



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
“十二五”江苏省高等学校重点教材
电子科学与技术类专业精品教材



*Electronic Science
and
Technology*

电子工程物理基础

Fundamentals of Electronic (第3版)
Engineering Physics

Third Edition

◎ 唐浩影 宋竞 万能 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

“十二五”江苏省高等学校重点教材

电子科学与技术类专业精品教材



电子工程物理基础

(第3版)

唐洁影 宋 竞 万 能 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书涉及量子物理、统计物理、固体物理基础及半导体理论方面的基础知识。内容主要包括:微观粒子的物理基础和理论体系,理解单个及大量微观粒子所需要具备的知识和背景;晶体中原子和电子运动的普遍规律;半导体的基本概念和载流子运动特点;半导体结构中电流控制的原理及方法。

本书充分考虑各部分内容之间的联系,从不同视角,以基本物理量和基本方程为重点,引导读者一步步了解物理架构,获得对量子物理、统计物理基础,固体物理特例和半导体应用理论的清晰认识。编写兼顾常识性、逻辑性和启发性,在讲清知识的基础上适当添加人文色彩,注重展现物理和技术的思考意趣。书中还紧跟现实发展,加入应用实例分析和新材料、新器件方面的内容,并在章后附有适量习题。

本书适合高等学校电子科学与技术、材料科学与技术等相关专业的本科生学习,也可供相关专业的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子工程物理基础/唐洁影等编著. —3版. —北京:电子工业出版社,2016.6
ISBN 978-7-121-29280-4

I. ①电… II. ①唐… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 152077 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:13 字数:360 千字

版 次:2002 年 7 月第 1 版

2016 年 6 月第 3 版

印 次:2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价:42.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888,(010)88258888

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254540,chenxl@phei.com.cn

第3版前言

“电子工程物理基础”涉及量子物理、统计物理、固体物理基础以及半导体物理方面的有关内容。

量子物理、统计物理和固体物理原本是综合性大学物理系的重要理论基础课。但随着现代科学技术的发展,大量多样的新材料、新器件不断涌现,既发展了应用,也丰富了理论。新型材料、器件尺寸更小,原理更新,功能更全,与基础物理的联系更加密切。所以,多年来大多数工院校的的电子工程及有关专业类普遍开设了量子力学、统计物理、固体物理和半导体物理的课程。

编者在多年的教学实践中感到,理工院校电子工程等专业类的培养目标、课程设置以及学生对理论知识需求的深度、广度,都与物理类专业存在很大差异。因此,沿用过去的模式,分门别类去讲授这几门课显得难以适应相关工科专业的特点及专业方向的发展。另一方面,这几门课本身有着内在的联系,理论物理基础是正确理解固体物理的前提,而半导体理论则是固体物理的特殊应用。基于上述原因,我们尝试着将这几门课中有关内容结合起来,作为一门课程进行系统的讲授。为此,编写了这本配套的教材《电子工程物理基础》。本教材在2002年出版后,经过多年使用,获得了不错的效果,并于2006年被正式列选普通高等教育“十一五”国家级规划教材,2014年又被遴选为“十二五”江苏省高等学校重点教材(编号:2014-1-138)(电子科学与技术类专业精品教材)。

本教材以非物理类专业的本科生为主要读者,以培养学生离开书本后仍能独立思考,自由想象为目的,努力搭建一套符合常识,前后连贯的知识体系。在物理层面上,着重展现基础物理体系的完整架构,理性关系和逻辑顺序。在工程层面上,着重提示基础理论转向实际应用后从术语体系和关注对象上发生的变化。

为此,本次修订对内容布局进行了较大幅度调整。教材不急于巨细无遗地铺陈理论,而是以每种物理的基本对象、基本量和基本规律为知识核心,引导读者通过常识性思考而非记忆来了解物理架构,形成简明完整的物理图景。行文中还参考了新兴的科普作品,适当增添了人文色彩,增强了阅读性。本次修订中,第1章做了部分调整,以粒子、波动和统计概念为基础重述了物理框架。第2章和第3章分别选取大量原子核和大量电子为观测对象,示范物理体系在固体中的主要应用。第4章加强叙述了半导体理论与前文物理和后文应用的逻辑关系。第5章增加了各种常用半导体材料及新型低维材料的相关介绍,根据发展需要,增加了“应用实例分析”章节。

考虑到不同学校不同专业对该课程的教学要求不尽相同,本教材可灵活使用。例如,以物理为侧重点,主要讲授第1~3章,用32~48学时,后两章作为前三章的应用实例自学。又如,以工程为侧重点,第1章自学,主要讲授第2~5章,用48学时。也可以5章内容全讲授,约用64学时。

