

磁偶极相互作用下玻色 – 爱因斯坦凝聚体中出现的奇特涡旋晶格结构*

张 剑[†] 翟 荟

(清华大学高等研究中心 北京 100084)

摘 要 文章简要地介绍了玻色 – 爱因斯坦凝聚体中出现的涡旋和铬原子玻色 – 爱因斯坦凝聚体的实验研究进展,还介绍了文章作者的一项最新的理论工作. 研究指出,由于铬原子磁偶极相互作用的影响,凝聚体中将出现奇特的各向异性的涡旋晶格结构.

关键词 玻色 – 爱因斯坦凝聚,磁偶极相互作用,涡旋晶格

Exotic vortex lattice structure in Bose-Einstein condensates with dipolar interactions

ZHANG Jian[†] ZHAI Hui

(Center for advanced study of Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Vortices in Bose – Einstein condensates (BEC) and recent experimental and theoretic progress in chromium condensation are reviewed. It is shown that the structure of vortex lattices in these condensates will be significantly affected by the dipolar interactions, and particularly that an exotic anisotropic structure of vortex lattice is predicted to exist.

Keywords Bose – Einstein condensate, dipolar interaction, vortex lattice

在温度低于接近零度的临界值时,遵从玻色 – 爱因斯坦分布的理想气体系统将发生宏观数量的粒子突然凝聚到同一个能量最低的量子态上的现象,这就是最早的所谓玻色 – 爱因斯坦凝聚. 在有相互作用的多体系统中,玻色 – 爱因斯坦凝聚表现为多体相干的关联效应,是一种宏观量子现象,不同于常见的热力学统计平衡态,整个凝聚体作为一个宏观体系处于量子力学纯态,仍然保持量子相干性. 1995年,美国科罗拉多大学实验室成功地用弱相互作用的碱金属玻色原子气体制备出玻色 – 爱因斯坦凝聚体^[1]. 10年来,对这类原子系统各方面性质的观察和研究进展迅速,并且积极地向外延伸,逐渐形成了一个物理学领域——冷原子物理学.

超冷原子气系统有3个重要的特点^[2] 稀薄的、冷的和由原子组成的系统. 首先,所研究的系统是一团稀薄的气体,制备在高真空环境中,较固体晶格中的电子气要纯净得多,几乎可以不考虑杂质的影响,

另一方面,稀薄使得我们在多数情况下可以忽略三体以上的相互作用,在理论上具有可操作性,便于理论模型与实验观察作细致的比较. 第二,冷就是温度低,实际上就是能量低,只需要考虑系统的低能散射过程和低能激发性质,进行有效近似处理,然后再对简化后的模型进行分析求解. 这是现代凝聚态理论中的一个基本观念和处理方式. 冷原子系统的行为,在一定意义下,具有一般复杂多体系统在低能极限下所表现出的普适特征,因此对这一系统的研究具有超出研究对象本身的更广泛的意义. 第三,也是最重要的一点,是原子有相对丰富的内部结构和较高的内部自由度. 这就为人工操纵这一系统提供了非常有利的条件,比如利用光和原子的相互作用的性

* 国家自然科学基金(批准号:10404015)资助项目

2005 – 12 – 03 收到

[†] 通讯联系人. Email: Zhang-Jian02@mails.tsinghua.edu.cn

质实现用光晶格囚禁原子,激光旋转凝聚体,选择性地抽取和探测原子.另一方面,原子内部的结构可以使原子系统的部分参数能够在实验中自由地调节,比如 Feshbach 共振技术可以通过改变外场条件来调节原子的相互作用.由于这些重要的特点,冷原子物理与精密测量、低温物理学、强关联体系、超导新物质态材料、原子分子物理学、现代光学、量子计算等诸多领域有密切的联系,甚至对天体物理和宇宙学也有一定的启发意义.

对于一个快速旋转的平面凝聚体,当旋转速度接近某临界值时,作为一种量子化携带角动量的方式,系统中会出现大量涡旋,来响应外界的扰动^[3].涡旋是有相互作用的原子凝聚体中的一种有奇点的拓扑激发,为了保证体系能量有限,在涡旋的中心处凝聚体的密度为零.稳定的涡旋态常常是超流体和第二类超导体的重要标志.1999年,美国 JILA 实验室的 Cornell E A 和 Wieman C E 共同领导的实验组首先在超冷玻色原子系统中产生了稳定的涡旋态^[4],这表明弱相互作用的原子气体组成的玻色-爱因斯坦凝聚体具有的超流性,是人们观察到的除了液氦外的一种新的电中性超流体.

