

# 神秘的麦克斯韦妖

报告人：吴嘉杰 大湾区大学  
2026. 4. 10

热力学第二定律的两大经典表述：

**克劳修斯表述：**热量不能自发地从低温物体传递到高温物体，而不产生其他任何影响。

**开尔文表述：**不可能从单一热源吸热，使之完全变为有用功，而不产生其他任何影响（否定了第二类永动机的存在）。

## 提出背景：

### 一、提出者与时间

1867 年，英国物理学家**詹姆斯·克拉克·麦克斯韦**在给好友泰特的私人信件中首次提出该假想模型；1871 年，在著作《热理论》中正式公开发表。

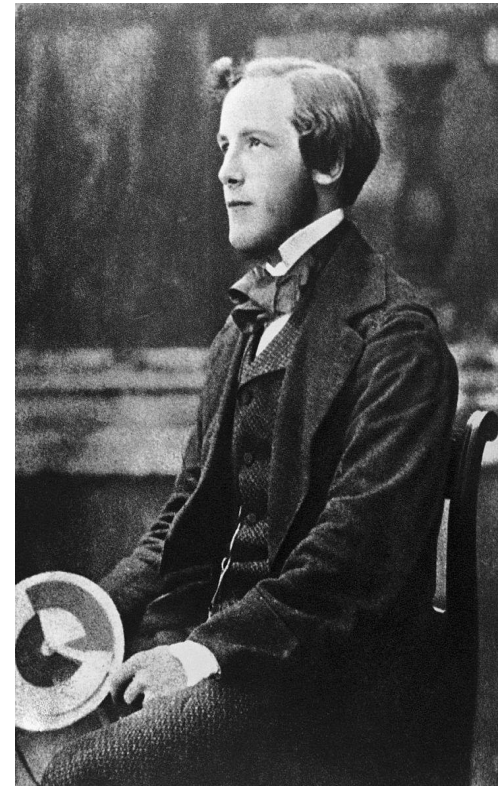
### 二、提出的核心初衷：为了揭示热力学第二定律的**统计本质**：

热力学第二定律描述的是大量分子的平均行为，对单个分子不具有约束力；

若存在能操控单个分子的智能体，看似能突破第二定律的统计约束，以此凸显第二定律的适用边界。

### 三、命名由来

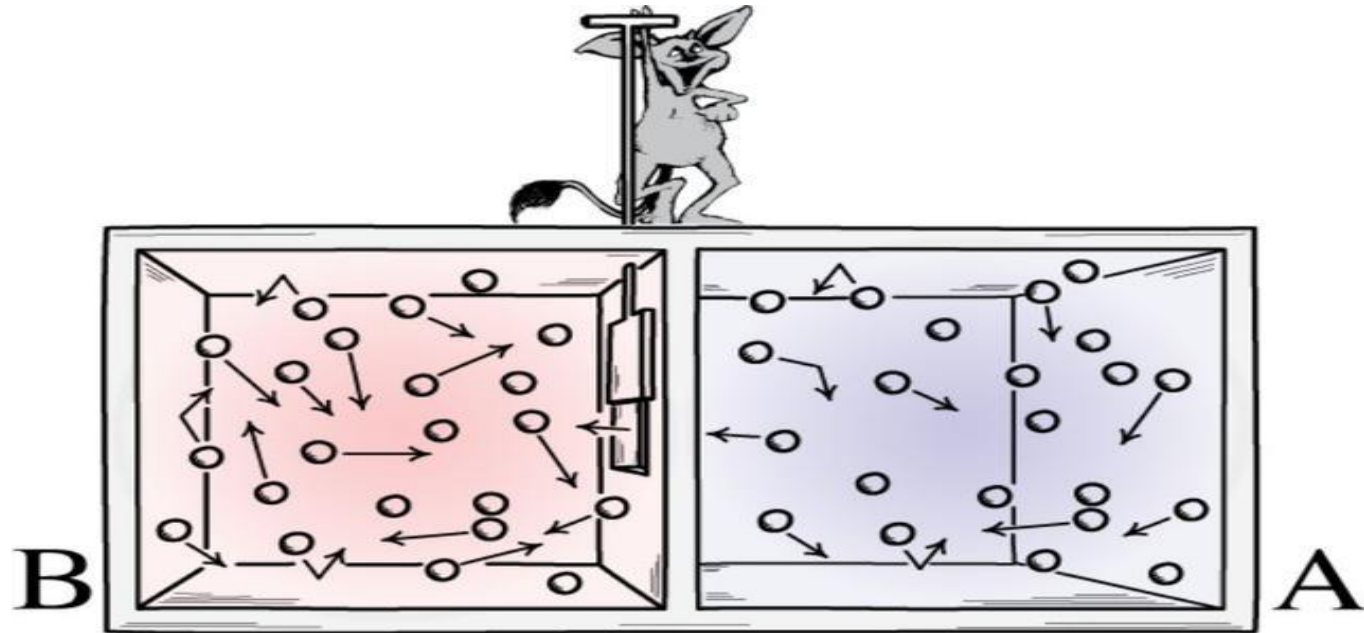
1874 年，开尔文勋爵首次将这个能操控单个分子的智能体命名为“**妖 (Demon)**”，该名称沿用至今。



