

从另一个角度处理“原子结构”内容的尝试

周春生¹ 邸友莹¹ 陈三平² 杨 奇² 谢 钢² 高胜利^{1,2,*}

(¹商洛学院化学工程与现代材料学院, 陕西 商洛 726000; ²西北大学化学与材料科学学院, 西安 710079)

摘要: 从教材内容和课程设计的科学性论证了基础无机化学课程中“原子结构”应分为“原子和原子结构”和“元素与周期律”两章。“原子和原子结构”包括原子结构、核外电子的运动状态和原子核结构,“元素与周期律”包括元素的起源、周期律的建立和元素基本性质的规律性。通过教学实践,说明这样的处理有利于探索教材结构处理对教学效果的影响,符合认识论规律。教法的改革有利于从基础课教学方面提高学生的科学研究意识。

关键词: 原子结构; 元素周期律; 课程设计; 教学方法; 教学效果

中图分类号: G64; O6

An Attempt on Teaching about the Content of “Atomic Structure” from a Different Point of View

ZHOU Chun-Sheng¹ DI You-Ying¹ CHEN San-Ping² YANG Qi²
XIE Gang² GAO Sheng-Li^{1,2,*}

(¹College of Chemical Engineering and Modern Materials, Shangluo University, Shangluo 726000, Shaanxi Province, P. R. China;

²College of Chemistry & Materials Science, Northwest University, Xi'an 710069, P. R. China)

Abstract: Based on the scientific nature of the teaching content and curriculum design, this article demonstrates that the chapter “atomic structure” in basic inorganic chemistry course should be divided into two chapters, “atom and atomic structure” and “element and the periodic law”. The chapter “atom and atomic structure” includes the contents of atomic structure, electron motion state and the nucleus structure, while the chapter “element and the periodic law” includes the origin of elements, the establishment of the periodic law and basic property regularity of elements. Through teaching practice, such treatment is helpful in exploring the effect of the teaching content structure, and is agreeable with the law of epistemology. The reform of the teaching is helpful in improving students' scientific research consciousness in fundamental course teaching.

Key Words: Atomic structure; Periodic law of elements; Course design; Teaching method; Teaching result

原子结构是大一无机化学教材的基础理论知识之一,它抽象、理论性强,学生理解难度大。在国内大多数主流教材中^[1-9],章节处理常常单列为一章“原子结构”,或设计为章题“原子结构与元素性质”或“原子结构与元素周期律(系)”。内容包括原子的起源、原子结构的玻尔模型和波动力学模型、核外电子的运动状态、元素周期系和元素基本性质的周期性。一些外文教材也是如此处理

*通讯作者, Email: gaoshli@nwnu.edu.cn

基金资助: 第三批国家级精品资源共享课[教高函(2013)132号]; 国家精品课程[教高函(2007)20号]; 陕西省高等学校教改项目[(2015)J32]

的^[10-16]。在多年的教学实践中，我们尝试从另一个角度处理教材结构，把“原子结构”和“元素与周期律”分为两章：“原子结构”包括原子结构、核外电子的运动状态和原子核结构；“元素与周期律”包括元素的起源、周期律的建立和元素基本性质规律。经过实践，效果良好。

本文就“原子结构”内容从章节划分、内容设计、讲授方法和尝试效果分析，目的在于探索教材结构处理对教学效果的影响，以及引导学生如何运用知识去认识自然界，如何从基础课教学提高学生的科学探究意识。

1 章节划分要有科学性

众所周知，物质的性质由原子内部结构决定。原子结构研究要回答的问题是：原子由哪些微粒组成？这些微粒在原子内部以怎样的方式排布？微粒之间的结合力如何等。在中学化学课中，学生已知原子是由质子和中子组成的原子核与核外若干个运动的电子组成，即原子结构应包含两部分：核和核外电子。因此，我们认为：第一，讲述原子结构也就应该包含原子核的组成及核子的排布与核外电子的运动及其排布，让学生明确原子结构包括原子结构模型和原子核壳层模型两部分，哪怕只是初步的讲解。第二，元素的区别是由原子核决定的，每一种特定的原子核称作一种核素。学生既然对质子和中子的概念不陌生，讲一下原子核的结构又何妨？何况了解了核结构，会对区分原子、核子、元素、核素、同位素等概念更加明确。第三，就无机化学的讲授，从原子到亚原子粒子，已是近代无机化学的范畴，让学生眼界洞开，全面认识亚原子概念的发展对认识自然更有益。

