

近代物理实验报告

实验 10-1: 非线性热对流斑图

姓名: 付大为
学号: 1800011105
邮箱: fudw@pku.edu.cn
近代物理实验 (II)
(2022, 春季学期)

北京大学
物理学院
2018 级 1 班

2022 年 4 月 10 日

摘要

热对流是自然界中常见的现象，具有通常所熟知的“热对流上升，冷流体下降”的流动基本特征。最简单的例子就是盛水容器底部加热所观测到的热对流和沸腾现象。因为热力分布的不均匀，造成了流体中的温差，而温差又可引起流体的密度差，于是在重力场中相应地出现了阿基米德浮力，最后驱动热对流的产生。1900年，贝纳对具有自由面-固壁底层的流体薄层进行了热对流实验，观测到各种对流图形。耗散结构理论的提出使得人们对此类问题有了更系统更深入的认识。

本实验通过观察 Rayleigh–Bénard 对流现象的产生、发展和演化过程，了解耗散结构理论及非线性动力学的基本内容。具体而言，实验中通过控制 2 mm, 4 mm 薄层去离子水的上下表面温差，观察到了非线性对流从无到有、从稳定有序到失稳湍流的转变过程，并借此图像定性地分析了系统相应结构的特征。

关键词：热对流，非线性斑图，耗散

目 录

1 引言	4
2 理论	5
3 实验	6
3.1 实验仪器	6
3.2 简要实验步骤	6
4 结果及讨论	7
4.1 观察 2mm 圆环的厚度水层上斑图随温差增加的状态演化	7
4.2 观察 4mm 圆环的厚度水层上斑图随温差增加的状态演化	11
5 结论	15
6 致谢	15

1 引言

自然界中存在丰富的自组织现象，即由局域的相互作用、从无序初态出发，自发地产生出更大尺度上的有序结构。常见的例子有热对流结构（如大气环流），结晶过程（如冰晶形成），化学振荡（如碘钟），生命过程（大至进化，小至蛋白质的合成与折叠）等等。从对称性的角度来看，自组织现象往往与所谓自发对称性破缺密切相关；这一观点在理论物理当中十分关键，它描述了统一理论到各种相互作用的过渡，如电弱（electroweak）理论到电、弱相互作用的分离过程。

由于考虑的往往是开放系统，上述现象与热力学第二定律暗示的无序演化恰好相反。虽说上述自组织现象往往可以通过具体的动力学加以分析，人们更希望以一种统一的语言对上述规律加以描述。正是基于此，Ilya Prigogine 于上世纪 60 年代发展出了耗散结构（dissipative structure）理论，这一工作于 1977 年获得 Nobel 化学奖。

据教材，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，此即耗散结构；若将系统拉开到离平衡态更远的地方，系统可能出现更多新的稳定有序状态。理论指出，系统从无序状态过渡到耗散结构有两个必要条件：

1. **系统必须开放**，与外界进行物质或能量交换；
2. **系统必须远离平衡**，突破近平衡的线性动力学而采用非线性动力学。

动力学上，在系统的非线性效应很小时，系统内部出现的随机涨落会衰减，但当系统的非线性效应不可忽略时，系统内部的产生的随机涨落会逐渐变大，自组织后形成稳定的耗散结构。

本实验观察的 Rayleigh–Bénard 对流正是耗散结构的一个具体实例。对流由薄液层的上下温差驱动，在突破静态的稳定临界条件时出现；此时通过阴影法可观察到有序的斑图。当温差过大时，耗散结构崩溃而被湍流所取代。本实验通过观察对流版图的形成与演化，以初步了解非线性动力学的基本特征，同时检验耗散结构的上述特性。

2 理论

研究在上下相隔 d 的两个平面之间所夹住的一薄层液体中的热对流现象. 上下两边界为水平, 温度分别维持为 T 和 $T + \Delta T (\Delta T > 0)$. 这一热对流系统满足 Boussinesq 条件, 相应的热对流基本方程组和边界条件如下

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = g\alpha T \hat{z} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \gamma \nabla^2 \vec{V} \\ \nabla \cdot \vec{V} = 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \theta = \kappa \nabla^2 T \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T(z = -d/2) = T + \Delta T \\ T(z = d/2) = T \\ \vec{V} = 0, z = \pm d/2 \end{cases} \quad (2)$$

对于这一定解问题可以做线性稳定性分析, 通过对定态解施加围绕, 讨论微扰的线性发展.