本教材第 1 版由东南大学唐洁影、刘柯林、汪开源执笔。

第 2 版由东南大学唐洁影、宋竞对原教材进行重编。

本次由东南大学唐洁影、宋竞、万能对第 2 版进行较大篇幅的修订。

编者

目 录

第 1 章 微观粒子的状态	1
1.1 微观粒子的力学	1
1.1.1 粒子、波动和统计	1
1.1.2 微观粒子的发现	2
1.2 单个微观粒子的状态	7
1.2.1 微观粒子和运动方程	8
1.2.2 波态和物理量	11
1.2.3 势阱模型	15
1.2.4 谐振子模型	18
1.2.5 氢原子模型	20
1.2.6 势垒模型	24
1.2.7 微扰问题	25
1.3 大量微观粒子的状态	27
1.3.1 经典统计分析原理	28
1.3.2 麦克斯韦—玻尔兹曼分布	30
1.3.3 玻色—爱因斯坦分布	31
1.3.4 费米—狄拉克分布	32
问题与习题	34
第 2 章 晶体中原子的状态	35
2.1 固体原子的结合	35
2.1.1 原子间的力	35
2.1.2 原子间的键	37
2.2 晶体原子的排列	39
2.2.1 晶体和非晶体	39
2.2.2 晶体的几何结构	40
2.2.3 晶体的物理结构	46
2.2.4 晶体的倒易结构	48
2.3 晶体原子的振动	53
2.3.1 原子序列的运动	53
2.3.2 简单晶格的格波	54
2.3.3 复式晶格的格波	58
2.4 声子	61

2.4.1	从格波到声子	61
2.4.2	声子气的统计分布	65
2.4.3	声子气的统计性质	67
2.4.4	声子气的单元性质	70
	问题与习题	72
第3章	晶体中的大量电子	74
3.1	大量电子的运动	74
3.1.1	多体模型	74
3.1.2	统计模型	74
3.2	自由电子气	76
3.2.1	自由电子气的统计分布	76
3.2.2	费米能级	78
3.2.3	固体的统计性质	80
3.3	周期势场下的电子气	82
3.3.1	布洛赫电子与能带图	82
3.3.2	近自由电子与禁带	86
3.3.3	紧束缚电子与允带	88
3.3.4	布洛赫电子的实际情况	91
3.4	外界作用下的电子	94
3.4.1	固体中电子的概念	94
3.4.2	固体中电子的运动	100
3.4.3	固体的导电性	103
	问题与习题	108
第4章	半导体电流理论	110
4.1	半导体常识	110
4.1.1	晶格和能带	110
4.1.2	电子和空穴	112
4.1.3	半导体术语	116
4.2	热平衡	121
4.2.1	本征半导体	121
4.2.2	浅能级杂质半导体	122
4.2.3	其他掺杂情况	126
4.3	产生-复合	128
4.3.1	跃迁常识	128
4.3.2	受激产生	131
4.3.3	自发复合	132
4.4	漂移-扩散	136

4.4.1	近经典粒子气	136
4.4.2	漂移电流	139
4.4.3	扩散电流	142
4.5	连续性运动	144
4.5.1	连续性方程	144
4.5.2	多子和少子电流	146
4.5.3	稳态综合运动	149
4.5.4	瞬态综合运动	152
4.5.5	温度和强电场效应	157
	问题与习题	164
第5章	半导体结构理论	167
5.1	材料	167
5.1.1	无机体材料	167
5.1.2	有机体材料	170
5.1.3	低维材料	173
5.2	pn结	177
5.2.1	基本结构	178
5.2.2	常规特性	180
5.2.3	异常特性	184
5.3	异质结	185
5.3.1	基本结构	186
5.3.2	优异特性	186
5.4	金属-半导体结构	188
5.4.1	基本结构	188
5.4.2	肖特基接触	189
5.4.3	欧姆接触	189
5.5	MOS结构	190
5.5.1	基本结构	190
5.5.2	介质电荷	191
5.5.3	表面态	192
5.6	应用实例分析	194
	问题与习题	197
附录A	常用物理参数	199
	参考文献	200

第 1 章 微观粒子的状态

1.1 微观粒子的力学

1.1.1 粒子、波动和统计

放眼自然界,我们可以轻易发现许许多多的运动现象。风在吹,云在飘,雨在下,水在流,人在走,鸟在飞,树叶沙沙,麦浪滚滚,山摇地动,星移斗转。在这些现象中,人们发现了三种最基本的运动形式。

第一种是粒子性的运动。保持有限范围内的固定特征而运动是它的根本特性,简称为定域实在性。定域使粒子的行动轨迹可以一个一个时刻和位置地描述,实在性使每个粒子具有独立清晰的运动特征,易于追踪和分辨(见图 1-1),不会混淆。这类运动在生活中比比皆是,是非常容易被注意到的物理行为。粒子物理规律也是最早被人类发现的物理规律。

然而,当我们看到多米诺骨牌依次倒下,看到麦浪翻滚,涟漪飘逝,歌声远扬,欢乐洋溢,光阴流逝的时候,也会觉得有东西在传播、运动,如图 1-2 所示。这些运动的主体不是有限范围内的实在物体,而是整块区域上的某种现象。它也有两个显著的特征,一个是在整块区域上同时出现的全域性,还有一个是可以混合叠加的相容性。由于这种运动也是随处可见,而它的特征又同粒子性运动截然相反,因此人们称之为波动性,用另一套运动理论来描述它的行为。波动像是全域的精神,粒子像是定域的行者。波动常为粒子的信使、媒介和相互作用。粒子常为波动的载体、波源和约束。两者错综组合构成世界上的各种确定性现象。

