

在神话故事中出现许多妖魔鬼怪,那是不足为奇的,但以精确严密著称的物理学之中也出现了妖精,就有点出人意料之外了。以英国著名物理学家命名的麦克斯韦妖(Maxwell's demon)在物理科学的发展之中已经扮演了相当重要的角色,不但以鲜明的图象,澄清了热力学第二定律的一些疑团,更重要的是指出了熵与信息之间的联系,成为信息论这一门新学科的先导。而在生命科学的发展之中,麦克斯韦妖也会大有其用武之地的。

麦克斯韦妖

按照热力学第二定律,在孤立系统中达到平衡态之后,熵为极大值,不会自发地减小。在热力学范围内,这是确切无疑的,但在统计物理学中,用吉布斯(J. W. Gibbs)的话来说:“未经补偿的熵之减小的不可能性,已归结为几率极其小”,平衡态仅为几率最大的状态,可能出现涨落现象,使得温度或压力的分布和平衡态发生少量偏差,这种偏差是否可以设想为一个神通广大的妖精的作用结果呢?

1867年麦克斯韦致友人泰特(P. G. Tait)的信中提到了“一个有限的生灵,他单凭观察就能通晓所有分子的轨迹和速度,但除了开关一个小孔外,不能作功。”他守住容器界壁上的小孔,让快速运动的分子单向穿过小孔,导致“热的部分变得更热,冷的部分更冷。无需作功,只用了一个敏于观察,手指灵巧的生灵所具有的智能。”这一生灵被开尔文(Lord Kelvin)称之为妖精。1870年麦克斯韦致瑞利(Lord Rayleigh)的信中再次提到“非常机灵、具有显微眼的守门人”与第二定律的关系,其用意无非是指出“第二定律正确的程度与这一论述无异:你若将一杯水倒进海里,你再也取不出同样的一杯水来,若用一句中国成语来译,即覆水难收。到1871年,麦克斯韦把他写进了“热的理论”这本教科书中有关第二定

律具有局限性的章节之中,作了更加充分的阐述:

“热力学所确立的最可靠的事实之一在于一个封闭于容积不变而且不导热的罩壁之中的系统,温度和压力处处保持均一,如果不做功的话,不可能产生温度或压力的不均匀性,这就是热力学第二定律。如

B的温度升高,使A的温度降低,与热力学第二定律产生矛盾。”

应该指出,麦克斯韦提出“妖精”的本意并不在推翻第二定律,而在于指出它有局限性,并用一个假想实验来阐明它只具有统计上的可靠性。从此,麦克斯韦妖堂而皇之地闯进了物理学的殿堂,受到了几代物理学家的关注,有关他的讨论持续到今天。他的内涵可能比原作者设想的更加丰富,这也生动地说明了形象思维在物理学中也有它的地位。

降妖伏魔的若干见解

麦克斯韦妖提出后不久,开尔文首先作出评论:“按照麦克斯韦的说法,这一妖精是有智能的生灵,具备自由意志,而且触觉和观察能力高强赋予它能观察和影响物质单个分子的本领……。麦克斯韦妖与真的活动物的差异无非在于他极其小而灵巧——他不能创造或消除能量——他能贮存小量而在要用时拿出来……。‘分门别类的妖精’的概念是纯粹机械性的,在纯物理科学中大有用处。但并非用他来帮助我们来处理生命与心灵对于物质运动的影响这一类超出动力学范围的问题。”开尔文强调了“妖”的三个方面:生气勃勃、尺寸微小和具备智能,虽则对他在生物学上的意义避而不谈。

1911年波兰物理学家斯摩罗柯夫斯基(M. Smoluchowski)在哥丁根作了一次关于第二定律有效性极限的演说。他认为布朗运动既

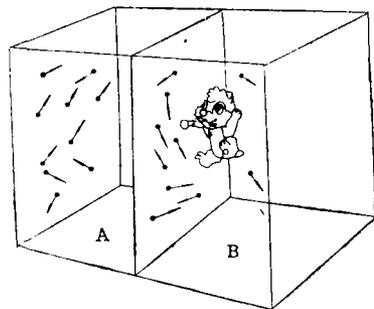
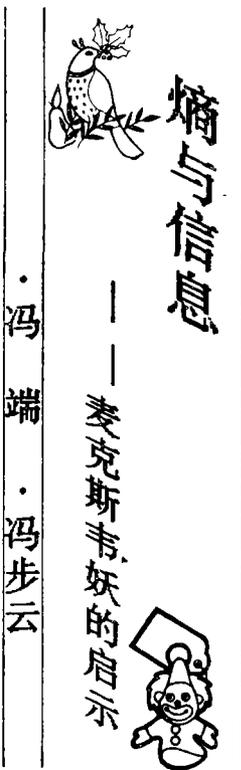


图1 麦克斯韦妖



· 基础物理知识讲座 ·

果我们只和大量的物质打交道,而无法辨识或处理组成它的个别分子,这无疑是正确的。但如果我们设想一个生灵,其官能是如此敏锐得以追踪每一个运动中的分子,这一生灵,虽则其本领仍然和我们一样有限,将能做出我们所做不到的事情。因为我们已经注意到处于等温状态装满空气的器皿之中,分子运动的速度并不均一,虽则任取大量分子的平均速度是均一的。现在我们设想容器分为A、B两部分,在界壁上留一小孔,而一个能够看到单个分子的生灵开关这一小孔,只令快速的分子从A进入B,而慢速的从B进入A。这样他无需作功使

