



关于化学信息学的探索与思考

徐光宪*

(北京分子科学国家实验室, 北京大学化学与分子工程学院稀土材料化学国家重点实验室, 北京 100871)

摘要 从化学角度探讨信息科学, 提出下列观点: (1) 通讯或信息传递必须有四个要素, 在传统的信源、信道、信宿三要素的基础上, 应增加“信的”要素, 即信息传递的目的或结果. (2) 任何物质粒子都有“互补配偶子”, 这是与对称性有关的普遍规律. (3) “互补配偶子”之间有信息传递, 它们互为信源和信宿. “互补配偶子”之间都有一种或几种相互作用, 这就是它们互相联系的信道. 信息传递的结果就是互相吸引, 组成高一级的粒子. 这就是“信的”. (4) 不同意 Stonier 的观点, 认为信息和能量不能互相交换. (5) 有无必要在物理学和化学中引入信息概念? (6) 关于进化与退化的思考.

关键词 信息 化学信息学 通讯的要素 信的 互补配偶子 负熵 进化 退化

1 引言

自从 C. E. Shannon 在 1948 年发表著名论文《通讯的数学理论》^[1]以来, 信息的概念已在人类知识的各个领域广泛应用, 并提出几十个不同的定义^[2]. 这些定义是如此之不同, 以至提出“是否存在统一的信息理论?”的疑问, 并因此在 1999 年召开了关于“The Quest for a Unified Theory of Information”的国际会议^[3], 但没有得出一致的结论.

本文从化学的角度探索化学信息学和信息化学这两个交叉学科. 信息化学用信息科学的理论和方法研究化学, 使化学发展获得新视角、新概念、新理论、新方法, 将是化学的一个分支. 1971 年 S. Wold 最早提出 Chemometrics (化学计量学), 至今已有 35 年历史. Chemometrics 也可翻译为信息分析化学, 应该是信息化学的一个分支.

化学信息学用物理和化学的观点、理论、方法探讨信息科学问题, 如能成立, 将是信息科学的一个分支. 作者考虑基础化学信息学应探讨的问题有:

(1) 信息是什么? 从物理和化学的视角, 如何理

解信息? 如何定义信息? 信息如何分类? 这些观点如何与正统的信息科学兼容? 信息的多种概念和定义, 只有互相兼容, 才能导致统一的信息理论.

(2) 信息的“量”和“质”的问题.

(3) 信息和能量可以互相交换吗?

(4) 原子、分子有没有信息? 如有, 可否把分子在恒星标准状态和地球标准状态的信息量计算出来. “可见宇宙”由 75%H, 23%He 和 2%其他化学元素组成, 如果把这些化学元素在恒星标准态的信息量计算出来, 是否可以估算可见宇宙的总信息量?

最近 Gasteiger 和 Engel 合著《Chemo-informatics》, 由梁逸曾教授等译为《化学信息学教程》出版^[4]. 这是用信息科学方法研究化学问题最新的一本好书, 但并未涉及上述基础问题. 所以现在还很少有人研究基础化学信息学这一新领域.

2 信息是什么?

2.1 宇宙究竟有多少要素?

信息不是物质, 因为信息没有质量. 信息不是能

量, 因为信息不守恒. 信息不是精神, 因为信息先于精神而存在. 所以信息是和物质、能量相平行的一个基本范畴, 是宇宙三要素之一.

宇宙究竟有多少要素? 这是一个哲学命题, 至少有四种回答:

(1) 一要素论: 唯物论、唯心论、唯能论(或唯场论)、唯信息论. 美国著名资深物理学家J. Wheeler^[5,6]说: “在我研究物理学的一生中, 它可以分为三个阶段: 第一阶段我笃信万物由粒子构成(唯物论); 而我把第二阶段的信仰叫做万物由场构成(唯场论). 现在我深信万物由信息构成(Everything is information)(唯信息论).

(2) 二要素论: 物质与精神. 其中认为物质是第一性的, 精神是第二性的, 是辩证唯物论. 罗先汉^[7]提出物信论, 认为宇宙的要素是物质和信息.

(3) 三要素论: 物质、场/能量、信息.

(4) 四要素论: 物质、场/能量、信息、精神/意识.

