

自加速 Airy 光束的产生、特性及应用研究进展

文 伟¹, 蔡阳健²

¹怀化学院机械与光电物理学院, 湖南 怀化 418008;

²苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006

摘要 自加速 Airy 光束是最近十年来被研究得最广泛的激光模式之一。该光束具有传输不变、自愈合以及横向自加速三大特性。这些特性使其在微粒操控、等离子体波、激光电子加速、全光路由、光学成像、激光导引电火花、物质波及量子引力等方面有重要应用。综述了自加速 Airy 光束的产生方法、各种特性及应用的研究进展, 展望了未来的发展前景。

关键词 物理光学; 自加速 Airy 光束; 产生方法; 特性; 应用

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.020002

Research Progress of Generation, Characteristics and Applications of Self-Accelerating Airy Beams

Wen Wei¹, Cai Yangjian²

¹ School of Mechanical, Optics and Physics, Huaihua University, Huaihua, Hunan 418008, China;

² School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract In the last decade, the self-accelerating Airy beam is perhaps one of the most widely studied laser modes. Existing research show that Airy beams have propagation-invariant, self-healing and self-accelerating properties, which make them very useful in the fields of particle manipulation, plasma wave, laser-driven acceleration, optical routing, optical imaging, laser-guided sparks, matter-wave, quantum gravity and so on. In this article, an overview on self-accelerating Airy beams, their generation, characteristics and potential applications is provided and the potential perspective of the Airy beams is also presented.

Key words physical optics; self-accelerating Airy beams; generation methods; characteristics; applications

OCIS codes 260.1960; 140.3430; 140.3570

1 引言

在激光器面世前,所有天然和人造的光源(如太阳、白炽灯、气体放电灯等)都是利用物质的自发辐射发光的,发射光的方向性和单色性都很差。1960年,美国科学家梅曼在爱因斯坦、汤斯和肖洛等人理论的基础上利用受激辐射发明了世界上第一台光激光器^[1]。近50多年来,激光技术快速发展,不仅波长的覆盖范围大为扩展,各种性能也有很大的提高。激光的方向性、单色性和相干性都已经达到了相当高的水平,在科学研究、工业、军事、信息技术、精密计量、医学,直至日常生活等各个方面都有重要的应用。

激光光学是激光科学很重要的分支,主要研讨激光束在谐振腔、光学系统和其他介质中的传输变换规律^[2]。在激光光学发展初期,主要是研究光强度呈高斯正态分布的激光束在各种光学系统及其他介质中的传输与变换规律。后来,随着激光传输理论的快速发展,人们希望能更准确地描述光场的存在形式,以便精确地实现对激光的控制和利用。多年来,科研工作者提出了诸多模型来描述各种不同的激光场模式,称为结构光场^[3]。结构光场在科学发展和技术应用中都不断发挥着重要作用,其产生的新效应和新应用已经在通

收稿日期: 2016-08-15; 收到修改稿日期: 2016-10-01

基金项目: 国家自然科学基金(11474120, 11374222)、湖南省教育厅一般项目(14C0896)

作者简介: 文 伟(1978—),男,博士,副教授,主要从事激光束的传输与调控方面的研究。E-mail: csuwenwei@126.com

信、军事、医学等领域产生了深远影响。2007年, Siviloglou等^[4-5]将无色散的 Airy 波包引入光学领域, 提出并产生了一类在实验室范围内沿弯曲路径传播的新型结构光场, 该光场在传输过程中具有保持局域光场结构不变、自愈合及横向加速三大奇异的特性, 被命名为自加速激光束。该光束在诸如光学清扫、弯曲等离子体通道的产生、时空光子弹、电子加速、微粒操控、全光路由和成像等领域得到了应用, 是继 1987 年提出的无衍射贝塞尔光束^[6-7]和 1992 年发现拉盖尔高斯光束具有轨道角动量^[8]之后激光光学领域的重要进展。

在从提出自加速 Airy 光束至今将近十年的时间里, 各国学者对 Airy 光束的产生、特性及应用进行了大量的研究。尽管有一些学者讨论了 Airy 光束的相关研究进展^[9-12], 但由于 Airy 光束的研究进展迅猛, 特别是近期有一系列重要进展, 因此, 有必要更全面系统和及时地反映相关研究成果。

2 自加速 Airy 光束的产生

最早实验产生 Airy 光束是通过对高斯光束进行三次相位的调制, 再用透镜进行傅里叶变换来实现的, 其实验装置如图 1 所示。线偏振的基模高斯光束从一氩离子激光器中发出, 经扩束器(BE)后被平面镜 M 反射进入分束器(BS)中, 其中一束直接出射至透镜 L 后入射到放大倍数为 5 的显微物镜(MO)中, 而另外一束经 BS 反射后用空间光调制器(SLM)对其进行三次相位调制, 再经过傅里叶变换进入显微物镜中, 最后通过移动相机采集不同处的横向光场分布, 光斑大小和坐标信息。透镜 L 的焦距为 f , 规定显微物镜的入口处位移量 $z=0$ 。

