

第一章 | 经典物理学家走近这个主题

“我思故我在。”

——笛卡儿

1. 研究的一般性质和目的

这本小册子是一位理论物理学家对大约 400 名听众作的一次公开讲演。虽然一开始我就指出这是一个难懂的题目，即使很少使用物理学家最吓人的武器——数学演绎法，讲演也不可能是很通俗的，可是听众却基本上没减少。其所以如此，并非由于这个题目太简单，以致不必用数学就可以解释明白了，而是因为问题过于复杂，不可能完全用数学语言来表达。讲演至少还有一个特点，它还较为通俗，讲演者试图把那些介于生物学和物理学之间的基本概念，既向物理学家也向生物学家讲清楚。

尽管实际上涉及的问题是多方面的，但我的任务只限于讲一个想法——对一个重大问题做一点小小的评论。为了不迷失我们的方向，先把计划简要地勾画出来也许是有用的。

这个讨论得很多的重大问题是：

用物理学和化学来解释？

这本小册子力求阐明和获得的初步答案概括为：

今天的物理学和化学在解释这些事件时显出的无能，绝不应成为怀疑它们原则上可以用这些学科来诠释的理由。

2. 统计物理学结构上的根本差别

如果说，只是为了对那些过去没有做成功的事重新激发起希望，那么上述这个注释就显得过于平淡了。更为积极的意义在于我们想说明，物理学和化学的这种迄今为止的无能为力是经过充分论证了的。

今天，由于生物学家，主要是遗传学家近三四十年来的创造性工作，关于有机体真实的物质结构及其功能的了解已经足以精确地说明，现代物理学和化学为什么还不能解释生命有机体范围内在空间和时间中所发生的事件。

一个有机体的最具活性部分的原子排列及其相互作用方式，和迄今所有的物理学家和化学家作为实验和理论研究对象的所有其他的原子排列是根本不同的。除了深信物理学和化学的定律始终是统计力学性质的那些物理学家外，其他人会把我所说的这种根本差别看成是无足轻重且容易发生的。①这是因为认为生命有机体的活性部分的结构非常特别，和物理学家或化学家在实验室里用体力或在书桌边用脑力所处理的任何物质完全不同 这种看法同统计力学的观点有关系。②既然生命有机体的活性部分具有如此

这个说法可能显得有点笼统。这个问题要到本书末第七章的 7~8 节来讨论。

② F·G·道南在两篇富有启发性的论文中强调了 this 观点。见《科学》（《Scientia》）24 卷，78 期，10 页，1918 年（《物理化学能否描述生物学现象》）；
①1929 年斯密斯学院报告第 309 页《生命的秘密》。

特异的结构，要把物理学家或化学家曾经发现的定律和规则直接应用到这种系统的行为上去，而这个系统却又不具有作为这些定律和规则的基础的结构——要能直接应用，这几乎是难以想象的。

不能指望非物理学家能理解我刚才用那么抽象的词句所表达的“统计力学结构”中的精确含义，更不必说去鉴别这些含义之间的关系了。为了让叙述增添一点声色，我先把后面要详细说明的内容提前讲一下：一个活细胞的最重要的部分——染色体纤丝——可以颇为恰当地称为非周期性晶体。迄今为止，在物理学中我们碰到的只是周期性晶体。对于一位并不高明的物理学家来说，周期性晶体已是十分有趣而复杂的东西了；它们构成了最有吸引力和最复杂的一种物质结构，由于这些结构，无生命的自然界已经使物理学家费尽心思了。可是，它们同非周期性晶体相比，还是相当简单而平庸的。两者之间结构上的差别，就好比一张是重复同一花纹的糊墙纸；另一幅则是堪称杰作的刺绣，比如说，一条拉斐尔花毡，它显示的并不是单调的令人讨厌的重复，而是那位大师精致的、有条理的、富含意义的设计。

把周期性晶体称为最复杂的研究对象之一，当然是对专门的物理学家而言。实际上，有机化学家在研究越来越复杂的分子时，已经非常接近“非周期性晶体”了，我认为其实那就是生命的物质载体。因此，有机化学家对生命问题已做出了重大贡献，而物理学家却几乎毫无建树，也就一点也不奇怪了。

① Raffaello Sanzio(1483 ~ 1520) 文艺复兴时期著名的意大利画家。他的绘画在生动优美之上又有高度的理想加工，奠定了西方近代绘画的典范风格，有画圣之称。他创作了大批壁画(如《雅典学派》)、圣母画、祭坛画和肖像画。——译者

