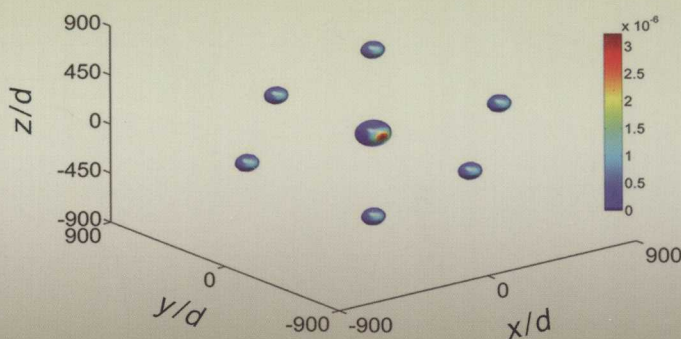


文文 周昱 著

超冷费米原子气体 宏观特性的理论研究



文文 周昱 著

0414.2
21

超冷费米原子气体 宏观特性的理论研究



北航

C1699694

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇江

0414.2
21

018510310

图书在版编目(CIP)数据

超冷费米原子气体宏观特性的理论研究 / 文文, 周昱著. — 镇江: 江苏大学出版社, 2013. 12
ISBN 978-7-81130-597-5

I. ①超… II. ①文… ②周… III. ①超冷中子—费米气体—研究 IV. ①O414.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 283708 号

超冷费米原子气体宏观特性的理论研究

CHAOLENG FEIMIYUANZI QITI HONGGUANTEXING DE LILUNYANJIU

著 者/文 文 周 昱

责任编辑/汪再非 张小琴

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/<http://press. ujs. edu. cn>

排 版/镇江文苑制版印刷有限责任公司

印 刷/句容市排印厂

经 销/江苏省新华书店

开 本/890 mm×1 240 mm 1/32

印 张/6.125

字 数/176 千字

版 次/2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-81130-597-5

定 价/28.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话: 0511-84440882)

前 言

冷原子物理是在过去二十多年里蓬勃发展的一个新兴科学领域. 由于激光冷却与囚禁技术的突破与成功应用, 超冷原子气体的理论和实验探索已成为国际物理学界备受关注、十分活跃的前沿研究热点. 目前全球有百余家实验室正在积极开展超冷原子物理方面的研究. 该方面的研究不仅具有十分重要的科学意义, 而且具有重大的潜在应用价值. 这是因为相关研究不仅成为原子分子物理、非线性与量子光学、统计与凝聚态物理、核物理和天体物理等基础学科研究领域的交叉点, 而且大大地推动了原子分子光学、单量子态调控、强关联体系的量子模拟等重要相关课题的研究, 以及精密光谱与精密测量、原子分子激光、原子干涉仪、原子芯片、原子钟与光钟、量子信息与量子计算等高新技术的发展.

1995 年, 科学家实现了弱相互作用玻色原子 (如 ^{87}Rb , ^{23}Na 等) 气体的玻色-爱因斯坦凝聚 (Bose-Einstein condensation, BEC), 即当温度低于某一临界值时, 玻色子体系中大量粒子凝聚到一个或几个量子态的现象. BEC 是量子统计物理学的基本结论之一, 是超流与超导现象的物理根源. 继关于 BEC 的理论和实验取得一系列巨大的进展和成功后, 目前的重点已转向超冷费米原子气体的研究. 1999 年, 美国科学家首次实现了费米原子 (如 ^6Li , ^{40}K 等) 气体的超低温冷却与量子简并. 尽管费米子不能像玻色子那样直接发生 BEC, 但通过 Cooper 配对等机制可形成费米子对. 这些费米子对如同 (准) 复合玻色子, 从而可以发生 BEC, 导致费米体系的超导和超流. 近年来理论与实验研究表明, 通过 Feshbach 共振技术可以使粒子间的相互作用从吸引变为排斥, 费米子体系可以实现从 Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 超流到 BEC 的转变. 事实上, BCS 与 BEC

