

LIANGZIYULIANGZILIXUE

量子与量子力学

陈亚孚 薛玲玲 孙雅东 著

开启原子物理世界的钥匙



吉林大学出版社

JILIN UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书与国内流行的量子力学教学用书相比,加强了基本概念、基本原理和基本计算方法的阐述力度,每章都有概念、原理、思考题,特别是对量子、状态、算符三个概念的阐述和七个基本原理的阐述更是重着笔墨。在本征方程求解和算符对易关系计算方面加强了基本原理和基本公式的演练。一、二章专门阐述了基本概念和基本原理,试图使读者首先建立清晰的量子力学的学习目标和内容框架。一~六章是单体非相对论量子力学的严格理论,七、八、九章属应用和提高内容。

本书适用于理、工科本科教学用书,也适用于非物理专业、研究生和各类科技人员在自学和工作时做参考书。

图书在版编目(CIP)数据

量子与量子力学/陈亚孚,孙雅东著. —长春:吉林大学出版社,
2006. 10
ISBN 7-5601-3527-7

I. 量... II. ①陈... ②孙... III. ①量子 ②量子力学
IV. 0413

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 127568 号

量子与量子力学

陈亚孚 薛玲玲 孙雅东 著

责任编辑、责任校对:唐万新

封面设计:创意广告

吉林大学出版社出版
(长春市明德路 421 号)

吉林大学出版社发行
长春市永昌印业有限公司印刷

开本:787×1092 毫米 1/16

2006 年 11 月第 1 版

印张:18.5

2006 年 11 月第 1 次印刷

字数:427 千字

印数:1—3000 册

ISBN 7-5601-3527-7

定价:26.00 元

前 言

量子论创立已经一个多世纪了，它和相对论是 20 世纪初人类科学的两大创举，造就了上一个世纪人类科学技术的辉煌，出现了原子能技术、航天航空技术、电子技术并开辟了世纪末的光子技术，这些划时代技术的出现，改变了世界经济、文化、科技和人的精神面貌，把人类社会推进到信息社会时代。量子论的出现引领人类向微观物质世界进发，将对 21 世纪生命科学发展有重要指导意义。

量子力学产生已有 80 年了，这个理论在 300 多年经典物理的基础上，以全新的思维方法、全新的物理概念和精妙的数学方法，从根本上改变了人们对微观物质世界的看法，现在已经成为自然科学中许多技术领域的基础物理理论。尽管量子力学从问世开始，国内外的初学者都认为是一门比较难学的物理理论，但是因为量子力学的应用越来越广泛，学习和研究量子力学的热潮越来越高，不仅是大学物理系必修课，而且许多非物理专业的学生也开设量子力学课程，如化学、化工材料、生物、医学、农业、精密仪器仪表、地质探测、海洋生物、空间技术等等，更值得一提的是许多非物理专业的硕士生、博士生和在职研究人员也要求学习或补学量子力学，已经形成了量子力学教学必须面对的教育群体，这就对量子力学的教学和教学用书提出了许多新的问题，他们从不同角度提出的问题对量子力学的深入研究和完善很有益处。

当今，量子力学展现在读者面前的公式推导，数学方法太多，使许多人沉浸在数学海洋中，掩盖了对物理概念和基本原理的深透理解，对培养学生创造性思维很不利。甚至许多渴望学习量子力学的人不敢触碰，因此，量子力学教学和教材亟须改进，应提倡多元化。

作者在 30 多年的量子力学教学中，曾为不同学时要求（60~120 学时），不同教学对象（理科和非理科，本科和研究生、博士生，在职教师和科研人员）编制过十几种教案，感到现有的教学用书尽管很多，但并不能满足变化了的教學要求，特别是现代科学技术的发展和信息传媒技术发展。大众科普技术的传播，人们对微观物理世界的感性认识和潜在影响，对接受量子力学的物理概念和教学方法已经不是 20 世纪五六十年代那种模式，对量子力学许多关键概念（如波粒二象性、波函数、物质波、几率波、量子、量子阱、共振隧穿、测不准关系、算符、量子化等等）没有那么多的奇妙感和不可思议的感觉，而是要求用最简洁的语言把这些概念准确地说明白，用最少的时间把量子力学理论思路和主要原理、方程、公式和应用说清楚。对那些非物理专业的学生还需要拓宽和加深经典物理的主要基础知识及其应用范围，对那些补学量子力学的人，需要突出重点和提高概念认识准确到位。因此量子力学的教学和教学用书面临新的挑战，有必要改变 20 世纪五六十年代的思路，那时要求学习量子力学必须具备物理专业学生的经典物理基础和数理方程基础。现在是面对那些渴望学习量子力学的学生，我们不能对

他们的基础指指点点，只能用心改进教材和教学内容的组织方法。不要用一种模式上来就是状态和波函数，接着就是归一化，解方程的微积分运算，根本来不及思考量子力学是什么？做什么？就被推进数学海洋。本书作者就试图探索量子力学学习的新思路。

