

浅析原子的能级教学

丁汉芹

新疆大学物理科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年7月6日; 录用日期: 2025年8月7日; 发布日期: 2025年8月14日

摘要

能级概念是原子物理学课程的“基石”，是原子物理学教学的核心内容之一。论文从教学目标、教学重难点、教学内容、教学方法和教学评估与反馈五个方面阐述了能级的教学策略。研究内容有助于学生理解量子化的精髓，帮助学生构建原子能级的认知框架。

关键词

原子物理学, 能级, 量子化, 教学

A Brief Analysis of Atomic Energy Level Teaching

Hanqin Ding

School of Physical Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang

Received: Jul. 6th, 2025; accepted: Aug. 7th, 2025; published: Aug. 14th, 2025

Abstract

The concept of energy levels is the “cornerstone” of atomic physics courses and one of the core contents of atomic physics teaching. This paper expounds the teaching strategies of energy levels from five aspects: teaching objectives, key and difficult points of teaching, teaching content, teaching methods, and teaching evaluation and feedback. The research content helps students understand the essence of quantization and assists them in building a cognitive framework at the atomic energy level.

Keywords

Atomic Physics, Energy Level, Quantum, Teaching



1. 引言

在原子物理学中，与经典物理学不同的第一个概念是能量的量子化。20 世纪初，物理学领域经历了一场革命性的变革，量子概念首先从电磁辐射能量问题上突破的[1]。普朗克为了克服经典理论解释黑体辐射规律的困难，提出了能量子概念，为探索微观世界开辟了新的道路。能量子假设是量子物理学发展的重要里程碑，它彻底改变了人们对微观世界的认识，为量子物理学的诞生奠定了基础。爱因斯坦针对光电效应实验与经典理论的矛盾，提出了光量子假设，并应用能量子概念成功解释了固体比热与温度的关系[2]，为量子理论的进一步发展打开了局面。玻尔在卢瑟福的原子核式模型的基础上，进一步把量子概念带进原子，应用能级和跃迁概念，解释了原子的稳定性和氢原子光谱的规律性。玻尔理论作为由经典力学向量子力学过渡的一个桥梁，为量子力学的建立打下了基础。

原子物理学中的能级概念是理解微观世界行为的核心框架，其重要性体现在以下多个层面，贯穿基础理论与实际应用。能级概念是原子物理学的“基石”，它不仅统一了微观粒子的量子行为，还为光谱学、量子力学和半导体技术等领域提供了理论框架。从解释原子稳定性到驱动激光革命，从揭示化学本质到探索宇宙演化，能级概念始终是连接理论预测与实验观察、基础研究与技术应用的桥梁。能级是指原子系统能量量子化的形象化表示，是《原子物理学》教学的核心内容之一[3]，它涉及原子的能量状态、光谱规律以及量子力学的基本概念。近些年来，原子物理学中关于能级、原子模型等核心主题在课程思政融合、教学模式创新、技术应用等方面取得显著进展[4]-[6]，但仍存在理论深度不足、跨学科衔接薄弱、学生认知障碍研究缺乏等局限。例如，学生常误认为将能级跃迁类比为“阶梯跳跃”、电子跃迁是确定性过程，而非概率性事件。笔者多年从事《原子物理学》的教学，对能级教学设计以下内容，涵盖教学目标、教学重难点、教学内容、教学方法和教学评估与反馈五个方面，旨在帮助学生逐步构建对原子能级的认知框架。

2. 教学目标

能级的教学目标需实现“知识 - 能力 - 情感”的有机统一。通过能级概念与规律的学习，构建量子化思维框架；通过实验探究与跨学科联系，培养问题解决能力与创新意识；通过科学史与科技应用案例，深化对科学本质的理解。最终使学生不仅能“解释能级是什么”，更能“运用能级思维探索未知世界”，为后续学习量子力学、固体物理等课程奠定基础。

一、知识目标

(一) 掌握能级的基本概念

理解原子能级的定义：电子在原子核周围不同轨道上具有的离散能量状态。区分能级与能层的关系，明确能级是能层的细分。认识能级的量子化特征：能量不连续，仅取特定值。

(二) 理解能级的形成机制

掌握玻尔模型的核心假设：定态假设、跃迁假设、角动量量子化。理解量子力学对能级的解释：通过薛定谔方程求解氢原子波函数，得到能量本征值与量子数的关系。认识多电子原子中能级的分裂：由于电子间相互作用和屏蔽效应，能级进一步细分。

