

高等学校教学参考书

量子力学

的基本概念

关 洪



高等学校教学参考书

量子力学的基本概念

关 洪

高等教育出版社

内 容 简 介

本书专门讲述量子力学的基本假设和基本原理,系统地反映了近年来在国际上影响较广的量子力学统计解释的观点,以及作者在这方面所做的一些工作,同时还介绍了量子力学的基本概念从创始直到近年的发展情况。

书中在整理出一套为量子力学的数学程式及其与实验相比较所必需的简明的基本假设之后,仔细地分析了在量子力学建立初期所提出的一些原始观念的适当性,指出象“波动-微粒二象性”和“互补原理”等等,并不是量子力学理论体系所必需的陈述。书中着重深入阐述态叠加原理,波函数的统计诠释和不确定关系的物理内容及其本质意义,把它们看成是量子力学基本假设中所包含或者可以由此导出的结论。此外,书中还讨论了态的概念和经典近似等问题,并且介绍了近一二十年来一些专门设计用来检验量子力学原理的实验工作的进展情况。

本书既照顾到初学者的水平,又为希望了解进一步情况的读者提供了详细的参考文献目录,因此无论对有关教师和学生还是对自然科学工作者和哲学工作者,都是一本重要的参考书。

责任编辑:李松岩

高等学校教学参考书

量子力学的基本概念

关 洪

清华大学出版社

新华书店总店北京科技发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 9 字数 210 000

1990 年 8 月第 1 版 1990 年 8 月第 1 次印刷

印数 0 001—1690

ISBN 7-04-002980-4/O·933

定价 2.40 元

序

量子力学所引入的微观世界的物理规律超出了人们日常生活经验的范围。这主要是宏观世界的因果规律不再直接适用于微观世界。新的因果规律要求波函数只代表几率振幅，从而引起了物理学中长期存在的争论。这争论中的不同观点，开拓了人们的视野，丰富了人们的直观思维，为物理学的进一步发展创造了有利的条件。它是有生命力的。任何人都不应对它作出僵化的教条式的断语。

这本书客观地向读者介绍了争论中不同的论点和意见，我认为是一本有益于培养学生独立思考能力的参考书。

胡 宁

一九八七年国庆日

前 言

道。可道。非常道。

名。可名。非常名。

——《老子》

象任何一门物理学理论一样，量子力学一方面包含了一套怎样进行计算的数学方法，以及把计算结果同经验事实相联系的规则；另一方面，它也包含着人类对自然规律的观念上的认识。本书专门讨论量子力学的基本概念，亦即是专门讨论为进行计算和同实验比较所必须用到的基本假设和概念，以及对其中物理内容的解释。

也许，对于大多数学生说来，知道怎么样运用量子力学去解算问题已经足够了。不少物理学家认为，只要计算结果相同，即使存在着观念上的原则分歧也是无所谓的。然而，那些多思好问的学生，必定不满足于单纯掌握计算的技巧；而担任有关课程的教师，更是为各种教科书里对量子力学基本概念五花八门的陈述而伤透脑筋。还有，那些把量子力学看做人类智慧结晶的物理学界内外的学者们，也在力图弄清楚这门理论的真正含义。本书主要就是为这几部分读者而写的。历史毕竟已经多次证明了，在关于物理学基本概念的探讨中，往往孕育着进一步发展的幼芽。因此，这方面的努力终究不会是白费的。

N. Bohr 曾经讲过，第一次听说量子理论而不感到震惊的人，必定是一点儿也没有听进去。的确，在现代科学的基本理论里，最难以理解而又争议最多的，恐怕就数量子力学了。这主要是因为，

它的基本概念如此违背日常生活的经验，又远远超出经典物理学的框框。当量子理论的创始人建立它的时候，他们熟悉的只有经典物理学，自然免不了使用一些经典概念来解释量子理论。这就好象在十九世纪下半叶，当人们建立电磁学理论时，他们手上只有经典力学的武器，也不可避免地试图通过流体力学或者弹性力学的模型去理解电磁现象一样。Maxwell 开始也提出过复杂的以太机械模型，并由此导出后来以他的姓氏命名的方程组。难能可贵的是，Maxwell 不久就挣脱了经典力学的束缚，把自己的以太模型放在一边，主张他的电磁理论是一种新的动力学，终于使电磁场取得了独立存在的地位。

