

量子力学原理

P. A. M. 狄拉克

科学出版社

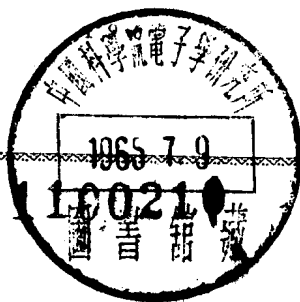
量子力学原理

P. A. M. 狄拉克

陈 咸 亨 译

喀 兴 林 校

科 学 出 版 社



0021/14

P. A. M. DIRAC

THE PRINCIPLES OF QUANTUM MECHANICS

Oxford, 1958

内 容 简 介

本书是一本名著，是理论物理学中的一本重要参考书。原书第一版出版于1930年，其后作者在1935年、1947年和1958年作了三次修改补充。本书是按照1958年第四版译出的。

狄拉克对量子力学与量子电动力学的建立有过重要贡献。他在本书中对量子力学的理论基础作了系统的总结，并提出了整套数学表现方法。他利用右矢与左矢的概念，简洁而深刻地反映出量子力学中各量之间的关系，着重地阐述了量子力学的理论结构。但作者的哲学观点不是没有问题的，这在全书的处理上和某些章节的字里行间都有所反映，而在第一版序言中，则比较明确地提出了作者对微观世界的看法。为了便于读者在学习物理内容的同时，研究狄拉克的哲学思想，本书的翻译力求忠实地表达原意，未予改动，这一点请读者注意。

本书可供大学理论物理专业高年级学生、教师和科研人员参考。

量 子 力 学 原 理

[英] P. A. M. 狄拉克著

陈咸亨译

喀兴林校

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街117号

北京市书刊出版业营业许可证出字第051号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1965年6月第一版 开本：850×1168 1/32

1965年6月第一次印刷 印张：10 5/16

精装：0001—2,730 字数：271,000

平装：0001—2,950

统一书号：13031·2126

本社书号：3246·13—5

定价：[科六] 精装本 2.10 元
平装本 1.60 元

第四版序言

对本书第三版的主要修改，是把有关量子电动力学的一章已重新改写。第三版中的量子电动力学描述了单个带电粒子在电磁场中的运动，它是与经典电动力学紧密类比的。在这种形式的理论中，带电粒子的数目是守恒的，因而这种理论不能被推广到允许带电粒子数目发生变化的情况。

在现代高能物理中，时常要出现带电粒子的产生与湮没。因此，要求带电粒子数目守恒的量子电动力学就与物理现实脱节了。所以，我已将它去掉，而代之以包括电子-正电子对的产生与湮没的量子电动力学。这一改变包含着放弃与经典电子理论的任何切近类比，然而它却提供了对自然现象的更为确切的描述。现在看来，电子的经典概念不再是物理中的有用模型了，它只是对于那些限于低能现象的初等理论，还可能有些用处。

作 者

1957年5月11日

第一版序言摘录

在本世紀中，理論物理学进展的方法经历了巨大的变化。經典物理学的传统曾把宇宙看成是許多可观察对象（粒子、流体、場等等）的集合，它們按照确定的力的規律进行运动，因而，人們可以在脑海中对整个理論方案形成一幅时空的图象。这样就产生了一种物理学，其目标是：对联系这些可观察对象的机制与力作出假定，以使用尽可能最简单的方式來說明这些对象的行为。但是，在晚近时期中越来越明显的是，自然界是按照另一种方案起作用的。自然界的基本規律，并不象我們所設想的图象一样，是用任何很直接的方式来支配宇宙的，相反地，这些規律控制着一个基础，我們不引入不相干的东西，就无法在脑海中形成关于它的图象。这些規律的公式表达要求采用关于变換的数学。宇宙中的重要事物表现为这些变換中的不变量（或者，更普遍地讲，一些近似不变量，即一些具有简单变換性质的量）。我們所直接了解的事情，就是这些近似不变量对某一参考系統的一些关系；通常选择的参考系統是为了引入一些特殊的簡化特点，这些特点从普遍理論的观点看来則是不重要的。