(三) 熟悉能级的应用规律

掌握能级跃迁的条件：光子吸收/发射时能量满足 $E_m - E_n = h\nu$ 。理解能级图的作用：通过能级图分析原子光谱(如氢原子巴尔末系、莱曼系)。认识能级在激光、X 射线、核磁共振等领域的应用原理。

二、能力目标

(一) 科学思维与建模能力

能够运用玻尔模型或量子力学模型解释简单原子的能级结构。通过类比(如阶梯模型)理解能级的离散性与跃迁过程。培养批判性思维：对比经典理论与量子理论的差异，理解科学理论的演进。

(二) 数据分析与问题解决能力

根据能级公式计算电子跃迁的能量、波长或频率(如氢原子能级公式 $E_n = -13.6/n^2 \text{ eV}$)。分析原子光谱数据，推断能级结构或跃迁路径。解决实际问题：如计算激光发射波长、设计光谱实验参数。

(三) 跨学科联系能力

联系化学：理解元素周期表中电子排布与能级的关系。联系材料科学：认识能级对半导体、导体导电的影响。联系天体物理：分析恒星光谱中的能级跃迁信息。

三、情感目标

(一) 激发科学探索兴趣

通过原子能级的微观世界与宏观现象的联系(如霓虹灯、火焰颜色)，感受物理学的美感。了解能级研究的历史(如玻尔的贡献)，培养对科学家的敬仰与探索精神。激发学生对微观世界的好奇心和探索欲，培养学生对物理学科的学习兴趣[7]。

(二) 培养科学态度与责任感

能级概念本身蕴含着量子化、离散性、概率性等反直觉的物理思想，而科学态度(如批判性思维、创新思维等)则是学生理解这些抽象概念、解决复杂问题的关键。强调实验验证的重要性：如弗兰克-赫兹实验对能级存在的证实。认识能级技术对社会的双刃剑效应(如核能利用的伦理问题)，树立科技应用的责任感。

(三) 促进终身学习意识

理解能级理论是现代物理学的基础(如量子计算、纳米技术)，激发持续学习的动力；鼓励通过文献阅读、模拟软件(如 PhET 交互式物理模拟)深化理解。能级教学不仅是知识传授的过程，更是科学思维培养的沃土。通过情感目标教学，学生能够从被动接受知识转变为主动探索规律，形成终身学习的意识[8]。

3. 教学重难点

一、教学重点

理解能级的量子化本质和掌握能级跃迁的规律。具体包含氢原子光谱的谱线系公式、玻尔半径及氢原子的量子化能级、玻尔的氢原子理论。这些内容是理解原子能级结构的基础，也是后续学习量子力学和原子光谱分析的重要前提。

(一) 能级的基本概念与量子化特征

能级的定义(电子在原子中的离散能量状态)及其与能层(K、L、M、...)、能级(s、p、d、...)的关系。量子化条件：能量不连续，仅取某些特定值。

(二) 能级的形成机制与理论模型

玻尔模型的三大假设(定态、跃迁、角动量量子化)及其局限性。量子力学对能级的解释：薛定谔方程求解氢原子波函数，得到能量本征值与量子数(n, l, m)的关系。

(三) 能级跃迁与光谱分析

跃迁条件：光子吸收/发射时能量满足 $\Delta E = h\nu$ 。光谱线的分类(如氢原子的巴尔末系、莱曼系)及其与能级的关系。

二、教学难点

电子的椭圆轨道和氢原子能量的相对论效应，较高的激发电势的测定，对量子跃迁概念的理解，如何引导学生正确理解能级的不连续性以及量子跃迁的概率问题。

(一) 量子力学概念的抽象性

量子态等概念缺乏直观对应，学生难以理解“电子无确定轨道”的含义。泡利不相容原理、洪德规则对能级填充顺序的影响。不确定原理与能级宽度的关联。

(二) 能级跃迁的数学计算与物理意义

跃迁概率、选择定则(如 $\Delta l = \pm 1$)的数学表达与物理图像。类氢体系(如氢离子和碱金属原子)的光谱分析。

(三) 能级与宏观现象的联系

理解能级如何决定材料的导电性、光学性质等宏观特性。认识能级技术在激光、核磁共振等领域的应用原理。

4. 教学内容

(一) 氢原子光谱的实验规律

介绍氢原子光谱的线状特征，以及巴尔末系、莱曼系等光谱线系的规律。通过实验观察，引导学生理解光谱是研究原子结构的重要途径。19世纪末期，光谱学得到了长足的发展。为了描述氢原子光谱的规律，巴耳末和里德伯分别提出了巴耳末公式和里德伯公式。卢瑟福原子结构的行星模型虽然成功地解释了 α 粒子散射实验，但无法解释原子的稳定性和原子的明线光谱现象，特别是无法解释为什么电子在绕核运动的过程中不会因辐射能量而坠入原子核。这一局限性促使科学家们进一步探索新的原子结构理论。玻尔在深入研究氢原子光谱的过程中，发现氢原子光谱具有线状特征，即光谱线是由一系列不连续的频率组成的。