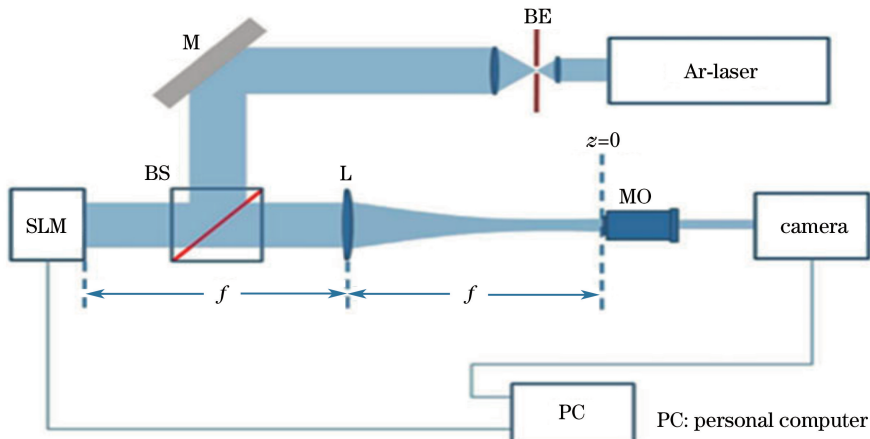


图 1 首次观测 Airy 光束的实验装置图

Fig. 1 First experimental setup for generation of Airy beams

这里的关键是加载的相位信息, 该实验中加载的相位模板如图 2 所示^[5]。图 2(a)为产生一维 Airy 光束的模板, 图 2(b)为产生二维 Airy 光束的模板。两个均为三次方相位的模板, 原因在于有限能量的 Airy 光束的傅里叶角谱为高斯型振幅分布和三次位相分布的叠加, 因此在实验上, 可以通过带上三次位相分布的宽高斯光束的傅里叶变换来得到 Airy 光束。三次相位模板“包裹”在 0 到 2π 之间, 对应灰度图的黑线数值为 0 而白线数值为 2π 。

受该工作激励, 各种构建 Airy 光束的方法被大量报道出来。2009 年, 美国 Cottrell 等^[13]报道了用将高斯光直接照射到 $3/2$ 次的相位模板反射后得到 Airy 光束的方法, 该产生装置所需空间距离较短, 有利于节省成本。2011 年, 新加坡 Dai 等^[14]利用二元的三次相位模板同时得到两束 Airy 光束。我国 Cao 等^[15]报道了利用连续相位板巧妙产生 Airy 光束的实验结果。他们利用自己的激光直写系统在特殊的负性光刻胶中制作了相位分布为立方相位的连续相位板。由于连续相位板的理论衍射效率很高, 远远高于液晶空间光调制器, 因此, 这种方法产生的 Airy 光束功率较高, 为解决如何产生大功率实用的自加速激光束提供了依据。

其他不同于加载相位板的产生 Airy 光束的方法也被相继提出。2009 年, 以色列 Ellenbogen 等^[16-17]报道了利用特殊光子晶体的非线性来产生 Airy 光束的方法。Pasiskevicius^[18]认为这项独特的技术将在未来产生重要应用。美国 Polynkin 等^[19]获得了飞秒 Airy 脉冲并在水中观测到了其成丝现象。2010 年, 新加坡

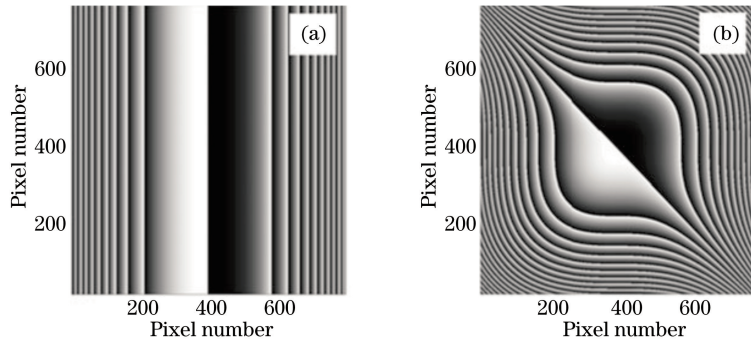


图 2 首次观测 Airy 光束实验的相位模板

Fig. 2 Phase masks used to generate the Airy beams

Luo 等^[20]报道了用液晶产生 Airy 光束的方法。土耳其 Yalizay 等^[21]报道了正确设置正负柱面透镜从而产生 Airy 光束的方法。同期希腊 Papazoglou 等^[22]也报道了利用透镜组合将飞秒光转化为 Airy 光束的实验。美国 Chong 等^[23]基于原创者在 2007 年提出的产生 Airy-Bessel 光弹的想法,在实验上生成了 Airy-Bessel 波包,该波包在空间域为贝塞尔光束的结构,在时间域为 Airy 脉冲,这种时空波包不受色散和衍射的影响,在传输过程中受传输材料的影响较小,可应用于微生物和等离子体物理。同时,希腊 Abdollahpour 等^[24]在实验上产生了三维的 Airy 光弹,该光弹在空间域具有二维 Airy 结构,时间域为 Airy 脉冲。Airy 光孤子也在光折变介质中被观测到^[25]。2011 年,意大利 Longhi^[26]报道了利用一个微芯片激光器产生 Airy 光束的方法,这样就克服了通常采用的把高斯光束调制成 Airy 光束的实验中装置体积比较大、稳定性低的缺点。他们的理论结果表明,在合适的抽运条件下,小角度倾斜的微型平面腔可以产生 Airy 光束。以色列 Porat 等^[27]报道了用非周期的衍射光栅取代激光腔的输出镜实现二维 Airy 光束的实验结果。他们将衍射光栅放入谐振腔内,能够把入射到其上的大部分激光反射回腔内,因此同时允许多个衍射级的激光输出到腔外,其作用相当于相位模板,一级衍射光束通过一个透镜进行傅里叶变换,即可产生 Airy 光束。《自然·光子学》以“Airy 激光器”为题做了专门报道^[28]。我国南京大学的李涛课题组、陈志刚课题组和澳大利亚国立大学的课题组在该年几乎同时在实验上实现了 Airy 表面等离子体波^[29-31],也是 Airy 光束研究热潮的一个侧面反映。其中澳大利亚国立大学和德国耶拿大学的研究小组是采用光栅产生了 Airy 等离子体激元,他们利用溅射法在玻璃衬底上沉积金薄膜耦合光栅,光栅相位跳跃点的间隔对应着一维 Airy 波包中各瓣的宽度^[29]。南京大学介电超晶格实验室的 Li 等^[30]则是利用一种新颖的平面内纳米结构对表面等离子激元的衍射进行波前相位调制,从而实现 Airy 表面等离子体波。陈志刚小组和美国斯坦福大学的张翔小组合作,由张鹏等^[31]也在实验上产生了 Airy 表面等离子体波并对其动力学行为进行了详细的研究。美国 Ament 等^[32]在实验上实现了超连续的飞秒 Airy 脉冲并对其自我修复能力进行了详细研究。最近,我国学者李莉等^[33]在均匀原子介质中利用四波混频也产生了 Airy 光束;而钱义先等^[34]获得了 Airy 光束阵列并利用其产生了可调的局域空心光束。总之,产生 Airy 光束的方法已经多样化,众多研究机构都能产生 Airy 光束,其内在的推动就是 Airy 光束迷人而实用的特性。

