

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

重要物理概念规律的形成与发展



## 前 言

物理概念与规律的教学是物理教学的核心。我国的基础物理教育历来都十分重视概念与规律的教学，可以说这是我国物理教育的好传统。不少第一线的优秀物理教师从教学实践的总结中形成了一套行之有效的概念、规律教学的好方法，积累了不少生动、活泼的经验。同时物理教育研究工作者也从物理教学论的角度，对概念、规律教学展开了深入的研究，提出了一些带有普遍性的教学规律，特别是近十几年来，无论从理论和实践上都取得了新的研究成果，成为我国物理教育的宝贵财富。

但是，随着物理教育研究的深入和形势的发展，特别是用新的教育思想和现代教学论的观点来看今天的物理概念与规律的教学时，又会发现有它的不足和缺陷。因而如何进一步研究概念与规律教学，又成了今天我们的物理教学改革的一个新热点。经过教育观念的更新，大家越来越认识到教学不仅要传授知识，同时还承担着培养学生学习能力的重要任务。尽管过去我们也重视概念与规律的教学，但其着眼点和侧重点主要是放在知识的传授上。因而强调的是对概念、规律本身的掌握状态。把对物理概念、规律的教学要求和标准放在一看是否讲清了它们的内涵，即它的物理内容和物理意义；二看是否讲清了它们的外延，即它的适用条件和范围；三看是否讲清了有关概念、规律的联系和相近概念、规律的区别。这样做的结果就更强化了概念、规律的教学状态，而忽视了教学过程。

近些年来，通过广大教育工作者对如何培养学生学习能力的探究和实践，认识到了方法和实践这两个因素对形成学生的学习能力有特殊的意义。而方法和实践又必须在掌握知识的过程中来体现。基于这样的认识，人们对物理概念、规律的教学进行了再思考。感到过去的教学要求是必要的，也是正确的，但它不够全面，这主要表现在忽视了对概念、规律的形成与发展过程的要求，其结果就会削弱通过概念、规律教学来加强对学生的能力培养。因而近些年来不少同志都明确地提出了对物理概念、规律的教学要求，应该包括要知道物理概念引入的必要性，它是怎样在物理现象中抽象出来的，要掌握概念的来龙去脉，要有典型的表象作为建立概念的基础，对发现和建立物理规律的过程要有较清晰的认识，知道它是通过什么实验发现和验证的，要知道导出的条件和主要步骤。主张对概念、规律本身的要求要适当，但对它们形成和发展过程的认识要求要提高。这样做的实质是提高了对培养学生学习能力的要求。

面对教学要求上的这种变化，广大物理教师自然要有一个适应的过程。这一方面要从改变教育思想入手，提高培养学生学习能力的自觉性。另一方面要充实自己的物理学史和物理学方法论的知识。首先要教师自己了解和熟知重要物理概念和规律的形成与发展过程。这样才能把概念、规律教学提高到一个新水平。正是为了适应这种需要，我们编写了这本《重要物理概念、规律的形成与发展》一书，以供广大中学物理教师进修和教学之用。书中较详尽地对40个重要的物理概念和规律的形成与发展过程做了介绍。在撰写时为了有别于一般物理学史的内容，我们着重突出了两点：一是在介绍物理概念、规律形成与发展的过程中，着重以方法因素为线索，力求层次清晰，因果关系明确。二是根据教学需要，对于概念、规律形成发展中的有关重要环节、典型事实、主要步骤、适用条件等尽量提

供对教学有直接参考价值的材料，以便更好地为教学服务。

我们是基于想对新形势下怎样提高物理概念与规律的教学水平而做些有益工作的愿望而写这本书的。至于是否能起到这个作用，还有待教学实践的检验。由于我们在物理学史方面的知识和占有资料的限制，书中可能会有某些不妥之处，敬请广大读者给予指正。

作者

1991年10月于北京

## 质 量

### 一、牛顿以前人们对质量概念的认识

在很早以前，人们在研究物体的惯性运动时，就曾探讨过打破惯性运动时外来原因与运动变化的关系问题。伊壁鸠鲁就认为：快慢现象的产生，是由于有还是没有发生碰撞。这样，就把原子在虚空中运动的方向和速度的改变与作用力联系起来，当然这还只是一种定性的思辨性思想，但这里也已孕育着质量概念的有关思想。

伽利略在否定亚里士多德将速度与力相联系的错误观点后，首次提出了加速度的概念，从而把加速度与作用力直接联系起来，他指出，作用力按物体运动的速度的变化而成正比例地增加，这里伽利略已具有静质量的概念，即物体含有原子数量的多少。但伽利略时代还不能区分质量与重量这两个概念，常把二者混用，而且还没有明确地提出质量的概念。

最早提出质量概念的是弗兰西斯·培根。他在1620年出版的《新工具》一书中，把质量定义为“物体所含物质之量”，并提出“作用力依赖于质量”，从而把质量与作用力联系起来。