物质与能量之间有爱因斯坦的质能联系定律, 所以罗先汉^[6]把能量合并物质之中. 作者考虑到现代天文学和天体物理学认为宇宙总质量中有 70% 是暗能量(或场), 26% 是暗物质, 只有 4% 是由夸克、质子、中子、电子、原子、分子、超分子、生物、恒星、行星等天体组成的可见物质^[8,9]. 物质之间有万有引力, 而暗能量是促使宇宙正在加速膨胀的动力. 所以把物质和能量分开, 倾向于物质、能量、信息三要素论. 精神只是在 140 亿年的宇龄中, 最近二百多万年有了人类以后才开始有精神/意识, 所以不列入宇宙的基本要素之内. 但我对哲学了解很少, 因此不在这个问题上展开深入讨论.

2.2 狭义信息论

信息是通讯系统中由信源发出, 通过编码、信道、解码, 由信宿接受的东西. 信息是不守恒的, 信息可以增益, 也可以消灭. 这个正统的信息概念被称为狭义信息论^[2].

2.3 生物信息学

自从基因遗传密码被发现以后, 生物细胞之间有信息传递的概念, 是被正统信息科学家接受的, 并且认为信息的起点就是生命的起点.

2.4 信息超分子化学

J. -M. Lehn^[10]把信息的起点推前了一步, 定位在

由给体和受体分子形成超分子. 她建立了信息超分子化学, 把给体和受体称为互补子(Pleromers), 把信息的起点定在超分子形成, 认为信息是超分子领域的主线. Pleromer 来自希腊文, 原意为“互补”.

2.5 Tom Stonier^[11~13]创建了物理信息学

Stonier 认为原子分子是有信息的, 并根据 Schrodinger 对 Boltzmann 关于熵的方程的表达^[14], 导出信息和熵的定量关系式^[11]:

$$S = k \log_e (I^*/I^*), \quad (1)$$

上式中 k 为 Boltzmann 常数, S 为 1 mol 某一纯物质的熵, I^* 为相应的信息, I^*_0 为 1 mol 该纯物质在完美晶体状态时的信息, 是信息的最大值. I^* 和 I^*_0 的数值非常大, 我们用 I^* 的对数 I 来表示, 称 I 为信息量, 即

$$I (\text{单位: bit}) = \log_2 I^* = 3.32 \log I^*. \quad (2)$$

把 Boltzmann 常数和 Avogadro 常数代入, 可以推导出熵的减少值 $-\Delta S$ 与信息量的增加值 ΔI 之间的关系:

$$\begin{aligned} -\Delta S &= -1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} = \Delta I = 1.045 \times 10^{23} \text{ bit/mol} \\ &= 0.1735 \text{ bit/粒子}. \end{aligned} \quad (3)$$

但 Stonier 没有论证原子或分子之间有无通讯? 有无“信源、信宿、信道”的信息三要素, 因而未能和正统信息概念相兼容.

3 对化学信息学的探索、几点思考和建议

3.1 通讯必须有四个要素

作者认为通讯有四个要素: 信源、信道、信宿、信的. “信的”是信息传递的目的或结果. 任何信息的传递或通讯都是有结果的, 例如质子和中子之间通过强相互作用的信道, 互相传递信息的结果, 是组成高一级的结构原子核. 对于人工信息和生物信息而言, “信息传递的结果”也可称为“通讯的目的”. 例如人类通讯为了交流等目的, 昆虫发送性信息素与异性昆虫通讯的目的是为了交配生育子代, 所以“信的”应为通讯的要素之一. 编码、解码、噪音等可以合并信道要素之内. 此外, 还有第五个因素, 即通讯所处的环境. 例如质子和中子的通讯, 必须使两者之间的距离在 10^{-13} cm 量级范围的环境内, 才能通过强相互作用的信道, 使它们结合成为原子核. 现在我们把通讯的环境要素归并在信道要素内.

3.2 关于“互补配偶子(体)”的假设

任何物质的微观粒子、宏观物体、宇观天体都有

某种性质相异而互补的“互补配偶子(体)”. 这是物质的普遍属性, 与对称性有密切关系.

