

# 熵可以减少

刘正荣

ZJL@CS.Stanford.EDU

此内容由人工智能(AI)辅助翻译,若未达意,请查阅[原文](#)

## 摘要

热力学第二定律主张熵永不减少,长期以来被广泛视为普适性的自然法则。然而,这一假设值得重新审视。在由排斥力主导的系统中,熵通常增加;而在诸如重力等吸引力主导的领域中,熵则会减少。这就是为什么138亿年以来宇宙的发展并未陷入“热寂”,而是随着恒星与星系由弥散的宇宙物质聚集形成,变得更有层次结构。传统熵增观点依赖于一个基本假设:能量流动(如热传递)总是沿着梯度下降的方向进行。然而在吸引力主导的系统中,这一假设并不一定成立。此外,第二定律仅描述了单向的演化过程,而许多自然过程却呈现振荡或周期性特征。这些现象表明,熵增规律只描述了自然现象的一个子集。为克服这一局限,我们提出了回归原理(Restoration Principle),使熵增、熵减及振荡过程在同一框架下得到统一。宇宙中的一切都以不同形式的能量存在,所有过程都是各种能量形式之间的转化。在基本引力或斥力的驱动下,系统成分会聚集或分散,趋向于一种稳定的能量分布——即**能量平衡比**。当这种平衡被打破时,系统会自发地恢复其平衡。回归原理因此提供了一个比基于熵的观点更全面的自然演化理解框架。

## 前言

热力学第二定律指出,孤立系统的总熵不可减少<sup>[1]</sup>。这一原理的经典例证是:在室温条件下,放入水中的冰块会自发融化,使能量分布更均匀,系统总熵随之增加。而相反的过程,液态水在无外部能量输入下自发重新结冰,则不会发生,因为这要求熵减少,违背了第二定律。

熵在自发过程中的增加趋势在众多领域普遍存在,因而被广泛视为演化的普适法则。熵的概念最早起源于经典热力学,随后通过统计力学扩展至更广泛的学科,涵盖从微观统计物理到信息理论的基础。其应用涉及化学、物理、生物学,以及宇宙学、经济学、社会学、气象学和气候科学等多个领域。

熵的概念经过统计意义上的扩展,常于无序、随机性或不确定性联系在一起,成为理解自然过程方向性和行为的重要基石。不同于许多时间对称的物理量,熵以单向增加为特征,这一特性被称为“时间之箭”。该概念进一步被用于预测宇宙的最终宿命:一个冷寂、黑暗且无活力的状态,能量均匀分布,熵达到最大值,即所谓的“热寂”。

然而,越来越多的宇宙学观测表明,即使经历了超过130亿年的演化,宇宙并未朝向热寂发展。相反,宇宙结构日益复杂:新的恒星和星系仍不断从宇宙尘埃云中诞生,而非分散成均匀的粒子海洋。那么,为什么宇宙没有遵循热力学第二定律所预言的演化路径?答案并非宇宙尚未达到成熟阶段,而是热力学第二定律并非普适的根本法则。

热力学第二定律面临多重挑战。首先,熵的定义未能充分揭示宇宙中万物的本质,因此无法涵盖所有过程。其次,热力学定义与统计定义并非完全等价,导致在解释熵变化时出现矛盾,例如某些情况下熵出现减少的现象。第三,热力学定义依赖温度作为输入变量,然而长期以来将温度简单视为粒子平均动能的误解,该认知存在根本性局限,难以全面反映宇宙中过程的复杂性。

更为根本的是，宇宙中的一切以能量形态存在，系统演化涉及能量形式间的转化和再分配。这些过程的趋势朝向能量平衡状态发展，即向平衡状态恢复，或围绕平衡状态振荡。前一种演化路径具有方向性，熵可能增加或减少，但热力学第二定律无法充分解释两者兼容的情形；而对振荡过程，第二定律更无法解释。

为克服上述局限，需建立更为宽广的理论框架——不仅涵盖熵增与熵减的方向性过程，还能解释振荡行为。回归原理正是这样一个描述系统演化的基础框架，涵盖了自然界所有过程中的方向性与周期性变化<sup>[2]</sup>。该原理具有普适性，适用于所有领域与基本相互作用。因此，热力学第二定律可视为回归原理的特殊体现。

