

量子力学

(I)

〔日〕汤川秀树 主编

阎寒梅 张邦固 译

周成民 张麦盈 校

科学出版社

1991

内 容 简 介

本书是著名日本物理学家、诺贝尔物理奖获得者汤川秀树主编的“现代物理学基础”中的第三卷,汤川秀树亲自撰写了本书的部分章节并负责全书的编纂。本书包括量子力学基础、量子力学的简单应用以及场的量子论初步。对于量子力学在原子核领域的发展,汤川秀树有过重大贡献;对于众说纷纭的量子力学物理图像,他也有独到的见解。相信本书会成为对量子力学感兴趣的读者的良师益友。

監 修 湯川秀樹
量 子 力 学 (I)
〔第2版〕
岩波書店, 1978

量 子 力 学 (I)

〔日〕汤川秀树 主编

阎寒梅 张邦固 译

周成民 张凌盈 校

责任编辑 郑德平

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100707

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

1991年5月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1991年5月第一次印刷 印张: 22 1/8

印数: 0001—1 050 字数: 581 000

ISBN 7-03-001936-9/O · 377

定价: 26.40 元

第二版序言

如初版序言所述,在本讲座的初版中,《量子力学》由三卷组成,而这次发行第二版时,改成了两卷,并重新组织作者撰写了《量子力学》(I)。

在第一部分历史的回顾中,首先概括论述了从经典物理学到量子力学发展的历史。其后各部分按如下顺序相继对量子力学的内容及结构进行了明确阐述:在第二部分“量子力学的构成”中,以新的观点审视了波粒二象性,而重新构造了波动力学,接着以与矩阵力学统一的形式,把它作为量子力学的基础体系而呈现于世,后者在《量子力学》(II)中则进一步被发展成严密的数学框架。

量子力学是为了统一地了解微观世界而发展起来的一门学科。其理论体系与宏观世界的体系不同,难以结合在一起。在第三部分,我们把第二部分所得到的基础体系应用于简单的力学系统,并进一步描述了量子力学中的一些重要概念和方法。

鉴于场的概念在量子力学中极为重要,本卷最后第四部分论述了多粒子系统的处理方法及场的量子论基础,并收进了稍具特色的“有约束体系的正则理论”。

与本书相接的是第四卷《量子力学》(II),其中第五部分以崭新的形式阐述了散射理论。第六部分结合具体物理问题,分析了量子力学的数学结构。第七部分讨论测量和信息问题。最后,第八部分描述了量子力学出现以后的物理世界。该卷是把初版《量子力学》(II,III)中的第四、五、六、七部分加以修改,又重新整理而成的。为此,事先讲明,本版与初版的各部分不能一一对应。

我们希望,在全体作者密切合作下,能将工作做得完美无缺。
当然,作为编辑的汤川和丰田终将责无旁贷。

汤川秀树

丰田利幸

1977年10月

1001/13

初 版 序 言

现在,人们一般认为,现代物理学具有极其复杂的结构。即使着眼于它的几个正在发展的尖端学科,亦不可观其全貌。不仅如此,就是集中研究局部问题,也容易堕入该部分对整体失去意义的相反状态中去。基本粒子理论的现状即为其典型一例。纵然同样对基本粒子理论进行研究,越是现代的理论,过分抽象的情况就越显著。通过与新得到的实验数据比较,从符合的程度虽然能判断其正确与否,但是,几乎完全不清楚它对进一步明确基本粒子的整体图像,进而在加深对自然界的认识方面具有什么意义,这种情况似乎是太多了。至于基本粒子理论分支以外的尖端理论,事态也许不这样严重。但是,就一部分理论而言,明确其在现代物理学整体中所占的地位,一般来说,亦非易事。