### 二、静质量概念的形成

牛顿在接受了从古原子论者直至伽利略和培根关于静质量概念的论述，他在《自然哲学之数学原理》中明确定义了物体的静质量，即质量是“物质之量”，是由其密度和大小（体积）共同量度。也即质量是指物体含有物质的多少。在这里牛顿用密度和体积来定义质量，而不像今天我们是用质量和体积来定义密度，因为在牛顿时代，密度和体积是比质量更为简单的物理量。按照牛顿这种定义，说明物质是由不变的、不可入的、不可分割和具有惯性的原子组成的；质量就是物体包含的原子数量的量度；物体的体积愈大，原子的排列愈密，它所包含的原子数愈多，其质量就愈大。

在现行的初中物理教材中，我们还是沿用了牛顿关于质量的定义，即“物体所含物质的多少叫做质量”。这种定义方法对于初中学生容易接受。但对于这种定义的理解要注意以下几方面：这种定义只是一种对静质量的定义，其中没有涉及运动物体的质量问题；此处的物体必须是由同种物质构成的物体，这样比较它们所含的物质的多少才有意义；对于物质的理解不能仅局限于由分子、原子、质子、中子、电子等粒子所组成的实物物体，还应包括充满整个空间的引力场、电磁场、介子场等场形物质，即这里的物质应包括一切客观的存在并为人们的意识所能反映的；对于“物质的量”的概念，它不能仅理解为就是构成物体的最原始的、最基本的“原料”，因为在一定条件下，物质可以从一种形态转化为另一种形态。也就是说，我们可以通过转化后所生量的多少来比较物质的多少。具体地说，可以创造一定的条件，使之转化为可以直接比较的静物质形态。如果一个物体能够转化为较多的量，则说明该物体含有较多的质量。例如，蜕变为质子、电子和反中微子的中子，包含着比质子更多的物质的量。恒

星中质子燃烧变成氦核的反应中，四个质子比一个氦核含有更多的物质，因为在燃烧的过程中，有中微子和电磁场（光）的辐射。对于运动的物体可用动质量来量度。

### 三、动质量概念的形成

在经典力学中，物体的质量是个不变的量，而在相对论力学中，物体的质量不是一个恒量，物体质量与运动速度之间有一定的函数关系，即质速关系：当静止质量为  $m_0$  的物体以速度  $v$  运动时，其质量为：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

式中  $c$  为真空中的光速。这就是相对论的质速关系， $m$  称为相对论质量，又称为动质量。 $m$  与  $m_0$  的差别只在物体运动速度很大，与光速可比拟时才显示出来。质速关系式已为实验所证实。质速关系式表明，物体的速度愈大，其质量愈大，速度为零时质量最小，这时的质量就是静质量。

### 四、引力质量概念的建立

质量的属性之一是量度物体引力作用的大小，具有这一属性的质量通常称为引力质量。引力质量的概念是牛顿在发现万有引力定律的过程中形成与建立起来的，从万有引力定律出发可定义引力质量。通常引力作用包括施力和受力两方面。根据牛顿的万有引力定律，任何两物体之间都有引力作用着，引力的方向沿两物体（视为质点）的连线上，大小与两物体的质量  $m_1$ 、 $m_2$  的乘积成正比，与两者距离  $r$  的平方成反比，即：

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

其中  $G$  为万有引力常数，质量  $m_1$ 、 $m_2$  反映了物体引力作用的大小，称为“引力质量”。引力质量与“物质的多少”这一关于质量概念的定义是一致的。根据万有引力定律，如果把  $m_2$  作为引力源，则  $m_2$  越大，引力就越大，因此，引力质量是产生引力场的能力的量度。另一方面， $m_1$  越大时，引力也越大，所以从这个角度看，质量又是受引力场作用能力的量度。因此，可以引入“引力质量”的概念来定义物体产生引力与受引力场作用的能力大小的量度。鉴于引力质量的性质，可用某物体（如地球）引力的大小来量度该物体的引力质量的大小。例如天平量度质量就是基于这种思想，因而天平所量度的就是物体的引力质量。

### 五、惯性质量概念的建立

牛顿在《自然哲学之数学原理》中引入了惯性质量的概念。“定义，物质固有的力，是每个物体按其一定的量而存在于其中的一种抵抗能力，在这种力的作用下物体保持其原来静止状态或者匀速直线运动状态。”在解释时，牛顿指出：“这种力总是同具有这种力的物质的量成正比的。”这样牛顿就把惯性质量的概念引入了物理学。在牛顿总结出的牛顿第二定律中更有具体的体现，由牛顿第二定律  $\vec{F} = m\vec{a}$ ，质量就被定义为“物体惯性大小的量度”，即可以对不同物体施以同样大小的力，根据它们获得加

速度的大小来确定质量的大小。获得加速度大的物体质量小，获得加速度小的物体质量大。这种测定物体质量的大小的方法就是根据惯性的大小来量度的，因此，这样测得的质量称为惯性质量。“惯性质量”的定义与“物质的多少”这一关于质量的概念也是相一致的。

根据定义，惯性质量是描述物体在受到一定的外力作用时所具有的维持原来运动状态不变性质的一个物理量。这个定义一方面反映了物质的客观实在性，因此惯性是物体的一种属性，作为其量度的质量也就成为反映物体特性的物理量。另一方面，它反映了物质与运动之间的辩证关系。但是，物体的惯性只是反映了物体保持其运动状态不发生变化的不变特性，而不直接反映物质的数量与物体的运动性质有什么联系，反映这种联系是惯性质量。