# 麦克斯韦妖的核心设定（理想实验）：

一个与外界完全隔绝的**绝热密闭容器**，内部充满处于热力学平衡态的理想气体，初始时温度、压强处处均匀，系统熵值最大。容器被无热传导、无能量耗散的刚性隔板分为 A、B 两个腔室，隔板上有一个可**无摩擦、零能耗开关**的微型阀门，仅允许单个气体分子通过。阀门由麦克斯韦妖完全操控，它具备完美的微观感知能力，能精准识别每一个接近阀门的分子的位置、运动速度与动能，且能瞬时完成阀门开关，全程不干扰其他分子运动。

麦克斯韦妖把动能高于平均的放入B腔室，把动能低于平均的放入A腔室。



这样就会产生悖论结果：

1. B 腔室聚集高动能分子，温度持续升高；A 腔室聚集低动能分子，温度持续降低，系统自发形成稳定温差。
2. 实现了热量从低温区（A）到高温区（B）的自发传递，且全程无外界对系统做功，系统总熵自发下降。
3. 直接看似违反了热力学第二定律的克劳修斯表述与熵增原理，被视作“第二类永动机”的理想原型。



- 我们将从三个层层递进的维度，完整论证麦克斯韦妖在物理上的不可实现性，其中**信息热力学论证是终极破解方案**。
- 1. 经典热力学的固有物理限制
- 2. 信息热力学的终极闭环论证（西拉德 - 兰道尔 - 贝内特框架）
- 3. 量子力学的根本约束



# 维度一：经典热力学的固有物理限制

## •操作的能量耗散不可避免

理想设定中的“无摩擦、零能耗阀门”在现实中完全不存在。任何实体阀门的开关都需要加速、减速，必然伴随机械能耗散；即使是光阀、磁阀，开关过程也需要电磁场能量输入，必然产生热耗散和熵增。

## •妖自身的热运动干扰

麦克斯韦妖作为物理实体，必然与气体系统处于相同温度环境，其自身的分子、测量装置都会产生无规则热运动。常温下，热涨落会完全淹没单个分子的测量信号，妖无法精准区分分子速度与位置。

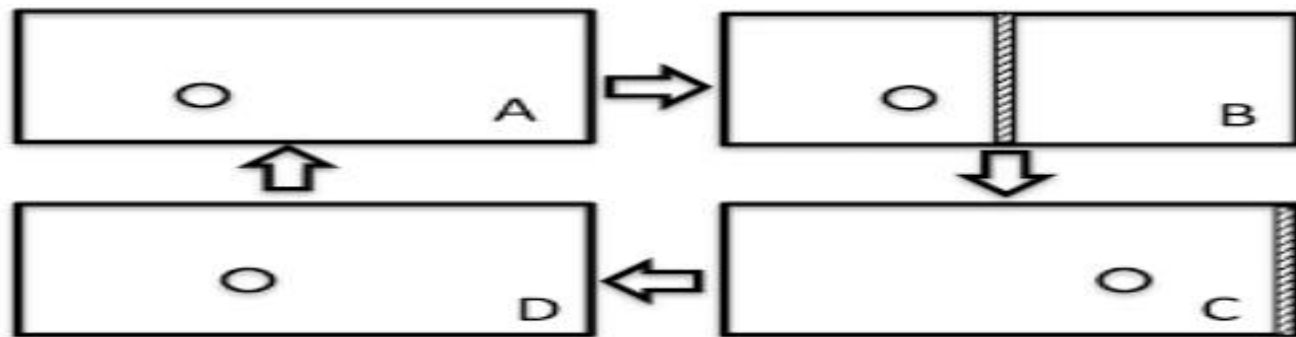
## •微观尺度的操作极限

常温下气体分子平均运动速度达数百米每秒，碰撞频率高达每秒数十亿次，分子尺寸仅为纳米级。要在纳秒级时间内完成单分子识别与阀门开关，且不干扰其他分子，在经典物理中完全不具备可实现性。

