

# 克鲁克斯辐射计旋转的驱动机制

刘正荣

ZJL@CS.Stanford.EDU

此内容由人工智能(AI)辅助翻译, 若未达意, 请查阅[原文](#)

## 摘要

克鲁克斯辐射计的风叶在受到光照时会开始旋转。尽管这一现象早在一个多世纪前就已被发现, 其背后的机制却长期未解。虽然已有多种理论提出, 但均无法全面解释所有观测结果, 尤其是高初始加速度和冷却时出现的反向旋转现象。对辐射计驱动机制的研究使我们发现了一种全新的分子间相互作用形式, 命名为跃迁冲击(transimpact)效应。当原子中的电子吸收能量跃迁至更高轨道时, 电子云随之膨胀, 同时原子与邻近原子的距离在数纳秒内缩短。这种距离的突变打破了库仑力的平衡, 导致原子与周围粒子间产生排斥作用。当跃迁冲击发生在空气分子与辐射计风叶表面分子之间时, 空气分子会被以较大动量弹射出去, 类似爆米花爆裂瞬间的推动力, 从而推动风叶向相反方向旋转。由于风叶的黑色面更有效地吸收能量, 电子激发及跃迁冲击的发生频率高于白色面, 造成作用力不对称, 进而驱动风叶持续旋转。电子跃迁在光照瞬间即发生, 跃迁冲击理论预测风叶加速度将在光照开始时达到峰值, 此后随着空气阻力的增加逐渐减小。这一特征明显区别于所有基于气压和气流的理论。后者认为气压差需通过预热空气逐渐形成, 因此预测初始加速度应为零, 加速度峰值应出现在光照后一段时间。为验证该理论, 我们设计并开展了一系列实验。实验结果与理论预期高度一致, 为跃迁冲击理论提供了有力支持。

## 前言

克鲁克斯辐射计发明于1879年, 又称光帆。如图1所示, 它由一组安装在低摩擦轴上的风叶组成, 置于低压玻璃球内。每片风叶一面涂有黑色或深色, 另一面为白色或浅色。风叶在受到光照时, 黑色面朝向背离光源的方向开始旋转, 旋转速度随光强增加而加快<sup>[1]</sup>。当辐射计置于阳光下时, 旋转迅速启动, 在几秒内达到稳定状态, 并可持续旋转。若将其迅速冷却, 例如放入冰箱冷冻, 风叶则会缓慢反向旋转, 并在数秒内停止。



图1: 克鲁克斯辐射计

一个多世纪以来，辐射计旋转的驱动机制一直是科学界争论的焦点。尽管已有多种理论，至今仍缺乏令人信服的解释。现有理论大致分为三类：光压理论、气压理论和空气动力学理论。辐射计发明者威廉·克鲁克斯曾认为，这种力源于光的压力，正如詹姆斯·克拉克·麦克斯韦所预测的<sup>[2-5]</sup>。若该理论成立，旋转方向应与实际相反，因为白色面因反射较强应承受更大的光压力。此外，如果光压是驱动力，真空度更高的玻璃球中风叶应旋转更快，然而实际情况是，在高度真空的玻璃球内，风叶保持静止。

同理，如果辐射计的驱动来自光电效应，那么在高度真空环境下旋转速度也应加快。而且，在冷却实验中没有高能光子足以击出电子，旋转显然不是由光电效应驱动的，因此光电效应应被排除。实际上，如图2所示，最佳的旋转效果出现在约1帕的压力下。

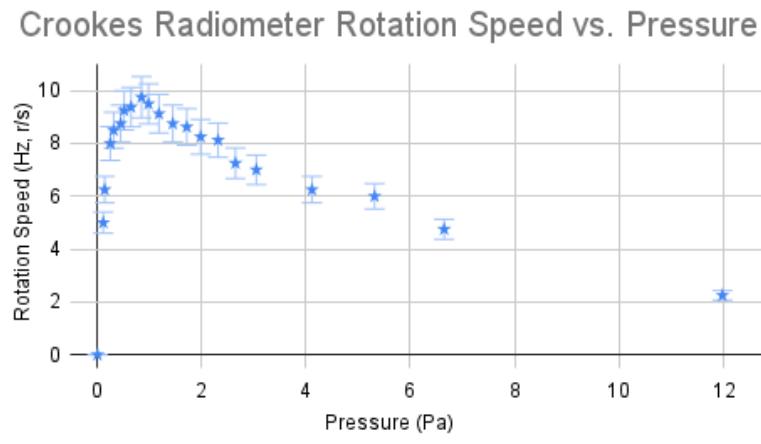


图2：克鲁克斯辐射计在约1帕压力下达到的最大旋转速度

基于气压的理论试图通过风叶两侧形成不平衡的压力解释其旋转机制<sup>[6]</sup>。其中一种观点认为，撞击风叶较热一侧的空气分子会吸收部分热量，并以更高速度从风叶表面反弹。问题在于，虽然高速分子产生更大的推动力，但它们同时也更频繁地与来向空气分子碰撞，从而阻碍了后者到达叶表面。

所有基于气压的理论面临的另一个挑战是，如何解释在热平衡状态下的驱动力。经过足够时间，辐射计最终会达到热平衡，此时风叶吸收与辐射能量相等。黑色面虽然吸收光线更有效，但也以相同效率辐射能量；白色面吸收较少光线，但反射更多光子。因此，反射与辐射的总能量密度与入射光相等。结果，风叶两侧的空气受到的加热能量相同，气压也趋于平衡。

在空气动力学理论中，有两种观点将风叶的旋转归因于边缘效应<sup>[7-9]</sup>。阿尔伯特·爱因斯坦提出，由于温度差异，空气分子在风叶边缘产生的推力不会完全抵消。然而，计算结果显示，爱因斯坦所预测的力不足以驱动风叶旋转。另一种较为广泛接受的理论是热蠕动(thermal creep)理论，认为空气沿着风叶的边缘缓慢流动，从而引发风叶旋转。

不过，所有基于空气的理论均无法解释旋转的迅速启动，尤其明显的是初始加速度。静止的风叶要开始转动，驱动力必须首先克服风叶与支撑轴的摩擦力。这些理论认为风叶的运动由压力差以及引发的气流驱动，而这些差距的形成需要时间加热空气，因此加速度应从零开始，逐步上升。但实际上，这种缓慢增长的过程几乎未被观察到。本研究发现，风叶旋转以最大加速度迅速启动，随后随着转速提升，空气阻力增大，加速度逐渐下降。