惯性质量的概念“质量是物体惯性大小的量度”出现在高中物理教材中，教学中要注意引导学生掌握惯性质量的概念，要明确一切物体都具有惯性，惯性的表现形式又因物体的运动形式的不同而不同。对于质点的运动和低速情况下的物体的平动来说，惯性可以用质量的大小来量度。但是，当物体作转动时，就不能单一地用质量来量度物体惯性的大小了，这时需要用所谓“转动惯量”来描述惯性的大小。而转动惯量除与物体质量的大小有关外，还与物体的转轴的选取和质量分布有关。对于高速运动的物体，其惯性表现得就更为复杂，此时需要用“惯性张量”来描述。因此，质量并不能完善地描述所有情况下惯性的大小，只有在特定的情况下（物体作低速平动），才可以作为惯性的量度。

## 六、惯性质量与引力质量的关系

从以上的叙述可知，惯性质量是出现在牛顿第二定律中，引力质量是出现在万有引力定律中。这二者是分别出现在两个基本的而且相互独立的定律中，显然，它们在物理本性上是完全不同的。爱因斯坦曾生动地以地球和石头间的引力为例来说明这一点，他说：“地球以重力吸引石头而对其惯性质量毫无所知。地球的‘召唤’力与引力质量有关，而石头所‘回答’的运动则与惯性质量有关。”因此，就出现了这样的问题：物体的引力质量与惯性质量是否是一回事？物体的惯性和引力这两种外表上完全不同的物理现象之间是否有深刻联系？这一问题在物理学的发展历史上曾有过许多争论和探索。

在物理学发展史上，牛顿首先从自由落体实验和单摆实验中论证了今天所说的引力质量与惯性质量的等价问题。

牛顿的实验设计思想是这样的：由于地球的自转，地球上的物体所受到的重力 $\vec{G}$ 与万有引力 $\vec{F}_{引}$ 是不一致的。我们可以把重力 $\vec{G}$ 看作是万有引力 $\vec{F}_{引}$ 与惯性质量有关的惯性离心力 $\vec{F}_{惯}$ 二者的合力。这样，重力既与引力质量有关，也与惯性质量有关。并有关系式：

$$\begin{aligned}\vec{G} &= \vec{F}_{引} + \vec{F}_{惯} \\ &= K \frac{m_{引} M_{地}}{r^3} \vec{r} + m_{惯} \omega^2 \vec{r}_1\end{aligned}\quad (1)$$

式中  $\omega$  为地球自转角速度， $\vec{r}_1$ 、 $\vec{r}$  分别为两个不同的半径矢量。

在重力 $\vec{G}$ 作用下物体产生的加速度可由牛顿第二定律中得到：

$$\vec{G} = m_{\text{惯}} \vec{g} \quad (2)$$

式中  $\vec{g}$  为重力加速度。

联立(1)、(2)两式可得：

$$\vec{g} = K \frac{m_{\text{引}} m_{\text{地}}}{m_{\text{惯}} r^3} \vec{r} + \omega^2 \vec{r}_1 \quad (3)$$

从地球上某一固定点来看，上式中第二项是一个常数。这样从(3)式中可得这样的结论：对于同一位置上的不同物体，如果每一物体的  $m_{\text{引}}$  与  $m_{\text{惯}}$  不等或不成比例，则不同物体的  $\vec{g}$  将不同。因此，实验就归结为验证不同物体  $\vec{g}$  是否严格一致。若一致，则  $m_{\text{引}}$  与  $m_{\text{惯}}$  相等或成正比；若不一致，二者则不等或不成比例。

在牛顿时代，要用实验精确测定  $g$  是很困难的，主要是难以精确测量下落的时间间隔。为此，牛顿设计采用了观测单摆的振动，根据长度相同的单摆的摆动周期来间接测定不同物体的重力加速度  $g$ 。牛顿推出的惯性质量与引力质量的关系式为：

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_{\text{惯}} L}{m_{\text{引}} g}} \quad (4)$$

式中  $T$  为摆动周期， $L$  为摆长， $g$  为重力加速度， $m_{\text{惯}}$  为该物体的惯性质量， $m_{\text{引}}$  为该物体的引力质量。这样，如果测得两个摆长相同、摆球不同的单摆的振动周期相同，再结合(3)式则可推得不同物体的重力加速度相同，于是就证明了惯性质量与引力质量相等或成正比例。牛顿测得，惯性质量与引力质量成正比例的准确性达到  $1/1000$ 。后来贝塞尔运用牛顿的方法曾用各种不同物质做成的单摆进行实验，得到这两种质量成正比例的结果精确到  $1/60000$ 。

1894年厄阜用扭秤实验证实了引力质量与惯性质量之间的比例性质，其结果准确程度很高。厄阜实验设计的基本思想是：在地球表面，重力  $\vec{G}$  的方向被定义为由引力质量引起的万有引力与由惯性质量引起的惯性离心力的合力方向。如果惯性质量与引力质量不成比例关系，则重力  $\vec{G}$  的方向对于不同的物体应稍有不同。这样，通过测定不同物体  $\vec{G}$  的方向，来推算两种质量之间的关系。厄阜的实验以十亿分之五的准确性测得二者是相等的。1922年厄阜又将实验精确度提高到  $3 \times 10^{-9}$ 。1964年狄克等人改进了厄阜的实验，用金和铝来进行扭秤实验，精确度提高到  $(1.3 \pm 1.0) \times 10^{-11}$ ，1971年勃莱金斯基和佩语又将精度提高到  $10^{-12}$ 。

