

物质结构的层次和尺度

Levels of Structure of Matter and Their Length Scales

徐光宪

(北京大学化学与分子工程学院,教授、中国科学院院士 北京 100871)

在复杂性科学和物质多样性研究中,尺度效应至关重要。尺度的不同常常引起主要相互作用力的差异,导致物质性能及其运动规律和原理的质的区别。

通常把尺度粗分为宏观、微观和介观(Mesoscopic)。但微观的含义有两种,生物学上的微观通常是指肉眼看不见,用光学显微镜(放大几百倍)可以看见的东西,如把微生物、细菌、细胞等称为微观生命。它们的尺度大致在 100μ 到 0.1μ 之间。而物理学和化学中的微观,是指原子和小分子的尺度,即 $0.1 \sim 1\text{nm}$ 的尺度。为避免混淆,笔者建议把前者称为“显微观(Optico-microscopic)”,后者称为“微观(Microscopic)”。介观是指介乎微观与宏观之间。鉴于微观有两个定义,故介观的定义也不难明晰。笔者认为,物质尺度的划分,应该先考虑宇宙间物质究竟有多少层次,再根据物质的层次结构来划分尺度。因此本文内容分4部分:(1)宇宙进化的8个层次结构;(2)物质结构的层次和尺度;(3)尺度的划分;(4)尺度效应的重要性。

一、宇宙进化的8个层次结构

笔者建议把宇宙进化分为8个层次。

第一层次是物理进化,从宇宙大爆炸开始到3万年,是宇宙的婴儿时期。按照宇宙大爆炸理论,大爆炸开始时处于超高温、超高密的超统一场。开始后 10^{-44} 秒发生超统一相变,超统一场分化为引力场和大统一场,时间和空间也开始分化。到 10^{-36} 秒发生大统一相变,大统一场分化为强场和电弱场,夸克和电子等轻子也分化出来。到 10^{-12} 秒,发生电弱相变,弱场和电磁场分化出来。到 10^{-6} 秒,夸克合成中子和质子。到3分钟,中子和质子合成氦、氘等轻核。到3万年合成原子。以上是物理进化。

第二层次是天体演化,从3万年到现在的150亿年,宇宙由原子云凝聚成星云、星系和现在夜空中灿烂的星星,这是宇宙的青春时期。

第三层次是地质演变,从46亿年前地球诞生开

始到现在,是地球的青年时期。

第四层次是化学进化,从大爆炸后3万年原子形成开始,到34亿年前微观生命开始。这是宇宙的幼童时期。这一层次的化学进化是从原子到生物大分子,从尚无生命的生物大分子到有生命的单细胞微生物,是由化学进化到生物进化的飞跃。当有了人类以后,化学进化还要发展下去。这就是不断人工合成新的分子和新材料,现在已有2000多万种,大概每隔10年要翻一番。

第五层次是生物进化,从34亿年前直到现在。

第六层次是社会进化,从400多万年前有猿人开始直到现在。

第七层次是人工自然进化,包括农业、工业、信息产业(包括计算机、电讯、网络等)、生物工程产业等。

第八层次是由物质产生精神,形成文化、艺术、科学、技术等,又由精神反作用于物质。这个层次是人脑、信息、自然进化的层次。

这8个层次,构成整个宇宙的进化。每一层次的学问依次为:(1)物理学;(2)天文学;(3)地质、大气、海洋、环境等地球科学;(4)化学;(5)生物学、医学等生命科学;(6)社会科学;(7)技术科学、工程科学;(8)数学和系统科学,哲学、宗教、思维和认知科学,语言学和文学,音乐艺术等。这些学问构成人类文化和精神财富的总体。