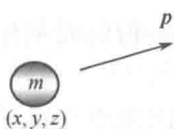


图 1-1 粒子性运动

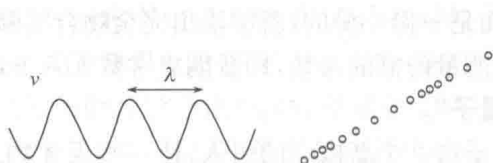


图 1-2 波动性运动

还有一类运动,它没有像粒子和波动那样有清晰、确定的特征,但又不是没有特征,如图 1-3 所示。大量偶然事件的总体都有一定的规律性。这种通过统合事物内部分布态势而总结出现象形式和特性称为统计性。统计理论构成了它的量化描述。

就这样,人们从生来就有的直觉中出发,逐渐发现和整理现象中的显著规律,终于在 19 世纪末的时候,分别从波动、粒子和统计三个角度发展出电动力学、经典力学、热力学与统计力学的成熟理论,建立起蔚为壮观的经典物理体系,如图 1-4 所示。

利用这三套理论,已经可以自如地解释三个物理领域内的各种现象。这时候唯独不太好解释的就是为什么不同物理领域的现象也存在密切的联系,例如,电能产生力,光能产生热,等等。对此,当时的主流意见采用了唯能论的思想,认为能量是最基本的物理要素,它可以在不同物理领域间相互转化,无需再引入其他机制来解释能量本身,只需恪守能量守恒定律。在这

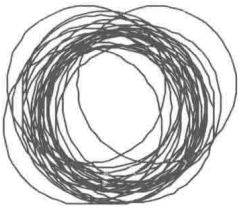


图 1-3 统计性运动

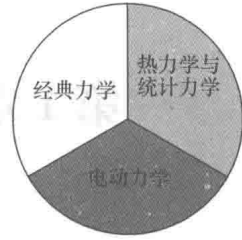


图 1-4 经典物理学的三大力学体系

种思想的影响下,人们一度认为经典物理的大厦已经落成。

1.1.2 微观粒子的发现

正是对各类交叉领域问题的研究导致了经典大厦的崩塌。这些问题最开始包括以下几方面。

(1) 统计—波动方面,基于电动力学和热力学会推出不同的黑体辐射曲线,而且都不能与实验结果完全吻合。

(2) 统计—波动方面,人们仍然认为光波与机械波一样,是大量粒子运动的特殊表现,但一直无法实测到光波传播的粒子媒介——以太。

(3) 波动—粒子方面,人们一直无法解释为什么原子光谱由离散的谱线组成。

(4) 波动—粒子方面,无法解释光生电流密度与光的频率而非强度有关。

(5) 粒子—统计方面,无法解释为什么不同温度下相同固体的比热会发生变化。

(6) 粒子—统计方面,发现了各类粒子射线的存在。

种种迹象提示人们,只有从更为底层的物质内部入手,从三大力学体系之间的联系入手,才有望对上述难题找出合理解释。

光量子假设

1900年,普朗克率先解决了黑体辐射问题。他发现,如果假设电磁场能量的传递不是连续的,而是一份一份的,就能推出完全吻合实验结果的黑体辐射公式。普朗克精确地推出了表征这种能量份额的参数,即普朗克常数 $h(6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s})$ 。他把这种一份一份的能量称为“(能)量子”。

量子这一全新概念的引入,让一些天才物理学家茅塞顿开。1905年,爱因斯坦在量子思路指导下解决了光电效应问题。他不仅支持普朗克的能量量子化假说,认为粒子以量子形式交换能量,而且还大胆地指出这种交换媒介就是粒子形式的光,“光(量)子”。每个光子携带的能量为:

$$E = h\nu = \hbar\omega \quad (1-1)$$

式中, $\hbar = h/(2\pi)$; ν 是光的频率, $\omega = 2\pi\nu$ 是光的角频率。按照这种说法,光就像电流一样,是光子的流动,它与外界的能量交换是通过发射和接受光子来进行的。这与之前早已深入人心的“光是能量连续的电磁波”的观念截然相反。爱因斯坦还根据它创立了狭义相对论中的质能方程:

$$E = mc^2$$

推出每个光子的动量应该为:

$$p = mc = \frac{E}{c} = h \frac{\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

需要提醒的是,光量子假设的本质,只是波动的量子化假设。光子可视为相同频率下自然界能

存在的最小能量的电磁波。但因为粒子以及大量粒子和波动的统计体都是用波动来传递作用的,所以波动能量被量子化以后,整个物理世界就面临着全部都要量子化的局面。

事实也是如此。爱因斯坦很快就把相同的理念推及到其他物理领域。1907年,爱因斯坦将能量量子化概念引入热能域,解决了固体比热随温度跳变的难题;再引入到化学领域,提出光化学第二定律。他明确地支持分子论,指出只有把物质视为由分子构成,利用大量分子的统计力学分析,才能很好地解释液体中大块微粒的布朗运动。他首先提出了用光子出现在空间的概率来解释光波幅度的物理意义。他也是最早意识到微观领域的粒子不再符合经典统计分布的学者之一。对于这样一个在所有经典物理学科领域都留下浓墨重笔的科学家,他的使命似乎就是为了唤醒世界进入前所未有的量子时代。