诚然，无机化学往往把原子核结构放在课程结构的后面“原子核化学”一章里讲，也不无道理（可能主要是为了保持知识的系统性）。然而，从章节内容的科学性讲，还是放在“原子结构”里讲更为合适。同时并不影响“原子核化学”内容的安排。

2 内容设计要符合认识论

科学的认识论包含两条基本原理：一是实践是认识的基础、来源和发展的动力，是检验认识真理的唯一标准，是认识的目的和归宿；二是认识对实践有反作用，正确的认识科学理论对实践有指导作用，错误的认识会把实践引向歧途。而原子结构内容正好反映了这一基本原理，人们从原子到原子结构的认识的提高，都是沿着实践—再实践逐渐上升到建立某种理论的，特别是在理论的更迭中更是表现得淋漓尽致。因此，这样的学习对学生掌握正确的认识观以及对学习自然科学有指导意义。正是这种认识，促使我们尝试将这章内容做成如表1所示的安排。

表1 原子结构内容目录

标题	内容
1 原子概念的变迁	1.1 哲学家的原子概念 1.2 科学家的原子概念 1.3 现代原子理论
2 原子内部组成探秘	2.1 原子的定义和性质 2.2 原子的基本组成
3 原子结构模型的建立和演变	3.1 人类对原子结构认识的简史 3.2 原子结构模型的几个里程碑
4 原子核结构模型	4.1 原子核结构的研究方法 4.2 原子核结构模型研究简介 4.3 原子核壳层模型

内容安排体现了以下特色：

(1) 突出实践第一。4节内容都是先有人们对自然界某种事物的发现到有奇怪的遐想，逐渐通过科学家智慧的大脑提炼、经过多次的辨识到认知，最后才形成了某种理论，反过来再指导对更为一般的类似事物的认识。其中不乏又被实践修正的情况，从而螺旋式地提高理论的正确性。例如，原子概念的形成和变迁就是这样，经历了从哲学到科学的认知过程。原子论成为了元素派学说中最简明、最具科学性的一种理论形态。英国自然科学史学家丹皮尔认为，原子论在科学上“要比它以前或以后的任何学说都更接近于现代观点”^[17]。再如，突破人们对原子内部结构的认识，首先是电子^[18]、质子^[19,20]、中子^[21,22]直至夸克^[23-25]的发现，才对原子结构有了明确的认识(图1)。同时，这些研究再次证明物质可无穷无尽地分割下去(图2)。