理论推导给出的结果指出, 参数 R 瑞利系数

$$R = \frac{g\alpha d^3 \Delta T}{\kappa \gamma} \quad (3)$$

是决定系统非线性特性的重要参量. 数值计算结果则给出, R 存在临界值

$$R_c = 1707.76, \alpha_c = 3.117 \quad (4)$$

即是说, 当系统的条件可以满足 $R < R_c$ 时, 系统出现的随机扰动噪声会随时间演化消失, 从而不会出现非线性对流现象; 而系统的条件满足 $R > R_c$ 时, 系统出现的随机扰动的非线性效应将不会能够忽略, 从而将会出现非线性对流现象与非线性斑图.

3 实验

3.1 实验仪器

- CCD
- 电脑
- 接收屏
- 半反半透镜
- 凸透镜
- 扩束镜
- 激光
- 铜盘
- 硅胶加热片
- 控温计
- 电流表

3.2 简要实验步骤

分为以下几个步骤:

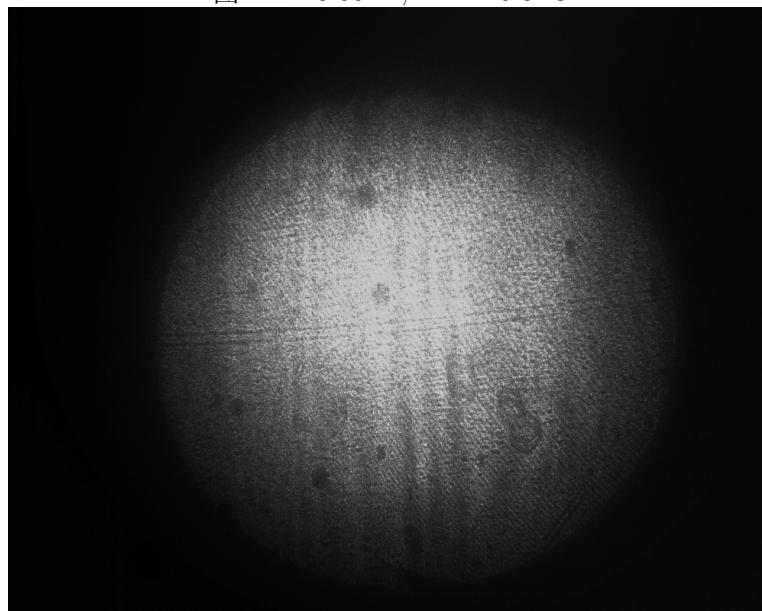
- ① 调整光路, 使得接收屏上出现圆形红色图案. 并开启电脑, 进入 winXP 系统, 打开桌面上软件, 观察接收屏上的图像
- ② 接通水泵的开关, 确定上层降温水层流动正常, 观察出水口是否有水流出
- ③ 确定待观测对流水层 (置于铜盘和蓝宝石片之间的用黑色圆环, 厚为 2mm, 固定的水层) 已加好
- ④ 开启温控仪, 温控仪 A 的数字显示对流水层上表面的当前温度, 即室温. 温控仪 B 的数字显示为对流水层下表面温度, 未加热时应为室温
- ⑤ 开启制冷机、控制水箱内水温、较室温略低即可, 此温度一致控制不变, 保持恒定
- ⑥ 改变硅胶片加热电流, 从而改变温度差, 观察并记录温差和相对应的稳定斑图
- ⑦ 重置 4mm 圆环的厚度水层, 观察版图随温差增加的状态演化

