

非线性对流斑图

方尤乐*

北京大学物理学院 学号: 2000012416

贝纳对流现象与非线性动力学有关, 是研究耗散结构理论的重要系统。本实验通过控制 2mm 和 4mm 薄层去离子水的上表面下表面温度差, 通过阴影法, 观察非线性对流斑图从无到有的涌现, 而后从稳定到失稳湍流的过程, 并借助图像定性地分析了系统相应结构的特征。

关键词: 对流斑图、耗散结构、贝纳对流、非线性动力学

I. 引言

自然界和人们的生活中充斥着不可逆过程, 但科学地研究这样的过程却姗姗来迟。19 世纪克劳修斯等人提出热力学第二定律, 指出孤立系统的熵永不减小, 最终将达到极大值, 即热力学的平衡态。然而自然界存在着丰富的自组织现象, 由局域的相互作用、从无序初态出发, 自发地产生出更大尺度上的有序结构。例如结晶过程 (如冰晶形成), 化学振荡 (如碘钟), 生命过程 (如进化, 蛋白质的合成与折叠) 等等, 这些现象与热力学第二定律暗示的无序演化相反。基于此, 普利高津于上世纪 60 年代发展出了耗散结构理论, 并于 1977 年获得诺贝尔化学奖。[1]

耗散结构理论表明, 当开放系统偏离平衡达一定程度时, 系统将会出现分岔行为, 此后系统将离开原先无序的热力学分支, 发生突变进入到一个全新的稳定有序状态, 即耗散结构。本实验观察的贝纳对流正是耗散结构的一个具体实例。

II. 实验装置

实验装置如图所示。本实验观察 $d = 2\text{ mm}, 4\text{ mm}$ 的对流层, 上、下表面均选用高热导率界面以使温度均匀分布。上表面水冷降温, 采用透明介质以便于观察; 底面为硅胶片加热的铜盘, 表面光洁作为反射面。

本实验通过阴影法观察对流斑图, 用准平行光正入射液层, 考察经底面铜盘反射的光线之光强分布。光强分布直接反映液层的折射率分布; 由费马原理, 光线向高折射率区域偏折, 高折射率区域将会聚光线而形成亮区。所以高折射率对应高密度, 即对流中的冷水下降区域。

III. 结果和讨论

实验中由加热电流控制温差 ΔT , 调整加热电流后等待 $10\text{ min} \sim 20\text{ min}$ 使系统达到稳恒态。室温条件下测得上表面温度与下表面温度不相同, 此时的上下表面温差可能

