

高等学校教材

# 量子力学基础

关 洪



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

0413.1  
G67  
高等学校教材

# 量子力学基础

关 洪

高等教育出版社

(京)112号

## 内容提要

本书是中山大学物理系关洪教授在其多年来对量子力学课程潜心研究的基础上,为我国高等院校物理专业大学生初学量子力学课程而编写的教材。

本书内容共分为12章,分别为绪论、态函数及其演化方程、一维定态问题、量子力学的基本原理、量子力学的基本原理(续)、中心力问题、量子力学的矩阵表述、定态问题的近似方法、演化和跃迁、电子的自旋和自旋-轨道耦合、全同粒子系统、散射理论。作者在编写过程中注重少而精的取材原则,努力尝试用一种简单明白而又完备自洽的概念体系来展示整部量子力学教材,以力图讲清楚量子力学的基本原理、计算方法和典型应用,并精选了一些有代表性的论题巧妙穿插其中,从而形成了一部有鲜明特色的量子力学基础教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

量子力学基础/关洪. - 北京:高等教育出版社,  
1999

ISBN 7-04-006996-2

I. 量… II. 关… III. 量子力学-高等学校-教材  
IV. 0413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 02741 号

量子力学基础

关 洪

---

|      |                                                           |      |                   |
|------|-----------------------------------------------------------|------|-------------------|
| 出版发行 | 高等教育出版社                                                   |      |                   |
| 社 址  | 北京市东城区沙滩后街 55 号                                           | 邮政编码 | 100009            |
| 电 话  | 010-64054588                                              | 传 真  | 010-64014048      |
| 网 址  | <a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a> |      |                   |
| 经 销  | 新华书店北京发行所                                                 |      |                   |
| 印 刷  | 国防工业出版社印刷厂                                                |      |                   |
| 开 本  | 787×960 1/16                                              | 版 次  | 1999 年 6 月第 1 版   |
| 印 张  | 17.5                                                      | 印 次  | 1999 年 6 月第 1 次印刷 |
| 字 数  | 330 000                                                   | 定 价  | 18.60 元           |

---

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

**版权所有 侵权必究**

## 前 言

1990年,高等教育出版社出版了我写的《量子力学的基本概念》一书.1993年,以这本著作作为主要内容的个人项目“量子力学基本原理的教学研究”,获得了全国普通高等学校优秀教学成果国家级二等奖.那时候,暨南大学物理系黄乐天教授向我建议,应当运用其中的基本观点,结合多年的教学经验,继续写出一本量子力学教材.后来,有关的计划得以列入原国家教委理科物理学和天文学“九五”教材建设规划,结果就有了现在这本书.

本书取名“量子力学基础”,因为所讲的是基础的或者基本的量子力学(Basic Quantum Mechanics),而不是专门论述量子力学的基础(Foundations of Quantum Mechanics).后者常指量子力学的数学基础、哲学基础、实验基础和逻辑基础等比较曲高和寡的学问,而这本书实际上是一本初学量子力学的教材.我们希望,它能够讲清楚量子力学最基本的概念原理和计算方法,使得读者在掌握了这个基础以后,再继续进行深入钻研的时候,不会产生原则上的困难.

具体说来,这本书是为国内综合性大学以及理工和师范院校的物理专业,讲授一学期的量子力学课程而准备的.经验证明,对于一般程度的学生,全部内容大致可以用70左右学时基本讲完;经过适当减省之后,也可以适用于50到60学时的计划.

像任何一门物理学理论一样,量子力学包含着一套计算规则和对这套数学程式的物理解释.狄拉克曾经讲过:“业已证明,作出解释的问题,要比仅仅解出方程困难得多.”这一句话,尤其适合于量子力学.这是因为,量子力学的理论基础是完全独立于经典物理学的,也是同人们的日常生活经验格格不入的.长期以来,对这一点的认识,普遍存在着各种各样的误解.而在国内外流行的许多教材里,都在不同的程度上,想方设法地试图用经典物理学的概念去解释微观物理现象,从而使量子力学基本原理的教学显得更加困难重重.

