

奇妙的空间光孤子*

陈 志 刚

(美国旧金山州立大学物理和天文系 旧金山 CA94132)

摘 要 空间光孤子是当今非线性光学前沿的热点之一.在介绍稳态光孤子的形成机理之后,文章重点评述了空间光孤子奇特的相互作用行为以及它们在光控制光诸方面的应用前景.此外,文章还介绍了非相干光空间光孤子方面的最新动态.

关键词 光孤子,光波导,非相干光,光折变

FASCINATING BEHAVIOR OF OPTICAL SPATIAL SOLITONS

CHEN Zhi-Gang

(Department of Physics and Astronomy, San Francisco State University, San Francisco CA 94132, USA)

Abstract Optical spatial solitons, beams free of divergence in nonlinear materials, are of strong interest at the frontiers of modern nonlinear optics. This article will review the mechanisms for obtaining stable optical spatial solitons, along with their fascinating particle-like behavior and their potential applications in controlling light by light. Recent work on solitons of incoherent light and associated novel nonlinear phenomena will also be discussed.

Key words optical solitons, optical waveguides, incoherent light, photorefractives

1 引言

光波、声波或是水波都有一个共同的特点:传播越远,扩展越大.如果波在传播时保持稳定形状而不扩展,这样的波称为孤子波(solitary wave).由于这样的波在相互作用时具有粒子般的特性,有时又称为孤子(soliton).在光学领域里,由于色散,超短脉冲会在时域自然加长;而由于衍射,超窄光束会在空域里自然拓宽.30年来,尽管时域里光孤子(temporal soliton)的研究有了很大进展,并已被当今高科技光纤通信所青睐,科学家们却一直在琢磨怎样让超窄光束定形传播,如同一根细针,在空间永不扩展.这就是说,不用光纤,而用介质自身的非线性效应达到光束自陷(self trapping),从而形成空间光孤子(spatial soliton).遗憾的是,这样的愿望一直未能圆满实现.虽然早在1964年,R. Chiao等人就预言光束自陷能在克尔(kerr)非线性材料中形成^[1],但以后的许多实验都证明,克尔非线性带给光孤子内在的非稳性.结果,三维空间光孤子无法稳定传播而最终夭折^[2].这

样的结果一度使空间光孤子的研究受到困扰而停止不前.直到1993年,随着材料科学与现代非线性光学的发展和结合,人们在光折变(photorefractive)材料中首次观察到稳态三维空间光孤子^[3].随后,光孤子在其他饱和非线性材料(如 $\chi^{(2)}$ 二阶非线性介质,饱和型原子蒸汽)也先后被观察到.从此,空间光孤子一跃成为当今非线性光学前沿的热点^[4].

本文阐述空间光孤子的形成机理和它们之间的奇特的相互作用特性,探讨光孤子的研究给物理和非线性科学领域展示的新课题以及为未来光通信、光控制光诸方面带来的诱人前景.

2 空间光孤子及其波导的形式

不用数学公式,我们可以唯象地按如下两种效应来理解空间光孤子的形成.其一是透镜效应(lensing effect),其二是波导效应(waveguide effect).透镜效应是说光改变非线性介质的折射率,从而改变其

* 2001-04-23收到

光学厚度,等效的作用是在介质中诱导透镜,达到光束自聚焦(self focusing).倘若自聚焦恰好能抵消光的衍射,光就能达到自陷而形成空间光孤子.波导效应是说光在非线性介质中传播时改变其折射率,非均匀的折射率变化起到等效的波导作用,就像光纤一样,将光在横向束缚而不让其展宽.这样的波导称为自诱导波导(self induced waveguide).不难想像,空间光孤子反映光与非线性介质相互作用的自洽过程.

怎样改变介质的折射率呢?非线性光学中的克尔效应(折射率变化与光强成正比, $\Delta n \propto I$)是人们最先想到的^[1].在克尔介质中,一束光强非均匀的高斯型光束将会导致中间强、边缘弱的折射率变化,从而起到等效的透镜作用.由于克尔介质中光强越强,折射率变化越大,自聚焦就越强,而自聚焦越强,就会导致光强越强.这种非饱和的非线性机制使克尔型光孤子具有内在的不稳定性^[2].另外,克尔效应要求高强度的激光光源.这些原因使得克尔介质中空间光孤子的存在只能成为精美的理论而无法发掘其实用价值.

