

学科发展

冷原子物理*

詹明生

(武汉物理与数学研究所波谱与原子分子物理国家重点实验室 武汉 430071)

摘要 20年前,人们通过物理实验方法获得了冷原子,今天超冷原子成为了多学科交叉的物理实验室,超低温物理、超低密度凝聚态物理、超低能碰撞物理、非线性与量子原子光学、量子信息处理、精密谱与量子频率标准等研究汇聚于此。文章介绍了相关研究进展、分析了院内外发展趋势并提出了发展建议。

关键词 冷原子物理,激光冷却,玻色-爱因斯坦凝聚,原子频标,量子信息



对自然界规律的研究和利用,取决于对自然控制的能力。在现代物理学中,一个明显的发展趋势是尽力提高获得纯量子体系和对其状态进行操纵的能力。

温度是物质内部热运动的量度,人类对世界的认识随着温度的降

低而不断深入。如1911年的超导、1938年 ^4He 超流性、1972年 ^3He 的超流性的发现等。20世纪80年代激光冷却与囚禁技术使得气体原子的温度达到mK以下,大量有意义的物理与应用问题显露出来,温度为 μK 的原子用于超冷碰撞、精密测量,在低至nK的原子气体中实现了量子简并,如1995年实现了玻色-爱因斯坦凝聚(凝聚现象与凝聚体均缩写为BEC),从而开辟了“冷原子物理”研究的新篇章。这些工作都获得了Nobel奖,特别是激光冷却与BEC的实现在过去五年内使超冷物质研究领域两度获奖。

原子的无规热运动是精密测量和控制的最大障碍。符合 Boltzmann 速度分布的气体、温度决定了

速度分布的宽度和平均速度。常温($T=300\text{K}$)下 ^{85}Rb 原子的平均速度为 $\bar{v}=272\text{ m/s}$,当 $T=1\mu\text{K}$ 时 $\bar{v}=1.9\text{ cm/s}$,而当 $T=1\text{nK}$ 时, $\bar{v}=0.6\text{ mm/s}$ 。因此,相对于室温或更高温的热原子而言,“冷原子”气体($T<1\text{mK}$)的速度及速度分布宽度要低几个量级。“冷原子”具有如下特性:(1)动能小,可用弱场(如磁场梯度、光场)操控,空间位置可高精度控制;(2)de Broglie 波长长,原子的物质波波动性明显;(3)热运动小,光谱一级和二级 Doppler 加宽很小,有利于精密测量;(4)速度低,原子与光相互作用时间长。

利用冷原子这些特性所做的研究,有许多是用“热”原子难以进行研究的新的物理内容与现象。如:1995年美国天体物理联合研究所(JILA,由科罗拉多大学与国家标准与技术研究院(NIST)合建)成功地实现了超冷 ^{87}Rb 原子的BEC,1996年麻省理工学院(MIT)实现了原子激光;1995年NIST制备单个离子于超冷的零点动能态并演示了量子逻辑门的实验;1999年朱棣文利用原子干涉技术对单个原子具有的重力加速度进行了迄今为止最精确的测量。此外还有,冷原子的碰撞形成的冷分子、用超冷原子研究量子混沌、超冷原子气体中光的低速传播、用囚禁冷原子进行痕量分析、用冷原子模拟天体过程等。冷原子物理研究还提供了形成高新技术

* 收稿日期:2002年10月11日

的潜在的可能性,如用原子光学实现纳米加工、原子刻蚀、原子干涉仪、原子激光器、量子计算机等。

1 国内外现状与发展趋势

冷原子物理研究是近年来物理学的注目点,几乎所有发达国家的重要研究机构都在为不同的目的开展了相关研究。如美国的 NIST、JILA、喷气推进实验室(JPL)、阿贡国家实验室、MIT等,英国的国家物理实验室(NPL)、苏塞克斯光学与原子物理中心(SCOAP)、牛津大学,德国的马普量子光学研究所、康斯唐士大学、慕尼黑大学,法国的国家科学研究院(CNRS)、里尔大学,奥地利的因斯布鲁克大学、维也纳大学,荷兰的自由大学,澳大利亚新南威尔士大学,亚洲有日本的电气通信大学、东京大学、电报电话公共公司(NTT)及韩国的个别大学等。

