

深奥理论 通俗阅读

吴今培◎著

# 量子

神奇的量子世界之旅

# 概论

非外借



清华大学出版社



# 量子概论

神奇的量子世界之旅

吴今培◎著

清华大学出版社  
北京

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。  
版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

量子概论:神奇的量子世界之旅/吴今培著.—北京:清华大学出版社,2019  
ISBN 978-7-302-52836-4

I. ①量… II. ①吴… III. ①量子论—普及读物 IV. ①O413-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第081639号

责任编辑:贺岩  
封面设计:李伯骥  
责任校对:王荣静  
责任印制:宋林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>  
地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084  
社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544  
投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)  
质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印装者:三河市吉祥印务有限公司

经 销:全国新华书店

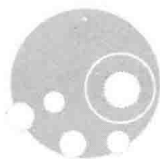
开 本:148mm×210mm 印 张:5.125 字 数:87千字

版 次:2019年5月第1版 印 次:2019年5月第1次印刷

定 价:35.00元

---

产品编号:083574-01



## 致 读 者

量子理论是研究微观世界规律的一门科学理论。那么，微观世界究竟有多么微小呢？它指的是一厘米的一千万分之一大小的世界。我们日常生活着的世界是一个看得见的、感受得到的、按部就班的宏观世界。倘若我们能缩小十个数量级，便打开了通向微观世界的大门，进入神奇的量子世界。那是一个错综复杂、乱花迷眼、迷雾重重的世界，它和宏观世界的规律完全不同，具有超出我们常识的极其奇妙的特性。

掐指算来，量子概念的诞生已经超过一个世纪，但其含义非常深奥，和人们的日常生活格格不入，甚至违背我们的生活常理，她就像一个神秘的少女，我们天天与她相见，却始终无法猜透她的内心世界。然而，量子理论却能解释量子世界一切不可思议的现象，正是在它的指引下，今日的科技才如此朝气蓬勃，并给人类社会带来了伟大的技术革命。从半导体到核能，从计算机到激光，从集成电路到生物技术，无不留下量子的足迹。可以说，量子理论把它的光辉播撒到人类社会的



每一个角落,成为有史以来在实用中最成功的科学理论。

21世纪信息科学将从“经典”时代跨越到“量子”时代,其发展将对国民经济、社会发展、国防安全等产生直接而重大的影响。量子技术已成为世界各国抢占的战略制高点,我国量子科学领军人物潘建伟院士认为,量子技术可能像20世纪“曼哈顿计划”造出原子弹那样改变世界格局。中国量子科学实验卫星“墨子号”于2016年8月发射升空,并圆满实现了各项科学实验目标,标志着我国量子科技水平雄居世界前列,这对攀登世界科技创新之巅具有重大意义。

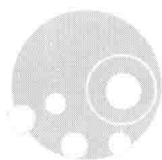
由于量子理论内容艰涩,人们几乎都是只闻其名,不知其详。如果你觉得量子理论难以理解的话,这是很自然的,因为你生活在经典世界中,你所看到的都是宏观物体和它们的连续运动,从一开始你所受的物理教育也都是牛顿的经典理论。然而,这一切对于量子世界中的微观粒子及其运动都已不再适用。为了让读者顺利步入一个完全陌生的量子世界,《量子概论》这本科普小册子,试图将深奥的知识通俗化、条理化,深入浅出地描绘量子的诸多不可思议的表现及其最新应用,以便更多人轻松快速阅读,把握量子理论的要旨,从而激发公众对于量子科技的浓厚兴趣和广泛关注。当然,对于专业读者,还是希望大家满怀勇气与敬意去研读经典著作,领略其原汁原味的内涵与韵味。

本书以量子理论发现、发展为主线，循序渐进地讲述了人类探索量子世界的全过程。内容涵盖了波粒二象性、量子化原子模型、物质波、波动力学、矩阵力学、测不准原理、量子叠加、量子纠缠、量子信息、量子计算和量子通信等。通过这样一次量子世界之旅，量子运动将真实地呈现在读者面前，它是非连续的、不确定的，完全不同于我们所熟悉的宏观连续运动。原来，我们眼中的世界并不是世界的全部。既然我们有幸来到这个世界，就应该尽量了解这个世界的全部，欣赏这个世界的奇妙。我们的目标正是让更多的人了解量子、理解量子、应用量子，用这个时代最流行的一个词来表述的话，就是让量子酷起来！

