

范德瓦耳斯和他的状态方程*

钞曦旭[†] 唐纯青

(陕西师范大学物理学与信息技术学院 西安 710062)

摘要 在物理学发展史上,范德瓦耳斯对气-液流体系统做了开创性的研究工作,建立了人类历史上第一个既能反映气、液各相性质,又能描述相变和临界现象的状态方程.范德瓦耳斯的理论成就和研究方法对热力学、统计力学和低温物理学的发展产生了重要而深远的影响.文章系统探讨了范德瓦耳斯方程产生的历史背景、科学意义和局限性,讨论了范德瓦耳斯的理论和方法对当代物理学的启发意义.

关键词 范德瓦耳斯 状态方程

Van der Waals and his equation of state

CHAO Xi-Xu[†] TANG Chun-Qing

(College of Physics and Information Technology , Shaanxi Normal University , Xi'an 710062 , China)

Abstract In the history of physics , J D van der Waals pioneered studies on the fundamental properties of the gas-liquid system , establishing the first equation of state which describes not only gases and liquids but also phase transition and critical phenomena. His theoretical achievements and scientific method had profound influence on the development of thermodynamics , statistical mechanics and low temperature physics. We present an overview of the van der Waals equation , including its historical background and scientific significance and deficiency , and discuss its influence on modern physics.

Key words van der Waals , equation of state

状态方程是描述热力学系统平衡态的独立参量与温度之间的函数关系式,是物理学的一个重要研究内容.人类对状态方程的研究可以追溯到很早的年代.早在1662年和1679年,英国化学家玻意耳(Boyle R)和法国物理学家马略特(Mariotte)就分别提出了描述理想气体性质的状态方程.两个世纪后,范德瓦耳斯在克劳修斯热力学理论的启发下,通过考虑分子体积和分子间引力的影响,导出了描述实际气体性质的状态方程,即著名的范德瓦耳斯方程.

范德瓦耳斯方程在历史上具有莫大的重要性,它是人类历史上第一个既能描述气、液各相性质,又能显示出相变的状态方程.由于它形式简单,物理意义清楚,成为热力学和统计物理学的重要应用对象.范德瓦耳斯也是第一个定量研究分子间相互作用的物理学家,他所使用的研究方法实际上就是后来所

说的平均场方法,这一方法对铁磁、超导、超流等众多物理系统相变和临界现象的研究,对热力学和统计物理理论的发展产生了重大影响.本文详细分析了范德瓦耳斯方程产生的历史背景,介绍了范德瓦耳斯的研究方法和科学成果,并对其在科学发展中的历史地位进行了初步探讨.

1 范德瓦耳斯的生平及科学成就

范德瓦耳斯(Johannes Diderik van der Waals),荷兰人,1837年1月23日生于荷兰莱顿一个普通工人家庭.范德瓦耳斯早年家境不甚宽裕,在出生地

* 2002-05-30 收到初稿,2002-07-25 修回

† 通讯联系人. E-mail: xxchao2001@yahoo.com.cn

完成了他的初等教育后,便做了一名小学教师。按照荷兰当时的法律,要进一步接受他所喜爱的自然科学的教育,就必须首先通过希腊文和拉丁文的考试。范德瓦耳斯在这方面的基础不够好,未能获得参加考试的资格。尽管如此,范德瓦耳斯并未放弃自己的努力。在1862—1865年期间,他利用业余时间莱顿大学继续学业,并获得了数学和物理的教学资格。1864年,范德瓦耳斯被一所中学聘为教师。1866年,这是给范德瓦耳斯带来转机的一年。这一年,荷兰政府颁布的新法律取消了自然科学学科的大学生必须预先接受希腊文和拉丁文教育这一限制,使得范德瓦耳斯能够参加大学入学考试,并跨入了著名的莱顿大学攻读物理学^[1]。