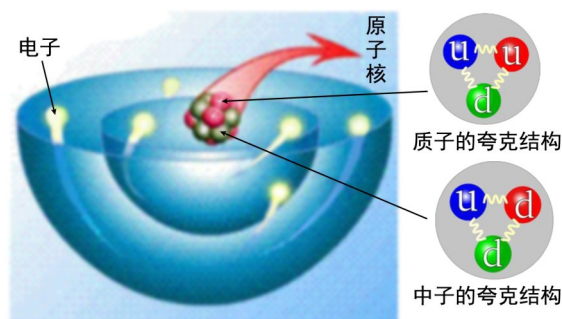


图1 原子的组成

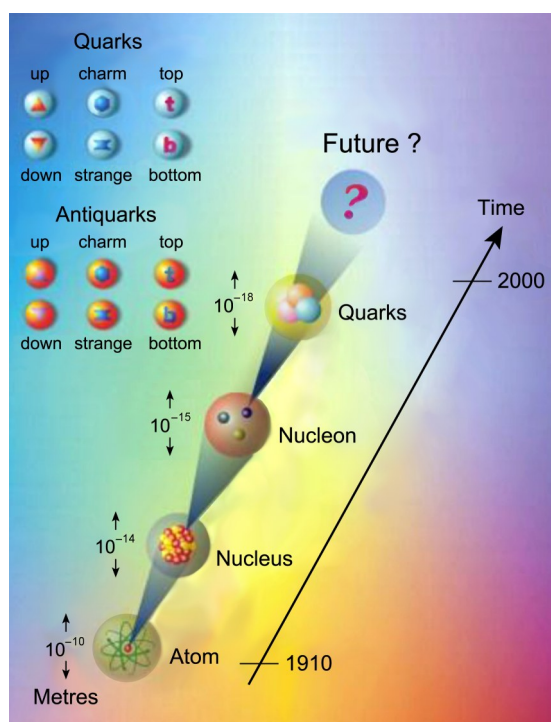


图2 原子-原子核-质子-夸克的比较

(2) 遵循实践-认识-再实践-再认识的规律。从人类对原子结构的认识过程，可以总结出一个理论发展的推进模式：现象 → 假说 → 解释现象 → 由唯象思维形成理论 → 实践 → 修正或否定旧理论、形成新理论 → 利用理论思维指导实践 → 在实践中不断充实与完善新理论。正如恩格斯曾指出

的：“只要自然科学在思维着，它的发展形式就是假说”。例如，原子结构模型的建立和演变，先是人类对原子结构的认识就经过了古代朴素原子论时期、原子-分子论时期、近代原子论时期和现代原子论时期4个阶段才得以完善。但是人们对原子结构的认识却经历了一个多世纪。真正谈得上原子有结构模型的工作大体可用图3说明。

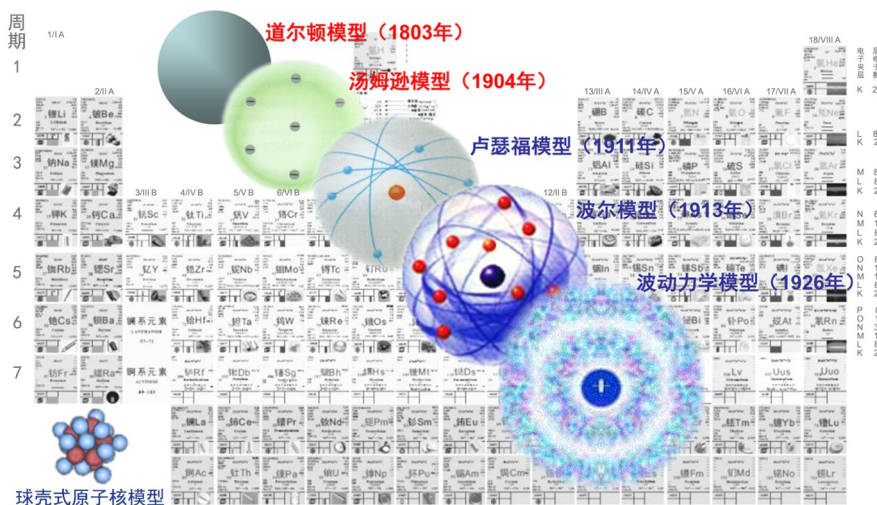


图3 化学中“原子结构模型”发展的里程碑

道尔顿(Dalton)^[26]基于牛顿(Newton)的原子论，在1808年发表的《化学哲学的新体系》中提出了他的原子理论。

汤姆孙(Thomson)^[27]在发现电子之后的第6年——1903年，为了解释原子整体的电中性，提出了著名的原子结构模型——“葡萄干布丁”模型(plum pudding model)。

1909年，卢瑟福(Rutherford)，汤姆孙的学生，对于葡萄干布丁模型提出了反对意见。他的助手盖革(Geiger)通过著名的“金箔实验”，发现一个原子的正电荷和绝大部分的质量都集中于其整体体积中一个极小的部分^[28]。他猜想，集中的位置是原子的正中心，从而提出了原子的行星模型(atomic planetary model)^[29]。后来，在1913年，为了回应弗雷德里克·索迪的质疑，他在*Nature*杂志又发表了一篇文章^[30]对自己的模型进行了完善。

