

高等学校教学用书·理论物理基础系列教程

5

量子力学 (上)

〔日〕 中嶋貞雄 著
马文学 译
王锡绂 校

北京师范大学出版社

高等学校教学用书

理论物理基础系列教程

第五册

量子力学 (上)

〔日〕中嶋贞雄 著

马文学 译

王锡绂 校

北京师范大学出版社

高等学校教学用书
理论物理基础系列教程
第五册

量子力学(上)

〔日〕中嶋贞雄 著
马文学 译
王锡绂 校

北京师范大学出版社出版
新华书店总店科技发行所发行
北京通县燕山印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 6 字数: 140千

1989年5月第1版 1989年5月第1次印刷

印数: 1—2 000

ISBN 7-303-00431-9/O·92

定价: 1.55元

原 序

物理学是理工科学生必不可少的基础课之一。因为理工科任何专业的基础必然与物理学有密切关系。理工科学生要想在学习专业课之后再自学物理学，很难获得令人满意的结果。就是说，必须在大学一、二年级扎扎实实地掌握物理学的基础知识。

这样，最重要的就是同学们要有积极的学习热情。同时，需要有一本向学生们传授物理学知识、指导学生学习方法的入门书。这套《理论物理基础系列教程》正是为了起到以上作用而编辑的，这套书的编辑方针与以往教科书有很大差别。

力学和电磁学是所有与物理学有关的重要学科的基础。因此，大部分学校要在低年级学完此课程，但象流体力学则可以作为选修课开设，也可以由同学们自学。另外，还需要有大学二年级后能够阅读的、内容充实的量子力学和相对论等教材。

编者基于这种观点，选择了物理学的基础课，编写了《理论物理基础系列教程》，这套丛书共10册，包括《力学》、《分析力学》、《电磁学》(上、下)、《量子力学》(上、下)、《热力学与统计力学》、《弹性体与流体》、《相对论》及《物理用数学》等八个科目。所有这些科目不都是(日本)大学一、二年级的课程，但各科目可以各自独立学习，力争做到大学一年或二年级的学生能够读懂。

在物理学教材中，往往有很多公式和现象，在期末考试之前，学生们常常要死记硬背，这不但掌握不了物理现象的本质，反而产生厌恶情绪。我们对这套教程的读者所应考虑的最重要问题，不是死记公式和现象，而是学会掌握事物本质的能力。

物理学相信一切事物都源于少数基础事实，而它们又遵循少数基本定律，物理学求得这些定律。这些明确的基本事实和定律

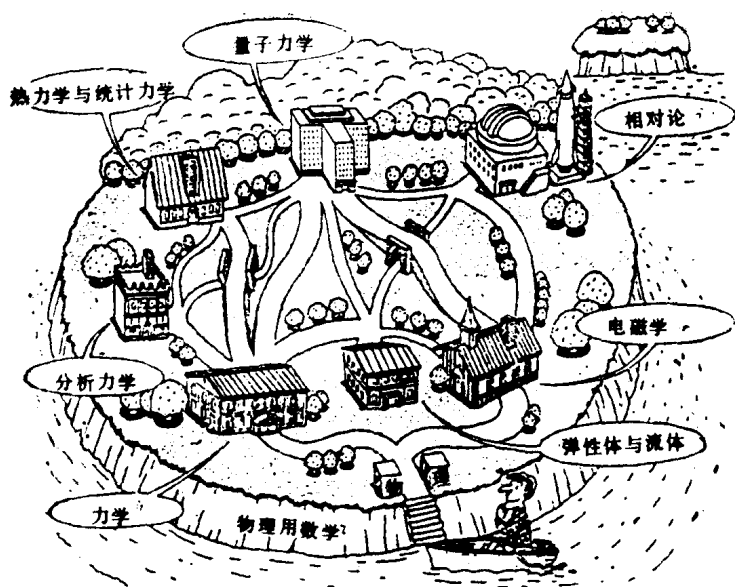
一定有助于同学们理解，在彻底理解的基础上，同学们通过自己亲身的努力去摸索事物的本质，这就是所谓的“物理学的思考方法”。