莱顿大学是荷兰的第一所大学,创建于1575年,是荷兰人民推翻西班牙殖民统治,赢得国家独立的象征。学校对教师和人才极度重视,鼓励不同学科自由竞争,允许来自不同宗教国家的学生来此求学。17—18世纪,莱顿大学以其在医学和数学上的卓越成就著称于世。正是由于莱顿大学开放、自由的学术风气,使得在1901—1920年诺贝尔物理学奖最初24名获奖人中,出自莱顿大学的物理学家就占了4位,他们是洛伦兹、塞曼、范德瓦耳斯和昂尼斯。

在这所学术气氛浓郁的校园里,范德瓦耳斯经历7年寒窗生活之后,于1873年,以其题为《关于气体和液体状态的连续性》的著名论文获得博士学位。在这篇论文中,他提出了一个描述实际气体性质的状态方程。这使他很快成名,并置身于物理学家的前列。1880年,范德瓦耳斯在他的方程的基础上发现了对应态定律,10年后,又把他的状态方程同热力学第二定律相联系,在二元混合物理论方面作出了重大成就。1910年,73岁的范德瓦耳斯因其对科学的杰出贡献而荣获诺贝尔物理学奖。

1876年,范德瓦耳斯被阿姆斯特丹大学聘为首位物理学教授。此后,他同物理学家范·托夫(Van't Hoff)和遗传学家弗里斯(Hugo de Vries)一起,为该校赢得了不少荣誉。1923年3月8日,范德瓦耳斯在阿姆斯特丹逝世。

2 范德瓦耳斯方程产生的历史背景

人类对状态方程的研究是从气体开始的。在实验研究方面,早在17世纪,英国科学家玻意耳就发现了气体压力和体积的关系,即著名的玻意耳定律。1787年,查理(Charles J H C)首次得到了压力一定

时气体体积与温度成正比的结果。1802年,盖-吕萨克(Gay-Lussac J L)测量了空气、氧气、氢气和氮气等在水的冰点和沸点之间的热膨胀,并得到了相应的关系。这三个关系称为气体三大实验定律,可算是最早的状态方程。当时人们以为,三大气体定律所描述的就是真实气体的行为。但是,随着研究工作的逐步深入,发现情况并非如此。1842年,雷尼欧(Regnault H V)通过精密的实验研究发现真实气体或多或少与盖-吕萨克定律和玻意耳定律有偏离,而且气体越被压缩,偏离越大。于是,人们逐渐明确了这两条定律并不能描述真实气体在低温和高密度状态下的行为,它们所描述的不过是只在一定程度上反映真实气体性质的理想模型^[2]。

随着对高密度气体和气体液化的深入研究,一个重要的物理现象渐渐浮出水面。1822年,卡尼亚尔·德·拉·图尔(Cagniard de la Tour)观察到在提高温度时,酒精饱和蒸气的压力和密度随温度升高而增大,他预言,在高温高压下,蒸气和液体应具有相同的密度。47年后,这一预言被英国物理学家安德鲁斯(Andrews T)所证实。1869年,安德鲁斯在皇家学会作了题为《论物质液态和气态的连续性》的著名报告。在报告中,安德鲁斯描述了在二氧化碳液化实验中所观测到的这种气、液具有相同密度的“临界状态”。对二氧化碳来说,该点对应的温度是31℃。在这个温度以上,气体是不能通过加压被液化的,气体与液体的差别也不复存在。因此,安德鲁斯得出结论说,气态和液态并不是能被绝对加以区别的状态,而是连续性地联系着。安德鲁斯关于临界点的发现,有力地促进了气液相变的理论研究,对范德瓦耳斯产生了重要影响^[3]。

从微观方面来看,范德瓦耳斯方程的提出也是当时气体分子动理学理论发展的必然结果。早在18世纪前半期,伯努利在其《流体力学》一书中从气体是由许多激烈运动的粒子构成这一假设出发,说明了气体压强的起因。在论述中,他忽略了分子的大小。1821年,赫勒帕斯提出了气体是既相互碰撞又飞旋前进的粒子的集合体,并认为这些粒子应该是完全坚硬的。1856年,克朗尼格完成了一项具有标志性的工作,他把气体看作是完全弹性小球的集合体,并以此计算了这些弹性小球对器壁碰撞产生的压力,得到了与玻意耳定律和盖-吕萨克定律等价的结论^[2]。1857年,克劳修斯(Clausius R)发表了题为《论我们称之为热的那种运动》的论文,把以前人们对分子运动的种种设想和实验结果总结加工成理

