1. 量子物理学

阿尔伯特·爱因斯坦说过“上帝不掷骰子。”这位著名的相对论的作者所作的这番评论并不是为了分析掷骰子这种游戏，而是表达了他自己对量子物理学这门在 20 世纪的第一个 15 年得到很大发展的新科学的感想。在弄清楚这位伟大的近代物理学家为什么会有这种想法之前，让我们先来了解一下量子物理学这门在 19世纪末建立起来的“新物理学”的科学内容和哲学理想，以及它对传统观念所提出的彻底挑战。

近代科学开始于 16世纪。当时尼古拉斯·哥白尼提出了“太阳中心说”,即在太阳系中,恒星和行星在天空中的运动以太阳为中心，而不是以地球为中心。这个学说遭到了当时的传统观点的强烈反对，但是这一切并不能阻止它对新兴科学思想的形成产生深远的影响，这种影响一直持续到今天。从那时起，对科学真理的最终检验不再是宗教和哲学教条，而是通过观察和实验结果来证明。

哥白尼的这种观点被开普勒、伽利略以及后来 17 世纪的牛顿等人加以发展和完善。牛顿通过早期的观察得出了两个重要定律。第一个定律是：运动物体的加速度等于施加在物

需要全本请访问 www.ertongbook.com

体上的力除以物体的质量。第二个定律是：任意两个物体之间存在着万有引力，引力的大小与两个物体的质量的乘积成正比，与它们之间距离的平方成反比。这是第一次把自然规律以量化的形式表达出来，并且通过对这些定律的数学推导可以得到物质体系的运动细节。牛顿通过这种方法不仅弄清楚了月亮和行星的运动是其自然规律的结果，而且能够解释潮汐的形成以及彗星的行为。

这种通过客观的、数学的方式去了解自然现象的方法在很多科学领域中继续采用，并且在 19 世纪麦克斯韦的工作中达到了巅峰麦克斯韦证明了所有人们知道的电和磁的行为都可以通过四个方程式(麦克斯韦方程)加以推导。通过麦克斯韦方程还证明了光波中总存在着一对电磁力，并且在空中以光速传播。人们终于开始认识到光本身也是一种电磁波，它和其他的电磁波(如无线电波、红外热波等)惟一的不同只是它具有更短的波长以及更高的频率。到 19 世纪末，经典的物理学理论似乎已经发展到了相当完善的阶段。所有的物理学现象都可以通过牛顿力学和麦克斯韦电磁波理论加以描述。哲学所包含的东西也开始被人们真正了解。人们开始认识到，如果宇宙间的任何事物都严格遵循这些物理规律，那么任何物质体系，甚至整个宇宙都可以根据这个宇宙现在所处的状态，通过物理定律来推导出其将来的行为。当然，完全精确地计算出复杂的物质体系的将来行为仍然是不现实的，也是不可能的。例如，我们不能在很多天以前就预报出英国当天的天气情况。但是，物质世界的将来行为总是严格地遵循着这些物理规律而发展的，这就是从牛顿开始的一种新的思想方法。用 19 世纪法国科学家、哲学家拉普拉斯的话来讲：

“我们总可以把当前的状态作为过去状态的结果和将来状态的前提。”