只不过是 BCS-BEC 渡越 (BCS-BEC crossover) 过程的两个极限而已。

相比于超冷玻色气体,超冷费米气体无论是实验实现还是理论研究都要困难得多。超流费米原子气体理论研究的一个重要方法是使用量子多体理论。由于问题的复杂性,即使对于简化了的哈密顿量,适用于整个 BCS-BEC 渡越的微观理论至今仍未能建立起来。另外,由于实验中所使用的囚禁势阱要求处理非均匀量子多体问题,而微观理论对于非均匀多体问题没有十分有效的理论处理方法。再者,对于非线性集体激发等非线性非平衡动力学问题,用微观多体理论求解也是十分困难的。鉴于此,本书采取的基本研究方案是基于扩展的 Thomas-Fermi 密度泛函理论和推广的超流流体动力学方程,以及由此导出的序参量方程。值得注意的是,序参量方程虽然不能有效地描述在 BCS 端的超流,但是其理论框架简单明了,易于解析数值计算,得到的结果不仅与实验结果相符,而且在么正极限和 BEC 端与基于平均场(微观)理论的结果一致。

基于以上方案,本书详细研究了在整个 BCS-BEC 渡越区域超流费米气体的相干特性与非线性动力学行为。本书共有 7 章内容。第 1 章简单介绍超流超导的研究历史,实现玻色-爱因斯坦凝聚的实验过程,以及国内外关于超流费米原子气体的研究进展。第 2 章讨论理想气体的统计性质、低能散射以及描述超冷原子气体的微观理论。第 3 章基于密度泛函理论,在超流流体力学方程组的基础上导出描述零温费米超流气体的宏观方程——序参量方程,且回顾了超冷费米气体中集体激发的理论结果和实验进展。第 4 章基于导出的序参量方程,利用费曼传播子方法研究了关闭谐振子势和光晶格势后子凝聚体的相干演化,得到整个 BCS-BEC 渡越区域中超流费米气体经近弹道碰撞后形成的干涉图案,计算结果与 MIT 小组发表在 *Nature* 杂志上的著名实验结果符合得很好。并进一步利用数值方法研究了在强相互作用区域,相互作用和 Feshbach 共振技术对干涉条纹的影响。第 5 章利用解析和数值两种方法研究准一维情形下超流费米气体在整个 BCS-BEC 渡越中暗孤子的形成和演化。在

长波长近似下导出了描述弱非线性激发所满足的 Kortewegde Vries 方程,分别给出了整个 BCS-BEC 渡越区域的孤子解,发现在不同超流区域暗孤子呈现不同的物理特征;还研究了两个暗孤子的迎面碰撞,发现沿整个 BCS-BEC 渡越区域由孤子碰撞导致的相移呈非单调变化.所有解析结果与数值模拟结果符合得很好.第 6 章首先解析求解了适用于整个 BCS-BEC 渡越的线性集体激发的本征值问题,所得到的适用于整个 BCS-BEC 渡越区域的线性声速值与 Duke 大学的实验测量结果值符合得很好.接着详细研究了体系非线性激发的动力学行为,导出了大粒子数和长波长情形下集体激发振幅所满足的非线性演化方程,并给出了该方程的亮孤子解,该亮孤子是由于体系的波导色散与粒子间相互作用之间的平衡形成的.第 7 章给出本书的结论和展望.

本书的研究工作受到国家自然科学基金(11105039,11047101,11205071,11391240183),中央高校业务经费(2012B05714)以及河海大学 2010 博士启动经费和江苏科技大学科研启动基金(35051002)等项目的支持,特此感谢.

特别感谢华东师范大学黄国翔教授、浙江师范大学李慧军副教授、浙江工业大学熊宏伟教授、华东师范大学杭超副研究员和新疆师范大学马晓栋教授,他们在研究过程中给予很大的帮助和支持.还要感谢河海大学常州校区陈华副教授在书稿写作过程中提供的帮助.

本书是在作者博士论文的基础上充实完成的,虽然经过多次修改,但由于水平和能力有限,书中难免有错误和疏漏之处,敬请读者批评指正.