另一个同样天才的物理学家玻尔也搭上了物理世界量子化的早班车。1913年,玻尔以电子轨道能级只能取特定不连续值等一系列假设,改进了原有的原子模型,解决了氢原子谱线不连续的难题。他提出电子的量子跃迁的概念,指出电子以在不连续能级间跃迁的形式,发射或吸收外界光子的能量,从而解释了光、电、磁之间的能量转化机理。这样就把本该是粒子的电子也推上量子化进程,同时也为从微观量子层面为宏观的能量守恒定律找到了合理的解释,大大提高了量子学说的生命力。历史上把这段时期称为旧量子论时期,它为量子力学的诞生打下了无法撼动的基础。

物质波假设

紧接着的问题是,为什么电子的能级是不连续的?

对于这个问题,玻尔只是人为假设如此,并猜出了能级的量子化表达式。虽然大家能够接受他的结论,但并不喜欢这种主观色彩严重的假设。有没有什么可以自然推出量子能级的方法呢?人们开始从记忆里搜索所有与离散有关的知识,希望从中找到灵感。

第一个想到的是德布罗意。德布罗意在物理感兴趣之前曾学过历史。这种特殊的史学素养使得他从前人的工作中找到线索。他研究了光从粒子论发展为波动论,波动理论和质点力学统一为哈密顿力学,以及同时代量子论发展的各种成果,尤其是爱因斯坦的光子说,发现了波和粒子运动在形式上的对称性。既然对光波的描述需要引入粒子,为什么对粒子的描述不可以引入波呢?波动理论中限定边界条件的驻波能量只能取特定的分立值,这已经具有强烈的量子化色彩。如果电子具有波的特性,那么它的能级量子化不就顺理成章了吗(德拜首先提出了驻波说,但他没有上升到物质波的高度)?1923年,德布罗意大胆地提出物质波假设,指出所有运动的物质粒子都具有波的特性,如果粒子的动量矢量为 p ,则对应物质波的波长 λ 满足德布罗意公式:

$$p = \frac{h}{\lambda} n = \hbar k \quad (1-2)$$

式中, n 是方向矢量; k 是波矢,其数值 $2\pi/\lambda$ 是波数。波矢的矢量特征使它比波长 λ 更频繁地用来描述问题。物质波假说在1927年由电子晶格衍射实验得到证实。电子的衍射图案和预测的一模一样。而在此之前,无论是阴极射线的发现,还是云室中的电子轨迹实验,都指向电子是粒子的结论。

物质波假说诞生之后,立刻受到爱因斯坦的关注,他推荐正在研究气体统计力学问题的薛定谔认真考虑该假说的价值。1926年,波粒在理论上的统一——薛定谔方程横空出世,以其无与伦比简洁的形式,深奥的内涵和准确的描述,将经典力学升级到波动力学版本,赢得了整个物理界的赞美。有趣的是,薛定谔并不是基于严格的方法推导出这个方程的,而是用物理

直觉有意把质点力学和波动理论关联起来后猜出了这个结果。我们将在下一节中详细了解这个方程。

第二个想到的是海森堡。1925年,年轻的海森堡以一种近乎哲学的视角提出了风格迥异的解决办法。他觉得,与其建立一个想象中的模型来解释观测到的量子化结果,不如基于测得的结果来建立这个模型。在能级量子化问题中,只有能级差是能被观测到的,能级本身的值无法观测,因此它没有物理意义。基于这种思路,海森堡与约尔当合作,建立了一套形式统一的方程组,每个方程分别对应一个被观测到的能级差。当海森堡把这个方法汇报给他的老师玻尔时,玻尔指出,这就是数学中的矩阵。现在我们都知道,矩阵问题和波动方程一样,都具有离散的本征值。这种用矩阵方法表示的力学理论,就是经典力学的另一个升级版,矩阵力学。同年,狄拉克用更简单的泊松括号方法简化了矩阵力学的表达形式。

值得说明的是,矩阵力学的思路,不用假设粒子具有波动性,但需要以牺牲物理量的连续性为代价。换句话说,海森堡认为,物理量的连续性是假象,我们实际上能观测到的,只是两次观测之间物理量的差,无论位移、动量、能量,还是时间都是如此。我们会以为物理量是连续的,是因为差值太小,就像动画片相邻图片间隔太短就会造成连续的错觉一样。

1926年,薛定谔、泡利和约尔当各自证明,波动力学和矩阵力学这两个升级版完全等价。它们基本上就构成了我们现在所说的量子力学。它沿着牛顿力学、拉格朗日力学和哈密顿力学一路发展而来。牛顿力学描述了宏观粒子的力与运动的关系,而量子力学则揭示了微观粒子的力与运动规律。随着研究对象的尺寸从微观向宏观增加,量子力学的结果将逐渐逼近直至吻合牛顿力学结果。所以说,量子力学兼容了经典力学,它并不是一种独立的物理分支,而是对原有物理体系的重新阐释。