遗憾的是，量子力学从借助经典概念的始创阶段到建立独立的概念基础这一过程，比较起来要慢得多，也曲折得多。至今在许多教科书和有关文献里，对于量子力学原理的陈述，仍然充满着过时的和不必要的陈旧概念。Dyson 曾经评论道*，上世纪末的物理学家们曾经花费了三十年的时间，从机械模型的图象转变到作为独立实体的电磁场概念。这是因为，满足波动方程的电磁场，是一种深层的抽象概念，不如表层的可以直接观察的机械运动那样容易理解。后来，人们的观念逐渐起了变化。到了今天，虽然我们或许不能一下子把 Maxwell 方程组全写对，但却认为电磁场的概念是容易把握的，完全不需要通过机械模型去理解它们。

Dyson 相信，总有一天，会把量子力学的基本概念教给中学生，并且使公众熟悉它们。他还说，学生学习量子力学一般可以分为三个阶段。第一阶段主要学习计算的技巧；第二阶段则为其中的物理解释而烦恼，第三阶段是，经过了痛苦和困惑之后，终于放弃了运用经典概念理解量子图象的努力，幡然大悟地说：“我现在

* F. J. Dyson, *Sci. Am.*, Sept. 1958.

明白了，这里面没有什么要弄明白的。”Dyson 还说，按照这一趋势，应当是“新的每一代学生学习量子力学都比他们的老师学得容易些。”以至于“最后……学生们会一开始就将量子力学当做一种简单而自然的思考方式来接受。”

Dyson 是在量子力学建立起来三十年之后说这番话的，那个时候本书作者正在学习量子力学。如今又过了三十年，情况好象还没有发生根本的改变。尽管如此，进步仍然是有的。例如，三十年前的理论力学课程里，还很强调要弄通流体力学的速度场描写，好为电动力学的学习打下基础；而且必定要讲到 Poisson 括号，来为量子力学做准备。现在，由于课程的精简，这些做法都不再必要了。今天的学生，可以先掌握电磁场理论再去学流体力学，也可以只熟悉量子力学里的对易关系而不知 Poisson 括号为何物。时代毕竟变了。

再举一个我们这代人亲身经历的例子。在晶体管初露头角的那一段时期里，讲晶体管电路的书籍往往拿它的集电极、基极和发射极，分别比喻作电子管的板极、栅极和阴极。虽然两者的工作机制大不相同，但这种对应的确有助于原来对电子管很熟悉的读者过渡到晶体管的领域。可是，过了十年八年，情况发生了逆转。新一代青少年，一开始就接触晶体管，他们也许从来没有见过一个普通的电子管。这个时候，再象以前那么讲就不合适了。现在早就应当反过来，从晶体管电路过渡到电子管电路，才容易使学生接受。

本书的目的，就是试图从现代的观点，把量子力学当做一门独立的动力学理论，为它给出一套前后一致的、充分而又必要的概念体系。在这一体系里，突出强调了几率幅描写的根本意义，而摒弃了波粒二象性之类的早期论证。在一定程度上，本书的讲法反映了近二十年来在国际物理学文献里占着愈来愈大的优势的量子力

学统计解释的基本看法。

鉴于一般教科书主要介绍量子力学的数学程式和它的应用，很少深入展开对基本概念的讨论。对这方面有兴趣的读者，即使找过几本名著来看，也很难得到满足。另一方面，关于测量理论和量子逻辑等论题的为数不少的专著，却又显得高不可攀而很少有人问津。本书希望能够填补中间层次这个空档，给出一本集中讨论量子力学概念问题、比教科书深入而又面向广大教师和学生等读者的参考读物。

由于本书所讲的许多内容，同好些教科书的传统说法大异其趣，一些不熟悉这方面讨论进展情况的读者，很可能会斥之为异端邪说而不屑一顾。因此，为了使那些在这方面曾经怀过或者仍然抱着求知欲望的读者不至于掩卷而去，书中不惮其烦地广征博引，大量摘取散见于各种文献中的一些著名和不怎么著名的学者公开发表的论述，以证明有关论题早已经不是什么禁区，起码是可以讨论的。然而，我们不是简单地罗列各种不同的观点。读者不难发现，作者是有明显偏爱的。我们说过，本书的目的在于整理出一套比较简单干净的概念体系。因此，所引用的材料都只是作为旁证而不是信条。同时，本书的主要目的不在于批评或者宣扬某一学派的观点，而只是说出我们认为适当的看法。因此，如果有一些读者看过之后，惊呼这是对哥本哈根学派离经叛道之作，或者有另一些读者相反地认为不过是拾哥本哈根学派之牙慧，对于这些可能的议论，作者将不予置辩。

