

# 低温高背压氘团簇源特性研究\*

王 磊<sup>1)B)</sup> 吴玉迟<sup>2)B)</sup> 王红斌<sup>3)</sup> 刘红杰<sup>3)</sup> 葛芳芳<sup>3)†)</sup> 陈家斌<sup>3)</sup>  
郑志坚<sup>3)</sup> 谷渝秋<sup>3)</sup> 史叔廷<sup>1)</sup> 罗小兵<sup>1)†)</sup> 杨朝文<sup>2)</sup>

1) 四川大学原子核科学技术研究所, 成都 610064)

2) 四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

3) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

4) 同济大学材料科学与工程学院, 上海 200092)

(2007 年 3 月 3 日收到, 2007 年 5 月 8 日收到修改稿)

为了产生大尺度氘团簇用于与强激光相互作用研究, 研制了低温高背压团簇源. 利用瑞利散射法对团簇尺度与气体背压相关性和团簇的形成演变过程进行了研究. 得到团簇尺度  $N_c$  随背压的指数变化关系为  $N_c \propto P_0^{2.89}$ , 当气体温度为 80 K, 背压  $P_0$  为  $48 \times 10^5$  Pa 时, 氘团簇尺度  $N_c \approx 2630$ , 并得到了团簇尺度随时间变化的特性曲线. 这些结果对分析激光与团簇相互作用过程, 优化激光打团簇靶时间有重要意义.

关键词: 氘团簇, 团簇源, 瑞利散射, 激光与团簇相互作用

PACC: 3640, 5250J, 5240M

## 1. 引 言

团簇研究已经有几十年的历史, 由于团簇为分子动力学和低温凝聚效应研究提供了强有力的技术手段, 一直以来都是人们非常感兴趣的课题. 近年来, 随着啁啾脉冲放大技术的发展, 脉冲激光的峰值功率已经达到  $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup> 以上<sup>[1,2]</sup>. 当作用物质由单体分子变为团簇时, 强激光与物质相互作用会产生一系列奇特的现象, 如有很高的激光吸收效率、产生的等离子体具有高得多的温度且包含更多高电荷态及更高能量的离子等, 这引起了人们的极大兴趣. 实验上已观察到能量达  $10^3$  eV 的电子、能量达  $10^6$  eV 的离子以及能量在  $10^3$  eV 量级的 X 射线辐射<sup>[1,3,4]</sup>, 并在强激光辐照氘团簇实验中测量到了一定产额中子<sup>[4]</sup>. 对这些现象进行深入研究, 有可能开发出具有重要应用价值的无碎屑高能量转换效率软 X 射线源、内壳层粒子数反转机制 X 射线激光及台式高效中子源等.

强激光与团簇相互作用过程非常复杂, 取决于激光参数、团簇源的特性以及激光束在团簇介质中

的传输和聚焦状况等因素, 团簇尺度、密度等因素对分析激光与团簇相互作用过程有重要意义. 用于相互作用实验的团簇源一般采用超声绝热膨胀法制备, 形成团簇的尺度由气体初速度、压力、喷嘴的几何形状以及气体原子间结合力等因素决定, 是一个复杂的流体动力学问题, 至今还没有一种严格的理论可以精确地定量描述团簇的形成机理. 目前常用 Hagena 的经验公式<sup>[5,6]</sup>来描述团簇尺度, 但由于团簇形成过程的极端复杂性, 相似设计的阀门只要有一些细微差别, 其产生的团簇都可能存在巨大差异. Hagena 等<sup>[5,6]</sup>的经验理论在定性分析团簇的形成过程时有很好的指导作用, 但在对特定团簇源进行定量计算时却不够详尽准确, 更准确可靠的方法是对所用团簇源进行细致的实验研究, 从而了解其特性. 本工作对用于与强激光相互作用实验的低温高背压团簇源特性进行了研究. 采用瑞利散射法测量氘团簇尺度, 得到了团簇尺度与背压的关系, 测定了团簇尺度随时间变化的特性曲线, 分析了影响团簇尺度的相关因素. 这些结果对分析激光与团簇相互作用过程, 优化激光打团簇靶时间具有重要意义, 同时也加深了对团簇形成机制的认识.