这些理论在冷却实验中面临比加热实验更多的挑战。冷却实验通常通过施加冷却剂或将辐射计从高温环境快速转移至低温环境来实现。此时，设备不再吸收能量，而主要通过红外辐射释放内部能量。由于空气分子直径约为0.3纳米，远小于红外光的波长(>750纳米)，它们与红外辐射的相互作用极为有限。因此，冷却过程中辐射计内部的空气基本不受辐射影响，难以通过内部热交换产生足够的压力差或气流来克服摩擦阻力。然而，风叶依然能够旋转，且旋转启动极为迅速。更为显著的是，在我们的微波辅助冷却实验中，观察到反向旋转速度高达每秒7转，远远超过普通阳光照射下的旋转速度。

为了尽可能减小气流与气压的影响，本研究在早期阶段开展了定向光源实验。通过使用聚焦光束照射风叶，我们有效降低了光与周围空气分子的干扰，从而能够更准确地观测风叶对定向光照的响应。实验结果表明，气流和气压并非辐射计旋转的主要驱动因素，这促使我们寻找其他解释路径，并初步提出了“跃迁冲击”(transimpact)理论，尽管当时尚无可用于验证该理论的方法。

在本次修订研究中，我们设计并实施了一系列新实验，专门用于检验跃迁冲击理论的一个关键预测：风叶旋转速度曲线应呈现出明显的初始加速度峰值。这一特征明显区别于现有所有理论模型。实验结果与该预测高度吻合，为跃迁冲击理论提供了有力的实验证据。

### 定向光源实验

为排除气流和气压的影响，我们开展了定向光源实验。如图3所示，当手电筒的光束聚焦照射在风叶的黑色面时，静止的风叶几乎立即开始旋转，并在不到五秒内完成一整圈。约一分钟后，旋转速度稳定在每秒约两圈左右。这一现象与在自然阳光下进行的典型实验结果高度一致。在随后的测试中，我们将光束照射到风叶的白色面，同时尽量避免光线反射至相邻的黑色面。令人意外的是，即使在持续照射的情况下，风叶依然保持静止，未出现任何明显旋转。

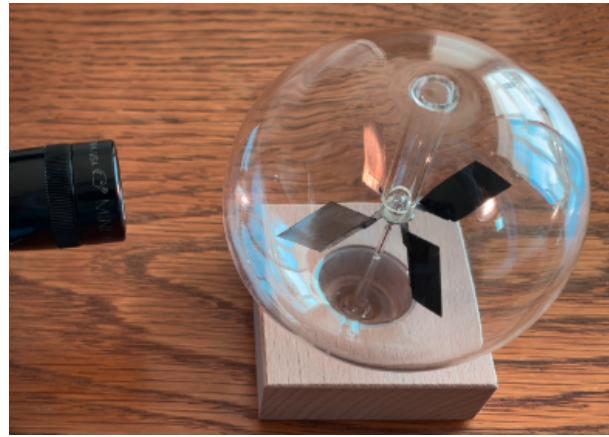


图3：聚焦光照射克鲁克斯辐射计风叶的实验示意

本实验旨在检验：当风叶两侧附近的空气接收到相同的能量输入时，是否会产生相同的气压，从而以相同速度驱动风叶向任意方向旋转。基于空气作用的理论，风叶在两种方向下应具有相近的旋转趋势。为减少光的散射及其带来的副作用，实验中使用了聚焦光源。当光照射在风叶的白色面上时，空气应通过入射光、风叶的反射光以及热辐射，获得与照射黑色面相同的总辐射能。理论上，随着时间推移，局部空气应被加热，从而形成足以驱动风叶旋转的气压，与照射黑色面时的情况相同。然而，实验并未观察到预期的旋转现象。这一结果表明，空气理论所依赖的基本假设可能并不成立。

后续实验更加耐人寻味，我们使用了一台灵敏度更高、静摩擦力更小的辐射计。正如预期，辐射计在正向光照下启动更快，旋转速度更高。当手电筒光束照射到风叶的白色面时，辐射计立即开始向前旋转，表现出白色面追逐入射光的现象。然而，旋转速度明显较慢，且仅持续了几秒便停止。关闭光源后，辐射计发生反向旋转，且未完成一整圈就停下，这与冰箱冷却实验中的反向旋转现象非常相似。为何风叶会“追光”，即使另一侧未直接受光照？按理来说，被照射的这一面受热后应被推开才对。该现象进一步挑战了基于空气动力的理论。

在约一帕的内部压力下，相当于海平面气压的约 $10^{-5}$ 倍，空气稀薄程度相当于海拔约80公里的高度，即中间层的上部。在这个高度，空气密度过低，无法产生足够的升力支撑普通飞行器飞行，因此飞机无法达到此高度。航天飞行则依靠火箭通过高速喷射来推进。同样，由于极低的气压，辐射计中的风叶不可能通过传统空气动力或气压作用获得推动力。黑白两面风叶表现出的明显差异，以及大多数实验中风叶的快速响应，表明辐射计的旋转驱动力并非源自气流或气压差，而是由其他类型的相互作用驱动。

### 跃迁冲击理论

当原子中的电子吸收能量后，会跃迁到更高的轨道，这一过程称为量子跃迁或原子电子跃迁<sup>[10-11]</sup>。该跃迁是自发发生的，通常在数纳秒内完成。价电子跃迁至更高轨道时，外围电子云膨胀，导致与邻近粒子的距离缩小，破坏了范德华力所维持的平衡。由于轨道跃迁是瞬时发生的，会对周围粒子、物体（如风叶表面）产生强烈的排斥力。此现象类似于爆米花爆裂时，爆裂的玉米粒冲击邻近的玉米粒或加热表面。该过程被称为“跃迁冲击”（transimpact），名称来源于“transition impact”。

如图4所示，跃迁冲击可通过两个相邻的单原子分子来示意。分子间的距离由吸引力与排斥力—即范德华力—保持平衡，如图4A所示。当原子吸收能量后，电子发生跃迁，导致分子尺寸增大，分子间距离缩短，如图4B所示。这一变化打破了范德华力的平衡，分子间的排斥力骤然增强，使得分子相互排斥推开，如图4C所示。

