

理工科类大学物理课程中的电磁学教学设计 ——“库仑定律与电荷三体运动”教学案例

谢 东 王 辉 何 钰

(西南交通大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610031)

摘 要 库仑定律是大学物理电磁学的核心内容,但中学阶段的“公式化学习”易导致大学教学陷入“浅层复习”误区,错失培养学生“科学研究方法论”的关键机会,成为“中学学过,大学如何再讲”的典型教学痛点。本教学案例依据《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2023年版),针对该痛点提出“熟悉定律陌生化”创新路径:通过再现“观察-猜想-实验-归纳”的科学史进程,深度挖掘库仑定律的历史背景、哲学意涵与方法论价值,推动教学重心从公式记忆转向科学思维能力培养;引入基于氦原子模型的“电荷三体运动”数值仿真,让学生直观发现经典理论与微观物理世界的矛盾,落实金课“高阶性、创新性、挑战度”要求;通过电荷三体关联科幻作品《三体》,在比较中西方叙事方式的基础上融入课程思政元素,探讨集体主义精神与人类命运共同体意识在全球性挑战中的现实价值,实现知识传授、能力培养与价值引领的有机统一,最终为理工科大学物理核心概念教学提供可复制的创新范式。

关键词 大学物理;库仑定律;电荷三体运动;数值仿真;课程思政;《三体》

DOI: 10.27024/j.wlygc.2025.08.27.02

TEACHING DESIGN OF ELECTROMAGNETISM IN COLLEGE PHYSICS COURSES FOR SCIENCE AND ENGINEERING MAJORS: A TEACHING CASE ON “COULOMB’S LAW AND THREE-BODY MOTION OF CHARGES”

XIE Dong WANG Hui HE Yu

(School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031)

Abstract Coulomb’s Law is a core topic in university physics electromagnetism, but the “formula-based learning” in high school can easily lead to a “superficial review” in university teaching, missing the key opportunity to cultivate students’ “scientific research methodology.” This has become a typical teaching pain point of “learned in high school, how to teach

收稿日期: 2025-08-27

基金项目: 全国高等学校大学物理改革研究项目(项目编号 2024PR074);四川省高等教育人才培养质量与教学改革项目(项目编号 JG2024-0287);西南交通大学本科教育教学研究与改革项目(项目编号 JG2024051, 20240319)。

通信作者: 谢东, xiedong@swjtu.edu.cn。

引文格式: 谢东, 王辉, 何钰. 理工科类大学物理课程中的电磁学教学设计——“库仑定律与电荷三体运动”教学案例[J]. 物理与工程, 2026, 36(1): 94-101.

Cite this article: XIE D, WANG H, HE Y. Teaching design of electromagnetism in college physics courses for science and engineering majors: A teaching case on “Coulomb’s Law and Three-body Motion of Charges”[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(1): 94-101. (in Chinese)

again in university.” Based on the “Basic Requirements for University Physics Teaching in Science and Engineering (2023 Edition),” this teaching case proposes an innovative approach of “familiarizing the law with unfamiliarization” to address this pain point. By recreating the historical scientific process of “observation-conjecture-experiment-induction,” it deeply explores the historical background, philosophical implications, and methodological value of Coulomb’s Law, shifting the teaching focus from formula memorization to the cultivation of scientific thinking skills. The case introduces a numerical simulation of “three-body motion of charges” based on the helium atom model, allowing students to intuitively discover the contradictions between classical theory and the microscopic physical world, fulfilling the requirements of a high-quality course with “high-level, innovative, and challenging” features. By integrating the science fiction work “The Three-Body Problem” with the three-body problem of charges, it incorporates ideological and political elements into the course, comparing Chinese and Western narrative styles, and discussing the practical value of collectivism and the awareness of a community with a shared future for humanity in the face of global challenges. This achieves an organic unity of knowledge transmission, ability cultivation, and value guidance, ultimately providing a replicable innovative paradigm for the teaching of core concepts in university physics for science and engineering students.