3.3 “互补配偶子”之间有通讯的假设

“互补配偶子”之间有通讯, 满足通讯的四个要素. 互补配偶子互为信源和信宿, 它们之间都有某种相互作用, 这就是它们互相联系的信道. 在它们之间传递信息的结果就是互相吸引, 组成高一级的粒子或高一级的动态平衡体系, 这就是“信的”(图 1).

下面举例说明物质粒子发送信息, 去选择/寻找“互补配偶子”, 然后互相结合成为较高一级的粒子.

例[1] 质子和中子是一对互补配偶子. 它们可以互为信源和信宿, 发出和接受的信息就是强相互作用, 通过强相互作用互相吸引, 组成高一级的结构原子核, 如氦核, He^{2+} , C^{6+} , O^{8+} 等. 质子和中子也有结构, 它们是由夸克组成的. 各种不同的夸克也是互补配偶子或三联互补配偶子, 后者通过强相互作用组成质子和中子.

例[2] 带正电荷的原子核和带负电荷的电子也是一对互补配偶子, 它们互为信源和信宿, 发出的电磁相互作用(库仑吸引力)就是信道, 通过后者组成高一级的结构“原子”.

例[3] 原子的价电子层如含有未配对的电子, 例如含有 α 自旋电子的 H 原子, 与含有 β 自旋电子的 H 原子或别的原子, 是一对互补配偶子, 它们互为信源

和信宿, 发出的电磁相互作用力就是信道, 通过后者组成高一级的结构“分子”或“分子片”. 分子片是指它的价电子层尚未充满, 含有自旋未配对的电子, 因而还能和其他含有相反自旋电子的原子或分子片形成共价键的不稳定分子. 含有相反自旋电子的原子之间的相互作用特称“交换力(exchange force)”, 它的能量是由量子力学 Hanmilton 算符中的交换积分来表达, 称为交换能. 交换能是负值, 可使形成的分子趋向稳定. 这种通过交换力把原子连接起来的方式, 称为“共价键”. 惰性气体原子的价电子层已充满, 没有自旋未配对的电子, 因而它们之间不能形成双原子分子.

例[4] 金属原子之间也是互补配偶子, 通过金属键形成金属或合金晶体.

例[5] 碱金属阳离子, 如 Na^+ , K^+ 等, 和卤素阴离子, 如 F^- , Cl^- 等也是互补配偶子, 通过离子键形成离子型晶体.

例[6] 不同结构的分子也能形成互补配偶子, 例如: 1) 酸与碱的中和, 2) 氧化剂与还原剂的反应, 3) 软阴离子如 S^{2-} 与软阳离子如 Cu^{+2+} 作用发生 CuS 沉淀, 4) 中心离子与配位体作用, 通过配位键形成配位化合物.

