

# 玻色-爱因斯坦凝聚体量子模拟实验技术进展

黄巍, 张善超, 颜辉\*, 朱诗亮\*

(广东省量子调控工程与材料重点实验室//华南师范大学物理与电信工程学院, 广州 510006)

**摘要:**文中对基于玻色-爱因斯坦凝聚体(BEC)的量子模拟实验技术的研究进展进行了综述. 早在1924—1925年间玻色和爱因斯坦从理论上预言了BEC的存在,直到1994年才通过激光冷却原子气体的方法在实验室实现了BEC,并于2001年获得诺贝尔物理学奖. BEC具有宏观量子特性和较长的相干时间,因此它是开展量子模拟研究的重要平台. 随着光阱、光晶格、微结构光阱和量子气体显微镜等技术的发展,基于BEC的量子模拟器不仅能够用于研究凝聚态物理中已有的基本模型,而且能够探索自然界中不存在的新奇量子物理现象和量子物态. 甚至在非平衡和动力学演化研究方面,BEC量子模拟器可以用来研究当前物理实验中无法观测的快速量子物理现象.

**关键词:** BEC; 量子模拟; 光晶格; 量子气体显微镜

**中图分类号:** O431.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5463(2018)05-0014-06

## Laboratory Techniques of Quantum Simulation Using Bose-Einstein Condensates

HUANG Wei, ZHANG Shanchao, YAN Hui\*, ZHU Shiliang\*

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials//

School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The developments in the research on laboratory techniques of quantum simulation using Bose-Einstein Condensates are summarized. The theory of Bose-Einstein Condensates (BEC) was first proposed by Bose and Einstein in 1924-1925. The pure BEC was realized using the technology of laser cooling of atomic gas in the lab as late as 1994 and this achievement was awarded with the 2001 Nobel Prize in physics. BEC has the macroscopic quantum property and a very long coherence time, which favors the quantum simulation experimental study. The development of BEC experiment techniques, such as optical dipole trap, optical lattice, configurable micro-trap and quantum gases microscope, has made the BEC a great quantum simulator in the research of fundamental models of condensed matter physics as well as the new quantum physics and quantum states that do not exist in the natural world. Even in the research of non-equilibrium state and dynamic evolution, the BEC quantum simulator can be used to detect the fast quantum procedure, which is impossible in the traditional physics experiment.

**Key words:** BEC; quantum simulation; optical lattice; quantum gases microscope

早在1924—1925年间玻色和爱因斯坦通过理论预言:当温度接近绝对零度时,玻色子体系中的绝大部分粒子会聚集在能量最低的量子态上形成具有宏观量子性的玻色-爱因斯坦凝聚体(BEC). 1938年,科学家发现液态 $^4\text{He}$ 在温度降到2.2 K时会成为无黏滞的超流体,这是因为少部分 $^4\text{He}$ 液体转变成了BEC. 然而,要在实验上获得纯BEC是相当困难的,不仅要使原子冷却到极低的温度,同时要求原子

不能被液化或者固化. 因此,直到1995年,ANDERSON等<sup>[1]</sup>利用激光冷却和陷阱以及蒸发冷却技术将气态 $^{87}\text{Rb}$ 原子冷却到170 nK才获得高纯度的BEC;同年,DAVIS等<sup>[2]</sup>采取类似的冷却方法获得了比ANDERSON所得密度高100倍的 $^{23}\text{Na}$  BEC(图1). 在上述2个实验中,蒸发冷却都是在磁阱中进行,但是磁阱存在天然的缺陷,蒸发冷却的过程中原子会不断地从磁阱的零点逃逸出去. 为了解决这个

收稿日期: 2018-08-30

《华南师范大学学报(自然科学版)》网址: <http://journal.scnu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(11704131, 11474107, 91636218, U1830111); 广东省自然科学基金项目(2016A030310462)

\* 通讯作者: 颜辉, 教授, Email: yanhui@scnu.edu.cn; 朱诗亮, 教授, 长江学者, Email: slzhunju@163.com.