所以,本书的首要宗旨,就是尝试用一种简单明白而又完备自洽的概念体系,去展开整部量子力学.一方面,这样做可以使初学者避免一些似是而非或者并不必需的观念先入为主,这一点无疑是非常重要的.另一方面,本书也不可能花很多篇幅去阐述概念问题,主要讲的当然还是方程的建立和求解的方法.然而,除了在前面几章集中讲解量子力学的基本原理和基本假设之外,在其他章节里,亦注意讲清楚有关的一些具体假定和物理考虑的道理,特别是它们与经典物理学的原则区别.因此,比起一般的教材,本书的说明文字要稍多一些,希望这样对教师备课和读者自学都能有所裨益.

其次,量子力学解决问题的范围比经典物理学宽阔得多.在一个学期内,既不可能学习到它每一方面的基本理论,更不可能接触到它在每一领域里的广泛应用.因此,本书的第二条宗旨就是取材少而精.我们着重于最基本的原理和典型的应用,精选一些有代表性的论题.并且,不收入一些在后续课程(例如固体物理学、量子统计物理学和高等量子力学)里必定要讲到的内容.本书一方面在理论体系和数学推导上尽可能给出完整的前后衔接;另一方面又不追求面面俱到,不铺陈太多的定理和例证.希望学习了这门课程之后,可以掌握进一步了解和运用量子力学理论的基础.正文中好些讨论性的段落,亦可以供参考阅读,不一定要在课堂上讲授.

最后,我们还努力于教材内容的更新.这里指的首先是整个理论的概念体系的改革.它反映了近年来在国际物理学文献上占着越来越重要地位的量子力学的统计(系综)解释的基本精神.其实,30年前出版的著名的《费曼物理学讲义》(第三卷),早就给我们提供了这方面的一个榜样.后来,从80年代中期开始,在国外出版的一批量子力学教科书,亦形成了致力于阐明或者至少宽容地介绍量子力学非正统解释的一种趋势,同我们改革的方向是一致的.其次,量子力学是现代物理学的一门基础理论,它不是专为其中哪一个分支服务的.我们在选题时注意避免早期量子力学教材里过分地侧重原子分子光谱问题的倾向.不过,量子力学的各种新鲜应用层出不穷,我们也只能选取对理解其基本原理有重要意义的一些课题.并且,不论选择什么内容,其目的都在于了解和掌握量子力学的基本方法,而不在于浏览各个不同领域上的进展,或者为将来可能遇到的具体问题做好准备.换句话说,我们注重的是基本功的训练,而不是“花样”的展览.不论在科学上还是在艺术上,无数的事例都证明了,决不应该把这两方面的比重弄颠倒了.

我不打算在这里描述量子力学的统计解释和正统解释(即在过去的大多数教科书中所采用的解释,也常常被称为哥本哈根解释)之间的原则差别,因为在本书正文里,已经对此有了适当的说明.如果要进一步了解,还可以参看我的《量子力学的基本概念》一书,或者再查阅其中所引用的各种参考文献.在那本著作里,除了对有关各个基本概念的历史由来、物理含义和哲学解说等方面的详细讨论之外,还写进了例如量子力学的经典近似,态的制备和测量,以及关于量子力学原理的一些引人瞩目的新课题(例如EPR论证)等为了节省篇幅而不便收入本教材的内容.至于量子论和量子力学早期发展的历史,则可以参阅我写的《物理学史选讲》一书第十章中的简要介绍.

如果课时不够,可以从第1.4节讲起,前三节安排自学.此外,在讲授时省去第7.2,7.4,9.1和9.4等节,不会给后续的章节带来困难.全书最后的第12.4节,介绍了带自旋的全同或者非全同粒子的二体散射的一些基本公式.这些内容是很有用的,但是不容易在一般的著作里找到.当然,也可以不在课程里讲,留待

以后再学。

书中每章末尾所附的习题,有一部分是用来推导或验证正文的公式的.习题的总数不太多.好在容易找到一些专门的量子力学习题集,读者可以自行选用.

书末列出了常用的一些参考著作.这些书籍的选取,主要着眼于与本书程度相适应的教学需要,并不是一份关于量子力学的权威著作的目录.