对于惯性质量与引力质量等价的实验从牛顿时代的精确度  $10^{-3}$  提高到目前的  $10^{-12}$ 。所有实验结果都可以简单表述为，在仪器测量精度范围

内， $\frac{m_{\text{引}}}{m_{\text{惯}}} = \text{常数}$ ，适当选取单位可使常数数值等于1（如选取引力常数

$G = 6.685 \times 10^{-8} \text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{s}^2$ ）这样，惯性质量与引力质量就完全等价。这一实验测量高度等价的事实，实在令人惊叹。那么这是一种巧合还是蕴藏着更为深刻的内在含义呢？这引起了许多物理学家的沉思。爱因斯坦以他独特地创见，从惯性质量与引力质量等价的基本事实出发，创立了广义相对

论，成为现代物理学的一大支柱。

引力质量与惯性质量等价性，虽然目前人们已实验测到精度  $10^{-12}$  数量级。同时，广义相对论也从理论上论证了两者之间的等价性。但是目前还不能说二者完全一致。因为一方面广义相对论也还只是相对真理；另一方面实验精度也是有限的。而且近年来还有一些新的实验事实初步证实了广义相对论的等效原理（引力质量与惯性质量等价）存在着一个微小的偏差。所以，惯性质量与引力质量二者在什么程度上等价，惯性质量与引力质量是否是一回事，仍然是一个有待进一步探索的谜，愿年轻读者有志去揭开这一谜底。

## 七、质量单位及质能关系

量度质量的单位，在米、千克、秒制和国际单位制中，质量的单位是千克，在厘米、克、秒制中是克。在我国原用斤、两、钱、分等作质量单位，现在为克、千克等逐步代替。在量度大质量时，常用吨作单位，在量度微小质量时，则用毫克、微克作单位。在计量原子质量时，则用原子质量单位。

质量单位的标准，在古代各国的质量单位都不相同，质量标准也不相同。十八世纪末，法国创建米制单位，规定千克为质量单位，并规定 1 千克等于 4 时 1 升纯水的质量。在此基础上，根据 1875 年十七国签署的米公约，制造出铂铱合金原器作为千克的国际标准。1901 年第三届国际计量大会正式规定 1 千克等于千克国际原器的质量。此规定一直沿用至今。与原规定相比，千克国际原器比 4 时 1 升纯水重 28mg。因此现在的千克标准并不等于 4 时 1 升纯水的质量。随着质量概念的进一步发展，现代物理学已明确质量与能量之间的内在联系，这就是根据爱因斯坦狭义相对论推导出的质能关系式： $E=mc^2$ 。式中  $E$  为能量， $m$  为动质量， $C$  为真空中的光速。该式表示任何一个物体的质量和它所包含的能量之间的关系。该式表明，任何物质的质量变化都将伴随着相应的能量变化，反之亦然，两相应量之间满足此关系式。这一关系已为实验事实，特别是核反应的实验事实所证实，它是揭示和利用原子能的理论基础。在自然界中，质量是一重要的守恒量。质量守恒定律是自然科学中重要的定律之一，它表明在任何与周围隔绝的物质系统（孤立系统）中，不论发生何种变化和过程，其总质量始终保持不变。这是质量重要的特性之一。



# 力

## 一、力的概念的初步形成

自远古时期，随着人们对各种原动力广泛而有效地利用，以及各种简单机械的发明与使用，便逐步产生和积累了许多有关力学的经验知识，力的概念也得以初步的形成与发展。

### 1. 我国古代人们对力的概念的认识

我国古代人们对力的概念的认识最初是与人在推、提、拉、抛时的肌肉活动感到紧张，就认为肌肉对其他物体有力的作用。我国春秋战国时期的墨家正是通过观察人们通过肌肉的动作使物体发生位置的移动，从而总结出力的初步概念。墨家最早指出：“力，刑之所以奋也。”这里的“刑”同“形”，指人体、物体，“奋”字在古籍中意思是多方面的，诸如由静到动、运动越来越快、由下上升等都可以用“奋”字。所以墨家的这句话意思就是：力是使物体由静而动、由下而上、或动而愈速的原因。也可以说是使物体的运动状态发生变化的原因。这是对力的一个很正确的定义。《墨经》的这一条的《说》还进一步指出：“力，重之谓，下、举，重奋也。”意思是说物体的重量也就是一种力的表现，物体下坠、上举，都是基于重力作用的运动。

从上面可看出，墨家把力与物体运动的原因联系起来，初步认识到力可以改变物体的运动状态。由于力不易见，而重是人人都能感觉到的，所以他们就力与重联系起来，把重看作一种力，可以说，这些都是人类对力的最早的理性认识。当然，墨家关于力的概念限于当时的历史条件和认识水平，表达还并不那么确切，可是远在二千多年前，我国人们就能对力的概念认识到如此水平，可以说达到了当时认识自然的高峰。