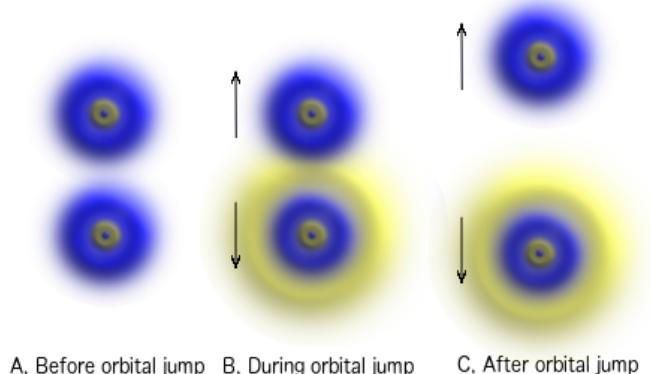


图4: 电子跃迁引发的跃迁冲击示意图

为了理解电子跃迁过程中体积变化的尺度，我们以构成空气78%的氮原子为例。氮原子共有7个电子，它们的基态轨道排布为 $1s^2 2s^2 2p^3$ ，其原子半径约为56皮米，主要由价电子轨道决定。激发后，氮原子的轨道排布变为 $1s^2 2s^2 2p^2 3s^1$ 或 $1s^2 2s^2 2p^2 3p^1$ ，半径约为120皮米。由此可见，氮原子激发后半径增长超过两倍，体积在数纳秒内膨胀超过700%。

当风叶上的分子原子发生电子激发，或空气分子在靠近风叶表面时被激发时，会产生一种剧烈的冲击力，将两者朝相反方向推开。这种冲击带来的动量远大于普通空气分子随机运动的碰撞作用<sup>[12]</sup>。因此，我们认为正是这种“跃迁冲击”现象构成了驱动辐射计旋转的主要机制。

跃迁冲击是一种普遍存在的现象。每当原子与其周围环境发生能量交换时，伴随电子轨道跃迁都会产生跃迁冲击。因此，跃迁冲击可能在许多物理过程中发挥着重要作用。例如，它可能是驱动布朗运动中颗粒随机运动的根本原因<sup>[12]</sup>。研究表明，水分子的热运动强度远远不足以推动花粉产生观察到的布朗运动。跃迁冲击还可能在物质的相变过程中起关键作用。随着温度升高，跃迁冲击可以突破分子间的束缚力，使分子分离，进而引发熔化或汽化等现象。相较于分子振动，跃迁冲击的强度更高，分子键往往在振动能量积累到足以断裂之前，就已被跃迁冲击所破坏<sup>[13]</sup>。

### 低温下的热平衡

通过分析本节及后续章节中的相互作用力，我们可以运用跃迁冲击理论来解释辐射计旋转现象，从简单情形逐步扩展到复杂情况。在先前的实验中，当手电筒照射在风叶的黑色面时，光子被迅速吸收，立即引发跃迁冲击，推动风叶开始旋转。相比之下，当光照射在白色面时，由于大部分光被反射，跃迁冲击的发生显著少于黑色面，因此未能产生明显的旋转效果。

以下是对辐射计中作用力的简要分析。只要物体的温度高于绝对零度，跃迁冲击就可能发生。这种冲击会分别作用于风叶的黑色面和白色面，产生对应的冲击力 $F_b$ （黑面）和 $F_w$ （白面）。此外，风叶在启动时还需克服一个阻力 $F_r$ ，在低速状态下主要表现为静摩擦力。为了使风叶开始旋转，两侧产生的净冲击力必须大于该阻力，即需满足以下条件：

$$(1) \quad |F_b - F_w| > F_r$$

当辐射计被放入冰箱冷却时，风叶两侧最初都会以高于从环境中吸收的速率向外辐射热量。由于黑色面在吸收和辐射方面更为高效，因此其能量损失更快，冷却速度也快于白色面。结果，黑色面温度迅速下降，其跃迁冲击强度随之减弱，从而使产生的冲击力 $F_b$ 小于白色面上的 $F_w$ 。

这种力的不平衡导致风叶发生反向旋转。随着两侧温度逐渐趋于一致，冲击力差减小，当其不足以克服静摩擦力（见不等式1）时，旋转便会停止。由于初始温差较小，加之原子电子跃迁具有瞬时性，系统能迅速趋于热平衡，因此这一过程通常只持续几秒钟。

在敏感辐射计实验中，当手电筒照射在白色面时，大部分光子被反射。其中的长波长成分（如红外光）难以穿透玻璃，因而在玻璃罩内发生反射。这些反射光最终被黑色面比白色面更有效地吸收，产生较大的跃迁冲击力 $F_b$ ，推动风叶向前旋转。随着白色面逐渐升温，两侧的温差减小，导致力差不足以维持旋转，辐射计很快停止运动。关闭光源后，辐射计开始冷却，过程类似于冰箱冷却实验中的反向旋转现象。

到目前为止，我们所探讨的情形主要涉及辐射计在低温环境下迅速达到新热平衡的过程。由于风叶两侧在加热或冷却时的速率不同，会在短时间内造成冲击力的不对称，从而推动风叶旋转。当系统逐渐在新环境中实现热平衡后，风叶也随之迅速停止旋转。

### 高温下的热平衡

接下来，我们将探讨在高温条件下（例如阳光照射时）达到热平衡后，辐射计仍能持续旋转的长期驱动力。在这种情况下，辐射计在热平衡状态下仍保持稳定的旋转速度。那么，为什么在高温平衡状态下旋转可以持续，而在低温平衡时旋转却无法维持？这个差异的根源又是什么？

回顾普朗克定律描述的黑体辐射特性<sup>[14-16]</sup>。通过对普朗克公式先在频率上积分，再在立体角上积分，可以得到黑体的辐射功率P与其绝对温度T的四次方成正比，这就是斯特藩-玻尔兹曼定律：

$$(2) \quad P = \rho T^4$$

在该公式中，P表示黑体单位面积表面的辐射功率， $\rho$ 是斯特藩-玻尔兹曼常数<sup>[17-18]</sup>。由于大多数实际系统并非理想黑体，其辐射功率 $P_e$ 可用以下公式估算：

$$(3) \quad P_e = \rho E T^4$$

其中，E表示非理想黑体的发射效率，通常 $E < 1$ 。设黑色面和白色面的发射效率分别为 $E_b$ 和 $E_w$ 。当辐射计达到热平衡状态（例如在阳光下放置足够长时间后），风叶两侧的吸收功率与辐射功率均与环境保持平衡。即黑色面上的辐射功率为 $\rho E_b T_b^4$ ，白色面上的辐射功率为 $\rho E_w T_w^4$ ，其中 $T_b$ 和 $T_w$ 分别为黑色面和白色面的温度。即使考虑风叶内部的热传导，黑色面的温度仍略高于白色面。跃迁冲击源于电子轨道的跃迁，其强度与能量吸收成正比。引入跃迁冲击系数r后，可分别估算风叶两侧受到的推动力为：

$$(4) \quad F_b = r \rho E_b T_b^4$$

和

$$(5) \quad F_w = r \rho E_w T_w^4$$

现在，不等式(1)可重新表述为：

$$(6) \quad r \rho |E_b T_b^4 - E_w T_w^4| > F_r$$

黑色面的吸收和发射效率高于白色面，即 $E_b > E_w$ 。在高温平衡状态下， $T_b > T_w$ 。因此，不等式(6)的左侧可简化为：

$$(7) \quad r \rho |E_b T_b^4 - E_w T_w^4| = r \rho (E_b T_b^4 - E_w T_w^4) > r \rho (E_b - E_w) T_b^4$$

