

对负熵、信息熵和熵原理等概念之厘清

黄沛天 胡利云

(江西师范大学物理与通信电子学院 南昌 330027)

20世纪中叶以来,生命科学和信息科学都获得了长足的发展,与之相关的负熵、信息熵等新概念也应运而生。这些新概念目前也开始受到物理学工作者的青睐。但是,人们在接受这些新概念时,却往往会产生一些混淆和误解。比如,有人“将信息的熵称为负熵”,这就把“信息熵”(不确定性)误解为“负熵”(即信息,是消除不确定性)。另外,在理解负熵原理时,若不小心,也容易把过程量(信息)与态函数(信息熵)相混淆。因此,有必要对这些相关概念和规律稍予厘清。

历史的简略回顾

物理学中的熵概念,最初是克劳修斯(1865年)把它作为描写系统的热力学态函数而引入的,并把热力学第二定律表述为熵增原理。1877年,玻耳兹曼等价地引入了统计意义的熵;1943年,薛定谔在题为“生命是什么”的演讲中引入了“负熵”的概念,提出“有机体就是赖负熵为生”的观点;1948年,香农参照熵的玻耳兹曼表示式引入了信息熵;1953年,沃森和克里克发现了DNA分子的双螺旋结构之后,人们又把遗传密码等生命信息问题推了出来;20世纪50年代,布里渊等人在解说麦克斯韦妖诘难时,提出了负熵原理:信息即负熵;20世纪中叶以来,人们总结出了开放系统的熵原理和自组织理论,等等。

现在,有些作者已开始把负熵、信息熵、生命信息和负熵原理等问题写进了基础物理学教科书。

两个时间箭头和开放系统的熵原理

热力学第二定律指出:随着时间的推移,孤立系统将从有序向无序演化。这被称做第一时间箭头。生物进化论则揭示了自然界的第二时间箭头:从无序向有序演化。这两个时间箭头曾经代表两种暂不两立的世界观而争论不休。

众所周知,作为熵增原理的热力学第二定律通常表示为 $S \geq 0$ 。实际上,熵增原理的完整表达式应该为

$$\iint d_v dt = S \geq 0 \quad (1)$$

(1)式左端的积分为过程量熵产生, S 为熵产生率

(单位体积中单位时间内的熵产生); S 则为态函数熵的增量。

20世纪中叶以来,人们把关于开放系统熵变的公式写做

$$\iint d_v dt + \iint d_A dt = S_i + S_e = S \geq 0 \quad (2)$$

(2)式中的 $S_i (\geq 0)$ 为熵产生; $\iint d_A dt = S_e (\geq 0)$ 被称做熵流,其中的 j 为熵流密度,并把熵流中的 $S_e < 0$ 的情况称做负熵流。(2)式被称做开放系统的熵原理。

根据(2)式,开放系统的熵变可以有下列几种情况:

$$\begin{aligned} & \text{若 } S > 0, \\ & \quad S_e = 0 \text{ (此即孤立系统的熵增加原理)} \\ & \quad S_e < 0 \quad \text{但 } S_i > |S_e| \\ & \quad S_e > 0 \end{aligned}$$

系统向无序演化(呈第一时间箭头);

若 $S = 0$ ($S_e = -S_i$),系统处于稳定态;

若 $S < 0$ ($S_e < 0$,且 $|S_e| > S_i$),系统向有序演化(呈第二时间箭头)。

由此可见,开放系统的熵原理包容了两个时间箭头,使两种对立观点的矛盾得以化解。人们也正是由此逐步迈向了与生命等现象相关的非线性开放系统非平衡态结构的自组织理论热点。

应当指出,(1)式和(2)式中的熵产生 S_i 和熵流 S_e 都是过程量。这些过程量导致系统的熵(态函数)发生变化: $S_2 - S_1 = S$ 。尽管过程量与相应的态函数具有相同的单位和量纲,但却是不同类型的物理量,二者不容混淆。犹如热力学第一定律中的功和热量是过程量,而内能则是态函数;动量定理中的冲量是过程量,而动量则是态函数;等等。

负熵、信息熵和负熵原理

1943年,薛定谔为了说明“生命是什么”提出了“有机体就是赖负熵为生”的观点。他认为,生命有机体在不断地产生和增加其自身的正熵值,当趋近最大的正熵值时,就是死亡。又说:“要摆脱死

亡……要活着,惟一的办法就是从环境里不断地汲取负熵”。可见薛定谔说的负熵就是用来降低生命体正熵值的某种机制。它就是(2)式中所包含的负熵流(过程量)。尽管薛定谔写出了“负熵 = $k \ln(1/D)$ ”的表达式,但这里的“负熵”只是表明有序性而已,而不宜把它当做系统的态函数。

