

基于原子模型的原子物理教学探索

刘 胜¹, 邹长伟¹, 侯其哲²

¹岭南师范学院物理科学与技术学院, 广东 湛江

²韶关学院智能工程学院, 广东 韶关

收稿日期: 2024年8月2日; 录用日期: 2024年9月4日; 发布日期: 2024年9月12日

摘要

物理学的主题是建模型、解模型并得到实验的进一步验证。基于此理念, 本文介绍了在原子物理学实验的基础之上进一步利用物理学模型的原子物理学教学改革的新方法, 对于原子物理的教学改革提出了我们的探索性意见。

关键词

原子物理学, 模型, 教学探索

Exploring Atomic Physics Teaching Based on Atomic Models

Sheng Liu¹, Changwei Zou¹, Qizhe Hou²

¹School of Physics Science and Technology, Lingnan Normal University, Zhanjiang Guangdong

²School of Intelligent Engineering, Shaoguan University, Shaoguan Guangdong

Received: Aug. 2nd, 2024; accepted: Sep. 4th, 2024; published: Sep. 12th, 2024

Abstract

The theme of physics is modeling, solving models, and further validating them through experiments. Based on this concept, this article introduces a new approach to reforming atomic physics teaching by utilizing physics models in addition to atomic physics experiments. We present our exploratory ideas for the reform of atomic physics education.

Keywords

Atomic Physics, Models, Teaching Exploration

Copyright © 2024 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

原子物理学是物理学专业的学科基础课，也是物理学师范本科专业的核心课程，在本科二年级下学期开设。课程内容包括原子物理、原子核物理及粒子物理共3部分。原子物理学是继经典的力学、热学、电磁学和光学之后开设的课程，仍旧属于普通物理的范畴，具有很强的历史性及综合性，需综合应用前面所学各专业的基础理论和基本知识，承上启下，是学习四大力学特别是量子力学的重要途径和基础。同时原子物理学又是20世纪才慢慢开始发展的学科，且还在不断深入发展中。因此原子物理的教学需综合考虑经典及发展这两方面的特点。对于非双一流本科院校师范生来讲，学生物理学基础相对薄弱，且原子物理学内容多且杂，知识点易混淆，不易准确掌握。因此，本文根据我们4年来在岭南师范学院及韶关学院48学时(只包括原子物理部分)的原子物理学(褚圣麟编著)授课实践[1]，提出了利用原子模型讲授原子物理学的新方法及一些探索性意见，请前辈们批评指正，希望此举能兼顾物理学师范教育及21世纪科学技术的发展对原子物理学教学的新要求。

2. 原子物理学课程特点

其一，原子物理学课程引用了大量的物理学实验，仅原子物理部分前八章引入了22个著名实验，并且每一个实验都是物理学诺贝尔奖的标志。这些实验能够最清晰的体现物理学基本原理和概念，这些原理和概念是现代理论发展的基础。实验基本上采用了一种特别的标准技术，以产生有足够精度又有意义的结果，而又不需要付出极大努力以得到极高精度，由此，不得不赞叹这些实验的精妙。包括2024年在内，共有104项Nobel物理学奖授予原子物理相关的理论或实验工作。这些理论或实验工作是人类了解自然的历史轨迹，是人类认识自然的丰碑，是人类改造自然的历史明证。

其二，不应强调严格的数学推导过程，将重点放在物理实验，物理现象，物理模型上，只强调基本原理和概念。由于学时及专业的限制，一般来讲，原子物理学先于量子力学，并与数学物理方法同学期讲授。此时，学生还没掌握求解偏微分方程，求解微扰矩阵元的技术方法，没有足够的基础去应对原子物理学的相关数学推导。在教学中，应可能简化数学处理，并且对于一些不能通过直接和相对简短的推导得到结果的情况，只是简单地给出结果并提供相应的参考。在可能存在多种处理方法的情况下，选择较为简单的方法。否则学生容易淹没在繁琐的数学计算中，从而忽略了物理实质。

其三，注意近似在原子物理学的应用，明确区分近似与严格。在讲授推导或实验原理的过程中，明确告诉学生用了什么样的近似，以及为什么要这样用近似。进一步，如果不用这种近似处理，将会有什么样的后果。这样一来能更清楚的讲清楚物理，使学生明晰物理图像，二来可以展示给学生数学与物理的区别在什么地方。