### 熵概念的引入

在经典热力学中，系统的熵变被定义为：在可逆过程中，从环境输入的微小热量与系统当时瞬时温度之比<sup>[3]</sup>：

$$(1) \quad dS = \frac{dQ}{T}$$

其中，T表示系统的瞬时温度，S为系统的熵，dQ表示输入的热量，dS则表示由该热量输入所引起的熵变。该概念最初是为将卡诺效率用系统状态变量加以表述而引入的<sup>[4]</sup>。卡诺效率定义为系统输出的功与输入热量之比，其最大理论值由卡诺定理给出：

$$(2) \quad \frac{W}{Q_h} = \frac{Q_h + Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

其中，W表示由高温热源（温度为T<sub>h</sub>）提供的热量Q<sub>h</sub>所做的功，Q<sub>c</sub>则为释放给低温热源（温度为T<sub>c</sub>）的热量。卡诺热机效率公式（2）右侧的表达式可整理为：

$$(3) \quad \frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_c}{T_c} = \Delta S_h + \Delta S_c = 0$$

其中，ΔS<sub>h</sub>和ΔS<sub>c</sub>分别表示高温与低温热源的熵变，表明系统总熵保持不变。相比之下，对于效率低于卡诺循环的热机，由于存在如摩擦等能量损耗，其输出功将小于净输入热量（即W<Q<sub>h</sub>+Q<sub>c</sub>）。在这种情况下，系统的总熵将增加：

$$(4) \quad \Delta S_h + \Delta S_c > 0$$

上述结果促使人们引入熵的概念，作为描述系统状态变化的物理量。然而，需要指出的是，表达式（4）所体现的熵增并非热力学第二定律所描述的熵增加，而是由于热机内部效率损失导致的熵增。在卡诺循环中，能量在四个组成部分之间交换：高温热源、低温热源、卡诺热机本身及做功子系统。

然而，表达式（4）仅涉及其中两个部分：高温热源与低温热源的熵变。相比之下，热力学第二定律讨论的熵增，是指系统在向平衡态回归过程中自身内部发生的熵变。

## 熵的统计定义

路德维希·玻尔兹曼通过研究系统的微观组成行为，提出了熵的统计定义。根据该定义，熵是对系统可能微观状态的对数度量，其中系统处于每个微观状态的概率 $p_i$ <sup>[5-10]</sup>：

$$(5) \quad S = -k_B \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i)$$

其中， $k_B$ 表示玻尔兹曼常数，求和范围涵盖系统所有可能的微观状态。为更好地理解这一定义，可考虑一个被限制在容器中的气体系统。所谓微观状态，是指系统中分子的一种具体分布方式。为简化讨论，假设所有微观状态具有相同的概率分布。若系统共有 $n$ 个可能的微观状态，则每个微观状态的概率为 $p_i=1/n$ 。在此假设下，公式(5)中的熵可以用概率 $1/n$ 或微观状态总数 $n$ 重新表达为：

$$(6) \quad S = -k_B \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \ln\left(\frac{1}{n}\right) = -k_B n \frac{1}{n} \ln\left(\frac{1}{n}\right) = -k_B \ln\left(\frac{1}{n}\right) = k_B \ln(n)$$

这一表达式体现了熵的两种互为补充的定义方式：其一，将熵视为系统状态期望概率(即 $1/n$ )的对数；其二，将熵定义为系统可能微观状态 $n$ 的对数。前者有助于刻画系统向平衡态(即最可能状态)回归的趋势，后者则更适用于理解熵如何随可能的微观状态变化而改变。例如，在气体系统中，随着温度降低，分子开始凝聚成液体，并逐渐沉降至容器底部。这一过程减少了分子的空间自由度，从而降低了可达微观状态的数量 $n$ ，导致熵减少。继续降温时，液体进一步凝固为固体，分子运动受到更严格的限制，可达微观状态数量进一步减少，熵随之进一步下降。在绝对零度时，系统处于唯一的基态，其熵为零。

通过统计学的拓展，熵的定义被进一步联系到无序、随机性和不确定性等概念。以随机性为例，在信息论中，克劳德·香农对这一概念进行了深化，提出了信息熵(H)的概念，并将定义(5)简化为<sup>[11-12]</sup>：

$$(7) \quad H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i)$$

需要指出的是，在该定义中省略了玻尔兹曼常数，因为它最初是为使熵的统计定义在量纲上与热力学定义保持一致而引入的。此外，自然对数( $\ln$ )被替换为以2为底的对数( $\log_2$ )，这是因为信息在计算机中通常以二进制形式编码和处理。

正是统计定义扩展了熵的概念，使其得以应用于物理、化学、生物、气象、气候、信息论、宇宙学、经济学和社会学等多个领域。然而，需要注意的是，这一扩展仅适用于统计学范畴；若脱离统计框架进行泛化，其适用性将受到质疑，甚至可能引发误解。这正体现了热力学第二定律的局限性。将传统热力学熵的定义与统计定义混为一谈，实属一种认知误区。