不仅限于物理学、科学的每个领域，都要探求事物的本质，但由于物理学发展的比较早，基础部分成熟，可以看做一个典型例子。因此，掌握“物理学的思考方法”的能力，不仅对于将来钻研物理学的同学们，而且对于钻研其它领域的同学都应该说是大有好处的。

在日常生活中，我们经常无意识地使用象时间、空间、力、压强、热量、温度、光等这样的物理学基本概念，物理学对这些日常使用的概念又重新给予了严格的定义，并与基本规律联系起来，物理学这样繁杂也是同学们厌烦的原因之一。但是，如果想根据基本事实和规律探索事物的本质，即使是日常感知的事物，也有必要详细弄清其实验的根据，重新明确与基本规律的关系，何况还涉及到超过我们日常体验的领域。例如：处理原子内部问题时，甚至有必要提出似乎与常识和直观相矛盾的新概念。因为物理学根据实验和观测不断扩大我们的经验世界，所以与其这样，倒不如改变常识和直观更有必要。

正如这样，用“物理学的思考方法”考虑事物，决不是很容易的事情。但是，如果采用正确的方法，是有可能掌握的。本教程的撰稿者们力求做到精选内容，所选的素材力争讲述通俗易懂，便于掌握。希望读者们和作者一起探求事物的本质。这样一来，自然而然地就能够学会“物理学的思考方法”。各卷篇幅都不大，不需要其它参考书就能读懂，但决不是简单的物理学摘要。希望读者认真阅读。

如此所述，因为各科目基本上可以独立阅读，所以根据需要，从哪个科目开始阅读都可以。但是，作为基本联系，可用图解的形式来表示各科的相互关系。



从图的前面向里延伸的宽路，表示传统的路线，窄路则表示做为相关联的学科，可以共同阅读，例如，《弹性体与流体》是集中了现代风格的弹性力学和流体力学的，但与《电磁学》中的场的概念相关联，而作为场的经典理论，又可以与《相对论》加以对比，这一卷的波动部分，对于《量子力学》的理解也有帮助。另外，每卷都广泛涉及到数学，为不脱离物理学本身，同时阅读《物理用数学》是大有益处的。在整理这套《理论物理基础系列教程》之际，编者阅读了全卷的原稿，也请执笔者提出了各种要求，再三改稿。另外，不断采用了执笔者们的相互意见和岩波书店编辑们所提出的见解。今后在听取读者意见的同时，将进一步加以修正。

编者 户田盛和
中嶋贞雄

1982年8月

译者序

这套《理论物理基础系列教程》是根据日本岩波书店1982—1984年出版的《物理入门コース》(物理学入门教程)翻译而成。原教程的主编者是户田盛和与中嶋貞雄。本书在日本颇受欢迎,在全套书出齐之前,先出的几本已经重印了三、四次。中译本根据我国习惯,定名为《理论物理基础系列教程》。

这套《系列教程》共十本,计有《力学》、《分析力学》、《电磁学》(上下)、《量子力学》(上下)、《热力学与统计力学》、《弹性体与流体》、《相对论》和《物理用数学》。各册篇幅不大,自成体系,而十本合起来又构成一个完整的整体。本书的起点相当低,有我国工科一年物理课基础的读者即可学习。但其达到的深度并不低,大体上只略低于我国综合性大学的理论物理各课的大纲要求,而在广度上则广于后者,并含有较多新鲜内容。

本书富有日本教材所独有的风格和特点:选材精炼;讲解简练而明快又不失科学性;系统经过精心安排,组织周密,突出重点,深入浅出。在引导读者逐步掌握正确概念方面有其独到之处,书中不乏精闢的论述和精采简捷的推导与证明,在不知不觉之中把读者带到较难较深的境界。本书是我国高等学校理论物理各课较好的教学参考书,师范院校和成人教育院校可以直接采用作为课本。本书也是中学教师进修、工程技术人员知识更新和知识青年自学的理想读物。

本书的翻译工作由喀兴林、王锡绂、梁绍荣和任萍四人组成工作小组负责,他们担任组织译校、联系出版、保证译文质量和其它各项事务工作。本书的译校人员以北京师范大学和东北师范大学的人员为主,他们大多数都具有高级职称及多年的日文经

历。翻译工作以忠于原作为原则。

由于我们学识有限，加之译校人员众多，译文中容或有不当之处或彼此不甚统一之处，敬请各界读者指正，以便再版时修改。

喀兴林

1988年6月

前 言

《量子力学》(上下)是为以量子力学为主课学习的读者编写的基础书或参考书,是以希望一般了解量子力学基本内容的理工科学生为对象所编写.学完本教程中《力学》和《电磁学》的读者,或者学完同等水平其他教材的读者,不用详细参考其它书就可以理解.