著 者

2013 年 9 月

目 录

1 绪 论

- 1.1 超流超导的研究历史 001
- 1.2 超冷原子气体的研究现状 007
 - 1.2.1 玻色-爱因斯坦凝聚 007
 - 1.2.2 超流费米原子气体 010
 - 1.2.3 研究超流费米原子气体的目的 015
- 1.3 内容安排 017

2 超冷原子气体

- 2.1 理想气体的统计性质 020
 - 2.1.1 玻色子 024
 - 2.1.2 费米子 027
- 2.2 原子间相互作用 030
 - 2.2.1 低能散射理论——分波法 030
 - 2.2.2 散射共振 034
 - 2.2.3 Feshbach 共振 035
 - 2.2.4 赝势近似 039
- 2.3 弱相互作用玻色气体 040
 - 2.3.1 二次量子化 040
 - 2.3.2 Gross-Pitaevskii 方程 043
 - 2.3.3 序参量的流体力学方程形式 045
- 2.4 相互作用费米气体 045

- 2.4.1 平均场解 045
- 2.4.2 能隙方程 049
- 2.4.3 BCS 超流的转变温度 050
- 2.5 本章小结 051

3 零温下 BCS-BEC 渡越的宏观描述

- 3.1 引言 053
- 3.2 流体力学方程组 055
 - 3.2.1 超流流体力学 055
 - 3.2.2 碰撞流体力学 056
- 3.3 态方程 058
 - 3.3.1 Gibbs-Duhem 关系 058
 - 3.3.2 BCS-BEC 渡越 059
 - 3.3.3 量子蒙特卡罗方法 061
 - 3.3.4 多方近似 063
- 3.4 序参量方程 065
 - 3.4.1 Thomas-Fermi 密度泛函理论 065
 - 3.4.2 扩展的 Thomas-Fermi 密度泛函理论 066
 - 3.4.3 序参量方程 067
- 3.5 集体激发 069
 - 3.5.1 集体振荡 069
 - 3.5.2 声波 074
- 3.6 本章小结 076

4 光晶格中超流费米原子气体的相干干涉

- 4.1 引言 078
- 4.2 光晶格 079
- 4.3 MIT 干涉实验 081

4.4	三维光晶格中超流费米气体的干涉图案	083
4.4.1	基态分布	084
4.4.2	含时演化	086
4.4.3	数值计算	087
4.4.4	费曼传播子方法合理性的证明	092
4.5	超流费米气体在谐振子势中的干涉演化	094
4.5.1	准二维序参量方程	095
4.5.2	数值结果	096
4.6	本章小结	101
5	准一维超流费米原子气体中暗孤子激发与演化	
5.1	引言	103
5.2	超冷原子气体中的孤子	105
5.2.1	玻色-爱因斯坦凝聚体中的孤子	105
5.2.2	超流费米原子气体中的暗孤子	108
5.3	准一维近似	111
5.3.1	准一维流体力学方程组	111
5.3.2	线性激发	112
5.4	暗孤子激发	113
5.4.1	KdV 方程及暗孤子解	113
5.4.2	BCS-BEC 渡越区域中暗孤子的特性	115
5.4.3	与微观理论的比较	117
5.5	数值模拟	119
5.5.1	基态分布	119
5.5.2	暗孤子的传播	121
5.6	两孤子迎面碰撞	123
5.6.1	相移	123
5.6.2	数值结果	126

