

《生物学通报》科普文选系列

丛书主编：郑光美



Order  
in Chaos

The Secret of Life

纷乱中的秩序  
主宰生命的奥秘

朱钦士 —— 著



科学出版社

《生物学通报》科普文选系列

—— 丛书主编：郑光美 ——

# Order in Chaos

The Secret of Life

## 纷乱中的秩序

主宰生命的奥秘

朱钦士 —— 著

科学出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

纷乱中的秩序：主宰生命的奥秘/朱钦士著.—北京：科学出版社，2019.3

（《生物学通报》科普文选系列）

ISBN 978-7-03-060863-5

I. ①纷… II. ①朱… III. ①生物学-青少年读物  
IV. ①Q-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 049061 号

责任编辑：牛 玲 / 责任校对：韩 杨  
责任印制：徐晓晨 / 封面设计：有道文化  
编辑部电话：010-64033934  
E-mail: fuyan@mail.sciencep.com

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行各地新华书店经销

\*

2019 年 3 月第 一 版 开本：720×1000 B5

2019 年 3 月第一次印刷 印张：14 1/4

字数：230 000

定价：58.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

# 《生物学通报》科普文选系列丛书 编委会

主 编：郑光美

编 委（以姓氏笔画为序）：

丁明孝	王 薇	王月丹	包丽芹	朱立祥
刘全儒	刘启宪	刘恩山	许木启	李晓辉
何奕颀	张 兰	张雁云	陈月艳	赵占良
荆林海	郑春和	徐国恒	常彦忠	甄 橙

## 丛书序

2018 年是我国改革开放的 40 周年。40 年来，由改革开放所引领的适合中国国情的发展道路，使我国从半封闭逐渐走向全面开放的局面，取得了举世瞩目的成就。党的十九大报告进一步清晰规划了全面建成社会主义现代化强国的时间表和路线图：在 2020 年中国共产党成立 100 年时全面建成小康社会；在实现第一个百年奋斗目标的基础上，到 21 世纪中叶中华人民共和国建国 100 年时，在基本实现现代化的基础上，把我国建成富强民主文明和谐美丽的社会主义现代化强国。“两个一百年”奋斗目标，与“中国梦”一起，成为引领中国前行的时代号召，激励着我们奋勇前进。广大科技和教育战线的工作者，怀着“科教兴国”的使命，创新求真，与时俱进，努力为我国基础教育的发展，以及提高全民族的科学文化素养做出自己的贡献。

《生物学通报》是适应我国自然科学教学需要和提高生物学教师的素质及交流教学经验，于中华人民共和国成立早期创刊的学术类期刊，由中国科学技术协会主管，中国动物学会、中国植物学会和北京师范大学筹办，并由时任中国科学院院长郭沫若先生题写刊名，聘请北京林业大学汪振儒教授为首任主编，于 1952 年 8 月出版了第 1 卷第 1 期，至今已半个多世纪。《生物学通报》坚持以服务于中等学校生物学教学为主要办刊宗旨，兼顾大专院校师生和农、林、医科学工作者的需要，以“基础、新颖、及时、综合”的特色，受到广

大读者的普遍欢迎，被誉为“生物学教师的良师益友”。为了响应“两个一百年”的奋斗目标，在更广大的范围内传播生命科学与生态学领域的科学知识和新的进展，为提高全民族的科学文化素质尽微薄之力，我们成立了“《生物学通报》科普文选系列丛书编委会”，从《生物学通报》已刊文章中选出一些优秀科普读物，以飨读者。

丛书的第一本收录了由美国南加州大学医学院朱钦士副教授为《生物学通报》撰写的系列文章，以通俗生动的语言介绍生命科学的种种奥秘，以及有关领域的科学研究新进展。随后还将陆续推出由《生物学通报》“科学家论坛”栏目特邀的中国科学院院士和资深教授，以及年轻有为的科学家为《生物学通报》撰写的一些科学普及文章，介绍有关专题及他们对生命科学发展的见解。希望这些文章将会进一步打开青少年心灵的窗口，提高他们对生命科学、生态学和医学的关注度及兴趣，为立志建设美丽中国和生态文明事业做出贡献！