例[7] 具有某种结构的单体分子, 如乙烯, 氨基酸, 核苷酸等能聚合或缩合, 生成高一级的结构“高

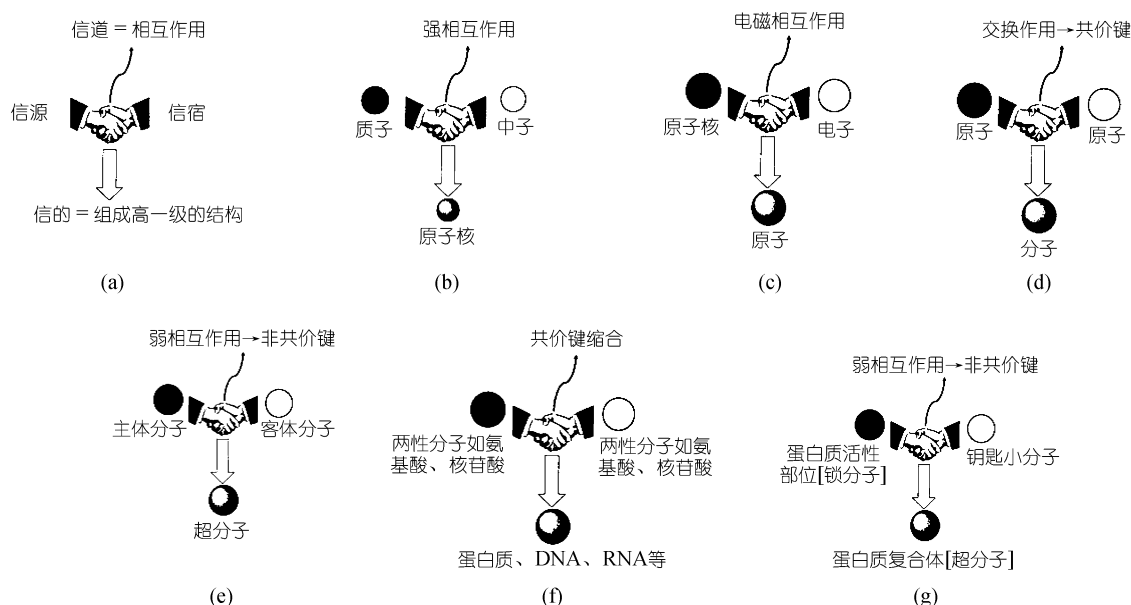


图 1 任何物质粒子都有互补配偶子, 它们互为信源和信宿, 通过相互作用的信道, 达到组成高一级的结构的信的

分子”(如聚乙烯),或生物大分子(如蛋白质,核酸等)。

例[8] 主体分子和客体分子,抗体和抗原,酶和底物等都是互补配偶子。它们的空间结构形状,能像锁和钥匙一样互补,通过“非共价键的弱相互作用”,互相接近组成超分子。超分子以上的层次就和生命运动接轨了。

例[9] 在宏观层面上,异性生物个体是互补配偶体。

例[10] 在宇观层面上,太阳和它的行星体系也是互补配偶体,太阳是信源,行星是信宿。作为信道的相互作用有两种,即万有引力和离心力,两者达到平衡,组成高一级的动态结构:太阳系。

例[11] 恒星以上的层次是星系,最典型的星系是银河系。银河系含有 1000 亿颗恒星,每个恒星的质量介乎太阳质量的 0.1 倍至 100 倍之间。银河系的中心称为银心,银心含有暗物质,其质量是太阳质量的 100 万倍以上。银心与银河系的众多恒星也是互补配偶体,信道也是万有引力和离心力,组成动态平衡的银河系。星系与星系之间也能互相吸引组成星系团。

例[12] 星系团与星系团之间不再互相吸引,而是互相远离。这是因为存在暗能量形成的“鬼星系团(ghost galaxy)”。星系团和鬼星系团成为互补配偶体,由于暗能量产生的负压力(万有斥力)大于万有引力,导致我们的宇宙正在加速膨胀之中^[8,9]。

如果本文的论述能被信息科学家所接受,那么化学信息学就有可能成为物理信息学和生物信息学的桥梁。

3.4 信息的多种不同概念和定义的统一

不同学科对信息提出多种不同的概念,要建立统一的信息理论,必须有统一的出发点,并从这一出发点推导出不同的信息概念,并使之互相兼容。信息科学的建立和发展是从信息的传送,即通讯的理论开始的。在 3.1 节提出:

信息的通讯必须有“信源、信道、信宿、信的”四个要素。

信源和信宿是互补配偶子(体),互补配偶子之间一定有一种或几种相互作用,作为它们之间通讯的信道,来达到“组织”成高级“结构”或动态平衡体系的目的(信的)。所以

信息 = 组织 = 结构 = 静态结构 + 动态结构
= 事物的静止和运动状态及其改变方式。

物质粒子都有结构,有光、电、磁、化学、生理等性

能。凭借这些性能,可向外界发送信息。例如我们能知道天体中含有哪些化学元素,就是从这些元素发出的光谱信息去认识的。信息是把事物从简单结构到复杂结构,从无序到有序进化发展的动力。信息的传送即通讯需要编码,编码就要在多种符号中选择一个,例如二进位制,就是在 0 与 1 之间,选择一个,所以

信息 = 选择 = 择偶 = 找配偶子 = 选择的确定
= 多种混乱状态的消除 = 从无序到有序
= 无序的反面 = 负熵(因为熵是无序的量度)。

在人类社会,语言是最好的通讯手段之一,所以从语言学的角度,

信息 = 语言 = 语法 + 语义 + 语用。

这样从不同视角提出的信息概念就能互相兼容,因此可把信息定义如下。

3.5 信息的定义

某一物质能量系统或某事物的信息,是它的运动状态、结构、性能、取值、和相互作用的规律,以及运动状态的改变,是使该事物能够由简单结构自组织成为较高级结构,并推动它进化、发展的源泉和动力。这个定义和钟义信教授提出的信息本体论定义:“某事物的信息的本体论层次定义,就是该事物运动的状态和状态改变的方式”^[2],是一致的。

