

量子理论

[美] 玻 姆 著

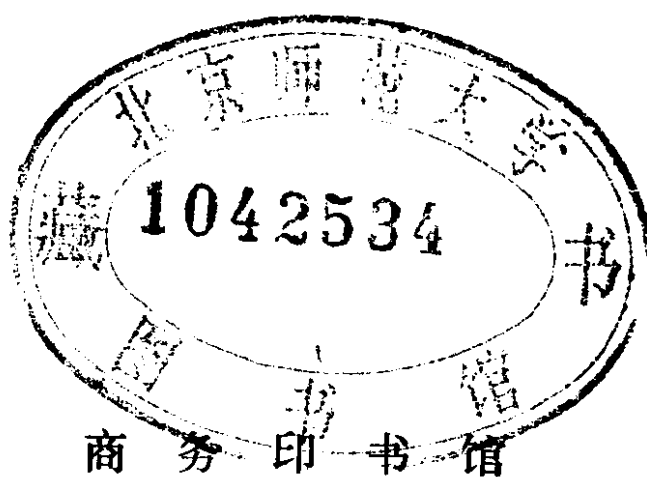
商 务 印 书 馆

量子理论

[美] 玻 姆 著

侯 德 彭 译

71.11.107



1982·北京

David Bohm
QUANTUM THEORY

Copyright 1951

Reprinted 1954

by

Prentice-Hall Inc.,

New York

量 子 理 论

〔美〕玻 姆 著

侯 德 彭 译

商 务 印 书 馆 出 版

(北京王府井大街 38 号)

新华书店北京发行所发行

北京第二新华印刷厂印刷

统一书号：2017·250

1982 年 5 月第 1 版

开本 850×1168 1/32

1982 年 5 月北京第 1 次印刷

字数 609 千

印数 1—8,800 册

印张 26 1/4

定价：(精装)3.85 元

54/1117/07

译者前言

这本关于非相对论性量子理论的书，我在五十年代就已经开译了，当时距离此书的出版时间不过几年功夫。六十年代初，此书已经译成，后来几经修改，正待付印时，“文化大革命”便已开始，因而未能出版。近年来翻阅旧稿，特别是译者多年来在讲授量子力学课程时深切感到，虽然此书出版年代已久，但由于它在论述上的某些特点，觉得将译稿整理出来，贡献给初学量子理论的读者和自然辩证法的工作者，还是有一定参考价值的。

本书著者 D·玻姆是美国物理学家，生于一九一七年。他原在美国普林斯顿大学工作，后因特务机关迫害，被迫离开美国，先后在巴西、以色列工作。现在英国任教。

玻姆不仅以研究量子力学基础问题著称，而且在等离子体理论、多体量子理论和固体理论等方面，也有相当贡献。在量子力学基础研究领域，作者提出了不少独创性的见解。他在本书中曾论证了隐变量理论不可能存在，但在本书出版后不久他便改变了观点。1951年，玻姆首先提出了量子力学的隐参数理论的一个具体模型，企图将量子理论纳入决定论和古典因果论的轨道。随后不久，他和其他一些人又陆续提出了各种不同形式的隐变量理论。近年来，人们曾做了一系列实验，这些实验虽然大多不利于甚至否定了某些隐变量理论的成立，但是，关于隐变量理论的研究无疑还是会加深人们对量子理论的理解的，从而有助于理论的进一步发展。

玻姆这本书较之其它的量子力学著作说来，是有其新颖独特

之处的。本书对量子理论的论述深入浅出,语言生动,逻辑性强,推理严密清晰。书中特别注重物理概念和物理内容的阐述,而尽量避免使用较高深的数学。本书每引入一个新的量子理论概念时,都紧密联系着经典理论来详尽分析了它的产生和发展。这些特点,对于初学量子力学的读者说来,都是极其有益的。

本书还有一个重要特点:全书都是密切结合着当代物理的哲学问题来介绍量子理论的。正如作者所说,本书主要是根据量子力学中的所谓“哥本哈根学派”的思想来写的。本书对于系统地了解这个学派对量子理论的解释以及从中所得出的哲学结论,极有帮助。因此,它对于自然辩证法工作者或对物理学中的哲学问题有兴趣的读者,也很有参考价值。