《生物学通报》科普文选系列丛书编委会

郑志东

2018年10月15日

# 目 录

细胞为什么大多是微米级的	1
细胞中的“闹市”	7
纷乱中的秩序——浅谈细胞中分子的结构和相互作用	16
动物细胞的多功能细胞器——鞭毛、纤毛和微绒毛	28
线粒体、叶绿体与细胞演化	47
细胞核的功能	54
细胞的信号接收和信号传输	62
正转和反转的三羧酸循环	101
为什么地球上的生物使用左旋氨基酸和右旋糖分子	108
为什么每个人都是独一无二的——谈谈基因的“洗牌”	116
DNA 与个体发育调控	125
DNA 与个体发育调控的相关实例	157
为什么生殖细胞能够“永生”	181
人体的更新之源——干细胞	191
食物分子中的碳怎样在人体中“燃烧”	204
器官排斥和配偶选择——谈组织相容性抗原 (MHC)	211

## 细胞为什么大多是微米级的

地球上的生物有许多共同点。例如，都使用脱氧核糖核酸（DNA）作为遗传物质，使用相同的“密码”为蛋白质中的氨基酸序列编码，用相同的 20 种氨基酸组成蛋白质，都通过电子传递链将食物分子中的化学能合成高能化合物三磷酸腺苷（ATP），都用磷脂构建生物膜，等等。除此以外，地球上的生物还有一个重要的共同点，即都是由细胞组成的（病毒除外）。许多微生物只由一个细胞组成，被称为单细胞生物。更多的生物是由多个细胞组成的，被称为多细胞生物。例如人就是多细胞生物，人的身体由大约 60 万亿个不同类型的细胞所组成。

生物的体型可以很大。例如，美洲红杉可以高达 100 米，树围可达 31 米，需十几个人才能环抱；蓝鲸可以达 33 米长，180 多吨重。但是细胞却很小，从细菌的几个微米到“真核细胞”（具有细胞核的细胞）的几十个微米。在 30 厘米的范围内，人眼的分辨率是 100 微米左右，自然不可能看见 1 微米大小的细菌和 30 微米大的人体细胞。这就是为什么在显微镜发明之前，人类根本不知道有细胞，也不知道有微生物。

到了 16 世纪中期，英国科学家胡克（Robert Hooke, 1635—1703）用自制显微镜观察软木的薄片，发现里面密集地排列着许多小孔，他把这些小孔叫作“小室”（cell，现译为细胞）。尽管当时胡克看到的只是已死亡细胞的细胞壁，但也发现了植物组织是由很小的单位所组成的。与胡克同时代的荷兰科学家列文虎克（Antonie van Leeuwenhoek, 1632—1723），制作了放大倍数更高的显微镜（现存的列文虎克自制显微镜的放大倍数为 275 倍）。列文虎克用自制的显微镜

观察到了池塘水样本中生存着各式各样的微生物。这使得人们大吃一惊，原来在这么小的尺度上还可以有独立的生命。列文虎克还观察到了动物的红细胞和精子，这些都是实际观察到的来自动物身体的活细胞。

细胞学说的建立，源于 1837 年德国生理学家施旺和德国植物学家施莱登共进晚餐时的一次谈话。施旺主要研究动物组织的构造，发现了包裹神经纤维的“施旺细胞”，而施莱登则主要研究植物组织的构造。交谈后他们意识到，原来在动物和植物体内都能看见细胞，说明生物体都是由细胞组成的。这个想法经过后人的发展和完善，成为生物学中的“细胞学说”。

