

# 量子物理学的基石\*

## ——纪念普朗克提出量子概念 100 周年

李海

(雁北师范学院物理系 山西大同 037000)

赵玉生

(山西柳林第一中学 山西柳林 033300)

**摘要** M.普朗克确信,外部世界是独立于人类感觉的“绝对的东西”,它可以被人类的智慧所认识.在这种信念下,他始终将能量和熵的本质问题作为研究的中心.当普朗克研究黑体辐射问题时,再次把熵放在突出的位置,并提出能量不连续的观点,导致了量子概念的诞生,成为现代物理学的一个起点.普朗克不仅是伟大的物理学家,而且也是优秀的教育家和哲学家.

**关键词** M.普朗克,黑体辐射,能量子,普朗克常数

### THE CORNER STONE OF QUANTUM PHYSICS ——ON THE 100TH ANNIVERSARY OF PLANCK'S QUANTUM THEORY

LI Hai

(Department of Physics, Yanbei Teacher's College, Datong, Shanxi 037000, China)

ZHAO Yu-Sheng

(No.1 Middle School, Liulin, Shanxi, Liulin, Shanxi 033300, China)

**Abstract** The concept of the quantum gave birth to modern physics. A brief account is given of Planck's life and the course of his development of quantum physics. his ideas and philosophical beliefs are also discussed.

**Key words** Max Planck, black body radiation, energy quantization, Planck constant

1900年12月14日,德国伟大的物理学家普朗克在德国物理学会的例会上宣读了一篇文章:《关于正常光谱的能量分布定律的理论》.在该文中第一次提出量子概念.这篇起初并没有引起多大注意的简短论文是量子物理学的基石,是19世纪和20世纪之交物理学革命的开端,正如德国著名的物理学家海森伯所言:“现代物理学是从普朗克发现作用量子开始的.”<sup>[1]</sup>在科学史上,这一天被公认为是量子论诞生之日.

#### 1 普朗克其人<sup>[2-5]</sup>

M.普朗克1858年4月23日生于德国北部基尔城的一个书香门第之家,父亲是基尔大学法学教授,祖父和曾祖父都是哥廷根大学著名的神学家.他9岁那年,随同父母迁居慕尼黑.读中学的时候,他最喜欢数学、物理和音乐,少年普朗克表现出非凡的数

学才能,据说有一次数学老师生病,便委托他的高足普朗克去给高年级代课,足以说明教师对他的数学天赋的器重.少年普朗克的音乐天赋也是出类拔萃的.1874年,16岁的普朗克中学毕业,学校对他的音乐天赋给出这样的评价:“每逢星期天和节日,普朗克就去教堂演奏管风琴,他的态度积极,技巧熟练.在合唱练习中,他的钢琴伴奏也是杰出的……”多种天赋使他选择终身职业时一度举棋不定,最后选择了物理学.

1874—1877年,普朗克在慕尼黑大学师从约里、赛德尔和鲍威尔等人学习实验物理学和数学.1877—1878年间到柏林大学,在物理大师亥姆霍兹(H. V. Helmholtz, 1821—1894年)和基尔霍夫(G. R. Kirchhoff, 1824—1887年)指导下学习,亥姆霍兹是19世纪后半叶德国自然科学崛起的源头之一,是进

\* 2000-09-26收到初稿,2000-11-16修回

行哲学思考的德国理论物理学家的先驱。基尔霍夫也是19世纪一位杰出的物理学家,在电学和光谱学等领域均有卓越贡献。名师出高徒,这两位物理学家的人品和学识对普朗克有深刻影响,他在《科学自传》一书中说:“在亥姆霍兹和基尔霍夫指导下,我的科学眼界大为扩大了。因为他们的学生都容易有机会接触到这两位物理学家那些开拓性的为全世界所注目的工作。”在柏林期间,普朗克认真自学了德国著名物理学家克劳修斯(R. J. E. Clausius, 1822—1888年)的主要著作《热的力学理论》,使他成为克劳修斯的忠实信徒。1879年6月,21岁的普朗克就是以《论热力学的第二定律》的论文获得博士学位。

