

文章编号: 0258-7025(2006)07-0910-04

飞秒强激光脉冲与氢团簇相互作用产生的 最大质子能量与团簇尺寸的相关性

郑 莉, 王 成, 李邵辉, 刘丙辰, 倪国权*, 李儒新, 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

摘要 报道了飞秒强激光脉冲(60 fs, 790 nm, 2×10^{16} W/cm²)与纳米尺寸的氢团簇(半径 r_c 约为 1~3 nm)相互作用, 产生的最大质子能量 E_{\max} 对于团簇半径 r_c 相关性的实验研究结果。从激光-氢团簇相互作用产生的质子的飞行时间谱测量以及团簇尺寸的瑞利散射诊断结果, 得到 E_{\max} 与 r_c^2 成线性正比关系, 比例系数为 0.75, 与报道的理论模拟结果一致, 表明氢团簇发生纯库仑爆炸。实验结果同时提示, 进一步的理论模拟应考虑气体喷流中团簇的尺寸分布。

关键词 非线性光学; 飞秒强激光脉冲; 纳米氢团簇; 库仑爆炸; 高能质子; 团簇尺寸效应

中图分类号 O 437 **文献标识码** A

Size Dependence of Maximum Energy of Protons Produced in the Intense Femtosecond Laser Interaction with Hydrogen Clusters

ZHENG Li, WANG Cheng, LI Shao-hui, LIU Bing-chen,
NI Guo-quan, LI Ru-xin, XU Zhi-zhan

(State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and
Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The dependence of the maximum energy of protons E_{\max} produced in the interaction of an intense femtosecond laser pulse (60 fs, 790 nm, 2×10^{16} W/cm²) with hydrogen clusters in a gas jet on the square of the cluster radius r_c^2 has been investigated experimentally. The results obtained have established a $E_{\max} \sim r_c^2$ relation such as E_{\max} (keV) = $1.2 + 0.32r_c^2$ (nm²) with r_c ranging from ~1 to 3 nm, in quite good agreement with the reported simulation results, demonstrating that the hydrogen clusters were purely Coulomb exploded under the present experimental conditions. The results also imply that the cluster size distribution in a gas jet should be taken into account in a further simulation study.

Key words nonlinear optics; intense femtosecond laser pulse; nano-sized hydrogen clusters; Coulomb explosion; high-energy protons; cluster size effects

1 引 言

啁啾脉冲放大技术的发展使激光与物质相互作用研究推进到一个崭新阶段^[1]。飞秒超强激光脉冲与团簇的相互作用研究在过去的十余年间成为强场激光物理的热点研究领域之一^[2]。其中一项引人注

目的工作为台式激光驱动的氘团簇核聚变^[3]。美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室于 1999 年首次实现台式激光核聚变, 实验中使用的氘团簇尺寸为半径 r_c 约为 2.5 nm, 在 120 mJ(50 fs)激光脉冲作用下获得的中子产额约为 10^5 /J^[3]。为提高台式激光聚变的中子产额, 许多实验室和研究机构开展了一系列实

收稿日期: 2006-02-10; 收到修改稿日期: 2006-02-18

基金项目: 国家重点基础研究专项基金(G1999075200)和国家自然科学基金(10535070)资助项目。

作者简介: 郑 莉(1980—), 女, 山东人, 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室硕士研究生, 主要从事团簇强场激光物理研究。