本书也有些美中不足之处,例如有些地方的论述稍嫌冗长烦琐,有些用词或用语不那么常见通用。

译者在翻译本书时,曾力求保持原文风格,但错误和欠妥之处,恐仍在所难免,尚希读者鉴谅。最后,有些技术问题应当在此说明一下。书中有些符号,例如表示电场强度或磁场强度的符号,由于印刷技术上的原因,未能按常规印成粗体或冠以箭头,而只能印成了花写体,希望读者阅读时注意识别。

译者

1981.6

序

量子论是物理学家为了正确地说明范围极其广泛的实验现象而进行的长期的、有成效的努力结果，这些实验现象是以前的经典理论甚至不能着手去解释的。但这并不是说，人们已经普遍认识到，量子理论不仅使得科学知识的内容有了根本变化，而且也使得用来表示这些知识的基本概念有了根本变化。经典理论总是使用一些比较直观的、容易想象的概念，这与量子理论最初发展起来的十分抽象的数学形式之间有着巨大的差别。这个巨大差别可能就掩盖了上述基本概念变化的真正深度。这个差别是如此之大，以致不少物理学家都得出结论说，物质的量子性就意味着它们不可能用通常的想象来理解，剩下的只是一种自洽的数学形式体系，它能以某种不可思议的方式正确地预言实际实验的数字结果。然而，随着量子理论解释的进一步发展（这首先是尼·玻尔的工作结果），终于有可能利用一些比较定性、比较直观的概念来表示量子理论的结果了，但这些概念与经典理论中的概念在性质上是完全不同的。本书的主要目的就是要建立量子论的这种比较初级的表述形式。

新的量子理论概念的真正内容将通过全书加以阐述，这主要是在第六、七、八、廿二和廿三各章中进行，但我们这里可以简要地提一下几个最重要的概念变化。第一，由于引用了一系列不可分的跃迁来描述运动，从而根本改变了精确确定的连续轨迹这个经典概念。第二，经典理论中的严格决定论，被因果律仅作为一种近似的和统计趋势的概念所代替。第三，基本粒子具有“内

在的”；不变的性质这一经典假定，被如下的假定所代替：它们可能表现得象是波，也可能表现得象是粒子，要看它们与周围环境的关系如何。这三个新概念应用的结果，打破了隐藏在我们许多通常语言和思想方法背后的一个基本假定，这个基本假定就是：世界能被正确地分析成一个个不同的部分，其中每个部分都是独立地存在着，但它们按照严格的因果律相互作用而形成整体。实际上，按照量子概念，世界是作为一个统一的、不可分割的整体而存在的，其中，即便是每个部分“内在的”性质（波或粒子），也在一定程度上依赖于它和周围环境的相互关系。但是，只有从微观（或量子）尺度看来，世界各部分不可分割的统一性才产生有意义的结果，而从宏观（或经典）尺度看，这些部分的行为则在很高的近似程度上表现得它们好象是完全独立地存在着。

作者本来的目的，是想要通过全书采用非数学的形式来介绍量子理论的基本概念。但是经验表明，为了用比较明确确定的形式表示出这些观念，并且指出量子理论中的一些典型问题如何能得到解决，一定的数学还是必要的。因此本书所采取的总方案是，除了基本上定性地从物理方面介绍基本原理外，还补充了许多数学处理相当详细的特殊应用。

依照上述总的方案，我们将特别着重阐明（主要是在第一编中）如何能从先前的经典理论出发，逐步通过那些导致量子理论代替经典理论的实验事实和理论推理，很自然地把量子理论推演出来。这就避免了要用一整套抽象的数学公设引进量子理论的基本原理，因为抽象的数学公设只有通过基于它们所作的复杂计算碰巧与实验相符，才能被证明是合理的。虽然本书所采取的上述处理方法从数学上说也许不如取公设的途径那么明朗简洁，但是它有三个优点。第一，它能更清楚地说明为什么需要这样一种根本崭新的理论。第二，它能使理论的物理意义更清楚。第三，其概

念结构不那么死板，以致当我们不能马上得到与实验完全相符的结果时，可以比较容易地看出如何对理论作一些小的修正。

虽然量子理论定性的和物理的阐述主要是在第一编和第六编中进行，但通贯全书作了系统的努力，以求用定性的和物理的语言解释各种数学演算结果。而且，我们希望在数学上已经作到充分简化，使读者能掌握推理的一般路线，而毋需在数学细节上花费太多时间。最后应当声明，本书相对地说来不那么着重于数学，其目的并不是想要减少为了彻底掌握理论所必需的思考；相反的，我们希望读者由此得到启发而更多地思考，从而使自己具备一个总的观点，引导自己在这个诱人的领域中进一步进行阅读和研究。

