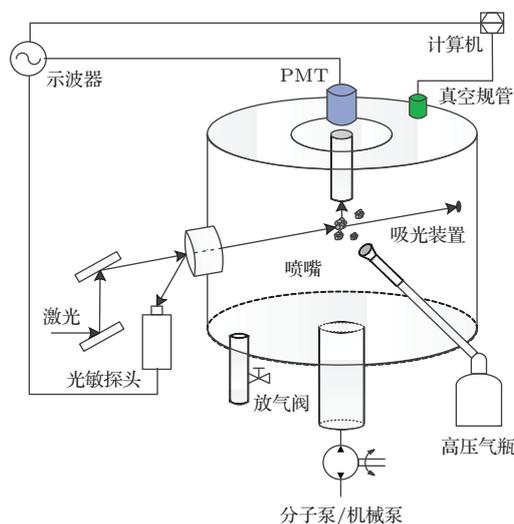


图 1 瑞利散射诊断系统结构示意图

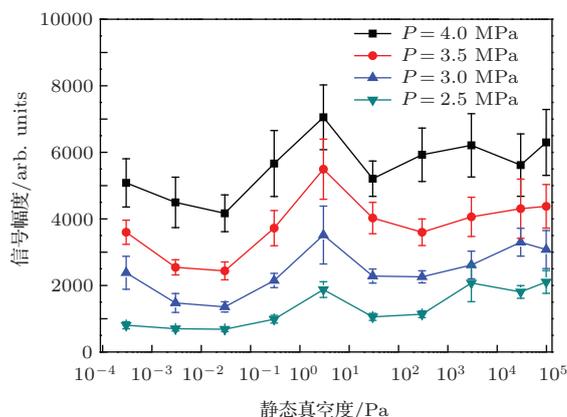


图 2 轴向距离  $2 \text{ mm}$  不同背压下瑞利散射信号与静态真空度的关系

从图 2 中可以看出, 在固定轴向距离  $2 \text{ mm}$  处, 在同一背压下, 静态真空度对瑞利散射信号幅度影响很小. 静态真空度改变达到 8 个数量级的情况下, 瑞利散射信号的幅度在误差范围内变化小于 20%, 即静态真空对于团簇的产生几乎没有影响. 从 Hagen 的经验公式中也可以看出, 团簇的尺度同静态真空无直接的联系.

根据 Hagen 经验公式, 瑞利散射信号与背压符合乘幂关系. 本文进一步研究了静态真空度对幂指数的影响. 在固定轴向距离  $2 \text{ mm}$  时, 拟合得

到不同静态真空度下瑞利散射信号同背压的幂指数, 如图3所示. 结果表明, 幂指数随静态真空度变化很小, 即静态真空度对瑞利散射信号几乎没有影响.

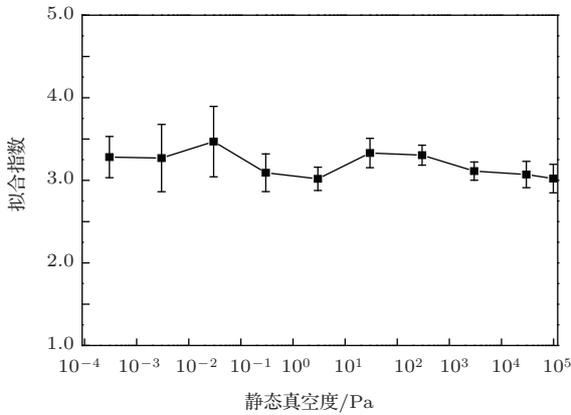


图3 轴向距离 2 mm 拟合幂指数与静态真空度的关系

根据瑞利散射理论, 在 90° 方向上, 散射截面  $\sigma$  与散射体半径  $R$  间满足  $\sigma \propto R^6$ . 形成团簇前气体中的原子数密度为  $n_0 \propto P_0$ , 团簇中包含原子数目即团簇平均尺度为  $N_c$ , 则气体中团簇数密度为  $n_c = n_0/N_c$ . 假设团簇为球形, 则团簇体积正比于  $N_c$ , 即  $R^3 \propto N_c$ . 因此可得到瑞利散射信号强度

$$S \propto \sigma n_c \propto R^6 n_c \propto N_c P_0. \quad (1)$$

根据 Hagen 经验公式, 团簇尺度

$$N_c \propto P_0^{2-2.5}, \quad (2)$$

由 (1) 和 (2) 式可得出  $S \propto P_0^{3-3.5}$ . 从图 3 中可以看出, 实验得到的幂指数与理论值 3—3.5 相符合.