3. 一个朴素物理学家对这个主题的探讨

在简要地说明了研究工作的基本观点——或者不如说是最终的视角——以后，让我来描述一下如何走近这个主题。

首先我打算解释一下什么是“一个朴素物理学家关于有机体的观点”。这里我是指一位物理学家可能会想到的那些观点。这位物理学家在学习了物理学，特别是物理学的统计力学基础以后，开始思考有机体的活动和功能的方式。他忖量自问：根据学到的知识，根据比较简明的基本的科学观点，能否对这个问题做出一些适当的解释呢？

他发现是能够做出解释的。下一步他就把理论预见和生物学事实作比较。比较结果说明了他的观点大体上是合理的，但需要做一些修正。如此下去，他就逐渐接近于正确的观点，或者谦虚点说，接近于自己认为正确的观点。

即使在此我是正确的，我也不知道这条探索途径是否真正是最好的和最简单的。不过，这毕竟是我的途径。这位“朴素物理学家”就是我自己。除了这一条曲折的道路外，我找不到通往这个目标的更好的更清晰的方法。

4. 为什么原子是如此之小

阐明“朴素物理学家的观点”的一个好方法是从这个可笑的、有点滑稽的问题开始的：为什么原子是如此之小？首先，它们确实是很小的。日常生活中的每一小块物质都含有大量的原子。为了让听众理解这一点，可以有许多例子，但没有比开尔文

勋爵^①所引用的例子更能给人以深刻的印象：假定给一杯水中的分子一个一个做上标记，再把这杯水倒进海洋，然后彻底搅拌，使得有标记的分子均匀地分布在全世界的七大洋中；如果你从海洋中任一处舀出一杯水来，将发现这杯中大约有 100 个已标记的分子。^②

原子的实际大小约在黄色光波长的 $1/5\ 000$ 到 $1/2\ 000$ 之间。^③这个比较的意义在于，波长粗略地指出了在显微镜下仍能辨认的最小微粒的大小。就拿这么小的、尺度为黄色波长的微粒来说，它的体积中还含有几十亿个原子。

那么，为什么原子是如此之小呢？

这个问题显然不能光从表面来回答。因为问题的真正目的并不在于原子的大小。它关心的是有机体的大小，特别是我们自己身体的大小。当我们以日常的长度单位，比如码（1 码约为 0.9144 米）或米作为量度时，原子确实是很小的。在原子物理学中，人们通常用埃（简写为 Å）的单位来度量，这是 1 米的百分之一，或以十进位小数计算则是 0.000000001 米。原子的直径

^① William Thomson Kelvin(1824 ~ 1907) 英国物理学家。是热力学第二定律的两个发现者之一，在电磁学领域（包括电磁测量、电工仪器等方面）也有重要贡献，是大西洋海底电缆的建造者。——译者

当然，你不会正好找到 100 个（即使这个结果是经过精确计算的）。你可能找到 88 个、95 个、107 个或 112 个，但也不会少于 50 个或多到 150 个。预期“偏差”或“涨落”是 100 的平方根，即 10 个。统计学家是这样来表达的：你将找到 100 ± 10 个。这个注释可暂时略过，后面还会提到的。它为统计学的 \sqrt{n} 律提供了一个例子。

根据目前的看法，一个原子是没有明确界限的，因而一个原子的“大小”并不是含义十分确切的概念。不过我们可以用固体或液体内原子中心之间的距离来确定它（或者来代替它）。当然，不是在气体状态，因为在常温常压下，气态中的这个距离几乎要大 10 倍。

在 1 ~ 2 埃的范围内。日常单位同我们身体的大小是密切相关的。有一个故事说，码是起源于一个英国国王的幽默故事。他的大臣问他采用什么单位，他就把手臂向旁边一伸说：“取我胸部中央到指尖的距离就行了。”不管这个故事是真是假，对我们来说它的意义在于：这个国王很自然地提出一个可以同自己的身体相比拟的长度，他知道用其他任何东西做单位都是不方便的。不管物理学家怎样偏爱“埃”这个单位，但当他做一件新衣服时，还是喜欢别人告诉他新衣需用六码半（约为 5.9436 米）花呢，而不是 650 亿埃的花呢。

所以，我们提出的问题的真正目的在于两种长度——我们身体的长度和原子的长度——的比例。考虑到原子作为一种独立存在的特殊重要性，问题应该反过来提：同原子相比，我们的身体为什么一定要这么大？