在量子力学中,要解决的是,电子和原子的微观运动,另一方面,读者以前学过的力学和电磁学,作为人造卫星和视频电波那样宏观世界物理现象和基本定律已被确定,不可能原封不动地适用于微观运动,说起来人本身就是宏观存在,我们的常识和直观等也都是适应宏观世界进化而来的,所以不可能完全适用于微观世界.为解决微观运动,建立量子力学新的物理规律和与此适应的新的物理直观是必要的.初学者认为量子力学抽象,难于理解这是理所当然的,努力接近微观现象,培育新的直观是很重要的.

这本《量子力学》(上)也是尽量巧妙地把读者引向微观世界,进而领会支配微观运动的基本规律是量子力学,为这一目的而编写的.其素材的大部分,以往往往称为《原子物理学》.对于量子力学所必备的分析力学方面的知识,以及作为要计算由固体内的原子振动而引起的比热和由空腔内的电磁振动而引起的比热的理论工具,本书也作了相应的说明.

《量子力学》(下)是讲解在把量子力学应用于具体问题时所必要的基本规律、基本概念、计算方法,根据本教程的精神,我们力求就基本的有应用性的问题进行详细讲解,把问题限制在非相对论的量子力学中,也是这个原因.但是,场量子化的概念,做

为表现量子力学中波、粒二象性，不仅重要，而且最近作为解决多粒子系统的计算方法也被广泛应用。因此，我们加以说明。

对于初学者，因为对量子力学内容的理解是非常重要的，所以我们努力尽量减轻数学负担，具有确定奇异点的微分方程的解法和特殊函数几乎没有出现，就是这个原因。在《量子力学》(下)中主要使用的是表示物理量算符的加法和乘法的代数运算。可以说，作为数学，和在以前电工学中使用的算符算法具有同一水平。

以上，说明了编写《量子力学》(上下)时所注意的几点，但在量子力学教材众多名著、好书中，本书能不能多少也认为包括在其中，这就只能由读者自己判定了。

在编写前和编写中，接受了本教程编者户田盛和及其他执笔者们的很多宝贵意见，另外，受到以片山宏海，大塚一夫两位为首的岩波编辑部各位的热情帮助，在此表示衷心感谢。

中嶋貞雄

1983年

目 录

第一章 原子和以太	(1)
§1-1 序论	(1)
§1-2 真空与气体的压力	(3)
§1-3 原子和分子	(6)
§1-4 原子序数和质量数	(10)
§1-5 光的粒子和波动理论	(13)
§1-6 波动方程	(16)
§1-7 真空概念的变革	(20)
第二章 带电粒子的轨迹理论	(25)
§2-1 序论	(25)
§2-2 由电场控制电荷的运动	(26)
§2-3 由磁场控制电荷的运动	(29)
§2-4 同位素的质量分析	(34)
§2-5 基本电荷的测定	(36)
§2-6 光电子	(39)
§2-7 原子发光的振子模型	(40)
§2-8 由磁场而引起的光谱的变化	(44)
第三章 热运动的经典理论	(48)
§3-1 序论	(48)
§3-2 布朗运动和玻尔兹曼常数	(49)
§3-3 经典力学的正则形式	(52)
§3-4 经典统计力学的基本公式	(56)
§3-5 麦克斯韦分布	(59)
§3-6 气体的比热与压力	(63)
§3-7 固体的比热	(67)
第四章 量子论的诞生	(70)