Key words college physics; Coulomb’s law; three-body motion of charges; numerical simulation; curriculum ideological and political education; “The Three-Body Problem”

在大学物理静电学教学中,库仑定律作为 A 类核心内容却面临独特困境:学生因中学阶段已熟练背诵其数学公式,许多教师便会认为学生已经掌握该定律,将教学简化为公式回顾与习题训练,这导致大学阶段“深化理解”的教学目标流于表面,更错失培养学生“科学研究方法论”的关键机会。——这正是“中学学过,大学如何再讲”的共性教学痛点。

诺贝尔物理学奖得主理查德·费曼曾分享过他童年时的一个故事^[1],为破解此痛点提供了关键启示。年幼的理查德·费曼曾观察到玩具车上的小球在马车启动时向后滚动,停止时又向前滚。他向父亲提出疑问,父亲没有直接抛出“惯性”概念,而是引导他重新观察现象,并指出:“运动的物体会尽力保持运动状态,静止的东西也尽量保持不动,科学家们把这叫作惯性,但事实上,没有人知道为什么有惯性,这只是一个称呼。”这个故事深刻地揭示了“知道一个名词”和“懂得一个概念”之间的区别。同样,学生“知道”库仑定律的公式(能默写),却未必“懂得”它是如何被提炼出来、为何是平方反比形式、其成立的前提是什么、以及它在整个物理学大厦中扮演着何等基石般的

角色。

一个物理定律的建立绝非一蹴而就,而是一个包含多个环节的复杂过程:从对自然现象的细致观察与分析出发,提出大胆的猜想与类比;为验证这些猜想,需精心设计实验,甚至在过程中定义新的物理量;最终将有限实验中发现的规律归纳为简洁的数学公式。然而,科学家的研究并未止步于此。他们进一步追问:该公式是否适用于更广泛的变量范围?其适用范围和实验精度如何?这些问题所探讨的,正是物理定律的“内涵”(本质含义与成立条件)与“外延”(适用边界与精度)。此外,真正理解一个定律,还需把握其“理论地位”——它是否构成更广泛理论体系的基础?若其存在偏差,是否会对整个理论框架产生颠覆性影响?例如,库仑定律中的平方反比关系与光子静质量为零之间就存在深刻的物理联系^[2],若库仑定律中的平方反比不严格成立,将动摇现代物理学的基础。图 1 为教学案例 PPT 中上述相关内容的页面展示。

物理定律的深化教学是中学教学的空白,也成为大学教学的创新突破口。为此,本案例提出“熟悉定律陌生化”的创新教学思路,从四个维度



图1 教学案例PPT中典型页面展示

重构“库仑定律”的教学设计:

(1) 科学史维度:重走“格雷导电现象→杜菲两种电荷→普利斯特利平方反比猜想→库仑扭秤/单摆实验”的发现历程,让学生亲历“科学家如何思考”,而非被动接受公式;

(2) 理论剖析维度:聚焦定律的“内涵(真空、静止、点电荷条件)”与“外延(原子到天体的适用范围、现代实验精度)”,建立“条件-范围-精度”的理论认知框架,打破“公式普适性”的误区;

(3) 矛盾探究维度:引入基于氦原子的电荷三体模型,结合数值仿真(COMSOL 或者 AI 辅助编程),让学生自主发现“经典仿真中电子坍塌”与“实际氦原子稳定”的冲突,直观感知经典理论的局限性,自然衔接量子力学思想;

(4) 价值引领维度:以“电荷三体”关联科幻作品《三体》,探讨科学伦理与文化自信,探讨集体主义精神与人类命运共同体意识在应对全球性挑战中的价值,实现立德树人的根本目标,提升课程

的深度、广度与温度。

本教学设计既响应《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2023 年版)“强化定律建立过程讲解、注重中学与大学衔接”^[3]的要求,又通过“数值仿真”的高阶任务、“科学-人文”双逻辑的思政融入,落实金课建设标准,更形成可迁移的教学范式,为大学物理中牛顿运动定律、万有引力定律等基础定律的深化教学提供创新参考。