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号:10535030)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: luo811@mail.sc.cninfo.net

## 2. 团簇源系统

当超高压气体经超声喷嘴进入真空室时,由于绝热膨胀,气体原子的平均动能转化为定向动能,使气体温度急剧下降,从而使室温下相互作用微弱的原子或分子冷却并凝聚成核形成团簇.这就是超声绝热膨胀法的原理.Hagena 和 Ober<sup>[6]</sup>对原子团簇的产生过程进行了系统研究,发现气体喷流中团簇开始形成以及团簇尺度变化可用一个经验参数来描述,习惯上称为 Hagena 参数,由下式给出:

$$\Gamma^* = k \frac{(d/\tan\alpha)^{0.85}}{T_0^{2.29}} P_0. \quad (1)$$

这里  $d$  为喷嘴喉直径(单位为 mm); $\alpha$  为喷流膨胀半角,对于声速喷嘴  $\alpha = 45^\circ$ ,对于超声速喷嘴  $\alpha < 45^\circ$ ,对于锥型(conic)喷嘴  $\alpha$  为喷嘴的半角; $P_0$  为气体背压(单位为  $10^2$  Pa); $T_0$  为初始气体温度(单位为 K); $k$  为与键形成有关的常数,表 1 列出了一些气体的  $k$  值<sup>[6-9]</sup>.

表 1 不同气体的  $k$  值

气体	H <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Ne	Ar	Kr	Xe
$k$	184	181	528	1400	3660	185	1650	2890	5500

通常  $\Gamma$  的临界值  $\Gamma^* > 10$ (不同  $k$  值的气体此临界值略有不同, $k$  值较大的气体此临界值也相应大一些)时,气体喷流的大部分聚集成团簇.假设单体原子 100% 结合成团簇,团簇尺度  $N_c$  与  $\Gamma$  的比例关系为  $N_c \propto \Gamma^{*2.0-2.5}$ ,则团簇密度  $n_c = n_0/N_c$ ,其中  $n_0$  为单体原子密度.根据 Farges 等<sup>[10]</sup>的实验结果,Dobosz 等<sup>[11]</sup>拟合得出,当  $50 < N_c < 10^4$  时,

$$N_c \approx 2.5 \times 10^{-4} \Gamma^{*1.95}. \quad (2)$$

一般情况下,原子序数  $Z$  大的气体(如氙气、氪气、氙气)的参数  $k$  比较大,相对容易形成团簇;原子序数  $Z$  小的气体(如氦气、氢气等)参数  $k$  比较小,需要降低喷流的初始温度  $T_0$  或者升高气体背压  $P_0$  才能形成团簇.由(1)(2)式可知,氙在常温下难以形成大尺度团簇,必须采用低温系统制备大尺度气团簇.低温系统相对常温系统更为复杂:不仅多了低温冷却部分,而且低温环境( $-170$  °C左右)对设备耐高压能力和机械性能要求更高.本实验设计的低温高背压团簇制备系统主要有进气装置、冷却装置、阀门、喷嘴和位置调整装置五部分组成,其中最关键的是冷却装置、阀门和喷嘴,它们直接关系

到是否能正常产生团簇.冷却装置结构简单,冷却包是一个中间被掏空的圆柱体,内部中空,由两根管子与外部相连,冷却物质(本实验中采用液氮)由下端的管子进入,从上端的管子溢出.系统温度控制非常关键,本实验中采用热电阻温度计监测储气室温度,并参照气压计读数:当外部未冷却气体进入储气室时,温度下降,气压随之下降,根据  $PV/T$  为常数,当气压计读数稳定时,说明气体已经达到液氮沸点温度.冷却包中间被掏空的部分用来放置阀门.本实验采用的阀门是中国科学院上海光学精密机械研究所研制的电磁阀门,其横截面如图 1 所示.锥形(conic)喷嘴在储气室的最前端,与阀门的接触面采用低温下密封性能良好的钽密封.喷嘴进气端(即喷嘴喉)直径为 0.5 mm,出气端直径为 2.7 mm,总长 21 mm,喷嘴锥角为  $3^\circ$ .冷却装置和电磁阀门等一起置于直径为 40 cm、高为 42 cm 的圆柱形真空靶室中.