4 结果及讨论

4.1 观察 2mm 圆环的厚度水层上班图随温差增加的状态演化

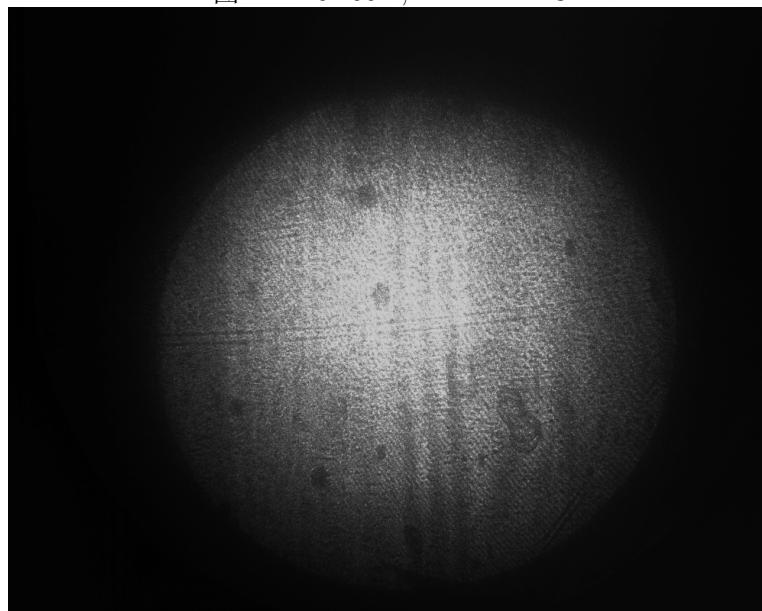
加水后开始时斑图如下图1所示结果

图 1: $I=0.001A$, $\Delta T = 0.8^{\circ}C$



接着演化到如下图2所示结果

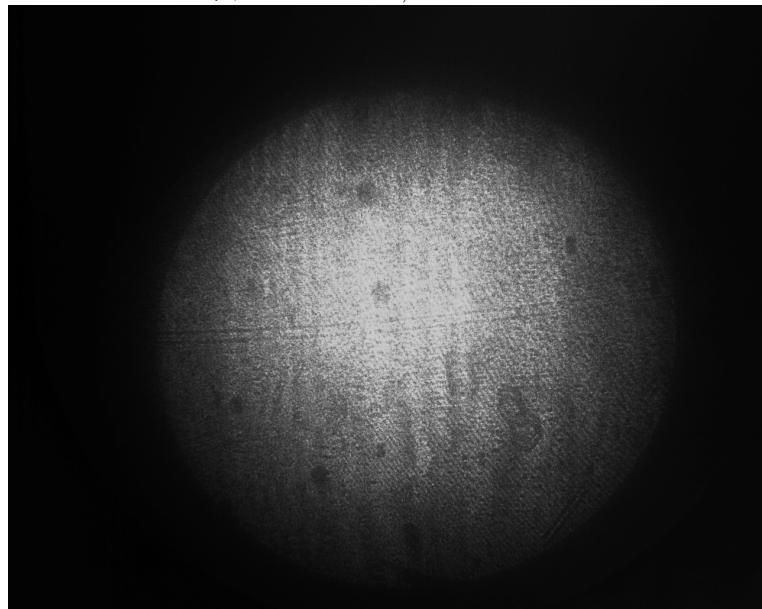
图 2: $I=0.199A$, $\Delta T = 1.2^{\circ}C$