5.7 本章小结 127

6 超流费米原子气体中声波和超声速亮孤子的传播特性

6.1 引言 129

6.2 线性激发和声速 131

6.2.1 准一维临界粒子数 132

6.2.2 本征值与本征函数 133

6.2.3 线性集体激发的多支频谱 136

6.2.4 雪茄型超流费米气体中的声速 138

6.3 弱非线性激发及亮孤子 139

6.3.1 KdV 方程及亮孤子解 139

6.3.2 亮孤子在 BCS-BEC 渡越区域的特性 143

6.4 数值模拟 145

6.5 本章小结 147

7 总结与展望

7.1 研究工作总结 149

7.2 拟开展的进一步工作 152

附录 A 计算积分 $I(\alpha)$ 153

附录 B $\alpha^{(j)}, \beta^{(j)}, M^{(j)}$ 和 $N^{(j)}$ 具体表述式 154

附录 C 集体激发模式的本征函数表达式 155

参考文献 157

1 绪 论

1.1 超流超导的研究历史

超流超导现象的发现要追溯到 20 世纪初. 1908 年, 荷兰物理学家 Kamerlingh Onnes 将 ^4He 液化后, 达到了之前从未达到的低温. 1911 年在研究低温下水银的电阻时, 他发现在温度 $T=4.19\text{ K}$ 时, 电阻突然消失, 并发表了题为“纯水银在氦温度的电阻”和“论水银电阻消失速率的突然改变”的两篇论文. 接着又发现其他一些金属(锡和铅)也有同样的现象, 他把这一特性称为超导特性. Onnes 首次使用“supraconductivity”来描述超导现象, 后来才改用“superconductivity”. Onnes 在获得此惊人发现两年后就获得了 1913 年诺贝尔物理学奖. 得奖的理由是他对于低温物理研究的贡献, 尤其是 ^4He 的液化, 而并非因为超导现象的发现. 实际上在他液化 ^4He 时, 其冷却温度已经达到了超流相变的临界点, 但是由于他的注意点在金属的低温特性, 超流相变并没有被发现.

1927 年, Willem Keesom 和 Mieczyslaw Wolfke 实验发现液 ^4He 的比热随温度变化曲线与希腊字母 λ 很相似, 并在温度 $T_\lambda=2.17\text{ K}$ 时经历状态的改变(即相变), 从而 Keesom 认为有两个不同液态, 温度高于 T_λ 的称为氦 I, 温度低于 T_λ 的称为氦 II. 虽然这些结果很有趣, 但并没有让人惊讶, 因此在当时也未引起太多的关注. 到 1937 年, 前苏联物理学家 Peter Kapitza 试图去理解为什么氦 II 的热导率异常高^①, Kapitza 意识到如果氦 II 的黏度(viscosity)很小, 则

① Keesom 和他的女儿 A P Keesom 也发现了同样的现象.

液体中的对流就很重要,从而热导率明显增大.随后他立即测量了液氦的黏度,发现氦Ⅱ的黏度比氦Ⅰ要小 1 500 倍,并且发表了著名的论断^[1]:

“by analogy with superconductors, ... the helium below the λ -point enters a special state which might be called superfluid.”

从此超流(superfluid)这个概念应运而生. Kapitza 指出超流与超导类似,金属的无阻抗与氦Ⅱ的无黏性似乎预示着相同的物理机制,尽管如此,后面将会看到这仅仅是一种自然巧合.同一时期,Jack Allen 和 Don Misener 在剑桥大学分别独立地发表相同的结果^[2].虽然 Allen 和 Misener 两人几乎与 Kapitza 同时发现了同样的结论,却没有获得诺贝尔物理学奖,只有 Kapitza 在 1978 年因低温物理的研究而获得诺贝尔物理学奖.

超导研究的下一个里程碑发生在 1933 年,德国物理学家 Walthe Meissner 和 Robert Ochsenfeld 发现,当金属处于超导态,原本穿过金属的磁力线立即被排斥出去,显示超导体具有完全的抗磁效应,也叫 Meissner 效应.为解释 Meissner 现象导致了第一个超导理论,1935 年 Fritz London 和 Heinz London 兄弟俩在二流体模型(two-fluid model)的基础上运用麦克斯韦电磁理论创立了宏观超导体电磁理论的基本方程^[3].他们将导体内电子分为正常电子及超导电子,分别构成正常电流和超导电流,而只有超导电子才能维持稳定的电流,基于描述超导电子运动的 London 方程可以得出超导体外的磁场是以指数衰减方式进入的.同样,排斥磁场的超导电流也仅存在超导体表面. London 兄弟第一个指出超导态是宏观尺度的量子效应,源于粒子波函数在对抗外界磁场扰动的某种刚性,这个想法为今后超导激发谱奠定了基础.接着,1938 年 Fritz London 提出量子统计性质对氦-4^①超流发挥了一定的作用,第一次将玻色-爱因斯坦凝聚(Bose-Einstein condensation)和超流两个概念联系起

① ⁴He 原子有 2 个质子、2 个中子及 2 个电子,所以⁴He 是玻色子,满足玻色-爱因斯坦分布.