作者在撰写本书的过程中，参考、引用、融合了国外相关的文献著作及研究成果，在此对书中涉及的专家、学者表示衷心的感谢。同时，作者还要感谢本书的责任编辑，是她做出的贡献，才让本书得以顺利出版。

客观地说，受限于作者的能力与水平，书中的缺点和不妥之处肯定不少，真诚地期望读者批评指正。

吴今培  
2019年3月



# 目

# 录

1 量子诞生 .....	3
2 光量子假说 .....	11
3 玻尔的原子模型 .....	19
4 矩阵力学 .....	24
5 波动力学 .....	30
6 测不准原理 .....	39
7 量子纠缠 .....	44
8 量子论发展史回顾 .....	68
9 20 世纪的一场科学争论 .....	81
10 量子论的其他解释 .....	87
11 量子信息 .....	99
12 量子计算 .....	107
13 量子通信 .....	121
14 量子人工智能 .....	134
尾声 .....	145
参考文献 .....	149
中英文人名对照表 .....	151

20 世纪初，在物理学阳光灿烂的天空中飘浮着两朵乌云：一朵是**以太**问题；另一朵是**黑体辐射**问题，它们成为经典物理学研究中遇到的难题。正是这两朵不起眼的乌云，给世界带来一场前所未有的狂风暴雨，驱散这两朵乌云，将会导致物理学的伟大新生。

第一朵乌云，最终导致了相对论革命的爆发。

第二朵乌云，最终导致了量子论革命的爆发。这是本书论述的主题，让我们从这里出发吧！





## 量子诞生

大家知道,一个物体之所以看上去是白色的,那是因为它反射了所有频率的光波;反之,如果看上去是黑色的,那是因为它吸收了所有频率的光波。物理上为了研究热辐射问题,提出了一种理想的模型,这样的模型叫作“黑体”,指的是那些可以吸收全部外来辐射的物体。绝对的黑体在自然界虽然不存在,但对“黑体”的研究是解决一切物体辐射的关键。

19世纪末,人们开始对黑体模型的热辐射问题开展研究。其实,很早的时候,人们就已经注意到对于不同的物体,温度和辐射频率似乎有一定的对应关联。比如说金属,有过生活经验的人都知道,要是我们把一块铁放在火上加热,那么到了一定温度的时候,它会变得暗红起来,温度再高些,它会变得橙黄,到了极高温度的时候,如果能想办法不让它汽化,我们可以看到铁块将呈现蓝白色。也就是说,加热物体的温度(或能量)与其释放的光的颜色之间有一定关系,而颜色又

同光的频率(或波长)有关。

问题是,物体的辐射能量和频率究竟有着怎样的函数关系呢?

经过科学家的研究,在黑体问题上,我们得到了两套公式。可惜,一套只对长波有效,而另一套只对短波有效。这让人们非常郁闷,就像有两套衣服,其中一套上衣十分得体,但裤腿太长;另一套的裤子倒是合适,但上衣却小得无法穿上身。最要命的是,这两套衣服根本没办法合在一起穿,因为两个公式推导的出发点是截然不同的!从经典的麦克斯韦电磁波理论去推导,就得到适用于长波的瑞利-金斯公式;而从玻尔兹曼运动粒子的角度出发去推导,就得到适用于短波的维恩公式。总之,用他们的公式来解释黑体辐射,无论如何也不能使辐射能量和辐射光谱统一起来。

正当人们在黑体辐射的研究中遇到困境,并不知道这个问题最后将会得到一个怎样的解答的时候,一个德国人——马克斯·普朗克登上了舞台,物理学全新的一幕终于拉开了。命中注定,这个名字将要光照整个 20 世纪物理学史。