3 自加速 Airy 光束的特性

自加速 Airy 光束具有三大奇异的特性:1) 在传播中近似无衍射;2) 光束在传播时能横向加速,它的传播轨迹为抛物线形,于是它在传播过程中可以绕过障碍物;3) 具有自我修复的功能,它不仅能在遮住部分光束的情况下恢复之前的形态,而且在通过无序的散射介质体或者湍流后仍能保持原有的形态基本不变。

人们广泛研究了 Airy 光束的各种特性。Airy 光束之所以受人关注,最初主要是因为其光束主峰在自由空间中传播时会有二次曲线形式的位移,此运动轨迹很像物体(现代物理认为实物粒子和波包都是物质的存在形式)在重力加速作用下的抛体运动,所以被命名为自加速激光束。自然,人们研究的最早也最多的就是其轨迹的运动特性,习惯上称之为它的动力学特性。最早专门撰文对此进行评论的是美国学者 Besieris 和 Shaarawi,他们详细讨论了 Airy 光束截断因子对其传输动力学的影响^[35],如图 3 所示。图 3 中 a 代表截

断因子,横轴 $S = x/x_0$ 为归一化的坐标,表示与光束的特征尺度 x_0 相比较的光束分布范围,纵轴则为传输距离。从图中可以看出截断因子决定着 Airy 光束的弯曲动力学轨迹,当截断因子远小于 1(比如图中的 $a = 0.05$)时, Airy 光束在传输过程中主瓣轨迹大角度弯曲;当截断因子增加(比如图中的 $a = 0.5$),弯曲的角度开始逐步减小;而当截断因子与 1 可以比拟(比如图中的 $a = 1$ 及 $a = 2$)时,光束沿直线传播,此时实际动力学行为近似为离轴的高斯光束。

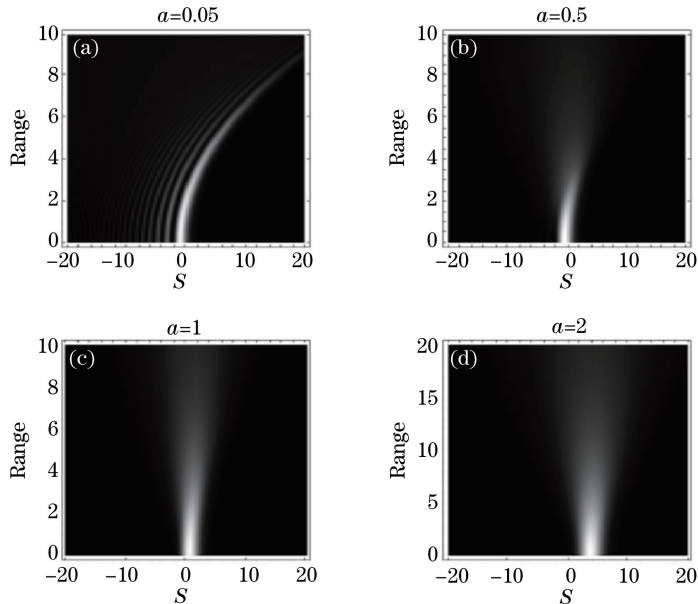


图 3 Airy 光束四种不同截断因子对应的光强分布传输情况

Fig. 3 Intensities of the Airy beams for four values of the parameter a

2008 年, Airy 光束的原创者 Siviloglou 等^[36]率先在实验中研究了 Airy 光束的弹性动力学特性。2009 年,以色列 Dolev 等^[17]研讨了如何通过改变非线性光子晶体的准相位匹配条件来改变 Airy 光束在自由空间的传输动力学行为的问题。2010 年,国内南开大学 Hu 等^[37]提出了一种非常巧妙的线性调控手段,通过简单地平移相位模板和高斯光束,不仅能改变无衍射 Airy 光束的传播轨迹,而且还能沿轨迹调整光强峰值出现的位置。天津大学 Dai 等^[38]讨论了 Airy 涡旋光束的动力学特性。北京理工大学 Xu 等^[39]讨论了 Airy 光束的内拓扑结构对其光学特性包括传输动力学特性的影响问题。2011 年, Ye 等^[40]利用光学感应折射率梯度来控制 Airy 光束的加速度。2012 年, Hu 等^[41]展示了如何在非线性光折变介质中操控 Airy 光束的传输动力学行为。2013 年, Chen 等^[42]讨论了 Airy 涡旋光束在克尔介质中的自聚焦动力学和崩塌动力学行为。南京航空航天大学的施瑶瑶等^[43]提出了采用梯度折射率材料操控 Airy 光束动力学特性的方法。2014 年,德国 Driben 等^[44]讨论了三维 Airy 涡旋波包的非线性动力学行为。程科等^[45]讨论了 Airy 涡旋光束在梯度折射率介质中的传输动力学特性。2015 年,以色列 Singh 等^[46]提出了可通过散光变换直接测量 Airy 光束加速度的方法。以色列和中山大学的小组观测到了用 Airy 函数描述的水波脉冲的传输动力学^[47]。