其四，一方面应尊重原子物理实验及理论发展的历史规律性，主线按史实介绍原子物理学，方便学生接受；另一方面，原子物理学是一门迄今为止仍在不断向前发展的学科。在过去的六十年中，随着人们对微观结构的了解不断深入，原子物理学已经多次以许多不同的方式进行了完全的更新。如光泵浦方法、实现了性能前所未有的激光光源、非线性和时间分辨光谱学、激光冷却和囚禁、单粒子(电子、原子或光子)水平的原子系统控制、Bose-Einstein凝聚和简并Fermi气体、腔量子电动力学、飞秒和阿秒脉冲、量子信息、原子中偶极矩破缺现象的检测等[2][3]。与这些发展并行的是，原子物理学已经与许多其他物

理学和化学领域建立了有趣而富有成果的联系，为新的协同作用和交叉促进的新可能性开辟了道路。基于此，学生需要掌握的原子物理学的知识也越来越多。这也给原子物理学的教学也带来了新的挑战，需要对现今原子物理学的教学进行根本性的变革。为此，迫切需要一种新的有针对性的教学方法来贯穿整个原子物理学的新旧知识，使学生能够提纲挈领，掌握重点，把握全局。

3. 教学新探索

绪论介绍原子学说的起源。关于原子的最早的记载是公元前 5 世纪 Democritus 的形而上的“原子”学说，即简单且不可分割的基本单元。此时的“原子”学说只是哲学上的一种观念，是看不见也摸不着的。原子真正进入物理学的研究领域的分水岭是 Dalton 在 1808 年将形而上的原子观念变成了形而下的实验可观测量。诚然，这一观念的真正确认要到 20 世纪初 Einstein 利用分子运动论解释 Brownian 运动才能为人们所接受。如图 1(a) 原子模型所示。

第一章直接进入氢原子模型，如图 1(b)。为此须先介绍量子力学。第一节介绍从经典过渡到量子最典型的物理实验基础，即黑体辐射实验与光电效应实验。首先介绍解释黑体辐射能谱的 Wein 经验公式及 Rayleigh-Jeans 公式，由于这两个公式的内在矛盾，引入 Planck 能量子，讲述 Planck 量子概念的建立，Planck 能量公式。再介绍 Einstein 利用 Planck 能量子解释光电效应，同时介绍 Scully 利用纯波动解释光电效应，引入光的波粒二象性，再介绍 de Broglie 公式，不确定性原理，及 Bohr 旧量子论，强调其历史的作用。第二节介绍量子力学基本假设：引入完全描述微观系统运动状态的波函数及 Schrödinger 方程，在此基础之上进一步介绍态叠加原理，基本算符及其本征方程与本征解。第三节介绍量子力学一维可解模型及微扰论，包括一维无限深势阱，一维线性谐振子，一维隧道效应，接着介绍量子力学微扰论，包括非简并微扰及简并微扰，为后面利用微扰论讨论 Zeeman 效应、光谱线的精细结构等做准备。第四节介绍有心力场下的氢原子，如图 1(b)，在考虑中心力场的情况下，向学生介绍这是一个严格可解模型，不要求学生掌握详细的推导过程，只要求掌握描述氢原子中电子的量子数 n, l, m 即主量子数，轨道角量子数与轨道磁量子数。

第二章介绍原子结构。首先介绍 Thomson 于 1904 年提出的原子枣核模型，随后 Lenard 的金属膜散射实验推翻 Thomson 原子枣核模型。引入 1909 年 α 粒子散射实验，得到 1911 年 Rutherford 原子结构核式模型及 Rutherford 原子理论；介绍原子的组成及大小，原子核的组成大小。此时整个原子的物理结构介绍清楚了，关于原子的模型基本建构完成。但，此简单模型不能解释原子的稳定性问题、原子的同一性问题、原子的再生性问题等，需用量子力学处理更复杂的模型以得到更丰富的物理现象。

