

## 引言

细推物理须行乐，何用浮名绊此身？

——杜甫《曲江二首》之一

人每时每刻都在呼吸着，所以并不觉得呼吸是一种幸福。但如果不能呼吸了，将会怎样？物理学对于我来说就像呼吸一样。

——李政道

### 一．光是什么？

起初，上帝创造天地。……上帝说：“要有光”，于是就有了光。……这是头一日。……

——《圣经·创世纪》

任何一门物理学科，都必须解决研究对象的两个问题：是什么？怎么样？

人来到世间，睁开眼就看到了光，光伴随一个人的终生。那么，如果问：“光是什么？”不同的人将会有不同的答案。

光是视觉，是眼睛所见。

光是光线。

光是一种电磁波。

光是能量子。

……

对于上述种种答案，既可以说是对的，又可以说不是完全对的。那么，光到底是什么呢？或者我们站在物理学的角度问，光的本质是什么？

要给出一个完全正确的答案，现在看来还为时过早。也许这个问题永远也没有一个终极正确的答案。

我们常说，要了解一个人，应当“察其言而观其行”，也就是说，要通过对其表现的观察，来判断他到底是一个什么样的人。那么，对于光，也可以按照这一原则进行研究。

人们对事物的本质和规律的认识，都是从认识其现象开始的。而现象，则是通过该事物与环境和其它事物的相互作用而表现出来的。于是我们就可以从光与其它物质的相互作用所产生的效果进行研究。

首先，光能够对眼睛产生刺激并由此在头脑中形成图像。人眼可以感觉到光的颜色、光的方向和光源的位置。人能够看到物体，是由于物体所发出的光，即包含各种颜色、来自各个地点、具有各种角度的光进入我们眼睛的原因。人眼所见的物体要么本身发光，要么反射来自其它物体的光。除此之外，光还能使物体发热，说明光还具有能量。这是人们在日常生活中对光的认识，当然是肤浅的。如果仅仅限于对现象的描述，还不能成为一门科学。

其次，可以发现光是遵循着一定的规律进行传播、反射和折射的，这种规律可以用几何上的线，即光线，进行描述。

如果再深入进行观察的话，将会发现，光会出现干涉、衍射等现象，而干涉和衍射是波的特征，那么，光无疑又是一种波。

但是，研究又发现，如果认为光是波的话，则无法解释诸如黑体辐射、光电效应等现象，于是，光的量子说又出现并得到认可。而且，从光量子的角度，也能够解释干涉、衍射等波动现象。

有了更加准确的光量子学说，是否意味着在此之前的光线、光波等等概念是错误的，而应该加以摒弃呢？

在回答这个问题之前，我们应该想一下，光量子的学说难道就是对于光最本质的解释吗？

事实上，无论是光线理论、波动理论还是光量子理论，既反映了在不同的历史阶段人们对于光的认识，也反映了光在与不同物质相互作用时所表现出来的特性。在研究光的反射折射和成像等问题时，用光线理论是最合适的；而在处理光的衍射、干涉等问题时，采用光的波动理论则最合适。对于诸如光电效应、黑体辐射等问题，则只有采用光量子理论来解决。所以，直到目前为止，上述三种理论仍然是组成光学的重要内容，都在不断获得发展、并在应用中取得了巨大的成功。

所以，可以这么说，光线、光波、光量子，都是物理学中为了研究光而引入的模型。

## 二、光的物理模型

在物理学中，人们要建立一门学科，总要先定义一些物理概念。物理概念是对某种物质或现象的本质的描述和概括，反映了人们对事物认识的程度。因而在不同的阶段，同一概念所包含的内容是不同的。

为了使物理概念形象化，人们往往建立物理模型来反映研究对象。例如，分子、原子、电子都是模型，电磁波也是模型。宏观物体的运动可以用质点运动模型来描述，微观粒子的运动可以用量子模型描述。由于概念不断变化，反映概念的模型也不断改进更新。对于光的认识，也是这样的一个过程。一方面，随着研究的深入，光的物理模型发生了变化；另一方面，光与不同物质相互作用时，表