这种状况与 50 年前相比,除了有显著的不同点之外,还会发现如下的相似之处。那时的尖端科学中,与今天的基本粒子理论对应的是原子结构理论。当时,关于原子光谱的实验数据迅速积累,通过数据分析所得到的各种经验规律之中,有几个以普朗克-玻尔时期的量子论(早期量子论)为基础。因此,当时大多数物理学家乐观而保守地认为,按照早期量子论和爱因斯坦的相对论,对以牛顿力学和麦克斯韦-洛伦兹电动力学为两大支柱的经典物理学做较大修改,就不但能说明宏观世界,而且对微观世界的各种现象也能进行定量解释。实际上,他们在浮想联翩,物理学——例如,像普朗克的五卷本《理论物理学》所揭示的那样——就是把经典物理作为树干的一棵构造简单的大树。

然而,没过几年,随着量子力学的出现,情况发生了变化。不言而喻,量子力学直接脱胎于早期量子论,而早期量子论本身也已是经典物理学突变的产物,其突变比相对论还甚,而唯有量子力

学的变化之大足以与昆虫的变态相比,其影响所至亦异常广泛.总而言之,人类对自然的认识明显地进入一个崭新的阶段.在这个阶段,人们向各个方向延伸的视野大大地开阔了.与此同时,包括相对论在内的经典物理学世界也必然以新的面貌出现.

从那时到现在,不足半个世纪,物理学继续发生着迅速的变化.因而,对现在大多数物理学家,特别是对那些初学物理的人们来说,与其把经典力学和经典电动力学作为出发点,不如把量子力学作为出发点.对应于这种变化了的情况,本讲座把经典物理学归入第一卷和第二卷,把量子力学归入第三、四、五卷,并从各种角度,程度不同地叙述之.

第三卷以第一、二卷包含相对论在内的经典物理学为前提,在其第一部分中,既追溯从出现早期量子论到建立量子力学这一发展过程,又极力明确数学形式所体现的物理意义.第二部分的前半部分,列举简例具体说明量子力学何以能完美地解释各种微观现象,而后半部分则揭示了从辐射场的量子化过渡到一般场的量子论的来龙去脉,此时,必然要把量子力学扩展到具有无穷多自由度的体系,这样,发散困难必不可免.这与必须同时进行相对论的研究密切相关.出现发散困难,意味着量子力学在此方面不够成熟.若要深入研究,就要把完全满足相对论各种要求的量子电动力学公式化,并讨论以介子理论为出发点的基本粒子一般理论的构成问题.不过,我们把这些内容都放到第十一卷《基本粒子理论》中去.

第四卷第三部分从研究对称性开始,比第三卷第二部分更一般地讨论了量子力学系统的性质,阐明了复杂体系能够具有的种种类似性质.最后,稍详细地论述了电子的相对论理论.也遇到了非相对论量子力学中不曾出现的各种新问题,这些问题准备在第十一卷《基本粒子理论》中继续讨论.第四部分以较新形式的散射理论为内容.它与近20年来的物性学以及现代基本粒子理论密切相关.

第五卷第五部分以量子力学的一般数学结构为研究对象,其

中也涉及无穷自由度问题。到了20世纪后期,信息在工程学、数学和生物学的发展中起着越来越大的作用。第六部分站在量子力学的立场上提出了信息问题,作为从物理学的角度重新评价信息的一种尝试。可以说,这是与以往量子力学教科书所不同的特点之一。最后,第七部分以量子力学世界的图像为议题。像经典物理学那样统一明确地描述量子力学世界的图像是困难的。量子力学出现以后,这个问题实际上使物理学家们颇感苦恼;然而,与其这么讲,还不如说,量子力学告诉我们,任何一种简单的思考方式都不能解决问题。第七部分还再次强调,量子力学本身并没有完结,它正在不同意义上向各个方向发展;同时,从另一个方面说明,量子力学的出现使物理学家的思想方法必然发生巨大的变化,而将来无论出现什么样更为基础的理论,人们的思想也不会倒退回去了。