到19世纪末，尽管还有很多自然现象的细节没有从根本上弄清楚，但科学家们认为绝大多数自然界的基本定律都已被发现，并且几乎所有的自然现象都遵循这些定律。然而，不久以后一个重要的变革终于出现了，并且它几乎完全毁灭了过去的那些基本观点。这种新的思想就是现在人们所了解的量子理论。这个让阿尔伯特·爱因斯坦作出一番评论的新理论是从对原子物理学的研究中发展起来的，这也是本书所要讲述的主要内容。量子理论导致了人们的基本观念和哲学思想的根本改变。我们将看到，量子物理否定了决定论这种由拉普拉斯提出的简单模式。人们再也不能把宇宙空间目前所处的状态简单地归结为过去状态的结果和将来状态的前提。量子理论告诉我们，任何物理量都不可能在未被干扰的情况下被测量和观察到。所以，在弄清楚任何物理过程的活动中，观察者总是处于决定性的地位，并且正是这种观察者所处的决定性地位使得一些人认为只有观察者的意识才是惟一真实的，而别的事物包括整个物理宇宙都只是幻象。而另外一些人则认为，量子物理学说明了我们所在的宇宙空间并不是惟一的。如果我们假定存在着别的无数宇宙空间和我们的宇宙空间相互作用，则我们仍可以发现另外一种形式的决定论。人们还认为，尽管量子理论取得了很大的成功，但它并不是描述宇宙空间的最终的、最全面的理论，并且仍然会出现更完善的理论。这也是本书描述这样或那样的一些观点并且对其进行解释的目的。在此之前，我们首先必须弄清楚什么是量子物理学。所以，我们在这一节概括了为什么量子物理学需要

被了解,并且描述了量子物理学的主要观点,以及它所取得的成功和存在的问题。

光　　波

越来越多的证据表明人们需要通过一种新的方法来了解光的特性。在讨论这种新方法之前，让我们先了解一点早期的麦克斯韦电磁波理论中关于光的内容。麦克斯韦证明了在光束中的任意一点上,都存在着电力和磁力,二者的方向互相垂直,并且同时都垂直于光束的方向。这些力(更确切地应称之为场)每秒钟振动几百万次,并且沿着光束的方向周期性地改变,参见图 1.1。电场的存在原则上可以通过测量光束的两点之间的电压来检验。尽管对光而言，这种直接测量是非常不现实的,因为它的振动频率太高。但是,通过收音机或电视机的天线接收，类似的测量对无线电波却是切实可行的。所以，通过光的干涉现象，我们同样可以观察到光波的特性。

图 1.2 描述了一个光的干涉实验。光线先通过一个狭缝 O,然后再通过两个狭缝 A 和 B,最后在显示屏 C 上被观察到。光线到达显示屏只有两个通道，即通过 A 或者 B。但光线通过这两个通道到达显示屏上某一点时的距离并不相等，也就是说并不总是彼此同步。通过图 1.2 ,我们还可以看到，如果光到达显示屏的某一点的光程差为光波长的整数倍时，光增强；如果光程差为光的半波长的奇数倍时，则光彼此抵消。在显示屏上我们可以观察到一系列的明暗条纹。通过对这种干涉条纹的观测,人们证明了光具有波的特性。此外,通过对干涉条纹的测量还可以直接算出光的波长。使用这种方法，人们发现可见光的波长随着其颜色的改变而改变。紫光

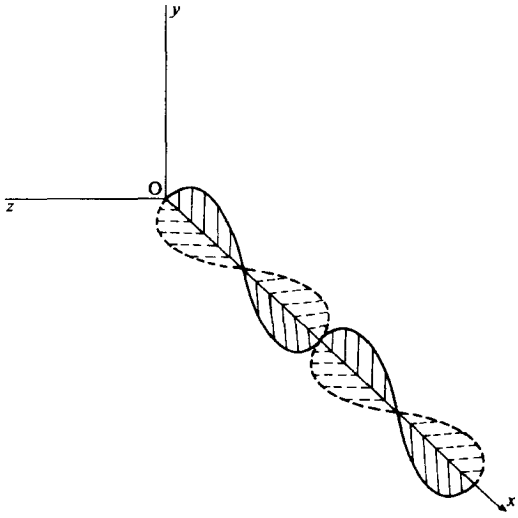


图 1.1　一束电磁波沿 Ox 方向传播并迅速振动，其电场和磁场方向分别指向 Oy 和 Oz 方向。

波长最短(大约为 $0.4\mu m$)，红光波长最长(大约为 $0.7\mu m$)。

图 1.2　光波到达显示屏 C 上的某一点只能经过两个通道，从狭缝 A 或者 B 中通过。在（b)中我们看到，当光程差为光波长的整数倍时，光增强；而当光程差为光的半波长的奇数倍时，光彼此抵消。（a)中显示屏 C 上的明暗条纹即为实验观察到的结果。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