(二) 玻尔氢原子理论

氢原子谱线与经典物理学的连续性相矛盾，促使玻尔思考如何用量子化的概念来解释这一现象。详细讲解玻尔的基本假设，包括定态假设、跃迁规则和角动量量子化条件。推导玻尔半径及氢原子的量子化能级公式，解释氢原子光谱的产生机制。通过对比经典理论与量子理论的预测结果，强调量子理论在解释微观现象中的必要性。玻尔模型主要包括以下几个概念和假设：(1) 定态假设。原子中的电子可在一些特定的轨道上运动而不产生电磁辐射，具有一定能量的原子处于稳定的量子态(简称定态)；(2) 跃迁规则。当原子从高能定态跃迁到低能定态时，即电子从能量高的轨道跃迁到能量低的轨道上时，要向外发射一定频率的光子。

(三) 实验验证

玻尔理论的正确性很快被光谱实验和弗兰克-赫兹实验所验证。玻尔理论的要点是原子内部存在稳定的量子态，电子在不同量子态之间跃迁时，会伴随电磁波的发射或吸收。光谱实验就是从电磁发射或吸收的分立特征证明量子态的存在。弗兰克-赫兹实验则是用电子束激发原子，如果原子只能处于某些分立的能级(量子态)，那么实验会显示只有特定能量的电子才能引起原子的激发。弗兰克-赫兹实验表明，原子激发需要的能量不是任意的，而是选择性地吸收，实验证实了原子能级的存在。玻尔的原子理论是物理学史上的一次重要革命，推动了量子力学的发展，并为其他科学领域提供了重要的理论支持。尽管如此，玻尔理论也存在局限性，逐渐被完善的量子理论所修正。

5. 教学方法

(一) 讲授法

通过清晰、准确的讲解，向学生传授能级和量子跃迁的基本概念、原理和规律，使学生对本节课的知识有一个系统的认识。指导学生绘制氢原子能级图，标注主要能级跃迁过程。结合具体问题，训练学生判断跃迁类型、计算光子能量及频率的能力。深化难点剖析与对策，设计创新教学活动，强化对能级不连续性和量子跃迁概率的理解(见下面“跃迁的概率性”教学难点突破方案)。

“跃迁的概率性”教学难点突破方案

一、学生认知困惑的根源分析

基于量子理论的教学难点，学生理解“跃迁的概率性”时普遍存在以下认知障碍：

经典物理思维定式：学生习惯于用“确定性”描述物理过程，难以接受微观粒子行为具有内在随机性。例如，学生常误认为“电子从高能级跃迁到低能级是必然事件”，而非概率性事件。

概率概念的抽象性：量子跃迁的概率性与经典概率(如掷骰子)有本质区别，学生难以将“波函数坍缩”“矩阵元”等数学工具与物理现象建立直观联系。

能级模型的简化误导：传统教学中常用“阶梯”或“轨道”类比能级，但这种静态模型掩盖了跃迁的动态随机性，导致学生误认为“电子在能级间跳跃是连续的、可预测的”。

实验现象的间接性：弗兰克-赫兹实验中电流周期性下降的现象需通过概率统计解释，但学生缺乏对“大量原子行为统计规律”的直观体验。

二、创新教学活动设计

基于“概率可视化”的探究式实验，通过虚拟实验与实物操作结合，帮助学生建立“跃迁概率”的物理图像，活动流程如下。

(1) 引入阶段：从经典到量子的认知冲突

• 教师引导语：

“假设我们有一个装满弹珠的盒子，弹珠从高处滚落时，是否一定会落入下方的某个固定凹槽？如果将弹珠换成电子，凹槽换成能级，结果会如何？”

“经典物理认为电子跃迁是确定的，但量子力学告诉我们，跃迁是概率性的。今天我们将通过实验验证这一观点。”