# 维度二：信息热力学的终极破解（西拉德的贡献）

1929年，匈牙利物理学家利奥·西拉德首次将“信息”纳入热力学框架，打破了百年争议的僵局。

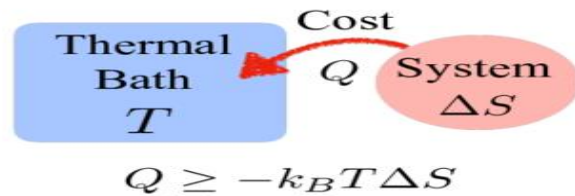
1. 拆解麦克斯韦妖的核心操作：测量分子信息 → 基于信息开关阀门
2. 提出简化模型“西拉德发动机”，通过定量计算证明：妖要实现分子筛选，必须先获取分子的位置、速度信息，而任何信息测量过程，都必然伴随能量耗散与熵增。
3. 定量结论：获取 1 比特的二元信息如“快 / 慢分子”“左 / 右位置”，至少会产生  $KT \ln 2$  的熵增  
(K为玻尔兹曼常数, T为系统热力学温度)
4. 核心结论：测量产生的熵增，恰好抵消了筛选分子带来的系统熵减，整个孤立系统的总熵不会减少。



# 维度二：信息热力学的终极破解（兰道尔原理）

- 1961 年，IBM 物理学家罗尔夫·兰道尔提出兰道尔原理，为悖论破解提供了最关键的底层定律，修正了西拉德的理论局限。
- 兰道尔原理核心表述
- 任何对1比特信息的不可逆擦除操作，必然会向环境释放至少  $KT\ln 2$  的热量，对应产生不小于  $KT\ln 2$  的热力学熵增

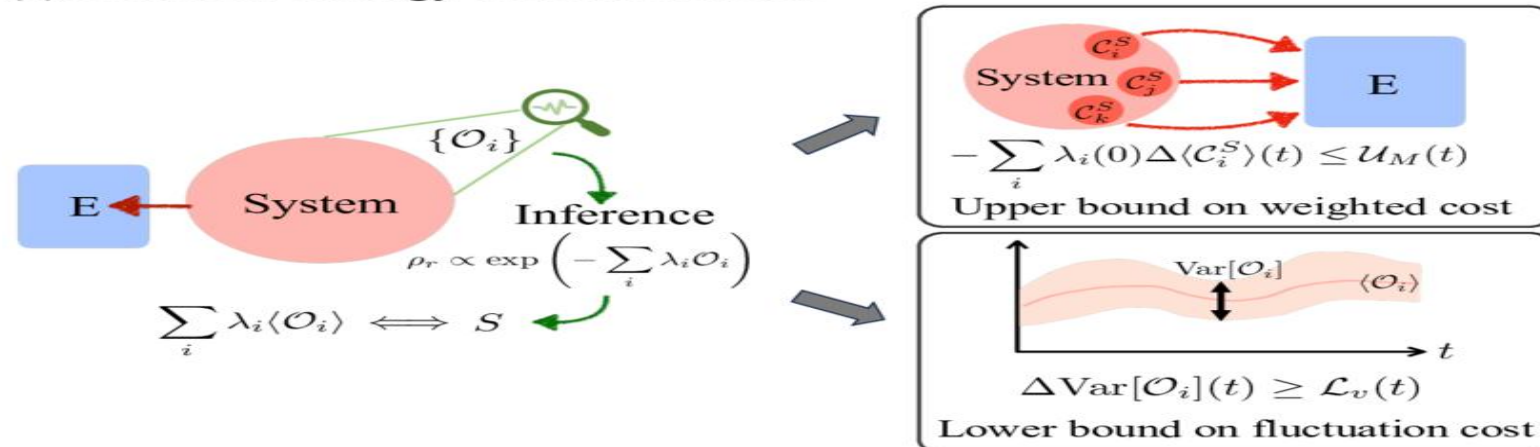
(a) Landauer's principle



(b) Scenarios beyond Landauer



(c) Inference strategy and main results



- **总结：**
- 西拉德认为 “测量是熵增来源”，但后续研究证明：理论上存在完全可逆的测量过程，测量本身可以不产生熵增。
- 兰道尔原理精准锁定了**真正不可避免的熵增源头：不可逆的信息擦除。**
- 通俗理解：电脑删除文件、清空回收站的操作，本质上是信息的不可逆擦除，哪怕是理想的零损耗芯片，这个过程也存在最低的能量耗散与熵增下限。