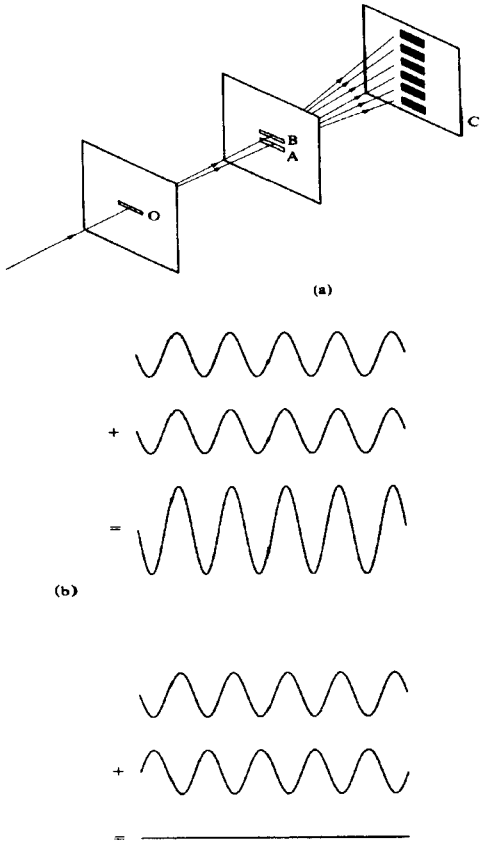


图 1.2　说明在第 5 页下。

光　　子

第一个证明了以牛顿和麦克斯韦等人为代表的经典物理学理论并不总是那么完善的实验是光电效应实验。在这个实验中，当光射向一个放置在真空装置中的金属靶时，就有电子从靶中逸出。在金属靶和另一个相邻的金属板之间加上电压，逸出的电子就可以被检测到。令人奇怪的是逸出电子的能量与入射光的光强无关，只是与其频率或波长有关。根据经典物理学理论，单位时间内逸出的电子数应与具有一定波长的光的光强成正比，而每个电子的能量是不变的，所以当光强不变时，总能量也应该不变。但实际上却观测到，每个电子的能量总是等于 $h\nu$，这里 ν 是入射光的频率，h 则是量子物理学中的一个普适常数，即普朗克常数。此外实验中还发现，不管入射光多么微弱，只要一有光照到金属靶上，几乎立刻就有电子逸出，这个时间远远快于经典物理学中光波聚集足够的能量将电子从原子中打出所需的时间。

根据这些结果，阿尔伯特·爱因斯坦（其同样出色的成就是提出了相对论）得出了这样一个结论：光的能量是一份一份的，以“量子”或“光子”的形式表现出来。一些进一步的研究也证实了这一点，并且认为光子具有能量和动量，其行为更接近于粒子而不是波。根据这些观测结果，我们现在可以建立两种模型来描述光的特性：根据光的干涉实验，我们可以认为光是一种波，而光电效应实验似乎说明了光更像一种粒子流。那么，是否有可能使这两种模型得到统一呢？

