

第六章 物质观的革命——量子论

……我以前同现在一样，相信物理定律越带普遍性，就越是简单。

—— M. 普朗克，《M. 普朗克物理论文和演讲集》

当一个人寻求生活的和谐时，必须永不忘记，在生活的伟大戏剧中，我们既是观众，又是演员，这是一个古老的真理。

—— N. 玻尔，《原子物理学与自然的描述》

本章将对20世纪物质观革命中一系列重大发现做出介绍，包括：

1. 普朗克 — 提出能量量子化(基于黑体辐射实验)。
2. 爱因斯坦 — 提出光量子(基于光电效应实验)。
3. 卢瑟福 — 提出原子核式模型(基于 α 粒子大角度散射实验)。
4. 玻尔 — 提出玻尔模型假定(得到光谱实验和弗兰克—赫兹实验证明)
5. 德布罗意 — 提出物质波假定(得到电子在晶体上衍射实验证明)

围绕这些重大发现，我们将看到：

量子物理学的先驱的杰出的洞察力、丰富的想像力和 惊人的创造力；

量子物理发展的艰难历程；

科学争论推动了量子物理发展；

物理学家寻找物质世界和谐统一的那种执著精神。

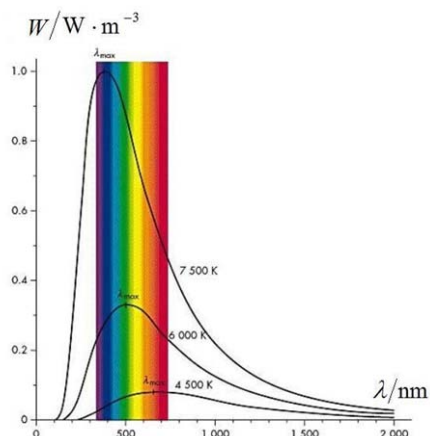
§ 6-1 开创物理学新时代的“量子”概念的提出

一、背景

1. 当力学、热力学、统计物理和电动力学等取得一系列成就后，许多物理学家都认为物理学的大厦已经建成，后辈们只要做一些零碎的修补工作就行了。
2. 两朵乌云的出现，打破了物理学平静而晴朗的天空。对这两朵乌云的研究分别导致了相对论和量子论的诞生，它们是：

(1) 迈克尔孙-莫雷实验：在实验中没测到预期的“以太风”，即不存在一个绝对参考系 → 这关系到相对论的建立(见第八章)。

(2) 黑体辐射实验：用经典理论无法解释实验结果 → 导致量子物理的诞生。



二、观念的根本突破 普朗克公式的导出

1. 什么是黑体辐射？为什么要研究它？

热辐射：物体内的分子、原子受到热激发而发射电磁辐射的现象。

不同温度下，辐射能量集中的波长范围不同。

$<600^{\circ}\text{C}$ ，物体的热辐射波长在红外和远红外波段。

温度的升高，物体热辐射的能量逐渐增强，辐射波长趋向短波段。

$600\sim 700^{\circ}\text{C}$ ，物体开始呈现暗红色，这表明辐射波段开始进入可见光区域。

物体温度的继续升高，辐射的波长进一步向短波方向移动，物体变得鲜红，甚至白热。

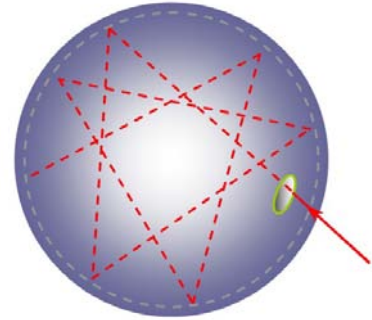
黑体是能100%吸收投射到它上面的电磁辐射而没有任何反射的物体。它的辐射是我们研究的对象。