问题, ANDERSON 采用了额外的旋转磁场来保持原子囚禁, 而 DAVIS 研究组利用激光形成光塞阻止原子从磁场零点逃逸来保持原子囚禁. 得益于这 2 项实验的成功, BEC 所具有的奇特性质也因此被真实地展示出来. 例如, 尽管 BEC 态的原子团可以大到毫米量级, 但是表现的行为就像是一个巨型的原子. 2001 年的诺贝尔物理学奖也因此颁给了对实现 BEC 做出重大贡献的 CORNELL、KETTERLE 和 WILEMAN.

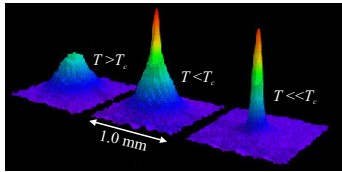


图 1 Na 原子 BEC 的实现<sup>[2]</sup>

Figure 1 The realization of Na BEC in MIT group<sup>[2]</sup>

BEC 的实现距今已经有 20 多年, 目前世界上已有 200 多个研究组正在开展基于 BEC 的实验研究. BEC 不仅在碱金属原子气体中实现, 也在碱土金属及稀土金属(如 Yb、Dy、Sr 等)原子中实现. BEC 是典型的宏观量子态, 具有高度可控的量子特性, 因此被用于开展对包括超流现象在内的凝聚态物理的量子模拟研究. 近几年随着相关实验技术的突飞猛进, 特别是光晶格、量子气体显微镜以及微结构光阱等实验技术的发展, BEC 不仅能用于模拟凝聚态物理中已有的量子现象, 甚至能够模拟凝聚态物理中不存在的新奇量子物态和物理过程. BEC 具有相干时间长、参数可控、实验技术成熟等优势, 已在中性原子气体中成功模拟了人工规范势、自旋轨道耦合、量子霍尔效应、拓扑物态等重要成果. 其中, LIN 等<sup>[3]</sup>首次在 BEC 气体中通过 2 束激光耦合原子的 2 个能级进而实现了等强度的 Rashba 和 Dresselhaus 自旋轨道耦合, 该技术的实现是在 BEC 体系中开展凝聚态物理中的量子霍尔效应、人工规范势以及拓扑绝缘体研究的重要基础<sup>[4-8]</sup>. 此外, 随着理论和实验的发展, BEC 还被用于开展非平衡和动力学演化过程的模拟研究. 在 BEC 量子模拟器中, 固体物理中的动力学演化过程将被减缓 13 个数量级, 整个过程的演化时间可以达到毫秒(ms)量级<sup>[9-12]</sup>从而大大降低了探测的难度. 因此, 在 BEC 量子模拟器中, 可以研究动力学演化中的细节, 这在传统的固体物理的研究中是很难甚至无法做到的.

量子模拟是当今国际物理学前沿研究领域之一, 它指用一个可控的量子体系来模拟另一个复杂

和困难求解的物理体系. 量子模拟最早由著名物理学家费曼于 1981 年提出, 并极大地促进了量子计算机的发展. 由于冷原子具有非常好的操控性, 并且发展了独特的测量技术, 在国际上已被公认是最好的量子模拟体系之一. 具体以模拟凝聚态体系为例, 凝聚态有许多著名的模型实际上都是首先在以 BEC 为代表的冷原子中实现. 如著名的 Bose-Hubbard 模型中的超流-莫特绝缘体相变、BEC-BCS 跨越、Hofstadter-Harper 模型等. 特别是去年诺贝尔物理学奖虽然是颁给凝聚态物理学家, 但在他们获奖成果中的有些模型实际上是在冷原子中首次实现的. 如在 Haldane 获奖的 2 项工作中, 其中一项是他在 1988 年提出的无朗道能级的量子霍尔效应-Haldane 模型, 该模型于 2014 年在冷原子中才首次实现. 另一位获奖人 Thouless 于 1983 年提出的拓扑泵也是直到 2016 年才首次在冷原子体系中实现.

