

物理的逻辑与历史

张汉壮

(吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130012)

摘要 概述了物理学七大基本领域的知识体系逻辑和发展简史.通过本文介绍的物理学的逻辑与历史,希望使初涉物理的读者能够开阔视野,激发其学习物理的热情,培养良好的分析问题和解决问题的能力.

关键词 物理学;知识领域;逻辑性;历史性

中图分类号:O4-09

文献标识码:A

文章编号:1000-0712(2016)05-0027-10

DOI:10.16854/j.cnki.1000-0712.2016.0075

续表

1 物理学的研究内容

物理学是研究物质的结构、性质、基本运动规律以及相互作用规律的科学.其研究内容可以从不同的角度来划分.从含时空结构的宏观和微观角度,物理学可分为经典物理学和近代物理学.从物质的运动形式角度,物理学研究内容可以分为机械运动、热运动、电磁和光运动、微观粒子运动,并形成了与之对应的力学、热学、电磁学、光学、量子理论等分支学科.各分支学科之间既相对独立又互相渗透,形成了彼此密切联系的统一的物理学整体.从研究对象的不同角度,物理学也划分为天体物理学、凝聚态物理学、原子分子物理学、核物理学和粒子物理学等.从物理学最基本知识领域角度,在教育部物理专业教学指导委员会所制定的物理规范中,将其概括成表 1 所示的六大知识领域,也是教育物理专业本科生所需掌握的基本知识内容.而课程体系是完成这些知识领域规律总结的载体.

表 1 物理学研究的基本知识领域

知识领域	研究的对象和内容	课程体系	
		基本课程	后续课程
机械运动现象与规律	研究大到天体、小到颗粒等宏观物体的空间运动规律	力学	理论力学

知识领域	研究的对象和内容	课程体系	
		基本课程	后续课程
热运动现象与规律	研究大量微观粒子的宏观统计规律	热学	热力学与统计物理
电磁和光现象与规律	研究包括光波在内的电磁场的性质、粒子在电磁场中的运动等规律	电磁学、光学	电动力学
物质微观结构和量子现象与规律	研究物质的微观结构以及微观粒子的个体运动规律	原子物理	量子力学
时空结构(狭义相对论、广义相对论、宇宙学)	研究时间和空间以及引力场性质,宇宙的形成、结构及演化	力学	电动力学、量子力学
凝聚态物质结构及性质	研究由大量原子所组成的凝聚态物质的结构、相互作用及宏观物理性质	固体物理	凝聚态物理

收稿日期:2015-12-05;修回日期:2016-02-15

基金项目:国家自然科学基金(11474131),光子晶体调控有机共轭低聚物光致发光和能量转移的机理研究项目资助

作者简介:张汉壮(1962—),男,吉林长春市人,吉林大学物理学院教授、博士生导师,吉林大学特聘教授,吉林省高级专家.多年从事物理专业本科生的力学基础主干课、研究生的光子晶体的主讲等教学工作,以及材料超快动力学过程的科研工作.

2 物理学研究方法

物理学现象与规律的研究可以用不同的方法进行。一种是以实验为基础,通过观测总结上升至理论,称为实验物理学研究方法。19世纪中叶以前的物理学研究大都属于这类。另一种是从已知的原理出发,理论上预测规律,再被实验所验证,称为理论物理学研究方法。20世纪以后,实验物理学和理论物理学两大分支并存,相辅相成地推动着物理学的发展。随着计算机技术的进步和发展,将数学和计算机应用到理论物理学的研究中,可以解决复杂体系的物理问题,称之为计算物理学。因此,物理学的研究包含实验、理论与计算,所得结论的正确性必须由实验测量与观察来验证。

3 物理学在自然科学中的地位

在科学长期的发展中,物理学是自然科学中最成熟的基础性学科。物理学在探索未知的物质结构和运动基本规律中的每一次重大突破,都带来了物理学新领域、新方向的发展,并导致新的分支学科、交叉学科和新技术学科的产生。物理学又是科学技术进步的源泉,极大地推动着人类文明的进步。自17世纪经典力学的体系建立以来,物理学的三次重大突破都导致了重大的技术进步和生产力的巨大飞跃。第一,在力学基础上的热学和热力学的研究促进了蒸汽机的发明和广泛应用,为工业生产和交通运输提供了动力,形成了人类历史上的第一次工业革命;第二,电磁感应的研究和电磁学理论的建立导致了发电机、电动机的发明和无线电通讯的发展,引发了第二次工业革命;第三,相对论、量子力学的建立为近代物理的发展奠定了理论基础,使物理学进入高速、微观的领域,在原子能、电子计算机、微电子技术、航天技术、分子生物学和遗传工程等领域取得了重大突破。

物理学不仅是一门基础性的自然科学,也是现代技术的重要基础,已成为人类文明的重要组成部分。

4 物理学的逻辑与历史

物理学是人类历史上最悠久的自然科学。人类对物理现象的最早观察始于古巴比伦和古希腊。到公元15世纪末以前,物理学还只是分散和不成体系的研究。物理学真正成为科学始于16、17世纪,最先建立了牛顿力学,到19世纪末相继建立了热学、统