东汉的王充在《论衡》中对力的作用问题进行了探讨。他从实际观察中认识到物体的内力不能使物体自身发生运动状态的变化。他指出：“力重不能自称，须人乃举”，“古之多力者，身能负荷千钧，手能决角伸钩，使之自举不能离地。”意思是说，古代有个大力士，能举起千钧，用手能使钢筋之类弯曲或伸直，但却不能把自己举起。王充进一步举例说明力是使物体能够从静止运动起来的原因，没有外力物体不能自动。这些都是继墨家之后，我国人们对力的概念的进一步加深认识。

### 2. 西方古代人们对力的概念的认识

古希腊的亚里士多德是较早探讨力的概念的科学家，但由于他的结论大多是一些猜想和推测的结果，所以往往导致一些不正确的结论。在力的概念上，亚里士多德认为，自然万物由火、气、水、土四种元素组成，在不受其他因素干扰的自然状态下，火与气作直线上升运动，水和土作直线下落运动。为了解释这种现象，他把自然界中的运动分成两类，一类是自然运动；另一类是非自然运动（又称受迫运动）。自然运动就是物体趋向其自然位置的运动，这符合物体的本性，因此，自然运动是不需要作用力的推动。非自然运动就是物体向非自然位置的移动或离开自然位置的运动，这不符合物体的本性，所以是受迫运动，它不能由物体本身自发地产生，而是需要作用力来推动。他认为，各种物体的自然运动取决于它包含的元素成分和所处的位置，作用力是产生非自然运动的原因，作用力的本

性就是抵抗，克服物体趋向其自然位置的本性。这样，亚里士多德就把非自然运动的根源放在事物之外，并把外力的作用与物体运动的速度直接联系起来。亚里士多德特别研究了一种自然运动，即自由下落运动。他指出，重量是使物体下落的原因，并得出了一个结论：物体下落速度同它的重量（所受到的外力）成正比。所以亚里士多德总的有关力的概念，是认为力是维持物体运动（速度）的原因，力与速度直接相联系。亚里士多德得的这一结论，当然同观察和实验有一定联系，但他对经验材料的概括缺乏严格的科学性，而在解释一些经验现象时，又提出了一些不依赖于经验，又未受经验检验的假设，因而他的理论只是一种思辨性的理论，其结论往往是不正确的。由于亚里士多德的威望和影响，以致使他的有关力的一些错误结论延续了近二千年，阻碍了物理学的发展，当然这并非亚里士多德本人的错。

### 3. 力的科学概念的初步形成

力的科学概念首先是由意大利物理学家伽利略所提出的。伽利略在研究了亚里士多德和先辈们的著作后认为，不能把运动分为自然运动和非自然运动，这样的研究和分类会把运动的研究引入绝境。他认为应该依据运动的基本特征量——速度进行分类，他由此提出了匀速运动和变速运动新的分类方法，从而使运动理论的研究取得了重大进展。伽利略首先定义了匀速运动，接着又研究了变速运动。他在研究一种典型的变速运动——自由落体运动中首次提出了一个重要的概念——加速度，并用速度的增量  $v$  和用去的时间  $t$  之比来定义加速度，这样伽利略进一步把力与物体获得的加速度联系起来，认为力是使物体产生加速度的原因，纠正了亚里士多德的力是维持物体运动速度的错误观点，从而初步形成了力的科学概念，大大推进了人类对力的概念的正确认识。

## 二、力的科学概念的建立

英国物理学家牛顿继承和发展了伽利略对力的科学概念的认识，他首次给出了力的严格和科学的定义。牛顿在他的巨著《自然哲学之数学原理》中写道“力：外加力是加于物体上的一种作用，以改变其运动状态，而不论这种状态是静止的还是匀速直线运动状态。”牛顿又指出，外力只存在于作用的过程中，一旦作用过去，它就不复存在。仅仅由于惯性一个物体才可以保持它所获得的新的运动状态。牛顿有关力的定义几乎是力学中力的现代定义，只是现在我们通常不说力使物体改变了它的运动状态，而是说力使物体获得了加速度。

牛顿进而总结出有关力的三定律，牛顿第一定律揭示出，任何物体都具有保持其原来运动状态的特性，即惯性。当物体不受力时，它将保持原来的静止或匀速直线运动状态不变。这纠正了亚里士多德的必须有外力的作用于物体，运动才得以维持的观点。牛顿第一定律又表明了必须施加一个力在物体上，才能使物体改变它的运动状态，力只与运动状态的改变直接联系着。牛顿第二定律表明：“运动的变化与外加推动力成正比，并发生在该力的方向上”这样以定律的形式把力与运动的改变联系起来，进一步说明了力不是维持运动的原因，而是改变运动，产生加速度的原因。牛顿第三定律又解决了自然界中作用力的性质问题，即自然界存在的作用力总是成对出现的，并且具有对称性。通过牛顿三定律力的科学概念被确立

下来，牛顿进一步研究了力的一种，即万有引力，并总结出万有引力定律，这样可以通过该定律定量计算出万有引力的大小，万有引力定律的发现使人们进一步加深了对力的概念的认识。三、力的概念的进一步发展