论,提出了理想气体分子模型:(1)相对于气体的整个体积,可以忽略气体分子的体积;(2)分子与分子之间的碰撞时间和碰撞与碰撞相隔时间相比,可以认为是在无限小时间内进行的;(3)分子之间力的影响无限小。克劳修斯从这个模型出发,通过计算他定义的理想气体分子对器壁作用的冲量求出了气体压力,并导出了理想气体的状态方程。如果用绝对温度 T 表示的话,该方程就是我们现在所使用的理想气体状态方程:

$$PV_m = RT, \quad (1)$$

其中 P 为气体的压强, V_m 为摩尔体积, R 为气体普适常数。至此,使用了近两个世纪的三大气体定律得到了统一的、透彻的理解,表征着人类对气体热现象的认识从感性上升为理性。

如上所述,经过两个世纪的漫长时间,人们认识到理想气体状态方程虽然在一定程度上反映了真实气体的性质,但对低温和高密度状态下的气体以及气体和液体之间的相变却无能为力,因而是一个理想的“永久气体”状态方程。从微观上说,这个方程是忽略了分子大小和分子间相互作用的产物。

3 范德瓦耳斯方程及其对气-液系统的描述

1873年,36岁的范德瓦耳斯在他的博士论文中提出了著名的实际气体状态方程——范德瓦耳斯方程。范德瓦耳斯对其所选课题的兴趣直接来源于上面提到的克劳修斯那篇阐述热是运动现象的著名论文,这篇论文的观点促使他寻求对安德鲁斯关于气体中存在临界温度这一实验结果的解释。除了上面所说的历史背景之外,范德瓦耳斯的睿智在于看到了在建立气体和液体的压强、体积与温度的关系时考虑分子体积和分子间作用力的必要性。

在克劳修斯理想气体状态方程的基础上,范德瓦耳斯作了两点修正:(1)分子体积的存在使得气体自由体积减小,所以气体的摩尔体积应为 $V_m - b$ (b 是体积修正常数);(2)分子间的吸引力将产生附加压强,所以气体压强应由与分子引力有关的参数来修正,可写为 $P + a/V_m^2$ (a 是引力修正系数)。其中,压强的修正项是结合了分子动理学和拉普拉斯的表面张力理论得到的^[1]。后面将会看到,这一步是极其重要的,他实际上是引入了一个平均场方法来处理多体问题。考虑到上述两点修正,新的状态方

程形式为

$$(P + a/V_m^2)(V_m - b) = RT. \quad (2)$$

对上述方程稍作整理就会看到它是一个 V_m 的三次方程。如果取不同的温度值,则由上述方程可在 $P-V$ 图中得到一系列等温线。在这些等温线中,有一条是特殊的,称为临界等温线,对应的温度称为临界温度,用 T_c 表示。当温度低于临界温度时,每个 P, V 对应的三次方程有三个不同的实根,反映了气体和液体之间的相变,属于一类相变;当温度等于临界温度时,三个根重合,这是对临界点现象的描述,此时发生的相变是二类相变;当温度大于临界温度时,有两个根变成虚的,反映了气体不会因加压而被液化;当温度进一步升高时,范德瓦耳斯等温线将趋近于理想气体等温线。