此外，作者认为大学物理学的学习应该达到两个目的，第一是建立物理思维，用物理学知识和思考方法研究和开扩物质运动特性的认识，在内容方面突出重点和基本理论方法非常重要；第二是建立创造性思维，教学内容的组织方面，对物理定律和物理学前辈们的创造性和创新点的介绍也很有必要，特别是量子力学这门理论的产生是物理学史上罕见的精彩论战，也是一代物理学精英们智慧和创造性思维的记载。本书在内容组织方面，沿着量子力学历史发展路线，围绕体系状态波动性和粒子性共存，力学量取值由连续性和不连续（即粒子和量子）概念形成及应用这两条主导思想展开全部内容，并且前面两章为物理背景和量子力学总论，用接近科普著作的笔法，先建立量子力学的总体思路和主要思考路线。这样可能更符合读者的思维规律，同时也为教师针对不同的教学对象和不同的时间进度要求提供一个弹性空间，可以不讲留给学生自学阅读或作为复习总结用。每章前面给出本章内容提要，后面加设原理及概念的思考题，对读者接受量子力学的物理原理及概念更有益处，以便使学生在数学推导计算的细节中保持物理思想清醒。

陈铁民、任大翠两位教授对本书进行了详细的审阅，并提出了许多有益的修改意见。赵利民、汤秋菊、刘谊元、魏伟对本书的文字和图表做了大量的工作，在此一并表示感谢。

本书内容的组织和许多概念的阐述都是作者学习量子力学的体会，有些属试探性的，作者的水平和底蕴有限，诚请同仁和读者批评指正。

陈亚孚

2006年8月于长春

目 录

| | |
|-------------------------|----|
| 第一章 量子力学的科学背景 | 1 |
| 1.1 自然科学与物理学 | 1 |
| 1.2 经典物理理论的评述 | 3 |
| 1.2.1 物理学研究的目的是能量和力 | 3 |
| 1.2.2 经典物理理论研究的内容是力学量 | 4 |
| 1.2.3 经典物理的理论结构特征 | 5 |
| 1.3 量子力学产生的直接物理背景 | 7 |
| 1.3.1 黑体辐射能实验及普朗克开创量子论 | 7 |
| 1.3.2 普朗克量子论创新点与理论方法 | 8 |
| 1.3.3 光电效应与爱因斯坦的光量子学说 | 10 |
| 1.3.4 原子线状光谱与玻尔的旧量子论 | 11 |
| 1.3.5 量子概念的其他实验证明 | 11 |
| 本章小结 | 12 |
| 第二章 量子力学概论 | 14 |
| 2.1 什么是量子力学 | 14 |
| 2.1.1 量子 | 14 |
| 2.1.2 状态与波函数 | 15 |
| 2.1.3 算符 | 16 |
| 2.1.4 量子力学理论的形成 | 17 |
| 2.2 量子力学理论的原理框架 | 19 |
| 2.2.1 一个新的物质运动观 | 19 |
| 2.2.2 两个研究内容交融并行 | 19 |
| 2.2.3 五条新的物理原理 | 20 |
| 2.3 量子力学创立的科学意义 | 22 |
| 2.3.1 核能开发与原子能技术 | 23 |
| 2.3.2 太空航天技术 | 24 |
| 2.3.3 电子智能技术 | 24 |
| 2.3.4 开辟了世纪末的光子技术 | 25 |
| 2.3.5 物理理论的根本变革 | 25 |
| 本章小结 | 25 |
| 思考题 | 26 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 第三章 状态与波函数表示 | 27 |
| 3.1 引言 | 27 |
| 3.2 状态与波函数的引进 | 29 |
| 3.2.1 德布罗意(deBroglie)假说 | 29 |
| 3.2.2 波恩的统计解释与叠加原理 | 30 |
| 3.3 薛定谔方程 | 31 |
| 3.3.1 建立方程的数学演绎 | 31 |
| 3.3.2 定态薛定谔方程 | 33 |
| 3.3.3 定态薛定谔方程求解问题 | 34 |
| 3.4 粒子流密度与守恒定律 | 35 |
| 3.4.1 体系的定态 | 35 |
| 3.4.2 粒子流密度公式与守恒定律 | 36 |
| 3.4.3 几率流密度矢量应用举例 | 37 |
| 3.5 定态问题讨论 | 37 |
| 3.5.1 关于状态的基本常识 | 38 |
| 3.5.2 定态方程求解的基本原则 | 40 |
| 3.6 一维无限深方势阱 | 41 |
| 3.7 一维有限深方势阱(对称型) | 45 |
| 3.8 一维线性谐振子 | 48 |
| 3.9 一维三角势阱 | 52 |
| 3.10 一维势垒与势阱的量子透射 | 54 |
| 3.10.1 一维方势垒量子反射与透射系数 | 54 |
| 3.10.2 一维势阱的量子透射讨论 | 56 |
| 3.11 δ 势阱与势垒的量子透射 | 57 |
| 3.11.1 $\delta(x)$ 函数知识 | 57 |
| 3.11.2 δ 势阱与势垒透射 | 59 |
| 本章小结 | 61 |
| 思考题 | 62 |
| 习题 | 63 |
| 第四章 力学量与算符表示 | 64 |
| 4.1 引言 | 64 |
| 4.1.1 力学量算符的引进 | 65 |
| 4.1.2 算符的构造及运算法则 | 66 |
| 4.2 算符的线性与厄米性 | 68 |
| 4.2.1 算符的线性性质 | 68 |
| 4.2.2 算符的厄米性性质 | 68 |
| 4.3 算符本征方程与本征函数系 | 69 |
| 4.3.1 常见算符的坐标表示 | 70 |

