

物理学咬文嚼字之七十二 什么补偿!

曹则贤[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2015-04-16收到

[†] email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20150510

但是科学不仅是逻辑的,也是历史的。

——王正行

摘要 Compensation常出现在热力学第二定律相关的表述中,这个英文词及其汉译补偿却总让笔者在热力学第一定律的层面上打转。

1 引子

西门庆是成功人士的典型自有其道理。其成功不只是在智商、情商皆高,不为自己的行为设下限,还在于其真的懂得并能自觉地运用物理学。为了巴结上当朝宰相蔡京¹⁾,他精心准备了四件能挠到宰相大人痒痒肉的礼物。西门庆的精明之处在于知道要想把礼物送至宰相大人台前且能让宰相大人知道送礼者是他西门大官人,花钱的主要方向就不在礼物上,给相府大管家的好处才是花销的大头。你不得不佩服,西方人敲破脑袋才能想明白的关于这个世界运行的基本规则,即热力学第二定律,在西门大官人那里凭直觉就运用得滚瓜烂熟。

西门大官人送礼一节,有助于理解“热力学”的关键,即功—热转换过程中所隐藏的一个奥秘——源自克劳修斯的compensation的概念¹⁾。不

知compensation,似乎不足以言entropy(熵)。Compensation,是对克劳修斯用的动词分词compensiert²⁾的英译,在汉语热力学语境中被随手翻译成“补偿”,且有“非自发过程若发生,一定要有补偿,补偿的目的在于使孤立体系的熵不减少”一类云里雾里的论述。补偿?什么补偿?

2 热力学

人类对冷热问题的思考由来已久,酒精温度计早在1654年(对应中国的明朝末年)就已出现,但热力学则是在1824年才初露端倪,其标志为卡诺的论文*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*(关于火的驱动能力以及发挥此一能力之适当机械的思考)。热力学的起源在于提高热机效率之努力所带来的沮丧。到底是什么限制了热机的效率?卡诺看到了确实有

个由可逆过程确定的不依赖于工作介质的效率上限。克拉伯隆(Émile Clapeyron)1834年在*Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur*(关于热的驱动能力)一文中阐明了卡诺的思想,引入了关于热机工作循环的图示,并试图用含温度、体积和压强的公式去表达热机效率。注意,卡诺关注的是火的驱动力,克拉伯隆关注的是热的驱动力,而在1850年代到了克劳修斯那里研究对象已经变成了热本身。在短短的30多年时间里热力学完成了从具体到抽象的升华,确实是物理学史上独特的风景²⁾。克劳修斯研究了卡诺和克拉伯隆的文章,当然还有此前关于热—功转换和热的本质等问题的研究,在克拉伯隆图示的卡诺循环上看出了门道。这个门道涉及compensation(和equivalence关联)的概念,这是熵概念的思想基础。

克劳修斯考察了热—功、功—热转换³⁾以及热机循环,他发现一

1) 蔡京还真是个文化人。其书法作品没有共同作者,想来应该出自其本人之手,与其名望(与苏轼、黄庭坚和米芾齐名)、学术地位(翰林学士兼侍读、太师)是相符的。——笔者注

2) 原文如此,奇怪!德文拼法应是kompensiert才对。——笔者注

3) 热—功、功—热转换还是要区分的。焦耳的工作是确定了功的热当量,而非热的功当量。对于有志于研究物理的人来说,这个差别可不是细微的!——笔者注

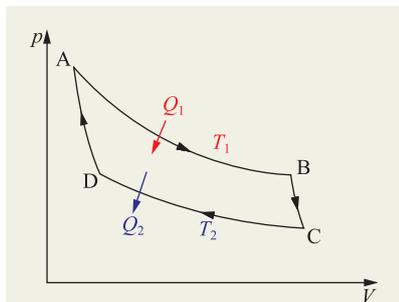


图1 在温度分别为 T_1 和 T_2 的高温热库和低温热库之间的热机循环。高温处吸收的热量 Q_1 可以看成转化成功的部分 Q_w 加上注入低温热库的部分 Q , $Q_w+Q=Q_1$, 之和

