

“思维导向”引领下的“原子物理学” 教学改革研究

李 芬 孙小香 李 昶 罗 良

湖南理工大学物理与电子科学学院，岳阳

摘 要 | 针对“原子物理学”公式繁多、概念抽象、逻辑体系不强的特点，本文以费曼“理解物理意义优于正规解方程”的教学理念和物理教育研究（PER）的实证结论为依据，提出“概念优先—图像先行—实验/历史矛盾驱动—可量化过程评价”的课程重构方案。通过黑体辐射、 α 粒子散射、氢原子光谱等核心节点的教学重组，将教学重点从演算流程转向模型建立、判据选择、证据检验与边界意义阐释，并结合讨论式课堂、概念测试与虚拟仿真等教学手段，使学生建立清晰的量子化直觉与批判性探究能力。教学实践结果表明，该方案能有效增进学生对物理概念的理解，提升科学思维品质。

关键词 | 原子物理教学；概念优先；物理图像；科学思维

Copyright © 2026 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



1 引言

“原子物理学”是连接经典物理与量子力学的重要基础课程，也是物理类专业学生系统接触微观世界的第一门系统课程。该课程具有鲜明的特点：以一系列关键实验（黑体辐射、 α 散射、弗兰克—赫兹实验、斯特恩—盖拉赫实验等）为起点，逐步建立量子化、波粒二象性、不确定关系等颠覆经典直觉的新概念。然而，在长期的教学实践中，许多教师将大量课时花费在数学推导上，从普朗克公式推导中涉及的腔模密度积分，到氢原子薛定谔方程分离变量求解，再到微扰理论处理塞曼效应。这种“推导导向”的教学模式保证了逻辑的严密

性，往往使学生陷入“只见树木不见森林”的困境：学生能够熟练地写出公式，却无法回答“为什么要引入量子化”“这个模型的适用边界在哪里”“如果某个参数趋于极端，物理图像会发生什么变化”等根本性问题。

费曼在《The Feynman Lectures on Physics》中强调，真实物理问题往往复杂到难以直接“解方程推进”，真正的物理解释往往是“能在不解出严格解的情况下判断解的行为特征”。^[1]这句话精准地揭示了物理教育的核心理想：培养学生对物理图像的分析判断力，而非仅是公式的运算能力。然而，颇具深意的是，费曼本人在加州理工学院的本科教学授课实践中恰恰遭遇了挫折。

基金项目：湖南省普通高等学校教学改革研究项目（项目编号：202401001150）。

作者简介：李芬，湖南理工学院物理与电子科学学院，副教授，博士，研究方向：锂离子电池；孙小香，湖南理工学院物理与电子科学学院，副教授，博士，研究方向：有机太阳能电池；李昶，湖南理工学院物理与电子科学学院，副教授，博士，研究方向：半导体纳米材料；罗良，湖南理工学院物理与电子科学学院，副教授，博士，研究方向：纳米材料。

文章引用：李芬，孙小香，李昶，等. “思维导向”引领下的“原子物理学”教学改革研究[J]. 教育研讨，2026，8（7）：755–759.

<https://doi.org/10.35534/es.0807132>

这套讲义深受教师和研究生推崇，却让相当数量的本科生感到难以跟上授课思路。费曼后来反思道：“我不认为我在教学上做得很成功。”这一事实并未否认其教学理念的价值，反而揭示了一个更深刻的课题：高水平的物理思想必须经过“教学转化”，才能有效传递给初学者。费曼的授课“失败”，在于将深刻的见解以他本人习惯的高度浓缩方式呈现，而未充分考虑到学生的认知起点和思维过渡需求。这正是本文教学改革方案试图回应的核心问题：本文认同费曼关于“物理解解”的目标（判断力优先于运算力），但主张通过“概念与图像先行”“推导分层”“历史—实验矛盾当引擎”等具体策略实现这一目标，而非简单地将高维思想直接倾倒在给学生。换言之，费曼明确了“教什么”的方向，而本文致力于探索“怎么教”的路径。此外，相关研究也表明，学生在量子概念上的学习困难，很大程度上源于“记住了公式，却建不起对应的物理模型与边界条件意义”。^[2]因此，原子物理教学应从“推导导向”转向“思维导向”，着力培养学生的物理学家式思维方式。^[3, 4]

