

借诺奖之窗 探物理之深*

——诺贝尔物理学奖融入基础教学的实践探索

王新绍 (同济大学科技中学 上海 200092)

吴媛** 陈丽清 (华东师范大学物理学院 上海 200241)

摘 要 诺贝尔物理学奖作为全球物理学领域的权威奖项,其成果承载着人类对物质世界认知的突破性进展,是衔接前沿科学与基础物理教育的优质载体。文章以 2025 年诺贝尔物理学奖(宏观量子隧穿与能量量子化)为核心案例,分析其在中学基础物理教学中的适配价值,提出分学段、分层级的融入策略,通过概念衔接、实验模拟、项目探究等路径,实现前沿成果与基础知识点的深度融合,助力学生夯实知识基础、培育科学思维、激发探究兴趣。

关键词 诺贝尔物理学奖 中学物理 教学融合 核心素养 宏观量子效应

文章编号 1002-0748(2026)6-0002

中图分类号 G633·7

文献标识码 A

物理学的发展始终以“微观与宏观的统一”“经典与量子的融合”为核心命题,从微观粒子行为到宏观物理现象的跨尺度关联,从经典理论框架到量子力学体系的迭代延伸,构成了物理学研究的核心脉络。2025 年诺贝尔物理学奖授予约翰·克拉克、米歇尔·德沃雷与约翰·马丁尼斯三位科学家,以表彰其在宏观电路中实现量子隧穿效应与能量量子化的突破性研究^[1, 2]。这一成果不仅突破了“量子效应仅存在于微观体系”的传统认知,拓展了量子力学的适用边界,更以宏观电路为载体,搭建起串联原子物理、经典电磁学、量子力学等多领域基础物理知识点的核心枢纽^[3-5],为破解当前基础物理教学中的碎片化困境提供了兼具理论性与实践性的重要契机。

在传统基础物理教学模式中,原子结构、电路导通、量子特性等核心知识点多以独立模块形式分阶段授课:初中阶段聚焦原子电荷构成与经典电路基础,侧重现象认知;高中阶段深化经典导电机制与欧姆定律应用,缺乏量子层面的延伸;大学阶段系统讲解量子力学理论,却与前期经典知识脱节^[6]。这种“阶段化、模块化”的授课逻辑,导致学生知识体系呈现碎片化特征,难以建立微观与宏观、经典与量子之间的内在逻辑关联,进而形成“知识脱节、前沿疏离”

的教学痛点^[7]。学习者既无法理解基础知识点的跨尺度统一性,也难以借助基础理论解读前沿学术成果,无法有效支撑其对物理学科整体性与普适性的认知构建,更难以实现知识的融会贯通与学以致用^[7]。

2025 年诺奖成果恰好弥补了这一认知缺口,通过构建“微观基础—经典延伸—量子突破—宏观验证”的完整认知框架,系统性串联起五大核心基础知识点,形成闭环式知识体系。具体而言,原子结构与电荷相互作用构成微观物理根基,其能量量子化特性为后续量子现象提供本质支撑^[8];经典导电机制基于原子外层电子行为,搭建起微观粒子运动与宏观电流现象的关联桥梁;超导体特性与库珀对机制实现经典导电理论向量子超导领域的跨界延伸,打破经典与量子的认知壁垒;粒子波动性与波函数理论为宏观量子隧穿效应提供底层理论支撑,诠释量子现象的物理本质;波粒二象性作为量子力学的核心准则^[8],贯穿微观原子、微观粒子与宏观电路全尺度物理系统,最终实现各知识点的深度耦合,既为物理学前沿突破提供核心支撑,也为基础物理教学提供了天然的知识串联载体。

基于此,本文以 2025 年诺贝尔物理学奖成果为核心,首先对其核心成果进行解读。其次,解析贯穿

* 基金项目:本文系国家自然科学基金(项目编号:12274132、12374331 和 U23A2075)和上海市教育委员会科研创新计划重大项目(项目编号:2021-01-07-00-08-E00099)的阶段性研究成果。