在牛顿时代，人们对力的认识仅局限于万有引力和相互接触的物体之间的各种常见的力，例如摩擦力、弹性力、绳的张力、压力、粘滞力等。另外，还应该看到，一方面物体间的相互作用并不一定是“力”的作用。还有其他类型的相互作用，这种作用的结果一般说来并不导致物体运动状态的改变，而可能使这些物体内部发生某种变化。如物体间的热相互作用，两个温度不同的物体相互接触时将达到热平衡的现象。所以当力仅仅使物体的速度发生变化时，力才是量度物体间的相互作用的量。另一方面，当我们用力来描述物体间的相互作用时，我们并不注意这个作用本身的物理特性。因为对于一个研究机械运动的观察者来说，他并不关心物体是如何获得加速度的，如是接触相互作用还是电相互作用、磁相互作用等的结果。对于观察者来说，这些作用结果都是一样的，即使物体产生了加速度。只要物体获得的加速度相同，那么不管相互作用的性质如何，从力学的角度看，力是完全等同的。牛顿本人也强调了这一情况，他说，力的起因可以是多种多样的，他所讨论的不是物理的力，而是数学的力，也就是说，他没有涉及到力的来源与性质的问题。

随着物理学的发展，人们对力的概念的认识也不断加深与扩展。在人们对电与磁认识的发展进程中，人们发现了电荷之间的静电力，磁场对运动电荷的洛仑兹力。按照力对任何一闭合路径做功是否恒等于零，力又可分为保守力和非保守力两种。力还可按接触力和非接触力来划分。随着人们对电磁现象研究的深入，人们认识到非接触力的传递不仅需要时间，而需要通过“场”来进行。除电磁力、万有引力外，今天人们又在研究原子核的结构中发现中子、质子等之间的相互作用力——强力、以及存在于基本粒子之间的弱力。这些都极大丰富了人类对力的概念的认识。四、力的合成与分解法则的发现

人们在实践中发现，力是一个矢量，有大小和方向，而力对物体的效应还与其作用点的位置有关，因此确定一个力的三要素是力的大小、方向和作用点。在实际问题中，人们常遇到一个物体同时受到几个力共同作用的问题，为了便于分析和解决问题，常常需要把几个力用一个和它们等效的力来表示。这个等效的力叫做那几个力的合力，求几个力的合力叫做力的合成。另一方面，作用在物体上的一个力往往同时产生几个方面的效果，如果几个力产生的效果跟原来一个力产生的效果相同，这几个力就叫做原来那个力的分力。求一个已知力的分力叫做力的分解。因为力是一个矢量，其合成与分解遵从矢量合成与分解法则。

对力的合成与分解的认识是人们在实践经验中逐步积累起来的。1587年，荷兰力学家斯台文（1548—1620）在出版的《静力学原理》一书中首次阐述了力的合成法则。在他的这本书里有一张被称为“斯台文链”的图，十四个重量相同的光滑小球等距地连成一链条。挂在光滑的直角三棱柱ABC上，如图所示：棱柱的二直角边与水平放置的斜边AB间的夹角分别为 $r$ 、 $l$ 。初看起来，会以为两边由于重量不等，链条会持续的由右向左滑移，形成永恒的运动。斯台文从永动机不可能实现的思想出发，断定这

种运动是不可能的，链条必定处于静止不动的平衡状态。这意味着每个球所产生的沿斜面的下滑力随着斜面与水平面间夹角的减小而减少。如果以  $F_r$ 、 $F_l$  表示作用在每边单个小球上的下滑力，则有平衡条件

$$F_r \times AC = F_l \times BC$$

所以 
$$\frac{F_r}{F_l} = \frac{\sin r}{\sin l}$$

这样斯台文发现了斜面定律：处于高为  $h$  长为  $d$  的斜面上重量为  $G$  的物体，为一个大小为  $F = \frac{h}{d}G$  而方向与斜面平行的力相平衡。于是，斯台文在两力互成直角的情况下，引进了力的三角形（或平行四边形）法则，形成了力的分解与合成原理的初步思想，但是斯台文没有把这个法则推广到更一般的情况。

1687 年牛顿在《原理》明确提出了力的分解与合成原理，清楚表述了力的三角形（或平行四边形）法则。

### 五、力的基本类型与力的统一理论

现代物理学的研究表明，到目前为止，人们已发现了自然界中四种基本类型的力：

1. 万有引力（引力相互作用）：存在于宇宙万物之间的相互吸引力，它遵从牛顿发现的万有引力定律。引力相互作用的传递者被爱因斯坦称为“引力子”。引力子的寻找目前正在进行中，引力子是否存在现在还是一个科学之谜。

2. 电磁力（电磁相互作用）：存在于静止电荷之间的电力和运动电荷之间的磁力，总称为电磁力，它们分别遵从库仑定律和洛伦兹力公式。弹性力、张力、正压力、摩擦力等都是原子、分子之间电磁力的宏观表现。电磁力是通过电磁场传递的。光子是电磁相互作用的传递者，它的自旋是 1，服从波色—爱因斯坦统计。

3. 强力（强相互作用）：存在于质子、中子、介子和超子等基本粒子之间，其特点是力程短（约  $10^{-15}\text{m}$ ），强度大（比库仑力还大  $10^2$  倍）核力就是核子之间的强相互作用。介子是汤川理论的强相互作用的传递者。