二、物质结构的层次和尺度

宇宙间物质的结构,从小到大可分为5个大层次,即原子及其以下的层次、分子及其聚集态的层次、生物体的层次、地球的层次和宇宙的层次。

1. 原子及原子以下的层次和尺度

(1)时间和空间都有最小的极限,分别称为普朗克时间和普朗克长度。

t_p = 普朗克时间 = $[\hbar G / 2\pi c^3]^{1/2} = 5.38 \times 10^{-44}$ 秒
 $\approx 10^{-44}$ 秒

l_p = 普朗克长度 = $[\hbar G / 2\pi c^3]^{1/2} = 10^{-33}$ cm

比它们小的时间和长度是没有意义的,因为那时时间和空间还没有分化出来。

(2) 轻子(电子、 μ 子和中微子)和夸克的层次,它们的尺度是 10^{-16}cm 。

(3) 中子和质子的层次,它们的尺度是 10^{-13}cm 。

(4) 原子核的层次,它们的尺度是 10^{-13}cm 到 10^{-12}cm 。

(5) 原子的层次,它们的尺度是 10^{-8}cm ,与原子核的尺度相差 4 到 5 个量级,所以原子的结构是十分空旷的。如果把它放大 10^4 倍,作个类比,那么 1 个原子就好比 1 个 10 米直径的圆形大厅,大厅中间只有 1 粒芝麻大小(毫米尺度)的原子核和若干粒细菌大小(微米尺度)的电子。其它已知粒子(除中微子外)之所以不能进入到这个十分空旷的大厅中去,是由于原子的电子轨道的量子化和巨大的库仑及 Pauli 斥力。2000 年 2 月 19 日的美国《The New York Time》和 20 日的《The Plain Dealer》,报道了意大利罗马大学的科学家小组(8 名作者中有 4 名来自中国的高能物理所,第一作者是 Rita Bernabei)发现的 WIMP 粒子(Weak interaction mass particle),其质量可能为质子质量的 50 倍,但没有电磁相互作用,只有弱相互作用(其作用距离只有 10^{-13}cm)。它能进入任何由原子组成的物质,如入无人之境。这一发现如被证实,将解决 21 世纪的科学难题之一:“占宇宙总质量 90% 的暗物质究竟是什么?”

2. 分子及其聚集态的层次和尺度

分子是一种可以在通常条件下独立存在、具有一定化学特性的物质微粒。除惰性气体原子可以生成单原子分子外,其它元素的分子则是由 2 个或多个原子通过共价键或共价配键连接而成。从原子、分子到分子聚集态,可以分为以下层次。

(1) 单原子分子。化学元素中只有惰性气体原子 He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn 可以在通常条件下独立存在,生成单原子分子。它们的尺度在 0.1 纳米左右。

(2) 小分子。分子量在 1 000 以下的分子,通常称为小分子,它们的尺度在 0.1~1 纳米之间。

(3) 高分子。高分子是由单体重复聚合生成的大分子,分子量从几千到几十万,甚至几百万,所含原子数一般在几万以上。高分子的尺度从几纳米到几十纳米。高分子纤维的尺度可以长达几百纳米以上。

(4) 生物大分子。生物大分子是有生物活性的大分子,如蛋白质、DNA、RNA 等。人体中的蛋白质约有 10 万种,它们的尺度在几十纳米量级。表 1 列出各类生物的 DNA 分子所含的碱基对(bp)数目和分子量。人类 DNA 分子含有 30 亿碱基对,大约 1 000 亿个原子。生物大分子的尺度范围十分宽广,从几纳米到几百纳米。

表 1 各类生物的 DNA 分子

生物	DNA 的碱基对数	分子量
哺乳动物(包括人类)	$\sim 3.0 \times 10^9 \text{bp}$	$\sim 1.9 \times 10^{12}$
酵母 Yeast <i>S. cerevisiae</i>	$\sim 1.6 \times 10^7 \text{bp}$	$\sim 7.7 \times 10^{10}$
噬菌体 Bacteriophage λ	48 515bp	3.1×10^7
质粒 Plasmid pUC18/pUC19	2 686bp	1.7×10^6

(5) 非生物大分子。是指没有生物活性的大分子,例如 1991 年饭岛(Iijima)首先合成的碳纳米管。它是由层状结构的石墨片卷成的无缝空心管,有多层的,也有单层的,其直径约在 1 纳米至几十纳米之间。碳纳米管的长度可用化学方法剪切。例如直径 1.4 纳米长为 15 纳米的碳纳米管约含有 3 000 碳原子,分子量为 36 000。碳纳米管有长达 1cm 的,其分子量就有几十亿。