1992年,M. Segev 等人预言空间光孤子可望在光折变材料中形成^[4],并称之为光折变空间孤子(photorefractive spatial soliton).与克尔型孤子迥然不同的是,光折变空间孤子只需毫瓦量级的低功率激光,而且能在三维空间中稳定传播.不久,一系列实验证实了光折变空间光孤子的存在^[3],也再度激起人们对空间光孤子研究的兴趣.图1显示了一束超窄光束(直径只有 $10\mu\text{m}$)在光折变晶体中形成空间光孤子[图1(a)],而不用非线性,由于衍射,光束会自然扩宽[图1(b)].稳态光折变空间孤子又分为屏蔽孤子、光生伏打孤子、矢量或复合孤子等.

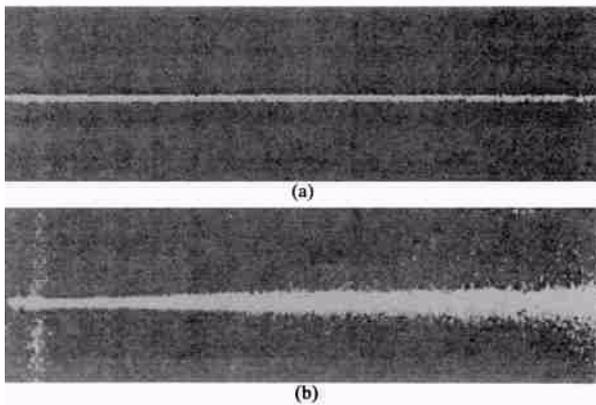


图1

- (a) 空间光孤子在光折变晶体中的定形传播;
- (b) 非孤子光束在传播时的自然展宽

为什么光折变材料中能形成稳态空间光孤子呢?对于屏蔽空间孤子来说,我们可以这样唯象地来理解:一束高斯型的非均匀光进入光折变晶体,光强的地方(中央区)激发的光电子多,相应地提高该区域介质的导电率.若在晶体两边加上直流电压,晶体便成为等效的分压器:光强的地方电阻率低,分压少;而光弱的地方(边缘区)电阻率高,分压多.结果,本来均匀的外加电场在空间不再均匀,而在中央区形成低凹.晶体又具有所谓的电光效应,那就是折射率变化的幅度与电场成正比($\Delta n \propto \pm E$),而其中的正负号则由外加电场的极性决定.若 Δn 为负,折射率在中央高而边缘低,其结果正好是透镜或波导效应所需,从而可以形成如图1所示的亮空间孤子^[3](bright spatial soliton).若 Δn 为正,结果正好相反.晶体中形成的不是正透镜而是负透镜.等效地说,介质将具有自散焦(self-defocusing)或是反波导(anti-guide)功能,从而可以形成所谓的暗空间孤子^[5](dark spatial soliton)(见图5).而对于光生伏打空间孤子则不同,因为光生伏打场近似正比于光强,其极性沿着自发极化方面,是固定的.因此,在自聚焦介质中($\Delta n > 0$),只能形成亮光生伏打空间孤子;在自聚焦介质中($\Delta n < 0$),只能形成暗光生伏打空间孤子.

甚为关键的是,在光折变材料中,折射率的变化 Δn 不是直接与绝对光强成正比,而是遵循饱和非线性(saturable nonlinearity)的规律.当光强增高到一定程度后, Δn 不再线性增加.这样,自聚焦放缓,以确保传播过程中始终能与光衍射平衡,所以,稳态空间光孤子能够形成.这与先前研究的克尔型光孤子有着质的区别.应该说明的是,光折变并不是产生光孤子的惟一材料,饱和非线性才是产生稳态空间光孤子的前提.