本文将介绍国际上玻色-爱因斯坦凝聚体量子模拟实验技术的新进展, 并在最后简单介绍华南师范大学冷原子研究团队的研究进展.

## 1 光阱和混合阱中 BEC 的实现

国际上, BEC 的首次实现均采用了磁光阱结合在磁阱中的强制蒸发冷却技术, 而此后的很长一段时间, 该技术也发展成为制备 BEC 的标准技术. 磁阱固然具有阱体积大的显著优点, 但是其所能囚禁的超冷原子只能处于特定的自旋态上, 而量子模拟研究经常需要 BEC 中的原子初态处在不同的自旋态上, 例如旋量 BEC 中原子将同时处在  $|m=0\rangle$ 、 $|m=1\rangle$ 、 $|m=-1\rangle$  这 3 个自旋态上. 因此, 磁阱的物理实现原理也限制了在其中可以开展的量子模拟研究. 为了解决这一问题, 全光 BEC 的实验方案不断被提出并且实现<sup>[13-15]</sup>. 全光 BEC 采用聚焦的激光束形成的光学偶极阱(简称光阱)作为强制蒸发冷却过程中原子的陷俘势阱. 光阱是基于激光引起的原子能级的 AC Stark 位移工作, 通过控制激光光强在空间上的分布形成陷俘原子的势阱, 因此用于实现光阱的激光一般是对原子能级远失谐的光. 大失谐激光与原子相互作用过程中, 对原子的自旋态是不敏感的, 因此, 光阱可以同时囚禁多个自旋态的原子, 最终光阱中蒸发冷却得到的 BEC 也具有多个自旋态. 光阱使得 BEC 量子模拟具有丰富的初态, 不再局限于特定的单一自旋态.

然而, 与磁阱相比, 光阱也有明显的缺陷. 受限

于可用的激光功率,光阱往往只有较小的阱体积,因此导致光阱蒸发冷却得到的 BEC 原子数量也较少.较低的原子数会让基于 BEC 的量子模拟实验中的量子态演化操控以及探测变得十分困难. NIST 和美国马里兰大学的研究组提出了利用混合阱的方案来解决这一问题<sup>[16]</sup>.在混合阱实验方案中,磁阱和光阱同时存在于蒸发冷却的初始阶段,而在蒸发冷却的末段只存在光阱.因此,磁阱的阱体积大、蒸发冷却速度快的优势在蒸发冷却的初始阶段得以保留.在蒸发冷却的末段,冷原子将全部被转移到光阱中,通过采用射频快速绝热通道、拉曼转移等手段可用在光阱制备处于不同自旋态的原子,再进行蒸发冷却直到形成 BEC.此时 BEC 是囚禁在光阱中,可以具有不同的自旋态.例如<sup>87</sup>Rb 原子采用混合阱的方案可以每 16 s 得到  $2 \times 10^6$  个 BEC 原子.不仅实验周期比全光 BEC 缩短很多,而且得到的 BEC 原子数比全光 BEC 要高 1 个数量级.

## 2 新型光晶格

光晶格是用相干激光场形成的周期性光学晶格势,例如一维光晶格就是由一对对射激光形成的驻波场产生.结合光晶格技术和 BEC,就可以构建一个功能强大的量子模拟器.通过设计合适的光晶格结构,可以构造出具有特定哈密顿量的模型系统,用于研究凝聚态物理中的基础理论.例如,虽然光晶格中 BEC 原子气体密度比空气的密度低 5 个量级,但具有强关联效应<sup>[17-22]</sup>,因此,可以模拟量子多体效应、凝聚态物理中的相变过程.如图 2 所示,实验中缓慢提高光晶格的阱深,可以观察到光晶格中的 BEC 从超流相演化变成 Mott 绝缘态相的相变过程<sup>[22]</sup>.

