

波动统计力学 及其隐参数理论

徐来自 徐丽琴 张雪峰 李永峰◎著



科学出版社

波动统计力学及其隐参数理论

徐来自 徐丽琴 著
张雪峰 李永峰

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书首先介绍了量子理论和量子力学的基础知识,包括经典量子论与薛定谔方程,进而介绍了量子论隐参数理论,试图通过隐参数去预测电子的运动轨迹,并解决了波函数坍缩问题引起的困惑。作者利用该理论发展了波动统计物理学并尝试对黑体辐射理论做了新的解释,本书后半部分对此做了详细介绍。

本书适合理论物理专业及相关专业教师、研究生和高年级本科生阅读参考,对广大物理学爱好者也会有很好的启发。

图书在版编目(CIP)数据

波动统计力学及其隐参数理论/徐来自等著. —北京:科学出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-03-046765-2

I. ①波… II. ①徐… III. ①量子力学 IV. ①O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 304025 号

责任编辑:钱 俊 胡庆家/责任校对:钟 洋

责任印制:徐晓晨/封面设计:铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 12 月 第 一 版 开本:720 × 1000 B5

2015 年 12 月 第一次印刷 印张:19

字数:365 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

当物理学的这些基础本身成为问题的时候……，经验迫使我们去寻求更新更可靠的基础，物理学家就不可以简单地放弃对理论基础作批判性的思考，而听任哲学家去做；因为他自己最晓得，也最确切地感觉到鞋子究竟是在哪里夹脚的。在寻求新的基础时，他必须在自己的思想上尽力弄清楚他所用的概念究竟有多少根据，有多大的必要性。

——阿尔伯特·爱因斯坦

前 言

20 世纪最重要的科学成就,莫过于量子论与相对论的诞生,尤其是量子论的诞生.正是在量子论的基础上,科学与技术已经推进到微观领域.没有量子论,就没有现代物理学,也就没有与现代物理学相联系的现代理论化学、现代分子生物学等,而且也没有与现代物理学相联系的现代技术,如电子技术、信息技术、激光技术、核能技术、功能材料技术、超导技术等.可以毫不夸张地说,量子论已经改变人类现在的生活方式,可能将更多地改变人类未来的生活方式.总之,量子论非常实用,但是它的理论含义却非常神秘、非常怪异.这引起了同为量子论创始人的爱因斯坦与玻尔之间的世纪争论,这争论至今在物理学界也没有停止.

大多数物理学家根本就不愿意去深究这类事情,他们满足于利用量子论的程式 (formalism, 量子论的整套数学表达形式及其物理内容的陈述) 进行应用研究、进行教学等.但仍有一些物理学家不满足于仅仅利用量子论的程式,他们为一个取得如此伟大成就的理论竟然不能被理解而深感苦恼,同时这也激发了他们的好奇心与强烈兴趣去试图揭示量子论的神秘性.奇怪的是,这些探索使得一些神秘性看起来更加神秘.人们不禁要问:为什么在如此漫长的岁月过去之后,我们不但没有对量子论了解得更清楚,反而越研究越感觉到它不可思议? 难怪物理学大师们为此大感困惑.

爱因斯坦:“光之本性的思考在我心中萦绕了 50 年,然而并没有使我接近答案半步,现在,似乎每个人都认为他能回答光是什么,然而他们错了.”

玻尔:“谁不惊异于量子理论,谁就没有理解它.”

费曼:“我确信没有一个人理解了量子理论.”