除了物理上的新发现外,光折变空间光孤子的应用前景也十分令人感兴趣.原因之一是光折变空间光孤子一旦形成后,随之形成的波导可以用来控制其他比孤子自身强度更强的光.这样,不用高水平的工艺制造,我们可以在体材料中用光诱导而形成象条形(slab),Y形(Y-junction)及圆光纤形(fiber-like)波导^[6].图2显示一个典型的例子.光孤子由一束非常弱的蓝光(488nm)产生,另一束比它强10倍多的红光(633nm)用来作为探测光.若没有光孤子的存在,红光在晶体材料中自然扩散[图2(b)].一旦光孤子形成之后,红光受到波导的束缚而定形传播[图2(a)].更妙的是,有些光折变晶体(例如 LiNbO_3)具有超强的记忆力:即便是将产生孤子的光

关闭,晶体中孤子诱导而成的波导依然能保持一年之久而不消失.这样的波导结构可用于光开关、光耦合器、高交率光频转换器^[7].下文将说明这样的光孤子或波导结构竟可用非相干光(诸如发光二极管、白炽灯,或是自然太阳光)产生.不难想像,一束弱的非相干光能控制一束强的相干激光该有怎样的应用前景.

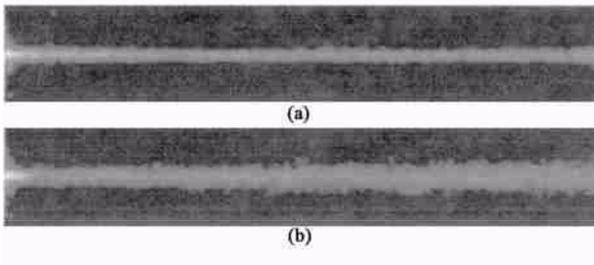


图 2
(a) 探测光束在空间光孤子产生的波导中传播;
(b) 没有光孤子波导时的自然展宽

3 空间光孤子的组合和相互作用

孤子之所以如此命名,是因为它们具有粒子般的相互作用特性.最典型的是两个光孤子会相互吸引、排斥,或是盘绕而行,犹如两个带电粒子一样.它们之间的相互作用也遵循动量、自动量及能量守恒的规律^[4].多个光孤子的相互作用会导致光孤子的裂变(fission)和聚变(fusion)或是产生(creation)和湮灭(annihilation),甚至会形成孤子束缚态(bound states)和孤子团(soliton clusters).当然,所有这些特性对早期发现的克尔型光孤子来说是难以观察到的.稳态空间光孤子(像光折变孤子)的发现使得光孤子能在三维空间中相互作用,从而使光孤子奇妙的粒子般相互作用行为得以在实验室中观察到.

为什么两个光孤子之间会有排斥或是吸引的相互作用呢?我们可以这样来看,倘若两光孤子之间相干(mutually coherent),那么它们近距离传播时就会有干涉效应.是吸引还是排斥,取决于它们之间的位相差异($\Delta\phi$).若位相差为零($\Delta\phi=0$),两孤子同相,会相互吸引.这是由于它们中央重叠区光强相干叠加,使得那里的折射率增大而等效地吸引两边的光孤子.同样的道理,若位相差为 π ($\Delta\phi=\pi$),两个孤子异相,中央光强相消,它们就会相互排斥.在其他情况下,位相差可以为任意数,孤子间除等效的吸引和排斥作用外,还会有能量的交换^[4].倘若两个光孤子之间互不相干(mutually incoherent),或是其位相差之涨落远快于介质的响应,那么它们之间无干涉

效应,中央重叠区的光强只能简单地叠加.结果,两个互不相干的光孤子总是相互吸引[见图 3(a)].这样的非相干相互作用首先在光折变晶体中观察到.两个光孤子碰撞时,只要它们之间的夹角不大(小于 1° 左右),就会看到它们之间的相互吸引.若是靠得很近,两个光孤子就会聚合到一起而达到孤子“聚变”^[8].更为惊人的是,如果两个互不相干的光孤子起初稍微错开而进入非线性晶体[见图 3(b)],那么,它们之间的吸引会提供等效的向心力而使它们盘绕而行,不分开也不聚会,其轨迹犹如 DNA 螺旋结构^[9].

