

# 激光核物理

王乃彦<sup>†</sup>

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 在最近十年,激光技术有了长足的进展,激光的强度超过了  $10^{22} \text{ W/cm}^2$ ,激光的电场达到  $\sim 4 \times 10^{12} \text{ V/cm}$ .当这种高强度的激光照射在靶上时,可以产生许多由激光产生的核反应现象.在这篇文章中,作者回顾了这一领域的研究进展,并对在不远的未来激光产生电子、质子、中子、X射线和正电子发展的潜力进行了一些讨论.

**关键词** 啁啾脉冲放大,粒子云,正电子发射层析术,库仑爆炸

## Nuclear laser physics

WANG Nai-Yan<sup>†</sup>

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** Outstanding progress in laser technology has been realized in the last decade. Laser intensities can now exceed  $10^{22} \text{ W/cm}^2$  with the electric field reaching  $\sim 4 \times 10^{12} \text{ V/cm}$ . When targets are irradiated by such high intensities, laser driven nuclear reactions can occur. Here we review the developments in this field and describe the potential of laser-induced electron, proton, neutron, X-ray and positron production in the near future.

**Keywords** Chirped pulse amplification, particle in cell, positron emission tomography, Coulomb explosion

### 1 什么是激光核物理

最近十年中,激光技术有了显著的进展,激光强度已超过  $10^{22} \text{ W/cm}^2$ ,激光的电场强度达到  $3.8 \times 10^{12} \text{ V/cm}$ ,比氢原子中电子玻尔轨道上的库仑场大 759 倍,相当于在原子大小上相应加上约 40kV 的电压,在原子核大小上相应加上约 0.38V 的电压,在这种很强的电场作用下,所有的原子都会在极短的时间内被电离,产生从几个 MeV 到几百 MeV 的质子,几十 MeV 到 GeV 的电子和其他粒子,以及韧致辐射和中子,这些粒子可以产生核反应,打开了核物理以及非线性相对论光学研究的新领域<sup>[1-3]</sup>.

在今后的十年中,激光强度可能会提高到  $10^{26} - 10^{28} \text{ W/cm}^2$ ,这样高强度的激光可以将粒子加速到  $10^{12} - 10^{15} \text{ eV}$ ,并将成为研究粒子物理、引力物理、非线性场论、超高压物理、天体物理和宇宙线研究中的一个有力工具<sup>[1]</sup>.

超高功率超短脉冲激光技术的发展,在实验室中创造了前所未有的极端物态条件,如高电场、强磁

场、高能量密度、高光压和高的电子抖动能量、高的电子加速度,这种极端的物理条件,目前只有在核爆中心、恒星内部、星洞边缘才能存在,在它和物质的相互作用中,产生了高度的非线性和相对论效应,产生了崭新的物理学领域,也为多个交叉学科前沿研究领域带来了历史性的机遇和拓展的空间.

### 2 国内外研究现状

当前国际上已经在一些实验室中建立了几十 TW 到几个 PW 的激光系统,在上世纪 80 年代中期,以前激光的强度长期停留在  $10^{14} \text{ W/cm}^2$  左右,这是由于非线性吸收效应随着激光强度的增加而迅速增强,在 80 年代中期之后,由于采用了啁啾脉冲放大技术(chirped pulse amplification, CPA),激光强度提高了 6—7 个数量级,在 CPA 技术中,一个飞秒或皮秒的脉冲通过色散的光栅对在时间尺度将它展宽了