实际上,这不奇怪.关于量子论深层次问题的探索与争论是 300 多年前关于光的本质属性的长期争论的延续.玻意耳在 1663 年挑起了关于光的属性的争论.胡克与惠更斯支持光的波动说,牛顿支持光的微粒说.到 1704 年,牛顿出版他的巨著《光学》,把波的一些概念如振动、周期等引入微粒说,很好地解答了牛顿环的难题,加上牛顿在科学界的崇高威望,终于以微粒说占上风结束历史上第一次波粒之争.1801~1807 年,托马斯·杨发表一系列论文,尤其用波动说成功解释了光的双缝干涉现象,这挑起了第二次波粒之争.1819 年,菲涅耳向法国科学院的一个悬赏征文竞赛评委会提交了一篇文章,在这里他采用光是横波的波动论以严密的数学推理,圆满地解释了光的衍射,并解决了一直困扰波动说的偏振问题.接着在 1819 年,傅科做了光速测量实验,发现光在水中的速度小于真空中的速度.这一结果有力地

支持了波动说. 1865 年麦克斯韦创立电磁理论, 并预言光其实只是电磁波的一种. 1887 年赫兹用实验证实了这个预言, 解决了横波理论所遇到的“以太”难题. 麦克斯韦的电磁理论使光的波动说取得胜利, 从而结束了第二次波粒之争. 1900 年, 普朗克提出能量子假说解决了黑体辐射的难题, 标志了量子论的诞生, 同时成为第三次波粒之争的前奏. 1905 年, 爱因斯坦把能量子假说发展成光量子假说, 在肯定光的波动说的同时提出了新的光微粒说, 解决了光电效应难题, 也挑起了第三次波粒之争. 这后来被密立根的光电效应实验和康普顿的 X 射线被自由电子散射 (康普顿效应) 实验所证实. 1909 年, 爱因斯坦进一步提出光的波粒二象性假说. 值得注意的是, 第三次波粒之争由辐射领域延伸到物质粒子领域. 早在 1825 年, 哈密顿就发现了几何光学与经典力学之间在数学形式上的类似性, 这虽然没有引起科技界的重视, 但埋下了物质粒子领域波粒之争的伏笔. 1858 年, 普吕克尔发现阴极射线. 1871 年, 英国物理学家瓦尔利 (C.F. Varley) 从阴极射线在磁场中发生偏转的事实, 提出这一射线是由带负电的物质粒子组成的微粒说, 并得到了克鲁克斯和 J.J. 汤姆孙的支持. 1876 年, 德国物理学家哥尔茨坦提出阴极射线的波动说, 并得到了赫兹的支持. 德国学派的“波动说”和英国学派的“带电微粒说”, 形成了两种对立的观点. 1897 年 J.J. 汤姆孙根据放电管中的阴极射线在电场和磁场作用下的运动轨迹确定阴极射线是带负电的粒子, 并测出其荷质比, 从而发现了电子, 这标志着阴极射线带电微粒说的胜利. 12 年后密立根用油滴实验测出了电子的电荷, 这打破了从古希腊人流传下来的“原子不可分割”的理念. 这时候人们意识到, 原子并不是组成物质的最小单位, 探索原子结构的序幕由此拉开. 1909~1911 年, 卢瑟福通过 α 粒子散射实验否定了 J.J. 汤姆孙的“葡萄干夹馅面包”原子模型, 提出原子有核模型. 1913 年, 玻尔发表三篇论文, 将量子假说引入原子结构领域, 提出原子结构量子论, 一举解决了原子有核模型的困难和氢原子光谱的困难. 不过, 玻尔原子结构量子论不但存在逻辑缺陷, 而且没有解决电子具有量子化能级和轨道的理论基础问题. 1923 年, 德布罗意把爱因斯坦的光的波粒二象性理论推广到物质粒子领域: 向来被认为是纯粹波动性的光, 具有微粒性; 那么, 向来被认为是纯粹微粒性的电子, 也可能具有波动性. 他提出电子 (包括其他微观粒子) 的波粒二象性假说, 并成功解决了电子具有量子化能级和轨道的理论基础问题. 在 1925 年, 戴维孙和盖尔末的电子对晶体的衍射实验, 1927 年, G.P. 汤姆孙的电子通过金属多晶薄膜的衍射实验都证实了电子的波动性.

