

# 物理学的本质

A. P. French

Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA

(弗里奇 麻省理工学院物理系)

## 引言

世界上充满了需要解释的现象。例如，想一想彩虹和肥皂泡的颜色，高速飞机的蒸汽尾迹，液态水在某一温度时突然变为固态的冰，暴风雨中的闪电及紧随其后的惊雷，美丽的六角对称的小雪花；所有这些，还有数不清的许多其它现象，都在物理学的研究范围之内。总的来说，科学的本质就是观察和探究我们周围的世界，试图从已知事物中确定某些潜在的秩序和模式。物理学是科学的一部分，主要研究无生命的世界，而且力图确认最基本的原理和统一的规律。这里指出了物理学与其他自然科学的两点区别，第一点——限制在非生命世界中——将它与生物学暂时区别开来；第二点——力图确认最基本的原理，表明物理学与化学的区别，化学在其基本原理方面，建立在物理学的某些具体领域之上，而不考虑其他。尽管数学对于物理学是不可缺少的，但数学是一个完全不同的领域。它是自洽的、完全不依赖对真实世界的观察。

本文的主题可以从许多角度展开讨论。其中一种洞悉物理学本质的方法是看物理学从古至今是如何发展的。本文就是这样做的，尽管它并不试图列出所有那些重要的、甚至是本质的话题。本文的目的并不是为物理学自身提供一个时间表，而是举例说明，把我们关于各种现象的知识同尽可能少的普遍规律联系起来，如何成为物理学矢志不渝的追求目标。

## 阿基米德与杠杆

说物理学起源于力学——关于机械、力和运动的科学——似乎是比较合理的。物理学和应用装置之间有着比较紧密的联系，这种联系在古代力学中就已经建立起来。最好的例子可能就是杠杆了。阿基米德在公元前 250 年就已经认识到杠杆原理“-----只有重量和悬挂它们的力臂成反比时，不同重量的物体才能保持平衡。”这个简单的例子一个源于特定经验的理论陈述，一个象征物理学本质质的理论陈述。这一结论可能是第一个真正的物理规律。它成为杆秤或者说天平——一种发明于罗马时代，至今仍在使用的装置——的理论基础。有必要把这个例子做进一步的阐述。最初，不同重量的物体保持平衡可能只是实际经验，此后阿基米德将其量化，并对各量之间的关系做了一般性的陈述。但他并不满足于此，他试图把它归因于——对称性——物理学家使用的最有效的概念之一。阿基米德认为，同样重( $W$ )的物体在距转轴(支点)同样远( $l$ )的地方保持平衡是一个公理。因而他设想，其中一个重物可以被两个 $W/2$ 的重物代替，一个放在支点，一个放在距离支点 $2l$ 的地方。由于第一个 $W/2$ 的重物显然不会对支点产生转动效果，因此他认为，位于 $2l$ 处重 $W/2$ 的物体会平衡位于 $l$ 处重 $W$ 的物体，把这一论断外推，就会得出关于杠杆的普遍规

律。

实际上这一论断是无效的。如果杠杆的规律是  $W_1 l_1^2 = W_2 l_2^2$ ，同样重的物体位于相同的距离上也会平衡，但位于  $2l$  处重  $W/2$  的物体却不会平衡位于  $l$  处重  $W$  的物体。正确的规律必须建立在对不同重量物体的实际观察之上。但是，毫无疑问，在条件适用的情况下，对称性是一个卓有成效的工具。我们随后会看



到这一点。

图 1.A Steelyard medal struck for Frederick I (1688-1713)

## 从亚里士多德到伽利略：空间，时间和运动

甚至早在阿基米德从事力学研究之前，把希腊语中的物理一词引入我们词汇的亚里士多德（384-322BC）就已经考虑过物体的运动。当然，传统上，空间和时间是我们认识自然的最基本的概念，作为时间函数的位置则一直是描述物体运动的基础。亚里士多德探讨了这些问题，并把运动区分为星体等所做的完美的圆周运动（实际上，是地球绕地轴转动的反映）和地球表面物体所做的轨迹不完美的运动。但有一点很清楚，那就是——在研究物理问题时，他并不研究第一手的现象。他曾经提出一个非常著名的，但只需一个实验就能驳倒的论断——“两倍重的物体从同一高度下落只需一半时间”。中世纪，人们对抛体运动做了一些研究，但是直到 17 世纪才由伽利略把理论和实验结合起来，给出了自由落体和抛体的正确描述。我提到这些不是为了这一特定结论，而是因为它指出了物理学的另一个本质特征——**依靠直接观察或实验**。如果同自然没有直接交流，我们就不会有物理学。人们常说观察和实验证据是建构物理理论的起点，但我认为这种说法有些言过其实。公正地讲，物理学的发展依赖于理论和实践之间持续不断的相互作用。有可能先出现理论，然后提出可能的实验验证，通过实验支持或驳倒这一理论。一组特定的实验不可能仅仅只体现一个基础理论，但是有可能只体现出观测量之间的关系——如，在自由落体运动中距离正比于时间的平方（但是，这并不是引力理论）。

## 碰撞与第一个守恒定律

众所周知，17 世纪物理学迎来了第一次繁荣，其基础就是对物体碰撞的研究。牛顿（1642–1727）首先认识到所有这类实验结果都符合一个守恒定律——动量线性守恒<sup>\*</sup>。