4. 弱力（弱相互作用）：主要存在于中子、质子、电子、中微子之间，其特点是力程更短，强度很弱（约为强相互作用的  $10^{-13}$  倍）。衰变放出电子（或正电子）和中微子就是弱相互作用的结果。中间矢量波色子  $W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z^0$  是弱相互作用的传递者。强力、弱力及相对论力学中的力都是力的概念的进一步推广。

人们对基本粒子从产生到消失的各种转化现象研究中得出四种相互作用力，即引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用，它们都是随距离的增加而减弱。由于引力和电磁力是长程力，所以人们早已从宏观的物理现象中认识到了；弱力和强力则是短程力，是基本粒子世界所特有的相互作用。虽然这四种相互作用在数量级上有很大的差别，但它们都是在粒子世界发生作用。

从理论角度来看，人们总是企图建立一些综合性理论，以便把粒子之

间的各种相互作用从更深刻的角度统一起来。从物理学发展的历史来看，天体引力和地球引力已由牛顿把二者统一起来；电力和磁力已由麦克斯韦统一起来，这些理论给后人以启发。于是德国数学家魏尔（1885—1955）和爱因斯坦最早进行了企图把电磁场和引力场统一起来的研究工作。1958年海森伯又提出企图把所有基本粒子场都统一起来的理论。1961年，美国物理学家格拉肖在量子规范理论的基础上首先提出了弱相互作用和电磁相互作用统一的猜想。1967年和1968年美国物理学家温伯格和巴基斯坦物理学家萨拉姆各自独立地提出了把弱相互作用和电磁相互作用统一起来的具体方案，在1973年和1978年的实验中初步证明了他们的弱相互作用和电磁相互作用统一理论的正确性。由于这一杰出贡献，格拉肖、温伯格和萨拉姆一起被授予1979年诺贝尔物理学奖金。

由于弱相互作用和电磁相互作用统一理论的成功，更促使人们试探着把弱相互作用、电磁相互作用和强相互作用三者统一起来，这种理论叫做大统一理论。到目前已提出了许多种大统一模型，都有待于实验的进一步验证。探索把目前已知的四种相互作用都统一起来的理论被称为超大统一理论，虽已提出了多种模型，但是还没有一种模型得到判定性的支持，统一理论是现代物理学的一个发展方向，还有待于许多科学家的努力探索。

## 自由落体运动定律

自由落体定律的发现主要是意大利物理学家伽利略的贡献，在他的发现过程中所体现的物理学思想和物理学方法主要表现在以下几方面：

一、运用逻辑推理方法，伽利略证明亚里士多德的落体观念是错误的。

在十七世纪以前，物理学中有许多观念都是错误的，比如亚里士多德的落体观念。亚里士多德认为，在自由落体运动中，物体下落的速度和它的重量成正比，他的这种落体观念统治了人们近二千年，到了十七世纪初期，年青的伽利略在读了亚里士多德的著作后，首先运用逻辑推理方法尖锐地指出了亚里士多德自由落体观念中的逻辑矛盾。他说，如果用一根绳子把两个重量不同的物体联系起来，那它们将以什么速度下落呢？按照亚里士多德的落体理论，联系起来后，它们的重量是两物体重量之和，所以，它们的下落速度也应是两物体各自单独下落时的速度之和。另一方面，用绳子联系起来的两个物体毕竟不是一个物体，重物体下落快，被轻物体拖了后腿，所以速度减慢；而轻物体原来下落慢，由于被重物体拖曳，则其速度应有所增加；很快两物体将以相同的速度下落，这个速度应是两物体各自单独下落时的平均值。这两个大相径庭的结论都是从亚里士多德的落体理论中推导出来的，可见亚里士多德的落体观念不足为信，是错误的。

二、运用理想模型，构思自由落体运动的图景

伽利略在确认亚里士多德落体观念是错误的之后，进一步构思了他日后形成的动力学的逻辑结构和自由落体运动的图景。首先是定义匀速运动，以此表明时间与通过的空间的比例关系，然后再定义匀加速运动，以此表述时间与速度的关系。但在没有进行数学推导和实验研究之前，他对匀加速运动的认识是十分模糊的。为了彻底揭示亚里士多德落体观念的错误所在，就必须证明力是使物体维持运动的观点是站不住脚的。这就是促使伽利略在吸收先驱者思想的知识背景里，设想落体在下落的每一点上都会得到一个速度的增量，这就使下落时间与下落速度二者之间的关系日益明显地暴露出来。

三、运用数学方法，推导自由落体运动的数学表达式以及可以直接测定的物理量间的函数关系

伽利略的数学构造是这样的：定义匀速运动，再从定义和几个公理出发，通过对运动概念的分析而得到某些附加的假定和在几何上得到证明的定理，再求出一些系定理和一些可以在实验中加以直接测量验证的物理量间的函数关系。

