

孙昌璞

# 原子系统的 宏观量子效应

根据量子理论的波粒二象性学说,实物微观粒子运动也会像光波、水波一样,具有传播、干涉和衍射等波动行为,形成所谓的物质波(或称德布罗意波)。对于较小的或结构简单的粒子,如电子和中子,人们不仅在实验上观察到干涉现象和衍射图样,而且成功地制备了现代测量技术必不可少的电子显微镜和中子干涉仪。考虑到日常所见的宏观物体是由大量服从量子力学规律的微观粒子组成的,人们自然要寻求宏观尺度上最具量子特征的物理现象,如原子和分子集团的宏观量子效应。

对于光波可以实现其受激辐射的相干放大——激光,那么对于原子的物质波是否也可以类似地做到这一点呢?这是一个非常自然而又十分基本的问题。然而,在没有实现原子系统的宏观量子态——玻色-爱因斯坦凝聚(Bose-Einstein condensation, BEC)之前<sup>[1]</sup>,这只能是空想。物质波波长太短,在通常情况下,原子波动特征并不明显。只有在极冷的 BEC 状态,才能很好地观察原子波动特征,才能考虑物质波的相干放大问题,制备物质波“光源”——“原子激光器”(atomic laser)。

## 原子的宏观量子态

BEC 是 20 年代爱因斯坦和玻色预言的宏观量子效应。1995 年 5 月首次在实验中观测到了这一现象<sup>[1]</sup>,得到了物质的第五种状态——宏观量子态。

自然界的粒子可分为两类——玻色子和费米子。只有在极低的温度下,由它们组成的全同粒子体系才

分别形成 BEC 和费米面填充,表现出各自明显的宏观量子特性。1924 年,时年 30 岁的印度物理教师玻色,发表了今天称之为玻色-爱因斯坦统计的第一篇论文。接着,爱因斯坦从根本上完善和发展了这项工作,并大胆地提出了“凝聚”的概念:即当把玻色状态计数的思想应用到全同粒子组成的玻色型理想原子气体,在某个临界温度以下,宏观数量的原子将突然凝聚到动量为零的单一量子态上,形成宏观量子态。在这种状态,系统的热力学性质,如比容和比热,出现非解析和不连续的特征。

对这种由“平凡”原子组成的无相互作用系统在宏观尺度上会出现“非平凡”的集体行为,人们一直困惑不解。直到 50 年代中期,杨振宁、黄克逊和李政道的工作才使这个问题得以澄清:这种非平凡性是在保持密度不变,体积和粒子数同时趋向无穷时,原子系统出现的极限情况。

根据爱因斯坦的凝聚理论,只有当原子热运动的物质波波长与原子间距可比拟时,原子波包才能相干地重叠起来,形成一种相干的宏观量子态。在这种状态下,单个原子不能独立存在,只有众多原子的集体协同行为或宏观特性才是重要的。然而,来自真空或其他环境的“噪声”无时无刻不在扰动原子的运动,使得大量原子同时凝结在单一的量子态上十分困难。

事实上,原子的热波波长与温度以及原子质量的平方根成反比。因此,室温下原子的热波波长很短,与原子间距相差几个数量级。如果要在实验室实现原子的 BEC,就必须把原子的温度冷却到微开数量级。这在没有发明激光冷却原子新技术以前几乎是不可能的。

虽然人们相信超导和超流也是 BEC 的体现,但这类强关联系统毕竟与当年玻色和爱因斯坦的预言相去甚远。由于存在复杂的相互作用,人们不清楚这类凝聚

孙昌璞:研究员,中国科学院理论物理研究所,北京 100080。

Sun Changpu: Professor, Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080.

