

一、时间之箭

时间是有方向性的，总是从过去向未来流动。这就是时间之箭。早在两千四百多年前，孔夫子就说过：“逝者如斯，不舍昼夜”（时间的流逝就象这河水一样，日夜不停啊！）唐代著名诗人李白也曾满怀感慨地吟唱：“黄河之水天上来，奔流到海不复回！”

但自然科学中研究时间之箭，却较晚——始于19世纪中叶。在那以前，科学仅仅研究没有时间箭头的对象。控制论的奠基人维纳(N. Wiener)说：“天文历书顺读与倒读都是一样的，未来总是以某种形式重复着过去。除了初始位置和方向外，顺转和逆转的两个太阳仪之间的运动没有任何差别。因此，假如把一部行星运动的电影片的放映速度加快，使得我们可以感觉到行星的运动，同时倒过来放映，那么它还是符合牛顿力学的一种行星运动状态”。维纳还把这种可逆性变化形象地比喻为“回文”(Palindrome)，即一种词和句子倒过来时仍具有原意的文句。所以维纳指出：“当这一切被牛顿归结为一组抽象的公设而推演出一门严格的力学的时候，这种力学的基本定律并不因时间变数，变为它的负数而改变，或者说，经典力学对于时间的平移群是不变式”。爱因斯坦也曾说过：“对于我们这些坚信物理学的人，过去、现在和将来的区别只是一种幻觉，但却是一种持久的幻觉。”

1822年，法国学者傅里叶(J. Fourier)以严格的数学形式表述了热传导定理。热传导取决于温度梯度，即热只能从高温传向低温。热传导是不可逆的，它对于时间的平移群已经不再是不变式，它的未来与过去不对称。这是自然科学中研究时间箭头之开始。

1824年，卡诺(S. Carnot)发表题为“关于热动力学以及热动力机制的看法”的经典论文，从理想的“卡诺热机”模型提出著名的卡诺原理。在卡诺原理中已经包含有“功可以完全直接转变为热，但热却不能完全直接转变为功”的思想。这被看作是热力学第二定律的萌芽。功和热的转变是不对称的，这中间就包含了时间箭头。

1850年，克劳修斯(R. J. E. Clausius)仔细研究了卡诺提出的理想热机模型，正式提出热力学第二定律：“热不可能自发地从一个较冷的物体流向一个较热的物体”。为了使热力学第二定律从定性形式发展为定量形式，克劳修斯经过十四年的努力，终于在 his 著名论文“热的唯动说”中提出了熵的概念，并给出了数学表述形式。1865年，克劳修斯将热力学第二定律表述为熵增加原理：“系统经绝热过程由初态变到终态，它的熵不减少；熵在可逆绝热过程中不变，在不可逆绝热过程中增加”。



1927年，著名物理学家爱丁顿(A. S. Eddington)在爱丁堡大学首先提出“时间之箭”(time's arrow)的说法，并且指出：“迄今物理学中所说的时间之箭，仅仅只是熵的性质”。

二、两类时间箭头

几乎与克劳修斯同时，生物学家达尔文(C. R. Darwin)提出了另一类时间之箭。1859年，达尔文出版他的巨著《物种起源》，以自然选择学说解释生物进化，奠定了生物进化论的基础。高等生物总是从低级生物进化而来，进化之后，高等生物即使发生局部器官的退化，也不可能退化成原先的低等生物。（此命题的逆命题不一定正确，不能说“低等生物总会进化成高等生物”）。

在生物进化过程中，时间的过去与未来是不对称的，这是一个不可逆过程。但生物进化的时间箭头与熵增不同。熵增意味着退化，即旧事物的分解和衰亡；而进化是新事物的产生和发展，它的时间箭头是指向熵减少的。这样，事物演化的时间箭头便可以分为退化和进化两大类。

进化意味着熵减少，这是否违反热力学第二定律？自达尔文的《物种起源》出版以后，多少年来这个问题一直困惑着物理学家们。彻底解决了这个疑难的是俄裔比利时科学家普里高津(I. Prigogine)。早在提出耗散结构理论之前，40年代至50年代，以普里高津为首的布鲁塞尔学派就已经把热力学的研究推广到非平衡态的开放系统，建立了不可逆过程热力学或非平衡态热力学。这时普里高津已经提出了生物体以环境的更大熵增为代价而减少本身的熵。普里高津曾在《不可逆过程热力学》一书中说过：“生物体的组织结构普遍地增加的事实相应于熵的减少。”布鲁塞尔学派的德格鲁脱(S. R. DeGroot)也曾指出：“进化论所说的生物体内部复杂化趋势与开放系统的熵减少是一致的”。

生物体的复杂化或有序化，相应于熵的减少，但与热力学的熵减少毕竟不完全是同一回事。普里高津察觉到了这一点。因此，他后来在耗散结构理论中就小心翼翼地避免用熵减或负熵来指有序化。他只是说，耗散结构依靠来自环境的负熵流而产生有序化，但他决不肯再轻易说有有序化即熵减少。这是普里高津的严谨之处。他避开了信息论的熵和负熵概念，而将整个耗散结构理论局限于热力学中。即使是“非平衡、非线性热力学”，也仍然是热力学！普里高津事实上已经在向经典热力学开刀了，但他却没有做得更彻底一些。

可是，事情的发展却偏偏不以人的意志为转移。在

本文为中华社科基金资助课题“广义进化论”的部分内容。

目前已经浩如烟海的评介性文章中,耗散结构屡屡被定义为“在远离平衡的条件下,借助于外界的能量流和信息流而维持的一种空间或时间的有序结构”。偏偏要节外生枝,在能量流之外另加上“信息流”!这样的说法已经连篇累牍,而普里高津却不置一词。莫非他已经默许了?事实上,普里高津已经说了:“把我们的探讨与信息论密切联系将是可行的”!