<sup>\*</sup> 其他的人（包括笛卡尔）都对这个规律做出了贡献，但不够全面或正确。牛顿有这样的才赋或运气把它作为自己力学的基础。

但是仅仅依靠它还不足以解释各种碰撞类型的细节。尽管如此，在两个物体的碰撞过程中，从来没有违反过总动量守恒。在这个规律的表述中涉及到两个重要的概念：

1 质量，用多少有些直觉色彩的 *物质的量* 定义。

2 参考系，有了它才可以测量其它物体的速度。在这些早期的实验中（甚至在今天类似的实验中）看起来不动的地球常常被选为参考系。

从早期到现在这两个概念经历了多次讨论和完善，这一事实说明了 **物理学本质的另一个重要方面**。在这一学科发展的某一特定阶段接受了某个经过检验的假设，但随后这些假设总是有待修正。例如，众所周知，甚至早在 17 世纪地球也不是静止的，而是在绕地球转动的同时，绕太阳公转。但是在分析实验室情景下的碰撞时，这两个因素都可以被忽略。只有涉及到大范围运动时，这些因素才是有意义的。在一开始就引入这些因素会带来不必要的麻烦。

大约在认识到动量守恒定律的同一时期，另一个重要的、但不够普遍的守恒定律也被人们所认识。它只限于弹性碰撞，在弹性碰撞中，碰撞后的物体以和碰撞前相互接近时相同的活力后退。如果设想一个沿直线的碰撞，碰撞物体质量为  $m_1$ 、 $m_2$ ，用  $u_1$ 、 $u_2$  和  $v_1$ 、 $v_2$  表示两个物体的初速度和末速度。则动量守恒可以表示为  $m_1 u_1 + m_2 u_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2$ 。不管是弹性碰撞还是非弹性碰撞，这个表达式都成立，但如果是弹性碰撞，那么下列关系式也成立： $m_1 u_1^2 + m_1 u_2^2 = m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2$ 。

随着力学的发展，逐渐认识到第二个关系式是弹性碰撞中动能守恒的表达式，物体的动能后来被定义为  $mv^2/2$ ，而不是  $mv^2$ ，至于原因，在此我们不打算深究。

除了这些守恒定律，另一个可以应用于碰撞的基本物理规律被与牛顿同时代的伟人惠更斯（1629–1695）发现。这就是我们现在所说的不同惯性参考系等价。惠更斯考虑了一个发生在两个质量相同的球之间的碰撞，两球速度大小相同，方向相反。他认为根据对称性，它们将以相反的速度后退。现在他设想这样的碰撞



撞发生在相对岸以速度  $v$  运动的船上（图 2）。如果站在岸上的人观察这一碰撞，他会认为这一碰撞发生在一个静止的球和一个以  $2v$  运动的球之间。或者，船以速度  $u$  运动，两个球的速度为  $u+v$  和  $u-v$ 。在这两种情况下，站在岸上的人会看到球的速度在碰撞过程中发生交换。也就是说，在最早的对称性碰撞的基础上，可以预言发生在这两个球之间的所有相对初速度相同的碰撞。

图 2. 从不同参考系观察到的两球之间的弹性碰撞 (From C. Huygens, *Oeuvres Complètes*, Vol. 16, The Hague: Martinus Nijhoff, 1940). (草图之上的示意图是 Ernst Mach 在他的书《*The Science of Mechanics*》中增加的。)

在这些现象之下是另一种从来没有被详细阐述过的情况，这就是质量守恒定律：碰撞过程中总质量不变。在这些物理系统中被认为是毋庸置疑的，但是直到一个多世纪之后，当拉瓦锡 (Antoine Lavoisier, 1743-1794) 在化学反应中建立起质量守恒定律时，才有了基于实验的详细阐述。在化学反应中涉及到的物质重组比牛顿时代的碰撞实验剧烈得多。

这并不是我们最后一次谈到守恒定律，但是在我们继续讨论它们之前，还是让我们考虑一些别的事情吧。

## 原因与结果：牛顿第二定律

观察物理世界的人总是对认识和发现事物的原因感兴趣。最著名的例子就是牛顿第二运动定律的近代数学表述： $F = ma$ 。左侧是力，右侧是质量同力产生的加速度的乘积。也就是说，左侧可以解释为原因，右侧是原因产生的结果。方程的两侧作用不同。这个特点是数学方程没有的。但是，并不是所有的物理方程都是这种类型。例如，爱因斯坦的  $E = mc^2$ ——可能是最著名的物理方程——就是质、能等价的简单陈述。不过，当一个方程表示因/果关系时都具有特殊意义。

## 经典物理膨胀

在牛顿之后的两个世纪中，物理学的范围迅速变大。在牛顿时代光学已经发展得很好，牛顿自己也是主要贡献者之一。但是在随后的 17、18 世纪，物理世界的知识扩展到包括热学、声学、电学和磁学等领域。起初，力学和光学都被看作是独立的研究领域，但是随后发生了一些重要的事情：人们开始觉察到它们之间的联系。例如，声音逐渐被理解为空气柱或弦的机械振动，热被理解为原子或分子的无规则机械运动（尽管当时还没有观察到原子，但坚信它们的存在）。随之而来的是对能量及其守恒定律概念的大量扩充。人们逐渐认识到，当机械能明显消失时——例如，两个物体的非弹性碰撞——我们可以转化为碰撞物体热能来解释，表现为它们的温度升高了。这样能量守恒可以被看成一条普遍原理，尽管它还没有立即扩张到电磁学中。

19 世纪早期，人们发现了电现象和磁现象之间的联系：电荷流过导线会产生磁效应，变化的磁场在闭合导线中会产生电流。随后在 19 世纪末，伟大的物理学家麦克斯韦 (1831—1879) 用统一的电场和磁场

