

探索诺奖：物理化学知识的发现之旅

颜美*, 王群, 果崇申*

哈尔滨工业大学化工与化学学院, 哈尔滨 150001

摘要: 物理化学课程包含了众多的理论和难懂的公式, 提高学生学习兴趣和强化学生对理论知识的认知是本门课程的授课重点。在物理化学课程中挖掘知识发现之旅, 以吉布斯函数为主线, 贯穿人物脉络, 引导学生追随诺奖获得者探索真理的步伐, 学习他们的创新性思维。同时, 还引入了学科前沿航天特色案例, 助力航天杰出人才的培养。

关键词: 物理化学; 诺贝尔奖; 学科前沿; 课程思政; 航天

中图分类号: G64; O6

Exploring Nobel Prizes: A Journey of Discovery in Physical Chemistry

Mei Yan*, Qun Wang, Chongshen Guo*

School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China.

Abstract: The physical chemistry course encompasses numerous theories and complex formulas. The primary teaching goal is to enhance students' interest in learning while deepening their understanding of theoretical concepts. This course frames the journey of knowledge discovery through the Gibbs function, integrating the biographies of key figures and guiding students to follow the footsteps of Nobel Prize laureates in their pursuit of truth and innovative thinking. Additionally, the course introduces cutting-edge aerospace cases, contributing to the development of outstanding aerospace professionals.

Key Words: Physical chemistry; Nobel Prize; Frontier Research; Curriculum ideological and political education; Aerospace

2020年哈尔滨工业大学建校一百周年之际收到了习近平总书记的贺信^[1]。在新百年之际, 学校贯彻落实贺信精神, 面向国家需求, 提出了“学术大师、工程巨匠、业界领袖、治国栋梁”的四类杰出人才的培养目标。物理化学课程作为化学化工类的专业基础课, 在人才培养过程中担任了重要的角色, 我们秉承学校的人才培养目标, 沿着诺贝尔奖获得者探索真理、发现真理的步伐, 学习大师并最终期待所培养学生能成为大师。

1 物理化学知识的发现之旅

物理化学作为化学学科的一个分支, 其早期的出现充满了质疑与反对的声音, 经历了提出假说、遭受质疑、实验验证、接受考验、成为定理的漫长过程。无数定理的出现造就了众多的诺贝尔奖,

收稿: 2024-09-12; 录用: 2024-11-13; 网络发表: 2025-02-13

*通讯作者, Emails: yanmei@hit.edu.cn (颜美); chongshenguo@hit.edu.cn (果崇申)

基金资助: 哈尔滨工业大学 AI 赋能课程教学改革项目(246172); 黑龙江省高等教育教学改革项目一般研究项目(SJGY20210302); 黑龙江省教育科学规划 2023 年度重点课题(GJB1423128)

整个过程回顾起来其实就是一个创新的过程。我们提出以吉布斯函数为内核知识主线，以科学家精神为外核思政主线，两条主线互为补充来提高学生的科学文化素养^[2]。进一步深化教学改革，深入探索诺奖获得者创立新理论的过程，并有机融入学科前沿知识，将学术探索发现的思维根植于学生心里，结合学校特色助力航天杰出人才的培养。表1总结了以吉布斯函数为主线的章节知识，以及与其相关的诺奖成果和科技前沿。