生物体或耗散结构本身的有序化,可以用信息论的熵减来描述。信息论中由申农(Shannon)公式 $H = -\sum p_i \log_2 p_i$ 定义的熵(信息熵)是广义熵或泛熵,可应用于描述任何一种物质运动方式(包括粒子的热运动乃至生命现象)的混乱度或无序度,它的矛盾对立面叫负熵或信息量,是有序度或组织结构复杂程度的表示。广义熵概念的外延比热力学熵要广,对于热力学过程可还原为热力学熵;但热力学熵却不能应用于非热力学过程,因为热力学中的熵概念局限于热运动这种特定的物质运动方式,它与热量有特定的比例关系,所以不能应用于不涉及热能传递或转换的非热力学过程。可以说,热力学熵的概念是包含于广义熵概念之中的,是广义熵这个集合中的一个元素。

自然界存在着自发的退化趋向,即无序化(混乱)趋向,这可以用广义熵(泛熵或信息熵)的增加来描述。热力学的时间之箭指向熵增加的方向,只是自然界广义熵增加的时间之箭的一类特例。换言之,不仅热力学的时间之箭指向熵(热力学熵)增加,自然界多种多样的时间之箭也是指向熵(泛熵)增加的。

自然界为什么会趋向自发的无序化或混乱?回答是:由于自然界无知!如果自然界会自发地进行有序化,那才是怪事。用一块隔板把一个容器分成两半,在左半倒入蓝墨水,右半倒入红墨水,然后抽开隔板。无知的蓝颜料分子当然不知道自己“应该”留在容器的左半还是“应该”进入右半,它们只会作随机运动。如果留在左半与进入右半的概率相等,则经过一段时间,会有一半的蓝色分子进入右半,红色分子也如此。于是红蓝分子在容器中达到了“平衡”,它们几乎是均匀地混和了,看起来是一瓶紫色墨水。平衡以后,某种颜色的分子留在左半或进入右半的概率仍相等。这样,平衡态得以保持。它们不可能再自发地分开成为红墨水和蓝墨水。

自然界还有另一类演化过程,即进化过程。前已述及在这类过程中的熵减是以环境的更大熵增为代价而实现的。但在超强引力导致黑洞甚至整个宇宙发生引力坍缩时,其熵减不需要环境的熵增。这将在下节中进一步讨论。

三、宇宙学时间之箭

自然界自发的熵增过程,最大者莫过于宇宙的膨胀。因而,宇宙膨胀是最强的、无与伦比的时间之箭。宇宙膨胀起因于宇宙起源时超密物质(“宇宙蛋”)的大爆

炸。“宇宙蛋”物质密度极大,在极其强大的引力作用下应发生引力坍缩,最终成为奇点(singularity)。何以不坍缩反而大爆炸?笔者设想,这是因为有一种目前人们尚未认识到的极其强大的斥力在起作用。这种力可以称之为“奇点力”(singularity force)。奇点力在超密物质坍缩至 $\leq 10^{-33}$ 厘米(普朗克距离,达此距离时一切自然规律将失效)时才产生。由于奇点力的存在,使坍缩物质不可能达到奇点。这就解决了奇点的疑难,并有可能给统一场论提供新的启示。由于奇点力的作用,我们没有必要象霍金(S. Hawking)那样假定宇宙“起源于无”。

如果宇宙物质的密度大于临界密度

$$\rho_c = 3H_0^2 / 8\pi G \approx 10^{-29} \text{g/cm}^3$$

(式中 H_0 为哈勃常数, G 为万有引力常数),则宇宙是封闭的,引力将使得宇宙膨胀速度降低,并进而停止膨胀,转为收缩。临界密度 ρ_c 、宇宙的实际密度 ρ_0 与描述宇宙膨胀速度变化的减速参数 q_0 满足下列关系:

$$q_0 = \rho_0 / 2\rho_c = 4\pi G\rho_0 / 3H_0^2,$$

如果 $q_0 > \frac{1}{2}$, 宇宙将封闭,否则就是开放的。

近年来关于中微子静止质量的发现及其研究进展,表明宇宙有可能收缩。宇宙大爆炸产生的中微子比其他物质粒子的总数还要多 10 亿倍,是宇宙间数目最多的基本粒子,为光子密度的 2 倍,质子密度的 2 亿倍。宇宙中除了存在 3K 微波(光子)背景辐射之外,还存在着 1.9K 的中微子背景辐射。中微子充斥整个宇宙。即使中微子只有一丁点儿质量,整个宇宙中的中微子质量总和就要大大超出所有其他物质的质量总和。据估算,宇宙中每立方厘米中约有 54.4 个中微子。那么,中微子的质量只要达到几十个电子伏,充斥宇宙的中微子即足以产生极其巨大的引力能,从而满足宇宙中动能与引力能的匹配要求,使宇宙成为封闭的。如此看来,浩瀚的中微子“海”足以形成巨大的引力源,宇宙总有一天(可能是一百亿年后)会发生收缩!

宇宙收缩与宇宙膨胀具有完美的对称性。收缩阶段应该是膨胀阶段的时间逆转,时间之箭指向熵减少!(霍金等人最初持此种观点,但后来放弃了并进而反对这种观点。这将在下面的“兰兹伯格妖”一节中讨论)。宇宙的收缩将形成一个“超级黑洞”。这个超级黑洞在超强引力的作用下仍将发生引力坍缩。坍缩至 10^{-33} cm 时,奇点力发生作用,将导致另一次宇宙大爆炸。宇宙学的时间箭头将再次逆转过来,又开始新的膨胀和熵增加。由于宇宙收缩导致熵减少,宇宙不会发生热寂。

(待续)