以上两张图可以看出还没有任何斑图出现

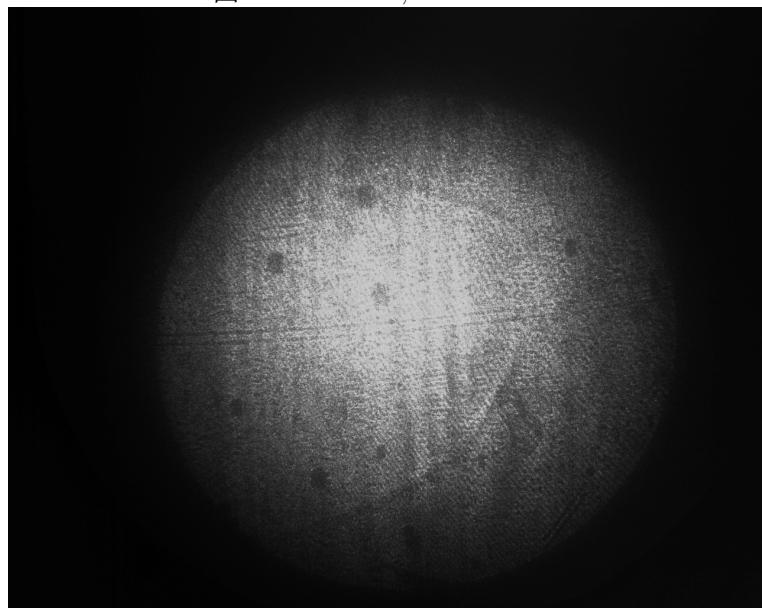
接着演化到如下图3所示结果

图 3: $I=0.698A, \Delta T = 4.1^{\circ}C$



接着演化到如下图4所示结果

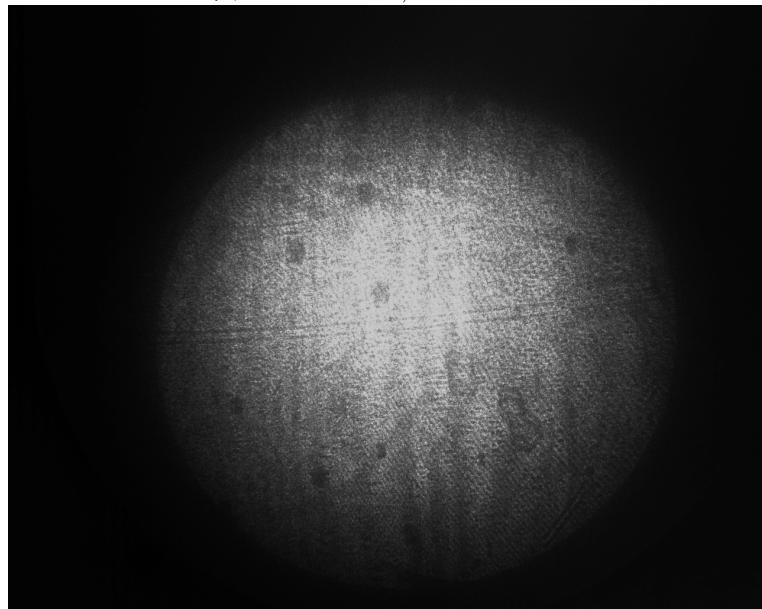
图 4: $I=0.751A, \Delta T = 5.3^{\circ}C$



以上两张图可以看出仍然没有任何斑图出现

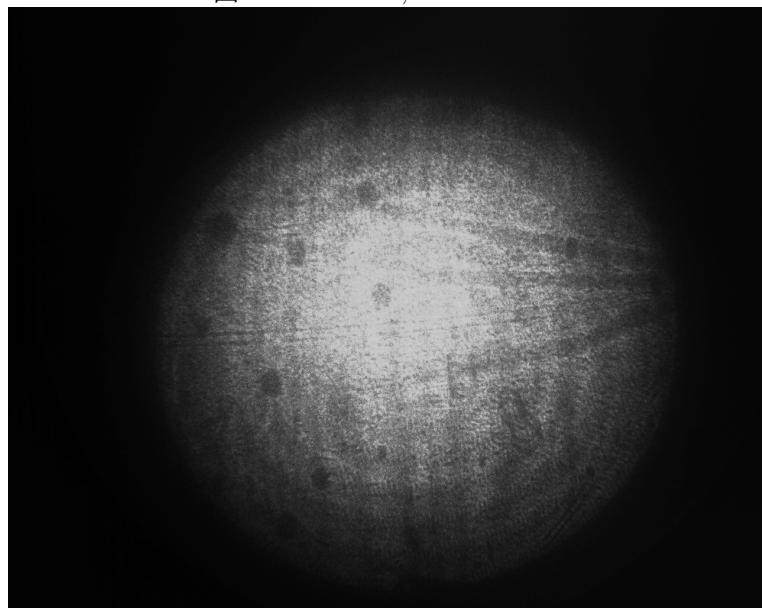
接着演化到如下图5所示结果

图 5: $I=0.800A, \Delta T = 6.1^{\circ}C$



接着演化到如下图6所示结果

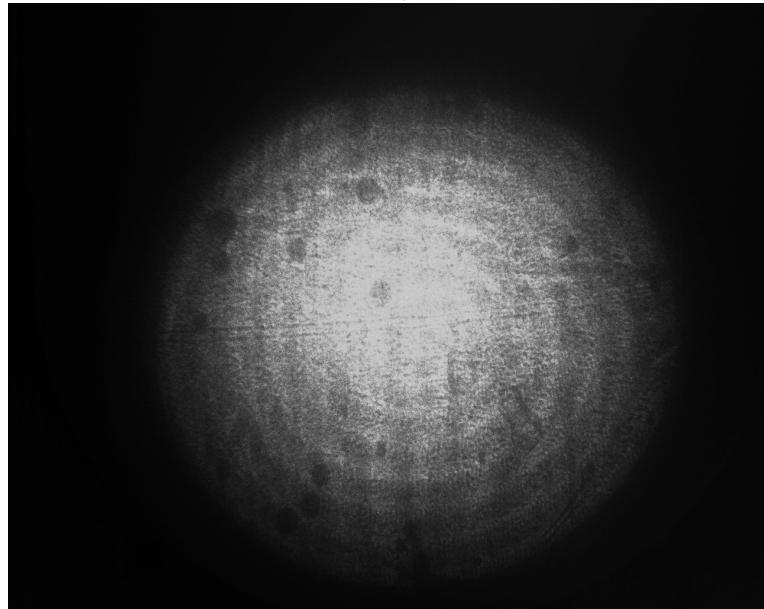
图 6: $I=0.846A, \Delta T = 6.7^{\circ}C$