1880年,普朗克以《各向同性物体在各种温度下的平衡状态》的论文,获得慕尼黑大学的讲师资格,这是他教学和科研生涯的真正开端。在慕尼黑大学,普朗克以讲师身份执教5年。1885—1889年间,普朗克被故乡的基尔大学聘为物理学副教授。这是他学术活动的一个重要时期:其一,由于对能量守恒问题的研究于1887年获得哥廷根大学哲学系二等奖,同时出版了《能量守恒原理》、《热力学教程》两本专著和以《论熵的增加原理》为题的论文集。这些论著体现了普朗克的物理学思路:以热力学为主线,将能量和熵的本质问题作为研究的中心课题。在研究方法上,普朗克总是把自己的研究建立在对历史考察的基础上,他的每部专著、论文和演讲几乎都涉及对历史的回顾和评价,物理学发展的每一步他都了如指掌。这种自觉的科学历史意识是普朗克成功的因素之一。其二,深入研究了马赫的哲学著作。普朗克在《评马赫的物理认识论》中说:“我在基尔大学工作的期间(1885—1889年),我也是马赫哲学的一名忠实信徒,马赫哲学对我的物理学思想曾发生过强烈影响”。这表明他的物理学研究一开始便具有自觉的物理认识论的背景。

柏林大学理论物理学讲座主持人基尔霍夫于1887年10月逝世。当时,有资格接替这一职位的物理学家有3位:玻尔兹曼(Boltzmann, 1849—1906年),赫兹(Hertz, 1875—1894年)和普朗克。亥姆霍兹鼎力推荐普朗克,赞扬他是一位具有独特思想、走自己的路、科学眼界开阔的学者。于是,1889年普朗克受聘于柏林大学继任基尔霍夫的职位,并兼任新设立的物理研究所所长,起先是副教授,1892年晋升为正教授。1894年,普朗克被选为普鲁士科学院院士,在该院他曾任职50多年。1894年亥姆霍兹逝世后,普朗克渐渐成了柏林最著名的物理学家,人们赞扬他

是“科学的帝国首相”。

1896年,普朗克开始了他一生中最重要的热辐射理论研究时期。热辐射实际就是红外辐射,是由英国天文学家赫歇尔于1800年在观察太阳光谱的热效应时首先发现的,并证明热辐射与光的统一性。19世纪中叶,由于钢铁、化工、照明等工业的发展,急需高温测量、光度计、辐射计等方面的新技术和新设备,吸引了一大批物理学家从事热辐射研究,使之成为一门新学科。当时德国是热辐射研究的中心,从理论到实验技术都处于世界领先水平。普朗克是在寻求由热力学第二定律所表述的自然过程的不可逆性的原因时开始研究热辐射的。在1897—1899年,普朗克连续发表了5篇《论不可逆的辐射过程》的论文。他先是发现电磁振子由于辐射而消耗能量,但这能量并未转换为热而变成电磁辐射了。他认为这种“保守阻尼”可能说明保守力如何产生不可逆性。于是,他研究了电磁辐射与电磁振子的平衡问题,却没有说明自然过程的不可逆性,而意外地导致了量子概念的诞生。1906年,普朗克的名著《热辐射理论教程》问世。在这部著作中生动地描述了他是怎样一步步逼近提出量子假设的。这部著作连同他的《能量守恒原理》、《热力学教程》、《理论物理导论》等著作,不断再版,被译成多种文字,饮誉世界科学界和教育界,培养了世界各国的好几代物理学家。

