

## 挤压环境促进引擎功效

(中国科学院理化技术研究所 戴 闻 编译自 James Millen, *Physics*, September 13, 2017)

热力学理论告诉我们，如何利用存在于我们周围丰富的、无序的能量，进而将热量转换为有用功。这些理解推动了工业革命。近年来，另一场革命在纳米尺度上发生，研究人员正忙于设计各种应用的纳米机器，如靶向药物及绿色能源存储等。但是我们如何有效地从热环境中提取能量呢？我们使用的典型工具是一种热机，它允许热量从高温热源流向较冷热源，而在过程中提取功。在1824年，卡诺证明：热机的最大效率是由高温、低温两个热源的温差之比给出的。最近，来自瑞士联邦理工学院(ETH)的Jan Klaers和他的同事，第一次用实验证明，通过设计环境的特性，他们可以驱动一台纳米引擎，效率达到卡诺极限的2倍。这意味着，

人工纳米引擎的工作效率有可能超越它们的宏观对应体。Klaers的引擎是由纳米线束构成，大约是20 μm长，两端固定(见图)。研究者通过施加电子信号来激励线束振动。然后他们给信号加上噪声，使线束的位置和动量涨落。噪声信号其作用就像纳米线束的热环境，随着噪声加入的量设定温度。

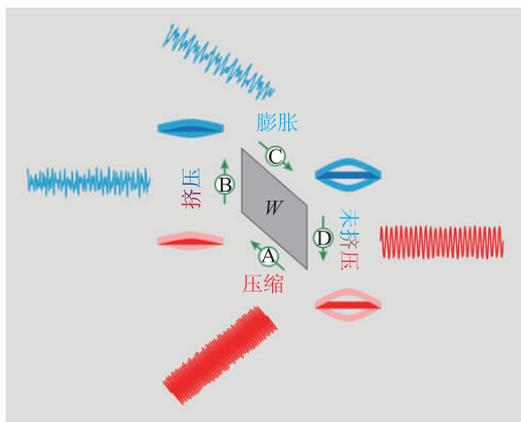
研究者借用了量子光学领域的一个技巧，他们“挤压”(squeeze)电子信号。Squeezing是一个过程，其中一个系统自由度涨落的减小，以牺牲另一个系统自由度涨落为代价。例如，一个浸入热环境的微小钟摆，其位置和动量之间有固定的关系。但有可能挤压钟摆的运动，使其位置的涨落降低，而其动量涨落增加。使用挤压的电子信号驱动纳米线束，Klaers和同事能够

从噪声热源提取244 meV的热量，将其转换为26 meV的功，大约10%的效率是卡诺极限的2倍。他们这样做的过程包括：引入不同程度的噪声，来改变有效温度；引入不同的信号频率，使线束有效地压缩或膨胀；引入不同程度的挤压，以有效地改变压强(见图)。值得注意的是，在这个系统中没有热力学定律被违背，因为挤压是一个本征的非平衡过程，超出标准热力学理论的范畴。在未来，研究人员可能不必花

费如此长的时间来设计非平衡环境，因为大自然可免费提供这类环境，特别是在生物领域。细胞内许多重要的过程其动力来自分子纳米机器，它们与环境的关系偏离平衡。

在这个实验中，纳米线束对它的夹持端点以应变的形式做功，这不是一个特别有用的任务。然而原则上说，我们可以耦合这两个端点到其他振动系统(它们本身有不足，不能被电控，也不能以超出卡诺预言的效率被驱动)。Klaers等获得的26 meV功听起来似乎很小，但在纳米尺度它是不可忽略的，这足以推动纳米颗粒或生物细胞以每秒几厘米的速度前进。

随着技术的不断微型化，处理环境热成为一个日益严重的问题。由于环境的热涨落，输入到纳米级设备的能量，与设备本身的操作能量大小相当，这将妨碍设备正常作业。在纳米尺度上，我们进入了一个领域，我们不能仅仅依靠标准热力学的定理或平均量，来理解热、功之消耗和产生，以及机器行为。一台大型机器并不关心，某些空气分子是否以两倍平均速度撞击它，但这种涨落对纳米器件有很大的影响。Klaers及其同事的研究突出了(利用这些破坏性涨落)使能量转换最大化的潜力。对于量子系统来说，热是一个更大的问题，因为来自环境的热导致脆弱量子态的破坏。在量子领域，使用Klaers等同类的热力学技巧，将会推动量子机器的发展，在操控中开发利用纠缠等效应。



Klaers等设计了振动纳米线束(其行为正如一台微型引擎)之环境，结果导致效率超越卡诺极限。在A过程，使用频率增高的电子信号(红色)激励纳米线束振动，产生有效压缩；在B过程，电子信号被引入挤压(蓝色)，线束压强增高；在C过程，改用频率减低的电子信号(蓝色)激励纳米线束，导致有效膨胀；在D过程，使用撤除挤压的电子信号(红色)，线束压强减低。W四边形面积代表引擎做功量