

科学前沿融入物理课程教学

——以强场超快光学研究前沿为例

何明睿, 王哲*, 毛振博

海军工程大学基础部, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年11月10日; 录用日期: 2025年12月12日; 发布日期: 2025年12月22日

摘要

强场超快光学是目前极端条件以及精密探测技术研究的前沿热点领域, 取得了大量创新成果。本文以强场超快光学前沿研究, 电子迁移过程的产生与探测设计形成的教学案例为例, 具体说明了案例的内容分析、具体设计与教学实施。本案例可以应用于大学物理量子物理相关章节以及量子力学课程教学中, 为课程的科研前沿案例库建设提供了一种可行的设计思路 and 具体示例。

关键词

大学物理, 强场超快光学, 教学案例

Integrating the Forefront of Science into the Teaching of College Physics Courses

—A Teaching Case Design Based on the Forefront of Strong-Field Ultrafast Optics

Mingrui He, Zhe Wang*, Zhenbo Mao

Department of Basic Courses, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei

Received: November 10, 2025; accepted: December 12, 2025; published: December 22, 2025

Abstract

Strong field ultrafast optics is a cutting-edge hot field in extreme conditions and precision detection technology research, achieving a large number of innovative results. This article takes the cutting-edge research on strong field ultrafast optics, the generation and detection design of electron transfer

*通讯作者。

processes, as an example to illustrate the content analysis, specific design, and implementation process of the case. This case can be applied to the teaching of quantum physics related chapters and can be promoted for use in the teaching of quantum mechanics courses. This article provides a feasible design approach and specific examples for the construction of a cutting-edge case library for scientific research in the course.

Keywords

College Physics, Strong-Field Ultrafast Optics, Teaching Cases

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

超快激光技术的发展,尤其是飞秒、阿秒激光脉冲的出现,为物理学、化学、材料科学、生命科学等科学领域提供了一种具有超高时间、空间分辨率的强大研究工具。使得探测原子、分子结构信息,追踪阿秒时间尺度的物理过程、化学反应过程以及生命过程成为可能。基于超快激光技术的强场超快光学是目前物理学研究的前沿热点领域之一,取得了大量的突破性成果。

与此同时,高等院校课程教学越来越重视课程前沿性与高阶性。例如,2023年8月,教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会编制了《理工科类大学物理课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》),指出了量子科技对国家科技发展的重要性,增加近代物理,特别是量子物理有关理论教学内容[1][2]。量子物理模块A类核心内容增加到15条[1]。

因此,为满足物理课程教学中更高的综合要求和前沿导向,我们将目前精密测量、强场超快光学、高温超导等国家科学研究前沿以案例形式引入课程教学,采用任务驱动式教学,以课程任务驱动学生主动探究。本文以一个基于超快光学研究前沿设计的量子物理教学案例为例,具体说明如何在大学物理课程教学中引入我国科技工作者在“四个面向”战略导向下取得的重大创新成果。这一教学案例,也可引入量子力学课程教学,作为学生课程综合拓展任务。

2. 强场超快探测技术

自世界上第一台激光器研制成功以来,研究者们不断突破极限,提高激光脉冲强度,压缩激光脉冲的时域持续宽度,催生出了强场超快光学这一研究领域。2023年,诺贝尔物理学奖授予皮埃尔·阿戈斯蒂尼(Pierre Agostini)、费伦茨·克劳斯(Ferenc Krausz)和安妮·吕利耶(Anne L'Huillier)三位强场超快科学领域研究者,以表彰他们在阿秒(Attosecond, $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$)持续时间的激光脉冲的产生以及研究物质中电子动力学的实验工作[3]。超短、超强激光脉冲不仅为研究极端条件下的物理现象提供实验条件,也为超高时空精度的精密探测技术提供方法和手段。

微观世界中,原子分子内部的电子的动力学过程,例如电子迁移(Charge Migration),持续时间常常在飞秒(Femtosecond, $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$)至阿秒量级。为捕捉这一超快的动态过程,研究者们就需要使用“快门”极快,也即持续时间为阿秒量级的光脉冲,作为“相机”来“拍照”。