研究黑体辐射的目的是：因为它的辐射本领与它的材料性质完全无关，只与温度和波长有关。

2. 如何获得黑体？

实际中不存在黑体，它只是个理想模型。

科学家在一个密闭的空腔上开一个小孔，则此小孔就可近似地看成为黑体。只吸收，不反射。



3. 由 $W(\lambda, T)$ 随 λ 变化的实验曲线可得下面一些重要结果：

(1) 维恩位移定律：即不同温度 T 时， $W(\lambda, T)$ 的极值位置 λ_m 与温度有如下关系：

$$\lambda_m T = \text{常数} = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

(2) 维恩根据实验结果给出了一个维恩经验公式；

$$W(\lambda, T) = \frac{A}{\lambda^5} e^{-\frac{B}{\lambda T}}$$

此式在 λ 较小时与实验符合很好， λ 大时则不好。A和B为经验参数。

(3) 瑞利-金斯根据经典电动力学和统计物理导出了瑞利-金斯公式：

$$W(\lambda, T) = \frac{2\pi c k T}{\lambda^4}$$

此式在 λ 较大时能与实验很好符合，而 λ 较小时，则根本不对。

4. 著名的普朗克公式

普朗克一开始是将两个公式综合起来，凑出一个与整个实验曲线符合的经验公式，称为普朗克公式。其中， h 是普朗克常数， c 是光速， k 是玻尔兹曼常数。

$$W(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k T} - 1}$$

当 λ 很小 \rightarrow ， $hc \gg \lambda k T$ 时，此式近似为维恩公式。

当 λ 很大； $hc \ll \lambda k T$ 时，此式近似为瑞利-金斯公式。

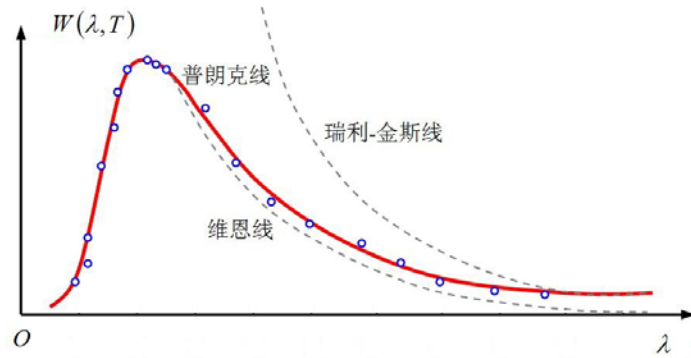
但是普朗克不满足这个凑出的公式，经过两个月奋斗，于1900年10月19日，在德国物理学会会议上报告了他在“能量量子化”的假设下，从理论上严格推导出了

上述普朗克公式。

爱因斯坦在《悼念麦克斯·普朗克》一文中指出：

“这一发现成为20世纪整个物理研究的基础，从那时起，几乎完全决定了物理学的发展。要是没有这一发现，那就不可能建立起分子、原子以及支配它们变化的能量过程的有用的理论。”。

摘自《走近爱因斯坦》p. 221 (辽宁教育出版社, 2005年)



在普朗克理论中, 他提出了如下的基本假设:

在辐射场中有大量包含各种频率的谐振子, 一个频率为 ν 的谐振子的能量不能是连续的, 只能是能量元 (又称能量子) ϵ_0 的整数倍, 即 $E_n = n\epsilon_0$, 其中 n 只能取正整数。能量元 $\epsilon_0 = h\nu$, h 为普朗克常数。这就是著名的“能量量子化”假设。

必须指出的是, 正如赵凯华教授在《量子物理》书中所指出的: 这些“谐振子”并不一定代表某种实体, 如分子、原子等, 且是与器壁无关。只是一种抽象化的模型, 只要假定它们遵从的物理规律与现实物体相同。

在此假设下, 导出了描述黑体辐射的普朗克公式以及与器壁无关的特点。

5. 应用举例

(1) 用维恩位移定律, 可估计太阳的温度。

太阳中最强的是黄光, 即 $\lambda \approx 0.5\mu\text{m}$, 则可估计太阳表面温度 $T \approx 5800\text{K}$ 。

(2) 将辐射本领对各种 λ 求和, 可得总辐射本领公式:

$$W(T) = \sigma T^4$$

此式又称斯忒藩-玻尔兹曼定律, 其中常数 σ 为

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.6705 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$$

利用斯忒藩-玻尔兹曼定律, 可估计太阳表面单位面积所辐射的功率约为 $6.4 \times 10^7 \text{ W}/\text{m}^2$ 。由此可见太阳能有重要的利用的价值。

三、量子观念在“非难”中得到发展

1. “能量子”假定遭到怀疑

普朗克引入了“能量子”的假设, 标志着量子物理学的诞生, 具有划时代的意义。但是由于这个假设对经典物理学致命的打击, 所以他同时代的那些物理学家对这一观念都表示疑惑不解, 甚至怀疑。

著名物理学家洛伦兹说:

“关于辐射量子问题的讨论使科学家们都陷在死胡同里了。”

普朗克本人也由于受传统的经典观念影响太深，对自己提出的“量子”思想违反了经典的连续性概念而烦恼和后悔。并一直试图用连续性代替不连续性，回到经典范畴。经过十多年徒劳的努力后，他才相信量子假设是正确的，作用量子 h 反映了新理论的本质。

2. 年仅21岁的爱因斯坦，对于新生“量子婴儿”，表现出热情支持的态度。并于1905年提出了“光量子”假设，把量子看成是辐射粒子，赋予量子的实在性，并成功地解释了光电效应实验，捍卫和发展了量子论，不愧为量子物理的一代先驱。

