

• 科技评述:2025年诺贝尔奖评述 •

DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0132

超导量子计算基石—电路中的宏观量子效应： 2025年诺贝尔物理学奖评述

郭秋江¹ 王浩华^{2*}

1. 浙江大学 杭州国际科创中心,杭州 311215

2. 浙江大学 物理学院,杭州 310027

[摘要] 2025年诺贝尔物理学奖授予John Clarke、Michel H. Devoret和John M. Martinis三位物理学家,以表彰他们“在电路中发现了宏观量子隧穿效应与能量量子化”。他们在宏观尺度上验证了量子力学规律,打破了微观与宏观世界的界限。这项奠基性工作直接推动了超导量子计算研究领域的诞生,被认为“为量子技术打开了大门”。

[关键词] 量子隧穿效应;能量量子化;超导量子计算;2025年诺贝尔物理学奖

2025年诺贝尔物理学奖授予了约翰·克拉克(John Clarke)、米歇尔·H·德沃雷特(Michel H. Devoret)和约翰·M·马蒂尼斯(John M. Martinis)三位量子物理学家,以表彰他们“在电路中发现宏观量子隧穿效应和能量量子化”。该成果能够获奖的重要原因在于它在实验上证明:在比如极低温的特定环境条件下,量子力学的基本规律在宏观系统中同样适用,打破了“量子行为仅属于微观世界”的传统认知界限。与此同时,该成果催生了宏观世界的人工原子—超导量子比特电路,为实现量子计算机提供了一条切实可行的技术路径,已成为当今最有希望的物理平台之一。

随着2025年诺贝尔物理学奖的公布,以下问题引发了人们的广泛关注:三位物理学家具体完成了哪些开创性工作?其研究成果具有怎样的深远意义?我国在该领域的研究进展如何?未来有望在哪些方面取得进一步的发展与突破?下文将围绕这些问题展开系统阐述。

1 2025年诺贝尔物理学奖的背景与研究过程

100多年前,当人类的探测手段深入到微观原子尺度时,遇到了一系列经典牛顿力学无法解释的物理现象。于是,量子力学诞生了,打开了人类认识微观世界

的大门。量子力学始于科学家用离散轨道的概念来理解原子中受束缚电子的运动状态,这种量化的概念成功诠释了实验观测到的原子光谱,进而最终颠覆了我们对微观世界的认知。可以说,量子力学是现代物理学的重要支柱之一。

很长一段时间,量子力学被认为是微观世界的理论,用于解释电子的轨道运动、磁场下原子的能级劈裂等。在人类肉眼可见的宏观尺度,例如弹簧谐振子、电容C和电感L组成的LC振荡电路等,似乎量子力学完全隐身了,一切又回到了经典物理学掌控的世界(图1)。图1A为微观尺度(亚纳米)的原子示意图,其中受原子核束缚的电子在自然环境中即遵从量子力学原则,分布于能量离散的特定轨道,轨道间的跃迁辐射或吸收特定频率的光子,即原子光谱;图1B为宏观尺度(毫米)的电容和电感构成的振荡电路,遵从经典物理学的麦克斯韦方程。但是超导材料构成的宏观振荡电路在极低温条件下也有可能展现类似的量子效应。

随着量子力学理论体系逐步完善,一个更深层的问题浮现:这些违背经典直觉的量子规律是否仅局限于肉眼不可见的微观世界?1935年,薛定谔提出了著名的“猫佯谬”,借助宏观猫态生死叠加的思想实验,尖锐地

收稿日期:2025-10-20;修回日期:2025-10-23

* 通信作者,Email:hhwang@zju.edu.cn

引用格式: 郭秋江,王浩华. 超导量子计算基石—电路中的宏观量子效应:2025年诺贝尔物理学奖评述. 中国科学基金,2025,39(5):782–787.