衷心地感谢我的老师们——北京大学物理系胡宁教授和郭敦仁教授对本书工作的热心支持和指教;还感谢我的兄弟——清华大学应用数学系关治教授的帮助.

我是在 1994 年夏天接受了胸部肿瘤切除手术之后,才开始动笔写这本书的.我非常感谢在这期间有关医务人员的精心治疗和护理,特别是我的妻子胡道媛医生的努力照料.没有他(她)们的这些贡献,我是不可能完成这项工作的.

最后,我还感谢中山大学物理系的积极支持.

关 洪

1996 年 7 月于广州

责任编辑 杨 祥  
封面设计 张 楠  
责任绘图 孟庆祥  
版式设计 马静如  
责任校对 俞声佳  
责任印制 杨 明

# 目 录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 前言 .....                       | 1   |
| 第一章 绪论 .....                   | 1   |
| 1.1 经典物理学的困难 .....             | 1   |
| 1.2 微观事件的统计决定性 .....           | 4   |
| 1.3 德布罗意波 .....                | 8   |
| 1.4 概率幅的引入 .....               | 12  |
| 习题 .....                       | 16  |
| 第二章 态函数及其演化方程 .....            | 17  |
| 2.1 作为概率幅的态函数 .....            | 17  |
| 2.2 态叠加原理 .....                | 20  |
| 2.3 薛定谔方程 .....                | 23  |
| 2.4 连续性方程 .....                | 26  |
| 习题 .....                       | 31  |
| 第三章 一维定态问题 .....               | 33  |
| 3.1 薛定谔方程的定态解 .....            | 33  |
| 3.2 一维散射和势垒穿透 .....            | 37  |
| 3.3 一维方势阱 .....                | 44  |
| 3.4 简谐振子 .....                 | 51  |
| 习题 .....                       | 56  |
| 第四章 量子力学的基本原理 .....            | 58  |
| 4.1 动力学变量的算符表示和量子力学的基本假设 ..... | 58  |
| 4.2 动量算符及其本征函数 .....           | 62  |
| 4.3 轨道角动量算符及其本征函数 .....        | 68  |
| 4.4 厄米算符本征函数组的性质 .....         | 73  |
| 习题 .....                       | 79  |
| 第五章 量子力学的基本原理(续) .....         | 81  |
| 5.1 连续本征值谱情况 .....             | 81  |
| 5.2 对易式和不确定关系 .....            | 85  |
| 5.3 角动量算符的本征值谱 .....           | 91  |
| 5.4 平均值的演化和运动恒量 .....          | 96  |
| 习题 .....                       | 102 |
| 第六章 中心力问题 .....                | 104 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 6.1 球对称势和径向方程·····             | 104 |
| 6.2 开普勒问题·····                 | 108 |
| 6.3 氢原子和类氢系统·····              | 113 |
| 6.4 自由粒子和球形方势阱·····            | 119 |
| 习题·····                        | 124 |
| <b>第七章 量子力学的矩阵表述</b> ·····     | 125 |
| 7.1 态和算符的矩阵表示·····             | 125 |
| 7.2 表象变换·····                  | 131 |
| 7.3 狄拉克记号·····                 | 136 |
| 7.4 谐振子的占有数表象·····             | 141 |
| 习题·····                        | 145 |
| <b>第八章 定态问题的近似方法</b> ·····     | 148 |
| 8.1 定态微扰论(非简并情况)·····          | 148 |
| 8.2 定态微扰论(简并情况)·····           | 152 |
| 8.3 变分法·····                   | 157 |
| 8.4 氢原子基态能级·····               | 162 |
| 习题·····                        | 166 |
| <b>第九章 演化和跃迁</b> ·····         | 168 |
| 9.1 含时薛定谔方程的解·····             | 168 |
| 9.2 含时微扰论·····                 | 174 |
| 9.3 原子和辐射的相互作用·····            | 180 |
| 9.4 准稳定态的描写·····               | 185 |
| 习题·····                        | 192 |
| <b>第十章 电子的自旋和自旋-轨道耦合</b> ····· | 194 |
| 10.1 电子自旋的描写·····              | 194 |
| 10.2 两个角动量的加法·····             | 199 |
| 10.3 塞曼效应和帕邢-巴克效应·····         | 206 |
| 10.4 光谱线的精细结构和反常塞曼效应·····      | 212 |
| 习题·····                        | 218 |
| <b>第十一章 全同粒子系统</b> ·····       | 219 |
| 11.1 全同性原理和对称化假设·····          | 219 |
| 11.2 双粒子系统的态函数·····            | 226 |
| 11.3 氦原子·····                  | 232 |
| 11.4 氢分子·····                  | 238 |
| 习题·····                        | 242 |
| <b>第十二章 散射理论</b> ·····         | 244 |
| 12.1 散射问题的定态描写·····            | 244 |
| 12.2 分波法·····                  | 250 |
| 12.3 玻恩近似和形状因子·····            | 256 |

