

* 学科发展 *

从液晶生物膜理论展望软凝聚态物理创新

欧阳钟灿*

(理论物理研究所 北京 100080)

摘要 软凝聚态物理是90年代物理学的前沿,具有跨学科的特性,涉及到生物、化学乃至纯粹数学。本文以液晶生物膜理论为例,阐述这个学科的发展趋势。

关键词 软凝聚态物理,液晶,生物膜

软凝聚态物理是相对“硬”凝聚态物理而言。后者的代表即早期固体物理,用量子理论处理简单点阵周期结构,揭示出的能带理论带来了本世纪最重大的技术进步——半导体与计算机技术。但当凝聚态物理扩大到包括液晶、高分子聚合物、生物大分子聚集态等复杂流体(Complex Fluid),即所谓的“软物质”(Soft Matter)——这是 de Gennes 在 1991 年的诺贝尔物理奖授奖大会上演讲的题目,对称破缺及标度定律等便取代量子论成为研究软凝聚态的钥匙。因此在一本专门论述软凝聚态物理的教科书中,普朗克常数 $h=0$ 与 $h \neq 0$ 成为划分“软”与“硬”凝聚态理论的表征。

物质体系的自由能是由内能(真正的粒子间的相互作用)与熵(刻划粒子聚集有序程度)组成。如果体系的熵可以忽略(即简单的、高度有序系),则体系的自由能是真正的力相互作用,即可作为哈密顿量用量子化处理而显示“硬”凝聚态特征。相反,在软凝聚态,熵起主要作用,体系自由能虽然可以抽象出宏观的“力势”(如液晶与生物大分子的弹性),但这种力势是属于经典物理范畴,而且必然是温度的函数,不可以量子化。由于熵带有强烈的信息论特征,因此,生物大分子的折叠、自组装、及体现的功能性便反映出软凝聚态材料不同凡响的特征。从各向同性的简单流体到复杂生物聚集态,液晶——各向异性流体——是软凝聚态物理最基本的物态概念。从其对生物膜的描述而得到的现代生物膜理论最能出现软凝聚态物理在生命科学、化学、乃至数学交叉学科中的创新机遇。

其实,液晶的发现一开始便带有明显的交叉学科特点。1888年奥地利植物学家 F. Reinitzer 在研究胆甾醇对植物作用时,发现这种有机物有两个熔点。德国物理学家 O. Lehman 用实验证实,介于两个熔点之间的胆甾醇酯是处于一种物质存在的新态——液晶。液晶这一术语代表着软物质中很广的一大类材料。只要组成的分子在几何尺度上有各向异性(如杆状或盘

* 中国科学院院士

收稿日期:1998年5月4日

状),即可存在液晶态。按照分子聚集和排列的有序程度分为三种液晶相(G. Friedel 1922):向列相(Nematic)组成的分子中心象普通流体呈无序分布,但分子长轴(对杆状分子而言)或盘面(指盘状分子)趋于平行,表现取向的长程序,因而该相流动象普通流体,但光、电、磁则表现出与晶体联系在一起的各向异性;胆甾相(Cholesteric)组成的分子具有手征性,即分子取向在空间会形成扭转的螺旋结构,其光学特性有强烈的圆二色性;近晶相(Smectic)组成的分子中心在一个方向具有周期序(即层状相),因而接近于晶体特征。但在层内,除分子取向有序外,分子中心仍保留位置无序。液晶相在三大类内又分为若干亚相。近晶相到目前为止已提出了 A、B、C、C*、D、E、F、G、H、H*、I、I*、J、K 等 14 种亚相(打 * 号相是分子具有手征性)。液晶发现 100 年来,物理学家与化学家对其兴趣不变的原因就在于液晶不是某些特殊物质才有的物质相,而是从分子量为 10^4 到 10^5 数量级的高分子聚合物都呈现相同的液晶相,这就激励人们寻求能说明差别很大的系统在相变行为的相似性的统一原理。这也是 de Gennes 1991 年获诺贝尔奖的精髓,他证明金属超导电性、液晶有序与高分子聚合物相变存在着统一的理论。生物膜的液晶模型正是出于同一个道理。

生物结构与液晶联系可追溯到 19 世纪中叶。对细胞学说创立有重要贡献的 Virchow 1854 年就发现神经细胞髓磷脂溶液具有偏光性(即液晶特性)。Lehman 在发现液晶后不久,即专文叙述液晶在生命科学中的重要前景。许多生物学家在液晶研究早期都对此发表过评论。在 1933 年的法拉第液晶讨论会上,生物结构的液晶特性便正式提出来讨论,而研究液晶的科学家本身就是著名生物学家的也不少见。如发现近晶相液晶焦锥结构的 F. Grandjean 就是一个著名的发育生物学家。胚胎学家李约瑟就曾把哺乳动物发育过程中肢节轴索的诞生与液晶相变产生的几何拓扑结构联系在一起。50 年代,生物学家便出版专著论述肌肉组织与细胞结构所显示的液晶各相相似的分子堆积结构。因此,1965 年召开的第一届国际液晶会议上,生物结构的液晶性质便正式成为独立议题。1974 年第五届国际液晶会议上,人们特别把生物膜与溶致液晶联系起来,随后出版了《溶致液晶与生物膜》与《液晶和生物结构》(有中译本)。以后,三年一届的国际生物物理大会与两年一届的国际液晶大会常在同一城市联袂召开。近 20 年来液晶学家愈益涉及生命科学已是一个趋势。在这一领域里,物理学与化学,甚至与生物学之间的传统界线已经变得模糊,其中最典型的就是表现在液晶生物膜模型研究。