范德瓦耳斯的论文很快受到19世纪伟大的物理学家麦克斯韦的重视。1874年,麦克斯韦专门在《自然》(Nature)杂志上发表文章评述范德瓦耳斯的研究成果,并称“这篇文章问世后会立即将他(范德瓦耳斯)置身于科学名家的行列”。麦克斯韦的热情宣传使这位年轻的荷兰人很快为物理学界所知晓。在高度评价范德瓦耳斯成就的同时,麦克斯韦也指出了他论文中的不足:等温线中有一段是热力学基本原理所不允许的^[1]。温度一定时,物体的体积只能越压越小而不会相反,这是自然界的一个基本事实。麦克斯韦提出范德瓦耳斯等温线中非物理部分应当换成一条两端分别对应气态和液态的水平线,这样,曲线的形状就与二氧化碳等温液化实验曲线相似。他还给出了确定这一水平线位置的法则——“等面积法则”。实践证明,范德瓦耳斯方程加上麦克斯韦的“等面积法则”,就可以相当好地描述气、液两相的性质,气-液相变和安德鲁斯发现的临界点现象,并定量地预言临界点附近的许多奇异性质。有趣的是,除了上述成就之外,范德瓦耳斯方程还能在一定程度上描述过饱和蒸气和过热液体这类亚稳态现象。

范德瓦耳斯方程包含了体现气体特定性质的两个常数 a 和 b ,由于这两个常数要由实验来确定,因此范德瓦耳斯方程是一个半经验方程,不能预言真实气体的可观测特性;另外,方程只描述了气、液的性质和气-液相变,这意味着范德瓦耳斯物质在低温下是“永久液体”。尽管如此,范德瓦耳斯方程对真实气体的描述还是足够多的,特别是对处于较高密度状态下的气体,范德瓦耳斯方程要比理想气体状态方程好得多,加之其形式简单,物理意义清楚,

很快便成为热力学和统计物理学的重要应用对象。

从低温下是“永久气体”的理想气体状态方程到低温下是“永久液体”的范德瓦耳斯方程,是人类对气体热学性质认识的一个飞跃,而完成这个飞跃经历了两个世纪的漫长历程。范德瓦耳斯的巨大成功极大地激发了人们研究状态方程的热情,今天已有数百个不同种类的状态方程问世,涵盖了众多的物质系统,形成了一个专门的研究领域。

4 对应态定律与“永久气体”的液化

1880年,在经历大量艰辛探索之后,范德瓦耳斯得到了他的第二个重要发现——对应态定律。该定律表明,如果用对比压强 $P_r = P/P_c$,对比体积 $V_r = V/V_c$ 和对比温度 $T_r = T/T_c$ 来表示他的状态方程,则方程中能表达特定物质性质的三个常数 a 、 b 和 R 将消失,变成了具有普适性的下列方程^[4]:

$$\left(P_r + \frac{3}{V_r^2}\right)(3V_r - 1) = 8T_r \quad (3)$$

此方程称为对应态方程,是范德瓦耳斯方程的约化形式,可适用于所有的气-液流体系统。实践证明,许多气体在一定压强和体积范围内相当好地遵从这个方程。该方程也是历史上第一个反映相变普适性规律的方程,它所反映的这种普适性在20世纪60年代被进一步发展成为标度理论。

对应态定律的一个重要的现实意义是从理论上指出了不存在所谓的“永久气体”。因为,既然所有气体都遵守对应态方程,那么,只要在临界点以下,所有气体就都可以实现气-液相变。虽然在该理论提出之前,人们已经实现了某些气体的液化,例如1823年,法拉第首次通过加大压力的办法使氯气液化,接着又成功地液化了二氧化碳和氨气;但是,当时人们以为氦气、氢气、氮气和氖气等是不能用任何方法使之液化的“永久气体”。安德鲁斯关于临界点的发现从实验上使人们猜想到所谓“永久气体”也可能存在临界点,只要在临界点以下加压就可以使它液化。1877年,凯泰(Cailletet L P)和皮克泰(Pictet R P)分别在法国和瑞士同时成功地实现了氧气和氮气的液化,证实了这一猜想。而范德瓦耳斯的对应态定律则从理论上使人们坚信:只要处于临界点以下,所有气体都是可以液化的。在范德瓦耳斯对应态定律指导下,英国人杜瓦(Dewar J)于1898年成功地将氢气液化^[2]。