变換理論的采用日益增长，是理論物理学新方法的精华，它首先用在相对論中，后来又用在量子理論中。进一步前进的方向是使我們的方程在越来越广泛的变換中具有不变性。从哲学观点看来，事情的这种状态是非常令人满意的；因为它意味着更多地承認观察者自己所起的作用，他把在观察中所显示出的各种規律性引入到理論中来；它还意味着，在自然的进程中沒有任意性，然而，它却使事物对于学习物理的人更不容易了。新的理論，如果人們脫离开它的数学背景去看，是由許多物理概念所組成，而这些物理概念是不能用学生以前所了解的事物讲清楚的。它們甚至也不

能用語言文字恰当地講清楚。就象每个人在他出生后就必須学会的那些基本概念(例如,远近、相同)一样,要能掌握这些物理学的更新概念,只有靠长期地熟悉它們的性質和用途。

从数学方面看,了解这些新理論并没有什么困难,因为所要求的数学与在相当长时间内已流行的內容,沒有本质上的差异(至少到目前为止物理学的发展所要求的数学是这样的)。数学是特別适合于处理任何种类的抽象概念的工具,在这个領域内,它的力量是沒有限制的。正因为这个緣故,关于新物理学的书如果不是純粹描述实验工作的,就必须基本上是数学性的。虽然如此,数学毕竟只是工具,人們应当学会在自己的思想中能不参考数学形式而掌握住物理概念。在这本书里,我试图把物理学放在首位,为此,以完全是物理的一章作为开端,并在以后的各部分中,都尽可能地考察了数学形式的物理意义。在能解决真正的实际数值問題以前,我們必須掌握的理論基础是相当大量的,然而,这种情况是变換理論所起的根本作用不可避免的结果,而且在将来的理論物理学中,这种情况很有可能要变得更为显著。

关于能够用来表现理論的数学形式,任何作者都必须一开始就在两种方法中决定选一种。有一种是符号法,它用抽象的方式直接地处理有根本重要意义的一些量(例如变換中的不变量等);另一种是用坐标或表象的方法,它处理与这些量相应的数集。后一种方法通常被用于陈述量子力学(事实上,除了魏耳(Weyl)的书“羣論与量子力学”以外,几乎所有的书都采用这种方法)。人們用“波动力学”和“矩陣力学”两个名称之一来为它命名,如果在論述中所強調的物理对象是系統的态,就用前者,如果所強調的是系統的力学变量,就用后者。用坐标或表象的方法的优点是所需的这种数学是一般学生較为熟悉的,同时它也是历史传统的方法。

但是,符号法看来更能深入事物的本质。它可以使我們用簡洁精煉的方式来表达物理規律。很可能在将来当它变得更为人們所了解,而且它本身的特殊数学得到发展之时,它将更多地被人們所采用。正因为如此,我选择了符号法,而在这以后引入的一些

表示式只是作为进行实际运算的帮助。这样，就必须完全脱离发展的历史路线，但是，这种脱离是有利的，因为它能使我們对于新概念的了解变成尽可能地直接了。

作 者

1930年5月29日

目 录

第四版序言·····	iii
第一版序言摘录·····	iv
第一章 态的迭加原理·····	1
§ 1. 量子理论的需要·····	1
§ 2. 光子的偏振·····	4
§ 3. 光子的干涉·····	7
§ 4. 迭加与不确定性·····	9
§ 5. 迭加原理的数学表达·····	13
§ 6. 左矢量与右矢量·····	17
第二章 力学变量与可观察量·····	21
§ 7. 线性算符·····	21
§ 8. 共轭关系·····	24
§ 9. 本征值与本征矢量·····	27
§ 10. 可观察量·····	33
§ 11. 可观察量的函数·····	39
§ 12. 普遍的物理解释·····	44
§ 13. 对易性与相容性·····	48
第三章 表象理论·····	53
§ 14. 基矢量·····	53
§ 15. δ 函数·····	58
§ 16. 基矢量的性质·····	62
§ 17. 线性算符的表象·····	67
§ 18. 几率幅·····	73
§ 19. 关于可观察量函数的若干定理·····	77
§ 20. 符号上的发展·····	80