3.6 信息的分类:

确定了自然界的物质粒子具有信息,那么信息就可分为三类:

[1] 自然信息:是有生命以前自然界本身具有的信息,例如宇宙大爆炸开始时的“原始火球”就带有促使大爆炸和以后宇宙进化发展的信息,促使夸克、电子、质子、中子、原子核、原子、分子、超分子、生物形成的信息,促使恒星诞生、发展、直致消亡的信息等。

[2] 生物信息:例如 DNA 分子包含的生物遗传信息,和促使生物生、老、病、死,以及生物种群进化发展和消亡的信息。

[3] 人工信息:是有人类以后用语言、文字、声音、绘画等符号系统所表达的信息。人工信息又可分为系统人工信息(知识)和一般人工信息二大类。知识是具备下列基本属性的系统人工信息,不具备这些属性的人工信息称为一般人工信息。例如我们在家中或在超市购物时随便说的话,就是一般人工信息。

知识的基本属性是:

(1) 系统性和群体性: 知识不是一个人发出的人工信息, 而是人类群体在历史的长河中创造和积累起来的系统人工信息. 但一个人提供的有价值的信息, 例如科学家的一篇论文, 文学家写一部作品, 艺术家创作一幅画, 如果被多数人所接受(例如已经发表, 出版或其他被公众认可的方式), 那么这个有价值的信息就转化成为知识系统中的一部分.

(2) 相对真理性或一定的价值观: 科学知识是在一定限度内被实验验证的相对真理. 文学艺术是被至少一部分人们认为有价值的东西. 宗教是一部分人们的信仰.

(3) 发展性: 知识是不断发展, 不断更新的. 但有相对稳定性, 例如牛顿创建的经典力学, 已在 20 世纪发展到量子力学和相对论, 但在宏观和比光速低得多的领域, 还是适用的. 我们在学校中讲授和学习的课程都有相对稳定性. 如果知识没有相对稳定性, 教育就没有意义了.

(4) 有保存价值和可存储性.

(5) 可传播, 可学习, 可处理和运筹, 可继承性.

(6) 可增益性: 你把知识传送给, 我获得了知识, 但你并不损失知识. 这就是知识的可增益性, 或不守恒性. “不守恒”也是信息的通性. 宇宙的物质和能量可以转变形式, 例如核裂变可以把裂变物质 U235 的小部分静质量, 按照质能联系定律, 转变为大量动能. 但体系总的质量和能量在变化前后是守恒的, 不能增益或减少的.

3.7 信息的“量”和“质”的问题.

物质、能量、信息都有“量”和“质”. 物质的“量”是质量, 单位是千克. 物质的“质”可用它含有的信息量来度量. 例如 1 千克的大脑含有的信息量, 远远大于 1 千克石头的信息量, 前者的“质”远远优于后者. 能量的“量”是热量, 单位是 J. 能量的“质”也可用它含有的信息量来度量. 例如电能含有的信息量大于热能, 电能可以无条件转化为热能, 但热能转化为电能, 要受热力学第二定律的限制, 所以电能的“质”优于热能.

信息的最简单的量度是比特(bit). 信息的“质”可以有许多层次. 例如在语言信息学中, 就分为语法、语义、语用三个层次. 钟义信^[2]研究了如何量度这三个层次的信息问题. 在语法、语义、语用三个层次以上, 可能还有更高的信息的品质, 建议称之为“信值”,

即包含语言文学、哲学宗教、科学技术、文化艺术等知识体系在内的信息的价值. 例如爱因斯坦在 1905 年发表的五篇短短的论文, 或李白的几首诗, 其比特数不及一份普通的报纸, 但其“信值”远远优于一份报纸. 研究信息的“质”或“信值”, 是广义信息论要探讨的问题, 不在本文讨论的范围之内.

3.8 信息和能量能否互相交换?