至此, 无论是辐射的领域, 还是物质微观粒子的领域, 300 多年来的波粒之争的最后归属都是: 波粒二象性. 德布罗意根据波粒二象性原理以及哈密顿发现的几何光学与经典力学之间在数学形式上的类似性的推广而进一步提出, “早在 1923 年, 我就指出这样的基本想法: 传统力学只是一种近似理论, 它成立的范围类似于几何光学. 自那时起, 我就强调建立新的力学, 即波动力学的必要性. 它与传统力学的关

系将类似于波动光学与几何光学的关系. 这就是波动力学的出发点.”

1926 年, 薛定谔沿着德布罗意关于新力学猜想的思路, 提出了德布罗意波所普遍满足的波动方程——薛定谔方程, 从而创立了逻辑上完备的量子论——波动力学. 创立逻辑上完备的量子论还有另一条思路: 海森伯从观测到的原子谱线以及玻尔原子结构量子论出发, 引入矩阵的数学工具创立“矩阵力学”. 不久证明了这两种“力学”是完全等价的, 统称为“量子力学”. 值得注意的是, 薛定谔创立“波动力学”时, 对其中的空间某种分布函数(波函数)的意义不清楚. 后来, 玻恩提出波函数的统计解释: 波函数的模平方代表一种几率密度, 代表电子在某个地点出现的几率分布. 接着(1927 年)海森伯提出, 在“量子力学”中存在“不确定性原理”: 微观粒子的位置与动量不可能同时具有确定的值. 玻尔等认为波函数的统计解释与“不确定性原理”表明, 量子论虽是一种“力学”, 却不可避免地要放弃力学对质点运动的因果性描述方法, 转而采用本质上的统计性描述方法, 量子论已经构成完备的理论. 对量子论物理含义的这个观点被称为“哥本哈根解释”. 如果仔细分析量子论的基础, 人们会发现微观粒子的波粒二象性是它的基本出发点. 正是微观粒子的这个特性, 使量子论具有爱因斯坦首先揭示的内在“非定域性”固有特性及一系列怪异性. 这引起了物理学家的巨大困惑, 并挑起了一场史无前例的大争论. 争论的一方是以玻尔、玻恩和海森伯等为代表的提出过“哥本哈根解释”的主流派. 这一派不用物理方法去解决量子论的内在困难, 而是采用哲学上的“实证论”理念加以回避. 另一方是以爱因斯坦、德布罗意等为代表的少数派. 这一派认为量子论对微观粒子的运动采用统计性描述, 是不完备的, 他们主张寻求对微观粒子的运动采用因果性描述的完备理论. 可见, 争论的中心论题是: 物理规律本质上应是因果性(决定论性)的, 抑或是几率性的? 正如爱因斯坦所说: “你们相信掷骰子的上帝, 我却相信客观存在的世界中的完备定律与秩序.” 这样一来, 300 多年的波粒之争演变成更加深刻的原则性问题: 物理规律在本质上应是什么? 这形势迫使物理学家对整个物理学的基础作批判性思考, 去寻找更新更可靠的基础.

近 80 年来虽然“哥本哈根解释”已经在物理学界占据了主导地位, 但是仍然陆续有一些物理学家对哥本哈根解释提出质疑, 并提出一些别的解释, 这里包括隐参数理论、多宇宙解释、系综解释、退相干理论等. 在这些解释中, “系综解释”虽然有很合理的成分, 但是不能解释量子世界中单体系统的行为; 而其他的解释, 除了隐参数理论, 它们和“哥本哈根解释”及“系综解释”一样, 没有给出比量子论多一点东西. 也就是说, 这些“解释”只是解释量子论, 而不是去发展量子论. 爱因斯坦认为: “量子理论的数学形式体系是无可怀疑的, 但是, 对于它的陈述所作的物理解释却不能那样说了.” 他还说: “当我们这样证明了波函数提供不出关于物理实在的完备描述的时候, 我们还是没有解决这样的描述是否存在的问题. 可是我们相信这样的一种理论是可能的.” 可见, 寻求完备的理论是爱因斯坦的梦想, 也是本书

作者和一些物理学家共同的梦想.