我能够想象到，许多聪明的物理学和化学系的学生会对下列事实感到多么遗憾。我们的每一个感官构成了身体上多少有点重要的部分，然而从上述比例来看，它们却是由无数原子组成的，对于感受单个原子的碰撞来说，它们显然是过于粗糙、太不灵敏了。单个原子我们是看不见、摸不着也听不到的。假说中的原子远远不同于我们粗大迟钝的感官所直接发现的东西，而且也不能通过直接观察来检验这些原子。

一定是那样的吗？有没有内在的原因可以解释呢？为了确认并理解为什么感官和大自然的规律性如此不相适应，我们能由此追溯到某种第一原理吗？

这是物理学家能够完全搞清楚的一个问题。对上面提问的回答都是肯定的。

5. 有机体的活动需要精确的物理学定律

如果生物有机体的感官不那么迟钝，而是能敏锐地感觉到单个原子，或者少数几个原子就能在我们的感官上产生知觉印象——天哪，生命将像个什么样子呢？我要着重指出：可以肯定地说，一个那种样子的有机体是绝不可能发育出有序的思维的，而正是这种有序的思维在经历了漫长的时期和阶段后，才终于形成了原子的观念和许多其他的观念。

尽管我们只选择了感官来谈，下面的考虑对于大脑和感觉系统以外的各个器官的功能也是适用的。然而对我们自身来说，惟一具有特殊兴趣的事件还是：我们在感觉、思维和知觉。对于产生思想和感觉的生理过程来说，除了大脑和感觉系统以外，其他所有器官的功能只是起辅助作用，假如不是从纯客观的生物学观点来看问题，至少从我们人类的观点来看是如此的。而且，这将大大有利于我们去挑选那种和人类认识紧密伴随着的过程来进行研究，尽管我们对这种紧密伴随的平行性质一无所知。其实，我认为那已经超出了自然科学范围之外，而且也许是完全超出了人类理性之外。

让我们回过来讨论下述问题：像人类的大脑这样的器官以及附属于它的感觉系统，为什么必须由大量的原子来构成，才能使其变化着的物理状态密切地对应于高度发展的思想？大脑作为一个整体，以及它的直接同环境相互作用的某些外围部分，和一台精巧而灵敏的足以反应并记录来自外界的单个原子的碰撞的机器相比，为什么它们是不相同的呢？

有两个理由，第一，我们所说的思想本身是一个有秩序的东西；第二，它只能置于具有一定有序性的资料，即知觉或经验之上。这有两个结果：第一，同思想紧密对应的躯体组织（如紧密

对应于我的思想的头脑)一定是十分有秩序的组织,在它内部发生的事件必须遵循严格的物理学定律,并且有高度的准确性;第二,外界其他物体对于这个具有良好组织的物理系统所产生的身体上的响应,显然和相应思想的知觉和经验相对应,构成了我所说的思想的材料。因此一般说来,这个系统和外界之间的物理学相互作用具有某种程度的物理学秩序,就是说,它们也必须遵循严格的物理学定律并达到一定程度的准确性。

6. 物理学定律是以原子统计力学为根据的,因而只是近似的仅由少量原子构成的对于一个或几个原子的碰撞就已经敏感的有机体,为什么不能实现上述目的呢?

因为我们知道,所有的原子每时每刻都在进行着毫无秩序的热运动。这种混乱的运动抵消了它们的有秩序的行动,使得发生在少量原子之间的事件不能有规律地表现出来。只有在无数原子的合作中,统计学定律才开始影响和控制这些集合体(系统)的行为,它的精确性随着系统包含的原子数目的增加而增加。观测到的事件就是通过这样的途径获得了真正有序的特性。现已知道,在有机体的生命过程中起重要作用的所有物理学和化学的定律都是这种统计性的定律;人们所能设想的任何其他类型的规律性和秩序性,总是被原子的不停的热运动所扰乱,或是被搞得不起作用。

7. 它们的精确性是以大量原子的介人为基础的
第一个例子 顺磁性)

我想用几个例子来说明这一点。这是从许多例子中随便挑出的几个,对于初次了解自然界状况的读者来说,不一定正好就是他最满意的例子。这里所说的自然界状况在现代物理学和化学中