1 教学总体设计方案

本案例面向理工科各专业大学物理课程,建议安排 2 学时,是“静电学”模块的核心案例,后续可直接衔接“量子力学基础”模块,形成知识闭环。

1.1 教学目标

1.1.1 知识与技能层面(从“知道”到“懂得”)

- (1) 复述库仑定律的表达式和内容(知道)。
- (2) 阐述库仑定律建立的科学历史过程,包括观察、猜想、实验验证和物理量定义(懂得)。
- (3) 分析库仑定律的成立条件(真空、点电荷、静止)、适用范围(从原子到天体)和现代实验精度(懂得)。
- (4) 运用叠加原理解决简单点电荷系的静电力问题。

1.1.2 过程与方法层面

- (1) 体验物理学家建立物理定律的科学思维方法:观察→猜想→实验→归纳→修正→应用。
- (2) 通过电荷三体运动的数值仿真,学习建立物理模型和利用计算机工具进行研究的方法。
- (3) 通过对比经典仿真与量子事实的冲突,学习发现问题和提出假说的研究方法。

1.1.3 情感、态度与价值观层面(课程思政)

通过关联科幻作品《三体》,在对比中西方叙事差异中融入课程思政,探讨科学伦理与文化自信,探讨集体主义精神与人类命运共同体意识在应对全球性挑战中的价值,实现知识、能力与素养的有机融合。

1.2 教学重点与难点

1.2.1 教学重点

- (1) 库仑定律的建立过程及其所体现的科学方法。
- (2) 库仑定律的内涵(成立条件)与外延(适

用范围与精度)。

(3) 通过数值仿真发现经典理论与量子事实的矛盾。

1.2.2 教学难点

(1) 引导学生超越公式记忆,深入思考定律的“所以然”。

(2) 电荷三体运动数值仿真的实现与结果分析。

(3) 理解从经典电磁学向量子力学过渡的必要性和基本思想。

1.3 教学方法与手段

1.3.1 教学方法:

(1) 科学史探究式教学:以问题驱动教学(PBL教学),如“如何定量测量静电力?”“没有库仑定律如何定义电量?”,替代传统“灌输式”讲解;

(2) 数值仿真辅助教学:以“氢原子为何稳定”为核心问题,引导学生通过专业软件 COMSOL 或者 AI 工具辅助编写仿真程序(降低仿真门槛)寻找答案;

(3) 跨学科融合教学:融合物理学(库仑定律)、计算机科学(数值仿真)、文学(《三体》叙事)与思政教育,打破学科壁垒。

1.3.2 教学手段

(1) 双工具仿真:提供“COMSOL 专业仿真”与“AI 辅助 Python 编程”两种选择,适配不同软件基础的学生,解决传统仿真“门槛高、参与率低”的痛点;

(2) 可视化冲突展示:将“经典仿真中电子坍塌或飞出轨迹”与“实际原子稳定结构”对比呈现,用直观图像强化认知冲突;

(3) 碎片化视频导入:播放《三体》“古筝行动”等片段,快速激活学生兴趣,为思政融入铺垫场景。

2 教学流程安排与构想(2学时,90分钟)

2.1 环节1:创设情境,引发认知冲突(10分钟)

2.1.1 直接提问

“库仑定律的公式是什么?”(几乎所有学生都能回答)。

2.1.2 深度追问(费曼式提问)

(1) “为什么是平方反比,而不是三次方或一

次方?”

(2) “库仑是如何测量出那么微小的力的?”

(3) “这个公式在什么情况下会失效?”

(4) “如果平方反比指数偏差一点点,比如是2.0000001,世界会怎样?”