以上两张图可以看到已经接近斑图出现的临界区域

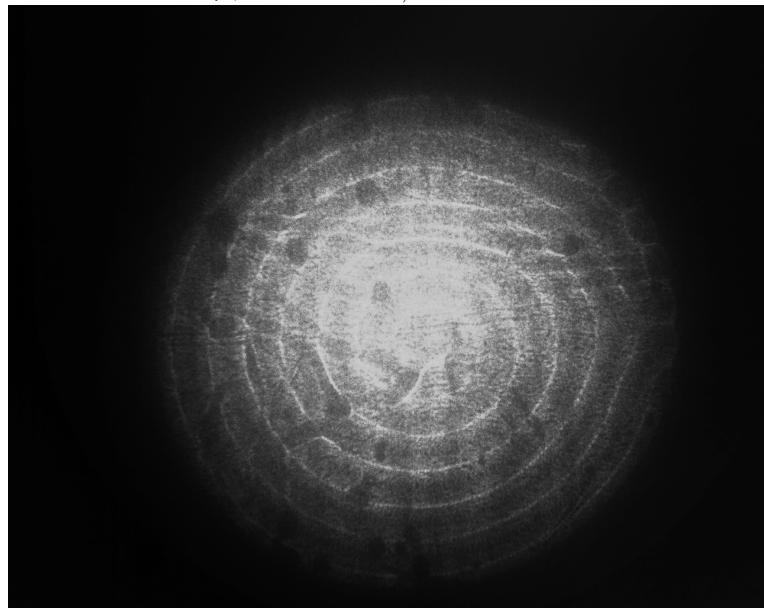
接着演化到如下图7所示结果

图 7: $I=0.903A, \Delta T = 7.2^{\circ}C$



接着演化到如下图8所示结果

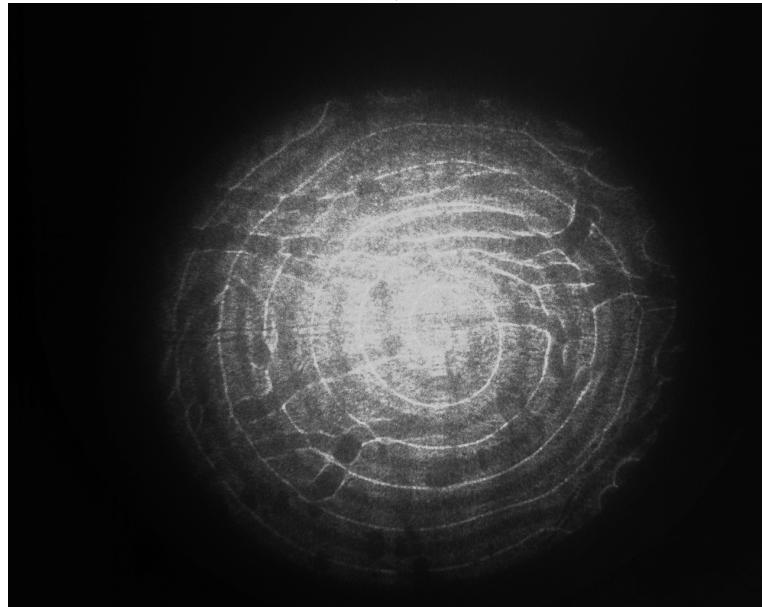
图 8: $I=1.196A, \Delta T = 9.9^{\circ}C$