Guo QJ, Wang HH. Cornerstone for superconducting quantum computing—Macroscopic quantum effects in circuits:Comment on 2025 Nobel Prize in physics. Bulletin of National Natural Science Foundation of China,2025,39(5):782–787.(in Chinese)

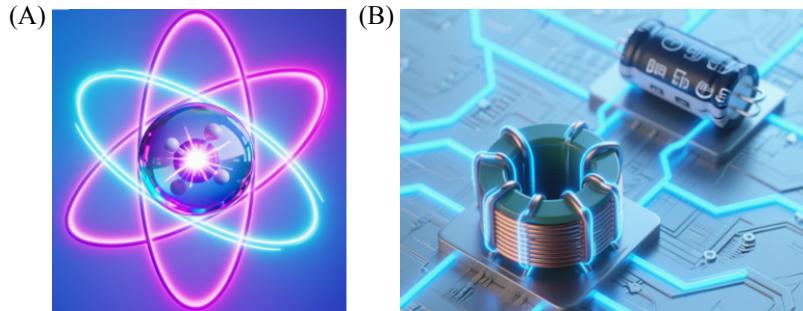


图1 微观尺度原子示意图及宏观尺度电容和电感构成的震荡电路(图片来源:网络)

Fig.1 Schematic Diagrams of a Microscale Atom and an Oscillation Circuit Composed of Macroscopic Capacitor and Inductor (Image Source: Network)

指出了将量子规律直接推广至宏观尺度所面临的逻辑困境。自此,物理学家们开始了长达半个世纪的探索,致力于在受控实验中捕捉宏观尺度下的量子效应,这成为量子物理研究的核心课题之一。

然而,宏观量子效应的观测始终面临“量子退相干”带来的根本性挑战:宏观系统由大量粒子组成,难以避免与环境发生相互作用,这导致其脆弱的量子态在极短时间内遭到破坏,无法持续维持。此外,并非所有的宏观系统都具备有效的观测条件,例如线性LC谐振子的势能呈抛物线型,缺乏可供隧穿发生的势垒结构,其量子化特征仅表现为微弱的量子涨落,难以进行观测。

因此,实现宏观量子效应观测的关键,在于寻找合适的物理平台并有效保护其量子相干性。2025年诺贝尔物理学奖的三位得主——约翰·克拉克、米歇尔·H·德沃雷特和约翰·M·马蒂尼斯,通过在超导电路中设计的精巧实验,成功实现了这一目标。他们的核心突破在于,基于超导电流振荡这一包含大量超导电子的集体行为与相空间中受势能函数影响的单体动力学过程的对应关系,首次在电流偏置的约瑟夫森结(等效于非线性电感)和电容并联的振荡电路中明确观测到宏观量子隧

穿^[1]和能量量子化^[2]这两个典型的量子现象(图2)。图2A为临界超导电流为 I_0 的超导约瑟夫森结(非线性电感)、电容C和电阻R(表征退相干大小)构建的等效实验电路图示,该电路受直流电流I偏置,微波脉冲 I_{low} 激发;图2B为该电路对应的势能函数和能级示意图。等效实验电路中存储的是高速振荡的超导电流—受束缚的电磁波场,虽然该电流包含大量的超导电子且分布于肉眼可见的宏观电路中,对超导电子集体行为的描述仍然可以等效为相空间中受势能函数 $U(\delta)$ 影响的一个单体的动力学过程(δ 为跨过约瑟夫森结的相位差,也正比于非线性电感上的磁通),包括该单体越过势垒的量子隧穿(宏观量子隧穿)和单体在势阱中的能级量子化(宏观能量量子化);图2C为宏观量子隧穿效应的实验结果^[1];图2D为宏观能量量子化的实验结果^[2]。需要指出的是,这里的宏观量子隧穿并非指约瑟夫森效应中单个超导电子对隧穿绝缘层的概念。

具体而言,随着温度的降低,电流偏置的约瑟夫森结电路(图2A)从零电压状态的逃逸速率从高温下依赖温度的热激活行为,转变为低温下与温度无关的饱和平台(图2C),这一转变正是宏观量子隧穿取代经典热激活

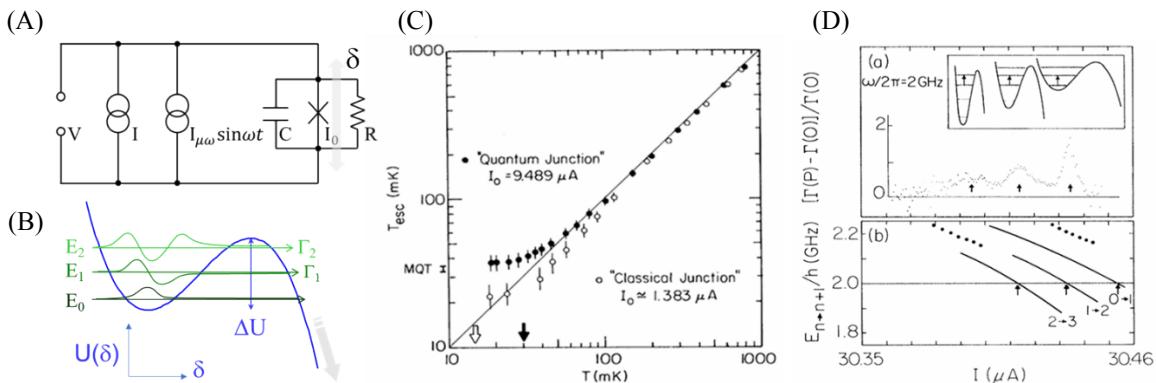


图2 等效实验电路、电路势能函数与能级分布、宏观量子隧穿和能量量子化^[1,2]