2.1.3 引出主题

指出“知道”公式与“懂得”定律之间的区别,明确本课目标不仅是复习,更是“深度学习”和“真正理解”。

本环节创新点在于:不回避学生“知道”公式的事实,而是以“深度追问”直击“知其然不知其所以然”的认知痛点,为“陌生化”教学奠定基础。

2.2 环节二:重走科学之路——库仑定律的建立(25分钟)

按“现象观察→猜想提出→实验验证→物理量定义”的科学逻辑展开,每一步均与学生展开互动讨论。

2.2.1 现象观察(17世纪—18世纪初)

(1) 展示历史实验:1729年格雷发现“电的传导性”,1733年杜菲发现“两种电荷(玻璃电与树脂电)”,引导学生总结早期静电现象的核心特征——“同种电荷排斥,异种电荷吸引,力的大小与距离有关,相互作用是一种非接触的作用等。”

(2) 互动提问:“这些现象只是定性描述,如何定量测量‘力与距离、电荷的关系’?这是当时物理学家面临的核心问题。”

2.2.2 提出猜想(1767年,普利斯特利)

(1) 讲解类比思维:普利斯特利观察到“带电金属空腔内部没有电荷”,类比牛顿万有引力中“球壳内部引力为零”的结论,提出“静电斥力也可能遵循平方反比律”的猜想;

(2) 学生讨论:“为什么‘空腔内部无电荷’能类比出‘平方反比律’?若力与距离的三次方成反比,空腔内部电荷分布会怎样?”(引导学生初步理解“实验现象与理论猜想的关联”)。

2.2.3 实验验证(1785年,库仑)

(1) 讲解扭秤实验(测斥力):用扭丝悬挂一根绝缘细杆,杆的一端固定带电小球A,另一端固定平衡小球;将带电小球B靠近A,因斥力使细杆旋转,通过扭丝的扭转角度计算斥力大小(扭转角度与斥力成正比)。库仑改变A、B间距,测得斥

力与距离平方成反比,即 $F \propto \frac{1}{r^2}$ 。

(2) 讲解单摆实验(测引力):实验改进,因引力较弱,扭秤灵敏度不足,库仑将带电小球作为单摆摆球,带电大球作为引力源,通过“引力改变单摆周期”计算引力大小(周期与引力的平方根成反比);实验结果验证“引力也遵循平方反比律”,且“力与两球电量乘积成正比,即 $F \propto q_1 q_2$ ”。图 2 为教学案例 PPT 中的上述相关内容的页面展示。

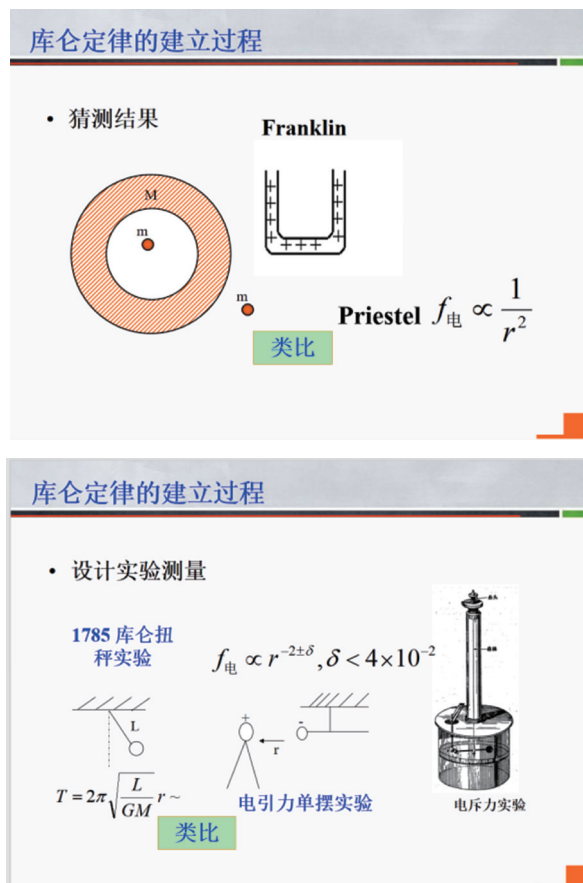


图 2 教学案例 PPT 中的典型页面展示

(3) 逻辑推导:库仑实验发现 $F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$,但此时“电量”尚无明确单位。进一步设 $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$,如果其他物理量都定了,系数 k 的大小自然确定;如果公式中有还没有确定的物理量,则可令系数为 1,然后来定义未知的物理量。按照这个方法,可定义电量的单位:取 $k = 1, q_1 = q_2, r = 1\text{cm}, F = 1\text{dyn}$,则 q 的单位称为 1e. s. u,这是 CGSE 制(厘米·克·秒静电单位制)中电量的单位。