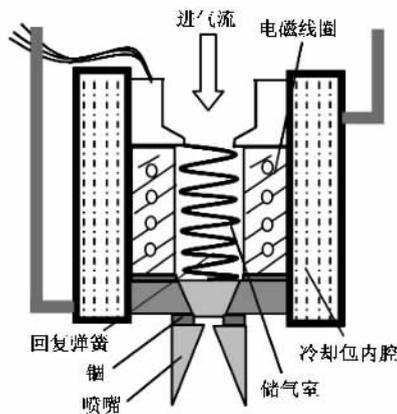


图 1 电磁阀门横截面简图

## 3. 团簇特性测量实验系统

测量团簇尺度有电子衍射、电子碰撞、轻原子散射、光散射以及质谱分析等方法.对于大尺度团簇,要精确测量其尺度是非常困难的.瑞利散射法是光散射法,其优点是实验易行,对于团簇是非破坏性的,所以我们选用该方法测量团簇尺度.利用这种方法,Bell 等<sup>[7]</sup>测量了尺度在 150—4000 的氙团簇,他们认为用瑞利散射法可测量的团簇尺度范围为<sup>[7]</sup>  $N_c = 150-2.4 \times 10^6$ .假设观察到来自团簇喷流的光散射信号强度超过本底水平时,团簇尺度为<sup>[4,9]</sup>  $N_c \approx 100$ ;同时假设团簇密度与气体背压的关系已知,则可根据散射信号强度与背压的比例关系估计团簇尺度.

### 3.1. 瑞利散射法测定团簇尺度原理

一般团簇的尺度小于可见光的波长,与探测光相互作用发生的散射光属于瑞利散射范围内.假设波长为  $\lambda$  的激光入射团簇束发生瑞利散射,其散射光强度  $S$  表示为

$$S = \beta I(\lambda) n_c \sigma V, \quad (3)$$

式中的  $I(\lambda)$  是入射光的强度,  $V$  为散射体积,  $\beta$  为测量效率,  $\beta$  与探测系统的位置、光电倍增管的灵敏度等因素有关. 实验中涉及的大尺度团簇  $N_c$  在  $10^3$  量级, 最小不低于  $10^2$ . 团簇几何结构研究的相关结果表明, 大团簇为多层二十面体或立方结构(cubic structure). 在团簇尺度很大的情况下, 这两种结构与球形的差别可以忽略. 另外, 瑞利散射要求散射体尺度小于光波波长, 实验中探针光波长为 532 nm, 团簇的线度一般不大于 10 nm, 远远小于探针光波长, 所以我们可以假设团簇呈球体状, 并不影响测量结果. 团簇半径  $R$  正比于  $N_c^{1/3}$ , 散射截面  $\sigma$  和团簇半径  $R$  的关系式可以表示为

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{128\pi^5 R^6}{3\lambda^4} \left( \frac{i^2 - 1}{i^2 + 2} \right) \\ &\propto \frac{128\pi^5 N_c^2}{3\lambda^4} \left( \frac{i^2 - 1}{i^2 + 2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为散射光波长,  $i$  为团簇介质的折射率. 因此

$$S \propto \frac{N_c^2}{\lambda^4} n_c.$$

由于

$$n_c = n_0 / N_c,$$

进而可得

$$S \propto n_0 N_c.$$

形成团簇前单体密度  $n_0$  与背压  $P_0$  成正比:  $n_0 \propto P_0$ , 故

$$S \propto N_c P_0. \quad (5)$$

这里  $S$  为测得的散射信号强度. 通过测量不同背压下的散射信号强度  $S$ , 选择合适背压下的散射信号定标, 可得团簇尺度的相对值, 即

$$\frac{N_{c1}}{N_{c2}} \propto \frac{P_{01} S_1}{P_{02} S_2}. \quad (6)$$

理论上, 由 Hagenau 参数知  $N_c \propto P_0^{2-2.5}$ , 因此散射信号强度与背压关系为

$$S \propto P_0^{3-3.5}. \quad (7)$$

### 3.2. 实验装置

瑞利散射法测量团簇尺度实验布局如图 2 所

示. 该系统主要分为三个部分: 光路调整部分, 测量部分, 杂散光消除部分. 探针光从激光器射出, 经凸透镜聚焦于喷嘴下方 2—3 mm 处的  $O$  点. 探针光平行于准直管入射进靶室, 并且通过相对的光子陷阱. 探针光通过  $O, A, B$  三点,  $A, B$  分别为准直管和光子陷阱入口端截面圆心. 准直管的前端放置一滤波带通片, 起减小杂散光的作用. 采用 GDB-60 型光电倍增管在与入射探针光垂直(与入射探针光呈  $90^\circ$  夹角)方向收集散射光信号, 光电倍增管的输出信号用示波器来记录.