在应用强场超快光学技术进行精密探测这一科研前沿领域,国内外研究者们取得了大量成就[4]-[6]。以案例的形式引入量子物理基础部分的课程教学中,既可以让学

题；还可以引导学生初步体会科学研究的方法和步骤；同时可以激发学生探索科技前沿的兴趣和热情，自然融入课程思政。

3. 教学案例设计

在超快、超强激光脉冲驱动下，几乎所有的多原子分子的激发和电离都会产生价电子的超快动力学过程。中性分子的一个价电子被激发或者电离后，剩余电子会以多个束缚态的叠加态的形式存在，表现为空间上分子的价电子分布随时间不断发生变化。电子迁移的产生和探测相关研究成果，可以设计成为一个融合整个量子物理基础部分知识的课堂教学案例。既可以帮助学生定性地理解波函数的物理图像，同时以具体案例引导学生应用量子力学知识定量分析计算。

电子迁移是分子中的一个典型的纯电子过程。我们以氢分子离子(H_2^+)这一最简单的、超快光学理论研究中常用的模型分子为例。假设一个固定核间距为4个原子单位(Atomic Units, a.u.)的 H_2^+ ，本来处于最稳定的基态，在强激光的作用下，部分被激发到了第一激发态，坐标空间的电子波函数的模随时间会有如图1所示的分布变化。这个过程是如何发生的？如何实现追踪探测？

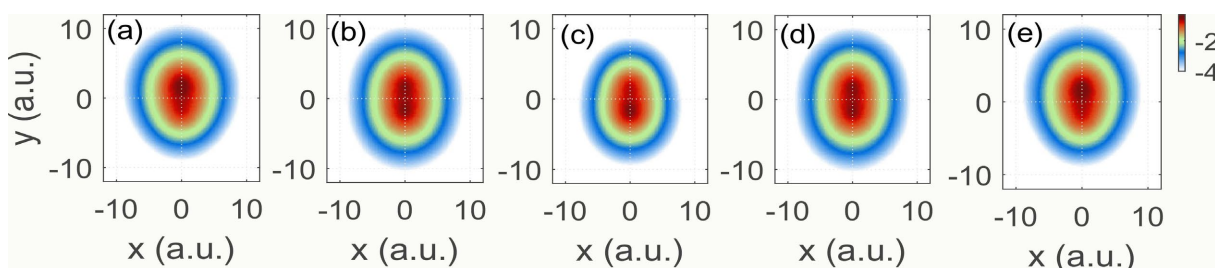


Figure 1. Schematic diagram of the time-dependent distribution of the superposition electron wave function in the coordinate space

图 1. 坐标空间叠加态电子波函数分布随时间变化示意图

3.1. 问题分析

综合应用基本的量子物理知识，就可以解答这两个问题。正常状态下，原子处于最低能级，电子处于基态。对于示例中的 H_2^+ 来说，基态($\psi_1:1s\sigma_g$)能量为 $E_1 = -21.7 \text{ eV} (-0.7963 \text{ a.u.})$ ，第一激发态($\psi_2:2p\sigma_u$)能量为 $E_2 = -17.8 \text{ eV} (-0.6551 \text{ a.u.})$ ，两能级相差能量 $\Delta E = 0.1412 \text{ a.u.}$ [5]。

根据玻尔氢原子理论，利用光子能量 $E = 0.1412 \text{ a.u.}$ 的激光，可以驱动 H_2^+ 基态激发至第一激发态。部分激发的 H_2^+ ，基态与激发态相互叠加，构成叠加态： $\psi(\vec{r}, t) = c_1\psi_1(\vec{r})e^{-iE_1t} + c_2\psi_2(\vec{r})e^{-i(E_2t+\theta_0)}$ 。其中， c_1 和 c_2 分别为 ψ_1 和 ψ_2 的展开系数(满足 $c_1^2 + c_2^2 = 1$)， θ_0 为两个本征态的初始相对相位。实验证实，应用高强度的中心光子能量为 E 的极紫外脉冲激光，可以实现对基态分子的激发，制备叠加态[5]。