细胞学说认为，（地球上）所有的生物都是由（1 个或多个）细胞组成的；细胞是所有生命形式最基本的结构和功能单位；而且所有的新细胞都从已有的细胞分裂而来。该学说为生物体结构和功能的研究奠定了坚实的基础，是 19 世纪最伟大的科学发现之一，其意义不亚于物质结构的原子分子理论。

细胞学说陈述的是事实，所以大家都能接受。但是如果换个角度思考，为什么地球上的生物体都是由微米级的细胞所组成？为什么没有单个细胞的大型生物？答案就不是那么容易得出的了。要回答这个问题，首先要弄清楚为什么细胞那么小。原因主要有两个，一个是几何上的，另一个是物理上的。

几何上的原因就是，当一个物体变大时，表面积是按线性的平方关系增加的，而体积（也就是重量）却按线性的立方关系增加。体积越大，单位体积所拥有的表面积就越小。细碎的白砂糖在水里溶解得比较快，但是如果把这些白砂糖变成一块冰糖，在水中的溶解速度就慢得多了，因为糖的总表面积（也就是糖与水接触的面积）变小了。细胞也是一样，细胞的体积越大，单位体积拥有的表面积就越小。细胞要维持正常的生命活动必须与外界不断地进行物质交换，而这种交换只能通过细胞表面进行。细胞越大，相对的表面积越小，到了一定程度就无法再维持细胞的生理需要。只有当细胞的尺寸保持在微米级时，相对的表面积才能满足物质交换的需要。

如果人是由 1 个细胞组成的，总的表面积（也就是皮肤的总面

积)只有2平方米左右。如此小的面积是不足以进行气体交换的(假设气体交换通过体表进行)。人的肺由大量的肺泡组成,总面积有60~100平方米,接近半个网球场的大小,这样才能满足人体吸入氧气并排出二氧化碳的需要。同理,人体所需要的营养物质主要是通过小肠吸收的。小肠壁不仅形成了许多皱褶以增大吸收面积,肠壁细胞上还长出大量的绒毛进一步增加表面积,使得小肠吸收养料的总面积达到200平方米左右。肺泡和小肠都是与身体外部相通的,所以人体是由这些联通身体内外巨大的“内表面”与外界进行物质交换的。而这样大的“内表面”是单个细胞难以拥有的。

物理上的原因是分子扩散的速度很慢。我们都有这样的生活经验,放一勺糖到水里,如果不搅动,过了很长时间上层的水仍然没有什么甜味,尽管在水底部的糖已经完全溶化。细胞所需要的物质(如氧气和葡萄糖),就算是分子已进入细胞了,但这些分子移动的速度却相当慢,因为它们要与细胞内的水分子及其他分子不断地碰撞。这就像一个人在街上走路,如果街上行人不多,就能很快地从街的一侧走到另一侧,但如果街上挤满了人,你走到另一侧就要花很多时间。细胞充满了水溶液,相当于挤满了人,如果细胞太大,这些分子从细胞表面移动到细胞内的目的地(如细胞的“动力工厂”——线粒体)就要花太长的时间,相当于工厂的原料和燃料供应不足,细胞的生命活动就无法维持正常状态了。

原核生物(如细菌)细胞的大小只有1微米左右,细胞内的分子靠扩散就可以有效地到达特定位置。而真核生物的细胞要大得多,细胞内还有各种细胞器,如线粒体(细胞的“动力工厂”)、溶酶体(细胞的“垃圾处理站”)、高尔基体(细胞中蛋白质的“转运站”)等。这些细胞器与简单分子(如氧气和葡萄糖)相比要大很多,即便是在几十微米大的细胞内,光靠扩散移动也是不够的。为了解决这些细胞器的运动问题,真核细胞还发明了小的“动力火车”来运输它们——肌球蛋白(myosin)带着“货物”沿着肌动蛋白(actin)丝的“轨道”运动;或是另两种蛋白,“动力蛋白”(dynein)和“驱动蛋白”(kinesin)沿着微管蛋白(tubulin)的细管移动。不过这种运输方式需要消耗能量,不是一般的小分子可以“享受”的“待遇”,对于绝大多