第三章讲述碱金属原子，模型如图 1(c) (以 Na 原子为例)，在氢原子模型的基础之上，使原来只有质子的氢原子核变成更复杂的闭壳层原子实，价电子维持不变。为此，须首先介绍原子中电子的壳层结构，介绍 Stern-Gerlach 实验，引入电子的自旋角动量，自旋量子数，再介绍完描述电子状态的量子数 n, l, m_l, m_s ，然后介绍 Pauli 不相容原理及多电子的电子组态，对于多电子原子，在有心力势的近似下，多电子模型简化为单电子模型。第二节，在此基础之上，结合能量最低原理，由多电子(通过电子组态)构成原子的闭壳层结构，进入多体模型，得到碱金属原子结构特点，即原子实 + 单电子。第三节介绍碱金属原子的能级结构，由于碱金属原子壳层结构的特点，引入原子的极化与贯穿形成的微扰，由微扰得到碱金属原子的有效量子数，得到碱金属原子能级及其特点。考虑单体模型下的非有心力势——自旋轨道(LS)耦合微扰 Hamiltonian，由微扰得到碱金属原子的精细结构。第四节介绍能级跃迁，考虑含时微扰，介绍单电子电偶级，磁偶极跃迁的 Laporte 定则。

第四章讲述多电子原子，原子模型如图 1(d) 所示(以 Mg 原子为例)，与前面第三章模型相比，价电子变成了 2 个。在精细结构一节中，由多电子原子壳层结构的特点，引入电子组态的 LS 耦合与 JJ 耦合，利用

非有心力势微扰计算 LS 耦合与 JJ 耦合的精细结构。由于基态原子都是 LS 耦合, 利用 Pauli 不相容原理及 Hund 定则确定基态原子的电子组态和原子态。在能级跃迁一节中, 考虑含时微扰, 介绍 2 电子电偶级跃迁的 Laporte 定则, 用电偶极, 磁偶极辐射微扰解释 Einstein 自发辐射及受激辐射, 在此基础上, 介绍受激辐射的光放大的激光原理。类似的, 如果价电子不止有 2 个电子, 壳层结构也变得更复杂, 其原子模型如图 1(e), 可以延用本章的方法继续讨论, 随着原子模型变得更复杂, 也会产生新的物理现象, 进入下章。

第五章介绍原子光谱。包括由外层价电子激发产生的原子光谱及由内层电子激发产生的 X 射线, 介绍 X 射线的连续谱与标识谱并强调其与外层电子激发的不同之处。继续介绍 Moseley 实验、Moseley 定律及原子序数的实验测定并与前面利用 α 粒子散射实验测定原子序数相比较; 介绍 Compton 效应。第二节介绍 Zeeman 效应。将原子磁矩与恒定磁场的相互作用势作为微扰项, 利用微扰理论计算能级可得到正常 Zeeman 效应与、反常 Zeeman 效应与 Paschen-Back 效应, 进一步, 再介绍核磁共振与顺磁共振。同理将电偶极矩与电场相互作用势能作来微扰, 得到氢原子的一级 Stark 效应。

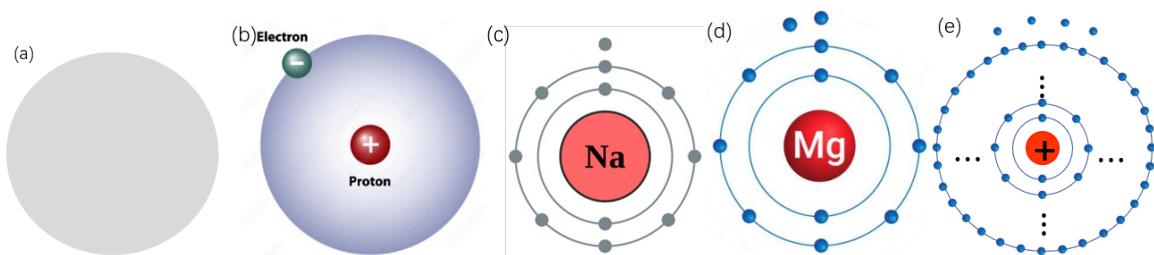


Figure 1. (a) Diagram of the atom in the concept; (b) Hydrogen atom model; (c) Sodium atom model; (d) Magnesium atom model; (e) Multi-electron atom model

