

量子力学课程教学内容改革的探索与实践

——以康普顿效应为例

何俊宝*, 傅瑜, 黄金书, 刘从斌, 程晋炳

南阳师范学院物理与电子工程学院, 河南 南阳

收稿日期: 2022年9月29日; 录用日期: 2022年12月7日; 发布日期: 2022年12月15日

摘要

基于量子力学课程教学内容改革的要求, 以康普顿效应为例, 从教学内容的整体把握、物理模型的构建、数学过程的严密推导、物理意义的分析、课程思政元素的挖掘等五个方面详细阐述我们在量子力学教学内容改革中的探索和实践。

关键词

教学内容改革, 量子力学, 康普顿效应

Exploration and Practice of Teaching Contents Reform for the Course of Quantum Mechanism

—Taking Compton Effect as an Example

Junbao He*, Yu Fu, Jinshu Huang, Congbin Liu, Jinbing Cheng

School of Physics and Electronic Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang Henan

Received: Sep. 29th, 2022; accepted: Dec. 7th, 2022; published: Dec. 15th, 2022

Abstract

Based on requirements of teaching contents reform for the course of Quantum Mechanism, we take Compton effect as an example and elaborate the exploration and practice of teaching contents

*通讯作者。

reform for the course of Quantum Mechanism in the following five aspects of overall grasp of teaching contents, construction of physical model, rigorous derivation of a mathematical process, analysis of physical meaning, and development of ideological and political elements.

Keywords

Teaching Contents Reform, Quantum Mechanism, Compton Effect

Copyright © 2022 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

量子力学是研究微观粒子运动规律的基础理论，在物理学各分支科学、以及化学、材料、生物、医药、信息等各领域都有非常广泛和重要的应用。作为构成现代物理学的两大理论基础之一，量子力学不仅是近代科技工作者必须具备的知识基础 and 创新能力基础，而且是衡量物理学知识水平和从事相关科学研究能力的重要指标之一[1] [2]。因此，量子力学不仅是物理学类本科专业一门重要的必修基础理论课程，而且是物理学类研究生入学考试的必考科目。量子力学的教学质量直接关系到物理学专业学生的培养质量。因内容多、理论抽象、内容深邃、且涉及的数学极为繁杂等原因，学生理解比较困难，老师不易讲解，量子力学教学方面普遍存在教师畏教、学生畏学的情况。因此，必须从教学内容、教法、教材等多个方面对量子力学课程进行教学改革，解决量子力学教学过程教师畏教、学生畏学的问题，达到提高量子力学教学质量的目的[3]。

本文在量子力学课程教学内容改革层面，以康普顿效应为例，立足量子力学的课程性质，在不失科学性和严密性的前提下，尽可能运用通俗的表达形式，从教学内容的整体把握、物理模型的构建、数学过程的严密推导、物理意义的分析、课程思政元素的挖掘等五个方面精心组织教学内容，详细阐述我们在量子力学教学内容改革中的具体探索和实践。

2. 课程教学内容改革措施

2.1. 教学内容的整体把握

1920 年左右，美国物理学家康普顿(Arthur Holly Compton)等发现：X 射线经过石墨等轻元素固体物质散射后，其散射的 X 射线中不仅有与入射 X 射线波长相同的 X 射线，还有波长比入射 X 射线波长更长的 X 射线，这种波长变长的散射效应叫做康普顿效应[4]。按照经典理论，X 射线是电磁波，其能量与振幅有关，与波长无关，散射过程的能量、动量交换不会导致 X 射线波长的变化。

1923 年，康普顿接受爱因斯坦的光子概念，认为 X 射线是由光子构成，并且估算 X 射线光子的能量远大于固体物质中自由电子热运动的平均动能，因此，康普顿效应中 X 射线散射过程实质应该是单个光子和静止电子的碰撞过程。康普顿假设单个光子和静止电子碰撞过程遵守能量守恒和动量守恒两个守恒定律，通过简单的推理很好地解释了康普顿效应的实验现象，为光的波粒二象性及德布罗意物质波假说提供了令人信服的证据，极大地促进了量子力学的发展[5]。

