

小小杯咖啡, 理含大宇宙

译者点评

在人类探求自然本源漫长的过程中,有三种品性令人感动不已:一是佛的悟性,其二是诗人的感性,再者是科学家的理性。

佛在绝对地弃绝自我之后,将己体融入万物,然后再拈一朵莲花,轻轻地道出事物的本源:

“一花一世界,一叶一菩提.”。

诗人则用自身短暂的血肉之躯,与永恒而浩瀚的宇宙抗争,才有如唐代王勃在滕王阁上迸发出的“天高地迥,觉宇宙之无穷;兴尽悲来,识盈虚之有数”的动人篇章。而英国诗人 William Blake 则更是写下了这样的名句:

To see a World in a Grain of Sand
And a Heaven in Wild Flower
Hold Infinity in the palm of your hand
And eternity in an hour

再经诗人徐志摩转译成如下的妙语:

一沙一世界,一花一天堂。

无限掌中置,刹那成永恒。

在这首短诗里,我们领略到的是一种诗与佛的境界,也就是所谓觉悟的境界。

与前二者不同的是,科学家对自然本源的探求,不仅仅在于内在的觉悟,还在于利用外在事物证实、还原已经获取或者还在求证中的认识。他们犹如一群开山架桥的人,在可感知的物质世界和无法触摸、由运动法则构成的理性世界间开辟了众人可以攀援的道路,通过知识的传习、进取、实践而到达一种觉悟的境界。

(中国科学院物理研究所 翁羽翔)

2011年5月份的 *Physics Today* (2011年第5期,第66—67页)刊登了耶鲁大学的 John S. Wettlaufer 教授撰写的论文,该文揭示了小如一杯咖啡、大至海洋及恒星动力学所共同遵循的物理规律:小小一杯咖啡或茶,便是一个研究旋转、冷却的实验室,蕴藏着巨如恒星动力学及地球大气与海洋进行能量交换的大尺度现象的物理规律。现介绍如下。

居住在全球各地醒着的人中,每分钟就有数百万人在做着—个再平凡不过的动作,把冷牛奶倒入热咖啡或热茶中。那些还没来得及用汤勺搅拌的人,也许已经注意到杯中一股股上升翻滚的牛奶被一些细小、下沉的深色线状体所分开,如图 1(a)所示。这一现象在我们的生活中是如此不起眼,就连那些经训练成为职业观察者的科研人员也会轻视这一现象的重要性和普适性。图中的斑图和海洋的卫星图像有几分相似,而主宰该现象的物理规律和导致太阳及其他宇宙物体的颗粒状结构的物理法则是一致的,而后者就没

有那么容易让人接近并进行仔细研究了。

早在两千多年前阿基米德就开始思考浮力的起源,如同今日孩子们在想象夏日的天上为何漂浮着千姿百态、飞禽走兽状的浮云时,孩子们和阿基米德想到了一处去了。对于热浮力和成分浮力的科学研究可以追溯到 1798 年伦福德伯爵试图说服热质说信徒的一篇论文。时至今日,浮力已成为非线性物理学中一些最富挑战性问题的核心,而这些问题的科学魅力也与日俱增。对于今天还在研究中的一些基本问题的回答,将有助于对地球热平衡、大气输运以及洋流能量的理解,也必将适用于对气候、星系的命运及星球的起源的探索。很少有这样既能结合如此基础的研究,又具有如此广泛影响力的研究领域。尽管如此,流体流动丰富的内容却很少能够在大学本科物理教材中找到。