数分子来说，还得靠扩散过程进行移动。

由于扩散速度较慢，需要信息快速传递的地方，距离就必须特别短。例如，神经细胞之间信息的传递是通过突触（synapse）进行的。发送信息的神经细胞在突触处释放出信息分子，即“神经递质”。这些分子再靠扩散到达接收信息的神经细胞上。为了保证信息快速传递，在突触处两个细胞之间的距离就比微米还短，只有30纳米左右。这样，神经递质分子在毫秒级的时间里就可以从一个细胞扩散到另一个细胞。如果神经细胞之间的距离再大一些，那么人们从感到被火烧着到避开火源所需要的时间就太长了，人也就会被烧伤了。

明白了这两个原因，就不难理解为什么没有单个细胞的大动物了。那是因为一个大细胞，难以有效地与外界进行物质交换。地球上的单细胞生物在形成更大的生物时是很“聪明”且很有策略的，它们一般不朝着巨大细胞的方向走，而是先聚合在一起，形成群体。例如团藻，就是由几千个到几万个衣藻类细胞组成的一个单层细胞的球形空腔。每个细胞仍然很小，但是团藻却可以大到1~2毫米。体型较大就不容易被其他动物捕食，而且上万个细胞长出的鞭毛一起划动，运动也更有效率。团藻还进行了细胞分化，由一些细胞专管繁殖。这些进化就使得团藻比单个细胞更加具有优势。

细胞分化可以形成更为复杂的结构。例如水螅，它的身体是由两层细胞组成的一根空管。一端是“口”，周围长着几根“触手”，可以用于捕食。另一端则是封闭的，下有“基盘”，可以附着在水草的枝叶上。里面的空腔可以用于消化食物，残渣也由“口”排出，所以“口”同时也是“肛门”。它既可以用出芽的方式进行无性繁殖，也可以长出“精巢”和“卵巢”进行有性繁殖。

沿着这样的聚集一分化的途径，单细胞生物在一起就可以形成越来越复杂的结构。尽管生物体的整体尺寸可以越来越大，但是单个细胞却仍保持在微米水平。动物体内还发展出巨大的“内表面”（如人的肺泡和小肠绒毛）与外界进行物质交换，并且通过循环系统将氧气和养料运输到每个细胞，又把细胞产生的废物带走（植物细胞消耗的能量比动物少得多，所以用叶片扩大表面积和用脉管系统输送物质就可以满足各种细胞的需要）。不同类型的细胞分工合作，形成高度复杂的

有机体，这是生物进化更有效的途径，也是地球上绝大多数生物都是多细胞生物的原因。

但是另一条途径，即细胞自己变大变复杂，也并非完全不可能。例如变形虫和草履虫，它们就是单细胞动物里面的“巨人”。草履虫虽然只有1个细胞，但其长度却可达到200~300微米，可以吃掉大小只有1~2微米的细菌。它有“口沟”用于吃东西，相当于人的嘴和食道；有“食物泡”消化食物，相当于人的胃；有“伸缩泡”和收集管收集和排出废物，相当于人的肾脏、膀胱和尿道；它还有纤毛用于游泳，像人的四肢。食物泡的运动和伸缩泡的收缩还可以起到“搅拌”的作用，加速细胞内物质的流动。

草履虫这样的原生动物能不能进一步“放大”，进化成体型更大的生物体，即走多细胞生物这条路？例如用伸出的突起和通向内部的管道系统扩大表面积，在细胞内建一个专门的“搅拌机”加速物质循环等。这些非细胞的大型结构在实际上能否建成还很难说。