在教学过程中，学生对康普顿效应了解不够深入，对康普顿效应容易产生很多疑惑，甚至误解。因此，有必要对康普顿效应的教学内容进行整体把握。通过教学内容的整体分析与把握，提供一种整体统

一的框架,使学生从整体上去认识康普顿效应,不仅有利于用整体的、联系的、发展的眼光看问题,而且有利于物理本质的认识和科学思维习惯的形成,教育学生建立科学的世界观、宇宙观,达到量子力学等物理学课程的教学与学习的文化功能。对于学生从整体、全局去思考和处理遇到的各种问题会有帮助。

2.2. 物理模型的构建

康普顿效应中 X 射线散射过程物理模型示意图如图 1 所示,散射过程可以看成入射光子沿水平方向靠近静止电子然后发生碰撞,碰撞过程中遵守能量守恒和动量守恒。经过碰撞,入射光子变为散射光子,静止电子变为反冲电子,入射光子和反冲电子的方向偏离水平方向的角度分别为 θ 和 θ' 。

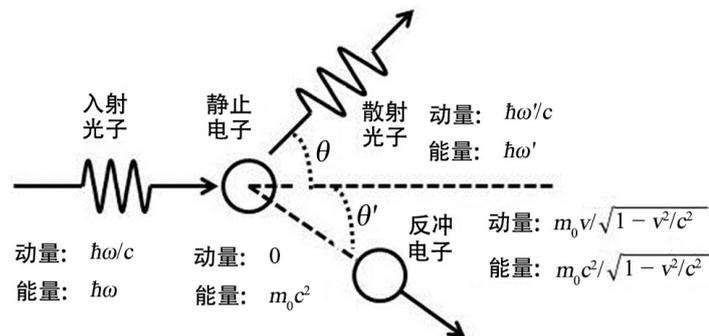


Figure 1. Diagram of physical model for Compton effect

图 1. 康普顿效应物理模型示意图

碰撞前,入射光子和静止电子的动量大小分别为 $\hbar\omega/c$ 和 0; 两者的能量大小分别为 $\hbar\omega$ 和 m_0c^2 , 其中 \hbar 为约化普朗克常量, ω 为入射光子的角频率(圆频率), m_0 为电子的静止质量, c 为光速。

碰撞后,散射光子和反冲电子的动量大小分别为 $\hbar\omega'/c$ 和 $m_0v/\sqrt{1-v^2/c^2}$; 两者的能量大小分别为 $\hbar\omega'$ 和 $m_0c^2/\sqrt{1-v^2/c^2}$, 其中 ω' 为入射光子的角频率(圆频率), v 为反冲电子的速度。

根据能量守恒可得,

$$\hbar\omega + m_0c^2 = \hbar\omega' + \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad (1)$$

根据水平方向上的动量守恒可得,

$$\frac{\hbar\omega}{c} = \frac{\hbar\omega'}{c} \cos \theta + \frac{m_0v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \cos \theta' \quad (2)$$

根据垂直方向上的动量守恒可得,

$$0 = \frac{\hbar\omega'}{c} \sin \theta - \frac{m_0v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \sin \theta' \quad (3)$$

在康普顿效应物理模型建立过程中,舍弃光子和电子相互作用的细节等次要因素,抓住光子和电子碰撞过程中能量守恒和动量守恒这个主要因素,直观简单地突出了康普顿效应过程的物理本质特征,使学生更加容易接受。引导学生认识到现实问题相对复杂,建立各种模型是物理学解决问题的一个基本出

发点。建立模型过程中，抓住主要因素，忽略次要因素，进行合理地抽象和简化，更加直观地了解物理现象，透过现象掌握本质，加深对基本规律的理解，增强学生的学习兴趣，培养学生科学的思维方法。