对 Airy 光束的自愈合特性的研究也比较广泛。这方面最早也最受人关注的工作是 2008 年,美国科学家 Broky 等^[48]从理论和实验上研究了 Airy 光束的自愈合特性,即 Airy 光束在传输过程中丢失部分信息后可以自修复,具有非凡的抗扰动能力。国内 Chu 等^[49]在 2012 年详细研究了 Airy 光束的这种自愈合能力。同时,南开大学 Cao 等^[50]讨论了 Airy 光束阵列的自愈合特性。以色列科学家讨论了自加速光束的自愈合特性对其一次和二次谐波产生的影响^[51]。Ament 等^[32]研究了飞秒 Airy 脉冲的自我修复能力。2015 年, Zhang 等^[52]也讨论了相位对 Airy 光束自愈合特性的影响。杭州师范大学的 Zhuang 等和本课题组分别独立想到了如何量化描述 Airy 激光束自愈合能力的问题。他们提出了用所谓的“强度相似因子”来定量描述 Airy 光束的自愈合能力^[53],而本课题组的工作则是基于希尔伯特空间中两个矢量相似的数学理论^[54]。

相对于自加速特性及自愈合特性,有关 Airy 光束的无衍射特性的研究工作最主要是早期的一些评论。另外, Airy 光束的其他特性也得到了相应的研究。例如:2011 年, Pang 等^[55]研究了 Airy 光束的相移特性;

2013年,南开大学 Yang 等^[56]研究了 Airy 光束的形态共振依赖现象;2015年,Nomoto 等^[57]详细研究了 Airy 光束的偏振特性。Airy 光束的这些特性,使其迅速在各个方面得到大量的应用。

4 自加速 Airy 光束的应用

由于 Airy 光束的众多特性,Airy 光束在诸如微粒操控、等离子激元及等离子体成丝、光局域、电子加速、成像、声学、激光导引电火花技术、物质波和量子引力、光路由、全息光学、孤子、汽车灯光照明及拉曼散射等领域得到了广泛的应用。图 4 列举了早期 Airy 光束的几个典型应用。图 4(a)为利用 Airy 光束进行光学粒子清洁的实验结果图;图 4(b)为利用高强度的 Airy 光束产生弯曲的等离子体通道的示意图;图 4(c)为利用 Airy 光束进行特殊粒子搬运的示意图,均为 Airy 光束应用中具有典型意义的成果。下面,将分类对 Airy 光束的一些重要应用进行举例说明。

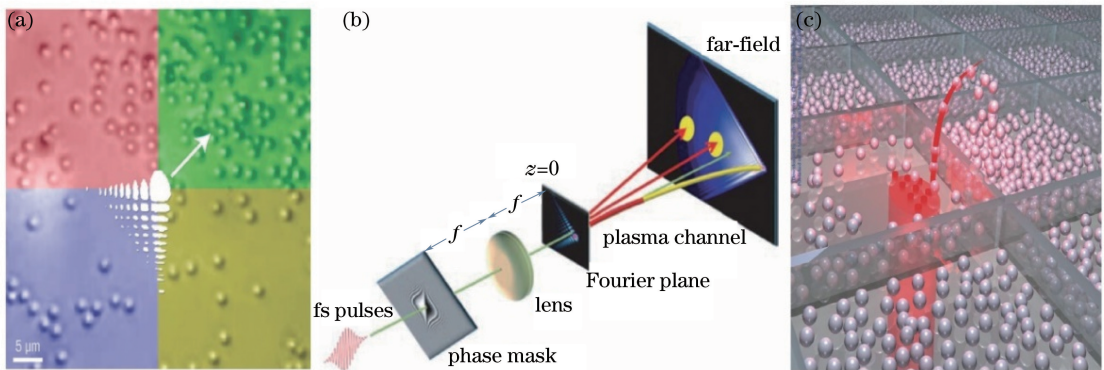


图 4 Airy 光束的几个典型应用

Fig. 4 Typical applications of Airy beams

1) 微粒操控方面的应用。2008年,英国科学家 Baumgartl 等^[58]用 Airy 光束清洁光学颗粒,他们用 Airy 光束照射到微米量级的胶体颗粒样品室中,在局部区间可观测到精确转移和清理光学颗粒[图 4(a)]。由于这是第一次将 Airy 光束用于实际,因此具有标志性的意义。在该工作的推动下,Airy 光束在微粒操控方面的应用被广泛的研究,涵盖了宏观的构想和详细具体的技术细节。2009年,Baumgartl 等^[59]又将该技术用于微粒操控和细胞技术,其研究结果为研究细胞在不同的介质的微流体环境之间再分配提供了一个新的手段[图 4(c)];2010年,该小组在原有工作基础上,利用 Airy 光束的多步清扫技术,发展了更高性能和更高效的光学清扫技术^[60]。

2) 等离子体方面的应用。强激光束自聚焦会产生短促的等离子冲击(或称“光弹”),这种现象在遥感和大气科学上有多种用途。2009年,美国科学家 Polynkin 等^[61]使用二维 Airy 光束的飞秒脉冲引发了空气中的非线性等离子体细丝,此时 Airy 光束的主瓣相当于一个强度集中的电磁能量,它沿弧形轨迹传输并在其后留下一条弯曲的等离子体轨道[图 4(b)]。这种方法的优点在于可以更方便地探测等离子通道各个横截面上的宽频辐射,而一般光束(通常为高斯光束)产生的等离子通道沿直线分布,因此各个横截面上的宽频辐射重叠在一起,不利于实验探测。

3) 电子加速方面的应用。近十几年里,激光加速带电粒子是强激光与物质相互作用领域的一项前沿研究课题,可喜的是,Airy 光束在电子加速方面也体现出非凡的特性。2010年,南开大学臧维平小组首次提出了基于 Airy 光束加速电子方案并用数值模拟方法研究了 Airy 光束加速真空电子的情况^[62-63]。2011年,该小组数值模拟了两束交叉的 Airy 光束加速真空电子,当电子沿着纵向中心注入时,电子只受合成的纵向场的影响,电子加速能力得到显著提高^[64]。