计力学、光学以及电磁学等分支学科,建成了经典物理学大厦。20世纪初,量子力学与相对论的建立使物理学发展为现代物理学。表1中的各分支学科的大致发展历程如表2所示。表2中的人物头像纵坐标位置代表着年代,横坐标位置代表着人物所做贡献的所属学科领域。

如果将表1所示的物理学基本知识领域比喻一座“山”的话,由表2可以看出,这座“山”是经过近2000年来,无数科学家为之努力而不断探索和堆积的结果。综合表1和表2的信息,我们定性地、形象地将这座“物理山”构画成如图1所示。

图1所示的每个知识领域的面积大小,是根据右侧所示的课程体系内容(学时数)占整个7大知识领域内容(总学时数)的比例绘制的。从下到上是按照年代顺序安排的。“山”中间部分的两个云朵标记代表着十九世纪末物理学上空飘着的“两朵乌云”,两朵乌云的散去,标志着近代物理学的基础“狭义相对论”和“量子力学”的诞生。“山”顶部的山尖代表着物理学当今的三大前沿领域方向。后面对图1所示的“物理基本知识领域山”的发展历程作进一步的介绍。

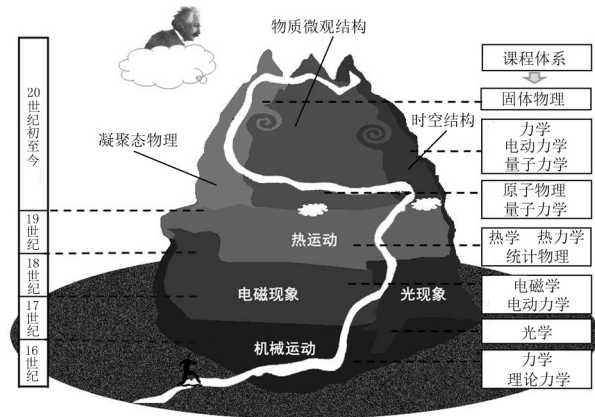
























图 1

4.1 机械运动研究领域(16—19世纪初完成规律体系的建立)

机械运动是指小到颗粒、大到天体的宏观物体的空间运动。研究其运动规律所形成的学科为力学。力学所形成的理论规律包括牛顿力学和分析力学。牛顿力学是实验总结的规律,分析力学即可以由牛顿第二定律导出,也可以完全独立于牛顿力学而从哈密顿变分原理获得。分析力学的表述形式与物理图像更为清晰的牛顿力学相比,显得渐行渐远,越来越抽象化。但从哈密顿变分原理获得分析力学的方

表 2 物理学发展简史一览表

		经典物理				近代物理			
		力学	热学	电磁学	光学	原子物理	量子理论	相对论	
公元 15 世纪以前	 ①	① 亚里士多德(古希腊,公元前 384—前 322, 其著作《物理学》统治近千年物理学历史。							
	 ②	② 阿基米德(古希腊,公元前 287—前 212,) 发现浮力定律、杠杆原理。							
	 ③	③ 托勒密(古希腊,约 90—168,) 创立了“地心说”。							
16 至 18 世纪期间	 ④	④ 哥白尼(波兰,1473—1543,) 于 1543 年建立了“日心说”体系。							
	 ⑤	⑤ 开普勒(德国,1571—1630,) 建立了开普勒第一(1609 年)、第二、第三(1618 年)定律。							
	 ⑥	⑥ 伽利略(意大利,1564—1642,) 发现了自由落体和惯性定律。							
	 ⑦	⑦ 牛顿(英国, 1643—1727,) 于 1687 年建立了牛顿三定律和万有引力定律. 完成了人类科学史上的第一次总结。						 ⑩	
	 ⑧	⑧ 拉格朗日(意大利,1736—1813,) 于 1788 年、⑨ 哈密顿(英国,1805—1865,) 于 1827 年分别建立分析力学的两种表述。						 ⑪	
	 ⑧							 ⑪	
	 ⑦							 ⑪	
	 ⑧							 ⑪	
19 世纪期间	 ⑨	⑭ 焦耳(英国,1818—1889,) 于 1843 年奠定了热力学第一定律的实验基础; ⑮ 卡诺(法国,1796—1832,) 于 1824 年建立了热力学第二定律; ⑯ 克劳修斯(德国,1822—1888,)							
	 ⑭	⑰ 开尔文(爱尔兰,1824—1907,) 在热力学第一定律基础上, 完善了热力学第二定律. ⑱ 麦克斯韦(英国,1831—1879,)、							
	 ⑮	⑲ 玻尔兹曼(奥地利,1844—1906,)、⑳ 吉布斯(美国, 1839—1903,) 等于 1902 年建立了统计力学。							
	 ⑯	⑱ 麦克斯韦在库伦、奥斯特、安培、法拉第等人的研究基础上, 于 1865 年建立了麦克斯韦方程组, 完成了人类科学史上的第二次总结。							
	 ⑰								
	 ⑲								

