力学所在波动熵力及其作用研究中取得进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/8039.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！

波动熵力源于热扰动，在纳米尺度是极为重要的一种普适的长程力。特别是波动熵力在众多细胞进程中发挥了极为重要的作用。例如，通过影响细胞粘附，波动熵力能够充分地调控癌细胞的转移过程。因此，对波动熵力性质及其作用的研究构成了微/纳米尺度科学研究的重要基础。然而，波动熵力基本的作用规律及其性质尚未完全清楚，是当前微/纳米尺度科学研究中的一个重要的挑战。

中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室（LNM）“生物及仿生材料力学”课题组助理研究员李龙和研究员宋凡，与国内外相关研究人员合作，以波动熵力为切入点，围绕细胞粘附的力学调控机制，逐层深入地开展了系统的研究工作，并取得系列研究成果。

（1）基于弹性力学、统计力学理论，获得了波动熵力（f）的基本力律，得到实验验证，并进一步给出了波动熵力的主要力程。在此基础上证明了，当膜间平均距离（c）足够小时，Helfrich提出的$f\sim c^{-3}$力律关系与Freund提出的$f\sim c^{-1}$力律关系分别为本研究结果的上限与下限，为结束当前关于波动熵力力律的国际争论奠定了理论基础 (*Acta Mech. Sinica*, 2016, 32: 970-975 (AMS 2018 Best Paper Award); *Phys. Rev. E*, 2017, 95: 012403; *Adv. Mech.*, 2018, 48: 201801; *Sci. China. Phys. Mech.*, 2018, 61: 128711)。

（2）在研究了波动熵力基本规律的基础上，探究了该熵力在细胞粘附过程中发挥的作用。首先研究了波动熵力对粘附蛋白键合作用的影响，建立了考虑波动熵力影响的细胞粘附多尺度模型。研究表明细胞膜上引入脂筏前后，波动熵力对膜间受体-配体键合的影响由抑制作用变为了促进作用。其本质原因在于，在波动熵力的作用下，脂筏内的蛋白质聚集引起的细胞膜构象熵增加。从而揭示了波动熵力与脂筏在膜间受体-配体相互作用过程中的协同效应，为现存的相互矛盾的实验结果提供了新的解释 (*Soft Matter*, 2017, 13, 4294-4304; *Phys. Rev. E*, 2018, 97: 012405; *Soft Matter*, 2019, 15, 3507-3514 (Cover article))。

其次，研究了波动熵力对细胞粘附过程中粘附蛋白分布的影响，构建了多尺度计算模型及平均场理论模型。研究结果显示，由于粘附蛋白在脂筏区内键合前后的平动熵损失量小于在非脂筏聚集区内键合前后平动熵的损失量，使得受体-配体的键合作用促进了脂筏聚集相变，进而引起粘附蛋白的聚集。理论分析结果表明，波动熵力会使得受体-配体结合体间产生吸引作用。借助粘附蛋白与脂筏间的亲和性，波动熵力可以进一步促进脂筏聚集相变与粘附蛋白聚集(*Nano Lett.*, 2020, 20, 1: 722-728)。文章一经发表，“纳米人”即对该项结果进行了专栏报道，指出“即使在非吸附膜中大尺度的团簇是热力学不稳定的，细胞间受体-配体结合和膜的形状波动也会导致受体在粘附膜内聚集。”

以上研究工作得到国家自然科学基金(11472285, 11902327, 11972041)、中科院战略性先导科技专项（B类）(XDB22040102)、国家重点研发计划(2016YFA0501601)等资助。

图1 理论结果与实验结果对比以及膜间距c很小时，波动熵力f 的上限值和下限值

图2 对于均质膜系统（细胞膜上无脂筏，仅含有粘附蛋白），波动熵力抑制了受体-配体键合（子图），而在含有脂筏的多组分膜系统中，波动熵力促进了受体-配体键合

图3 波动熵力促进了蛋白质聚集与脂筏相变：对于平板膜系统，此时膜间无波动熵力，脂筏发生相变时所需的脂筏间吸引力为$0.88U_0^*$
。引入波动熵力后，即对于波动膜系统而言，该值降为$0.81U_0^*$

研究团队单位：力学研究所

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