上述结果表明, 轴向距离 2 mm 处团簇的产生同静态真空无必然联系, 即团簇的制备同静态真空度无关. 由于激光团簇打靶位置一般选择在距离喷嘴出口 2 mm 处<sup>[13,14]</sup>, 因此, 在制作基于激光聚变原理的桌面中子源时, 可据此简化真空装置以降低运行和维护成本.

另外, 必须指出的是, 虽然团簇的制备同静态真空度基本无关, 但系统必须提供真空环境且靶室需足够大, 以保证喷出的气体不会在喷嘴出口附近堆积, 否则将导致产生的团簇迅速破碎而无法持续. 本文同时测试了在不抽取真空的情况下产生的散射信号, 发现其散射信号只有抽取真空情况下的 50%, 甚至更小.

#### 4 不同轴向距离时静态真空对团簇尺度的影响

随着轴向距离的增加, 团簇产生后在自由飞行过程中会不断同周围的背景分子(原子)或其他团簇碰撞而解离或破碎, 因此静态真空对于团簇的输运应该有较大的影响. 为此, 实验研究了在轴向距离 20 mm, 200 mm 处的瑞利散射信号随静态真空度的变化. 图 4 给出了背压为 4 MPa、静态真空为  $3 \times 10^{-1}$  Pa, 轴向距离  $d$  分别为 2, 20, 150 和 200 mm 处的 Ar 团簇瑞利散射信号随时间的演化曲线.

由图 4 可见, 在相同静态真空、相同气体背压和温度下, 当轴向距离为 2 和 20 mm 时, 瑞利散射信号随时间的演化过程基本不变, 在整个喷气时间内可基本保持最大信号幅度, 只是 20 mm 处瑞利散射信号幅度远小于 2 mm 处的幅度, 当喷嘴关闭时, 瑞利散射信号迅速降为本底, 表明团簇很快消失. 但当轴向距离逐渐增大到 150 和 200 mm 时, 瑞利散射信号随时间的演化出现较大的变化, 散射信号在喷气过程的起始阶段可基本保持稳定, 之后散射信号不断降低, 最后降低到本底水平. 如在轴向距离 150 mm 时, 散射信号可稳定维持约 13 ms, 后 7 ms 信号逐渐降低; 在轴向距离 200 mm 时, 仅能稳定维持约 7 ms, 接下来的 5 ms 信号逐渐降为本底, 最后 8 ms 内全是本底, 没有有效信号.

与轴向距离 2 mm 的结果相同, 同一轴向距离下产生的瑞利散射信号的演化规律同静态真空基本无关. 图 5 所示为固定背压 4 MPa, 在 2, 20, 200 mm 三种轴向距离下, 团簇产生的瑞利散射信号与静态真空度的关系曲线.

从图 5 可以看出, 轴向距离 2 mm 处, 静态真空度从  $3 \times 10^{-4}$ — $9.9 \times 10^4$  Pa 范围内变化时, 瑞利散射信号幅度几乎不变. 在轴向距离为 20 mm 处, 静态真空度从  $3 \times 10^{-4}$ — $3 \times 10^4$  Pa 范围内变化时瑞利散射信号幅度基本不变; 但当静态真空较差时, 瑞利散射信号幅度随静态真空度变差而逐渐降低. 当轴向距离增大到 200 mm 时, 只有当静态真空在  $3 \times 10^{-4}$ — $3 \times 10^{-1}$  Pa 范围内时, 瑞利散射信号幅度基本不变; 当静态真空差于  $3 \times 10^{-1}$  Pa 时, 瑞利散射信号逐渐减小为零, 说明此时团簇间的碰撞效

应已经非常剧烈, 团簇迅速破碎并引起散射信号降低.

图4和图5表明, 当轴向距离较远时, 氩气团簇出现了类似于低温下氢气团簇的自限制效应<sup>[15]</sup>, 其形成原因是先喷出的气体无法及时离开, 导致局部分子数目急剧增加, 造成后续的团簇碰撞加剧进而破碎. 由于喷出的气体数量远远大于静态真空环境中的空气分子数量, 因此静态真空对团簇形成无明显的影响. 另外, 由于气体在高速通过喷嘴时, 其速度较为一致, 因此在轴向距离较小时,

堆积效应并不明显, 即无自限制效应. 但当轴向距离较大时, 气体分子间速度的不一致性得到放大, 导致碰撞进一步加剧, 如前一时刻喷出的速度较慢的分子和后一时刻喷出的速度较快的分子也可发生碰撞, 从而出现了自限制效应. 表现在图5中就是在距离喷嘴2 mm处基本无自限制效应; 在距离喷嘴20 mm处, 在静态真空度约为 $3 \times 10^4$  Pa时出现自限制效应; 在距离喷嘴出口200 mm处, 在静态真空度为 $3 \times 10^{-1}$  Pa时即出现自限制效应.