§ 6-2 第一个钻到原子中心的人——卢瑟福

在介绍第三位量子物理的先驱者玻尔的工作以前，有必要先介绍卢瑟福，不仅因为卢瑟福的工作同样是给了经典物理一个致命的打击，而且玻尔的工作正是建立在他的工作基础上的。

一、汤姆孙的原子模型

电子的发现者汤姆孙本人所提出的一种原子模型：

原子的正电荷是均匀分布在原子球体内，而电子是一个个嵌在其中，并保持整个原子的电中性。当时这种模型被称之为“葡萄干布丁模型”。

1904年又作进一步假设：

原子中电子是分布在一个个同心圆环上，作着旋转，每个环中只能包含有限个电子，这是闪光点。这个假设也可以解释元素周期表。

二、 α 粒子探针的奇迹

1. 生平

卢瑟福1871年8月13日生于新西兰一个苏格兰移民后裔家庭。1894年大学毕业，考入剑桥大学三一学院，成为J. J. 汤姆孙第一个外国研究生。后来成为卡文迪许实验室的第四任教授。

2. 卢瑟福的重大贡献

他发现了放射性规律，发现了原子核式结构，首次实现了人工核反应，预言了中子等。被誉为“核物理之父”

他还非常重视人才培养，被称为培养人才的巨匠。反应堆的发明者——费米说，卢瑟福在科学史上被怀念，不仅因为他的贡献，而且还因为“他作为教师这个字眼最高意义上的一个教师”。他提倡鼓励学生思考问题，提出问题，自己解决问题。

3. 发现原子核过程

卢瑟福是有意让他的研究生马斯登寻找有否 α 粒子从金属表面反射回来。后来马斯登和盖革用 α 粒子轰击厚度为 $0.4\mu\text{m}$ 的金箔，发现有 $1/20000$ 的概率被反射回来，发生大角度散射(可见决不是偶然发现)——这是第一个有科学依据的原子模

型的起点。

用葡萄干布丁模型是无法解释粒子被反射回来的现象。卢瑟福提出原子的“**核式结构模型**”：所有正电荷 (Ze) 和原子质量都集中在原子中心一个非常小的体积内，这就是原子核。原子中的电子绕核运动，靠静电引力把整个原子结合在一起。并且通过**理论推导**给出了著名的“**卢瑟福散射公式**”，所计算出的 α 粒子散射概率与实验事实完全相符。

三、卢瑟福提出“原子核式结构”模型的意义和遭遇

1. 模型提出的重大意义：

- (1) 又一块新的里程碑 一开始了原子核研究的历史。
- (2) 开创了利用粒子散射实验研究物质结构的新方法。
- (3) 在思想观念上, 对经典物质观又一次致命打击。

2. 模型遭怀疑和卢瑟福勇敢面对

任何重大发现的背后，往往又孕育着新的问题，甚至是一种灾难。卢瑟福模型也不例外。主要问题是无法解释原子的稳定性和原子有一定的大小。因为按照经典电磁学理论，当带电粒子作加速运动时，会发射电磁波，放出能量。因此，绕核运动的电子辐射而损失能量最后导致落到原子核上。（这个过程非常短暂。）

这样的原子就都是不稳定的了。后果不堪设想！有人开玩笑说，物理学家不知道为什么自己住的楼没有倒塌掉！

面对这样的困难，卢瑟福还是勇敢地宣布了他的原子模型，在文章中很有预见性的提出：

“关于所提的原子稳定性问题，现阶段尚未考虑进行研究……但是，**我们的科学事业除了今天还有明天！**”

“显然，**原子的稳定性与原子精细结构有关，并且与其中带电粒子的运动有关。**”（卢瑟福很有预见性）

四、卢瑟福预言核内存在“中子”和中子发现的重大意义

1. 卢瑟福预言核内存在“中子”

发现原子核后，科学家就在思考原子核的组成。

在1920年以前，科学家普遍认为原子核是由质子（氢核）和电子组成，当时电子和质子是人们仅知的两种基本粒子。随着一些元素的同位素的发现，提出了一个问题，即为什么这些同位素的核电荷 Ze 相同，但质量不同，且非常接近质子质量的整数倍？

卢瑟福以他丰富的科学想象力提出了**著名的中子假设**：

“在某些情况下，也许由一个电子更加紧密地与H（氢）核结合在一起，组成一个中性的双子，这样的原子也许有很新颖的特性。”

“要解释重元素的组成，这种原子的存在，看来是必需的。”

