# 第 7 章 早期量子论和量子力学的准备

## 7.9 爱因斯坦与波粒二象性

### 7.9.1 波粒二象性是波动力学的基础

第一个肯定光既有波动性又有微粒性的是爱因斯坦。他认为电磁辐射不仅在被发射和吸收时以能量 *hν* 的微粒形式出现，而且在空间运动时，也具有这种微粒形式。爱因斯坦这一光辉思想是在研究辐射的产生和转化时逐步形成的。与此同时，实验物理学家也相对独立地提出了同样的看法。其中有 W.H.布拉格和 A.H.康普顿（Arthur Holly Compton，1892—1962）。康普顿证明了光子与电子在相互作用中不但有能量变换，还有一定的动量交换。1923 年，德布罗意把爱因斯坦的波粒二象性推广到微观粒子，提出物质波假说，论证了微观粒子也具有波动性。他的观点不久就得到电子衍射等实验的证实。

波粒二象性是人类对物质世界的认识的又一次飞跃，这一认识为波动力学的发展奠定了基础。下面几节将介绍这一方面的情况。

### 7.9.2 爱因斯坦的辐射理论

早在 1905 年，爱因斯坦在他提出的光量子假说中，就隐含了波动性与粒子性是光的两种表现形式的思想。他分析了从牛顿和惠更斯以来，波动说和微粒说之间的长期争论，指出麦克斯韦电磁波理论的局限性，审查了普朗克处理黑体辐射的思路，总结了光和物质相互作用有关的各种现象，认为光在传播过程和与物质相互作用的过程中，能量不是分散的，而是一份一份地以能量子的形式出现的。

1909 年 1 月和 4 月，爱因斯坦又撰文讨论辐射问题。他利用能量涨落的概念，考察一个挂在空腔中的完全反射性的镜子的运动，空腔中充有温度为 *T* 的热辐射。如果镜子是以一个非零的速度运动，则从它的正面反射出去的具有给定频率 *ν* 的辐射要比从它的背面反射出去的多一些；因此镜子的运动将会受到阻尼，除非它从辐射涨落获得新的动量爱因斯坦利用普朗克的能量分布公式，推导出体积 *V* 中，时间 *τ* 内，频率在 *ν*→*ν* + d*ν* 之间的那一部分黑体辐射所具有的动量均方涨落为

$\overbar{∆^{2}}$ = *fτ*d*ν*

或能量均方涨落为

$\overbar{ε^{2}}$ = *V*d*ν*

其中 *ρ* 是辐射能量密度，*f* 是镜子表面积。[[1]](#footnote-1)

接着，爱因斯坦对上式两项分别作了说明。前一项正是能量子的涨落，它是以 *hν* 作为基数的。后一项具有从麦克斯韦理论求出的电磁场涨落的形式。前者代表粒子性，后者代表波动性。爱因斯坦虽然还没有用“类点量子”一词来明确地表明他的观点，但他此时确已把光量子当作粒子来看待。他在 1909 年还没有形成完整的辐射理论，但他已经明确到，遵循普朗克能量分布公式的辐射，同时具有粒子和波动的特性。

1909 年 9 月爱因斯坦在萨尔茨堡举行的第 81 届德国物理学家和医学家会议上作了题为《论我们关于辐射的本质和组成的观点的发展》的演讲，解释上述均方涨落：

“因此，我认为，从上面的公式（它本身是普朗克辐射公式的结果）出发，不得不作出如下的结论：除了从波动论得出的辐射动量分布的空间不均匀性，还存在动量分布的另一种不均匀性，在辐射能量密度很小的情况下，后一种不均匀性的影响远远超过前一种。”[[2]](#footnote-2)

爱因斯坦对辐射理论的状况表示了如下的见解：

“我早已打算表明，必须放弃辐射理论现有的基础”；“我认为，理论物理学发展的下一阶段将给我们带来一个光的理论，这个理论可以解释为波动理论与发射理论的融合”；“不要把波动结构和量子结构……看成是互不相容的。”[[3]](#footnote-3)

爱因斯坦在这里预见到了将有一种新的理论使波动性和微粒性融合于一体。

### 7.9.3 《关于辐射的量子理论》的论述

1916 年爱因斯坦再次回到辐射间题上来，发表了《关于辐射的量子理论》一文，这篇论文总结了量子论的成果，指出旧量子论的主要缺陷，并运用统计方法，又一次论证了辐射的量子特性。

他考虑的基本点是，分子的分立能态的稳定分布是靠分子与辐射不断进行能量交换来维持的。他假设能量交换的过程，即分子跃迁的过程有两种基本方式，一种叫自发辐射，一种叫受激辐射。根据这两种方式发生的概率，他推导出玻尔的频率定则和普朗克的能量分布公式。这样他就把前一阶段量子论的各项成果，统一在一个逻辑完备的整体之中。

爱因斯坦在这篇论文中，认为分子与辐射在相互作用的过程中，不仅有能量转移，也同时会发生动量转移。他假设在辐射束传播的方向上，传递给分子的冲量为 ，也就是说，他假设能量为 *hν* 的量子携带了大小为 *hν*/*c* 的动量，这一动量具有确定的方向。他这样写道：

“看来，只有当我们把那些基元过程看作是完全有方向的过程，我们才能够得到一个贯彻一致的理论”。[[4]](#footnote-4)

“应当把那个小的作用（指冲量交换）和辐射所引起的明显的能量转移完全同等看待，因为能量和冲量总是最紧密地联系在一起的。”[[5]](#footnote-5)

值得特别指出的是，爱因斯坦的受激辐射理论，为 50 年后激光的发展奠定了理论基础（参看 11.1 节）。

### 7.9.4 量子辐射理论的实验检验

激光的产生可以看成是对量子辐射理论的一种检验。其实，早在 20 世纪 20 年代初，爱因斯坦的辐射理论就得到了验证。1921 年，德拜（P.J.W.Debye）在一次演讲中讨论到爱因斯坦的量子辐射理论。作为一个例题，他计算了光量子和电子相互碰撞的情况，结果显示光在碰撞后波长变长了。当时他曾建议他的同事舒勒（P.Scherrer）做一个 X 射线实验来检验波长是否真有改变。可惜舒勒没有及时做这个实验，德拜也就暂时放下这项研究。就在这段时间里，康普顿却一直在为 X 射线散射后波长变长的实验结果探求理论解释。在介绍康普顿的工作之前，还应当提到另一桩与波粒二象性有关的事件，这就是 W.H.布拉格和巴克拉（C.G.Barkla）之间发生的关于 X 射线本性的争论。

1. 爱因斯坦全集，第二卷．湖南科技出版社，2002.478 [↑](#footnote-ref-1)
2. 同上注，第 505 页。 [↑](#footnote-ref-2)
3. 转引自：Pais A.Subtle is the Lord....Oxford，1982.404 [↑](#footnote-ref-3)
4. 爱因斯坦文集，第二卷．商务印书馆，1979.337 [↑](#footnote-ref-4)
5. 同上注，第 350 页。 [↑](#footnote-ref-5)