生物学家公认的生物膜流体镶嵌模型(Singer, Nicolson, 1972)认为膜糖蛋白是浸在二维脂类双分子液体膜中,如果把双亲脂类分子膜当为普通流体,则蛋白分子都能在不到一分钟时间内扩散跨越细胞,但荧光漂白实验显示蛋白质在膜上扩散本领比自由扩散所预期的少许多个数量级。把生物膜当成液体膜的另一个困难是无法解释为什么人的红血球是双凹碟形而不是其他几何形状。从拉普拉斯液体膜泡定律出发,几何学家(Alexandrov)在 50 年代证明,平衡的液体膜泡只有一种形状——正球形。因此从高尔基体到细胞膜泡所显现出来的生物膜泡结构的奇形怪状确实证明生物膜不是普通流体,而是液晶。

发明液晶显示 TN 技术的 W. Helfrich 是生物液晶模型定量理论的创立者,这在 de Gennes 诺贝尔物理奖演讲“软物质”中特别指出过。Helfrich 1973 年的开创性论文,《SCI》引用已达千篇的数量级。美国 90 年代大学分子生物学教科书中关于红血球形状的论述,已采用他的液晶膜曲率弹性理论。抓住软凝聚态物理的发展时机,我国理论生物物理工作者在液晶生物膜理论研究中已做出一系列有创新意义的成果,如根据这个理论导出的膜泡普遍方程,被称为

研究油/水/活性剂流体膜的广义拉普拉斯方程,并解析地给出系列膜泡解,其中包括生物力学家长期追索的红血球双凹碟形解,尤其是在1990年依据该方程预告了半径比为根号2与无穷的生物膜环形结构,开创了高亏格膜泡的研究,并迅速得到不同实验室的证实,环形结构实际上是近晶相液晶焦锥结构的体现。液晶生物膜泡方程是一类广泛而又全新的曲面方程,因而已引起数学界的高度重视,并有专文评述。

根据生物膜是液晶的线索,生命科学中许多困难问题,如细胞膜的融合,蛋白质在膜上的奇异扩散及定域成帽现象,以及细胞分泌的胞吐与内吞现象正在一一得到理论解释。尤其是以胆甾相液晶相似所建立的手征分子生物膜理论对1984年以来发现的生物手征分子的自组装螺旋结构给出符合实验的解释,并被物理学家与病理学家联合推广发展去研究胆结石的螺旋结构,被评价为比 de Gennes 等人的理论更符合于实验。

液晶相的拓扑缺陷和相变都与膜融合的机理有关。液晶显示技术原理——电场引起分子重排与堆积变化——对基因和药物用生物膜泡传递显得异常重要。外加电场(由蛋白质或药物分子带来)诱发膜融合,并推动蛋白质的移动,这些都是液晶生物膜动力学理论大有可为的挑战性课题。由美国国家研究委员会组织的大型调查报告《90年代物理学:学科交叉和技术应用》分册中,特别在生物物理学一章中指出:“层状液晶提供了可以研究膜相互作用、局部缺陷和相变的有用的膜模型系统。它们类似于一叠完整的膜,中间被薄层的水分隔开。这里可以应用相变的现代物理学理论。膜上分子的迁移也会由像液晶里那样的相变而发生深刻的改变。在现在公认的膜融合、克分子渗透压浓度控制和酶调节等过程的机制中,都涉及到与带电磷脂的相变相联系的膜缺陷。”

但是,我们注意到国内物理与生命科学交叉,目前仍存在着典型的不同学科间的内在隔阂,并反映在对生物膜液晶模型的认识上。与这种认识相反的是,国际生物学界正在日益接受物理学家对生物膜的研究观点与结果,例如,欧洲(North-Holland出版社)学界正在组织编写一套计划有12分册之巨的《生物物理手册》,其第一分册《生物膜结构与动力学》是由研究膜的物理学家 R. Lipowsky 与生物化学家 E. Sackmann 共同主编的,并已在1995年出版,其中第八章《Morphology of Vesicles》全面介绍 Helfrich 液晶生物膜理论的研究结果,也包括我国理论物理学家的若干研究结果。我们特别推荐阅读该手册总编在前言中所阐述的生物物理的交叉学科含义,即生物物理是生物与物理两个学科共同兴趣的领域。在美国《90年代物理学:学科交叉和技术应用》的生物物理一章中的“结论和建议”指出:“由于复杂合作到了能把生物学系统作为物理学中的基本问题开展讨论的程度,纯物理学已经成为这类中心(指生物与物理交叉学科的中心)的重要组成部分。”

参考文献

- 1 P. G. de Gennes. *Soft Interfaces; The 1994 Dirac Memorial Lecture*, Cambridge, 1997.
- 2 P. G. de Gennes. *Rev. Mod. Phys.*, 1992, 64:645.