量子论隐参数理论在实现这个梦想的道路上迈出了重要的一步. 因为它不但在所有方面都和量子论等价, 而且比量子论多了一些内容, 即它试图通过隐参数去预测电子的运动轨迹, 并解决了波函数坍缩问题引起的困惑. 但是, 它目前尚未解决量子论固有的“非定域性”引入的困难. 这一点不但爱因斯坦不能接受, 绝大多数物理学家也难免感到遗憾. 因此, 物理学家当前面临着这样的任务: 不但要寻找量子论的更好的理论解释, 还要解决量子论固有的“非定域性”难题, 更要寻找关于物理实在的完备描述的理论, 从而实现爱因斯坦之梦 (哪怕是试探性的). 这就是本书的宗旨.

本书获内蒙古科技大学教材建设项目和教学改革重点项目资助.

本书内容是合作研究的成果. 第一篇的 1-4 章、第二篇的第 5 章、第四篇的第 13、14 章由李永峰执笔, 第二篇其余部分由徐来自执笔, 第三篇由徐丽琴执笔, 第四篇其余部分由张雪峰执笔.

徐来自 徐丽琴 张雪峰 李永峰

2015 年 6 月 28 日

目 录

第一篇 量子论简介

引言	3
第 1 章 量子论的物理基础	5
1.1 量子论的物理基础的组成	5
1.2 量子系统的状态及其描述	5
1.3 量子系统状态随时间演化的描述	6
1.4 关于量子系统可观察量及其测量结果的描述	8
1.5 量子系统可观察量算符	12
1.6 海森伯关系式	17
1.7 量子论的首要概念	19
1.8 量子论的两种形式	20
第 2 章 粒子全同性原理	22
2.1 全同粒子 粒子全同性原理	22
2.2 全同粒子的性质	22
2.3 全同粒子的波函数 泡利原理	24
2.4 电子的自旋角动量	26
第 3 章 狄拉克符号	31
3.1 右矢 $ A\rangle$ 与左矢 $\langle A $	31
3.2 线性算符	32
3.3 基矢	34
3.4 态矢量	35
3.5 可观察量	36
3.6 薛定谔方程	37
3.7 可观察量 $\hat{\beta}$ 的本征方程	38
3.8 可观察量 $\hat{\beta}$ 的平均值	39
3.9 两个表象之间的变换 (么正变换)	40
3.10 密度算符与密度矩阵	42

第 4 章 薛定谔方程的解	44
4.1 一维谐振子	44
4.2 势垒隧穿效应	56
4.3 球对称势场下定态薛定谔方程角度部分的解	59
4.4 氢原子	64
4.5 非定态微扰法	76

第二篇 经典统计力学

引言	83
第 5 章 经典统计力学的基础	85
5.1 物理学中几率概念的提出	85
5.2 随机参数、几率及其分布函数	85
5.3 统计系综——统计力学系统	87
5.4 经典统计力学的基本假设——系综运动方程	89
5.5 经典统计力学的基础	92
5.6 量子论的经典统计力学形式	93
第 6 章 系综运动方程的几种特解——几种特殊的系综	95
6.1 几种特殊的系综	95
6.2 “波包”系综	95
6.3 微正则系综	98
6.4 微正则系综与热力学的关系	100
6.5 正则系综	102
6.6 正则系综与热力学的关系	103
6.7 能量均分定理	105
6.8 理想气体	106
6.9 固体比热	108
6.10 平均值的偏差	109
6.11 巨正则系综	110
6.12 巨正则系综与热力学的关系	112
第 7 章 宏观多体问题的单粒子模型方法	115
7.1 宏观多体问题的单粒子模型方法	115
7.2 宏观近独立子系综的泛系综	118
7.3 玻尔兹曼分布与热力学的关系	120
7.3.1 热力学量的统计表达式	120

