

量子论初期史

(1899—1913年)

[西德]阿尔明·赫尔曼 著

周昌忠 译

王福山 校

商务印书馆

1980年·北京

THE GENESIS OF QUANTUM THEORY
(1899—1913)

By

Armin Hermann

(Translated from the German by Claude W. Nash)
The Massachusetts Institute of Technology Press
Cambridge, Massachusetts, and London, England
1971

量子论初期史

(1899—1913 年)

[西德]阿尔明·赫尔曼 著

周昌忠 译

王福山 校

商务印书馆出版

(北京王府井大街 36 号)

新华书店北京发行所发行

北京第二新华印刷厂印刷

850×1168 毫米 1/32 5 1/4, 印张 125 千字

1980 年 6 月第 1 版 1980 年 6 月北京第 1 次印刷

印数 1—2,900 册

统一书号: 2017·243 定价: 0.55 元

序*

量子论的创生是本世纪物理学最重大的进展。它的影响绝不局限于物理学和化学这两门学科，而且还涉及人类认识本身的种种基本问题。由于这个原故，量子论除了它的物理和哲学面貌之外，其历史背景也是很早就已成为研究的对象。F. 洪德、M. 雅默尔(Jammer)、M. J. 克莱因和 L. 罗森菲尔德等人都曾就量子理论的发展情况发表过文章。近年来，一项庞大的计划“量子物理学史料”(Sources for History of Quantum Physics)(参看本书第161页)已经征集了浩瀚的原始资料，其中主要的是量子物理学早期各个阶段各有关科学家的书信，而且已经拍成缩微胶卷收藏了起来。

本书第一次尝试大量运用未发表过的原始资料，它们在年代上追溯到这个发展史的最初十五年，即从1899到1913年。除了上述“史料”所收集的书信和手稿之外，这里还包括了大量以前所不知道的资料。为此，作者曾广泛地查阅了各个图书馆和档案馆收藏的手稿，特别是约翰尼斯·斯塔克和阿图尔·埃里希·哈斯两人的科学遗物以及阿诺耳德·索末菲的那些论文中最基本的部分。本书的目的，是借助1899到1913年间有关的出版物和书信，同时审慎地利用那些回忆中的记述(难免有失实之处)，来尽可能生动地描绘出一幅量子论创生的图景。

本英文版收录了一般认为一本科学著作所必需具备的所有参

* 这篇序文是原作者为英译本所作。中译本系据英译本转译，故一并译载。中译本未另作序。——编者

考文献。而德文原版中本来有的一个范围广泛的文献概观，也就是一篇讲师升等论文，这里已经删去，因为对于目前的目的来说，它显得累赘。

我要向有才干的译者克劳德·W. 纳什先生致以谢忱。我深望本书将给读者带来乐趣，并为物理学史结交新的朋友。

阿尔明·赫尔曼

1970年9月于斯图加特

目 录

引 言 连续性原理	5
-----------	---

第一章 麦克斯·普朗克 新物理常数和辐射定律 (1899—1906 年)

1. 辐射平衡	9
2. 维恩公式的推导	11
3. 新物理常数	14
4. 普朗克辐射公式	15
5. 玻耳兹曼方法	18
6. 自然常数的意义	23
7. “牛顿以来最伟大的发现之一”	25

第二章 亨德里克·安东·洛伦兹 辐射问题的讨论 (1903—1910 年)

1. 接受普朗克的辐射理论	32
2. 为解决问题而奋斗	37
3. 1908 年的罗马演讲	39
4. 非难	41
5. 普朗克和洛伦兹的对话	43
6. 洛伦兹是科学领袖吗?	46

第三章 阿耳伯特·爱因斯坦 光量子和新量子现象 (1905—1910 年)

1. “三级技术员”	51
2. 光量子假说	54
3. 支持光量子假说的又一个证据	57
4. 光量子 and 电子的统一理论	60

5. “与光的转化有关的一组现象”	62
6. 比热的量子理论	64
7. 1909 年的萨尔茨堡会议	66

第四章 约翰尼斯·斯塔克 探索新量子现象 (1907—1910 年)

1. 动机	73
2. 1907 年提出的三个论据	74
3. 激发能和发射光谱	76
4. 斯塔克 1908 年的进一步论据	80
5. X 射线和光量子假说	83

第五章 阿图尔·埃里希·哈斯 量子论对原子的初次应用 (1910 年)