来^[4].而在这之前,玻色-爱因斯坦凝聚只是 Albert Einstein 和印度物理学家 Satyendra Nath Bose 在 14 年前提出的一个理论概念^[5-6],即当温度下降到一定程度时,无相互作用的玻色粒子会聚集到同一个量子态,即形成玻色-爱因斯坦凝聚态.若将液氦-4 看成无相互作用的气体,代入相应的质量和密度,可以得到玻色-爱因斯坦凝聚态的转变温度为 3.3 K,这个温度非常靠近 $T_\lambda = 2.17$ K.然而,值得注意的是,玻色-爱因斯坦凝聚对于具有强相互作用的液氦来说并不适用.

正是出于这个原因,前苏联物理学家 Lev Davidovich Landau 拒绝玻色-爱因斯坦凝聚这个概念,而是在 1941 年提出描述液氦 II 的二流体模型^[7]①. Landau 对超流理论的主要贡献^[8]有: ① 引入凝聚态物理中有巨大影响的准粒子(quasiparticle)概念.准粒子是体系偏离基态的一种激发,有确定的能量和动量.超流态的弱激发可以看成是若干个准粒子的集合. Landau 将玻色流体的准粒子分为两类,一类是量子化声波(quantized sound waves)或声子(photons),其能量和动量的关系满足 $\epsilon = cp$ (c 是声速);另一类是旋子(rotons),也称为量子化转动(quantized rotational motion),其能谱为 $\epsilon(p) = \Delta + (p - p_0)^2 / 2m^*$. 在低温极限下 ($T \ll \Delta$),旋子对体系的比热没有贡献,只是来源于声子,所以比热正比于 T^3 . ② 假设氦 II 由超流成分和正常成分(也就是准粒子)两部分组成.超流体成分的熵为零,且无旋运动(超流速度满足 $\nabla \times \mathbf{v}_s = 0$);而正常部分就是一般有黏度的流体;从而 Landau 创立了一个二流体力学完备理论. Landau 的流体力学理论预言了超流临界温度,正常流体成分的质量密度,以及超流成分与正常成分的反相位振荡.正是由于液氦的开创性理论, Landau 在 1962 年获得诺贝尔物理学奖.

虽然 Landau 二流体模型为超流奠定了概念基础,但至今看来

① 也许是战争原因, Landau 没有注意到 Laszlo Tisza 也有关于氦 II 二流体模型描述.

只是一个唯象理论^①,因为无论是超流体的性质还是激发谱的本质都是靠对实验现象直觉分析建立起来的,而不是从玻色-爱因斯坦统计理论严格推导出来的.真正将理想气体的玻色-爱因斯坦凝聚和粒子相互作用结合起来的是 Nikolay Nikolaevich Bogoliubov 在 1946 年创立的弱相互作用玻色气体理论^[9].之后又被三位华裔物理学家李振道、杨振宁以及黄克孙进一步拓展.无可置疑,量子统计性质对 ^4He 超流很关键,因为由费米子组成的 ^3He 在温度 T_λ 时并没有显示出超流特性.

Landau 的确是物理学界公认的奇才,因为他的杰出贡献不仅仅局限在超流方面.1950 年他与另外一位俄罗斯物理学家 Vitaly L Ginzburg 考虑到当时超导理论并不令人满意,因为它们无法让人确定正常相和超导相边界的表面张力,也不可能很好地描述磁场或电流对超导电性的破坏,因而他们一起提出了一个比以前超导唯象理论更精致、也更实用的超导理论^[10].当然,这还是一个唯象的理论,这个理论是以 Landau 提出的二级相变理论为基础的,选择描述超导电子的有效波函数作为序参量,在转变温度附近,超导的自由能可以用序参量表示,通过最小化自由能得到两个联立方程,后来这两个方程被人们称为 Ginzburg-Landau 方程.建立在 Ginzburg-Landau 理论上,Alexei A Abrikosov 注意到 Ginzburg 和 Landau 的研究中只考虑了超导相和正常相之间界面能为正的情况,这与以前一些关于金属薄膜的实验不符,从而他假定在界面能为负的情况下,计算出超导体的临界磁场与薄膜厚度之间的关系,从理论上处理了这类具有负界面能的超导体(也就是现在的高温超导,第二类超导),并在 1956 年提出了理想第二类超导体理论^[11],因为这项工作他与 Ginzburg 以及后面将要提到的 Anthony J Leggett 同获

