

碱金属气体中的玻色 - 爱因斯坦凝聚*

——2001 年度诺贝尔物理奖介绍

王育竹 李明哲 龙全

(中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点开放实验室 上海 201800)

摘要 介绍了 2001 年度诺贝尔物理奖的科学成就,简述了碱金属气体中的玻色 - 爱因斯坦凝聚研究历史,评述了它对物理科学和技术科学的影响。

关键词 玻色 - 爱因斯坦凝聚 激光冷却 碱金属气体

THE 2001 NOBEL PRIZE FOR PHYSICS

WANG Yu-Zhu LI Ming-Zhe LONG Quan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The scientific achievements that led to the 2001 Nobel Prize for physics are overviewed, with an introduction to the history of research on Bose-Einstein condensation in alkali gases and its influence on physics and technology.

Key words Bose-Einstein condensation, laser cooling, alkali gases

瑞典皇家科学院将 2001 年度诺贝尔物理奖,授予美国科学家维曼(C. E. Wieman)、康奈尔(E. A. Cornell)和德国科学家克特勒(W. Ketterle),以表彰他们在实现玻色 - 爱因斯坦凝聚(BEC)工作中做出的突出贡献。稀薄气体中的玻色 - 爱因斯坦凝聚是 70 年前爱因斯坦所预言的新物态^[1]。长期以来,人们不知道哪个物理系统能展示这个有趣的物理现象,不少科学家付出了艰辛的探索,力图证实它的存在。终于在 1995 年,这三位科学家首先从实验上证实了这个新物态的存在^[2,3],开辟了研究相干物质波性质的新领域。

20 世纪初叶,热辐射的量子性质是一个倍受关注的科学问题。普朗克发现,物体热辐射的光谱分布可用辐射体发射能量的不连续性来解释,后称为“光子”。爱因斯坦接受了“量子”这个概念,解释了光电效应。据此,他获得 1921 年度诺贝尔奖。1924 年,印度的物理学家玻色给爱因斯坦送去了一篇文章,文中玻色从纯统计的观点,即把热辐射看成等同的光子气体,并服从某种统计规律(现在称为玻色统计)完全没有凭藉经典电动力学的结果,推导出普朗克热辐射光谱分布。爱因斯坦意识到这个问题的

重要性,将论文译成德文发表,并且马上动手研究单原子理想气体的量子统计分布。1924 年和 1925 年他先后发表了两篇文章,推广和发展了玻色的量子统计理论。

若在体积为 V 的空间里有 N 个粒子,在每一能级上占有的粒子数 $n_i(\epsilon_i)$ 的分布为

$$n_i = \frac{g_i}{e^{(\epsilon_i - \mu)/k_B T} - 1},$$

其中 ϵ_i 为本征能, g_i 为简并度, μ 为化学势, T 为温度, k_B 为玻尔兹曼常数。对理想玻色子气体,化学势 $\mu \leq 0$ 。在经典极限的条件下(即在温度较高时),若简并度为 1,则 $n_i < 1$,热运动的粒子避免积聚在同一个量子态上。换句话说,在一个态上找到多于一个粒子的几率可以忽略,但总粒子数为 N 。现可将最低能态粒子数和激发态粒子数分开写为

$$N = N_0 + \sum_i n(\epsilon_i),$$

这里 $N_0 \equiv g_0 / (e^{-\mu/k_B T} - 1)$ 是处于最低能态 $\epsilon_0 = 0$ 的粒子数。上式可以进一步写为

* 2002 - 02 - 04 收到

$$\frac{N - N_0}{V} = \frac{(2\pi mk_B T)^{3/2}}{h^3} g_{3/2}(e^{\mu/k_B T}),$$

其中 m 为原子质量, h 为普朗克常数, $g_{3/2}(z) =$

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \sqrt{x} \frac{1}{z^{-1} e^x - 1} dx.$$

温度较高时, N_0 与 N 相比可以忽略. 当温度 T 逐渐降低时, $g_{3/2}(z)$ 逐渐增大, 以保持上式成立. 但当温度降至 T_c 时, 即

$$T = T_c = \frac{h^2}{2\pi mk_B} \left(\frac{N}{2.612V} \right)^{2/3},$$

$g_{3/2}(z)$ 已经达到最大值, 此时若继续降低温度, 就不可能保持 N_0 为小的数. 也就是说, 当温度 T 低于 T_c 时, 激发态的粒子数已有最大值, 所以, 原子只能以相干方式相互凝聚于最低能态上,

$$n_0 = \lim_{\mu \rightarrow 0} \frac{1}{e^{-\mu/k_B T}} = \lim_{\mu \rightarrow 0} -\frac{k_B T}{\mu} \rightarrow \infty,$$