1. 原子模型	88
2. 普朗克的谐振子	90
3. 阿图尔·埃里希·哈斯	91
4. 1910 年的理论尝试	91
5. 对哈斯思想的最初反应	96
6. 1911 年的量子论原子模型	98

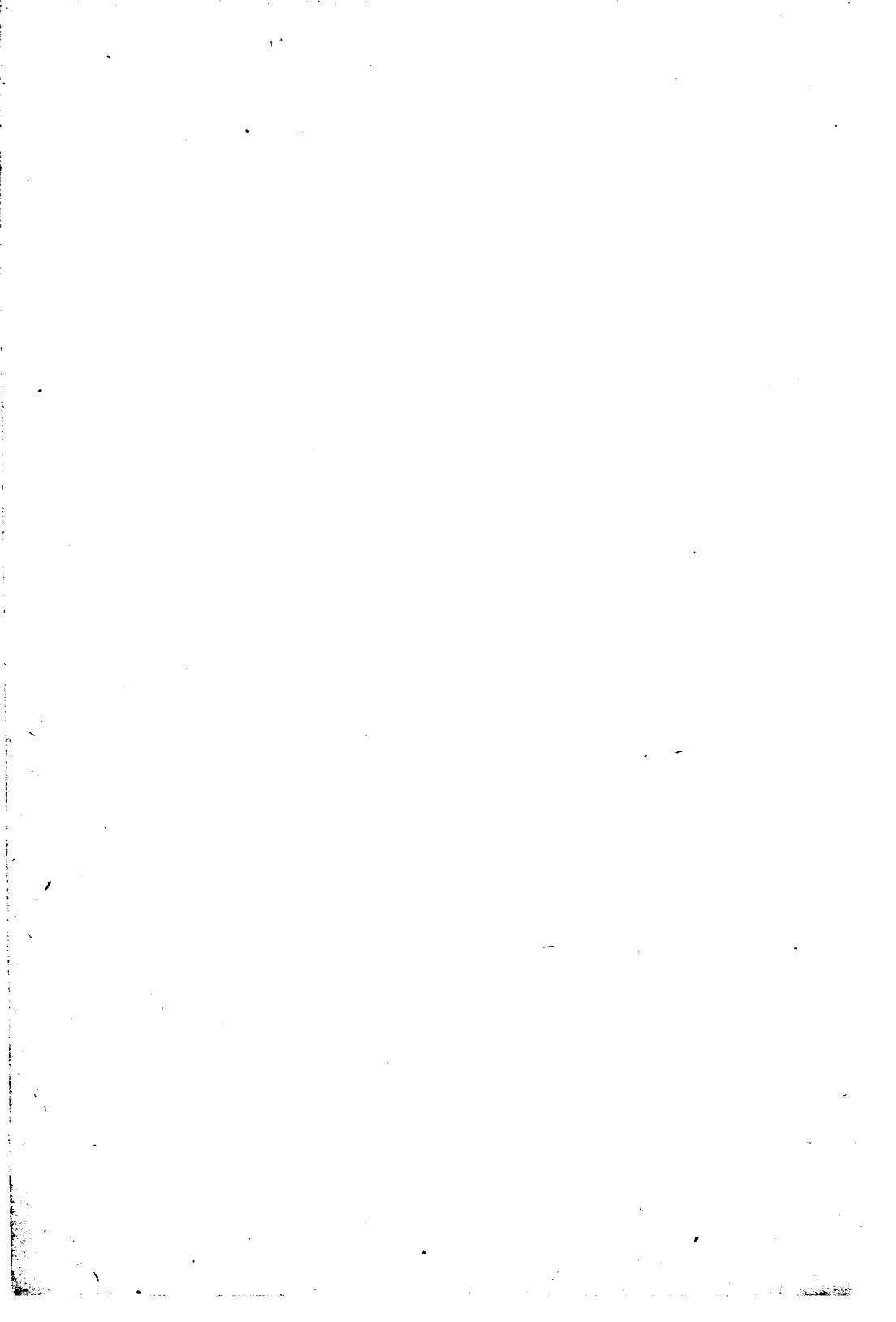
第六章 阿诺耳德·索末菲 电子和分子的相互作用 (1910—1912 年)

1. 有怀疑的保留	102
2. 哲学的转变	105
3. 德拜对普朗克辐射公式的推导	108
4. 索末菲的第一篇量子论文	110
5. 普朗克假说和索末菲假说	112
6. 应用和批评	115
7. 历史作用	118

