

大气学科在与物理学科的交融中发展

刘式达[†] 刘式适

(北京大学物理学院 北京 100871)

2013-06-04收到

† email: liusd@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20130903

2013年是北京大学物理学科的百年纪念,我们清楚地记得,在1952年国家进行院系调整时,清华大学气象系在谢义炳教授的倡议下,得到著名物理学家叶企孙、周培源的支持,融合到北京大学物理系^[1],物理专业、气象专业共同组成北京大学物理系,1956年谢义炳教授任物理系副主任。由于同在一个物理系,气象学科大大强化了数理基础。至今,大气学科融入北京大学物理学科已经61年,得到了迅速发展。

上世纪50年代,我国物理学奠基人之一的叶企孙先生说:“不要以为气象学是从物理学中分出来的,实际上大气学科也影响了物理学的发展”^[2]。据赵柏林院士回忆,解放初期,叶先生还亲自为学生开设气象学,讲述“大气声光电”^[3],赵凯华教授也说:“物理学是整个自然科学和现代工程技术的基础”^[4]。的确,大气科学是以物理学为基础的。1953年,气象专业设立了“大气环流专门化”,大气环流是指在旋转的地球上的大气大范围的空气流动现象,它是以物理学的流体力学为基础的。上世纪开展的声雷达、微波辐射计、卫星遥感等研究是以物理学中的声、光、电为基础的。大气科学的发展证实了叶企孙先生的论述。

大气学科对物理学也是有影响的。最典型的例子是科里奥利力(简称科氏力)的发现。对于在实验室研究的物理学,并不明显地察觉到科氏力。但是在旋转的地球上,人们早就知道赤道的热空气上升到赤道高空,并从高空流向极地下沉到地表,空气又从极地沿地表流向赤道。这种大气环流现在称为哈得莱(Hadley)环流,它是英国科学家 G. Hadley(1685—1768)在380年前的1735年发现的。从赤道到极地约有一万公里,科氏力的影响非常明显,它使地表由极地流向赤

道的气流在北半球向右偏而形成东北信风^[5, 6]。直到 Hadley 发现信风的100年后,法国科学家科里奥利(G. Coriolis)才正式提出非惯性系的科里奥利力^[7]。今天,我们已经清楚地知道,科氏力是大气大尺度运动围绕垂直轴作水平旋转的主要力量。当气压梯度力和科氏力相平衡时,可以很好地解释沿等压线作旋转的气旋和反气旋^[8]。若再加上摩擦力后的三力平衡,则气旋、反气旋会越过等压线作螺旋运动^[9],这就可以解释台风、台风眼的结构^[8, 9]。大气学科中气旋、反气旋、台风的三维图像,使得物理学中科氏力的概念更加直观形象。

大气环流中的信风,促进了物理学对科氏力的认识,物理学中的科氏力的概念,又促使气象



图1 叶企孙照片,1953年6月摄于北京大学原物理南楼,左起叶企孙、叶铭汉(照片取自叶铭汉、戴念祖、李艳平编的《叶企孙文存》一书。该书由首都师范大学出版社出版(2013年4月第一版))

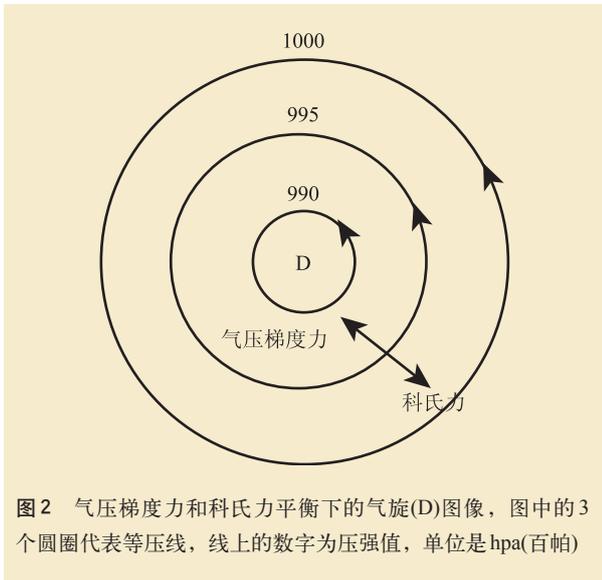


图2 气压梯度力和科氏力平衡下的气旋(D)图像, 图中的3个圆圈代表等压线, 线上的数字为压强值, 单位是hpa(百帕)