在氢的原子光谱研究中，巴尔麦(Balmer)^[31]提出了一个公式，里德伯(Rydberg)提出了里德伯常数^[32]。1900年，普朗克(Planck)^[33]为了解释黑体辐射，大胆提出量子假设，提出了表达光的能量(E)与频率(ν)关系的著名的普朗克方程。1905年，爱因斯坦(Einstein)^[34]将这一概念引入光学，成功地解释了曾使经典物理学处境尴尬的一种现象——光电效应(photoelectric effect)，提出光子学说。玻尔(Bohr)，卢瑟福的学生，在行星模型的基础上引入了普朗克的量子概念，认为原子中的电子处在一系列分立的稳态上。1913年，经卢瑟福推荐，*Philosophical Magazine*接连刊载了玻尔的3篇论文^[35-37]，玻尔模型公诸于世。

1923年，德布罗意(de Broglie)^[38-40]提出了德布罗意波(相波)理论。他给出了由微粒质量(m)和运动速度(v)计算运动物体波长(λ)的德布罗意公式。1927年，戴维森(Davission)和革末(Germer)^[41]用电子衍射证实了德布罗意提出的物质波假设，构成了量子力学的实验基础。量子力学奠基人之一玻恩(Born)^[42]又给了“统计解释”^[38]。1927年，海森堡(Heisenberg)^[43]发表了不确定性原理(uncertainty principle)。在量子力学里，不确定性原理表明，粒子的位置与动量不可同时被确定。德布罗意的物质波理论和海森堡的不确定性原理说明微观粒子既具有波粒二象性，又不能同时准确地测定位置和动量，也就是说微观

粒子不会有确定的轨道。1926年薛定谔(Schrödinger)受这一想法的启发,开始探究电子的运动行为:以波的形式去表述,是否会比以粒子的形式表述更为贴切,在1926年发表了著名的薛定谔方程^[44-47],提出了迄今最成功的原子结构模型——波动力学模型。

(3) 突出物理学研究成果对原子结构理论发展的促进。从图4可以看出,在原子结构的研究中发展起来的原理、实验装置、技术和理论方法以及所积累起来的大量的基本数据,都说明了物理学的研究成果在大大促进化学中原子结构理论的发展。



图4 物理学的发展促进了原子结构理论的发展

再如原子核结构模型的建立、发展,每一点进步都充满着物理学家和核物理学家的智慧。这种智慧不光表现在对核结构的半唯象模型理论和微观理论的假想、调整和完善上,还表现在发展实验技术、设计和完善实验装置以及积累大量的基本数据等方面。

3 讲授方法要提倡“悟其渔识”

吴永军^[48]从古语“授之以鱼不如授之以渔”,引申出教书育人的三重境界,认为最高境界为“悟其渔识”。就是说,教学要从教师给学生水,到教师带领学生去找水,最终使学生拥有寻找水资源的能力,创造出新的找水方法。这对于教师的教学艺术是一种升华。这与钱伟长^[49]说的“大学教育的一个重要任务,是培养学生获取知识的能力”有异曲同工之处。因此,在原子结构一章的教授上我们采取了以下措施:

(1) 鉴于教授内容的浩瀚、课时的限制,拟采用三段式教授方法。即课前预习、课堂讲解、课后思索。课前预习就是将预备知识,如本章1.1、1.2、1.3、3.1、4.1、4.2的内容作为背景知识让学生自

学,或者提供参考文献。让学生在上课前就知道该预习什么、该听什么、该问什么,这样才有可能实施讨论,才能做到“以教师为主导,以学生为主体”的境界,才可能获得好的教学效果。这就是我们提倡的大纲式教学方法^[50]。课堂讲解就是充分发挥教师的主导作用。在大学里,基础课课堂教学和实验课仍是主要方式,其中教师是教育教学活动中的实践主体,是知识传播、人才培养的主体。这就要求教师在有限的时间内,着重讲述难点和重点,概念要讲准确。所谓课后思索,就是给学生留有对某些问题的深入思索空间,介绍可能感兴趣的读物,放在课程论文中去思考,例如《原子结构理论》、《原子结构和原子光谱》、《近代原子核模型》等书籍。