## 热力学熵与统计学熵的区别

虽然人们通常认为玻尔兹曼通过分析系统微行为，建立了热力学熵定义与统计熵定义之间的等价关系，但两者仍存在本质上的差异，尤其是在将热力学定义(1)与统计定义(5和6)进行比较时。这种差异在接近绝对零度时尤为明显。根据统计定义5或6，在绝对零度时，系统处于唯一的微观态(基态)，对应熵为零；而热力学定义则预测完全不同的结果：随着温度趋近于零，其倒数趋近于无穷，导致根据定义1计算的热力学熵也趋近于无穷。这种不一致揭示了统计学和热力学熵定义之间的本质差异。

根据统计定义，系统演化朝向其组成部分的平衡分布；而热力学定义描述系统趋向能量平衡状态。例如，统计熵能够通过棋盘上棋子的随机分布描述其无序程度——这是热力学定义无法涉及的。热力学定义基于系统的能量参数刻画宏观态，统计定义则将熵与可达微观态数量相关联。若要实现两者真正等价，必须明确连接系统的能量与其对应的微观态数目，然而这种直接关系尚未被确立。现有统计定义过于宽泛，难以直接推导出热力学熵的表达。

统计熵定义的另一大挑战是“微观态”概念的模糊性，缺乏精确定义和普遍共识。举例而言，数学上长度为1米和10米的线段均包含不可数无限多个点，意味着1000立方米的空间并不包含比1立方米更多的点。因此，仅凭空间体积大小来断言气体分子在更大容器中拥有更多微观态是不严谨的。这种概念上的模糊性限制了统计熵定义的实际适用性，因此应用过程中，化学家不得不依赖基于可测物理量（如温度和热量）的热力学定义。

熵的两种定义之间被认为等价的观点，可能源自气体系统的微观行为，而这也很可能影响了玻尔兹曼的推导。在气体中，如果粒子的动力学主要受电子-电子排斥作用支配，分子就会自然地趋于弥散。随着温度升高，分子动能的增加会导致粒子在空间上分布得更加广泛。在统计学框架下，更大的弥散对应于更高的熵；因此，根据统计学定义（5）或（6），高温与气体系统中更高的熵相关联。对于气体系统，可以证明在热力学定义下，高温同样与高熵相关。为说明这一关系，设想一个质量为 $m$ 的气体，其在相关温度范围内具有恒定的比热容 $c$ 。在这些假设下，根据热力学定义（1），其熵可以表示为：

$$(8) \quad dS = \frac{dQ}{T} = \frac{mc dT}{T}$$

将该方程在温度区间 $T_0$ 到 $T$ 上积分，得到：

$$(9) \quad S = mc \left( \ln(T) - \ln(T_0) \right)$$

当以 $T_0$ 作为固定起点时，该方程表明气体的熵与温度的对数成正比，揭示了温度与熵之间的直接关系。对于该特定系统，可以建立两种熵定义参数之间的相关性：将较高温度对应于更分散的分子分布和更多的可达微观态。通过这一联系，热力学中熵随温度增加的趋势与统计学中熵随微观态数量增加的趋势相关，表明两种熵的定义在这种情况下的一致性。

然而，需要强调的是，这种表面上的一致性仅适用于特定的物理系统，难以推广至其他情况，特别是受吸引力主导的系统。尽管表达式9形式上与定义5和6相似，但两者本质不同。热力学熵明确依赖温度，与系统能量水平直接相关；而统计熵则仅依据可达微观态数量，这些微观态在某些系统（如气体系统）中仅间接受能量和温度影响。因此，两种定义之间的对应关系主要适用于由排斥力主导的扩散型系统，但在吸引力主导的系统中则不成立。正如下文所示，统计定义在吸引力主导的系统中往往表现为熵的减少，而热力学熵则未必如此。

### 更多熵减现象例证

热力学熵定义与统计学熵定义本质上存在差异，因此不应混用。在一种定义应用中同时思考另一种定义，容易引发混淆和误解。尤其是在使用仅依赖可达微观态数量的统计定义时，不应假设或强加能量变化，因为能量并非该定义的输入参数。明确区分两者，有助于避免概念错误，澄清统计力学框架下熵可能减少的现象，并为比较统计定义与热力学定义提供清晰基础。

以一个简单实验说明：在一个孤立系统中，将摄氏零度的水与低于零度的冰混合。随着冰升温至零度，部分水可能结冰。根据统计定义（6），系统总熵下降，因为冰的形成减少了分子的自由度和可达微观态。但根据热力学定义（1），整个系统的熵是增