醒来后闻一下物理的气息

有关流体动力学稳定性的现代理论肇始于贝纳德 (Henry Bernard) 的实验研究。贝纳德在以水平金属板为底的容器中盛—薄层鲸油(—种粘滞性的

本栏目是经美国物理联合会(AIP)授权,与 *Physics Today* 合作的项目

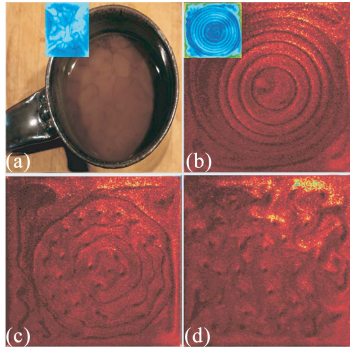


图1 一杯咖啡中的涡旋结构 (a) 每个人都知道, 如果你等上一会儿咖啡就会变凉, 而冷却作用主要通过蒸发对过程来实现. 把冷牛奶倒入咖啡中, 然后等待. 这时就可以看到, 在冷牛奶沉入杯底的过程中, 只有很少一部分和咖啡混合, 但最终经表面蒸发而形成的一缕缕烟状冷液体沉下杯底, 并取代原先牛奶的位置, 形成由上升(浅色)和下沉(深色)流体构成的斑图, 其中的插图室温条件下水表面蒸发的红外成像, 且暗区的温度仅比明区温度低十分之几度; 图(b)到(d) 是深度为 11.4cm, 截面为 22.9×22.9 cm 水层的几幅视图; 图(b)为液体在以每秒十分之几弧度的转速开始旋转 7.5 分钟后的照片, 其中主图表示液体在表面以下 0.6cm 处的密度分布(颜色越浅表示密度越大), 插图为液面热成像; 图 c 显示旋转启动 11 分钟后, 由于剪切不稳定性作用, 导致圆环被破坏; 图(d)表示旋转至 14 分钟时, 圆环被破坏后形成涡旋点阵. 该过程的录像资料可以在下列网站上找到: <http://prl.aps.org/supplemental/PRL/v105/i4/e044504> (引自 J. Q. Zhong, M. D. Patterson, J. S. Wettlaufer, *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 105:044504)

蜡质流体), 从容器底部加热流体层. 对于一个很小的纵向温度梯度, 贝纳德没有发现特别的地方; 流体通过其表面向上导热, 在该过程中并没有出现流体的整体运动. 然而当温度梯度达到一个临界点时, 随着有组织的对流运动从原先均匀的流体中出现, 突然形成了一种六边形斑图结构的对流胞腔. 瑞利勋爵把临界温度梯度作为描述热浮力和粘性应力之间平衡的一个物理量, 并将其纳入一个无量纲参数即瑞利数. 当由底部热边界提供给一流体微团的瞬时热浮力足以克服周边流体的粘性应力时, 流体整体的有序运动就出现了. 这种由按特定几何形态进行上下流动而形成醒目的有序结构的流体, 是演示耗散系统能够产生对称性破缺、自组织现象及美的典型标志(这种上下对流运动在水平位置上是可区分的, 尽管底部边界具有均匀的温度分布).

尽管科里奥利(Gaspard-Gustave Coriolis)在 1835 年就出版了《论多体系统相对运动的方程》一书, 然而在 1905 年卷的德国《物理年鉴》上还是爆发了一场关于傅科摆偏转物理机制的学术争论, 而这一年正好是爱因斯坦向世人推出狭义相对论的年份, 凑巧的是, 爱因斯坦的论文恰好刊登在同一卷上. 人们对于科里奥利效应缺乏应有的理解并不感

到惊奇, 看看今天的大学生, 掌握爱因斯坦的相对论仍然比科里奥利效应容易. 而科里奥利效应对于理解下列现象是必不可少的, 例如为什么从上往下看, 围绕一个低压中心旋转的大气环流在美国的城镇是逆时针方向, 而在澳大利亚的城镇是顺时针方向的.

奶油, 糖加旋转

北冰洋的海水在冻结过程中, 温度不断降低并将盐分驱至海水的表层. 地球的内核在固化过程中, 逐渐形成一个贫铁的金属浮层. 空气由炙热的地表快速上升而产生雷暴. 行星的吸积盘从其中心处的行星接受辐射能. 在上述所有的系统中, 旋转都将改变上升或下沉中流体的命运. 那么你手中热气腾腾的咖啡又会如何呢? 当你转动它的时候又会出现什么现象呢?