(6) 超分子。超分子是 2 个或 2 个以上分子通过非共价键的分子间作用力结合起来的物质微粒。这些分子间作用力包括范德华引力、各种不同类型的氢键、疏水-疏水基团相互作用、疏水-亲水基团相互作用、亲水-亲水基团相互作用、静电引力、极化作用、电荷迁移、分子的堆积和组装、位阻和空间效应,等等。相对于共价键而言,分子间作用力至今研究得很不够,是今后要重视的方向。

(7) 分子聚集体。

3. 生物的层次

(1) 细胞, (2) 组织, (3) 器官, (4) 系统, (5) 生物个体。

4. 地质的层次

5. 宇宙的层次和尺度

(1) 卫星的层次。

(2) 行星的层次。地球的直径是 $12\,753\text{Km} = 0.425$ 光秒。

(3) 恒星的层次。太阳的直径是 $1.39 \times 10^6 \text{Km} = 46.3$ 光秒。

(4) 星系的层次。银河系的形状像一个铁饼,直径 10 万光年,厚约 6 000 光年。

(5) 星系团的层次。尺度在 1 000 万光年的量级。

(6) 超星系团的层次。尺度在 1 亿光年的量级。

(7) 最遥远的类星体。距离地球约 130 亿光年。

三、尺度的划分

1. 宇观(Cosmoscopic) 是指人们用各种波段的天文望远镜及航天飞机上的各种现代宇宙探测仪器能观察到的宇宙尺度,即从 0.1 光秒(30 000Km)到 150 亿光年。在这一尺度范围,主要作用力是万有引力和电磁作用力,主要学科是宇宙学、天文学、牛顿力学和广义相对论。

2. 遥观(Remote sensoscopic) 是指人们用地球

轨道上的人造卫星的遥感技术(Remote sensing)能够观察到的尺度,大致从 1Km 到 30 000Km,所以把遥感的英文译名定为 Remote sensoscopic。这个尺度范围的主要作用力也是万有引力和电磁作用力,主要学科是地球科学、地理学、遥感学、经典力学。

3. 宏观(Macroscopic) 是指人眼能够直接观察到的尺度,大致从 0.1mm 到 1Km。在这个尺度范围,主要作用力也是万有引力和电磁作用力,主要学科是经典力学、经典物理学、经典化学、经典生物学、工程科学、技术科学等。

4. 显微镜观(Optico-microscopic) 是指以放大几百倍的光学显微镜为观察手段的尺度,大致从 1μ 到 $100\mu = 0.1\text{mm}$ 。在这个尺度范围,主要作用力是万有引力、电磁作用力,以及由表面张力(包含毛细管作用)等引起的效应,主要学科是经典力学、微生物学、显微医学(包含显微外科、病理分析等)、微电子技术,等等。

5. 介观(Mesoscopic) 是指介乎显微镜和微观之间的尺度,大致从 1nm ~ 100nm,所以叫它纳米观(Nanosopic)更为确切。这个尺度可用扫描隧道显微镜(STM)、原子力显微镜等来观察,它的范围虽然只跨越两个量级,但非常重要,因为它的特征是量子状态和经典状态的交叉和混合,因而赋予纳米分子、纳米材料、纳米器件等许多特异的性质和功能,有广阔的应用前景。在这个尺度范围,主要作用力是万有引力、电磁作用力,以及由表面张力、平均自由途径等引起的效应,主要学科是纳米科学和纳米技术。在纳米科学领域,量子力学和经典力学同时起作用,在理论探讨上有特殊难度。

6. 微观(Microscopic) 是指原子和小分子的尺度范围,从 $1 \sim 10\text{\AA} = 0.1 \sim 1\text{nm}$ 。在这个尺度范围内的主要作用力是电磁作用力,具有量子化和波粒二重性的特征,主要学科是量子力学、相对论量子力学、原子物理、分子物理、量子化学、单分子化学等。

7. 皮米观(Picoscopic) 尺度范围为 $1\text{pm} \sim 100\text{pm} = 0.01\text{\AA} \sim 1\text{\AA} = 10^{-12}\text{m} \sim 10^{-10}\text{m}$,即硬 X-射线波段和软 γ 波段,介乎原子和原子核之间的尺度。这个尺度现在研究得比较少。将来在对超固体、中子星、白矮星等超高密度物质的结构研究中要涉及这一尺度范围。