---

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 12.4 全同粒子的散射 .....       | 262        |
| 习题 .....                 | 268        |
| <b>附录 物理常量(数)表</b> ..... | <b>270</b> |
| <b>参考文献</b> .....        | <b>271</b> |

# 第一章 绪 论

## 1.1 经典物理学的困难

从 17 世纪末牛顿力学的建立开始,经典物理学在各个方面迅速得到发展,在宏观物理现象的领域内取得了广泛的成功.因此,在其后的 200 年内,人们普遍相信经典物理学的基本原理是颠扑不破的,他们要做的事只是进一步运用这些理论,来改善旧的计算结果和探索新的应用课题.然而,到了 19 世纪末,物理学家们陆续观察到一些别开生面的实验现象,它们是不可能从经典物理学的理论得到解释的.这主要是指以下几个问题:

### 一、固体比热

早在 1819 年,杜隆和珀蒂观察发现,各种固体物质的克分子(相当于现在的摩尔)热容,都具有一个与温度无关的、互相成简单比例的确定数值.后来,在经典统计物理学里,设定了一条能量均分定理,使这一实验事实得到了解释.按照这条定理,当处在热平衡状态时,物质原子的每个任意的振动自由度占有相同的平均能量  $kT$ .那么,进行着三维振动的每个固体原子,就会贡献相同的一份热容,使得每种固体的摩尔热容,都等于不依赖于温度的一个常数  $3nR = 3nN_A k$ . ( $k$  是玻尔兹曼常量;  $T$  是热力学温度;  $n$  是一个分子内的原子数目;  $R = N_A k$  是摩尔气体常量;  $N_A$  是阿伏伽德罗常量,即 1 摩尔固体物质中所含分子的数目.)

到 19 世纪末,由于低温技术的发展,逐渐发现了各种固体的比热,在温度降低时都不同程度地明显低于杜隆-珀蒂定律所规定的数值.此外,多原子分子气体的比热,也出现了类似的问题.这些结果都表明了,作为经典统计物理学基础之一的能量均分定理的权威,受到了严峻的挑战.

### 二、黑体辐射

19 世纪末,在对黑体辐射的研究中,经过多方面的努力,一直未能从经典物理学的理论,推出一条符合于实验的辐射能量频谱公式.其实,在经典物理学里,由一定数目的原子分子组成的固体空腔腔壁,是一个有限自由度的系统;而由谐振腔的理论知道,封闭在这种空腔里的辐射即电磁场,则是一个无限自由度的系统.那么,按照能量均分定理,有限的总能量当然填不满那无限自由度的深坑,这两种系统之间是根本不可能建立热平衡的.由于问题出在电磁场的无限扩展的高频自由度上,所以这一困难被称为紫外灾难.这一情况已经足以表明,经典物

理学理论里存在着的不仅仅是一些技术细节上的困难,而是含有根本性的缺陷了。

1900年10月,普朗克先通过热力学的方法,对当时已知的辐射频谱公式进行分析,找出了代表腔壁分子运动的线性振子的平均能量 $\langle E \rangle$ 的新公式(普朗克公式)

$$\langle E \rangle = \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1} \quad (1.1)$$

用这一表示式去代替经典统计物理学里的平均能量公式 $\langle E \rangle = kT$ ,结果得到同实验数据符合得很好的、黑体辐射频谱函数的新公式(普朗克定律)