国内在冷原子实验研究方面有五个小组:北京大学王义道小组、上海光学精密机械研究所王育竹小组、山西大学彭坤墀小组、武汉物理与数学研究所詹明生小组(冷原子)和高克林小组(离子阱)。理论方面,华中科技大学、武汉物理与数学研究所、物理研究所、理论物理研究所、清华大学等单位的一些小组或个人均有出色的工作。

1.1 冷却新技术与新原子分子体系

磁光阱与蒸发冷却:蒸发冷却是达到 nK 温度的最后步骤,即在人为降低势阱高度从而抛出具有高速原子的同时,利用气体的弹性碰撞使剩下的原子迅速达到低温的热平衡分布。因此碰撞是关键性的物理机制。原子与原子或与背景气体之间的非弹性碰撞则改变冷原子的内态从而使该原子脱离囚禁,导致阱中原子的损失,所以非弹性碰撞是有害碰撞。由于此原因,至今对 Cs 原子还没有实现 BEC。已经实现 BEC 的原子有 ^{87}Rb 、 ^{23}Na 、 ^7Li 、 ^1H 、He、 ^{85}Rb 、K。其中在 Na 和 Li 中达到的 BEC 可处在不同的超精细结构量子态,而 He 则处于高电子激发的亚稳态($^3\text{S}_1$)。

全光阱:利用原子在具有强度空间梯度的红外 CO_2 激光中所受的偶极力形成全光阱。降低光强可改变阱的深度从而达到类似蒸发冷却的目的。最近 Georgia 工学院的 Chapman 小组在全光阱中实现了

^{87}Rb 的 BEC^[1]。全光阱适合磁偶极矩很小或自旋反转损失率大的原子,有很好的前景。

微磁阱与原子芯片:在微小尺度芯片上利用刻印技术制作电路,通电流后能产生足够的梯度磁场,利用该种微磁阱阵列,德国马普量子光学研究所 Hänsch^[2] 等两个小组在芯片表面上同样实现了 BEC。MIT 的一个小组则将预先获得的 BEC 成功引入了微磁阱。原子芯片将被用于物质波波导、物质波分波片、微型原子干涉仪及受限区域的量子流体的研究中。

Feshbach 共振:用外磁场控制原子的碰撞性质,使碰撞的原子对在 Feshbach 共振对应的磁场强度处形成束缚态,由此实现了 ^{85}Rb 的 BEC。

交互冷却(也称同情冷却):利用易于碰撞和冷却的原子作为“制冷剂”,通过不同种核或不同状态的原子之间的碰撞,对不易碰撞和蒸发冷却的原子进行交互冷却,使之达到极低温。如不同超精细结构态的 ^{87}Rb BEC 的实现、通过与 ^{87}Rb 碰撞得到冷 ^{85}Rb 、通过冷 Rb 获得 K 的 BEC 等。

对费米子来说,在低温下同种原子之间的碰撞受 Pauli 不相容原理的抑制,因此利用异种原子的交互冷却是能有效将费米子冷却到量子简并状态的关键技术。目前已对 ^6Li 、 ^{40}K 观察到明显的费米量子简并,但要观察费米气体的 Cooper 配对、超流等现象还须进一步冷却。要达到更低温度,必将有大量的原理和技术上困难有待克服。

此外,利用超冷原子的光缔合过程形成冷分子(Li_2 、 Na_2 、 K_2 、 Rb_2 、 Cs_2)及分子 BEC^[3]的研究也不断取得进展。极性分子的静电冷却与囚禁(ND_3)、缓冲气体冷却(Cr、CaH)等技术将超冷物质的研究延伸至更多的原子和分子。

1.2 BEC 与超低密度凝聚态物理

新实验技术和新理论思想的结合,使原子气体 BEC 的研究保持飞速发展之势。BEC 是一个超低密度的凝聚态体系,比空气稀薄十万倍,致使温度如此之低以至于原子之间弱的相互作用会产生常规凝聚态的效应。BEC 已成为原子光学、碰撞物理、多体物理、超流、量子涡旋、约瑟夫森结、量子相变等方面研究的超低温实验室。超冷气体的凝聚态物理