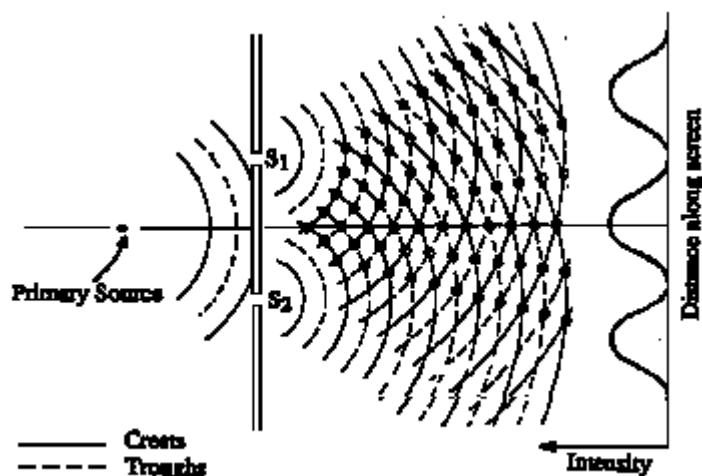
方程，解释了光以惊人速度  $3 \times 10^8$  m/s 传播——该数值已由实验证实。

最后结果是物理学的巨大统一。很多年来，随着新的发现，似乎物理现象的多样性在无限地膨胀。随后才逐渐认识到，传统上把物理学区分为不同的领域，实际上，是因为我们对它们本质联系的无知。为了方便起见，但可能很不幸，物理学的不同领域在大多数情况下仍然被作为彼此独立的研究领域，课本在也继续这种分割。然而，只要承认在根本意义上物理学是一个学科，这还不算很糟。

## 光的本性

物理学的一个主要目标是发展合理的概念模型，正象它们被称为的那样，用它们可以描述和解释各种各样的物理现象。在这方面最显著的例子就是试图找出一个成功的光的模型。根据一些古希腊人的观点，我们看清物体的能力依赖于从眼中发出的某些东西——一个很容易被实验驳倒的想法（例如，在黑暗的房间里看不见物体）。另外一些人的想法似乎合理一些，物体能被看见是因为它们自己发出一些粒子，由点光源产生的清晰的影子很自然地导致了这样的光的图景，即光是由光源或被它照亮的物体发出的沿直线传播的粒子组成的。光线在镜面上的反射规律——反射角等于入射角——的发现进一步强化了这个模型。牛顿偏爱这个粒子模型。但是他的同代人惠更斯设计并发展了另一个完全不同的模型——光由在介质中传播的波组成。他认为光的巨大速度及光线彼此穿过而不相互干扰的能力，都是反驳光由实物粒子组成的证据，他认为视觉必须依靠光对视网膜的振动，他可以通过发自光束波前不同位置的圆波或球波的叠加解释光的直线传播。

在当时，光的粒子模型和波动模型显然是互相排斥的。由于牛顿的权威性使得光的粒子模型被普遍接受，并在大约 100 年内没有受到挑战。但是随后发生了一些令人震惊的事。大约在 1801 年托马斯·杨（1773—1829）演示出，如果一束光被分成两束并互相叠加，就会显示出干涉现象——在接收光屏上会出现黑白相间的区域（图 3）。出现黑色区域——干涉相消是粒子模型无法解释的；一个光粒子怎么会被另一个消灭呢？这样粒子模型就被放弃了。在 19 世纪剩余的时间里，光的波动模型的证据不断积累，正如前面所提到的，麦克斯韦表示如果把光看作穿过布满整个空间的以太介质的电磁扰动，那么他能够解释光的传播，这时证据的积累达到了顶峰。波动模型的胜利似乎是永久而彻底的，但事实并非如此。正如我们随



后要讨论的，这个被认为可以作出是或不是的简单判断被证明是令人吃惊而且不可思议的。

图 3，一个杨氏双缝干涉实验的简图。来自双缝的波加强的区域用黑点表示，削弱的区域用空心圆来表示。

这一干涉模式，中间最亮，其它最亮的区域分居在两侧。实际上光的波长很短，这意味着干涉弧越多，而且靠得很近。

## 打开潘多拉盒子

19 世纪接近尾声时，当时的物理学家感到物理已经是一门快要完成的学科。它的基本因素是绝对的时间、空间和力学、电学和磁学（包括光的波动模型）的因果律及物质由不可分割的、彼此分离的、遵从上述规律的粒子组成这一图象。但是，如此的自满即将打破。电子的发现、能量量子化、狭义相对论，它们每一个都以自己的方式要求我们对物理世界图景作出巨大调整。

### a) 放射性

这种现象在 1895 年由贝克勒耳(1852-1908)发现，主要特点是一些化学家已知的重原子会自发地释放出各种未知的射线。这些射线的来源和它们的能量让人感到非常迷惑，在某一阶段有人建议抛弃能量守恒定律。进一步的研究表明不必如此，但另一个更宝贵的规律则不得不牺牲掉——单一因果律。因为有一个问题已逐渐明晰，在一群确定的放射性原子中，它们什么时候变为另一种不同的原子是完全随机的；没有发现能在特定的时间引起一个特定的原子发生放射性变化的原因；原子自发地、独立地发生衰变。这建立在卢瑟福（1871-1937）实验的基础上，他是早期核物理研究中的一个重要人物。尽管如此，物理仍然是一门具有非凡预测力的精确科学。在下文中我们对此会有更多的论述。