4) 成像方面的应用。2014年,美国哈佛大学 Shu 等^[65]将自加速 Airy 光束应用于超分辨率荧光成像的最新结果,有望在成像、探测和传感方面具有巨大的应用价值。他们还提出了自弯曲的点扩展函数的概念。Shu 等^[66]还将其应用于三维的光学显微成像。同期,著名英国科学家 Vettenburg 等^[67]也讨论了 Airy 光束的显微成像问题。广西大学的 Liang 等^[68]理论结合实验研究了 Airy 光束在图像信号传输方面的应用。当

然,以上优点分别是基于 Airy 光束自加速、无衍射和自愈合的特性。

5) 激光导引电火花方面的应用。放电广泛应用在焊接,微加工,内燃机的燃料点火中。尽管这种现象普遍存在,控制并且塑造其沿着设计的路径放电仍然充满挑战。加拿大、英国和我国南开大学的联合课题组在 Airy 光束在此领域的应用上迈出了重要的一步。当激光束在两个电极之间跳跃时,以一定方式发射的激光可以对电火花塑形,甚至使电火花绕着物体弯曲^[69]。产生如此效果的原因是激光可以电离空气,从而产生一个放电路径。该团队在实验中对比了高斯光束与 Airy 光束,发现 Airy 光束可以产生较优化的放电路径,然而高斯光束的放电路径则非常混乱并且不可预知,同时, Airy 光束中心强度远小于高斯光束。他们还发现 Airy 光束的电场破坏阈值是高斯光束的 22.2%。值得惊奇的是,即使在两个丝之间加入障碍物, Airy 光束的放电仍然会发生,原因是 Airy 光束具有强自愈合能力,因此电场可以不受影响地继续放电。图 5 为该文的主要结果图。图中绿色代表激光,蓝色为等离子通道,产生的电火花则用白线表示。图 5(a)为高斯光束经透镜聚焦后产生电火花的情形和相应高斯光束的光强分布。图 5(b)表示激光束经相位模板调控后在经透镜聚焦后产生电火花的情形及相应的 Airy 光束的光强分布图。

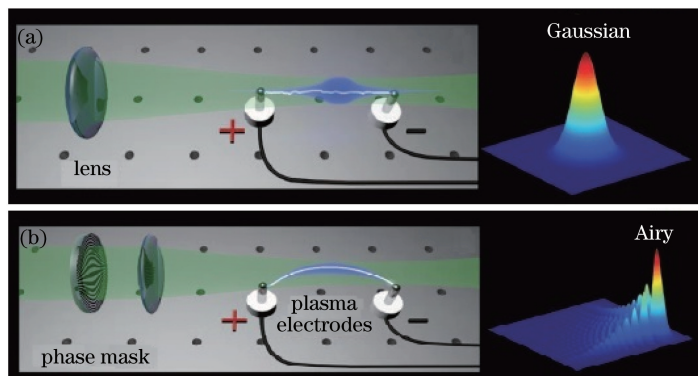


图 5 (a)高斯和(b) Airy 光束产生的弯曲放电轨迹图

Fig. 5 Curved trajectories generated by (a) Gaussian beam and (b) Airy beam discharge

该工作受到了广泛的关注,《自然·光子学》也对该工作做了专题报道^[70]。该技术也有可能产生多种应用,如目前小部件的焊接十分困难,为了精确焊接电火花发生器必须十分贴近物体表面,该技术可获得特定要求的电火花,从而可以使细小物体的焊接变得更加精确;另一种可能应用是电子显微镜,电子束显微镜是通过电子束点亮样品来工作的,这样的电子束只能沿直线传播,然而该技术可以使人们更加精确地控制电子束的传播方向,这就意味着许多样品并不需要分解就能观察到它们的内部情况。该课题组的下一个目标正是要寻找一种能够看到拐弯处的电子显微镜。

6) 物质波和量子引力方面的应用。最近,以色列著名科学家 Arie 的团队大胆地将产生 Airy 光束的方法应用到物质波领域,利用纳米尺度的全息图和磁透镜对初始电子束的概率密度波函数整形,产生了自加速、自愈合的电子束,如图 6 所示^[71]。电子束由电子枪射出,经纳米级的三次相位图进行相位调控并被磁透镜聚焦,在后焦平面上形成 Airy 电子波包。Airy 电子波包在自由空间中传输过程中受到障碍物遮挡住主瓣,在继续传输中主瓣得到补偿恢复,显示出自愈合特性。

这种电子束具备了 Airy 光束所有的传输特性:无衍射、横向自加速、自修复,在诸如电子扫描隧道显微镜的分辨率优化等多个方面存在重要的应用价值。同时,自弯曲电子束的产生也为自弯曲物质波的出现开创了先河。同期,希腊科学工作者 Efremidis 等^[72]也预言玻色-爱因斯坦凝聚体可以产生自加速的物质波,包括自弯曲的 Airy 物质波和圆对称(或者说自动会聚)的自加速物质波。德国科学家 Karlovets^[73]还讨论了具有轨道角动量的 Airy 量子波包。2015 年, Kaminer 等^[74]基于理论分析发现:亚原子粒子可以被诱发从而开始自加速到接近光速,而且这个过程没有任何外力作用。他们同样用三次相位的掩模来实现对波的操控,但是相位掩模板的尺度要小得多。粒子(量子力学认为波和粒子是统一的)一旦以这种方式被创造,就开始自加速,这种自加速和粒子受到电磁场作用后产生的运动很难区分。需要说明的是,由于粒子在加速时,它也会在相反方向的空域传播,因此并不违反 Ehrenfest 定理。更有趣的是,他们还发现此自加速现象和相对