需要指出的是我们现在采用的 MKSA 制(SI)中,电量单位是库仑(C),两者可以转换: $1\text{C} = 3 \times 10^9 \text{e. s. u}$ 。在库仑定律建立当初,电量还没有定义。库仑定律重要性就在于它建立了一个力的测量值与电荷量值之间的关系,从而为我们提供了一种定义和测量电量的根本方法。没有库仑定律,我们就无法精确地量化“电荷”这个概念。

(4) 互动提问:“若没有库仑定律,我们如何衡量‘一个物体带多少电’?”(引导学生理解“物理定律与物理量定义的相互依存性”)。

本环节创新点:通过“还原科学家的困境与突破”,让学生从“公式接收者”转变为“规律探索者”,实现库仑定律的“认知重构”。

2.3 环节三:深化与拓展——定律的内涵、外延与理论地位(15 分钟)

2.3.1 内涵(成立条件)

引导学生总结出“真空”“静止”“点电荷”三个关键条件,并讨论为何需要这些条件。比如,可向学生介绍,若电荷运动,就会产生磁场,相互作用力需考虑洛伦兹力,库仑定律失效;若有介质,介质的极化现象会影响电荷分布,库仑定律中需引入介电常数 ϵ 进行修正;若非点电荷,需用微元分析法,利用叠加原理或积分来计算带电体间相互作用力等。

2.3.2 外延(适用范围与精度)

(1) 适用范围:从原子尺度(约 10^{-10}m)到天体物理尺度(行星际空间),讨论其普适性。

(2) 实验精度:考虑实验精度,库仑公式应写为 $F = k \frac{q_1 q_2}{r^{2 \pm \delta}}$,其中 δ 越小,定律越精确;库仑年代测得 $\delta \leq 10^{-2}$,现代实验测得 $\delta \leq 10^{-16}$,说明“平方反比”是极高精度的近似。

2.3.3 理论地位与现代意义

(1) 指出库仑定律是静电学的基石,是整个电磁理论大厦的起点。库仑定律是电场强度、电通量、高斯定理的基础,如电场强度定义 $E = \frac{F}{q_0}$ 就直接源于库仑定律;

(2) 揭示库仑定律与光子静质量为零的深刻联系:若库仑定律中的“平方反比”不严格成立,那么高斯定理将不再成立,光子的静止质量将不是零,将动摇现代电磁理论的基础。

(3) 指出库仑定律的普适性:在化学(分子键作用力)、材料科学(半导体掺杂)、粒子物理(质子-质子散射)中均有核心应用;平常所说的一些力,如拉力、弹力、支持力、压力、摩擦力本质上也是库仑相互作用力。库仑定律是链接经典物理与近代物理的桥梁。

本环节创新点在于:通过“条件分析→精度对比→跨学科应用”,构建库仑定律的“立体认知网络”,打破“公式孤立存在”的局限。

2.4 环节四:挑战与超越——从经典到量子的过渡(25 分钟)

2.4.1 提出问题

库仑定律如此精确,能否用它来描述原子(如氢原子)内部的世界?当三个具有质量的物体仅在引力作用下运动时,其行为呈现出复杂的混沌特性,这就是著名的三体问题。类似地,三个带电粒子在仅受库仑力作用下的运动被称为电荷三体运动,其动力学行为是否同样具有高度复杂性?在提出这一问题的同时,可顺势引入刘慈欣所著科幻小说《三体》,为后续课程思政内容的融入做好铺垫。实际上与引力三体问题类似,电荷三体系统同样表现出复杂的混沌行为,通常需借助计算机编程进行数值仿真求解。