是最基本的概念，就像生物学中的有机体是细胞组成的，或天文学中的牛顿定律，甚至像数学中的整数序列 1, 2, 3, 4, 5 等基本事实一样。不应该期望一个十足的外行读了下面几页就能充分理解和领会这个问题。这个问题是同路德维希·玻耳兹曼^①和威拉德·吉布斯^②的光辉名字联在一起的，在教科书中称之为“统计热力学”。

如果在一个长方形石英管里充氧，并把它放入磁场，你会发现气体被磁化了。^③这种磁化是由于氧分子是一些小的磁体，它们像罗盘针似地有着使自己与磁场平行的趋向。可是你别认为它们全部转向了与磁场平行的单一方向。因为如果你把磁场加倍，氧气中的磁化作用也会加倍，更多的氧分子磁体趋向于这个方向。磁化作用随着你作用的场强而增加，这种正比例关系可以保持到极高的场强。

这是纯粹统计定律的一个特别清楚的例子。磁场倾向于产生确定取向，不断地遭到倾向于随机取向的热运动的对抗。这样斗争的结果，实际上只是使磁偶极子轴（氧分子小磁体的南北极轴）同场方向间的夹角小于 90 度比大于 90 度稍占优势。虽然单个原子无休止地改变取向，然而由于它们数量巨大，平均来看，朝着场的方向并与场强成比例的趋向稍占优势。这一创造性的解释是

① Ludwig Boltzmann(1844 ~ 1906) 奥地利物理学家，原子论的积极维护者，统计物理学的重要奠基人，他建立了气体分子运动论，并提出了热力学：熵同宏观态所对应的可能的微观态数目的关系。——译者

② Josiah Willard Gibbs(1839 ~ 1903) 美国物理学家，化学热力学的创立者之一，引入统计系综的方法，建立了经典平衡态统计力学的系综理论。——译者

选用气体是由于它比固体或液体更单纯，这种情况下的磁化作用是极弱的，但无碍于理论上的考察。

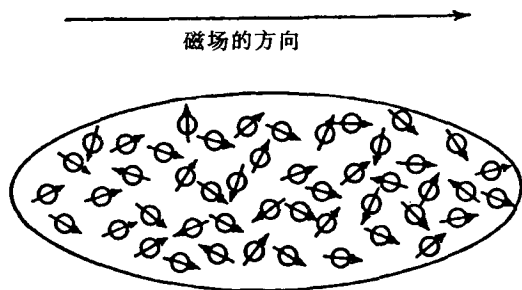


图 1 顺磁性

法国物理学家 P·郎之万^①作出的。可以用下面的方法来验证。如果观察到的弱磁化确是两种对抗趋势平衡的结果，确是力图使所有分子平行于磁场，同随机取向的热运动的对抗趋势的结果，那就应该有可能通过减弱热运动来增强磁化作用，即用降低温度来代替加强磁场，以达到相同的效果。实验已经证实了这一点，实验结果是磁化与绝对温度成反比 与理论预期 居里定律 定量地相符。现代的实验装置甚至能使我们通过降低温度把热运动减低到如此的不明显，以致能够充分显示出磁场的完全取向效应，如果不是全部，至少也是部分的“完全磁化”。这时，我们不再期望场强加倍会使磁化加倍；而是随着场的进一步增强，磁化的增强愈来愈少，接近于所谓的“饱和”。这个预期也定量地被实验所证实了。

要注意的是，这种情况的出现完全依赖于产生可观察的磁化时参与合作的分子的巨大数量。否则，磁化就根本不会是恒定

^① Paul Langevin(1872 ~ 1946) 法国物理学家，发展了布朗运动的涨落理论，提出了磁性理论，对于狭义相对论也有重要贡献。——译者

的，而是无休止地不规则地变动着。这是热运动同磁场二者之间抗衡消长的明显证明。

8. 第二个例子 布朗运动 扩散)

如果把微滴组成的雾装进一个密闭玻璃容器的底部，你将发现雾的上边界按一定的速度逐渐下沉，这种速度取决于空气的黏度和微滴的大小和相对密度。可是，如果你在显微镜下注视一粒微滴，发现它并不是以恒定的速度一直下沉，而是在做一种十分不规则的运动，即所谓布朗运动。只有平均地看，这种运动才相当于一种有规则的下沉。