本书相当一部分材料源出于奥本海迈教授在伯克利 (Berkeley) 市加利福尼亚大学所作的一系列关于量子理论的演讲中的评论，以及皮特教授有关这些演讲的部分笔记。尼·玻尔所作题为“原子论和自然界的描述”的一系列演讲，在提供本书的一般哲学基础方面有着决定的重要性，这种哲学基础是为了合理地理解量子理论所必需的。作者在普林斯登大学与师生们进行的许多讨论，对于澄清本书的阐述方式很有帮助。特别是威特曼博士，他对于澄清第二十二章关于测量的量子理论的讨论，曾给予重要协助。在写作本书手稿时，作者的 1947 年和 1948 年的量子理论班的成员们完成了很有价值的工作，他们在数学上和推理上进行了校核。最后，作者对维恩斯坦表示谢意，他校阅了本书手稿，提出了批评，并且提出了许多很有用的建议；作者也要对施密德表示谢意，他对本书手稿作了编辑加工，并且校阅了校样。

D. 玻姆

目 录

序.....	1
--------	---

第 一 编

量子理论的物理表述形式

第 一 章	量子理论的起源.....	5
第 二 章	早期量子理论的进一步发展.....	27
第 三 章	波包和德布罗意波.....	70
第 四 章	几率的定义.....	96
第 五 章	测不准原理.....	118
第 六 章	物质的波动性与粒子性.....	138
第 七 章	关于量子概念的总结.....	167
第 八 章	建立物质量子本性的物理图象之尝试.....	171

第 二 编

量子理论的数学公式

第 九 章	波函数, 算符和薛定谔方程.....	207
第 十 章	涨落, 相关关系和本征函数.....	238

第 三 编

对简单系统的应用, 量子理论 公式的进一步推广

第 十 一 章	方形势波动方程的解.....	277
第 十 二 章	量子理论的经典极限, WKB 近似	319

第十三章	谐振子.....	357
第十四章	角动量和三维波动方程.....	374
第十五章	径向方程的解, 氢原子, 磁场的效应.....	405
第十六章	量子理论的矩阵表述形式.....	438
第十七章	自旋和角动量.....	469

第 四 编

薛定谔方程的近似解法

第十八章	微扰理论, 含时间和不含时间的微扰理论.....	493
第十九章	简併情况下的微扰理论.....	561
第二十章	突变扰动和浸渐扰动.....	602

第 五 编

散 射 理 论

第二十一章	散射理论.....	619
-------	-----------	-----

第 六 编

测量过程的量子理论

第二十二章	测量过程的量子理论.....	705
第二十三章	量子概念和经典概念之间的关系.....	754
索引		760

第 一 编

量子理论的物理表述形式

现代量子理论有两方面的特点。首先，它所包含的一套物理观念与我们的许多日常经验完全不符，而且也与宏观领域中的大多数物理实验完全不符。其次，把这个理论应用到甚至最简单的例子上，所需要的数学工具也比经典物理中相应问题所要求的复杂得多。结果往往有一种趋势，把量子理论说成是与它在应用中所出现的数学问题分不开的。这种看问题的方法，就好比把牛顿运动定律当作微分方程理论中的问题来向初学物理的学生介绍一样。本书特别着重于阐述基本的物理原理，这些原理不仅在我们需要把物理概念应用于新问题时有用，而且在我们不想进行详细演算而希望预知数学解的一般性质时也是有用的。为了获得复杂问题的定量结果所必须的特殊数学技巧，大部分应该在数学课或者有关量子理论数学的特殊课程中去阐述。然而，要全面阐述量子概念而不用到傅立叶分析，似乎是不可能的。因此我们预先假定读者已经相当熟悉了傅立叶分析。

在本书第一编中，我们从经典理论和某些导致量子理论代替经典理论的特殊实验出发，特别注意阐述量子理论发展的步骤。这些实验不是按照历史顺序来陈述，而是按照所谓逻辑顺序来陈述的。按照历史顺序陈述会带来许多容易引起混乱的因素，可能掩盖了量子理论的内在统一性。本书介绍实验发展和理论发展的

方式，就是要着重指出量子理论的这种内在统一性，并说明每个新的发展步骤都是直接以实验为依据，或是从先前的步骤逻辑地推演而来。这样，量子理论就不会显得是一种离奇的、有些随意的约定，这种约定只有在其抽象的数学演算结果碰巧与实验相符时才能被证明是合理的。