学科从理论上认识大气环流、气旋、反气旋等天气系统。北京大学大气学科的教师在上世纪70—80年代编辑出版了《天气学基础》、《动力气象学》等教材, 这些书物理概念清晰, 内容丰富且严谨, 成为当时国内气象学科的重要参考书。大气学科在1976年翻译出版了麻省理工大学(MIT)著名气象学家洛伦茨(E. N. Lorenz)的专著《大气环流的性质和理论》^[10], 并开展了长江洪水大气环流模型试验, 人工影响天气, 数值天气预报, 卫星遥感等多项研究。为此, 1988年谢义炳教授荣获了帕尔门(E. Palmén)国际奖, 他是获得该奖唯一的亚洲人。谢义炳院士的铜像和叶企孙、周培源等人的铜像一起放在物理大楼展厅中。

对物理学科影响最大的应该还是气象学家E. N. Lorenz 1963年发表的一篇文章《确定的非周期流》^[11]。这篇文章启发了物理学家, 在非线性方程中, 也可以出现随机性的结果, 在只涉及少数几个(≥ 3)自由度的经典状态空间中, 也会出现较为复杂的混沌轨道。这使我们想起了只有两个变量(位置和速度)的单摆振荡, 这种振荡只是简单的轨道, 对保守系统, 它是圆轨迹, 对耗散系统, 它是衰减振荡的螺旋轨道。经典物理学研究振荡和波, 已遍及力学、电磁学、量子力学等领域。在大气科学中也有振荡和波, 在对流层中, 上层大气的西风环流中也会出现波长为数千公里

的罗斯贝(Rossby)波。Rossby(1895—1957)是瑞典著名气象学家, 他在1939年^[12]导出这个波的色散关系, 按照这个关系, 波数越小(即波长越长)的波, 移动越慢。天气预报员常利用这个公式来估算空气自西向东移动的速度, 从而预测天气的变化。但是, Lorenz的文章启发我们, 若有非线性因素存在的话, 波动的移动速度就不那么简单了, 它不但和波数有关, 还和振幅有关。其实, 早在1844年, 英国科学家T. S. Russell就发现了非线性水波^[13], 1895年, D. Korteweg和H. de Vries两位科学家提出了浅水波著名的非线性KdV方程^[14]。今天物理学家已经认识到系统中色散因子的作用是使波能铺开, 非线性因子的作用是使波能集中, 色散因子和非线性因子的平衡(如KdV方程)就会产生孤立波。同理, 热扩散因子和非线性因子的平衡也会产生孤立波(包括冲击波)。原来, 在Lorenz的非线性耗散动力系统中, 出现孤立波的轨道是进入复杂混沌轨道的必经之路。孤立波和冲击波在动力系统理论中分别称为同宿(homocline)轨道和异宿(heteroclinic)轨道^[15]。前者是当时间 $t \rightarrow \pm\infty$ 时趋向同一个奇点, 后者是当时间 $t \rightarrow +\infty$ 和 $t \rightarrow -\infty$ 时趋向不同的奇点。设行波解的波动变量为 $(x-ct)$, 则非线性演化方程就化为常微分方程。所以动力系统同(异)宿轨道分别对应于演化方程中的孤立波和冲击波。由于孤立波和冲击波的周期为无穷大, 因而频率为零, 只



图3 谢义炳院士在赫尔辛基获帕尔门奖后在科学研讨会上讲话的照片(取自文献[1])