这些微滴并不是原子，可是它们既小又轻，足以感受到单个分子不断冲击它表面的碰撞。它们就是这样地被碰来碰去，只是平均来说才有跟从重力影响的下沉倾向。

这个例子说明，如果人类的感官也能感觉到少量几个分子的碰撞，那我们将会有多么莫名其妙和杂乱无章的经验呀。事实上，细菌等有机体是如此之小，它们将可能受到这种现象的强烈影响。它们的运动是由周围环境中分子的热运动所决定的，自己没有什么自由选择的余地。如果它们自己有一点动力，还是有可能成功地从一处移到另一处，但是这有点困难，因为受着热运动的颠簸，它们像飘浮在惊涛骇浪中的一叶扁舟。

非常类似于布朗运动的是扩散现象。在一只装满液体，比如装满水的容器中，溶解少量的有色物质，比如高锰酸钾，并使它的浓度不均匀，如图 4 所示，那里的小点代表溶质分子（高锰酸钾），浓度从左到右地递减。如果你对这个系统放手不管，那么就开始了很缓慢的“扩散”过程。高锰酸钾将按从左到右的方向散布过去，就是说，从高浓度处向低浓度处散布，直到均匀地分

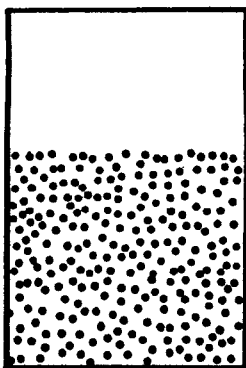


图 2 沉降的雾



图 3 下沉微滴的布朗运动

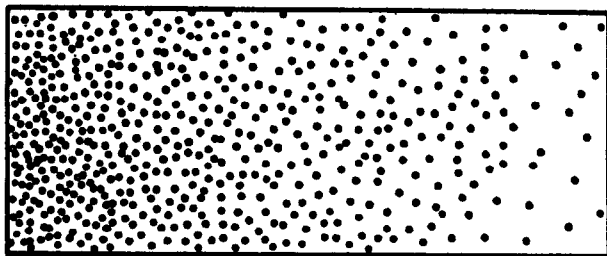


图 4 在不均匀浓度的溶液中，从左到右地扩散

布于水中为止。

对于这个相当简单的、并不特别有趣的过程来说，值得注意的是，绝非如人们最初想象的那样，高锰酸钾分子在某种单一趋向或力量的迫使下从稠密区迁到稀疏区——如同一个国家的人口分散到有更多活动余地的地区去那样。在高锰酸钾分子那里，事情根本不是那样的。每一个高锰酸钾分子对所有其他的高锰酸钾分子来说，是完全独立地行动着，很少和其他高锰酸钾分子相碰撞。可是，每一个高锰酸钾分子，无论是在稠密区还是在空旷区，都遭到水分子的不断撞击，从而随着一种不可预言的方向逐渐移动——有时朝高浓度的方向，有时朝低浓度的方向，有时则是斜向移动。这种运动，同蒙住眼睛的人的活动相似。这个蒙住眼睛的人站在地面上，充满了某种“行走”的欲望，可是并没有选定任何特定的方向，因而不断地变换着他的路线。

尽管所有单个的高锰酸钾分子都是这样随机地行走，还是总体上产生了一种有规则的朝低浓度方向的流动，最后造成浓度的均匀分布。乍看起来，这是令人困惑不解的——但仅仅是乍看起来而已。如果你把图 4 想象为一层层浓度几乎恒定的薄片，考察某一瞬间某一薄片所含的高锰酸钾分子，由于随机走动，确实每一分子有相等的几率被带到右边或左边去。但正是由于这一点，通过某一分隔两层相邻薄片的假想平面的分子，来自左面的比来自右面的要多，这是由于左面比右面有更多的分子参与随机行走的缘故。只要是这种情况，总体上将表现为一种自左到右的有规则的流动，直到均匀分布。

把这些想法转换成数学语言，扩散定律可用下面的偏微分方程来精确表达：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \nabla^2 \rho,$$

我不打算解释这个方程式来麻烦读者，虽然它的含义用普通语言来说也是很简单的。^①这里之所以提到严格的“数学上精确的”定律，是为了强调它应用于每一具体情况时，物理上的精确性是不一定能保证的。由于以纯机遇为理论前提，所以它的正确性只是近似的。一般地说，如果它是一个极好的近似，那也只是由于在扩散现象中有无数分子合作的缘故。我们必须考虑到，分子的数目愈少，偶然的偏差就愈大——在适合的条件下，这类偏差是可以观察到的。

