

熵、信息与生物进化

——布鲁克斯和威利学说简介

王梅生

上海华东师大

布鲁克斯是加拿大大不列颠哥伦比亚大学动物学教授,威利是美国国家自然历史博物馆副馆长,堪萨斯大学分类学与生态学教授。二位学者(以下简称为 B. W.)除了在各自的专业方面有大量的著作和论文发表外,他们对熵、信息与生物进化有极大的兴趣,并且进行了深入地研究,发表了大量论文和著作,成为美、加、英三国这方面研究有影响的人物。

近年来,国内许多学者也对熵、信息与生物学的关系议论很多,也有不少论文或著作发表,然而大量介绍和引用的是早期物理学家薛定谔的观点以及近期比利时物理学家普里高津的耗散结构理论和德国物理学家哈肯的协同学理论。这属于物理学家和化学家运用

物理学的理论与方法讨论生物学问题,而本文要介绍的是两位地道的生物学家用物理学的理论与方法研究生物进化问题,由于各自的知识背景不同,两位生物学家确实有许多不同于物理、化学家的新观点为国人所未知,因而值得介绍给国内广大读者,借以开拓思路。

由于 B. W. 有关熵、信息与生物进化的论文和著作很多,涉及许多生物学科,这里只能介绍他们的基本观点。至于这些观点在具体学科中的应用(如物种形成,分类学以及群体生物学等),留待以后介绍。

“迈向统一的生物学理论”

B. W. 研究熵、信息与生物进化的目的是要建立

照射孕妇穴位,使之成功地实施人工流产。

当前为适合激光疗法的激光理疗仪正异军突起,门类多样的激光治疗机异彩纷呈。除了临床常用的一般激光治疗机外,还有电脑控制、自动化的激光检测、预警、治疗一体化激光医疗仪。据最新报道,日本防卫医大医用电子工程和富克达电子公司已成功开发从诊断到治疗一体化激光装置,并已用于下肢动脉闭塞症手术,拟再用于冠状动脉硬化症诊治。1990年英国首次推出外科手术用二极管激光医疗系统,激光波长 805 nm,输出功率 30~35W 并可连接单光纤。不列颠哥伦比亚癌症研究机构研制成一种肺荧光成像内窥镜系统,使用波长 422nm 的 He-Cd 激光器,激光束仅 1mm;该系统不管癌患者是否服用光敏药物,都能分辨出正常与异常组织细胞在自然条件下荧光光谱的差别,能有效预警早期内腔、内脏的癌病变。印度采取时间平均散斑干涉法研制成一种(使用输出功率 7 mw,波长 632nm,光斑 10cm 的) He-Ne 激光扫描分析胸部激光散斑图形仪器,用于监护心脏病。近年来,被誉为激光医学的一颗“新星”——自由电子激光器诞生了。它将成为光动力学疗法最为理想的激光器。它具有从红外到紫外连续可调的波段范围、高的功率密度及其可控性,准确可调的光斑大小与可控脉宽,在切除病变组织时对周围细胞伤害极小,尤其适用于激光外科、光辐射疗法。还有一种 ArF 准分子激光器发出紫外光,对于病灶非热能的切开、切除显示出光化学疗法威力,现仅在一部分眼科中作角膜手术的近

视治疗;ArF 激光由于对骨切开能力很强,可望用于整形外科。

以不同工作物质产生的激光(Ar⁺激光、Cu 蒸气激光、准分子激光)激发的染料激光器具有连续可调的功能,并已经在临床上和基础医学研究上发挥了作用。另一种以 GaAs、InP 等化合物为材料半导体激光器随着外延生长工艺的不断改进而推陈出新。由于其体积小、振荡要求条件简单,可制阵列作为泵浦,易与光纤配合,故这一类半导体激光器已在光纤通信中大放异彩。同样也能为激光医疗仪器向小型化发展增光添色。近年来,半导体激光器需求量增长很快,1990年销售额仅 100 万美元,1991 年翻了一番,1992 年达到 220 万美元。根据 Ophthalmic 公司和医学激光咨询组资深顾问 Irving Arons 预测,全世界医用激光系统销售从 1992 年的 7.5 亿美元上升到 1995 年的 11 亿美元;1995 年其产值可望达 60 亿美元,平均年增长率 17%。