表1 物理化学知识的发现及学科前沿案例

知识主线	章节知识	探索诺奖	学科前沿
热力学定律 $dG = -SdT + Vdp$	热力学第一定律	卡诺是如何发现卡诺循环的	火箭发动机 霍尔电推力器
	热力学第二定律	痛失诺奖的吉布斯	航天器与氢氧燃料电池
增加化学势 $dG = -SdT + Vdp + \sum_B \mu_B dn_B$	多组分系统热力学 (溶液)	范特霍夫与依数性(1901年) 拉乌尔与拉乌尔定律	海水淡化新技术——太阳能 界面水蒸发
	化学平衡	化学天才还是战争魔鬼——哈伯发明合成氨 (1918年)	电催化合成氨
	相平衡	屠呦呦发明青蒿素(2015年)	高效液相色谱的原理
关联热力学与电化学 $\Delta_r G_m = -zEF$	电解质溶液	物理化学奠基者——奥斯特瓦尔德(1909年) 阿伦尼乌斯的电离理论(1903年)	固态电解质最新进展
	可逆电池	能斯特与能斯特方程(1920年) 古迪纳夫、威廷汉、吉野彰——“锂电池之父”(2019年)	再生氢氧燃料电池
吉布斯自由能判据判断反应的方向和限度 $(dG)_{T,p,n_i=0} \leq 0$	化学反应动力学	利比与碳十四测年法(1960年)	药物代谢动力学
增加表面功 $dG = -SdT + Vdp + \sum_B \mu_B dn_B + \gamma dA_s$	表面物理化学	朗缪尔——冰箱里开启的人工降雨新发现 (1932年)	储氢材料

1.1 航天案例——助力国防军工人才的培养

工业革命时期，大量机器被使用，提高机器效率成为现实问题。卡诺明确了热机的工作原理，当时他处在热质假说占统治地位的时期，人们认为热质会在不同温度的物体间流动，满足热质守恒的观点^[3]。所以卡诺认为热机的工作原理是，热质在工作介质中流动，也就是从高温物体流向低温物体。当时卡诺的父亲致力于提高水轮机的效率，他认为理想水轮机工作时不应有能量损失，比如激起水花等，这会降低水轮机的效率。父亲的观点对他有所启发，他提出了热机也不应有能量损失，即不允许存在不同温度的物体相接触。基于以上观点，卡诺提出了一个简化模型：气体先通过压缩使自身温度升高至高温热源的温度，然后持续从高温热源获得热量的同时膨胀；之后气体在绝热下继续膨胀到与低温热源同样温度；气体与低温热源接触，通过压缩体积将热量传递给低温热源；最后气体绝热条件下继续压缩体积至回到高温热源的温度开启下一个循环。这就是典型的卡诺循环的四个过程。至此，卡诺热机成为理想热机，任何热机的效率都无法超越卡诺热机效率。我校始终以“国家需要”为导向，将“立足航天，服务国防”的使命融入人才培养全过程，本课程同样助力国家重大国防军工人才的培养。火箭发动机作为热机的典型案例，其对国之重器如火箭、导弹的发射起到了至关重要的作用。它利用冲量原理，自带推进剂，推进剂在燃烧室燃烧放热产生高温气体(化

学能转化为热能),通过喷嘴喷出,排出气体膨胀时对内壁的压力(膨胀做功)使火箭朝向一个方向运动,实现热能向动能的转化。排气速度就是检验发动机效率的最好证明。火箭发动机是一种效率极高的热力发动机,产生高速射流,结果如同卡诺循环一样产生高燃烧室温度和高压压缩比。引导学生去了解它的类型,如何提高推进剂的效率,以及开发低成本、绿色高能的推进剂作为未来的研究目标。火箭发动机作为航天推进器的一种,自带燃料和氧化剂,不需要从空气中汲取氧气,能够在没有空气的环境中工作,主要用于将物体送入太空。这种传统推进器比冲较低,对燃料的消耗量大。为了提高比冲和效率,科学家们发明了一种新型的推进器,叫霍尔推力器。霍尔推力器利用离子加速来产生推力,其作为先进的电推进装置是未来空间飞行器的首选,其在国际上的首次空间应用是由我校完成的^[4],这一典型案例既增强了学生的自豪感,同时又赋予了其强烈的责任感和使命感。