概率波假设

方程形式虽然尘埃落定,但真正的硝烟才刚刚燃起。尽管两种力学方程被证明等价,但我们看到,它们的前提思路截然不同。波动方程是以连续的波动性为前提,而矩阵力学是以不连续性的粒子性为前提。在物质到底是波还是粒子的问题上,它们显然代表相反的观点。尽管波动方程在形式上更加优美简洁,但方程的主角,波函数的意义迟迟没有确定。从德布罗意开始,它就只是假设出来的波函数,没有人给出合理的物理解释,包括薛定谔自己。薛定谔曾经假设电子波函数是电荷密度分布函数。但如果按照这种解释,电子的质量和电荷都将不再集中在一个点上,那么它在很多问题中都将无法表现出显著的粒子特性,这与实验结果不符。

在此之前,爱因斯坦曾经对光波波幅的微观意义提出过合理的假设,认为光波幅度的模平方(即强度)反映大量光子分布空间的概率。受此启发,1926年,海森堡的另一位老师波恩做出了一个比爱因斯坦更加大胆的论断:波函数不仅可以反映了大量粒子分布的概率,而且可以反映单个粒子出现的概率,它就是单个粒子的**概率波**!其中最关键的区别在于,概率分布的大量粒子中,每个粒子仍然遵守因果规律。理论上说,我们可以不用统计方法,而用经典力学方法对每个粒子建立方程,预测每个粒子的运动轨迹,应该与统计方法计算出的结果相同。这个概率性只是我们把大量粒子行为按统计平均后打乱了时间次序的结果。然而,如果单个粒子也是以概率形式出现,那么物理事件的发生将不再遵循因果律!电子的轨迹将变得神出鬼没,你只能知道它出现在某个位置的**概率**,而不知道它什么时候会出现在这里。最有力的证据就是电子衍射实验。电子的光斑是一个一个随机出现在荧光屏上的,无法预测下一个电子将出现在什么位置,只能预测统计后的衍射图案。为此,人们把概率波的观点形象地比喻为“上帝掷的骰子”。

单体概率波假设的提出,把统计物理十分自然地揉入了已经渐渐被统一的波动和粒子理论中,使微观粒子成为一个兼具波动,粒子和统计特性的完备的物理对象。它就像是一个全能发展的学生,从每位老师身上习得各种经典而宝贵的能力,为日后经历更多更艰难的现实考验打足了基础。

不确定性原理

更离奇的还不止于此。1926年,创立了矩阵力学的海森堡继续发现,如果承认矩阵力学方程是正确的,那么根据矩阵乘法的不可交换性,会导出一个奇怪的结论,那就是 $p \cdot q \neq q \cdot p$, 其中 p 为动量矩阵,而 q 为位移(位置)矩阵。海森堡一贯坚持只有可测的物理量才有意义,因此,他特别关注这种不可交换性与测量之间的关系。海森堡从 p 和 q 的测量误差 Δp 和 Δq 的角度,对这个不等式进行了推演,结果发现了下面的两个推论:

$$\Delta p \cdot \Delta q > h \quad (1-3)$$

这个推论的另一个等价形式为:

$$\Delta E \cdot \Delta t > h \quad (1-4)$$

这就是**不确定性原理**。因为它是理论推导的产物,所以不是假设,而是原理。该原理说明,既无法同时准确获得动量和位置,也无法同步准确获得能量(变化)和时间(差)。推论是,经典力学量是不可能被同时准确测得的。海森堡对其物理原因做出了简单的解释:任何一种测量手段,在测量某物理量的同时,必定带来对其对应物理量的干扰,使得这一对物理量无法同时被准确测得。例如,测量某粒子的位置,需要接受它发出的光子,而发出光子必然影响其原有动量。

不确定性原理暗示了**测量**在物理诠释中的地位,解释了波动性和粒子性实验现象的矛盾起源,并且为概率波假设提供了有力的理论依据。当我们去做粒子类实验,如电子云室轨迹实验时,一旦我们测定其位置,就完全无法测准动量。动量测不准,物质波波长就不能确定,因而无法在粒子类实验中观测到对象的波动性。而在波动类实验,如电子衍射实验中,一旦我们测到电子是物质波,会衍射,就无法像阴极射线那样确定其位置,只能看到随机出现的电子光斑。总之,测准粒子就测不准波,测准波就测不准粒子。薛定谔方程中的波函数就是站在波的一面描述对象,因此对象的粒子性无法确定,粒子位置只能听从概率分布。