第四章 量子条件	85
§ 21. 泊松括号	85
§ 22. 薛定谔表象	90
§ 23. 动量表象	96
§ 24. 海森伯测不准原理	99
§ 25. 位移算符	101
§ 26. 么正变换	105
第五章 运动方程	110
§ 27. 运动方程的薛定谔形式	110
§ 28. 运动方程的海森伯形式	113
§ 29. 定态	118
§ 30. 自由粒子	120
§ 31. 波包的运动	123
§ 32. 作用量原理	127
§ 33. 吉布斯系综	132
第六章 初等应用	137
§ 34. 谐振子	137
§ 35. 角动量	142
§ 36. 角动量的性质	146
§ 37. 电子的自旋	151
§ 38. 在有心力场中的运动	155
§ 39. 氢原子的能级	160
§ 40. 选择定则	162
§ 41. 氢原子的塞曼效应	168
第七章 微扰理论	171
§ 42. 概述	171
§ 43. 微扰引起的能级变化	172
§ 44. 引起跃迁的微扰	176
§ 45. 对辐射的应用	179
§ 46. 与时间无关的微扰引起的跃迁	182
§ 47. 反常塞曼效应	185

第八章 碰撞問題	189
§ 48. 概述	189
§ 49. 散射系数	192
§ 50. 动量表象中的解	197
§ 51. 色散散射	202
§ 52. 共振散射	205
§ 53. 发射与吸收	208
第九章 包含許多相同粒子的系統	211
§ 54. 对称态与反对称态	211
§ 55. 排列作为力学变量	215
§ 56. 排列作为运动恆量	217
§ 57. 能级的决定	220
§ 58. 对电子的应用	223
第十章 輻射理論	229
§ 59. 玻色子系集	229
§ 60. 玻色子与振子之间的联系	231
§ 61. 玻色子的发射与吸收	237
§ 62. 对光子的应用	240
§ 63. 光子与原子间的相互作用能	244
§ 64. 輻射的发射、吸收与散射	249
§ 65. 费米子系集	253
第十一章 电子的相对論性理論	258
§ 66. 粒子的相对论性处理	258
§ 67. 电子的波动方程	259
§ 68. 洛伦茲变换下的不变性	263
§ 69. 自由电子的运动	266
§ 70. 自旋的存在	269
§ 71. 过渡到极坐标变量	273
§ 72. 氫原子能级的精细结构	275
§ 73. 正电子理論	279

第十二章 量子电动力学.....	283
§ 74. 沒有物质的电磁場	283
§ 75. 量子条件的相对论形式	287
§ 76. 薛定谔力学变量	290
§ 77. 补充条件	295
§ 78. 电子与正电子	299
§ 79. 相互作用	306
§ 80. 物理的变量	311
§ 81. 理论的困难	315
索引.....	320

第一章 态的迭加原理

§ 1. 量子理論的需要

从牛頓的时代起,經典力学已有不断的发展,并且被应用到力学系統的日益广泛的領域,包括与物质有相互作用的电磁場。一些基础性的思想与支配它們的应用的規律,形成了一个簡洁而优美的方案,使人們不禁要认为,这种方案如果不把它的吸引人的特点全部破坏,是不可能作重大的修改的。虽然如此,現在已发现有可能会建立一种新的方案,称为量子力学,它更适合于描述那些原子尺度內的現象,而且在某些方面,它比經典方案更为优美,更令人滿意。这种可能性是由于新的方案所包含的变化具有十分深刻的性質,而且不与那些使經典力学如此吸引人的特点相冲突,結果經典力学的所有这些特点都能够合并到新方案中去。