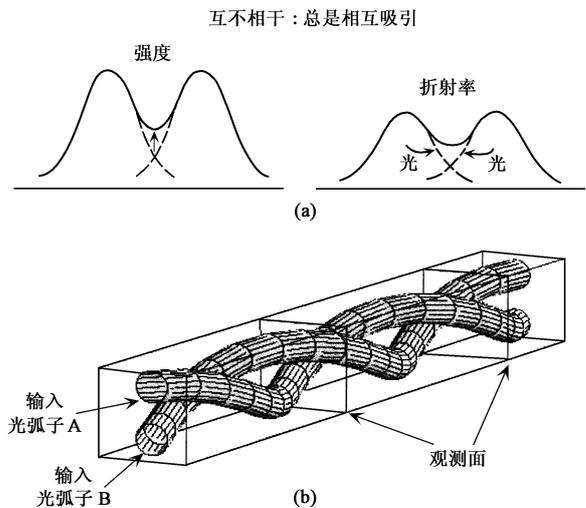


图 3 (a) 两个互不相干的光孤子总是相互吸引;
(b) 两个互不相干的光孤子进入非线性晶体,轨迹犹如 DNA 螺旋结构

一个光孤子也可以由多个分量组合而成,称为矢量或是复合光孤子(vector or composite soliton),就像一个原子可以由许多基本粒子组合而成一样.最简单的复合当然是两分量(矢量)光孤子.起初,这样的两分量可以来自光的不同偏振态或不同频率^[10].后来发现,即便是同一偏振态和同一频率,只要两分量之间互不相干,就照样可以形成矢量光孤子^[11].一系列的实验表明,孤子和孤子之间可以结伴而形成不可分割的孤子对^[12].当然,矢量光孤子间也会发生相互作用.如果复合分量之间的作用力能达到平衡,这样的作用会导致孤子束缚态的形成.图 4 显示一个典型的例子^[13],光孤子 A 有两个分量(a_1, a_2),B 也有两个分量(b_1, b_2).分量 a_1, a_2 之间或是 b_1, b_2 之间互不相干,却可各自配对形成孤子.倘若分量 a_1 和 b_1 之间同相($\Delta\phi=0$),而分量 a_2 和 b_2 之间反相($\Delta\phi=\pi$),在一定条件下,同相光孤子的吸物理

引[图 4(a)]会刚好与反相光孤子的排斥[图 4(b)]相平衡,从而形成束缚态一样的多光子稳定传播[图 4(c)].有趣的是,有些条件下一个分量自身并不能形成光孤子,但却可以与其他分量共存而形成复合态光子,就像量子色动力学中胶子需要与夸克相互作用而形成束缚态一样^[13].

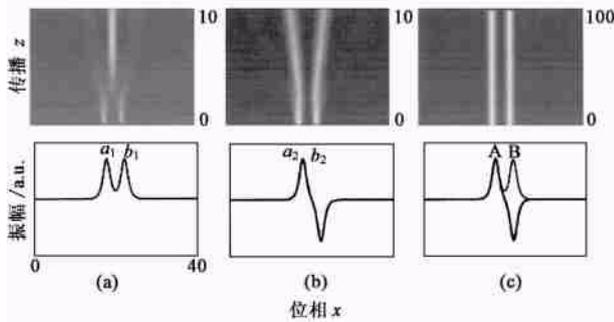


图 4 同相光孤子的吸收(a)和异相光孤子的排斥(b)相抗衡而形成多光子的并行传播(c)

4 非相干光空间光孤子

从 30 多年前光孤子的预言,到 1993 年稳态三维空间光孤子的实现,所有有关光孤子的研究都作了这样的假定:光子是一个相干波的实体,因而它只能由相干波源产生.光孤子只能是相干光孤子(coherent soliton).如果说用相干激光来产生一束在空间永不扩展的光曾经只是理论家的预言,那么,用非相干光(例如太阳光)来产生光孤子更像一个遥远的梦.众所周知,自然界存在诸多非相干光源.很多电磁辐射都没有激光那样的相干特性.一束光来自白炽灯或是发光二极管,其光谱中含有许多频率而被称为“白光”,在时间上固然没有好的相干性;其波阵面上各点相位随机而无相关关系,在空间上也不具有相干性.这样一来,非相干光能否实现自陷而形成非相干光空间光孤子(incoherent spatial soliton)呢?