2008-03-24 收到

<sup>†</sup> Email: Wangny@public.bta.net.cn

3—4 个数量级,这样就避免了放大器的饱和以及在很高强度时由于非线性效应产生的光学放大器件的损伤,在经过放大以后,再由另一光栅将对脉冲宽度压缩回到飞秒或皮秒宽度,以获得  $10^{19} \text{ W/cm}^2$  到  $10^{22} \text{ W/cm}^2$  的靶上功率密度. CPA 超短脉冲 TW 的激光装置在法国光学应用研究所、瑞典 Lund 大学、德国 Mark - Plank 研究所、德国 Jena 大学、日本 JAERI 和中国工程物理研究院、中科院上海光学精密机械研究所、中科院物理研究所、中国原子能科学研究院等都建有. 日本原子能研究所采用变形镜和 CPA 相结合的技术,运用低  $f$  值的抛物面镜,将激光聚焦于  $1 \mu\text{m}$  的斑点,可以进一步提高焦斑上的功率密度,但是由于放大介质的单位面积上的饱和能量通量和光学元件的损伤阈值的限制,单位面积上最大的光强度  $I_{th} = \frac{h\nu^3}{\sigma} \frac{\Delta\nu_a}{c^2}$ ,这个数值约为  $10^{23} \text{ W/cm}^2$ . 美国 LLNL 正在计划建造  $10^{18} \text{ W}$  (exawatt) 和  $10^{21} \text{ W}$  (zettawatt) 的激光装置,以期获得  $10^{26} \text{ W/cm}^2$  —  $10^{28} \text{ W/cm}^2$  的靶上功率密度.

高强度的激光可以引起许多核反应,当激光强度  $I > 10^{18} \text{ W/cm}^2$  时,在激光电场做抖动的电子能量达到  $0.511 \text{ MeV}$ ,产生了相对论等离子体. 运用强激光在等离子体中产生的尾场去加速电子,如用一台紧凑型的重叠频率的激光器可以产生  $200 \text{ MeV}$  的电子. 这种激光等离子体型的加速器具有比普通电子加速器高出 1000 倍的加速梯度,即达到  $\text{GV/m}$ . 运用高强度、单次脉冲的激光也获得了  $100 \text{ MeV}$  的电子,并测量到它的韧致辐射. 超短超强激光还可以产生质子束,并开始运用这些质子束产生正电子发射层析术 (positron emission tomography, PET) 所需要的短寿命的正电子放射源,一种用激光来产生的小型化的和经济的质子产生器有望在未来用于质子治病. 运用超短超强激光直接产生正电子已在英国卢瑟福实验室开展,他们用重叠频率的 TW 级的激光,打在高  $Z$  元素的靶上得到每脉冲  $2 \times 10^7$  个正电子,它对于基础研究和材料科学很有用途. 通过超短超强激光和氩团簇的相互作用,产生聚变反应的中子,其中子产额可以达到  $10^5$  中子/焦耳,激光产生中子的能量效率已达到世界上大型的激光装置的水平,它可以成为台面的中子源,由于其中子脉冲通量高,但总的中子剂量很小,适合于生物活体的中子照相和材料科学的研究. 运用超短超强激光和氩化聚乙烯作用产生中子, Hilsher 等人用钛宝石激光 ( $300 \text{ mJ}$ ,  $50 \text{ fs}$ ,  $10 \text{ Hz}$ ,  $10^{18} \text{ W/cm}^2$ ) 轰击氩化聚乙烯

靶,产生  $10^4$  中子/脉冲. 运用超短超强的激光在相对论性的电子上的散射,产生几百飞秒、几十埃的硬 X 射线,可以用来研究材料和生命科学的一些问题,这种超快的硬 X 射线源对于研究一些高  $Z$  物质和时间分辨的超快现象具有重要的意义. 超短超强激光所产生的高能电子,在物质中产生高能 X 射线,可以在裂变物质铀中引起裂变,并在裂变靶中探测到许多裂变产物.

在激光的强度达到  $10^{28} \text{ W/cm}^2$  时,电场强度只比 Schwinger 场(真空击穿场强)低一个数量级,在这样的场中,由于真空的涨落被激发,激光就有可能从真空中产生正负电子对,美国 Lawrence Berkeley 实验室在 SLAC 高能加速器上,用  $10^{18} \text{ W/cm}^2$  的激光束和聚焦性能很好的  $46.6 \text{ GeV}$  的电子束相碰撞,产生了 200 多个正负电子对,这是由于在反向相碰的电子和激光中,从电子的坐标系来看,激光的场强增强了 Lorentz 因子倍,以至于可以远远地超过 Schwinger 场值,直接从真空中产生一些电子对.