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} \quad (1.2)$$

同年12月,为了给这道半经验公式以一种基本的理论解释,普朗克又假设,振子的能量不是连续分布的,而只能采取某种能量元 $\epsilon$ 的整数倍。因此,电磁辐射同振子交换能量的时候,也会受到相应的限制。他由这一假设出发,运用概率统计方法,重新导出辐射频谱公式(1.2),并且得出能量元 $\epsilon$ 与振子频率 $\nu$ 成正比的关系

$$\epsilon = h\nu \quad (1.3)$$

普朗克把上式中的比例常量 $h$ 称为“作用量子”,后来又被叫做普朗克常量,它的现代测量值是

$$h = 6.626\,075\,5(40) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

普朗克常量是量子效应尺度的表征。普朗克的这一工作,第一次在物理学里引进了物理量的不连续性,标志着量子论的诞生。

1906年,爱因斯坦首次用量子论的方法处理固体比热问题。他将单一频率的普朗克振子平均能量公式(1.2),代替原来与温度成正比的能量均分值 $kT$ ,这样求出来的固体比热自然不再是与温度无关的常数。爱因斯坦的初步结果,可以定性地解释实际固体为什么在高温时遵从杜隆-珀蒂定律,而在低温下则比热逐渐变小;还预言了当温度接近绝对零度时,固体比热一定会趋向于零。1910年,这一项预言就被能斯特的实验所证实。后来,1912年德拜所做的经过改进的理论处理,又很好地同观察到的固体比热曲线的低温行为取得一致,为量子论给出了它诞生之后的第一个重要的佐证。

### 三、光电效应

光电效应是在1900年前后发现的。那时看到的现象是,当用紫外光照射到某些金属的表面上时,就会立刻产生电子的发射。实验观察到的光电子的能量仅仅依赖于照射光的频率,而光的强度则只决定光电子数目的多少;并且,当光的频率低于某一个阈值时,无论光强有多大,都不会引起电子的发射。这种规律无法从经典物理学的理论得到解释。此外,按照经典电磁场理论,光照的能量密度

是连续分布的,在原子尺度的小范围内,需要经过比较长的一段时间,才能积累起足够的能量去激发电子,这也是同观察到的现象相矛盾的.

1905年,爱因斯坦首先对黑体辐射进行理论分析,提出不仅腔壁振子的能量分布是不连续的,而且光即电磁辐射本身就是由大小为  $h\nu$  的“能量子”所组成的;然后,他进一步研究“是否光的产生和转化的定律也具有这样的性质,就像光是由这样一些能量子所组成的一样”,从而推出了光电效应的规律.爱因斯坦的工作表明了,在光和物质相互作用时,“光的能量在空间中不是连续分布的”,而是表现为“个数有限的、局限在空间各点的能量子”,“这些能量子……不能再分割,而只能整个地被吸收或产生出来”.

爱因斯坦所预言的,光电效应里观察到的光电子动能与电磁辐射频率的线性关系定律,于1916年被密立根的实验所确证.于是,能量为

$$E = h\nu \quad (1.4)$$

的光量子概念,便被广泛地接受了.

1916年,爱因斯坦在新的工作里又提出,在电磁辐射同物质粒子相互作用时,每个光量子在传递一份能量  $h\nu$  的同时,还传递一份大小为

$$p = h\nu/c \quad (1.5)$$

的动量(式中的  $c$  是光速).1923年前后,康普顿对电子和光子散射(康普顿散射)过程的实验研究,亦证实了这一个设想的正确性.这样一来,就可以把频率一定的光量子,看做是具有确定能量和动量的一种粒子.不久之后,人们把这种新认识到的粒子起名为“光子”.

#### 四、原子光谱

19世纪末,已经观察到氢原子发出的许多条频率确定的光谱线.1908年,里兹终于把这些线状光谱的频率,整理成用公式

$$\nu = Rc \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (1.6)$$

表示的、以不同的  $n$  值区分的一些谱系.式中的  $n$  和大于  $n$  的  $m$  都是正整数,系数  $R$  则称为里德伯常量.

按照经典物理学的理论,一定频率的电磁辐射,必定是由按同一频率振动着的、由带电体组成的振子,通过例如偶极辐射那样的机制发射出来的.按照这种机制,最简单的氢原子也需要存在着几十种不同的振动方式,才能发出那么多的线状光谱,这简直太令人不可思议了.

