
活性物质的理论研究获进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36353.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

活性物质的理论研究获进展

。自然界中，较多细菌生活在极度受限的微米尺度环境中。理解细菌在这些受限空间中的运动规律，对于调控微生物生态系统至关重要。真实环境中细菌往往面临更复杂的“受限”环境，即同时受到上下、左右多个边界限制的空间。在这种条件下，细菌的运动规律是否发生变化及其背后的物理机制，尚不清楚。

近日，中国科学院理论物理研究所研究团队通过结合粒子模拟、连续介质理论模型和精密实验测量，揭示了空间限制对游泳细菌近表面运动行为的关键影响。研究发现，与单一无限大表面附近的行为相反，当细菌在两层平行板构成的狭窄空间中游动时，它们减少在表面附近的聚集，更易从表面逃逸，转向在空间中央区域聚集。这一反常现象的背后是以往常被忽略的高阶流体力学相互作用——力四极子在发挥主导作用。

传统理论将细菌在表面附近的聚集行为归因于其自身产生的“力偶极子”流场与表面的流体力学相互作用。这种偶极子流场会产生将细菌拉向表面的“吸引”效应，被认为是表面聚集的主导机制。研究发现，在高度受限的狭小空间中，仅考虑偶极子无法解释实验观察到的细菌从表面逃离、向中间聚集的现象。研究通过建立更精细的“杆-球体模型”来准确刻画大肠杆菌的几何形态，并完整推导出其产生的流场包含力偶极子以及不可忽略的力四极子。理论计算表明，对于典型的杆状细菌，力四极子对细菌行为的作用与偶极子相当，在受限条件下其效应甚至更显著。理论分析显示，与偶极力产生的“牵引”流不同，四极子产生的镜像流场主要贡献在于其旋度（涡量）。这种旋转流场对细菌施加一个使其转向、远离表面的力矩，相当于为细菌提供了“逃离表面”的力学推动。

研究通过求解包含流体相互作用和空间位阻的Smoluchowski方程，进行严格的连续介质模拟。结果表明，仅考虑偶极子和空间位阻时，模型无法再现实验观察到的中央聚集峰。只有当引入四极子项后，理论预测的细菌密度分布曲线才能与实验数据高度吻合，且无需引入任何拟合参数，直接使用由细菌几何形状和游动速度计算出的偶极子和力四极子的强度即可。进一步，对细菌与侧壁碰撞动力学以及三维逃逸率的模拟分析均证实，四极子增大了细菌从表面逃逸的角度和概率，解释了受限环境下表面聚集减弱的原因。研究还发现，在单一表面附近，细菌因受力矩作用进行典型的圆周运动。在强限制条件下，来自上下两个表面的力矩相互抵消，导致细菌的游动轨迹变得更直，且曲率降低。边界元法模拟定量重现了这一现象，为理解受限环境中的细菌运动模式提供了完整的理论解释。

上述研究确立了高阶奇异子在强限制条件下的核心地位，提出了预测和调控微生物分布的理论方法，为理解真实环境中的细菌行为提供了新视角。

相关研究成果发表在《物理评论快报》（Physical Review Letters）上。

[论文链接](#)

研究团队单位：理论物理研究所

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](#)转发