# 闭环：贝内特的终极论证

1982年，IBM物理学家查尔斯·贝内特基于兰道尔原理，彻底完成了麦克斯韦妖悖论的完整破解，终结了百年争议。

## 一、麦克斯韦妖的完整工作循环

测量分子信息 → 存储信息到内存 → 基于信息开关阀门 → 擦除内存信息，准备下一次测量

## 二、核心逻辑闭环

**1. 测量与阀门操作可实现可逆：**理论上，对分子的测量、阀门的开关，都可以设计为完全可逆的物理过程，全程不产生任何熵增，完美契合麦克斯韦“无摩擦、零能耗”的理想设定。

**2. 信息擦除的不可避免性：**麦克斯韦妖的信息存储能力（内存）必然是有限的，无论内存多大，持续测量最终会占满全部内存。要持续完成分子筛选，妖**必须擦除之前存储的测量信息**，否则工作流程会彻底中断。

**3. 总熵必然增加：**根据兰道尔原理，每擦除 1 比特信息，必然产生至少  $kT \ln 2$  的熵增，而这一熵增**严格大于等于**筛选分子带来的腔室系统熵减。

# 维度三：量子力学的根本约束

即使将麦克斯韦妖拓展到量子体系，利用量子效应操控，也无法突破物理定律的约束：

## 1. 海森堡不确定性原理的绝对限制

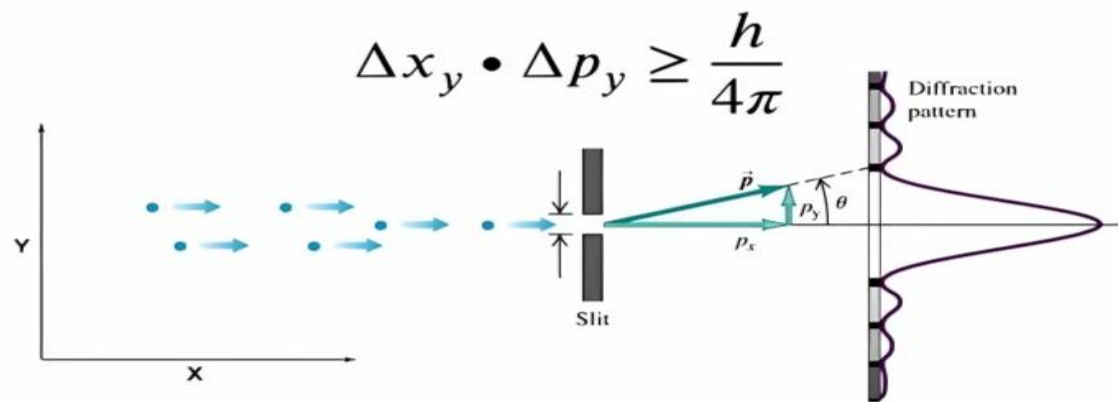
麦克斯韦妖需要同时精准测量分子的位置（判断是否到达阀门）和动量（判断速度快慢），而不确定性原理明确指出：**微观粒子的位置与动量无法同时被精准测量**，测量一个物理量的精度越高，另一个的测量误差就越大。这意味着妖无法获取筛选分子所需的完美信息，精准筛选从根本上无法实现。

## 2. 量子测量的不可逆扰动

量子力学中，任何测量过程都会对量子系统产生不可逆的扰动，改变粒子的运动状态。妖对分子的测量，必然会改变分子的速度和轨迹，导致测量结果与实际状态不符，且测量的不可逆性必然伴随熵增。

## 3. 量子兰道尔原理的约束

即使是量子比特的信息存储与擦除，依然遵循量子版本的兰道尔原理，不可逆的量子信息擦除，仍会产生不低于 $kT \ln 2$ 的最低熵增，总熵依然满足熵增原理。



# 百年遗产：麦克斯韦妖的科学价值与延伸应用

- 一、核心理论贡献
- 催生了**信息热力学**这一全新学科，彻底揭示了“信息是物理的”这一核心本质：信息不是抽象的概念，它的存储、处理、擦除都必然伴随物理过程与能量耗散，无法脱离热力学定律的约束。
- 完善了热力学第二定律的适用边界，再次验证了其普适性，深化了人类对熵、能量、信息三者关系的理解。

- 二、实际应用延伸
- **计算科学的极限定义**：兰道尔原理为芯片计算的能耗下限提供了理论依据，揭示了摩尔定律的物理极限，推动了低功耗计算、可逆计算的研究。
- **量子信息与量子计算**：量子版本的麦克斯韦妖与兰道尔原理，为量子计算的纠错、能耗控制提供了理论支撑。
- **生物物理**：解释了生物体内的“分子马达”“离子通道”的工作机制，比如细胞通过消耗 ATP（能量）获取信息、实现分子筛选，本质上是“付出熵增代价实现局部熵减”，和麦克斯韦妖的逻辑一致，但完全符合热力学定律。

感谢聆听！  
敬请各位老师、同学批评指正