

## 桶里的水滴

布朗大学的一个研究实验室正在用一台 Phantom 高速摄像机研究小液滴是如何从液槽中反弹的 — 这是流体力学中的一个重要现象。

布朗大学的 Daniel Harris 博士正在用 3D 打印设备、尖端直接数值模拟 (DNS) 和新型数学模型进行自己设计的实验来研究液滴如何是在液体表面上反弹的。他的工作对从喷墨打印到植物病理学等各种应用都有意义。

## 了解液滴回弹

Harris 是布朗大学工程学助理教授。他的实验室名为 **Harris 实验室**，在数学和数值建模技术的支持下进行流体力学和软物质方面的实验。该实验室目前的研究领域之一是液槽中液滴在表面上反弹的低能量区域，这一区域被称为惯性毛细管区。

据 Harris 介绍，了解液滴在液体表面的反弹方式对很多工业应用都有意义。“例如，在喷墨打印中，有时你希望墨滴粘住，而在其他情况下，你可能希望墨滴反弹。”另一个重要应用是植物病害传播。“雨滴对叶片的影响被证明是植物间病原体传播的主要机制。”

当液滴与装有同一液体的液槽接触时，流体惯性、表面张力、重力和粘度等因素会导致在液滴和流体界面之间发生非常复杂的流体力学相互作用。Harris 说：“我们的研究重点是惯性毛细管区，在这个区域，惯性和表面张力的效应大于粘性和重力效应。”

作为这项研究的一部分，Harris 和他的实验室开发了一种**准势模型**，该模型可以准确预测撞击液滴的轨迹、液滴的形状以及撞击过程中在液槽界面上产生的波浪。他们利用实验数据和 DNS 技术验证了这一数学模型，然后在各种流体条件下使用了该模型。