普朗克慧眼识英才,以科学真理明辨是非,热情支持新生事物。1905年,普朗克深知恩斯特(Nernst, 1864—1941年)是一位能进行化学研究的物理学家,这对物理研究力量很强的柏林大学要振兴化学研究来说,是一个难得的人才。于是坚决推荐恩斯特担任柏林大学物理化学教授和物理化学研究所所长。恩斯特的出色工作使他获得1920年诺贝尔化学奖。普朗克对爱因斯坦的支持更是科学史界流芳千年的佳话。1905年,普朗克作为世界科学权威性刊物《物理学年鉴》的主编,他收到并审阅了爱因斯坦关于狭义相对论的划时代论文《论动体的电动力学》,普朗克高瞻远瞩,认识到该文的价值予以及时发表,并立即成为第一个坚决支持爱因斯坦的重要物理学家。为此,1905年底,他在柏林大学作了相对论演讲,对相对论给予公开的支持,并用了3年时间研究相对论。普朗克发现爱因斯坦给出的电子运动方程根据不充分,就重新推导出该方程式,得出相对论动能表达式,发展了相对论动力学。第一次世界大战前,爱因斯坦还难免生计之忧,为了让爱因斯坦专心致力于理论物理学问题,1909年普朗克推荐爱因斯坦为苏

黎世大学特约教授.1913年普朗克和恩斯特一道赴伯尔尼请爱因斯坦到柏林,在普鲁士科学院专为他设置了一个特别讲座.之后又推荐爱因斯坦担任威廉皇家物理研究所所长.以后,他们相互支持,友谊长存.1929年在普朗克获得博士学位50周年纪念会上,爱因斯坦称赞普朗克说:“您第一个挺身而出维护了相对论.”

普朗克是一个优秀的教育家.他从教近50年,学生们都喜欢听他讲课.亥姆霍兹推荐他去柏林大学任教时说:“至于他作为一位教师的才能,我们从基尔大学已经获得了十分的满意报告.”在教学中,他善于启发学生进行独立思考.对学生的提问总是经过慎重考虑之后方作出回答,他的口头禅是:“我想明天回答您这个问题.”足见其治学之严谨.他的学生中著名的有:因晶体中X射线衍射研究获1914年诺贝尔物理学奖的劳厄;在电动力学方面著称于世的阿伯拉罕;在现代数学基础研究中作出重要贡献的策默罗;创立逻辑实证主义哲学的石里克及被爱因斯坦称为“我们的居里夫人”的迈特纳等.可谓一流的大师培养出一流的人才.

1928年,普朗克在柏林大学的著名讲座由薛定谔(E. Schrödinger, 1887—1961年)接替,70高龄的普朗克虽然退出了教学活动,但仍是威廉皇家科学学会主席和科学院数学物理学部的常务秘书.晚年,普朗克的主要精力转向对物理学哲学问题的思考.在普朗克的一生中从1896年发表《反对新的唯能论》开始,撰写了大量的物理哲学方面论文,同马赫和实证主义进行了“论战”.他确实也是一位优秀的自然哲学家.

普朗克的科学贡献和人品,为世界科学界所敬仰,他被选为美国、苏联、英国、意大利、丹麦、芬兰、希腊、瑞典和匈牙利等国科学院的外籍院士.

1947年10月14日,伟大的物理学家普朗克在哥廷根与世长辞.

## 2 普朗克的哲学信念和能量子的诞生

普朗克是一个唯物主义者,他在《科学自传》中写道:“我致力于科学研究并从青年时代起就爱好它的原因,出于一个绝非不说自明的事实:我们的思维规律和我们从外界接受到的自然过程的规律是一致的,因此人们有可能通过纯粹思维对这种规律作出解释.这里具有重要意义的是,外部世界是独立于我们的绝对的东西,而探索这种绝对的东西所适用的

规律,我认为就是最崇高的科学研究任务.”<sup>[6]</sup>在其他有关论著中,普朗克多次重复上述观点.这些观点体现了普朗克的哲学信念.他确信外部实在世界是独立于人类感觉的客观存在,这个客观存在乃是“一种绝对的东西”它可以被人类的智慧所认识.普朗克的毕生工作正是奉献于研究这个“绝对”,即研究对任何自然现象都普遍有效的基本定律.能量守恒定律是符合普朗克哲学信念的第一个定律,在从事热力学研究中,他又发现不可逆过程显示着某种绝对性,因而他十分重视对能量和熵两大概念的深入理解.当普朗克研究黑体辐射正常能量分布这种绝对规律时,他再次把熵放在突出的位置,从而敲开了量子大门.