第七章 瓦尔特·能斯特 探索组织起来 (1910—1912 年)

1. 有关量子现象的实验	122
--------------------	-----

2. 比热的测量	126
3. 玻恩与卡曼理论和德拜理论	129
4. 转动状态的量子化	131
5. 筹备索耳未会议	133
6. 1911 年的索耳未会议	136
第八章 尼耳斯·玻尔 原子的量子论(1912—1913 年)	
1. 1912 年的初步工作	144
2. 原子能级	149
3. 斯塔克原子理论的新形式	153
4. 氢光谱的推导	154
补充阅读书目	159
人名索引	162



引 言

连续性原理

一切自然过程都是连续的这条原理可以看作为十七世纪发展起来的新物理学的教父。这在微积分学的发展中看得特别清楚，而微积分的精神也就是物理学的精神。莱布尼兹的整个哲学充满了最广意义上的连续性原理。

莱布尼兹清楚地说道，现在把未来抱在怀中，任何一个给定的状态只能用紧接在其前面的那个状态来解释。如果对于这一点要提出疑问，那末，世界将会呈现许多间隙，而这些间隙就会将这条具有充分理由的普遍原理推翻，结果迫使我们不得不去乞灵于奇迹或纯粹的机遇来解释自然现象了。

十八和十九世纪的许多科学家和哲学家的心目中已经有了一切物理过程都是连续的这条原理，虽然他们一般都把它看做是理所当然的，因而没有明确地加以阐述过。

孤注一掷的行动——这是麦克斯·普朗克后来称呼他对辐射定律的推导的话：“一言以蔽之，我所做的事情可以简单地叫做孤注一掷的行动。我生性喜欢平和，不愿进行任何吉凶未卜的冒险。然而……一个理论上的解释……必需……以任何代价非把它找出不可，不管这代价多高……。我认为，那两条〔热力学〕定律必须在任何情况下都保持成立。至于别的一些，我就准备牺牲我以前对物理定律所抱的任何一个信念……。”

1900年12月14日是普朗克向柏林物理学会提出他对黑体辐射定律的推导的一天。这天一般被看做为量子论的诞生之日。

事实上,普朗克这个勉强的革命者,由于他引入了线性振子的分立能级,已经推翻了物理过程的连续性原理。

与一般所想象的恰恰相反,普朗克几乎没有认识到他在本世纪初的这个发现所产生的冲击有多大。

如果说,普朗克在1900年实际上没有,而且也不可能意想到他已经推翻了连续性原理,那末,辐射公式的推导中他所谓的“孤注一掷的行动”,以及所谓的“牺牲物理学信念”,其实质是什么呢?普朗克完全自觉地作出的那个牺牲,就是他抛弃了他先前所死抱着的那个热力学观念,即认为热力学第二定律纯粹是一个公理,而接受了在此之前他一直执意反对的那个用原子说和概率论的物理解释。很晚一直到1896年他才同意他的助教恩斯特·策默罗去跟玻耳兹曼就这问题进行一次辩论。