除实验制备外，研究中也常通过数值求解含时薛定谔方程，理论模拟激光驱动的基态的激发。数值模拟过程中，将时间演化波函数投影到基态和激发态上，可以追踪基态和激发态的布居情况随时间的变化过程。如图2蓝色曲线所示，选择中心光子能量为 E 的极紫外脉冲，脉冲持续时间10个光周期，激光强度 $5.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ ，数值模拟得到的基态(图2红色曲线)和激发态(图2绿色曲线)布居的时间演化。激光脉冲持续将基态电子泵浦到激发态，基态展开系数减小，激发态展开系数增大。最终，极紫外脉冲结束后，构成的叠加态 $\psi(\vec{r}, t)$ 的展开系数比为 $c_2^2/c_1^2 = 1/2.5$ ，可以形成如图1所示的电子迁移现象，体现为随着时间变化，坐标空间的电子波包概率密度分布极大值不断地从一个原子核迁移到另一个原子核。完成的一个振荡周期所用时间 $\tau = 2\pi/\Delta E = 1.056 \text{ fs}$ 。

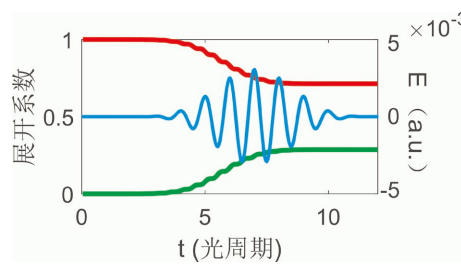


Figure 2. Temporal evolution of the population of the ground state (red curve) and excited state (green curve)

图 2. 基态(红色曲线)与激发态(绿色曲线)布居时间演化图

更进一步地，想要对这样一个超快的分子内部的电子过程进行准确的追踪和探测，就需要具有飞秒量级的精密测量技术，这是目前强场科学领域关注的热点和前沿。应用强激光场驱动的高次谐波，或是阿秒瞬态吸收光谱以及光电子全息成像技术等，都可以实现对电子迁移的有效探测[6] [7]。

总的来说，第一个问题的解答难度中等，学生可以在课上完成定性分析，课后完成定量描述。而第二个问题的解答较难，适宜作为探索和延伸问题，供学生根据学习兴趣，课后主动调研、讨论，更进一步地完成课程论文等。

3.2. 课堂教学设计

在以上问题分析的基础上，对照《基本要求》中量子物理基础部分 15 个 A 类、4 个 B 类教学内容 [1]，我们梳理了学生分析电子迁移的产生和探测过程所涉及的量子物理教学内容，总结了学生需要熟练掌握的分析微观物理现象的相应能力，如表 1 所示。

Table 1. Teaching case alignment with course content and competency requirements

表 1. 教学案例对应教学内容与能力要求表

案例分解	教学内容与能力要求	
	教学内容(类别)	能力要求
基态激发	德布罗意物质波假设(A)	应用波的观点描述电子状态
	玻尔的氢原子模型(A)	开始应用能级和态的概念描述电子 定性描述电子从基态跃迁的过程，定量计算跃迁所需激光波长
	波函数、波函数归一化及其概率解释(A)	应用波函数的统计解释定性描述基态和激发态的电子状态
	薛定谔方程(A)	
	一维无限深势阱(A)	掌握求解不同模型势能的薛定谔方程，解析获得波函数的方法； *应用到其他势能模型中，数值计算不同电子状态的波函数
叠加态演化	一维谐振子(A)	
	波函数、波函数归一化及其概率解释(A)	准确写出叠加态的电子波函数表达式，满足波函数归一化要求 等波函数数学表达式条件
电子迁移过程探测	态叠加原理(A)	
	一维势垒、隧道效应、电子扫描隧道显微镜(A)	应用隧道效应解释隧穿电离现象 *理解隧穿电子携带分子动力学过程信息原理
	薛定谔方程(A)	理解数值求解薛定谔方程的思想；
	力学量与算符、对易关系(A)	*应用实际分子模型，数值求解强激光场驱动下的光电离电子波包时间演化过程和光电子动量谱
	变分方法、氦原子的基态(B)	

表 1 中详细列出了定性解释、定量分析基态激发形成叠加态, 叠加态演化, 以及演化过程探测所需的能力和对应的教学内容。星号(*)标出的部分对学生能力要求较高, 作为学生课外拓展提高问题, 供学生根据兴趣和能力, 在教师提供的参考资料和答疑研讨帮助下尝试解决。

