

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。

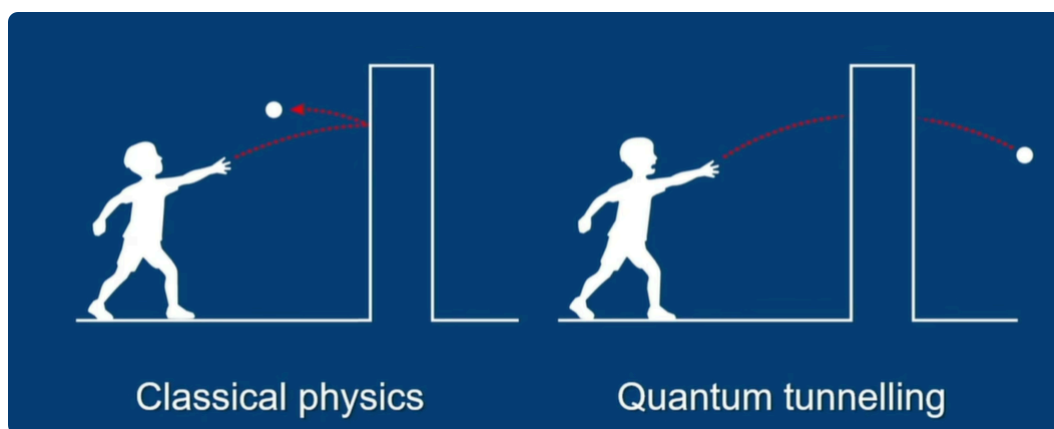
这个相位差很特殊：它是**宏观变量**，不是单个电子的状态，而是上亿个库珀对的集体状态。文章就盯着这个宏观变量，看它有没有量子特性。

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

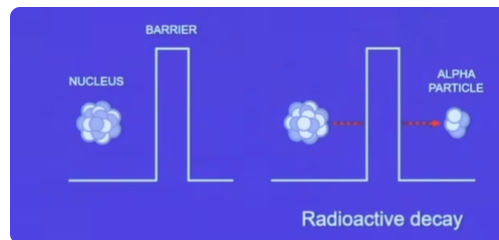
为了测试“阻尼”对量子特性的影响，他们做了两种样品：

- **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。

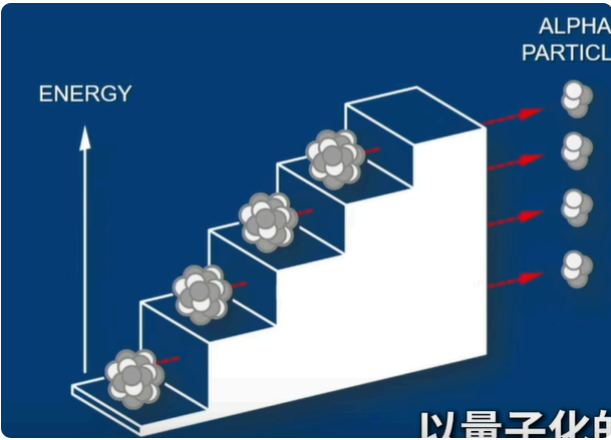
如果是经典物理的热激活，温度越高，热能量越大，逃逸率应该越高（像温度高，阻隔的冰块融化快）；如果是量子隧穿，温度低到一定程度，逃逸率会不变（不用热能量，直接穿墙）。

（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。



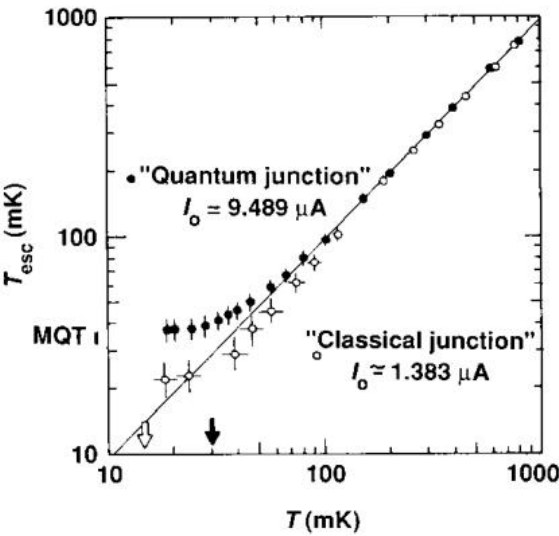
三、测到宏观物体真的有量子特性

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 $0 \rightarrow 1$ 、 $1 \rightarrow 2$ 、 $2 \rightarrow 3$ 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。