### 3 新的科学研究的内容,新的交叉点

#### 3.1 激光产生高能电子<sup>[4-7]</sup>

产生高能电子的机制有两种:第一种是在激光场作用下,电子做抖动运动,在激光强度  $I = 10^{20} \text{ W/cm}^2$  时,电子抖动运动能量能达到  $10 \text{ MeV}$ ;第二种是由非线性效应所产生的能量比较高的部分. 用  $300 \text{ J}$ ,  $0.5 \text{ ps}$  的激光照射在厚的金靶上,测量到的电子能谱分布基本上由两个部分组成:一部分是由有质动力产生的,它的能量在  $20$ — $30 \text{ MeV}$  以下,还有一部分就是由非线性效应产生的几十  $\text{MeV}$  以至  $100 \text{ MeV}$  以上的高能量的电子,并和粒子云 (particle in cell, PIC) 的计算结果符合,目前加速电子最高能量已达  $1 \text{ GeV}$ . 能散度可达  $3\%$ .

当激光的强度增加时,光波的压力变得很大,光压推着电子往前走,光波就像一个光子靶将等离子体中的电子推到脉冲的前面积累,形成电子的“雪犁” (snow plow),在这种“雪犁”加速中,电子的动能得到增益. 在综合了光压作用和激光场的作用后,计算得到在激光强度为  $I = 10^{26} \text{ W/cm}^2$  时,加速梯度可达  $200 \text{ TeV/cm}$ ,如果加速长度达到  $1 \text{ m}$ ,电子能量为  $2 \times 10^{16} \text{ eV}$ ,在  $I = 10^{28} \text{ W/cm}^2$  时,加速梯度可达  $2 \text{ peV/cm}$ ,加速长度为  $1 \text{ m}$  时,电子能量为  $2 \times 10^{17} \text{ eV}$ ,可以用来研究高能物理中的许多问题.

### 3.2 激光产生质子束<sup>[8,9]</sup>

在激光等离子体中,在  $I = 10^{20} \text{ W/cm}^2$  的情况下,加速质子的能量可以高达 58MeV. 加速梯度约为  $1 \text{ MV}/\mu\text{m}$ . 质子被加速的距离只有  $60 \mu\text{m}$  左右,如何增长加速距离成为非常重要的研究内容,加速质子的机制是相当复杂的,也提出了一些加速模型的设想. 实验上的研究结果已显示它存在很好的应用前景. 这表现在:

(1) 激光能量转换成质子束能量的效率是高的,而且和激光的能量有关,在激光脉冲能量为 10J、宽度为 100fs 时,转换效率为 1%,当 500J、500fs 时,转换效率为 10%,人们已经获得了  $10^{13}$  质子/脉冲,质子脉冲宽度约 1ps,相当于  $10^{25}$  质子/秒,即  $1.6 \times 10^6 \text{ A}$  的脉冲质子流.

从理论到实验应该研究如何进一步提高能量转换效率的问题,尤其是当激光能量进一步提高时,转换效率是否还继续上升.

(2) 质子束的发散角比较小,观察到的横向发散角为  $0.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ,比通常加速器上加速的质子束的发散角小.

(3) 高能质子束的获得可能会在今后的十年中实现,按照 Bulanov 等人的计算结果,在  $I = 10^{23} \text{ W/cm}^2$  时,质子可以被加速到 1GeV 以上,在  $I = 10^{26} \text{ W/cm}^2$  和  $10^{28} \text{ W/cm}^2$  时,质子能量可以达到 100GeV 和 10TeV.

(4) 目前已获得几十 MeV 的质子束,并已用于为 PET 产生  $^{18}\text{F}$  等短寿命的正电子源,在英国 Rutherford 实验室的 Vulcan 装置上,在 20 分钟内制备了  $10^9 \text{ Bq}$  的  $^{18}\text{F}$  源,已经可以用在 PET 上.

(5) 产生 200MeV 的质子,并用于质子治癌,由于它在能量沉积上的优越性能,以及整个装置可以做得小,成本低,所以在治癌应用上很有发展前景,并可应用于中子照相. 目前由激光加速产生的质子的能量分散度为 17%. 治癌应用要求能散度  $\leq 3\%$  左右,因此减少能散度的工作在一些实验室正在进行中.

