

引言

如果你是第一次听到“量子”这个词，很有可能会以为它是某一种粒子的名字，其实不然，这是一种常见的误解。事实上，“量子”是一种物理概念，这个概念是与经典物理中的“连续”相对立的，它代表的是一种不连续的变化方式，我们称之为“量子化”。

我们所熟知的所有微观粒子，如光子、电子、质子、原子、分子等，在微观尺度里都表现出明显的量子特性，这是与我们在日常生活中的认知完全不同的特性，我们所熟悉的许多物理认知，在量子世界中都被彻底颠覆。微观粒子的运动根本不服从牛顿力学，因此，描述微观粒子运动规律的科学就被称为量子力学。

量子力学的发现过程，是一幅波澜壮阔的历史画卷，其中，既有人类智力的巅峰对决，也有超出想象

的自然之谜。量子现象给人类带来的冲击和震撼，连人类最聪明的大脑都为之惊叹。量子物理对人类文明的推动作用，在过去100年已经带来了一场深刻的技术革命，且在未来的100年，还将继续带来另一场更深刻的技术革命。

下面，就让我们跟随历史的脚步，把这幅画卷徐徐展开，跟那些伟大的物理天才们一起，去探索量子科学的奥秘吧。



第一篇
量子·起源

1

黑暗中的光

1900年是20世纪的第一年，从伽利略时代算起，近代物理学到这时候已经发展了近300年。300年间，物理学家们格物致理、孜孜不倦地探求自然界的奥秘，开辟出了力学、光学、热学、电磁学等多个研究领域，涌现出牛顿、法拉第、麦克斯韦、玻尔兹曼等一大批天才的物理学家。到1900年的时候，人们已经弄清楚了太阳系的运行规律，发现了元素周期表，发明出蒸汽机和发电机，甚至发明了无线电通信……人类对世界的认识和改造达到一个空前的高度，当时很多物理学家自信满满地认为，人类对自然界已经了如指掌，人类对物理学的探索也即将走到尽头，到那时候，宇宙在人类眼里将不再有秘密。

1900年，德国物理学家马克斯·普朗克（1858—1947）刚满42岁，但他已经荣誉满身了。普朗克21岁博士毕业以后，先在自己的母校慕尼黑大学任教，



普朗克

后来又回到家乡的基尔大学任教。凭借自己在热力学领域的出色工作，他在1889年来到了首都柏林，出任柏林大学理论物理研究所的主任，1894年，他当选为普鲁士科学院的院士。

荣誉加身的普朗克，在世人眼里已经是一位非常成功的物理学家了，但他自己却时常会回想起他的大学物理老师冯·约利对他说过的一番话。那时候，他一心想钻研物理，于是申请从数学系转到物理系，没想到，冯·约利居然对他说，物理学的大厦已经建成，剩下的只不过是 在一些偏僻的角落里进行边边角角的修补，已经没有什么大的发展前途了。普朗克虽然没有被这些话语劝退，但是这些话却在他的心底深深地扎下了根，他也时常在疑惑，物理学难道真的快走到尽头了吗？

就在他当选院士的那一年，普朗克决定向当时物理学界的著名难题——黑体辐射发起进攻，他希望能攻克这个难题，即便是修补大厦

的边边角角，他也要修补最难的那一块。

当物体被加热时，就会发光发热，例如，烧红的铁块在黑暗中会放出橙黄色的光芒（图 1-1）。当时物理学家们已经知道，“光”就是电磁波，发光就是辐射电磁波，电磁波携带的能量就是测量出来的“热”。事实上，任何温度高于绝对零度（ $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）的物体都在发光发热，只不过，它们发出的“光”并非都是可见光。只有波长在 $400\sim 700\text{ nm}$ 的光才是可见光（图 1-2），也就是人类肉眼能识别的电磁波，其他波段的电磁波都是不可见光，人类看不到。例如，人类虽然也在发光，发出的却是肉眼看不到的红外线。而物体只有在被加热到 500°C 以上时才会发出较强的可见光。