在此背景下，本文提出一套系统的教学改革路径。核心思路是：在保障课程科学性的前提下，重新组织教学内容，将教学重心从“如何推导”转移到“为什么这样建模”“如何判断模型的合理性”“实验结果如何迫使理论更新”等科学思维培育层面，并通过具体的教学案例印证该方案的可行性。

2 理论框架

使“培养物理学家思维方式”这一目标落到实处，首先需要将其转化为可操作的教学目标。基于对原子物理发展史的学习和对物理学家工作模式的观察，将物理学家思维方式的核心总结为一套科学思维的“操作链”：现象/实验事实→矛盾（与旧模型冲突）→关键简化假设（新模型）→可检验推论→新概念固化（并标记适用范围）。这套操作链在原子物理课堂教学的每一次重大进展中，都完整遵循该思维链条。例如，黑体辐射实验结果与经典能量均分定理的矛盾，催生了普朗克的能量量子化假设； α 粒子大角散射的实验事实与汤姆逊“葡萄干布丁”模型的冲突，迫使卢瑟福提出核式结构模型；氢原子光谱的规律性（巴尔末系）与经典电磁理论（加速电子应连续辐射）的矛盾，推动玻尔提出定态跃迁假设。

具体到原子物理课堂教学中，特别强调以下三种“方法习惯”的内化。

（1）量级与尺度判断：学会判断何时经典参数失效（如作用量接近普朗克常数 h 的量级时）、何种条件下可做近似（如高激发态可用玻尔对应原理），以及“数量级论证”如何取代繁琐计算。

（2）模型迭代观：理解科学理论不是静态的“正

确答案”，而是在不断被实验挑战中演进。汤姆逊模型→卢瑟福模型→玻尔模型→索末菲模型→海森堡矩阵力学/薛定谔波动力学，每一次更迭都不是简单的“换公式”，而是基本假设（如轨道的存在与否）的根本性变革。

（3）物理思维观：养成追问“量纲对不对？”“极限情况能否回到经典？”“可观测量是什么？”“计算结果与实验的直接联系是什么？”的习惯。这些追问的方式，构成了物理学家思考问题时共享的“思维公约”。但是，“适度降低数学门槛”并不等于放弃严谨。物理学的严谨应体现为前提透明、适用范围清晰、与实验对接方式可追溯，这正是物理学家看重的严谨标准。与此相对，部分为了形式完美而忽略物理底层逻辑的推导，反而容易让学生形成“假性理解”。

3 教学重构的四条原则

基于上述理论框架，本文提出原子物理教学重构的四条基本原则。

（1）概念与图像先行。在开展数学推导前，先用自然语言、类比、图示或动画等形式，帮助学生建立清晰的物理图像。例如，在引入能量量子化前，先让学生直观感受“连续能量假设”与“离散能量假设”在宏观世界与微观世界的不同表现；在讲解波函数前，先通过双缝干涉的渐进演示（强束→弱束→单电子累积），建立“概率幅叠加”的直观认知。

（2）推导分层。将推导分为核心推导、技术性推导和延伸推导三类。首先，核心推导必须关联物理内在机理，如玻尔角动量量子化可以从光谱规律和稳定性反推其“必要性”，保留在课堂；其次，对于代数技巧性强但教学收益递减的技术性推导，如黑体辐射的腔模计数积分、氢原子薛定谔方程的分离变量全过程，可作为课后阅读材料或通过计算机编程实现，学生运行一次数值解，相较于抄写三页递推公式更有意义；最后，对于某些针对特定应用的延伸推导，如微扰论处理斯塔克效应，可视课时安排设为选学内容。

（3）以历史—实验矛盾为引擎。每一章的教学起点不应是“今天我们学某某模型”，而应是“我们遇到了一个什么样的实验事实，它与已有理论产生了怎样的冲突”。让学生站在科学家的立场上，经历“旧模型被否认→新模型被迫出场”的认知冲突过程，从而深刻理解新概念出现的内在逻辑。

（4）批判性与发散性训练制度化。在每个知识模块设置至少一个“可争论点”，引导学生思考既有模型的局限性。示例：“玻尔模型明明错了（违背不确定性原理），为什么它还能如此成功地解释氢原子光谱？”“如果电子的波长远小于原子尺寸，是否可以用经典轨迹近似？”“EPR佯谬告诉我们量子力学不完备吗？”这些问题没有标准答案，能极大培养学生的批判