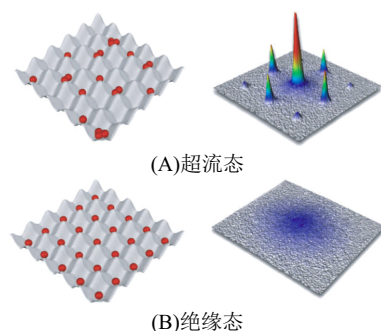


图 2 光晶格中 BEC 的超流态和 Mott 绝缘态<sup>[22]</sup>

Figure 2 BEC in optical lattice quantum phase transition from superfluid to Mott insulator<sup>[22]</sup>

近年来,有很多新型的光晶格相继被提出并得到实现.例如:(1)超晶格是每个格点,具有双阱结构的光晶格,由基频光和其倍频光的驻波场形成,并且通过调节基频光和倍频光之间的相位差可以控制 BEC 在超晶格中的相互作用;(2)量子态依赖光晶格,通过选择特定的激光频率和偏振可以使处于不同自旋态的原子感受到不同的周期势;(3)傅里叶光晶格,是由基频光和偶数倍基频叠加的光晶格等<sup>[23-27]</sup>.这些新型的光晶格丰富了 BEC 量子模拟的实验手段,能够用来构造凝聚态物理中的各种基本模型和研究复杂的多体物理问题.

激光场构造的光晶格最多只有 3 个空间维度,利用原子的磁子能级、亚稳态、动量态等手段可以构造额外的人工维度<sup>[28-31]</sup>(图 3).这使得基于 BEC 的量子模拟不但能模拟已有的物理模型例,例如 3D 量子霍尔效应,还能够探索新奇的高维物理现象,例如用三维光晶格加一维人工维度研究 4D 量子霍尔效应<sup>[30]</sup>.

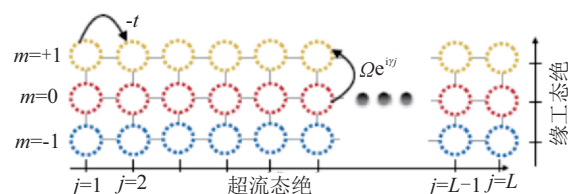


图 3 利用原子磁子能级构造人工维度<sup>[31]</sup>

Figure 3 The synthetic dimension using Zeeman sublevels<sup>[31]</sup>

## 3 微结构光阱

通过驻波场设计的光晶格虽然具有很强的可操作性,但也有自身的不足之处.对于量子模拟需要的特定形状的非周期势,只能形成周期性势能的光晶格就没法实现.例如,最近提出的原子电子学中用独立的三阱结构和 BEC 原子模拟电子晶体管、环形势阱中的 BEC 原子流模拟超导电路中的电流、Y 型势阱构造 BEC 原子流开关等<sup>[32-34]</sup>.要实现这种具有一定的微观结构但又不具有周期性的光势阱,就需要用到微结构光阱的技术.

构造微结构光阱的技术主要有 2 种:(1)时间平均光阱,用 2 个相互垂直的声光调制器控制激光光束逐点扫描,在扫描速度足够快时,BEC 中的原子感受到的是一个具有一定结构的光阱;(2)用空间相位调制器或者数字微镜阵列器件(DMD),调节光束在空间上的光强及相位分布,在 BEC 原子位置

形成想要的光阱结构. 其中 DMD 是采用全息成像的方法,使用更加灵活,能形成各种复杂的势阱结构. 如图 4 所示,用 DMD 调制激光光束在 BEC 平面成像,形成具有复杂微结构的全息光阱,装载 BEC 原子进入全息光阱后,利用成像手段可以看到原子排列形成各种图像,甚至能形成玻色和爱因斯坦的头像照片中复杂的图案<sup>[35]</sup>.