** 通信作者:吴媛。

其中的核心基础知识点及其内在串联逻辑,厘清各知识点在“微观—宏观”“经典—量子”框架中的定位与关联。最后,以诺奖成果为教学载体,探索基础物理课程的教学策略。通过重构教学逻辑、强化知识关联、衔接前沿成果,精准破解“碎片化讲授”困境,助力学习者打通不同阶段、不同领域的知识壁垒,实现基础物理知识的融会贯通,提升学以致用能力,进而构建系统完整的物理知识体系与跨尺度物理思维。

1 2025 年诺贝尔物理学奖核心成果解读

2025 年诺贝尔物理学奖的核心突破是“在宏观电路中实现量子隧穿与能量量子化”,获奖科学家约翰·克拉克·米歇尔·德沃雷与约翰·马丁尼斯通过精巧的实验设计,打破了量子效应仅存在于微观领域的传统认知,为宏观量子物理的研究与应用奠定了基础。其核心成果可从三个维度通俗解读:

一是超导载体的构建。科学家选用超导材料制作电路,利用超导体在临界温度以下电阻为零、内部形成“库珀对”(电子两两成对形成的集体运动单元)的特性,为量子效应的宏观呈现提供了稳定载体。库珀对的集体运动使得大量粒子能够协同表现出量子特性,而非单个粒子的独立行为,这是宏观量子效应得以观测的关键前提。

二是宏观量子隧穿的实现。在经典力学中,粒子无法穿越能量高于自身的势垒(类似小球无法翻越高于自身动能的斜坡),但在量子世界中,微观粒子具有显著波动性,其运动状态由波函数描述,在一定概率穿透经典力学中无法跨越的势垒,这一现象即为量子隧穿现象。获奖团队通过“超导—绝缘—超导”结构的约瑟夫森结构建势垒,成功观测到超导电路中库珀对整体穿透势垒的宏观隧穿现象,首次在宏观尺度验证了量子隧穿的普适性。

三是能量量子化的观测与应用。量子化的核心是“能量只能取分立的数值”,如同楼梯的台阶只能一级级跨越。获奖团队通过微波光谱技术发现,超导电路的能量状态呈现明显的分立特征,仅能吸收或发射特定频率的微波能量,这与微观原子的能级跃迁规律一致。该成果构建了“人造宏观原子”的实验平台,为超导量子比特的研发提供了核心技术支持,直接推动了超导量子计算、量子传感等前沿领域的发展。

从上述核心成果来看,其本质是基础物理中超导现象、量子隧穿、波粒二象性、能量量子化、电路特性等知识点的系统性整合与前沿突破。下面我们将根据诺贝尔物理学奖的核心成果,梳理其对应基础

物理知识点,补充前沿成果与基础教学的衔接内容,为教学拓展提供支撑。

2 2025 年诺奖中串联的核心基础知识点梳理

围绕 2025 年诺贝尔物理学奖,拆解其对应基础物理知识点,提取与教材精准对接的核心知识点的同时,对基础知识进行前沿扩展,实现“前沿成果与基础认知”的无缝衔接(见图 1)。