为了使理论的阐述在初学者看来不太抽象，我们将对量子理论和原有经典理论之间的关系作出完整的说明，这是本书的主要部分。凡有可能，我们尽量采用简单的物理语言来阐明量子理论的意义。此外，第一编的最后一章中将指出，在广大的日常经验领域中，我们所不断使用的思维方法更加接近于量子理论概念，而不是接近经典概念。该章还要详细讨论量子理论的某些哲学含义，并指出这将导致我们的世界观发生重大的改变（与经典理论所提供的世界观相比）。

读者将看到，全书分散布置了许多习题。这些习题应当当作正文部分来阅读，因为我们常常要直接应用这些习题的结果来阐述物理概念。通常，毋需把这些习题解出来就能理解其结果的意义，但我们还是力劝读者设法解出它们。把习题分散在全书的主要好处，是使读者能更具体地思考刚刚讨论过的问题，以促进他对问题的理解。

补充参考书目

下列补充参考书目对读者极有帮助，并且在本书各编中将被引用：

Bohr, N., *Atomic Theory and the Description of Nature*.
London: Cambridge University Press, 1934.

Born, M., *Atomic Physics*. Glasgow: Blackie & Son, Ltd., 1945.

Born, M., *Mechanics of the Atom*. London: George Bell &

Sons, Ltd., 1927.

Dirac, P. A. M., *The Principles of Quantum Mechanics*. Oxford: Clarendon Press, 1947.

Heisenberg, W., *The Physical Principles of the Quantum Theory*. Chicago: University of Chicago Press, 1930.

Kramers, H. A., *Die Grundlagen der Quantentheorie*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1938.

Mott, N. F., *An Outline of Wave Mechanics*. London: Cambridge University Press, 1934.

Mott, N. F., and I. N. Sneddon, *Wave Mechanics and Its Applications*. Oxford: Clarendon Press, 1948.

Pauli, W., *Die Allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik*. Ann Arbor, Mich.: Edwards Bros., Inc., 1946. Reprinted from *Handbuch der Physik*, 2. Aufl., Band 24. 1. Teil.

Pauling, L., and E. Wilson, *Introduction to Quantum Mechanics*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1935.

Richtmeyer, F. K., and E. H. Kennard, *Introduction to Modern Physics*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1933.

Rojansky, V., *Introductory Quantum Mechanics*. New York: Prentice-Hall, Inc., 1938.

Ruark, A. E., and H. G. Urey, *Atoms, Molecules, and Quanta*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1930.

Schiff, L., *Quantum Mechanics*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1949.

第一章 量子理论的起源

瑞利-秦斯定律

§ 1. 绝对黑体的平衡辐射。就历史来说，量子理论的产生是由于人们企图说明空腔中电磁辐射的平衡分布。所以我们一开始将简略地描述一下这种辐射分布的特征。辐射能量发自空腔壁，腔壁连续发出具有各种可能频率和方向的电磁波，其发射率随温度的升高而迅速增大。但空腔中的辐射能量并不随时间无限制地增大，因为发射过程将为吸收过程所补偿，而后者进行的速率与空腔中已有的辐射强度成正比。在热力学平衡状态下，频率在 ν 到 $\nu + d\nu$ 范围内的能量 $U(\nu)d\nu$ 由下一条件决定：腔壁发射这一频率的速率与吸收这一频率的速率相等。实验上和理论上都已证明^①，在达到平衡后， $U(\nu)$ 仅与腔壁的温度有关，而与作成腔壁的材料及其结构无关。

为了观测这种辐射，可在腔壁上开一小孔。当此小孔与空腔的大小比较起来非常之小时，它所引起的空腔中辐射能量分布的变化可以忽略不计。不难看出，这时从小孔发出的每单位立体角内的辐射强度是 $I(\nu) = \frac{c}{4\pi} U(\nu)$ ，式中 c 为光速^②。

① Richtmeyer and Kennard. (参看第 3 页参考书目)。

② 这个公式的推导以及关于绝对黑体辐射的更完全的说明，可参看 Richtmeyer and Kennard。“绝对黑体”这个名称的产生，是由于从这种空腔小孔发出的辐射和来自一个完全黑色物体的辐射相同。