物体发光发热的现象，在物理学上有一个专有名词——热辐射。



图 1-1 烧红的铁块发出可见光

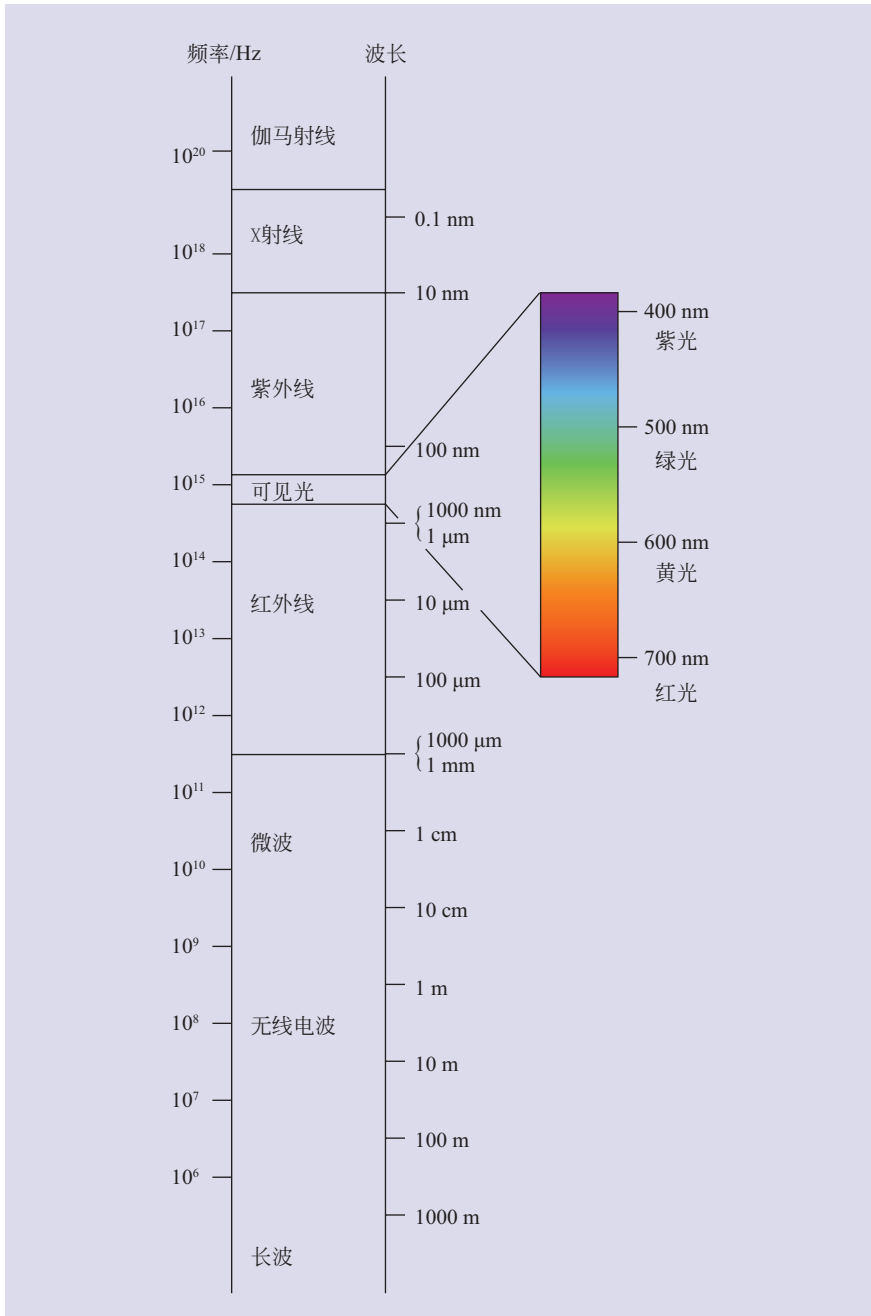


图 1-2 可见光在电磁波谱中的范围

温度越高，辐射能力越强。热辐射看起来好像并不复杂，按道理讲，当时人们已经有了完善的光学、热学、统计力学、电磁学等理论，解释这个现象应该不算一个难题，但令人意外的是，这竟然是当时的一大难题。

为了研究热辐射，人们设想了一种理想情况。如果一个物体能吸收全部的外来光，那么当它被加热时就能最大限度地发光，这就是理想的热辐射，也叫黑体辐射。“黑体”的概念是普朗克的老师基尔霍夫在1862年提出来的。我们知道，一个物体之所以呈黑色，是因为它能吸光而不反光。显然，最黑的物体能把照射到它表面的所有光都吸收掉，一点儿都不反射，这就是“黑体”。

最开始人们用涂黑的铂片作为黑体来研究。后来，德国物理学家维恩想出来一个更巧妙的办法来制作黑体：找一个内壁涂黑的耐热的密闭箱子，在箱子上开一个小孔，因为射入小孔的光能被完全吸收，所以这个小孔就是一个“黑体”（图1-3）。