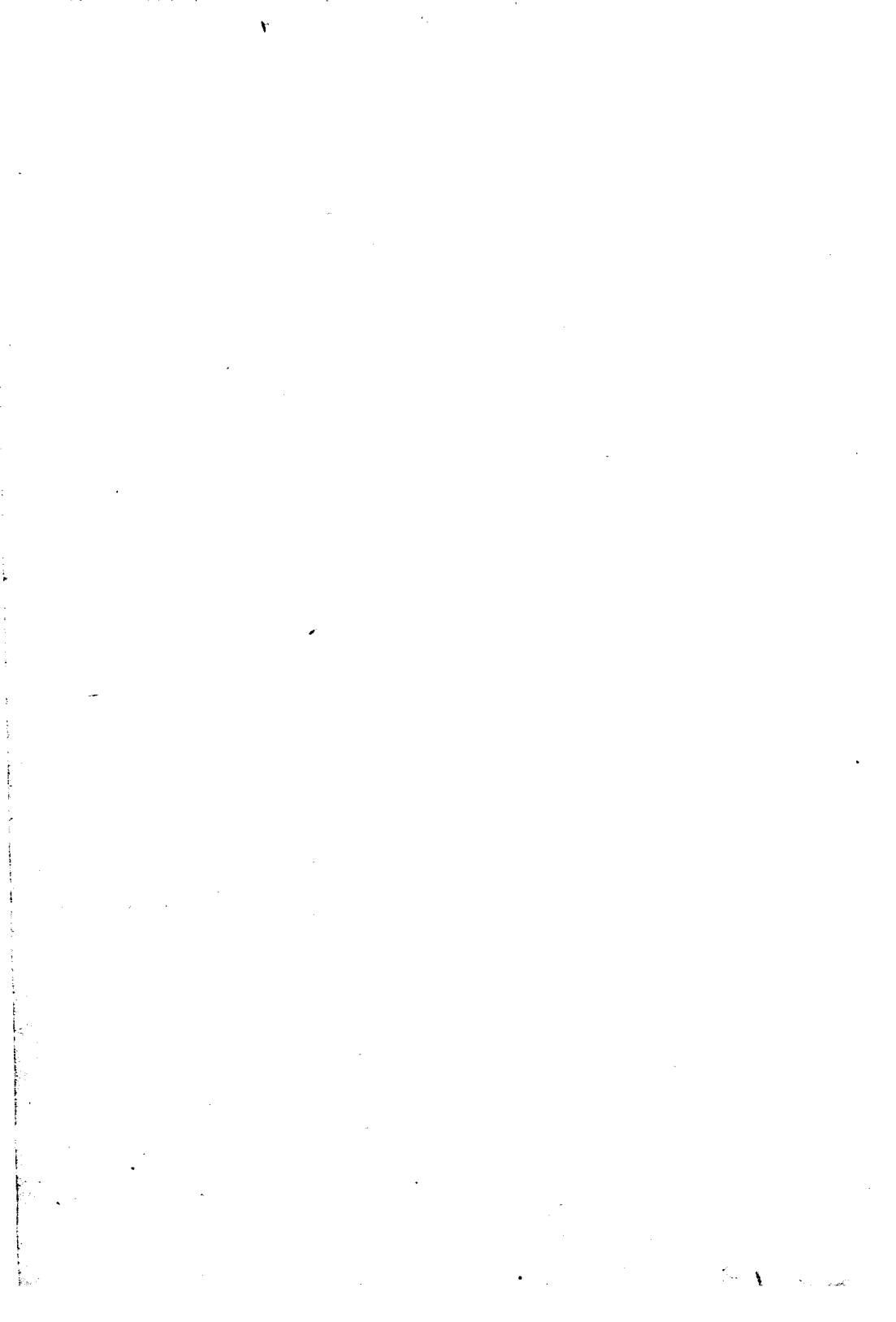
为了推导黑体辐射定律,普朗克现在不得不采用玻耳兹曼的方法。在他考虑问题的过程中,他不得不把能量也写成 $\epsilon = h\nu$ 这一点并没有给他增添什么大的困难。“这纯粹是一个形式上的假设,我实际上并没有对它想得太多,而只是想到,要不惜任何代价得出一个积极的成果来。”

从1899年5月起他已经对物理常数 h 非常熟悉,并且从辐射的测量中已经以很高的精确度得到了它的数值。所以,量子论的逐渐形成过程,从一开始就(而且以后也)可以用物理常数 h 的被引入物理学中作为标志;我们正是从这个观点出发想来研究量子论的创生,并论述它的发展。相比之下,对连续性原理的讨论则只是从1908—09年才开始,而且即使在那个时候,也只在解决量子问题的那许多探讨中占一小部分。

在为理解能量子或作用量子的本性所做的努力中,与之紧密联系在一起的是系列新物理现象的发现和所获得的对它们的认识。量子论的历史为物理学史写下了典型的一章,而不单是为承认或者反对某些思想方法而展开的一场智力斗争。

量子概念最初只是少数人所持的观点,可是到了1910—11年

前后，物理学家的看法一般都开始转向于支持这个观点。当尼耳斯·玻尔于1913年3月利用普朗克的作用量子为解决当时物理学中最重要的问题即原子结构问题而获得成功时，物理学的发展就达到了一个里程碑。我们将把它看做是量子论创生过程的终点。



第一章 麦克斯·普朗克 新物理常数和辐射定律

(1899—1906 年)