实验結果清楚地表明了背离經典力学的必要性。首先,經典电动力学中已知的各种力已不足以解释原子与分子的显著的稳定性,而沒有这种稳定性,物质材料就完全不可能有任何确定的物理性質与化学性質。引入新的假定的力也不能挽救这种情况,因为在經典力学里,存在着一些带普遍性的原理,这些原理对所有各种力都是适合的,但它們却要引起一些直接与观察不相符的結果。举例說,如果使一个原子系統从平衡位置受到任何方式的干扰,再让它不受外界影响,它就会振动,这些振动将影响周围的电磁場;这样,这些振动的頻率就可能用光譜仪观察出来。不管支配这个平衡的力的規律是什么样的,人們总期待能够把这些不同的頻率包括在一个由某些基本頻率与它們的諧頻所組成的方案中。观察的結果却不是这样。相反地,观察到的是,在这些頻率之間有出人意料的新联系,这个联系被称为“光譜学的里茲組合定律”,按照这个



定律，所有这些頻率都能表达成某些譜項之差，譜項的数目要比頻率的数目少得多。从經典观点看来，这个定律簡直是不可理解的。

有人为了克服这个困难而不背离經典力学，也許会假定光譜学上观察到的頻率的每一个都是基本頻率，各有其自由度，而力的規律應該具有使諧頻振动不出現的特点。但是，这样的理論是不行的，即令不考虑它不能解释組合定律这一事实，也还是不行的，因为它直接与比热的实验証据相冲突。經典統計力学使我們能够在振动系集的自由度总数与其比热之間建立普遍的联系。如果假定原子的光譜頻率全部相应于不同的自由度，那么，对任何物質所得出的比热会比观察值大很多。事实上，在普通温度下，观察得到的比热是与仅仅考虑每个原子作为单个整体运动而完全不考虑它的內部运动的理論符合得很好的。

这一点把我們引向經典力学与实验結果之間的新矛盾。为了說明原子的光譜，在原子中肯定应有某种內部运动，但这些內部自由度由于一些經典理論难以解释的原因，对比热沒有貢獻。在与真空中电磁場振动能量有关的問題上，也发现有类似的矛盾。經典力学要求与这种能量相应的比热是无穷大的，而观察到的比热却是有限的。从实验結果得到的一般性結論是，高頻率振动对于比热都沒有作出經典理論所要求的貢獻。

我們可以把光的行为当作經典力学失敗的又一例証。一方面，我們有干涉和衍射等現象，它們只能在波动理論的基础上得到解释；而另一方面，又有諸如光电发射、自由电子对光的散射等現象，这些現象表明，光是由小的粒子所組成。这些粒子称为光子，每一个光子都具有由光的頻率决定的一定的能量与动量，并且它們看来是真正存在的，其真实程度与电子或物理学中已知的其他粒子一样。从未观察到不是整个的光子。

实验已經表明，这种反常行为不是光子所特有的，而是十分普遍的。所有物質粒子都有波动性質，这种波动性質能在适当条件下表現出来。这里我們有經典力学失敗的一个很惊人的而且是普

遍性的例子——不仅是它的运动规律不准确，而且是它的概念不足以给我们提供对原子性事件的描述。

当人们要想说明物质的终极结构时，就不能不背离经典思想，这一必要性不仅可从实验上已确立的事实看出来；而且也可从一般哲学基础上看出来。在物质组成的经典解释中，人们要假定物质是由很大数量的小的组成部分构成的，并且人们要对这些组成部分的行为规律作出假定，从而推导出物质整体的一些规律。但是，这样是不会使解释完全的，因为还没有接触到组成部分的稳定性与其构造的问题。要深入探讨这个问题，必须假定每个组成部分本身又是由许多更小的部分构成，并用这些更小的部分来说明它的行为。对于这样的程序显然是没有止境的，所以，照这样的路线，人们永远不能达到物质的终极结构。只要大与小还只是相对性的概念，用小的来说明大的是没有用处的。因此，必须用一种方法来修改经典思想，这种方法要能给大小以绝对的含意。