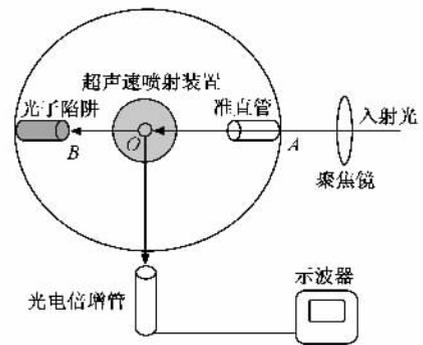


图 2 瑞利散射法实验布局

为了协调激光器和电磁阀门的工作时间, 采用了如图 3 所示的脉冲信号同步控制系统. 该系统先后发出两路脉冲信号, 一路驱动电磁阀门开关喷射气体; 另一路直接触发激光器. 改变激光器与阀门触发信号的时间间隔, 即相对延迟时间  $\Delta t$ , 可获得团簇整个形成演变过程的图景.

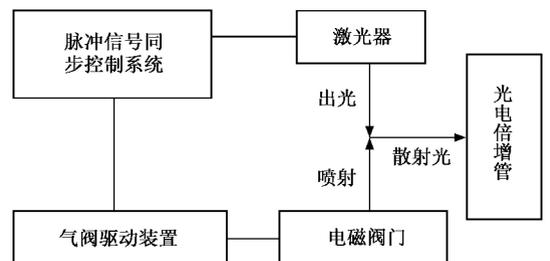


图 3 同步控制系统流程图

## 4. 测量结果及讨论

实验过程中持续加注液氮, 使团簇源系统温度维持在 80 K 左右. 探针光为一束二倍频 Nd:YAG 激光(波长为 532 nm), 输出能量约为 10 mJ, 脉冲宽度约为 10 ns. 探针光经透镜聚焦在离喷嘴中心下方

2—3 mm处(实验的测量点).真空靶室真空度约为  $5 \times 10^{-3}$  Pa,阀门驱动脉冲宽度  $t = 1.234$  ms.

#### 4.1. 本底测量

本底是在气阀不喷气的情况下测量,光电倍增管或激光器的工作电压不同,本底也不同.当光电倍增管和激光器的工作电压分别为 1600 和 740 V 时,由示波器测得本底读数约为 450 mV,多次测量结果显示信号波动范围保持在 400—500 mV 区间内.当光电倍增管和激光器的工作电压分别为 1400 和 680 V 时,测得本底约为 110 mV,多次测量结果显示信号波动范围保持在 80—120 mV 区间内.

#### 4.2. 团簇尺度随背景压强的变化关系

调节光电倍增管和激光器的工作电压分别为 1600 和 740 V,固定探测激光脉冲与电磁阀门开阀触发信号之间的时间间隔,即相对延迟时间  $\Delta t = 10$  ms,将气体背压由  $50 \times 10^5$  Pa 依次降低,测量瑞利散射信号强度,得到散射信号强度  $S$  随背压  $P_0$  ( $12.8 \times 10^5$ — $48.0 \times 10^5$  Pa) 的变化关系如图 4 所示.