是相互作用造成的，还是由于全同粒子的玻色-爱因斯坦统计引起的，只有后者才能充分体现宏观量子现象的根本特征。因此，在无相互作用或仅有排斥弱作用的稀薄原子气体中发现 BEC，是几代物理学家一直努力追求的目标。

## 激光冷却和超冷原子制备

实现原子系统 BEC 的关键技术，是原子激光冷却<sup>[2]</sup>。这一技术是 80 年代中期发展起来的，其早期发展的动机并非以实现原子 BEC 为目标，当时的主要目的，是为了精确测量各种原子参数、实现高分辨激光光谱和超高精度的量子频标(原子钟)。

应用激光冷却技术可以获得几乎处于静止状态、无复杂相互作用的原子体系。由于发展了这一技术，斯坦福大学华裔物理学家朱棣文(Steven Chu)，美国国家标准局的菲利普斯(William Phillips)和法国巴黎高等师范学校利昂-唐努日(Claude Cohen-Tannoudji)荣获 1997 年度诺贝尔物理学奖。

20 世纪初，人们就注意到光对原子有辐射压力作用，但这个压力太微弱，不足以使原子明显地改变速度。前苏联的莱特霍夫(V. S. Letohov)等人于 1968 年发现，共振散射的偶极力可以把原子捕获在光束之中。1975 年，肖洛(A. Schawlow)等，提出了共振激光减速原子的建议。

1985 年朱棣文等人发现，当原子在频率略低于原子跃迁能级差且相对传播的一对激光束中运动时，由于多普勒效应，原子倾向于吸收反向运动的光子，而对同向运动的光子吸收概率较小。吸收光子后，原子将各向同性地自发辐射。因此，平均而言，两束激光的净作用是产生一个与原子运动方向相反的阻尼力，从而使原子冷却下来。

在三个互相垂直的方向安置三对相对传播的激光束，则形成所谓的“光学粘团”，它可以使原子在三维得到冷却。通过这种技术，朱棣文等首次把钠原子冷却到了 240 微开。原子速度降下来后，由于偏离了共振条件，进一步吸收反向运动的光子的可能性变小了。为了补偿这种效应，菲利普斯等人提出，用非均匀磁场产生的能级非均匀塞曼分裂来增强共振吸收。由此，达利巴尔(J. Dalibard)和普里查德(D. Pritchard)发展了磁光冷却技术。

利昂-唐努日研究小组和朱棣文等人在此基础上提出了更精巧的冷却方案，可以把氦原子在一维方向冷却到 1 微开。值得指出的是，中科院上海光机所的王育竹等人，于 70 年代末在中国率先开展原子激光冷

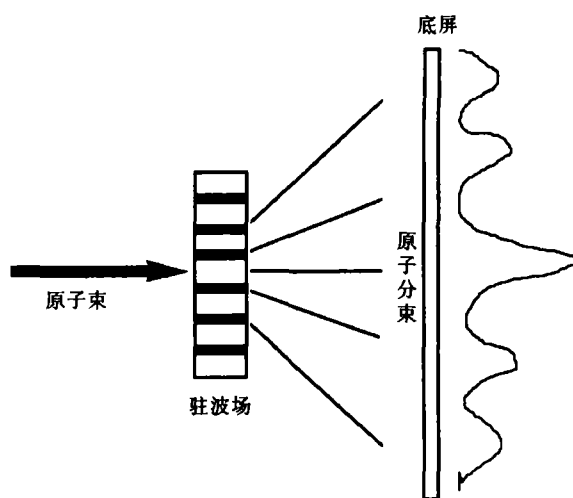
却的研究，并在 1988 年实现了钠原子 60 微开的一维冷却。

上述原子冷却技术虽能克服诸如多普勒冷却极限等困难，但由于在磁场零点原子出现能级交叉，交叉点上的低速原子将跳到一个非共振的高能级上，并从磁光原子阱中逃逸出来。即使在纯磁场约束的原子阱中，磁场零点的非绝热逃逸仍是一个难题。实现原子 BEC 的关键，均是设法克服能级交叉点上原子逃逸这一困难。