当温度达到使如下不等式成立的条件时，不等式(6)和(1)也将同时成立，说明两侧之间的净作用力足以克服阻力。

$$(8) \quad r \rho (E_b - E_w) T_b^4 > F_r$$

这就解释了辐射计在阳光或其他强光源照射下能够持续旋转的原因。

辐射计转轴与风叶支架之间的静摩擦力是固定不变的。只要满足不等式(8)中的条件，风叶就会开始加速旋转。一旦风叶开始运动，空气阻力便随之增大，且其大小与转速的平方成正比。起初，转速较低时空气阻力较小，风叶得以加速旋转；但随着转速提升，阻力逐渐增大，最终达到平衡点：阻力完全抵消驱动力，风叶不再加速。此时，风叶进入稳态，保持恒定的旋转速度。

实际上, 不等式(6)也能更准确地解释低温平衡时的观测现象。随着环境温度降低, 黑色面辐射能量更高, 导致其冷却速度快于白色面, 致使 $T_b$ 低于 $T_w$ 。当温差显著时, 白色面受到的冲击力强于黑色面, 因此我们可以将不等式(6)更正为:

$$(9) \quad rp \left| E_b T_b^4 - E_w T_w^4 \right| = rp \left( E_w T_w^4 - E_b T_b^4 \right) > F_r$$

由于 $E_b > E_w$ , 为了使不等式(9)成立, 黑色面的温度必须明显低于白色面。该条件在冷却过程中通常无法长时间维持, 这也解释了冷却实验中观察到的短暂反向旋转现象。随着白色面温度在新环境中逐渐降低, 作用力差逐渐减小, 最终不等式(9)左侧的值不足以克服阻力 $F_r$ , 因此在低温下无法形成持久的驱动力。这同样解释了敏感辐射计实验中, 当手电筒照射在风叶白色面时所观察到的现象。

### 影响阻力的要素

在上文讨论中, 我们曾简要提到空气阻力, 它是辐射计达到稳态转动的一个影响因素。为简化分析, 当时将其与静摩擦力合并不等式(1)中的单一项 $F_r$ 。现在, 我们需要更详细地分析阻力的组成。不等式(1)中的阻力项 $F_r$ 由静摩擦力和空气阻力共同构成:

$$(10) \quad F_r = F_s + F_a$$

其中, 叶片与主轴之间的摩擦力 $F_s$ 是一种静摩擦力, 它起到“阈值”的作用: 驱动力必须超过这一阈值, 旋转才能发生。当叶片保持静止时, 并不是由于没有跃迁冲击, 而是因为这些冲击所产生的净驱动力不足以克服静摩擦力, 这种情况常见于低能光源条件下。

一旦叶片开始旋转, 空气阻力 $F_a$ 将随转速平方增加。最终, 当阻力与驱动力相平衡时, 系统不再加速, 转速稳定在某一最大稳态值。在低压环境中, 这一简化的阻力模型能够很好地解释叶片的运动。

然而, 当气压升高时, 阻力模型会变得显著复杂。要进行更全面的分析, 就必须考虑叶片每一侧上发生的五种相互作用, 如图5所示。

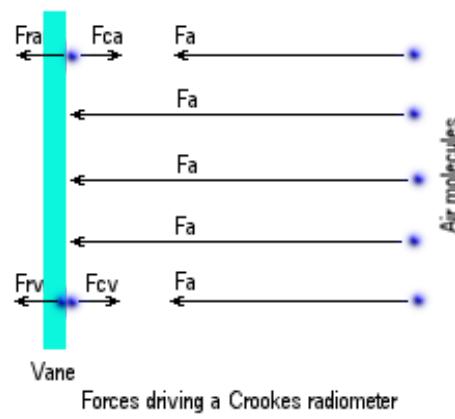


图5: 辐射计风叶两侧的各类相互作用示意图

在图中,  $F_a$ 表示空气分子撞击叶片所产生的作用力, 它直接构成空气阻力, 并随气压和叶片转速的增加而增强。 $F_{ra}$ 表示由邻近空气分子的跃迁冲击所产生的推力, 而 $F_{ca}$ 则是同一过程的反作用力, 它会将空气分子沿相反方向排出。这些被排出的分子可能与迎面而来的分子发生碰撞, 从而削弱部分空气压力 $F_a$ 。在低气压下, 由于空气密度较低, 这类碰撞可以忽略; 但在高气压下, 该效应变得显著, 必须予以考虑。

类似地,  $F_{rv}$ 和 $F_{cv}$ 来源于叶片表面分子与相邻空气分子之间的跃迁冲击, 其作用方式与 $F_{ra}$ 和 $F_{ca}$ 相似。因此, 在评估叶片两侧所受的总力时, 也必须将其纳入考量。其中,  $F_{ra}$ 与 $F_{rv}$ 都对驱动力有正向贡献, 是不等式(1)中 $F_b$ 与 $F_w$ 的关键组成部分。

叶片在高压下无法转动, 主要有两方面原因: 一是阻力增大, 二是净驱动力减弱。空气阻力项 $F_a$ 与气压密切相关。随着气压升高, 空气分子密度增加, 分子与叶片的碰撞更加频繁。由于 $F_a$ 直接受到气压影响, 总阻力 $F_r$ (10)随之增大, 从而提高了驱动力必须克服的阈值。这一机制解释了图2所示的结果: 转速随气压升高而逐渐降低。

其次, 在高气压下, 与 $F_{ca}$ 和 $F_{cv}$ 相关的反弹空气分子更容易与迎面而来的分子发生二次碰撞, 部分减小气压。这种相互作用在叶片两侧造成了压强不平衡, 从而削弱跃迁冲击所产生的有效驱动力。由此可见, 高气压既会降低净驱动力, 又会提高启动转动所需的阈值。这一双重效应正是叶片在高压条件下无法转动的根本原因。

