

# Adiabatic 的含义是怎样 从“绝热”变成“无限缓慢(寔渐)”的?

赵凯华

(北京大学物理学院 北京 100871)

Adiabatic 本是热力学的词汇. 从词源上看, 它是 1858 年由兰金(W. J. M. Rankine)<sup>[1]</sup>按希腊文造出来的, 由  $\alpha$ -(not)  $\delta\alpha$ (through) -  $\beta\alpha\iota\nu\epsilon\nu$ (pass) 组成, 在热力学中意思是没有热交换, 即绝热. 其实在此之前的 1824 年, 卡诺在论证他的著名的循环时已用到这个概念. 1902 年, 瑞利<sup>[2]</sup>证明, 缓慢改变摆长, 它的能量  $E$  和频率  $\nu$  之比不变. 1893 年, 维恩<sup>[3]</sup>在研究黑体辐射谱时认为, 缓慢地移动理想反射器壁以绝热地压缩空腔体积, 反射波的多普勒效应会使辐射的高频部分增加, 其结果与提高温度等效. 由此他导出了他著名的位移定律. 这里也蕴含着能量与频率之比是个不变量的概念.

量子论诞生以后, 人们关心什么样的经典物理量才能量子化的问题. 埃伦费斯特(P. Ehrenfest)把  $E/\nu$  这个不变量推广, 在哈密顿力学中, 每个作用量积分(integral of action)  $J = \oint pdq$  在参量缓慢变化时都保持不变. 实际上普朗克常量  $h = \epsilon/\nu$  就是一个作用量子, 后来玻尔和索末菲的量子化条件也都建立在作用量积分  $J$  上. 由于它们的不变性, 在参量慢变化时量子系统不会发生能级之间的跃迁.

埃伦费斯特的文章发表在 1911 年<sup>[4]</sup>. 几个星期以后, 在比利时的布鲁塞尔召开第一次索尔威会议, 会议由洛伦兹主持. 他在会上提出一个简单而重要的问题: 设想一个摆在某个特殊的量子态上振荡, 如果将摆线缩短一点, 量子化的状态将发生什么事? 会议最年青的参加者爱因斯坦毫不犹豫地立即回答: 如果摆长改变得无限缓慢, 其能量仍保持  $h\nu$ . 爱因斯坦那时已读过埃伦费斯特的文章, 并熟悉瑞利对相应经典问题的处理.

直到此时, 还没有出现 adiabatic invariance 的提法. 是谁在什么时候首先公开使用这种提法? 现在看来, 始作俑者是爱因斯坦.

爱因斯坦在 1914 年写了一篇题为《贡献给量子论》的文章<sup>[5]</sup>, 其中谈论到玻尔兹曼熵公式  $S = k \log Z$ , 其中  $Z$  是量子态数目. 作者问道, 在系统的参量  $\lambda$  改变时  $Z$  如何变? 作者说, 回答这个问题非用埃伦费斯特的 Adiabatenhypothese(绝热假说)不可. 作者对这一假说的表述如下: Bei umkehrbarer adiabatischer Änderung von  $\lambda$  geht jeder quantentheoretisch mögliche Zustand wieder in einen dertartigen Zustand über. (在  $\lambda$  的可逆绝热变化中, 每个可能的量子态重新变换到一个这样的状态). 在这里作者对“绝热变化”加了限制词“可逆”. 后面作者接着说: Diese Hypothese hat zur Konsequenz, daß die Zahl  $Z$  der quantentheoretisch möglichen Realisierbarkeiten eines thermodynamischen Zustandes bei adiabatischen Prozessen nicht geändert wird. (这一假说必导致如下推论, 即一个热力学状态可能实现的量子态数目  $Z$ , 经绝热过程将不改变). 在这里作者把对“绝热过程”的限制词“可逆”省略了. 这里讨论的是热力学问题, 这种省略也许还不打紧. 若要把这一假说推广到与“热”无关的问题, 如力学问题, 或一般的量子力学问题, 关键词不是“绝热”, 而是“可逆”, 即过程是准静态的(quasi-steady), 或者说, 无限缓慢的. 而这里偏偏把这一关键词省掉了.