* 通信联系人。E-mail: gqni@mail.shenc.ac.cn

验^[4,5]和理论研究^[6,7]。台式激光驱动的团簇核聚变被认为由相邻团簇在激光脉冲作用下爆炸产生的高能氦离子(能量在 2~3 keV 至约 10 keV 或更高)之间的 D-D 碰撞引发。为了增大 D-D 碰撞的截面,氦离子的能量应该尽可能地大。于是希望提高激光脉冲的强度并同时增大氦团簇的尺寸(团簇球体的半径 r_c 或每团簇所含原子的数目 n)^[6],或者采用异核分子团簇,如 CD_4 团簇^[7]。这样,在足够高强度的飞秒激光脉冲作用下, D_2 或 CD_4 团簇库仑爆炸产生的质子能量对于团簇尺寸的关系就成为一个基本的研究课题^[7,8]。理论工作得出一致的结论,氦团簇库仑爆炸产生的最大质子能量 E_{\max} (相当于库仑爆炸之初位于离子团簇表面的离子在团簇爆炸之后获得的动能)与初始团簇半径 r_c 的平方成正比。这一结论的前提是,团簇在库仑爆炸前,已完全外电离(outer ionization)。这要求,对于一定尺寸的团簇,激光脉冲需足够短(数十飞秒)和足够强($>10^{16}$ W/cm²)^[6]。此时, $E_{\max} \sim r_c^2$ 的线性比例系数与团簇的原子密度 ρ (团簇在激光脉冲作用下完全电离后和库仑爆炸前,为团簇离子球体的离子密度)有关。如在氦团簇为固体密度 $\rho = 5.89 \times 10^{22}$ /cm³ 的情况下,有 $E_{\max}(\text{keV}) = 0.355r_c^2(\text{nm}^2)$ ^[6];在液氢原子密度 $\rho = 4.22 \times 10^{22}$ /cm³ 的情况下,经计算可得 $E_{\max}(\text{keV}) = 0.254r_c^2(\text{nm}^2)$ ^[9]。由于氢的与成键相关的常数 $k = 184$,与氦($k = 181$)十分相近,所以,在与飞秒强激光脉冲相互作用研究中,氢团簇可以在相当程度上替代氦团簇,如在离子能量和团簇爆炸机制等的研究方面。

目前为止,氢(氦)团簇在飞秒强激光脉冲作用下库仑爆炸产生的最大质子能量 E_{\max} 与团簇尺寸 r_c^2 (或 r_c) 关系的实验结果报道还极少。此种数据对于判定理论结果的正确与否,或判定在多大程度上和何种条件下团簇的爆炸为纯库仑爆炸,以及对于考虑飞秒强激光与氦团簇相互作用方案,都具有重要意义。然而,这类实验无论对于团簇爆炸产生的最大离子能量的测量,还是对于团簇尺寸的诊断,都有较为严格的精确度要求,否则,将给不出在一定的 r_c 范围内 $E_{\max} \sim r_c^2$ 的实验结果^[10]。

2 实 验

氢团簇由高背压(backing pressure)氢气经处在液氮低温(80 K)冷阱中的脉冲气阀和锥形喷嘴

向真空的超声绝热膨胀产生。氢团簇的尺寸诊断用瑞利散射法。诊断实验中所用锥形喷嘴的小孔直径为 500 μm ,半张角为 5°。实验采用许多措施以抑制背景光噪声,这对于实验的成功十分关键。Nd:YAG 激光器二倍频输出的 532 nm 光束(脉冲能量约 20 μJ ,脉宽约 10 ns)经一焦距约 50 cm 的透镜粗略聚焦后,在距喷嘴口约 2 mm 处与团簇喷流相互作用。从团簇喷流的散射光由置于 532 nm 激光束与团簇喷流交点正上方(90°布置)的光电倍增管接收。光电倍增管输出至数字存储示波器(LeCroy 9350AL),信号经约 50 次平均后记录。在上述实验条件下,团簇的尺寸大小由气体背压 P_0 决定。图 1 为瑞利散射信号 S_R 与气体背压 P_0 的关系曲线,二者遵从指数规律 $S_R \propto P_0^{3.4}$ 。由此可得到每团簇内含氢原子的数目 $n \propto P_0^{2.4}$ ^[11]。团簇半径 $r_c = \frac{r_0}{2}(n)^{1/3}$,其中 r_0 为团簇内原子的间距。本文团簇密度采用液氢原子密度 $\rho = 4.22 \times 10^{22}$ /cm³^[9],原子间距 $r_0 = 0.356$ nm。团簇尺寸的瑞利散射诊断通常假定,在团簇散射信号 S_R 开始出现时, $n = 100$,然后可以得到不同气体背压 P_0 下的团簇半径 $r_c(P_0)$ ^[11,12]。

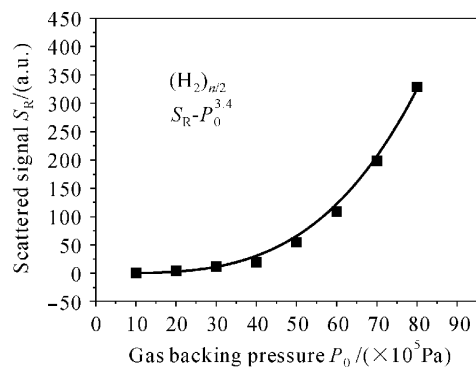


图 1 液氮低温下氢团簇的瑞利散射信号强度 S_R 随气体背压 P_0 的变化关系

Fig. 1 Rayleigh scattered light intensity S_R as a function of the gas backing pressure P_0 at the temperature of ~ 80 K for the hydrogen clusters