在1924年后，这种中性双子被定名为中子。

2. 约里奥-居里夫妇错失发现中子良机

1931年，著名的居里夫人的女儿和女婿——约里奥-居里夫妇在实验室里观测到一种穿透力特别强的射线，它不带电，也看不见。

约里奥-居里夫妇把它当成是非常硬的短波 γ 射线。

约里奥-居里夫妇在旧的传统观念的影响下，错失了机会。

3. 查德维克发现中子

卢瑟福“关于中子”的预言，为后来他的学生，查德维克发现中子起了很关键的作用。

相信卢瑟福的预言，一心在寻找中子的剑桥大学卡文迪许实验室的查德维克抓住了机遇。

当他看到约里奥-居里夫妇的实验结果，查德维克则激动地意识到：这就是中子！说：“他们真傻！看见了中子还不知道！”。

查德维克设计实验发现了中子，并用云室测定了中子的质量。

1935年，在诺贝尔奖评奖委员会上，有人认为应由约里奥-居里夫妇与查德维克共享这一年的奖金。

卢瑟福说，给查德维克吧，约里奥-居里夫妇那么能干，他们以后还有机会。就在同一年，化学的诺贝尔奖评委员会把1935年诺贝尔化学奖授予约里奥-居里夫妇，表彰他们发现了人工放射性。

4. 中子发现的重大意义

中子的发现是核物理发展史上的一个重大转折点，使人们对原子核的研究进入一个崭新阶段。

由于中子不带电，容易进入核内，所以用它作为研究原子核的炮弹，比带电的粒子威力大得多，因此中子的发现也为核能的利用打开了大门。

§ 6-3 和谐的乐章——玻尔模型

物质世界具有统一性在于它的物质性，“统一”并不是主观臆想。对统一性的追求是历代科学家共同奋斗的壮丽目标。

一、行星模型的鉴赏家

谁是卢瑟福濒临失败的原子模型的救星呢？不是他自己，而是尼尔斯·玻尔。

后来，史学家问过玻尔：“当时是不是只有你一个人感兴趣呢？”

玻尔回答说：“是的，不过你们知道，我主要不是感兴趣，我只是相信它。”

二、玻尔原子结构模型的基础（科学背景）

1. 普朗克和爱因斯坦提出了“量子化”概念

在玻尔的文章中他尤其强调了普朗克常数 h 的重要意义，他指出在普朗克能量量子化假定中，基本作用量子 h ，不属于经典的一个量，在他的原子结构模型中， h 是一个关键的常数，由 h 、 e 、 m 才可得原子的大小、能量和角动量的量级。

在比热、光电效应、特征X射线等问题的研究中，说明在微观世界要用量子化

概念,所以电动力学的连续性概念在微观世界不能用了,可以假定不辐射。

2. 他相信卢瑟福提出的“原子核核式结构”模型。
3. 受到描写氢原子可见光谱线的波长的经验公式——巴耳末公式的启发:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = \frac{4}{B} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad m = 3, 4, 5, 6, \dots$$

由这么简单公式所计算出的谱线波长与实验符合的如此之好,实在是个“谜”。其中的精髓被玻尔发现了,这个谜被揭开了。在玻尔文章中讲到,得到巴耳末公式(里德伯公式)的启发:“频率可以写成两个整数函数之差,这情况暗示我们……当体系在两个不同的定态之间过渡时,谱线对应于此时发出的辐射。”(把辐射与能级跃迁联系起来)

三、玻尔模型的基本假定和创新点

玻尔的目的:要解决卢瑟福原子模型的稳定性问题及给出原子大小。在他所发表的划时代的关于原子结构的论文中首先对氢原子提出了玻尔模型的两个基本假定:

(1) 定态条件假定

作绕核圆周运动的电子只能处在一些分立的允许轨道上运动,且不存在能量辐射。也就是说电子只允许在一些有确定分立半径和分立能量大小的“定态”轨道上运动。此假定使原子可以保持稳定性。

(2) 频率条件假定

当电子从一定态能量为 E_m 的允许轨道跃迁到另一定态能量为 E_n 的允许轨道时,会以电磁波形式

释放能量(当 $E_m > E_n$)

吸收能量(当 $E_m < E_n$)

若 $E_m > E_n$, 则所放出的电磁波所相应的光子能量为

$$h\nu = E_m - E_n$$

玻尔模型的创新点:

上述两个假定反映了玻尔在前人基础上的创新思维:

第一个将量子化概念用到了原子结构。

第一个将原子光谱与原子结构定量联系起来

第一个将量子化概念原子光谱与原子结构三者和谐地统一到他的原子模型上。

在上述两个假定的基础上,玻尔利用对应原理假定,还导出了电子作圆周运动时角动量也是量子化的,即有

$$L_n = m v_n r_n = n \hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

其中 $\hbar = h/2\pi$ 。又一次看到了普朗克常数 h 在对微观世界描述中的重要性。

在一些教材中，也将角动量量子化作为玻尔模型的第三个假定与前两个放在一起。但请注意，前两个更加关键些。

四、 r_n 、 E_n 和跃迁波长的计算公式

(1) 玻尔轨道半径

$$r_n = \left(\frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{Zm_e e^2} \right) n^2 = \frac{0.0529}{Z} n^2 \text{ nm}$$

同时，可得在轨道上的速度

$$v_n = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 n\hbar} = \frac{\alpha Zc}{n} = \frac{Zc}{137n} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