加的。尽管水与冰之间的热量交换量相等，但冰温度较低，使得冰获得的熵大于水失去的熵，从而导致整个系统熵净增加。此例既表明熵可能减少，也说明同一过程依据不同定义可能呈现相反的熵变趋势。

在室温条件下，冰会自发融化，逆过程不会发生；而在上述实验中，水却能自发结冰。表面上区别仅在温度，实质差别在于主导分子间相互作用。库仑力既有吸引力也有排斥力：异性电荷相吸，同性电荷相斥。低温时，分子振动减弱，吸引力（如范德华力）占主导，促使分子聚集体结晶；高温时，分子动能增强，振动剧烈，抑制吸引力，排斥力主导分散行为，这种趋势在气体中尤为明显。

此例表明，统计熵定义主要基于气体系统观察提出，将它们应用于以吸引力为主导的系统时，可能会产生矛盾的结果。在吸引力作用下，熵往往减少。例如，过饱和醋酸钠溶液结晶过程在统计定义下表现为熵减，即使系统与外界无能量交换，热力学定义下总熵保持不变。类似现象还见于密封蜂蜜中糖晶体的形成，亦为吸引力驱动的熵减过程。

另一个例子是生牛奶静置后自发分层，奶油上浮，脱脂乳下沉。根据统计定义，这表明系统从无序高熵状态向有序低熵状态转变。由于统计定义不包含能量参数，因此在分析过程中能量变化被忽略。然而，该自发有序分层过程也同样可在孤立系统中发生，无需与外界交换能量。类似分层现象也出现在不同密度物质的混合物中，如油漆随时间分层，均因重力吸引使系统趋向更有序，显示热力学第二定律在吸引力主导系统中的局限。

进一步看，在引力作用下，星体和星系由最初高度无序、微观态众多的宇宙气体云坍缩形成。物质向质心聚集，形成行星、恒星、中子星、黑洞等结构化天体，表现为熵减。同理，地球内部分层结构的形成亦受引力驱动，也体现熵降低。虽然局部空气呈高熵均匀气体，但大气在行星尺度上分层明显。观测显示宇宙趋向日益结构化，而非无序“热寂”，这主要归因于引力的广泛作用。

上述种种案例对热力学第二定律的普适性提出质疑。该定律虽能有效描述众多自然过程，但存在本质局限。第二定律反映的是系统趋于分散的统计趋势，这种行为通常与排斥相互作用相关。相比之下，自然界中的吸引力驱动系统聚集形成更有序结构，导致统计定义下的熵降低。

## 热力学第二定律的局限性

前一节中的例子表明，按照统计熵定义（5和6），熵是可以减少的。但按照热力学熵定义（1），熵是否也能减少呢？答案是肯定的。考虑两个温度分别为 $T_1$ 和 $T_2$ 的系统，且 $T_1 > T_2$ 。当这两个系统相互作用时，有一部分热量 $dQ$ 从高温系统流向低温系统。根据热力学定义（1），两系统的总熵变化为：

$$(10) \quad dS = \frac{dQ}{T_2} - \frac{dQ}{T_1} = \frac{dQ}{T_1 T_2} (T_1 - T_2) > 0$$

因此，总熵是增加的。需要注意的是，表达式（10）的推导依赖于一个直观假设，即能量总是沿着递减的梯度流动。这个假设通常在由排斥力主导的系统中成立，例如气体系统。在这类系统中，粒子倾向于扩散，从而促进混合与热传递。这一过程会使系统内的温度趋于均匀，导致热量沿梯度方向传递——这种行为长期以来被视为自然界的固有属性。虽然这一推理对大多数小尺度气体系统是有效的，但并不必然适用于大尺度系统，尤其是在引力主导的情况下。如果能量能够反向流动，根据热力学定义（1），熵将会减小。

为了证明表达式(10)并非普遍成立,只需举出一个热量从低温系统流向高温系统的反例即可,因为此时表达式(10)的右端将成为负值。假设黑洞为一个系统,其余宇宙为另一系统。由于黑洞的巨大引力,所有入射的电磁波(包括热辐射)都会从周围环境被吸入黑洞。宇宙的平均温度接近绝对零度,而黑洞的温度则显著更高。在这种情形下,能量由低温系统流向高温系统,从而导致总熵减少。该例表明,热流的方向并非由能量梯度递减所决定,而是由引力方向主导。换言之,能量传递受基本相互作用力的支配。下一节将进一步论证这一观点。