(2)“悟其渔识”的实质是如何调动学生的学习主动性。首先通过原子结构中问题的提出引起学生对科学的兴趣,以风云科学家对亚原子的研究为线索,通过熟悉—深思达到由浅入深的效果;由原子结构模型从无核到有核,以旧量子力学模型到近代量子力学模型为契机,通过理解—思索达到能提出问题的程度(即便是异想天开)。例如在讲授中提出类似如下问题供学生判断,然后教师再以实验事实进行分析:

- ① 微观粒子与宏观粒子的运动方式相同吗?为什么?
- ② 怎样证明测不准原理是对的?拍摄到的电子运动连续画面^[51,52]与测不准原理是否矛盾?
- ③ 能让原子结构模型前进的动力何在?

学生通过实例、文献分析,从科学角度自己判断所学理论的动态发展及其作用,从而避免了僵化地学习知识和不加判断地吸收,提高科学思辨能力,把知识学“活”,知道为什么要学,学了用在哪里,甚或使一些学生产生深入研究的欲望。

4 尝试效果分析要看实效

英国数学家、哲学家、教育家怀特海^[53]说:“大学存在的理由是:它使青年和老年人融为一体,对学术进行充满想象力的探索,从而在知识和追求的热情之间架起桥梁。”课程内容的新设置促进了教学方法的改革,体现了通过教学让学生“走进化学”的思想,突出了引导学生运用所学知识去认识自然世界,以及从基础课教学方面提高学生的科学研究意识的理念^[54]。

(1)多数学校会将“原子结构”放在第一章去讲,如果不改变教法,自然会让刚入校的大学生觉得台阶高、抽象性强、理解难度大。我们的做法正好突破了这一点:从化学及其相关学科的大背景入手,从历史研究事实出发,从认识论开始渐渐进入自然科学学习的殿堂,觉得理解—接受—思考很自然,也进行了科学思维方法的训练,让学生能在欣赏和享受中吸取广泛的营养。

(2)本章是最好的化学史学习,有助于学生对化学学习情感态度和价值观的培养。丰富多彩的化学史(表2)常常会以动人的故事使他们激动不已,会激发起学习化学的兴趣,感受并赞赏化学科学研究,培养献身科学的精神和严谨治学的科学态度,获得些许灵感在学习中闪烁和延伸,让他们走进化学并热爱化学。

(3)授课中注重了文献介绍,扩大了学生的科学视野。扩大科学视野不只是化学新概念、新知识、新发现和新技术的罗列,而是在于对基础内容的背景文献介绍,有利于学生科研意识的产生。本章介绍了原子结构模型的几个主要里程碑的来源、发展、进化,使学生了解现在学习的不是“死的东西”,而是当时科学研究中最为突出的成果(图5),然而它又是发展的。原子核壳层模型的建立也是这样^[55-58];同时,让学生知道为什么要学会查看和理解原始文献和怎样查阅,看看科学家是怎样产生这些想法的,有利于科学意识的培养。关于这一点,北京大学讲授“无机化学”课程的卞江教授的课件给了我们很大的启发,使学生明白科学意识产生的气氛、环境。