| | |
|----------------------------|-----------|
| 4.3.2 解本征方程 | 72 |
| 4.4 厄米算符本征函数性质 | 75 |
| 4.4.1 本征函数的正交性和归一性 | 75 |
| 4.4.2 本征函数的完全性 | 76 |
| 4.4.3 力学量算符 \hat{G} 的平均值 | 77 |
| 4.5 力学量的对易性与测不准原理 | 80 |
| 4.5.1 算符的对易性 | 80 |
| 4.5.2 对易性定理 | 80 |
| 4.5.3 算符不对易与测不准原理 | 81 |
| 4.5.4 对易关系计算公式 | 82 |
| 4.6 力学量随时间变化与守恒定律 | 85 |
| 4.6.1 力学量平均值随时间变化 | 85 |
| 4.6.2 力学量守恒定律 | 87 |
| 本章小结 | 88 |
| 思考题 | 90 |
| 习题 | 91 |
| 第五章 表象理论 | 93 |
| 5.1 物理学空间与坐标表示 | 93 |
| 5.1.1 物理学空间 | 93 |
| 5.1.2 构造坐标系的数学原则 | 93 |
| 5.1.3 量子力学中的希尔伯特空间与表象 | 94 |
| 5.2 状态和力学量算符的表示 | 95 |
| 5.2.1 状态的列矩阵表示 | 95 |
| 5.2.2 力学量算符的矩阵表示 | 96 |
| 5.3 状态与力学量矩阵表示定理 | 98 |
| 5.4 量子力学公式的矩阵表示 | 101 |
| 5.4.1 平均值公式矩阵表示 | 101 |
| 5.4.2 本征方程的矩阵表示 | 102 |
| 5.4.3 薛定谔方程的矩阵表示 | 103 |
| 5.5 狄拉克符号表示 | 103 |
| 5.5.1 左矢与右矢 | 103 |
| 5.5.2 量子力学的狄拉克符号表示 | 104 |
| 5.6 量子力学中的幺正变换 | 106 |
| 5.6.1 幺正算符的量子力学认识 | 106 |
| 5.6.2 幺正变换矩阵 | 107 |
| 5.6.3 态矢和算符矩阵的变换公式 | 108 |
| 5.6.4 幺正变换的性质 | 109 |
| 5.7 线性谐振子与粒子数表象 | 111 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.7.1 | 粒子数算符的引进 | 111 |
| 5.7.2 | 粒子数表象 | 113 |
| 5.8 | 量子力学的三种绘景 | 115 |
| 5.8.1 | 海森堡绘景 | 115 |
| 5.8.2 | 薛定谔绘景 | 116 |
| 5.8.3 | 两种绘景的关系 | 116 |
| 5.8.4 | 相互作用绘景 | 117 |
| | 本章小结 | 118 |
| | 思考题 | 119 |
| | 习题 | 120 |
| 第六章 | 角动量和氢原子 | 121 |
| 6.1 | 轨道角动量算符的对易关系 | 121 |
| 6.1.1 | 量子力学轨道角动量的定义 | 122 |
| 6.1.2 | L^2 与分量 L_x, L_y, L_z 对易关系 | 124 |
| 6.1.3 | 角动量升降算符对易关系 | 125 |
| 6.2 | 轨道角动量的本征方程 | 126 |
| 6.2.1 | L^2 的本征方程 | 127 |
| 6.2.2 | 讨论 | 133 |
| 6.3 | 自旋角动量 | 133 |
| 6.3.1 | 斯特恩-盖拉赫实验与自旋假定 | 133 |
| 6.3.2 | 自旋算符与泡利矩阵 | 134 |
| 6.3.3 | S^2, S_z 共同本征函数 | 137 |
| 6.4 | 角动量升降算符 | 137 |
| 6.4.1 | L^{\pm} 在 $\{ lm\rangle\}$ 中表示 | 138 |
| 6.4.2 | L_x 和 L_y 在 $\{ lm\rangle\}$ 中的矩阵表示 | 139 |
| 6.4.3 | S^{\pm} 在“ S_z ”中表示 | 140 |
| 6.5 | 两个角动量耦合 | 142 |
| 6.5.1 | 无耦合表象 | 142 |
| 6.5.2 | 有耦合表象 | 143 |
| 6.5.3 | 有耦合与无耦合表象变换 C-G 系数 | 144 |
| 6.5.4 | 自旋与轨道角动量耦合 | 145 |
| 6.6 | 原子内单电子在库仑场中运动 | 147 |
| 6.6.1 | 径向方程 | 148 |
| 6.6.2 | 变系数二阶微分方程 | 149 |
| 6.6.3 | 径向方程定解 | 151 |
| 6.6.4 | 库仑场中电子能量与波函数 | 155 |
| 6.7 | 氢原子 | 155 |