1913年,玻尔断定氢原子内部只有一个核外电子,而线状光谱的发生则是同这个电子的运动变化相联系的,在这一基础上提出了他的原子模型.玻尔模型里的两个核心概念是电子的定态和跃迁.前者指的是,只有满足量子化条件(用后来经过索末菲改进的公式表示)

$$\oint p dq = nh \quad (1.7)$$

(式中的  $p$  和  $q$  分别是同一个任意自由度的动量和坐标)的电子轨道才是稳定的,这样的各个定态轨道的能量排列成一系列分立的能级  $E_n$ .而后者则指的是,当电子从以  $m$  为标志的定态轨道跃迁到以  $n$  为标志的定态轨道时,会发出频率为

$$\nu = (E_m - E_n)/h \quad (1.8)$$

的电磁辐射.

玻尔提出的跃迁,显然是光量子这一新概念的自然延伸,而他的定态概念也是同经典物理学完全不相容的.大家知道,在一定的范围内,受经典力学规律支配的行星或者人造卫星的运动,都可以有连续变化的、任意大小的稳定轨道,没有任何规则去限制这些轨道能量的大小.而且,由经典电动力学可知,当电子沿着一条封闭的曲线轨道运动时,必定会因为不断发出辐射而丧失能量,不可能保持着稳定的状态.所以,玻尔提出的这些假设,从根本上是同经典物理学格格不入的.而且,除了简单原子的能级分布之外,还有光谱线的强度以及分子和复杂原子等问题,都是玻尔模型所无法系统地给出满意解决的难题.总之,玻尔模型一方面越出了经典物理学的限制,指示出改革前进的方向;另一方面,它本身还不是一门新的动力学理论,而应当看做是从旧的物理学过渡到一门崭新的物理学的一座有重要价值的桥梁.

## 1.2 微观事件的统计决定性

上一节里所讲到的几种在经典物理学里无法解释的现象,都在量子论的基础上得到了初步的说明.例如,在原子的自发辐射和光电效应或者康普顿散射等光的产生和转化的过程中,光都是以一个个光量子即光子的形式出现的.在这些物理过程中,光的能量和动量总是一份一份地进行交换的,其中的每一份能量和动量就对应着一个光子.对于单色光说来,每个光子所携带的能量和动量的大小,分别由(1.4)和(1.5)两式表示.

以上的论断具有双重的意义:一方面,在光的产生和吸收的过程中,不可能出现小于一个光子的能量或动量的交换;另一方面,所有宏观的光学现象,都是由一个个光子的产生或吸收的效果积累而成的.一句话,所有观察到的光学现象,都可以分解为一个个不可以再分解的单元,其中每个单元都是由一个光子的产生或吸收的微观过程所引起的结果.

事实上,从20世纪初开始,就不断有人用极弱的光束,对细针衍射、阶梯光栅、双缝衍射和法布里-珀罗干涉仪等有关的光学现象,进行很长时间的观察.在这类实验中,光束的强度减弱到每次接收到的都只可能是由单个光子所引起的响应,所以叫做“单光子干涉实验”.把这样积累起来的记录加到一起就会发现,所得到的图像都与用强光在短时间内曝光所得到的相同.由这些实验所得出的、

总的观察结果同曝光时间长短无关的结论充分说明了,由单个光子的效应所引起的各个观察单元是互相独立的,总的结果并不是由于各个光子之间的相互影响而形成的。

以上所说的一个观察单元,称为一个事件.它不仅是光学现象,而且是我们观察到的一切物理现象的基本单元.例如,假若在一块电视屏幕上显示出一幅固定的画面,当我们逐渐减弱送给显像管的信号时,屏幕上的画面将会逐渐暗淡下去,最后用肉眼就什么也看不见了.但是,如果我们用专门的手段进行检测,并且继续减弱信号,那么当画面暗淡到一定程度之后,就不会出现更为暗淡的一幅幅完整的画面,而是会出现一些千疮百孔式的甚至满天星斗式的一幅幅不完整的图像.最后,如果还可以观察到的话,当信号减到极弱时,我们将会看到一个个光点先后在屏幕的不同位置上闪亮.这每一个光点,就代表着一个观察事件.当我们把在足够长的时间内记录下来的大量光点拼集起来,结果就会重新得到原来的画面。