它的物理的意义是: 当 $\mu \rightarrow 0$ 时, 宏观数量的原子处于单个量子态上, 已无法区分单个原子, 量子态可用单一波函数来描述凝聚原子的量子态, 这种现象称为玻色-爱因斯坦凝聚(BEC). 利用原子的德布罗意波长 λ_{dB} 与温度的关系 $\lambda_{dB} = \sqrt{2\pi\hbar^2/mk_B T}$, 从临界温度 T_c 可导出相变的临界条件为: $\rho = n(\lambda_{dB})^3 \geq 2.612$, 其中 n 为原子数密度, ρ 为原子的相密度. 这个条件要求: 在以德布罗意波长为尺度的三维空间内必须多于两个原子. 它的物理意义十分明确, 只有两个以上原子时, 它们才会相干重合和叠加. 为了实现玻色-爱因斯坦凝聚, 就要求原子气体的温度极低, 而原子的密度必须很高. 对铷原子气体而言, 要求温度达到 nK ($10^{-9}K$) 量级, 原子密度达到 $10^{12}/cm^3$ 以上. 由此可见, 这是一个难度很高的物理学实验.

近二十年来, 激光冷却气体原子技术的发展取得了长足进展^[4], 1997 年度的诺贝尔物理奖授予了在激光冷却气体原子研究做出突出贡献的美国科学家朱棣文(S. Chu), W. D. 菲利普斯(W. Phillips)和法国科学家 C. C. 达诺基(C. Cohen Tannoudji). 他们的研究成果为实现玻色-爱因斯坦凝聚提供了有效的冷却手段. 很久以前, 人们就认识到光具有压力, 称光压. 直到激光问世之后, 光的辐射压力才倍受关注. 因为相干光与原子共振时, 原子受到的光压比重力大 10 万倍. 因此, 用激光的压力阻尼原子的热运动速度, 减低原子气体的温度.

利用三对相互垂直的(上、下;左、右;前、后)激光束照射气体原子, 原子不仅受到粘滞力作用而被冷却, 而且还会因受非均匀光强的梯度力作用而被

囚禁于光束交汇中心. 利用激光冷却技术可将碱金属原子气体的温度冷却到 μK ($10^{-6}K$) 量级, 并利用静磁阱将超冷原子气体囚禁于空间. 因此, 激光冷却技术为实现玻色-爱因斯坦凝聚相变提供了重要的实验手段. 但是, 激光冷却技术仅能使原子气体的温度降低到 μK 量级, 而产生玻色-爱因斯坦凝聚相变的温度在 nK 量级, 因此, 还需将气体温度降低 3 个量级. 实际上, 人们曾试图实现氢原子的玻色-爱因斯坦凝聚, 发展了一套十分有效的冷却气体原子的方法, 即蒸发冷却方法. 这种方法的冷却过程与冷却一杯热茶水的过程一样. 即当热原子或分子飞离水面后, 水才会冷却. 因此, 在技术上已为实现玻色-爱因斯坦凝聚打下很好的基础.

美国科学家 Wieman 首先提出了利用激光冷却技术与蒸发冷却技术相结合的路线来实现玻色-爱因斯坦凝聚. 即先用激光冷却碱金属原子气体, 然后用磁阱囚禁和压缩超冷原子气体, 再用蒸发冷却技术进行深度冷却, 达到相变的条件. 实践证明这条路线是正确的. 他们实验中的最大困难是在四极矩磁阱中原子的相密度达不到产生相变的条件. 他们认识到在四极矩磁场中心为零处存在一个原子漏洞, 它是一个小的区域. 囚禁的超冷原子经过这个区域时会发生自旋反转, 原子从囚禁态变到了非囚禁态, 从磁阱中漏出, 原子气体的温度越低, 损耗也越快. 所以, 囚禁的超冷原子达不到产生相变的条件. Cornell 当时在 Wieman 的研究组做博士后, 他提出了一个解决漏洞的方法. 他建议在四极磁场中加一个类似于电机中的旋转磁场, 使磁场为零的点在平面上旋转, 原子在势阱中运动时总追不上或达不到磁场为零的点. 因而, 消除了磁场中的漏洞, 使原子相密度大幅度提高, 达到了相变的条件. 这说明 Cornell 对物理机制的了解十分深刻, 他提出的解决方法也十分聪明, 使原子气体的玻色-爱因斯坦凝聚成为可能. Ketterle 是 MIT 的高级研究人员, 他在钠原子气体中实现了玻色-爱因斯坦凝聚, 比 Wieman 小组晚了 4 个月. 他也是在四极矩磁场中实现了钠原子的玻色-爱因斯坦凝聚. 他解决漏洞的方法与 Cornell 不同, 他是用一个激光束穿过磁场为零的点, 由于激光的波长比钠原子的共振波长短得多, 光束对原子的作用力是排斥力, 使超冷原子无法接近磁场为零的区域, 解决了漏洞损耗问题. Ketterle 小组获得的凝聚体的原子数比 Wieman 小组多两个数量级, 因而有可能演示凝聚体的物理性质, 他们小组最早演示了物质波的干涉现象和原子激光器, 并且观察

到了玻色-爱因斯坦凝聚体中产生的涡旋.此外,国际上还实现了锂原子、氢原子、氦原子和钾原子的玻色-爱因斯坦凝聚^[5-9].目前,世界上已有30多个实验室实现了气体原子的玻色-爱因斯坦凝聚.