要稍加扰动,就会出现各种周期都有的波动,甚至于非周期运动的混沌。至今,非线性波和混沌的研究已经深入到物理学中的神经元、反应扩散^[16]、光学、量子等系统^[17, 18]。对于保守系统,物理学中把孤立波也称为孤子(soliton),而且常把孤子看成粒子,如弦论中的基本弦粒子,广义相对论中的黑洞,杨-米尔斯理论中的磁单极子等^[19],在大气科学中,非线性因子(如平流项 $u\frac{\partial u}{\partial x}$, $u\frac{\partial T}{\partial x}$, u 是西风气流, T 是温度)就存在于大气运动方程组中。同时,大气的主要波动(如Rossby波)都是色散波,因此出现孤立波是必然的,非线性Rossby波中的高空切断低压和阻塞高压等都可以看成是孤立子或偶极子。同时也可以很容易地将大气波动满足的演化方程化简成KdV方程^[20],而且导出了含有波数和振幅的色散关系,振幅越大, Rossby波动移动的速度越慢,它给广大预报员提供了较为完整的色散关系。我们还首次提出了用椭圆函数展开法求解非线性演化方程的孤立波,相关论文^[21]获得了中国物理学会2012年度最具影响力论文一等奖。

除了非线性科学对大气科学和物理科学的交融发展有较大的影响之外,1983年,国际科学理事会提出“全球变化”对两个学科的影响也是很大的^[22]。全球变化的核心内容是气候变化,气候变化已经成为自然科学的最前沿学科。同时物理学也进入了复杂系统非平衡物理学的领域。大气科学中的气候变化和物理学科中复杂系统的共同特征是多尺度、多层次。对气候而言,若研究的时间尺度从月算起,那么季、年、10年、100年、1000年……等都是气候变化研究的尺度。物理学早已有“微观”和“宏观”两个层次,现在又多了一个介于两者之间的“介观”层次。我们知道,微观层次上重复应用简单的相互作用规则(例如格子全自动机(lattice gas automata)),在宏观上可以涌现出各种各样的斑图。多尺度、多层次对大气科学和物理科学都带来巨大的挑战,另一方面,从研究气候变化和复杂系统物理学所得到的知识对其他学科也有重要意义,例如说明生命的功能,甚至于说明大脑是如何

觉察和理解自己的环境的。

“气候变化”如何去研究呢?物理学科也给了很大的启发。物理学中的连续相变,在相变点上有各种尺度的涨落,它也是多尺度现象。物理学家寻找关联长度随尺子(例如 $T-T_c$, T_c 是临界温度)变化规律,寻找“临界指数”。Wilson因为采用重整化群方法求得临界指数,在1982年获得了诺贝尔物理奖。而且,在原子分子的微观层次上,原来磁化方向无序的对称状态到达临界点后,好像一个领导突然下达了命令,使无序的自旋指向都朝向同一个方向,这样的状态称为对称破缺状态;在宏观层次上,“自组织”成了“磁性结构”。对气候而言,气候的冷暖也是随尺度变化而变化的,离开时间尺度谈气候的冷暖是毫无意义的。目前常说的气候变暖,是指近100年尺度上而言的。受物理学中连续相变的启示,研究气候变化的科学提法并不是为什么变暖变冷,而是要寻找气候冷暖随尺度变化的规律^[23]。

更有意义的是,现今的大气成分已经维持了几千万年,尽管工业革命以来二氧化碳的排放不断增加,但是数千万年来,有大气运动造成的大自然灾害,如大洪水、大暴雨等也经历了千万年。而大气运动的唯一能源——太阳,也只是由于地球轨道和太阳的耀斑(黑子)而有缓慢的变化,它正说明气候系统处于自组织临界状态。自组织临界状态的典型物理模型是沙堆模型^[24],在沙堆模型中,外界的沙子缓慢地一粒一粒向沙堆上落,结果是沙堆可以有小的跌落,也可以有大的崩塌。天气气候的多尺度系统也正是如此,有涨落较小的事件(如小雨、小旱等),也可以有涨落大的事件(如暴雨、大旱等),自组织临界性具有通常相变临界点的所有特点,特别是时空的长程相关性。和相变不同的是,它不需要外部的控制参数,而仅仅是自调整。我们能否将气候系统看成是一个自组织临界系统呢?这是一个值得深思的问题^[25]。

在气候变化的研究中,对多尺度、多层次的物理现象,通常会思考如下一些问题:

(1)各种尺度,各个层次之间存在什么样的联系?