氢团簇喷流与飞秒强激光相互作用实验使用 TSA-25 激光系统。输出激光的中心波长为 790 nm,重复率 10 Hz,脉冲宽度约 70 fs,传输到真空靶室的单个脉冲能量约 10.5 mJ。飞秒激光束由一个焦距 20 cm 的离轴抛物面镜聚焦,焦点在喷流中心距喷嘴约 2 mm 处,焦斑直径约为 30 μm ,激光脉冲的功率密度约为 2×10^{16} W/cm²。在靶室一端有

一个漂移长度为 225 cm 的飞行管,其轴线垂直于团簇喷流和激光束构成的平面并通过激光束聚焦点。氢团簇在飞秒强激光脉冲作用下爆炸,产生的高能质子先经过一个漏匀准直器(skimmer),然后飞越无场(field-free)飞行管,最后被双微通道板(DMCP)探测器收集。微通道板输出的信号由数字示波器(TDS3052)记录。质子能量由 $E = \frac{1}{2}m\left(\frac{l}{t}\right)^2$ 计算求得,其中 m 为质子质量, l 为飞行管道长度, t 为质子的飞行时间。质子能量谱 $f(E)$ 由飞行时间谱 $f(t)$ 通过 $f(E) = f(t) \times (dE/dt)^{-1}$ 变换求得。

图 2 为气体背压 $P_0 = 3$ MPa 的氢团簇喷流与激光脉冲相互作用得到的质子飞行时间谱和相应的质子能谱。激光-团簇相互作用实验中使用小孔直径 500 μm ,半张角 5° 的锥形喷嘴。依据 Hagena 关系式^[13]可知,在其余条件相同的情况下,500 μm 的喷嘴较 300 μm 的喷嘴,产生的团簇的半径 r_c 将增大 1.4 倍。

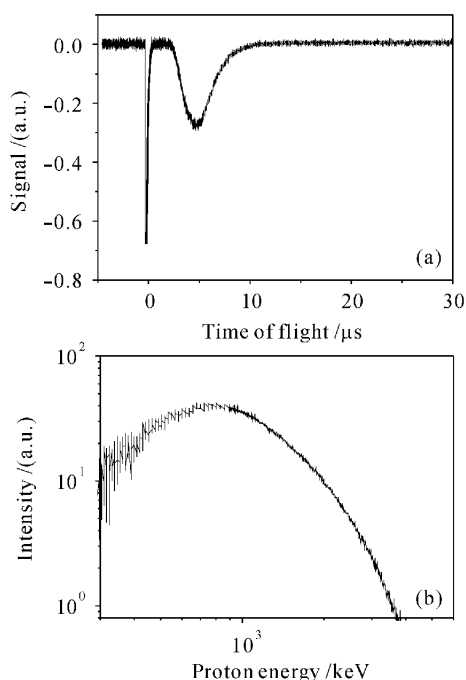


图 2 氢团簇的飞行时间谱(a)和相应的质子能量谱(b)
Fig. 2 Time-of-flight spectrum of protons (a) and the corresponding proton energy distribution of hydrogen clusters (b)

3 结果和讨论

从氢团簇的瑞利散射尺寸诊断结果以及不同背压 P_0 下的离子能谱获得的最大质子能量 E_{max} ,可以

得到 $E_{\text{max}} \sim r_c^2$ 的关系,结果示于图 3。实验结果表明,最大质子能量 E_{max} 与团簇半径的平方 r_c^2 遵从线性关系,有 $E_{\text{max}}(\text{keV}) = 1.20 + 0.32r_c^2(\text{nm}^2)$ 。理论研究给出的一致结果是,团簇库仑爆炸产生的最大离子(质子)能量 E_{max} 与团簇的半径平方(r_c^2)成正比。我们的实验给出 $E_{\text{max}}(\text{keV}) \sim r_c^2(\text{nm}^2)$ 的线性比例系数为 0.32,与理论模拟结果符合良好^[6,7]。这表明,在我们的实验条件下,氢团簇(半径 r_c 约 1~3 nm)在 $2 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$, 70 fs 激光脉冲作用下发生了迅速的库仑爆炸。但是,与 Last 和 Jortner^[7] 的理论模拟结果小有不同,质子能量稍微偏高。原因是本实验给出的 $E_{\text{max}} \sim r_c^2$ 直线有一个数值为 1.20 keV 的截距存在。这个截距的出现其实是一个提示,指出理论模拟应将气体喷流中团簇的尺寸分布考虑在内。