普朗克于 1858 年 4 月 23 日生于德国基尔的一个书香门第。他少年时



图 1 普朗克

代极喜欢音乐,以至于中学毕业后选择专业时,在音乐和自然科学间犹豫再三,即使到了大学他还在留恋音乐,并且亲自领导了一支乐队,又是学院合唱团的指挥。在他通向未来的大路上又遇到一次干扰,老师坚决反对他攻读理论物理。1924年普朗克在讲演中回忆说,当我开始研究时,我可敬的老师约里对我描绘物理是一门高度发展的、几乎是尽善尽美的科学。现在,能量守恒定律的发现给物理学戴上桂冠之后,这门科学作为一个完整的体系,已经建立起足够牢固,并接近于最终稳定的形式。

幸亏中学和大学的这两次干扰都没有动摇普朗克最终的决心。他21岁时通过了博士学位论文,获得慕尼黑大学的博士学位。他关于热力学方面的研究孕育了其后来的新思想。1886年,普朗克读到了维恩关于黑体辐射的论文,并对此表现出了极大的兴趣,决定彻底解决黑体辐射这个困扰人们多时的问题。最初,普朗克利用数学上的内插法,通过在黑体辐射的维恩公式与瑞利-金斯公式之间寻求统一,得到了黑体辐射公式。普朗克得到的黑体辐射公式能够解释黑体辐射的实验结果。但是,他不知道这个公式背后的物理意义,并没有认识到它将引起物理学根基的巨大变化。

为了解释他的新公式,后来普朗克回忆道:“即使这个新的辐射公式证明是绝对精确的,如果仅仅是一个侥幸揣测出

来的内插公式，它的价值也只能是有限的。因此，……我就致力于找出这个公式的真正物理意义。这个问题促使我直接去考虑熵和概率之间的关系，也就是说，把我引到了玻尔兹曼的思想。”原来普朗克发现，仅仅引入内插法是不够的，如果要使他的新公式成立，他必须接受他一直不喜欢的统计力学，从玻尔兹曼的角度来看问题，把熵和概率引入系统中来。而在处理熵和概率的关系时，就必须做一个假定，假设能量在发射和吸收的时候，不是连续不断，而是分成一份一份的。

1900年10月19日，柏林物理学会举行讨论会。会上，普朗克提出了一个自己推出的公式。这个公式无论对长波、短波、高温、低温都惊人地适用，维恩公式和瑞利-金斯公式被和谐地统一到一起。于是满座大惊，虽然还没有一个人能完全弄清楚这个新公式，但是在事实面前却无人提出反对意见。两个月之后，1900年12月14日，人们正在忙着准备欢度圣诞节。这一天，普朗克在德国物理学会上发表了的大胆假设。他宣读了那篇只有3页的名留青史的论文《黑体光谱中的能量分布》，其中改变历史的是这段话：

为了找出  $n$  个振子具有总能量  $U_n$  的可能性，我们必须假设  $U_n$  是不可连续分割的，它只能是一些相同部件的有限总和……

请读者记住,1900年12月14日这个日子,就是量子的诞辰。那一年普朗克42岁。今日,他终于痛快淋漓地说:“一言以蔽之,我做的这件事,可以简单地看作是孤注一掷。我生性平和,不愿进行任何吉凶未卜的冒险。但是我经过6年的艰苦摸索,终于明白,经典物理对这个黑体辐射问题是丝毫没有办法的。旧的理论既然无能为力,那么就一定要寻找一个新的解释,不管代价多高也一定要把它找到。除了热力学的两条定律必须维持之外,至于别的,我准备牺牲我以前对物理所抱的任何一个信念。问题往往是这样,到实在不能解决时,抛弃旧框子,引入新概念,就立即迎刃而解了。”

普朗克引入了一个什么新概念呢?就是辐射的能量不是连续的,而是一份一份的,像机关枪里不断射出的子弹。这一份一份的能量普朗克把它称作“能量子”。但随后,在另一篇论文里,他就改称为“量子”,英语就是 quantum。量子就是能量最小单位,就是能量里的一美分,一切能量的传输,都只能以这个量为基本单位来进行。它可以传输一个量子,两个量子,任意整数个量子,但却不能传输  $1/2$  量子、 $1/4$  量子。那样的状态是不允许的,就像你不能用现钱支付  $1/2$  美分一样。在两个基本单位之间,是能量的禁区,我们永远也不会发现能量的计量会出现小数点以后的数字。