熵不仅在黑洞附近会降低,在大多数天体周围也会如此。以地球为例:类比上文讨论的气体系统,若将地球视为系统T<sub>1</sub>,而将宇宙的其余部分视为系统T<sub>2</sub>,那么沿时间回溯,我们会看到一个更炽热的地球逐渐扩散成寒冷的宇宙尘埃,恢复早期的高熵宇宙状态。这种熵的增加与气体系统的行为相呼应,表明地球与宇宙的整体演化方向实际上是总熵的降低。这一例子还说明,能量的流动并不一定遵循温度梯度下降的方向,而是受引力主导。在宇宙尺度上,从恒星的诞生到星系的聚集,宇宙的演化似乎正朝着低熵状态发展,而非如“热寂”假说所预测的那样,走向粒子与能量均匀分布的局面——无论是在统计意义上,还是在热力学意义上,皆是如此。

根据爱因斯坦的质能等价原理,物质只是能量的一种高度集中的形式。通过化学和核反应,储存在物质中的能量可以转化为辐射能并以热的形式释放。从这个意义上说,物质的流动实质上就是能量的流动;反之,能量(包括热)的流动也必然伴随着物质的运动。这种二重性在前面冰与水的例子中表现得很明显:能量转移不仅涉及热(辐射),还包括水分子之间的势能。在较高温度(如室温)下,排斥力主导分子间相互作用:更短的分子间距对应更高的势能,因此分子倾向于彼此分离以最小化势能,从而导致熵增加。而在冰点以下,吸引性的范德瓦耳斯力占主导地位,最小化势能则驱使分子聚集成固体,从而导致熵减。在这一过程中,热量的传递不仅表现为热能,同时也表现为势能——二者都与物质本身密不可分。

最后,熵的增加与减少代表了自然演化的两种可能方向,而热力学第二定律仅解释了其中的一种。除了这种方向性的演化,许多自然过程实际上是振荡的或周期性的。例如,钟摆围绕其平衡位置来回摆动。在地球上,无数日常与季节性的周期节律源自地球的自转和公转。事实上,围绕平衡点的振荡是系统的一种基本特征。在化学平衡中,反应并不会停止,而是正反应与逆反应以相同速率同时发生。从单一组分的角度来看,该系统可以被视为在反应物与生成物状态之间不断振荡。所有这些过程的根本驱动力都是系统恢复能量平衡的趋向。这一普遍的趋势支配着宇宙的运行,并体现在回归原理之中。

## 回归原理

回归原理在另一篇同名文章中有详细论述<sup>[2]</sup>。此处简要介绍,以便为理解熵变化中相互对立的趋势提供背景依据。根据爱因斯坦的质能等价原理,宇宙中的一切都以某种形式的能量存在,物质本身则是能量的集中体现。任何系统的演化,本质上都由其能量的转化所驱动。这种转化要么趋向于恢复平衡的能量分布,要么在平衡态附近进行振荡。回归原理认为,自然界固有地倾向于使系统向这种能量平衡演化,其特征是在给定总能量水平下,不同形式能量之间呈现出特定的比例关系。这种平衡通过持续的能量转化逐步形成,使系统趋于稳态。它反映了系统内部多种竞争驱动的相互作用,其中占主导地位的力引导能量重新分配,以在保持总能量守恒的前提下最小化势能。其核心思想归纳于以下方程与表达式中:

$$(11) \quad E = M + D$$

$$(12) \quad D = U + K + R$$

$$(13) \quad U: K: R > u: k: r$$

这些关系定义了系统在给定总能量下的平衡能量分布。根据爱因斯坦的质能等价原理,系统的总能量(E)等于其等效质量(m)与光速平方(c<sup>2</sup>)的乘积。等效质量不仅包括系统的静止质量,还包含其他所有形式能量的贡献。在方程(11)中,这一总能量更为明确地表示为两个部分的和:动能(D)和物质能(M)。其中,M表示系统在绝对零度下由静止质量所对应的能量,而D

则代表系统的动态能量部分。温度通常通过辐射水平来表示，其反映的是系统的动态能量，而非仅仅是粒子运动的动能(K)，这也是许多教材中常见的误解<sup>[13]</sup>。绝对零度对应于动态能消失的状态，此时势能、动能与辐射能都必须同时达到其最小值<sup>[14]</sup>。