性思维。

4 典型教学案例设计

下面本文通过选取原子物理中最具代表性的三个知识点，展示上述原则的落地方式。每个案例均给出学习目标、课堂流程及关键提问设计。

4.1 黑体辐射与能量量子化起源

(1) 传统讲法

从基尔霍夫定律出发，先计算腔模密度（涉及频率模式的计数），再乘以经典能量均分定理给出的平均能量 kT ，得到瑞利-金斯公式；随后引入普朗克的能量量子化假设，将平均能量替换为离散求和得到的 $\langle E \rangle = \frac{\varepsilon}{e^{\varepsilon/kT} - 1}$ ，从而得出普朗克黑体辐射公式。学生往往只记住了最终公式的形式，而对“为什么必须引入能量量子化”缺乏深刻体会。

(2) 重构讲法

首先，通过实验事实建立矛盾。先展示黑体辐射的实验曲线（不同温度下的谱分布），然后让学生用经典能量均分定理“猜测”理论曲线会是什么形状。当学生发现经典理论在短波长处发散（紫外灾难）时，制造强烈的认知冲突，即“连续能量假设”存在理论缺陷。

其次，通过量级论证引导学生思考。“如果我们将能量交换的最小单元设为 ε ，那么平均能量 $\langle E \rangle$ 在高温（ $kT \gg \varepsilon$ ）和低温（ $kT \ll \varepsilon$ ）下分别趋向什么？”通过简单的等比数列求和，学生可以自行推导出平均能量的离散化表达式： $\langle E \rangle = \frac{\varepsilon}{e^{\varepsilon/kT} - 1}$ 。这一过程不需要复杂的积分，就能清晰地揭示“离散化如何压制高频发散”问题。

再次，明确关键物理意义。指出普朗克常数 h 的物理角色是一个具有作用量量纲的“截断标尺”，决定了量子效应何时显现。让学生对比 $h \rightarrow 0$ 时的极限行为，理解“关闭量子化”后的世界（即经典世界）。

最后，通过课堂提问引导学生批判性思考。例如：“如果你只允许能量取 $0, \varepsilon, 2\varepsilon, \dots$ ，平均能量 $\langle E \rangle$ 在高温和低温下分别趋向什么？它如何压住高频发散？”“假设 h 变为现在的两倍，黑体辐射的颜色会有什么变化？”

4.2 α 粒子散射与原子核式结构

(1) 传统讲法

直接给出卢瑟福散射公式，代入数据计算核半径，学生缺乏对“模型竞争”过程的体验。

(2) 重构讲法

首先，给出旧模型预期。先用动画或示意图展示汤姆逊“葡萄干布丁”模型，即正电荷均匀分布在球体内，电子镶嵌其中。让学生预测：“如果用 α 粒子轰击这样的原子，散射角分布应该是怎样的？”最终得出多

数小角度，极少大角度的结论。

其次，引入实验形成事实冲击。呈现盖革—马斯顿实验的真实数据：观察到约1/8000的 α 粒子发生了大于 90° 的偏转，部分粒子甚至反向弹回，这个现象发生概率远远超出汤姆逊模型的理论预测。

再次，进行数量级估算。让学生自己估算“如果原子真的是葡萄干布丁，大角散射的概率上限有多大？”，只需用到库仑散射的简单几何关系，由此意识到只有将全部正电荷集中在极小的核内，才能匹配实验观测结果。

同时，进行推导取舍。课堂上只推导卢瑟福公式的基本思路（库仑力+轨道假设），并强调公式的适用范围（不考虑核力、相对论效应）；完整的微分截面推导可作为课后阅读材料。

最后，进行课堂提问。示例问题：“如果 α 粒子的动能增加10倍，大角散射的概率会如何变化？这说明了什么？”“卢瑟福模型中，原子核的大小是如何确定的？这个估计值的可靠性取决于哪些假设？”

4.3 氢原子光谱与玻尔模型

(1) 传统讲法

从巴尔末公式到玻尔假设，再到角动量量子化条件的推导，最后计算原子能级。学生常常混淆“为什么角动量必须是 $h/2\pi$ 的整数倍”这一关键假设的来源。

(2) 重构讲法

首先，从经验规律出发，先展示氢原子光谱的巴尔末系照片，让学生观察谱线的规律性，即波长满足一个简单的整数公式。提出问题：“这些离散的谱线告诉我们，原子的能量状态有什么特点？”