当时人们通过实验已得出了黑体辐射的光波波长与辐射能量之间的

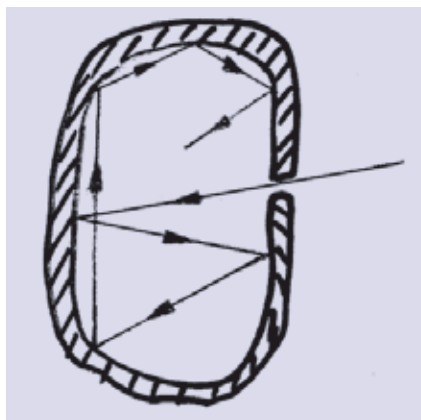


图1-3 空腔小孔黑体

关系曲线，对于一个理想的热辐射来讲，这条曲线是确定的，只随温度变化（图 1-4）。但是在理论解释上，却找不到一个合适的公式来描述这条曲线。物理学家们通过经典的热力学和统计力学推导出两个公式，分别叫维恩公式和瑞利-金斯公式，但这两个公式只能分别解释曲线的一半，都无法给出全部曲线的能量密度分布。经典物理学在这个问题上，似乎无能为力。

到 1900 年，普朗克研究黑体辐射问题已经 6 年了。身为热力学专

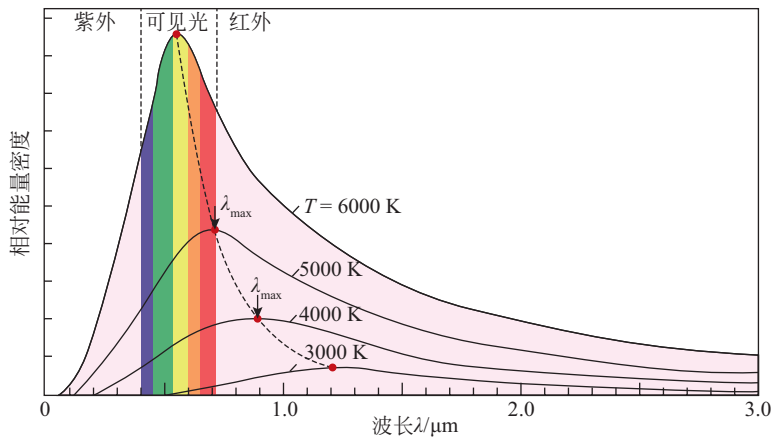


图 1-4 不同温度下的黑体辐射能谱曲线

(https://www.chem17.com/tech_news/detail/2195430.html)

家，顶着科学院院士的光环，奋斗 6 年仍然一无所获，普朗克承受的压力也是巨大的，付出和回报似乎不成比例，能否取得成果还是未知数，难道要在这个问题上耗一辈子？

耗一辈子就耗一辈子！普朗克下定决心。解决一个重大问题胜过解决 10 个普通问题。普朗克知道，这个问题对整个物理学至关重要。他决定，无论付出什么样的代价，都要找到黑体辐射的理论解释。

扩展阅读

如果我们对比一下普朗克公式和维恩公式，就会发现普朗克仅仅在维恩公式的指数项后面减了个1，这一点小小的变化，竟产生了天壤之别的结果。二者的区别如下。

$$\text{维恩公式: } f(\lambda) = \frac{b}{\lambda^5 e^{\frac{a}{\lambda T}}}$$

$$\text{普朗克公式: } f(\lambda) = \frac{b}{\lambda^5 (e^{\frac{a}{\lambda T}} - 1)}$$

式中： $f(\lambda)$ 是黑体辐射能量随波长 λ 的分布函数； T 是温度； e 是自然常数 ($e=2.718\cdots$)； a 和 b 是两个经验参数。

经过6年的研究，普朗克非常清楚，经典物理学是无法解决这个问题的。看来，必须要做出一些改变，这个改变是大是小，还不得而知，但是，必须迈出这一步。于是，普朗克决定抛弃经典物理的条条框框，先凑一个公式出来。不管公式的来由是什么，先找到一个能符合实验曲线的公式，然后再来寻找这个公式背后的物理内涵。

普朗克从维恩公式入手，结合6年来早已烂熟于心的实验曲线，经过一番推敲，最后，利用数学上的内插法，他竟然真的凑出了一个公式，这个公式可以完全解释整条黑体辐射曲线，分毫不差！这一结果让普朗克欣喜若狂，但更让他紧张焦虑，他已经看到了希望的曙光，但似乎又处在黎明前的黑暗中，他必须找到这个公式背后隐藏的物理奥秘，去迎接黎明真正地到来。

接下来的几个星期，是普朗克一生中最忙碌最紧张的几个星期，他的全部心思都花在了这个公式上面，他不满足于仅仅出于凑巧找到这个