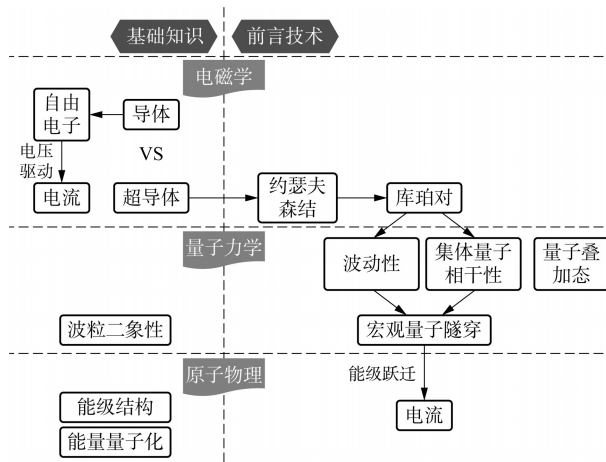


图 1 围绕诺奖的基础知识梳理

2.1 电磁学模块

教材对应:人教版《物理(必修 3)》“电磁感应与电磁波初步”中“超导现象的初步了解”“电路元件的特性与应用”知识。

核心知识点:导体与超导体核心特性对比。

(1) 电阻特性。导体具有一定数值的电阻,电流通过时会产生能量损耗;超导体在临界条件下可以实现零电阻(不存在热损耗)与完全抗磁性(迈斯纳效应)。

(2) 载流子特性。导体内部存在的可以自由移动的电子。载流子在定向移动过程中会与晶格原子、杂质发生碰撞,碰撞产生的阻碍作用表现为电阻。从电磁学规律看,导体的电压与电流遵循欧姆定律。在临界条件下,超导体内部的电子会通过晶格振动的介导形成库珀对。库珀对作为整体在晶格中运动时,不会与晶格原子发生能量交换,因此超导体呈现零电阻特性。

(3) 载体特性。导线作为日常电路的导电载体,遵循经典电磁学规律;约瑟夫森结作为一类非线性超导元件,其电流—电压特性突破经典电阻、电容与电感的响应规律,可在零电压条件下形成无能量损耗的超导隧穿电流。

衔接重点:对比经典导体与超导体的核心特性,

为宏观电路的量子隧穿提供理论基础。

2.2 机械波与光模块

教材对应:人教版《物理(选择性必修1)》“机械波”“光”中“波的反射、折射与衍射”“光的衍射”部分。

核心知识点:波的衍射与一维方形势垒模型对比。

(1) 波的衍射。波遇障碍物或缝隙时绕边缘、穿缝隙传播的经典波动现象,研究对象为宏观经典波(机械波、电磁波),依赖介质或电磁场传播,仅当障碍物或缝隙尺寸与波长相当或更小时衍射明显,属确定性行为,波振动会延伸至障碍物后方,能量仅影响传播强度。

(2) 一维方形势垒。量子力学简化模型,将能量障碍抽象为一维矩形势垒,研究具有波粒二象性的微观粒子,其运动由波函数描述;经典视角下粒子能量低于势垒高度无法穿越,量子视角下波函数会延伸至势垒另一侧,粒子有非零穿越概率,属概率性行为,概率与粒子能量、势垒宽高相关。

衔接重点:以“波的延伸性”为锚点类比二者共性,实现从经典确定性思维到量子概率性思维的转变,搭建经典波动与量子隧穿的理论迁移桥梁,衔接两模块知识点。

2.3 量子力学基础模块

教材对应:人教版《物理(选择性必修3)》“原子结构和波粒二象性”中“粒子的波动性和量子力学的建立”。

核心知识点:波粒二象性与量子隧穿。

(1) 波粒二象性的本质。微观粒子既具有粒子性(动量、能量的离散分布),又具有波动性(干涉、衍射、隧穿),本次诺奖将这一特性拓展至宏观系统。

(2) 量子隧穿的基础模型。一维方形势垒模型,经典物理中粒子无法穿越能量高于自身的势垒,量子力学中因波函数的延伸性,粒子具有非零隧穿概率。

衔接重点:以诺奖级宏观隧穿实验为切入点,破解量子概念的抽象难题,联动波粒二象性基础概念与量子隧穿前沿技术,强化知识点的迁移应用效果。

2.4 原子物理基础模块

教材对应:人教版《物理(选择性必修3)》“原子结构和波粒二象性”中“能量量子化”相关知识。

核心知识点:原子能级结构与约瑟夫森结。

(1) 从能量量子化本质来看,原子中的电子无法在任意能量区间运动,只能处于一系列满足量子数条件的定态能级中,各能级间存在固定的能量差(能级间距)。电子跃迁时吸收或辐射对应频率的能量($\Delta E = h\nu$, h 为普朗克常量, ν 电磁波的频率)。

(2) 在约瑟夫森结(由两个超导体夹一层薄势垒构成)中,两侧超导体中的库珀对分属各自的量子化能级;当势垒层足够薄时,库珀对可借助量子隧穿效应,跨越势垒实现两侧超导体能级差间的跃迁,进而形成无能量损耗的超导电流。

