

无疑,这就是拓扑

(上海交通大学 钱冬 编译自 Jon Cartwright. *Physics World*, 2021, (6): 28)

对流体的崭新认识是固体物理学中最热门的课题之一。正如 Jon Cartwright 所报道的那样, 流体动力学中拓扑行为所产生的结果, 可能会远超我们对自然界和其他复杂系统(比如托卡马克核聚变反应堆)的理解。

如果要让一个固体物理学家说出最近 50 年来领域内的最大发现, 其回答无外乎高温超导体和拓扑材料。现如今, 拓扑研究已超出固体领域, 物理学家开始意识到它在流体动力学中可能发挥着重要作用。拓扑为我们理解自然和其他复杂人工体系, 如核聚变反应堆提供了新的数学方法。“拓扑提供了一种快速而直接的方法(在某些系统中)去判断波是否存在,” 布朗大学的理论学家 Brad Marston 说。

拓扑作为数学概念至少可追溯到 19 世纪, 它描述了在经过连续变换操作后, 物体中保持不变的属性。然而, 物理学家并没有立刻发现拓扑学的重要性。固体中发现的第一个拓扑特性是量子霍尔效应。1980 年德国物理学家 Klaus von Klitzing 发现了该效应。在量子霍尔效应中, 二维半导体处于外加垂直磁场中, 内部无法导电, 而边缘却可以很好地传导电子。两年之后, 英国理论学家 David Thouless 揭示了量子霍尔效应的拓扑本质。von Klitzing 和 Thouless 分别在 1985 年和 2016 年获得了诺贝尔物理学奖。尽管有了 Thouless 的洞察力, 但直到 21 世纪初, 随着理论预言并随后被实验证实的二维及三维拓扑绝缘体的出现, 人们对固体中拓扑态的兴趣才真正飞涨。

所有这些拓扑研究有一个共同

的特征, 它只针对固体物理, 或者至少是离散的、周期性的格点体系。到了 2017 年, 当布朗大学的 Marston 以及里昂大学的 Pierre Delplace 和 Antoine Venaille 从拓扑的角度研究了构成地球大气层和海洋的流体时, 一切都变了。

三位研究人员对赤道大气和海洋中某些不寻常的波特别感兴趣。这些波被限制在地球赤道, 持续时间长且只向东运动。他们注意到这些赤道波具有拓扑特征。首先, 地球大气和海洋的薄层可以近似为二维。其次, 空气和水中的分子就像量子霍尔效应中的电子, 受到垂直的科里奥利力作用, 使南半球的空气和水流顺时针偏转, 北半球则逆时针偏转, 在赤道上形成了一个自然的边界。有了这些要素, 就可以通过拓扑学快速地确定在赤道上应该存在长时间持续的波, 而不需要考虑地球气候和海洋系统的具体细节(图 1)。

但是有多少波呢? 所有的拓扑性质都对应一个特征整数值,

即第一陈数(first Chern number)。Marston 和同事们计算出的第一陈数等于 ± 2 , 这对应两种边缘模式。利用拓扑学, 不需求解波动方程, 就证明了赤道上应该包含两个单向的赤道波——开尔文和 Yanai 模式(Kelvin and Yanai modes)。这两种波会影响到地球海洋—大气系统中的厄尔尼诺-南方涛动(El Niño Southern Oscillation), 进而产生了重大的气候影响, 导致赤道上的国家发生

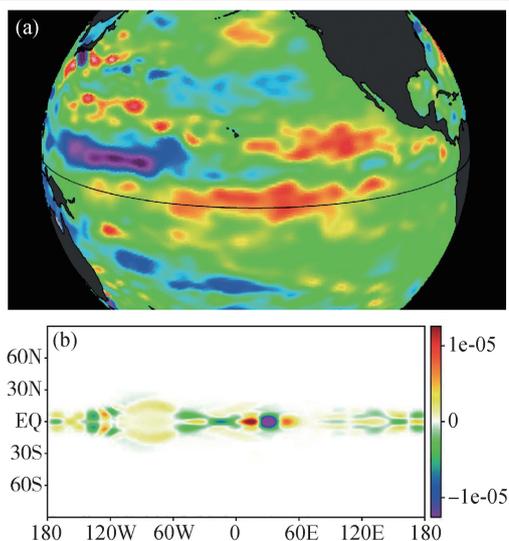


图 1 拓扑潮汐。地球物理学家多年来一直在研究赤道波——温暖的洋流脉冲, 它在调节地球气候方面起着重要作用, 但目前还不清楚这些波如何起源, 以及为什么会存在。Brad Marston 和他的同事们发现, 这些赤道开尔文波和 Yanai 波很可能具有拓扑起源。(a)由美国/欧洲 Jason-3 卫星于 2018 年 5 月拍摄的照片, 图中红色区域显示了一个下沉开尔文波, 沿着赤道向东移动; (b)图片显示了模拟的开尔文波。垂直坐标轴和水平坐标轴分别为纬度和经度, 颜色标度为温度