虽然物质能通常不会直接反映在温度测量中，但一旦释放出来，它就可能表现为热。以核子之间的势能为例，它通常被束缚在物质内部，被视为质量的一部分。在核聚变过程中，这部分能量会被释放，同时伴随着相应的质量损失，并以辐射能的形式向外散发，从而产生如太阳这类恒星所观测到的极高温度。在正电子-电子湮灭中，两种粒子的全部质量都会转化为辐射能。同样，任何基本粒子都可以与其反粒子发生湮灭，释放出其全部物质能量。相反，在成对产生过程中，高能光子在原子核附近作用时，可以生成一个电子-正电子对，从而展示了物质如何直接由辐射能产生。

尽管物质能与动态能可以相互转化，但它们在系统中的形态与分布主要由系统的总能量所决定。正如水会因动态能(通常表现为温度)的不同而呈现固态、液态或气态一样，天体系统中的物质也会根据总能量演化为不同的状态。当天体的质量超过约0.08个太阳质量时，引力坍缩足以克服库仑斥力，使不同原子的核子足够接近，使短程核力发挥作用并触发氢聚变，标志着恒星的诞生。通过核聚变，轻元素逐步结合形成较重元素，这一过程可以持续进行直到形成铁。铁之后，原子核变得不稳定：质子间的库仑斥力超过短程核力的吸引，使重元素发生裂变或放射性衰变为较小的原子核。因此，铁代表了最稳定的原子核，并在恒星的多代演化过程中不断积累。

当一颗初始质量为8-25个太阳质量的恒星，其铁核质量超过钱德拉塞卡极限<sup>[15-16]</sup>(约1.4个太阳质量)时，电子简并压力已无法抵抗引力，核心随即坍缩。在此过程中，电子与质子结合形成中子，从而产生一颗中子星，其物质主要以中子形态存在。初始质量超过25个太阳质量的恒星，其铁核可能突破托尔曼-奥本海默-沃尔科夫(TOV)极限<sup>[17-18]</sup>(约2.2个太阳质量)。在这种情况下，中子简并压力以及强短程核排斥力都不足以阻止进一步的引力坍缩，最终形成黑洞。在黑洞内部，物质被认为压缩至一个奇点，即近乎无限密度的点。其引力之强大以至于连光也无法逃逸，因此无法被直接观测。黑洞的存在通常通过附近恒星的运动，以及吸积物质辐射出的能量间接推断。这些转变表明，宇宙在特定能量条件下演化为特征性物质形态和能量分布的趋势。

质量不足以突破钱德拉塞卡极限的恒星最终会演化为白矮星或红矮星。质量低于约0.08个太阳质量的天体则完全无法启动核聚变，因此保持为类行星天体，例如地球。在这类体系中，引力不再是决定物质形态的主要因素。取而代之的是库仑相互作用，它在微观尺度上占主导地位，支配着物质的结构与行为。由于静电力既可以表现为吸引，也可以表现为排斥，再加上元素之间能够以无数方式结合，因而产生了极其丰富的物质多样性。根据其动态能水平，物质可以以固态、液态或气态存在，并在不同化合物之间发生无数化学反应。在这一系列能量状态之中，特别是在地球独特的条件下，生命能够由物质多样性中诞生，而智慧则可以从生命系统中进化而来。

在引力主导的大型系统中，在这些系统中物质能与动态能的相互转化十分常见，不同的是，在受库仑力支配的系统，其演化主要体现在动态能(D)、内部势能(U)、动能(K)与辐射能(R)之间的转化与交换，如方程(12)所示。这些交换不断调整三种能量形式的相对比例，趋向于由平衡比率(u:k:r)表征的稳定能量分配，如表达式(13)所示。对于一个特定动态能水平的孤立系统，该比率在基本保持恒定。在特定物态(固态、液态或气态)中，该比率通常处于一个较窄的范围内。偏离该平衡会引发三种能量形式之间的内部交换，以恢复平衡，这一过程往往表现为围绕平衡点的周期性振荡。相比之下，长期的渐进演化通常反映的是从一个平衡态向另一个平衡态的过渡，而这种过渡通常由系统整体动态能的变化所触发。在所有情况下，系统都朝向其能量形式之间的平衡分布演化。

需要强调的是，温度反映的是系统的辐射能，而不是动能。辐射能的水平和相对比例由系统的总动态能决定，而总动态能又决定了支配物质状态(固态、液态或气态)的主导作用力。在低动态能水平下，分子之间的库仑吸引占主导地位，形成化学键并增加系统中势能的比重。为了在低温下维持较高的势能，水会结晶为固态。类似地，化学反应的方向也受系统动态能的