、随着科学技术的日新月异,当前物理学研究已经渗透到其他自然科学中,与生命科学、现代医学之间联系日趋紧密。激光技术已经推广应用到现代医学的各个部门,不仅在学科研究上结出丰硕之果;而且在检测、诊断、治病治病方面创造了不少奇迹,这是人类引为自豪的。展望 21 世纪,激光技术本身将继续发展,同时激光医学在基础研究、诊治疾病和保健预防等方面也必将前景灿烂。

统一的生物学理论,因而他们把自己的专著《作为熵的进化》一书的副标题定做《迈向统一的生物学理论》。

他们认为,要统一生物进化理论,必须提出共同背景的动力学和共同的流通“货币”(即公共的可比较的量),从而把各个功能层次上的现象作为更普遍现象的不同表现形式而联系起来。为此必须在生物进化与更普遍的自然规律间找到联系。生物进化是与时间相关的,以从旧的有序态中形成新的有序态为特征的过程。通常具有这种性质的系统要用统计力学或者非平衡态热力学来描述。对观测者而言,时间推移是通过各种类型的与时间相关的不可逆过程来表现的。据此,所有与时间相关的过程都显示熵性质,生物进化也应与熵有关。

“生物进化是个熵过程”

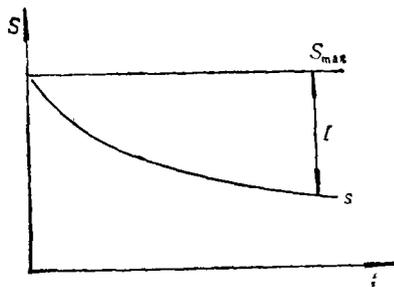
B. W. 认为,科学概念的框架往往是由中心假说和与中心假说相关的辅助假说构成的。中心假说应给出概念框架所包含的基本事实,但由于它的简明性,难以直接验证。而统一于中心假说的各具体研究方面则形成一套可验证的辅助假说。生物进化的中心假说是“生物进化是个熵过程”。

B. W. 解释说,在中心假说中特别强调熵和信息概念的重要性是因为:(1)熵和信息为生物进化过程与物理定律之间提供了联系,这表明生物过程不受特殊的生物定律支配;(2)熵和信息为生物系统内存在的某个内在的非随机因素驾驭进化变化提供了可能的证明方法;(3)熵和信息为各辅助假说间提供了概念联系。

复杂性与组织化

复杂性与组织化是两个概念,一个复杂性高的系统不一定组织化高。同样一个组织化高的系统也不一定复杂性也高。生物进化的特点是复杂性与组织化同时增加。目前普遍认为复杂性与熵有关,而组织化与信息有关。

至今国内一些学者在用熵和信息解释生物进化现象时,总是认为系统的最大可能熵 S_{max} (即 $\log W, W$



图① 目前国内流行的 I 与 S 和 S_{max} 的关系

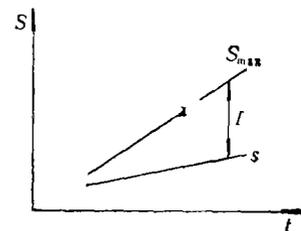
为微观状态数)不变(即 W 不变)。因此若系统的信息量 I 增加,则系统的实际熵(即观测熵) S 必须减小,这是因为 I 的定义是

$$I = S_{max} - S \quad (1)$$

由该式和图(1)可知,由于 S_{max} 恒定, S 与 I 不能同时增加,因而复杂性和组织化不能同时增加。而这是与一般情况下的生物进化不符的。其次是,按照这种关系,随着进化的发展,则系统的实际熵 S 在不断地减小,最后当 S 减小到零时,系统也就不再变化了,因而进化也就终止了。导致上述弊端的根本原因是认为 S_{max} 是恒定的,即最大微观状态数是恒定的。如果假设 S_{max} 和 S 是随时间增加的,并且 S_{max} 增加的速率比 S 快,这样 S 和 I 就可以同时增加,因而复杂性和组织化也可以同时增加。B. W. 的这一重要观点首先是由宇宙学家提出的。