表2 本章出现的一些诺贝尔奖获得者

获奖时间	获奖人	获奖原因
1901年	[德]威廉·康拉德·伦琴(Wilhelm Röntgen, 1845–1923)	发现X射线
1906年	[英]约瑟夫·汤姆孙 (Joseph John Thomson, 1856–1940)	对气体导电的理论和实验研究
1923年	[美]罗伯特·安德鲁·密立根(Robert Andrews Millikan, 1868–1953)	测定电子电荷以及光电效应的卓越工作, 包括著名的油滴实验
1908年	[新西兰]欧内斯特·卢瑟福(Ernest Rutherford, 1871–1937)	对元素蜕变以及放射化学的研究
1935年	[英]詹姆斯·查德威克(James Chadwick, 1891–1974)	发现中子
1969年	[美]默里·盖尔曼(Murray Gell-Mann, 1929–)	对基本粒子的分类及其相互作用的研究发现
1936年	卡尔·戴维·安德森(Carl David Anderson, 1905–1991)	发现正电子
1957年	[华裔美国籍]杨振宁(1922–)	对所谓的宇称不守恒定律的研究, 该定律导致了有关基本粒子的许多重大发现
1976年	[华裔美国籍]丁肇中(Samuel Chao Chung Ting)(1936–)	与美国物理学家伯顿·里克特(Burton Richter)在发现新的重基本粒子方面的开创性工作
1918年	[德]马克斯·卡尔·恩斯特·路德维希·普朗克(Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858–1947)	对量子的发现而推动物理学的发展
1921年	[美国、瑞士双重国籍]阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein, 1879–1955)	对理论物理学的成就, 特别是光电效应定律的发现
1922年	[丹麦]尼尔斯·亨利克·戴维·玻尔(Niels Henrik David Bohr, 1885–1962)	对原子结构以及由原子发射出的辐射的研究
1954年	[德]马克斯·玻恩(Max Born 1882–1970)	在量子力学和波函数的统计解释及研究方面作出贡献
1929年	路易·维克多·德布罗意(Louis Victor de Broglie, 1892–1987)	发现电子的波动性
1932年	维尔纳·海森堡(Werner Heisenberg, 1901–1976)	创立量子力学以及由此导致的氢的同素异形体的发现
1933年	埃尔温·薛定谔(Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger, 1887–1961)	与英国保罗·狄拉克(Paul Adrien Maurice Dirac, 1902–1984)发现了原子理论的新的多产的形式(即量子力学的基本方程——薛定谔方程和狄拉克方程)
1963年	[美]玛丽亚·戈佩特·迈耶(Maria Goeppert Mayer, 1906–1972)	与德国汉斯·丹尼尔·詹森(J. Hans. Daniel Jensen, 1907–1973)发现原子核的壳层结构
1975年	[丹麦]奥格·玻尔(Aage Niels Bohr, 1922–)	与丹麦本·罗伊·莫特森(Ben Roy, Mottleson, 1926–)和美国利奥·詹姆斯·雷恩沃特(Leo James, Rainwater, 1917–)发现原子核中集体运动和粒子运动之间的联系, 并且根据这种联系发展了有关原子核结构的理论

5 结束语

著名教育家、化学家傅鹰教授曾经多次指出:“一门科学的历史是这门科学中最宝贵的一部分, 因为科学只能给我们知识, 而历史却能给我们智慧。”本文借助论述“原子结构”内容的教学方法和理念, 试图对此做出阐释。一是强调化学中任何一个理论都是在争议中不断更新和发展的, 结合化学史讲授, 对学生正确认识主观与客观、人类与自然等一系列问题, 以及提高人文素质和科研素质都起到不可估量的作用。其二, 不要怕给大学生讲科学大背景, 不要怕大学生了解不同的学术观点甚至是争论, 不要怕大学生在学习科学的发展中产生奇思怪想。例如, 正是上世纪以玻尔为首的哥本哈根学派与爱因斯坦等人, 围绕着量子力学理论体系的物理解释问题展开的旷日持久的、最富哲学意义的论争, 推动了量子力学的建立和完善, 并为量子力学的进一步发展提出了新的指向^[59]。甚或当代弦论的