1996 年,作者和他在普林斯顿大学的合作者们首次成功实现非相干光束的自陷^[14].紧接着,由“白光”而产生的亮空间光孤子以及由部分非相干光而产生的暗空间光孤子在权威杂志《自然》^[15]和《科学》^[16]上相继发表.这一系列的实验结果激发了科学家们对光孤子的重新认识和思考,以及对非相干光孤子的理论探索.研究表明,非相干光孤子的形成机理相对复杂,但其关键在于介质要具有非瞬时的非线性特性(noninstantaneous nonlinearity).尽管在每一给定时刻,非相干光波阵面杂乱无章,但若介质的

响应是非瞬时的,它就只能感受到有限时段内相对平稳的平均光强.只要这一平均光强能在饱和非线性介质中起到等效的波导作用,非相干光就能达到自陷而形成空间光孤子^[17].从某种意义上讲,非相干光空间光孤子可以看作是一个由多模、多分量组合而成的超级光孤子.尽管各分量自身的强度随机涨落,分量与分量或是模与模之间也互不相干,它们组合而成的平均光强却能在介质中诱导形成一多模波导(multimode waveguide)结构,从而像一势阱一样将所有的分量都束缚住.当然,复合光孤子与非相干光学孤子的联系还有待进一步研究.

图 5 显示由非相干光产生的暗空间光孤子^[16].所谓暗空间光孤子,是指在一均匀的背景光中间“挖掉”一部分而形成黑带或是黑洞,再输入介质[图 5(a)].倘若没有非线性效应,这样的光强空缺在传播过程中会自然扩展[图 5(b)].施加非线性而使介质附有自散焦功能,黑带或是黑洞的扩展就会受到抑制而形成暗空间光孤子[图 5(c)].令人兴奋的是,

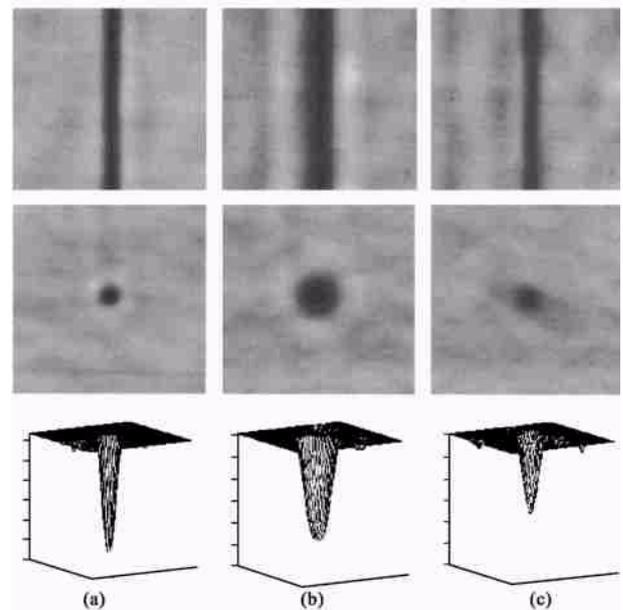


图 5 非相干光产生的横向一维(上图)和二维(下图)暗空间光孤子

(a) 输入面;(b) 无非线性时的输出面;(c) 加非线性时的输出面

这样的暗空间光孤子也能在介质中形成波导.文献[18]第一次展现由这样的非相干光空间光孤子诱导而成的波导结构.这标志着从此人们可以用一束弱的非相干光(如白炽光)去控制一束强的相干激光.

非相干光空间光孤子的发现改变了人们对孤子的传统观念,也为光子科学、非线性光学以及其他非线性领域开辟了新课题.比如,是否可以通过非相干

光孤子的相互作用去改变光的相干统计特性,使得一束非相干光(无序)朝相干光(有序)转换呢?这样的转换将可用来实现光的相干度控制(coherence control)或是光“冷却”(light “cooling”).非相干光从根本上讲代表了一个由具有弱关联(weakly - correlated)粒子组成的多体系统,而这样的系统在自然界普遍存在,大到银河系中的星体,小到原子蒸汽在接近玻色-爱因斯坦凝聚前,或是半导体中靠近量子霍尔(Hall)区的电子流.是否可以通过非相干光孤子动力学的研究去揭示其他非线性领域里的物理规律呢?最新的两项实验给了科学家们不少启发:其一是非相干光波阵面上空间模式(patterns)的自发形成^[19],它说明即便是弱关联粒子组成的多体系统也能通过噪音和非稳机制而自组织般地形成空间模式.这样的空间模式可望在物质波或是原子波中观察到.其二是非相干光波阵面上空间孤子团(soliton cluster)的形成^[20](见图6),它反映了一个具有弱相互吸引的多体非线性系统的普遍现象,就像生化系统中原子或分子的自发聚集(molecular aggregate)或是天体中星团(star cluster)的自发形成一样.