1.2 科学无国界——团结协作精神

对溶液依数性的研究早期并不是来自化学家。最早观察到渗透现象的是法国物理学家诺勒。他用猪膀胱密封住装满酒精的圆筒,然后把圆筒浸入水中,发现水通过膀胱渗透进圆筒,最后膀胱竟被撑破,但他没有意识到这是渗透压造成的。德国植物学家菲普法于1877年用德国生理化学家特劳贝所制得的半透膜测定了稀溶液(糖水)的渗透压。荷兰的一位植物学家在研究植物枯萎时发现:植物浸于纯水中会发生“浮肿”,浸在浓溶液中则很快枯萎;而在介于中间的溶液中,细胞膜能维持正常。他理解最后一种情况是由于细胞膜内外具有相同的渗透压。这些实验结果激起了德国科学家范特霍夫(第一位诺贝尔化学奖获得者)对渗透压进行理论探讨的热情。他从理论上推导出了稀溶液渗透压与饱和蒸气压下降等之间的关系^[5]。他的结果与拉乌尔的实验结果(发表于1883年的拉乌尔定律)相一致。1884年,拉乌尔又作出修正,指出上述定律不适用于盐类溶液,因为盐类溶液的渗透压比理论值偏高。出现这种偏差的原因在哪儿?而要破解这一难题不得不提另一个独立性理论的创立者——瑞典物理化学家阿伦尼乌斯。

阿伦尼乌斯在研究溶液导电性时发现,氨气不导电,但是氨水导电,氢卤酸也类似。还有,纯净的水不导电,固体食盐也不导电,但食盐溶解在水里变成盐水就导电了,水在这里到底起了什么作用?是不是食盐溶解在水里就解离成为 Na^+ 和 Cl^- 了呢^[6]?当时,法拉第的观点被当作权威,认为溶液只有外加电压才会分解成离子。阿伦尼乌斯的理论与人们普遍达成共识的法拉第的观点相冲突,他在1884年公开发表了一篇题目为“关于电解质导电性的研究”的论文,同时作为博士论文内容提交了答辩申请^[7]。该理论在瑞典国内并未获得学术权威包括答辩委员会的认可,他因此仅勉强获得博士学位。之后,阿伦尼乌斯极力向众多瑞典国内学者自荐自己的电离理论,却屡屡碰壁还遭受同行们的嘲笑。但他并没有气馁,坚信自己的理论具有价值,后来写信求助多国权威学者,幸运的是,他遇到了奥斯特瓦尔德,奥斯特瓦尔德对他的理论公开表示支持,认为阿伦尼乌斯开创了“离子化学”新时代^[8]。奥斯特瓦尔德也是最先对吉布斯表达赞赏并翻译推广其热力学论文的学者。

正是阿伦尼乌斯电离理论很好地解释了范特霍夫关于电解质溶液渗透压出现偏差的原因,阿伦尼乌斯指出,电解质溶液的解离程度取决于溶液的稀释程度,所有溶液稀释到极限时,很可能完全解离。今天我们知道,阿伦尼乌斯的部分电离理论适用于弱电解质溶液,对于强电解质溶液,还需要学习德拜休克尔极限理论。奥斯特瓦尔德、范特霍夫和阿伦尼乌斯三位学者来自不同的国家,但他们跨越国界开启了毕生的合作与友谊。他们被誉为“物理化学三剑客”(图1),正是由于这三位大师的努力,才逐步建立起了物理化学的经典理论体系。

我们应该学习他们团结协作的精神,面向国家重大需求,开展跨学科跨领域的合作交流,探索创新前沿成果。比如在新能源领域,随着汽车电动化的快速发展,锂离子电池凭借高能量密度、长循环寿命等优势成为新能源汽车的主要功能载体,支撑全球汽车电动化的进程。古迪纳夫、威廷汉和吉野彰因在发明锂离子电池方面做出的贡献而获得了2019年诺贝尔化学奖,他们也被称为“锂离子电池之父”^[9]。1976年,威廷汉开发了一种新型的电池,以二硫化钛为阴极,金属锂作阳极,电池电压达到了2.5 V,而此前最好的可充电电池是镍镉电池,最大输出电压1.3 V。威廷汉利用这种新型

的电池第一次阐述了嵌入式电池的概念。但这种电池的总能量密度还太低，1980年古迪纳夫发现了钴酸锂材料，取代二硫化钛，电池电压可达4–5 V。威廷汉和古迪纳夫的贡献奠定了锂离子电池的理论和技術基础，而安全性问题仍是阻碍其产业化的原因。1991年日本的科学家吉野彰利用石油焦替换金属锂作阳极，钴酸锂作阴极，组装出了首个可用于商业化的锂离子电池。自此，锂离子电池被用于便携式摄像机、手机、笔记本电脑等等，我们才开始步入移动智能化时代。不过，液态锂电池技术发展已趋近成熟，能量密度提升越来越困难，限制了新能源汽车续航里程的进一步提高。因此，固态电池成为未来电池路线的新选择。而固态电解质作为固态电池的重要组成部分，其发展正代表了该领域的学科前沿，请学生查找资料并讨论最新的研究进展，探讨固态电解质与液态电解质相比其优缺点分别是什么？还有什么亟待解决的问题？以此为学生树立目标，明确未来发展方向。