为了寻求这种可能性，人们提出了这样一种观点，认为我们过去把光看作是一种波本身就是错误的。也许我们应该认

为光就是粒子流，只不过它具有一些不同寻常的特性，从而导致了干涉现象的出现，而这些又误导了人们认为光是一种波。人们猜想,当光子通过图 1.2所示装置中的两个狭缝时，彼此将发生碰撞，或至少彼此之间以某种方式发生相互作用，从而导致了大多数光子都射向亮条纹区域，而只有极少数光子射向暗条纹区域。这种猜想在大多数干涉实验中似乎都是可以使人信服的，因为通常在任一时刻总是有大量的光子通过这两个狭缝，并且彼此之间总存在着发生相互作用的可能。但是，我们可以设想这样一个实验，如果我们用足够微弱的光来做这个实验，就可以使得每一时刻只有一个光子通过狭缝到达显示屏。这样就不存在光子之间的相互作用，在显示屏上也就不应该再看到干涉条纹了。这个实验虽然有一点困难，但还是可以做的。我们用感光板或照相底片代替显示屏，并且将整个装置仔细地屏蔽起来，以防止外界的光的干扰。当我们等候足够长的感光时间以使得大量的光子能够一个个地通过这个装置以后，却发现感光板上记录下了和前面一样的干涉图案。我们可以再进一步地来做这个实验，用不同的感光时间重复做几次。可以看到如图 1.3 所示的实验结果。感光板上随机分布的点说明了光具有粒子性。当感光时间很短时，这些点看起来有些散乱，但随着感光时间的增长，干涉现象越来越明显。同样数目的光子以弱光的形式一个个地通过和以强光的形式一起通过所产生的效果完全相同，这实际上也就意味着光子之间并没有相互作用。

既然干涉现象并非来源于光子之间的相互作用，那么是否可能一个光子通过狭缝时被一分为二呢？为了验证这一点，我们把一个照相底片或一对光子探测器放在狭缝的背后，

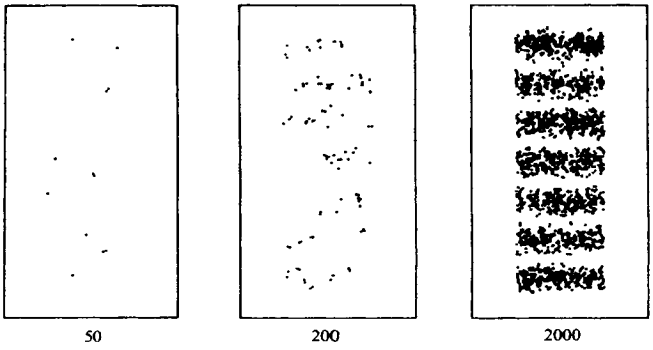


图 1.3　三个方框内分别显示了 50、200 和 1000 个光子通过双缝干涉装置后所产生的图案。即使光子并非同时通过这个装置，只要通过的光子数目足够多，干涉图案就会非常清晰。

并且紧贴着狭缝。这样，我们就可以知道光子是从其中一个狭缝通过，还是分为两半从两个狭缝通过。当我们这样做了以后,我们发现光子总是通过其中一个或另外一个狭缝,而从未被观察到一分为二地从两个狭缝通过。图 1.4(b)描述了另外一个实验,在两个狭缝背后安置一个快门,快门交替地开和关，使得任一时刻都只有一个狭缝处于被打开的状态。结果没有再观察到干涉现象。奇怪的是当我们用光子探测器来测试光子是从哪个狭缝通过时，同样也未观察到干涉现象。由此可见，当我们试图设计一个实验来观察光子是从哪个狭

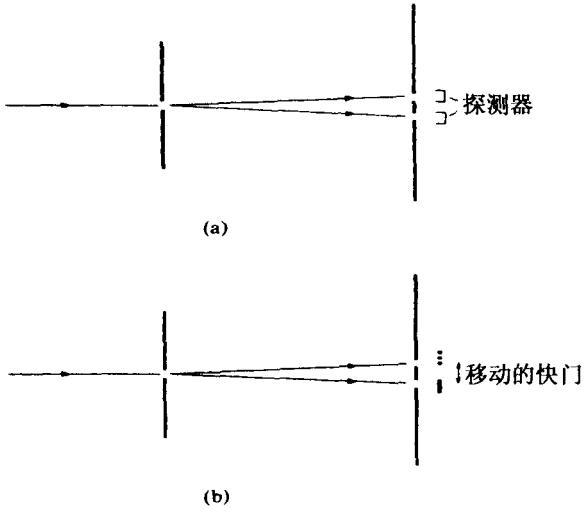


图 1.4　如果我们将两个光子探测器放置在一个干涉装置中的狭缝背后，如(a)所示，结果总是表明光子从其中一个狭缝或另一个狭缝通过，而从未被观察到一分为二地从两个狭缝通过。如果我们在狭缝的背后安置一个快门，快门交替地开和关，使得两个狭缝不可能同时处于被打开的状态，如（b)所示，则干涉图像被破坏。