### 预言最大初始加速度的根据

跃迁冲击理论与基于气压气流理论对转动初始加速度的预测截然不同, 且这一差异可通过实验轻易验证。跃迁冲击效应在光照瞬间即发生, 而空气压差的形成则需经历加热过程。因此, 跃迁冲击理论预言初始加速度在光照瞬间达到最大值, 而基于气压流理的理论则预测初始加速度为零, 随后逐渐增大。

即便跃迁冲击模型中的参数尚无精确测量, 依然可以做出定性预测以指导实验验证。例如, 图6展示了加热过程中各作用力的变化趋势及其相对大小。图中黑色曲线表示辐射计风叶黑色面在加热过程中的跃迁冲击力( $F_b$ )变化。由于黑色面吸收效率较高, 其温度在初期迅速上升, 达到与其自身辐射热平衡后, 增长曲线趋于平稳。光源关闭后, 黑色面迅速冷却, 跃迁冲击力随之下降。

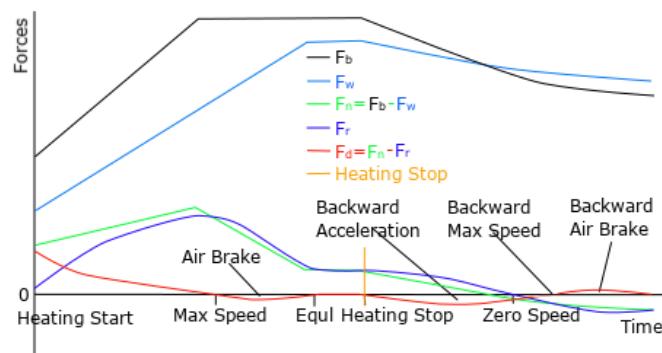


图6: 辐射计在加热过程中的驱动力变化曲线

白色一侧的温度在同一时间段内也发生升降变化，但变化速度较慢，并存在明显的延迟，如浅蓝色曲线( $F_w$ )所示。由此产生的两侧温差形成了净推动力，如绿色曲线( $F_n$ )所示，该推动力几乎瞬间促使风叶开始加速旋转。

风叶一旦开始旋转，空气阻力和静摩擦共同构成总阻力，如紫色曲线( $F_r$ )所示。随着转速的提升，空气阻力迅速增大，导致驱动力逐渐减弱。该现象表明，最大净驱动力和加速度会在光照刚开始时达到峰值，这一预测已由我们下一节的实验结果所证实。

在高速实验中，可能会出现制动效应。达到峰值速度后，因积累的高动量，阻力可能短暂超过驱动力，导致即使在加热阶段也出现减速现象。同样，在强烈加热后立即进行快速冷却时，也会观察到类似的制动效应。这些现象在我们的实验中均有明显体现。

由跃迁冲击产生的驱动力几乎在光照开始的瞬间产生作出，而阻力由于空气压力和气流反应较慢，常常滞后于驱动力。这种响应时差可能导致阻力短暂超过驱动力，从而产生制动效应。因此，此类制动现象通常仅在高能量且变化迅速的实验中才会显著出现。

为了便于比较理论预测与实验结果，图7中用红色和蓝色曲线分别表示跃迁冲击理论和空气动力学理论所预测的净驱动力。蓝色曲线表明，如果叶片的运动由空气压力或气流驱动，初始加速度将从零开始，随着空气温度升高逐渐增加。相比之下，红色曲线(即图6中显示的净驱动力)展示了跃迁冲击理论的预测：初始加速度在光照开始时即达到最大值。

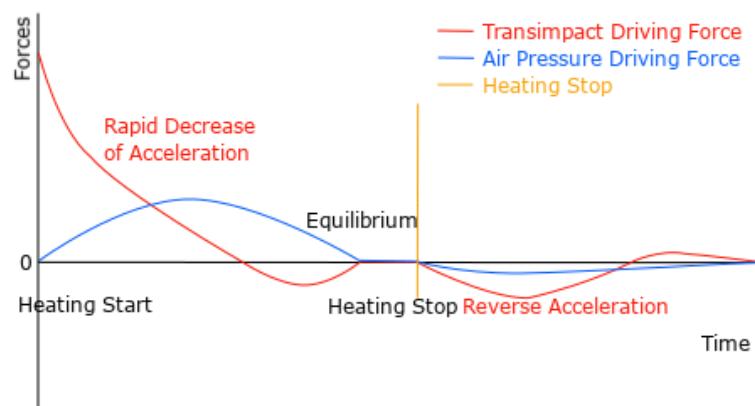


图7:跃迁冲击驱动力与基于空气驱动力的比较

尽管这些预测属于定性分析，但它们揭示了各理论独特的运动特征，这些特征在实验中应能清晰呈现。跃迁冲击理论所预测的速度曲线中，特别是明显的初始峰值加速度，已被后续实验所证实，有力支持了该理论。

### 快速加热验证

不同理论所预测的独特特征，可以通过测量辐射计在快速加热过程中的速度变化在实验中观察到。图8展示了使用强力手电筒进行的相关实验。通过分析加热过程中叶片的旋转速度及其变化情况，我们能够深入理解驱动辐射计运动的作用力，从而区分不同理论的正确性。



图8:利用12万流明手电筒进行的辐射计快速加热实验。相关实验视频可在YouTube上观看,标题分别为《[The Process Driving Crookes Radiometers](#)》和《[The Force Driving Crookes Radiometers](#)》。

以下是实验观察结果:开启光源后,辐射计立即开始旋转。初始转速迅速上升,在30秒内从0加速至峰值25转/秒。随后,转速逐渐下降,并在110秒时稳定在约3转/秒,达到平衡稳态。120秒关闭光源后,转速迅速减缓,并在8秒内完全停止。128秒内的转速变化汇总于表1,表中每个加速度值为相邻两个转速采样点之间的平均加速度。

Time (s)	0	2	5	17	30	43	64	78	100	110	120	128
Speed (Hz, rev/s)	0	7.5	15	22.5	25	22.5	15	7.5	3.75	3	3	0
Acceleration (Hz/s)		3.75	2.5	0.625	0.192	-0.192	-0.357	-0.536	-0.17	-0.075	0	-0.375

表1:手电筒实验中辐射计转速与加速度的变化

表1中的实验数据绘制在图9中。通过分析加速度(与驱动力成正比),我们可以更清晰地理解驱动辐射计转动的力。图9中红色曲线表示实际测得的加速度,与图6和图7中跃迁冲击理论预言的驱动力红色曲线高度一致。这一观察结果与理论预测的良好吻合,为跃迁冲击理论提供了有力支持。

