



## 力学所在磷脂单分子膜内反常扩散研究中取得进展

作者: 郑旭 2022-09-30 08:28

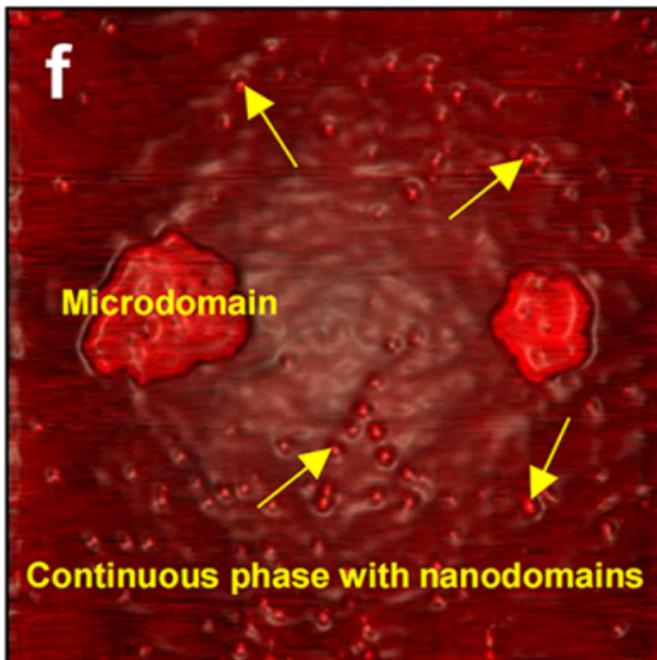
【放大 缩小】

磷脂分子膜(如细胞膜和肺表面活性剂膜)是生物体系普遍存在的组成部分。理解纳米颗粒在磷脂膜上的运动机理是研究吸入气溶胶颗粒侵入肺部、纳米药物输运、膜蛋白介导输运等问题的重要力学基础。传统的流动镶嵌模型(fluid mosaic model)强调磷脂分子膜的流动性, 将其视为无厚度的二维粘性流体膜。然而, 越来越多的研究表明, 磷脂膜内部存在复杂的各向异性结构, 这给磷脂膜流动性的理论描述带来了严重的挑战。经典的流体力学模型, 如Saffman-Delbrück(SD)线性模型和高阶HPW (Hughes, Pailthorpe, and White)模型均采用单一黏度描述粘性磷脂膜的流动性, 缺少对磷脂膜内结构的考虑, 往往被发现与实验结果相左。另一方, 通过测量嵌入颗粒的运动反推磷脂膜黏度的设想, 由于嵌入颗粒尺寸与膜厚相差较大且嵌入位置难以控制, 至今仍缺少可靠实验结果。迄今, 描述磷脂膜流动性及膜内纳米颗粒扩散等运动特征, 仍是悬而未决的重要科学问题。

中科院力学所非线性力学国家重点实验室微纳流动研究团队通过原子力显微镜AFM实验发现DPPC(Dipalmitoylphosphatidylcholine, 二棕榈酰卵磷脂, 是肺表面活性剂膜的主要成分)磷脂单分子膜上存在非均匀分布的纳米凝聚相岛域(condensed phase nanodomain)结构(图1)。以往研究认为, 由于相分离作用, 这类磷脂膜由DPPC分子聚集成的微米尺度凝聚相岛域(microdomain)与周围的DPPC流体连续相(liquid continuous phase)共同构成。本实验不仅澄清了纳米凝聚相岛域是否存在的争议, 还给出了其尺寸及间距等特征量。进而, 我们测量了DPPC膜上微米凝聚相岛域的扩散, 并由此获得了二维黏性磷脂膜的黏度。由于微米凝聚相的厚度与磷脂膜厚度相当, 该实验体系最为接近SD和HPW模型假设的二维黏性流体, 可以有效检验经典流体力学理论的有效性和磷脂膜的黏性。实验发现, 磷脂膜内的扩散由局部DPPC连续相主导的短时间线性段向纳米凝聚相岛域结构影响的长时间线性段过渡(图2左); 相应的, DPPC磷脂膜的黏度也由连续相微观黏度和带纳米结构的全局膜黏度共同决定。通过与理论比较, 发现采用双黏度的HPW模型仍可以很好的预测不同分子密度的磷脂膜内的扩散系数(图2右)。值得强调的是, 实验还发现磷脂膜内扩散的位移概率分布从短时间高斯分布转变为受纳米岛域限制的尖峰分布并进而演化为双峰分布的统计特征(图3), 揭示了磷脂分子偶极排斥力及纳米结构的重排主导长时间段膜内的非平衡态扩散。

该研究成果以“Heterogeneous Nanostructures Cause Anomalous Diffusion in Lipid Monolayers”为题发表于国际纳米科学重要期刊ACS Nano。中科院力学所刘杨博士和郑旭副研究员为共同第一作者, 关东石研究员和蒋玺恺副研究员分别在AFM测量纳米结构及数值模拟验证统计特征方面做出重要贡献, 浙江大学胡国庆教授为通讯作者。此工作得到了国家自然科学基金、中科院前沿科学重点研究计划、中科院B类战略先导科技专项等项目的资助。