就算这样的内部结构能建立起来，在地球上，这样的单细胞大生物也很少有生存的机会。因为地球上充满了多细胞生物，而多细胞生物是高度有效、竞争力很强的。走另外一条路的单细胞大生物在与多细胞生物的竞争中，会很快被淘汰掉。只有在多细胞生物难以到达的地方，巨大的单细胞生物才有可能进化出来。例如，在深达1万米的马里亚纳海沟的底部，科学家就发现了直径达10厘米的单细胞生物，它的表面长满了皱褶，说明这种生物也懂得用这种方式增大表面积。不过大的单细胞生物只能“躲”在深海这个事实也说明走单细胞放大这条路不是很成功。只有走多细胞分工合作这条路才能产生出高度复杂的生物，包括人类。

有趣的是，在特殊情况下，多细胞生物也可以产生出巨大的细胞。例如，未受精的鸡蛋的蛋黄就是1个细胞，但是细胞内绝大部分是为胚胎发育准备的营养物质，基本上没有什么代谢活动。橘子瓣内梭形的透明颗粒也是细胞；西瓜瓢的细胞也比较大，甚至肉眼可见。但是这些细胞都是准备让其他动物食用的，目的是为了传播自己的种子，长成以后也没有多少代谢活动。要成为进行正常生命活动的多细胞生物体活跃的一部分，每个细胞还得是微米级的。

## 主要参考文献

- [1] Dix J A, Verkman A S. Crowding effects on diffusion in solutions and cells. *Annual Review of Biophysics*, 2008, 37: 247-263.
- [2] Luby-Phelps K. The physical chemistry of cytoplasm and its influence on cell function: An update. *Molecular Biology of the Cell*, 2013, 241: 2593-2596.
- [3] Luby-Phelps K. Cytoarchitecture and physical properties of cytoplasm: Volume, viscosity, diffusion, intracellular surface area. *International Review of Cytology*, 2000, 192: 189-221.
- [4] Koch A L. What size should bacterium be? A question of scale. *Annual Review of Biophysics*, 1996, 50: 317-348.

## 细胞中的“闹市”

我们在休息的时候，呼吸是徐缓的，3秒左右才呼吸1次。摸摸脉搏，近1秒的时间心跳1次。再看看周围的树木花草，它们的变化是人眼所难以察觉的，除非有风吹过，否则它们看起来似乎纹丝不动。在这样的环境中，一切似乎都是那么从容不迫，带给人们宁静、悠闲的舒适感觉。

如果人体细胞中的分子也如此“悠闲”，那就糟糕了，生命会因为没有动力而停止，也更谈不上什么悠闲舒适之感了。按照牛顿力学第一定律，物体在没有受到外力作用时，只能维持静止或匀速直线运动的状态。像呼吸和心脏跳动这样的“非匀速直线运动”及植物叶片的摆动，都需要有力的作用，也就是说，都需要消耗一定的能量。呼吸和心脏跳动时肌肉的收缩，是由体内的高能化合物“三磷酸腺苷”（ATP）来驱动的，叶片和花朵的摆动则是靠风力来推动的。

——生命活动需要细胞内、外的许多分子不断改变自己的位置。例如，空气中的氧气被吸入肺泡后，要进入上皮细胞，再从上皮细胞进入血液，从而进入红细胞与血红蛋白结合，通过血液循环转运至全身。到了循环系统的末端，它们又离开血红蛋白，“跑”出红细胞，“跨越”毛细血管的内皮细胞，进入组织液，再进入身体的各种细胞中，然后“跨过”线粒体的两层膜，到达“呼吸链”中最后一个蛋白复合物（即细胞色素氧化酶），在那里与呼吸链中的质子结合生成水。除了呼吸循环和血液循环需要能量以外，氧分子“旅行”了那么多地方，所需要的能量是从哪里来的呢？