物理信息学的奠基人 Tom Stonier^[11~13]对信息理论做出巨大贡献. 但我不同意他关于“信息和能量可以互相交换转化的观点”^[9], 理由如下:

(1) 信息和能量是不同的范畴, 能量守恒, 信息不守恒. 如果两者可以互相交换转化, 那么能量也就不守恒了. 这就违反能量守恒定律.

(2) 根据质能联系定律, 有能量就有相应的质量, 物质和能量是可以相互转换的, 而信息是没有质量的, 所以不能转化为能量.

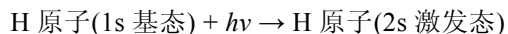
(3) 信息与能量的量纲不同. 在自然单位制, 能量的量纲是能量, 单位是 MeV, 而信息没有量纲. Stonier 书^[11]中第 108 页列出二个公式, 作为信息和能量可以转换的重要关系式:

$$-1 \text{ J/K} = 10^{23} \text{ bit},$$

$$-1 \text{ eV/K} = 1.6 \times 10^4 \text{ bit}.$$

但 J/K 或 eV/K 是熵的单位, 不是能量的单位. 上面两个公式表示熵和信息量的换算关系, 不是能量和信息量的换算关系.

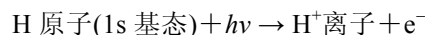
(4) Stonier(文献[11]第 125 页)认为: “光包含信息. 物质对光的吸收, 导致原子态的信息的增加, 这就表明, 光能可以转变成信息”. 我们把这个例子具体化:



在这一过程中 H 原子(2s 激发态)的信息量是减少了, 而不是增加了. 因为信息是“有序”, 而激发态不如基态有序, 所以激发态的信息量比基态小.

光是含有信息的, 如它的波长、频率、偏振性等. 在这一过程中, H 原子(1s 基态)吸收了光子, 变成激发态. 光子消灭了, 它的信息也没有了. 但 H 原子并不增加信息, 反而减少了信息, 这说明信息不守恒, 而能量是守恒的, 因为 2s 激发态的能量比 1s 基态高, 其增加值正好等于消失的光子的能量.

为了说明激发态的信息量比基态少, 可以举一个激发到电离的例子:



上述过程的反过程, 即 H 原子由离子和电子组织起

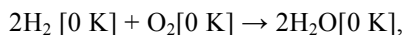
来的过程, 按照信息的定义, 是信息量增加的过程, 因而电离是信息量减少的过程。

3.9 物理学和化学中早已建立了熵的概念, 有无必要再引进信息概念?

熵的减少值($-\Delta S$)与信息量的增加值(ΔI)之间有定量关系如(2)式:

$$-\Delta S = -1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} = \Delta I = 1.045 \times 10^{23} \text{ bit/mol} \\ = 0.1735 \text{ bit/粒子.} \quad (2)$$

这一关系式只适用于同一纯化合物的不同状态之间的变化关系, 不适用于不同化合物之间的化学变化的 ΔS 与 ΔI 之间的关系。例如下列化学反应的 ΔS 与 ΔI 之间就不能适用(2)式。



$$\Delta S = S[2\text{H}_2\text{O}, 0 \text{ K}] - S[2\text{H}_2, 0 \text{ K}] - S[\text{O}_2, 0 \text{ K}] = 0,$$

$$\Delta I = I[2\text{H}_2\text{O}, 0 \text{ K}] - I[2\text{H}_2, 0 \text{ K}] - I[\text{O}_2, 0 \text{ K}] > 0.$$

熵的标准态是绝对零度 0 K 时的完美晶体态, 此时所有纯化合物的 $S = 0$, 所以 $\Delta S = 0$ 。但此时化合物 $2\text{H}_2\text{O}$ 是比单质 $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ 高一级的结构, 所以 $\Delta I > 0$ 。

反之, 信息量的标准态是早期宇宙态 $[p^+ + e^- + n, 10^{12} \text{ K}]$, 此时 $\Delta I = 0$ 。

所以化学反应的 ΔS 与 ΔI 之间没有定量关系式。熵的绝对值 S 和信息量的绝对值 I 之间也没有定量关系。因此除熵以外, 在物理和化学中引进信息概念还是必要的, 对物理学和化学的发展是有利的。