篇首所引语录，是《老子》里开宗明义的两句话。近读汤川秀树的回忆录^{*}，发现他对这两句话有一种新的解释，使我很受启发。仿照汤川的诠释，我把这两句话理解成：

* 汤川秀树，《创造力和直觉——一个物理学家对于东西方的考察》，周林东译，复旦大学出版社（1987）。

自然的规律和秩序是可以讲述清楚的，但它们不是通常意义的规律和秩序。科学的术语和概念是可以给予称呼的，但它们不是通常意义的术语和概念。

我觉得，这两句话对本书所讨论的问题，确是最贴切不过了。微观世界的规律是可以讲清楚的，但它不是我们习见的宏观世界的规律。量子力学的概念是可以弄明白的，但它不是我们习用的经典物理学概念。这就是在本书里贯彻始终的一条原则。

为了照顾到第一次学习量子力学的学生和物理学界以外的读者，我们把起点放低一些，主要只讨论非相对论性量子力学，或者说相应于初等量子力学课程里涉及的概念内容。虽然我们不深入展开对多体问题、相对论性电子理论和量子场论的详细讨论，也已经包括了整个现代量子理论里最主要的基本概念。出于同样的考虑，我们避免一开始就追求使用严格的数学工具，而是一直把物理内容的讨论放在第一位。当然，在叙述基本概念的同时，必定要提到一些比较具体的规定，一些比较细致的数学论证，以及在各个论题上的进一步发展。但是，由于篇幅关系，我们不可能对这些枝节问题一一详细说明，一般只限于指出问题所在，并且列出有关的文献篇目，有兴趣的读者可自行参阅。

本书第一章是绪论。第二章陈述了量子力学的基本假设。第三章到第五章分别讨论了态函数的几率诠释、态叠加原理和不确定关系，以及它们同基本假设之间的关系。第六章再回过头来讨论态的概念和经典对应。这几章的全体构成了量子力学的完整的概念体系，其中每一章的叙述都有相对的独立性，可以按照需要单独抽出来阅读。

关于量子力学原理，争论的题目太多，而且其中大部分都长期停留在纯观念讨论的水平上。幸而，近二十多年来，已经提出了

一些专门设计来检验量子力学基本原理的实验，并且其中几个这样的实验已经取得了确定的结果。我们在最后的第七章里，简单介绍 Bell 不等式，A-B 效应，中子干涉和光的相干性等几方面引人瞩目的进展。这些新近的实验结果，必将促进我们对量子理论基本概念的深入理解。

本书从内容到形式都不可能是十全十美的。我们也没有刻意追求逻辑上的完善。书中的叙述肯定有遗漏、有重复，还有多余和失误，也可能有前后矛盾之处。我们决不认为本书的讲法是什么不可更动的定论。作者只是希望，本书有助于读者开阔眼界，活跃思想，对这方面争论的症结所在得到了解，并且看到进一步钻研的方向。

书中每一章的公式和参考文献分别按出现先后顺序编号。如引述其他章里的公式和文献，则有两个编号数字，中间用圆点分开，前一数字是章数，后一数字是该章内的顺序号数。如(2.2)式指第二章(2)式，[1.10]指第一章文献[10]等。全书插图不多，不再分章而统一编号。

书中正文所引外国人名，除日本人名尽量用原文汉字外，一般都使用汉语拼音字母写出。对于拉丁语系民族的姓氏，实际上即按国际惯例，用原文写出。对于苏联人名和未查到汉字的日本人名，则使用惯常的拉丁字母拼音。但对于由人名派生的词汇，则用汉语译出，如 Newtonian mechanics 作“牛顿力学”，Hermitian operator 作“厄密算符”等。

书中所引外文文献内容，凡找得到原著的，尽量按原文译出和核对；只找到中译文的，按中译文引用。因此，本书引文如有与已出版的中译文不符之处，均系本书作者的重译或者改动。