• 预期反应：学生可能提出“电子跃迁是否受外界控制”“概率是否意味着完全随机”等问题。

• 应对策略：用“掷骰子”类比概率性，但必须强调量子概率的内在性(由波函数决定)，而不是外部随机因素。

(2) 虚拟实验：概率分布的可视化

学生调节加速电压(0~60 V)，观察单个电子与氩原子的碰撞结果(跃迁/未跃迁)。重复实验 100 次，统计不同电压下跃迁成功的次数，绘制概率分布曲线。修改参数(如灯丝电压、拒斥电压)，观察曲线变化。

• 教师引导语：“尝试将实验重复次数从 10 次增加到 1000 次，概率分布是否更接近理论值？”

• 应对策略：强调“统计规律需大量样本”，类比“抛硬币 10 次可能 7 次正 3 次反，但 1000 次时正反面比例接近 50%”。

(3) 实物实验：概率的宏观验证

分组完成弗兰克-赫兹实验，记录 I-V 曲线并计算第一激发电位。

• 教师引导语：“为什么电流下降点对应的是跃迁概率最大的电压？如何从实验数据中提取概率信息？”

• 预期反应：学生可能因加热温度不足、电压调节过快导致数据模糊。

- 应对策略：引导学生通过“平滑滤波”处理数据，模拟统计平均效果。

(4) 深化讨论：概率与能级的关系

- 讨论：

“跃迁概率与能级差有何关系？为什么第二激发电位的跃迁概率通常低于第一激发电位？”

- 教师引导语：

“结合玻尔模型，能量高于激发电位的电子是否一定引发跃迁？概率与能量过剩部分有何关联？”

- 预期反应：学生可能误认为“能量越高，跃迁概率越大”。

- 应对策略：

类比“射门成功率”：球员离球门越近(能量越接近阈值)，进球概率越高；但离球门过远(能量过高)时，射门可能偏出。

(二) 演示法

利用多媒体课件、动画等手段，直观地展示氢原子的能级结构、量子跃迁的过程等，帮助学生更好地理解抽象的物理概念和现象。**直观化教学工具**类比模型：能级如阶梯，电子只能“站在”台阶上(离散能量)；能层如大楼楼层，能级如每层的房间(s、p、d、f)。利用可视化软件展示氢原子能级分布、电子概率云及跃迁过程，模拟不同元素的光谱线、对比实验数据。

(三) 讨论法

组织学生进行小组讨论，鼓励学生积极思考、发表自己的观点和见解。在讨论过程中，教师引导学生分析问题、解决问题，加深对知识的理解和掌握。例如，可以讨论“为什么电子不能随意跃迁？”，“能级的不连续性对原子光谱有何影响？”等问题。安排适量的课堂讨论作业，让学生通过练习巩固所学知识，提高运用知识解决问题的能力。在讨论过程中，教师及时反馈学生的学习情况，针对学生存在的问题进行有针对性的答疑。

6. 教学评估与反馈

(一) 课堂表现评估：

通过观察学生在课堂上的表现，如注意力集中程度、参与讨论的积极性、回答问题的准确性等，通过“为什么电子不能吸收任意能量的光子？”等问题检测理解，评估学生对能级教学内容的掌握情况。

(二) 作业与测试评估：

通过批改学生的作业和测试卷，了解学生对能级概念、公式和计算方法的掌握程度。考查能级公式与光谱公式的应用，如计算氢原子 $n=4 \rightarrow n=2$ 跃迁的波长。针对学生普遍存在的问题进行集中讲解和辅导。

(三) 学生反馈收集：

定期收集学生对能级教学的反馈意见，了解学生在学习过程中遇到的困难和问题。根据作业错误率针对性复习难点，如选择定则、能级交错等。根据学生的反馈意见调整教学策略和方法，提高教学效果。