研究刚刚起步。

原子相互作用 (多体问题): 实验显示 BEC 不是理想气体, BEC 中的原子之间存在相互作用。正是这些作用, 使得 BEC 不完全等同于激光中的光子, 使 BEC 成为一个多体体系, 且是一个易于理论描述的相互作用的体系。到目前为止所有的实验都符合弱相互作用条件, 都可以用 Gross-Pitaevskii-Bogoliubov 理论很好地解释观察到的现象。但有限温度下 BEC 的行为仍是多体物理的前沿问题。

BEC 生长动力学: 在 BEC 的生长过程中, 原子必须找到系统的最低能态, 并建立起长程相干。实验发现, 这个过程发生在蒸发冷却之后, 但在 BEC 达到平衡尺寸之前。生长动力学理论必须包括 BEC、BEC 的激发、BEC 与热原子云的作用。有人用量子光学描述激光的产生过程, 来模拟 BEC 的形成, 也有用凝聚态中的对称性破缺和相位弛豫方法来研究。实验发现, 对具有吸引作用的 BEC, 添加原子或通过 Feshbach 共振改变散射长度都会导致该 BEC 的瓦解。而在实验中观察 BEC 先瓦解后跟着抛出粒子的行为, 目前还没有恰当的理论解释。

激发与声音: 对应 BEC 实验的通常的稀薄气体, 一个范围小于气体平均自由程的密度扰动将在局部消逝而不会传播。而在一个 BEC 中, 原子散射碰撞大大增强, 可产生相干的压力并支撑波长远小于平均自由程的密度波。在 BEC 的合作激发方面, 已研究了模的耦合、孤子传播、量子涡旋等非线性现象。

稀薄气体中的超流: 液态 He 的超流动性在 1938 年就观察到了, 虽然当时人们很快就将其与 Einstein 的 BEC 理论联系起来, 但直到 60 年后才有实验证实其中的凝聚现象。与之相反的是, 在气体中, 先是于 1995 年实现了 BEC, 几年后的 2000 年才观察到超流。气体超流的实验验证有两种方法, 一种是直接用激光搅拌并通过改变势场晃动原子云, 发现凝聚体以相干隧穿方式运动, 而尚未凝聚的原子云则以旋转方式运动。另一种方法是研究 BEC 的扭转模式, 对于超流液 He, 如果转动液 He 罐, 其中的液体并不跟着转动, 同理在旋转阱中的气体 BEC 应该只能做摆动而不会出现整体的刚性转动, 但可以有局部转动的量子化涡旋存在。

涡旋: 从 1999 年至今, 已有美国的科罗拉多大学、MIT、法国巴黎高师、英国牛津大学等几个小组先后实现气体 BEC 的量子涡旋, 研究了量子涡旋的产生、运动、晶化和耗逸动力学。

多组分 BEC: 将不同核的原子混合起来并同时冷却至量子简并状态, 是 BEC 研究的另一个方向, 已有几个实验做到了这一步。玻色子混合物可用于研究超流体的相互贯穿, 费米子与玻色子的混合将会使 $^3\text{He}-^4\text{He}$ 混合物的研究向前推进。

低维 BEC: 将一个系统限制到低维往往会增强系统的量子特性, 从而出现新的物理现象。一个著名的例子是二维电子气的量子霍尔效应。根据热动力学, 一个有效一维系统不可能出现 BEC。但在实际冷原子实验中, 由于粒子数目和体积均有限, 该定理的限制并不明显。目前已用原子物理学的方法制备多种形状的 BEC, 一维、二维的 BEC 也已实现。

隧穿结与约瑟夫森结: 两个分开的 BEC 的相位相干性使原子的布居数在两地发生往返振荡, 而其中的单个原子则由于势垒的量子隧穿在两地往返穿梭。当原子之间的排斥作用强度与隧穿率可比拟时, 相干隧穿突然停止。这是因为, 原子之间排斥的增强增加了原子密度起伏的能量消耗, 导致突然的布居数的固化, 同时由于物质波中相位与原子数密度起伏之间的测不准关系, 确定的布居数对应不确定的相对相位, 不确定的相位使约瑟夫森流消失。耶鲁大学的实验观察到了原子数的压缩。

