

去年诺奖给了AI，结果AI爆火。今年的诺奖颁给到超导量子，可能之后也会爆火。咱实验室方向和这个相关度较高，感觉之后对找工作应该大有好处。既然诺奖和我们的研究方向有一定相关性，所以我们可以深入了解。我把细节整理了下。

获奖者及获奖理由

2025年10月7日，瑞典皇家科学院宣布，将2025年诺贝尔物理学奖授予约翰·克拉克（John Clarke）、米歇尔·H·德沃雷（Michel H. Devoret）和约翰·M·马蒂尼斯（John M. Martinis）三位科学家，以表彰他们在电路中实现宏观量子力学隧穿效应和能量量子化方面的贡献。



这三个人都是美国加利福尼亚大学的教授，第一个是老师，后面两个是学生，三人平分了1100万瑞典克朗（约合836万元人民币）奖金，平均1个人奖了278万人民币。

他们通过一系列实验证明，量子世界的奇特特性可以在宏观尺度的系统中具体展现。他们设计的超导电路系统能从一种状态隧穿到另一种状态，仿佛直接穿过一堵墙。还证实该系统会以特定大小的能量吸收和释放能量，与量子力学的预测完全一致。

他手上拿着的，就是能够宏观观测到量子效应的量子芯片，也就是他们做的两种约瑟夫森隧道结的样品，后面文献里边会讲到。



《Quantum Mechanics of a Macroscopic Variable: The Phase Difference of a Josephson Junction》

文献：Quantum Mechanics of a Macroscopic Variable: The Phase Difference of a Josephson Junction，这是三位获奖者在 1980 年代共同完成的关于宏观量子隧穿效应和能量量子化的开创性实验论文，发表在SCIENCE上，影响因子49.7，国际顶刊。

我有参考文献的pdf，需要的可以向我要或者网上搜。

现在根据这篇参考文献简单讲解一下他们做了什么，才能能获得诺奖。

这篇文章核心是解决一个反常识的科学问题：平时只在原子、电子身上出现的量子特性，能不能在看得见、摸得着的宏观物体上出现？

一、研究核心

1. 约瑟夫森隧道结

它是两块超导金属（比如铌、铅铟合金），中间夹一层极薄的绝缘膜的结构。

关键特性：它里面的电流是两个电子成对运动形成的，叫库珀对，而整个元件的状态，能用一个叫相位差 (δ) 的量来描述。

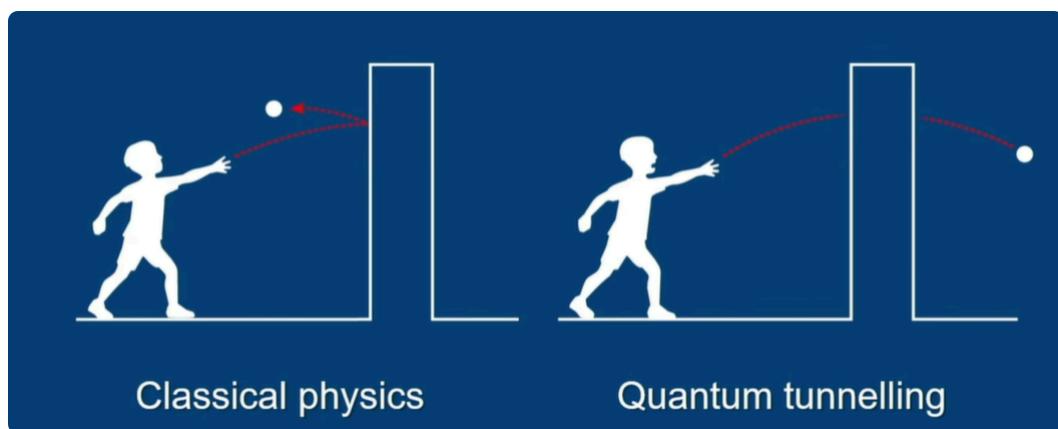
这个相位差很特殊：它是宏观变量，不是单个电子的状态，而是上亿个库珀对的集体状态。文章就盯着这个宏观变量，看它有没有量子特性。

2. 宏观变量有量子特性吗？

我们平时学的常识：

- 量子特性只在微观粒子，比如电子，原子身上有。这些微观粒子有很多神奇的效应：比如 隧穿效应，像穿墙一样穿过本应穿不过的障碍。能量量子化：能量不是连续的，而是一段一段的。
- 宏观物体只遵循经典物理，例如想过墙必须爬过去，能量可以连续变化。