8. 飞米观(Femtoscopic) 和亚飞米观(Subfemtoscopic) 前者是指原子核的尺度,从 $1\text{fm} \sim 10\text{fm} = 10^{-15}\text{m} \sim 10^{-14}\text{m} = 10^{-13}\text{cm} \sim 10^{-12}\text{cm}$;后者是指夸克和电子的尺度(10^{-16}cm)以及超弦理论模型和宇宙大爆炸理论中更小的尺度,直到 10^{-33}cm ,跨 20 个量级。在这个尺度范围,主要作用力是电磁作用力、强相互作用力、弱相互作用力,具有色荷、对称性、量子化和波粒二重性等特征,主要学科是量子

色动力学、规范场论、超弦理论、宇宙大爆炸理论等。皮米、飞米和亚飞米观也可总称为渺观。

以上 8 个尺度层次,共跨 62 个量级。

四、尺度效应的重要性

本文开头就叙及,在复杂性科学和物质多样性研究中,尺度效应至关重要。尺度的不同,常常引起主要相互作用力的不同,导致物质性能及其运动规律和原理的质的区别。下面举一些例子说明尺度大小对性能的影响。

1. 纳米金属粉有异乎寻常的物理化学性质和催化性质。如金的熔点为 1063°C ,纳米金的融化温度却降至 330°C 。银的熔点为 960.3°C ,而纳米银为 100°C 。纳米铂黑催化剂可使乙烯催化反应的温度从 600°C 降至室温。

2. 乳状液(如牛奶)是水包油(乳脂)的颗粒分散在水相中的混合物。这些颗粒能散射可见光,所以不透明。但当颗粒的尺度小于 100 纳米,即可见光波长为 400 ~ 800 纳米的 $1/4$ 时,它们就不能散射可见光,使得乳状液变得像真溶液一样透明清亮,这就是微乳状液。近 10 余年来,利用微乳状液作为有机相来萃取金属或分离药物,已成为当前萃取化学和萃取化工的前沿。

3. 电子或声子(phonons)的特征散射长度,即平均自由途径(Mean free path)系纳米量级。当纳米微粒的尺度小于此平均自由途径时,电流或热的传递方式就发生质的改变。^{[2][3]}

4. 与微粒运动的动量 $p = mv$ 相对应的 de Broglie 波长 $\lambda = h/p$,通常也在纳米量级。由此产生许多所谓“量子点(Quantum Dot)”的新现象。^{[4][5][6]}

5. 小尺度体系的热力学性质。文献[7]中讨论到热力学性质,包括相变和“集体现象(Collective phenomena)”,如铁磁性、铁电性、超导性和熔点等与粒子尺度有重要的关系。当尺度介于十分之几到 10 纳米的量级,即处于量子尺度和经典尺度的模糊边界(fuzzy boundary)时,热运动的涨落和布朗运动将起重要的作用。前面提到的纳米金属粉熔点降低的原因可能在此。

6. 纳米粒子的比表面很大,由此引起性质的不同。

7. 当代信息技术的发展,推动了纳米尺度磁性(Nanoscale magnetism)的研究^[5]。由几十个到几百个原子组成的分子磁体表现出许多特性,如 tunneling, quantum coherence, thermo-induced spin crossover transitions。^{[8][9][10]}

以上列举的由尺度效应产生的质变,常常发生在纳米的量级。这就是纳米科学和纳米技术的重要性与日俱增的根本原因。^{[11]~[18]}

机器人(学)可视为进化(论)的延续吗?