50年前,Abrikosov 证明,在超流体和第二类超导体系统中,大量涡旋核会在空间均匀地排列成三角点阵,来降低系统的总能量^[4].在接下来的半个世纪里,这一论断被充分证实,各种超流和超导材料中都观察到了排列成三角点阵的涡旋结构.2001年,美国麻省理工学院 Ketterle W 领导的实验研究小组,在快速旋转的弱相互作用的玻色原子凝聚体中,观察到了上百个涡旋排成的稳定的三角点阵^[5].

但是,不久前 Phys. Rev. Lett. 同时发表了 2 篇研究论文,讨论当原子有磁偶极相互作用时凝聚体的涡旋态特点^[6,7].其中,我们的理论研究指出,相互作用势的性质决定了超流涡旋晶格的结构,原子之间存在磁偶极相互作用,会严重影响涡旋的排列方式,特别是在合适的参数范围内,一种奇特的各向异性长方形点阵结构是稳定的.这一结构将有可能在铬(⁵²Cr)原子凝聚体中被观察到^[7].

2005年初,一种新的超流体,铬原子气组成的玻色-爱因斯坦凝聚体,在德国斯图加特大学的实验室中成功实现了^[8].斯图加特大学的 Pfau T 领导的实验组近年来一直致力于超冷铬原子气体的制备和性质方面的实验研究.他们不但成功地制备了铬原子凝聚体,而且掌握了通过调节外部磁场来改变铬原子之间的相互作用性质的技术手段^[9].这两方

面的实验进展对于冷原子物理学来说都具有重要的意义.铬原子凝聚体有这样的特点:一方面不同于以前的液氦超流体和电子超导体,铬原子间的短程相互作用可以通过改变外磁场来调节;另一方面不同于碱金属原子气凝聚体,铬原子是过渡金属元素,核外有 6 个电子,每个电子单独占据一个空间角动量轨道,在有外磁场存在时,原子的自旋磁矩是碱金属原子的 6 倍,而磁偶极相互作用则是后者的 36 倍.因此在讨论铬原子系统的性质时,磁偶极相互作用的效果不能忽略.

磁偶极相互作用是一种原子间的各向异性长程相互作用,既可以是吸引势,也可以是排斥势,这不仅取决于原子磁矩的取向与相对位置,而且还受到系统所在空间的几何结构的制约.其自身的性质及其对多体系统的影响,非常不同于普通的原子间各向同性短程接触势.

对于最普通的原子间排斥性各向同性短程接触势,凝聚体中的涡旋将会如 Abrikosov A 所预言的那样,排成正三角格子,或者有人称为六角晶格结构;假如这种相互作用是吸引的,凝聚体就会塌缩,稳定的涡旋晶格态自然也就不能存在.在物理上不难理解这样的结果,短程排斥势使系统倾向于将原子尽量均匀和对称地分布于空间当中,但是为了保持角动量守恒,凝聚体中要存在一定数目的涡旋,而三角晶格是二维空间中最均匀、最对称的晶格排布方式,于是涡旋排成三角格子,最终达到稳定的平衡态.

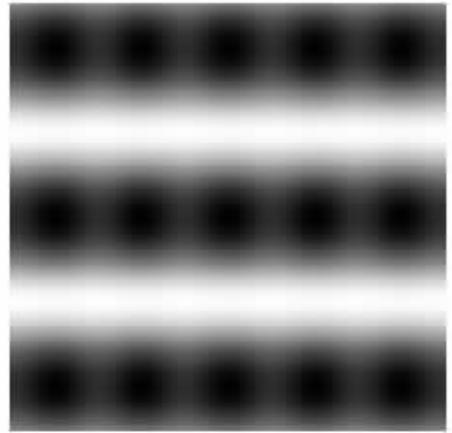


图1 涡旋点阵为长方晶格时凝聚体的密度分布(白色为高密度区,从白到黑密度逐渐降低)

但是铬原子之间除了短程接触势之外还存在磁偶极相互作用.假如所有原子的磁矩都垂直于凝聚体平面均匀极化,这时的磁偶极相互作用为有效排斥势,它可以一部分抵消了短程吸引作用,在更大参

数范围内继续保持涡旋晶格结构的稳定性. 最有趣的是, 在恰当的参数范围内, 涡旋会选择一种长方形晶格点阵为稳定排布方式, 即晶格的两格矢互相垂直, 但是长度不等. 这是一种各向异性结构, 而且当涡旋晶格的两格矢长度相差很大时, 凝聚体的密度分布在空间的起伏很大(如图 1 所示), 这正是吸引相互作用在涡旋晶格结构上表现出的效果, 这在碱金属凝聚体中是观察不到的.