① 物理理论一般来说分为两类,一种是微观理论,就是从本质上对物理现象进行解释;一种是唯象理论,就是用一些简单有效的模型来对宏观特性作出解释,而不考虑内在微观机制.大多情况下,唯象理论是微观理论的必由之路,因为所有微观机制的结果都是通过宏观现象来表现.

2003 年诺贝尔物理学奖。

尽管唯象理论已经颇为成功,但是很多科学家对于这种不是基于体系的微观机制,也不是从量子力学的理论模型出发的唯象方法并不满意。1950 年, E. Maxwell 和 C A Reynold 等研究人员发现,超导转变温度与原子平均质量有关,若以较重的同位素取代超导体中的原子,则转变温度会降低,这意味着超导电性除了与材料中电子的运动有关外还与原子的运动有关。为了解释同位素(Isotope)效应,美国物理学家 John Bardeen 和 David Pines 从理论上发现,虽然电子间的直接相互作用是相互排斥的库仑力,但电子间还存在以晶格振动(声子)为媒介的间接相互作用,使得最后的有效相互作用是吸引。接着, Bardeen 的博士后 Leno Cooper 发现 Bardeen-Pines 吸引可以使得动量相反的电子以一定的结合能配对(也就是现在所熟知的 Cooper 对)^[12]。其机理是:电子在晶格中移动时会吸引邻近格点上的正电荷,导致格点的局部畸变,形成一个局域的高正电荷区。这个局域的高正电荷区会吸引自旋相反的电子,和原来的电子以一定的结合能相结合配对。在很低的温度下,这个结合能可能高于晶格原子振动的能量,这样,电子对将不会和晶格发生能量交换,也就没有电阻。两个电子在多体效应的影响下,无论多微弱的相互吸引都将导致 Cooper 对的形成,这种动量空间中形成的费米对尺度非常大,不同于局域空间形成的束缚费米对。可以将这种物理图像和当时流行的舞蹈 Frug 作类比,在这种舞蹈中跳舞者在舞池中相互分离,中间隔了许多其他人,但是他们始终是一对。然而单个 Cooper 对不能描述超导的宏观行为,必须由大量费米对共同作用形成一个集体关联态。几个月后, Bardeen 的研究生 Robert Schrieffer 在数学上定义了多体波函数,用于描述集体关联态(后称为 Bardeen-Cooper-Schrieffer, BCS 态)——由大量质心动量为零,角动量为零(s 波),且总自旋为零(单态)的相互关联费米对组成,简单来说,BCS 态就是 Cooper 对的相干态,大量 Cooper 对的相干关联导致了超导态的产生。最后由 Bardeen, Cooper 和 Schrieffer 发展出一套完整的 BCS(超导)理论^[13-14],从一个新的、稳定的对的基态(BCS

态)出发,解释了超导的各种奇妙现象^[15],他们三人因此同获 1972 年诺贝尔物理学奖. 令人遗憾的是,虽然 BCS 理论取得巨大成功,却无法解释第二类超导,即高温超导现象. 英国物理学家 Brian D Josephson 利用 BCS 理论从理论上预言了超导体之间的隧道效应(因此获得了 1973 年的诺贝尔奖). 值得一提的是,后来另一位苏联物理学家 Lev Petrovich Gor'kov 在某种近似下从 BCS 理论推导出了 Ginzburg-Landau 方程^[16].