经典物理					近代物理		
力学	热学	电磁学	光学	原子物理	量子理论	相对论	
20世纪中叶以前	19世纪末微观世界三大发现：X射线、放射性元素、电子。⑲卢瑟福(英国,1871—1937,)于1911年提出原子核式模型。						
	⑳普朗克(德国,1858—1947,)于1900年提出能量量子化假说；㉑爱因斯坦(美籍德国犹太裔,1879—1955,)于1905年提出光子,解释了光电效应；㉒玻尔(丹麦,1885—1962,)于1913年、索末菲于1916年建立轨道量子化模型；㉓海森伯(德国,1901—1976,)于1925年建立矩阵力学。						
	㉔德布罗意(法国1892—1987,)于1924年提出物质波；㉕薛定谔(奥地利,1887—1961,)于1926年建立波动力学。同年,玻恩(德国1882—1970,88岁)赋予物质波的概率解释；1927年,戴维孙和革末、汤姆孙等实验证实了电子的波动性。						
	㉖狄拉克(英国,1902—1984,)于1927—1928年间阐述了量子力学不同表述的数学本质,并进一步建立相对论量子力学。至此,量子基本理论体系被建立。						
	㉗爱因斯坦建立了狭义相对论(1905年)和广义相对论(1915年)。						
20世纪中叶以后	开展微观尺度、宇观尺度、宏观复杂系统三大前沿问题研究						

注：图片所在的横坐标表示分支学科，纵坐标表示该学科体系建立的年代。

法为拓展研究力学的普遍问题提供了更为有效的新方法,更为重要的是,这种新方法为其他非力学体系问题的研究提供了基础。因此,虽然牛顿动力学和分析力学是等价的规律表述形式,但不能简单地将分析力学作为牛顿力学的拓展来理解。

力学是在16至19世纪完成规律体系的建立。历史上首先形成的是牛顿力学,其后分别是拉格朗日表述的分析力学和哈密顿表述的分析力学。

4.1.1 天体观测规律

从地球上观测浩瀚的天空,人们感觉大部分星体都围绕着地球在做圆周运动。早在古希腊的亚里士多德就提出了宇宙结构的地心说理论。公元150年左右,希腊天文学家托勒密总结了古希腊天文学家喜帕恰斯(Hipparchus,又译伊巴谷)等人的大量观测与研究成果,写成以地心说理论为主体的巨著《天文学大成》。该书成为古希腊天文学的百科全书,

统治天文学长达13个世纪.在此期间,人们陆续发现,地心说对有些现象不能给予很好的解释,例如,金星、火星等的折返等现象.为了在地心说基础上解释这些现象,人们就在星体的运行轨道上再加上额外的本轮轨道,使得地心说体系越来越复杂.

公元16世纪,波兰天文学家哥白尼打算以托勒密的地心说体系为基础来修订天文学,但发现托勒密体系太繁琐,而且对很多自然现象不能给予很好的解释.他搜寻并攻读了大量古希腊哲学原著,分析其中关于地球运动的描写,结合自己的观测和计算,提出设想:如果星体围绕太阳运动的话,即日心地动说,很多问题的解释就变得简单化了.依据这个想法,他于1514年完成了《天体运行论》的撰写,于1543年临终前公开发表.哥白尼日心说的提出,给当时的社会带来了恐慌,给科学界带来了争论.因为地心说意味着地球是巍然不动的,感觉人们生存的地球踏实可靠.而日心说意味着地球是漂浮在宇宙中的,无法被人们理解和接受.尤其是日心说受到了当时掌管社会行政、文化大权的天主教会的反对.宣扬日心说者会判以极刑.例如,意大利天文学家布鲁诺就于1600年被烧死在罗马的鲜花广场.

但是,任何的理由阻挡不了科学进步和发展的脚步.德国天文学家开普勒受到哥白尼日心说的影响,并进一步阅读研究天文学著作.1600年,开普勒受到布拉格天文台的第谷的资助和邀请,成为第谷的助手.第谷一生积累了大量的天文观测资料.1601年第谷逝世前把所有的资料赠送给了开普勒.开普勒紧紧抓住行星轨道问题,以火星为例分析第谷的资料.尝试了19种可能的路径,最后发现只有椭圆轨道才与观测资料相符,开普勒前后用了8年时间于1609年得到了开普勒第一、第二定律,又用了9年时间于1618年得到了第三定律.开普勒定律的建立,也打破了自古以来人们所信奉的星体做完美圆周轨道运动的信念.

开普勒三定律的建立,渐渐增加了科学家们对日心说的认可.但一直没有证据来证明日心说.真正的决定性证据来源于伽利略的望远镜天文观测.1609年伽利略听说荷兰有人制作并展出了能把远处景物放大约3倍的望远镜,立即利用自己的光学知识制出了类似的装置.他在很短的时间内不断改进技艺,最后将其提高33倍用来观测天体,获得很多人们前所未有的星体现象.1610年伽利略对金星进行了长达3个月的观测,发现金星的位相现象,即有类似月亮的盈亏现象.这一发现是对日心说理论

的一个决定性证据.因为按照地心说理论,不会有金星的满盈现象出现,而日心说可以预言满盈现象的出现.

至此,天体观测规律得以形成.从公元150年左右的托勒密地心说到1610年伽利略证明日心说的观测证据,时间长达1400余年.天体观测规律给人们带来的下一个问题是,什么样的力使星体做椭圆轨道运动?亦即后人所称的开普勒问题.直到1687年牛顿的万有引力定律公开发表,这个问题才得以圆满解决.

4.1.2 地面实验规律

关于地面上物体运动的描述最早始于古希腊的亚里士多德.他的主要著作之一《物理学》被称为古代世界学术的百科全书,对其后近千年的历史都有很大的影响.“物体越重,下落越快”,以及“只有力才能使物体运动”是亚里士多德作中关于物体运动规律的描述.