现出不同的特性，所以可以用不同的物理模型来描述光。

描述光的一个重要物理量是光的波长，可以用光的波长作为一种度量的尺度或标准，光在与不同尺度的物体作用时，表现出不同的特征，因而可以用不同的物理模型来描述。

### 1. 光的宏观表现

如果观察光与宏观物体，即尺度比光的波长大得多的物体相互作用，则可以用光线这一模型来描述其规律，光的直线传播定律、反射定律、折射定律等就是关于光线的定律，由此构成几何光学。几何光学中最基本的概念是光线，即认为光是由一束束的几何线组成。

几何光学是关于光的一个唯象理论，只是利用几何线来描述光在媒质中的传播、反射和折射，主要用来处理光的成像问题。对于光的物理本质并不涉及。所以，无法从理论上说明光是如何传播的，也无法定义和导出光速、波长等概念。

#### 1) 光与小尺度物体的作用

光与介观尺度的物体，即尺度与波长可以比拟的物体相互作用时，则表现出典型的波动特性，可以进行干涉、衍射。描述光的波动性的理论被称作波动光学。

波动光学是经典光学的核心内容，就是认为光是电磁辐射频谱的一段，即光就是电磁波，从 Maxwell 方程组出发，可以解决波动光学中诸如反射、折射、干涉、衍射、偏振、散射、色散等问题。

#### 2) 光在原子尺度上的表现

由黑体辐射导致的“紫外灾难”，在 1900 年由 Plank 用量子假设解决。

1905 年，Einstein 用量子假设成功解释光电效应。

1921 年，Compton 用光子解释了 X 射线与电子的散射。

从此以后，光量子的理论开始登上历史舞台，并获得了极大的成功。光的量子理论的核心是光具有波粒二象性——一切量子现象的基本属性。但这里的“波动”和“粒子”的含义与最初 Huygens 所提出的波动性和 Newton 所提出的粒子性是根本不同的。

综上所述，光线、光波、光子等，都是光的物理模型，以这些物理模型作为最基本的假设和出发点，分别建立了几何光学、波动光学和量子光学。它们都是光学的重要分支，构成了现代光学的基本内容；既相互关联，遵循相同的物理规律，又相对独立，各有不同的应用领域和适用范围。在实际中，往往要根据具体的情况，按照简捷实用的原则，采用不同的模型和理论处理不同的问题。

## 三、光学的发展及其成就

光学是物理学的一个重要组成部分，也是一门基础学科。但是，自古以来，即使是在真正意义上的物理学诞生之前，人们就已经根据所积累的经验 and 知识对光进行研究和利用。

《墨经》，成书于公元前 4~3 世纪，据后人研究，其中有 8 条论述了几何光学知识（见钱临照《释墨经中之光学、力学诸条》，最初发表于 1940 年的《李石曾先生六十岁寿辰纪念论文集》，后又发表于《科学通报》，2 卷 8 期，1951）。阐述了影、小孔成像、平面镜、凹面镜、凸面镜成像，还说明了焦距和物体成像的关系。但由于年代久远，散佚严重，真讹难辨。

《光学》或译作《反射光学》，前 3~2 世纪，古希腊 Euclid（约公元前 330~275）著，已指出光在平面上反射时，入射角等于反射角。其后研究了光的折射等成像规律，并制成了一些光学器件。

几何光学的最初发展就是源于天文学和解剖学的需要。因为光学仪器在天文学和解剖学的研究中有着重要作用，在人们不断研究、制造光学仪器的过程中，几何光学形成了。

阿拉伯学者阿勒·哈增（965~1038）在视觉生理学方面进行过深入的研究。他认为，视觉是在玻璃体中得到。“网膜”“角膜”、“玻璃状体”、“前房液”等术语都是阿勒·哈增的发明。阿勒·哈增从希腊人那里学到了反射角的定律，并对光在球面和其它曲面镜上的反射作了进一步的研究，他指出，入射线、反射线以及法线都位于同一平面上。1572 年，阿勒·哈增的光学专著《光学全书》被译成拉丁文出版。