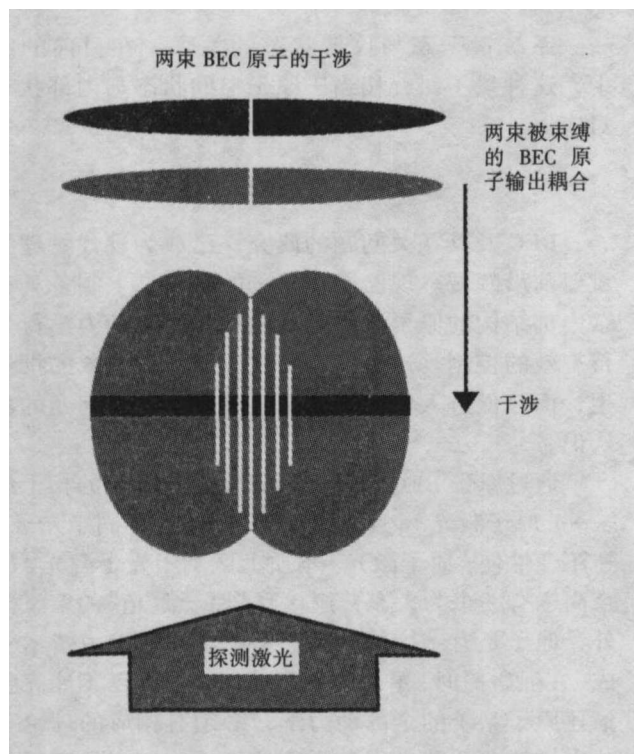
## 实现原子玻色-爱因斯坦凝聚

为了达到实现 BEC 的温度，康奈尔(E. A. Cornell)与普里查德在 1995 年初提出了“时间平均轨道势”方法<sup>[2]</sup>：通过附加一个时变的射频磁场，使得磁场零点不再固定不变，而是绕着原来的零点在平面内快速转动。这相当于形成一个底部较快转动的原子磁阱，当原子以较慢的速度接近阱底时，将会永远也达不到势能零点。这个物理过程的时间平均结果，相当于原子经历一个不再有能级交叉的有效势。对应于不同磁量子数的塞曼能级的简并被解除了，原子不再从势阱的约束能级跳到一个相当于势垒的非约束能级上，超低速原子在能级交叉点上的逃逸问题从此得到解决。

把时间平均轨道势方法与蒸发冷却技术结合起来，韦曼(C. Weiman)等成功地把铷原子气体冷却到 0.17 微开，首次实现了弱作用稀薄铷原子气体的 BEC。蒸发冷却的技术是以前研究极化氢相关问题时发展起来的另一种冷却原子技术，其关键在于利用射频场把处在较高能级的“高能原子”从有限高度边缘的磁阱中蒸发掉。循环利用这种方法可以增大处于基态



原子光学示例



“原子激光”示意图

上原子的浓度。

克特勒 (W. Ketterle) 等利用“光塞”方法,在钠原子系统上得到了确定无疑的 BEC。他们的冷却温度虽然只有 2 微开,但原子密度超过了  $5 \times 10^{14}$  个/厘米<sup>3</sup>。这项工作为研究 BEC 原子的相干输出——“原子激光”,打下了必要的基础<sup>[3]</sup>。

## 原子激光

实现原子系统的 BEC 后,这个领域的研究工作自然向两个方面发展:一方面人们需要考虑它能否对高新技术产生影响,如实现稳定的物质波相干放大输出,得到比普通光波和电子波波长更短的“光源”;另一方面,更加关注基础理论和基本实验方面的问题,如 BEC 的形成过程<sup>[4]</sup>、BEC 原子的量子隧道效应和费什巴赫效应<sup>[4]</sup>。

由原子 BEC 产生原子相干输出,最终是克特勒小组于 1996 年底首先在实验上取得实质性进展<sup>[4]</sup>。通过相干射频光场,把磁阱中处于 BEC 状态的原子激发到磁量子数为 0 或其他没有约束的塞曼能级上,他们发现原子会经历一个相当理想的集体拉比振荡。通过射频扫描的办法,可以得到一个保持原子相干性的稳态输出。这些没有约束的相干原子,在重力场中自由下落并扩散。当初态 BEC 原子制备在一个双阱势而不是单