研究还发现, 随着短程吸引相互作用强度的增加, 稳定涡旋点阵将经历三角晶格、正方格子、两格矢长度差越来越大的长方格子, 直到最后凝聚体自身发生塌缩. 比较这三种晶格, 不难发现系统的对称性和均匀程度在逐渐降低, 与三角晶格相比, 长方晶格是相当不均匀和不对称的. 系统稳定的涡旋晶格结构的这种变化体现了相互作用势中, 各向异性势部分与各向同性势部分之间的竞争.

参 考 文 献

- [1] Matthews M, Wieman C, Anderson M *et al.* *Science*, 1995, 269 :198
- [2] 翟荟. 超冷原子的量子多体理论(博士学位论文). 北京: 清华大学高等研究中心 2004[Zhai H. *Quantum Many-body Theory of Ultracold Atoms*. Beijing: Center for Advanced Study Tsinghua University, 2004]
- [3] Leggett A J. *Rev. Mod. Phys.*, 2001, 73 :307; Haljan P C, Hall D S, Wieman C E *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83 :2498
- [4] Abrikosov A. *Rev. Mod. Phys.*, 2004, 76 :975
- [5] Abo-Shaeer J R, Raman C, Vogels J M *et al.* *Science*, 2001, 292 :476
- [6] Cooper N R, Rezayi E H, Simon S H. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95 :200402
- [7] Zhang J, Zhai H. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95 :200403
- [8] Griesmaier A, Werner J, Hensler S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 94 :160401
- [9] Werner J, Griesmaier A, Hensler S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 94 :183201

· 物理新闻和动态 ·

Google 发掘精品物理论文

在物理学界, 一篇论文的价值是以它的被引用的次数来评估的, 这个数称为引用指数. 然而这个方法有时并不可靠, 一篇论文在物理学上有很大的影响, 但它被引用的次数却不多, 其中最典型的例子就是 1958 年由 R. Feynman 和 M. Gell - Mann 发表的“费米相互作用理论”, 在这篇论文中他们引进了一个新的理论, 随后就成了弱相互作用的“经典模型”.

最近美国波士顿大学的 S. Render 和 Pu Chen、Brookhaven 国家实验室的 Huafeng Xie 和 Sergei Maslov 等人提出了一个新的方法来评估论文的重要性. 这个方法称为“Google 页面分级运算法则”(Google PageRank algorithm). 他们建立了一个论文引用网络, 这个网络上包括了从 1893 年到 2003 年 6 月所有发表在《物理评论》系列杂志上的论文, 在网络上有 353 268 篇论文, 每篇论文在网络上是用一个“节点”(nodes)来表示, 同时在网络上还用 3 110 839 根“链”(links)来表示在《物理评论》上被引用的次数.“Google 页面分级运算法则”的具体操作是先在网络上投入许多的漫游者(walker), 这些漫游者有半数的时间是从一个节点, 即这篇论文的参考文献中任意地跳跃到网络上的另一篇论文上, 参考文献的选择是随意的、等几率的. 而在其余的时间, 漫游者可在网络上无规地跳跃到其他的论文上. 这样的跳跃过程可持续地反复进行, 直到网络上各个节点的统计平均值达到一个常数. 这个常数被称为是该节点的“Google 数”.

计算结果表明, 节点的“Google 数”与该论文的引用指数是线性相关的, 也就是说, 对于有高引用指数的论文, 它的“Google 数”也很高. 但也有一些例外, 有一些论文具有比它们的引用指数高得多的反常的“Google 数”. 这些论文是:

1933 年由 Wigner 和 Seitz 发表在《物理评论》上的“On the Constitution of Metallic Sodium”. 其反常的原因是由于 Wigner 和 Seitz 的结构被绝大多数的《固体物理》教科书所引用.

1957 年由 Gell - Mann 和 Brueckner 发表在《物理评论》上的“Correlation Energy of an Electron Gas at High Density”. 这是一篇有关多体理论的重要文献.

1963 年由 Glauber 发表在《物理评论快报》上的“Photon Correlation”. 这是由于去年诺贝尔物理奖的影响.

“Google 页面分级运算法则”要比仅仅考虑引用指数来评定论文的价值更为有利一些, 同时它还可以为发掘新出现的物理精品论文提供参考. 当然它也并不是唯一的评判标准, 对科学界来说, 全面地浏览科学论文这种传统的方式还是要保持的. 研究组的科学家们也指出“Google 页面分级运算法则”也存在着一些缺点, 一是可能会出现一篇普普通通的论文在短暂的时间内具有很高的“Google 数”, 二是有可能某些论文是被“Google 网络”的赞助者们所购买的, 最后还有一个问题是运算法则可能存在若干固有的误差.

(云中客 摘自 PhysicsWeb, 21 April 2006)