### b) X 射线和电子

在 19 世纪的最后 10 年，很多研究集中于低压气体中的放电现象。能开展这种研究在很大程度上是由于制造真空管的有效方法不断发展。这是一个技术进步直接影响基础物理进展的典型例子。人们发现了大量新现象，其中可能最富戏剧性的是伦琴（1845-1923）发现了 X 射线。这些射线穿透人体，并显示出人体内部结构的性能很快被开发应用。起初，人们不了解这些射线的本质，但几年以后，它们被确认为电磁波，类似于光，但波长更短（大约千分之一）。但是在 X 射线背后，注定会有一些东西将对物理学的进程产生重大影响。它们产生于真空管的阴极，放出的阴极射线与一个固体“靶子”互相作用。这些阴极射线是什么？汤姆生（1856-1940）发现它们是带负电的粒子，如果相对于所带电量而言，比已知的任何粒子质量都小。事实上，如果认为它们的电量同氢离子相同（一个后来由实验证明的比值关系），它们的质量还不到氢原子的  $1/1000$ 。幸运的是它们的性质与产生它们的阴极材料无关。这表明原子的内部结构中都含有这些带负电的粒子，当然我们今天知道它们就是电子。原子不可分的观念（希腊人曾据此给它们命名）一去不复返了。自然会有新的问题产生：原子的内部还有别的什么成分，十几年后，卢瑟福发现原子的正电部分是一个直径只有原子直径的  $1/10000$  的原子核时，这些问题才得到解答。在本文的下一部分，我们

会继续讨论它的发展情况。

### c) 量子

有史以来，人们就已经形成了对热辐射的一般性看法。但是直到 20 世纪初，才对它的性质有了充分的了解。在此之前，人们已经认识到热辐射是一种电磁辐射，当物体足够热时人眼可以看到，这些辐射中当然也有一些长波辐射，来自一个一定温度的物体的辐射曲线（波长，辐射密度）其形状不能令人满意。（图 4）随着物体温度的升高，它的峰值偏向短波。用已经理解得很透彻的经典电磁辐射理论不能很好地解释这些曲线。

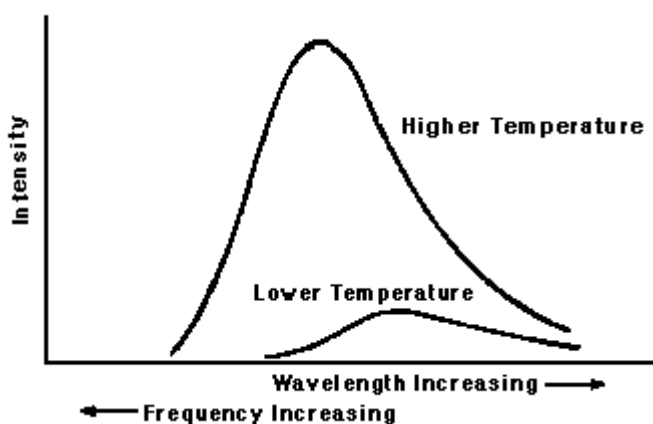


图 4. 一条辐射密度和波长(或频率)的热体辐射曲线。随着温度的升高，总体辐射量增加，峰值偏向短波（高频）。

德国物理学家普朗克（1858-1947）投入这项工作，寻找更好的解释。令他感到惊讶和懊恼的是，他发现自己得出这样一个结论（1900）：热体辐射出的能量必须是分离的，并且与辐射波的频率（波长成反比）成正比，服从公式  $E = hf$ ， $f$  是频率， $h$  是很快就被人们所知道的普朗克常量。这样“量子”就诞生了。普朗克避免提出辐射本身是量子化的——经典的光的波动理论还占据主导地位。但是爱因斯坦（1879-1955）在 1905 年用自称是过渡（管用的，但不一定是最终的）的方式提出了这一假设。它的结果意义深远，我们随后会提到。

### d) 相对论

原子物理和辐射中的发现已足以撼动经典物理的核心，但决非仅仅如此而已。自从牛顿时代起，绝对的时空观就已经被接受，尽管牛顿自己也承认我们无法定义绝对的空间，所以不得不研究相对运动。但是在 1905 年，爱因斯坦提出了革命性的建议。时间和空间都不是绝对的，它们彼此相互联系，并决定于测量时所选取的参考系。在特定意义上说这意味着不能断言发生在两个不同地点的事件是同时的，它们是否同时的判定依赖于观察者所在的参考系。

这一理论——狭义相对论——基本上不难，也不复杂，只需高中代数的知识就能用一种简单的形式推

导出来。它是对概念提出的挑战，因为它要求我们放弃与生俱来的直觉观念。做出这样的调整不是一件小事，但是与爱因斯坦同时代的人（至少，对很多人）很快发现这一理论具有不可否认的预言能力。例如，对我们来说，运动的时钟变慢简直就象科幻小说。在双生子佯谬中，旅行的人依然年轻，而他在地球上的兄弟则已经变老——但基本效果已经通过观察精确的、放在围绕地球飞行的商务喷气式飞机上的原子钟得到直接证实，毫无异议。

对传统主义者，最大的困难是相对论否定了唯一的理想参考系的存在，即惠更斯所说的以太参考系。以太是一种假想的介质，作为光和各种电磁波的载体，它是注定不可缺少的。波不需要任何介质传播其振动的想法被认为是荒谬可笑的。但是所有测量地球穿过这种介质运动的实验的失败都是对爱因斯坦理论正确的重要支持。物理学家不得不接受电磁波的传播不需要介质，只有在需要单纯的机械模型时，这一图景才适用。19 世纪末期，在创立机械模型上做出了巨大努力，直到爱因斯坦使之成为多余。