2.3. 数学过程的严密推导

康普顿效应物理模型建立后，还需要用动量守恒定律和能量守恒定律详细严密推导出康普顿效应中散射光子波长变化与散射角的关系式，与实验结果相符，才能被学生完全准确的接受。“实践是检验真理的唯一标准”任何学科中都是实实在在的真理。运用严密的数学演绎方法，通过推演公式计算出结果并解决实际问题，将复杂抽象的物理过程严密生动形象地呈现在学生眼前，可以使学生理解得更加透彻，从而达到增强学生的学习兴趣、提高学生分析解决物理问题能力的目的。

利用能量守恒关系式(1)，整理可得

$$\hbar\omega - \hbar\omega' + m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

式子(4)两边同时平方，可得

$$(\hbar\omega + m_0c^2 - \hbar\omega')^2 = \frac{(m_0c^2)^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{(m_0c^2)^2 c^2}{c^2 - v^2} \quad (5)$$

整理式子(5)得

$$c^2 - v^2 = \frac{(m_0c^2)^2 c^2}{(\hbar\omega + m_0c^2 - \hbar\omega')^2} \quad (6)$$

从而可得

$$v^2 = c^2 - \frac{(m_0c^2)^2 c^2}{(\hbar\omega + m_0c^2 - \hbar\omega')^2} \quad (7)$$

利用动量守恒式子(2)和(3)可得

$$\frac{\hbar\omega}{c} - \frac{\hbar\omega'}{c} \cos\theta = \frac{m_0v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cos\theta' \quad (8)$$

$$\frac{\hbar\omega'}{c} \sin\theta = \frac{m_0v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \sin\theta' \quad (9)$$

式子(8)和(9)两端分别平方可得

$$\left(\frac{\hbar\omega}{c} - \frac{\hbar\omega'}{c} \cos\theta\right)^2 = \frac{(m_0v^2)^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} (\cos\theta')^2 = \frac{(m_0v)^2 c^2}{c^2 - v^2} (\cos\theta')^2 \quad (10)$$

$$\left(\frac{\hbar\omega'}{c} \sin\theta\right)^2 = \frac{(m_0v^2)^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} (\sin\theta')^2 = \frac{(m_0v)^2 c^2}{c^2 - v^2} (\sin\theta')^2 \quad (11)$$

式子(10)和(11)两端分别相加可得

$$\left(\frac{\hbar\omega}{c} - \frac{\hbar\omega'}{c}\cos\theta\right)^2 + \left(\frac{\hbar\omega'}{c}\sin\theta\right)^2 = \frac{(m_0v)^2 c^2}{c^2 - v^2} \quad (12)$$

式子(12)两边同乘 c^2 ，并对式子左边进行整理可得

$$(\hbar\omega)^2 + (\hbar\omega')^2 - 2\hbar\omega\hbar\omega'\cos\theta = \frac{(m_0v)^2 c^2 c^2}{c^2 - v^2} \quad (13)$$

式子(7)代入式子(13)右边分母可得

$$(\hbar\omega)^2 + (\hbar\omega')^2 - 2\hbar\omega\hbar\omega'\cos\theta = \frac{(m_0)^2 c^2 c^2 \left[c^2 - \frac{(m_0c^2)^2 c^2}{(\hbar\omega + m_0c^2 - \hbar\omega')^2} \right]}{\frac{(m_0c^2)^2 c^2}{(\hbar\omega + m_0c^2 - \hbar\omega')^2}} \quad (14)$$

整理式子(14)可得

$$(\hbar\omega)^2 + (\hbar\omega')^2 - 2\hbar\omega\hbar\omega'\cos\theta = (\hbar\omega + m_0c^2 - \hbar\omega')^2 - (m_0c^2)^2 \quad (15)$$

式子(15)右边展开可得

$$\begin{aligned} & (\hbar\omega)^2 + (\hbar\omega')^2 - 2\hbar\omega\hbar\omega'\cos\theta \\ &= (\hbar\omega)^2 + (\hbar\omega')^2 + (m_0c^2)^2 + 2\hbar\omega m_0c^2 - 2\hbar\omega' m_0c^2 - 2\hbar\omega\hbar\omega' - (m_0c^2)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

式子(16)消除相同项可得

$$-2\hbar\omega\hbar\omega'\cos\theta = 2\hbar\omega m_0c^2 - 2\hbar\omega' m_0c^2 - 2\hbar\omega\hbar\omega' \quad (17)$$