关于普朗克引入振子能量量子化概念导出黑体辐射公式的历程,不少学者已作了深入的研究<sup>[7-8]</sup>.在此,笔者仅对其主要步骤及相关背景作一重复和补充.量子概念诞生始于热辐射研究.第一个对热辐射作系统理论研究的是基尔霍夫.1860年,基尔霍夫引进“辐射本领”、“吸收本领”和“黑体”概念,并证明热辐射的发射本领和吸收本领之比与黑体的辐射本领相等.黑体的辐射本领是一个只依赖于波长和温度的普适函数,而与物体的性质无关.这表明它是一个具有重要意义的普适函数.1879年,斯特藩(J. Stefan)总结出黑体辐射总能量与黑体温度四次方成正比关系.1884年,这一关系得到玻尔兹曼从电磁理论和热力学理论的证明.1893年,维恩(W. Wien, 1864—1928年)提出辐射能量分布定律(即维恩分布定律):

$$U(\lambda \cdot T) = b\lambda^5 e^{-a/\lambda T}, \quad (1)$$

其中  $U$  表示能量随波长  $\lambda$  分布的函数,也叫能量密度,  $T$  表示绝对温度,  $a, b$  为两个任意常数.从(1)式可得到维恩位移公式:  $\lambda_m T = \text{常数}$ , 即对能量分布函数  $U$  最大值的波长  $\lambda_m$  与绝对温度成反比.维恩因发现上述热辐射定律而获1911年诺贝尔物理学奖.

维恩是一位理论和实验都有很高造诣的物理学家,他所在的工作单位是德国国家物理技术研究所(Physikalisch Technische Reichsanstalt, 简称 PTR),主要研究基本量度.19世纪后半叶该所也进行了许多有关热辐射的实验,所内的实验物理学家鲁本斯(H. Rubens)、陆末(O. Lummer)、普林斯海姆(E. Pringsheim)和库尔鲍姆(F. Kurlbaum)等对热辐射研究作出过重大贡献.1895年,维恩和陆末建议用加热的空腔代替涂黑的铂来代表黑体,随后陆末和普林斯海姆用专门设计的空腔炉进行实验,精确测得

物理

黑体辐射能量分布曲线.1896年初, PTR的理论核心人物维恩因故离去, PTR的实验研究结果需要有理论研究者的配合, 于是, 普朗克在其好友鲁本斯的推荐下填补了维恩留下的空缺, 参与热辐射研究. 任何一位研究者的世界观都决定性地影响着他科学工作的方向, 基尔霍夫关于黑体辐射函数的普适性使普朗克着迷, 在他内心深处构成了一种自然哲学的高贵冲动, 他说:“陆末和普林斯海姆在国家物理技术研究所作的热辐射光谱测量, 把我的注意力转移到了基尔霍夫定律. ....这种所谓的正常能量分布代表着某种绝对的东西. 因为我一向认为, 对绝对的东西所作的探索是科学研究的最高形式, 因此我满腔热情地致力于解决这个问题了”.<sup>[9]</sup>他这种情怀在许多年和许多场合从不同的侧面予以重复.

普朗克认真分析了维恩分布定律, 认为维恩的推导过程假设太多, 似有是凑出之嫌. 于是从1897年起, 他企图用更系统的方法以尽量少的假设从基本理论上导出维恩公式. 普朗克把电磁理论用于热辐射和谐振子的相互作用, 通过熵的计算, 终于在1899年得到维恩分布定律. 然而就在这时, PTR成员的测量结果表明维恩分布定律与实验有偏差. 1899年11月, 陆末和普林斯海姆向德国物理学会报告说, 他们把空腔加热到800—1400K时, 所测波长为0.2—6 $\mu\text{m}$ , 得到的能量分布线基本与维恩公式相符. 1900年2月, 他们再次报告, 当把测量范围扩展到8 $\mu\text{m}$ 时, 在长波区域有系统偏差. 接着鲁本斯和库尔鲍姆发现在长波区域辐射能量分布函数与绝对温度成正比. 这个结果正符合当年6月英国科学家瑞利(L. Rayleigh)导出的分布律公式:

$$U \propto \nu^2 T. \quad (2)$$

普朗克是理论物理学家, 但他密切注意实验的进展. PTR成员的测量结果使普朗克深思: 能不能找到一个新的辐射公式, 使它在长波区域渐近于鲁本斯的实验结果, 在短波附近渐近于维恩的分布呢? 普朗克根据实验数据用数学上的内插法得到了后来以他的名字命名的普朗克公式:

$$U = a\lambda^5 \cdot \frac{1}{e^{h\nu/\lambda T} - 1}. \quad (3)$$

后经鲁本斯证实, 这一公式和实验结果完全一致. 于是, 两人就在1900年10月19日向德国物理学会作了题为《维恩光谱方程的改进》的报告, 报告了这一发现. 但普朗克并不满足这个从数学上得来的经验公式, 他要探求这个公式的物理意义. 几经努力, 都无法从他深信不疑的热力学理论推出(3)式. 最后只

好“孤注一掷”用玻尔兹曼的统计方法试一试.

设想一个空腔系统内有频率为 $\nu$ 的 $N$ 个谐振子, 其总能量为 $E$ . 现在要确定 $E$ 在这 $N$ 个振子中有多少种可能的分配方式(又称配容数), 按玻尔兹曼的方法,  $N$ 必须是有限的, 而且要求把能量分成一份一份的形式, 分给 $N$ 个振子. 设能量 $E$ 划分为 $P$ 个相等的小份额 $\epsilon$ (能量元),  $P$ 个能量元 $\epsilon$ 在 $N$ 个振子中可以按不同比例分给单个振子, 按照排列组合法则, 总的分配方式数为

$$W = (N + P - 1) / (N - 1) ! P !$$

因为 $N, P \gg 1$ , 利用斯特林(Stirling)公式,  $N! = (N/e)^N$ , 得 $W = (N + P)^{N+P} / N^N P^P$ . 于是

$$\ln W = (N + P) \ln(N + P) - N \ln N - P \ln P. \quad (4)$$

早在1877年, 玻尔兹曼就由分子运动论认识到熵与几率的对数成正比. 根据这一思想, 普朗克为任意物理系统的任意一个状态写下了一个普遍的表达式:

$$S = k \ln W,$$

其中 $W$ 是相应于这个状态计算出来的几率.<sup>[14]</sup>这个公式的提出, 在普朗克发现能量子的历程中是很重要的. 爱因斯坦给予高度的评价:“多么大胆, 又是多么富于独创性.”公式中的 $k$ 即玻尔兹曼常数, 也是普朗克首先计算出来的.

设单个振子的熵为 $S$ , 则有 $N$ 个振子系统的熵为

$$S_N = NS. \quad (5)$$

单个振子的平均能量为

$$U = E/N = P\epsilon/N, \quad (6)$$

而

$$S_N = k \ln W. \quad (7)$$

由(4), (5), (6), (7)式得

$$S = k \left[ \ln \left( 1 + \frac{U}{\epsilon} \right) - \frac{U}{\epsilon} \ln \frac{U}{\epsilon} \right]. \quad (8)$$

另外, 与辐射公式等效的熵应为频率 $\nu$ 的函数, 即

$$S = f \left( \frac{U}{\nu} \right). \quad (9)$$

普朗克由此证明, 能量元 $\epsilon$ 一定正比于频率 $\nu$ , 于是就提出著名的量子假设:

$$\epsilon = h\nu. \quad (10)$$

将热力学公式 $1/T = ds/dU$ 用于(8)式, 可求出

$$\frac{1}{T} = \frac{k}{\epsilon} \left[ \ln \left( 1 + \frac{U}{\epsilon} \right) - \ln \frac{U}{\epsilon} \right]. \quad (11)$$

由(10),(11)式得

$$U = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}. \quad (12)$$

黑体辐射公式则为

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}}. \quad (13)$$

普朗克还根据黑体辐射的测量数据,计算出普适常数  $h$  值:  $h = 6.65 \times 10^{-27} \text{ erg}\cdot\text{s} = 6.65 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ , 后来人称这个常数为普朗克常数(当时普朗克称为“作用量子”),而把能量元称为量子.1900年12月14日,普朗克在柏林德国物理学会的例会上宣读了题为《关于正常光谱的能量分布定律的理论》的论文,报告了黑体辐射公式的推导.为此,普朗克获1918年诺贝尔物理学奖.