其次，引入定态与跃迁的概念。用类比（如楼梯的台阶）说明玻尔的核心假设：电子只能在某些特定的轨道上运动，在这些轨道上不产生经典电磁辐射（即不因圆周运动的加速度而持续损耗能量，轨道得以保持“稳定”）；只有当电子从一个定态轨道“跃迁”到另一个定态轨道时，才以光子的形式量子化地发射或吸收能量。这里需要强调“经典电磁辐射”（连续、由加速引起）与“量子跃迁辐射”（离散、由能级差决定）是两种完全不同的物理机制，玻尔的创新恰恰在于否定了前者在原子内的适用性，同时引入了后者来解释光谱。这一区分对于理解“稳定原子何以存在”与“光谱线何以分立”至关重要。

再次，提出角动量量子化的“必要性”。不直接给出量子化条件，而是引导学生思考：“如果我们已知光谱线的频率，如何确定轨道的半径和能量？”通过里德伯常数的表达式，让学生发现只有假设角动量 $L = n\hbar$ 时，才能得到正确的里德伯常数。这个过程可以让学生体会到量子化条件不是凭空捏造的，而是实验观测带来的必然推论。

以“反向验证”的方式，呈现角动量量子化的必要

性。教学中可设计如下启发式路径：先展示里德伯经验公式，然后提出问题“什么样的轨道量子化条件能导出与实验一致的能级公式？”。教师引导学生尝试几种可能的量化方案（如 $L \propto n^2$ 或 $L \propto \sqrt{n}$ ），逐一对比其导出的里德伯常数表达式，发现唯有 $L = n\hbar$ 的假设才能得出 $R_\infty = (me^4)/(8\epsilon_0^2 h^3)$ ，与实验值精确吻合。（需向学生说明：这种“反推”是教学上的启发式设计，历史上的玻尔是从定态假设和频率条件出发，直接提出角动量量子化，再用实验数据验证其正确性）这一环节的目的，是让学生体会到量子化条件并非数学家凭空构造，而是被实验事实“筛选”和“确认”的。

而后，强调量子数的物理意义。主量子数 n 决定能量和轨道大小，角量子数 l 决定轨道角动量，磁量子数 m 决定空间取向。通过斯特恩—盖拉赫实验动画，直观展示空间量子化效应。

最后，进行课堂提问。示例问题：“玻尔模型能解释氦离子（ He^+ ）的光谱吗？如果不能，问题出在哪里？”“如果电子真的沿圆周轨道运动，按照经典电磁理论，它的寿命有多长？这个时间与实验观测的原子稳定时间相比说明了什么？”

5 实施路径与考核方式

5.1 课堂组织模式

采用“碎片化讲授+冲突问题投放+小组讨论+教师纠偏”的混合模式。具体而言，每次课程（90分钟）分为四个阶段。

第一阶段：前15分钟，快速回顾上次课核心概念，抛出本节课的“核心矛盾”。

第二阶段：中间40分钟，教师讲授核心概念与关键推导，聚焦于“为什么”，而非“怎么算”。

第三阶段：随后20分钟，发放1~2道概念测试选择题，选项均为常见的错误理解；学生先独立作答，再与小组成员一起讨论，最后全班统计投票并公布正确率。

第四阶段：最后15分钟，教师针对错误率高的选项进行针对性讲解，总结本节课的科学思维要点。

5.2 教学工具

概念测试题：每个知识点配套3~5道选择题，每题考查一个核心概念的理解（而非计算能力）。示例：

“关于不确定关系 $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$ ，以下哪种理解是正确的？”选项包括“测量仪器的精度限制”“粒子的固有属性”“同时测量位置的动量时产生的干扰”等内容。

虚拟仿真实验：若没有专业实验配套的条件，建议使用PhET交互式仿真平台（如“氢原子模型”“双缝干涉”“斯特恩—盖拉赫实验”等模块），让学生在电脑上“动手操作”微观实验，观察参数变化对结果的影响。已有研究表明，将虚拟仿真技术融入原子物理课

堂，能够“生动形象地呈现相关物理原理、物理图像、实验过程和物理意义，加深学生对原子物理学知识的理解”。^[5]