汤川秀树

1972年2月

目 录

第一部分 关于历史的导言

第一章 从经典物理学到量子力学	1
§ 1.1 经典力学时期的原子论	1
§ 1.2 电量的单元性和电子的发现	3
§ 1.3 作用量子的发现	4
§ 1.4 光的粒子说的复活	11
§ 1.5 周期运动的量子条件	14
§ 1.6 原子结构和量子论	20
§ 1.7 量子力学的开端	26
§ 1.8 电子的波动性的发现	32
§ 1.9 量子力学的建立及其后的发展	36

第二部分 量子力学的构成

写在前面	39
第二章 波动力学的引入	40
§ 2.1 波粒二象性——得以形成量子力学基础的实验事实	40
§ 2.2 波动力学中的运动定律	49
a) 第一定律——关于自由粒子的定律 (50) b) 叠加原理 (50)	
c) 第二定律——动力学的定律 (54) d) 第三定律——波函数的概率解释 (57) e) 位置坐标的测定 (63) f) 波函数, 概率幅, 态函数 (66)	
§ 2.3 定态和边界条件	68
a) 定态和能量本征态 (69) b) 平面波和自由粒子波包 (74)	
c) 一维问题和边界条件——束缚态和散射态 (81)	
§ 2.4 简单的定态	91
a) 阶梯势 (91) b) 矩形势 (95) c) δ 函数势和刚性壁 (104)	
d) 共振散射和亚稳态 (108) e) 谐振子 I (114)	
第三章 量子力学的形成	119

§ 3.1 动量表象·····	119
a) 概率解释规范化和力学量规范化 (120) b) 动量表象中的力学量算符(124) c) 量子条件和对易关系(129)	
§ 3.2 力学量及其观测·····	132
a) 力学量算符的线性性质 (132) b) 力学量算符的厄米性和本征函数系的完备性 (135) c) 力学量的测量和期待值 (138) d) 不确定关系 (142)	
§ 3.3 量子力学中的基本假定·····	146
a) 基本假定 I——态(146) b) 基本假定 II——力学量 (148) c) 基本假定 III——时间演变 (150)	
§ 3.4 海森伯绘景和矩阵力学·····	152
a) 按能量本征函数系所作的展开 (152) b) 海森伯运动方程 (154) c) 矩阵表示的量子力学——矩阵力学 (157)	
§ 3.5 谐振子 II·····	164
a) 能量本征值问题 (164) b) 波包的运动 (170)	
§ 3.6 多粒子体系·····	176
§ 3.7 向经典理论的回归·····	180
第四章 量子力学的基础体系·····	188
§ 4.1 右矢空间和左矢空间·····	188
§ 4.2 线性算符·····	191
§ 4.3 本征值问题·····	193
a) 自共轭算符的本征值问题(194) b) 测量值的系综平均, 概率解释 (196)	
§ 4.4 正则变量·····	198
a) 一个自由度的力学系 (198) b) 多自由度体系(205) c) 狄拉克空间 (206)	
§ 4.5 运动方程·····	206
a) 海森伯绘景 (206) b) 守恒定律, 位力定理, 总和定律 (209) c) 薛定谔绘景 (211) d) 相互作用绘景 (212)	
§ 4.6 物理解释·····	214
a) 纯态 (215) b) 混合状态 (217)	