量子相变: 最近, 德国 Ludwig-Maximilians 大学实现了超冷原子气体从超流态向莫特绝缘体的量子相变。实验中, 超冷原子在三维光晶格中先达到平衡后以超流相膨胀, 监视干涉图形, 发现当晶格强度达到某一值时干涉突然消失, 表明不同格点间的相干性消失, 体系进入绝缘相。在绝缘相, 每个格点中有相同的原子数目, 对应高有序态, 原子-原子排斥产生的能隙阻止了原子在格点之间的迁移。

1.3 超低能碰撞物理

原子之间的相互作用决定了碰撞的动力学, 反之, 碰撞动力学行为是原子相互作用的精密探针。不同温度时气体的相对平动能 (碰撞能量) 大小及

能量分布宽度不同。随着温度的不断降低,原子相互作用的量子特性及新的物理内容日益显露出来,例如,外场可控制超冷碰撞的动力学;在极低温下,碰撞能分布也很窄,于是所有的原子可同时发生共振;对低能超冷碰撞,精确的理论计算完全可以引导和解释实验,两者相互促进,BEC的实现过程本身就是一个例证。

由于散射矩阵是酉矩阵,所以所有的碰撞本质上是相干的。超冷原子的碰撞中由于基本不存在高温碰撞时的热平均的过程,碰撞相互作用的相干性得以保持。已有几个小组建议利用这种相干相互作用在原子之间产生纠缠。控制的纠缠可用于量子信息和量子计算、精密测量等。

BEC的实现、冷分子的产生、相互作用的主动控制等无一不展示了自然界在超冷碰撞中的量子力学特性。散射长度作为惟一的碰撞参量,在多体物理的无可调参数描述中得到了初步的试用。单个原子或原子对的精确控制将导致量子信息处理的物理装置的建立。冷碰撞物理的另一个趋势是受限尺度内的低维碰撞,当某一方向上的尺寸小于相互作用特征尺度(如散射长度),新的碰撞量子特性甚至相变动力学可能都与自由空间的碰撞物理不一样。冷分子的获得为超低能“原子-分子”、“分子-分子”碰撞提供了实验可行性,这类碰撞问题的研究有助于对势能精确性和碰撞量子特性的理解。在努力实现分子BEC的过程中,如果采用类似于原子的蒸发冷却方案,则分子之间的弹性碰撞与非弹性碰撞的细节将是不可缺少的。对这些较复杂的碰撞过程的理解和控制将有利于推动一般的化学反应过程控制的实现。

1.4 原子光学

即使在BEC实现以前,实验已经展示了原子甚至分子的物质波^[4]特性,观察到原子的干涉与衍射,实现了原子束的聚焦(透镜)、反射和准直,形成了“原子光学”——即以原子取代光学中的光子而诞生的波动原子光学。而此时的原子光学类同于激光未出现之前的传统光学。

除静止质量外,BEC中的原子(量子简并,两个以上的原子占据完全相同的量子态)类同于激光器

谐振腔中的光子(单模光子数大于1)。耦合输出的BEC作为高亮度、低发散的相干原子源(原子激光器)用于原子干涉仪和原子光学的各方面,形成相干原子光学。当BEC中含有原子的相互作用时,相干原子光学又出现非线性(非线性原子光学),原子的四波混合^[5]、位相相干物质波放大、孤子等非线性现象已先后在实验中观察到。同时,相干原子光学象激光一样具有量子起伏与压缩特性(量子原子光学)。

原子刻蚀是一种应用原子光学原理在衬底沉积原子的方法,与其它获得小于100nm分辨率的刻蚀技术(如:电子束、离子束、X-射线、EUV)相比具有许多优点。例如,与光刻相比,原子的物质波长很小,因此衍射极限很小;与电子或离子刻蚀相比,中性原子间无库仑排斥,可达到高分辨极限;与扫描探针显微镜(SPM)相比,原子刻蚀能实现大面积并行加工,可满足大尺度空间相干性的要求。冷原子加工可有两种模式,即直接原子沉积与原子刻蚀:原子沉积模式提供干净的无膜环境,且冷原子的动能小,对衬底无损伤;原子刻蚀模式中冷原子对掩膜曝光时的定位好、散射小、层穿透小。