7.3.2 热力学的基本公式	121
7.4 理想气体	123

第三篇 量子论是波动统计力学

引言	127
第 8 章 量子论是波动统计力学	129
8.1 对量子论的正统理解	129
8.2 正统观点的依据	130
8.3 对量子论正统观点的质疑	135
8.4 量子论存在固有的“非定域性”困难	137
8.5 量子论固有的“非定域性”特性的实验证实	138
8.6 重新理解诺依曼定理	145
8.7 重新考察薛定谔方程的经典极限	147
8.8 重新考察量子论“波包”运动的经典极限	150
8.9 量子论的极限过渡与态叠加原理	151
8.10 推论: 量子论是波动统计力学, 而不是波动力学	152
8.11 重新理解海森伯关系式 (测不准原理) 的含义	153
第 9 章 量子论隐参数理论难题的解决	164
9.1 量子论隐参数理论是德布罗意-玻姆力学	164
9.2 量子论的隐参数理论未解决“非定域性”困难	166
9.3 量子论隐参数理论的奇异性	167
9.4 量子论隐参数理论“非定域性”困难的解决方案	168
9.5 验证“微观实体”是否存在的实验方案	170
第 10 章 德布罗意-玻姆力学	172
10.1 德布罗意-玻姆力学	172
10.2 氢原子中电子的轨道运动	176
10.3 氢分子中电子之间的交换力是电子纠缠态库仑力	179
10.4 双缝实验中微观粒子的可能运动轨迹	179
10.5 势垒隧穿效应中微观粒子的可能运动轨迹	180
10.6 玻姆力学中的退相干问题	183
10.7 测量过程中的波函数坍缩问题	184
10.8 关于全同性原理	186
10.9 关于马赫原理	186
10.10 小结	187

第 11 章 波动统计力学	188
11.1 微观多体问题的单粒子模型方法	188
11.2 微观近独立子系综	188
11.3 近独立子系综的混合泛系综统计力学	189
11.4 近独立子系综的微观泛系综统计力学	194
第 12 章 光子的波动统计力学	204
12.1 从统计力学与光学之间的类似性得到的推论	204
12.2 电磁场论是未“归一化”的光子近独立子系综统计力学	206
12.3 光子近独立子系综统计力学	207
12.4 光子近独立子系综的混合泛系综统计力学	208
12.5 光子近独立子系综的微观泛系综	209
12.6 电子和光子的近独立子系综的组合微观泛系综	210
 第四篇 黑体辐射理论——各种统计物理学的应用 	
第 13 章 热辐射的描述	215
13.1 辐射振子	215
13.2 辐射场中的物质粒子	217
13.3 辐射压强	219
13.4 热辐射的“光线束”描述	220
13.5 绝对黑体及黑体辐射	222
第 14 章 黑体辐射的热力学理论	224
14.1 基尔霍夫定律	224
14.2 斯特藩-玻尔兹曼定律	225
14.3 维恩位移定律	226
第 15 章 黑体辐射的经典统计物理学理论	230
15.1 线性振子能量的统计平均值	230
15.2 瑞利-琼斯辐射公式	231
15.3 瑞利-琼斯辐射公式与实验的比较	231
第 16 章 黑体辐射的混合泛系综统计物理学理论	233
16.1 线性振子与光子	233
16.2 维恩辐射公式	234
16.3 普朗克辐射公式	235
第 17 章 黑体辐射的爱因斯坦理论及爱因斯坦微分系数的确定	237
17.1 黑体辐射的爱因斯坦理论	237

17.2	原子的发射几率与吸收几率	239
17.3	辐射的“半经典”理论	241
17.4	辐射的近独立子系统综的波动统计物理学理论	243
17.5	辐射的微观泛系综统计力学理论	245
参考文献		247
附录一	量子论“非定域性”难题的试探性解决	249
附录二	重新理解海森伯关系式 (测不准原理) 的含义	273
附录三	光子的波动统计力学	283

第一篇 量子论简介

“我确信没有一个人理解了量子力学。”