| | |
|---|------------|
| 6.7.1 氢原子中电子运动的精确考虑 | 155 |
| 6.7.2 氢原子中电子能量与本征函数 | 156 |
| 6.7.3 氢原子实验的理论计算 | 156 |
| 6.8 原子光谱的精细结构与塞曼效应 | 159 |
| 6.8.1 塞曼效应 | 159 |
| 6.8.2 精细结构 | 160 |
| 本章小结 | 162 |
| 思考题 | 164 |
| 习题 | 164 |
| 第七章 近似方法 | 166 |
| 7.1 非简并的微扰理论 | 166 |
| 7.1.1 定态微扰的一般原理 | 166 |
| 7.1.2 非简并定态一级微扰 | 167 |
| 7.1.3 二级修正 $E_n^{(2)}$, $\psi_n^{(2)}$ | 170 |
| 7.2 简并性微扰理论 | 172 |
| 7.3 定态微扰例题与一级斯塔克效应 | 173 |
| 7.3.1 弱电场作用的带电谐振子 | 173 |
| 7.3.2 氢原子的斯塔克效应 | 176 |
| 7.4 含时微扰 | 179 |
| 7.4.1 含时微扰的一般原理 | 179 |
| 7.4.2 一级修正方程 | 180 |
| 7.4.3 $a_k^{(1)}$ 的讨论 | 182 |
| 7.5 量子跃迁 黄金规则 | 182 |
| 7.5.1 跃迁几率 | 182 |
| 7.5.2 共振跃迁 | 183 |
| 7.5.3 时间与能量的测不准关系 | 186 |
| 7.6 爱因斯坦的光发射和光吸收理论 | 187 |
| 7.6.1 光发射与吸收系数 | 187 |
| 7.6.2 量子跃迁系数 | 188 |
| 7.6.3 量子跃迁选择定则 | 190 |
| 7.7 变分法 | 190 |
| 7.7.1 变分法近似的操作 | 190 |
| 7.7.2 变分法定理 | 191 |
| 7.7.3 氦原子基态 | 192 |
| 7.7 WKB 近似方法 | 193 |
| 本章小结 | 195 |
| 思考题 | 197 |
| 习题 | 197 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 第八章 量子散射 | 199 |
| 8.1 引言 | 199 |
| 8.2 散射与散射截面 | 200 |
| 8.2.1 散射的经典力学描述 | 200 |
| 8.2.2 散射的量子力学描述 | 201 |
| 8.3 分波法 | 203 |
| 8.3.1 中心场的渐近解 | 203 |
| 8.3.2 散射波振幅 $f(\theta)$ 光学定理 | 204 |
| 8.3.3 对分波法的讨论 | 206 |
| 8.4 球形方势阱散射 | 207 |
| 8.5 共振散射 | 209 |
| 8.5.1 低能共振散射 | 209 |
| 8.5.2 布瑞特-维格纳共振宽度公式 | 210 |
| 8.6 玻恩近似 | 211 |
| 8.6.1 一级近似方程 | 212 |
| 8.6.2 一级近似方程的求解 | 212 |
| 8.6.3 散射振幅 $f(\theta)$ | 213 |
| 8.6.4 有限深球势阱散射 | 214 |
| 8.6.5 汤川秀树势散射 | 215 |
| *8.7 全同粒子散射 | 215 |
| 8.7.1 α 粒子与氧原子的碰撞 | 216 |
| 8.7.2 α - α 粒子散射 | 216 |
| 8.7.3 电子-电子散射 | 218 |
| 8.7.4 自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子间的散射 | 219 |
| 本章小结 | 220 |
| 思考题 | 221 |
| 习题 | 221 |
| 第九章 多体量子力学理论 | 222 |
| 9.1 全同性原理 | 222 |
| 9.2 全同性粒子体系的波函数 | 223 |
| 9.2.1 对称和反对称波函数 | 223 |
| 9.2.2 玻色子和费米子 | 225 |
| 9.2.3 全同粒子体系波函数组合 | 225 |
| 9.2.4 费米子的泡利不相容原理 | 229 |
| 9.3 两个电子体系自旋波函数 | 229 |
| 9.3.1 对称和反对称本征函数 | 229 |
| 9.3.2 体系自旋函数的本征值 | 230 |

| | |
|---|-----|
| 9.4 原子中的多电子体系近似表述 | 232 |
| 9.4.1 原子中单电子量子态 | 233 |
| 9.4.2 原子中电子壳层结构 | 234 |
| 9.4.3 壳层结构解释元素周期表 | 234 |
| *9.5 金属电子的费米气体近似 | 235 |
| 9.5.1 金属电子气 | 235 |
| 9.5.2 费米能级 E_f | 236 |
| 9.5.3 讨论 | 237 |
| 9.6 分子的振动和转动 | 238 |
| 9.6.1 玻恩-奥本海默(Born-oppenheimer)近似 | 238 |
| 9.6.2 双原子分子的振动与转动 | 240 |
| 9.7 全同粒子的二次量子化方法 | 242 |
| 9.7.1 二次量子化的物理和数学概念 | 242 |
| 9.7.2 相对论量子力学的基本概念 | 243 |
| 9.7.3 二次量子化方程的演示 | 245 |
| 本章小结 | 247 |
| 思考题 | 247 |
| 习题 | 248 |
| 模拟试题 | 249 |
| 试题 1 | 249 |
| 试题 2 | 250 |
| 试题 3 | 251 |
| 试题 4 | 253 |
| 试题 5 | 254 |
| 试题 6 | 255 |
| 试题 7 | 256 |
| 附录 1 常用物理常数 | 257 |
| 附录 2 计量单位 | 258 |
| 附录 3 常用数学公式 | 261 |
| 附录 4 正交曲线坐标 | 265 |
| 附录 5 特殊函数 | 266 |
| 附录 6 矩阵知识 | 274 |
| 附录 7 粒子波的波包解释 | 278 |
| 附录 8 量子理论大事记 | 282 |
| 参考文献 | 283 |