## 原子核

20 世纪初，原子直径的数量级是  $10^{-10}$  米已被接受，主要原因是知道了阿佛加德罗常数——1 摩尔原子或分子的数目——阿佛加德罗常数可以从气体的体积推出，也可以从普朗克关于热辐射的理论分析中得出。（注意，物理量的又一次内部联系！）如果假设象金属这样的物质其原子是紧密排列的，那么推出单个原子的直径就只是一个代数问题了。

在发现电子并已知其电量后，应用经典的电磁理论可以推出它的直径数量级约为  $10^{-14}$  米<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> 在现代理论模型中，这一数值已不被接受。电子被看作一个质点

考虑到这一数据，并结合电子的质量大约只占原子质量的  $1/10,000$ ，很自然地可以把原子画成一个直径约为  $10^{-10}$  米的带正电的物质球，小点一般的电子镶嵌其中。这个模型是 J. J 汤姆逊自己发明的。但存在很多问题，其中之一就是不能解释由原子发出的光的波长。

前面已经提到，1911 年，情况发生了根本性的转折，卢瑟福通过  $\alpha$  粒子打击薄金属片后发生的强烈散射发现金或银等材料的原子绝大部分质量集中在  $10^{-14}$  米的半径之内。

在这一发现的基础上玻尔（1885—1962）在 1913 年提出了著名的小宇宙原子模型，电子象行星一样绕带正电的原子核旋转。没有人比玻尔本人更清楚，这是一个非常武断的模型。它简单地假设电子在它们的轨道上并不向外辐射光（这一点不符合经典电磁理论的要求），没有任何理论证明。在巧妙地使用普朗克的能量量子理论之后，他还得出这些轨道的半径被限制为一系列的离散值。

这是一个彻头彻尾的权宜之计——但它管用！它成功地说明了氢原子光谱，预言了一些以前不知道的原子谱线（在紫外和红外区）。

然而，这个理论确实还有严重的不足之处。它不能成功地解释类氢原子系统——核外只有一个电子产



生辐射，如一些正离子——的光谱。很明显，它并不是最终的理论。有趣的是，像在他之前的普朗克一样，玻尔不相信光是量子化的，直到很多年以后，他才被光子和电子碰撞的直接实验（康普顿实验）说服。

## 波粒二象性

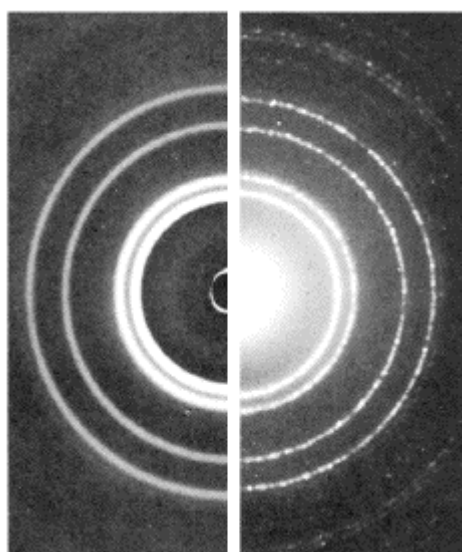
我们已经看到人们关于光的本性的看法是如何在粒子模型和波动模型之间摆动的。当然，光的波动性不可否认。但是，在随后的二十世纪早期，人们做了光电效应的实验——电子被光子从金属中打出来——得到爱因斯坦的支持，他认为，光的发射和吸收都以小集团——量子——的形式进行，称之为光子。换言之，光同时具有波的性质和粒子的性质。这是一个全新的理论。

大约二十年后，德布罗意(1892—1987)更上一层楼，做出了补充，他认为从前被人们无条件看作是粒子的电子可能也有波动性，波长为  $h/p$ ， $h$  是普朗克常量， $p$  是动量  $mv$ 。在几年之内，这一观点也得到了证实。具有确定能量的电子被晶格散射，情况和 X 射线相同。(图 5) 也就是说，我们以前所接受的关于物理世界基本要素的范畴，在原子水平止步不前了。事实上，在这个层次上，我们日常的语言及相关的日常联系都分崩离析了。我们有必要因为光子和电子是那样而接受它们，不是用我们自己的语言去定义，而是依据它们自己的行为。

不久以后，人们发现所有以前贴着粒子标签的中子、质子、各种中性原子和分子都具有波动性，波长由德布罗意公式给出。

## 量子物理世界

尽管经典物理途径在很多方面做得很好，但是放射性的随机性和波粒二象性都不能简单地纳入经典物理的框架。该怎么办呢？两个杰出的科学家海森堡（1901—1976）和薛定谔很快提供了答案，在 1925 年



至 1926 年，他们用完全不同的方法创立了新的科学——量子力学。起初没有人认识到着两种方法是等价的。

图5 两张展示了电子散射及波长相近的 X 射线散射的照片。这些圆环是一束电子或 X 射线通过一个各向同性的小晶体薄片后得到的。散射波（粒子）被放在晶片后的感光胶片所接收(After A. P. French and Edwin F. Taylor, *Introduction to Quantum Physics*, New York: W. W. Norton. 1978.)

