

# 让量子现象“肉眼可见”

## 2025年诺贝尔物理学奖解读

今年的诺贝尔物理学奖,表彰了那些在宏观尺度上、涉及大量粒子的情况下,成功观测到量子隧穿现象的实验。1984年和1985年,约翰·克拉克、米歇尔·H·德沃雷特和约翰·M·马丁尼斯三位科学家在美国加州大学伯克利分校进行的一系列实验,构建了一个包含两个超导体的电路。超导体是能够以零电阻传导电流的材料,这两个超导体之间由一层完全不导电的薄材料隔开。但在实验中,他们证明了可以控制并研究一种现象:超导体中的所有带电粒子协同运动,表现得就像一个单一的粒子,充满整个电路。

这种类粒子系统被束缚在一个有电流流动但没有电压的状态中。在实验中,该系统通过量子隧穿效应展现出了量子特性:从零电压状态中逃逸出来,并产生一个电势差(电压)。

与此同时,今年的三位获奖者还证明了这一系统的能量是量化的——即它只能以特定的、分立的量吸收或释放能量。

Illustrations: Niklas Elmehed  
约翰·克拉克



米歇尔·H·德沃雷特



约翰·M·马丁尼斯



### 1 什么是隧穿?

为了开展研究,三位获奖者借助了数十年来发展起来的理论概念和实验工具。

我们知道,量子物理与相对论共同构成了所谓“现代物理学”的基础。过去一个世纪以来,无数科研人员一直在探索其深远含义。

单个粒子发生隧穿的现象,其实早已为人所知。1928年,物理学家乔治·伽莫夫意识到,正是隧穿效应导致某些重原子核以特定方式发生衰变。原子核内部各种力的相互作用在其周围形成了一道势垒,将内部粒子束缚其中。然而,尽管存在这道势垒,原子核的一小部分仍有时能分裂出来,穿过势垒逃逸出去,从而使原来的原子核转变为另一种元素。如果没有隧穿效应,这类核衰变就不可能发生。

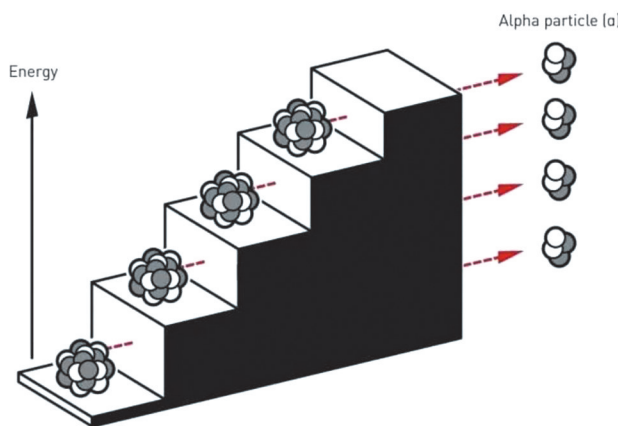
隧穿是一种量子力学过程,其中包含着随机性。某些类型的原子核具有又高又宽的势垒,因此其粒子需要很长时间才能出现在势垒之外;而另一些类型的原子核则更容易发生衰变。如果人们只观察单个原子,那无法预测隧穿何时会发生;但通过观测大量同种原子核的衰变行为,可以测量出隧穿发生的平均时间。描述这一现象最常见的方法是“半衰期”概念,即样品中一半原子核发生衰变所需的时间。

物理学家很快开始思考:是

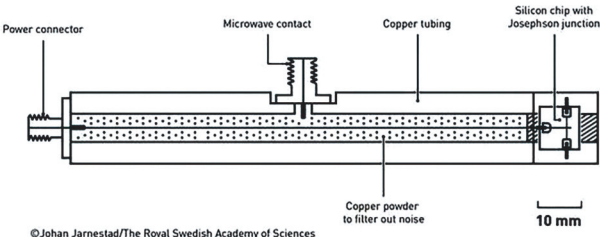
否有可能研究一种涉及多个粒子同时参与的隧穿现象?探索新型实验的一个方向,源自某些材料在极低温下出现的特殊现象。

在普通导电材料中,电流的产生是由于存在可在整个材料中自由移动的电子。在某些材料中,穿过导体的独立电子会变得有序,形成一种协调一致的“舞蹈”,毫无阻力地流动。此时材料就变成了超导体,而电子则两两结合成对。这种电子对被称为“库珀对”,以莱昂·库珀命名。他与约翰·巴丁和罗伯特·施里弗共同详细描述了超导体的工作机制(三人因此获得1972年诺贝尔物理学奖)。

库珀对的行为与普通电子完全不同。电子具有很强的“个体性”,倾向于彼此保持距离——两个具有相同性质的电子不可能处于同一状态。这一点在原子中可以明显看到,例如电子分布在不同的能级(即电子壳层)上。然而,当超导体中的电子结成对后,它们的部分个体性就消失了;虽然两个独立的电子总是可区分的,但两个库珀对却可以完全相同。这意味着超导体中的所有库珀对可以被描述为一个整体,一个统一的量子力学系统。用量子力学的语言来说,它们具有一个共同的波函数。这个波函数描述了在给定状态下观测到该系统的概率及其具有的特性。