衔接重点:能量量子化是连接原子能级结构与约瑟夫森结的核心物理纽带,两者的联动分析,强化基础知识与前沿技术的有效融合。

2.5 电路基础知识模块

教材对应:人教版《物理(必修3)》“电路及其应用”中“电流的微观解释与宏观量子隧穿”相关知识。

核心知识点:经典隧穿与宏观量子隧穿。

(1) 经典隧穿。经典电路处于常温,电子无集体量子相干性,大量电子的隧穿行为随机叠加,宏观上呈现连续电流;热噪声与散射进一步掩盖了量子效应的离散特性。

(2) 宏观量子隧穿。在临界条件下,约瑟夫森结中的载流子(库珀对)形成集体量子相干态,共享同一波函数、保持固定相位关联,能量变化需通过能级跃迁实现集体协同隧穿。其宏观表现为零电阻、无耗散电流,系统能量受量子约束呈非连续分布。

衔接重点:约瑟夫森节能级量子化是经典物理在介观尺度的拓展,既继承了经典电路的“电荷传输”功能,又展现了微观原子的“量子化特性”,是连接经典与量子的关键桥梁。

2.6 近代物理拓展模块

教材对应:人教版《物理(选择性必修3)》中近代物理拓展部分。

核心知识点:量子叠加态与量子相干性。

(1) 量子叠加态。作为量子系统的基础特性,微观粒子可同时处于多个量子态的线性叠加状态,仅在被测量时才会坍缩至某一确定状态;而宏观物体因易与环境发生相互作用导致退相干,叠加态难以观测。

(2) 量子相干性。量子态保持相干是实现量子调控的前提,若发生快速退相干,宏观量子效应将消失。

衔接重点:结合“薛定谔的猫态”思想实验,阐释量子相干性从微观到宏观尺度的延伸逻辑,对比微观粒子的量子态叠加特性与超导体中库珀对的宏观相干行为,点明“量子态保持相干是实现量子调控的前提”这一核心结论,同时剖析快速退相干对宏观量子效应的破坏机制。

3 诺奖成果融入基础物理教学的实践策略

结合课标要求与诺奖成果特点,可从概念衔接

对比、课标考点联动、认知误区突破以及前沿应用延伸四个维度设计教学策略。其中,概念衔接为考点联动提供认知框架,误区突破为考点建模扫清思维障碍,应用延伸为考点迁移提供价值导向,四大策略层层递进、相互支撑,形成“认知—能力—素养”的完整培养路径。

3.1 概念衔接对比:厘清经典与量子电路核心差异

基于奥苏贝尔“有意义学习”理论,以旧知为认知锚点,对比为解构工具,整合为最终目标,打破“微观量子”与“宏观量子”的知识割裂,不仅呈现对比表象,更深挖本质关联,落实课标“概念建构循序渐进、形成系统物理观念”的要求,帮助学生构建连贯的概念体系,为后续考点联动铺垫认知基础。

根据如图 1 所示的知识梳理,在旧知识激活过程中,首先回顾导体与超导体的核心特性、电流的微观解释、波粒二象性以及原子能级结构等高中物理基础知识,为新知识衔接搭建认知框架。在新知识解构过程中,将导体中自由电子与超导体中库珀对进行类比,强调单个粒子的随机行为和库珀对的集体协同行为所引起的不同的导电机理,以及由此引发的能量量子化现象。最后,将超导特性、波的衍射、波粒二象性、量子隧穿、能级跃迁等知识点串联,让学生明确“宏观量子效应并非否定经典物理,而是在特定条件下的规律延伸”,帮助学生形成“本质统一、场景分化”的量子概念体系,避免知识碎片化。

3.2 课标考点联动:基础考点与前沿科技深度绑定

紧扣课标“知识应用与迁移”核心要求,突破“考点+情境”的表面绑定,深入实现“诺奖情境解构—考点逻辑建模—进阶迁移应用”的三层联动,既强化考点本质理解,又提升学生用物理知识解决前沿情境问题的能力。