(2) 玻尔轨道能量

$$E_n = -13.6 \frac{Z^2}{n^2} \text{ eV}$$

对于氢原子 ($Z = 1$), 有

$$\begin{aligned} r_n &= 0.0529 n^2 \text{ nm} \\ E_n &= -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV} \\ v_n &= \frac{c}{137n} \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned}$$

著名的玻尔半径是指 $n=1$ 时的氢原子电子轨道半径

$$a_0 = 0.0529 \text{ nm}$$

氢原子基态电子的能量为: $E_1 = -13.6\text{eV}$, 也就是电子的电离能为 13.6eV 。

氢原子基态中电子速度为: $v_1 = c/137$

氢原子第一激发态: $n = 2 \quad E_2 = -13.6\text{eV}/4 = -3.4\text{eV}$

氢原子第二激发态: $n = 3 \quad E_3 = -13.6\text{eV}/9 = -1.51\text{eV}$

(3) 跃迁放出的电磁波的波长为:

$$h\nu = E_m - E_n = -13.6 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ eV}$$

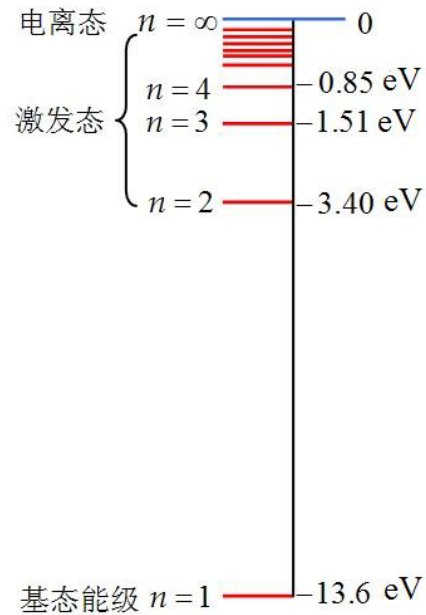
$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{-13.6 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{eV}}$$

由不同的高激发态跃迁到相同的低激发态（或基态）得到的是同一谱线系的光谱。

例子：对巴耳末谱线，是 $n=2$ 不变， $m=3, 4, 5, \dots$ （省略，详见教科书中）

3. 对多电子原子

在玻尔论文中，还着重指出了多电子原子体系中，同样包含了许多量子化的能级，只是其表示式不像单电子那样可以方便写出。玻尔并在论文中提到了可用高速电子轰击原子来显示原子中的量子态的存在。



五、玻尔模型的实验验证

除了光谱实验能证明玻尔模型正确外，法国科学家夫兰克和赫兹正是用电子轰击多电子汞原子，成功证明了原子内部能量的量子化。这是独立于光谱实验的另一种方法，极其重要。

六、玻尔模型的贡献与困难

1. 贡献：给出了量子化的原子结构，成功地给出了对氢原子结构的定量描述，揭开了30年来令人费解的氢光谱之谜。

2. 困难：在玻尔理论中却同时存在着两种不协调的概念——经典的连续性和量子的不连续性。

面对这些困难，人们期待着新的物理思想的诞生。

七、哥本哈根精神

哥本哈根精神是玻尔研究所所倡导的，也是玻尔研究所能成为世界著名的“物理学界的朝拜圣地”，为近代物理发展做出一系列重大贡献的关键所在。

哥本哈根精神可以归纳为两点：

(1) 科学国际主义

在玻尔研究所成立的头10年里，共有17个国家的63位物理学家来此研究。

在玻尔担任所长的40年中，共培养了10多位诺贝尔奖获得者。

(2) 独特的研究风格

平等自由合作的讨论气氛和浓厚的学术气氛。

§ 6-4 德布罗意与物质波

一、物质波提出的背景

1. 玻尔模型遇到根本困难，亟需突破

2. 爱因斯坦的光量子论及光的波粒二象性思想得到国际科学界的承认。

德布罗意是爱因斯坦的狂热崇拜者，他领悟了爱因斯坦深刻的思维方式，体会到“爱因斯坦的光的波粒二重性乃是遍及整个物理世界的一种绝对普遍现象”，并且勇敢地发展了爱因斯坦的思想。

3. 在他哥哥的影响下，德布罗意本人对量子物理研究感兴趣，他从攻读历史转向学习物理，他把量子理论研究作为他的博士论文方向。他发誓：“要尽我所能去理解那个神秘的量子。”