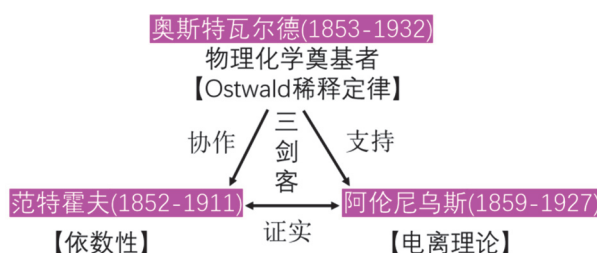


图1 物理化学“三剑客”

1.3 科技是把双刃剑——莫让天使变魔鬼

哈伯发明了合成氨反应解决了世界粮食危机。19世纪下半叶，物理化学的快速发展为合成氨提供了理论指导：氮、氢合成氨反应是可逆的，由化学平衡的角度分析，增加压力推动向合成氨的反应移动，提高温度则使反应逆向进行，而温度过低反应速率又太小(化学反应动力学)，因此，催化剂将对反应产生重要影响。1904年，他用铁作为催化剂，在1020 °C高温下常压合成氨，成功得到0.005%–0.012%浓度的氨。这一数值与当时的权威，德国的能斯特计算的理論值不符(能斯特计算氨的浓度仅为0.0032%)，但他并没有盲从权威，而是通过实验来检验，最终证明了能斯特的计算是错误的。合成氨的高温高压实验是危险的，条件摸索是艰难的，哈伯最终以锲而不舍的精神获得了大众所熟知的哈伯法合成氨。他的发明使大气中的氮可变成氮肥的廉价来源，从而使农业生产可以不用完全依赖于土壤。哈伯因此被称作解救世界粮食危机的化学天才。就是这样一个造福人类的发明，后来却被用于合成炸药，造成了殃祸全球的第一次世界大战。而哈伯也从划时代的化学天才变成了丧心病狂的战争魔鬼。合成氨技术既可以用于生产造福于人类的化肥，亦能为毁灭性炸药提供原料。再比如放射性元素在医学上可以用于癌症的治疗和疾病的诊断，也可以用于核电站发电，但如果使用不当，放射性的剂量过大或核电站泄露都会造成污染，产生不可逆的损伤甚至威胁生命。所以，科技是把双刃剑，我们必须确保科技发展方向是为了提高人们的生活质量，应该利用它造福人类，以促进人类社会的进步和福祉，而不是带来毁灭性的灾难！引导学生树立正确的价值观、人生观尤为重要！莫让天使变魔鬼！

1.4 师生传承——榜样的力量

能斯特是德国著名物理化学家，23岁在维尔茨堡大学获得博士学位，在这里他曾跟随科尔劳奇教授学习物理学，与此同时他结识了阿伦尼乌斯，从此开始接触物理化学。阿伦尼乌斯介绍能斯特认识了奥斯特瓦尔德^[10]。1887年奥斯特瓦尔德担任莱比锡大学的化学教授，他成立的物理化学研究所汇集了来自世界各国的物理化学领域的科学家^[11]。这一年能斯特23岁，开始担任奥斯特瓦尔德的助手，在他的实验室研究溶液化学。25岁就将热力学原理应用到了电池上，这是自伏打发明电池以来，第一次有人对电池电动势作出合理解释，他推导出的公式正是能斯特方程，这奠定了电化学的