在荷兰莱顿,范德瓦耳斯的对应态定律也直接

引导了他们学校在低温物理和气-液相变方面的实验研究工作。他们发展了低温实验技术,建立了低温研究所,研究所的创始人就是著名低温物理学家昂内斯(Onnes H K)。1882年,昂内斯应聘担任莱顿大学实验物理学教授,1908年,实现了氦气的液化,随后又发现了超导电性,并于1913年荣获诺贝尔物理学奖,成为莱顿大学第四位获此殊荣的物理学家。他在1910年写道:“我们一直把范德瓦耳斯的研究看成是实验取得成功的关键,莱顿的低温实验室就是在他的影响下发展起来的^[1]。”后面我们将会看到,范德瓦耳斯的研究不仅是引导实验工作的关键,而且也是引导新的理论工作的关键。他的看似简单的方法将人们引入了相变和临界现象这一既丰富多彩,又充满挑战的研究领域。

5 内压强与平均场理论

范德瓦耳斯是历史上第一个定量研究分子间相互作用的物理学家。他认为,气体压强来自分子运动和分子力两部分的贡献,其中分子力对压强的影响主要在于较为长程的吸引力部分。对于处在气体内部的某一分子,周围其他分子对它的吸引力平均来说抵消了。但是,对于靠近器壁的那些分子情况则大不相同。受拉普拉斯液体表面张力理论的启发,范德瓦耳斯考虑这些分子受到一个来自气体的内聚力,这种内聚性质可用内压强来描述。显然,内压强正比于施力者的数密度和受力者的数密度,即正比于数密度的平方,而分子数密度又反比于体积 V ,所以内压强应与体积 V 的平方成反比。这样,范德瓦耳斯在他的方程中便巧妙地使用了内压强 a/V^2 来修正理想气体方程中的压强。内压强的实质是使用一个平均了的力场(即内场)来代替其他分子对靠近器壁的那些分子的作用,从而把复杂的多体问题近似地化为单体问题。范德瓦耳斯的这个方法实际上就是后来所说的平均场方法,应该说,他是平均场理论的创始人。

范德瓦耳斯的内场方法对相变和临界现象的研究发挥了重要作用。1890年,范德瓦耳斯将他的状态方程同热力学第二定律相联系,发表了关于“二元混合物理论”的第一篇论文,这是他的另一个伟大成就。该理论引发了一系列的实验工作,库恩(Kuenen J P)发现临界现象特征的实验就是完全依照他的理论预言进行的^[1]。

范德瓦耳斯的方法也启发了人们对其他物质系

统相变和临界现象的研究. 1895年,皮埃尔·居里(Pierre Curie)发表了一篇专门讨论铁磁相变的学术论文. 在这篇论文中,他特别强调了铁磁体镍与二氧化碳的相似性. 如果将磁场 H 比作压强 P ,自发磁矩 M 比作密度 ρ ,那么 $H-M$ 相图与 $P-\rho$ 相图非常类似. 他说:“从铁的强大磁性和顺磁性转移的情况可以看出,顺磁性状态类似于气态,强磁性状态类似于液态.”^[2]1907年,外斯(Weiss P)根据居里的上述类比,仿效范德瓦耳斯的方法,假定强磁体的各分子受到来自周围分子群的等价于某一均匀磁场的作用而引起自发磁化. 外斯还把这种内部磁场叫做“分子场”,以强调它和范德瓦耳斯引入的“内压强”的相似性^[5].

1934年,布拉格(Bragg W L)和威廉姆斯(Williams E J)在研究合金有序化时,也受到了气液和铁磁相变的启发,采用了平均场近似. 超导的金兹堡-朗道(Ginzburg-Landau)理论,超流的葛罗斯-皮达耶夫斯基(Kalos-Pitaevskii)理论,液晶的朗道-德让纳(Landau-de Gennes)理论实际上都是平均场理论,只是表达形式稍有不同而已. 1957年巴丁(John Bardeen)、库珀(Leon N. Cooper)、施里弗(John Robert Schrieffer)提出的超导微观理论,更是平均场思想的一个光辉发展^[3].

1937年,朗道概括了平均场理论的基本精神,提出了一种很普遍的表述. 但他在自己的著作中没有指出气液临界点是一个典型的二类相变,没有说明范德瓦耳斯对临界点的描述与他自己提出的平均场理论完全一致,这一缺憾后来由他的一位学生作了弥补.