薛定谔采用的方法直接建立在波粒二象性基础上，比较容易使人明白。通过接受德布罗意粒子具有波动性的观点，薛定谔得以构造一个方程解决大量的原子问题。（这种观点的量子力学被称为波动力学）非常类似于声学。我们知道，在开放的空气中，可以传播各种波长和频率的声音，但在封闭的空气中，如房间内或吹管乐器的内部，只有一些特定波长和频率的声音能够传播。与此类似，在开放地带各种波长的电子都可能存在，但在原子内部就象一个围场，带正电的原子核对电子的吸引就象软墙一般。没有一定能量的电子无法逃脱，这些电子被限制在特定的分离的能量状态。从这一模型可以自然而然地引出玻尔理论关于氢原子的结果，它也适用于许多其他的原子模型。

这里依然有一个基本问题：这些波是什么？这一问题在一篇文章中经常被讨论，这篇文章是关于托马斯·杨的第一个光的双缝实验的一个推广。可以设想用电子来做类似的实验（实际上，在波动力学建立 35 后，确实做了这样的实验），推测用光和电子（或其他粒子）所做的实验主要特点是否相同。

让我们先根据光来讨论这一问题；因为普遍来讲光比较容易做到，而电子束则不太容易做到。如果光的强度足够高，可以得到一个传统的波的干涉图样；在测量时，例如用感光计，光的强度可以在最大值和最小值之间连续变化。如果把光的强度减小到一个很低的水平，用一个很灵敏的、可以探测到单个光子的仪器（光电倍增管）代替感光计，会出现令人惊异的结果。这个实验可以在每次只有一个光子通过的情况下进行，当光子到达探测屏时，它可以被作为粒子探测到。但它到达探测屏的位置，完全无法预测。然而，数百万计的光子顺利通过系统之后，每个打击的贡献叠加起来就形成了传统的干涉图样。关键是，在某种意义上，每个光子同时通过仪器上的双缝并互相干扰，至少，这是解释实验结果的最简单的办法。

这是否意味着光子确实分裂了？答案是否定的，这其实涉及到一些很微妙的东西。

如果试图发现光子通过了哪一个缝，干涉图样就会消失。为描述这种现象，玻尔引进了他称之为“互补原理”的概念。光子的粒子性和波动性是互补的。在某一点上，光子被作为一个粒子探测到，但它从光源到探测屏的运动却需要用波动方程来描述。

波恩（1882-1970）建议把薛定谔波称为几率波（或者，更确切地说，几率振幅，几率的平方根）。尽管随后有了很大进展，这一解释还是经受住了时间的考验。正如每个物理学家都承认的那样，这是一个引发很多争议的结论。在另外一些情况中，它直接指向物理学和数学的紧密联系——著名的理论家 Eugene Wigner（1902-1992）的一篇文章《数学在自然科学中不合理的有效》就以此作为主题。

作进一步的评论是合适的。放射性现象、双缝干涉实验表明在原子尺度内单个事件具有随机性。这是

否意味着物理已退出了精确科学？回答是“不”！经典物理的发展使我们认为各种单独的事件受严格的因果律支配。量子现象迫使我们承认这并不是真的。但是大量特定原子构成的系统的统计行为仍然可以精确预言。尽管把它引入经典物理是一个新事件，但它自身并不是一个什么新奇的想法。我们都很熟悉大量的人口服从精确的描述和预言这一事实，尽管发生在个体身上的事可能并非如此。例如，尽管每个人的命运无法预测，但保险公司却可以在确切了解人寿分布的基础上开展他们的业务。不过对量子物理进行统计预测要比对人类事务进行统计预测完美的多。

## 原子核内部

长期以来，我们已经很熟悉，把原子核的组成部分——质子和中子——称为核子。质子，也就是氢原子，大约在 1910 年就已经知道。质量和它大约相同的生存伙伴中子是卢瑟福在 1920 年预言，并被查德威克（1891–1974）在 1942 年实验证实的。原子核理论领域产生以后，很快就快速发展起来。很快人们就认识到一种前所未有的力，这一点让人感到震惊，因为直到核力被引入之前，当时所有已知的物理现象多可以用这两种基本的力——万有引力和电磁力——解释。万有引力显然是一种很弱的力，只有施力物体非常巨大时才被考虑，如地球。其它所有的力用电磁相互作用来表述。核力是严格的短程力——它们的作用范围几乎不超出原子核，在不同原子之间根本不起作用。它只是在完全超出我们经验的情况下——在星体的中心，更甚者，如由中子紧密排列形成的中子星上——才起主要作用。人们逐渐认识到有两种核力，简单称之为“强”和“弱”。强力使质子和中子结合在一起，抵抗质子之间的静电排斥力，弱力则是隐藏在某些类型的放射性衰变背后的间谍。在这里我们不会详细讨论这些力的细节问题，只要知道它们存在就可以了。

用质子和中子把原子核的结构图景建立起来之后，物理学家很快就转入了更低一层——中子的内部构造。探询者们承担起建造越来越大的粒子加速器的工作，为能量越来越高的探测粒子——如电子——提供粒子源。需要不断提高能量的根本原因来自于德布罗意关系式：波长等于普朗克常数除以动量。现代的粒子加速器就象研究微小物体的显微镜一样，但研究对象要比光学显微镜研究的对象小数十倍。要做到这些，要求波长比可见光短。达到这一要求的唯一途径就是提高动量，提高探测粒子的能量。开始，这一研究产生了似乎数不清的新粒子和奇异粒子（还有短寿粒子）。它们中的许多显然不是原子核的组成部分。但是在 1964 年提出中子是由夸克——由发明者 Murray Gell-Mann (1929–) 赋予的名字——组成的。这一理论的后果意义深远，远远超出中子的内部构造。基本上所有已知的“重”粒子（除了电子和与它相近的粒子，如中微子）可以被看成是两个或三个夸克的结合，复杂的对称性被引入到所有这些分析中，用于预言以前没有观察到的粒子，一种处于激发态的核子。正如我们前面所说的，象这样成功的预言是衡量一个好理论的标准。