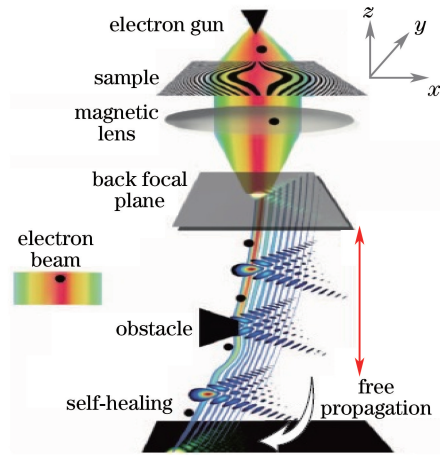


图 6 全息产生 Airy 电子束示意图

Fig. 6 Holographic generation of an electron Airy beams

论有关:它可以看做另一种形式的时间膨胀和空间收缩。由于亚原子粒子存在自然衰减现象,生命期极短,时间膨胀可以使得这些粒子的生命期大大延长,从而使其被更容易地研究。他们认为,这种特殊的电子加速方法可能在多个领域(医学成像等)发挥作用。此外,他们认为产生这一现象的内在规律也可以用来延长某些不稳定同位素的生命期,为基本粒子物理开辟一个新领域。基于时间膨胀,著名科学家爱因斯坦提出了所谓的双生子佯谬问题,由于该文提到只有在弯曲轨道传播的自加速粒子和与之对应的保持静止的双胞胎粒子之间才能发生时间膨胀,因此,有望利用该成果来演示双生子佯谬。该课题组还展示了 Airy 光束在量子引力方面的应用^[75],科学家 Faccio^[76]在《自然·物理学》期刊上对此做了点评,认为该应用为研究引力问题提供了一个新的模拟方法。

自加速 Airy 光束在其他方面的应用的研究也有很多报道。我国华东师范大学 Hang 等^[77]人将自加速 Airy 光束通过电磁感应透明的四能级原子系统,研究了利用自加速光束导引稳定、超慢的弱光子弹的可能性。其他比如 Airy 光束在全光路由^[78]、光学设计、孤子、拉曼散射、全息光学、汽车灯光照明、大气通信^[79]乃至能源等方面的应用均被挖掘出来。相信随着科技的发展,Airy 光束的更多应用将被发现,给人们带来更多的实惠。

5 结束语

综述了最近十年 Airy 光束产生、特性及应用的理论和实验研究进展。介绍了首次产生 Airy 光束的实验原理及产生方法,具体阐述了产生的装置及加载的相位板的信息。总结分析了其他几种加载相位的方法:3/2 次相位模板、二元的三次相位模板及连续模板等。其他巧妙产生自加速的 Airy 光束的方法,比如利用光子晶体、液晶、正负柱面透镜、微芯片激光器、非周期的衍射光栅等也做了介绍。其次,重点总结了 Airy 光束传输动力学特性的研究进展,对各种控制 Airy 光束传输轨迹的研究做了客观的评述。同时,介绍了 Airy 自愈合特性的研究进展,比较了不同研究工作的特点。再次,特别综述了 Airy 光束的各种重要应用。分别从光学微粒清扫及捕获、产生弯曲的等离子通道、光学电子加速及成像技术、激光导引电火花技术和物质波及量子引力等方面的应用进行了综述。这些应用大多数发表在著名的国际科学期刊上,对基本的物理学理论和当前先进的激光技术方面均产生了重要影响。展望未来,自加速 Airy 光束以及在此基础上发展出来的其他自加速光束在多个领域还将具有更大的应用与发展前景。比如最近伯克利大学 Zhang 等^[80]实现了不靠人工介质也能弯曲声波场的梦想,他们设计出了一个“声学捕获器”,就是受到最初产生 Airy 光束思想的启发。此项技术为控制声学能量按需流动提供了新的自由度,有望在声学成像及隐身,甚至在化学、材料学、生物科学等各方面有重要的应用。大角度弯曲的非傍轴自加速光束的发展也令人鼓舞,也许不久以后就能实现可以使光弯曲 360 度的“光学回力镖”^[81]。

参 考 文 献

- [1] Maiman T H. Stimulated optical radiation in ruby[J]. Nature, 1960, 187(4736): 493-494.
- [2] Lü Baida. Laser Optics: Beam characterization, propagation and transformation, resonator technology and physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [3] Andrews D L. Structured light and its applications: an introduction to phase-structured beams and nanoscale optical forces [M]. Burlington: Academic Press-Elsevier, 2008.
- [4] Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. Optics Letters, 2007, 32(8): 979-981.
- [5] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, *et al.* Observation of accelerating Airy beams[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(21): 213901.
- [6] Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(4): 651-654.
- [7] Durnin J, Miceli J Jr, Eberly J H. Diffraction-free beams[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [8] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [9] Xu Jia, Liu Juan, Xie Jinghui, *et al.* Reviews of recent researches on Airy beams [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(7): 070501.
徐 佳, 刘 娟, 谢敬辉, 等. 艾里激光束理论及应用的最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(7): 070501.
- [10] Zhang Ze, Hu Yi, Zhao Juanying, *et al.* Research progress and application prospect of Airy beams[J]. Science China, 2013, 58(34): 3514-3520.
张 泽, 胡 毅, 赵娟莹, 等. 艾里光束研究进展与应用前景[J]. 科学通报, 2013, 58(34): 3514-3520.
- [11] Cheng Zhen, Zhao Shanghong, Chu Xingchun, *et al.* Research progress of the generation methods of Airy beam [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030008.
程 振, 赵尚弘, 楚兴春, 等. 艾里光束产生方法的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030008.
- [12] Cheng Zhen, Chu Xingchun, Zhao Shanghong, *et al.* Research progress of Airy beam's propagation trajectory control [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 060002.
程 振, 楚兴春, 赵尚弘, 等. 艾里光束传输轨迹控制方法的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 060002.
- [13] Cottrell D M, Davis J A, Hazard T M. Direct generation of accelerating Airy beams using a 3/2 phase-only pattern[J]. Optics Letters, 2009, 34(17): 2634-2636.
- [14] Dai H T, Sun X W, Luo D, *et al.* Airy beams generated by a binary phase element made of polymer-dispersed liquid crystals[J]. Optics Express, 2009, 17(22): 19365-19370.
- [15] Cao R, Yang Y, Wang J, *et al.* Microfabricated continuous cubic phase plate induced Airy beams for optical manipulation with high power efficiency[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(26): 261106.
- [16] Ellenbogen T, Voloch-Bloch N, Ganany-Padowicz A, *et al.* Nonlinear generation and manipulation of Airy beams[J]. Nature Photonics, 2009, 3(7): 395-398.
- [17] Dolev I, Ellenbogen T, Voloch-Bloch N, *et al.* Control of free space propagation of Airy beams generated by quadratic nonlinear photonic crystals[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(20): 201112.
- [18] Pasiskevicius V. Nonlinear optics: engineering Airy beams[J]. Nature Photonics, 2009, 3(7): 374-375.
- [19] Polynkin P, Kolesik M, Moloney J. Filamentation of femtosecond laser Airy beams in water[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(12): 123902.
- [20] Luo D, Dai H T, Sun X W, *et al.* Electrically switchable finite energy Airy beams generated by a liquid crystal cell with patterned electrode[J]. Optics Communications, 2010, 283: 3846-3849.
- [21] Yalizay B, Soyulu B, Akturk S. Optical element for generation of accelerating Airy beams[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(10): 2344-2346.
- [22] Papazoglou D G, Suntsov S, Abdollahpour D, *et al.* Tunable intense Airy beams and tailored femtosecond laser