不确定性原理中的最小误差乘积,即普朗克常数 h ,还为衡量微观和宏观问题的界限提供了理论依据。普朗克常数决定了物理上所能测量到的位置和动量的误差乘积的极限。即使采用最精良的设备,也不可能突破这个误差。在宏观领域中普朗克常数 h 的作用可以略去,但在微观领域它起着重要的作用。例如,我们将动量的不确定性改写成速度的形式,这样 $\Delta p_x \Delta x = h$ 变为 $\Delta v_x \Delta x = \frac{h}{m}$, 只有当质量 m 很大时,右端才为零,但这只有在宏观物体上才会出现,这是说宏观时“测得准”。当 m 很小时, $\Delta v_x \Delta x \neq 0$, 此时用再精良的测试方法也无法将低测量误差的乘积降为零,也就是说微观时“测不准”。如一粒微尘, $m \approx 10^{-12} \text{g}$, 若其位置不准确度 $\Delta x \approx 10^{-8} \text{cm}$, 这对宏观测量来说已是相当精确了。由不确定性原理可得 $\Delta v \approx 6.6 \times 10^{-7} \text{cm/s}$, 而实际宏观测量的误差远没有这么小,因此微尘也将表现出“精确”的轨道和速度。但如果是氢原子中的电子,按玻尔理论估计出其速度量级为 10^6m/s , 假定电子速度的不确定度与速度值的量级相仿,那么由不确定性原理可知,电子位置的不确定度为 10^{-10}m , 这与氢原子的线度已经同数量级,因此电子运动轨迹的概念完全失去意义,电子以概率形式在空间出现。

互补原理

不确定性原理仅仅告诉我们,波和粒子特性无法同时测得。然而一个物质到底是粒子还是波?当海森堡将不确定性原理汇报给老师波尔后,波尔对这一段时期以来量子力学的研究成果进行了深刻地思考,于1927年提出**互补原理**,把**波粒二象性**上升到了量子力学的最高原理的高度。他的原话是这样的:“一些经典概念的应用不可避免地排除另一些经典概念的应用,而这‘另一些经典概念’在另一条件下又是描述现象不可或缺的;必须而且只需将所有这些既互斥又互补的概念汇集在一起,才能而且定能形成对现象的详尽无遗的描述”。这其实已经是哲学原理。

表面上看,互补原理似乎只是把不可调和的波动性和粒子性敷衍地拼凑在一起。但事实上,波尔想强调的是一种测量现象意义上的互补性。他既不认为物质同时具有波和粒子特性,即波粒的相容性,也不认为必须从波动性和粒子性中选定其一,即波粒的矛盾性。物质特性只有一个,即波粒二象性。但这个特性在每次测量中只能表现出一面,要么是波动性的那一面,要么是粒子性的那一面。

没过多久,理论上的自然发展就把这个原理推向更大的舞台。现象不只是可以呈现出波动象或粒子象,而是可以根据观测方式不同而展现出不同现象,一种观测方式对应一种观测现象。这样所有的观测现象都没有真正反映现象的本质,它们都只是事物在当前方式下的“表象”。由此生成的表象理论已经在现代物理中得到广泛应用。

尽管理论上可以随意摆弄,但这个原理有一个让人费解的现实推论,想观测哪一面,另外一面就不会表现出来。典型的例子是电子双缝干涉实验,如图1-5所示。实验本来的设置是“想观测波动性”,控制缝隙线度使波动干涉现象展现。正常做法下足够长时间后就会看到荧屏A上出现预期的干涉条纹。但如果人们想观测电子究竟经过了哪个缝,而在缝后设置荧屏B时(或是其他检测手段),那么就是“想观测粒子性”。这时荧屏B上可以观测到亮点,但在荧屏A上

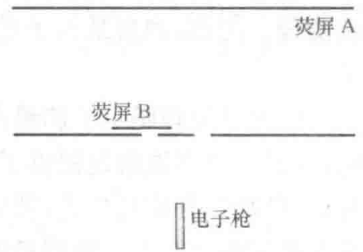


图1-5 电子双缝干涉实验

就没有干涉条纹,甚至连衍射条纹都没有。这是因为电子已经在测量中展现过了粒子性,因此无法再展现波动性。这实际上暗示着,想测到什么可以影响到发生了什么,结果可以影响原因,从而又一次违背了因果律。后来人们又设计出更多的精妙实验,把这一结论推向难以辩驳的地步。

撇开波粒二象性原理中隐藏的逻辑软肋和现实问题不谈,玻尔的这种实证主义做法,就像一件合体的紧身衣,以最简单、紧凑的方式容纳了量子物理的思维基础。它不引入任何多余的假设或理论,避免陷入无休止的循环论证,为量子理论正身立名继续前进提供了有力的支持。

坍缩

最后还剩下一个关键问题。既然每次观测只能看到对象的一面,那么这种由本质上的波粒二象性转化为观测时刻的粒子性/波动性的过程,究竟是怎样发生的?以想测到电子波动性的电子衍射实验为例,观测到电子之前,电子应该是弥漫在空间中的波动,这样它才可能具有想要观测的波动特征。但用肉眼在荧光屏上观测到单个电子位置的那一刹那,电子并不是散布在屏幕上各个位置,而是在瞬间随机选择一个位置,以100%概率出现于此。人们把这种原先弥漫在全域的波态瞬间集中于定域一点的行为称为**坍缩**。哪怕原本概率波分布的空间再

大,例如整个宇宙,在观测的一刹那,其他地方的概率都像约好了一样一起瞬间消失。按爱因斯坦的说法,这实际上暗示了一种超距作用。它们怎么能够在这么短的时间里和这么大分布空间中保持同步行动呢?