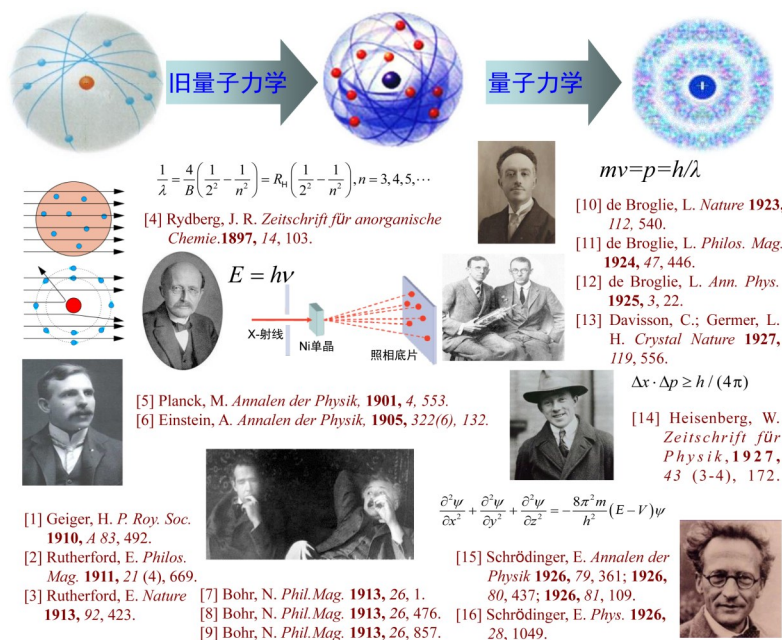


图5 原子结构模型发展中的一些文献

观点^[60]也应该介绍给学生，这正是培养学生科学批判精神的开端。人类已习惯于用一种思维方式来认识世界，而今天科学的进步，有可能让我们用多科思他途经去认识这个世界。科学研究应逐渐从表象到其本质深入。

参 考 文 献

- [1] 武汉大学, 吉林大学等校编校. 曹锡章, 宋天佑, 王杏乔, 修订. 无机化学(上册). 第3版. 北京: 高等教育出版社, 1994.
- [2] 宋天佑, 程 鹏, 王杏乔, 徐家宁. 无机化学(上册). 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [3] 申泮文. 近代化学导论(上册). 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [4] 傅献彩. 大学化学(下册). 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [5] 华彤文, 陈景祖. 普通化学原理. 第3版. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [6] 金若水, 王韵芳, 芮承国. 现代化学原理(上册). 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [7] 北京师范大学, 华中师范大学, 南京师范大学. 无机化学(上册). 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [8] 天津大学无机化学教研室. 无机化学. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [9] 龚孟谦. 无机化学. 北京: 科学出版社, 2010.
- [10] Chang, R. *Chemistry*, 10th ed.; McGraw Hill: New York, 2010.
- [11] Ralph, H. P.; William, S. H.; Geoffery, F. H. *General Chemistry: Principles and Modern Applications*, 8th ed.; UpperSaddleRiver: Prentice Hall, 2002.
- [12] Theodore, L. B.; Eugene, H. L.; Bruce, E. B.; Catherine, J. M. *Chemistry: The Central Science*, 10th ed.; UpperSaddleRiver: Prentice Hall, 2000.
- [13] Gary, L. M.; Donald, A. T. *Inorganic Chemistry*, 3th ed.; Pearson Education Asia: Hong Kong, 2004.
- [14] Ralph, A. B. *Fundamentals of Chemistry*, 4th ed.; Pearson Education Asia Limited: Hong Kong, 2003.
- [15] David, W.; Oxtoby, H.; PatGillis, N. H. *Principles of Modern Chemistry*, 4th ed.; Thomson Learning: Belmont, 2002.
- [16] Shriver, D. F.; Atkins, P. W.; Langford, C. H. *Inorganic Chemistry*; Oxford University Press: Oxford, 1994.
- [17] Dampier, W. C. 科学史. 李 珩, 译. 张 今, 校. 北京: 中国人民大学出版社, 2010.
- [18] Thomson, J. J. *Philos. Mag.* **1897**, 44 (269), 293.
- [19] Grayson, M. A. *Measuring Mass: From Positive Rays to Proteins*; Chemical Heritage Press: Philadelphia, 2002.
- [20] Richard, R. *A Force of Nature: The Frontier Genius of Ernest Rutherford*; W. W. Norton Press: New York, 2008.