## 凝聚态领域

当然，物理学不止是研究新的基本粒子。实际上，在这一领域进行研究的人比从事凝聚态物理——基本是固体物理——各个方面研究的人要少得多。在量子理论发表之前，对固体物质的性质——如，它们是透明的，还是不透明的；是导体还是绝缘体——只是经验性的研究。这并不是说这一领域没有被大面积开发。实际上，特别是在使用 X 射线之后，对晶体内部原子的排列情况已经获得了细致而准确的途径。但是产生它们性质的原因很大程度上还是一个秘密。量子理论的运用改变了这一切。用量子力学首先进行计算的就是单个原子的电子能态。第二步就是考虑当相似的原子越聚越多时，能态会如何变化。研究发现这时一部分电子将不再依附于某个特定的原子而属于整个集合体。在某些粒子中，这意味着集合体将变成良好的导体；在别的例子中，它会变成绝缘体。也有折衷的情况——半导体，人们认识到通过加入其它种类的原子——掺杂——这些性质可以得到控制。随之产生了晶体管。

凝聚态物理的另一个重要领域是低温。不象核物理学和粒子物理学家注重探测能量越来越高的物质的性质，低温物理学家对所能达到的最低能量状态下——低至绝对零度以上百万分之一度——的物理现象感兴趣。每一个粒子的能量大约不到现代粒子加速器所达到的最高能量的  $1/10^{22}$ 。在不是很极端的情况下，仍在低温范围内（大约高于绝对零度 100 度），已经对超导现象做了大量的研究，在超导现象中某些材料的电阻会减小到零。这种现象的实用前景是巨大，尤其是如果能够发现接近室温下的超导材料。

## 微波激射器和激光器

通过考虑大量原子聚集在一起时电子间的相互作用，我们描述了固体理论是如何发展的。一个与之可比，但不同的情况则更关注于大量的、聚集在一起的原子之间通过交换量子辐射产生的相互作用。这种情况可以发生在凝聚态物体之间，也可以发生在液体和低压气体之间——甚至在接近真空的星际间——对它进行可控制的利用使激光的发明成为可能。这又是一个值得大书特书的基础物理能够对技术作出重要贡献的例子。

我们的故事还要从爱因斯坦开始。在 1916 年他发展了一种新方法，把普朗克关于热物体的公式应用于辐射光谱。人们已经接受处于激发态的原子向低能态跃迁时会自发地释放出光子。人们同样也接受处于低能态的原子如果吸收一个能量适当的光子可以跃迁到高能态。针对这些，爱因斯坦增加了一个更进一步的可能性——如果被一个和它自发辐射出的光子能量相同的光子打击——受激发射，原子从激发态到低能态跃迁就会被加强。这一过程将导致以前只出现一个量子的地方出现两个具有特定能量的量子。这样，如果有大量的原子处于激发态，就很有可能发生链式反应；仅仅一个能量适合的光子突然闯入，就会引起同样波长和频率辐射的大爆发，这就是激光的概念。

Charles Townes (1915-) 和他的学生用氨分子吸收大约波长为 1 厘米的氨分子辐射波，首先实现了这一过程。由于在微波电磁辐射的范围内，他们决定称他们的发明为 maser——微波激射器。七年以后，一个使用可见光的类似仪器被 Theodor Mainman (1927-) 发明。“微波”这个词被 Charles Townes 和他的同事

用“光”代替，这样激光器就有了自己的名字。它非常显著的特点就是发出的光纯度惊人——波长范围比普通光源中同种原子发出的光小得多。再有一个特点就是产生的光束强度很高，发散角很小，以至于可以把反射器放在月球上，观察它们反射到放在地球上的激光源处的光。

## 等离子体

尽管这个话题完全不涉及到任何新概念，但是任何对物理学的考察如果不提到等离子体，哪怕是很简略地提到，都不能称之为物理考察。本质上等离子体是一种气体，温度很高，使大部分原子都失去一个电子，成为正离子。电子仍保留在系统内，这样，作为整体系统是电中性的。荧光灯就是一个为人所熟知的等离子体的例子。它可能摸起来并不热但是通过测量它内部自由电子的能量，得知电子的温度相当于上万度。

等离子体被称为“第四种物态”。尽管（除了自然现象，如闪电和极光）在地球上必须采取特殊步骤才能得到它——基本上是气态电荷，但宇宙中大多数看得见的物体都处于等离子体状态。事实上，处于千万度高温以上的恒星都处于等离子体状态。这就是为什么在物理世界的讨论中包括等离子体是非常重要的。然而，在地球上等离子体对我们的意义在于——利用它们可能会产生“清洁”能源。这种设想可以通过创造一种轻元素的等离子态来实现——特别是原子量为 2 和 3 的两种氢的同位素——使系统足够热以产生核聚变反应。这方面的工作大约已经进行了 50 年，成功却总是可望而不可及。从现在的情况来看，有应用价值的等离子体燃料源有望在 21 世纪中期获得。