- filaments[J]. *Physical Review A*, 2010, 81(6): 061807.
- [23] Chong A, Renninger W H, Christodoulides D N, *et al.* Airy-Bessel wave packets as versatile linear light bullets[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(2): 103-106.
- [24] Abdollahpour D, Suntsov S, Papazoglou D G, *et al.* Spatiotemporal Airy light bullets in the linear and nonlinear regimes[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(25): 253901.
- [25] Jia S, Lee J, Fleischer J W. Diffusion-trapped Airy beams in photorefractive media[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253904.
- [26] Longhi S. Airy beams from a microchip laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 716-718.
- [27] Porat G, Dolev I, Barlev O, *et al.* Airy beam laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 4119-4121.
- [28] Won R. Solid-state lasers: the Airy beam laser[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(12): 715.
- [29] Minovich A, Klein A E, Janunts N, *et al.* Generation and near-field imaging of Airy surface plasmons[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(11): 116802.
- [30] Li L, Li T, Wang S M, *et al.* Plasmonic Airy beam generated by in-plane diffraction[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(12): 126804.
- [31] Zhang P, Wang S, Liu Y, *et al.* Plasmonic Airy beams with dynamically controlled trajectories[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3191-3193.
- [32] Ament C, Polynkin P, and Moloney J V. Supercontinuum generation with femtosecond self-healing Airy pulses[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(24): 243901.
- [33] Li Li, Li Shuli, Zhang Yunzhe, *et al.* Study of Airy beams generated via four-wave mixing process in a homogeneous atomic medium[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 081406.
李莉, 李姝丽, 张云哲, 等. 均匀原子介质中四波混频产生艾里光束的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 081406.
- [34] Qian Yixian, Li Denghui. Tunable optical bottle beam generated via self-bending Airy beam arrays[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(9): 0909002.
钱义先, 李登辉. 自弯曲艾里光束阵列产生的可调局域空心光束[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0909002.
- [35] Besieris I M, Shaarawi A M. A note on an accelerating finite energy Airy beam[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(6): 2447-2449.
- [36] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, *et al.* Ballistic dynamics of Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(3): 207-209.
- [37] Hu Y, Zhang P, Lou C, *et al.* Optimal control of the ballistic motion of Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(13): 2260-2262.
- [38] Dai H T, Liu Y J, Luo D, *et al.* Propagation dynamics of an optical vortex imposed on an Airy beam[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 4075-4077.
- [39] Xu J, Liu J, Jia J, *et al.* Contribution of the internal topological structure of optical Airy beams to optical behaviors[J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(7): 075705.
- [40] Ye Z, Liu S, Lou C, *et al.* Acceleration control of Airy beams with optically induced refractive-index gradient[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3230-3232.
- [41] Hu Y, Sun Z, Bongiovanni D, *et al.* Reshaping the trajectory and spectrum of nonlinear Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(15): 3201-3203.
- [42] Chen R P, Chew K H, He S. Dynamic control of collapse in a vortex Airy beam[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(3): 1406.
- [43] Shi Yaoyao, Wu Tong, Liu Youwen, *et al.* Control of self-bending Airy beams[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(12): 1401-1407.
施瑶瑶, 吴彤, 刘友文, 等. 艾里光束自弯曲性质的控制[J]. *光子学报*, 2013, 42(12): 1401-1407.
- [44] Driben R, Meier T. Nonlinear dynamics of Airy-vortex 3D wave packets: emission of vortex light waves[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(19): 5539-5542.
- [45] Cheng Ke, Xia Jishen, Zhong Xianqiong. Propagation dynamics and vortex trajectory of an Airy vortex beam in gradient-index media[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(9): 0905002.