图 1. (a) 观念中的原子图解; (b) 氢原子模型; (c) 钠原子模型; (d) 镁原子模型; (e) 多电子原子模型

4. 强调实验的重要性

原子物理学是研究原子结构、能级以及原子与其它粒子、电磁辐射之间相互作用的科学。它是一门构筑在实验基础之上的学科, 且其发展又密切依赖于实验与理论的深切合作, 同时, 实验提供了对理论模型的验证和修正, 可以帮助我们理解原子和分子的行为, 并为应用领域, 如材料科学、生物医学、能源和环境科学等提供基础。包括 2022 年在内, 共有 104 项诺贝尔物理学奖授予原子物理相关的理论或实验工作。这些理论或实验工作是人类了解自然的轨迹, 是人类认识自然的丰碑, 是人类改造自然的明证。讲授原子物理学课程, 首先应建立在讲授这些著名的原子物理学实验的基础上。获得诺贝尔物理学奖的科学家通常是在重大科学问题上做出了杰出贡献, 他们的实验成果对于推动物理学领域的发展具有重要的意义。通过讲授这些著名实验, 学生可以深入了解这些重大科学成果, 从而加深对物理学的理解和认识。诺贝尔物理学奖实验通常都是非常具有创新性和挑战性的, 这些实验成果的获得往往是众多科学家长期努力和不断尝试的结果[2]。通过讲授这些实验, 可以激发学生的科学兴趣和研究热情, 让他们了解到科学的研究的长期性和不断探索的重要性。诺贝尔物理学奖实验通常都是非常具有复杂性的, 需要科学家们具备扎实的理论基础和优秀的实验技能。通过讲授这些实验, 可以培养学生的科学素养和研究能力, 提高他们的理论水平和实验操作技能, 为他们未来从事科学研究打下坚实的基础。诺贝尔物理学奖实验代表了物理学领域的最高成就, 对于学生了解和掌握物理学领域的科学文化素养非常重要。通过讲授诺贝尔物理学奖实验, 可以增强学生的科学文化素养, 提高他们对物理学领域的认识和了解。

5. 注意近似在原子物理学中应用

让人类引以为傲的物理学理论, 如量子力学、相对论, 其实都是近似理论, 它们只适用于自然世界的

局部, 只能描述宇宙自由度空间中的一个子集。如此, 不管是处理物理理论问题还是实验问题, 首先要用到的就是近似, 特别是在原子物理学中, 近似用得尤其多, 也尤其重要。如在 α 粒子散射实验中处理散射角的时候, 将在有限距离观察的散射角近似为无穷远严格的散射角; 近似描述原子的电子结构的 Hartree-Fock, 它将每个电子视为在其它电子所产生的平均场中运动, 忽略了电子之间的关联, 这种近似简化了多体问题, 并允许计算原子的能级和电子密度等性质; Thomas-Fermi 近似[2], 近似认为电子密度是电子动能的函数, 并忽略了电子密度的空间变化, 这种近似提供了一种简单而有效的方法来计算原子的性质; 又如扰动近似, 被广泛用于处理已知解的小偏差, 扰动理论在考虑电子之间的相互作用或外部场的情况下特别有用; 又如 Born-Oppenheimer 近似、半经验模型近似等。这些近似在推动我们对原子结构、光谱学和化学反应方面的理解方面起到了重要作用[3]。虽然引入了简化, 但并没有隐没真正的物理, 且提供了宝贵的见解, 并使得计算原子的性质成为可能, 而纯粹的理论方法难以实现。这些近似为学生在学习原子物理学时提供了一些重要的启发, 其一, 理解复杂系统的简化, 学生可以通过研究近似方法来理解如何在不失原有物理的前提下将复杂的多电子原子系统简化为更易处理的形式。这有助于培养学生在处理复杂问题时的抽象和简化的能力。其二, 掌握基本原理, 通过学习近似方法, 学生可以深入了解原子物理学的基本原理和概念。这些近似方法提供了一个框架, 使学生能够理解原子结构、能级分布、电子行为等基本原理。其三, 计算和模拟技能, 近似方法在计算原子性质和模拟原子系统时起着关键作用。学生可以通过学习和应用这些近似方法来提高他们的计算和模拟技能, 从而能够预测和解释实验结果。其四, 理论与实验的结合, 半经验模型是将理论和实验数据结合起来的方法, 学生可以通过研究这些模型了解如何将理论与实验相结合来解释和预测原子性质。这有助于培养学生的实验设计和数据分析能力。其五, 深入研究的激发, 近似方法虽然简化了问题, 但仍然能够提供有关原子物理学的深入见解。学生可以通过深入研究这些近似方法的局限性和改进方法来激发他们对原子物理学的兴趣, 并鼓励他们进一步探索更复杂的问题。学习近似方法可以帮助学生建立原子物理学的基本概念和计算技能, 并激发他们对未知领域探索的兴趣。