Fig.2 Equivalent Experimental Circuit, Potential Landscape and Energy Levels of the Circuit, Macroscopic Quantum Tunneling and Energy Quantization^[1,2]

动力学的标志性证据。当进一步对结施加特定频率的微波辐射，并通过调节偏置电流来改变势能结构，可以观察到逃逸率在对应于第一、第二和第三激发态的位置表现出显著的共振增强(图2D)。这一现象如同对能级结构进行光谱学扫描，为宏观系统中能量的离散化提供了直接证据。通过低温的测量技术与精巧的超导电路设计，三位物理学家成功地在宏观可观测量上看到了量子行为，为后续超导量子比特的诞生奠定了基础。

三位诺贝尔奖得主中，马蒂尼斯教授后续与Andrew Cleland教授在加州大学圣塔芭芭拉分校(University of California, Santa Barbara, UCSB)开展了一系列深入研究。他们先是研发了新一代的超导相位量子比特(图3A)，并成功将亚毫米尺度约瑟夫森结电路的量子化效应拓展至尺寸更大的毫米平面波导谐振腔电路体系(图3B)，实现了多谐振腔电路的NOON态耦合^[3]。此后耶鲁大学研究团队实现了厘米尺度三维谐振腔比特的宏观量子态调控^[4]。此外，马蒂尼斯教授与Cleland教授合作，将宏观电磁波振荡的量子化效应拓展至更广泛认知的机械振动领域(图3 C)，实现了首个“量子机”(Quantum Machine)^[5]，该成果被*Science*杂志选为2010年“十大科学进展”之首。前两者储存的是能量量子化的电磁波振荡，而后者是用于展示能量量子化的机械振荡。器件均为本文作者之一在马蒂尼斯教授UCSB团队博士后研究期间参与研发的。

2 超导电路与量子计算

此次诺贝尔奖成果最直接且深远的影响在于催生了“超导量子计算”这一全新研究方向。与基于自然微观粒子(离子、原子、分子)的量子计算体系不同，在宏观电路中观测到的量子隧穿效应与能量量子化现象表明，通过设计、制备宏观尺度的电路结构，能够构造出行为可控且具备量子特性的“人工原子”——这一重要发现，为将超导电路应用于量子比特(即量子计算机的基本信息单元)奠定了坚实的物理基础。正如英国卡文迪许实验室负责人梅特·阿塔图尔(Mete Atature)教授所评

价：“他们为今天的量子技术打开了大门”。在此基础上，1999年，日本学者中村泰信(Y. Nakamura)与蔡兆申(J. S. Tsai)在由超导电路构成的“库伯对盒”(Cooper-pair Box)中成功观测到Rabi振荡，进而构建出世界上第一个真正意义上的量子比特^[6]，为超导量子计算领域的后续发展提供了关键实验支撑。

在三位获奖科学家中，马蒂尼斯教授具有最高的公众知名度。在获得诺贝尔奖之前，他更为人知的身份是谷歌量子人工智能团队的前负责人。在该岗位上，马蒂尼斯教授及其团队的工作，极大地推动了超导量子计算从理论原理向工程实践的跨越：在提升量子比特相干时间、开发高精度量子门操控方案，以及实现量子比特阵列的规模化扩展等关键技术领域，均取得了具有里程碑意义的突破性进展。

马蒂尼斯教授亲自研发了用于调控超导相位量子比特的吉赫兹(GHz)微波脉冲发生电路(GHzDAC)。他对微波传输线路上电子元器件的精细化设计极为执着，经常纠结于解决低至0.1分贝(dB)的传输效率差异以追求完美的阻抗匹配。正是这种对技术细节的极致追求，马蒂尼斯团队最终在2019年成功研制出“悬铃木”(Sycamore)量子处理器，并首次实现“量子优越性”这一里程碑式突破。该处理器搭载53个超导量子比特，在特定计算任务中达成了传统超级计算机难以企及的运算能力^[7]。这一成就不仅极大振奋了全球超导量子计算领域，更为本次诺贝尔奖的颁发增添了重要权重。