第一章 量子力学的科学背景

20 世纪自然科学的发展已经向微观物理世界进发,物理学是自然科学的基础学科,量子力学已经在自然科学的许多技术领域中获得成功的应用.量子力学又是在 19 世纪末经典物理理论成熟,自然科学技术大发展的基础上产生的.因此量子力学的物理思想、物理概念和理论方法是在吸收 300 多年自然科学和物理理论的精华基础上产生的,理性思考达到空前的高度.本章从自然科学与物理学的关系和地位开始,评述经典物理的理论特征和缺陷,并且讨论分析经典物理出现的直接困难,提出量子力学应该解决的理论问题.

1.1 自然科学与物理学

自然科学有六大门类:数学、物理学、化学、天学、地学和生命科学,这六门科学构成了人类科学活动大厦,物理学既是六门科学之一,又是自然科学大厦的基石,是支撑其他五门的科学基础.从人类科学活动的历史看,从观天象、测量大地和防火、防水、防风开始,应该说先有天文和数学,其后有物理学、化学和生命科学,但是早期天文和数学(几何学)的研究内容,在自然科学形成学科体系之后,都是物理学的研究内容,所以物理学从人类科学活动开始就引领自然科学各门学科的发展,并且在很长时期物理学和自然科学是不分的,直到现在西方不少国家还在使用自然科学(物理学)或物理学(自然科学)这种提法.

物理学对自然科学的支撑作用还可以从物理学的研究内容看出来,现在物理学有四门学科:力学、热学、电磁学和量子物理学,但是物理学的最终目的是寻找支持人类生存基本需要的力和能量(机械能、热能、电磁能、核能),这也是人类全部自然科学活动的基本目的,所以物理学的研究内容始终是各门自然科学研究的出发点.物理学研究的成果始终是自然科学发展的根据.

一般地说,人类科学活动的原始目的是为了生存,要向周围的物质世界获取物质财富,防御伤害.为了这个极其简单的生存目的,首先想到的是考虑研究周围物质特性和运动规律,然后再研究达到这个方法的目的和方法,前者是科学活动,后者是技术活动.所以科学与技术从人类科学活动开始,就有不同的含义,是一个目的下的两个不同的行为阶段,只是随着科学与技术的发展,人类的文明发展,贪欲增加,对自然界物质只重索取,轻视规律,破坏规律,对科学与技术概念的区别也就混淆了,甚至以技术取代科学,产生许多学习思考的弊端和人类行为准则的变异.这是一个科学工作者应该注意的事情.简言之,科学是对自然界物质运动规律的观察、分析与总结,包含着精密实验和

人类思维的创造；技术是在科学规律的基础上索取财富的行为方案，方案的成功决定于按科学规律衍生的技术原理，没有科学规律，没有技术原理，多么美好应用前景的实验发现，都不会变为物质财富。

19世纪是人类科学与技术发展的全盛时期，主要是物理学三大经典物理理论成熟，导致技术大发展。由于1831年法拉第(Faraday M, 1791~1867)电磁感应定律的发现，人类找到了新的能源——电磁能，这是在17世纪机械能、18世纪热能之后，人类找到支持生存的第三个能源，19世纪也就被称为电的世纪。

电磁能的出现，引发了19世纪末技术革命的风暴，电磁能的开发与应用，给这个世界带来新的动力和光明，经济、生产和生活面貌全变了，人们看到了周围物质世界的深层和远处都蕴藏丰富的资源和无限的奥妙，极大地激发了自然科学活动的热情，自然科学的六门学科门类也开始形成了，物理学向微观物理发展，经典物理理论的危机也出现了。据不完全统计，19世纪末的20年间自然科学的重大发现有400多件，发明专利有500多件，平均每月就有3~4件发现或发明，这些发明和发现都跟电能和电力的开发应用有关，其中跟物理学直接有关的科学发现(不包括发明)就有60%以上。惰性族元素氦(He)、氖(Ne)、氩(Ar)、氪(Kr)、氙(Xe)，化学元素镓(Ga)、锗(Ge)、镝(Dy)，放射性元素铀(U)、镭(Ra)、钍(Th)、钚(Pu)，都是1895~1899年发现的新元素，还有碳钢、电解铝、无机硬塑料、人造丝、汽车内燃机点火等。对物理学发展有重大推动作用的有：氢原子光谱巴尔末线系(1885, 巴尔末)，太阳光谱图(1891, 赫耳)，原子光谱里德堡常数 R_{∞} (1890, 里德堡)，原子光谱塞曼效应(1896, 塞曼)，焦耳-汤姆逊效应(1880, 林德)，光电效应和电磁波存在证明(1888, 赫兹)，麦克斯韦速度分布率证明(1892, 斯特恩)，阴极射线发现(1892, 贝林)，X射线发现(1895, 伦琴)，电子存在发现(1897, 汤姆森)， α 、 β 射线发现(1889, 卢瑟福)，无线电收音机(马可尼, 1895)，经典电子论和洛伦兹力(1896, 洛伦兹)，迈克尔逊-莫雷测量以太风干涉实验(1887, 迈克尔逊-莫雷)，黑体辐射定律公式(1884, 玻尔兹曼；1893, 维恩；1899, 瑞利)等等。这些发现的共同特点是物理学的研究已经向微观物理世界进发，一方面为自然科学其他学科(包括物理学)提供探测和开发方面的技术原理，并为物理理论向微观发展指出了方向；另一方面也为经典物理理论的危机揭开了帷幕。这些发现中，特别引起我们现在应该注意的是电子的发现。第一个基本粒子在自然科学中出场了，20世纪的自然科学的大战中几乎都有电子的角色！

