

谈 熵

王 彬 (西北工业大学应用物理系)

摘 要

本文阐述了熵作为一个对状态无序性或不均匀性描述的物理量在热力学、统计物理、信息论、数学、天体物理乃至生物医学等不同领域的含义,指出了熵具有一切不可逆过程的共同特征,标志着时间进程的单向性。

爱因斯坦说:“熵理论,对于整个科学来说是第一法则”。熵作为一个概念,是1865年由德国物理学家克劳修斯提出的^[1]。克劳修斯在研究热力学第二定律时发现,熵 S 是一个状态函数,用它可以表征热力学第二定律:在孤立系中,不可逆过程使熵增加,可逆过程使熵不变。这个结论也叫熵增加原理。

一百多年以来,熵的应用已经远远超出了物理的范畴,这正显示了熵的概念在描述物质世界中的重要意义。

一、熵 的 含 义

熵作为一个状态函数,它的含义非常丰富。在热力学中它是不可用能的量度;在统计物理中它是系统微观态数目多少的量度;在信息论中,它是一个随机事件不确定程度的量度。在不同场合,针对不同对象,熵可以做为状态的混乱性或无序度,不确定性或信息缺乏度,不均匀性或丰富程度的量度。

热力学定义熵为 $dS \geq \frac{dQ}{T}$, dQ 是元热量, T 是绝对温度,不等号对应不可逆过程,等号对应可逆过程。可以证明,熵变与热能的不可用程度成正比。系统内部进行的不可逆过程总是伴随着熵增加,熵增意味着系统的能量从数量上讲虽常驻不灭,但“质量”却越来越坏,转变成功的可能性越来越低,不可用程度越来越高,即所谓能量耗散了。熵增加标志宏观能量在质方面的耗散^[2]。

在统计物理中,1896年玻耳兹曼从分子运动论的角度对熵做出了微观解释。他指出熵反映了分子运动的混乱程度,是无序性的度量。玻耳兹曼公式 $S = k \ln W$ (k 是玻耳兹曼常数, W 是宏观态对应的微观态数目,又叫热力学几率)把熵和微观态数目联系起来,揭示了熵在不可逆过程中增加的本质,是宏观过程总是自发地向着热力学几率大或微观态数目多的方向进行。熵值越大,微观态数目越多,对应的宏观态愈加无序。因此熵是系统状态无序程度的度量。

在信息论的研究中,1948年申农引进熵的概念,奠定了现代信息论的理论基础。一个信息源的熵 H 定义为

$$H = -C \sum_i^n P_i \ln P_i,$$

P_i 是信息源中第 i 种信号出现的概率, $-\ln P_i$ 是它带来的信息量, C 是比例系数,信息熵 H 反映信息源每个信号带来的信息,它是对信息量大小的测度。信息熵的建立大大地扩展了熵概念的含义。这里我们看到信息熵与热力学中的不可用能无关,与统计物理中的微观态数目也无关,它和状态的概率建立了密切的关系,从而成为系统状态不确定程度的度量。

近十年来,方兴未艾的模糊数学也把熵引入自己的领域,用它描写模糊度。所谓模糊熵就是对模糊集所含模糊性大小的一种量度。模糊熵与信息熵一样,是对系统的不确定程度的整体度量。从这个意义出发,在混沌动力学研究中,人们引入了度规熵的概念来表征系统的

有序、随机或混沌性。

我国气象学界的学者把信息熵的概念进一步推广,用来描述物理量对于空间或某种集合分布的不均匀性,建立了物理场熵的概念,用它来研究系统内部某个物理量分布的差异或丰富程度。例如,海洋中盐分浓度的分布,大气中水气含量的分布,人的财产,昆虫的密度分布等等。从而为物理学对状态的研究提供了一种新的方法。与此同时,还发现孤立系在自发进行的过程中物理场的熵总是减小的规律^[1]。这是一项有意义的工作。

黑洞是爱因斯坦引力场方程的一个奇理解,它是晚期星的一种可能存在的形式。在黑洞区域里(即所谓黑洞视界范围内)没有任何物质可以逃逸出强大的引力而不被吞没。1972年,霍金证明了黑洞动力学过程中视界的总面积 A 永不减少,这就是黑洞动力学第二定律。1973年,贝肯斯坦进一步证明黑洞的视界面积 A 正是热力学意义下的熵。如果能够把黑洞熵解释为黑洞“微观态”数的某种量度——玻耳兹曼熵,则将进一步证实自然界的任何实际过程都服从热力学第二定律。

在人体科学中,熵成为描述人体无序性的物理量。我们知道,新陈代谢是生命的基础,假定在能量代谢过程中,人体做为一个孤立系,则根据热力学有

$$\Delta E = \Delta F + T\Delta S,$$

ΔE 是体内糖类、脂肪等提供的能量, ΔF 是自由能,即可转化为有用功的能量, $T\Delta S$ 叫束缚能,是 ΔE 转化为 ΔF 的不可逆过程中报废的能量,即不可用能,主要耗散为热, ΔS 是体内的熵增加。当 ΔE 一定时, ΔF 小, $T\Delta S$ 则大; $\Delta F = 0$, $\Delta E = T\Delta S$ 时,能量全部转化成无用的束缚能, ΔS 达到最大值,说明体内全部信息和有序均被破坏,出现热力学平衡,即为死态。实际上人体是一个开放系统,靠调节熵外流速率或引进负熵流维持熵值在最低的水平上,从而使人体处于非平衡定态——健康态。体内熵如果发生积累,则必然对生命体的高度有序性引起扰乱而导致疾病,这就是熵病。有人

根据热力学理论提出了熵病产生的机制及其防治的理论^[4]。物质的状态是多种多样的,作为描述状态丰富程度的物理量熵,也就有各种各样。物质的状态总是随时间而变化,因此熵应该具有一切物理演化过程的共同特征。

二、熵的地位

俗话说:“光阴似箭”,时间是有箭头的,即过去→现在→将来。自然界的自发不可逆性显示着时间的箭头。地球的演变,化学元素的变化,宇宙的演化,生命的进化,社会的发展……,无不标志着时间的进程。李白在《将进酒》中说:“君不见黄河之水天上来,奔流到海不复回;君不见高堂明镜悲白发,朝如青丝暮成雪。”前一句反映了流水的不可逆,后一句反映了生命的不可逆。但是作为阐述物质运动变化基本规律的物理定律,除了热力学第二定律之外,几乎都是时间反演对称的。不论是牛顿运动方程,还是薛定谔方程,时间 t 和 $-t$ 的作用是相同的。不管是经典力学还是量子力学,是相对论都仅是一种“存在的物理学”。它给我们描绘的是一幅静态的、可逆的、确定性的、永恒不变的自然图景。唯有熵概括了演化的特征,成为“发展”的指标,指明了不可逆过程的方向性,即“时间箭头”只能指向熵增加的方向。熵增加原理第一次把演化的、历史的观念引入物理学,建立了“演化的物理学”。为我们描述出一幅动态的、不可逆的、随机性的自然图景。因此,人们说,“熵”的提出是十九世纪科学思想的一个巨大贡献,它可以与生物学中提出的“进化”相媲美。

今天,我们要重新发现时间,要把不可逆性嵌入,建立一种能够在过去和未来之间作出区别的动力学系统。这是一个新的有重大意义的课题,熵将是起关键作用的桥梁。

[1] 阎康年,物理,15-2(1986),123.

[2] 严济慈,热力学第一和第二定律,人民教育出版社(1978),101.

[3] 张学文,自然杂志,9-11(1986),847.

[4] 冯昭仁,自然杂志,5-4(1982),269.