§4-1	序论	(70)
§4-2	基尔霍夫定律	(71)
§4-3	固有振动与本征值问题	(74)
§4-4	固有振动的叠加	(78)
§4-5	电磁场的平面波展开	(82)
§4-6	热转射的能量密度	(84)
§4-7	普朗克辐射公式	(88)
§4-8	量子论的诞生	(90)
第五章	原子构造和量子论	(95)
§5-1	序论	(95)
§5-2	α 散射与原子结构	(97)
§5-3	卢瑟福散射的截面积	(99)
§5-4	玻尔量子论	(103)
§5-5	光的发射、吸收	(108)
§5-6	电子碰撞	(111)
§5-7	索末菲量子化条件	(114)
第六章	波粒二象性	(117)
§6-1	序论	(117)
§6-2	由晶体引起的X射线散射	(119)
§6-3	波动的复数表示	(124)
§6-4	康普顿散射和X射线的粒子性	(128)
§6-5	德布洛依物质波	(131)
§6-6	几何光学和牛顿光学	(135)
§6-7	薛定谔方程的发现	(139)
第七章	量子力学的创立	(143)
§7-1	序论	(143)
§7-2	电子波的衍射	(144)
§7-3	几率振幅 Ψ	(147)
§7-4	测不准原理	(151)
§7-5	动量表示的波函数	(155)

§7-6 薛定谔方程和能级	(159)
§7-7 简谐振子的能级	(164)
附录 习题略解	(168)
基本物理常数	(178)

第一章 原子和以太

如果把学习物理学比做宇宙旅行的话，本章就是将诸位平安送到量子力学这个未知星球上的降落伞。

§1-1 序论

原子是微观力学体系，其大小约为 10^{-10}m 。因此，原子物理学中常常采用 $1\text{\AA}(\text{埃})=10^{-10}\text{m}$ 作为长度单位，另一方面，我们周围的宏观物体用 m 或 cm 作为长度单位正合适，从微观的立场来观察宏观物体，1粒食盐也是由 10^{20} 个无比众多的原子构成的巨大力学体系。

原子和**电子**现在已成为日常用语，但是，作为物理学的对象，真正研究微观粒子的时间并不很长，19世纪末明确了电子的存在，20世纪以后，明确了原子具有与太阳系相似的结构，在原子中心存在带正电荷的重**原子核**（简称核），在核周围有带负电荷的轻的电子运动，乍一看，大家用以前学过的力学（本教程《力学》）和电磁学，也能解决与太阳系一样的原子问题。

果真如此吗？回答是否定的，如第五章所述，原子稳定存在的事实，用大家所知的力学和电磁学并不能说明，不限于原子和电子，为了研究一般的微观力学体系必须有**量子力学**这种新的力学规律，牛顿的力学和麦克斯韦的电磁学，在原子物理学发展以前，是作为宏观物理现象的基本规律而被确立起来的，只是在极其有限的条件下应用于微观现象。现在称作**经典论**与**量子论**有所区别。

可是，以往的量子力学教材，常常是从20世纪初经典论所面临的困难，用经典论处理微观现象时所产生的与实验事实难以相符的差异性来谈起，这种格式被通晓经典论的读者认为是倡导新量子理论时代的残余，现代青年学生对于经典理论和量子理论的了解大概相差无几。如第六章所述，经典理论所面临的困难的核心就在于微观力学系统所普遍显示的**波粒二象性**，可是，同学们把这种波粒二象性作为重要课题到底能理解多少，有些疑问。

现在，我们彻底开阔观察历史的视野，要从原子物理学长久的史前时代说起，实际上，我们人类并不是19世纪后半叶突然发现微观世界的存在，英语的原子语源是希腊语的原子，意思是指不可分割的粒子。法谟克利特和伊壁鸠鲁倡导的古希腊的原子理论认为，存在于世界上的物质只是无数的原子和无限开阔的空虚空间——真空，并试图用真空中原子的运动说明所有的现象。

这个大胆的理论假说对近代科学的建立在正、反两方面带来了很大影响。但，这是17世纪以后的事情，在经过中世纪到文艺复兴的长时间内，亚里斯多德的思想成为罗马教会的公认哲学，原子理论作为无神论而被视为邪说。