采用任务驱动式教学, 以具体的章节任务牵引学生主动探究。在量子物理章节教学开始前, 通过在线教学平台发布本章任务: “关于电子迁移的产生和探测的研究”, 以及紧密相关的博士论文、中英文论文、Matlab 程序等参考资料, 保证学生在学习和解决本章任务的过程中随时获得有效的科研文献的帮助。

随着课堂教学展开, 在不同节次课程中加入解决本章任务的引导和讨论, 带领学生一步步深入理解整个过程, 并根据个人兴趣主动进行探索和延伸, 让整个量子力学章节教学具有极强的完整性、连贯性。

在德布罗意物质波假设及实验证明的教学中, 引导学生共同探讨光电效应实验, 其物理本质是金属内电子吸收单个光子产生电离, 与束缚在单个原子、分子内的电子产生电离的原理类似。鼓励学生课后阅读电子单光子电离、多光子电离、隧穿电离相关文献, 并小组讨论、主动探究电子的光电离过程。

玻尔氢原子模型教学中, 引导学生应用能级、态和跃迁的概念, 定性描述电子在激光场作用下从基态到激发态的物理过程。并更进一步地定量计算原子、分子中的电子从基态跃迁到不同状态所需用的激光波长。鼓励学生课后主动梳理相关资料, 探究强激光场驱动下的电离率、激发率计算。

波函数教学中, 引导学生从上一次课完成的强激光场驱动下的原子激发态产生出发, 进一步地, 探究激发态与基态形成的叠加态。根据波函数的统计解释, 定性描述基态和激发态的电子状态。应用态叠加原理和波函数的归一化条件, 尝试写出叠加态的电子波函数表达式。

至此, 通过对具体科学研究问题的分析和研讨, 学生基本了解了微观粒子和宏观物体动力学过程的巨大差异, 理解了微观粒子波函数包含了微观粒子的全部信息, 明白了获得微观粒子波函数的重要性。接下来的薛定谔方程、一维无限深势阱、一维谐振子以及氢原子波函数的教学中, 鼓励学生根据求解薛定谔方程获得的不同势能模型波函数的数学表达式, 应用 Matlab 等软件, 模拟波函数概率密度分布情况。并更进一步地应用到其他势能模型中, 数值计算不同模型原子、分子的不同电子态的波函数。

通过本章的完整研讨学习, 学生掌握了处理本章任务: “关于电子迁移的产生和探测的研究” 所需的基本知识。基于提供的求解薛定谔方程 Matlab 程序, 可以实现对二维模型分子基态波函数、激发态波函数的数值求解。激光驱动下的分子内电子的激发、电离则需要学生根据兴趣, 在提供的相关资料的基础上, 结合学习的 Matlab、python、C++ 编程方法编写程序进行计算, 或者学习、应用 Gaussian、Octopus 等计算化学软件, 实现数值模拟。在此基础上, 如何更进一步地实现追踪探测, 需要学生调研大量文献, 进行文献综述。并结合具体的兴趣, 自主展开研究。

3.3. 其他成果融入

不仅仅是这一个案例, 超快物理研究前沿研究中的许多发现和成果都可以引入课堂教学, 拓展学生视野, 培塑学生勤于思考, 敢于质疑, 善于钻研的创新研究精神。

例如光电效应实验, 课堂教学中, 我们简化了对实验现象的讲解, 并做了拓展延伸: 怎么理解光电离是“瞬时”发生的? 它是否需要时间? 引导学生思考, 对事件发生所需时间的观察, 需要精确的“钟表”。随着强场超快技术的发展, 2010 年, 研究者们发现氪原子 2s 轨道电子和 2p 轨道电子的发射时间相差 21 as [8]。2020 年, 研究者们发现, 液态水中的光电发射相比于气态水, 有约 50~70 as 的时间延迟 [9]。这些研究说明, 光电效应需要一定的时间, 但是这个时间太快了, 寻常的“钟表”无法捕捉到。

另一个例子是在玻尔氢原子模型教学中, 引导学生思考: 跃迁只能是吸收一个光子发生的吗? 是否可以吸收同时吸收多个光子? 更进一步地, 脱离原子核的束缚, 只能通过跃迁的方式吗? 强场物理研究