缝通过时，光看起来是以光子的形式通过一个狭缝而当我们进行光的干涉实验时，光却是以波的形式从两个狭缝通过。

在这个类似于双缝干涉的实验中，光同时呈现出粒子和波的特性，事实上这就是光的波粒二象性。通过这个实验还说明了量子物理学的一个基本特征，即要了解一个体系的特性，总需要通过一个外界的装置去作用在这个体系上。光从两个狭缝通过时是一种波，但当它打在光子探测器或照相底片上时却是一种粒子流。只有通过外界的观察才能了解量子体系的特性，这也是本书所要讨论的一个具有概念性和哲理性的问题。我们将从下一章开始进行更系统的讨论。在这一章里，让我们首先了解一下量子理论的基本含义和大体轮廓，以及量子理论在解释一些物理问题中的成功之处。

海森堡测不准原理

波粒二象性所导致的一个必然结果就是在任何时候，我们都不可能得到一个量子体系的全部信息。我们可以选择让光通过双缝来测量光波的特性而不考虑光子从哪个狭缝通过，或者牺牲进行干涉实验的可能性而只观测光子是从哪个狭缝通过的，但我们永远不可能同时完成这两件事。海森堡，这位对量子物理学早期的发展作出了巨大贡献的科学家最先认识到了这个问题，并且用一种很特别的方式解释了这种测量的不确定性。他指出，测量光子通过哪个狭缝其实就是测量光子到达显示屏时的位置，而观察干涉现象则是测量光子的动量。因此，根据波粒二象性，人们不可能同时测量出一个量子对象(如光子)的位置和动量。

海森堡的这个理论确实能够被很巧妙地运用到双缝实验中。另一个更直接的实验则是观察光通过一个有限宽度的狭缝后的行为的实验。如图 1.5,如果用光波的模型来分析,我

需要全本请访问 www.ertongbook.com

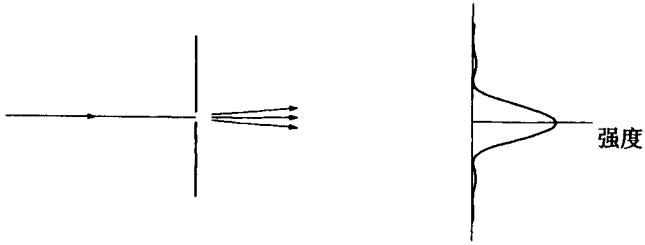


图1.5　光通过一个单缝时会形成散射图像，其强度的变化如右图所示。狭缝的宽度越窄，则散射的角度越宽。如文中所解释的，这个结果说明了对位置测量的精确性和对光子的动量测量的精确性之间的关系满足海森堡测不准原理。

们会发现,光通过狭缝时将出现类似于‘散射模式’的扩散,其扩散的角度与狭缝的宽度成反比。如果我们用很弱的光来做这个实验以考察单个光子的行为，我们会发现，如同双缝实验一样，光子到达显示屏的位置随机分布，但随着到达显示屏的光子不断增加，散射图像越来越明显。如果我们现在来观察光子的位置和动量,如图 1.5，我们可以发现光子通过狭缝后能到达的垂直方向的距离取决于狭缝的大小。但我们能同时知道这个方向的动量分量吗？我们可以知道光子通过狭缝后以散射的形式到达显示屏的某处，但我们不知道光子究竟到达哪个位置，也就是其垂直方向的动量分量相对于散射角度具有不确定性。这样，如果我们试图减小狭缝的宽度以提高