玻色-爱因斯坦凝聚的实验证实有着十分重要的科学意义和潜在的应用价值.首先它证实了一个新物态的存在,并且这个态是用相干波函数描述的物态,为实验物理学家提供了一个独一无二的新介质.利用物质波的相干性可开拓很多新的研究领域:BEC是一个相干物质波源,可用于进行原子激光的产生和放大研究^[9].它与激光相似,可复现激光在科学技术上的各种应用.类比于非线性光学,可开展非线性原子光学的研究^[10].利用BEC的相干性,可进行凝聚体的涡旋-超流的研究和在超冷原子气体中从超流到Mott绝缘体的量子相变研究^[11].利用BEC中Feshbach共振效应,改变了原子间相互作用的符号,从而导致类似于超新星的BEC爆炸^[8].同时,由于测不准原理,费米子不能都处于最低能态,即使在零温度下仍有量子压力存在.因此,可在实验上模拟白矮星的内部压力^[12].综上所述,玻色-爱因斯坦凝聚研究在科学上的意义是重大的.玻色-爱因斯坦凝聚研究在应用技术方面也十分重要,已提出了很多新设想,如应用于改善精密测量的准确度(如原子物理常数测量、微重力测量和研制原子干涉仪和原子钟等).在量子信息科学中,玻色-爱因斯坦凝聚可用于光速减慢、光信息相干存储、量子信

息传递和量子逻辑操作等^[13,14].另外,利用BEC的相干性可进行微结构的刻蚀,研制微型电子回路等.总之,玻色-爱因斯坦凝聚的实现为科学研究和高技术应用打开了一个崭新的大门,众多的新事物等待人们去发掘.

参 考 文 献

- [1] Einstein A. Stuzungsber. Kgl. Preuss. Akad. Wiss., 1924, 261, 1925, 3
- [2] Anderson M H, Ensher J R, Mathews M R *et al.* Science, 1995, 269: 198
- [3] Davis K B, Mewes M O, Andrews M R *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 75: 3969
- [4] Cohen-Tannoudji C N, Phyllips W D. Phys. Today, 1990, 43(10): 33
- [5] Bradley C C, Sackett C A, Hulet R G. Phys. Rev. Lett., 1997, 78: 985
- [6] Roberts A, Sirjean D, Browaeys A *et al.* Science Express, 2001, 10: 1126
- [7] Pereirts F, Dos Santos, Leonard J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 86: 3459
- [8] Cornish S L, Claussen N R, Roberts J L *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 85: 1795
- [9] Modugno G, Ferrai G, Roati G *et al.* Science, 2001, 294: 1320
- [10] Deng L, Hagley E W, Wen J *et al.* Nature, 1999, 398: 218
- [11] Greiner M, Mandel O, Esslinger T *et al.* Nature, 2002, 415: 39
- [12] Trucoff A G, Shecker K E, McAlexander W I *et al.* Science, 2001, 291: 2570
- [13] Liu C, Dutton Z, Behroozi C H *et al.* Nature, 2001, 409: 490
- [14] Budker D, Kimball D F, Rochester S M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 83: 767

(上接第321页)

速率不快,有点像传统超导体在强磁场下的超导转变行为,这是因为,超导转变是在铁磁性存在的条件下发生的.与电阻减小相对应,样品表现出抗磁性,在 $T=0\text{K}$ 时,抗磁磁化率的幅值达到了理想迈斯纳效应的65%.对样品施加0.2T的外场, T_c 从零场时的0.29K下降到0.17K.

对 ZrZn_2 样品的加压实验表明,随着压力的增加, T_c 和 T_c 均下降.当压力增至2.1GPa, T_c 和 T_c 同时下降到接近0K.这一结果排除了超导相和铁磁相分属两个子系统的可能性,它表明在一个相当宽的压力范围内超导与铁磁是均匀共存的.与 ZrZn_2 的情况不同, UGe_2 的超导仅仅发生在很窄的所谓“边缘压力范围”内.零场比热的测量表明, ZrZn_2 是

一种无能隙超导体,即正常态费米面在超导转变时没有完全破缺.

致谢 感谢国家自然科学基金(批准号:19974050)的资助

参 考 文 献

- [1] Shimizu K *et al.* Nature, 2001, 412: 316
- [2] Pfeleiderer C *et al.* Nature, 2001, 412: 58
- [3] Saxena S S *et al.* Nature, 2001, 412: 290
- [4] Saxena S S *et al.* Nature, 2000, 406: 587
- [5] Coleman P. Nature, 2000, 406: 580
- [6] 戴闻. 物理, 1999, 28(4): 247. Dai W. Wuli(Physics), 1999, 28(4): 247. [in Chinese]

(中国科学院理化技术研究所 戴闻)