本节的自然科学与物理学相互关系和发展状态概述，告诉我们量子力学的产生，大背景是19世纪以来自然科学各门学科，特别是物理学的发展是量子力学产生的必然，也是19世纪自然科学和物理学成就为量子力学产生和形成提供基础。19世纪末自然科学技术风暴，为物理学深入发展提出了问题，指出了方向。

最后要指出一点，我们所说的自然科学和物理学都是从西方传播过来的，也是现在流行的说法。需要提醒的是西方科学的思维逻辑和学科体系跟中国传统的科学思维是完全不同的，中国传统的科学(也称传统文化)不分自然科学和社会科学，也不分数、理、化、天、地、生六大门类，研究的对象也不分宏观物质和微观物质，不分运动和静止，研究方法也不必分理论、实验，层层隔离的模型化，没有那些研究范围和限制条件规定，

因而也没有数不清的原理、定律、公式、概念、定义、方程等等。中国传统科学思想是把天、地、人作为一个研究对象，运动的起因概括为阴、阳相生相克，按照物质(天、地、人)运动特性分为金、木、水、火、土五行学说。因而中国的科学思维和结构是最简捷、最博大精深，适用范围最广泛的思维型的科学体系。西方科学发展到今天，经历 500 年的科学积累，进入 21 世纪生命科学阶段，已经有若干天体和人体的实验发现表明，才开始看到中国传统文化(实际就是西方所说的科学)的精深奥妙和真理性，1985 年诺贝尔奖金获得者在法国巴黎开会，讨论 21 世纪人类科学发展问题，会后的宣言说：21 世纪人类科学发展和进步，必须从 2530 年前孔子那里找智慧，否则是没有出路的。

作者认为，西方自然科学是实证性质的，直观经验型的，学科分得过细，研究内容划界割裂，运动定律过分依赖实验，点点确定定律、原理、公式，非常庞杂，不利于继承和发展。中国传统科学是思维创造型的，智慧型的，深入的，彻底的，因此造就了中华 5000 年的经济繁荣和国力强盛不衰。西方科学至今也只有 500 年，西方科学的起步(哥白尼 1542 年《天体运行论》出版开始)，正是中国的明朝末年(1368 ~ 1644)，而中国传统科学已经支持了十多个王朝的昌盛，居世界首位，已经有 3000 多年(夏、商、周算起)了，这是有文字记载可查的。从明朝末年开始，随着西方科学的渗透，我们的国力也开始衰退，传统科学思想(中华民族文化)受到抑制逐渐加剧。尽管这样，到清朝(1644 ~ 1911)乾隆年间，我国经济总产值还占世界经济总产值的一半以上，仍然世界第一，那时美国那个地方还是无人知晓的印第安人部落。到了近百年来，我们把传统科学忘光了，甚至从思想上否定了，国力也就降到最低点。

我们说中国传统科学是智慧型和理性思维型的；而西方科学是实证型的，分散分离型的，繁琐的，到了 20 世纪初量子论和相对论发现，才开始向理性思维型迈进，难怪进入 20 世纪末，迎战 21 世纪生命科学的时期，那些诺贝尔奖获得者们开始意识到中国传统科学是何等的优秀。因此我们学习和研究量子力学，注意学习 20 世纪初一代物理学精英们的创造性科学思想，注意回顾我们民族的科学思想，复苏更生中华民族的智慧，这是难得的机遇。

1.2 经典物理理论的评述

现代自然科学是从物理学开始的，因为早期的科学活动没有分科，只是到了 19 世纪初才有门类分科：数学、物理、化学、天学、地学和生物。物理学也分为三大经典物理学科：力学、热学和电磁学，19 世纪中期又完善形成三门经典物理理论学科：理论力学(包括分析力学)、热力学与统计物理和电动力学。物理学从 1590 年伽利略(Galileo G, 1564 ~ 1642)的自由落体实验开始计算，至今只有 400 多年，意大利文艺复兴时期以前是宗教思想和现代科学思想交错。

1.2.1 物理学研究的目的是能量和力

物理学是研究世界物质基本结构与基本运动规律的科学。两个“基本”是它的宗旨，

所谓基本结构是指世界物质排布层次和未知的物质,这是一种属于静态观察认识的方法;基本运动规律是指力、热、电和微观物质在时空中的运动特性,这是一种属于动态观察认识方法.其他新物质的发现,也要靠运动特性分析,所以运动和静止是不可分的,运动是本质,静止是运动的特殊形式.但是从物理学的两个基本来看,主要来自于它的最终目标是获得能量和力.能量和力是人类生存和行为的基本保障条件,这个条件也是人类全部自然科学活动的目的,可见物理学一定是自然科学的基础,并非偶然.