阱势中,激发出的两团原子下落时会相干地重叠起来,产生很明显的相干条纹。这表明,人们的确得到相干性很好的原子束。

事实上,由于实物粒子质量非零,在垂直于传播方向上原子束必将扩散,使原子束变宽。因而,物质波的相干输出通常并不具有很好的方向性,它只是在相干性方面具有激光的特性。因而,克特勒小组在宣布他们这一重要工作时,谨慎地称:“这种相干输出‘可以当作脉冲的原子激光’。”需要指出的是,原子激光至今还没有一个明确的定义。

毋庸置疑,克特勒小组的开创性工作已表明,最终实现稳定的物质波相干放大输出,是完全可能的。最近,菲利普斯领导的研究小组利用驻波场 BEC 原子的布拉格衍射,成功地实现了准连续原子物质波激光器。这类工作一旦成功,人们便可以得到比光波和电子波波长更短的“光源”——原子激光器。原子激光一旦实现,它不仅可以为物理学家提供进一步探索物质世界微观领域更有效的“利器”,而且可能像激光器一样在工业中得以应用,导致一场深刻的新技术革命。

关于 BEC 原子低温碰撞的研究,导致了原子-分子转换的费什巴赫共振效应<sup>[4]</sup>的实验发现。费什巴赫效应是 60 年代在研究强外场中原子核碰撞时发现。这个共振过程,会导致散射长度的突然改变。通过调节磁场,可以使有效散射长度从正变到负。由于散射长度标志着原子间的相互作用强度,从而决定了玻色-爱因斯坦凝聚气体原子的宏观量子行为,如玻色-爱因斯坦凝聚气体的集体振荡的约化。

事实上,散射长度为零意味着人们通过调节外场得到了没有相互作用的理想玻色原子气体;散射长度为负意味着可以观察凝聚体的突然塌陷。由此可见,BEC 原子费什巴赫效应的实现,表明了人们不仅能够通过外场调节微观层次上原子间相互作用,而且能有效地控制宏观量子态。

## 原子光学

BEC 实验和相关的原子冷却囚禁技术的发展,促进了原子物质波量子干涉效应——原子光学的研究。原子光学是研究原子束由于与光子交换能量和动量所导致的类光行为,如原子束的分束与聚焦。

与光子的动量相比,原子质心运动的动量通常很大。吸收和发射光子时,原子质心运动不会发生宏观的改变。只有对于超冷原子(如温度为微开量级的铯原子的速度为每秒几厘米),光子的动量才能与原子质心运动的动量相比拟。这时,当原子束沿垂直于驻波波矢方

向在电磁场中入射，原子将吸收垂直于其运动方向的光子而偏转。由于沿垂直于驻波波矢方向吸收的光子动量是量子化的，原子束将对称分裂，形成周期花样。将特定的分束原子相干地沉积在硅化物衬底上，形成周期性的纳米结构，这是原子相干研究和介观物理交叉领域的结合点。

原子光学的研究是腔体量子电动力学<sup>[5]</sup>的一个重要发展，它除了像传统的量子光学一样强调光场的相干性，主要着眼于特殊条件下相干原子集团和光场的相互作用。在超小尺度（与原子辐射波长可比拟的尺度）腔体量子电动力学中，固定腔壁为辐射场提供的边界条件，可以通过原子的集体相干效应增强或抑制原子的自发辐射。这涉及到光与物质的强场作用，微扰论通常不再适用，从而需要发展传统的量子电动力学，正确描述多普勒效应、反弹现象和多能级高激发态原子与单模（少模）腔体光场的作用，由此可能建立激光致冷的新机制。