2.4.2 数值仿真活动

模型:以经典氢原子模型为例,氢原子由一个带正电的原子核和核外 2 个带负电的电子组成,可视为电荷三体模型^[4]。模拟时,原子核固定(解释原因:原子核质量远大于电子质量,在相同库仑力作用下,原子核的运动相对电子运动要弱得多,可忽略不计),原子核与电子之间只考虑库仑力,忽略万有引力。

任务:通过 COMSOL 软件对电荷三体问题的运动轨迹进行仿真求解。在教学实践中,为确保学生具备相应的软件操作能力,笔者前期采用录制 COMSOL 教学视频的方式,引导学生进行线上学习,从而掌握软件的基本使用方法,并顺利开展数字化教学,取得了良好的教学效果^[5]。对于尚未掌握 COMSOL 的学生,也可借助 Deep-Seek、豆包等 AI 工具辅助编写 Python 程序,实现仿真模拟,同样可取得较好的学习成效。

结果:仿真结果显示氢原子体系不稳定(特殊的稳定解除外),电子很快会“坍缩”或被“甩

出”,如图 3 所示(注:仿真尺寸并非原子实际大小)。

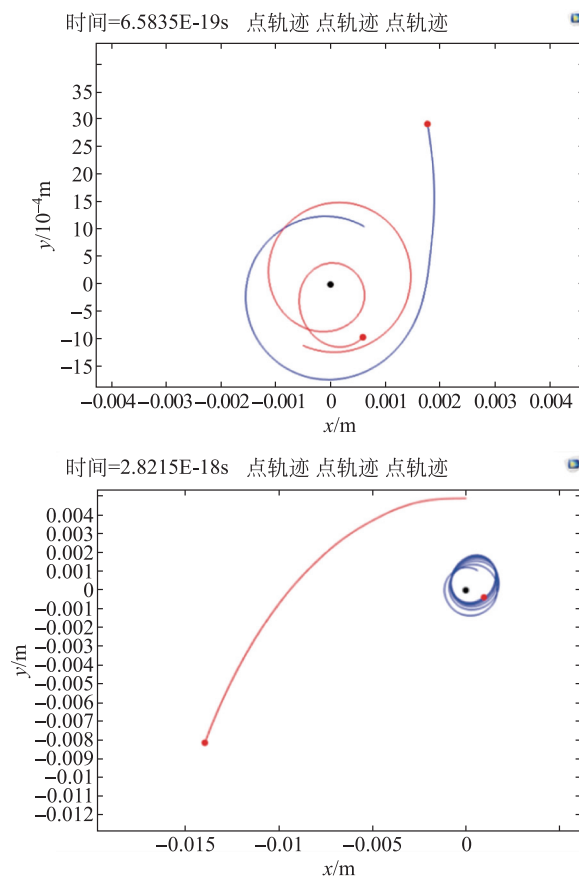


图 3 电荷三体运动轨迹

2.4.3 引发认知冲突并开展讨论

现实的氢原子是稳定存在的,与经典模拟结果存在矛盾!矛盾原因何在?引导学生开展讨论。

(1) 引导学生思考经典仿真中忽略了什么?(答案要点:忽略了电子的波粒二象性,即电子的粒子量子效应)

(2) 简要介绍量子力学的基本思想:能级量子化、波粒二象性、泡利不相容原理等,指出正是这些原理保证了原子的稳定性。

(3) 讨论总结:库仑定律在原子尺度内仍然精确成立,但描述微观世界需要新的理论框架——量子力学。经典理论有其适用边界。

本环节创新点:通过 COMSOL 专业软件或者“AI 辅助仿真”,让学生自主发现经典理论的局限性,实现“从经典物理到量子物理的自然过渡”,避免量子力学“突兀引入”的痛点。