就在 BCS 理论作为解释超导现象的一个成熟理论时候,很多科学家都认为在没有找到新的超导体前,超导体的转变温度不会有提高. 1973 年发现锆化铌(Nb_3Ge),其转变温度为 3.2 K,此后虽然陆续发现许多新的超导体,但是临界温度的提高一直停滞不前. 直到 13 年之后,也就是 1986 年,国际商用机器公司(IBM)苏黎世研究实验室的德国物理学家 Johannes Georg Bednorz 与瑞士物理学家 Karl Alexander Muller 发现镧钡铜氧($\text{La}_{4.25}\text{Ba}_{0.75}\text{Cu}_5\text{O}_{15-x}$)超导体的临界温度高达 37 K(次年这两位科学家就被授予诺贝尔物理学奖),并再度引发了全世界对高温超导研究的热潮. 紧接着,1987 年美国华裔物理学家朱经武等人发现临界温度为 90 K 的超导体,首次将转变温度提高到液氮温度(77 K)以上,此发现突破了 BCS 理论预测的极限. 在这之后 20 年里,超导体的临界温度屡屡被刷新,目前最高的超导临界温度达到了 164 K^[17]. 令人惊喜的是,2008 年日本东京工业大学细野秀雄研究小组报道了铁基材料 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ 的超导转变温度高达 26 K^[18],从而打破了 20 多年来在高温超导领域铜氧化物超导体一统天下的局面,也无疑为解决高温超导机制——当今凝聚态物理学中最大的谜团之一,开启了一扇崭新的窗户.

至此,超流超导的故事还没结束. 1972 年,3 位美国物理学家 David M Lee, Douglas D Osheroff 和 Robert C Richardson 在做 ^3He (^4He 的同位素,因为比 ^4He 少一个中子,所以 ^3He 是费米子)中反铁磁相变化的实验中,意外发现液 ^3He (在氢蒸汽压下冷却到最低温度, ^3He 为液态)在极低温度 3 mK 下不是一个相,而是 3 个反常

相,且每个相都表现出超流特性,所以将这3个相统称为“ ^3He 超流”^[19-20],3位美国科学家也因 ^3He 超流的发现而获得1996年诺贝尔物理学奖。

与相比 ^4He 超流, ^3He 超流的转变温度要低3个数量级。满足玻色-爱因斯坦分布的 ^4He 原子在转变温度以下发生玻色-爱因斯坦凝聚,成为超流体;而像 ^3He 这样满足费米-狄拉克统计的费米子即使在最低温度下也不可能发生凝聚,所以认为导致 ^3He 超流的物理机制如同金属超导体中的电子一般,即两个费米子结合成Cooper对——一种超大型双原子准分子,其特征半径远远大于原子间距,满足玻色分布,从而在低温下发生玻色-爱因斯坦凝聚。虽然不是所有 ^4He 超流特性都存在于 ^3He 超流中,但是总体的相似性让人们有理由相信导致这两种超流的机制是有共同点的,那就是, ^4He 凝聚体波函数相当于 ^3He 中Cooper对质心的波函数。然而,不同的是, ^3He 中的Cooper对具有内在自由度和质心自由度。将Cooper对想象成一个双原子分子,则Cooper对的总自旋 $S=1$ 和内在轨道角动量 $L=1$ 将导致合成的总角动量在任意方向上都有投影。值得注意的是,在常规超导体中,电子形成的Cooper对($L=S=0$)不具有这样有趣的内部自由度。所以在 ^3He 超流中,凝聚Cooper对不仅包括相同的质心波函数,而且内在自由度也必须一致。以上就是2003年诺贝尔物理学奖获得者之一Leggett对于 ^3He 超流物理机制的理论贡献^[21-22]。

1.2 超冷原子气体的研究现状

1.2.1 玻色-爱因斯坦凝聚

另一个与超导和超流紧密联系的领域——超冷原子气体,也被称为第三种人工中性超流系统,始于激光冷却(laser cooling)技术。

自从1975年两位美国物理学家Theodor W Hänsch和Arthur L Schawlow提出激光冷却原子的物理思想之后^[23],激光冷却、囚禁与操控中性原子的理论和实验研究取得了一系列重大进展,远远超