理论基础，为电化学分析的发展开辟了新思路。能斯特的成功离不开恩师奥斯特瓦尔德的培养，他又追随导师的步伐，以恩师为榜样，尽心竭力地培养、提携后辈，最终门下出了三位诺贝尔物理奖得主罗伯特·安德鲁·密立根、卡尔·大卫·安德森和唐纳德·格拉泽(图2)，这五位师徒相传的诺奖在史册上是空前的。师者匠心，止于至善；师者如光，微以致远。作为老师，我们应当以身作则，躬行践履始玉成，行而不辍终致远，为学生树立良好的典范。

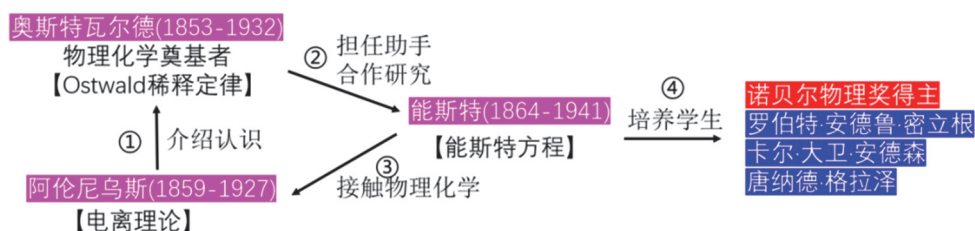


图2 人物关系脉络图

1.5 意外成就经典——创新源自发现

朗缪尔是首次实现人工降雨的科学家，有趣的是，这个突破性的发明是于炎热的夏天在冰箱内取得的。当时，流行着一种观点：雨点凝结以尘埃微粒为“种子”，如果下雨必须有尘埃。开尔文公式告诉我们，小雨滴的饱和蒸气压大于平面液体的饱和蒸气压，雨滴越小饱和蒸气压越大，即使云层中的蒸气对水平液面的水来说已经是过饱和了，但对于将要形成的小液滴来说，则尚未饱和，因此小雨滴难以形成。“如果要下雨必须有种子，那就是尘埃微粒。”这种观点严重束缚着人们对人工降雨的研究。朗缪尔实验室里一直保存有“人造云”，就是充满在电冰箱里的水蒸气。他想方设法模拟下雨前大气中的水蒸气，不断改变冰箱温度，同时加入各种灰尘进行实验。1946年7月的一天，酷热难熬，朗缪尔正进行实验，忽然电冰箱因设备故障停止制冷了，他决定利用干冰降温，当他把一些干冰放进冰箱中的时候，冰室里立即出现了漫天飞舞的冰粒和雪花，人工云变成了冰和雪。朗缪尔分析这一现象认识到：尘埃对降雨并非绝对必要，干冰也可以作为“种子”。朗缪尔的干冰布云法摆脱了旧观念的束缚，创新性地开启了人工降雨研究中的一个突破性发现。一次意外成就了经典，善于分析发现也是成功的关键，这个案例告诉学生，有时候实验过程中出现意外不见得都是坏事，也不要急于摒弃不一样的实验结果，请仔细分析，说不定会有意外的收获。

1.6 国之骄傲——树立榜样，培养使命担当

疟疾是一种高传染、高死亡率的恶性疾病，越南战争中疟疾的再次爆发迫使我国政府启动了对抗疟疾的“523项目”。研究者们如同大海捞针一般试了四万多种草药，仍没有找到真正管用的药物，屠呦呦也不例外。后来，屠呦呦重温中医古籍《肘后备急方》后受到启发，在第191次实验中采用低温乙醚提取方法，保留中性提取物的抗疟率达到了100%。并且在临床试验中，她向领导申请，成为首批人体试验的志愿者。青蒿素的发现拯救了无数人的生命，它被世界卫生组织誉为消灭疟疾的“首要疗法”。屠呦呦也因此成为诺贝尔生理学或医学奖获得者。我国科技工作者为国家的发展和人民的生活做出了杰出的贡献，屠呦呦发明青蒿素拯救了无数疟疾患者，袁隆平院士解决了全人类吃饭问题。以及以钱学森为代表的众多航天工作者为中国航天事业作出了巨大的贡献，比如我国自主研发的北斗卫星导航系统，在全球范围内为我们提供高精度、高可靠地定位和导航服务；我国探月工程实现了世界首次月球背面自动采样并返回；我国成功发射了射程约12000公里的洲际弹道导弹，采用飞行轨迹复杂的钱学森弹道，飞行速度高达25马赫！这些都彰显了我国强大的军事硬实力！为中国航天事业做出杰出贡献的科研工作者中，不乏我校杰出校友的身影，身为国防院校的学生，我们应该以前辈为榜样，以服务国家和人民为己任，爱党报国、志存高远，为实现中国梦和强军梦贡献自己的力量。