对于这一质疑,玻尔等人依旧避繁就简,从哲学而不是物理上予以回答。玻尔指出,只有被观测时物理状态才有意义,不去观测时物理状态没有意义,不存在也不必去讨论。既然不存在,那么不符合物理常识就不足为奇。我们看到,这种论断赋予了“测量”极高的物理地位,符合玻尔等人的一贯做法。但它实在有些主观,遭到了很多学者的怀疑。爱因斯坦打趣地说,很难想象你不去看月亮的时候它是不存在的,并联合其他物理学家提出 EPR 佯谬进行质疑。薛定谔也提出了家喻户晓的薛定谔猫佯谬,幽默地指出了该解释在现实中随意应用所带来的离奇结果。此后的研究者相继提出意识作用、平行宇宙、退相干等各种原理,试图回答这一难题。读者可以参阅曹天元编写的《量子力学史话——上帝掷骰子吗》,了解这些有趣的故事。

这个奇怪的话题并没有随着量子启蒙时期的结束而告终。只从理论上,波动作为天生的全域对象本身就是超乎现实常识的存在,它所潜藏的超时空同步性到底只是遗漏了现实因素的理想画饼,还是像目前正在被不断展示的那样是一个可以证实、重现甚至改变寻常生活的神奇能力,这些就留给时间本身来展示。

小结

尽管概率波、不确定、互补、坍缩这一系列概念与经典的因果性、精确性和物质决定论理念是如此的格格不入,但它们合在一起,确实构成了逻辑上相对圆满的解释体系。提出这些解释的物理学家玻尔、海森堡和玻恩当时都在丹麦的哥本哈根大学理论物理学研究所工作。他们相互启发,互为师友,形成了著名的哥本哈根学派。

令人感慨的是,这一套解释遭到了另外三位量子力学的奠基者,爱因斯坦、薛定谔和德布罗意的坚决反对。他们都是坚定的因果律者,不相信物理事件会以概率形式不够精确地发生。用爱因斯坦的话说,上帝不掷骰子。这两派为了哥本哈根学派解释的完备性问题进行了反复的论战,但基本都是以“哥派”的不败而告终。无论如何,哥本哈根学派的解释至少稳住了量子力学的根基,使人们得以把更多精力投入到它的应用中。后来的发展也逐渐印证了他们的合理见地。为此,人们把它称为**正统解释**,以此认可哥本哈根学派在开创和普及量子力学过程中所做出的巨大贡献。

量子物理的诞生是物理学有史以来最大的一次革命。它几乎颠覆了经典物理所有的常识。这次革命是如此的彻底,以至于玻尔曾经矛盾地说过,谁要是说他懂得量子力学,那么他实际上还没有懂。物理就是这样不可思议。而爱因斯坦却说,世界上难以理解的,就是事情是可以理解的。难道不是如此吗?

1.2 单个微观粒子的状态

物理大厦不仅没有崩塌,反而以波动,粒子和统计性兼具的微观粒子为基石,重生为更加牢靠的理性圣地。受此鼓舞,人们就像当年热切地航行驶向大洋彼岸那样,向同样陌生而神秘的微观世界发起了勇敢的征程。这其中最伟大的壮举之一,就是从固体中找到了可以导电的电子和它终日伴随的声子和光子,为它们构造出舒适的结构和精密的轨道,使其千姿百态地奔腾流动,在肉眼看不见的尺度上滋养出庞大辉煌的信息世界。这项壮举就是电子工程,我们就从单个微观粒子的运动开始来描述它。

1.2.1 微观粒子和运动方程

固体中最常见的有两类、三个微观粒子。

一类是宏观上是粒子,微观上能显现出波动特性的物理对象,主要指电子。电子衍射条纹显现的就是电子的波动象。原子核、原子核内的质子和中子也属此类,但它们的波动性不如电子明显。以费米为主的物理学家确定这类微观粒子的统计运动规律,故也称它为**费米子**。

另一类是宏观上是波动,微观上也具有粒子特征的物理对象,包括光子和声子。光子可以简单视为相同频率下最小能量的电磁波(的粒子象)。声子可以视为相同频率下最小能量的机械波,该机械波由原子核序列组成。单光子有同单电子几乎一样的衍射实验和结果,它被观测时也会坍缩在单个确定位置上展现出粒子象。以玻色为主的物理学家确定了它的统计运动规律,故也称它为**玻色子**。

这两类微观粒子的主要区别在运动方程和统计特性上,讲清全部细节需要动用较深的物理。我们跳过一些内容,只看必要的以及用常识就能理解的部分。

波动方程

大量玻色子在宏观上的有序统计结果就体现为确定的宏观波动,它的运动方程就是波动方程,以 Φ 为波幅; v 为相速度,即

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \quad (1-5)$$

根据不同的教学顺序,可能有些读者目前还不太熟悉这个方程,但我们在初中就已经了解的简谐波 $\cos(kx - \omega t + \theta)$ 及其相速度 $v = \lambda f = \omega/k$ 就是这个方程的基本解和结论。有关简谐波的各种讨论实际上也在阐述该运动方程的基本性质。在大学的数理方法和电磁波类课程中还会再深入地了解它。随着粒子种类的不同,波动方程还可以有其他变化,但光子和声子都符合上式给出的形式。