意大利物理学家伽利略除了前述的利用自制的望远镜观测天体的工作外,也在研究亚里士多德的理论.针对亚里士多德的“物体越重,下落越快”的规律,伽利略从逻辑推理角度提出,如果将一个重物和一个轻物绑在一起,下落的时间会如何?从物体重量的角度,按照亚里士多德的理论,下落的时间应该更快.但从时间的角度,应该是重物 and 轻物各自下落时间的平均值.二者是矛盾的.因此,伽利略认为亚里士多德的理论是存在问题的.从实验的角度,1586年,比利时天文学家斯蒂文在他所出版的《静力学原理》一书描述,“将两个轻重相差10倍的铅球从30英尺的高度同时释放,结果发现铅球落地发出的声音像一个声音一样,说明两球同时落地的”,说明亚里士多德理论存在着问题.而广为流传的伽利略在意大利比萨塔上做落体实验只是一种传说而已.他是通过人工设计的斜面物体运动实验,推知获得的自由落体定律和惯性定律.伽利略是首个通过人工设计实验寻求物理规律之人,也是首个利用实验和数学相结合的方法探求物理规律之人.爱因斯坦对其的评价是:伽利略是现代物理学之父.

在伽利略和牛顿年代期间,还有比利时的斯蒂文、法国的笛卡儿、荷兰的惠更斯、英国的胡克等物理学家,以及德国的莱布尼兹等数学家,他们在天文学、物理学等方面进行了重要的研究工作,为牛顿的集大成工作奠定了基础.

4.1.3 天地合一的理论规律

前述为天体和地面的观测规律总结.我们重新

回到天体观测规律留给人们的“什么样的力使星体做椭圆轨道运动？”的问题上来。

开普勒本人曾试图引入太阳磁力来探求星体运行规律的原因,但没有成功.1673年惠更斯、胡克、哈雷、雷恩等人结合各自的研究工作,认定星体所受太阳的向心力与其距离成反比.但是他们无法说明引力的本质,也不能证明在平方反比引力作用下的行星轨道是椭圆或更广泛的圆锥曲线.而真正圆满解决这一问题的是英国物理学家牛顿.

1661年,牛顿进入英国剑桥大学学习数学,后来从事物理学研究.1665—1666年期间,因为流行瘟疫,剑桥大学被迫关门,牛顿回到了家乡,在那里他完成了微积分、光的色散性质、引力定律等科学成果的积累.其中的微积分是他在研究物体运动学时所创立的,后人将牛顿和德国数学家莱布尼兹并列为微积分的创始人.光的色散性质是牛顿通过自然光照射三棱镜后发生的折射现象而总结的.引力定律真正回答了什么样的力使星体做椭圆轨道运动问题.

“苹果落地”故事广为流传,这是牛顿思考引力过程的一个传说故事.苹果落地引发牛顿的一个问题的思考是,苹果落地和月球围绕地球运动是否是具有相同性质的力引起的?在此之前,伽利略已经发现抛射体的运动相当于一个匀速的水平运动和一个落体的加速运动的叠加.牛顿进一步设想,从高山水平抛出一个物体,当抛出的水平速度不断增大时,抛射体会越射越远,若速度达到一定程度,该抛射体就永远不会到达地面.若不考虑大气的阻力,它就应该一直绕地球运动.牛顿进一步设想,既然抛射体可以作这样的运动,为什么不能把月球也当作这样一个抛射体来考虑呢?由此牛顿猜想苹果与地球之间、月球和地球之间的力是同一性质的力.他把月球的轨道运动分解为两种简单的直线运动:一是由于惯性引起的、沿月球轨道切线方向的匀速直线运动;另一种是把月球拉向地球的落体运动,是由地球的引力引起的.以此思想为基础,牛顿基于惯性定律和第二定律,利用几何的方法获得了圆周运动与受力成平方反比的关系.

反过来,利用月球和地球、苹果和地球都具有相同的平方反比的受力关系来计算地球重力加速度与月球重力加速度的关系,以及月球围绕地球的运行周期,结果相当完善.证明了牛顿的猜想,即,苹果落地和月球围绕地球运动是具有相同性质的力引起的.其轨道的差别仅在于初始条件不同而已.

牛顿进一步设想,既然月球绕地球公转可以这样来解释,那么地球和其他行星绕太阳的公转为什么不能类似地来说明呢?所以牛顿又把思路推广到行星绕日的运动上.利用平方反比的受力关系圆满地解释了行星轨道问题.

牛顿进一步将平方反比的受力关系推广至任何星体,以及任何物体之间,建立了万有引力定律.牛顿直到约20年后才在他出版的《自然哲学的数学原理》中公开发布这一研究成果.原因是他无法精确地确定巨大星体之间的距离.这期间他发明了“流数术”,即现代的微积分方法,并且从数学上证明了球体对外部物体的作用恰如球体的质量全部集中在球心点一样,即现代的“质点”概念.只有在此基础上,牛顿才能够得出万有引力定律的数学验证.

牛顿三定律、万有引力定律等牛顿在力学领域的重要研究成果集中体现在1687年出版的《自然哲学的数学原理》一书中.在该书中,牛顿三定律只是用了几页篇幅的语言描述,而大部分内容是关于引力与轨道关系的几何推导过程和应用的描述.