6. 改进教学方法

原子物理学作为 48 学时的课程, 教学内容相当丰富, 课时量较少。如果采用传统灌输式的教学方法, 除了极少数有兴趣的同学能够充分利用这种教学方式外, 其它同学感到信息大, 负担重, 提不起兴趣, 所获甚微。原子物理课程分为三个层次: 第一是成熟、已有定论的基本内容, 要求学生掌握基本概念并能熟练运用, 这部分内容应重点讲解; 第二是目前已取得最新研究成果, 要求学生理解其物理概念和物理内涵, 这部分可次要讲解; 第三对于前沿研究课题内容, 要求学生了解其研究方向, 这部分可作简要介绍。基于此, 具体的展开为: ① 互动实验: 原子物理学是一个基于实验的科学领域。通过设计互动实验, 学生可以更好地理解物理概念和原理。例如, 可以使用激光来展示原子的结构和能级。② 虚拟实验: 虚拟实验可以让学生在没有实验室的情况下进行实验。一些模拟器可以模拟原子物理学实验, 并提供实时反馈和数据分析。③ 视频教学: 通过使用动画和演示视频, 可以更好地向学生展示原子物理学的概念。这些视频可以使用现代的动画和计算机图形技术来呈现, 从而更好地吸引学生的兴趣。④ 互动课程: 通过设计互动课程, 学生可以更好地理解原子物理学的概念。例如, 可以使用小组讨论、游戏和问题解决等活动来促进学生的参与和交流。⑤ 个性化学习: 为每个学生设计个性化的学习计划。这可以通过使用自适应教学软件来实现, 该软件可以根据学生的学习风格和进度来调整课程内容和难度。⑥ 跨学科教学: 将原子物理学与其他学科结合起来, 例如化学、生物学和工程学等。这可以帮助学生更好地理解原子物理学的实际应用和意义。

7. 总结

以上是用褚圣麟老师编著《原子物理学》在岭南师范学院及韶关学院讲授 48 学时原子物理学课程的一点探索。对原子物理教学将物理学建模型, 解模型的思想贯穿于原子物理学教学的每一章, 具体渗透

到每一节。用这种模型方法教学简洁明了，可以有更多的时间投入到具体细节中，但又不至于迷失于繁琐的计算当中，混乱了物理。使学生体会到模型的魅力和重要性。加深了学生对于物理学的理解和认识，激发了学生的兴趣和热情。希望此举能兼顾基础物理学及 21 世纪科学技术的发展对原子物理学教学的新要求。

基金项目

国家自然科学基金(12205194)、2021 年度广东省一流本科课程——原子物理学(2021~2025)、2021 年广东省本科高校教学质量与教学改革工程项目(“岭师 - 江海行” 真空技术创新联合实验室)、2021 岭南师范学院教学质量与教学改革工程项目——真空技术与装备产业学院、2021 年度岭南师范学院教育教学改革项目：以产业集群和产业学院引导的学生融合创新能力培养模式探索与实践、2022 岭南师范学院教学质量与教学改革工程项目——应用物理学一流专业、2022 年度岭南师范学院应用物理学课程思政教学团队、湛江科技项目(2019A03009, 2022A0100)、广东省普通高校重点领域专项项目：新一代信息技术(2020ZDZX3068)、韶关市科技计划项目(210809004530908)。

参考文献

- [1] 褚圣麟. 原子物理学[M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2022.
- [2] 杨福家. 原子物理学[M]. 第 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [3] Foot, C.J. (2005) Atomic Physics. Oxford University Press Inc., New York.