大量玻色子的无序统计运动不具有确定的波动性,而变为统计性现象,在 1.3 节将阐述玻色子的统计物理描述。

薛定谔方程

大量费米子的无序统计运动也是统计性现象,将在 1.3 节叙述费米子的统计物理描述。

大量或高能费米子在宏观上的有序统计结果就体现为确定的粒子运动,它符合牛顿定律不必多言。但反过来却不能说单个费米子在微观上也简单符合牛顿定律,因为牛顿定律中根本就找不到波函数的踪影, $x(t)$ 是定域粒子的全域轨迹,而不是像 $\Phi(x, t)$ 这样的全域波态。

正因为如此,寻找费米子波态的运动方程才成为一个物理难题,且经历了一段漫长的过程。若详细展开这段过程,会成为好几本专业教材。但如果跳过它,粒子的波动方程就显得与牛顿力学毫无联系。因此,我们权且以囫圇吞枣的速度来浏览这段历史。

在理论物理欣欣向荣的 18 世纪,物理原理的数学本质开始得到人们的理解。欧拉发明了把函数作为自变量来分析的泛函数变分法,使人们找到一直以来仅存于思想中的高级物理原理的数学语言,探索物理秘密更多成为一种数学工作。拉格朗日可谓是物理问题数学化的集大成者,他把牛顿定律以后发展的各类粒子力学和连续体力学的结论用数学方法总结在一起,形成一个能同时解释数个领域粒子性运动规律的方程,称为拉格朗日方程:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) \hat{p} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (1-6)$$

式中： $L=T-V$ ，称为系统的拉格朗日函数，或拉格朗日量； T 为动能； V 为势能。 q_i 和 \dot{q}_i 分别是某自由度下的位移和速度，下角标 i 是自由度序号， N 是系统自由度总数。只取一个自由度，也即只考虑粒子的一维运动，将粒子的动能 $T=mv^2/2$ 和力与保守场势能关系 $F=-dV/dx$ 代入其中，它就变成我们熟知的保守场力下的牛顿力学方程 $F=m \frac{d^2v}{dt^2}$ 。但它的适用范围比牛顿定律大得多。

与此同时，描述波动性的光波理论和连续介质力学也在蓬勃发展，波动方程和它的各类同胞，如常用的拉普拉斯调和方程和泊松方程，也都在这一时期纷纷建立。波动迥异于粒子的各类特性也得到越来越准确的认识。

到了19世纪，实验物理复兴，各领域的研究相互交叉，人们开始思索各物理学科的内在联系。1834年，在光学、天文学和理论力学方面潜心多年的哈密顿在波粒理论集成的道路上又迈出了重要的一步。哈密顿意识到速度不是一个附属量，而是一个独立的变量。而从形式上看，真正与位移 q 同等重要的那个独立变量还不是速度 \dot{q} 本身，而是 $\partial L/\partial \dot{q}$ ，这个量就是标准定义下的动量 p ：

$$p = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}}, \quad q = \frac{\partial L}{\partial p} \quad (1-7)$$

接下来只要想办法将原本由 q 和 \dot{q} 表示的 L 换成由 q 和 p 来表示即可。这在数学中就是勒让德坐标变换问题，变换方式为：

$$H = -L + \sum_1^N p\dot{q} \quad (1-8)$$

H 就是拉格朗日量 L 变换后的形式，称为哈密顿函数，或哈密顿量。变换后就得到了完全以 H 形式表示的新方程：

$$\dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p}, \quad \dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q}, \quad \frac{\partial L}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial t} \quad (1-9)$$

这就是哈密顿正则方程。它与拉格朗日方程等价，但变量数增倍，微分阶数减半，方程形式更对称。原本只在 x 空间以不同速度 v 运动的粒子，现在可视为是在 x 空间和 p 空间以给定状态运动。这个由 x 和 p 正交组成的空间就称为相空间，或称 μ 空间。加入动量 p 空间的意義不只是在于美化方程形式，到量子时代人们就发现，波动物理中动量 p 空间的实质就是与 x 空间相对应的波点 k 空间，它与 x 空间以傅里叶变换相关联。因此，哈密顿方程中已经埋下了波粒二象性的种子。

哈密顿方程本身并不容易看懂，但它有一个我们非常熟悉的推论。如果方程中的拉格朗日量不显含时间 t ，就可以简单理解为是保守势场问题，它就能推出：

$$dH/dt = 0 \quad H=T+V \quad (1-10)$$

这就是保守场的能量守恒定律。如果保守势能取作重力势能，它就变为机械能守恒定律。到了这一步，保守场下的牛顿定律通过多次等价变换终于上升到能量的层面，哈密顿量 H 也正式成为此类问题中能量 E 的表现形式。很多文献中都会看到 $H=T+V$ 而不是 $E=T+V$ ，就是源出于此。

粒子本来不能直接视为波动，但是到了普适的动量和能量层面以后，就有希望脱离现象的具体特征，统合波动和粒子理论形式。现在还欠缺的一步是，即使在相同的动量和能量下，也可能有很多种具体的波动分布或粒子路径形式，但现实中只可能呈现出其中的一种，究竟是哪一种呢？对于这个问题，物理学家也早有察觉。他们先后以费马原理、莫培督原理、最小势能