9. 第三个例子（测量准确性的限度）

我要举的最后一个例子同第二个例子是类似的，但它有特殊意义。考虑悬挂在一根细长纤丝上保持平衡取向的轻物体，用电力、磁力或重力使它围绕垂直轴扭转，物理学家常用这种方法来测量使它偏离平衡位置的微弱的力。当然，这种轻物体必须视具体目的而适当地选用。在不断努力改进这种常用的“扭力天平”的准确度时，遇到了一个极其有趣的奇妙的极限。如果选用愈来愈轻的物体和更细更长的纤丝，这个天平就能够感应愈来愈弱的力。当悬挂的物体愈益明显地感受到周围分子热运动的冲击，在它的平衡位置附近开始进行像第二个例子中的微滴的颤动那样一种不停的、不规则的“舞蹈”时，测量的精确度就达到了极限。虽然这样做并没有给天平的测量准确性设置绝对极限，但

就是说，在任何一点上的浓度都按一定的变化率随时间增加（或减少），这种变化率是同该点无限小的环境内浓度在空间中的变化成比例的。顺便讲一下，热传导定律正是这个形式，只要用“温度”代替“浓度”就可以了。

它却建立了一个实际上的极限。热运动的不可控制的效应同被测量的力的效应相竞争，使观察到的单个的偏差值失去了意义。为了消除仪器的布朗运动的影响，你必须做多次的观察。我想，在我们目前的研究中，这个例子是特别有启发性的。因为我们的感觉器官毕竟是一种仪器。如果变得太灵敏，它将是多么的无用。

10. 律

暂且举这么多例子吧。我只想再补充一点，凡是同有机体内部有关的，或同有机体与环境相互作用有关的物理学或化学定律，没有一个不能被选做例子的。尽管详细的解释也许更复杂些，但要点都一样，因此再举例子就会变得千篇一律了。

但是我想补充一点非常重要的定量的说明，关于物理学定律的不准确度的期望值，即所谓 \sqrt{n} 律。先举一个简单例子，然后再进行普遍概括。

如果我告诉你，某气体在一定的压力和温度下具有一定的密度，或者说，在一定的压力和温度下，一定的体积内（体积大小适合于实验需要）正好有 n 个气体分子，那么你可以确信，若能在某一瞬间进行检验，将会发现这个说法是不准确的，偏差将是 \sqrt{n} 的量级。因此，如果数目 $n=100$ ，你将发现偏差大约是10，相对误差为10%。可是，如果 $n=1\ 000\ 000$ ，你多半会发现偏差大约是1000，相对误差为0.1%。粗略地说，这个统计规律是普遍成立的。物理学和物理化学定律的不准确性总是可能发生在 $1/\sqrt{n}$ 的相对误差范围之内，这里 n 是在某些理论考虑或某些特定实验中，为了在一定的空间时间范围内使该定律生效，参与合作的分子数目。

由此你们又一次看到了，一个有机体为了使它的内在生命以及它同外部世界的相互作用，都能为精确的定律所描述，它就必须有一个相当巨大的结构。不然的话，参与合作的粒子数太少了，“定律”也就太不准确了。特别需要注意的是这里出现了平方根。例如，尽管 100 万是一个相当大的数目，可是精确性就只有千分之一。这样一种精度对于一条“自然界定律”来说似乎还是不够的。

第二章 | 遗传机制

存在是永恒的；因为有许多法则保护了生命的宝藏；而宇宙从这些宝藏中汲取了美。

——歌德

1. 经典物理学家那些绝非无关紧要的设想是错误的

于是我们得到的结论是，一个有机体和它经历的全部生物学相关过程，必须具有极多的“多原子”结构，必须防止偶然的“单原子”事件起到太重大的作用。“朴素物理学家”告诉我们的这一点是重要的，正因如此，有机体可以具有足够精确的物理学定律，并按照这些定律实现其颇有规则和颇有秩序的功能。从生物学观点来说，这些先验地得出的（就是说，从纯粹的物理学观点得出的）结论，能否和实际的生物学事实相符呢？

乍看起来，人们往往认为这个结论是无关紧要的。比如说，30年前的生物学家也许已经讲过这一点。可是，对于强调统计物理学对有机体像其他地方一样具有同样重要性的通俗讲演者来说，这个结论还是十分恰当的，尽管实际上这也不过是人所共知的道理而已。因为对任何高等生物的成年个体来说，不仅它的躯体，而且是