以上两张图可以看到较清晰的斑图图样出现

接着演化到如下图9所示结果

图 9: $I=1.490A$, $\Delta T = 13.3^{\circ}C$

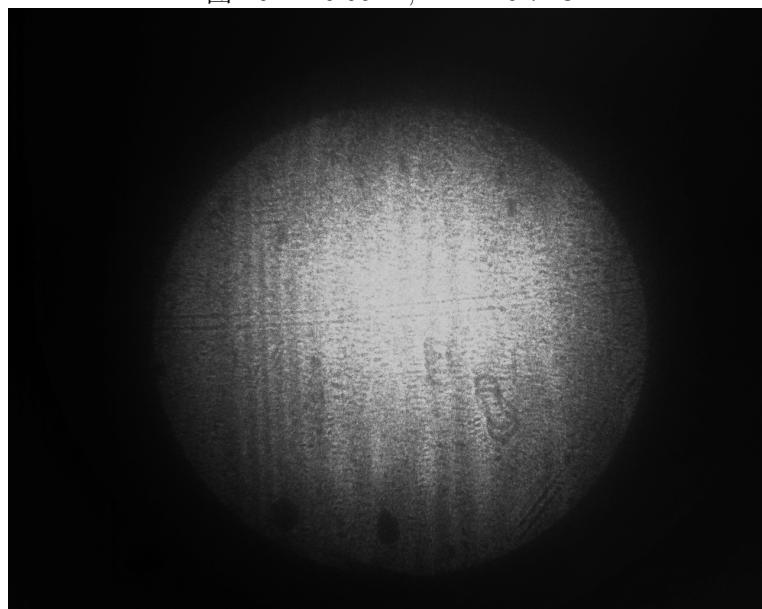


这张图可以看到非常清晰的斑图图样出现, 此时的上下表面温度差已经超过了斑图出现的阈值

4.2 观察 4mm 圆环的厚度水层上斑图随温差增加的状态演化

加水后开始时斑图如下图10所示结果

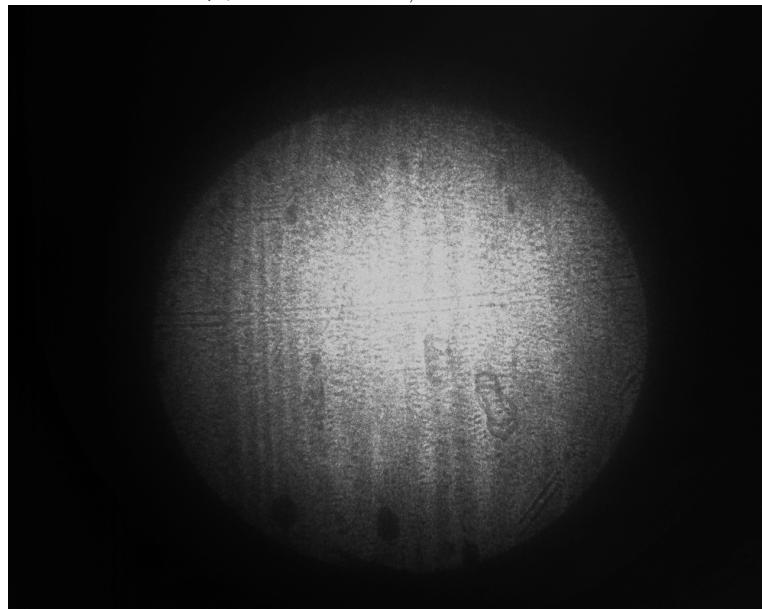
图 10: $I=0.001A$, $\Delta T = 0.7^{\circ}C$