以普朗克常数  $h$  为根本特征的量子论给人们提供了新的关于自然界的表述方法和思考方法,使人类认识由低速宏观领域扩展到高速微观领域.  $h$  的提出引发了一系列解释性假说,经爱因斯坦、玻尔、德布罗意、薛定谔、海森伯、玻恩等人的努力,创立了量子物理学,为原子物理学、固体物理学、核物理学和粒子物理学奠定了理论基础,并且这些成果在化学、生物等有关学科和许多现代技术中也得到了广泛的应用.可以说,量子论和爱因斯坦创立的相对论共同创造了20世纪人类科技文明.

轰轰烈烈,转眼百年.今天我们同普朗克当年发

表量子论一样又立足于新世纪的起点.回顾他的伟大贡献,回忆他的高风亮节,探索他的科学思想,无疑对我们仍有许多启示.

### 参 考 文 献

- [1] 赵鑫珊.普朗克之魂.上海:文汇出版社,1999.61[ Zhao X S. Spirit of Planck. Shanghai: Wenhui Publishing House, 1999.61(in Chinese) ]
- [2] Planck M. Physikalische Abhandlungen und Vortrage( III). [ s. l. ]:Bravnschweig, 1958.170—171
- [3] 厚宇德,张克敏,左伟.大学物理,1998,17(3):32[ Hou Y D, Zhang K M, Zuo W. College Physics, 1998,17(3):32(in Chinese) ]
- [4] 赵鑫珊.普朗克之魂.上海:文汇出版社,1999[ Zhao X S. Spirit of Planck. Shanghai: Wenhui Publishing House, 1999(in Chinese) ]
- [5] 阎康年.热力学史.济南:山东科学技术出版社,1989[ Yan K N. History of Thermodynamic. Jinan:Shandong Science and Technology Publishing House,1989]
- [6] Planck M. Physikalische Abhandlungen und Vortrage( III). [ s. l. ]:Bravnschweig, 1958.374—375
- [7] 于林成.大学物理,1992,11(6):36[ Yu L C. College Physics, 1992,11(6):36(in Chinese) ]
- [8] 金尚年,田卫东.物理,1985,14(2):121[ Jin S N, Tian W D. Wuli ( Physics ),1985,14(2):121(in Chinese) ]
- [9] Planck M. Physikalische Abhandlungen und Vortrage( III). [ s. l. ]:Bravnschweig, 1958.121—122
- [10] Planck M. Physikalische Abhandlungen und Vortrage( III). [ s. l. ]:Bravnschweig, 1958.626

•物理新闻•

## 在布基球晶体上的高温超导体

( Superconductivity at 117K in a Buckyball Crystal)

德国 Konstanz 大学 Lucent 研究所的 B. Batlogg 教授和他的同事们首次在  $C_{60}$  的布基球晶体上观察到转变温度为 117K 的超导电性质.正常的  $C_{60}$  分子,它的晶格间距为 1.415nm,一般它可在温度为 18K 时转变成超导体.如果我们能迫使让晶体中的空穴来代替电子进行传导,并在晶格中填充其他分子使晶格间距适当增大,这就能使布基球晶体的超导转变温度得到提高.

与此同时,位于瑞士苏黎世的 ETH 实验室也进行了同样的实验,他们共同试探了各种掺杂条件,最终发现以掺  $Br_3CH$  分子得到的结果为最理想,它能使  $C_{60}$  分子的晶格间距扩大到 1.445nm,从而使超导转变温度提高到 117K.这是目前在高温陶瓷超导体范围内最好的结果.

(云中客摘自 Science published online, 30 August 2001)