支配:在对热敏感的反应中,输入辐射能可以通过改变能量成分的平衡而改变反应方向。同样,改变反应物或生成物的数量也会影响势能的贡献,从而改变整体能量平衡。总之,一个系统的总动态能不仅决定了能量成分的平衡比率,也决定了物质的状态。

熵增或熵减反映了系统在不同能量水平下恢复能量平衡分布的趋势。在低能量水平下,吸引力占据主导地位,促使粒子间形成更多键并储存更多势能。在这种情况下,平衡分布通常以高比例的势能为特征。在吸引力的影响下,粒子倾向于聚集,从而减少微观态数量,导致熵减。这一机制解释了低温下晶体和固态物质的自发形成,也说明了为何天体系统在引力作用下会从宇宙尘埃演化为恒星和星系,导致熵降低,而非走向“热寂”。

在高动态能水平下,粒子间的相互作用以库仑排斥为主,导致键的断裂并使体系趋于弥散。这解释了为何物质在高温下会发生熔化或汽化过程,并伴随熵的增加。随着键的断裂,势能成分减少,使动态能中势能的占比下降,而其他能量形式的占比相对上升。从**回归原理**的角度来看,这种熵的增加体现了体系在高能条件下为恢复平衡能量分布所做的响应。

这一原理同样有助于解释为什么许多物体会随着时间的推移而发生降解——这一过程通常被描述为熵的增加。这类材料往往形成于不同的能量条件下,而其最终的分解反映了体系在新的能量水平上恢复能量平衡分布的自然趋势。例如,聚乳酸(PLA)是一种由玉米淀粉制成的生物塑料,它在约摄氏170–200度的高温下合成。在室温环境下,能量水平发生转变;为了在这一较低水平上恢复平衡,PLA会发生酯键的水解,从而导致快速降解。然而,并非所有自然过程都遵循降解路径。结晶过程就是一个相反的趋势:体系变得更加有序和稳定,这正是**回归原理**的另一种体现。

## 结论

**经典熵概念的核心思想是能量具有趋于弥散的倾向。**这一趋势在以排斥相互作用为主导的系统中成立,但在吸引相互作用占主导时则可能出现相反的情况。此外,热力学与统计力学对熵的定义并不完全等价,这就对热力学第二定律的普适有效性提出了质疑——而该定律正是建立在熵的精确定义之上。对第二定律的挑战不仅限于理论上的不一致,更直指其核心主张:熵永不减少。解决这一问题需要一个更为宽广的概念框架。**回归原理**提供了这样的框架,它揭示了系统通过势能、动能和辐射能的转化与再分配而趋向于能量均衡分布的内在倾向。不同于仅承认熵增过程的第二定律,回归原理同时涵盖了熵增与熵减过程,以及周期性的振荡演化,从而为在各种基本作用力影响下刻画系统演化提供了更为普遍的基础。由于宇宙中的一切最终都由能量构成,任何系统的演化都可以理解为恢复或围绕其能量平衡进行振荡的过程。因此,回归原理在各个科学领域都具有广泛的适用性,为理解自然现象的底层机制提供了更深刻的视角。

## 版本更新

- [04/16/2025: 本文在斯坦福初始发布](#)
- [11/01/2025: 在Zenodo上发表](#)
- [12/18/2025: 增加相关文章摘要连接](#)

## 相关文章摘要链接

- [https://cs.stanford.edu/people/zjl/abstractc.html, PDE](https://cs.stanford.edu/people/zjl/abstractc.html)
- [https://sites.google.com/view/zjlc/, PDF](https://sites.google.com/view/zjlc/)

- <https://xenon.stanford.edu/~zjl/abstractc.html>, PDF
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.1797205>, PDF

## 相关文献

- 热力学中的错误概念 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 克鲁克斯辐射计旋转的驱动机制 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 布朗运动的原动力 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 温度是分子平均动能的标志吗? (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 绝对零度的本质 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 能量转换三角 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 热膨胀是由于粒子振动引起的吗? (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 超流体不是流体 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 为什么相变温度保持恒定 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 摩擦为何会产生热量? (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 简明熵概念 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 熵可以减少 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 回归原理 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 金属中是否存在自由电子海? (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 电子通道: 导体超导统一论 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 低温和高温超导统一理论 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- LK-99的局限和意义 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 地球磁场超导起源说 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 关于质量的本质问题 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 从万有引力定律到广义相对论的演化 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 爱因斯坦质能方程的最简单推导 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 如何理解相对论 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 数学并非科学 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- 潮汐能并非可再生能源 (PDF: DOI) (中文: DOI)
- AI 知识污染 (PDF) (中文)
- DeepSeek pk ChatGPT (PDF) (中文)