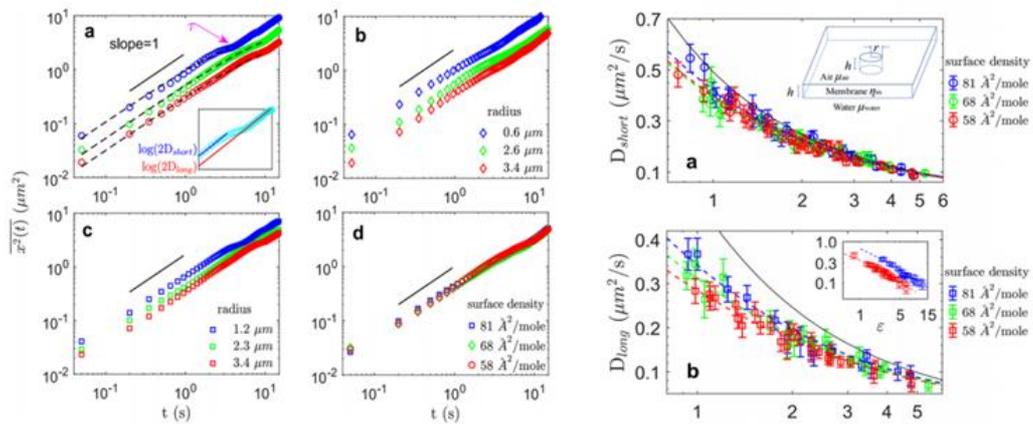
论文链接: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.2c04089> (<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.2c04089>)



(./W020220930315242921826.png)

图1. AFM测量得到DPPC磷脂单分子膜上的纳米凝聚相岛域(condensed phase nanodomain)结构

图片分享



(./W020220930315243152917.jpg)

图2. (左图a-d)磷脂膜内的均方位移由局部DPPC连续相主导的短时间线性段向纳米凝聚相岛域结构影响的长时间线性段过渡；(右图) HPW模型(图中虚线)可很好的预测不同分子排布密度的磷脂膜内的扩散系数测量结果(图中彩色圆形和方形符号)，而线性SD模型(图中黑色实线)显然不再适用

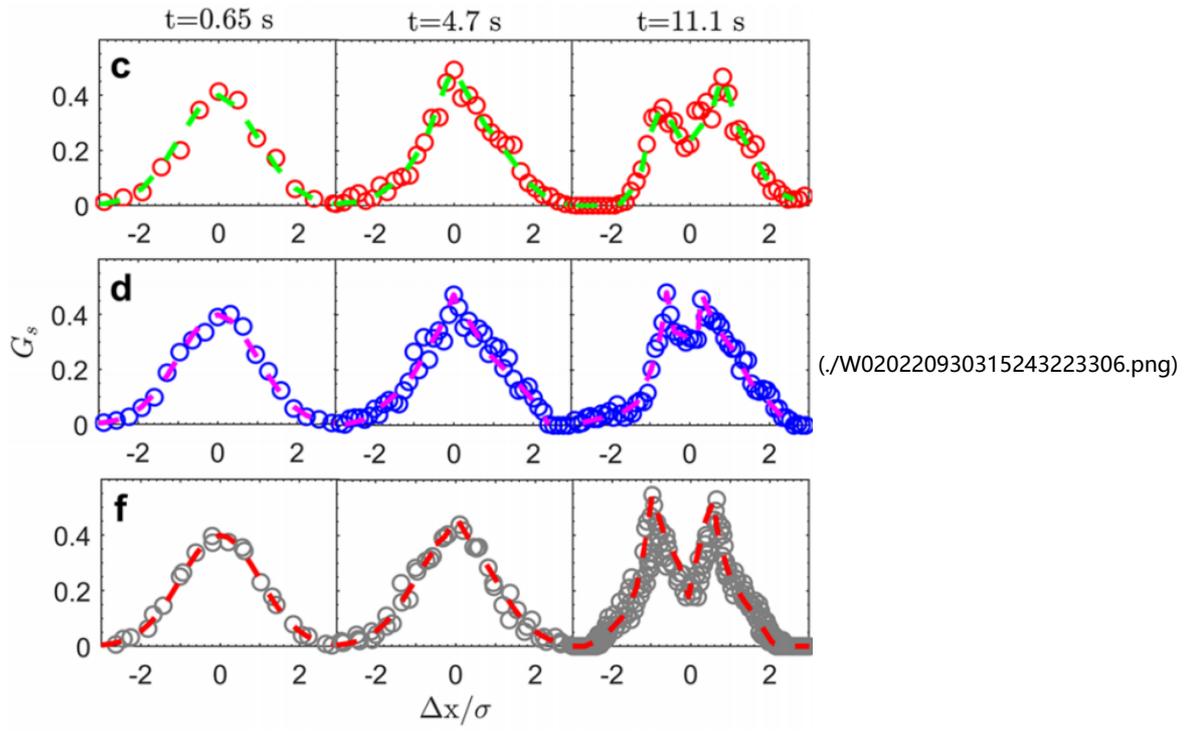


图3. 位移概率分布从短时间高斯分布转变为受纳米岛域限制的尖峰分布并进而演化为双峰分布



中国科学院 (http://www.cas.cn)  
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

中国科学院力学研究所 版权所有 京ICP备05002803号 京公网安备110402500049

地址：北京市北四环西路15号 邮编：100190

(http://bszs.conac.cn/siteName?method=show&id=081D2D6355AD574EE053022819ACCBA7)