### 3.3 激光产生中子<sup>[10,11]</sup>

超短超强激光加热氘团簇产生核聚变,已经产生了  $10^4$  中子/脉冲或  $10^5$  中子/焦耳,从激光的能量转换成中子的效率看,和美国 LLNL 上的大型激光器 NOVA 上的每焦耳激光的中子产额相当,比日本大阪大学的大型激光装置 Gekko 12 上的数值大一个数量级,因此是一种很有发展前景的桌面台式

的中子发生器,因为这种中子源的时间宽度只有 1ps,是一个高中子通量的中子源,可用于材料科学和中子照相.

氘的团簇在吸收激光能量后要发生库仑爆炸,应该说到现在为止对于库仑爆炸的机理理解尚不非常清楚,尤其是团簇爆炸后产生的氘分子和氘的小团簇如何产生氘-氘的聚变反应也缺乏细致的了解,在进一步的改进方面,还有发展的余地,例如,如何采用多束的超短超强激光同时照射团簇,或用大于 50T 的脉冲磁场去推迟热等离子体的解体时间,以增加中子产额.

利用超短超强激光和氘化聚乙烯作用来产生中子, Hilsher 等人用钛宝石激光(300mJ, 50fs, 10Hz,  $10^{18} \text{ W/cm}^2$ )轰击氘化聚乙烯靶也产生了  $10^4$  中子/脉冲,大约每焦耳的激光产生  $3.3 \times 10^4$  中子. Disdier 等人用 20J, 400fs,  $5 \times 10^{14} \text{ W}$  的激光辐照  $\text{CD}_2$  靶,获得  $10^7$  中子,每焦耳激光产生了  $3.5 \times 10^5$  中子,这是很高的中子产额,他们还要用 500J, 500fs, 1pW 的激光照射  $\text{CD}_2$ ,以获得更多的中子.

在激光辐照  $\text{CD}_2$  平面靶时,除了要研究激光能量在  $\text{CD}_2$  靶上的能量沉积的分布外,如何充分地利用沉积的能量是一个很重要的问题. 沉积的能量有很大一部分要转变成等离子体的动能,在平面靶的情况下,如何设计靶面形状,以最大限度地使等离子体的动能对 D-D 反应做贡献.

### 3.4 激光产生硬的超短( $\sim 100\text{fs}$ )X 射线<sup>[12]</sup>

用超短超强激光(50mJ, 0.5TW, 100fs)和 50MeV 的电子束散射可以产生 4nm, 300fs 的硬 X 射线,虽然转换效率不高,但产生的 X 射线强度可以在 Si 表面产生衍射峰,可以用来研究 Si 表面相变过程(从固相 $\rightarrow$ 熔化过程)的时间分辨的研究,也可以研究蛋白质折叠动力学,蛋白质的折叠时间为 1ns,用 300fs 的硬 X 射线可用来了解它的折叠过程中的状态.

### 3.5 激光产生正电子<sup>[13,14]</sup>

将具有几个 MeV 的电子,经过很好地准直后,射到一个高 Z 的靶上,通过 Trident 过程( $Z + e^- \rightarrow Z' + 2e^- + e^+$ )和 Bethe-Heitler 过程( $Z + r \rightarrow Z' + e^- + e^+ + r'$ )产生正电子,采用重复频率的超短超强激光和高 Z 靶的相互作用,每脉冲可以产生  $2 \times 10^7$  个正电子,经过慢化后,储存在磁场中,它对于基础科学和材料科学的研究是很有用的.

## 4 主要存在的问题和分析

这门新兴的交叉学科在国际上也只有十多年的历史,但发展十分迅速,搞激光技术和原子核物理的科学家们已经开始在一起召开学术研讨会,共同参加一些实验,由于它是一个新的生长点,发展比较快,也比较容易发现一些新现象,所以合作的积极性也在日益增长.随着超短超强激光技术的发展,在粒子加速、核物理、甚至粒子物理方面可以做出一些很好的工作来.

我国发展的情况有些滞后,学科之间的交叉和合作还没有真正形成,学科之间的了解和交流还不够,因此只在交叉学科的边缘上做了一些工作.按照我国在激光技术和核物理方面的力量来说,都应该有可能做出更多更好的工作.目前具有超短超强激光装置的研究单位并不少,但将它们运行好,做出好的物理工作的成果并不多.