为妖精提供机会，也对其操作产生了限制。他论述了利用布朗运动作功的理想机器。强调了妖的身体尺寸微小，在大量分子碰撞下将变得头昏眼花，无法正常地操纵闸门，其本身也要作布朗运动。这样闸门的无规开关并不会导致第二定律的失效。

1929年匈牙利物理学家西拉德(L. Szilard)发表题为“论由智能生灵导致一个热力学系统中熵的减少”的一篇很有见地的论文，强调了妖精在智能方面的作用。他设计了几种由麦克斯韦妖所操纵的理想机器，其中最简单的一种如图2所示。设想圆柱容器中有一个分子在运动，容器中间可以插入一个活塞，操纵机器的妖如果能够明察并记住分子的位置是在左方还是右方，适时插入活塞推向无分子的一方。这样活塞往复运动将提供功。不妨设想抽出和插入活塞乃至至于活塞的运动都在无摩擦力的情况下进行，机器作功的关键在于妖精取得分子位置的信息，并有记忆的功能。这个例子可以说明，西拉德强调了妖精有获得信息、存储信息和运用信息的功能，他作出如下的陈述“如果我们不愿意承认第二定律遭受破坏，结论必然是将 ν (位置坐标)与 t (时间)耦合起来的作用，即建立记忆，是和熵的产生不可分割地联系在一起”的“通过对妖精作用的分析，揭示了信息与熵之间存在的密切关系，开了现代信息论的先河。

1948年贝尔实验室的电气工程师香农(C. Shannon)发表有关信息的数学理论的一系列论文为信息论奠定了基础。他纯粹就通信的理论进行考虑。当时也在贝尔实验室工作的法国物理学家布里渊(L. Brillouin)随即将信息论与统计物理联系起来考虑，抓住西拉德提供的线索，更加全面地论述信息与熵的关系，总结在1956年所出版的“科学与信息论”这一专著中。

在麦克斯韦妖操作过程中，首先他要能看得见运动的分子，并且

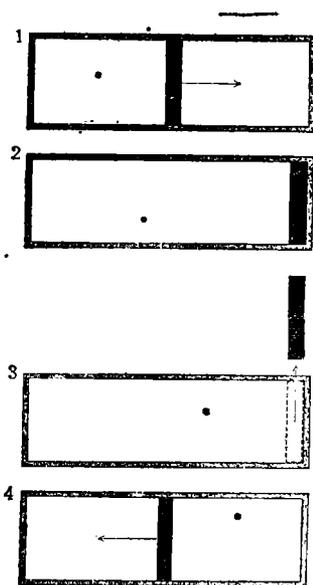


图2 西拉德的理想机器

能够判断其运动速度。布里渊认为这不可能依赖于腔体内的黑体辐射，因为按照基尔霍夫(G. Kirchhoff)的辐射定律，腔体内的辐射是均匀的而不具有方向性，要看到分子，必须另用灯光照在分子上，光将被分子所散射，而被散射的光子为麦克斯韦妖的眼睛所吸收。这一过程涉及到热量从高温热源转移到低温热源的不可逆过程，导致系统中

熵的增加。当麦克斯韦妖接收到有关分子运动的信息之后，再通过操作闸门来使快、慢分子分离，来减少系统的熵。信息的取得会导致系统中熵的增大，而操作闸门减少的熵，就数量而言，并不能超过前者。这正是这一问题获得突破的关键：包括这两个步骤的全过程的总熵还是增加的。有关熵减过程，布里渊认为它是由于信息对麦克斯韦妖的作用引起的，故信息应视为系统熵的负项，即信息是负的熵。正是由于这个负熵的作用，才使系统的熵减小，但若包括所有的过程总熵依然是有所增加的，这充分说明，麦克斯韦妖只能而且必须是一个可以从外部引入负熵的开放系统，正因如此，他并不违背热力学第二定律。

这里，信息与负熵相当，信息的失去为负熵的增加所补偿，因而使系统的熵减少。从麦克斯韦妖可知，若要不作功而使系统熵减少，就意味着必须获得信息，即吸取外界的负熵。生命过程就是不断地汲取环境的负熵来补偿身体内部自身熵的增加，而正是基于这一点，其行为与麦克斯韦妖颇为相似，开尔文所说妖精的三个特征之一就是生气勃勃，洵非虚语。(待续)

《高能物理与核物理》(月刊)

《高能物理与核物理》，高级学术期刊。刊载国内高能物理及核物理研究工作的成果与进展的论文，其内容既涉及有关理论物理与实验物理的各个专题，也反映了当前理论物理研究的热点。两学科内大部分国家自然科学基金资助的项目，以及国家自然科学基金奖的获奖项目的成果都在该刊上发表。读者对象为有关的科研工作者、大学教师、研究生。

自1988年起由美国 Allerton 公司在美国出版发行该刊的英文版，刊名为 High Energy Physics and Nuclear Physics，季刊，每期120页。

该刊保持了国际上同类刊物的一流水平，所发表的科研成果在国内外积累和提供了我国两学科的重要科学资料，很多文章被国外一流期刊引用，在全国394种期刊中，被世界五大检索体系选用的期刊只有5名，《高能物理与核物理》名列第二，已被国家自然科学基金委员会列为全国核心期刊之一。该刊1990年被评为中科院优秀期刊。(杉仁)

代邮 需1957年李政道、杨振宁教授荣获诺贝尔奖之讲稿者，可从邮局直接汇款至本刊编辑部。每份1.50元(含邮资)。