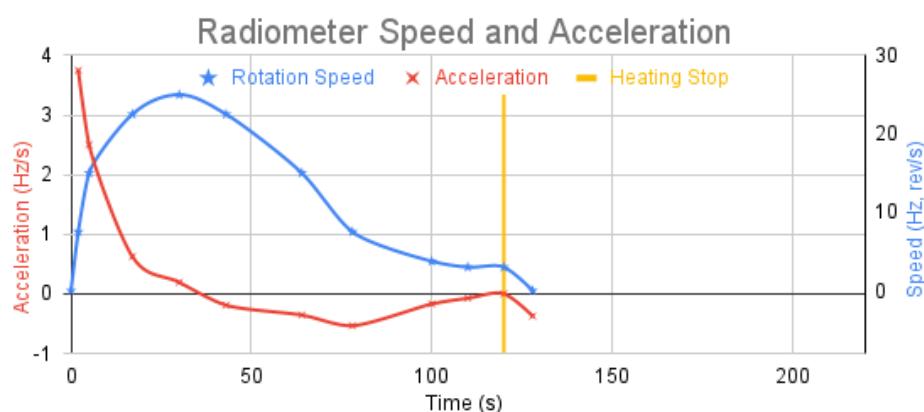


图9:手电筒实验中辐射计转速与加速度的变化曲线

观察到的速度变化特征反映了跃迁冲击强度及力相互作用在整个过程中相应的变化特征：

1. 初始加速度从最大值开始，表明黑色叶片一侧的跃迁冲击强烈。随后的加速度下降，显示空气阻力快速增加，这样试验结果与如图6所示跃迁冲击理论的预测一致。
2. 大约在30秒时，转速达到峰值，加速度降至零。这与图6中预言的推动力（绿线）与阻力（紫线）首次相交吻合。这是因为黑色一侧达到热平衡后，白色一侧的跃迁冲击增长较为缓慢。
3. 随后，加速度变为负值并持续减小，因高转动惯量导致阻力超过总推动力，从而产生空气制动效应。
4. 结果，转动逐渐减缓，最终在约110秒时趋于稳定，表明阻力最终与减弱的推动力相匹配并同步，通常发生在叶片两侧达到平衡时。
5. 光源在120秒关闭后，转动迅速减速并完全停止。这一快速减速主要源于光源关闭后黑色一侧跃迁冲击的迅速下降。下面的实验将对此过程作进一步详细说明。

### 快速冷却验证

此外，如图7所示，停热后的制动效应在跃迁冲击理论与基于空气的理论之间的差异更为显著。跃迁冲击理论指出，在快速加热停止后的快速冷却阶段，风叶可能会出现短暂的反向加速，甚至表现为短时间的反向旋转，随后才最终停止。

相比之下，基于气压气流的理论无法预测在冷却阶段会出现反向旋转。在冷却过程中，辐射计主要通过红外辐射释放内部能量，而非吸收能量。由于空气分子（约0.3纳米）远小于红外光的波长（通常大于750纳米），它们与红外辐射几乎没有有效的相互作用。因此，风叶的热辐射对内部空气影响甚微，不足以引发足够的热交换，从而产生克服主轴摩擦所需的压力差或气流。

在上述的手电筒实验中，关闭光源后的最后8秒内辐射计出现了明显的减速。但由于加热时间较长，风叶两侧的温差有限，因此未观察到反向旋转现象。为探究该现象，应进行短时而快速加热实验，以极短时间内在风叶两侧产生显著的温差。为验证这一预测，实验中将辐射计置于微波炉中加热6秒后切断电源，如图10所示。

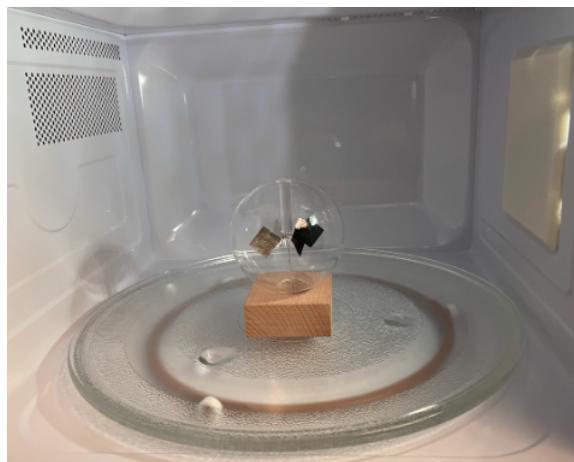


图10：辐射计经微波加热后的快速冷却实验

这个实验结果的转度变化如表2所示。尽管实验数据采样的分辨率有限，仍清晰地观察到反向加速度和快速的反向旋转，这跃迁冲击理论所预测的“空气制动”与“反向加速”阶段高度一致（见图6和图7）。相较之下，气压气流理论不仅不能预见反向旋转现象，更无法解释其所达到的方向高速特征。上述结果进一步验证了跃迁冲击机制作为辐射计旋转驱动原理的合理性。

时间(秒)	0	6	15	21	71
速度(转/秒)	0	10	0	-7	0
加速度(转/秒 <sup>2</sup> )		1.67	-1.11	-1.17	0.14

表2:微波实验中辐射计的转速与加速数据

由于加热时微波炉门必须关闭,无法直接观测微波炉内的速度变化。但在切断电源后,观察到了反向加速和反向旋转现象,验证了我们的预测。实验的主要观察结果如下:

1. 经过微波快速加热6秒后,切断电源,随即打开微波炉,此时辐射计转速约为10转/秒。
2. 随后,辐射计迅速减速,其旋转速度在接下来的第9秒内降至零。
3. 此后,辐射计开始反转,反向转速在接下来的6秒内加速至约7转/秒的峰值。
4. 随后逐渐减缓,最终,辐射计在接下来的50秒内完全停止转动。

微波实验存在一定安全风险:辐射计中连接风叶的金属部件在第二次加热试验时烧毁。鉴于此,我们不建议重复该实验。幸好,有一段YouTube视频记录下类似的微波加热过程可供参考<sup>[19]</sup>。

### 相关研究的进一步支持

水平风叶辐射计的实验观察进一步支持跃迁冲击理论。每个风叶两面采用对称的双色设计,一半涂黑,另一半涂白。辐射计置于高反射表面,确保其上下水平面均受光照。实验中,辐射计以白色(冷色)边缘引领旋转方向<sup>[20]</sup>。