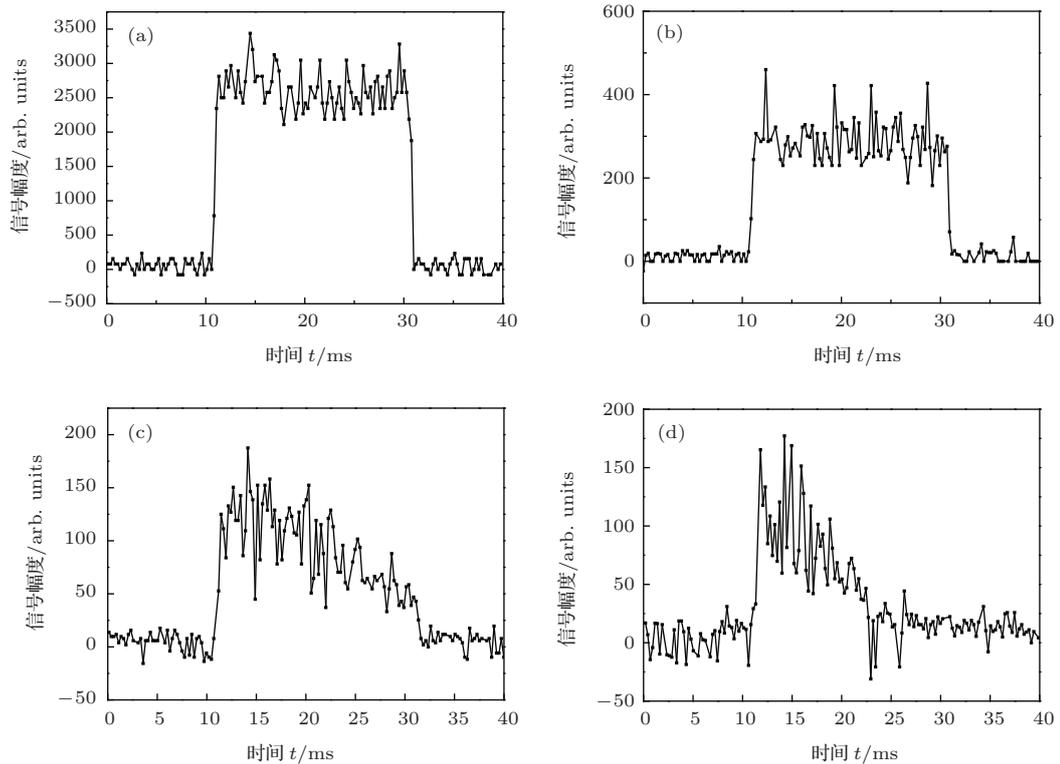


图4 相同背压不同轴向距离 Ar 团簇瑞利散射信号随时间的变化 (a) 轴向距离 2 mm; (b) 轴向距离 20 mm; (c) 轴向距离 150 mm; (d) 轴向距离 200 mm

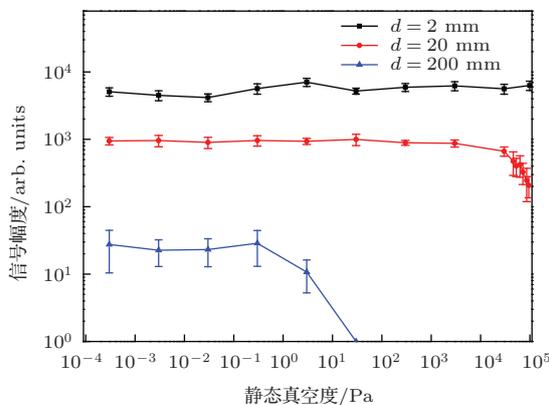


图5 背压为 4 MPa 时不同喷嘴距离下瑞利散射信号与静态真空度的关系

## 5 结 论

本文研究了静态真空对超声喷流团簇制备的影响, 发现静态真空对团簇的制备几乎无关. 这对建造基于激光聚变原理的桌面中子源具有重要意义, 可据此简化真空装置以降低运行和维护成本. 同时通过研究不同轴向距离、不同静态真空度下氩气团簇的瑞利散射信号, 发现氩气团簇存在同氢气团簇类似的自限制效应, 进一步验证了自限制效应在团簇产生、输运过程中存在较大的影响, 需要进一步的深入研究.

