

准一维玻色-爱因斯坦凝聚体的暗孤子特性研究

徐文慧

2020 年 10 月 8 日

摘要: 玻色-爱因斯坦凝聚作为一种新的物质态, 近年来已经成为一个非常有趣的物理学前沿课题。玻色-爱因斯坦凝聚体中暗、亮物质波孤子的成功观测及他们潜在的应用前景, 使得玻色-爱因斯坦凝聚中的物质波孤子成为了当前低温物理及凝聚态物理领域的研究热点之一。[1] 本文简要介绍了玻色-爱因斯坦凝聚的概念、性质与产生条件, 从海森堡运动方程推导描述 BEC 特性的非线性薛定谔方程。从 G-P 方程出发, 借助于解析与数值分析方法, 研究一维玻色-爱因斯坦凝聚 (BEC) 中暗孤子在抛物势阱中的动力学特性。

关键词: 玻色-爱因斯坦凝聚; P-D 方程; 暗孤子; 抛物势阱; 薛定谔方程

1 绪论

人们熟知大自然中的三态, 固、液、气, 而在温度极高的状态下还存在一种物质状态等离子体, 它广泛地存在于宇宙空间当中, 温度极低的状态下, 物质向为典型。随着科技的进步, 人们对凝聚态物理的研究日益深入, 玻色-爱因斯坦凝聚态也被人们一点点地了解。在其身上有着许多有特殊的性质吸引着人们对其的研究与应用。此篇文章在第 2、3 节中对玻色-爱因斯坦凝聚进行简要的介绍, 希望读者通过这些介绍对其有一定的了解。在 4、5 节中, 则基于海森堡运动方程, 理论推导玻色-爱因斯坦凝聚的非线性薛定谔方程, 并对波函数进行分析, 由此解释暗孤子的产生。最后在第 6 节中, 推导解释玻色-爱因斯坦凝聚态中暗孤子在抛物势阱中的动力学性质。玻色-爱因斯坦凝聚的暗孤子在不同的情况下表现出不同的动力学性质, 通过对这些性质的研究, 可以将其应用于生产生活的各个领域。

2 玻色-爱因斯坦凝聚简述

2.1 玻色-爱因斯坦凝聚的发现

1924 年，玻色提出理想气体光子的新颖观点。根据其假设计算得的每个光子能量既符合最大几率分布假设，又符合爱因斯坦光量子假设，使得该观点从根源上解决了黑体辐射半经验公式难题。[2] 但是由于最初玻色仅仅是提出了相关假设，没有对应的证明或是研究成果，因此遭到了学术期刊的否认。为证明自己假设的正确性，玻色将自己论文寄予爱因斯坦。而爱因斯坦经过仔细阅读后意识到这个假设的重要性便开始着手研究相关问题。经过长时间的学术研究，爱因斯坦成功将玻色新颖的光子统计方式结合到原子领域，提出假设认为原子温度足够低时，会生成一种全新的物质形态。全部原子将会集聚在最低的能量形态，这个假设我们称之为玻色—爱因斯坦凝聚。直至 1938 年，有关科学家提出液氮的超流现象的本质也是一种量子的统计现象，也是玻色—爱因斯坦凝聚的一种方式。[3] 自此科学领域开始逐步重视起这个假设，无数科学家进行不断的尝试企图观察到玻色—爱因斯坦的凝聚现象。然而由于时代各方面的科学技术不够发展，而玻色—爱因斯坦凝聚的条件又十分苛刻，早期该方面的实验研究的发展进度极为缓慢。

2.2 玻色-爱因斯坦凝聚的概念

玻色—爱因斯坦凝聚态本质上属于量子的统计现象。综合考虑动能经典定理 $\epsilon = \frac{1}{2}mv^2$ 、量子表达式 $\epsilon = \frac{3}{2}kt$ 以及德布罗意关系式 $\lambda = \frac{h}{p}$ ，可以分析得知，环境温度越低或是粒子运动速度越慢，粒子物质波波长就会越长。如果达到一定的极低温时（绝对零度附近），物质波彼此作用形成了完全一致的状态，原子的热运动现象就不再存在，此时原子间的距离与德布罗意波长即会处在同一量级，这样的现象就是理想状态下的玻色—爱因斯坦凝聚态。[2]