——理查德·费曼

引言

量子论的诞生是 20 世纪最重要的科学成就, 它不但改变了自然科学的面貌, 而且可以毫不夸张地说, 它已经改变人类的生活方式, 但是它的理论含义却非常神秘、非常怪异. 可以说, 在科学史上它是最成功, 同时也是最难以理解的理论. 这引起了同是量子论奠基人的爱因斯坦与玻尔之间的世纪争论. 这争论至今在物理学界也没有解决. 虽然大多数物理学家根本就不愿意去深究这类事情, 而关注于利用量子论的整套数学体系进行应用研究与教学; 但仍有一些物理学家为一个取得如此伟大成就的理论竟然不能被理解而深感苦恼, 从而激发他们的好奇心与强烈兴趣去试图揭示量子论的神秘性. 于是, 出现了许多试图理解“量子论到底意味着什么”的不同解释. 奇怪的是, 这些探索不但没有使量子论的理论含义更明晰, 反而使得一些神秘性看起来更加神秘. 这种情况在科学历史上是前所未有的.

尽管如此, 正如贝尔所希望的那样, 对于量子论的理论含义的探究必须继续下去.

什么因素使得量子论的理论含义如此神秘、怪异? 量子论的核心概念究竟是什么? 如今量子论的各种教科书对于量子论的核心概念的叙述莫衷一是. 有的把不确定性原理 (海森伯关系式) 当作核心概念, 由此讲起; 有的把态叠加原理当作核心概念, 由此讲起; 此外还有什么互补原理、对应原理等. 实际上, 量子论的核心概念是微观粒子的波粒二象性原理, 上述各种概念都是由此引申出来的. 最能体现波粒二象性的神秘性的莫过于微观粒子双缝实验 (图 0.1). 正如费曼所说, 双缝实验所显示的现象, “绝对不可能用经典的方式去解释, 它位于量子力学的核心位置. 实际上它包含着所有量子力学的唯一神秘之处.”

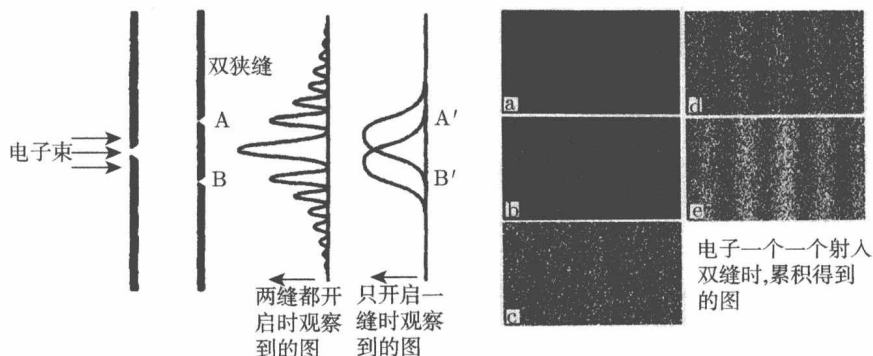


图 0.1 电子双缝实验结果示意图

在双缝实验中, 如果许多电子同时射入屏障的双缝, 由于发生相互干涉而得到

干涉条纹图案, 这容易理解, 因为这就是普通的波动干涉效应. 但是, 如果像图 0.1 所显示的那样, 当两个缝都开启时, 电子一个一个射入屏障的狭缝 (双缝中任一个), 并使它们相隔的时间长到不可能有相互影响的程度, 累积起来得到的图案, 不是相继只开启一个缝所得到的图案的叠加, 而是更复杂的干涉条纹图案, 它与许多电子同时射入屏障的双缝所得到的干涉条纹图案完全一样. 这现象变得难以理解, 因为它特别神秘、怪异. 要注意的是, 电子被发射时作为一个粒子, 到达显示屏时也作为一个粒子, 但是, 在射入屏障的狭缝时却显示波动行为, 它似乎同时穿过两个缝, 并与自己发生干涉, 而且算出自己在显示屏的什么位置出现. 这就产生这样的问题: 单个电子如何同时穿过两个缝? 它又如何“知道”在显示屏中自己应该有的位置? 这就是量子理论最难以理解的怪异现象的典型例子. 为了试图揭开量子论之谜, 最好先作量子论的简介.