测量表明,在一定温度下,函数 $U(\nu)$ 所对应的曲线与图1中的实线相似。低频时辐射能量与 ν^2 成正比,而在高频时则按指数

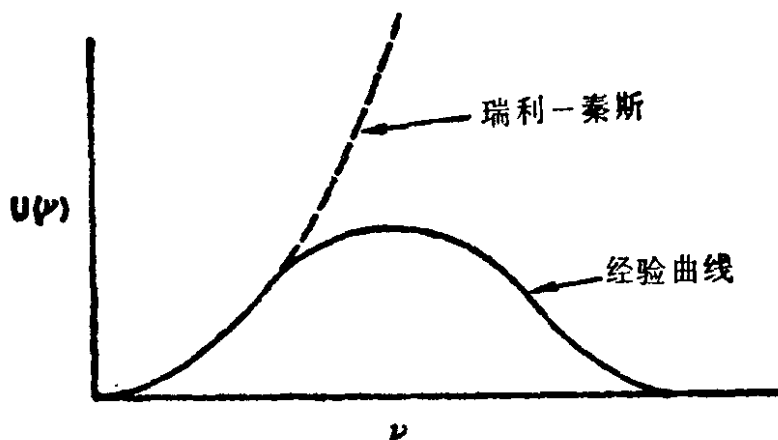


图 1

律降落。当温度升高时,曲线的最大值向高频方向移动;这说明物体逐渐变热时所发出的辐射在颜色方面的变化。

维恩由热力学的论据证明了,能量按频率的分布必须具有 $U(\nu) = \nu^3 f(\nu/T)$ 的形式。但函数 f 的形式单单由热力学不能确定。维恩获得了一个相当好的结果,但不完全符合实验曲线,其公式是

$$U(\nu) d\nu \sim \nu^3 e^{-h\nu/\kappa T} d\nu \quad (\text{维恩定律}) \quad (1)$$

式中 κ 是波耳兹曼常数, h 是一个由实验确定的常数(以后将证明,它就是著名的作用量子)①。

另一方面,经典电动力学导致一个完全确定的、但是十分不正确的 $U(\nu)$ 的形式。这个理论分布将在以后几节推导,它是

$$U(\nu) d\nu \sim \kappa T \nu^2 d\nu. \quad (\text{瑞利-秦斯定律}) \quad (2)$$

由图1可以看出,瑞利-秦斯定律在低频时与实验相符,但在高频时给出过多的辐射。事实上如果我们试图对所有的频率取积

① 实际上,维恩所引进的不是普朗克常数 h ,而是常数 h/κ 。

分, 来求总能量, 则积分结果将是发散的, 因而得出空腔中包含无限大能量的荒谬结论。当 $h\nu$ 达到 κT 的量级时, 实验曲线开始显著地偏离瑞利-秦斯定律。因此我们必须尝试建立这样一个理论: 它在 $h\nu < \kappa T$ 时导致经典结果, 而在较高频率下不同于经典理论。

然而, 在着手讨论要如何修改经典理论之前, 比较详细地检查一下瑞利-秦斯定律的推导是有益处的。从这一推导过程中, 我们不仅可以了解经典物理是如何失败的, 而且还会由此引进某些对理解量子理论很有帮助的经典物理概念。此外, 在处理这个经典问题时要引用傅立叶分析的方法, 这也会给今后在量子理论问题中应用它提供一定的准备。

§ 2. 电磁能量。根据经典电动力学, 含有电磁辐射的虚空空间是具有能量的。事实上, 这一辐射能量即是空腔能够吸热的原因。可以证明, 这一能量可用电场 $\mathcal{E}(x, y, z, t)$ 和磁场 $\mathcal{H}(x, y, z, t)$ 表示如下①:

$$E = \frac{1}{8\pi} \int (\mathcal{E}^2 + \mathcal{H}^2) d\tau \quad (3)$$

式中 $d\tau$ 表示积分是对电磁场所占据的全部空间进行的。

因此我们的问题是要在腔壁处于一定温度的情况下, 确定这一能量按空腔中出现的各种频率分布的方式。第一步是对电磁场应用傅立叶分析的方法, 把能量表示为各个频率的贡献之和。这样做了以后, 我们将看到, 辐射场在各方面都表现得象是一个简谐振子(所谓“辐射振子”)的集合。然后我们对这些振子应用统计力学, 以确定每个振子在温度 T 之下与腔壁处于平衡时的平均能量。最后, 我们将确定给定频率范围内的振子数目, 再用一个振

① Richtmeyer and Kennard, 第二章。