在超短波微腔中，超冷原子的运动，满足绝热近似的条件，处在不同内部状态的原子将与特定的光场态纠缠，形成不同的绝热缀饰态，经历不同的有效作用势。由于这个机制，对应于不同的失谐情况即使腔中没有光子，真空微腔也可能排斥激发态（或基态）的超冷原子，吸引基态（或激发态）的超冷原子。这一事实进一步雄辩地证明现代物理的“真空不空”这一深刻的物质观！不同光子态也将导致处在同一单态原子束空间分裂的宏观量子动力学行为，如原子的多光子逆斯特恩-盖拉赫分束问题等。这些现象的出现，从与光场相互作用的角度，体现了原子物质波相干效应的丰富多彩。

另外，原子间存在的相互作用，会导致描述 BEC 原子物质波的非线性薛定谔方程，从而引起原子的位相共轭效应——原子物质波的四波混频。在三团 BEC 原子碰撞实验中，人们确实发现了中心运动满足能量守恒和动量守恒的第四团原子的产生<sup>[6]</sup>。这方面的研究将会形成宏观量子态研究的一个新的分支——非线性原子光学。

原子光学的一个重要应用，是检验量子理论基本问题。众所周知，在表现波粒互补性的双缝实验中，确定粒子通过哪一个缝的观察，会破坏粒子的波动性，从而使干涉条纹消失。玻尔对此的解释是依据海森堡的测不准原理：观测粒子的路径将对垂直路径的动量产生扰动，导致干涉条纹的模糊。最近，基于超冷原子布拉格衍射的实验，表明玻尔的“标准”解释不尽正确<sup>[7]</sup>，干涉条纹消失的准确解释应当是薛定谔的量子纠缠

——系统量子态与仪器状态的关联。在目前的实验中，这种量子纠缠相当于原子空间状态与内部状态的对应。

## 科学前景

BEC 及其相关问题的研究，已成为现代物理学的重要前沿领域。现已能在单一的量子态上制备具有复杂内部结构的原子，并对其微观和宏观动力学行为进行有效的控制。这不仅会导致重要物理现象的批量产生，而且促进人们对物理学某些重要基本问题的重新认识。

通过原子 BEC 机制，可以实现原子束的相干放大——“原子激光”，但由于原子有质量，不同于光子，光速不变性使“原子激光”本质上区别于光子激光，故至今尚未有一个为大家普遍接受“原子激光”的定义。另外，原子是有结构的，玻色型原子本质上由费米子组成，在强碰撞时，单一的复合玻色自由度已不能完整地描述原子系统的全部动力学，必须有相应的理论和实验去描述残余费米子自由度的影响。相应的原子光学问题在玻色-爱因斯坦凝聚发生时，也会呈现出极其丰富的相干物理结构。

总之，近年来原子 BEC 的研究，揭示了科学和技术发展的内在互动关系。虽然科学的直接目的是认识世界，对科学真理的追求通常也是非功利的，但它却可以导致一系列的高新技术变革，深刻地影响人类的社会生活。

- [1] Anderson M H, et al. *Science*, 1995, 269: 198; Bradley C C. *Phys Rev Lett*, 1995, 75: 1687; Davis K B, et al. *Phys Rev Lett*, 1995, 75: 3996; Fried D G. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 3811
- [2] Chu S. *Rev Mod Phys*, 1998, 70: 685; Cohen-Tannoudji C N. *ibid*, 1998, 707; Phillips W D. *ibid*, 1998, 721
- [3] Mewes, et al. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 582; Andrews M R, et al. *Science*, 1997, 275: 637; Hagley W, et al. *Science*, 1999, 283: 1706
- [4] Anderson B, et al. *Science*, 1998, 282: 1686; Inouye S, et al. *Nature*, 1998, 392: 151; Miesner H, et al. *Science*, 1998, 279: 1005
- [5] Berman P. ed. *Cavity Quantum Electrodynamics*, New York Academic Press, INC. 1995
- [6] Deng L, Hagley E W, Philips W D. *Nature*, 1999, 398: 218
- [7] Durr S, Nonn T, Rampe G. *Nature*, 1998, 395: 33

关键词：宏观量子态 玻色-爱因斯坦凝聚 原子激光 激光冷却 □

## SPECIAL

## 3 The Historical Perspective for Physics

Feng Duan

A brief survey of the past developments of physics is given and then the future of physics is prospected.