牛顿万有引力定律和牛顿三定律的建立,使天上、地面物体的运动规律有了统一的描述,奠定了物理学的力学基础,使力学有了精练完美的表达,成为系统完整的科学.正如恩格斯所说,“牛顿完成了人类科学史上的第一次总结”.

从1610年伽利略证明日心说的观测证据到1687年牛顿的《自然哲学的数学原理》问世,历时近80年.

4.1.4 理论规律的能动作用

牛顿第二定律和万有引力定律使人们理解了自然界为什么如此井然有序地运转,她可以使人们追踪过去,预测未来,充分体现了科学的能动作用.

由牛顿第二定律和万有引力定律不但可以推导出开普勒三定律,圆满地解决星体的运动轨道问题,而且还可以进一步探讨更为广泛的轨道问题.星体不仅具有类似围绕太阳运动的一般椭圆轨道,还可以有长椭圆、双曲线、抛物线等各种轨道(由星体形成过程中的初始能量所决定).如此的预测结果被哈雷彗星的发现所证实.人们在1531年、1607年和1682年分别观测到过3颗未知的星体.英国天文学家哈雷用牛顿定律论证,这3颗星体属同一颗星体,以约75.5年为一个周期,并预言此星体将于1758年再现.临近1758年,人们纷纷打赌预言是否灵验,成为世界性趣闻.1758年该星没来,而是于1759年3月12日意外地出现了.后来人们发现,出现偏差的

原因是没有考虑木星和土星对其吸引,从而造成了218天的迟到误差。此后,这颗星体就被命名为哈雷彗星(其远日点已超过海王星轨道)。以此类推,哈雷彗星再次光临地球的时间是1986年、2061年等等。1986年的哈雷彗星也已被观测到。

1781年,人们发现了天王星。不久发现他的轨道有偏差。法国的勒维耶根据轨道偏差利用牛顿力学进行了计算,预测天王星外应该有另外一颗星体。1846年9月,他写信给柏林天文台的伽烈,告之预测星体的位置,伽烈果然在预测的偏差52分处发现了该星体,并命名为海王星。后来用同样的办法,人们发现了冥王星。

4.1.5 理论规律的完善与发展

经过16、17世纪世界科学大飞跃,物理学家开始用伽利略、牛顿的成果和科学方法,用力学的观点去认识热、电、光,相关的科学实验开始兴起。如,美国科学家富兰克林对于电的实验研究,英国的物理学家卡文迪许,在万有引力定律建立的111年后,设计扭秤实验,测量了引力常量“G”。利用所测得的G可以计算地球的重量,所以卡文迪许被称为是第一个称量地球重量的人。法国物理学家傅科设计著名的“傅科摆”,首次验证了地球的自转。此外,出现了刚体力学、流体力学、天体力学、声学等衍生学科。

1788年意大利科学家拉格朗日发表著作《分析力学》,建立了拉格朗日表述的分析力学。1827年,英国科学家哈密顿提出哈密顿函数,1834年发表了《动力学的一种普遍方法》的论文,成为建立哈密顿函数表述分析力学的里程碑。

从1687年牛顿的《自然哲学的数学原理》问世到1834年哈密顿的《动力学的一种普遍方法》的论文发表,历时近150年。

力学虽然是一门古老的学科,但他依然不断地在发展。力学与后来逐步发展起来的分析力学、弹性介质力学、非线性混沌等学科在当今的精密仪器、工程设计、航空与航天等领域发挥着重要的作用。

4.2 热运动研究领域(19世纪至20世纪初完成规律体系的建立)

热学研究的是大量微观粒子的宏观运动规律,形成了宏观理论和微观理论。宏观理论是基于实验总结而成的,包括热力学第零、第一、二、三定律等宏观热力学规律。而微观理论则是由经典或量子力学的原理和基本假设而形成的,包括统计物理学、分子动理学及其他非平衡态理论等。宏观理论和微观理论的桥梁是系统的热力学函数,二者殊途同归。所

以,宏观理论和微观理论构成了热学完备的理论体系。

18至20世纪初,热学完成了规律体系的建立。从历史发展的角度,热学理论形成的先后顺序是先有宏观热力学规律,后有微观理论。宏观热力学规律形成的先后顺序是热力学第二定律、第一定律、第三定律、第零定律。微观理论形成的先后顺序是分子动理学、统计物理学(玻尔兹曼经典统计、吉布斯系综统计、玻色、费米量子统计)、其他非平衡态理论。

4.2.1 宏观热力学

热学规律的探索首先是从宏观现象的研究开始的。1662年,英国化学家玻意耳首先发现了等温气体的压强体积反比定律。由于没有建立一个合适的温标,直至100多年后才由两个法国人发现另外两个气体状态定律,即,1787年法国查理发现的等容气体压强与温度成正比定律,1802年盖吕萨克发现的等压气体体积与温度成正比定律。