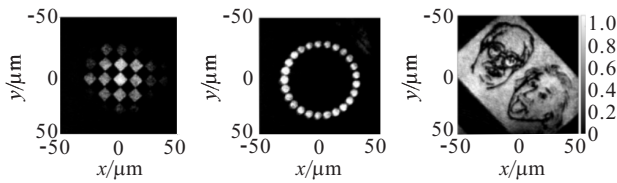
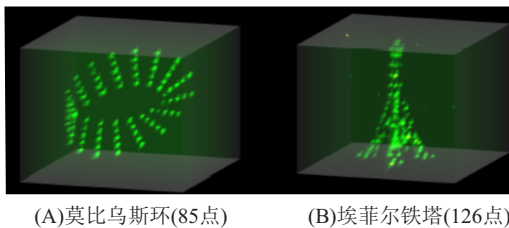


图 4 采用 DMD 全息成像的方法产生的微结构光阱装载 BEC 原子形成的图像<sup>[35]</sup>

Figure 4 The holographic optical traps by DMD<sup>[35]</sup>

最近,法国一个小组用 2 个相互垂直的声光调制器与 1 个焦距可控的透镜组合,演示了具有三维结构的微光阱. 再加上空间调制器的空间选择,就能形成立体图像. 将 BEC 原子装载进去,采用单原子分辨的荧光成像技术观测到几十个超冷原子组成的各种立体图形(图 5),例如莫比乌斯环、埃菲尔铁塔等<sup>[36]</sup>.



(A)莫比乌斯环(85点) (B)埃菲尔铁塔(126点)

图 5 三维微结构光阱装载的 BEC 原子形成的立体图形<sup>[36]</sup>

Figure 5 The solid figures of BEC atoms loaded in the 3D micro-traps<sup>[36]</sup>

## 4 量子气体显微镜

光晶格和 BEC 的结合已经可以构建一个功能强大的量子模拟器,对量子模拟器的实验结果的探测往往通过包括飞行时间法、能带映射等传统方法进行. 其中,能带映射方法是将在光晶格中处在不同 Bloch 能带的 BEC 原子映射到自由空间中进行观测的方法. 虽然目前的探测方法已经取得了较好的研究成果,但大多数通过探测原子系综在动量空间的信息而开展相应的研究,没有办法对实空间的物理信息进行有效的探测研究.

量子气体显微镜就是将光学显微镜技术用在超冷原子实验的探测上<sup>[37-40]</sup>,如图 6 所示,量子气体显微镜可以用来直接观测二维光晶格中的原子分布,高分辨率的显微镜甚至可以获得单格点的分辨能力<sup>[39]</sup>. 产生光晶格的激光场波长一般为 1 064 nm,单格点分辨的显微镜需要达到 500 nm 的空间分辨率. 高分辨率的量子气体显微镜可以观测到光晶格中每个格点中原子的演化情况,能够研究量子气体的空间关联、量子相变中的缺陷和不均匀性等采用统计方法观测不了的物理问题. 量子气体显微镜可以在维持光晶格等系统条件不变的情况下进行探测,因此,采用量子气体显微镜可以对光晶格中的原子态进行实时测量. 实际的量子气体显微镜是一项困难很大的实验技术. 由于 BEC 的制备需要超高真空环境,真空腔体的玻璃窗片以及真空设备因此都会对成像系统带来的复杂影响和引入多种像差,因此该显微技术使用的光学产品往往需要高度的定制性. 此外,也有研究将显微镜放置在真空腔内,这样的设计就需要对显微镜镜头进行特殊处理并定制的特殊真空系统.

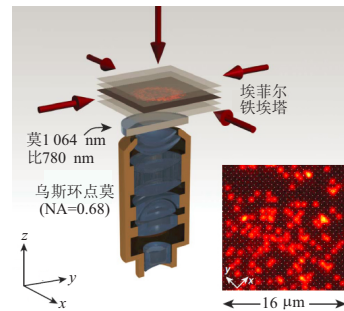


图 6 BEC 量子气体显微镜<sup>[39]</sup>

Figure 6 The quantum gas microscope for BEC<sup>[39]</sup>

## 5 华南师范大学冷原子研究团队的研究进展

华南师范大学拥有“物理学”双一流建设学科以及广东省量子调控工程与材料重点实验室,冷原子物理是主要支撑方向. 实验研究聚焦于量子操控、量子存储和量子网络、微波电场的精密测量、基于 BEC 的量子模拟、基于超冷稀土金属费米简并气体量子模拟、冷原子-超导比特复合体系量子信息处理. 已有实验设备总价值 3 000 多万元,包括高功率半导体激光、高功率钛宝石激光器、窄线宽光纤激光器、超高真空系统等贵重实验仪器(图 7). 实验研

