

排斥势中随时间变化原子间相互作用的玻色 - 爱因斯坦凝聚的亮孤子的动力学*

梁兆新^{1,2} 张志东^{1,†} 刘伍明²

(1 中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室和中国科学院国际材料物理中心 沈阳 110016)

(2 中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘要 简要地介绍了玻色 - 爱因斯坦凝聚现象及国际学术界的实验研究动态和最近的一项理论研究进展. 给出了一个一维非线性薛定谔方程的严格解, 它描述了在一个排斥势中随时间变化的原子间相互作用的玻色 - 爱因斯坦凝聚的一个亮孤子的动力学.

关键词 玻色 - 爱因斯坦凝聚, 动力学, 非线性薛定谔方程, 严格解

Dynamics of a bright soliton in Bose-Einstein condensates with time-dependent atomic scattering length in an expulsive parabolic potential

LIANG Zhao-Xin^{1,2} ZHANG Zhi-Dong^{1,†} LIU Wu-Ming²

(1 *Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, and International Centre for Materials Physics, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*)

(2 *Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract Bose - Einstein condensates are introduced briefly, together with experimental progresses and a recent theoretical work. A family of exact solutions of the one-dimensional nonlinear Schrödinger equation is derived, which describes the dynamics of a bright soliton in Bose-Einstein condensates with the time-dependent interatomic interaction in an expulsive parabolic potential.

Keywords Bose-Einstein condensates, dynamics, nonlinear Schrödinger equation, exact solutions

自然界有两种类型的基本粒子:一种为费米子,另一种为玻色子.基本粒子或复合粒子的自旋数为半整数时为费米子,如电子、质子、中子、 μ 子、 ^3He 原子等,它们具有反对称波函数,遵从费米 - 狄拉克统计和泡利不相容原理.基本粒子或复合粒子的自旋数为整数时为玻色子,如 π 介子、光子、 ^4He 原子等,它们具有对称波函数,遵从玻色 - 爱因斯坦统计.费米子和玻色子具有本质的不同,表现出两类截然不同的性质.

1924年,印度科学家玻色将光子作为粒子数不守恒的粒子成功地导出了普朗克黑体辐射定律.爱因斯坦将其推广到全同粒子理想气体,并从理论上预言了玻色 - 爱因斯坦凝聚(BEC)现象的存在,即

在一定低的温度下,无相互作用的玻色子会在最低能量量子态上突然凝聚,达到可观的数量.由于泡利不相容原理,费米子(除了配对成玻色子)不可能在最低能量量子态上凝聚.玻色 - 爱因斯坦凝聚体具有奇特性质,通过对它的研究,可以研究原子间的相互作用力、外场等对物质凝聚过程及动力学的影响.这不仅对基础研究有重要意义,而且在原子激光、原子钟、原子芯片技术、精密测量、量子计算机和纳米技术等领域都有非常好的应用前景.由于找不到合

* 国家自然科学基金(批准号:50331030,10274087,90103024,10174095)资助项目
2005-02-23收到

† 通讯联系人. Email: zdzhang@imr.ac.cn

适的实验体系以及受实验技术的限制,玻色-爱因斯坦凝聚的早期实验研究进展十分缓慢.1995年7月美国科罗拉多大学实验天体物理联合研究所(JILA)Wieman小组首先在实验中观察到了原子的玻色-爱因斯坦凝聚现象.2001年度诺贝尔物理学奖授予了 Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle 和 Carl E. Wieman,表彰他们在实现弱相互作用玻色气体的玻色-爱因斯坦凝聚实验方面的开创性工作^[1,2].2004年国际著名学术刊物 Science 将实现费米子的玻色-爱因斯坦凝聚评为年度国际科技十大进展之一^[3].玻色-爱因斯坦凝聚的理论和实验研究已成为国际物理学界的研究热点之一.