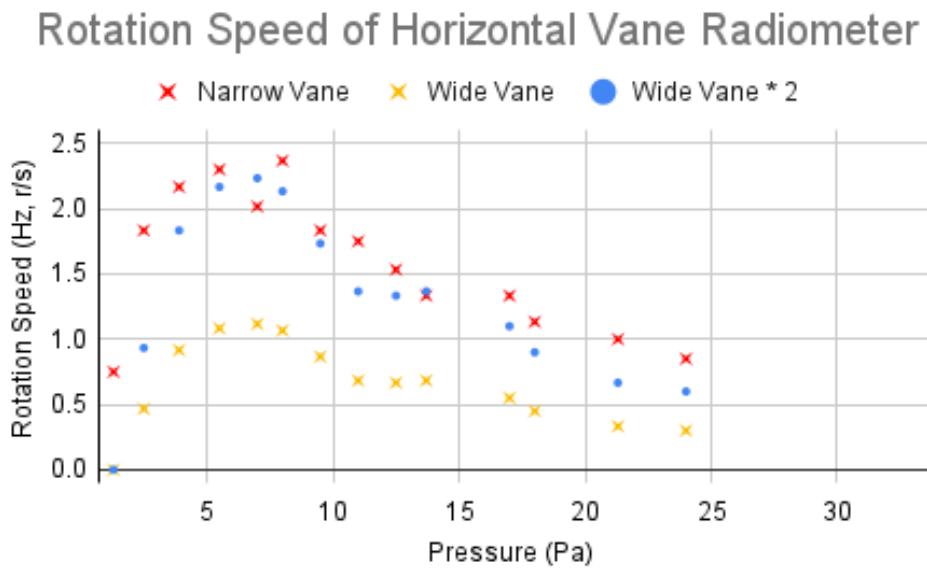


图11:水平风叶辐射计转速对比。蓝色点表示宽风叶辐射计转速的两倍。水平风叶辐射计的转速数据摘自Wolfe、Larrazá和García的研究成果<sup>[20]</sup>。

从拓扑角度来看,水平排列的风叶可通过在垂直方向压缩并在水平方向拉伸传统风叶获得。因此,驱动水平风叶辐射计旋转的基本机制与垂直风叶相同。然而,由于跃迁冲击发生在风叶的黑白边缘之间,驱动力显著减弱。因此,水平风叶的旋转速

度明显较低—这一结果不仅符合跃迁冲击理论的预测，也从图11中的实验数据得到验证，并与图2中垂传统直风叶的结果形成对照。

他们的实验测试了两种水平风叶辐射计：一款配备窄叶( $8 \times 16 \text{ mm}$ )，另一款配备宽叶( $16 \times 16 \text{ mm}$ )。根据跃迁冲击理论，因为受力面只有风叶的边缘，两款辐射计的驱动力是等同的。由于宽叶的摩擦力和转动惯量约为窄叶的两倍，可以预测窄叶辐射计的旋转速度应约为宽叶的两倍。图11中的实验结果验证了这一预测，进一步支持了跃迁冲击理论的有效性。

具有凸面与凹面的单色叶片，其旋转行为同样可以通过跃迁冲击理论加以解释。与依赖颜色对比的传统机制不同，一种表面均匀涂覆金纳米晶体（以其强光吸收能力著称）的辐射计表现出凹面领先的旋转<sup>[8]</sup>。这一旋转方向与空气动力学相悖。根据跃迁冲击理论，在光照下，由于几何结构所致，凸面收到的入射光子数量更多，因而产生更高频率的跃迁冲击，相较之下，凹面受到的冲击较少。这种冲击强度的不对称性推动了观测到的旋转方向。

根据跃迁冲击理论，风叶的驱动力来源于电子跃迁所产生的冲击，因此高频光（能量更高）应比低频光更有效地驱动辐射计旋转。该预测在Robert Distinti的[YouTube视频](#)中得到验证<sup>[21]</sup>。在其实验中，虽然绿色滤光片的透光量高于蓝色滤光片，但辐射计仅在蓝光照射下发生旋转，而在绿光照射下未出现旋转现象。

## 讨论

跃迁冲击是一种普遍现象，因为电子轨道跃迁在任何高于绝对零度的物质中都普遍存在。这类冲击可能在多种物理过程中发挥关键作用，例如布朗运动<sup>[12]</sup>、相变<sup>[13]</sup>、以及系统中不同形式能量的交换<sup>[22-23]</sup>。

在极能光子照射下，风叶上的电子可能被激发逃逸。在这种条件下，可能出现新的物理现象。例如，当电子从风叶逸出后，其残留部分将带正电，从而吸引这些自由电子。这引发一个问题：这些电子会转移至下一个风叶的白色一侧，还是会返回原来的风叶？为排除跃迁冲击的干扰，实验必须在高真空条件下进行。

深入研究跃迁冲击的平均动量将具有重要意义。由于风叶的角动量相对容易测量，估算辐射计所受的转动力矩是可行的，从而可进一步推算出在特定条件下的平均跃迁冲击动量。结合空气分子的密度与平均质量，还可估算参与传递冲击的分子平均速度。这类研究有望为布朗运动等现象提供新的观察数据。

这项研究不仅可能拓展对跃迁冲击机制的理解，也有望揭示基本物理过程中的复杂机制，进而推动对热力学基础原理的深入认识，拓展科学探索的边界。

## 结论

本文通过精心设计的实验，提供了有力的证据，支持跃迁冲击理论作为辐射计旋转机制的合理解释。跃迁冲击的理论框架，能够有效解释辐射计的各类观测现象，从而加深了我们对其运行原理及相关物理过程的理解。电子跃迁是微观层面上广泛存在的基本过程。与之相伴的跃迁冲击现象，可能在诸如布朗运动、相变行为、以及微观能量交换等众多物理机制中发挥重要作用。其潜在的广泛影响表明，跃迁冲击在揭示和理解基本物理过程方面具有重要的研究价值和理论意义。

## 版本更新

- 06/20/2019: 本文初始发布
- 06/03/2021: 语法检查更新
- 01/08/2023: 跃迁冲击理论更新
- 06/12/2023: 跃迁冲击理论的预测与验证
- 11/01/2025: 在Zenodo上发表
- 12/18/2025: 增加相关文章摘要连接

### 相关文章摘要链接

- <https://cs.stanford.edu/people/zjl/abstractc.html>, [PDF](#)
- <https://sites.google.com/view/zjlc/>, [PDF](#)
- <https://xenon.stanford.edu/~zjl/abstractc.html>, [PDF](#)
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.17972005>, [PDF](#)