图4 大气与海洋科学系揭牌仪式(右一是赵柏林院士,左一是校长助理李晓明,中间是为大气与海洋科学系系主任胡永云教授)

(2)从非局部的时间空间领域上讲,是否存在长期相关性和记忆性?

参考文献

- [1] 北京大学地球物理系. 北京大学地球物理系成立四十周年, 北京: 方正集团, 1998
- [2] 谢义炳. 谢义炳文集(北京大学院士文库). 北京: 北京大学出版社, 1997
- [3] 北京大学物理学院大气科学系. 江河万古流. 北京: 北京大学出版社, 2007
- [4] 秦克诚, 刘寄星. 木铎金声集——贺赵凯华教授八十华诞. 北京: 高等教学出版社, 2010
- [5] Wallace J M. Atmospheric Science: An introductory survey. Cambridge: Academic Press, 2006
- [6] Hadley G. Phil. Trans., 1735, 29: 58
- [7] 赵凯华. 新概念物理学教程·力学. 北京: 高等教育出版社, 1995
- [8] 刘式适, 刘式达. 大气动力学. 北京: 北京大学出版社, 2011
- [9] 刘式达, 刘式适. 大气涡旋动力学. 北京: 气象出版社, 2011
- [10] Loreng E N 著, 北京大学地球物理系气象专业. 译. 大气环流的性质和理论. 北京: 科学出版社, 1976
- [11] Lorenz E N. J Atmos. Sci., 1963, 20: 130
- [12] Rossby C G. J. Marine Res., 1939, 2: 38
- [13] Russell J S. Report on waves 14th meeting of the British Association for the Advancement of science. 1844
- [14] Scott A. Nonlinear Science: Emergence and dynamics of coherent structure. Oxford: Oxford university press, 2003
- [15] 刘式达, 刘式适. 孤波和湍流. 上海: 上海科技教育出版社, 1994
- [16] 欧阳颀. 反应扩散系统中的斑图动力学. 上海: 上海科技教育出版社, 2000
- [17] 刘式适, 刘式达. 物理学中的非线性方程. 北京: 北京大学出版社, 2012
- [18] Wattis J A D. J. phys A: Math. Gen., 1998, 31: 3301
- [19] 秦克诚译. 21世纪新物理学. 北京: 科学出版社, 2013
- [20] 刘式达, 刘式适. 中国科学B, 1982, 4: 372
- [21] 刘式适, 刘式达等. 物理学报, 2001, 50(11): 2068
- [22] 国家自然科学基金委员会. 自然科学学科战略调研报告: 大气科学. 北京: 北京科学出版社, 1994
- [23] 刘式达, 刘式适. 地球物理中的混沌. 长春: 东北师范大学出版社, 1999
- [24] Tang B P. Phys. Rev. A, 1988, 33: 364
- [25] Pruessner G. Self-organised criticality, Theorg, models and characterization. Cambridge: Cambridge University press, 2012

(3)大涨落和小涨落之间有怎样的关联性? 它们之间服从什么样的概率分布?

(4)涨落的扩散方差比布朗运动快还是慢?

这些问题对大气科学和物理科学都是非常重要的。

当然研究气候变化是一个很复杂的问题, 大气学科已经在数值模拟和气候资料等方面做了大量研究, 也对温室气体(如CO₂)的源和汇作了一些探讨。过去对占全球四分之三的海洋也了解很少, 因为海洋的热容量比大气要大得多, 所以海洋对气候变化的影响非常值得关注, 正因为如此, 从2010年起, 北京大学物理学院的大气科学系, 正式改名为北京大学大气与海洋科学系。

我们坚信, 大气科学一定会在和物理学科的交融中得到扎实的进展。