大量实验表明,由平均场理论计算的临界指数与实验测量值是有差异的,而造成这一差异的原因是平均场理论未把临界点上的短程关联效应严格考虑进去,这是平均场理论的固有缺陷. 另外,平均场理论只是优化了热力学参量,因而属于表象理论,不能给出相变和临界现象的本质解释,而要做到这一步还必须借助于统计理论.

6 范德瓦耳斯方程与统计力学

范德瓦耳斯方程是第一个通过考虑分子间相互作用得到的能描述相变的状态方程,这为统计物理学提出了一个重大课题:从吉布斯(Gibbs)统计力学的基本原理和方法出发,能不能以单一数学表达同时描述相变问题及所涉及的各相? 1937年11月,

在荷兰举行的纪念范德瓦耳斯诞辰100周年的国际学术讨论会上曾为此发生过激烈的争论. 吉布斯的统计力学方法分为三个步骤:先由分子的运动和相互作用写出系统的能谱,然后计算出系统的配分函数,最后再代入热力学公式得到系统热力学量的表达式. 其中,计算配分函数是较为困难的一步. 进一步讲,即使计算出了配分函数,有关相变的信息是否已包含在配分函数之中? 从连续的配分函数出发能得到不连续的相变行为吗?

后来的理论发展表明,在采取适当的物理模型和一定的极限情况下,由统计力学基本原理和方法确实可以导出能描述相变的物态方程,求出相变临界温度近似值. 1940年,迈耶(Mayer)等人使用集团展开法完成了经典非理想气体的统计理论. 该理论表明,使用简化的列纳德-琼斯(Lennard-Jones)位势(LJ位势),可以导出实际气体的范德瓦耳斯方程形式,并给出了方程中两个修正系数的具体表达式^[5]. 迈耶等人对气-液凝结现象也曾给出过一个理论解释,不过该理论只预言了气-液相变的开始,因而与实验不符. 但是,它毕竟在气液等温线上出现了水平部分,因此是一个重要的进展. 1938年,Kahn和Uhlenbeck将集团展开法推广到量子非理想气体,提出了量子统计集团展开法^[8]. 20世纪50年代末,李政道、杨振宁又进一步完善了这种方法,提出李-杨相变理论. 该理论表明,在热力学极限情况下,由系综方法得到的状态方程可以呈现出相变^[9]. 1963—1964年,Kac等人研究了一个可解的一维粒子模型,假定粒子间的相互作用尺度为 R ,定义距离给定粒子为 R 处的那些粒子为最近邻粒子. 他们发现,在 R 趋于无穷的极限下存在相变. 有趣的是,该系统的明显特征是其状态方程严格的是范德瓦耳斯方程^[6,7].

上述研究成果说明在热力学极限情况下,采用适当的模型确实可以从统计力学导出反映相变的状态方程. 但是,这并不意味着我们能以严格的数学方法给出统计力学中的配分函数能描写相变的一般性证明^[5]. 看来,范德瓦耳斯方程对统计力学的影响是深远的,尚有许多工作等待人们去进一步完成.

7 结语

回顾历史可以发现:状态方程的研究是与热力学和统计力学的发生和发展密切相关的. 范德瓦耳斯的伟大功绩在于他率先定量研究了分子间的相互

作用,创立了内场方法,即平均场方法;首先得到了能反映各相性质、相变和临界现象的状态方程,并首先描述了相变中存在的普适性。他将低温下是“永久气体”的状态方程发展为低温下是“永久液体”的状态方程,完成了人类对热现象认识的一次飞跃。遗憾的是,在他之后,我们对状态方程的研究并未取得多少进展,直到现在还未找到能从统计物理严格导出的、在低温下是“永久固体”的状态方程。