整理式子(17)可得

$$(\omega - \omega')m_0c^2 = \hbar\omega\omega'(1 - \cos\theta) \quad (18)$$

整理式子(18)可得

$$\omega - \omega' = 2\frac{\hbar}{m_0c^2}\omega\omega'\left(\sin\frac{\theta}{2}\right)^2 \quad (19)$$

由 $\omega = 2\pi c/\lambda$ ， $\omega' = 2\pi c/\lambda'$ ，可将式子(19)改写为

$$\frac{2\pi c}{\lambda} - \frac{2\pi c}{\lambda'} = 2\frac{\hbar}{m_0c^2}\frac{2\pi c}{\lambda}\frac{2\pi c}{\lambda'}\left(\sin\frac{\theta}{2}\right)^2 \quad (20)$$

整理式子(20)可得

$$\lambda' - \lambda = 2\frac{2\pi\hbar}{m_0c}\left(\sin\frac{\theta}{2}\right)^2 = 2\frac{h}{m_0c}\left(\sin\frac{\theta}{2}\right)^2 \quad (21)$$

其中 $h = 2\pi\hbar$ 为普朗克常量。

设常量

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0c} \quad (22)$$

则可得

$$\lambda' - \lambda = 2\lambda_c \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^2 \quad (23)$$

因 λ_c 为常量, 从式子(23)可以看出 $\lambda' - \lambda$ 的大小仅与散射角 θ 的有关。由 $0 \leq \theta \leq \pi$, 得 $0 \leq \theta/2 \leq \pi/2$, $\lambda' - \lambda$ 的值随散射角 θ 的增大而单调增大, 从而可得: 散射光子的波长 λ' 随散射角 θ 的而增大。这就从理论上得到了实验上一致的结果。

2.4. 物理意义的分析

整理式子(22)可得

$$m_0 c^2 = \frac{hc}{\lambda_c} \quad (24)$$

式子(24)左边代表电子的静能, 右边代表波长为 λ_c 的光子的能量。从式子(24)可以看出 λ_c 的物理意义是当光子的能量与电子的静能相等时所对应的光子的波长, 因此, 一般称 λ_c 为电子的康普顿波长。通过式子(22)代入数值计算可得电子的康普顿波长 $\lambda_c = 0.00243 \text{ nm}$ 。

另外, 当散射角 $\theta = \pi/2$ 时, $\sin \theta/2 = \sin \pi/4 = \sqrt{2}/2$, 代入式子(23)可得

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c \quad (25)$$

从式子(24)可以看出数值上电子的康普顿波长 λ_c 等于散射角 $\theta = \pi/2$ 时入射光子与散射光子波长之差。

由于式子(23)可以得到 $\lambda' - \lambda$ 的值随散射角 θ 的增大而单调增大, 且散射角 θ 的范围为 $0 \leq \theta \leq \pi$, 所以当散射角 $\theta = \pi$ 时, $\lambda' - \lambda$ 取最大值 $2\lambda_c = 0.0049 \text{ nm}$, 这就是康普顿散射所能引起的入射光波长的最大变化。

康普顿效应中理论和实验高度结合, 理论来源于实验, 同时又要接受实验的检验。康普顿效应问题的解决是通过实验观察新现象、形成新概念和建立新理论的过程。物理意义的分析是新理论进一步接受实验检验的过程, 是理论教学的延伸。通过“实验 - 理论 - 实验(物理意义)”这样的闭环教学过程, 使学生弄清楚学科发展的因果逻辑, 从而形成完整的知识体系, 可以达到教学目的, 获得更好的教学和学习效果。

2.5. 课程思政元素的挖掘

康普顿效应的解决涉及到如唯物主义世界观、人生观及价值观等许多课程思政元素。这些课程思政元素的挖掘, 将思想政治内容与物理专业教学有效融合, 坚持辩证唯物主义思想, 促使学生在获取专业知识的同时, 重视反映出来的崇尚理性、崇尚实践、追求真理的精神, 建立正确的物理观、时空观和宇宙观, 形成正确价值理念体系, 在正确人生观、价值观的引领指导下成长成才。将物理学史揉合进教学内容中, 充分展示科学家的思想方法, 不仅能够帮助学生加深对相关知识的理解, 而且加强了对学生心理素质的培养, 使学生能在智力、专长与心理上达到和谐统一。