1.5 精密谱与原子频率标准(原子钟)

超窄原子谱线对物理量的敏感性是用光谱学方法进行精密物理测量的基础。相反,尽量避免和消除环境对原子谱线位置(频率)、线宽、强度的影响,并将振荡器锁定在该谱线上,可得到超高稳定性和精确度的原子频率标准(简称原子频标,又称原子钟)。原子频标以跃迁谱线所处的电磁波段可分为两类:即微波频标和光频标。与传统的常温气体Rb、Cs、H微波原子钟相比,近年来,用囚禁离子实现的离子阱频标、用冷原子的原子喷泉频标、用飞秒频率光梳和锁相激光技术的光频标,在稳定性和精度上都有量级上的提高。单离子囚禁的离子阱光频标的稳定度已达到 10^{-17} 量级,准确度达到 10^{-18} 量级。这是目前已知可以实现的最高的频率稳定性和准确度。飞秒光梳技术已成功用于多种原子、离子、分子的精密光频测量,包括Rb、Ca、 CH_4 、H、 Hg^+ 、 I_2 、 Sr^+ 、 Yb^+ 、 In^+ 等。

原子频标不但应用于原子分子精密测量与基

基础研究领域,目前还广泛应用于全球定位系统(如美国的 GPS 系统、俄罗斯的 GLONASS 系统,欧洲的 Galileo 计划)、导弹与卫星的发射以及通讯网络和城市交通管理等方面。原子频标在国防和国民经济中起着至关重要的作用。

1.6 量子信息处理

量子信息以微观体系的量子态作为信息载体,光子、核自旋、原子(离子)、电子等粒子的每一个两态的自由度均可作为一个量子位。目前光子体系多用于量子密码通信和实验演示量子纠缠;核自旋(核磁共振,NMR)体系则多被用于量子计算和多量子位量子算法^[6]的研究,液体 NMR 实验已达到 7 量子位^[7];用固体中的电子(如量子点)虽有许多方案,但目前还未能实现量子逻辑门。

冷原子和冷离子具有与环境隔离的优势,冷却至基态的原子和离子是干净可靠的纯量子力学体系,用冷原子与冷离子进行量子信息处理的前景越来越广阔。

自 1995 年用囚禁的单个冷离子首次演示了量子逻辑门以来,两个、四个离子的量子纠缠先后实现,特别是提出了多个微型离子阱阵列组成复杂量子计算机的方案,前不久 NIST 的实验展示了离子阱方案可扩展量子计算机结构至大尺度。微腔中的中性冷原子同样可用做量子信息处理器,这类基于腔量子电动力学(CQED)的方案的优势是可以实现光纤的结点互联,实现分布式量子计算。

集成原子光学和冷原子微加工(原子刻蚀)有可能将量子态控制与固体微结构相结合,实现多位可扩展的量子计算。

由上述不难看出,“冷”原子确实是“热”话题。^[8]

2 我院研究态势与发展建议

2.1 我院研究态势

从实验上实现 BEC 是一个实验室整体实验研究水平的标志,这种说法一点也不过分。截至 2002 年 10 月 15 日,全球共有 12 个国家(美、英、德、法、日、澳大利亚、奥地利、瑞士、新西兰、荷兰、意大利、中国)的 46 个研究小组在实验上实现了 7 种原子(Li、Na、K、Rb、Cs、H、He)的 BEC(Cs 的 BEC 尚未

公开发表)。

实际上,在冷原子研究方面,国内起步并不晚。上海光学精密机械研究所王育竹小组开展原子激光冷却与囚禁研究甚至比日本等国家还早,但由于投入不足,虽一直坚持研究却在实验上难以领先于国外,武汉物理与数学研究所在“七五”期间即开始离子阱物理实验,但囚禁离子激光冷却的实验却未能开展。詹明生 1990 年在日本首次实现中性 ^7Li 及 ^6Li 的激光囚禁^[9],1991 年回国后很长时间没有开展冷原子研究的机会,直到 1996 年利用“百人计划”的部分有限支持开始在武汉物理与数学研究所建立装置,并于 1998 年在国内较早地在玻璃系统中实现了 Rb 的激光囚禁^[10]。国内虽还有北京大学的王义道小组、山西大学彭坤墀小组也在进行激光囚禁中性冷原子的实验研究,但情况都基本类似。