参考文献

- [1] Ditmire T, Zweiback J, Yanovsky V P, Cowan T E, Hay G, Wharton K B 1999 *Nature* **398** 489
- [2] Deng C B, Chen J B, Wu Y C, Zhan X Y, Liu H J, Gu Y Q, Cao L F, Tang Q 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 164504 (in Chinese) [邓才波, 陈家斌, 吴玉迟, 詹夏宇, 刘红杰, 谷渝秋, 曹磊峰, 唐琦 2011 强激光与粒子束 **23** 164504]
- [3] Willingale L, Petrov G M, Maksimchuk A, Davis J, Freeman R R, Joglekar A S, Matsuoka T, Murphy C D, Ovchinnikov V M, Thomas A G R, van Woerkom L, Krushelnick K 2011 *Phys. Plasmas* **18** 083106
- [4] Hagen O F, Obert W 1972 *J. Chem. Phys.* **26** 994
- [5] Hagen O F 1992 *Rev. Sci. Instrum.* **63** 2374
- [6] Li S H, Wang C, Liu J S, Zhu P P, Wang X X, Ni G Q, Li R X, Xu Z Z 2005 *Plasma Sci. Technol.* **7** 2684
- [7] Kim K Y, Kumarappan V, Milchberg H M 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 15
- [8] Dorcies F, Blasco F, Caillaud T, Stevefelt J, Stenz C, Boldarev A S, Gasilov V A 2003 *Phys. Rev. A* **68** 023201
- [9] Liu M, Lu J F, Han J F, Li J, Luo X B, Miao J W, Shi M G, Yang C W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6951 (in Chinese) [刘猛, 陆建峰, 韩纪峰, 李佳, 罗小兵, 缪竞威, 师勉恭, 杨朝文 2009 物理学报 **58** 6951]
- [10] Fu P T, Han J F, Mou Y H, Han D, Yang C W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 053602 (in Chinese) [付鹏涛, 韩纪峰, 牟艳红, 韩丹, 杨朝文 2011 物理学报 **60** 053602]
- [11] Han J F, Yang C W, Miao J W, Lu J F, Liu M, Luo X B, Shi M G 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 043601
- [12] Han J F, Yang C W, Miao J W, Lu J F, Luo X B, Shi M G 2010 *Eur. Phys. J. D* **56** 347
- [13] Wei F H, Wu Y C, Gu Y Q, Liu M, Liu H J, Yang C W, Zhu B, He Y L 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 134305 (in Chinese) [魏番惠, 吴玉迟, 谷渝秋, 刘猛, 刘红杰, 杨朝文, 朱斌, 何颖玲 2010 强激光与粒子束 **22** 134305]
- [14] Zheng L, Wang C, Li S H, Liu B C, Ni G Q, Li R X, Xu Z Z 2006 *Chin. J. Lasers* **7** 910 (in Chinese) [郑莉, 王成, 李邵辉, 刘丙辰, 倪国权, 李儒新, 徐至展 2006 中国激光 **7** 910]
- [15] Han J F, Yang C W, Miao J W, Fu P T, Luo X B, Shi M G 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 064327

# Influence of static vacuum on the preparation of cluster of supersonic gas jet\*

Wang Long<sup>1)3)</sup> Guo Er-Fu<sup>1)3)</sup> Han Ji-Feng<sup>2)3)†</sup> Liu Jian-Bo<sup>1)3)</sup> Li Yong-Qing<sup>1)3)</sup>  
Zhou Rong<sup>1)3)</sup> Yang Chao-Wen<sup>1)3)</sup>

1) (*College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

2) (*Institute of Nuclear Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

3) (*Key Laboratory of Radiation Physics and Technology, Ministry of Education, Chengdu 610064, China*)

( Received 11 May 2014; revised manuscript received 9 June 2014 )

## Abstract

The influence of static vacuum on the cluster size and density of the supersonic gas jet is studied by Raleigh scattering method. It is found that in a range from  $3 \times 10^{-4}$  Pa to  $9.9 \times 10^4$  Pa, the static vacuum has very little influence on the cluster size and density. The self-limiting effect which was found for hydrogen cluster at liquid nitrogen temperature is also found for argon cluster at positions far from the nozzle, and it is found to play an important role in the cluster generation and transpiration. The result is very valuable for the construction of the desktop neutron source based on laser fusion method, since the pumps and device to supply the vacuum can be reduced and simplified.

**Keywords:** laser fusion, desktop neutron source, cluster in supersonic gas jet, static vacuum

**PACS:** 36.40.-c, 52.40.Mj, 52.50.Jm, 47.40.Ki

**DOI:** [10.7498/aps.63.203601](https://doi.org/10.7498/aps.63.203601)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11275133) and the Special Funds of the National Magnetic Confinement Fusion Energy Research and Development of China (Grant No. 2014GB125004).

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