从物理学的学科形成的历史看,也是围绕力和能量这两个目标发展出来的,例如17世纪发展出力学学科,开发出机械能和机械力;18世纪开发出热能和热动力,形成了热力学;19世纪开发出电磁能和电磁力,形成了电磁学;20世纪开发出核能和核力等微观粒子作用力,形成了量子物理学.依此为据,预见21世纪的生命科学就是开发生物能和生命的潜力,这是无限伟大和空前的大愿.

从物理学史上大师们的活动看,也都是围绕力和能量这两个目标做出开拓性的创造,如伽利略、牛顿(Newton I, 1642 ~ 1727)、哈密顿(Hamilton W, 1805 ~ 1865);焦耳(Joule J P, 1818 ~ 1889)、克劳修斯(Clausius R J, 1822 ~ 1888)、亥姆霍兹(Helmholtz H L, 1821 ~ 1894)、玻尔兹曼(Boltzman L E, 1844 ~ 1906);法拉第、洛伦兹(Lorentz H A, 1858 ~ 1928)、麦克斯韦(Maxwell S C, 1831 ~ 1879);普朗克(Planck M, 1858 ~ 1947)、爱因斯坦(Einstein A, 1879 ~ 1955),玻尔(Bohr N, 1885 ~ 1962, 丹麦),德布罗意(Debroglie L V P R, 1892 ~, 法国)、薛定谔(Schrödinger E, 1887 ~ 1961)、狄拉克(Dirac P A M, 1902 ~ 1976)、费曼(Feynman R P, 1918 ~ 1988)、泡里(Pauli W, 1900 ~ 1958)等物理学家,都把本学科的能量和力作为他们工作的主旋律.

1.2.2 经典物理理论研究的内容是力学量

三门经典物理是按力、热、电的研究内容分工的,它们共同的理论内容可以分为两个方面,即体系(研究对象)的运动状态和力学量.这也是所有物理学理论应该研究两个内容.状态是指体系总体运动图象,总体面貌和姿态,及其数学函数表示.状态函数应以力学量为自变量参数的函数,但是经典物理没有做到.力学量是指体系运动的某个物理性质及各个力学量之间的相关性,体现出的是运动定律或方程.如坐标、动量、角动量、动量定律、连续性方程等.但是三门经典物理中都没有涉及状态的研究内容,这是一大缺陷,只有力学量及相互关系(定律、定理等)的研究,所以经典物理理论可以称为力学量物理学.

我们看到,经典物理理论中充满了坐标、动量、角动量、能量、温度、压强、电场强度、磁场强度等等这些物理量,并由这些物理量的相互关系组成的物理定律.数学表示是运动方程,这些运动方程也是力学量的运动方程.

每门学科又在众多的物理量中精选出最重要的几个物理量,称为完整力学量组,成为理论建立的重要基础,如理论力学的坐标 r 和动量 p ;热力学的温度 T 、压强 p 、体积 V 、熵 S ;电动力学的电场强度 E ,磁场强度 H .共计7个物理量就可以把全部经典物理的力、热、电的运动特性和其他有用力学量如能量、角动量、力矩等按相关方程计算出来.

经典物理还有两个通用的物理概念,即体系和时空参照系(数学表示是坐标系),然后把每个学科的完整力学量作为数学参量放在坐标系中游戈,每个学科的运动方程就出来了,所以到19世纪末三门经典物理理论已经达到相当成熟的程度。

1.2.3 经典物理的理论结构特征

这里对经典物理的理论结构作综合评价,跟量子力学理论比较.这个评价是指经典物理的理论缺陷,深入了解量子力学内涵,就会发现这个评价是经典物理的优秀特征,是量子力学的理论基础,是量子力学吸收的经典物理理论的精华之处,理性智慧之处,这对于理解量子力学从新概念、新原理、新的物理思维,同时加深理解经典理论深度都有好处。

1. 经典物理理论是力学量物理学

前面已经提到,物理学应该研究两个大方面内容:体系运动状态和表示单个运动特征的物理量,也就是物理体系的整体运动特征和局部个别运动特征.但是历经三百多年形成的三门经典物理理论,对物理体系整体运动特征没有涉及到,也没有理论描述,因此经典物理没有关于体系运动状态的任何知识准备,量子力学恰恰从体系运动状态开始,就带来很大的难度。

经典物理理论的主要内容是力学量和力学量所组成的若干其他力学量函数和基本运动方程.数学表示的力学量就是自变量函数.我们看到经典物理理论就是由力学量(或参量)及实验定律和运动方程组成的。