生物进化与宇宙进化

宇宙学家莱泽和弗洛奇认为,宇宙自大爆炸之日起开始膨胀,最初阶段宇宙是热的气体,而当宇宙中的



图② 宇宙进化中 I 与 S 和 S_{max} 的关系

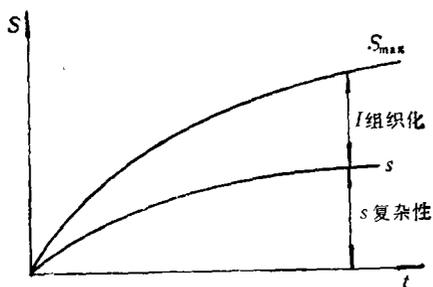
物质质量集结到足够大,以致万有引力作用不能忽略时,引力将影响正在膨胀中的宇宙,以致宇宙中的实际熵 S 的增加速率落后于最大可能熵 S_{max} 的增加速率。

据式(1)和图(2),则 S 和 I 可以同时增加。莱泽进一步认为,进化永远以相空间的增加为特征。在进化方面,生物系统与物理系统相似之处就在于把生物系统视为膨胀着的宇宙系统。由于结构的实现落后于相空间的膨胀,因而熵 (S) 和有序(信息)同时增加。

若把上述宇宙进化中的熵变思想引用到生物进化中去,则进化中的内部遗传约束就相当于宇宙进化中的引力约束,它将使生物系统中实际发生的状态数比最大可能发生的状态数少,即实际熵比最大可能熵小。如果系统的最大可能熵增加速率大于实际熵增加速率,则如图(3)所示,熵 (S) 和信息 (I) 同时增加。

B. W. 进一步认为,当外因与进化世系不相抵触时,复杂性(熵)与组织化(信息)随时间同时增加,熵增加的速率将随时间趋于最小值,而组织化的程度将随时间趋于最大值,世系最大地变为自组织化。对作用于内部约束的外界因素来说生物系统将变为最佳适应状态。而外因将影响熵增加速率和组织化程度增加速率。

生物进化与宇宙进化间的这种相似性,也许正是



图⑨ 生物进化中 I 与 S 和 S_{max} 的关系
国内一些学者所说的全息关系吧!

内部遗传约束

B.W. 认为,如果进化是属于热力学第二定律的某些生物过程的自然结果,则现有的进化理论必然是不完善的,例如达尔文和达尔文主义的自然选择理论就是不完善的近因论(具有国内学者常说的外因论含意)。“达尔文创造了一个摆脱自然幽灵的近因论”,“从而把生物学推入牛顿力学的框架(即外因论的框架)”。

B.W. 进一步解释说,虽然用自然选择解释进化是不完善的,但这不等于承认直生进化(或译为定型进化)是合理的。正确的方法应该是把它们二者结合起来,为此必须为自然选择提供一些约束条件,并借助这些约束条件从自然规律控制下的所有可能的事件组中选择出一些特定的可观察到的事件(即确定哪些是可能发生的,哪些是实际发生的)。B.W. 认为,进化中的约束不是来自环境而是来自历史。进化主要由物种的过去历史(即内部遗传约束)决定,而自然选择和其他近因因素主要是限定进化速率。

若进化是由外部因素产生和维持的以有序为特征的过程,则可以严格地用自然选择来解释。然而为了与热力学定律相一致,其动力学过程中必须引入麦克斯韦妖^{*1}。如果进化是在内部遗传约束下以顺序地改变其固有性质为特征,如个体发育和繁殖,则不需要麦克斯韦妖,为此必须证明熵伴随着生物过程而增加。

B.W. 认为,在热力学第二定律作用下的生物系统内的历史约束的必然结果是自组织,生命系统的自然结果是通过增加熵而不是减小熵去增加复杂性和自组织。因而进化不需要负熵。

生物进化的两种模型

目前有关生物进化的模型基本上有两种,一种是边界条件模型,另一种是初始条件模型。现将 B.W. 对这两种模型的看法介绍如下:

一. 边界条件模型

B.W. 认为,这种模型就是普里高津所说的热力学

模型。它所涉及的系统其内部是随机的,没有初始“记忆”的,系统的宏观性质由系统边界的力引起。如果流过系统有足够数量的能流使系统扰动,并由随机态过渡到某一非随机态,一般都称其为“自组织”。其实这不能叫做“自组织”,而是外力作用下的“受迫组织”^{*2}。

当该模型用于生物学时,(1)时间非对称性起源于系统外的环境的能量,因而进化是随机过程。在此过程中进化世系是在静止的相空间内“跳变”,而静止的相空间是在特定流的“选择”影响下由所有可能的系统构型确定的。(2)该模型中,由图(1)定义的宏观信息 I 是时间过程中任一点的唯象描述。但是由于随机性和缺少宏观性质的内因,因而宏观信息与生物信息没有联系,不是系统的内在信息。(3)按照图(1),该模型无法正确地解决复杂性同时增加的问题。(4)该模型来源于量子理论的思想。若假定系统的量子微观态数一定,则组成系统的粒子的最大可能分布是所有量子态被等几率地随机地填满。任何观测到的对随机态的偏离都是来自系统边界以能量形式出现的选择力的作用。若系统受到选择力影响,则量子态的构型趋向于由选择力作用给出的最大可能状态的构型。由于系统是没有“记忆”的非历史结构,因此只要在相同的选择力影响下,不管起始点在何处,通过足够长的时间后,系统都将变为相同的构型。系统的宏观性质是严格地统计制品,用统计熵量度它是恰当的。

二. 初始条件模型

B.W. 认为,这种模型是普里高津所说的动力学模型,是决定性的和可逆的。然而莱泽指出:这种模型的子集^{*3}是宏观的,如果系统的最大可能熵随时间增加,如果内部约束使系统熵的实际增加速率变慢,将产生宏观信息(参见图 3)。这类系统起码“记得”某些初始条件,因而信息成为因果组成的一部分,某一时刻的宏观信息可以确定系统的宏观有序,可以约束系统的未来进化,但不能决定未来。由于此信息是生物系统固有的,不是强加在系统之上的,因而是真正的“自组织”。当然此系统仍然处在变动的环境之中,并且不排除边界条件对它的影响,不排除环境约束变为内部约束的可能性。

当该模型用于生物学时,(1)时间不对称性来源于任一功能层次上系统的历史经历。协调的生物学功能要求生物体内物质某种程度的组织化。如果所有生物世系都表现出某种程度的宏观有序性,同时如果有序

*1 有关麦克斯韦妖问题,可参阅本刊 91 年第 4、5 期《信息与信息——麦克斯韦妖的启示》一文。

*2 一般物理学家认为这就是自组织。可是 B.W. 认为这是受迫组织。

*3 若集合 B 的全部元素都存在于集合 A 中,则 B 是 A 的子集。若把系统视为一个集合,则子系统就是一个子集。

是通过过去的世代提供的,则在此过程中存在一个内在的时间不对称性.生物的继承性保证复制活动的产物是高度组织化的,甚至在继承出现缺陷、边界条件也在影响系统的情况下,这仍然是正确的,因而已有的继承机制是系统宏观行为的初始原因.(2)系统的唯象信息(图3)表示在初始条件约束下,使实际的熵增加比最大可能的熵增加更慢的程度,是系统不能再变为最大随机态的估量.作为初始条件传给下一代的非随机性(即宏观有序)在约束着系统,因此该模型中信息不仅是系统的唯象描述,而且是系统的因果组成部分,因而生物系统中的信息是系统的实在能力.在具有遗传组分的任何信息系统中,唯象信息是生物内在信息效应的直接估计.由于唯象信息是内在生物信息引起的,因而唯象信息起码部分地是系统熵的函数.由此可见,内在生物信息形成了对生物宏观行为(如个体发育或进化)的初始条件约束.(3)如图(3),该模型能给出复杂性与组织化差异的信息,并且在正常情况下,复杂性与组织化可以同时增加.(4)该模型假定系统和它的边界都是开放的和能够演化的.由于生物信息的继承性引起的内部时间不对称性,进化世系将分布在微观状态数随时间增加的方向上,因此由进化世系占居的最大微观状态数决定的相空间也随时间增加,最后只要复制率大于突变率,相空间总是比由进化世系占居的微观状态的集合以更快的速率增加,因而出现未填满的相空间.只要出现未填满的相空间,任何宏观行为都是熵行为,因而熵的统计估计将是系统行为的恰当量度.(5)该模型是一种“非达尔文主义”的新理论.当它用于具有继承机制的系统时,既排斥了生态决定论,又排斥了目的论和活力论,因为它的设计蓝图来自历史的约束,而不是来自未来的目的.实际上,它是自然选择论与直生进化论的结合.