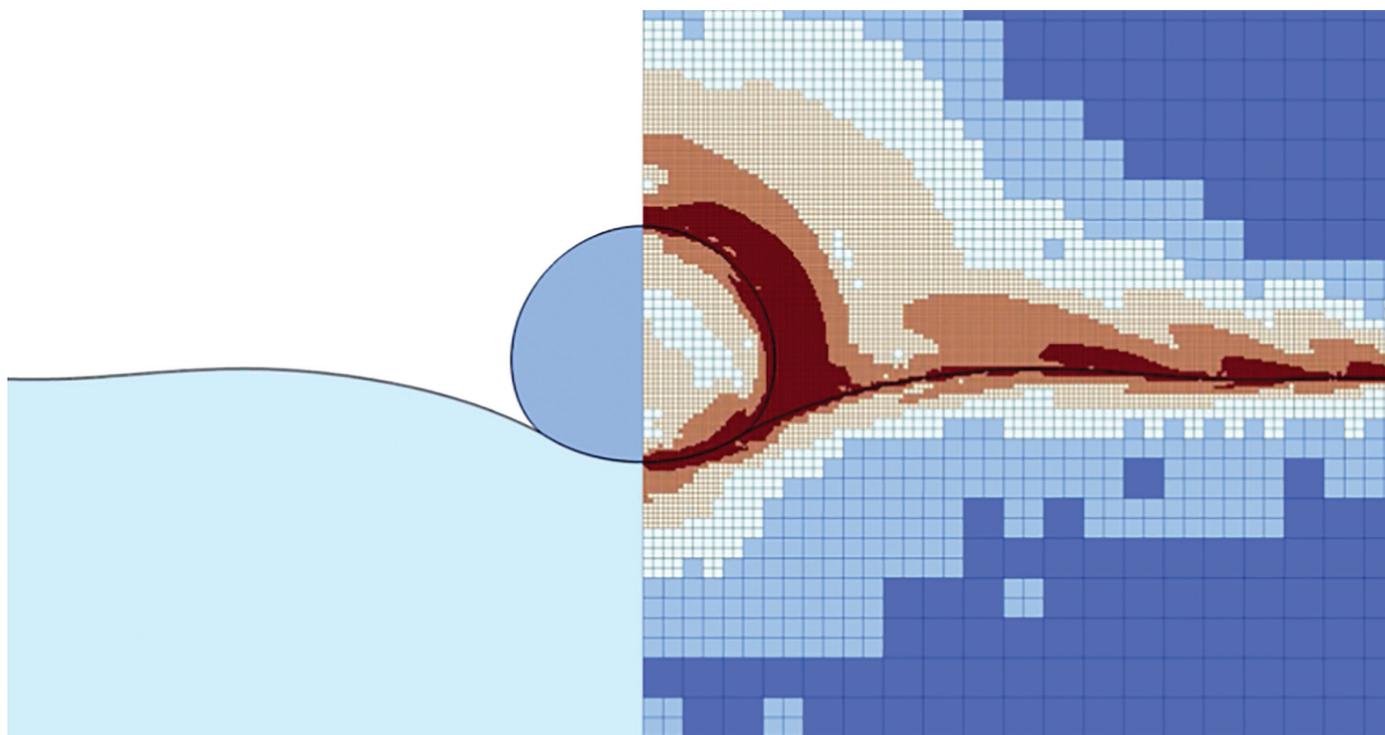
液滴实验的高速镜头

## 实验装置

为了收集实验数据，Harris 和他的团队使用两种低粘度液体进行了液滴撞击实验：去离子水和粘度为 5 厘沱 (cSt) 的硅油。他们用 3D 打印技术制造了一个按需滴液电发生器，以产生毫米大小的液滴。据 Harris 称，这种发生器类似于“大型喷墨打印机”，它包括一个在外加电压的作用下会发生形变的压电盘，通过一个小喷嘴喷出液体。当液体流出喷嘴时，压电盘松弛，夹断液滴并将其滴入液槽中。Harris 将滴液发生器安装在一个用 3D 打印机打印出来的平台上，他可以通过升降平台来改变滴液的速度。发生器正下方是液槽，长宽均为 70 毫米，深度为 50 毫米。

Harris 将一台 Phantom MIRO LC311 高速摄像机放置在与液槽持平的位置,以拍摄空气-水界面。他以每秒 10,000 帧 (fps) 的速度记录了滴液实验,使用的曝光时间为 99.6 微秒 ( $\mu\text{s}$ )。额外的照明是由 LED 背光提供的。

Harris 说:“我们从侧面观察液槽界面,记录液滴下落、撞击液槽并反弹的过程。”“然后,我们使用后处理软件跟踪液滴的速度,计算撞击速度,并研究速度与各种流体参数之间的函数关系。”其中一些参数包括液滴半径、流体密度、表面张力、运动粘度、重力加速度和雷诺数,即流体流动中惯性力与粘性力之比。



液滴的直接数值模拟细节

## PHANTOM MIRO 和 VEO 高速摄像机

为了记录这些滴液实验,Harris 使用了一台 Phantom MIRO LC311 高速摄像机,这是一款适合实验室使用的 100 万像素 (Mpx) 系统,在全分辨率下可达到 3,200 帧/秒。此后,他的实验室又购买了一台 Phantom VEO 1310 型摄像机,这是一台结构紧凑、坚固耐用、感光度高、帧速率更高的高速摄像机。这款多功能摄像机可在 120 万像素的全分辨率下以超过 10,800 帧/秒的速度拍摄图像,其众多功能可进一步简化 Harris 的工作流程,包括可互换的镜头接口、机上控件、各种触发选项以及用于快速数据下载的万兆以太网。Harris 实验室致力于在艺术和科学之间搭建桥梁,而彩色 VEO 1310 的动态范围超过 60 dB,读取噪声为  $10 e^-$ ,可以帮助他们实现这一目标。因此,即使在光线不足条件下,他们也能获得出色的视频质量。

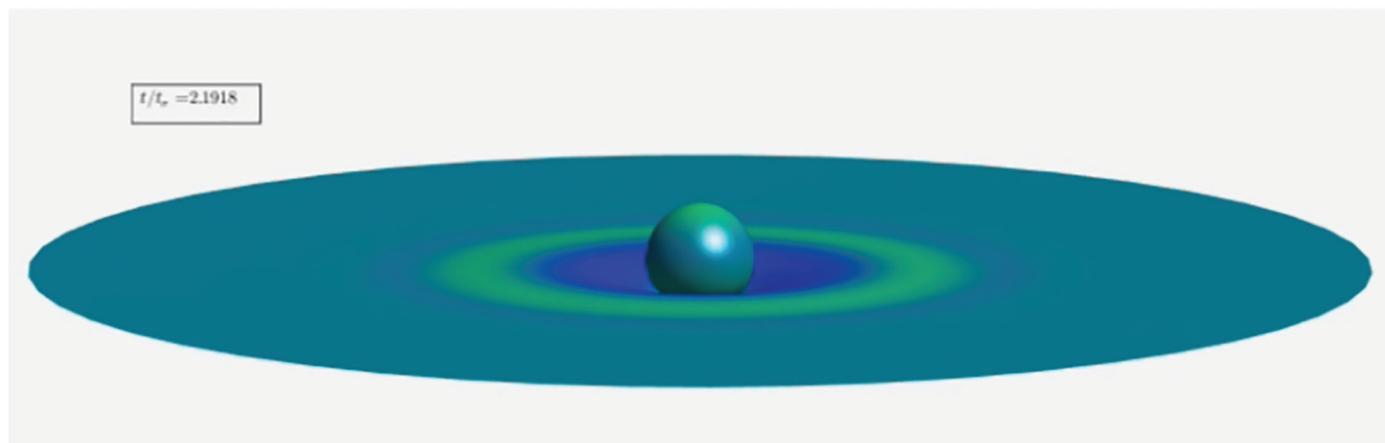
## 恢复系数

Harris 对恢复系数 (COR) 特别感兴趣,它是两个碰撞物体的最终速度与初始速度之比。在这种情况下,COR 描述的是液滴与液槽接触后所保留的能量。据 Harris 称,这一比值始终保持在 30% 左右。“能量被传递到液槽中。我们的模型可以帮助我们理解为什么总是保持在这个数字左右。”