那么,这个最小单位究竟是多少呢?从普朗克的辐射方程可以容易地推算出答案:它等于一个常数乘以特定辐射的频率。用一个简明的公式来表示:

$$E = h\nu$$

其中  $E$  是单位量子的能量,  $\nu$  是频率,  $h$  是一个神秘的量子常数,以它的发现者去命名为“普朗克常数”。它等于  $6.626 \times 10^{-27}$  尔格·秒,也就是  $6.626 \times 10^{-34}$  焦耳·秒。 $h$  这个值,后来竟是构成我们整个宇宙最为重要的三个基本物理常数之一,另外两个是引力常数  $G$  和光速  $c$ 。 $G$  出现在牛顿万有引力公式  $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$  中,  $c$  出现在爱因斯坦质能等价公式  $E = mc^2$  中。正是这三个常数把宏观宇宙、微观世界与光速时空联系起来。

利用这个简明公式,我们可以做一些基本计算。比如对于频率为  $10^{15}$  赫兹的辐射,对应的量子能量是多少呢?那么就简单地把  $10^{15}$  乘以  $h = 6.6 \times 10^{-34}$ ,算出结果等于  $6.6 \times 10^{-19}$  焦耳,也就是说,对于频率为  $10^{15}$  赫兹的辐射,最小的“量子”是  $6.6 \times 10^{-19}$  焦耳,能量必须以此为基本单位来发送。当然,这个值非常小,也就是说量子非常精细,难以察觉。因此由它们组成的能量自然也十分细密,以至于我们通常看起来,能量的传输就好像是平滑连续的一样。

普朗克提出能量必须是有限个可能态，它不能是无限连续的，这有什么了不起的意义呢？

对此爱因斯坦这样评价道：“普朗克提出了一全新的、从未有人想到的概念，即能量量子化的概念。”“该发现奠定了20世纪所有物理学的基础，几乎完全决定了其以后的发展。”

在这以前，人们总是认为，一切物理过程都是连续的。德国数学家、哲学家莱布尼茨曾明确指出，“自然无飞跃”。牛顿也认为，自然界中的所有变化必然以连续的方式发生。这种连续性的假设，是微积分的基础。牛顿庞大的体系，便建筑在这个地基之上，度过了百年的风雨。同样，18世纪和19世纪的科学家和哲学家也都认为，物理过程必定是连续的。而普朗克第一次将不连续性引进物理领域，把物理学构筑起来的连续性原理体系毫不留情地彻底打破，引发出一场最为反叛和彻底的革命，也是最具传奇和史诗色彩的革命。

基本量子的发现，开创了物理学的新时代，它表明：原来物理过程可以是不连续的，认为一切自然现象无限连续的观念是一种误解，应该放弃。正如德国物理学家劳厄所说：“普朗克的关于能量的  $h\nu$  外延，不仅是对已有的物理学的改造，而且是一次革命。在以后的几十年内不仅越来越明显地显示出这一革命是多么深刻，而且也越来越显示出它是多么必要。借助于量子的观念，人们就能够进一步理解到在这以前，对于



物理上还是封闭的各种原子过程。”

一眼看来，普朗克公式  $E = h\nu$  实在太过于朴实，但就像大智者往往若愚，简洁无华的它其实也是深藏不露的。毫不夸张地说，量子化才是世界的本质！一个简单普适的公式总结了普朗克辉煌的人生，也彻底打破了我们以往对世界的认识。

1920年，普朗克因发现量子这一成就而获得诺贝尔物理学奖。他在一次演讲中谦虚地说：“如果一个矿工发现了一座金矿。那是因为地下本来就有金子。我不去发现量子原理，也总有人会去发现它的。”物理学发展到一定阶段总要推出自己的代表人物。