作者衷心感谢胡宁教授欣然为本书作序，感谢郭硕鸿教授对本工作的支持。

作者还感谢中山大学教务处的支持。

关 洪

1987 年 12 月于广州

目 录

序.....	1
前言.....	1
第一章 绪论.....	1
1.1 量子力学的成就.....	1
1.2 量子力学的解释.....	4
1.3 量子力学的教学.....	8
1.4 量子力学和哲学.....	13
第二章 量子力学的基本假设.....	20
2.1 引言.....	20
2.2 量子力学的基本假设.....	26
2.3 进一步的讨论.....	40
2.4 其他.....	55
第三章 从波动-微粒疑难到态函数的几率诠释.....	62
3.1 引言.....	62
3.2 de Broglie 波和 Schrödinger 的物质波.....	67
3.3 态函数的几率诠释.....	73
3.4 微观现象的统计性.....	80
3.5 几率幅的意义.....	97
3.6 小结.....	105
第四章 态叠加原理.....	110
4.1 经典物理学中的叠加原理.....	110
4.2 量子力学中的叠加原理.....	116
4.3 态叠加原理的非经典特征.....	123
4.4 态叠加原理的直接例证.....	133
4.5 态叠加原理的物理要求.....	146
第五章 不确定关系.....	154

5.1 不确定关系的提出	154
5.2 不确定关系的例子	160
5.3 不确定关系的证明	165
5.4 所谓“同时测量”	173
5.5 对 γ 射线显微镜的再考查	182
5.6 关于时间-能量不确定关系	189
第六章 态的概念	201
6.1 态的制备	201
6.2 态和测量	208
6.3 波包和经典近似	219
6.4 再谈经典对应	226
第七章 新近的一些进展	235
7.1 Bell 不等式及其检验	235
7.2 Aharonov-Bohm 效应	244
7.3 中子干涉术	251
7.4 光的相干性	259

第一章 绪 论

1.1 量子力学的成就

非相对论性量子力学是在本世纪二十年代中期建立起来的一种物理学理论。在这个基础上,不久又陆续发展了相对论性量子力学和量子场论。为了与本世纪初叶的旧量子论相区别,我们把上面所讲的这些理论统称为量子理论。本书主要讨论非相对论性量子力学中的基本概念,然而它们同时也在相对论性量子力学和量子场论中具有根本的意义,虽然后面那些更高深的理论也许还需要一些深入一步的基本概念。所以,可以认为本书的主要内容适合于整个量子理论。然而,作为初步的讨论,本书只在个别章节里提到相对论性量子力学和场的量子化等有关问题,而不做详细讨论。

大家知道,量子力学理论起初是为了解决原子光谱问题的需要而发展起来的。例如,氢原子光谱(Balmer系)公式的动力学推导,以及在电场和磁场影响之下这些谱线的分裂结果,乃是关于量子力学最早的令人信服的有力证据。后来,又相继解决了氦原子、氢分子等的能级以及各种光谱线强度的计算等等,为整个原子和分子光谱以及化学键的理论打下了坚实的基础。

可是,由于现代光谱测量技术的不断改进,很快发现了非相对论性量子力学的一些缺点。就拿最简单的氢原子来说,先是发现了对同一主量子数 n 的能级的精细结构,即按不同总角动量 j 的

能级分裂,这一事实很快在Dirac的相对论性电子理论里得到圆满解释。后来,又发现了更进一步的“Lamb 移动”,即解除了对总角动量 j 的能级简并。例如,对 $n=2$ 的 $P_{1/2}$ 和 $S_{1/2}$ 两子能级之间约有 $7.0 \times 10^{-7} \text{eV}$ 的裂距,折算成相应的(微波)辐射频率的精确测量值是^[1]:

$$1057.862(20) \text{MHz},$$

括号内的若干位数字表示测量值最后若干位数字的误差。这一能级移动在量子电动力学里得到很好的解释。

据说,在光谱学实验里最精确的测量数据,要算氢原子基态 ($n=1$) 的超精细结构(核自旋 $F=0$ 同 $F=1$ 之间)的裂距了,它的频率数值是^[2]:

$$1420.405751768(1) \text{MHz}.$$

可是,这一长串十三位有效数字,目前只有前五六位数字得到理论上的验证。如果我们注意到,精细结构常数 $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$ 最近公认的测量值^[3]

$$\alpha^{-1} = 137.03604(11)$$

的精确度只有 10^{-6} 的数量级,上面所讲的这种理论预言值同实验测量值两者有效数字位数的重大差别,就可以得到理解了。可见,即使氢原子问题,也不是那么简单的。