但诺奖得主好奇：如果把宏观物体放到极低温、无干扰的环境里，能不能让它的某个宏观变量表现出量子特性？这篇文章就是要验证这个猜想。文章用约瑟夫森隧道结的相位差当实验对象，测试它有没有宏观量子隧穿和能量量子化。



二、实验怎么做？

为了让相位差表现出量子特性，需要创造两个关键条件：**极低温（减少热干扰）**、**无噪声（减少外界信号干扰）**，然后设计实验测数据。

1. 第一步：搭无噪声、超低温的实验环境

- **极低温：用稀释制冷机降温到 19 mK**

19 mK，已经非常接近绝对零度 (-273.15°C) 了。这么做是为了让元件的热能量足够小。如果温度高，热运动就会干扰量子状态。

- **无噪声：用多级滤波器挡住干扰**

外界的无线电信号、电线噪声都会影响实验，所以他们做了一套降噪系统：包括射频滤波器、微波滤波器（用铜粉填充铜管做的，能把干扰信号衰减 200 倍以上）。

2. 第二步：做两种约瑟夫森隧道结的样品

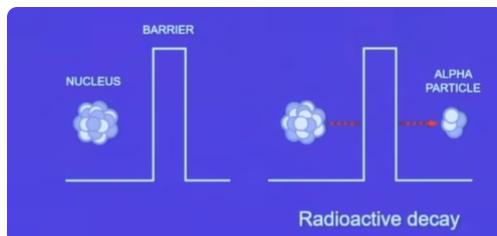
为了测试“阻尼”对量子特性的影响，他们做了两种样品：

- **无分流结**：没有额外电阻，阻尼小（在光滑冰面上滑行，阻力小）；
- **分流结**：在元件上额外加了一层铜金合金电阻（还连了“冷却鳍”防发热），阻尼大（在粗糙地面滑行，阻力大）。

3. 第三步：测两个关键数据

实验的核心是测结的逃逸率。就是**结从不通电状态（零电压）变成通电状态（有电压）的概率**。

逃逸率就像一个**小球**过一座山坡的概率，要么靠热能经过坡顶爬过去（符合经典），要么靠量子隧穿穿过去。



为了测准，用了两种方法：

(1) 测逃逸率和温度的关系：验证宏观量子隧穿

方法：给结加一个慢慢变大的电流（电流斜坡），（就像给上边的小球一个慢慢变大的推力），重复 10 万次，记录每次从不通电到通电的电流值，算出逃逸率；然后改变温度（从 19 mK 到 800 mK），看逃逸率怎么变。

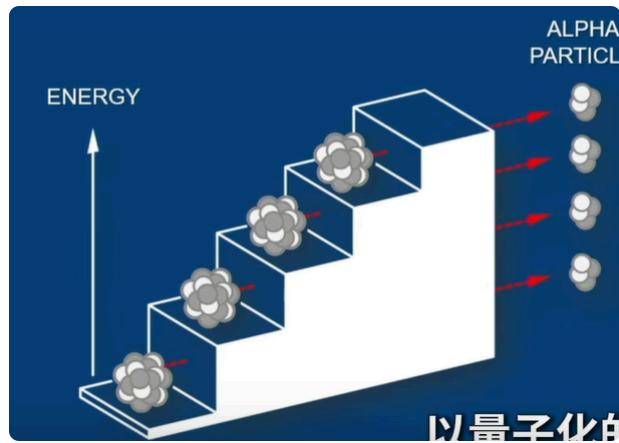
如果是经典物理的热激活，温度越高，热能量越大，逃逸率应该越高（像温度高，阻隔的冰块融化快）；如果是量子隧穿，温度低到一定程度，逃逸率会不变（不用热能量，直接穿墙）。

(2) 测逃逸率和微波的关系：验证能量量子化

方法：给结加固定频率的微波（2.0 GHz），慢慢改变电流，看逃逸率有没有突然变高的峰值。

如果能量是量子化的，只有当微波能量刚好等于两段能量的差距时，才会让结的状态跳变，逃逸率才会突然变高；如果能量是连续的，就不会有这种峰值。

还是用小球 + 山坡比喻。把约瑟夫森隧道结想象成带山坡的轨道，小球代表结的宏观变量（相位差），量子世界里，山坡的能量不是连续，而是像楼梯一样分台阶。实验里加的2.0 GHz 微波，可以想象成给小球递**固定大小的能量包**，只有当能量包大小刚好等于两个台阶的高度差时，小球才能接住能量包，从低台阶跳到高台阶，这时候就会有一个突然变高的峰值。