- 程 科, 夏基深, 钟先琼. 艾里涡旋光束在梯度折射率介质中的动态传输与涡旋轨迹[J]. 光子学报, 2014, 43(9): 0905002.
- [46] Singh B K, Remez R, Tsur Y, *et al.* Measurement of acceleration and orbital angular momentum of Airy beam and Airy-vortex beam by astigmatic transformation[J]. Optics Letters, 2014, 40(22): 5411-5414.
- [47] Fu S, Tsur Y, Zhou J, *et al.* Propagation dynamics of Airy water-wave pulses[J]. Physical Review Letters, 2015, 115(3): 034501.
- [48] Broky J, Siviloglou G A, Dogariu A, *et al.* Self-healing properties of optical Airy beams[J]. Optical Express, 2008, 16(17): 12280-12291.
- [49] Chu X, Zhou G, Chen R. Analytical study of the self-healing property of Airy beams[J]. Physical Review A, 2012, 85(1): 013815.
- [50] Cao R, Hua Y, Min C, *et al.* Self-healing optical pillar array[J]. Optics Letters, 2012, 37(17): 3540-3542.
- [51] Dolev I, Kammer I, Shapira A, *et al.* Experimental observation of self-accelerating beams in quadratic nonlinear media[J]. Physics Review Letters, 2012, 108(11): 113903.
- [52] Zhang L, Ye F, Cao M, *et al.* Investigating the self-healing property of an optical Airy beam[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 5066-5069.
- [53] Zhuang F, Zhu Z, Margiewicz J, *et al.* Quantitative study on propagation and healing of Airy beams under experimental conditions[J]. Optics Letters, 2015, 40(5): 780-783.
- [54] Wen W, Chu X X. Quantitative comparison of self-healing ability between Bessel-Gaussian beam and Airy beam[J]. Annals of Physics, 2015, 360: 549-555.
- [55] Pang X, Gbur G, Visser T D. The Gouy phase of Airy beams[J]. Optics Letters, 2011, 36(13): 2492-2494.
- [56] Yang Y, Zang W P, Zhao Z Y, *et al.* Morphology-dependent resonance of the optical forces on Mie particles in an Airy beam[J]. Optics Express, 2013, 21(5): 6186-6195.
- [57] Nomoto S, Aadhi A, Prabhakar S, *et al.* Polarization properties of the Airy beam[J]. Optics Letters, 2015, 40(19): 4516-4519.
- [58] Baumgartl J, Mazilu M, Dholakia K. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets[J]. Nature Photonics, 2008, 2(11): 675-678.
- [59] Baumgartl J, Hannappel G M, Stevenson D J, *et al.* Optical redistribution of microparticles and cells between microwells[J]. Lab on A Chip, 2009, 9(10): 1334-1336.
- [60] Baumgartl J, Cizmar T, Mazilu M, *et al.* Optical path clearing and enhanced transmission through colloidal suspensions[J]. Optics Express, 2010, 18(16): 17130-17140.
- [61] Polynkin P, Kolesik M, Moloney J V, *et al.* Curved plasma channel generation using ultraintense Airy beams[J]. Science, 2009, 324(5924): 229-232.
- [62] Li J X, Zang W P, Tian J G. Vacuum laser-driven acceleration by Airy beams[J]. Optics Express, 2010, 18(7): 7300-7306.
- [63] Li J X, Zang W P, Tian J G. Analysis of electron capture acceleration channel in an Airy beam[J]. Optics Letters, 2010, 35(19): 3258-3260.
- [64] Li J X, Fan X L, Zang W P, *et al.* Vacuum electron acceleration driven by two crossed Airy beams[J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 648-650.
- [65] Shu J, Vaughan J C, Zhuang X. Isotropic 3D super-resolution imaging with a self-bending point spread function[J]. Nature Photonics, 2014, 8(4): 302-306.
- [66] Schroeder B, Shu J. Frequency analysis of a self-bending point spread function for 3D localization-based optical microscopy[J]. Optics Letters, 2015, 40(13): 3189-3192.
- [67] Vettenburg T, Dalgarno H I, Nytk J, *et al.* Light-sheet microscopy using an Airy beam[J]. Nature Methods, 2014, 11(5): 541-544.
- [68] Liang Y, Hu Y, Song D, *et al.* Image signal transmission with Airy beams[J]. Optics Letters, 2015, 40(23): 5686-5689.
- [69] Clerici M, Hu Y, Lassonde P, *et al.* Laser-assisted guiding of electric discharges around objects[J]. Science Advances, 2015, 1(5): e1400111.

- [70] Horiuchi N. Physics: Laser-guided sparks[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(8): 488.
- [71] Voloch-Bloch N, Lereah Y, Lilach Y, *et al.* Generation of electron Airy beams[J]. *Nature*, 2013, 494(7437): 331-335.
- [72] Efremidis N K, Paltoglou V. Accelerating and abruptly autofocusing matter waves[J]. *Physics Review A*, 2013, 87(4): 043637.
- [73] Karlovets D V. Gaussian and Airy wave packets of massive particles with orbital angular momentum[J]. *Physics Review A*, 2015, 91(1): 013847.
- [74] Kaminer I, Nemirovsky J, Rechtsman M, *et al.* Self-accelerating Dirac particles and prolonging the lifetime of relativistic fermions[J]. *Nature Physics*, 2015, 11(3): 261-267.
- [75] Bekenstein R, Schley R, Mutzafi M, *et al.* Optical simulations of gravitational effects in the Newton-Schrödinger system[J]. *Nature Physics*, 2015, 11(10): 872-878.
- [76] Faccio D. Nonlinear optics: a matter of gravity[J]. *Nature Physics*, 2015, 11(10): 806-807.
- [77] Hang C, Huang G. Guiding ultraslow weak-light bullets with Airy beams in a coherent atomic system[J]. *Physics Review A*, 2014, 89(1): 013821.
- [78] Rose P, Diebel F, Boguslawski M, *et al.* Airy beam induced optical routing[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(10): 101101.
- [79] Wang Xiaozhang, Tang Feng, Yuan Mengjie, *et al.* Experimental simulation of circular-Airy beam drift in atmospheric turbulence [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0813001.
王晓章, 唐峰, 原劭捷, 等. 实验模拟环形艾里光束在大气扰动中的光束漂移[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0813001.
- [80] Zhang P, Li T, Zhu J, *et al.* Generation of acoustic self-bending and bottle beams by phase engineering[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4316.
- [81] Chen Z G. Viewpoint: light bends itself into an arc[J]. *Physics*, 2012, 5: 44.