范德瓦耳斯的理论和方法对当代物理发展的影响是广泛而深远的,这在物理学发展史上并不多见。值范德瓦耳斯方程提出 130 年之际,谨以此文表达对他的永久纪念。

参 考 文 献

- [1] 郭奕玲,沈慧君. 诺贝尔物理学奖. 北京:高等教育出版社,施普林格出版社,1999. 43—46 [Guo Y L, Shen H J. The Nobel Prize in Physics. Beijing: Higher Education Press, Springer Press, 1999. 43—46 (in Chinese)]
- [2] 广重彻. 李醒民译. 物理学史. 北京:求实出版社,1988. 216—217, 243—245, 389—390 [Tetu Hirotsige. Li X M trans. History of Physics. Beijing: Qiu-shi Press, 1988. 216—217, 243—245, 389—390(in Chinese)]
- [3] 于淦,郝柏林. 相变和临界现象. 北京:科学出版社,1984. 19, 67 [Yu L, Hao B L. Phase Transition and Critical Phenomena. Beijing: Science Press, 1984. 19, 67(in Chinese)]
- [4] 雷克 E. 黄昀,夏蒙梵,仇韵清,赵凯华译. 统计物理现代教程. 北京:北京大学出版社,1983. 102—105 [Reichl L E. Huang Y, Xia M F, Qiu Y Q, Zhao K H trans. A Modern Course in Statistical Physics. Beijing: Beijing University Press, 1983. 102—105 (in Chinese)]
- [5] 北京大学物理系. 量子统计物理学. 北京:北京大学出版社,1987. 171—183, 313—314, 42—343 [Physics Department of Beijing University. Quantum Statistical Physics. Beijing: The Press of Beijing University, 1987. 171—183, 313—314, 342—343 (in Chinese)]
- [6] Rodney J. Baxter F R S. Exactly Solved Models in Statistical Mechanics. London: Academic Press Inc. LTD, 1982. 13
- [7] Kac M, Uhlenbeck G E, Hemmer P L. J. Math. Phys., 1963(4) 216; J. Math. Phys., 1964(5): 60
- [8] Kahn B, Uhlenbeck G E. Physica, 1938(5): 399
- [9] Lee T D, Yang C. Phys. Rev., 1960, 117(1): 12

· 物理新闻与动态 ·

玻色 - 爱因斯坦凝聚的瞬态过程 (BEC ends globally but starts locally)

众所周知,玻色 - 爱因斯坦凝聚(BEC)是指成千上万的原子以稀薄气体的形式在瞬间凝聚到具有相干性的基态上,这种状态可以显示许多极有意义的量子效应。当然要出现 BEC 状态,首要的条件是必须让系统处于临界点。但长期以来科学家们却很少关注凝聚时的崩塌现象。最近荷兰原子与分子物理研究所的 J. Walraven 教授及其研究组对此进行了研究,他们细致地观察了这个崩塌现象,并发现了在凝聚时出现的奇异的类似于雪茄烟状的凝聚云团。

研究组采用“激波冷却(shock cooling)”方法来冷却原子(即利用无线频率波使原子在 1ms 内迅速冷却,而不是采用传统的持续不断的蒸发冷却方法),这时被冷却的原子进入 BEC 状态,实验显示,开始时 BEC 只是一个局域效应,凝聚原子只在局部区域内发生相干作用,然后再逐步扩展为全部原子处于相干态。也就是说,凝聚过程发生得非常快,因此开始时只有部分原子进入了基态,这时的凝聚云团类似于细长的雪茄烟,中间部分聚集着较热的原子,而较冷的原子则聚集在雪茄烟的两端,因此对应的状态也不是平衡态。接着凝聚云团发生振荡,最后才达到真正的平衡凝聚。研究组在断开捕集阱开关后利用吸收成像器拍摄下了凝聚云团的形态。振荡云团的弛豫过程是在固有时间内发生轴向的收缩,径向的膨胀。经过一定的弛豫时间后,云团的轴向尺寸达到最小,也就是相当于通常在重力影响下水滴的形状。而处在原子激光器腔内的这个聚集过程,其聚焦的大小决定于凝聚原子间轴向矩的分布。他们的研究结果对进一步了解在弛豫时间内凝聚过程中发生的相涨落提供了极有价值的信息。

(云中客 摘自 Phys. Rev. Lett., 30 December 2002)