第三部分 量子力学的拓展

第五章 典型状态的结构·····	221
------------------	-----

§ 5.1 对称性和守恒量	221
a) 连续群的情况——平移与旋转 (222) b) 离散变换群, 空间反演 (226)	
§ 5.2 角动量	227
a) J^2 和 J_z 的同时对角化 (228) b) 轨道角动量, 球函数 (233)	
c) 自旋 (243) d) 角动量的合成 (249)	
§ 5.3 时间反演	258
a) 简单情况 (259) b) 有自旋的情况 (261)	
§ 5.4 中心力场中的运动	263
a) 原点附近的边界条件 (266) b) 在远处的性质 (266) c) 束缚态 (268) d) 势阱 (275) e) 散射截面 (283)	
§ 5.5 库仑场情形	289
a) 束缚态 (292) b) 散射态 (296) c) 波在远处的畸变 (300)	
§ 5.6 磁场中的运动	304
a) 均匀磁场和轴对称电场 (305) b) 只有磁场的情形, 朗道能级简并 (309) c) 轨道中心的局域化 (310) d) 规范变换 (313)	
§ 5.7 多粒子体系	315
a) 配位空间 (315) b) 质心运动的分离 (317) c) 变分法 (319)	
d) 位置相关 (326) e) 氢分子 (329)	
第六章 近似方法	333
§ 6.1 定态微扰论	333
a) 无简并状态下的微扰 (334) b) 微扰展开式的收敛性, 渐近级数 (337) c) 简并态的微扰 (348)	
§ 6.2 与时间有关的微扰论	356
a) 逐次递推法 (356) b) 跃迁概率 (361)	
§ 6.3 绝热近似	366
a) 绝热定理 (366) b) 玻恩-奥本海默近似 (371)	
第七章 量子力学和相对论	377
§ 7.1 洛伦兹变换	377
a) 矢量, 张量 (377) b) 场量的变换, 克莱因-戈登方程 (381)	
§ 7.2 旋量	383
a) 正常洛伦兹群的表示 (383) b) 范德瓦尔登旋量 (386) c) 韦耳方程 (388)	
§ 7.3 空间反演, 时间反演	389

§ 7.4 狄拉克方程.....	391
a) 狄拉克旋量 (391) b) 物理解释 (393) c) 自由粒子解, 平面波 (395)	
§ 7.5 中心力场中的狄拉克粒子.....	400
a) 部分波分解 (401) b) 径向方程 (403) c) 氢原子 (405) d) 库仑散射 (413) e) 散射截面, 自旋极化 (416)	
§ 7.6 哈密顿形式.....	424
a) 颤动 (424) b) 与电磁场的相互作用 (430) c) 谷-傅德-渥萨依森变换 (432)	
§ 7.7 空穴理论.....	437
a) 负能态问题 (437) b) 空穴假说 (442)	
第八章 力学系的对称性.....	446
§ 8.1 群的定义及其结构.....	447
§ 8.2 李群和李代数.....	451
§ 8.3 连续群的射线表示.....	455
§ 8.4 动量和角动量.....	460
§ 8.5 轨道角动量和自旋.....	477
§ 8.6 角动量的合成与分解.....	485
§ 8.7 伽利略变换.....	492
§ 8.8 规范变换.....	496
§ 8.9 力学系内在的对称性.....	498
§ 8.10 置换对称性.....	507

第四部分 多粒子体系与场

第九章 多粒子体系的量子力学.....	519
§ 9.1 全同粒子体系的态空间.....	519
a) 全同粒子体系的波函数 (519) b) 泡利原理, 统计 (522) c) 粒子占有数表象 (524)	
§ 9.2 二次量子化.....	527
a) 多粒子体系中物理量的矩阵元 (527) b) 产生和湮没算符 (531)	
c) 福克空间 (538)	
§ 9.3 多粒子体系的运动和状态 I —— 基态.....	542
a) 密度矩阵 (542) b) 哈特里方程 (548) c) 费米子体系的基态 (555)	
d) 托马斯-费米法或局域费米动量法 (557) e) 玻色子体系的基	