二、物质波的提出

1. 创新思维

德布罗意把爱因斯坦所提出的光的“波粒二象性”推广到了所有物质粒子，从而朝创造描写微观粒子运动的新的力学——量子力学迈进了革命性的一步。

他认为辐射与粒子应是对称的、平等的，辐射有波粒二象性，粒子同样应有波粒二象性，即对微粒也赋予它们波性（周期性）。

德布罗意在1929年领诺贝尔奖时曾回忆当时提出物质波时的想法：“在原子中电子稳定运动的确立，引入了整数；到目前为止，在物理学中涉及整数现象只有干涉和振动的简正模式，这一事实使我产生了这样的想法：不能把电子简单地视为微粒，必须同时赋予它们以周期性”。也就是说，必须要赋予电子波性。为此，他认为在玻尔模型中这些电子轨道的周长应该是电子波长的整数倍（驻波要求），也就是德布罗意把玻尔提出的定态与驻波联系起来。

思考：

如果不是整数倍，电子能是“定态”运动吗？

2. 著名的德布罗意关系式

1924年11月，德布罗意正式提出了所有物质粒子都具有波粒二重性的假设，他认为“任何物体伴随以波，而且不可能将物体的运动与波的转播分开”；并且从理论上导出了粒子动量 p 与伴随着的波的波长之间的关系式：

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

这就是著名的德布罗意关系式。

例如，动能 $E_k=10\text{eV}$ 的电子，其德布罗意波长

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{\sqrt{2mc^2 \cdot E_k}} = \frac{1240\text{eV} \cdot \text{nm}}{\sqrt{2 \times 511\text{keV} \times 10\text{eV}}} = 0.388\text{nm}$$

上述计算中，已用了组合常数 $hc=1240\text{eV}\cdot\text{nm}$ 。

可见这个电子的波长已与原子半径相仿，所以在原子、分子那样的微观世界中，电子的波长就显示出来了。动能越大，电子波长就越短，科学家正是利用短波长的高能电子束代替可见光，制成了电子显微镜。

3. 驻波条件与玻尔的角动量量子化条件完全等价

要想量子数为 n ，轨道半径为 r_n 的圆周轨道上形成驻波

$$2\pi r_n = n\lambda_n \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\lambda_n = \frac{h}{p} = \frac{h}{m v_n} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

所以，

$$L_n = m v_n r_n = n\hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

4. 物质波概念的提出令人惊讶

在论文答辩时，物质波概念的新颖，使答辩委员会不知如何评价，但也不敢轻易否定。

为此，他的导师郎之万将论文副本寄给了爱因斯坦。对德布罗意的论文，爱因斯坦大加赞赏。在爱因斯坦的大力推荐下，德布罗意的论文顺利通过了。

对于德布罗意的物质波思想，爱因斯坦评价说：“厚幕的一角被德布罗意揭开了。M. 德布罗意的弟弟做了一项很有意义的工作……我相信，**这是对物理之谜中最棘手的一个谜投下了第一道微弱的光芒。**”

三、电子波动性的实验验证

在论文答辩会上，针对物质波思想，有人问德布罗意：有没有办法验证这一观点？他回答：“通过电子在晶体上的衍射实验，应当有可能观察到这种假定的波动的效应。”

他哥哥实验室中的一位实验物理学家道维勒试图用阴极射线管做这个实验，没有成功！放弃了。

道维勒为什么没有做成呢？

后来分析是电子的速度不够大，作为靶子的云母晶体吸收了空中游离的电荷。如果改变实验条件认真做下去，是会成功的。

3年后的1927年，美国物理学家戴维孙和英国物理学家G. P. 汤姆孙（J. J. 汤姆孙的儿子）分别发现了晶体的电子衍射，完全证实了电子的波性。

戴维孙-革末的实验装置极其精巧。整套装置仅长5英寸、高2英寸，密封在玻璃泡里，经反复烘烤与去气，真空度达 10^{-6}Pa 。散射电子用一双层的法拉第桶（叫电子收集器）收集，送到电流计测量。收集器内外两层之间用石英绝缘，加有反向电

压，以阻止经过非弹性碰撞的电子进入收集器；收集器可沿轨道转动，使散射角在 $20^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内改变。

1961年德国科学家约恩逊首次获得电子的双缝干涉图样，明确显示了电子的波动性，被列为世界十大最美丽的实验之榜首。

§ 6-5 描写物质波动的方程及波函数的统计解释

一、薛定谔波动方程

德布罗意提出了物质波的概念，可是没告诉大家这种波满足什么样的运动方程，是如何随时间变化的。

电子的波动性与粒子性又是如何完美统一起来的？

1926年，薛定谔完成了波动方程的建立：

$$\nabla^2\Psi + \frac{8\pi^2m}{h^2}(E + \frac{e^2}{r})\Psi = 0$$

称薛定谔方程。

Ψ 是物质波的波函数， m 、 e 是电子质量和电荷， E 是电子运动总能量， r 是电

子离原子核的距离， h 是普朗克常数， $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 是二阶偏导符号。