有个有趣的现象：功可以在不引起其它效应的情况下转化成熟，但热转化成功就不行；热可以在不引起其它效应的情况下自高温处流向低温处，但自低温处流向高温处就不行。克劳修斯在1854年这篇文章的思考方式，按照马赫的说法，是“took a freer standpoint”^[2]，我觉得就是天马行空式的⁴⁾。他把这些过程分成正、负两类：那些无须其它会被保留的变化掺合的(ohne dass dazu irgend eine sonstige bleibende Veränderung nötig ist)，是正确的，如热自高温向低温处的转变(transformation)和自功向热的转变(heat from work)；而那些必须出现其它变化的，是负的，如热自低温向高温处的转变和自热向功的转变(heat into work)。对于可逆过程，其过程中发生的事情是compensiert的，即所涉及的功呀热呀什么的，其有个等价量(Aequivalenz，英文为equivalence)，其代数和是为零的。考察一个卡诺循环，自高温热库吸收热量 $Q_1=Q_w+Q$ ，其中 Q_w 转化成了功，而 Q 流入低温热库(图1)。 Q_w 转

化成了功，其等价量的值为 $-Q_w f(T_1)$ ；而 Q 流入低温热库，其等价量的值为 $Q f(T_1, T_2)$ ，这里的 $f(T)$ 和 $F(T, T')$ 是性质不明的函数。对于函数 $F(T, T')$ ，显然应该有 $F(T_1, T_2) = -F(T_2, T_1)$ 。那么， $f(T)$ 和 $F(T, T')$ 之间该有什么样的关系呢？克劳修斯写到，可以把在高温处吸取的热量 $Q_1=Q_w+Q$ 看成全转化成功了，而传递给低温源的热量 Q 权当都是由功转化而来的，过程的可逆性意味着其等价量的值为零，即 $-(Q_w+Q)f(T_1)+Qf(T_2)=0$ ；也可以把在高温处吸取的热量之 Q_w 部分看成转化成功了，而热量 Q 部分是自高温源传递给低温源的，过程中等价量的值为零，即 $-Q_w f(T_1)+QF(T_1, T_2)=0$ 。由此得到关系式 $F(T_1, T_2)=f(T_2)-f(T_1)$ 。克劳修斯继续写到，根据一个日后会变得明了的(der später ersichtlich werden wird)原因，取 $f(T)=1/T$ ，则有 $-Q_w/T_1+Q(1/T_2-1/T_1)=0$ 。至此，在克劳修斯的视野里出现了 Q/T 这样的量。正是关于循环过程中量 $\oint dQ/T$ 的研究，才导致了熵概念， S ，的引入。

克劳修斯引入这个所谓的等价量(Aequivalenz)，是为了 die Verwandlungen als mathematische Größen darzustellen (把转化当成一个数学的量去表示)，这也是为什么他用 entropy 这个词去表述这个等价量的原因。

克劳修斯在这篇文章中好象只用了一次 compensirt。请注意，Kompensation 来自拉丁语动词 compensare，是 com, with + to weigh，其本意和 equilibrium (平衡) 是一样

的^[3]，其实是对 equivalence 的说明。在德语中动词 kompensieren 就是均衡、平衡、抵消的意思，如 die Wirkung zu kompensieren (抵消效果)。如果把 compensation 理解为传热过程中某种补偿的话，笔者愚笨，总是把它理解成能量意义上的补偿，也即只想到热力学第一定律的层面上。似乎这样理解的人还有不少，比如如下这句就源于同样的误解：“Here work produced is compensated by influx of heat, keeping the internal energy fixed (这里产生的功有流入的热量所补偿，而内能保持不变)”^[4]。

有趣的是，compensate, compensation 却不断出现在一些英文热力学书籍中，如“Reversibility was essential in Clausius's argument leading to equation (13) because it enabled him to assert that the two kinds of heat transformations compensate each other.”^[5] 这算是好的，因为它指明了是两种转化 compensate each other。我不知道对于操英语的学者来说 to compensate each other 是如何理解的。我的有限中英文知识会让我随意就想到“互相补偿”，虽然物理上这应该指的是“(等价量，即熵，的)正好互相抵消(sich gegenseitig gerade aufheben müssen)”。也许，to be equivalent 更容易理解些。提请读者朋友们注意，equivalence 与 equilibrium 才是热力学的中心概念——在其它物理领域也是这样，因为它们才导致 equations^[3]。至于 compensation，克劳修斯只是随手用了一下而已。有了熵的概念

4) 汉语成语天马行空谓思想洒脱、不受框架约束。有趣的是西方的天马，生双翅的 pegasus，其蹄子刨出的水乃是灵感之泉。更有趣的是，循着哺乳动物是如何丢失了掌控飞行能力的基因的思路，可以推测马是最后一个丢失飞行能力的哺乳动物，因为它和硕果仅存的飞行哺乳动物，蝙蝠，基因最接近。一条正确的科学内容，会有不同的途径指向它的正确，信夫？——笔者注