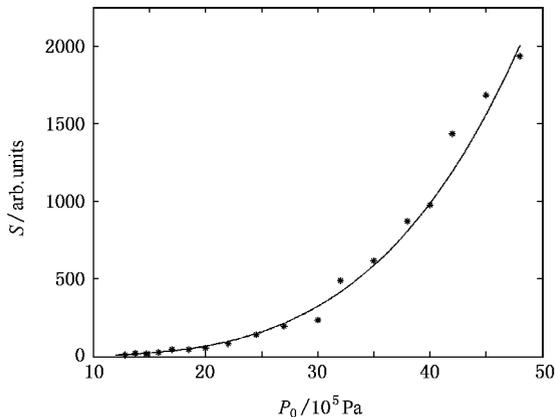


图 4 散射信号强度随背压的变化关系

在不同的气体背压下,氘团簇的尺度存在明显差异.当背压  $P_0 = 13.7 \times 10^5$  Pa 时,团簇的瑞利散射信号强度开始超过本底,达 660 mV,表明氘团簇已经形成.拟合  $S$  与  $P_0$  的关系,得到氘团簇的散射信号强度随背压  $P_0$  呈  $S \propto P_0^{3.89}$  增强(理论值为  $S \propto P_0^{3.0-3.5}$ ),如图 4 中平滑曲线所示.当背压增大到  $48 \times 10^5$  Pa 时,散射信号强度上升到 19.8 V.本实验定标采用 Ditmire 的假设<sup>[12]</sup>,即假定散射信号强度超过本底时团簇平均尺度为  $N_c = 100$ .假设  $P_0 = 13.7 \times 10^5$  Pa 时  $N_c = 100$ .依照(6)式计算并对实验数据进

行拟合,进一步推导团簇尺度与背压的关系为  $N_c \propto P_0^{2.89}$ (理论值  $N_c \propto P_0^{2.0-2.5}$ ),如图 5 所示.这基本符合 Hagen 的经验公式  $N_c \propto \Gamma^{*2.0-2.5}$ .由(6)式可得,当气体温度约为 80 K,背压  $P_0 = 48 \times 10^5$  Pa 时,氘团簇尺度  $N_c \approx 2630$ .在我们将要进行的强激光与氘团簇相互作用实验中,产生聚变中子是一大实验目标,为使团簇库仑爆炸后产生的大多数氘核具有足以发生氘-氘聚变核反应的动能,团簇的半径应达到  $10$  nm<sup>[13-16]</sup>,对应  $N_c \approx 10^4$ .据本实验所得结果推算,当气体温度为 80 K 时,背压必须升高到  $75 \times 10^5$  Pa 才能得到  $10^4$  量级的氘团簇;结合(2)式可得,在背压为  $50 \times 10^5$  Pa 时,温度必须降低到 50 K 才能产生  $10^4$  量级的氘团簇.

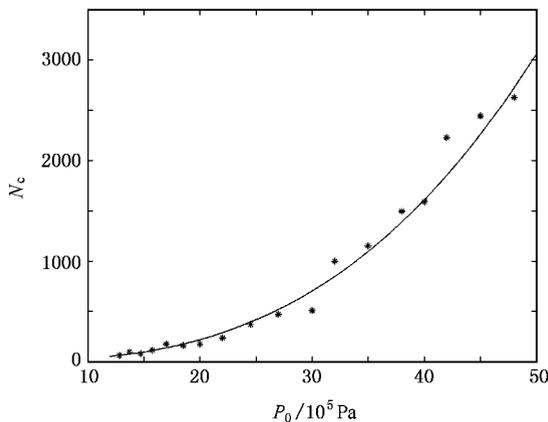


图 5 团簇尺度随背压的变化关系

瑞利散射光强度为实验中直接测量到,与团簇尺度直接相关.根据(6)式,由瑞利散射光强可得团簇尺度.团簇尺度误差由定标信号  $S_1$ (对应  $N_{c1} = 100$ )和实测信号  $S_2$ (对应  $N_{c2}$ )的误差合成.散射光强的误差主要来源于探针光光强误差.

利用(2)式计算得到团簇尺度最大值为  $N_c \approx 1130$  ( $T_0 = 80$  K,  $P_0 = 48 \times 10^5$  Pa).实验测量值与理论计算值比较有一定差异,原因如下:首先,瑞利散射法测量团簇尺度缺乏准确的定标手段,得到的团簇相对尺度与定标方法有很大关系,而 Ditmire 等<sup>[12]</sup>的定标方法又有很大的随意性,他们给出的团簇尺度测量值误差为  $\pm 30\%$ .再者,上述团簇尺度理论计算公式是不同研究人员根据不同的实验数据拟合得到的,公式千差万别,普适性不强.因此,实验测得的团簇尺度  $N_c$  与由  $\Gamma^*$  计算所得的值会出现较大差异.