究亚自然线宽偏振纠缠光子对的产生<sup>[41]</sup>曾被《Nature Photonic》选为研究亮点报道;受激拉曼绝热捷径转移通道的实验实现<sup>[42]</sup>曾入选2016年中国光学重要成果.理论研究主要聚焦于量子模拟特别是拓扑物态等新奇量子特性方面<sup>[43-44]</sup>.以基于冷原子量子模拟为主要成果之一的“量子几何相位及其相关研究”项目获得2013年度国家自然科学奖二等奖.

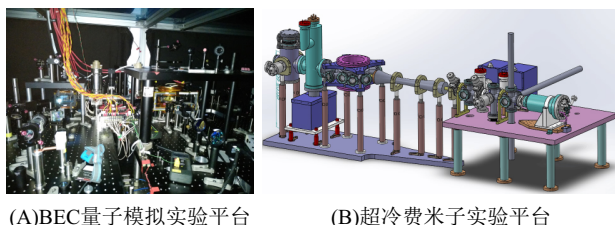


图7 BEC量子模拟实验平台和超冷费米子实验平台(在建)  
Figure 7 The BEC quantum simulation system and ultracold fermion system (under construction)

## 6 结论和展望

BEC具有参数可控、相干时间长、适用性广等优点,是用来模拟研究凝聚态物理中的基本物理问题的有力工具,而且可以用来探索未知的新奇量子物理和量子物态. BEC量子模拟的实验技术近年来在飞速发展,各种新型的光晶格、微结构光阱、量子气体显微镜等实验技术的发展,使BEC量子模拟器的功能更为强大. BEC量子模拟甚至可以研究4维量子霍尔效应, $SU(N)$  ( $N>3$ )等未知的物理领域,并带来新的物理发现(加深人们对相关基本物理的认知.新的实验技术(如超绝热操控BEC量子态、驱动量子相变等)的发展,必将给BEC量子模拟带来广阔的研究前景.

### 参考文献:

[1] ANDERSON M H , ENSHER J R , MATTHEWS M R , et al. Observation of Bose-Einstein Condensation in a dilute atomic vapor [J]. *Science* ,1995 ,269: 198-201.

[2] DAVIS K B , MEWES M O , ANDREWS M R , et al. Bose-Einstein Condensation in a gas of sodium atoms [M]. Oxford: Oxford University Press ,1995: 39-39.

[3] LIN Y J , JIMÉNEZ-GARCÍA K , SPIELMAN I B. Spin-orbit-coupled Bose-Einstein condensates [J]. *Nature* , 2011 ,471: 83-86.

[4] GALITSKI V , SPIELMAN I B. Spin-orbit coupling in quantum gases [J]. *Nature* ,2013 ,494: 49-54.

[5] JI S C , ZHANG J Y , ZHANG L , et al. Experimental deter-

mination of the finite-temperature phase diagram of a spin-orbit coupled Bose gas [J]. *Nature Physics* ,2013 , 10(4) : 314-320.