国内的情况也和国际上相似存在着一个问题,即搞强激光技术的专家和搞核物理和粒子物理专家之间的交流、讨论不够,这就会影响这一交叉学科的发展.

从强场物理到超短超强激光技术,到应用于各个领域,在世界上是基础科学和技术进步相互推动,相互作用的一个范例,基础研究的需求,以及光学科学的基础,非线性科学的基础,促进了超短超强激光技术的发展,而高强度激光的发展又为物理学的发展提供一个崭新的世界.

### 参考文献

- [ 1 ] Tajima T, Mourou G. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2002, 5 :037301
- [ 2 ] Mourou G, Tajima T, Bulanov S V. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78 :309
- [ 3 ] Lee mans W P *et al.* *Nature Physics*, 2006, 2 :696
- [ 4 ] Thomas Katsouleas. *Nature*, 2004, 431 :515
- [ 5 ] Mangles S P D *et al.* *Nature*, 2004, 431 :535
- [ 6 ] Geddes C G R *et al.* *Nature*, 2004, 431 :538
- [ 7 ] Farue J *et al.* *Nature*, 2004, 431 :541
- [ 8 ] Wilks S C *et al.* *Physics of Plasma*, 2001, 8 :542
- [ 9 ] Schwoerer H *et al.* *Nature*, 2006, 439 :445
- [ 10 ] Perkins L J *et al.* *Nuclear Fusion* 2000, 40 :1
- [ 11 ] Zweiback J *et al.* *Phys. Rev. Lett.* 2000, 85 :3640
- [ 12 ] Kmetec J D *et al.* *Phys. Rev. Lett.* ,1992, 68 :1527
- [ 13 ] Gahn C *et al.* *Appl. Phys. Lett.* ,2000, 77 :2662
- [ 14 ] Gahn C *et al.* *Phys. Rev. Lett.* ,1999, 83 :4772



### · 物理新闻和动态 ·

## 石油价格为什么如此飞涨？

石油价格的飞涨引起了科学家们的注意,他们要寻找价格飞涨的原因.一部分人认为是由于新兴国家(如中国、印度等)的需求增加所引起的,另一些人则认为这是由于有投机买卖所引起的,因为只要有投机买卖就会驱动商品价格发生违反常规的飞速变化,并使投资者从中获取暴利.

最近瑞士苏黎世 ETH 的经济物理学家 D. Sornette 和他的研究伙伴 Wei-Xing Zhou, R. Woodard 共同对石油价格的上涨进行了研究,他们定量地证实了从 2003 年以来在石油买卖中存在着“泡沫”,这是投机买卖的一个指标.2003 年,每桶石油的价格要比现在低 4 倍.当然对如何看待“泡沫”在经济界是一个有争议的课题,因为它没有确切的定义.现在 D. Sornette 的研究组通过对商品价格增长规律的计算,清楚地建立了“泡沫”的概念.在经济领域中,如果没有投机活动时,商品价格是每年按一定的百分比增长,它具有一个确定的增长指数.当有投机活动存在时,价格的增长指数就会发生变化,它们将按幂律增长,这种情况称为超指数增长.研究组利用对数周期幂律算法对石油价格建立了三种模型去寻求它的增长规律.通过计算“泡沫”存在的时间、幂律的幂指数和标度因子这三个重要的参数,证实了石油价格存在着超指数增长,而且三个模型都与石油价格的数据吻合,这表明石油价格上确实存在着“泡沫”.

同时他们也利用国际能源委员会提供的数据,来计算由于新兴国家对石油需求的增加所引起的石油价格的变化,计算表明并不存在超指数增长的现象.因此, D. Sornette 教授认为,目前石油价格的飞涨 99% 是由于在石油买卖中存在着投机活动所引起的. D. Sornette 研究组曾利用他们的理论讨论过 1996 年的经济“泡沫”,也曾预示过 2005 年的美国住宅“泡沫”.

(云中客 摘自 *Physica A*, 24 June 2008)