2.5 环节五：思政融入-课堂升华(10 分钟)

由电荷三体运动,联想到刘慈欣著名科幻小说《三体》及其改编的同名电视剧。大部分同学对《三体》小说或者电视剧都有了解,并且很感兴趣,这为课堂的讨论打下了基础。该环节案例设计如下:

2.5.1 首先播放《三体》中“古筝行动”或“面壁计划”等片段

展示人类为应对共同危机所进行的全球协作、战略谋划与集体牺牲。

2.5.2 抛出问题

“同样面对末日危机,好莱坞电影中的超级英雄如何解决问题?而《三体》中的人类又是如何应对的?”

2.5.3 学生讨论与教师总结要点

(1) 西方个人英雄主义,以钢铁侠、蝙蝠侠等为例,强调个人的超能力、智慧或财富,以一人之力力挽狂澜,拯救世界。其叙事核心是个人的卓越与胜利。

(2) 中国集体主义精神:《三体》中,无论是“古筝行动”中多国部队的协同执行,还是“面壁计划”举全球之力寻找对策,抑或是“危机纪元”下的人类联合政府,强调的都是集体的智慧、协作与牺牲。没有唯一的救世主,命运掌握在人类共同体的手中。

2.5.4 课堂升华:文化自信与人类命运共同体

(1) 中国科幻的崛起与认可:刘慈欣的《三体》获得世界科幻最高奖“雨果奖”^[6],标志着蕴含着中华文化基因的科幻叙事和价值观得到了世界的广泛认可。这不仅是文学的成功,更是一种文化软实力的体现,增强了我们的民族自信和文化自信。

(2) 东方智慧的时代价值:《三体》所蕴含的集体主义、全局观和“天下”情怀,与西方个人英雄主义叙事形成了鲜明对比。在面对全球性挑战(如气候变化、流行病、能源危机)的今天,这种强调合作、共担、共赢的“人类命运共同体”理念,提供了至关重要的东方智慧和解决方案。

本环节创新点:从“电荷三体”到与学生感兴趣的科幻作品《三体》,打破学科壁垒(物理-计算机-文学),将思政教育融入科学探究场景,探讨科学伦理与文化自信,实现立德树人的根本目标,

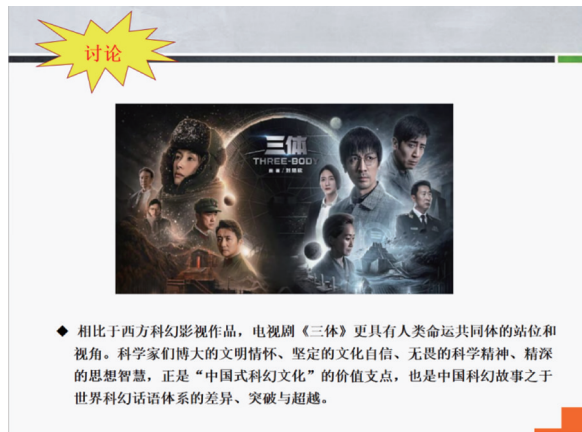


图4 教学案例 PPT 中的《三体》讨论相关页面展示

提升课程的深度、广度与温度。

2.6 环节六：课堂小结与作业布置(5 分钟)

2.6.1 课堂小结

总结本次课的核心思想:懂得一个物理定律,既要理解其科学内涵,也要了解其背后的科学方法与精神;既要拥有探求真理的热情,也要具备反思理论的批判性思维;既要学习西方科学的先进成果,也要树立起基于自身文化的自信,认识到中华文化中的集体主义智慧在解决未来人类共同挑战中的巨大价值。

2.6.2 布置作业

(1) 完善电荷三体仿真程序,并撰写简短报告。

(2) 分析“万有引力定律”公式的外延、内涵、其使用范围、质量的定义等。

3 结语

本教学案例旨在对大学物理中一个“熟悉”的定律进行“陌生化”处理,深入挖掘其历史背景、哲学意涵与方法论价值,将教学重心从公式记忆转向科学思维能力的培养。通过“重走科学之路”,让学生亲历定律的构建过程;通过“剖析内涵与外延”,让学生深入理解理论的深度与适用边界;通过“数值仿真冲突”,让学生直观感知经典理论的局限性,与量子理论发展的必要性;最终通过“《三体》叙事”融入课程思政元素,实现价值引领。