十七世纪初，德国天文学家开普勒由于革新天文望远镜的实际需要对几何光学进行了研究。1604 年他发表了一篇论文，对光的反射现象、光的折射现象及视觉现象作了初步的理论解释。1611 年，他又出版了一部光学著作，其中记载了他的两个重要试验，对几何光学作了进一步的理论探讨，提出了焦点、光轴等几何光学概念，发现了全反射。

继开普勒之后，荷兰物理学家和数学家斯涅尔（Snell）对几何光学做出了系统的、数学的分析。斯涅尔通过实验与几何分析，发现了光的反射定律和光的折射定律。但斯涅尔在世时并没有发表这一成果。1626 年，他的遗稿被惠更斯读到后才正式发表。折射定律的确立，促进了几何光学的迅速发展。

在这一时期，笛卡儿等人也对光的反射、折射和色散等现象进行了研究，并提出了自己的观点。

1661 年，法国的费马把数学家赫里贡提出的数学方法用于折射问题，推出了折射定律，于是费马根据光的传播、反射和折射定律，提出了著名的费马原理：光沿着所需时间为极值的路径传播。

牛顿（Newton）受到笛卡儿等人的著作的启示，在 1672 年成功地进行了分光实验，一束白光经三棱镜折射后，不同颜色的光沿不同角度出射，形成彩色光

带。

十七世纪，几何光学初步形成并得到了蓬勃的发展。

随着几何光学的发展，光的本质问题成了研究和争论的焦点。

1704年 Newton 在其《光学》一书中提出微粒说，认为光是由一个个粒子组成的，每个粒子可看做一个质点，遵守质点运动的规律，提出了完整的微粒说理论，并得到牛顿派二百多年的支持。

格里马第是光的波动说的提出者，波义耳和胡克是他的支持者；惠更斯继承并完善了胡克的观点。Huygens 在 1678 年所出版的《论光》中完整地阐述了波动说。认为光以波的形式存在和传播，遵循波动的规律。1809 年，马吕斯在实验中发现了光的偏振现象。1811 年，布吕斯特在研究光的偏振现象时发现了光的偏振现象的经验定律。

另外在光的波粒之争中，光速的测定曾给他们提供重要的依据。在相当长的时期内，许多人进行了测量光速的试验，事件排列如下：

1607 年，伽利略 (Galileo)，第一次尝试测量光速，但由于方法简单，没有获得结果。

1676 年，罗默 (O.Romer)，天文学方法， $c=215,000\text{km/s}$ 。第一次提出了有效的光速测量方法。

1725 年，英国天文学家布莱德雷发现了恒星的“光行差”现象，他用地球公转的速度与光速的比例估算出了太阳光到达地球需要 8 分 13 秒。这个数值较罗麦法测定的要精确一些。

1849 年，斐索 (Fizeau)，在实验室中，用齿轮法， $c=315,000\text{km/s}$ 。

1851 年，弗科 (Foucault)，用旋转棱镜法， $298,000 \pm 500\text{km/s}$ ，且发现在水中光的传播速度比真空（空气）中低。

1928 年，卡娄拉斯和米太斯塔德首先提出利用克尔盒法来测定光速。

1972 年，埃文森测得了目前真空中光速的最佳数值： $299792457.4 \pm 0.1$  米/秒。

除在波粒之争中的作用之外，光速的测定本身在光学的研究历程中也有着重要的意义。

1801 年，T. Young 在光通过双孔的实验中，首次观察到了与水波的干涉现象相似的光的干涉现象。光经过双孔后，由于干涉，光能量在空间重新分布，出现了一系列明暗相间的条纹。这一实验称为杨氏干涉。杨氏干涉实验证明了光的波动性。

托马斯·杨进行光的干涉试验，第一次提供了测定波长的方法。其后，德国物理学家弗琅和费对太阳光谱作了认真的检验，并向慕尼黑科学院展示了他自己绘编的太阳光谱图，另外他还发明了衍射光栅。此后，人们逐渐对光谱的性质重视起来。