目前,可以在实验上通过 Feshbach 共振来调节原子间的散射长度及其符号,从而实现暗孤子和亮孤子原子物质波的非线性激发^[4,5].玻色-爱因斯坦凝聚在分子场理论框架下可以用 Gross-Pitaevskii 方程结合 Feshbach 共振来描述^[6],并在一定条件下可以化为一维非线性薛定谔方程.但至今仅标准非线性薛定谔方程可以严格求解.获得不同类型的非线性薛定谔方程的严格解对研究和深入了解玻色-爱因斯坦凝聚的行为具有重要的意义.梁兆新、张志东和刘伍明合作研究在玻色-爱因斯坦凝聚态的理论研究中取得进展,论文在《物理评论快报》上发表^[7].应用 Darboux 变换^[8],给出了一个一维非线性薛定谔方程的严格解,它描述了在一个排斥势中随时间变化的原子间相互作用的玻色-爱因斯坦凝聚的一个亮孤子的动力学(见图1).从而也证明了非线性薛定谔方程在具有特定的 Feshbach 非线性系数时可积.计算了孤子和背景中的原子数,给出亮孤子中原子数存在极大值和极小值的条件,发现在亮孤子中的原子数可以保持一个动力学平衡.在亮孤子和背景间存在一个时间周期的原子的交换(见图2).结果表明,在一定的参数范围内,亮孤子可以通过增加原子的散射长度被挤压成非常高的局域物质密度.文章还给出了一组参数来指导今后实验的进行,并对解的稳定性进行了讨论.这提供了一个实验的工具来确认一维 Gross-Pitaevskii 方程的适合应用的范围,并可以实现对玻色-爱因斯坦凝聚态的挤压与控制.由于一维非线性薛定谔方程还可以描述光子晶体、光纤通信、磁性孤立子等许多物理系统的非线性动力学行为,因此这项研究结果对这些研究领域也将有很大的启迪.

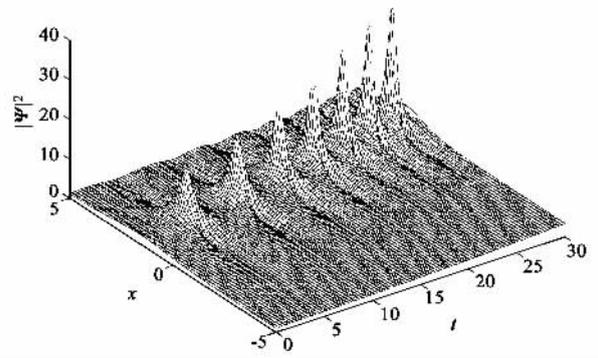


图1 玻色-爱因斯坦凝聚的一个亮孤子的动力学

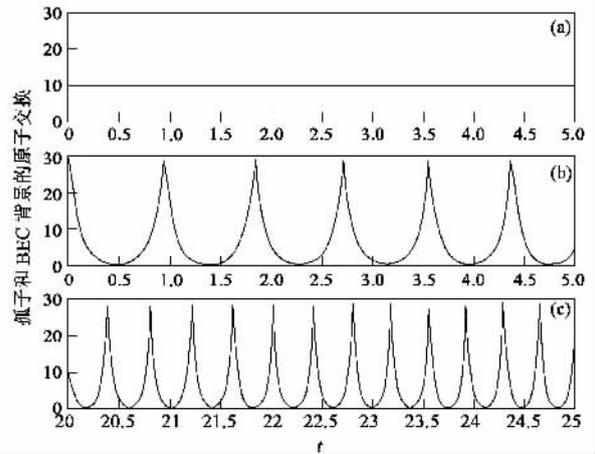


图2 在亮孤子和 BEC 背景间周期性原子交换
(a) $\mu = [0, 5]$ (b) $\mu = [0, 5]$ (c) $\mu = [20, 25]$

参 考 文 献

- [1] Anderson M H, Ensher J R, Matthews M R *et al.* Science, 1995, 269 :198
- [2] Davis K B, Mewes M O, Andrews M R *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 75 :3969
- [3] Regal C A, Greiner M, Jin D S. Phys. Rev. Lett., 2004, 92 :040403
- [4] Roberts J L, Claussen N R, Burke J P *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81 :5109
- [5] Stenger J, Inouye S, Andrews M R *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 82 :2422
- [6] Abdullaev F Kh, Kamchatnov A M, Konotop V V *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 90 :230402
- [7] Liang Z X, Zhang Z D, Liu W M. Phys. Rev. Lett., 2005, 94 :050402
- [8] Matveev V B, Salli M A, Darboux Transformations and Solitons, Springer Series in Nonlinear Dynamics, Springer, Berlin, 1991