- [6] LI Y , MARTONE G I , PITAEVSKII L P , et al. Superstripes and the excitation spectrum of a spin-orbit-coupled Bose-Einstein condensate [J]. *Physical Review Letters* ,2013 ,110(23) : 2858-2861.
- [7] HAMNER C , QU C L , ZHANG Y P , et al. Dicke-type phase transition in a spin-orbit-coupled Bose-Einstein condensate [J]. *Nature Communications* ,2014 ,5: 4023/1-8.
- [8] WU Z , ZHANG L , SUN W , et al. Realization of two-dimensional spin-orbit coupling for Bose-Einstein condensates [J]. *Science* ,2016 ,354: 83-88.
- [9] RAJAGOPAL S V , FUJIWARA K M , SENARATNE R , et al. Quantum emulation of extreme non-equilibrium phenomena with trapped atoms [J]. *Annalen Der Physik* , 2017 ,529(3) : 1700008/1-10.
- [10] ARLINGHAUS S , HOLTHAUS M. Driven optical lattices as strong-field simulators [J]. *Physical Review Letters* , 2010 ,81(6) : 624-626.
- [11] SALA S , FÖRSTER J , SAENZ A. Ultracold-atom quantum simulator for attosecond science [J]. *Physical Review A* ,2017 ,95(1) : 011403/1-5.
- [12] LÜHMANN D S , WEITENBERG C , SENGSTOCK K. Emulating molecular orbitals and electronic dynamics with ultracold atoms [J]. *Physical Review X* ,2015 ,5: 031016/1-8.
- [13] BARRETT M D , SAUER J A , CHAPMAN M S. All-optical formation of an atomic Bose-Einstein condensate [J]. *Physical Review Letters* ,2001 ,87(1) : 010404/1-4.
- [14] CHANG M S , HAMLEY C D , BARRETT M D , et al. Observation of spinor dynamics in optically trapped <sup>87</sup>Rb Bose-Einstein Condensates [J]. *Physical Review Letters* , 2004 ,92: 140403/1-4.
- [15] KAWAGUCHI Y , UEDA M. Spinor Bose-Einstein condensates [J]. *Physics Reports* ,2010 ,520(5) : 253-381.
- [16] LIN Y J , PERRY A R , COMPTON R L , et al. Rapid production of <sup>87</sup>Rb Bose-Einstein condensates in a combined magnetic and optical potential [J]. *Physical Review A* ,2009 ,79: 063631/1-8.
- [17] BLOCH I. Ultracold quantum gases in optical lattices [J]. *Nature Physics* ,2005 ,1(1) : 23-30.
- [18] LEWENSTEIN M , SANPERA A , AHUFINGER V , et al. Ultracold atomic gases in optical lattices: Mimicking condensed matter physics and beyond [J]. *Advances in Physics* ,2007 ,56(2) : 243-379.
- [19] BLOCH I , DALIBARD J , NASCIMBÈNE S. Quantum sim-