本案例有效回应了“中学学过,大学如何再讲”的教学痛点,并通过“电荷三体仿真”任务落实

金课建设“两性一度”的教学要求。该教学设计可推广至大学物理中其他基础定律的教学实践,如牛顿运动定律、万有引力定律等,其核心在于“以定律建立过程替代公式背诵,以矛盾分析推动知识深化,以思政元素引领价值塑造”。未来教学中,可进一步引入虚拟仿真技术(如 VR 技术重现库仑扭秤实验),构建沉浸式学习环境,让学生更真实地体验物理定律的形成过程,进一步提升教学效果。最终,希望通过本案例的实施,使学生不仅“掌握库仑定律的数学表达”,更能“理解物理定律的本质与科学思维方法”,从而培养具备“科学素养、创新能力与家国情怀”的高素质理工科人才。

参 考 文 献

- [1] 理查德·费曼. 别闹了,费曼先生[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,2013.
RICHARD P. Feynman. Surely You're Joking, Mr. Feynman! [M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 2013. (in Chinese)
- [2] 吴琪,席特,胡婧,等. 关于光子静止质量是否为零相关问题的讨论[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2019(7):33-37.
WU Q, XI T, HU J, et al. Discussion on issues related to whether the rest mass of a photon is zero[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2019(7): 33-37. (in Chinese)
- [3] 教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会. 理工科类大学物理课程教学基本要求(2023年版)[M]. 北京:高等教育出版社,2023.
Teaching Guidance Committee for University Physics Courses in Institutions of Higher Education, Ministry of Education. Basic Requirements for the Teaching of College Physics in Science and Engineering Universities (2023 Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2023. (in Chinese)
- [4] YAMAMOTO T, KANEKO K. Helium atom as a classical three-body problem[J]. Physical Review Letters, 1993, 70(13): 1928-1931. DOI: 10.1103/PhysRevLett.70.1928.
- [5] 谢东. COMSOL Multiphysics 在“大学物理”数字化教学中的应用[C]. //2024年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会,2024:15-20.
Xie D. Application of COMSOL Multiphysics in Digital Teaching of College Physics[C]. //Proceedings of the 2024 National Academic Symposium on Physics Basic Course Education in Higher Education Institutions, 2024: 15-20. (in Chinese)
- [6] 万紫欣. 科幻小说《三体》的文本内叙述视角忖度[J]. 牡丹, 2023(10):23-26.
WAN Z X. Analysis of Intratextual Narrative Perspective in the Sci-Fi Novel The Three-Body Problem [J]. Peony, 2023 (10): 23-26. (in Chinese)
- [7] 马中玉,张竞上. 高等量子力学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2013.
MA Z Y, ZHANG J S. Advanced quantum mechanics[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2013. (in Chinese)
- [8] 钱伯初. 量子力学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
QIAN B C. Quantum mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [9] 井孝功,郑仰东. 高等量子力学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2012.
JING X G, ZHENG Y D. Advanced quantum mechanics [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2012. (in Chinese)
- [10] ANZAI Y, HERBERT A S. The theory of learning by doing[J]. Psychological Review, 1979, 86(2): 124-140.
- [11] HUSIMI K. Some formal properties of the density matrix [J]. Proceedings of the Physic-Mathematical Society of Japan, 1940, 22(4): 264-314.
- [12] MA J, WANG X G, SUN C P, et al. Quantum spin squeezing[J]. Physics Reports, 2011, 509: 89-165.
- [13] KITAGAWA M, UEDA M. Squeezed spin states [J]. Physical Review A, 1993, 47(6): 5138-5143.

(上接第 93 页)