## 参考文献

1. Dugdale, J.S. (1996). "[Entropy and Its Physical Meaning](#)". *Taylor & Francis*. p. 13. ISBN [978-0-7484-0569-5](#).
2. Liu, J.Z. (2025). "[The Restoration Principle](#)". Stanford University. Archived (PDF). doi:[10.5281/zenodo.17504893](https://doi.org/10.5281/zenodo.17504893).
3. Wright, S.E.; et al. (2001). "On the Entropy of Radiative Heat Transfer in Engineering Thermodynamics". *Int. J. Eng. Sci.* **39** (15): 1691–1706. doi:[10.1016/S0020-7225\(01\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7225(01)00024-6).
4. Murrell, J. (2009). "[A Very Brief History of Thermodynamics](#)". Retrieved May 2, 2014. [Archive copy](#) at the [Internet Archive](#) PDF (142 [Archived](#) November 22, 2009, at the [Wayback Machine](#) KB).

5. Reif, F. (1965). "Fundamentals of Statistical and Thermal Physics". *McGraw-Hill*, New York.
6. Carey, V. (1999). "Statistical Thermodynamics and Microscale Thermophysics". Cambridge University Press.
7. Narimanov, E.E.; Smolyaninov, I.I. (2012). "Beyond Stefan–Boltzmann Law: Thermal Hyper-Conductivity". *Conference on Lasers and Electro-Optics 2012*. OSA Technical Digest. Optical Society of America. pp. QM2E.1. doi:[10.1364/QELS.2012.QM2E.1](https://doi.org/10.1364/QELS.2012.QM2E.1).
8. Vertical Learning Labs. (2011). "[Molecular Speed Distribution](#)". *Introduction to Chemistry*, Unit 1.5.
9. Osborne, R. (1879). "On Certain Dimensional Properties of Matter in the Gaseous State". *Royal Society Phil. Trans.*, Part 2.
10. Boltzmann, L. (1895). "On Certain Questions of the Theory of Gases". *Nature*, **51** (1322): 413–415.
11. Shannon, C.E. (1948). "[A Mathematical Theory of Communication](#)". *Bell System Technical Journal*. **27** (3): 379–423. doi:[10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x). hdl:[10338.dmlcz/101429](https://hdl.handle.net/10338.dmlcz/101429). (PDF, archived from [here](#) Archived 20 June 2014 at the [Wayback Machine](#)).
12. Shannon, C.E. (1948). "[A Mathematical Theory of Communication](#)". *Bell System Technical Journal*. **27** (4): 623–656. doi:[10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb00917.x). hdl:[11858/00-001M-0000-002C-4317-B](https://hdl.handle.net/11858/00-001M-0000-002C-4317-B). (PDF, archived from [here](#) Archived 10 May 2013 at the [Wayback Machine](#))
13. Liu, J.Z. (2023). "[Can Temperature Represent Average Kinetic Energy?](#)". *Stanford University*. Archived (PDF). doi:[10.5281/zenodo.17503871](https://doi.org/10.5281/zenodo.17503871)
14. Liu, J.Z. (2023). "[The Nature of Absolute Zero Temperature](#)". *Stanford University*. Archived (PDF). doi:[10.5281/zenodo.17504015](https://doi.org/10.5281/zenodo.17504015)
15. Chandrasekhar, S. (1931). "[The Maximum Mass of Ideal White Dwarfs](#)". *Astrophysical Journal*. **74**: 81–82. Bibcode:[1931ApJ....74...81C](https://doi.org/10.1086/143324). doi:[10.1086/143324](https://doi.org/10.1086/143324).
16. Chandrasekhar, S. (1935). "[The Highly Collapsed Configurations of a Stellar Mass \(second paper\)](#)". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **95** (3): 207–225. Bibcode:[1935MNRAS..95..207C](https://doi.org/10.1093/mnras/95.3.207). doi:[10.1093/mnras/95.3.207](https://doi.org/10.1093/mnras/95.3.207).
17. Oppenheimer, J. R.; Volkoff, G. M. (1939). "On Massive Neutron Cores". *Physical Review*. **55** (4): 374–381. Bibcode:[1939PhRv...55..374O](https://doi.org/10.1103/PhysRev.55.374). doi:[10.1103/PhysRev.55.374](https://doi.org/10.1103/PhysRev.55.374).
18. Bombaci, I. (1996). "The Maximum Mass of a Neutron Star". *Astronomy and Astrophysics*. **305**: 871–877. Bibcode:[1996A&A...305..871B](https://doi.org/10.1051/0004-6361:19961305.871).