- ulations with ultracold quantum gases [J]. *Nature Physics* 2012 ,8( 4) : 267–276.
- [20] PAREDES B ,WIDERA A ,MURG V ,et al. Tonks–Girardeau gas of ultracold atoms in an optical lattice [J]. *Nature* 2004 ,429: 277–281.
- [21] TODAY P. Quantum coherence and entanglement with ultracold atoms in optical lattices [J]. *Nature* ,2008 ,453: 1016–1022.
- [22] GREINER M ,MANDEL O ,ESSLINGER T ,et al. Quantum phase transition from a superfluid to a Mott insulator in a gas of ultracold atoms [J]. *Nature* ,2002 ,415: 39–44.
- [23] JAKSCH D ,BRUDER C ,CIRAC J I ,et al. Cold bosonic atoms in optical lattices [J]. *Physical Review Letters* , 1998 ,81( 15) : 3108–3111.
- [24] JAKSCH D ,ZOLLER P. The cold atom Hubbard toolbox [J]. *Annals of Physics* 2004 ,315( 1) : 52–79.
- [25] SOLTANPAHAHI P ,STRUCK J ,HAUKE P ,et al. Multi-component quantum gases in spin-dependent hexagonal lattices [J]. *Nature Physics* 2011 ,7( 5) : 434–440.
- [26] SALGER T ,GECKELER C ,KLING S ,et al. Atomic Landau–Zener Tunneling in Fourier–Synthesized optical lattices [J]. *Physical Review Letters* ,2007 ,99( 19) : 190405/1–4.
- [27] LEDER M ,GROSSERT C ,WEITZ M. Veselago lensing with ultracold atoms in an optical lattice [J]. *Nature Communications* 2014 ,5( 2) : 3327/1–6.
- [28] STUHL B K ,LU H I ,AYCOCK L M ,et al. Visualizing edge states with an atomic Bose gas in the quantum Hall regime [J]. *Science* 2015 ,349( 6255) : 1514–1518.
- [29] CELI A ,MASSIGNAN P ,RUSECKAS J ,et al. Synthetic gauge fields in synthetic dimensions [J]. *Physical Review Letters* 2014 ,112( 4) : 043001/1–6.
- [30] PRICE H M ,ZILBERBERG O ,OZAWA T ,et al. Four-Dimensional Quantum hall effect with ultracold atoms [J]. *Physical Review Letters* 2015 ,115( 19) : 195303/1–6.
- [31] BARBARINO S ,TADDIA L ,ROSSINI D ,et al. Synthetic gauge fields in synthetic dimensions: Interactions and chiral edge modes [J]. *New Journal of Physics* 2016 ,18( 3) : 525–533.
- [32] AGHAMALYAN D ,COMINOTTI M ,RIZZI M ,et al. Coherent superposition of current flows in an Atomtronic Quantum interference device [J]. *New Journal of Physics* 2015 ,17( 4) : 045023/1–14.
- [33] AGHAMALYAN D ,NGUYEN N T ,AUKSZTOL F ,et al. An atomtronic flux qubit: A ring lattice of Bose–Einstein condensates interrupted by three weak links [J]. *Physics* , 2016 ,18( 7) : 075013/1–12.
- [34] RYU C ,BOSHIER M G. Integrated coherent matter wave circuits [J]. *New Journal of Physics* ,2015 ,17( 9) : 092002/1–11.
- [35] GAUTHIER G ,LENTON I ,PARRY M K ,et al. Configurable microscopic optical potentials for Bose–Einstein condensates using a digital–micromirror device [J]. *Optica* 2016 ,3( 10) : 1136–1143.
- [36] BARREDO D ,LIENHARD V ,DE LÉSÉLEUC S ,et al. Synthetic three-dimensional atomic structures assembled atom by atom [J]. *Nature* 2018 ,561: 79–82.
- [37] HERWIG O. Single atom detection in ultracold quantum gases: A review of current progress [J]. *Reports on Progress in Physics* 2016 ,79: 054401.
- [38] SHERSON J F ,WEITENBERG C ,ENDRES M ,et al. Single-atom-resolved fluorescence imaging of an atomic Mott insulator [J]. *Nature* 2010 ,467: 68–72.
- [39] BAKR W S ,GILLEN J I ,PENG A ,et al. A quantum gas microscope for detecting single atoms in a Hubbard–regime optical lattice. [J]. *Nature* 2009 ,462: 74–76.
- [40] HALLER E ,HUDSON J ,KELLY A ,et al. Single-atom imaging of fermions in a quantum-gas microscope [J]. *Nature Physics* 2015 ,11: 738–742 .
- [41] LIAO K ,YAN H ,HE J ,et al. Subnatural–linewidth polarization-entangled photon pairs with controllable temporal length [J]. *Physical Review Letters* ,2014 ,112( 24) : 243602/1–5.
- [42] DU Y X ,LIANG Z T ,LI Y C ,et al. Experimental realization of stimulated Raman shortcut-to-adiabatic passage with cold atoms [J]. *Nature Communications* ,2016 ,7: 12479/1–7.
- [43] 张丹伟,曹帅. 人工自旋轨道耦合玻色-爱因斯坦凝聚体的元激发 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)* , 2016 ,48( 4) : 10–15.  
ZHANG D W ,CAO S. Elementary excitations in a synthetic spin-orbit-coupled Bose–Einstein condensate [J]. *Journal of South China Normal University( Natural Science Edition)* 2016 ,48( 4) : 10–15.
- [44] 杜炎雄,程爱琴,郑翔,等. 量子网络研究进展 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)* ,2016 ,48( 1) : 16–22.  
DU Y X ,CHENG A Q ,ZHENG X ,et al. Research progress on Quantum network [J]. *Journal of South China Normal University( Natural Science Edition)* ,2016 ,48( 1) : 16–22.

【责任编辑:谭春林 责任校对:谭春林 英文审校:程杰】