1. 辐射平衡

在研究了鲁道夫·克劳胥斯的论文之后,年轻的麦克斯·普朗克认识到,跟能量原理一样,热力学第二定律也具有带根本性的重要意义,而它的许多可能性还根本没有得到充分开发。21岁的普朗克在慕尼黑提出的那篇博士论文^[1]就是论述这个问题的。麦克斯·普朗克后来回忆这件事说:“这篇论文给那时物理学家们留下的印象等于零。但是由于我完全相信我工作的重要意义,这个遭遇丝毫没有阻挡我继续对熵进行研究。我把熵跟能量一起看做是任何一个物理系统所具有的最重要的性质。由于最大的熵表明最后达到了平衡,因此,一切物理平衡和化学平衡都可从所知道的熵推导出来。我在其后几年所进行的各项研究中,都详细地做了这项工作,起初是对聚集态的变化,继而对混合气体,最后对溶液。”^[2]

这项工作没有给普朗克带来特别的成功,因为约瑟亚·威拉德·吉布斯已经发表了他在这方面的研究成果。但是,普朗克却“在辐射热领域里发现了新的场所”。古斯塔夫·基尔霍夫于1859—60年间曾经第一个强调指出,存在着一个普适函数:“量 I (黑体发射率)是一个由波长和温度决定的函数。测定这个函数是一件极端重要的事。但是要从实验上来测定它,会遇到相当大的

困难;尽管如此,我们还是有理理由可以希望用实验方法把它建立起来,因为它无疑象所有与特定物体的性质无关的函数——至少与迄今所已被发现的那些一样,是一个简单的函数。"[3]

因此,黑体辐射强度分布的重要性,已经在基尔霍夫定律的推导中显示出来了,尽管实验上和理论上的困难仍然阻止着人们尽早去测定这个函数。当时为强度测量所能使用的温差电堆,灵敏度实在太低,只是在兰利发明了电阻测辐射热器之后,这个问题才可望得到解决。①

“我认为,函数 I 的测量很重要,应该为此配备一位教授”,弗里德里希·帕邢曾经这样评述过。[4] 维利·维恩也同样看出了这问题的重要性。帕邢和维恩作出了先驱性的成就;他们密切合作的结果便是 1896 年得出的维恩辐射定律。帕邢用下面一些话向凯泽尔报告了他们协作的成果:

此外,我还可以高兴地告诉您,我相信我找到了基尔霍夫定律中的函数 I 。从我的观察中,我测定了发射率函数

$$I = \frac{c_1}{\lambda^\alpha} \cdot e^{-c_2/\lambda T},$$

由此式可得出 $\lambda_{\max} T = \text{常数}$, 以及总辐射 $= T^{\alpha-1}$; c_1 和 c_2 是两个常数, α 的值为 5.5, 就这个值来说在实验数据经过更周密的计算之后可能会有所修正……。由于 W. 维恩从理论上也导出了相同的式子, 只是其 $\alpha=5.0$, 因而就给这个等式更加增添了意义。当我把[我的]等式寄给他之后, 他写信给我说, 他在早些时候已经得出了同样的结果。我们现在将联名发表我们关于这等式的各个基本论点; 很可能已经发现了与真正的定律相当接近的一个近似。[5]

维恩的辐射公式在以后的几年中为进一步测量所证实, 并且到 1900 年中期, 一直被看做是一个以实验为基础的表达式; 只是它的推导不是无懈可击的。

① 关于黑体辐射问题的实验解决方法, 见凯泽尔的《光谱学手册》(*Handbuch der Spektroskopie*)第 2 卷, 莱比锡 1902 年版。

当普朗克的注意力被引到这个问题上来的时候，他也被基尔霍夫函数的普遍适用性迷住了：“这个所谓正常的能量分布代表着某种绝对的东西，既然在我看来，对绝对的东西所作的探求是研究的最高形式，因此我就劲头十足地致力于解决这个问题了。”〔6〕

于是，普朗克仿效维恩，研究封闭在一个具有理想反射壁的空腔里的电磁辐射。由于其各个分波能相互贯穿而彼此不发生作用，所以那存在的、任意分布在各光谱区的辐射强度将保持不变。因此，“正常分布”只能通过它与吸收和发射辐射的谐振子发生相互作用而得到。既然正常分布与谐振子的种类无关，普朗克就设想一种最简单的情况，即采用线性赫兹(Hertz)振子（参看本书第90页）。

利用这个概念，平衡状态即可通过振子与辐射场之间的相互作用建立起来。因此，为了计算正常分布，就必须研究这种相互作用。如果每单位体积和频率间隔的电磁辐射能用 $u(\nu, T)$ ，而赫兹振子的平均能用 $U(\nu, T)$ 表示，那末，按照普朗克便有