态 (559)	
§ 9.4 多粒子体系的运动和状态 II——集体运动	565
a) 正则振动——谐振子之一例 (565) b) 正则振动——费米子体系之一例 (571)	
第十章 场的量子论	578
§ 10.1 德布罗意波, 量子化了的波场以及经典场	578
a) 广义概率幅和德布罗意波 (579) b) 运动的时空描述和二次量子化场的作用 (580) c) 广义薛定谔函数和二次量子化场 (584) d) 相干态与经典波动 (587) e) 多粒子体系的量子力学和场的正则量子化 (594)	
§ 10.2 拉格朗日形式的场方程和诺芝定理	601
a) 拉格朗日形式的场方程 (602) b) 诺芝定理——各种不变性和守恒量 (604)	
§ 10.3 场的正则量子化	613
a) 正则变量和量子化 (613) b) 正则运动方程及其与经典理论的对应 (616) c) 量子化场的无限小变换及生成元 (617)	
§ 10.4 自由场的量子论	619
a) 标量场理论 (620) b) 复标量场 (629) c) 狄拉克场 (631)	
§ 10.5 反演不变性及自旋与统计的关系	635
a) 空间反演, 正反粒子变换 (635) b) 时间反演 (636) c) CPT 变换 (637) d) 关于并行统计 (639)	
§ 10.6 从不同时理论到超不同时理论	641
a) 相对论电子多体系的不同时理论 (641) b) 辐射场的量子化和附加条件 (643) c) 场的超不同时理论 (646)	
§ 10.7 具有不定度规的场的量子论	648
a) 发散困难和具有不定度规的混合场理论 (648) b) 不定度规的引入 (652) c) 多质量波动方程 (653)	
第十一章 约束系的正则理论	658
§ 11.1 广义狄拉克的一般正则理论	658
a) 奇异拉氏量和约束 (658) b) 狄拉克括号和向量子论的过渡 (664)	
§ 11.2 在类光的超平面上场的正则理论	666
a) 正则量子化面及其稳定群 (666) b) 中性标量场的光面正则形式 (671) c) 产生和湮没算符与福克空间 (679)	
文献与参考书	684

第一部分 关于历史的导言

第一章 从经典物理学到量子力学

§ 1.1 经典力学时期的原子论

本讲座第 I 卷和第 II 卷的《经典物理学》解释在现代物理学之前就已成立的理论体系及通过该体系能充分说明的物理现象的总体。与通常的处理方法不同,在那里,相对论亦纳入经典物理学之中,并规定现代物理学以量子力学为起点。如《经典物理学》序言所述,其最重要的理由在于上述意义下的经典物理学与量子力学之间存在某种**鸿沟**。这种鸿沟具有二重性,一方面是基于自然现象本身的不连续性,另一方面是人类认识自然的方法中,呈现出为经典物理学所不曾有的全新的性质。这两个方面之中,前者最先明确,即“自然界存在飞跃”。当然这是从 1900 年普朗克 (Planck) 发现**作用量子**才开始的,以后则演变成量子力学这个独立的理论体系。与此同时,作为另一个侧面,对自然界认识的方法的变革,经历了近乎 30 个春秋。特别在其前半期,普朗克的量子假设像油滴一样矛盾地存在于以自然现象的连续性和个别的因果关系为必然前提的经典物理学的汪洋大海之中。它能够发展成量子力学那样相反又为经典物理学所依据的一种理论,并非容易。本章将对这个时期的情况稍加评述。

若广泛观察物质世界的连续性或非连续性问题,就会知道,它决不是什么新的课题。从古希腊开始,有关物质是连续还是非连续的争论长时间地延续下来。然而,只是到了近代,这场争论在作为经验科学的物理学和化学领域中才具有实际意义。本讲座中作

为经典物理学出发点的经典力学,按照惯例先处理**质点**的运动,并把质点定义为有**质量**却无大小的点。因此,物质的一种非连续结构似乎是理所当然的。如《经典物理学》第一部分第一和第二章所述,牛顿(Newton)本人假定物质由微小的但却是形状一定、大小有限的许多原子所组成的。这时,对物质仍然采用了非连续的观点。不管通常教科书中的提法和牛顿本人之间存在这样的差异,将物质实地细分,其终点到底是大小有限的原子还是不折不扣的质点,直至 19 世纪后半叶,也仍然是一个意义不曾完全明确的问题。例如,18 世纪发展起来的弹性体力学和流体力学,像《经典物理学》第一部第三章详细阐述的那样,可以把弹性体及流体当作连续物质来处理。但是到原子论确立之后再重新考虑,由于原子相当小,所以它们只不过是近似地被看作连续体而已。