### 2 科学家们的起步



© Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

这些课题恰好契合约翰·克拉克的研究。他当时是美国加州大学伯克利分校的教授,此前于1968年在英国剑桥大学获得博士学位后移居美国。在伯克利,他组建了自已的研究团队,专注于利用超导体和约瑟夫森结来探索多种物理现象。

到20世纪80年代中期,米歇尔·H·德沃雷特在巴黎获得博士学位后,作为博士后加入了约翰·克拉克的研究团队。该团队还包括博士生约翰·M·马丁尼斯。他们三人共同承担起证明“宏观量子隧穿”的挑战。实验装置必须极其精细,并采取大量措施屏蔽外界干扰。他们成功地优化并精确测量了电路的所有特性,从而能够深入理解该系统的运行机制。

为了测量量子现象,他们向约瑟夫森结注入一个微弱的电流,并测量电压(电压与电路中的电阻相关)。最初,约瑟夫森结两端的电压为零,这符合预期,因为系统的波函数被限制在一个不会产生电压的状态中。接着,他们研究了系统从该状态隧穿出去所需的时间,一旦发生隧穿,就会出现电压。由于量子力学本质上具有随机性,他们进行了大量重复测量,并将结果绘制成图,从

中读取零电压状态的持续时间。这种方法类似于通过大量衰变事件的统计来测量原子核的半衰期。

三位科学家构建了一个使用超导电路的实验装置。承载该电路的芯片尺寸约为一厘米。此前,隧穿效应和能量量子化主要在仅含少数粒子的系统中被研究;而在此实验中,这些量子现象出现在一个包含数十亿个库珀对的宏观量子系统中。这些库珀对遍布整个芯片上的超导体。因此,这项实验将量子效应从微观尺度推进到了宏观尺度。

这种隧穿现象表明,实验中那些协调运动的库珀对,表现得就像一个巨大的单一粒子。当科学家们进一步观察到系统具有分立的、量子化的能级时,这一结论得到了进一步证实。

量子力学之所以得名,正是源于人们发现微观过程中的能量,是以离散的“包”(即量子)形式存在的。今年的三位获奖者向零电压状态引入了不同波长的微波,发现其中某些频率的微波被系统吸收,导致系统跃迁到更高的能级。这表明:当系统能量更高时,零电压状态的持续时间更短——这正是量子力学所预测的结果。

### 3 理论与实践意义

这项实验对理解量子力学具有深远影响。以往在宏观尺度上展示的量子效应,通常是由大量微小单元各自独立的量子性质叠加而成。这些微观组分共同导致宏观现象,例如激光、超导体和超流体。然而,这一实验却不同:它从一个本身就具有宏观性的状态,即大量粒子共享的统一波函数产生了一个宏观效应——可测量的电压。

理论物理学家安东尼·莱格特曾将获奖者的宏观量子系统,与著名的“薛定谔的猫”思想实验相比较。在该思想实验中,如果不去观察,猫就同时处于“活着”和“死亡”的叠加态(薛定谔因此获得1933年诺贝尔物理学奖)。这个思想实验的初衷是揭示这种状态的荒谬性,因为在宏观尺度上,量子力学的特殊性质通常会被抹去。人们在实验室中真正展示一只猫的量子叠加态。

然而,莱格特认为,今年三位获奖者所进行的一系列实验表明,确实存在一些现象,其中大量粒子共同表现出量子力学所预测的行为。尽管由众多库珀对构成的这个宏观系统在尺寸上仍比一只小猫小好几个数量级,但由于实验测量的是整个系统的整体量子特性,因此在量子物理学家看来,它与薛定谔那只假想中的猫在本质上是相当类似的。

可以想见,今年的获奖者不仅深化了人们对物理世界的理解,也为发展新一代量子技术包括量子加密、量子计算和量子传感等领域开辟了新路径。

诺贝尔物理学委员会主席奥勒·埃里克松表示:“量子力学在百年发展历程中持续带来新突破,值得共同庆祝。而这项研究更具重大应用价值,因为量子力学是所有数字技术的基石。”

另一个实用例子,则是马丁尼斯后来进行的量子计算机实验,该实验正是利用了他与另外两位获奖者所研究的能量量子化特性——他使用具有量子化能级的电路作为信息载体,即量子比特(qubit)。最低能级和第一个激发态分别代表“0”和“1”,这正是构建未来量子计算机的技术路径之一。