3.10 信息的不守恒性, 信息量的增减, 进化与退化

(1) 信息是不守恒的, 这是大家的共识。但在书刊文献中(我未查到最先提出的作者)有这样的说法: “熵与信息不守恒, 但熵与信息之和是守恒的”。这个结论可能是从(2)式得来的。

由(2)式可得,

$$\Delta I + \Delta S = \Delta [I + S] = 0.$$

所以熵与信息之和守恒。但 Stonier 推导的(2)式只适用于同一纯化合物在不同状态时熵的变化值 ΔS 与信息量的变化值 ΔI 之间的关系。在 3.9 节中已论证了它不能适用于化学变化, 更不能作为普遍规律。

(2) 在封闭体系中, 熵是永远增加的, 这是热力学第二定律。但宇宙不是封闭体系, 所以不适用。

(3) 在开放体系中, 信息量可以增加, 可以减少。信息量增加的过程称为进化过程, 信息量减少的过程称为退化过程。这是进化过程和退化过程的定义。

(4) 人是一个与外界环境有物质、能量和信息交

流的开放体系。人有生老病死, 生长、发育时, 信息量不断增加, 是进化的过程; 衰老、病死, 直到尸骨腐烂化为泥土时, 信息量不断减少, 是退化的过程。但人类整体, 或推广到地球上的生物界整体是在进化的。这个进化的原动力来自太阳光提供的能量和信息。一旦太阳走向衰老和死亡, 即进入退化过程, 地球和地球上的生物整体也会退化, 直到灭亡。但太阳还有 60 ~ 70 亿年寿命, 那时人类科技进步, 早已迁移到更年轻的星球去了。

(5) 宇宙的局部, 例如太阳系, 也有生老病死, 从进化到退化的过程。恒星的质量在 0.1~100 个太阳质量的范围。恒星的寿命长短与它的质量的平方成反比。太阳是第二代恒星, 现在的年龄约 50 亿岁, 寿命约 110 ~ 120 亿岁。

(6) 宇宙整体是进化还是退化, 决定于宇宙在膨胀还是收缩。现在从太空望远镜观察到宇宙在加速膨胀之中。所以宇宙在不断进化, 信息量在不断增加。宇宙膨胀的原动力来自暗能量的负压^[8,9]。

参 考 文 献

- 1 Shannon C E. A Mathematical Theory of Communication. Bell Syst Tech J, 1948, 27: 379-423; 623-656
- 2 钟义信. 信息科学原理. 福州: 福建人民出版社, 1988. 北京: 北京邮电出版社, 1996 新版
- 3 Hofkirchner W, 编. The Quest for a Unified Theory of Information. Proc. of the 2nd International Conf. on the Foundations of Information Sci., 1999, Vienna, Australia: Gordon and Breach Publishers, 1999
- 4 Gasteiger J, Engel T, 著. 梁逸曾, 徐峻, 姚建华, 译. 化学信息学教程. 北京: 化学工业出版社, 2005
- 5 Wheeler J A. Information, Physics, Quantum: The Search for Links in Complexity, Entropy and the Physics of Information. Wojciech H Zurek ed. New York: Addison Wesley, 1990
- 6 Wheeler J A, Ford K, 著. 蔡承志, 译. 美国物理学的开拓者, 重力电磁体, 黑洞和量子泡沫: 约翰·惠勒自传. 汕头: 汕头大学出版社, 2004
- 7 罗先汉. 物信论——多层次物质信息系统及其哲学探讨. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(3): 440-447
- 8 Lee T D. The strongly interacting quark-gluon plasma and future physics. Nucl Phys A, 2005, 750(1): 1-8 [\[DOI\]](#)
- 9 李政道. 在我的祖国纪念爱因斯坦. 科技导报, 2005, 23(5): 4-5
- 10 Lehn J-M, 著. 沈兴海, 译. 超分子化学. 北京: 北京大学出版社, 2002
- 11 Stonier T. Information and the Internal Structure of the Universe. London: Springer Verlag, 1990
- 12 Stonier T. Beyond Information: The Natural History of Intelligence. London: Springer Verlag, 1992
- 13 Stonier T. Information and Meaning, An Evolutional Perspective. London: Springer Verlag, 1997
- 14 Schrodinger E. What is Life? London: Cambridge University Press, 1944