

测量时间的热力学成本

(中国科学院理化技术研究所 戴 闻 编译自 Anthony J. Short. *Physics*, August 2, 2017)

精确测量时间之能力已对社会产生了巨大影响,从海洋航行计时器(在十八世纪推进航海),到星载原子钟(今天全球定位系统(GPS)之基础设备)。但是,物理学对我们测量时间的能力有什么基本的限制呢?在一篇新论文中,来自西班牙巴塞罗那 Autonomous 大学的 Paul Erker 和他的同事认为,在这样的限制中热力学起关键作用。考虑一个简单的量子钟模型,他们在准确性和分辨率两个特性之间建立了定量关系,并借助于模型钟的热耗散和熵增,计算了运行模型钟的“热力学成本”。时间无情地流逝,从过去流向未来,就我们的感知而言,热力学占据核心地位。因此,这些结果将我们测量时间的能力与时间流逝本身联系起来。

量子理论支撑着几乎所有的当代物理学,并一直被用来设计现今最准确的时钟。为探讨测量时间的基本限制,Erker 和他的同事专注于

量子时钟。为了确保所有方面都得到充分的考虑,他们设计了一台自主时钟模型,它不需要任何外部控制或电源,就可产生一系列的“滴答”声,后者进而被传送到外部世界。Erker 模型的一个关键优势是,初始状态不需要微调,也不需要任何精确的编时准备;另一个优点是,模型明确地包含了时钟的物理运行和功率供应。

新的时钟由最小的热机引擎组成,它包括两个量子系统,每个系统有两个能级。热机引擎连接两个热沉,一热一冷。此外,它被连接到一个负载系统,该系统有一个有限的可能量子态的“阶梯”,具有相等的能量间隔。随着时钟演进,热量从热端热沉流向冷端热沉,提升负载沿“阶梯”向上。当负载到达阶梯的顶端时,它迅速地衰减到底部,向探测器发出一个光子,产生时钟的滴答声,然后这个过程再一次开始(被重复)(见图)。时钟的性能

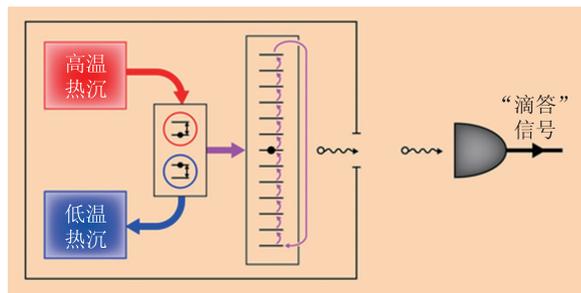
借助于分辨率(连续滴答声之频率)以及准确性被描述,时钟准确性的概念是:“滴答”声的数目会有正负 1 的不确定性。

有趣的是,研究小组发现,时钟可达到的分辨率和准确性取决于流入冷端热沉的热耗散量,耗散热量越大,时钟性能就越好。此外,通过改

变时钟的参数,例如阶梯中的阶梯数,可以改进准确性或分辨率,进而在两个量之间进行非线性权衡。在冷端热沉的热耗散与时钟的熵增密切相关;并且证明了在一个特定的限制下(即阶梯有许多级,并且阶梯负载与热机引擎弱耦合),时钟的准确性等于其熵增的一半——出奇简单的关系,连接两个很不同的量。随着宇宙向更无序状态演化,熵的增加被认为会引起我们在时间感知上的不对称性。例如,落在地板上的物体,会消耗能量释放热量到地板,但我们看不见相反的情况:地板上的物体吸收热量并被推起。

一个关键的论点是,一台自主的量子钟作为具有有限功率的机器运行,没有熵的增加,被认为是不可能的——实质上讲,没有熵的增加,任何完全有效的时钟都将无限缓慢地滴答滴答。

它也将很好地确定热力学量子时钟和更多的先前考虑的机械量子钟之间的关系。以前认为,在机械量子钟中,熵似乎并不发挥核心作用。最后,人们可以研究自主量子钟的额外特性,例如:对精确初始状态的敏感性,或者它们的寿命(在寿命时间段之后,准确性和分辨率显著下降)。注意,在后一种情况下,热力学似乎起着关键的作用,因为一台自主时钟一旦达到了一个永久的平衡状态,就不能继续运行。



Erker 和同事的自主量子时钟。热量从一个高温热沉,经由双量子系统(例如,两个原子,它们可处于激发态或基态)组成的热机引擎,流入低温热沉。热机引擎的部分做功被提取,用于提升一个负载系统的能态“阶梯”高度。一旦载荷达到了阶梯的顶端,它迅速衰减到底部,发射一个光子进入探测器,产生一个时钟“滴答”信号