Robotics as Continuation of Evolution

K. Mainzer¹(著) 梁 栋²(译)

(德国 Augsburg 大学,教授¹;访问学者²)

一、机器人学和自动机的小文化史

犹如希腊神话中捏土造人的提坦神普罗米修斯,人也致力于使自己成为生命的创造者。普罗米修斯的命运是众所周知的。在他为人类带来人类完成自身的文明所需要的最后一物——火之际,就被宙斯缚在高加索山上,并忍受着宙斯的神鹰所施予的最残酷惩罚。不仅如此,宙斯还通过美貌绝伦的潘多拉带给人类传播一切灾害的“潘多拉之匣”。或许我们还能联想到犹太神话中的犹太大师用黏土所创造的无言的人造假人戈尔木(Golem),Golem在希伯来语中意味着无灵魂的物质(Seelenlose Materie)。在《创世界》一书中按照希伯来语的字母组合,Golem又被塑造为犹太民族的保护神。但是,人

们并未曾想到,当这些 Golem 一旦变得凶悍残暴时,人类将会面临怎样的命运!在根据古斯塔夫·迈林克(Gustav Meyrink, 1862~1932)的同名小说改编的哑剧经典影片“Der Golem”中,这一命运的戏剧性情节得到了深入细致而又令人难忘的刻画。

中世纪在自然研究和炼金术方面走得更远的智者,也在谈论着人类本质的创生,诸如犹太传统中来自布拉格的拉比勒维(Loew Ben Betsabel, 1520~1609)、基督传统中的阿尔伯特乌斯·马格努斯(Albertus Magnus, 1206~1280)。

随着近代科学的兴起,这一思想逐渐得到自然科学技术的支持。首先借助于力学,巴洛克式的玩具钟被视为有生命的自动机模型;随之则是通过电与光:在1879年出版的法文小说《新的梦想》(L'Eve Nouvelle)中,就曾塑造了一位人造女士,这位女士由

参考文献

- [1] 陈景:“原子态与金属态贵金属化学稳定性的差异”(待发表)
- [2] L.L.Sohn, et al, editors:《Mesoscopic Electron Transport》,Dordrecht,1996
- [3] S.Frank, et.al,“Carbon Nanotube Quantum Resistors”, Science,280,1744,1998
- [4] Special Issue on Quantum Dot Structures, Japanese J.of Applied Physics, Vol.38, No1B,1999
- [5] G.Timp, editor,《Nanotechnology》,AIP Press, Springer - Verlag, New York,1999
- [6] Y.Wang, et.al,“Tunnelling through quantum dot systems:a study of the magneto - conductance fluctuations”, J.Phys.Condens.Matter,6,L143,1994
- [7] T.L.Hill:《Thermodynamics of Small Systems》,Dover, New York,1994
- [8] E.Coronado, et.al,《Molecular Magnetism: From Molecular Assemblies to Devices》, NATO AISI Series. E. Vol 321, Kluwer(Dordrecht,1996)
- [9] D.Givord and M.F.Rossingol,“Coercivity”, p.210, in《Rare Earth Permanent Magnets》, J.M.Coey, editor, Oxford Univ Press(Oxford,1997)
- [10] G.A.Prinz,“Magnetoelectronics”, Science,282,1660, 1998
- [11] 吴征铠,唐敖庆主编.分子光谱学专论.(其中第五篇)李铁津,赵冰,赵新生.纳米材料与二维有序薄膜的分子光谱研究.山东科技出版社,1999
- [12] A.P.Alivisatos et al.“From Molecules to Materials: Current Trends and Future Directions”, Adv.Mater.1998, 10.No.6
- [13] G.M.Whitesides, et.al,“Complexity in Chemistry”, Science, Vol.284,89-92,1999
- [14] H.V.Westerhoff, et.al,“Thermodynamics of Complexity”, Thermochimica Acta,111,1998
- [15] I.S.Choi et.al,“Shape - selective Recognition and Self - Assembly of mm - scale Components”, JACS 1754,1999
- [16] K.Mainzer, Thinking in Complexity (Springer - Verlag, New York, ed.3,1997)
- [17] F.A.Carroll Perspectives on Structure and Mechanism in Organic Chemistry (Brooks/Cole, Pacific Grove, CA,1998)
- [18] A.Arkin et al.Science 277,1275(1997); I.Schreiber et al.J.Phys.Chem.100, 8556(1996); A.Goldbeter et al.Biochemical Oscillations and Cellular Rhythms: The molecular Bases of Periodic and Chaotic Behavior (Cambridge Univ.Press, Cambridge,1996)

(责任编辑 蔡德诚)