这张图可以看出还没有任何斑图出现

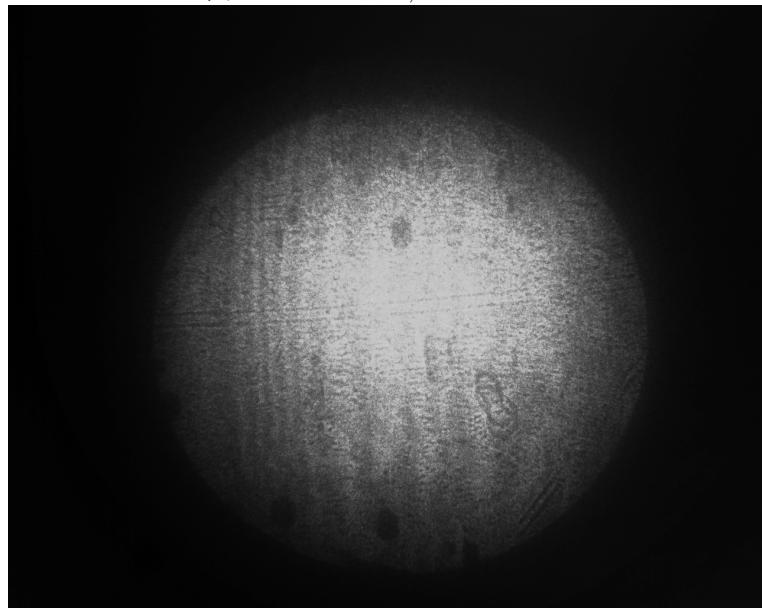
接着演化到如下**图11**所示结果

图 11: $I=0.203A$, $\Delta T = 0.7^{\circ}C$



接着演化到如下**图12**所示结果

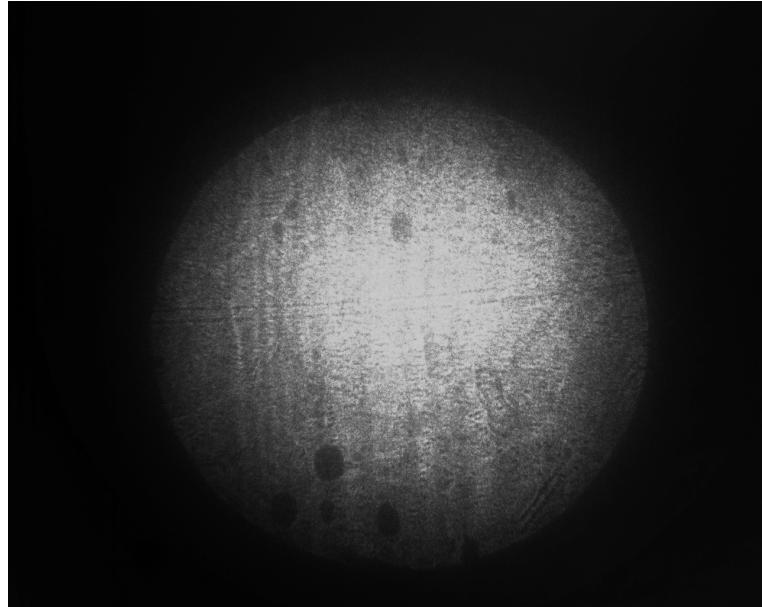
图 12: $I=0.599A$, $\Delta T = 2.2^{\circ}C$