### 4.3. 团簇形成演变过程

由于瑞利散射信号强度对应着团簇尺度,通过测量散射信号强度随时间的变化,可以了解团簇的形成和演化过程.通过调节探测激光脉冲与电磁阀门开阀触发信号之间的相对延迟时间  $\Delta t$ ,可测量团簇生成过程中不同时刻的散射信号强度.实验中,光电倍增管和激光器的工作电压分别为 1400,680 V,固定激光脉冲相对脉冲信号源的延迟时间,通过改变电磁阀门对脉冲信号源的延迟时间来测量不同时刻散射信号强度,进而得到团簇喷流的时间特性曲线.

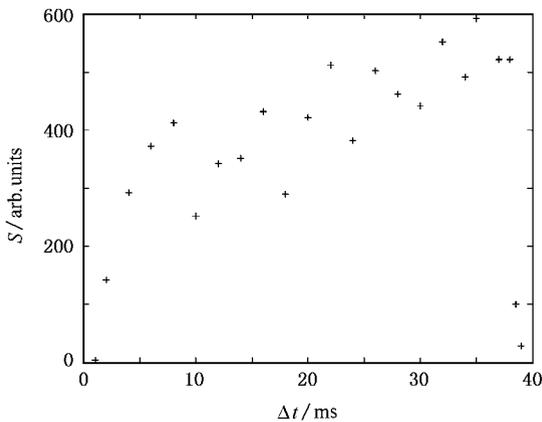


图 6 散射信号强度随相对延时的变化

图 6 显示的是当背压为  $30 \times 10^5 \text{ Pa}$  时团簇喷流的时间特性曲线.  $\Delta t = 0$  时,信号发生器产生  $t = 1.234 \text{ ms}$  的触发脉冲.当触发脉冲的下降沿启动阀门后,氙气喷出并以超声速膨胀.当相对延时  $\Delta t = 2 \text{ ms}$  时,散射信号强度明显增大,表明阀门打开,氙团簇开始形成.此后散射信号强度基本稳定略有增长,直到  $\Delta t = 38.5 \text{ ms}$  时信号强度突然降低,表明团簇尺度迅速减小,阀门关闭.在  $\Delta t = 4\text{—}38 \text{ ms}$  期间,散射信号强度基本保持在一个相对稳定的水平.

以上给出的团簇时间特性曲线中,有几点需要加以说明.首先是散射信号的持续时间,虽然阀门的驱动电流脉冲宽度只有  $1.234 \text{ ms}$ ,但是散射信号持续约  $39 \text{ ms}$ ,说明阀门的实际开启时间约为  $39 \text{ ms}$ .这是由于阀门的密封栓塞具有一定的惯性,当驱动电流脉冲消失时,栓塞在其惯性作用下,继续原来的运动方向,直到它在弹簧推动下重新把阀门关闭.因此阀门的实际开启时间取决于诸多因素,如驱动电流的大小、阀门栓塞的质量和活动范围以及弹簧的弹性系数等,还需要考虑到低温下设备机械性能的变化,动作趋慢,反应时间趋长.再者,图 6 中在  $\Delta t = 4\text{—}38 \text{ ms}$  期间散射信号强度变化与文献 [12] 报道的结果有所不同.这是由于本实验中采用了大储气室,冷却气体量大,远超过阀门开启一次的喷气量,同时螺线管通电时间 ( $1.234 \text{ ms}$ ) 相对阀门开启时间 (约为  $39 \text{ ms}$ ) 短得多,因此螺线管发热所引起的升温效应影响减小,从而使后半段散射信号强度没有明显减弱.另外,因为激光器工作电压的波动,加上系统的涨落,导致在  $\Delta t = 4\text{—}38 \text{ ms}$  期间散射信号强度上下浮动.事实上,超声绝热膨胀法团簇的形成演变与阀门的设计密切相关,得到的结论更多是给定阀门或者是给定喷流的特性.

## 5. 结 论

本工作对用于强激光与团簇相互作用的氙团簇尺度进行了诊断,采用瑞利散射法测量氙团簇尺度,得到了团簇尺度与背压的关系,测定了团簇尺度随时间变化的特性曲线.此结果对分析激光与团簇相互作用过程,优化激光打团簇靶时间有重要意义.然而,团簇尺度的精确测量是非常困难的,实验和相关理论都需要进一步完善.在下阶段实验中,将进一步提高系统真空度到  $10^{-4} \text{ Pa}$ ,并对激光参数进行同步监测,以期得到更好的实验结果.