## FRONTIER

## 8 Scientific Problems Identified in IGBP Researches

Gao Shu, Wang Yaping, Jia Jianjun

Human beings are facing the danger of environmental degradation and resource shortage in the 21st century. Without doubt, science and technology will play a crucial role in dealing with such issues. IGBP is such a project that aims to solve these problems.

## 12 The Strategic Meaning of System Coupling on the Grand Agriculture System

Ren Jizhou

Agriculture system is organized by various subsystems. The system coupling can upgrade the system complexity and make it to be a super ecosystem. The coupling ecosystem increases the productivity magnificently.

## 15 VaR in Financial Risk Analysis

Wang Zhicheng, Tang Guozheng, Shi Shuzhong

VaR (Value at Risk) is a new technique for financial risk management, which becomes prevalent in recent years. It has been widely used in international financial firms. A popular presentation about its history, numerical methods, related hypotheses and applications is given in this paper.

## 19 Macroscopic Quantum Effects of Atomic System

Sun Changpu

A brief review about the macroscopic quantum states of atomic system is presented in association with the most recent progresses. Some utilities of Bose - Einstein Condensation and the related ultra - cold atom system are also reviewed.

## 23 From Antarctic to Arctic

Yan Qide

China has carried out Antarctic Research 15 times since 1984. And the first Arctic Research was completed in July 1999. All these actions show that Chinese Polar Research has reached international advanced level.

26 In Search of the Ancestor of the Human Race: *Homo Erectus*

Wang Qian

*Homo erectus* first appeared on the Earth about 2 million years ago. The early *Homo erectus* had two evolutionary directions, which led to two Middle Pleistocene groups respectively: classic *Homo erectus* and *Homo heidelbergensis*.

## 29 The Basic Problems and Harnessing on the Lower Yellow River

Hou Guoben

Digging silt from the Yellow River monthly increases the flood flow and depresses the riverbed. Delivering silt from the estuarine of the Yellow River leads to alkalization of the land on the river delta.

## FORUM

## 33 "Double Dawn" and Chronology of West Zhou

Liu Ciyuan

The fascinating ancient record, "the day dawned twice at Zheng", offered important clues for identifying the chronology of West Zhou dynasty. It was proved to be a solar eclipse when the sun was rising on April 21, 889 BC.

## 36 Open Source Software and Chinese Information Technology

Hong Feng

Open Source Software became a hot topic in the international information technology (IT) in 1998. The history and developments of Open Source Software are reviewed. Some suggestions are presented to Chinese IT industry.

## ORIGIN &amp; DEVELOPMENT

## 39 The Developments of Universe Outlooks: Modern Universe Outlooks

Luo Xianhan

The origin and evolution of the universe are discussed by reasoning methods. The Way of Lao Zi is explained based on modern cosmology.

## COMPASS

## 43 Designer Seeds

Yin Ming

## 47 Medical Researches in Manned Space Flight

Lu Yincheng

## 51 DNA Chips for Medical Diagnosis

Chen Yali, Lu Zuhong

## 53 MATLAB and Images Processing

Deng Kun

## Office:

450 Ruijin Er Road  
Shanghai 200020

P. R. China

## Fax:

86 - 21 - 64730679

## E-mail:

kexuec@online.sh.cn

## Telephone:

86 - 21 - 64734651

## Publisher:

Shanghai Scientific and  
Technical Publishers

(http://

www.sstp.com.cn)

## Distributor:

China International Book  
Trading Corporation  
(P. O. Box 399,  
Beijing)

## Code Number:

BM1188

## Date of Publication:

1999 - 11 - 25