埃伦费斯特于 1916 年写的文章认可了爱因斯坦对“绝热”一词的这种不当用法, 而且更使用了 adiabatic invariant(绝热不变量)一词, 并用于非热学问题上. 埃伦费斯特此文发表在荷兰杂志上<sup>[6]</sup>, 不大好找. 缩减的英文版本次年发表在《Phil. Mag》上<sup>[7]</sup>, 我们就来看这个版本.

英文版本在标题上就使用了 adiabatic invariants 的提法. 文中有这样一段话: By changing the

parameters...in an infinitely slow way, a given motion  $\beta(a)$  may be transformed into another motion  $\beta(a')$ . These special type of influencing upon the system may be called “a reversible adiabatic affection”, the motion  $\beta(a)$  and  $\beta(a')$  being *adiabatically related to each other*. (以无限缓慢的方式改变参量时,一给定的运动  $\beta(a)$  可变换到另一运动  $\beta(a')$ . 这种对系统施加的特殊影响可称做“可逆绝热影响”,运动  $\beta(a)$  和  $\beta(a')$  彼此绝热地联系在一起。)文中斜体字是埃伦费斯特自己加的. 有意思的是他在前半句话里有“可逆”的字眼,在后半句里便不见了. 据说在他的荷兰文本里也是这样,而且在以下的讨论中,“可逆”的字样再也没有出现. 文中在谈到“绝热假说”的应用时说, the so called “*adiabatic invariants*” are of great importance... (所谓“绝热不变量”具有很大的重要性...) 斜体字仍是他加的. 而举的第一个“绝热不变量”的例子是任意周期运动中的二倍平均动能与频率之比  $2\bar{T}/\nu$ , 对于一维简谐振动, 这就是能量与频率之比  $E/\nu$ . 然而这是个力学问题, 完全与“热”的概念无关. 从此以后, *adiabatic invariants* 的提法就流传下来了. 有趣的是, 在这期《Phil. Mag》中, 紧接着埃伦费斯特此文之后另一作者的论文标题就是 “Adiabatic Invariants of Mechanical System”.

应当指出, 现在国际上对 *adiabatic* 一词的这种用法, 即使在热力学领域里也是不通的. 现在这种意义下的绝热过程就是熵不变的过程, 而在热力学中, 只有可逆的绝热过程才保持熵不变, 在不可逆的绝热过程中熵是会变的, 例如气体在真空绝热自由膨

胀时熵要增加. 若赋予 *adiabatic* 一词“无限缓慢”之意, 那么不可逆的绝热过程还算不算绝热过程?

当然, 随着时代的发展, 科学术语内涵是会扩展的. 把 *adiabatic* 一词的内涵从原来的“绝热”扩展到包括“无限缓慢”之意, 亦无不可. 西方的语言不像汉语那样透明, 人们看到 *adiabatic*, 不会望文生义, 立刻想到它的希腊词源有断绝热交换的意思. 汉语就不同了, 仍把 *adiabatic* 译成“绝热”, “热”字赫然在目, 难以接受它还有“无限缓慢”之意. 所以我国物理学界老前辈把这种意义下的 *adiabatic* 译成“浸渐”, 可谓用心良苦. 由于“浸”字在计算机的汉字库里不易找到, 将它简化为“浸渐”, 也是可取的. 如是, *adiabatic invariants* 应作“浸渐不变量”, 而不作“绝热不变量”. 其实对 *adiabatic* 一词的这种“误用”, 不仅中国人有意见, 西方也有人议论. 加拿大的一位化学家曾就此发表过文章<sup>[8]</sup>, 本文的写作许多地方参考了他的论述.

#### 参考文献

- [1] Rankine W J M. A Manual of Applied Mechanics. London and Glasgow, 1859
- [2] Rayleigh L. Phil. Mag. , 1902, 3:338
- [3] Wien W. Sitz. ber. Preuss. Akad. Wiss. (Berlin), 1893, p. 55
- [4] Ehrenfest P. Ann. Phys. , 1911 36 :91
- [5] Einstein A. Verh. Deutsch. Phys. Ges. , 1914, 16 :820
- [6] Ehrenfest P. Versl. Akad. Wet. Amsterdam, 1916, 25 :412
- [7] Ehrenfest P. Phil. Mag. , 1917, 30 : 500
- [8] Laidle K J. Can. J. Chem. , 1994, 72 :936