2 人才培养成效

授课中以理论知识为主线,按照章节顺序讲授,在与知识点紧密衔接的位置引入科学家对真理发现的过程,将一个个枯燥的定理、公式变成了一个个有趣的故事,提升了学生的学习热情,也加深了学生对知识的记忆。真理的发现,充满了无数种创新的思维,我们学习他们逆向的思维,团结合作的精神,质疑权威的勇气,以身作则的典范以及善于挖掘意外的发现等等。另外,学科前沿的引入,使学生了解了所学理论知识的重要性,能够紧密联系实际,具备解决实际问题的能力,并且明确了当前及未来新兴产业的需求。本文中的部分思政案例已经录制到我们的慕课中,后续会不断补充思政案例,建成并完善典型案例库。所培养的学生学习兴趣大幅提升,课堂互动积极性高,将兴趣融入科研,撰写了诸如“手机电池在不同电量下的充电速度研究”“蓄电池在低温下耗电较快的原因”“药物在机体内的代谢”等研究报告(图3)。学生应用创新思维参与实验教学的改革,多次参加全国大学生化学化工实验创新设计大赛和中国国际大学生创新创业大赛等并斩获大奖;所培养学生本科期间就有机会参与国家重点研发项目,其中“嫦娥五号”取芯软袋和“天问一号”火星探测器的五星红旗都有学生参与。亲身参与到中国航天事业的发展中,感受祖国的繁荣富强,同时肩负未来航天发展的使命和担当,以家国情怀为动力,勇于创新,敢于挑战,为中国航天事业的发展贡献力量。



图3 部分学生成果展示

3 结语

我们在物理化学授课过程中为学生引入了诺贝尔奖获得者探索真理的过程以及融入了航天案例等学科前沿的知识,站在科学家的视角下,探索其在当时的背景下是如何发现相关的定理的,以讲故事的方式呈现给学生,兼具趣味性与知识性。科学家发现真理的思维过程同样适用于我们的科学研究,比如批判性的思维、创新性的假设和探索性的实验等。在课程中还引入了学科前沿的知识,将理论与实际关联,将科学思维运用于实际问题的解决以及未来工程应用的探索。本门课程中思政案例和学科前沿的引入共同助力航天领域杰出人才的培养。

参 考 文 献

- [1] 邢朝霞. 生涯发展教育研究, 2020, 24, 8.
- [2] 王群, 张兴文, 刘程岩, 吴晓宏. 化工高等教育, 2023, 40 (4), 105.
- [3] 庄崇光. 物理教学, 1989, No. 5, 26.

- [4] 校园里放火箭? 看“硬核”的哈工大航天! [2025-02-13].
https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzI3NzU5NTEwNw==&mid=2247553736&idx=1&sn=25a1d0db75919e9e724dfbb4805d7f55&chksm=eb618444dc160d52b69a017c73126432e6a979876664fad5851af0b6a5af90a00fb156b45231&scene=27
- [5] 蔡邦宏, 李文超, 刘茹. 科学大众(科学教育), **2016**, No. 3, 118.
- [6] 张艳. 基础教育研究, **2015**, No. 5, 40.
- [7] 盛根玉. 化学教学, **2011**, No. 8, 63.
- [8] 侯纯明. 化学史话. 第2版. 北京: 中国石化出版社, 2022: 177–183.
- [9] Scientific Background: Lithium-ion batteries. [2025-02-11]. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/advanced-information/>
- [10] 赵玉杰, 杨谦, 王洪见. 大学物理, **2014**, *33* (1), 51.
- [11] 闫蒙钢, 慈洁琳. 大学化学, **2013**, *28* (6), 71.