从宏观量子现象的发现，到量子计算原型机的实现，这一清晰的发展路径充分表明：本年度诺贝尔物理学奖的获奖成果，不仅是量子理论领域的重大突破，更是开启超导量子计算技术路线、推动该领域从基础研究迈向实用化探索的关键转折点。

3 我国在该领域的研究现状

值得一提的是，中国学者很早就参与了超导量子电路领域的研究，且取得了一系列重要成果。例如，现任职于浙江大学的游建强教授，在该领域相关理论研究方

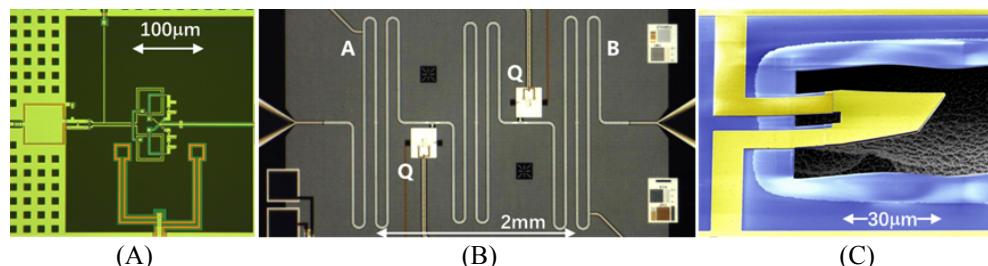


图3 A. 亚毫米尺寸的超导相位比特；B. 毫米尺度的平面波导振荡器；C. 机械振子

Fig.3 A. Sub Millimeter-scale Superconducting Phase Qubit; B. Millimeter-scale Planar Waveguide Oscillator; C. Mechanical Oscillator

面贡献显著^[8];南京大学的于扬教授,早年曾在美国堪萨斯大学率先开展超导量子比特研究^[9],回国后亦牵头建立了相关研究实验室。此外,中国科学院物理研究所的郑东宁教授、赵士平教授等学者,也长期深耕于该领域基础与应用研究。

同时,此次获奖的马蒂尼斯教授与中国渊源深厚,其UCSB团队的两位博士后于2010年前后加盟浙江大学建立实验室,助力中国开展超导量子电路相关实验研究,进一步推动了国内该领域研究与国际前沿的衔接。马蒂尼斯教授本人也曾于2018年访问浙江大学(图4),为学校师生奉献了一场精彩的科普讲座。

近年来,在国家的大力支持下,中国科学家们在超导量子计算领域取得了一系列令世界瞩目的重要突破,各科研机构逐渐形成了特色鲜明、优势互补的发展格局。中国科学技术大学成功研制了“祖冲之号”号系列超导量子计算原型机,并在量子优越性验证方面不断刷新纪录^[10,11]。浙江大学超导量子计算团队在量子比特精确控制与多比特集成方面成果显著,推出的125比特“天目2号”超导量子处理器展现出国际先进水平^[12],为开展量子多体物理模拟和纠错研究提供了重要实验平台。同时,清华大学、中国科学院物理研究所、北京量子信息科学研究院、深圳国际量子研究院、南京大学和福州大学等优秀团队也在量子纠错、量子模拟和量子比特远程互连等方面取得了关键进展^[13-16]。

上述一系列系统性成果,标志着我国在超导量子计算领域已成功跻身国际第一梯队,实现了从技术追赶者到与国际前沿并跑者的关键转变,且在部分特色研究方向已展现出领跑潜力。展望未来,随着国家层面在量子

科技领域持续加大资源投入,以及产学研协同创新机制的不断深化,我国有望在容错量子计算、实用化量子算法等核心前沿方向取得更大突破,为全球量子计算技术发展贡献更多中国力量。

4 展望该领域未来发展趋势

从全球视野来看,近年来超导量子计算领域发展势头迅猛,在芯片集成度提升、量子操控精度优化及关键技术验证等方面均取得显著进展。不过,当前超导量子计算技术整体仍处于“中等规模含噪声量子”(Noisy Intermediate-Scale Quantum Era, NISQ)时代,在从实验室基础研究向工程化实际应用转型的过程中,仍面临量子比特相干性提升、系统容错能力突破、大规模集成兼容性优化等诸多挑战,整体呈现出“硬件性能持续提升”与“应用场景拓展探索”双轨并进的发展态势。