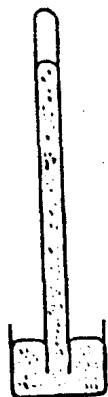
亚里斯多德否认真空的存在，他认为，物质无孔不入地充满空间，宇宙也是由以太这种贵重物质所充满，17世纪以后，笛卡尔和惠更斯提出光的波动理论的时候，模仿亚里斯多德称传播光波的未知媒介为以太，象空气振动传播声波一样，以太的振动传播光波，因为光是从很远的星体到达地球的，因此以太充满着宇宙空间。

第一章的前半部分，叙述古希腊时期，原始原子理论的发展，作为与之对抗的潮流，在后半部分将叙述光的波动理论的发展。正是在这两个历史潮流的延长线上标有量子力学诞生的位置。

§1-2 真空与气体的压力

17世纪复兴的原子理论的最初成果是以证实原子理论的基本假设——真空的存在为目的进行的，托里拆利实验(1644年)，把水银装入长约一米，一端封闭的玻璃管内，并使之倒立在水银槽内，管内水银下降一些，上端就能够形成真空，这个实验不仅成功地在玻璃管内形成了真空，弄清了在管内把水银压上去的大气压存在，根据水银的高度就能够定量的测定大气压了，这个方法也被应用于大气以外的气体压力测定，不久玻义耳发现，稀薄气体的压力与体积成反比。

真空度 从实验的立场来说，与力学的完全光滑斜面一样，纯真空也是一种极限概念，实际上真空中多少都残留些气体，以其压力表示真空度，压力的单位常常采用1mmHg(水银柱上1mm高度时的压力 $\cong 13.3\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)，托里拆利命名1mmHg为1Torr(托)。图1-1的托里拆利真空中也含有水银蒸气，在室温下真空度为 10^{-3} (托)，目前真空度已能达到 10^{-11} (托)的超高真空。



利用泵排气的方法从托里拆利时代已被应用，但是一跨入19世纪真空泵的性能迅速提高，成为加速原子物理学发展的重要因素，把微观粒子从物质中牵引到玻璃管内的真空中，根据粒子在已知外力作用下运动的情形，进行测定粒子的质量和电荷。

根据这个方法，最早发现的粒子是电子，电子是带电粒子，其电荷用 $-e$ 表示， e 无论在什么情况下测定其值的大小都一定，如果用电量的MKSA单位库仑[C]表示：

$$e=1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (1.1)$$

这是非常小的数值，但电子质量的数值亦很小，其值为：

$$m_e = 0.91095 \times 10^{-30} \text{ kg} \quad (1.2)$$

因此能够比较容易地，根据附加的电磁力来控制真空中电子的运动。

气体的压力和绝对温度 在牛顿力学成功地说明了围绕太阳运行的行星运动的半个世纪以后，伯努利结合牛顿力学和原子理论，导出了稀薄气体的波义耳定律，假设气体是高速运动的大量粒子系统，粒子不断碰撞装有气体容器的壁面，并被壁面弹回，由其反作用而产生压力，可以认为用微观粒子的运动说明宏观物质的性质是统计力学的前奏。实际上，稀薄气体的压力 P 和组成气体的粒子运动能量之间，可由伯努利方程给出以下关系：

$$P = \frac{2N}{3V} \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) \quad (1.3)$$

V 是气体的体积， N 是气体所包含的粒子数， m 是 1 个粒子的质量， $\langle \dots \rangle$ 代表粒子动能的平均值，即，如果假设粒子的速度分别为 $v_1, v_2, \dots, v_N$ 那么：

$$\left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m v_i^2 \quad (1.4)$$

为了强调 (1.3) 是波义耳定律，必须证明动能的平均值只由气体的温度决定，且与体积无关，这个证明，在 19 世纪后半叶，统计力学建立时才成为可能，在伯努利时代，温度的概念还不十分明确。

如第 3 章所示，统计力学给出：

$$\left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) = \frac{3}{2} k_B T \quad (1.5)$$

T 是绝对温度， k_B 是玻尔兹曼常数，其值与 T 的单位选取有关。把 (1.5) 代入 (1.3)，可得到理想气体的状态方程：