引导式探究材料：针对常见误区设计结构化学习单，引导学生一步步推理。例如，在学习不确定关系时，设计配套学习单，让学生分别用“波动图像”和“粒子图像”分析同一物理问题，最终认识到两种图像的互补特性。

5.3 考核方式调整

传统闭卷考试以计算题为主，容易导致学生机械记忆公式。改革后的考核方案如下：期末笔试占比50%，提高概念解释题和物理图像题的比例，如“请用不超过200字解释为什么玻尔模型不能解释精细结构”，减少纯公式推导题；保留少量核心推导题，如氢原子能级公式的导出。过程性评价占比30%，包括课堂概念测试成绩、随堂小报告，每次课后写一段“今日最深刻的物理思想”。小组讨论项目占比20%，根据教学知识点分布情况，发布四个讨论主题，如“如果普朗克常数是现在的10倍，世界会怎样？”，小组讨论后撰写一篇1000字左右的短文，要求文章包含物理图像、数量级分析和至少一个自创的类比解释物理规律。

6 初步成效与反思

通过两学期的实际教学实践，匿名问卷调查结果显示，试点班大多数学生表现出对原子物理“非常感兴趣”。在开放式问题中，有学生给出“课堂充满创意与活力”“教学思路清晰，善于引导独立思考”等正面反馈。

本方案也存在一定局限。首先，该模式对教师的课堂把控能力提出了更高要求。教师不仅要熟悉物理知识，还要善于捕捉学生的错误直觉并即时回应。其次，对于基础薄弱的学生，过度弱化推导训练，可能导致他们对“物理为什么是这样”仍然感到困惑。未来的改进方向包括：开发配套的“可视化教学案例”，让抽象的概念和实验更加直观；建立更系统的概念测试题库，使课堂评价更加客观。

7 总结

费曼曾说：“我宁愿拥有一个能猜出解并理解其物理意义的学生，而不是一个只会解微分方程的学生。”“原子物理学”作为近代物理的入门课程，承载着培养学生科学思维的重任。本文提出的“概念优先、图像先行、科学方法内化”教学改革方案，并非要否定数学推导，而是要重新审视推导在教学中的位置，使其从“主角”变为“配角”、从“目标”变为“手段”。当学生不再被繁琐的公式束缚，而是有机会像物理学家一样去“猜”、去“辩”、去“判断”，才能深度感受物理学的魅力，并为

后续的“量子力学”课程学习奠定坚实的基础。

参考文献

- [1] Feynman R P, Leighton R B, Sands M. The Feynman Lectures on Physics [M]. Boston: Addison-Wesley, 1964.
- [2] Singh C. Student understanding of quantum mechanics [J]. American Journal of Physics, 2001, 69 (8): 885-895.
- [3] 杨丙灿, 陈晓. 关于量子力学建立中的创新思维的思考 [J]. 电子元器件与信息技术, 2020, 4 (3): 163-164.
- [4] 廖玮. 从量子电动力学的创立历史看物理学思维的特色和价值 [J]. 物理, 2023, 52 (3): 203-212.
- [5] 郭泽平, 魏代会. 基于虚拟仿真技术的“原子物理学”教学改革与创新 [J]. 教育教学论坛, 2024 (5): 97-100.

“Thinking-Oriented” Teaching Reform in “Atomic Physics”

Li Fen Sun Xiaoxiang Li Chang Luo Liang

School of Physics and Electronic Science, Hunan Polytechnic University, Yueyang

Abstract: In view of the characteristics of “Atomic Physics” — numerous formulas, abstract concepts, and weak logical coherence — this paper draws on Feynman’s teaching philosophy that “understanding the physical meaning is more important than formally solving equations” and the empirical findings from Physics Education Research (PER). It proposes a restructuring scheme centered on “concept first, image priority, experiment/historical contradiction-driven, quantifiable process evaluation”. Through the pedagogical reorganization of core topics such as blackbody radiation, α -particle scattering, and hydrogen atom spectra, the instructional focus shifts from computational procedures to model building, criterion selection, evidence testing, and boundary interpretation. Combined with discussion-based classrooms, concept tests, and virtual simulations, this approach enables students to develop better quantum intuition and critical inquiry skills. Teaching practice results show that this scheme can effectively deepens students’ conceptual understanding and scientific thinking.

Key words: Atomic physics teaching; Concept priority; Physical picture; Scientific thinking