1948年,香农在其狭义信息论中,参照玻耳兹曼熵引入了信息熵来描写概率信息系统状态的不确定性:

$$H = - \sum p_i \log_2 p_i = - K \sum p_i \ln p_i \text{ (比特)} \quad (3)$$

式中 $K = 1/\ln 2$, p_i 为第 i 个信息状态出现的概率, $i = 1, 2, \dots, N$ 。显然,信息熵 H 是信息系统的态函数。应当指出,尽管(3)式中出现了负号,但 H 却是正的值,决不能由此“将信息熵(H)称为负熵”。

对于等概率信息系统,有 $p_1 = p_2 = \dots = p_i = \dots = p_N$, (3)式可写为

$$H = - KN \frac{1}{N} \ln \frac{1}{N} = K \ln N \quad (4)$$

这就是该信息系统的最大信息熵,它表示信息系统状态的最大不确定性。

在狭义信息论中,信息的涵义是:被消除的信息系统状态的不确定性。而“消除不确定性”就是“减少信息熵”。因此,信息具有过程量的特点。

应当知道,系统态函数(比如熵)的改变(无论增或减),都须经由过程量(比如熵产生或熵流)来实现。从(1)式和(2)式以及热力学第一定律、动量定理、动能定理等都可看到这一点。认识到这一点非常重要。历史上,麦克斯韦曾经设想过一个智能小精灵(后人称之为麦克斯韦妖)存在于自由膨胀气体的容器内,它可以使系统的熵减少,以此来对抗熵增原理。这就是有名的麦克斯韦妖诘难。1929年西拉德指出,小妖施妖法须获得信息才行。到了20世纪50年代,在香农信息论的基础上,布里渊、维纳等人明确指出“信息即负熵”的观点。这就是负熵原理。麦克斯韦妖正是靠从外界吸入负熵这种过程量的东西来对抗系统正的态函数熵的增加。小妖诘难才就此得以化解。

为了帮助读者进一步认识“信息即负熵”以及它们的过程量的特征,我们可以用香农的狭义信息论继续考察负熵原理的数学表达式。假定某概率信息系统在获得信息之前的不确定性为 H_0 , 获得信息之后消除了一部分不确定性,它的不确定性减为 H_t , 因此,使系统消除的不确定性($H_0 - H_t$)就给出了系

统获得的信息量(I),其数学表达式为

$$I = H_0 - H_t = - (H_t - H_0) \quad (5)$$

这就是负熵原理。(5)式可以陈述为:系统从外界汲取的信息(量)等于系统熵增量的负值(简称负熵)。这就准确体现了“信息即负熵”的涵义及其过程量特征。它与薛定谔的“有机体就是赖负熵为生”涵义也是基本一致的。

为了让读者对信息(量)、信息熵和负熵原理的认识更具体化,下面不妨考察一下DNA所含的生命信息。我们知道,DNA分子是由4种可能被选取的碱基对A(T)、C(G)、T(A)、G(C)按特定顺序排列而成的双螺旋结构信息链。一条DNA链序列储存了一定的结构信息量。如果测得某条DNA分子链所含碱基对的数目为 $N = 5 \times 10^9$ 个,试求该DNA分子所含信息量。这里有两个信息系统:一个是由4种待选碱基对构成的信源系统,另一个则是建成后的信使DNA分子。我们先看碱基对系统。对于4种碱基对中的每一种碱基对来说,每次被选的概率均等,因此,每次被选之前的不确定性为 $H_{10} = K \ln 4 = 2$ 比特。当每次选取出一个碱基对时,就消除了2比特的不确定性,因此,根据(5)式,每选一次提取的信息量为 $I_i = - (0 - H_{10}) = 2$ 比特。倘若选取了 5×10^9 次,从信源(碱基对)中提取的总信息量应为 $I = 2 \times 5 \times 10^9$ 比特。如果没有信息损失,这就是储进该DNA分子中的信息量。当然,我们也可以从信使DNA分子的角度来看:DNA分子是被 $I = 10^{10}$ 比特的信息消除了这 5×10^9 个碱基对在最初离散状态下的不确定性(H_0)之后才具有完全确定性($H_t = 0$)结构状态的。因此我们可以由负熵原理 $I = - (H_t - H_0)$, 倒推出该DNA分子所含碱基对在离散状态下(初态的)的信息熵 $H_0 = I = 10^{10}$ 比特。

信息熵与物理熵的当量关系、广义熵原理

我们知道,若让1摩尔理想气体做体积增大一倍的自由膨胀,当达平衡态时,其最大无序度表述为玻耳兹曼物理熵

$$S = k \ln 2^{N_0} = N_0 k \ln 2 \text{ (焦耳/开)} \quad (6)$$

$(k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ 焦耳/开})$

或者说,其最大的不确定度表述为香浓信息熵

$$H = K \ln 2^{N_0} = N_0 \text{ (比特)} \quad (7)$$

实际上(6)式和(7)式是对同一事物的不同描写方法。显然,它们应当等价。因此,若将(6)式和(7)式联合成等式,可得

黑洞果真无毛吗

肖胜利 朱 峰

(西安通信学院数理教研室 西安 710106)