1859 年，基尔霍夫对光谱进行了深入的研究，他发现了物体吸收和发射本领之间的联系。他和本生研究了各种火焰光谱和火花光谱，并在研究碱金属的光谱

时发现了铯和铷。他们发明了为光谱学的蓬勃发展打下坚实基础的光谱分析，发明了光谱的可见光部分、紫外部分和红外部分的光谱学测量方法。随后，用光谱方法人们又发现了几种金属元素。光谱分析对鉴定化学成分的巨大意义，使光谱研究工作迅速发展。1868年，埃格斯特朗发表了“标准太阳光谱”，记有上千条弗琅和费线的波长，数字十分精确，为光谱工作者提供了极有价值的资料。1882年，劳蓝德制作了一个具有高分辨率的光栅干涉仪和高分辨率的干涉分光镜，这是光学技术的伟大成就。

在这一形势下，许多物理学家都试图寻求光谱的规律。1884年，瑞士的一位中学数学教师巴耳末报告了他发现的氢光谱公式。这就是著名的巴尔末公式，正是由于这个公式的启发，是玻尔提出了著名的氢原子模型。从此光谱规律陆续总结出来，原子光谱逐渐成为了一门系统的学科。

1865年，Maxwell提出光的电磁波理论，后来光被证实是电磁波。

至此，光的波动理论学说建立起来，形成了一个完整的理论体系。在那个年代，物理学的其它分支，如力学、热学、电磁学也已经有了完备的理论体系，以至于很多著名的物理学家，都认为物理学不再可能再有新的突破。然而，两个光学实验改变了这一局面：一个是关于黑体辐射的研究，另一个是迈克耳逊测量光速的试验。

黑体辐射早就有了很精确的实验结果，但是，当人们试图用物理学的理论对这一结果进行解释时，却遇到了难以逾越的障碍，这一情况当时被称作“自外灾难”，由于已有的理论无法解释黑体在短波段的辐射规律，物理学似乎面临着灭顶之灾。在这一时期，1887年，赫兹发现了光电效应。光电效应同样也无法用已有的理论进行解释。1900年，Plank提出了能量分立的谐振子假说，解决了黑体辐射的“自外灾难”，1905年，Einstein用光量子的学说，成功地解释了光电效应。

从公元1887年起，当迈克耳逊（Michelson，公元1852—1931）和莫雷（Morley，公元1838—1923）在美国测量了光在通过以太沿着地球运动的方向与地球方向成直角的速度，发现光的速度都是一样的，迈克耳逊因此认为这个结果表明以太是随着地球运动的。可是公元1893年洛奇（Lodge，公元1851—1940）在伦敦发现，光通过两块快速转动的巨大钢盘时，速度并不改变，表明钢盘并不把以太带着转。恒星的光行差也显示以太并不随着地球转动，这一来，那种认为空间弥漫着一种物质以太，可以传递光波振动的见解，就因迈克耳逊和莫雷的实验结果而被人放弃了。这一实验导致后来爱因斯坦在1905年提出了相对论。

相对论和量子理论的提出，标志着现代物理学的建立。在现代物理学建立的过程中，光学发挥了巨大的作用，功不可没。所以我们说，光学是经典物理学向现代物理学发展和过渡的纽带和桥梁。

必须强调的是，尽管光的量子理论已经完全确立，但是几何光学和波动光学并没有没落，相反，即使到目前，它们都在不断发展，无论是基础理论还是实际

应用，都取得了极大的成就。

几何光学理论，最初仅仅用于平面和球面成像，现在，各种非球面的消像差成像镜头获得了越来越广泛的应用。

从二十世纪三、四十年代起，波动光学在衍射和光信息处理领域中获得了极大的发展，相衬方法（1935年）和全息术（1945年）发展起来；近场光学也获得了广泛的应用。利用电光和磁光效应，研制出了大量的光电子器件。结合了波动光学和量子理论的激光更是极大地改变了我们的生活。