- [21] Chadwick, J. *Nature* **1932**, 129 (3252), 312.
- [22] Chadwick, J. *Phys. Engin. Sci.* **1933**, 142 (846), 1.
- [23] Gell-Mann, M. *Phys. Lett.* **1964**, 8 (3), 214.
- [24] Zweig, G. *CERN Report* No.8182/TH.401. 1964.
- [25] Carithers, B.; Grannis, P. *Beam Line (SLAC)* **1995**, 25 (3), 4.
- [26] Dalton, J. *A New System of Chemical Philosophy*, 1808; reprinted with an introduction by Alexander Joseph; Peter Owen Limited: London, 1965.
- [27] Thomson, J. J. *Phil. Mag.* **1904**, 7 (39), 237.
- [28] Geiger, H. *Proc. R. Soc.* **1910**, 483, 492.
- [29] Rutherford, E. *Phil. Mag.* **1911**, 21 (4), 669.
- [30] Rutherford, E. *Nature* **1913**, 92, 423.
- [31] Nave, C. R. *HyperPhysics: Hydrogen Spectrum*; Georgia State University: Atlanta, 2008.
- [32] Mohr, P. J.; Taylor, B. N.; Newell, D. B. *Rew. Mod. Phys.* **2012**, 84, 1527.
- [33] Planck, M. *Annalen der Physik* **1901**, 4, 553.
- [34] Einstein, A. *Annalen der Physik* **1905**, 17 (6), 132.
- [35] Bohr, N. *Phil. Mag.* **1913**, 26, 1.
- [36] Bohr, N. *Phil. Mag.* **1913**, 26, 476.
- [37] Bohr, N. *Phil. Mag.* **1913**, 26, 857.
- [38] de Broglie, L. *Nature* **1923**, 112, 540.
- [39] de Broglie, L. *Phil. Mag.* **1924**, 47, 446.
- [40] de Broglie, L. *Ann. Phys.* **1925**, 3, 22.
- [41] Davisson, C.; Germer, L. H. *Nature* **1927**, 119, 556.
- [42] <http://www.vigyanprasar.gov.in/scientists/MBorn.html>
- [43] Heisenberg, W. *Z. Phys.* **1927**, 43, 172.
- [44] Schrödinger, E. *Annalen der Physik* **1926**, 79, 361.
- [45] Schrödinger, E. *Annalen der Physik* **1926**, 80, 437.
- [46] Schrödinger, E. *Annalen der Physik* **1926**, 81, 109.
- [47] Schrödinger, E. *Phys.* **1926**, 28, 1049.
- [48] 吴永军. 新课程备课新思维. 北京: 教育科学出版社, 2004.
- [49] 钱伟长. 群言, **2003**, No. 10, 16.
- [50] 陈三平, 王尧宇, 谢 钢, 高胜利. 大学化学, **2009**, 24 (2), 14.
- [51] Mauritsson, J.; Johnsson, P.; Mansten, M.; Swoboda, M.; Ruchon, T.; L' Huillier, A.; Schafer, K. J. *Phys. Rev. Lett.* **2008**, 100, 073003.
- [52] Cosmin, I. B.; Xu, J. L.; Anthony, D. D.; Emily S.; Zhang, K. K.; Pierre, A.; Terry, A. M.; Louis, F. D.; Lin, C. D. *Nature* **2012**, 483, 194.
- [53] 怀特海. 教育的目的. 徐汝舟, 译. 北京: 生活读书新知三联书店, 2001.
- [54] 杨 奇, 谢 钢, 陈三平, 张一凡, 郭培宇, 高胜利. 大学化学, **2015**, 30 (6), 33.
- [55] Mayer, M. G. *Phys. Rev.* **1948**, 74 (3), 235.
- [56] Mayer, M. G. *Phys. Rev.* **1950**, 78 (1), 16.
- [57] Haxel, O.; Jensen, J. H. D.; Suess, H. E. *Phys. Rev.* **1949**, 75 (11), 1766.
- [58] Marie, G.; Jensen, J. H. D. *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure*; Wiley: New York, 1955.
- [59] 夏志厚. 探索与争鸣, **1987**, No. 2, 12.
- [60] 朱清时. 中国书画家, **2014**, No. 4, 122.