量子力学可以说明原子的不同能级之间发生跃迁的选择定则,并且从跃迁几率的计算得出光谱线的强度以及有关状态的平均寿命或衰变宽度等结果。虽然理论值的精确度不象上面两个例子那么高,但也足以对付一般不超过三四位有效数字的这方面的实验数据了。

至于原子核和粒子物理学,它们一开始就建筑在量子力学和量子场论的基础之上,在这些领域内的一切成就,都应归功于量子理论。

此外,在凝聚态物理学等方面,也早已广泛地运用了量子理论。在这方面,量子力学除了作为有效的基础理论方法之外,还陆续发现了诸如超导、超流、Josephson 效应和量子 Hall 效应等,直接在宏观水平上显示出量子行为的“宏观量子现象”^[4]。至于量子力学在化学、生物学等学科的成功应用,就不一一列举了。

以上所提到的,多是关于束缚态的量子理论。束缚态是系统能量较低因而只能局限在一定空间区域内的状态。相反的情况是散射态,那是系统的不同成员可以分离到无限远的情形。量子理论可以计算出各种散射过程的总截面或反应率,以及不同的微分截面,即散射产物对于不同的能量、出射角度和自旋(极化)的分布等等。

现代物理学的发展,使散射问题所占的比重变得愈来愈大。人们耗费巨大的财力物力,建造一台又一台的高能加速器,为的就是通过对各种散射过程的研究,不断探索物质之间的相互作用。甚至化学家们也已经开始运用散射过程来研究化学反应的性质。李远哲等在这方面进行的分子束实验,新近获得了最具权威性的承认——1986 年 Nobel 化学奖,就是一个明证。

在物理学方面,一个很好的例子是电子反常磁矩的存在。大家知道,Dirac 的相对论性电子方程,预言了电子的内禀磁矩是一个 Bohr 磁子。后来,发现了电子磁矩比 Dirac 值约大 $1/1000$,这多出来的就是“反常”部分。现在,电子磁矩的精确数据,就不是来自束缚态,而来自对自由电子的测量。它的最新实验值是(以 Bohr 磁子为单位)^[5]

$$1.001\ 159\ 652\ 209(31).$$

根据量子电动力学,即处理电磁相互作用的量子场论方法,计算出的电子磁矩是^[6]

$$1.001\ 159\ 652\ 460(127)(43).$$

上述数据后面第一个括号，表示由所采用的精细结构常数的新观察值 $[\alpha^{-1}=137.035963(15)]$ 的误差($\approx 10^{-7}$)所产生的误差；第二个括号表示计算过程本身所产生的误差(实际上，测量和计算的都只是反常磁矩部分)。我们看到，观察值和理论值在两个标准差的范围内相符合。¹⁰电子反常磁矩在 10^{-7} 量级上的符合，被认为是现代物理学理论的最精确检验之一。尽管如此，物理学家们仍然为这组数据最末两三位数字的差异绞尽脑汁，希望找出合理的说明。

以上扼要叙述了今天的量子理论运用的范围和它能解决哪些类型的问题。至少，这些就是在一般的量子力学教科书里所涉及的主要内容。微观粒子的行为必须用量子理论来描写，而宏观物质的性质又是由组成它们的微观粒子的结合和运动决定的。所以，可以毫不犹豫地讲，原则上整个物理学都属于量子物理学，包括量子统计物理学在内。虽然，对于复杂的系统，还有许多细节需要弄清楚，有效的计算技巧也需要不断改进，但基本的理论工具无疑就是量子动力学，量子理论的基本概念就是我们了解物理世界的钥匙。

除了量子力学在物理学各分支的应用外，还进行着对量子力学理论体系本身的研究。除了其中所用到的数学方法以外，主要指对量子力学基本原理和基本概念的探讨，这些正是本书要讨论的主要内容。这种讨论并不是空洞的纸上谈兵，已经设计了好些实验来检验量子力学的一些基本假设是否正确，其中有些试验已经得出了比较明确的结果^[7]。所以，我们在对量子力学理论体系进行一般讨论的同时，还着重介绍近年来完成的这一类实验的若干进展。

1.2 量子力学的解释

上一节扼要地叙述了量子力学的运用范围和它所取得的成