黑洞是现代天文学中最诱人的发现之一,其含义极具魔力。它是宇宙中看不到的恒星,它起初被认为是封闭的世界,人们几乎无法探测;它是无底深渊,几乎能吞噬一切所有近旁的物质,包括光子在内,当然我们就看不见这一天体了,剩下的乃是一个绝对“黑”的恒星了,因此称为黑洞。黑洞如此奇特,目前已成为许多神话作品和科幻小说的主题。

广义相对论中通常将只有质量的黑洞称之为施瓦西黑洞;将既具有质量又兼有电荷的黑洞称之为里斯纳—诺兹特隆黑洞;将有质量且同时还在旋转(即具有角动量)的黑洞称之为克尔黑洞;将质量、电荷和角动量三个特征全有的黑洞称之为克尔—纽曼黑洞。质量、电荷和角动量是远方的观测者所能观测到的仅有的三个物理量,这就是广义相对论中著名的“黑洞无毛定理”,该定理是1972年由美国学者贝肯斯坦提出的。广义相对论在研究黑洞时没有用到量子力学所以通常将其称之为经典黑洞。黑洞果真除了这三根毛(质量、电荷、角动量)之外,再无它毛了吗?

将现代物理学中强有力的理论工具量子力学和量子场论用于黑洞研究,不但使黑洞研究获得了巨大的生命力,而且使一些最基本的物理概念受到了触动。贝肯斯坦证明了黑洞具有温度,英国物理学家霍金,认为黑洞能通过热辐射辐射出能量,并从完全不同的角度发现了黑洞发射各种粒子并具有热辐射能谱的量子效应。把黑洞具有量子性质的热辐射称之为霍金辐射。可见黑洞除了质量、电荷、角动量这三根毛之外,还有热辐射这根毛!

霍金在1974年证明了若黑洞的质量为 M ,则黑

洞的温度为 $T = \frac{hc^3}{8\pi kGM}$ 。其中 G 为万有引力常数; k 为玻耳兹曼常数; c 为光在真空中的速度; $h = h/2\pi$, h 为普朗克常数。

由此可见,黑洞的温度 T 与黑洞的质量 M 成反比,于是就有了“黑洞不黑它会蒸发,黑洞不黑越小越白”的结论。

霍金辐射的物理机制可以这样来理解。量子力学中狄拉克理论认为,真空中充满着“虚”的粒子和反粒子对,它们不断的“物化”为一对实粒子,分离开、再合并而湮灭,这种真空理论早已得到公认。正反粒子对的产生和湮灭过程中有物理效应,这已通过测量光谱中的“蓝姆移动”而被证实。在黑洞的视界附近也充满着这些“虚”的正反粒子对,它们产生了、又分开、再合并而湮灭,但由于黑洞的存在,使其中的一个粒子可能掉入黑洞,剩下的一个就失去了与之湮灭的对象,它也可能落入黑洞,也可能逃逸到遥远的地方去。对遥远的外部观测者来看,好像粒子是从黑洞发射出来的。正反粒子对中一个具有正能量,另一个具有负能量。逃逸出来的一个是正能粒子,落入黑洞的一个是负能粒子,结果使黑洞的能量(或质量)减小。这对经典黑洞理论无论如何都是不可能存在的,用经典黑洞理论无论如何也是无法解释的。

就霍金辐射的物理机制而言,也可以这样来理解:黑洞的引力场可以作为一个势垒,阻止粒子逸出。因此从经典的角度看,粒子无法从黑洞中逸出,即黑洞除了质量、电荷和角动量可探测外,其他特性无法探测,但是从量子的角度看,粒子有一定的几率穿透势垒,只不过是穿透几率随势垒的厚度在迅速减小(厚度出现在负指数上,所以下降极快)。黑洞大,势垒壁厚,因此穿透几率就小,实际上几乎为零。黑洞小,势垒壁就薄,因此穿透几率可达到相当可观的程度。结果有大量粒子穿透引力势垒逃逸到黑洞外面。

$1(\text{比特}) = k \ln 2 = 0.957 \times 10^{-23} (\text{焦耳} / \text{开})$ (8)
这就是信息熵与物理熵的当量关系。

有了两种熵的当量关系之后,就可以把(2)式理解为包含信息和信息熵概念在内的开放系统广义的熵原理。实际上,香农的狭义信息(或称“好信息”)、布里渊的负熵原理以及薛定谔的“有机体就是赖负熵为生”之说,仅仅反映了(2)式熵流项中的负熵流情况 $S_e < 0$;而 $S_e > 0$ 的正熵流则对应于系统汲

取某种增大无序(或增加不确定性)的“坏信息”或“正熵”物质。比如人们吸食营养物质或听到许多高兴的事,意味着获得负熵流;而吸食有毒物质或遇到许多心烦的事,则意味着正熵流的入侵。这才是描写生命“赖负熵为生”“遭正熵而病、而亡”的广义熵原理涵义之精髓。它生动表达了过程量与态函数之间的关系。而过程量和态函数之区分也正是厘清负熵、信息熵、熵原理等概念之关键所在。