在课程实践过程中,我们将以“约瑟夫森结”为核心场景,聚焦量子力学核心考点(波粒二象性、能量量子化)以及与经典电流规律的对比,设计如下综合练习题。

例题 背景:2025 年诺贝尔物理学奖授予约翰·克拉克·米歇尔·H·德沃雷和约翰·马蒂尼斯,表彰他们在“宏观超导电路量子效应”领域的突破性发现。三人团队的核心成果是:利用超导材料构建含约瑟夫森结的电路,使宏观尺度的带电粒子系统呈现量子隧穿与能量量子化特性——超导体中电子形成“库珀对”构成宏观量子态,穿越约瑟夫森结的绝

缘层时,既不遵循经典电路中“能量不足无法跨越壁垒”的规律(量子隧穿),又只能在特定能级间跃迁(能量量子化)。这一发现不仅验证了宏观系统可承载量子效应,更让量子技术从微观实验走向可工程化应用。

(1) 请从量子力学波粒二象性的角度,说明该宏观量子态的库珀对是如何穿越约瑟夫森结的绝缘层实现量子隧穿的。

(2) 对比波的衍射(经典波动)与库珀对量子隧穿(量子波动),从研究对象、障碍属性、行为本质三个维度说明二者核心区别。

(3) 对比经典电路中带电粒子的能量变化规律,结合能量量子化特性,分析约瑟夫森结中产生超导电流(含直流、交流两种情况)需满足的能量条件。

(1) 答题或者讲解要点:

前提:库珀对是整体呈现量子相干性的宏观量子系统,非单个微观粒子(诺奖核心)。

核心:从波粒二象性角度,库珀对作为宏观量子态,其运动遵循量子波函数规律,当绝缘层足够薄时,库珀对通过“波函数相干穿透”实现量子隧穿。

避坑要点:勿用经典“跨越壁垒”解读,隧穿无轨迹,无需外界能量突破势垒。

(2) 答题或者讲解要点:

① 研究对象。波的衍射针对宏观经典波(机械波、电磁波),无粒子性或粒子性可忽略;库珀对量子隧穿针对宏观呈现的微观粒子体系(库珀对),兼具波粒二象性。

② 障碍属性。波的衍射面对的是实体障碍物或缝隙(几何障碍);量子隧穿面对的是能量壁垒(约瑟夫森结绝缘层,一维方形势垒)。

③ 行为本质。波的衍射是经典确定性现象,满足条件必发生,可精确预测传播规律;量子隧穿是量子概率性行为,无法预测单个库珀对是否隧穿,仅能通过波函数计算整体概率。

避坑要点:区分衍射(经典波确定性传播)与隧穿(量子概率行为),二者延伸性同源不同质;分清研究对象与障碍类型(经典波+几何障碍 vs 库珀对+能量势垒),忌“绕过”表述;摒弃经典绝对化思维,明确宏观隧穿需严苛条件,规范使用“波函数延伸”等术语。

(3) 答题或者讲解要点:

核心:对比经典与量子能量规律,分场景明确能量条件。

① 能量规律对比。

经典:能量连续变化,有电压即可形成电流,无能级匹配要求。

量子:能量量子化,仅吸收/释放与能级差匹配的离散能量($\Delta E = h\nu$)。

② 超导电流能量条件。

直流:两侧库珀对能级相等($\Delta E = 0$),无需外加能量,无损耗相干隧穿。

交流:外加电压形成能级差 $\Delta E = 2eU$,且与 $\Delta E = h\nu$ 匹配。外加电压提供的电场能,以离散量子化单元被库珀对吸收,使其从低能级跃迁到高能级;跃迁后库珀对自发释放能量回到低能级,循环往复形成交变超导电流,既遵循能量量子化,又满足能量守恒。

避坑要点:避免遗漏“直流无需能量、交流需能级差匹配”的双场景,二者均受能量量子化约束。明确“能量量子化”是核心约束,而非“电压大小”,即使有外加电压,若能级差不匹配,仍无法形成超导电流(能量过剩会转化为热能,甚至破坏超导态)。