问题到此变得重要的是，要记住科学所研究的只是可观察的事物，同时，只有当对象与某种外界影响互相作用，我们才能观察它。这样，观察的动作必然地要伴随着对所观察的对象的某些干扰。当我们观察某一对象时所伴随的干扰如果是可忽略的，我们就下定义说，这对象是大的；而当干扰不能忽略时，这对象就是小的。这样的定义和大与小的普通含义是紧密相一致的。

通常假定，只要仔细些，我们就可以把伴随观察的干扰减少到任意所希望的程度。大与小的概念因而纯粹是相对的，是关联到我们的观察工具的细致程度，也关联到被描述的对象。为了要给大小以绝对的含意（这是有关物质终极结构的任何理论所要求的），我们必须假定：对我们观察力的精细程度和对伴随着的干扰的微小程度有一个限度。这个限度是事物本质中所固有的，观察者方面改进技术或提高技巧，都不可能超越这个限度。如果被观察的对象大到足以使这种不可避免的极限干扰可以忽略，那么，这个对象就是在绝对的含义上是大的，并且我们可以把经典力学应用到它身上。反之，如果这种极限干扰不能忽视，则对象在绝对

意义上就是小的,我們就要用新的理論来处理它。

上述討論的一个結果是我們必須修改我們对因果性的观念,因果性仅对那些未受干扰的系統适用。如果系統是小的,我們不能在观察它时而不产生严重的干扰,因此,我們不能期望在我們的观察結果之間找到任何因果性的联系。我們假定因果性对于沒有受干扰的系統仍是适用的,为描述未受干扰的系統而建立起的方程是一些微分方程,它們表达出某一时刻的条件与后一时刻的条件間的因果性联系。这些方程与經典力学中的方程紧密对应,但是它們只能間接地与观察的結果相联系。在計算观察出的結果时就有不可避免的不确定性出現,一般說來,理論使我們能够算出的只是,当进行观察时能获得某个特定結果的几率。

§ 2. 光子的偏振

在上节里討論了观察所能做到的細致程度的限制,以及因之在观察的結果中引起的不确定性;这些討論并未为建立量子力学提供任何定量的基础。为了这个目的,就要求有一套新的准确的自然規律,其中最基本的、最突出的規律之一是态的迭加原理。我們將通过对某些特例的研究,引出这个原理的普遍表达方式,首先研究由光的偏振所提出的例子。

从实验得知,当平面偏振光用于激发光电子时,电子的发射便有择优方向。这样,光的偏振性質是与它的粒子性質紧密地相联系的,而人們必須把偏振性質归之于光子。举例說,人們必須把在某一方向平面偏振的一束光看成是每一个都是在此方向上平面偏振的許多光子所組成的;而把一束圓偏振光看成是每一个都是圓偏振的許多光子所組成。我們应当說,每一个光子是处于某一偏振态。我們現在必須考慮的問題是,怎样使这些想法适合于已知的事实,这些事实是关于光分解为平面偏振的組分以及这些組分的重新組合。

讓我們举一个确切的例子。假定我們有一束光通过一个方解石晶体,这种晶体有一种性質,即只許垂直于光軸的平面偏振光通

过。經典电动力学告訴我們，对入射光束的任意給定偏振会发生什么情况。如果这个光束垂直于光軸偏振，則它全部通过此晶体；如果它平行于光軸偏振，則它全部不通过此晶体；如果它的偏振面与光軸成一个角 α ，則将有一部分通过，通过的与全部之比为 $\sin^2\alpha$ 。在光子的基础上怎样理解这些結果呢？