将杯子放在旋转的唱片上, 让其跟着旋转. 此时杯壁的摩擦力将应力传给流体内部. 如果咖啡能够保持恒温状态约一分钟, 那么每一咖啡流体微团将以相同的角速度运动, 也就是说, 咖啡被转起来了.

就目前大气学和海洋学的时间尺度而言, 地球的自转速度可视为一常量, 然而旋转速度随时间的变化对诸如星际的内部现象、吸能盘的演化, 或者月球的潮汐扰动都至关重要. 因而相对于旋转的背景流动, 人们想出了对流涡旋的概念. 对旋转速度的扰动激活了边界摩擦的作用, 并显著地影响了流体内部的循环. 此外蒸发和冻结提供了额外的扰动, 该扰动以一种应力的形式改变流体的行为, 起着加强匀速转动的作用. 让我们重新回到作为研究旋转、冷却的实验室的咖啡杯中, 图 1(b) 所示的模型系统显示, 所引入的旋转复杂性暂时将图 1(a) 中的斑图组织成由冷、热流体构成的同心环. 当你转动热气腾腾的咖啡时, 一些基本的竞争过程也就开演了. 正如我们所看到的那样, 蒸发冷作用驱动图中狭窄区域作向下的对流运动; 流体的粘滞效应和科里奥利效应在沉降区到达相互平衡. 然后旋转作用迅速将下沉的冷薄层和上升的暖流团组织成同心环, 并首先出现在杯子的中心部位. 大约在旋转运动开始后的 7.5 分钟, 图 1(b) 所示的同心环几乎扩展至整个水平面. 同心环沿方位角的等速运动持续约 3.5 分钟, 此时在同心环的边界处出现了与圆环之间的剪切力相关的所谓开尔文-亥姆霍兹(Kelvin-Helmholtz)团流, 逐渐生长并卷曲成涡旋, 见图 1(c). 再过 3 分钟后, 涡旋失去了方位角对称性, 组装成规则的涡旋格点, 格点的中心为沉降中的流体.

图 1(d) 所示为在旋转流体及其他数学模拟体系中形成的一类相干结构(此处是涡旋), 条件是相干结

构的存在时间要远长于旋转周期. 其他著名的例子有木星的“大红斑”(即涡旋状飓风, 是木星大气混沌现象的持续特征)以及地球大气中的蜿蜒状射流.

此外, 超导材料中持续的涡旋电流及超流体也能够形成自组织结构. 事实上超导体中的涡旋与非粘性流体中的涡旋具有相同的流动性. 尽管科研人员长期以来一直在研究旋转系统中的对流超流体, 然而本文中讨论的一些经典系统提示, 也许我们能够在超导系统发现类似的现象. 那么, 我们何时能够看到超导体中的射流现象呢?

如果你在阅读本文的时候正好手握一杯咖啡, 请把杯子轻轻地放下, 仔细看一看你的咖啡杯中正在出现什么现象.

最后译者也试作一偈, 权作对科学饱含理性的

诠释:

小小杯咖啡, 理含大宇宙.

一杯一世界, 一转现乾坤.

参考文献

- [1] Chandrasekhar S. Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. New York: Dover, 1981
- [2] Bercovici D. Mantle Dynamics Past, Present and Future: An Introduction and Overview. In: Treatise on Geophysics, vol. 7, Mantle Dynamics. Bercovici D ed., New York: Elsevier, 2007, p. 1
- [3] Spiegel E A. Theor. Comput. Fluid Dyn., 2010, 24: 77

(中国科学院物理研究所 翁羽翔 编译自 Tohn S. Wettlaufer. *Physics Today*, 2011, 5: 66, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)