近两年的发展明显加快,在院内先后启动的“量子物理与信息”(现已转为“973”项目)和“冷原子物理”两个创新方向性项目为我院的冷原子物理研究注入了强大的动力,上海光学精密机械研究所今年终于实现了 BEC,武汉物理与数学研究所成功研究了冷原子的多种电磁诱导透明现象,并启动了离子阱频标研制项目。

2.2 思考与建议

高难度的基础物理实验需要长期的技术积累,急功近利的潮流往往难以容忍任何一个立足国内的科学家在 5 年或更长的周期内在实验研究上落后于国外。营造一个能让人潜心将“冷”板凳坐“热”的软硬环境,是冷原子物理方面赶超世界的关键。

我院在冷原子物理及与之相关的原子频标、量子信息方面有比较优势。国内同行及一批杰出的海外华人科学家(如邓鲁^[5]、吴颖^[11]、朱一夫)一致认为应在中国科学院建立冷原子物理研究中心,为国内外合作研究提供一个固定的研究基地。我本人认为对这种长线的基础研究,应该主动部署,而不是做成了再授予“基地”称号。

冷原子物理作为原子物理、量子光学、凝聚态物理的结合点,需要多学科参与。实验与理论的结合、新物理思想与新技术的交叉应受到足够的重视。

主要参考文献

- 1 Barrett M D, Sauer J A, Chapman M S. All- optical formaion of an atomic Bose-Einstein condensate. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87(1):010404-1—4.
- 2 Hänsel W, Hommelhoff P, Hänsch T W, et al. J. Bose-Einstein condensation on a microelectronic chip. *Nature*, 2001, 413: 498—501.
- 3 Zoller P. Making it with molecules. *Nature*, 2002, 417: 493—494.
- 4 周士康, 詹明生. 原子物质波干涉. *量子电子学*, 1993, 10(2): 97—102; 10(3): 193—199.
- 5 Deng L, Hagley E W, Wen J, et al. Four-wave mixing with matter waves. *Nature*, 1999, 398: 218—220.
- 6 赵志, 冯芒, 詹明生. 量子算法与量子计算实验. *物理学进展*, 2001, 21(2): 183—215.
- 7 Daxiu Wei et al. Experimental realization of seven qubit universal controlled-Not and controlled square-root Not gates. *Quant-ph*, 2001, 0109002.
- 8 Southwell K. Ultracold Matter. *Nature*, 2002, 416: 205.
- 9 Lin Z, Shimizu K, Zhan M S, et al. Laser cooling and trap-ping of Li. *Japan J. Appl. Phys.*, 1991, 30 (7B): L1 324— L1 326.
- 10 王谨, 柳晓军, 李交美等. Rb 原子的激光囚禁. *光学学报*, 2000, 20(6): 862—864.
- 11 Wu Y, Yang X, Xiao Y. Analytical method for yrast line states in interacting Bose-Einstein condensates. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 86(11): 2 200—2 203.

Physics of Cold Atoms

Zhan Mingsheng

(State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics,
Wuhan Institute of Physics and Mathematics, CAS, 430071 Wuhan)

About 20 years ago, we studied physics to obtain cold atoms. But now ultra cold atoms have become a research laboratory for new physics. Ultra low temperature physics, ultra low density condensed matter physics, ultra low energy collision physics, nonlinear and quantum atoms optics, quantum information processing, precise spectroscopy and quantum frequency standards, all converge at the cold atoms. This article reviews the progress in the above fields, analyses the development trend in and out of the CAS, and suggests proposals to conduct related researches inside the CAS.

詹明生 武汉物理与数学研究所所长, 研究员, 博士生导师。1961年8月出生于湖北大冶。1988年8月获博士学位, 后在日本国立电气通信大学激光极限技术中心博士后研究3年, 1995年入选中国科学院“百人计划”, 1996—2002年与英国帝国理工学院 Blackett 实验室保持合作研究, 其中1997年度为 EPSRC Senior Fellow。中国科学院知识创新工程方向性项目“冷原子物理”、“量子物理与信息”首席科学家之一。发表学术论文110篇, 培养博士10名, 硕士11名。