3.3 认知误区突破:夯实量子经典衔接脉络

以建构主义学习理论为支撑,暴露学生的概念偏差,通过诺奖实证情境完成“认知冲突—证伪修正—逻辑重构”的闭环,而非简单纠正,帮助学生建立严谨的物理观念,适配课标“培养科学思维严谨性”的要求。

2025 年诺奖成果的融入过程中,需重点突破三个典型认知误区,实现顺畅衔接。

误区 1:“量子效应只能存在于微观尺度”,结合诺奖实验装置(可手持的宏观电路),说明“只要系统与环境充分隔离(如极低温、低噪声),宏观系统也能呈现量子特性”,打破“微观与宏观的绝对界限”;

误区 2:“超导就是电阻极小的导体”,通过电阻定律对比分析,明确“超导是电阻严格为零,电流无损耗;良导体是电阻极小但非零”,纠正“低电阻=超导”的错误认知;

误区 3:“量子隧穿是粒子‘穿透’势垒的实体运动”,用波的衍射现象类比,说明隧穿是量子波函数的概率性渗透,并非经典力学中的“轨迹运动”,强化“波粒二象性”的核心认知。

通过以上误区澄清,帮助学生构建连贯、严谨的物理知识体系。

3.4 前沿应用延伸:搭建“基础—前沿—应用”认知链

呼应课标“关注物理与科技、社会的联系”要求,突破“仅介绍应用场景”的浅显模式,深入实现“诺奖价值解构—技术应用溯源—创新场景畅想”的三层延伸,让学生理解基础研究与前沿技术的传导路径,激发科学探究兴趣与责任感。

在价值解构方面,2025 年诺奖聚焦基础研究突破,证实宏观系统可呈现量子特性,拓展了量子力学的适用范围,完善宏观量子相干性理论。在技术溯源方面,可以结合超导量子计算的核心需求(高稳定性、可操控性),溯源诺奖成果如何解决量子比特的稳定性问题(从库珀对集体相干性、能量量子化两个角度分析),印证“基础研究是前沿技术源头”。在创新畅想方面,可以引导学生利用直流超导无损耗特性,开展低能耗的量子计算的研究。

4 结 论

2025 年诺贝尔物理学奖的“宏观量子隧穿与能量量子化”成果,为基础物理教育提供了兼具科学性、趣味性与前瞻性的优质教学载体。通过拆解诺奖对应基础物理知识点,既能帮助学生夯实电磁学、量子力学以及原子物理等核心知识点,又能引导其体会“提出问题—建立模型—实验验证—得出结论”的科学研究方法。

在教学实践中,需把握“通俗化不庸俗化、前沿化不超纲化”的原则,聚焦核心概念与基础知识的衔接,通过核心概念拆解、课标对接清单提炼与教学策略设计,既能帮助学生扎实掌握基础规律,又能引导其洞察基础物理对技术革命的核心推动作用,实现知识掌握与核心素养的同步提升,打破“前沿科技与基础教学割裂”的壁垒。未来,随着量子科技的持续发展,诺奖成果将持续为基础物理教育注入活力,助力培养兼具科学素养与创新意识的新时代学习者。

参考文献

- [1] The Royal Swedish Academy of Sciences. The Nobel Prize in Physics 2025[EB/OL]. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/press-release/>.
- [2] 新华社. 科普|让量子现象“肉眼可见”——2025 年诺贝尔物理学奖成果解读[EB/OL]. <http://www.shturl.cc/d49449302c796fc75717eb121ee72653>.
- [3] 胡友秋,程福臻,叶邦角,等. 电磁学[M]. 北京:科学出版社,2025.
- [4] 梁珪涵,时运豪,许凯,范桁. 宏观量子效应与超导量子计算——2025 年诺贝尔物理学奖解读[J]. 物理,2025(11):739—752.
- [5] 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[J]. 中国科学基金,2025(5):782—787.
- [6] 王小力. 量子力学思辨式教学初探[J]. 高等理科教育,2023(2):45—51.
- [7] 王青. 问题驱动式教育在电动力学教学中的实践与探索[J]. 物理通报,2022(8):23—27.
- [8] 曾谨言. 量子力学(卷 1)(第 5 版)[M]. 北京:科学出版社,2013.