光电子学、光子学、非线性光学等等许多基于波动光学和量子光学的新学科也获得了飞快的发展。

## 四、光学的特色与研究方法

### 1. 物理学里我们有多近？

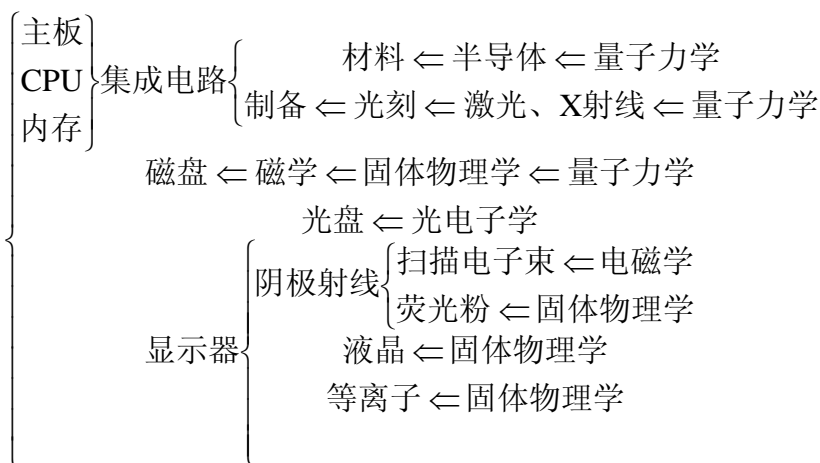
物理学是一门自然科学，而且是一门非常重要的基础科学。我们在中学阶段已经学过了物理学中关于力学、热学、光学和电磁学的内容，现在在大学里又要学习，而且在许多著名的大学，物理学是作为一门公共必修课来学的。也就是说，物理学是必须学习和反复学习的。这是为什么？

让我们先来看看一个简单的例子。计算机是集合了最先进科技的产品。如果对计算机的硬件加以简单的分析的话，我们将得到如下结论：

首先看 CPU 和内存，它们是超大规模集成电路。要实现超大规模集成电路，从材料上说，要有半导体，而人们认识和发现半导体，是量子力学的结果。从制备工艺上说，要有超微细的光刻，即利用 Laser 或 X-Ray 对材料加工，而 Laser 和 X-Ray 也都离不开量子力学。

再看磁盘，当然是磁性材料，是磁学的成果。光盘是光电子学的成果。显示器的扫描电子束和荧光粉也都是物理学的成果。

也就是说，计算机的绝大部分都是物理学的成果，没有物理学、特别是没有量子力学，是不会有计算机的。单从这一点来看，物理学在社会的发展和我们的生活中充当了多么重要的角色。在现代社会中，认为物理学是一门纯粹的基础科学、离我们的生活很遥远的说法显得多么幼稚！



## 2. 物理学的研究方法

### 1) 物理学是一门实验科学

物理学是一门实验科学，因为物理学的研究对象是实实在在的物质，而不是抽象的逻辑。所以必须通过观察得出结论。一切结论都是建立在物理实验的基础之上的，而且一切结论都必须经过实验的检验。光学也不例外。

### 2) 物理学的理论体系

Newton 所著的《自然哲学的数学原理》，被认为是物理学的基石和建立的标志。从那时起，物理学的科学体系开始建立，物理学的研究对象被确定，物理学的研究方法逐步完善。

仅仅从该书的名字中我们可以得到如下启示：

物理学的研究对象——自然的原理，物理学是自然哲学。

物理学的理论体系——数学，用严格的数学理论阐述、推导和研究物理学的规律。

可以说，物理学就是将自然界的原理用数学理论加以阐述的科学体系。

### 3) 物理模型

物理学中，为了概括事物的本质和特征，需要建立研究对象的模型。所谓模型，就是模拟真实的一种形象化的构型。如质点、原子、电子等等，都是对真实的模拟。有了模型，就可以对研究对象的特征进行描述、加以数学上的分析和推导，从而很容易得出新的结论。所得到的结论同实验上的结果进行对比，如果一致，说明模型是正确的，即“自洽”，否则，就要对模型进行修正。光学的发展过程正体现了这一特点。从“光线”模型，到“光波”模型，再到“光子”模型，对光的认识越来越深入，对光的描述越来越准确。所以说，新模型的建立，标志着新理论的建立，模型不断被修正，标志着物理学不断发展、前进。