薛定谔由此方程成功地求解得到了氢原子中电子运动的分立能量公式，与玻尔模型中所给出的一致。

请注意：在这里量子化能级是薛定谔方程的自然结果，不必去规定某些量子化条件了。可惜当时薛定谔自己也没有认识到他所提出的波函数的真正意义。

薛定谔：“要是必须承认这该死的量子跃迁，我真后悔卷入到量子理论中来。

玻尔：“但是，我们大家却全都感谢你，你的波动力学代表了一次巨大的进步。”

——1926年10月，于哥本哈根

对薛定谔有必要提一下他对生命科学研究的贡献：

1944年，薛定谔出版了《生命是什么？——活细胞的物理学观》一书。书中薛定谔试图用热力学、量子力学和化学理论来解释生命的本性，引进了非周期性晶体、负熵、遗传密码、量子跃迁式的突变等概念。这本书使许多青年物理学家开始注意生命科学中提出的问题，引导人们用物理学、化学方法去研究生命的本性。正是在这本书的启发下，后来克里克和沃森发现了DNA双螺旋结构，将生命科学研究深入到分子水平。使薛定谔成了分子生物学的先驱。

薛定谔的《生命是什么？——活细胞的物理学观》

(1) 生命以负熵为主。

- (2) 遗传是以密码形式通过染色体来传递的。
- (3) 生命体系中存在量子跃迁现象，X射线照射可以引起遗传的突变，就是证据。

薛定谔的《生命是什么？》一书，使克里克放弃了研究基本粒子的计划，而选择了“原来根本不打算涉猎的生物学”。使“部分由于原子弹而对物理学失去兴趣”的威尔金斯“为控制生命的高度复杂的分子结构所打动”，而“第一次对生物学产生了浓厚的兴趣。”使感到自己“深深地为发现基因的奥秘所吸引”而投身对它的研究。

可见《生命是什么？》在上个世纪的生物学革命中的作用确实非同凡响。后来，克里克和沃森发现DNA双螺旋结构。

诚然，薛定谔在生物学领域并非行家，他所具有的“只是第二手的和不完全的知识”，但如威尔金斯所说，他的著作所以有影响的理由之一，就是他“是作为一个物理学家写作，如果他作为一个正式的大分子化学家来写，或许就不会有同样的功效。”正是从一个有深邃眼光的理论物理学家的角度，他对生命物质和遗传机制等问题发表了精湛见解，开拓了一种新的研究途径。

二、波函数的统计解释

$|\Psi(x,t)|^2$ 表示电子于 t 时刻在空间 x 点 **被测到的** 概率密度。

直到1927年，玻恩才对波函数作出了正确的统计解释，并且利用统计性把波与粒子两个截然不同的经典概念完美地联系起来。

1. 爱因斯坦观点的启发

“爱因斯坦的观点又一次引导了我。他曾经把光波解释为光子出现的概率波，从而使离子和波的二象性成为可以理解的。这个观点马上可以推广到波函数上：必须是电子（或者其他粒子）的概率波。”

——玻恩的《我这一代的物理学》

2. 玻恩的统计解释

类似爱因斯坦把光波振幅的平方 (E^2) 解释为“光子密度的几率量度”，玻恩认为描写电子运动的波函数的 Ψ 模 (Ψ 是复数) 的平方 $|\Psi(x,t)|^2$ 表示电子于 t 时刻在空间 x 点被测到的概率密度。这样就自然地把粒子性和波性统一起来。

请注意：波函数 Ψ 本身没有直接可观察的物理意义，只有 $|\Psi(x,t)|^2$ 才表示粒子在空间 **被测到的** 概率密度。

三、对量子力学做出重要贡献的其他物理学家

“物理学的原理有它的结构，这个结构有它的美和妙的地方。而各个物理学工作者，对于这个结构的不同的美和妙的地方，有不同的感受。因为大家有不同的感

受，所以每位工作者就会发展他自己独特的研究方向和研究方法，也就是说他会形成他自己的风格。”

—— 杨振宁《美与物理学》

让我们先来认识一位物理学家。

他的才华，让杨振宁想起唐朝诗人高适的诗：

“灵性出万象，风骨超常伦”。

说读他的文章读起来很通顺，就像“秋水文章不染尘”，没有任何渣滓，直达深处，直达宇宙的奥秘。

他的创见，让丁肇中戏称：

“一个天才和一个神经不正常的人的距离是很小的。”

他就是**保罗·狄拉克**（Paul Dirac）

狄拉克的杰出成就之一是，他把20世纪物理学的两项伟大成就——相对论和量子力学结合起来，他写出一个相对论性的量子力学方程，叫狄拉克方程。开创了相对论量子力学，时年26岁。

在相对论和量子力学里，质量是以平方项的形式出现的。 M^2 可以表示 $m \times m$ ，也可以表示为 $(-m) \times (-m)$ 。这也许不会引起普通人的注意，但狄拉克没有放过它，他问 $-m$ 有物理上的意义吗？