以后，可以把此问题用一种更明了的方式表述了吧？

3 絮叨

克劳修斯引入 entropy(熵)概念

的关键是表达式 $Q_1/T_1=Q_2/T_2$ 。他得到这样一个表达式的思维过程，是天马行空式的。William Thomson，即开尔文爵士，在 1849 年也得到了类似的式子 $W=JH(T_1-T_2)/T_2^{[6]}$ ，他得到这个式子的推导过程笔者至今没

有看懂。我甚至觉得那里有错。可那又怎样呢？问题不在于推导过程中有没有错，而是物理学的创造者们知道如何在黑暗中看到远处正确的亮光。至于期间琐碎又神奇的过程，胡乱拼凑的教科书哪管这些呢。

参考文献

- [1] Clausius R. Annalen der Physik und Chemie, 1854, 93(12):481
- [2] Mach E. Principles of the Theory of Heat. D. Reidel publishing company, 1986. p.361
- [3] 曹则贤. 物理, 2008, 37(12):882
- [4] Salamon P, Andresen B, Nulton J *et al.* The mathematical structure of thermodynamics. see <http://www.sci.sdsu.edu/~salamon/MathThermoStates.pdf>
- [5] Cropper W H. Great Physicists: The Life and Times of Leading Physicists from Galileo to Hawking. Oxford University Press, 2004
- [6] Thomson W. Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 1849, 16(5):541

首次发现双星相食时发光

许多恒星系统由互相围绕做轨道运动的两颗星组成。在有些情况下，两颗星的轨道平面和我们观察的视线十分接近，因此一颗星会周期性地遮挡另一颗，使我们看到的被遮挡的这颗星的星光变暗(类似于日食)。天文学家们几世纪前就知道了这种双星系统。最有名的例子是 Algol—Arabic 双星。中世纪的占星家认为，这个双星是天空中最危险的星，可能是因为其星光闪烁的。1782 年，英国天文学家 Edward Pigott 正确地解释了 Algol aa 变暗的原因。

1973 年，瑞士天文学家 Andre Maeder 预言某些双星会表现出相反的现象。按照牛顿的引力理论和爱因斯坦的广义相对论，质量会使光线弯曲。因此 Maeder 认为，如果一颗小的但质量很大的恒星遮挡住它的伙伴，那么小恒星的引力会使另一颗恒星的光线放大，

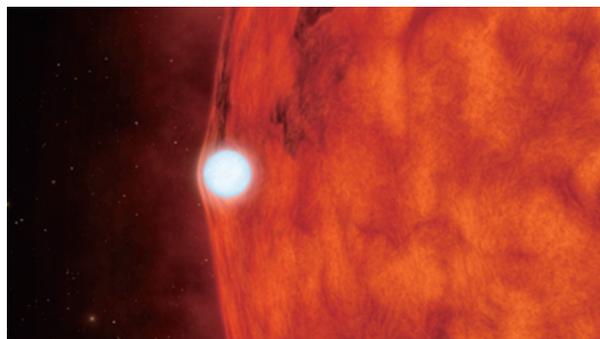


图1 白矮星起着放大镜的作用

物理新闻和动态

甚至超过遮挡造成的变暗。

40 年后，天文学家发现了 2600 光年外的第一个例子。2013 年 12 月初，在 Seattle 的 Washington 大学读博士的 Ethan Kruse 对恒星 KOI 3278 进行了研究。美国航空和宇宙航行局的 Kepler 航天器发现这颗星每 88.18 天变暗一次。这意味着有一颗行星在以 88.18 天的周期围绕这颗恒星做轨道转动。当这颗行星通过恒星前面时，使其光线变暗。Kruse 注意到一个奇异的特点，他发现的信号与一颗行星从恒星前面通过时的信号相似，但是恒星的星光不是变暗而是变得更明亮，每次变亮的程度很小，只有 0.1% 的增强，持续 5 个小时。每 88.18 天重复一次。但与变暗并不同步。

实际上，KOI 3278 并没有已知的行星。它是由一颗像太阳那样的恒星与一颗体积小而密度高的白矮星组成。当这颗白矮星通过恒星的背面时，恒星变暗，而当白矮星通过恒星的前面时，将恒星的光线放大，恒星变亮(见图 1)。

大约 40% 以上的类似太阳的恒星是被结合成双星或多星系统的。双星系统可由更多种的奇特物体组成。中子星和黑洞组成的双星系统应该也显示周期性的变亮。对种系统的研究可以得到关于中子星和黑洞的质量的信息。有关论文发表在 *Science* 2014 年第 344 卷第 275—277 页上。

(周书华 编译自 *Physics World News*, 17 April 2014)