以上两张图可以看出仍然没有任何斑图出现

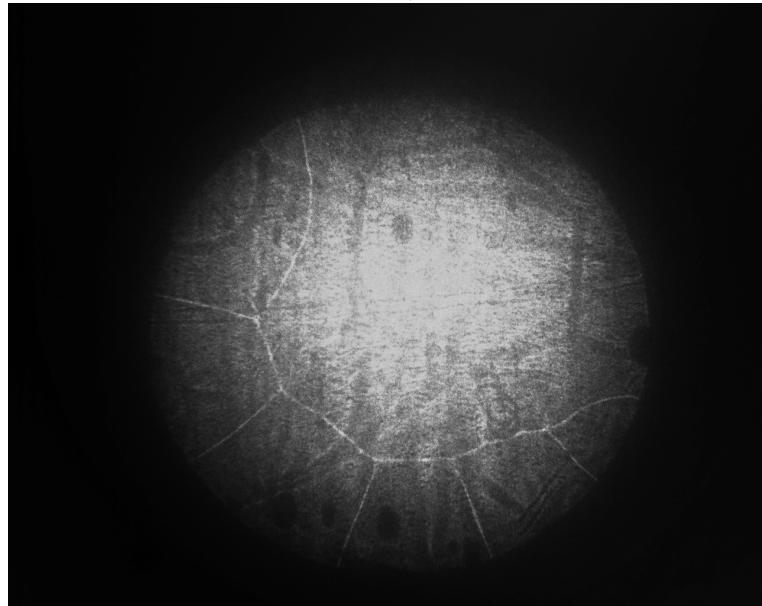
接着演化到如下**图13**所示结果

图 13: $I=0.793A$, $\Delta T = 3.5^{\circ}C$



接着演化到如下**图14**所示结果

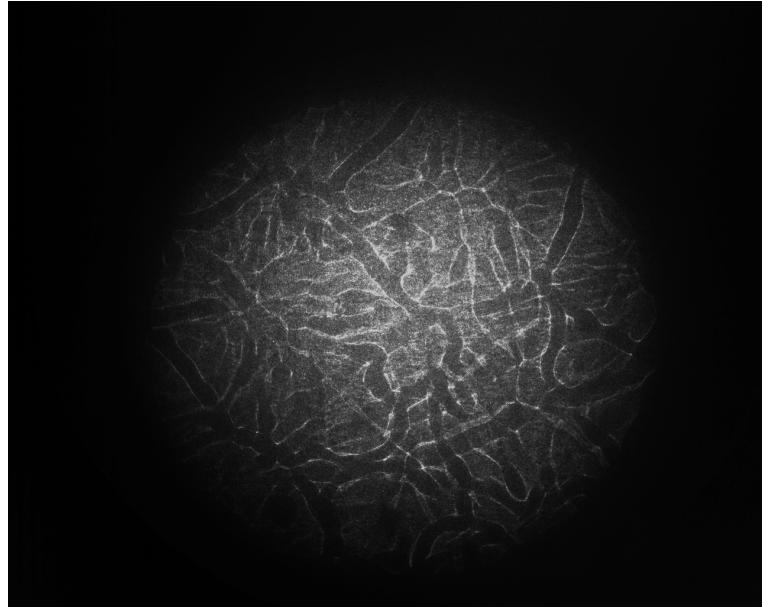
图 14: $I=1.092A$, $\Delta T = 5.4^{\circ}C$



以上两张图可以看到已经接近斑图出现的临界区域，并且有初步清晰的斑图出现

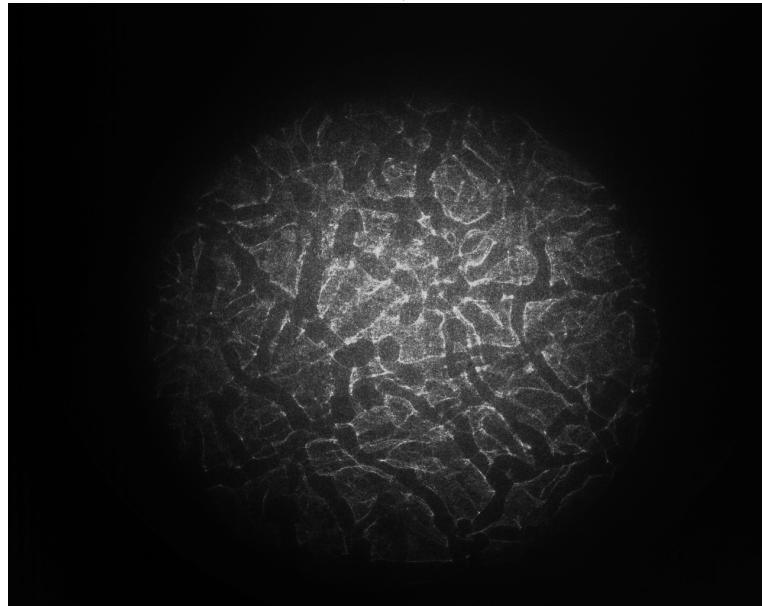
接着演化到如下图15所示结果

图 15: $I=1.486A$, $\Delta T = 9.2^{\circ}\text{C}$



接着演化到如下图16所示结果

图 16: $I=1.787A$, $\Delta T = 11.8^{\circ}\text{C}$



以上两张图可以看到非常清晰的斑图图样出现, 此时的上下表面温度差已经超过了斑图出现的阈值

5 结论

本实验通过考察耗散结构的经典实例:Rayleigh–Bénard 对流斑图;实验中比较了 $d = 2 \text{ mm}, 4 \text{ mm}$ 薄层去离子水的上下表面温差, 观察分析了斑图形成至崩溃的过程, 认识并检验了耗散结构的基本特征, 初步了解了非线性动力学的分析手段。

6 致谢

感谢老师在实验中的悉心指导.

参考文献

- [1] 吴思诚, 荀坤. 近代物理实验. 高等教育出版社, 北京, 第 4 版 edition, 2015.
- [2] Jack L Lambert and Gary T Fina. Iodine clock reaction mechanisms. *Journal of Chemical Education*, 61(12):1037, 1984.
- [3] Ilya Prigogine. Time, structure, and fluctuations. *Science*, 201(4358):777–785, 1978.