## 统一的目标

在前面我们已经指出，物理学家逐渐认识到了四种不同的力：万有引力、弱核力、电磁力和强核力（以力逐渐增大的形式排列）。许多物理学家梦想能够找到一些基础把所有这些力用一个单一的统一理论结合起来。爱因斯坦没有任何收获地干了许多年，力图把万有引力（他狭义相对论中的一个主题）和电磁力结合起来，直至 1955 去世。其他人做了仔细地研究，一个主要的收获是在 1967 年 Abdus Salam(1926-1996)和 Stephen Weinberg(1933-)统一了电磁力和弱核力。在写本书时（1996）还没有取得新进展。有一个有趣的理论认为强核力在宇宙诞生的早期同弱核力和电磁力融合在一起了，当时（根据大爆炸模型）的温度比现在的温度高得多。尽管已经作出了很大努力万有引力依然在其他三个力的框架之外，但总有一天它会被纳入同一日程。比起其他的力，它弱得难以置信，它的存在至今仍是一个迷。

## 混沌：经典物理接受的又一个冲击

我们已经指出，对量子现象的研究迫使我们改变单个原子事件可以预言的信仰。但是对很多物理学家而言，严格的因果律原则上允许我们预言所有原子水平以上的事件的发生过程仍然是一个信仰问题。伟大的法国物理学家 Pierre Simon de Laplace (1749-1827) 在一个著名的称述中清晰地吐露了这一信仰：

智力很快就会知道自然界中所有的力和位于其中的实物的情况（位置和速度），能够进一步地分析这些数据，纳入宇宙中最大的物体和最轻的原子都遵循的运动公式。对于智力，没有什么是不确定的，未来

和过去一样清晰。

这一信仰的基础，早些时候我们已经提到——数学描述物理本质的能力。有些问题（如湍流）事实上非常复杂，对正规的数学分析提出了挑战，这一看法已被接受。但是有人认为，这是实际情况造成的限制，而不是根本限制。另一个伟大的法国科学家Henri Poincaré (1854 -1912)认为，情况不仅仅如此——即便有严格的数学方程——对某些物理系统进行长期预报也存在根本的限制。关键是在运动方程中存在所谓的非线性因素。在现代计算机发明之前，这些系统的行为无法探究。因为——如摆钟的周期性振动——追踪成千上万次的摆动太浪费时间，经受不起。但是这类工作——迭代计算——现代的计算机非常合适。这项工作可以被称为计算数学。方程被很好地定义，但要想出结果，应用时必须一遍又一遍地重复运算程序，结果另人吃惊。起先，人们认为初始条件中很小的变化，相应地，会在最后结果中产生微小的变化。最终却发现最后结果对初始条件非常敏感，致使长期情况无法预测，最终结果可能截然不同\*。

\* 这意味着如此地不同寻常，蝴蝶翅膀的扇动可能改变世界的天气。

这是 Poincaré 认识到的。这种现象称为决定论混沌，这与在量子系统中因果律的本质失败不同，但是结果在某些方面是相似的。

探究混沌系统已经成为数学物理的一个重要领域。尽管首要的应用可能依然在流体力学方面，但现在已经发现还可以应用于固体物理、等离子体物理、基本粒子物理、天文学，还有生物学和化学。

## 总结

如果有谁看一下物理学的发展，会发现这是一个不断努力把我们关于宇宙的知识推向新的疆域的故事。就距离和时间而言，很多进步就表现为知识范围的扩大。人如果只使用天生的能力，就看不见比灰尘——直径大约  $1/1000$  厘米——小的东西。在另一种极端情况下，尽管他能够看见星星，并认识到它们非常遥远，但发现任何距离超过月球（大约 400,000km）的东西，已经超出了他的能力范围。现在，对小至  $10^{-18}$ 米，大至  $10^{15}$ 米的长度我们已经有了确切地了解。至于时间，肉眼无法区分间隔小于  $1/50$  秒的时间，尽管理解历史允许人们注意几百年的时间\*，但是人的寿命的上限大约为  $10^9$ 秒，也就是人可以进行观察的期限。

\* 当然，19 世纪的地质学家面对千百万年的时间范围，但却无法享受对年代进行很好地界定所带来的好处。

但是对比之下，通过今天的物理测量，已使之成为可能。了不起的现代电子学使研究象  $10^{-15}$ 秒这么短的时间成为可能，联合观察和推论使天文学家们谈起百万年（ $10^{17}$ 秒）这么长的时间时充满自信。考虑到时间和空间，物理学家能够研究的现象其要素已超过  $10^{30}$ 个，并且仍有继续扩大的趋势。

我们关于各种事物的要素之间如何彼此相互作用产生出数量巨大（仍在继续增加）的各种具体的物理现象的知识不计其数。

但是，物理学探测、解释和控制正在进行的物理过程的能力毋庸置疑。甚至有人说，使用已经建立

的很好的物理规律探究正在不断扩张的应用领域已代替了追求最小数量的基本规律的传统目标。

我认为，事实上，两个过程都在进行，并且将继续下去。正在扩张的部分毫无疑问得到了计算机的帮助，也对其他科学产生了撞击。所有的化学问题，至少是化学规律，可以用电磁力和量子理论解释。应用物理规律后，生物学开始取得一些有价值的见解。这并不是说物理学在任何方面都优于其他科学。任何人只要看到生物学和化学所取得的惊人成就，特别是在 20 世纪取得的成就，都会摒弃哪怕任何一点这样的想法。我们也不愿说化学和生物学的命运最终是沦为物理学的一部分。当然，化学家和生物学家都关注的生物系统是如此地复杂，以至于要求一种完全不同于物理学的方法。物理学的特殊地位仅仅在于，在一个由基本粒子及其相互作用构成的宇宙中，物理学的工作是在最基本的层次上理解这些事情。事实上，这句话概括了本文所要寻求的目标。

感谢 E. L. Jossem 教授阅读了本文的初稿，并提出了很多宝贵的建议。

(梁志国译)