Phantom MIRO 和 VEO 1310 等摄像机在此类液滴撞击实验中表现出色,原因有以下几点:

- 这些小液体的相互作用发生得非常快,通常在几毫秒内发生。“标准摄像机无法在如此短的时间内捕捉我们所需的细节,”Harris 说。由于 VEO 1310 在全分辨率下的最大帧速率是 MIRO 的三倍多,Harris 认为帧速率更高的摄像机能够为实验室未来的液滴实验提供有价值的信息。
- 使用 MIRO LC 摄像机的自动控制套件,Harris 可以将液滴产生过程与高速拍摄过程同步,从而以更快的速度和更高的效率完成实验。再有,VEO 1310 摄像机的万兆以太网功能将在 Harris 下载大型图像文件时为他节省时间。
- 这两款 Phantom 摄像机都配备了彩色传感器,使 Harris 能够用彩色拍摄反弹的液滴。他说:“这种功能对我们非常重要。”“我们的实验室非常热衷于探索科学与艺术之间的联系,因此我们更喜欢用彩色观察我们要研究的现象。Phantom 摄像机具有出色的彩色功能,这使我们能够做到这一点。”

Harris 继续说:“我很想知道我们还可以将更新款的 VEO 1310 高速摄像机用在哪些地方。”“在我们在今后的研究中增加流体实验的复杂性后,它将成为我们的宝贵工具。”



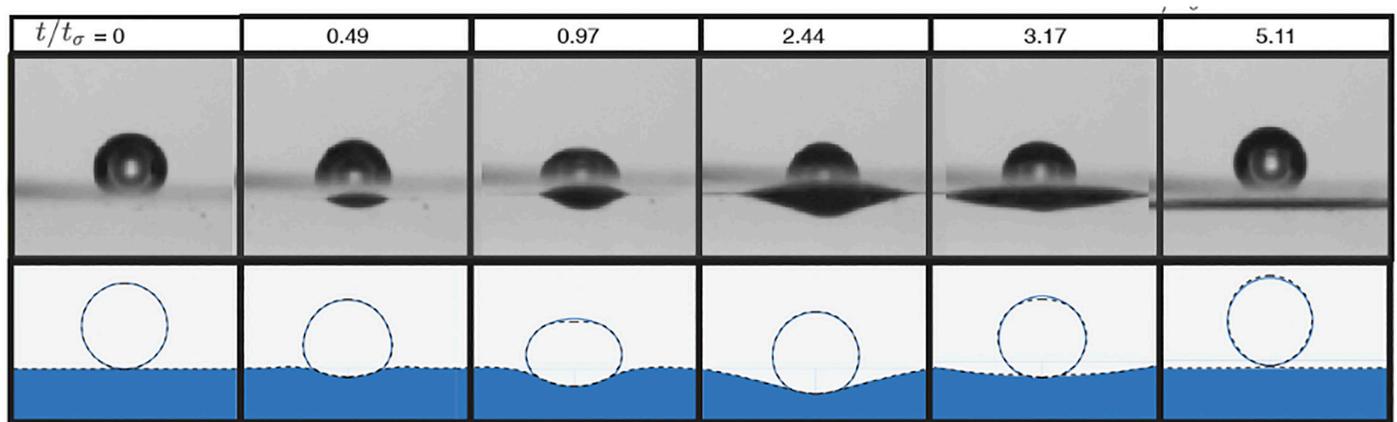
液滴的准势模型

## 验证数学模型

Harris 和他的团队将他们测得的液滴轨迹和其他反弹参数与他们利用准势模型和 DNS 技术得出的预测结果进行了比较, 结果证明他们的模型能够准确预测包括恢复系数、接触时间和最大表面挠度在内的流体变量。该模型可以帮助研究人员进行高效计算, 采用标准的现成算法, 可在几分钟内解析多次反弹。

Harris 实验室的准势模型将继续为他们今后进行的毛细管回弹研究提供信息。“现在, 我们可以开始对其他流体情况进行预测, 或使用不同的参数, 扩大我们的研究范围。”目前, Harris 正在寻求扩展实验室研究, 在更现实的条件下进行实验。他说:“迄今为止, 我们所做的大部分工作仍然是在理想条件而非现实条件下进行的。”“我们希望慢慢增加复杂性, 以便将研究成果应用到更多的工业环境中。”

Harris 实验室最近获得了一笔拨款来研究移动流化床的倾斜或非垂直影响。Harris 说:“我想看看我们的模型在在这种情况下是否仍然适用。”



实验、DNS 和准势模型中液滴形状的比较

要了解更多信息, 请访问: [www.phantomhighspeed.com](http://www.phantomhighspeed.com)。



某些 Phantom 摄像机需要出口许可证。有关更多信息, 请访问 [www.phantomhighspeed.com/export](http://www.phantomhighspeed.com/export)。