两种进化模型比较

B.W.认为,边界条件模型与目前生物学中某些理论(如自然选择理论)较好的一致,但它没有找到进化机理.而初始条件模型与已有的遗传机理是一致的,但它不包括现代进化理论中的几个主要观点(虽然它没有拒绝这些观点的存在).B.W.十分偏爱初始条件模型,并列出了优于边界条件模型的十大优点.现简述如下:

<1>它阐明了生物系统为何既可看做是决定的(受一定的历史与初始条件约束)又可看做是随机的(遗传是不完美的,因而有熵;边界条件也在影响进化).这表明生物系统是决定性与非决定性相结合的系统,对进化的某些方面做出决定性预言是不可能的;

<2>它说明了进化为何是熵但又表现出好像是负熵的原因;

<3>它提供了一个共通量(宏观熵与宏观信息)和动力学过程(图3),用以联系所有生物功能层次.并发现是信息确定结构,而不是能量确定结构;

<4>它找到了生物学中宏观行为的机制,并且这些机制在实验上被证实了;

<5>它阐明了生命物质自组织能力的由来是生物信息和生物信息与唯象信息的关系;

<6>它给出了生物学中组织化(与宏观信息相关)与复杂性(与观测熵相关)以及它们关系的协调性;

<7>它重申了历史和历史分析对进化生物学的重要性(因为历史约束就是初始条件约束),并给出了终极原因性的公理——历史决定内部的方向性,因而进化是内在的非强加的过程.

<8>它属于历史结构主义理论,在对进化解中没有一个形态服从于功能.相反它预言生物进化过程中结构变化比功能变化更加经常发生.对每一时刻的现存态的进化解必定是历史上已实现的其他态的延伸;

<9>它提出了一个新的“自然平衡”的观点.众所周知,生物系统是通过一些对立的力的平衡组合而组织化的.例如,突变是受到选择对抗的随机过程,繁殖可增大群体的规模,但受到竞争者的对抗.过去一些研究者认为,由于这些对立的力在同时起作用,生命系统处在精确的动态平衡之中,组织化由最强大的力决定,从而表现出适者生存的本质.而B.W.则认为这些力不是对立的,而是互补的.但又为何在表现上对进化的影响是对立的呢?这是因为组织化发生在用两个以不同速率进行的熵现象表征的任何系统中.从较快速率变化的熵现象角度看,速率较慢的现象似乎在相反的运动,从而显示出对抗效应(正是由于这一点,B.W.把该模型视做相对论观点的模型).例如与较高的突变率相对应的繁殖世系图中,相对较低的变化率似乎是在对抗有性繁殖系统中的突变效应.这是一种自然观的理论,即组织化来自历史的以不同速率进行的互补过程,而不是来自对抗力的斗争结果,甚至可以说真实的对抗力正在瓦解.

<10>初始条件模型并不排斥边界条件模型能解释的现象,尽管不能给予这些现象以同样的含意.相反边界条件模型则排斥任何类型的初始条件约束.因而前者是更为普遍的理论.

B.W.认为,一种理论可以消亡也可以纳入更加普遍的新理论之中.由于生物进化一直在发生,选择与竞争也一直在影响生物进化,因而达尔文和新达尔文主义的理论不是虚假的,只是与他们提出的新理论相比不够完善,而且其理论框架又不允许它变得完善,因此可以把它视为新理论的特殊情况.