控制基因表达的蛋白质（即“转录因子”）必须要结合到DNA的特定序列上才能发挥作用，例如，转录因子AP-1的一个结合序列就是

AGTCACT (A、G、T、C 4 个字母分别代表 4 种核苷酸，分别是腺嘌呤、鸟嘌呤、胸腺嘧啶和胞嘧啶)。AP-1 首先要在细胞核中“找到”DNA，比较松弛地结合在 DNA 分子上，再沿着 DNA 分子“滑动”，“寻找”像 AGTCACT 这样的序列，然后紧密地结合在这个位置上，继而发挥调控附近基因转录的作用。有位美国教授在学术会议上听完一个关于基因调控的报告后不免惊讶道：“转录因子做如此复杂的运动，所需要的能量从哪里来？”

有些读者可能会想到，人体不是有 ATP 可以提供能量吗？确实，许多生命活动是靠 ATP 供给能量的，如肌肉收缩（肌纤维之间的相对滑动）、细胞把内部的钠离子“泵”到细胞外面，这些过程就是由 ATP 驱动的。葡萄糖从肠道进入肠壁细胞，也需要能量。在这种情况下，细胞内、外钠离子的浓度差，就像水库中蓄存的可以用来发电的水，也可以“带着”葡萄糖进入细胞。但是，并非所有的分子运动都是需要身体供给能量的。如氧分子的运动（除呼吸和血液循环外）、转录因子 AP-1 的运动等，都不需要 ATP，身体也不可能给每个分子都装上一台“火箭发动机”来推动它们的运动。水分子、氧气分子、二氧化碳分子等进出细胞就不需要额外的能量供应，既然如此，这些分子是如何移动位置的呢？

如果不能给每个分子都装上“发动机”，那只有用外力来搬运它们。究竟细胞中有没有“搬运工”来主动搬运“货物”呢？答案是：有。神经细胞的轴突可长达 1 米以上，但神经细胞中的蛋白质主要是在细胞体（含有细胞核的膨大部分）内合成的。这些蛋白质若想到达轴突远端就需要有“搬运工”的帮助。例如，含有神经递质的小囊泡可以被一种叫作驱动蛋白（kinesin）的“搬运工”沿着“微管”（microtubule，“细胞骨骼”的一种）运输到轴突远端。另一种蛋白质——动力蛋白（dynein）则可以“反向运输”，将“货物”沿着微管从细胞远端向细胞体转运。驱动蛋白和动力蛋白都靠 ATP 来给“搬运”过程提供所需要的能量，此外，它们还能运输像线粒体这样的细胞器。

不过这类运输系统运送的大多是比较大的“货物”，如细胞器和囊泡等，许多小分子（如氨基酸、核苷酸、葡萄糖、氧气、二氧化碳等），是得不到靠“搬运工”来搬运的待遇的，要运动还得靠自己。人在走

路时需要能量，那分子运动所需的能量又从哪里来呢？在人体内，这些分子的运动似乎违反了牛顿力学定律，似乎在不需要额外的能量供应时，分子自身就可以完成各种复杂的运动。

实际上这个问题是多余的。细胞中的分子本来就在运动，而且非常激烈，这就是分子的“热运动”。我们所说的“温度”，其实就是微观粒子运动激烈程度的量度。这些微观粒子可以是分子，也可以是原子、离子、自由基、比分子小的基本粒子或者比分子大的颗粒，如蛋白质复合物、病毒等。

温度越高，粒子运动越激烈；温度降低，粒子运动的激烈程度就会减小。热运动完全停止时的温度被称为“绝对零度”。用绝对零度作为标准的温标叫“热力学温标”，也叫“开氏温标”，以开尔文（William Thomson, 1st Baron Kelvin, 1824—1907，英国物理学家和数学家）的爵位名命名，单位为 K。这才是真正反映粒子热运动的指标，而平常使用的摄氏温标则是假设在一个大气压下水的沸点为 100 度和冰点为 0 度而设定的，以瑞典天文学家 Anders Celsius（1701—1744）的名字命名，单位为  $^{\circ}\text{C}$ 。由于摄氏温标只是以水的冰点和沸点作为标准，所以只是一个相对指标，并不能直接反映微观粒子的运动激烈程度。