* eden@stu.pku.edu.cn; (86)15313960363

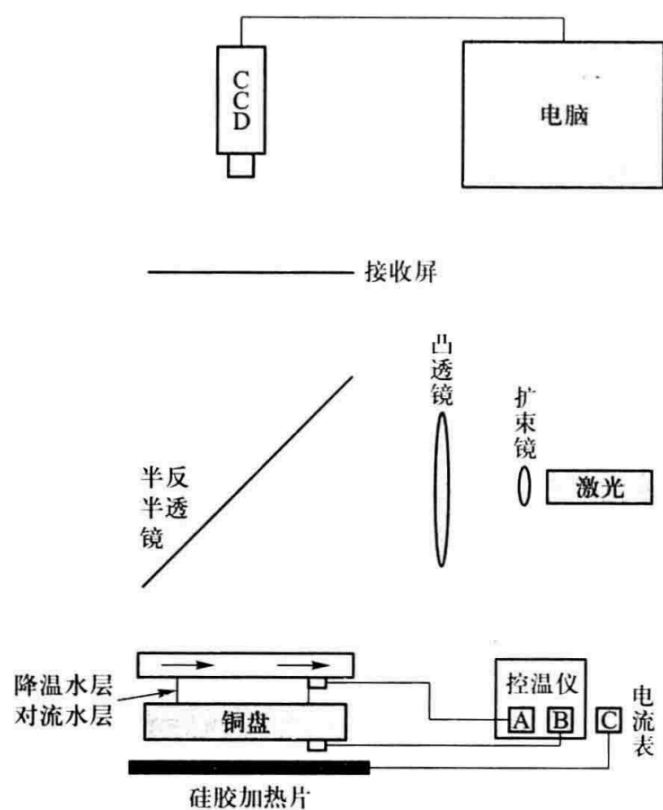


图 1. 实验装置示意图

来自于电路接触点的电阻，因此需要减去 ΔT 得到真实的温差。

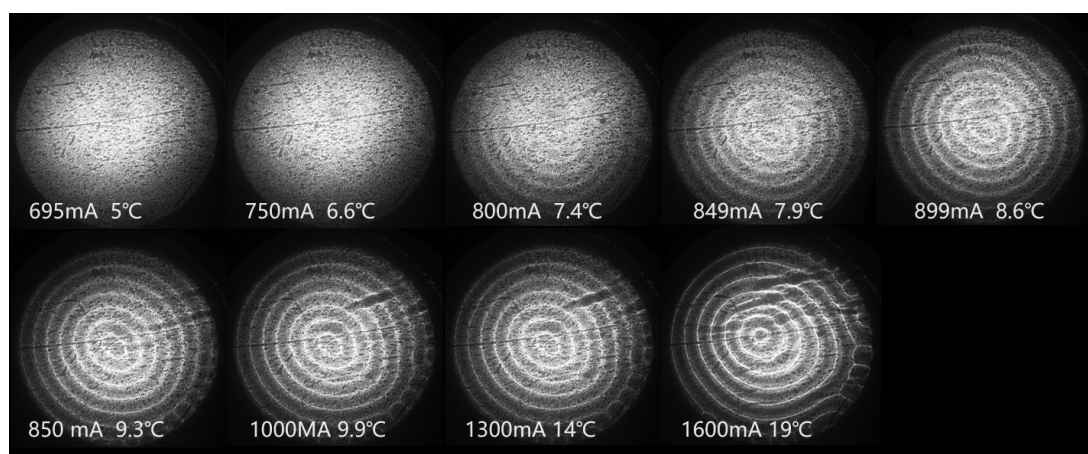


图 2. 2 mm 薄层的对流斑图

实验结果如图 2 和 3 所示，每张图的左下角有标注加热电流的大小和上下表面的实际温差。可以看到，当温差较小时，没有对流斑图，图像中没有明显特征。当温差过一个临界值后，对流斑图开始出现，且斑图的对比度随温差的增大而增强。对于 2 mm 薄层，温差的临界值约为 7°C ；4 mm 薄层，温差的临界值约为 3°C 。出现斑图的临界温差降低，是因为 4 mm 薄层在 z 方向上的范围增大，由瑞利数 $Ra \propto d^3 \Delta T$ 和临界条件 $Ra = R_c$ ，所以临界温差降低为原来的 $1/8$ 倍。实验观察得到的临界温差降低程度不