随着研究的持续深入,超导量子计算硬件进一步凸显规模化、高精度、高速度的综合优势并不断迭代演进,应用层面的研究重点也逐步从基础原理验证,转向具有明确科学价值与实际需求的实践探索。在可预见的未来,伴随硬件性能的持续突破与应用场景的持续拓展,超导量子计算有望在药物研发(如精准模拟分子相互作用以加速新药筛选)、材料设计(如高效研发新型超导材料)、金融建模(如复杂风险评估与衍生品定价)、物流优化(如大规模供应链路径规划)以及人工智能(如量子神经网络构建)等关键领域,充分释放其变革性潜力,为相关行业突破传统技术瓶颈、实现跨越式发展提供重要机遇。

当然,需要客观认识到,当前超导量子计算仍处于

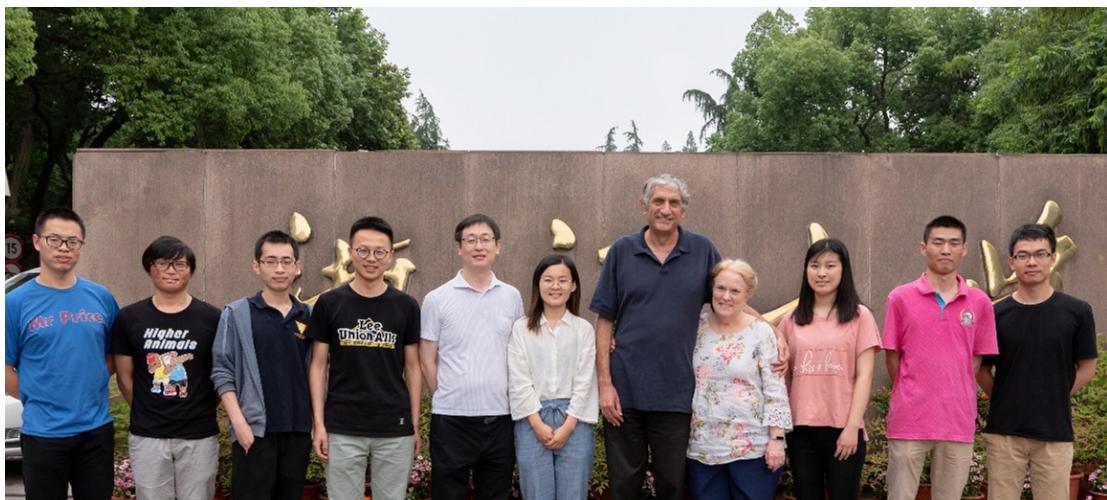


图4 马蒂尼斯教授(右五)2018年来访浙江大学时与本文两位作者(左四、左五)的合影

Fig.4 Professor Martinis (Fifth from Right) Took a Photo with the Two Authors of This Article (Fourth, Fifth from the Left) during His Visit to Zhejiang University in 2018

“襁褓中的婴儿”阶段——虽前景广阔、充满希望，但技术成熟与大规模应用仍需长期积累，不可操之过急。理性看待量子计算的未来发展，需格外重视关键技术人才梯队的建设与培养，给予领域足够的耐心与支持。这一点可从马蒂尼斯教授的职业发展境遇中得到印证：他曾因在美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, U. S., NIST)面临管理理念不合的问题，最终选择离开并加盟学术氛围更为自由的UCSB。在UCSB的日子，马蒂尼斯教授得以专注于超导量子比特测控中的关键科学技术问题，并在此期间构建了其核心研究团队。在方向明确并且有足够技术铺垫的前提下，马蒂尼斯教授携团队加入谷歌，依托更为雄厚的技术和经费资源充分施展其科研与技术才华，推动“悬铃木”处理器等重大成果的诞生。这一经历深刻表明，科研的磨砺对于人才的成长是不可或缺的，而超导量子计算领域的竞争本质上还是人才的竞争，唯有发些真正对口的人才并重视人才价值、尊重人才发展规律、营造良好的科研创新环境，才能为领域持续健康发展注入核心动力。