对于“热”的本质的理解,人们经历了从早期错误的“热质说”(热是一种物质)到热是一种运动形式的过程。在此期间,18世纪蒸汽机的进一步发展,迫切需要研究热和功的关系,以提高热机效率,适应生产力发展的需要。19世纪40年代,英国物理学家焦耳等人在对热与功转化等实验研究中,建立了能量转化与守恒定律,即热力学第一定律。热力学第二定律的雏形——卡诺定理,是早在热力学第一定律建立之前,即1824年,由法国物理学家卡诺提出的。之后由德国物理学家克劳修斯等人在热力学第一定律基础上进行完善,分别于1850年和1851年提出了克劳修斯和开尔文表述形式的热力学第二定律。低温物理学和化学平衡常数的确定为热力学第三定律的建立提供了基础。德国科学家能斯特在1906年和1912年分别给出了热力学第三定律的两种不同表述。热力学第零定律是由英国物理学家福勒于1939年正式提出,比热力学第一、第二定律晚了近百年,但较其他定律更为基本,因此被命名为第零定律。

成熟的热学微观理论的研究经历了分子动理学和统计物理两个发展阶段。

4.2.2 分子动理学

克劳修斯在研究热力学第二定律的同时,也从微观上对分子运动论理论进行了探讨。1857年他以分子对器壁的碰撞说明了气体压强的形成,推导出气体压强公式,并由此提出了理想气体分子运动模型。1859年,英国物理学家麦克斯韦基于分子碰撞

的能量和动量守恒原理及速率统计假设,推导出了自由空间的平衡态气体分子速率分布规律,即麦克斯韦速率分布律.1868年,奥地利物理学家玻尔兹曼将麦克斯韦速率分布推广至受保守力作用的系统平衡态中,得出保守力场下分子的速率分布,即玻尔兹曼分布律,并给出了能量均分定理,揭示了温度概念的微观本质.玻尔兹曼认为麦克斯韦速率分布律的获得没有足够的理论保证.为此,玻尔兹曼基于牛顿力学原理和一些碰撞假设,进一步研究系统状态随时间演化的一般规律,于1872年导出了包含时间的分布函数随时间演化所遵循的方程,即玻尔兹曼积分微分方程.玻尔兹曼由此发现,麦克斯韦分布律所描述的平衡态是一种最可几、最稳定的状态.对于非平衡状态,玻尔兹曼提出了著名的H定理,与克劳修斯的熵增加原理是一致的,给宏观热力学第二定律以微观解释.至此,由克劳修斯、麦克斯韦和玻尔兹曼从分子运动论角度建立了分子动理学的主要内容.分子动理学理论不但可以处理近独粒子体系的稳态问题,还可以处理该系统近平衡态的输运问题.

4.2.3 统计物理学

针对分子动理学的研究成果,1874年和1876年,英国开尔文和奥地利洛施密特先后分别提出了“可逆性佯谬”问题,即,经典力学方程和分子间碰撞过程是可逆的,而大量分子所组成系统的宏观过程规律是不可逆的,玻尔兹曼所基于的经典力学原理,针对大量微观粒子组成体系的研究结果是否正确?玻尔兹曼就此进一步研究统计问题.他基于经典力学原理,加上统计概率原理假设,于1877年发表了用以处理近独粒子经典体系平衡态问题的统计研究成果,并提出了熵与概率的关系.玻尔兹曼也就此回答了“可逆性佯谬”问题,即,分子动理学理论虽然引进了统计方法,但未将统计观点作为理解热力学现象的新的基础,从而造成统计随机性与经典力学决定性之间的矛盾.进一步讲,宏观系统的不可逆性不是由于运动方程和分子间的相互作用力形式而引起的,而是由于宏观系统的概率性而引起的.或者说,宏观自发过程的可逆过程并不是没有,而是由概率原理导致的这种可逆过程发生的概率非常小,以至于实际中观察不到.至1900年,普朗克明确写出玻尔兹曼的熵与微观状态数的关系式,标志着玻尔兹曼统计力学理论的形成.

美国物理化学家吉布斯在麦克斯韦、玻尔兹曼等人工作基础之上,使用温度、内能、熵等状态函数

为坐标,发展了热力学系统的图示法.在热力学系统中考虑了化学、引力、应力、表面张力、电磁等因素,扩展了热力学的范围.1902年发表《统计力学的基本原理》巨作,创立了统计系综方法,建立了平衡态的经典统计力学方法.吉布斯的系综统计方法,不但可以处理前述的玻尔兹曼统计理论,以及后来发展的玻色、费米的量子统计理论所能解决近独粒子体系的稳态问题,而且还可以处理非独粒子体系的经典和量子统计问题.因此,吉布斯的系综理论是更具普遍化的统计理论.

在玻尔兹曼统计、吉布斯统计系综理论基础之上,玻色、爱因斯坦、费米等人基于微观粒子的全同粒子假设,逐步建立了玻色、费米等量子统计物理理论,用以处理近独粒子量子体系的平衡态问题.至此,统计物理学的基础理论得以建立.

4.2.4 其他非平衡态理论

涨落的准热力学理论是由波兰物理学家斯莫陆绰斯基提出,后经爱因斯坦补充完善形成的一种处理近平衡态涨落的方法.1827年,英国植物学家布朗在显微镜下观察到悬浮在液体中花粉在不停地做无规则运动,称为布朗运动.经过70余年的努力,形成了郎之万方程和爱因斯坦-斯莫陆绰斯基理论等涨落理论,使布朗运动现象得以解释.目前,包括耗散结构理论在内的等处理远离平衡的其他微观理论仍在不断地完善和发展中.