在上面所举的例子里,在荧光屏上观察到的每一个光点,是由一个电子的轰击所引起的,它的响应只局限在微小的空间范围之内.这一区域在宏观上是微小的,但在微观上却包含了许多原子分子,这样才有可能用肉眼或者显微镜之类的仪器看得到.这一响应区域的大小即图像的分辨率,是由所采用的技术和材料决定的,并不代表着引起这类事件的电子或其他粒子的大小.相似的分析同样适用于云雾室、气泡室和感光乳胶之类的探测装置.另外有一类探测器,例如电离室和计数管等等,当在它们内部触发了一个微观过程的时候,相应输出的是一个电脉冲信号.这种脉冲信号只局限在短暂的时间间隔之内,脉冲的长短同样是由所使用的器材和电路的性能决定的,而不代表粒子参与有关微观事件所经历的时间.这里所讲的每一个小光点和每一个短脉冲,都是一个可以观察到的事件.无论如何,只要观察过程足够缓慢,总可以看到观察的结果是由一个个的事件组成的,而且每个事件的响应只局限在宏观上很小的空间或时间范围之内.这就足以使我们相信,每个事件都是由某种物质的量子即粒子所引起的。

下面以放射性现象为例,继续做进一步的讨论.设有一种放射性核素,它会发射出某种带电的射线粒子.这些粒子会在云雾室或核乳胶内留下一条条径迹,或者使电离室或计数管装置发出一个个电脉冲.在19世纪末、即放射性现象发现之初,就已经知道了放射性衰变的指数式规律

$$N(t) = N(0)\exp(-t/\tau) \quad (1.9)$$

式中的  $N(t)$  是在时刻  $t$  存在着的放射性核素的数目,  $\tau$  是这种核素的平均寿命.事实上观察到的各个核素的衰变时刻有先有后,原则上各不相同.这里所说“平均”的意思是,定律(1.9)式中的参数  $\tau$ ,是用大量放射性衰变事件的观察数据,同公式(1.9)作拟合处理而得出的一种平均结果.实际的做法是对(1.9)式取对数,得到

$$\ln N(t) = \ln N(0) - t/\tau \quad (1.10)$$

因此,  $N$  的对数对于  $t$ , 应当呈现出简单的线性关系. 从直线(1.10)式的斜率, 就可以确定出平均寿命  $\tau$ . 这不仅是放射性核素的衰变规律, 而且是观察到的任意不稳定粒子所满足的衰变规律. 例如, 图 1 是早期的一张  $\Lambda$  超子衰变曲线图, 图上十多个实验点, 是由三百多个观察事件统计出来的结果.

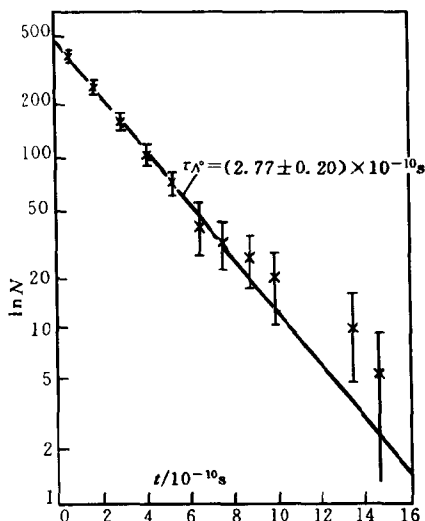


图 1  $\Lambda$  超子衰变曲线图(1957 年)

纵坐标是计数率的对数, 任意标度; 横坐标是时间, 单位是  $10^{-10}\text{s}$ .

这张图是以 304 个衰变事件为基础而绘制出来的.

由此可见, 仅仅观察到一两个事件, 根本不可能谈论粒子的寿命. 只凭从少数事例得来的数据, 也是无法准确地测定放射性核素的寿命的. 此外, 从对实际上数目有限的衰变事件所得出的数据, 同以(1.9)式表示的精确的指数式定律之间的偏差的研究, 早就了解到这种偏差的性质与随机事件的正态分布相同. 由此可以得出结论: 放射性衰变事件完全是随机发生的. 亦即是说, 每个事件是独立发生的, 互相之间不存在任何有规律的联系.