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U. \quad (1)$$

普朗克是通过使一个略带阻尼的赫兹振子的发射与吸收相等而求得等式(1)的。〔7〕这等式由于假定谐振子取分立能级而引起了一些问题。爱因斯坦于1905年首先指出了这一点（参看本书第54—55页）。

“在我看来，这个不可或缺的等式的重要之点在于：按照这个等式，谐振子的能量只取决于辐射强度和辐射频率 ν ，而与它的任何其他性质无关。”〔8〕

2. 维恩公式的推导

普朗克于1899年5月18日在普鲁士科学院的一次会议上

宣布了 $u = \frac{8\pi\nu^2 U}{c^3}$ 这个等式。重要的是——如一再指出的那样^[9,10]——普朗克没有马上用下列直接从“经典”均分定理导出的式子：

$$U = k \cdot T \quad (2)$$

来取代线性振子的能量 U 。这本来早在 1899 年就会把普朗克引导到辐射公式

$$u = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot kT. \quad (3)$$

而实际上它是由瑞利首先于 1900 年 6 月给出的。^[11]

这使我们立刻得出一个乍一看来也许会令人吃惊的结论：普朗克不知道均分定理。然而，如果我们考察一下历史情况，那就会觉得这是完全可能的：一方面，普朗克对于导致均分原理的统计观点几乎并不熟悉，这是他直到 1900 年底“孤注一掷的行动”之前还明确拒绝的一些观点。另一方面，他在他的回忆^[12]中曾经说过，辐射强度 $u(\nu, T)$ 在 $\lambda T \rightarrow \infty$ 时所表现出来的渐近行为是鲁本斯告诉他的（参看本书第 16 页），并且终于在 10 月 9 日导致了普朗克的辐射公式。然而，要是普朗克在 1899 年就已获悉有象(2)那样简单的式子，那末他肯定会研究它所引出的结果。^①因此，等式(1)的推导“不过是在解决这个实际问题中所走的第一步，而它的量值现在已变得更加不妙……。于是，我不得不从另一端，即通过热力学的途径来研究这个问题，这里我也觉得比较熟悉。其实，我过去对热力学第二定律的研究证明在这里是相当有用的，因为我立即想到要确定谐振子的能量与它的熵而不是与它的温度之间的关系。”^[13]

① $U = k \cdot T$ 将直接导致谐振子的熵 $S = k \cdot \ln u$ ，这跟普朗克给谐振子的熵所下的如等式(9)所示的定义并不一致。

那时,具有两个参量的维恩辐射公式

$$u = \frac{8 \pi \nu^3 a'}{c^3} \cdot e^{-a' \nu / T} \quad (4)$$

被认为是正确的。从这里普朗克立刻导出了谐振子的能量 U 为

$$U = a' \nu e^{-a' \nu / T}.$$

在解出 $\frac{1}{T}$ 之后,因 $\frac{dS}{dU} = \frac{1}{T}$, 所以得

$$\frac{dS}{dU} = -\frac{1}{a' \nu} \ln \frac{U}{a' \nu}. \quad (5)$$

对 U 微分以后,普朗克获得

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{1}{a' \nu} \cdot \frac{1}{U}. \quad (6)$$

普朗克后来又引入符号 R 以表示 $\frac{d^2 S}{dU^2}$ 的倒数,从而得到

$$R = -a' \nu U. \quad (7)$$

现在他为熵的变化导出了下列等式:^[13]

$$dS_t = \Delta U dU \cdot \frac{3}{5} \cdot \frac{d^2 S}{dU^2}. \quad (8)$$

这个等式描述了这样一个系统,它的熵由于其个别谐振子相对于平衡值 U 偏离了 ΔU 而与最大熵有了偏离。这给定的熵的变化,发生在振子能量变化 dU 的时候。如果 ΔU 和 dU 符号不同,就是说,如果系统恢复到平衡,则 dS_t 必为正;换言之,函数 $\frac{d^2 S}{dU^2}$ 必须是一个负值。这个要求是为从维恩辐射定律得出的等式(6)所满足的。^①“由于整个问题是在研究一条普遍的物理定律,而且由于我以前同现在一样,相信物理定律越带普遍性,就越是简单……,所以我一度认为,我从量 R 与能量成正比这一点看到了它是整个能量分布定律的基础所在。”^[14]

① 辐射公式中所出现的常数 a 是正的,因而 U 也是正的。