玻尔兹曼是原子论的坚决支持者,他的研究结果受到以马赫、奥斯特瓦尔德为代表持唯能论观点学者的长期批评.所以,玻尔兹曼生前的研究工作没有得到认可和支持.直至他去世两年之后的1908年,法国物理学家佩兰通过布朗运动的实验结果证实了原子的存在,原子论得到普遍承认后,人们才逐渐接受了玻尔兹曼的研究成果.后人在玻尔兹曼的墓碑上刻上了熵与微观状态数的关系式,以纪念玻尔兹曼在统计物理学所做出的杰出贡献.

热力学与统计物理学作为物理学的一个重要分支,被广泛应用在物理、生物、化学甚至社会学等各领域.

4.3 电磁学(19世纪完成规律体系的建立)

电磁学研究的是电磁场的产生及其传播规律.从电磁场产生及在空间传播的角度,所形成的根本规律是麦克斯韦方程组.从有限电路应用角度,其基本规律是欧姆定律和基尔霍夫第一、第二定律.

电磁学是19世纪完成规律体系的建立.从历史的发展角度,电磁学理论形成的先后顺序是库伦定

律、毕奥-萨伐尔定律、安培定律、法拉第电磁感应定律、麦克斯韦方程组.电路规律形成的先后顺序是欧姆定律、基尔霍夫定律.

4.3.1 静电与静磁

人类有关电磁现象的观测可追溯到公元前 585 年.希腊哲学家泰勒斯记载了用木块摩擦过的琥珀能够吸引碎草等轻小物体,以及天然矿石吸引磁铁现象.在此后的 2000 多年中,人们对电磁现象陆续进行观测和总结.1600 年英国伊丽莎白女王的御医吉尔伯特系统总结磁现象.1729 年英国的格雷发现感应起电方法.1745 年荷兰的穆欣布罗克发明莱顿瓶.1747 年美国富兰克林研究雷电现象并统一天地电.1766 年英国普里斯特利提出电吸引力与距离成反比的设想.1769 年苏格兰罗比生进行第一次电力测量.1773 年英国卡文迪许实验验证普里斯特利预言等众多科学家等对电磁现象进行了观测和实验研究.

在 1820 年丹麦物理学家奥斯特发现电流的磁效应实验之前,静电和静磁的研究是彼此独立发展的,认为物质的磁现象和电现象原理是相同的,即电荷产生电场,磁荷产生磁场(磁荷观点).1785 年,法国物理学家库仑通过实验总结出了两个静止点电荷之间的相互作用力规律,即库仑定律.按照磁荷观点,库仑定律同样适合两个静止点磁荷间的相互作用力的规律.但是,在奥斯特的电流磁效应实验之后,磁荷观点被放弃,由法国物理学家安培提出的磁效应的分子环流假说所取代.

4.3.2 运动的电荷产生的稳恒磁场

1800 年意大利物理学家伏打发明了伏打电堆,使获得持续、相对稳定的电流成为可能.1820 年 7 月,丹麦物理学家奥斯特通过实验发现电流(运动的电荷)可以对磁铁施加作用力,即电流的磁效应.奥斯特的实验工作首次揭示了电磁现象的内在联系,即电可以产生磁.这一实验发现从根本上改变了此前人们认为电和磁是彼此无关的认识.

电流的磁效应导致静磁学的两个问题,一个是磁场的起源问题,即电流产生的磁场规律,二是磁场的性质问题,即磁场对电流的作用力规律.通过法国的安培、毕奥-萨伐尔、拉普拉斯等人的共同努力圆满地解决了这两个问题.

1820 年 10 月,法国的毕奥和萨伐尔公布了载流长直导线对磁针的作用力实验,给出了载流长直导线产生的磁场与电流强度和距离的关系,经过法国数学家拉普拉斯从数学上证明,最终给出了电流

产生磁场规律的表达式,即,毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律.教材和文献中经常称为毕奥-萨伐尔定律.

1820 年 12 月,法国物理学家安培基于 4 个巧妙的实验和作用力方向假设公布了他的研究成果,给出了两个电流元之间的相互作用公式,即安培定律,或安培力公式.1829 年荷兰物理学家洛伦兹所总结的洛伦兹公式是单个运动电荷在磁场中受力公式的普遍表达式.结合毕奥-萨伐尔的电流产生磁场规律和安培定律,二者联合起来,就给出了电流产生的磁场、以及其他电流在磁场中的受力规律,从而圆满地解决了磁场的起源和磁场的性质两个问题.安培还提出任何磁场都是由分子环流所产生的微观机制,即磁效应的分子环流假说,取代了以往的磁荷观点.

4.3.3 变化的磁场产生的电场

既然电能够产生磁,反过来磁是否也能产生电?英国物理学家法拉第通过圆环实验,于 1831 年第一次观察到由变化的电流所产生电磁感应现象,给出了法拉第电磁感应定律,并提出了力线,即场的概念.1834 年俄国物理学家楞次给出了判断感应电流方向的另外一种简洁的方法,即楞次定律.

4.3.4 电磁理论大统一

英国物理学家麦克斯韦对已有的电磁现象与规律进行了总结,并提出了“位移电流”和“涡旋电场”的假设.在此基础上,1865 年麦克斯韦用数学公式将电磁规律表示出来,建立了麦克斯韦方程组,完成了电磁学的统一理论.引入的“位移电流”和“涡旋电场”也从理论上预言了电磁波的存在,并于 1888 年被德国赫兹实验所证实,麦克斯韦完成了人类科学史上的第二次总结.