譬如, 面对着一块放射性物质, 当我们观察到一次衰变事件之后, 无法确切地知道下一次衰变将在什么时刻发生, 也无法知道下一次将会轮到哪一个原子核发生衰变. 这是因为, 从来不存在任何理论可以确切地预测, 个别的原子核将会在什么时刻发生衰变. 由于将要在第十一章里讲到的全同性原理, 我们还知道所有同一种类的原子核都是完全相同的, 对它们既不可以进行辨区别, 也不可以贴上标记编号. 这种全同性意味着, 微观粒子的各项性质是同它已经存在的时间没有关系的; 或者说, 不管什么时候产生的粒子, 都是完全一样的. 在这个意义上讲, 微观粒子是没有历史包袱的, 同一种粒子是没有老嫩强弱之分的. 因此, 现

存在的同种粒子都是一样的,个别粒子为什么会在某一时刻消失,是不可能找出具体原因来的。

在像医学统计和产品统计那样的普通统计学里,每个个体的行为都是遵循一定的因果规律的。亦即是说,在这些情况下,任何一个个体出了毛病甚至要报废,原则上都是可以找出原因的。所以,在普通统计学里对大量个体进行调查检验所得出来的统计分布,是建筑在每个个体的因果决定性的基础之上的。再回顾在经典统计物理学里,虽然我们实际上不可能同时对一个宏观物理系统内所有原子或分子的坐标和速度进行测量,但是我们仍然假定每个原子分子都遵循着牛顿运动定律,沿着某种轨道改变着它的位置和速度。而且,尽管我们事实上没有办法给任何一个原子分子贴上标签,可还是在想象中为它们编上了一个个号码来进行计算。由此可见,在经典统计物理学里,实际上对微观粒子使用了一套只适用于宏观对象的方法,在那里所讲的统计分布,也是建筑在每个个体的假想的因果决定性的基础之上的。

现在,在微观物理学里,对个别的微观事件会怎么样发生,是无法做出确切预言,因而也是无法找出具体原因的。所以,微观物理学里的统计决定性是不依赖个体行为的因果决定性的一种全新的统计决定性,可以称它是一种本质上的统计决定性。

以上的论证对于微观现象是具有普遍意义的。例如,当被观察的粒子存在着几种不同的衰变方式时,现代物理学理论只能求出在大量的观察事件中各种衰变方式所占的统计比例即“分支比”,而无法预言个别粒子的衰变将以哪一种方式进行。又如,一般说来,探测到的衰变(或者散射)过程的末态粒子,朝哪一个方向射出都是有可能的;理论上只能求出在大量的观察事件里的某种末态粒子,对于各个不同的射出角度的统计分布即“角分布”,而无法预言个别的末态粒子将会朝哪一个角度射出。事实上,我们亦不可能建造某种实验装置,使微观粒子只能按某种指定方式进行衰变(或散射),或者其中只会出现沿指定角度产生的某一种末态粒子。这都说明了,个别微观事件为什么按这一种方式发生而不按另一种方式发生,是找不出具体原因的。

玻尔曾经设想,能量和动量守恒定律也只在统计的意义上成立,而个别的微观过程则不必遵守,这样仍然有可能推出过去在宏观范围内得到支持的这两条守恒定律。后来,康普顿散射的实验结果证明了这种极端的想法是没有根据的,个别的微观过程依然严格遵守能量和动量守恒定律。可是,即使受到系统总能量和总动量在反应前后保持不变的限制,在末态含有三个或者更多个粒子的情况下,末态粒子的能量分配仍然不能确定。例如在放射性核素(中子)的 $\beta$ 衰变中,放出的 $\beta$ 粒子(另外两个末态粒子是质子和反中微子)的(质心系)能量的取值不是固定的,而是可以在从零到某一个极大值之间的范围内变化。现代物理学理论只能计算出这些 $\beta$ 粒子的能量在这个范围内的统计分布函数即 $\beta$ 能谱,而无法