### 相关文献

- 热力学中的错误概念 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 克鲁克斯辐射计旋转的驱动机制 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 布朗运动的原动力 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 温度是分子平均动能的标志吗? ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 绝对零度的本质 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 能量转换三角 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 热膨胀是由于粒子振动引起的吗? ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 超流体不是流体 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 为什么相变温度保持恒定 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 摩擦为何会产生热量? ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 简明熵概念 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 熵可以减少 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 回归原理 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 金属中是否存在自由电子海? ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 电子通道: 导体超导统一论 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 低温和高温超导统一理论 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- LK-99的局限和意义 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 地球磁场超导起源说 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 关于质量的本质问题 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 从万有引力定律到广义相对论的演化 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 爱因斯坦质能方程的最简单推导 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 如何理解相对论 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 数学并非科学 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))
- 潮汐能并非可再生能源 ([PDF](#): [DOI](#)) ([中文](#): [DOI](#))

- [AI 知识污染 \(PDF\) \(中文\)](#)
- [DeepSeek pk ChatGPT \(PDF\) \(中文\)](#)

## 参考文献

1. Crookes, W. (1874). “[On Attraction and Repulsion Resulting from Radiation](#)”. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. **164**: 501–527. doi:[10.1098/rstl.1874.0015](https://doi.org/10.1098/rstl.1874.0015).
2. Worrall, J. (1982). “The pressure of light: The strange case of the vacillating 'crucial experiment'”. *Studies in History and Philosophy of Science*, **13** (2): 133–171, doi:[10.1016/0039-3681\(82\)90023-1](https://doi.org/10.1016/0039-3681(82)90023-1).
3. Maxwell, J.C. (1879). “[On stresses in rarefied gases arising from inequalities of temperature](#)”. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. **170**: 231–256. doi:[10.1098/rstl.1879.0067](https://doi.org/10.1098/rstl.1879.0067).
4. Han, L.H.; et al. (2011). “Light-Powered Micromotor: Design, Fabrication, and Mathematical Modeling”. *Journal of Microelectromechanical Systems*. **20** (2): 487–496. doi:[10.1109/JMEMS.2011.2105249](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2011.2105249).
5. Yarris, L. (2010). “[Nano-sized light mill drives micro-sized disk](#)”. *Physorg*. Retrieved 6.
6. Gibbs, P. (1996). “[How does a light-mill work?](#)”. *Usenet Physics FAQ*. Retrieved 8 August 2014.
7. Brush, S.G.; Everitt, C.W.F. (1969). “[Maxwell, Osborne Reynolds, and the Radiometer](#)”. *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 1, 1969, pp. 105–125.
8. Han, L.H.; et al. (2010). “[Light-Powered Micromotor Driven by Geometry-Assisted, Asymmetric Photon-heating and Subsequent Gas Convection](#)”. *Applied Physics Letters*. **96** (21): 213509(1–3). doi:[10.1063/1.3431741](https://doi.org/10.1063/1.3431741).
9. Reynolds, O. (1879). “On certain dimensional properties of matter in the gaseous state”. *Royal Society Phil. Trans.*, Part 2.
10. Vijay, R.; et al. (2011). “Observation of Quantum Jumps in a Superconducting Artificial Atom”. *Physical Review Letters*. **106** (11): 110502. arXiv:[1009.2969](https://arxiv.org/abs/1009.2969). doi:[10.1103/PhysRevLett.106.110502](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.110502). PMID [21469850](#).
11. Itano, W.M.; et al. (2015). “[Early observations of macroscopic quantum jumps in single atoms](#)”. *International Journal of Mass Spectrometry*. **377**: 403. doi:[10.1016/j.ijms.2014.07.005](https://doi.org/10.1016/j.ijms.2014.07.005).
12. Liu, J.Z. (2019). “[The Cause of Brownian Motion](#)”. *Stanford University*. Archived ([PDF](#)). doi:[10.5281/zenodo.17503671](https://doi.org/10.5281/zenodo.17503671).
13. Liu, J.Z. (2023). “[Why Phase Transition Temperature Remains Constant](#)”. *Stanford University*. Archived ([PDF](#)). doi:[10.5281/zenodo.17504663](https://doi.org/10.5281/zenodo.17504663).
14. Planck, M. (1914). “The Theory of Heat Radiation”. *Masius, M. (transl.)* (2nd ed.). P. Blakiston's Son & Co. [OL 7154661M](#).
15. Planck, M. (1915). “Eight Lectures on Theoretical Physics”. *Wills, A. P. (transl.)*. *Dover Publications*.
16. Draper, J.W. (1847). “On the production of light by heat”. *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, series 3, **30**: 345–360.
17. Narimanov, E.E.; Smolyaninov, I.I. (2012). “Beyond Stefan–Boltzmann Law: Thermal Hyper-Conductivity”. *Conference on Lasers and Electro-Optics 2012*. OSA Technical Digest. Optical Society of America. pp. QM2E.1. doi:[10.1364/QELS.2012.QM2E.1](https://doi.org/10.1364/QELS.2012.QM2E.1).
18. Knizhnik, K. (2016). “[Derivation of the Stefan–Boltzmann Law](#)”. *Johns Hopkins University – Department of Physics & Astronomy*.
19. Jaynes, R. (2019). “[Radiometer in the Microwave](#)”. *YouTube channel* [@jaynesnetwork](#), <https://www.youtube.com/watch?v=OGX0-C1FXYA>.

20. Wolfe, D.; et al. (2016). “A Horizontal Vane Radiometer: Experiment, Theory, and Simulation”. *Physics of Fluids*. **28** (3): 037103. arVix:[1512.02590](https://arxiv.org/abs/1512.02590). Bibcode:[2016PhFl...28c7103W](https://doi.org/10.1063/1.4943543). doi:[10.1063/1.4943543](https://doi.org/10.1063/1.4943543). S2CID [119235032](https://arxiv.org/abs/1512.02590).
21. Distinti, R. (2019). “T10B: Crook's Radiometer Part 2”. YouTube channel [@rdistinti](https://www.youtube.com/watch?v=-iCf6K91_No), [https://www.youtube.com/watch?v=-iCf6K91\\_No](https://www.youtube.com/watch?v=-iCf6K91_No).
22. Liu, J.Z. (2023). “The Nature of Absolute Zero Temperature”. Stanford University. Archived ([PDF](#)). doi:[10.5281/zenodo.17504015](https://doi.org/10.5281/zenodo.17504015).
23. Liu, J.Z. (2023). “Can Temperature Represent Average Kinetic Energy?”. Stanford University. Archived ([PDF](#)). doi:[10.5281/zenodo.17503871](https://doi.org/10.5281/zenodo.17503871).