位置测量的精确性，我们就会不可避免地增大了散射角度，从而降低了动量测量的精确性。海森堡证明了量子理论要求所有这样的测量都遵循类似的不确定性。他把这个著名的测不准关系表达为位置的不确定性（Δx）和动量的不确定性（Δp）满足关系式 $\Delta x \Delta p > h/4\pi$。这里 h 是一个基本量子常数（普朗克常数）。如果我们更详细地分析单缝散射形式，可以发现海森堡测不准原理中位置和动量的不确定性的乘积大约就等于 $\frac{1}{2}h$。

关于测不准原理中的一个常见误解是认为它违背了这样一个事实：即在单缝散射实验中，我们可以很精确地知道光到达显示屏时其动量的 x 方向分量。这实际上是因为光子离开狭缝后到达显示屏的位置是很不确定的。同时也说明了动量和位置测量之间的关系是满足测不准原理的。

我们认为测不准原理在科学测量中的应用具有深远的意义。它使人们认识到对任何物理量的测量，其精密程度都存在着一个限度。在量子物理学出现以前，人们总是找不到一个理论来解释为什么不能得到一个预期的精密程度来提高我们的实验技术。而波粒二象性和海森堡测不准原理却给出了在任何两个物理量（如光子的位置和动量）的测量中所存在的一个基本限度。在这个理论被提出之后，人们做了一系列的实验，试图使其精密程度超过测不准原理所允许的限度。但事实证明这一切都是徒劳的。现在人们认识到测不准原理是量子物理学中的一个具有创新和革命性的理论，它导致了人们对一些基本的物理概念和哲学思想的认识上的改变。

原子和物质波

20 世纪初，当光波的模型在经典物理学理论中被很好地建立起来以后，人们开始考虑物质是如何由大量的微观粒子构成的。道尔顿的原子理论非常成功地用离散分子的运动解释了布朗运动(空气中悬浮粒子的无规则运动)的现象和化学过程。J·J·汤普逊根据对电子放电管（即电视机中的阴极射线管)的特性的研究总结出,当金属线在真空容器中被加热到一定温度时,将有一些带负电的粒子(人们很快知道这就是电子)被释放出来。在 20 世纪早期，卢瑟福发现原子中包含了一个带正电的原子核，并且几乎所有的原子质量都集中在这个原子核上。这就很容易使人们认为在原子中，电子是镶嵌在这个原子核中的。但任何试图用经典物理学理论来描述这种原子结构细节的努力都失败了。于是，人们又提出了一个似乎更为合理的模型，认为电子以一个固定的轨道如同行星围绕太阳一样地绕着原子核运动。但是根据麦克斯韦的电磁波理论,这种轨道电荷的能量将不断减少,并且向外发出电磁波。由于这个能量只能来源于电子的动能，所以电子的运动速度将不断减慢，并且最终会落回到原子核中去。丹麦物理学家尼尔斯·玻尔（我们还将在今后的章节中经常提到他）提出了一个氢原子模型(只包含一个电子)。他认为,在氢原子中，电子只能到达某些特定的轨道。这个理论虽然在解释单个电子粒子的问题上取得了很大的成功，但是不能解释包含了多个电子的原子的特性，并且也无法对电子轨道的稳定性作出一个合理的解释。

关于这一点，法国科学家德布罗意提出了一个更为合理

的假定。既然光波的行为在某些时候表现得像粒子，那么粒子（例如电子和原子核）是否会在某些时候表现出波的特性呢？为了验证这一点，我们也许会认为可以做一个类似于光波的双缝干涉的实验（参见图 1.2)来观察电子流通过双缝装置后是否会出现干涉现象。但这个实验却是不可能实现的。因为根据德布罗意的理论，电子流的波长非常短，这样干涉条纹将会靠得太紧而无法被区分出来。然而，在德布罗意提出这个设想后不久，一个类似的实验却得以进行。人们将电子流射到镍的晶体上，发现电子流经过不同的原子面反射后观察到的干涉现象完全类似于波的行为。现在，人们还可以产生一束中子流，其波长可以与光的波长相比，其双缝干涉现象也类似于光的干涉，这也进一步证明了物质波的存在。