经典物理学中,原子及分子概念的有效性是在 19 世纪发展起来的气体分子运动论及其普遍化了的经典统计力学中才被明确的。据此,不仅能解释作为大量分子的集团所具有的平均性质的各种热力学现象,也能处理由于偏离平均值而造成的各种**起伏**。而且,把分子运动论用于典型起伏现象的布朗(Brown)运动,即可断定宏观物质中所含分子的数目,因而用分子数去除该物质的总质量,便能求出每个分子的质量。当然在此以前道尔顿(Dalton)的原子说成功地解释了通用于各种化学变化的许多定律,对原子和分子概念已有所区别。综合这两方面的研究成果即可确认:物质由数目有限的分子所构成;各个分子又可进一步分割成数个原子;一摩尔物质中包含的分子总数 N 总是一个恒量,即

$$N \simeq 6 \times 10^{23} \quad (1.1.1)$$

其中, N 叫做阿伏伽德罗(Avogadro)数。这样一来,就不得不承认物质的单元性,即空间不连续地分布着原子和分子。在这个阶段,不但必须承认由于化学元素种类不同而有区别的数十种原子的存在,而且其质量之比亦非准确的整数比,所以并不能说一切物质的质量是**单一的通用单位的整数倍**。实际上,甚至在今天基本粒子阶段,这个问题亦尚未解决。再者,在上述的 19 世纪原

子论阶段,并不确切知道原子本身的空间限度。后面将详细论述,由于量子力学的出现,原子的限度已具有完全不同于经典物理学的含义,同时必须重新考虑物质的连续性和非连续性问题。

§ 1.2 电量的单元性和电子的发现

在物质所具有的各种属性之中,电与前节所述的质量一样同物质密切相关。特别地,1833年法拉第所发现的电解定律,如果从原子论的立场出发,就可以把它解释成各种元素的一个原子或分子在电解质中运送某一定量的电荷或该电荷的整数倍。此后电荷的单元性更加明显,到1909年密立根(Millikan)著名的油滴实验确认了电荷存在着最小单位,即**单元电荷 e** 。它的值为

$$e \simeq 4.8 \times 10^{-10}(\text{g}^{1/2} \cdot \text{cm}^{3/2} \cdot \text{s}^{-1})^* \quad (1.2.1)$$

尽管以后又作了很多实验,直到今日仍未发现有比它更小的电荷。因此,对假定存在 $e/3$ 或 $2e/3$ 的带电粒子的简单夸克模型来说,尚无充分的实验依据。

至于另一个与电有关,也同物质密切相连的性质——磁,情况则大相径庭。如本讲座《经典物理学》第二部分所述,在经典电动力学的基本方程中引入了电荷密度和电流密度,与此相反,却没有出现其对应的磁荷密度和磁流密度。这就意味着,**磁偶极子**(magnetic dipole)归根结底是由带电粒子所形成的电流引起的,而**磁单极子**(magnetic monopole)并不存在。此后这种看法一直为人们所接受。但是,几乎在量子力学出现的同时,发生了一次大的变动,即1924年乌伦贝克(Uhlenbeck)和高茨密特(Goudsmit)引入了电子**自旋**的概念。按经典物理学的解释,它是由带电粒子的自旋所产生的,但后面将要详细谈到,自旋是量子化的,而且,即使电子是没有大小的点粒子,也必须承认其自旋的存在。伴随着这