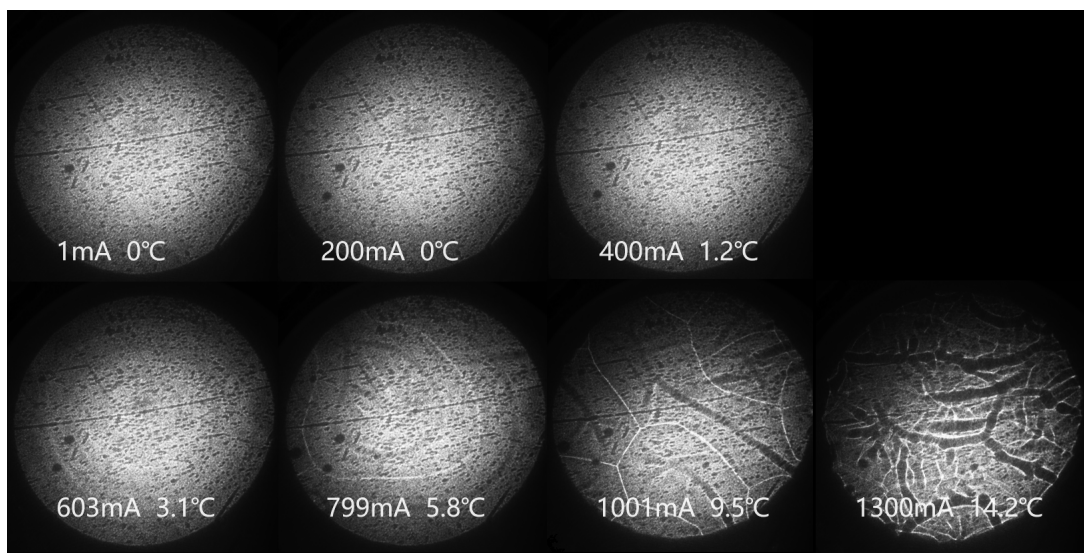


图 3. 4 mm 薄层的对流斑图

如 $1/8$ 那么显著，可能是由于上述的理论计算是在无限大平面条件下做的计算，和实验条件中有限大圆盘的情况有所不同。此外，4 mm 薄层的斑图原胞比 2 mm 的对流斑图元胞的尺度更大，耗散结构破坏也出现得更糟。如 3 中最后两张图中，大元胞裂解为小元胞以维持耗散结构的稳定性。预计继续升温，斑图会彻底崩溃出现不断变换的湍流。

IV. 结论

本实验通过考察耗散结构的经典实例：贝纳对流斑图；实验中比较了 $d = 2\text{ mm}$, 4 mm 薄层去离子水的上下表面温差，观察分析了斑图从无到有至破坏的过程，认识并检验了耗散结构的基本特征，对耗散结构理论有了更直观的理解。

致谢

感谢周路群老师的细致指导，尤其是老师关于耗散结构和非线性动力学的讲解对本人带来了很大启发；感谢合作者汪奕程同学的工作和帮助。

[1] 吴思诚、荀坤. 近代实验物理 [M]. 高等教育出版社, 2015.

附录 A: 思考题

1. 随着温差的升高, 可看到黑白结构的出现, 黑白区域如何对应水层的流动情况?

黑白结构的出现是由于水层中形成稳定有序的流动。黑色区域对应着水层中的上升流, 白色区域对应着水层中的下降流。因为下降流密度较大, 折射率较高, 光线被聚焦, 所以看起来比较亮; 黑色区域的密度较小, 折射率较低, 光线被发散, 所以看起来比较暗。

2. 斑图出现的临界点如何确定? 如何根据所观察到的现象确定临界点?

实验通过加热电流控制温差, 逐步增大温差, 当能观察到略微的明暗交替, 稳定的元胞出现后, 可以确定斑图出现。此时对比度较小是因为斑图明暗区域之间的对流较弱, 上升流和下降流的密度差异不大, 所以折射率差异不大, 对比度较低。

3. 当水层换成 4 mm 时, 考虑临界点会如何改变? 并注意实验过程中参数的选择。

临界点会变小, 是因为 4 mm 薄层在 z 方向上的范围增大, 由瑞利数 $Ra \propto d^3 \Delta T$ 和临界条件 $Ra = R_c$, 所以临界温差降低为原来的 $1/8$ 倍。实验观察得到的临界温差降低程度不如 $1/8$ 那么显著, 可能是由于上述的理论计算是在无限大平面条件下做的计算, 和实验条件中有限大圆盘的情况有所不同。

4. 如何确定斑图的空间特征尺度?

测量斑图中相邻两条亮条纹之间的垂直距离。

5. 斑图的空间特征尺度与对流水层厚度的关系如何?

斑图水平尺度大致正比于对流水层厚度 d , 这可以由 [1] 中的稳定解公式得到。