从现代物理学视角看, 康普顿效应已经成为一个普通常识, 被大家普遍接受。但在 20 世纪初, 对于初康普顿等物理学家来说却不是那么容易。康普顿效应的发现是经历了一番实实在在的曲折探索的。在经典物理解决康普顿效应面临困难和挑战时, 经过深入思考接受量子假说, 这需要巨大的勇气和魄力。康普顿的成功, 不仅要归功于老一辈科学家高超的实验技术、周密的研究方法和长期的不懈探索等科学精神, 更要归功于他们在面临挫折后断然扬弃的魄力[5]。科学技术历史中任何重大突破都需要作出艰苦

卓绝的努力，才能获得普遍的认同。值得注意的是，我国现代物理学家吴有训先生以精心的实验、细致的研究和严密的分析，不仅证明了康普顿效应的普遍性、驳斥了对康普顿效应的各种否定，而且发展了康普顿的 X 射线量子散射理论，为康普顿效应的进一步证实和确认做出了重要贡献[5]。我国科学家做出的突出贡献能够极大激励学生的民族自豪感和奋发向上的精神。透过康普顿效应获得的普遍意义的思想方法，进行科学方法论的教育，对学生创新能力的培养、素质的提高和长远的发展都起着重要的作用。

3. 成效与不足

教学团队反馈在保证教学基本内容的前提下，上述教学内容的改革不仅使教学内容更加丰富，而且教学内容的系统性逻辑性得到了极大提高，形成了立体化的教学内容体系。不仅降低了教师的教学难度，克服了教师畏教的问题，对整体教学质量的提高起到十分重要的基础性作用。同时，通过教学内容改革，学生的学习热情和学习效果都得到了极大提升。首先，学生畏学的问题极大改善，学生在教学活动中的参与度极大提高，从被动学变为主动学；其次，从答疑、作业和考试等多方面反馈情况看，改革后学生对知识的掌握更加牢固全面，远远达到了教学目标的要求；最后，从学校组织的学生评教结果看，改革后课程评教分数连续三年名列专业第一，学生对任课教师的满意度接近 100%。同时，我们也认识到教学改革是一个系统工程，不仅包含教学内容改革，而且还包含教材、教法等多方面的改革。因此，我们单单从教学内容上进行改革具有很大的局限性。下一步，我们将充分调动教学内容、教材、教法等各方面的要素，用系统的观点对课程教学进行改革，从而达到真正意义上教学改革的目标。

4. 结论

在教学内容改革层面，以康普顿效应为例，从教学内容的整体把握、物理模型的构建、数学过程的严密推导、物理意义的分析、课程思政元素的挖掘等五个方面详细阐述我们在量子力学教学改革中的探索和实践。通过上述的教学内容改革的实践，学生对康普顿效应有一个比较清晰的物理图像，对光的波粒二象性这一基本概念理解得也更深刻一些，不仅能够使学生能够获得相应专业课程的知识基础，体现了量子力学的知识教育功能，还挖掘了量子力学更深刻的文化教育功能，获得较好的教学和学习效果。

基金项目

南阳师范学院一流课程建设项目《量力力学》。

参考文献

- [1] 周世勋. 量子力学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 7-9.
- [2] 苏汝铿. 量子力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 7-9.
- [3] 何良明, 周萍. 新时期地方院校量子力学教学改革与探索[J]. 高教学刊, 2021(22): 94-99.
- [4] Compton, A.H. (1923) A Quantum Theory of the Scattering of X-Rays by Light Elements. *Physical Review*, **21**, 483-502. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.21.483>
- [5] 郭奕玲, 沈慧君. 康普顿效应的发现及其意义[J]. 大学物理, 1998, 17(6): 37-42.