* $e = 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ 。——译者注

种自旋，电子也成了一种具有固有磁矩的磁偶极子。这是用经典物理学的观点难以理解的电子的性质之一。

量子力学出现后，狄拉克 (Dirac) 曾暗示过磁单极子存在的可能性，但时至今日在实验上尚未获得任何证据。

话锋逆转，再回过头来谈一谈。众所周知，1897 年 J.J. 汤姆孙 (Thomson) 的实验已经确定了电子的存在。通过把电子看作带有负单元电荷 $-e$ 和极小质量的微粒，就能解释广泛的电磁现象。如《经典物理学》第二部分 § 5.10 所述，在这种情况下，除质量随其速度而增大外，洛伦兹 (Lorentz) 电子论把电子同普通的经典力学粒子一样来对待。然而，正如以下各节反复阐述的那样，只有电子才是本质上具备量子力学特性的客体。尽管如此，后面还要论述经典电子论在各种情况下呈现出有效性的理由。

作为物质的基本属性，质量和电量间的一个本质差别在于，前者只限于正值，而后者却能取正负两种值。19 世纪后半叶，伴随着真空放电研究工作的进展，逐渐明确了带正电的粒子和带负电的粒子在性质上截然不同。也就是说，阴极射线的实体是上述带负电的电子，与此相反，阳极射线的实体却是质量远远大于电子的各种带正电的离子。在这个层次，正负电间明显的不对称性照样反映在下节所述的原子内部结构上。然而，在量子力学中，相对于粒子引入了反粒子的新概念，并且在实际上业已确认正电子和反质子这些反粒子的存在，而正负电荷的不对称性问题也应该以新的观点重新评价。进一步到了基本粒子层次，除带正电或负电的基本粒子外，尚须承认中子、中微子、中介子等种类繁多的电中性基本粒子的存在。这些将放在本讲座第十卷《基本粒子论》中详细叙述。

§ 1.3 作用量子的发现

如上节所述，19 世纪末叶发现了带负电的电子，而且还知道

它是构成一切物质的共同要素。这一点广泛地影响着此后物理学的发展。特别是，电子在质量上虽远远小于构成物质的其它带正电的粒子，但所起的作用却很大。即使和质量最小的带正电荷的氢离子（即质子）相比，电子的质量也只不过是它的 $1/1840$ 左右，而其电荷的绝对值却相同，因此，电子将会受到电场和磁场的极大加速。但是，根据经典电动力学，被加速的带电粒子发射的电磁场强度与加速度的平方成正比。这样一来，若从微观立场出发研究各种电磁现象，电子的行为就具有特别重要的意义。洛伦兹经典电子论取得了极大成功便证明了这一点。其中，电子也好，电磁场也好，都是在经典物理学的框架中处理的。

1900 年普朗克的量子假说竟在这种情况下脱颖而出，实为惊人之举。在此之前的数年间，普朗克本人持续奋战，企图通过经典物理学来解决热辐射问题，但终究未能以纯理论的方式推导出与实验相一致的结果。要简洁地描述内中情况，极为困难。其主要原因在于热辐射现象本身的复杂性。概括而言，热辐射指的是红外线、可见光和紫外线之类的电磁辐射从高温物体中放射出来的现象。众所周知，一般，温度越高，辐射强度越大，与此同时所发射出的电磁波的波长总的来说也就越短。但是，如果打算定量地研究热辐射现象，就要指出物体是由什么样的物质构成的，因此很难推导出普遍性的规律。所以，抛开各种实际物体的特性，而假想出像黑体那样的理想物体。所谓黑体指的是能将入射到其表面上的辐射全部吸收，而毫无任何反射、透射或散射的物体。也就是说，入射的辐射能既能贮存于黑体之中，就能以另外的方式——一般以波长不同的辐射——再发射出去。我们假想这样的黑体能够存在，并在对一切波长的辐射均予以反射的理想的壁所围成的空腔中，置入一个小体积的黑体。略去详细的讨论，结论就是，假如在该空腔中黑体和辐射在绝对温度 T 时达到热平衡状态，则在其中得以实现与黑体辐射等同的空腔辐射。那么，该空腔中任意点附近的单位体积内所包含的辐射能，可由电磁场的能量密度给出，即