我們所建立的图象是：在某一方向平面偏振的光束，是由每一个都在此方向平面偏振的許多光子所組成。对入射光束是垂直或平行于光軸的平面偏振的两种情况，这个图象不引起任何困难。我們只要假定，垂直于光軸偏振的每个光子都无阻碍也无变化地通过此晶体，而平行于光軸偏振的每个光子都被阻止住并被吸收了。然而，在入射光束为斜偏振时却引起了困难。这时每个入射光子都是斜偏振的，这样的光子到达方解石时会出現什么情况，是不清楚的。

关于在一定条件下某一特定光子会发生什么情况的問題，实在是不很精确的。为了使問題精确化，我們必須設想进行与此問題相联系的一些实验，并探寻这些实验的結果将是什么。只有关于实验結果的問題，才有真正的意义，也正是只有这些問題，才是理論物理学所必須考慮的問題。

在我們当前的例子里，明显的实验是用仅含有一个光子的入射光束，然后去观察在晶体背后會出現什么。按照量子力学，这个实验的結果是：有时候人們在晶体背后会找到一整个光子，其能量等于入射光子的能量，而另一些时候，人們找不到任何光子。当人們找到一整个光子时，这个光子将是垂直于光軸方向偏振的。但人們永远不会在背面仅只找到一个光子的一部分。假如重复这种实验很多次，在背后找到光子的次数将是实验总次数乘以 $\sin^2\alpha$ 。这样，我們可以說，光子通过方解石后，在背后出現为垂直于光軸方向偏振的几率是 $\sin^2\alpha$ ，而光子被吸收的几率为 $\cos^2\alpha$ 。对含有大量光子的入射光束，这些几率的数值就給出正确的經典結果。

用这种方法，我們在所有情况下都保留了光子的单个性。然而，我們所以能这样做，只是因为我們放弃了經典理論中的决定論

性質。實驗的結果並不是象經典思想所要求的那樣，由實驗者控制下的各種條件所決定的。事先所能料定的最多是一組可能的結果以及每一個結果出現的幾率。

上述關於單個斜偏振的光子入射在方解石晶體上的實驗結果的討論，回答了全部能夠合理地提出的問題，即當一個斜偏振的光子到達方解石時將出現什麼情況。關於決定光子是否通過的因素是什麼，以及當光子通過時偏振方向是怎樣改變的等問題，是不能從實驗中研究出來的，因而應當被認為是在科學領域之外的。雖然如此，為了使這個實驗結果與光子的其他可能的一些實驗結果聯繫起來，並使所有的結果恰當地納入一個普遍方案，那就還需要作進一步的描述。這種進一步的描述不應當被當作企圖回答科學領域之外的問題，而應看成是將規律公式化，使之簡練地表達大量實驗的結果的一種手段。

量子力學所提供的進一步描述如下：假定可以把對光軸斜偏振的一個光子看成部分地處於平行光軸偏振態，部分地處於垂直光軸偏振態。斜偏振態可以被認為是某種迭加過程應用於平行偏振態與垂直偏振態而得的結果。這就意味着，在各種偏振態之間存在有某種特別的關係，這種關係類似於經典光學中偏振光束間的關係，但是它現在不是應用於光束，而是應用於一個特定光子的各個偏振態。這種關係容許任一偏振態被分解為任意兩個互相垂直的偏振態，或者說，可以被表達為任意兩個互相垂直的偏振態的迭加。

當我們讓光子遇到方解石晶體時我們就是讓它接受一次觀察。我們要觀察它究竟是平行於光軸偏振的，還是垂直於光軸偏振的。做這種觀察的效果也就是強迫光子完全進入平行偏振態，或者完全進入垂直偏振態。它必須來一個突然的躍變，從原來部分地處在每一種態中的情況改變為完全處在其中的某一種態中。它究竟跳到這兩態中的哪一個，是不能預料的，只是由幾率規律支配的。如果它跳入平行態，它就會被吸收了；如果它跳入垂直態，它就通過了晶體，而在另一邊出現，保留着這種偏振態。