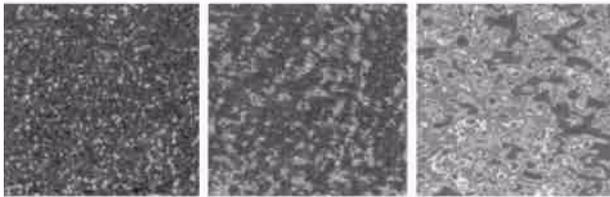


图6 非相干光波阵面光空间孤子团的形成
(从左图到右图,光的空间相干度逐渐下降)

5 小结

在物理学的发展史上,理论与实验工作的结合

•物理新闻•

超重氢原子 (Superheavy Hydrogen)

最近 Korshennikov 为首的俄罗斯,法国和日本的科学家们在莫斯科联合核子研究所(JINR)制成了一种超重氢原子,其中包含有一质子和四个中子,即由五个核子组成.

将由氦-6核组成的奇异束轰击氢靶,随后可形成偶然性的中间产物为氢-5核和氦-2核.这些不稳定的粒子迅速发生分离,从氦-2核中分裂出两个质子,而氢-5核则裂变为两个中子和一个氦同位素.

如果说,我们将具有两个中子的氢同位素称为氘(deuterium),三个中子的氢同位素称为氚(triton),那么我们应如何来对具有四个中子的氢同位素进行命名呢?是否应称它为:Pentium.

(云中客摘自 Phys. Rev. Lett., 27 August, 2001)

往往会带给科学家们新的发现.空间光孤子的研究正说明了这一点.从克尔型光孤子的不稳定,到稳态光折变空间光孤子的产生,从相干光孤子观念的持久,到非相干光空间光孤子的突破,这是人们认识和实践的一次飞跃.无疑,空间光孤子正以其崭新的姿态为科学家们在应用科学和基础科学的研究方面开拓新课题,带来新挑战!

参 考 文 献

- [1] Chiao R Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 1964, 13 : 479
- [2] Kelley P L. Phys. Rev. Lett., 1965, 15 : 1005
- [3] Duree G *et al.* Phys. Rev. Lett., 1993, 71 : 533; Shih M *et al.* Elect. Lett., 1995, 31 : 826
- [4] Segev M, Stegeman G. Phys. Today, 1998, 51 (8) : 42; Science, 1999, 286 : 1518
- [5] Chen Z *et al.* Opt. Lett., 1996, 21 : 629
- [6] Chen Z *et al.* Opt. Lett., 1996, 21 : 716; Shih M *et al.* Opt. Lett., 1996, 21 : 931
- [7] Lan S *et al.* Opt. Lett., 1999, 24 : 475; 1999, 24 : 1145
- [8] Shih M *et al.* Opt. Lett., 1996, 21 : 1538; Appl. Phys. Lett., 1996, 69 : 4151
- [9] Shih M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1996, 78 : 2551
- [10] Manakov S V. Sov. Phys. JETP, 1974, 38 : 248
- [11] Christodoulides D N *et al.* Appl. Phys. Lett., 1996, 68 : 1763
- [12] Chen Z *et al.* Opt. Lett., 1996, 21 : 1436; J. Opt. Soc. Am. B, 1997, 14 : 3066
- [13] Chen Z *et al.* Opt. Lett., 2000, 25 : 417; 1999, 24 : 327
- [14] Mitchell M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1996, 77 : 490
- [15] Mitchell M, Segev M. Nature, 1997, 387 : 880
- [16] Chen Z *et al.* Science, 1998, 280 : 889
- [17] Mitchell M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1997, 79 : 4990; 1997, 78 : 646
- [18] Chen Z *et al.* Opt. Lett., 1999, 24 : 1160
- [19] Kip D *et al.* Science, 2000, 290 : 495; Klinger J *et al.* Opt. Lett., 2001, 26 : 271
- [20] Chen Z *et al.* Proc. Am. Nat. Sci. (PANS), to appear