参考文献

- [1] Devoret MH,Martinis JM,Clarke J. Measurements of macroscopic quantum tunneling out of the zero-voltage state of a current-biased Josephson junction. *Physical Review Letters*,1985,55(18):1908—1911.
- [2] Martinis JM,Devoret MH,Clarke J. Energy-level quantization in the zero-voltage state of a current-biased Josephson junction. *Physical Review Letters*,1985,55(15):1543—1546.
- [3] Wang H,Mariantoni M,Bialczak RC,et al. Deterministic entanglement of photons in two superconducting microwave resonators. *Physical Review Letters*,2011,106(6):060401.
- [4] Paik H,Schuster DI,Bishop LS,et al. Observation of high coherence in Josephson junction qubits measured in a three-dimensional circuit QED architecture. *Physical Review Letters*,2011,107(24):240501.
- [5] O'Connell AD,Hofheinz M,Ansmann M,et al. Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator. *Nature*,2010,464(7289):697—703.
- [6] Nakamura Y,Pashkin YA,Tsai JS. Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box. *Nature*,1999,398:786—788.
- [7] Arute F,Arya K,Babbush R,et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*,2019,574:505—510.
- [8] You JQ,Hu XD,Ashhab S,et al. Low-decoherence flux qubit. *Physical Review B*,2007,75(14):140515.
- [9] Yu Y,Han SY,Chu X,et al. Coherent temporal oscillations of macroscopic quantum states in a Josephson junction. *Science*,2002,296(5569):889—892.
- [10] Wu YL,Bao WS,Cao SR,et al. Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor. *Physical Review Letters*,2021,127(18):180501.
- [11] Gao DX,Fan DJ,Zha C,et al. Establishing a new benchmark in quantum computational advantage with 105-qubit Zuchongzhi 3.0 processor. *Physical Review Letters*,2025,134(9):090601.
- [12] Jin FT,Jiang S,Zhu XH,et al. Topological prethermal strong zero modes on superconducting processors. *Nature*,2025,645(8081):626—632.
- [13] Ni ZC,Li S,Deng XW,et al. Beating the break-even point with a discrete-variable-encoded logical qubit. *Nature*,2023,616(7955):56—60.
- [14] Deng CL,Liu Y,Zhang YR,et al. High-order topological pumping on a superconducting quantum processor. *Physical Review Letters*,2024,133(14):140402.
- [15] Deng X,Zheng W,Liao XD,et al. Long-range ZZ interaction via resonator-induced phase in superconducting qubits. *Physical Review Letters*,2025,134(2):020801.
- [16] Niu JJ,Li YS,Zhang LB,et al. Demonstrating path-independent anyonic braiding on a modular superconducting quantum processor. *Physical Review Letters*,2024,132(2):020601.

Cornerstone for Superconducting Quantum Computing—Macroscopic Quantum Effects in Circuits: Comment on 2025 Nobel Prize in Physics

Qiujiang Guo¹ Haohua Wang^{2*}

1. ZJU-Hangzhou Global Scientific and Technological Innovation Center, Hangzhou 311215, China

2. School of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract The Nobel Prize in Physics 2025 was awarded jointly to John Clarke, Michel H. Devoret and John M. Martinis “for the discovery of macroscopic quantum mechanical tunnelling and energy quantization in an electric circuit”. Their landmark research validated the laws of quantum mechanics at the macroscopic scale, breaking the traditional notion that quantum behavior is confined to the microscopic realm. This breakthrough directly catalyzed the advent of superconducting quantum computing and has been hailed as “opening a door to quantum technologies.”

Keywords quantum tunneling effect; energy quantization; superconducting quantum computing; The Nobel Prize in Physics 2025

王浩华 浙江大学物理学院教授,美国物理学会会士(APS Fellow)。曾主持国家自然科学基金青年科学基金项目(A类、B类),入选中组部青年拔尖人才支持计划,获新基石科学基金会科学探索奖等。长期从事超导量子计算与量子模拟实验研究,研究专长包括超导量子器件的设计制备与微波测控,专注于超导量子计算底层物理器件及其量子计算模拟应用的研发。2007—2010年期间在加州大学圣塔芭芭拉分校John M. Martinis教授团队做博士后,是第二代超导相位量子比特研发团队的核心成员之一。

郭秋江 浙江大学杭州国际科创中心百人研究员,主要从事超导量子计算、量子多体物理领域的实验研究,重点探索超导量子芯片集成化面临的技术挑战,并利用多比特芯片探索非平衡量子多体领域的前沿科学问题。获得国家级青年人才计划和浙江省杰出青年科学基金等项目支持。

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: hhwang@zju.edu.cn