2.3 玻色-爱因斯坦凝聚的性质

2.3.1 玻色-爱因斯坦凝聚态的相干性

2.3.2 玻色-爱因斯坦凝聚态的相干性间的相位关联

3 玻色-爱因斯坦凝聚 (BEC) 产生的条件与实验实现

3.1 玻色-爱因斯坦凝聚 (BEC) 产生的条件

3.2 玻色-爱因斯坦凝聚 (BEC) 的实验实现

3.2.1 冷玻色原子气体的产生及静磁阱技术

3.2.2 玻色-爱因斯坦凝聚的检测及蒸发冷却技术

4 BEC 非线性薛定谔方程推导

5 阐述 BEC 中非线性物质波，获得暗孤子

5.1 BEC 中的非线性物质波

5.2 获得暗孤子

5.2.1 孤子的发现

5.2.2 玻色-爱因斯坦凝聚中的孤子

6 详细分析一维 BEC 中暗孤子在抛物势阱中的动力学

7 总结与展望

玻色-爱因斯坦凝聚是很值得我们去研究的新兴领域。通过对玻色-爱因斯坦凝聚各种性质的研究，可以其对应地应用于相关领域。凝聚态物理的发展势必能够带动各个学科的发展，这一新兴领域存在着许许多多的未知等我们去探索。

参考文献

- [1] 许治勇, 李瑛, 张雪华, 吴章炜. 玻色-爱因斯坦凝聚物理本质探索 [J]. 大学物理实验, 2017, 30(03): 63-68.
- [2] 窦志国. 碱性原子的玻色爱因斯坦凝聚态与“原子激光”——2001 年诺贝尔物理学奖介绍 [J]. 物理与工程, 2002(04): 30-33+64.
- [3] 郭振华, 王清君, 刘晓弘. 2001 年度诺贝尔物理学奖与玻色—爱因斯坦凝聚 [J]. 宝鸡文理学院学报 (自然科学版), 2002(01): 79-80.
- [4] 姜云青. 强排斥玻色—爱因斯坦凝聚体中的精确解 [D]. 浙江师范大学, 2012.
- [5] 郭慧, 王雅君, 王林雪, 张晓斐. 玻色-爱因斯坦凝聚中的环状暗孤子动力学 [J]. 物理学报, 2020, 69(01): 37-48.
- [6] 刘超飞, 潘小青, 张赣源. 玻色爱因斯坦凝聚体中暗孤子动力学研究 [J]. 江西理工大学学报, 2016, 37(05): 102-111.
- [7] 李秋艳. 非自治孤子的动力学研究 [D]. 河北工业大学, 2011.

致谢

一转眼四年的大学生涯就要走到尾声, 从第一天踏入校园, 回想这段大学时光, 离不开老师、同学们给予我的无私帮助, 在文章完成的最后, 提笔已有许多激动和不舍, 有许多人值得我真心感谢。在大学学习的这段时间, 是我人生生涯中最充实的阶段。学习方面, 有专业的老师对我们的课程进行指导, 做我们学习知识道路上的领路人。生活上, 辅导员给予了我们许多帮助, 同学之间相处也十分融洽, 让我深刻的体会到了师生情, 同学爱。在这论文即将完成之际, 我要感谢我的导师 XXX 老师, 从最开始的选题、收集资料、撰写大纲直到最后定稿, 全程都很认真细心的给我们指导论文, 哪怕是一个小格式的问题, 都会提醒我们注意修改, 对于老师这份专业敬业的态度, 我十分钦佩, 也再一次表示对 XXX 老师的感谢。本文在写作过程中的每个阶段, 都有老师认真负责地指出文中的不足, 并提出相应的整改意见, 这篇文章的完成离不开每一位老师的细心指导。最后谢谢学校能给我这么好的一个平台让我去学习, 让我遇见这么多优秀的老师和同学, 我相信, 带

着学校、老师和同学给的知识、友谊与感动，即将进入社会的我会迈上人生中新的台阶！