摄氏温标不仅规定了  $100^{\circ}\text{C}$  和  $0^{\circ}\text{C}$  时的温度，还定出了 1 温度差的大小。按照这个标准，绝对零度就相当于  $-273.16^{\circ}\text{C}$ 。这是目前所认知的宇宙中的最低温度，此时一切热运动完全停止。

高温是没有极限的，火焰的温度一般为几千摄氏度，太阳的核心约为 1500 万摄氏度，宇宙大爆炸几分钟后的温度甚至超过了 10 亿摄氏度，科学家使金离子以接近光速对撞，产生了 4 万亿摄氏度的高温，在如此高温下质子和中子都会“融化”。但是低温却有极限，不可能有零下几千或几万摄氏度，即使是  $-300^{\circ}\text{C}$  也不可能，因为  $-273.16^{\circ}\text{C}$  就是粒子热运动完全停止的温度。

人的体温是  $37^{\circ}\text{C}$ ，看上去不是很高。可是按照开氏温标，人的体温就是 310K（ $273+37$ ）。这才是人体细胞中分子运动的指标。在这个温度下，分子的运动程度激烈到令人难以想象。

例如，在体温环境下水分子的运动速度高达 694 米/秒，比波音飞机的速度还要快 3 倍以上。复杂一些分子其分子量较大，但是总平

均运动能量必须和小分子一样，其运动速度自然较慢。葡萄糖分子（分子量 180）比水分子（分子量 18）大 9 倍，相较之下，葡萄糖分子的运动速度就是 236 米/秒。即使是分子量为 100 万的蛋白质分子，其运动速度也能达到 2.6 米/秒。在直径为 10 微米的人体细胞中，如果没有其他分子的阻挡，蛋白质分子 1 秒能跑 13 万个来回。就算是假设“分子质量”为 100 亿的病毒，其运动速度也能达到 2.6 厘米/秒，如果没有其他分子的阻挡，病毒每秒能在细胞内跑 1300 个来回。

当然，这只是一个形象的比喻，这些微观粒子并不是真的这样来回跑。细胞的内容物主要是液体，其中绝大多数是水分子。这些分子密密地挤在一起，它们的运动速度又是如此之快，所以每个分子都以极高的频率与其他分子相互碰撞。从分子的运动速度和“自由程”（分子在 2 次碰撞之间移动的距离），科学家计算出室温下空气中分子之间的碰撞频率可达 10 亿/秒以上。液体分子之间同时存在着较强的吸引力和排斥力，从理论上计算液体中分子之间的碰撞频率比较困难，但可以从其他实验数据进行推断。

大肠杆菌在适宜的条件下每 20 分钟便可以繁殖一代，在细胞有丝分裂之前，它的遗传物质必须要进行复制。大肠杆菌的 DNA 有 4 639 221 个碱基对。要在 20 分钟内复制一个完整的 DNA，每秒钟就要复制近 4000 个碱基对。即使 DNA 的复制是从一点开始，朝两个方向同时进行，那每秒钟也要复制近 2000 个碱基对。如此快的合成速度令人不得不惊叹。

DNA 是由 4 种不同的核苷酸线性相连组成的，要把不同的核苷酸按照一定的顺序加上，就需要正确的核苷酸靠碰撞到达合成 DNA 的地点。由于有 4 种不同的核苷酸，每次与 DNA 合成地点碰撞的核苷酸中，只有 1/4 的机会是合适的核苷酸。而且在每次碰撞中，分子的方向是随机的，只有少数分子的方向正确，所以核苷酸必须以远远大于每秒 8000 次的频率去碰撞，才能满足大肠杆菌繁殖的需要。由此推断，细胞中多数分子之间碰撞的频率一定远远大于每秒 8000 次。核苷酸（这里指合成 DNA 所需要的含有 3 个磷酸根的“三磷酸核苷”，即 ATP、GTP、CTP、TTP）这种较大分子（分子量 500 左右）的碰撞频率