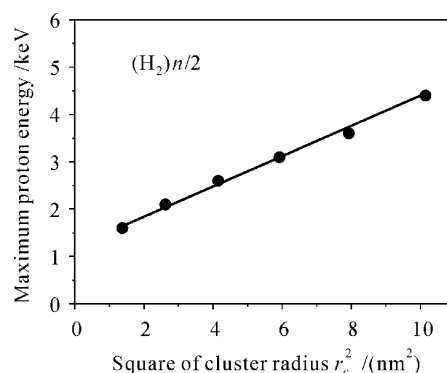


图 3 氢团簇的最大质子能量与团簇尺寸平方 r_c^2 的关系
Fig. 3 Dependence of the maximum proton energy from the exploding hydrogen clusters on the square of cluster size r_c^2

4 结 论

从氢团簇尺寸的瑞利散射诊断和团簇-激光相互作用的质子能谱测量实验,给出在团簇半径 r_c 约 1~3 nm 的范围内,氢团簇在 70 fs, $2 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 激光脉冲作用下发生了纯粹库仑爆炸。实验结果表明,最大质子能量 E_{max} 线性正比于 r_c^2 ,且比例系数与理论模拟值十分接近;氢团簇在强度为 $I = 2 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ 的激光脉冲作用下爆炸产生的最大离子能量 E_{max} 与团簇半径平方 r_c^2 的关系为 $E_{\text{max}}(\text{keV}) = 1.20 + 0.32r_c^2(\text{nm}^2)$ 。采用液氢原子密度 $\rho = 4.22 \times 10^{22} / \text{cm}^3$ 表征氢团簇。本实验得到的 $E_{\text{max}} \sim r_c^2$ 线性关系的比例系数为 0.32,与理论结果一致^[6,7]。实验结果同时表明,进一步的理论工作应该考虑气体喷流中团簇的尺寸分布。

参 考 文 献

- 1 Michael D. Perry, Gerard Mourou. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers [J]. *Science*, 1994, **264**(5161):917~924
- 2 V. P. Krainov, M. B. Smirnov. Cluster beams in the super-intense femtosecond laser pulse [J]. *Physics Reports*, 2002, **370**:237~331
- 3 T. Ditmire, J. Zweiback, V. P. Yanovsky *et al.*. Nuclear fusion from explosions of femtosecond laser-heated deuterium clusters [J]. *Nature*, 1999, **398**(6727):489~492
- 4 J. Zweiback, R. A. Smith, T. E. Cowan *et al.*. Nuclear fusion driven by Coulomb explosions of large deuterium clusters [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(12):2634~2637
- 5 G. Grillon, Ph. Balcou, J.-P. Chambaret *et al.*. Deuterium-deuterium fusion dynamics in low-density molecular-cluster jets irradiated by intense ultrashort laser pulses [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(6):065005-1~065005-4
- 6 P. B. Parks, T. E. Cowan, R. B. Stephens *et al.*. Model of neutron production rates from femtosecond-laser-cluster interactions [J]. *Phys. Rev. A*, 2001, **63**:063203-1~063203-12
- 7 Isidore Last, Joshua Jortner. Nuclear fusion driven by Coulomb explosion of methane clusters [J]. *J. Phys. Chem. A*, 2002, **106**:10877~10885
- 8 M. Hohenberger, D. R. Symes, K. W. Madison *et al.*. Dynamic acceleration effects in explosions of laser-irradiated heteronuclear clusters [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**:195003-1~195003-4
- 9 K. W. Madison, P. K. Patel, D. Price *et al.*. Fusion neutron and ion emission from deuterium and deuterated methane cluster plasmas [J]. *Phys. of Plasma*, 2004, **11**(1):270~277
- 10 S. Sakabe, S. Shimizu, M. Hashida *et al.*. Generation of high-energy protons from the Coulomb explosions of hydrogen clusters by intense femtosecond laser pulses [J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **69**:023203-1~023203-4
- 11 T. Ditmire, E. Springate, J. W. G. Tisch *et al.*. Explosion of atomic clusters heated by high-intensity femtosecond laser pulses [J]. *Phys. Rev. A*, 1998, **57**(1):369~392
- 12 Bingchen Liu, Pinpin Zhu, Shaohui Li *et al.*. A study of size estimation and time evolution of large size rare gas clusters by Rayleigh scattering techniques [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19**(5):659~662
- 13 Otto F. Hagen. Cluster ion sources [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(4):2374~2379