德国物理学家欧姆受傅里叶热传导理论研究结果的启发进行电路规律的研究.在 1827 年发表的《电路的数学研究》中给出了电流、电压和电阻三者之间的关系,即欧姆定律.这是电路的最基本规律.1845 年,德国物理学家基尔霍夫提出了用于分析和计算较为复杂电路的基础规律,即基尔霍夫电路定律,包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律.

4.4 光学(18 至 20 世纪初完成规律体系的建立)

光学是研究光的传播及光与物质相互作用规律的科学.所形成的基本理论包括几何光学、波动光学(物理光学),以及进一步发展的量子光学、激光物理、非线性光学、信息光学等等.

光学是 18 至 20 世纪初完成规律体系的建立的.从历史的发展角度,光学理论形成的先后顺序是

几何光学、波动光学、量子光学等近代光学。

4.4.1 几何光学

几何光学的早期研究可以追溯到古代。我国战国时期墨翟及弟子所著《墨经》有对光的直线传播、反射等的描述记载。在此后的两千多年的岁月中，人们不断观察和总结光现象与规律。光学的系统研究始于17世纪。1611年，德国物理学家开普勒发现了全反射现象。1621年，1630年分别由荷兰物理学家斯涅尔和法笛卡尔将折射现象的观察结果总结为折射定律。1657年，法国物理学家费马提出了最小时间原理，并以此从理论上证明了反射定律和折射定律。1676年丹麦天文学家罗默根据木星卫蚀的推迟得到光速有限的结论。至此，以光的粒子性为基础的几何光学的基本知识体系建立完成。与此同时，英国物理学家牛顿对光的反射、折射、绕射和色散现象也进行了系统研究。

4.4.2 波动光学

光的本质问题一直是物理学界长久以来探讨的问题。17世纪，出现了很多显示光的波动特性的报告。例如，1665年意大利物理学家格里马第提出的光的衍射现象，1667年英国物理学家胡克研究的薄膜干涉彩色现象，1669年丹麦的巴塞林纳斯发现光通过冰洲石的双折射现象，牛顿本人也做了著名的“牛顿环”实验等等。以牛顿为代表的科学家认为光是一种粒子，即光的微粒说。光的微粒说可以在一定程度上解释几何光学现象，但却无法解释光的衍射、干涉和双折射等现象。英国物理学家胡克、荷兰物理学家惠更斯是主张光的波动说的代表。1687年惠更斯提出了子波原理，即惠更斯原理。利用惠更斯原理不但可以解释此前几何光学所能解释的现象，还可以解释光的衍射现象。但由于惠更斯的波动说原理的不完善，以及牛顿在17世纪的巨大影响，使得在18世纪末之前，光的微粒说占据主导地位。1801年英国物理学家托马斯·杨成功地实现了光的双缝干涉实验，在实验上验证了光的波动说。1816年，法国物理学家菲涅尔在惠更斯的子波思想基础上，提出了惠更斯-菲涅尔原理，成功解释了衍射现象，建立了波动光学的理论基础。至此，光的波动说逐渐被人

们认可，并占据了主导地位。

4.4.3 量子光学

1865年，麦克斯韦方程组的建立又将光和电磁现象统一起来，使人们对光的本质的认识又向前迈出了一大步。19世纪末至20世纪初，光学的研究深入到光与物质相互作用的微观机制中。光的电磁学波动理论在解释光和物质相互作用时的某些现象时遇到困难。例如，黑体辐射中的能量按照波长的分布问题，1887年德国物理学家赫兹发现的光电效应问题。为此，人们重新研究光的属性。1900年，德国物理学家普朗克提出辐射的能量量子化假说。这一假说圆满地解决了自1859年以来人们一直探讨的黑体辐射问题。1905年，德国爱因斯坦依据能量量子化假说，提出光能量的量子化假说，即光子，简称光子。光子假说成功地解释了1888年的光电效应问题，并被1923年的康普顿效应以及后来的其他实验所验证。

随着20世纪中叶量子力学的发展和完善，将物质量子化，光作为经典电磁波，所形成的理论为半经典量子光学。将物质和光均做量子化处理，所形成的理论为全量子光学。视不同的条件，采取相应的半经典量子光学或全量子光学理论处理光与物质相互作用问题。随着人们对物质材料认识的加深，进一步形成了激光物理、非线性光学、信息光学等等。

4.4.4 光的波粒二象性

至此，人们一方面通过干涉、衍射和偏振等光学现象证实了光的波动性；另一方面通过黑体辐射、光电效应和康普顿效应等又证实了光的粒子性。但此时的粒子性较早期几何光学的粒子性的概念是有所区别的，即光不但可以看成是粒子的传播，同时粒子的能量还是量子化的。为了将光的波动性和粒子性的两个完全不同的概念联系起来，1924年法国物理学家德布罗意提出物质波假说，即每一物质的粒子都和一定的波相联系。1926年德国犹太裔物理学家玻恩赋予物质波的概率解释，从而建立了物质波粒二象性的物理图像。1927年的戴维孙和革末的电子束衍射实验证实了德布罗意物质波的假说。

(未完待续)