这里我们围绕“弗兰克-赫兹实验”这一验证能级存在的关键实验，展示如何运用本文提出的五环策略进行一堂课的完整设计，将抽象的“能级”具象化。

弗兰克-赫兹实验教学案例

一、教学目标

【知识目标】

- 1、理解原子能级、量子化跃迁等核心概念，掌握弗兰克-赫兹实验原理。

2、能通过实验数据计算氩原子的第一激发电位，验证能级存在。

【能力目标】

- 1、掌握实验仪器操作与数据处理方法，提升科学探究与误差分析能力。
- 2、通过模拟软件操作，培养虚拟实验设计与问题解决能力。

【情感目标】

- 1、激发对微观世界探索的兴趣，体会科学理论验证的严谨性。
- 2、通过团队协作完成实验，增强沟通与协作意识。

二、教学重难点

【重点】

- 1、实验原理：电子与原子碰撞的能量转移机制，能级跃迁条件。
- 2、实验操作：仪器连接、参数调节、数据采集与图像分析。

【难点】

- 1、理解“非弹性碰撞导致能级跃迁”的微观过程。
- 2、实验误差分析：温度、电压参数对图像清晰度的影响。

三、教学方法

提问、讲授、讨论、演示等相结合。

四、教学内容

提问导入：

问题 1，“经典物理如何解释原子吸收/发射光谱的离散性？”

问题 2，“玻尔理论中‘定态’与‘跃迁’的核心矛盾是什么？”

讨论：结合历史背景(1914 年弗兰克 - 赫兹实验与玻尔理论的冲突)，引出实验对量子理论的验证意义。

原理讲解

核心机制：电子在加速电场中能量增加，与氩原子碰撞时发生弹性/非弹性碰撞。当电子能量 $\geq$ 第一激发电位(11.5 V)时，能量被原子吸收，电子无法克服拒斥电压，电流骤降。

图像分析：展示典型 I-V 曲线，标注峰谷值对应能级跃迁。

提问：“为什么相邻峰间距相等？若电压参数不当，图像可能如何变化？”

模拟软件操作

软件功能：虚拟搭建 F-H 管，调节灯丝电压、加速电压、拒斥电压等参数。实时观察 I-V 曲线变化，模拟不同条件下的实验现象。

讨论题：“若实验中未出现周期性峰谷，可能由哪些因素导致？”“如何通过调节参数优化图像清晰度？”

实物实验操作

使用真实 F-H 管，按模拟软件优化后的参数进行实验。记录数据并绘制 I-V 曲线，计算第一激发电位(与标准值 11.5 V 对比)。

五、教学评估与反馈

1、形成性评价

- 课堂提问：能否解释“电流骤降对应能级跃迁？”“能否分析参数不当导致的图像异常？”
- 小组讨论：评估学生对误差来源的识别能力(如温度波动、电压漂移)。

2、总结性评价

- 实验报告评分细则(见表 1)。

Table 1. Scoring criteria for experimental reports
表 1. 实验报告评分细则

评价维度	评分标准(满分 10 分)
数据记录	完整、无遗漏(3 分)
图像分析	峰谷标注准确, 激发电位计算误差 < 5% (4 分)
误差讨论	能提出 2 种以上合理误差来源(2 分)
团队协作	分工明确, 沟通高效(1 分)

- 模拟软件操作考核: 能否在 10 分钟内通过调节参数获得清晰 I-V 曲线。

3、反馈与改进

针对学生普遍疑问(如“第二激发电位峰为何更弱?”), 补充碰撞概率与能量分配的微观解释。
对操作困难的学生提供个性化指导, 强化仪器使用规范。

7. 总结

在原子物理学中, 原子能级概念的教学需要兼顾抽象理论的直观化、数学描述的渐进性以及实验现象的关联性。通过类比、模拟和实验将抽象概念具象化。以核心问题串联知识点, 培养科学思维。通过讨论、演示和任务设计提升参与度。通过以上方法, 学生可系统掌握原子能级的核心概念, 理解其从理论到应用的科学逻辑, 为后续学习量子力学、固体物理等课程奠定基础。

基金项目

本论文受 2023 年度自治区高校本科教育教学研究和改革项目资助(XJGXPTJG-202314)。

参考文献

[1] 周世勋. 量子力学教程[M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
[2] 黄昆. 固体物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.
[3] 诸圣麟. 原子物理学[M]. 第 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2010.
[4] 杨宁选, 王锐, 范婷, 张岩文. 思政元素融入原子物理学课程教学策略探究[J]. 物理通报, 2024(1): 69-73.
[5] 林志忠. 验证原子能级量子化的里程碑: 弗兰克-赫兹实验[J]. 物理, 2024, 53(7): 496-500.
[6] 李博. 研讨式教学模式在“原子物理学”教学中的探索[J]. 教育教学论坛, 2023(9): 149-152.
[7] 穆良柱. 物理课程思政教育的核心是科学认知能力培养[J]. 物理与工程, 2021, 31(2): 9-15.
[8] 丁汉芹, 欧阳方平. 原子物理学的课程思政教学[J]. 教育进展, 2024, 14(3): 261-265.