发现,单光子的电离和激发发生在激光强度较低的情况下。1961年,实验证实了双光子激发;1965年,实验发现电子的多光子电离,所需激光强度大约是 10^{13} W/cm^2 [10]。随着激光强度的进一步增大,原子的库伦势能一侧被压低,形成势垒,电子可以通过隧穿的方式到达势垒外,发生电离。目前强场物理研究所用的激光强度很容易使电子发生隧穿电离。对隧穿电离和随后的一系列过程的研究,构成了强场物理的重要研究内容。

通过这一延伸问题,可以让学生对1887年发现的光电效应、1913年玻尔建立的氢原子理论等内容有更深入的理解和认识,感受现代科学在百年时间里,在不断挑战旧有认知,挑战极限尺度的道路上进行的艰辛探索和取得的累累硕果。

4. 结语

我们将超快物理研究前沿问题——电子迁移过程的产生与探测,设计提炼成为课程教学案例,融入量子物理章节教学中。基于本案例,建立了可推广应用的教学案例设计通用框架。选择我国科技工作者在“四个面向”战略导向下取得的重大创新成果,对照《基本要求》中的教学内容与能力要求,将科研前沿成果进行分解,并映射到具体的知识点和能力需求。设计形成核心章节任务,引导学生自主探究,达成知识掌握和能力提升的目标。除本案例之外,物理科学研究的许多前沿问题,例如“引力波探测”、“阿秒脉冲的产生与探测”等,都可以按照这一框架设计成为教学案例,通过恰当的方式融入光的干涉等章节课程教学中,有效提升课程的高阶性、前沿性和挑战度。

基金项目

本研究在国家自然科学基金项目(基金号:12204545),以及海军工程大学教学改革项目、教学成果培育项目(项目号:NUE2024TA14)支持下完成。

参考文献

- [1] 教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会编制. 理工科类大学物理课程教学基本要求理工科类大学物理实验课程教学基本要求(2023年版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2023.
- [2] 贾瑜, 王炜. 2023年版《理工科类大学物理课程教学基本要求》内容细化修订解读[J]. 物理与工程, 2024, 34(1): 3-10.
- [3] 胡茜婕, 刘阳阳, 张金伟. 2023 诺贝尔物理学奖解读[J]. 现代物理知识, 2023, 35(6): 38-48.
- [4] Driver, T., Mountney, M., Wang, J., Ortmann, L., Al-Haddad, A., Berrah, N., *et al.* (2024) Attosecond Delays in X-Ray Molecular Ionization. *Nature*, **632**, 762-767. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07771-9>
- [5] He, M., Li, Y., Zhou, Y., Li, M., Cao, W. and Lu, P. (2018) Direct Visualization of Valence Electron Motion Using Strong-Field Photoelectron Holography. *Physical Review Letters*, **120**, Article ID: 133204. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.133204>
- [6] Tan, J., Xu, S., Han, X., Zhou, Y., Li, M., Cao, W., *et al.* (2021) Resolving and Weighing the Quantum Orbits in Strong-Field Tunneling Ionization. *Advanced Photonics*, **3**, Article ID: 035001. <https://doi.org/10.1117/1.ap.3.3.035001>
- [7] Kraus, P.M., Mignolet, B., Baykusheva, D., Rupenyan, A., Horný, L., Penka, E.F., *et al.* (2015) Measurement and Laser Control of Attosecond Charge Migration in Ionized Iodoacetylene. *Science*, **350**, 790-795. <https://doi.org/10.1126/science.aab2160>
- [8] Schultze, M., Fieß, M., Karpowicz, N., Gagnon, J., Korbman, M., Hofstetter, M., *et al.* (2010) Delay in Photoemission. *Science*, **328**, 1658-1662. <https://doi.org/10.1126/science.1189401>
- [9] Jordan, I., Huppert, M., Rattenbacher, D., Peper, M., Jelovina, D., Perry, C., *et al.* (2020) Attosecond Spectroscopy of Liquid Water. *Science*, **369**, 974-979. <https://doi.org/10.1126/science.abb0979>
- [10] Voronov, G. and Delone, N. (1965) Ionization of the Xenon Atom by the Electric Field of Ruby Laser Emission. *JETP Letters*, **1**, 66-68.