来源:科技日报

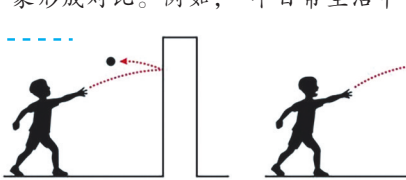
### 名词解释

#### 量子力学描述的是什么?

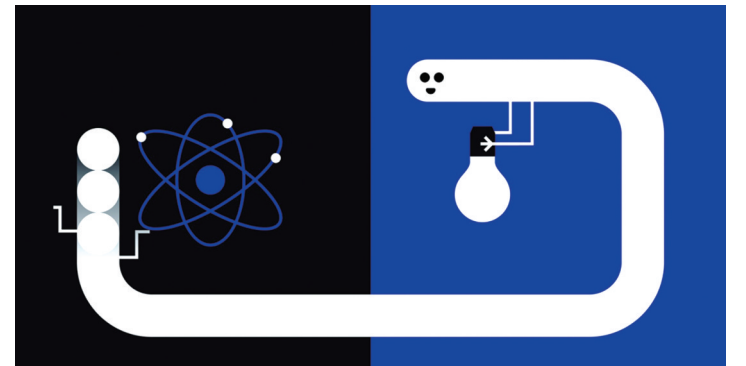
2025年是量子力学诞生一百周年。量子力学描述的是什么?是在单个粒子尺度上才“显现”的物理特性。在量子物理学中,这些现象比光学显微镜所能观测到的还要小得多,它们被称为“微观”现象。

这与由大量粒子构成的“宏观”现象形成对比。例如,一个日常生活中

常见的球,由分子组成来描述的话就是天文数字级别的,它不会表现出任何量子力学效应。人们都知道,每次把球扔向墙壁,它都会反弹回来。然而,一个单独的粒子在其微观世界中,有时却能直接穿过类似墙的障碍,出现在“墙”的另一侧。这种量子力学现象被称为“隧穿”。



© Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences



调节性T细胞工作艺术图



玛丽·布伦科

# 他们找到调控人体免疫系统的“秘密武器”

## 2025年诺贝尔生理学或医学奖解读

人体强大的免疫系统需要精准调控,否则便可能攻击我们自身的器官。美国系统生物学研究所的玛丽·布伦科(Mary E. Brunkow)、索诺玛生物治疗公司的弗雷德·拉姆斯德尔(Fred Ramsdell),以及日本大阪大学的坂口志文(Shimon Sakaguchi),因在“外周免疫耐受”机制方面的突破性发现,共同荣获2025年诺贝尔生理学或医学奖。他们的研究揭示了免疫系统如何避免攻击自身组织,守护人体健康的深层奥秘。

每一天,我们的身体都面临成千上万微生物的侵袭,而免疫系统正是抵御这些入侵的忠诚卫士。然而,有些病原体外形多变,甚至能伪装成人体细胞的“模样”,以躲避免疫系统的攻击。那么,免疫系统如何准确分辨敌我,做到既不放过敌人,也不误伤人体自身组织?

这三位科学家的答案指向了人体内的“调解员”——调节性T细胞。它能够抑制过度活跃的免疫反应,防止免疫细胞攻击自身组织。

“他们的发现彻底改变了我们对免疫系统运作机制的理解,解释了为何大多数人不会患上严重的自身免疫疾病。”诺贝尔奖委员会主席欧莱·卡珀如此评价。

1995年,坂口志文的研究向学界共识发起了挑战。当时,科学界普遍认为,免疫耐受主要依赖“中枢耐受”过程清除胸腺内可能攻击自身组织的免疫细胞。然而,坂口志文发现,即便经过中枢耐受过程,仍有一部分具有潜在攻击性的T细胞会进入外周组织。

他首次识别出一个具有免疫抑制功能的T细胞亚群——调节性T细胞。它们能监测其他免疫细胞,确保免疫系统耐受自身组织,从而防御自身免疫疾病

的发生。这一发现为“外周免疫耐受”理论奠定了基础。

时间来到2001年,布伦科与拉姆斯德尔在研究一种易发多器官自身免疫疾病的小鼠模型时,发现其病因源于关键基因Foxp3的突变。进一步的研究显示,人体内该基因的对应基因突变会导致一种罕见而致命的遗传性自身免疫疾病,即免疫失调、多内分泌腺病、肠病伴X染色体连锁综合征。该疾病会造成调节性T细胞功能缺陷,进而引发严重的自身免疫反应,累及肠道、内分泌腺和皮肤等多个器官。

两年后,坂口志文将这两项重要发现联系起来,证明Foxp3是调节性T细胞发育与功能的主控基因。缺乏Foxp3的小鼠无法产生功能性调节性T细胞,并迅速出现全身性自身免疫反应。这一关联性研究不仅确立了调节性T细胞的分子基础,也标志着该领域进入功能与

机制系统解析阶段。

如今,调节性T细胞已被公认为免疫稳态的核心调控者。它们如同体内的“巡逻队”,持续监控其他免疫细胞的活性,确保免疫反应精准而适度,避免误伤正常组织。

三位获奖者的研究不仅开创了“外周免疫耐受”这一重要领域,也推动了癌症与自身免疫疾病的治疗进展。基于调节性T细胞的疗法正被积极探索,用于治疗1型糖尿病、类风湿关节炎等自身免疫病,也有望催生更成功的器官移植手术。

从基础科学到临床转化,布伦科、拉姆斯德尔和坂口志文的研究,逐步精准揭开了人体在防御外敌与维护自我健康之间保持微妙平衡的奥秘,为呵护人类健康,书写下重要篇章。

来源:科技日报



弗雷德·拉姆斯德尔



坂口志文