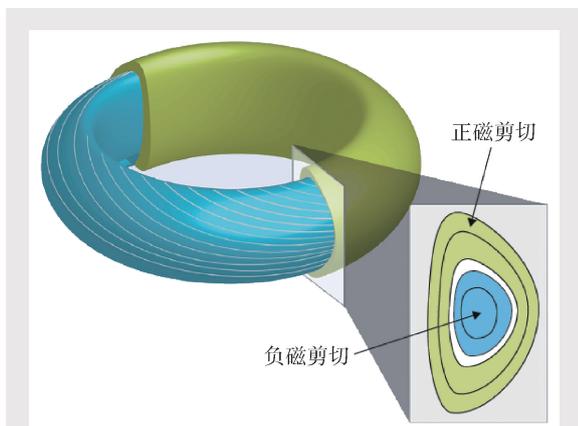


图2 环形拓扑结构。Marston、Parker及其同事们一直在研究磁场约束等离子体的拓扑性，例如在托卡马克内。这张图显示了托卡马克的环形结构和其中一个横截面。横截面中显示了几个嵌套的磁通面。每个磁通面由依赖于磁剪切的陈数来表征。正负剪切面用相反的陈数表示，具有不同的拓扑结构。拓扑波在相反面的边界处形成，拓扑相变发生在零剪切层处(白色区域)。未来，他们的工作可能用于精心定制和产生在核聚变器件中有用途的其他拓扑态

干旱或洪水灾害。

美国雪城大学 Christina Marchetti 小组探索了一种完全不同类型的流体系统——活性物质——中的拓扑性。这种物质由一些能够自我驱动的单位组成，例如自然界中的鸟群和细菌悬浮液等。活性物质通常在薄层内流动，这些薄层通常都有曲率。Marchetti 和同事们通过计算发现，活性流动和弯曲几何形状相结合支持出现拓扑波，这些拓扑波为集群内部数据信息的传输提供了高速通路。

但是 Marchetti 研究小组并没有考虑任何特定类型的活性物质。哈佛大学的 Suraj Shankar 表示，由于生物学非常复杂，现在还无法推断这种效应对特定系统的重要性。他同时指出，已知某些类型的活性物质确实含有波。例如，参与伤口愈合的细胞传递应力波，科学家相信这种波可能参与了引导组织的生长

并能保持其完整性，直到伤口完全愈合。鉴于伤口经常发生在身体的弯曲部位，Shankar 表示：“最终发现这些波具有拓扑特征也并非难以置信。”虽然利用活性物质开展实验非常困难，但是现在已经有了研究组在试图观察活性物质系统中显露的拓扑迹象。

越来越多的研究正在转向流体中的拓扑结构。英国巴斯大学的 Anton Souslov 小组发现，

在一个包含手性单元的活性物质系统中，可以设计出一种拓扑波能进入但不能流出的界面——这种现象可以用来制作完美的声音吸收器用于隔音。与此同时，里昂大学的 Delplace、Venaille 和 Manolis Perrot 利用拓扑学来预测新型被囚禁的声-重力波，也被称为兰姆波(Lamb waves)。他们说，对这种兰姆波的观测可以让我们了解遥远行星大气层层理结构中其他方法看不见的细节。

但从应用的角度来看，流体拓扑学中最迷人之处可能在于等离子体领域。Marston 和美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的等离子体物理学家 Jeff Parker、英国利兹大学的 Steven Tobias、美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Joshua Burby 合作，研究了托卡马克(tokamak)聚变系统。在托卡马克环形的类似甜甜圈结构的任意径向截面中，用等高线来表

示等离子体中的磁剪切(磁场改变方向的位置)。他们发现磁剪切从某个切片到其相邻切片由负变到了正，这表明存在陈数从+1变到-1的边界，边界上的离子将包含一个拓扑波(图2)。

事实上，等离子体实验物理学家早就知道这种波——被称为逆向剪切阿尔文本征模(reversed shear Alfvén eigenmodes, RSAEs)。这种波是一把双刃剑。一方面，它们与聚变反应的产物 α 粒子产生共振，导致 α 粒子及其相关能量在被用于聚变能量之前从被约束体中喷射出来。另一方面，它们的特征又能显露托卡马克中部等离子体磁场结构的细节，这些部位由于处于极端条件之下，很难用传统的手段进行探测。Parker、Marston 及其同事们回顾性地预测 RSAEs 的存在，虽然这并不会改变任何此方面的物理性质，但是，就像地球大气层和海洋系统中的赤道波一样，这一结果为托卡马克中涌现更多拓扑见解提供了诱人的前景。目前托卡马克只能限制等离子体几分钟到几个小时。

通过更多的研究，物理学家们是否有可能发现托卡马克环境能提供一种拓扑保护的核聚变状态？换句话说，一种可以永远维持的状态？“我想这还有很远的距离，但是理想如斯。”Parker 说，他认为这个目标类似于在量子计算中利用量子霍尔效应获得稳定的量子比特，也就是说，一个具有推测性但合理的目标。拓扑流体的物理研究才刚刚开始。考虑到其应用已经遍及到地球气候、活性物质，再到等离子体，谁知道接下来它又会照亮什么呢？