通过对原子中的电子结构的研究，人们还可以通过一系列数学公式的推导来间接地证明物质波的存在但这些数学推导已经超出了本书所要讨论的范围。其基本观点是认为局限于一定空间中的波具有某些特定的波长：例如，由于小提琴的琴弦的长度是一定的，因此其发出的声音也就具有特定的波长。并且其他许多类似的乐器所发出的声音也符合这一规律。而物质波的行为则完全类似。实际上，带负电的电子和带正电的原子核之间存在着一个满足平方反比定律的引力，并且，电子波的存在必须满足一个方程（即薛定谔方程）。根据薛定谔 方程，电子的能量只能是一些特定的“ 量子化 ”的值，而且电子所具有的能量必须高于一个最低的值，这样就解决了电子落回到原子核中的问题。此外，如果电子处于一个比“ 基态 ’能量高的高能态,它将会跃迁到基态,并且释放出一个光子，而这个光子的能量就等于两个能态之间的能量 差(见图

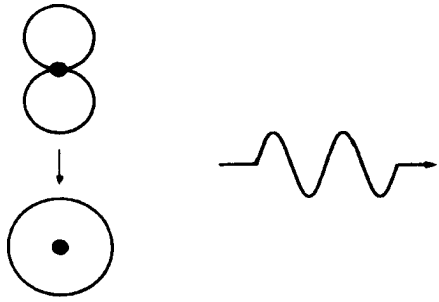


图 1.6　左图显示了电子波在原子中的两个可能的状态。如果电子从一个高能态向低能态跃迁，那么它将释放出一个具有固定波长的光子。

1.6)。由于光子的能量是和光的波长相关的,所以原子发出的光具有特定的波长。量子物理学的成功之处不仅在于可以解释原子发出的光为什么具有这种特性，而且还可以计算出其发出的光的波长，以进行进一步的研究工作。

超越原子范畴

波粒二象性的成功之处不仅局限于原子，类似的思想还被应用到原子核结构的本身。原子核是由一些带正电的质子和几乎同样多的不带电的中子组成。这些粒子之间的作用力的形式比平方反比定律复杂得多，人们还未能完全弄清楚这种作用力的形式，所以对它的计算要比计算原子间的作用力

困难得多。然而,其结果却非常好,并且对原子核的特性的计算也能够被实验所证实。

现在,人们甚至知道‘基本’粒子,如质子和中子(但不包括电子),都具有其自身的结构,甚至由更基本的物质‘夸克”构成。量子物理学以类似的方法成功地分析了原子和原子核的结构,并且证明了夸克也具有波的特性。但是,现代粒子物理学中的量子观点更加超越了这一点。在足够高的能量下,光子可以转变为一个带负电荷的电子和一个几乎完全相同但带正电荷的正电子,并且一对正负电子也可以重新结合并转变为光子。此外,在高能过程中还可以产生一些特殊的粒子,而且它们将很快自发地衰变为一些更加稳定的粒子(如电子或夸克)。所有这些过程都在一种量子观点的扩展形式——量子场论中得到了解释。这个理论的一个本质特征就是一些物理现象只有在很多基本物理过程同时发生时才能被解释:例如,当光通过一个干涉装置的两个狭缝时,尽管光是由离散的光子构成的,但很多基本的量子场过程还是以相干的方式叠加在一起,从而产生了人们所观察到的干涉现象。

凝聚态物质

量子物理学的成功之处不仅仅局限于原子或亚原子现象。就在物质波的假设提出后不久,人们就清楚地认识到它还可以被应用到对化学键的解释上。例如,对一个由两个氢原子组成的氢分子,电子波(电子云)包围着两个原子核,并且产生了一种吸引力,这种吸引力与两个带正电的原子核之间的排斥力相互平衡,这样就形成了氢分子。这些观点还被发展来计算分子的特性,如原子核的价态等,并且这也得到了实

需要全本请访问 www.ertongbook.com