（前面丁肇中开玩笑的话就是由此而来）

海森堡是20世纪另一位大物理学家。在他1925年发表的文章中给出了方程，引导出了量子力学的发展，开创了一个模糊前进的方向。因为当时物理学正进入一个非常时代：牛顿力学的基础发生了动摇，“有许多关键性的实验和大胆的决策，有许多错误的尝试和不成熟的假设”，“对于那些参加者，那是一个创新的时代，自宇宙结构的新认识中，他们得到了激奋，也尝到了恐惧。”海森堡正是在那个雾中摸索，摸到了前进方向，这也导致了他的文章有一个共同特点：朦胧、不清晰、有渣滓。与狄拉克的文章风格形成鲜明对比。但当你读他的文章时，会为他的独创力所惊叹，尽管它让你觉得问题还没有做完，还要发展下去。

海森堡和狄拉克的风格之所以如此不同，关键在于他们所专注的物理学内涵不同，注意的方向不同。狄拉克的灵感来自他对数学美的直觉欣赏；海森堡的灵感则来自他对实验结果和唯象理论的认识。

“粒子的位置测定得越精确，它的动量就知道得越不精确，反之亦然。”

——海森堡，1927年

再介绍一个重要人物：

比上帝还挑剔的人 — **泡利**提出了著名的“**泡利不相容原理**”：一个原子中任何两个轨道电子的4个量子数不能完全相同。

不相容原理并没有立刻呈现出它的价值，可是泡利的才华却因此而得到社会的

承认。他还以科学的预见预言了中微子的存在，获得普朗克奖章。直到泡利提出不相容理论20年后的1945年，这个理论的正确性和它产生的广泛深远的影响才得以确认。不相容原理被称为量子力学的主要支柱之一，是自然界的基本定律，它使得当时所知的许多有关原子结构的知识变得条理化。人们可以利用泡利引入的第四个、表示电子自旋的量子数，把各种元素的电子按壳层和支壳层排列起来，并根据元素性质主要取决于最外层的电子数（价电子数）这一理论，对门捷列夫元素周期律给以科学的解释。

四、一场在20世纪传为佳话的科学争论

争论中心：描述微观粒子运动的统计规律和量子力学理论的完备性。

一派以爱因斯坦为代表

“非决定论完全是一个不合逻辑的概念”

“无论如何我坚信，上帝是不会掷骰子的。”

另一派是玻尔为首的哥本哈根学派

统计规律是量子物理的基本规律。

大自然的一切规律都是统计性的，经典因果律只是统计规律的极限。

爱因斯坦“无法相信”上帝在和宇宙玩骰子，他认为统计解释是因为认识不完善才引进来的，是一种临时的办法，物理学中的统计理论只不过是一种不充分、不完美的理论，并批评哥本哈根学派否认微观世界中的因果规律，批评“互补原理”是一种“绥靖哲学”，当时英国著名的物理学家布拉格有一句著名而幽默的话：

“星期一、三、五，光的行为像波，星期二、四、六，光的行为像粒子，到了星期天就什么也不像了。”

双方最著名的交锋有三次。

第一次是一战后1921年和1924年的两次索尔维会议，爱因斯坦就在玻恩的发言后对量子理论提出了质疑：

“这个理论的缺陷在于：它一方面无法与波动概念发生更密切的联系，另一方面又用基本物理过程的时间和空间来碰运气。”

玻尔在后来的答辩过程中试图把爱因斯坦争取过来，说互补原理也曾出现在爱因斯坦的理论之中，但是爱因斯坦不为所动，仍然用一个又一个的理想试验向哥本哈根学派的诠释挑战，不过一一都被玻尔驳倒。

双方的**第二次**正面交锋就是第六届索尔维会议上的那个“光子箱”模型。爱因斯坦这一次是有备而来，据目睹者会议，玻尔在听完爱因斯坦的讲话以后，竟然脸色苍白，呆若木鸡。这是一次严峻的挑战，爱因斯坦用自己的相对论巧妙的“驳倒”了哥本哈根学派的理论。

爱因斯坦一定以为自己稳操胜券了。但是，在第二天的会议上，玻尔却一改昨天的晦气，精神抖擞的指出“光子箱”模型中的致命错误，用爱因斯坦15年前的发

现广义相对论驳倒了爱因斯坦。他指出爱因斯坦在光子盒实验中忽略了他的引力红移公式。爱因斯坦的最后一次尝试还是以失败告终，并且是由于他一生中最幸福的思想——广义相对论，这次他不得不承认量子力学具有逻辑一致性。

双方的第三次交锋是EPR模型，有人又把EPR佯谬称为“第三朵乌云”，双方在这个问题上针锋相对，互不相让，一直持续到1955年爱因斯坦的去世。

两种观点的的争论一直持续了数十年，延续到现在。然而双方都是在为追求科学的真理而进行着不懈的努力。

爱因斯坦和玻尔虽然有激烈的争论，但却相互敬仰，是很好的朋友。