

物理学史中的五月

1962年5月11日：费曼的“布朗式棘轮”

(译自 *APS News*, 2013年5月)



萧如珀¹ 杨信男² 译

(1 自由业; 2 台湾大学物理系 10617)

1948年，爱丁顿爵士 (Sir A. Eddington) 清楚说明热力学第二定律占据着“自然法则最高的位置”，他哀叹说，如果有人设计出一个违反第二定律的理论，“就会走上彻底耻辱性的崩溃一途”。虽然如此，却无法阻止物理学家经常提出推测性的想象实验，看看要如何违反第二定律，这些过程也因此深化了我们对它的理解。

其中最著名的“麦克斯韦精灵”，是麦克斯韦 (J. Maxwell) 最早于 1867 年 12 月给苏格兰数学家泰特 (P. Tait) 的一封信中所提出的。麦克斯韦想象说，有一个容器，里面充满处于热平衡的气体分子，有一个绝缘隔板将容器一分为二。容器内有一个精灵定期地打开隔板上的门，让速度比平均要快的分子往同一方向流动，一段时间后，两个空间就会产生温度的差异，可以用来做功。以第二定律的统计性来看，这只精灵似乎打败了熵的增加。

大约 100 年后，费曼 (R. Feynman) 再度思考此概念，他以自己从热力学所得到的灵感设计想象性实验，似乎违反了第二定律。费曼成长于美国纽约皇后区法洛克威，自幼即喜爱解难题。在他的高中时代，有一位同学常会一早就问他一道几何难题，费曼会一直思考至解出为止。在一整天当中，其他同学会拿相同的难题问他，他都能立刻为他们解出来，因此赢得了“超级天才”的声誉。他的整个物理生涯即是在解答越来越复杂的难题。

费曼于 20 世纪 40 年代初期加入了曼哈顿计划，当时他还是一位研究生，生性爱恶作剧，只因好玩就



图 1 费曼

去破坏洛斯阿拉莫斯实验室的安全系统。他自己学会安全开锁的技巧，撬开保管库的锁，里面有建造原子弹最机密的秘密。他从未取走任何数据，只留下讥讽的字条，感叹曼哈顿计划安全系统的松散。费曼晚年培养出绘画与打鼓的兴趣。

20 世纪 60 年代，费曼是美国加州理工学院的物理教授，参与了一个提升加州理工学院大学部学生教学的三年计划。结果他整理出经典的授课内容，最后出版成《费曼物理学讲义》(*The Feynman Lectures on Physics*)。此讲义光是英文版就卖了一百五十多万册，一直指导激发着现在的年轻物理学家。

在那些讲义中，费曼于 1962 年 5 月 11 日说明“布朗式棘轮”的设计，此设计是基于先前波兰物理学家斯莫卢霍夫斯基 (M. Smoluchowski) 于 1912 年的研究工作。斯莫卢霍夫斯基设计出一个机器，可以从温度平衡系统的热能中撷取有用的功。此机器由一浸在液体中的小桨轮，和一个由轮轴所联结的棘轮所组成 (图 2)。液体中的分子呈现随机的布朗运动，它们的碰撞让桨转动。重点是，防止齿轮逆转的制转杆会阻止反方向的旋转，因此桨会持续沿同方向转动，可用来做某些功，产生机械能。

费曼修正了斯莫卢霍夫斯基的想象性实验，他证明给大学部学生看，棘轮不会一直沿同方向转动，因为制转杆也会呈现布朗运动，会上下抖动，因此棘轮的轮齿有时会向后滑动，而不是向前转动。事实上，

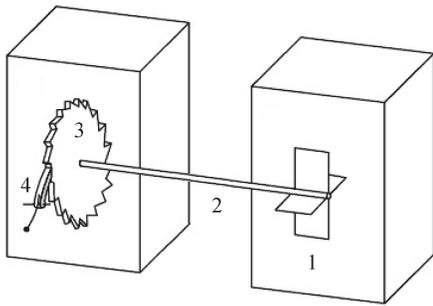


图2 布朗式棘轮, 由《费曼物理学讲义》第一册的图 46-1 修改而成

1. 轮桨 2. 轮轴 3 棘轮 4 制转杆 (或棘爪)

费曼对此装置做了第一个定量分析, 得到的结论是, 随着时间的流逝, 机器向后转动和向前转动会一样多, 因此抵销任何做功的可能性; 而且很可能由于没有外在的能量来源让它继续转动, 最后会丧失能量。唯一可以从此系统撷取功的方法是, 要想办法让机器两边的气体产生温差, 就像蒸汽机的基本原理一样。

费曼的想象性实验几十年来让物理学家深感兴趣, 甚至将它延伸到多个棘轮的情形。最后它发展成布朗电动机的概念: 纳米尺度的机器, 可以从非平衡的微小来源, 例如化学势, 取得有用的功, 而非从热噪声来取得。

2010 年, 荷兰特温特大学成功地展示了一部利用布朗棘轮的机器, 使用了 2000 个跳动的珠子, 珠子的跳动让机器中的桨转动, 产生了小小的净能量。为

了确定桨只会转同一方向, 推德的研究员将桨的每一叶片的一边覆盖住, 这样珠子每碰到覆盖的那一边就会失去更多的能量。

这是一个很无效率的系统; 它大部分的能量都化为热和声音消失了。它并未违反第二定律, 可是, 它可清楚解释生物分子, 如核糖核酸聚合酶和驱动蛋白的运动。在那么小的尺度中, 这些分子根据棘轮机制在身体里沿着细胞内的轨迹移动, 此现象称为后档作用。特温特的设备便是此运动模式在大比例尺度的呈现。

因此, 爱丁顿宣称第二定律不可能被打破, 严格来说是正确的。然而, 足智多谋的物理学家却继续证明它也许可以弯曲。

进一步阅读: Eshuis, P. et al. (2010) “*Experimental Realization of a Rotational Ratchet in a Granular Gas,*” *Physical Review Letters* 104(24): 4.

Feynman, R.P. *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 1 (Chapter 46). Boston, MA: Addison-Wesley, 1963.

Von Smoluchowski, M. (1912) “*Experimentell nachweisbare, der Ublichen Thermodynamik widersprechende Molekularphenomene,*” *Phys. Zeitschur* 13: 1069.

(本文转载自 2016 年 6 月《物理双月刊》, 网址: <http://Psroc.org.tw/Bimonth/index.php>; Email: Snyang@phys.ntu.edn.tw)



科苑快讯

科学家发现早期人属成员牙齿形态演化新证据

最新一期《人类进化杂志》(*Journal of Human Evolution*) 在线发表了中国科学院古脊椎动物与古人类研究所潘雷与法国、南非同行关于早期人属牙齿形态演化的最新研究成果。

他们借助高分辨度工业 CT 扫描技术, 对南非出土的早期人属成员牙齿的内部三维形态特征进行了观察, 通过与南方古猿、尼安德特人及现代人牙齿的对比和分析, 发现南非早期人属成员的牙齿釉质三维分布特征与晚期人属成员相同, 而与同时代或较早的南方古猿有显著差别。

由于现代人经历了与早期人属不同的发育过程, 这种釉质分布的相似性可能是与食性相关的适应性特

征, 在人属起源的早期已经出现。另一方面, 早期人属的前臼齿、臼齿的釉质-齿质界面 (EDJ) 形态分别接近于进步的现代人群体与原始的南方古猿群体, 提示了前臼齿 EDJ 形态在分类学上的重要意义。此项研究对探讨早期人属成员的起源及其与类人猿、直立人关系的研究具有一定的参考价值。

(文章来源: 古脊椎动物与古人类研究所)