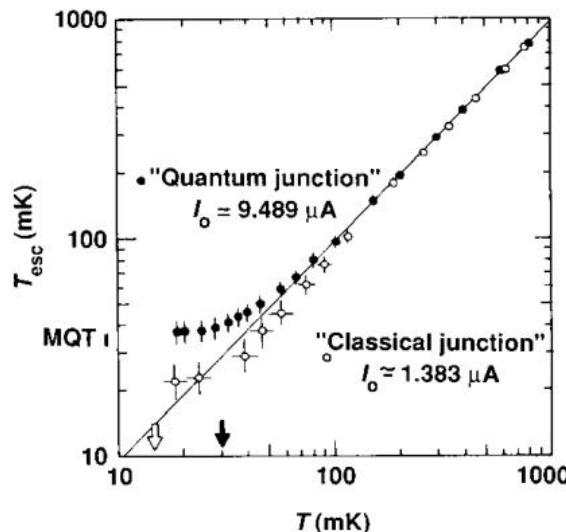
三、测到宏观物体真的有量子特性

科学家测到了 3 个核心结果，都证明宏观变量也就是约瑟夫森隧道结的相位差有量子特性。

1. 低温下，结会量子隧穿，不用热能量也能穿墙

当温度高于 100 mK 时：逃逸率随温度升高而变大，符合经典热激活（靠热能量过障碍）；当温度低于 100 mK 时：逃逸率突然不变了（无分流结的逃逸温度固定在 37.4 mK 左右），和量子隧穿的理论预测完全一致（不用热能量，波包直接穿障碍）；

文章还排除了干扰：为了证明不是噪声导致的假结果，还加了磁场改变结的参数，发现逃逸率不变的现象消失了，说明这确实是量子特性，不是噪声。



这张图展示了约瑟夫森隧道结的逃逸温度 T_{esc} 与环境温度 (T) 的关系，用来区分经典热激活逃逸和宏观量子隧穿 (MQT) 逃逸两种物理机制。图中有两条曲线，对应**两种约瑟夫森结**，空心曲线对应经典结。实心曲线对应量子结。

对应经典结来说，空心曲线沿**对角线**分布 $T_{\text{esc}} \approx T$ ，说明逃逸过程由**经典热激活主导**。环境温度越高，热能量越大，越容易越过势垒逃逸，因此逃逸温度与环境温度同步变化，完全符合经典物理的预期。

对于量子结，实心曲线高温区和经典结类似，此时热激活仍主导逃逸，热能量足够大，掩盖了量子效应。而在低温区偏离了经典的线性关系，说明：逃逸过程从热激活转变为“宏观量子隧穿（MQT）”。量子隧穿不依赖热能量，而是通过波包穿透势垒实现逃逸，因此即使环境温度降低，逃逸温度也不再同步降低，体现了宏观系统的量子特性。原本认为只有微观粒子才有的“隧穿效应”，在宏观结上也出现了。

2. 结的能量是量子化的

加微波时，测到了多个逃逸率峰值（2.0 GHz 微波下有 3 个峰），每个峰对应相邻能量段的差距（如 0→1、1→2、2→3 的能量跳变）。这些峰值的位置，和用量子力学公式算出来的结果几乎一模一样（误差只有 2/3000），证明能量不是连续的，而是一段一段的。

3. 阻尼会降低量子隧穿的概率

分流结（阻尼大）的隧穿率，比无分流结（阻尼小）低了 200 多倍（从 190 万次 / 秒降到 1.2 万次 / 秒）。这个结果也和Caldeira-Leggett 理论（这个理论是描述阻尼对量子隧穿的影响的）完全吻合，进一步证明实验是对的，说明了阻力越大，越难穿墙。

四、研究的意义

颠覆常识，又奠基未来

1. 拓展了量子力学的适用范围。

以前大家觉得量子只属于微观世界，这篇研究证明：只要环境足够干净（极低温、无干扰），宏观变量也能有量子特性。刷新了人类对量子世界的认知。

2. 为量子计算机打了关键基础

现在的超导量子计算机，核心元件就是超导量子比特，而它的原理就来自这篇研究。约瑟夫森隧道结的量子隧穿和能量量子化，是量子比特存储量子信息”的关键；后来科学家在这个基础上改进，做出了更稳定的量子比特如Transmon 比特，才有了今天的量子计算原型机。

这篇文章既回答了宏观物体能不能有量子特性的科学难题，又给未来的量子技术铺了路。