理论力学只有两个基本力学量,即广义坐标 q 和广义动量 p .这两个力学量的不同关系的组合,由虚功原理和哈密顿变分原理,得到两个基本运动方程,即拉格朗日方程和哈密顿正则方程,对力学体系的能量、力、位移、力矩、角动量和轨迹做出了精确的理论描述,大到星体运行小到质点粒子。

热力学与统计热力学,用温度 T 、压强 p 、体积 V 和熵 S 四个基本力学量,用热力学三个实验定律建立三个基本运动方程,引进热容量 C 、焓 H 、吉布斯函数 G 、自由能 F 、化学势 u 等把平衡态热力学体系的热运动规律及热机、热动力的物理作了比较彻底的描述.到了19世纪末麦克斯韦等人又从微观分子运动角度对热运动的微观物理机制做出解释,提出著名的分子速度分布律,用数理统计的方法对 T 、 p 、 V 、 S 、 F 、 u 从体系微观机构出发作了更深入严格的理论计算,这套理论体系称统计热力学.进入20世纪,费米(Fermi E, 1901~1954)和玻色(Bose S N, 1894~1974)等人,按照单粒子(子系)的量子力学运动规律,又提出两种称为量子统计分布律,也是用数理统计的方法计算热力学宏观物理量 T 、 p 、 V 、 S 等,事实上这三种分布律的创立,形成了一种热力学理论体系,也是经典物理向微观物理发展的开始,为量子论的出现作了理论方法的准备。

电动力学的基本物理量是电场强度 E 和磁场强度 H 两个,首先在理论上引进标势 ϕ 、矢势 A 和位移电流 J_0 ,建立一组麦克斯韦方程组.并从麦克斯韦方程组推导出波动方程,预言了电磁波存在和光是电磁波,用深睿的物理思维和严密的数学推导,形成了电动力学理论体系,把物理学研究推向新的理性高度,开创了理论物理的学科典范.这就是在实验定律的基础上,可以通过深入物理图象思考和严密的数学推理发现隐藏在实

验定律后面的深层物理规律,使物理学研究开始走出实验科学的束缚。

2. 经典物理是连续性物理学

经典物理是力学量物理学,物理学研究目标是找到能量和力,三门经典物理的力学量取值都是连续的,无论是理论值还是实验测量值都是连续取值规律,力学量取值规律的连续性,已经成为一种不必考虑的约定,认同了物质连续性运动是一条自然法则。然而300年后量子力学在微观尺寸下却发现力学量取值存在不连续情况,即物质运动还有不连续的量子化规律,并且发现,凡是受到限制(或外场束缚)的力学量取值都存在量子化取值规律,自由运动都是连续性取值规律,就是说力学量取值连续和不连续都是物质运动的自然法则。

3. 经典物理是确定性的物理学

经典物理的力学量取值都是肯定性取值,无论是理论预言还是实验测量都有一个严格的定量数值。一般地说,理论和实验取值是一一对应的严格取值,理论和实验之间的差别,称为实验误差,归结为实验仪器精度的原因,不是物理量自身规律的原因,单次实验的重复测量取值应该完全相同,不应有差别,不应该跟实验次序有关,也不应该跟其他力学量有关。而量子力学的力学量取值宏观测量具有几率特性,同一个力学量的重复测量取值是不同的,并且取值跟测量次序有关,有些力学量之间在同时实验测量上产生的误差是相关的,并且误差的乘积是一个确定的常数(即测不准关系),揭示了力学量取值还有不确定的情况出现。

4. 经典物理有两类不同的理论体系

三门经典物理,虽然都是力学量物理学,都是连续性物理学和确定性物理学,最终目标都是寻找体系的能量和动力。但是因为描述的物理对象不同,理论结构有很大差别。

理论力学和热力学可以认为是单体物理学,其研究对象(或体系)都可以是单个可数,有确定的质量,都可以作为独立的个体。电动力学的描述对象是场物质,没有确定质量,也无法确定描述对象有多少质量,只能模拟体积范围。宏观的运动现象是在有限空间中表现为波动,波动是布满整个空间的,并且带有电荷,因此电动力学可以认为是波动物理。

电动力学是描述波动现象最成熟的物理理论,也称波动物理。它与另外两门经典物理比较,理论创造是比较多的,数学演绎也是严密的,量子力学关于波动性理论的描述基本上继承了电动力学的风格,由电动力学产生的波动光学经过140年仍然广为应用。

电动力学描述的对象是有限空间中的电磁场物质,没有质量,运动形式又是波动。因此理论体系结构有独特的特征,首先理论必须满足叠加原理,因为波动基本单元是一列波。波动相加法则不是空间点对空间点,而是有限空间中一列波对一列波,称为叠加。虽然电磁场的基本力学量是电磁场强度 E , H 和电荷 Q ,但是力学量发生在有限空间 dV 内,电荷与电流模拟为电荷密度 ρ 与电流密度 J , E 和 $H(B/\mu)$ 也无法反映波动的物理特性,电磁场强度已经不是数值变量,而是由波动特性参数振幅、频率和相位为自变量的函数,事实上电动力学描述电磁场运动的力学量是频率 $\omega = 2\pi\nu$, 相位 $\varphi = k \cdot r$,