[1] Ditmire T, Tisch J W G, Springate E, Mason M B, Hay N, Smith R A, Hutchinson M H R 1997 *Nature* **386** 54  
 [2] Shao Y L, Ditmire T, Tisch J W G, Springate E, Marangos J P 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 3343  
 [3] McPherson A, Thompson B D, Borisov A B, Boyer K, Rhodes C K 1994 *Nature* **370** 631  
 [4] Ditmire T, Zweiback J, Yan V P, Cowan T E, Hay G, Wharton K B 1999 *Nature* **395** 689

[5] Hagena O F 1992 *Rev. Sci. Instrum.* **63** 2374  
 [6] Hagena O F, Obert W 1972 *J. Chem. Phys.* **56** 1793  
 [7] Bell A J, Mestdagh J M 1983 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **26** 994  
 [8] Wormer J, Guzielski V, Stapefeldt J, Moller T 1989 *Chem. Phys. Lett.* **159** 321  
 [9] Arno J, Bevan J W 1995 *Jet Spectroscopy and Molecular Dynamic* (London: Blackie)  
 [10] Farges J, Ferady M F D, Raoult B, Torchet G 1986 *J. Chem.*

- Phys.* **84** 3491
- [ 11 ] Dobosz S , Lezius M , Schmidt M , Meynadier P , Perdrix M 1997 *Phys. Rev. A* **56** 2526
- [ 12 ] Smith R A , Ditmire T , Tisch J W 1998 *Rev. Sci. Instrum.* **69** 3798
- [ 13 ] An W K , Qiu X J , Zhu Z Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2250 ( in Chinese ) [ 安伟科、邱锡钧、朱志远 2004 物理学报 **53** 2250 ]
- [ 14 ] Zheng L , Wang C , Li S H , Liu B C , Ni G Q , Li R X , Xu Z Z 2006 *Chin. Phys.* **15** 697
- [ 15 ] Xia Y , Liu J S , Ni G Q , Xu Z Z 2004 *Chin. Phys.* **13** 196
- [ 16 ] Li S H , Wang C , Liu J S , Wang X X , Li R X , Ni G Q , Xu Z Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 636 [ 李邵辉、王 成、刘建胜、王向欣、李儒新、倪国权、徐至展 2005 物理学报 **54** 636 ]

## Characterization of a cryogenically cooled high-pressure gas jet<sup>\*</sup>

Wang Lei<sup>1)B)</sup> Wu Yu-Chi<sup>2)B)</sup> Wang Hong-Bin<sup>3)</sup> Liu Hong-Jie<sup>3)</sup> Ge Fang-Fang<sup>3)†)</sup> Chen Jia-Bin<sup>3)</sup>  
Zheng Zhi-Jian<sup>3)</sup> Gu Yu-Qiu<sup>3)</sup> Shi Shu-Ting<sup>1)</sup> Luo Xiao-Bing<sup>1)†)</sup> Yang Chao-Wen<sup>2)</sup>

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

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

3) *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

4) *College of Material Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*

( Received 3 March 2007 ; revised manuscript received 8 May 2007 )

### Abstract

We have developed and carried out a detailed characterization of a cryogenically cooled ( 80 K ) high-pressure (  $50 \times 10^5$  Pa ) solenoid driven pulsed valve that has been used to produce dense jets of deuterium atomic clusters for interaction studies with high intensity laser. Rayleigh scattering was employed to investigate the scaling law between cluster size and upstream gas pressure, which was shown to be of the form  $N_c \propto P_0^{2.89}$ . Cluster size gets to its peak  $N_c \approx 2630$  at 80 K  $48 \times 10^5$  Pa. We also studied the cluster formation process, portrayed a characteristic curve which revealed cluster size temporal evolution. Our results are important for analyzing the cluster interaction with intense laser, and are expected to provide guidelines to choose proper fire time.

**Keywords** : deuterium clusters, cluster resource, Rayleigh scattering, clusters interaction with intense laser

**PACC** : 3640, 5250J, 5240M

<sup>\*</sup> Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10535030 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : luo811@mail.sc.cninfo.net