伽利略对匀速运动的定义是：我（伽利略）所说的稳定的或均匀的运动是指这样一种运动，在此运动中，一个运动质点在任何相等的时间间隔里所经过的距离本身也相等。在定义匀速运动的基础上，伽利略提出了第一定理，即平均速度定理：一个从静止开始的匀加速运动的物体经过任一空间所用的时间等于这个物体以下述均匀速率经过同一空间所需的时间：这个均匀速率值等于最高速率和加速刚开始前的速率的平均值。伽利略对这个定理的证明如下：如图，三角形 AEB 代表速度从 A 到 EB 的均匀

增长，AB 线上有相等的 8 段时间，在 AB 线上各个相等间隔所画出的各段逐渐变长的平行线，代表 AB 线上标示的各段相等的时间间隔所增加的速度。F 是 EB 线上的中点，从 F 点作 EB 线的垂线得到矩形 ABFG，这个矩形表示匀速运动，FB 代表匀速运动的那个恒定的速度。如图，两个运动的时间（AB）是相等的。显然，矩形 ABFG 的面积=三角形 AEB 的面积，所以在时间 AB 里以匀速 FB 运动的各个速度总和，等于以斜边 AE 表示的均匀变化率变化的经过同一时间的各个速度的总和。

伽利略在上述定理的基础上又推出定理：一个从静止开始的匀速运动下落的物体所经过的各段空间的比，等于经过这些距离（相应）所用的各时间间隔的平方之比。（证明从略）。伽利略又给出定理的又一种表述：在相等的时间间隔里速度按自然数增加，而在这些相等的时间间隔里所经过的距离的增量之比则等于从 1 开始的奇数之比。即  $S_1 : S_2 : S_3 = 1 : 3 : 5 \dots$

至此，伽利略便完成了自由落体定律的数学表述。通过以上数学推导和数学表述，伽利略修正了早期关于自由落体运动的一些错误提法，提出了正确的表述：在匀加速运动中，落体的瞬时速度正比于下落的时间，经过的距离正比于时间的平方。即

$$\frac{S}{t^2} = \text{常量}$$

在这里，不包含任何瞬时值，只要测定 S 和 t 就行了。

#### 四、运用实验方法，对自由落体定律进行实验验证

伽利略在驳斥亚里士多德的落体观念，从数学上推导出自由落体运动定律后，又进一步用观察和实验进行了验证。据说，1589 年伽利略亲自登上比萨斜塔，让 10 磅重和 1 磅重的两个球同时下落，请来众人观察，由于两球下落速度很快，所以看起来两球是同时落地的。人们通常称这次活动是一次实验，实际上它只能算作一次观察。这种观察活动虽然提供了生动的感性认识，但立刻显示了它的局限性，物体下落得太快，塔又不太高，所以难以得出明确的结论。于是他另辟蹊径，开始了斜面研究。由数学推导方法得出的自由落体定律，伽利略精心设计了著名的斜面实验加以验证，同时在实验中对概念的物理意义有了更加清晰的理解。伽利略想，落体在空间垂直下落，速度太快，以伽利略时代的实验仪器而论，无法对此获得准确的测量。他设想用斜面落体来“冲淡重力”从而获得比较准确的测量，因为通过延伸斜面和人工控制斜面的倾角，从而使人们方便得以减慢物体的运动，得以控制物体运动的速度和所经历的时间。为了要得到准确的结果就要设法减小阻力。为此，他首先精心加工落体—青铜球和木板斜面，使之尽量光滑以减小摩擦。为了克服物理实验中的其他因素，伽利略把实验条件理想化，抽象出一些虽然实际存在但却无法准确计量的因素：如空气的阻力（早在反驳亚里士多德落体观念的时候，伽利略已经意识到了真空是存在的，而在真空中物体下落的速度与物体的重量无关。然而伽利略本人当时还无法用实验手段得到真空，也就是说落体总要受到空气的阻力影响），表面摩擦、观察精度和各种误差等等。而且，实验的一个重要测量量——时间，限于当时的条件，是通过水的重量称量间接加以测量的。时间间隔被认为是正比于在每一间隔中所收集到的水的相应重

量。实验中只要测定小球滚动的距离与所用的时间两个物理量就可以了。

伽利略的斜面实验具体的设计、装置和操作是这样的：他首先假设一个物体从一个具有任意斜度的平面滚下与从同一高度垂直下落是等价的。他用一块约6米长、四分之一米宽、一指厚的木模板作斜面，在板子的边沿上挖一条比一指稍宽一点的槽，槽要挖得很直，而且打磨得很光滑，然后再铺上羊皮纸，纸也尽可能光滑。然后，做一个“水钟”以测量时间。将一大桶水放在较高的位置上，在桶的底部插上一根口径狭小的管子，使它喷出一股细水流，在每次下落的时间里，试验者就用一只小玻璃杯去接这股水流。在每次小球下落之后，就用一架极为精确的天平称量所接到的水的重量，这些重量的差和比率就给我们提供出时间的差和比率。条件具备了，就开始将那块木模板垫起一头，使一端比另一端高出一米左右，使木模板放成斜坡的位置。然后，就沿木模板的槽滚动一个坚硬、光滑、很圆的青铜球。先在小槽的1/4长的地方滚下小球。然后，再将距离改为1/2、2/3、3/4全长等等，一再重复这些实验，使时间测量的精确度达到两次观察的误差不大于1/4脉搏。把这些实验重复一百次，比较小球滚动经过的距离和时间之间的关系。伽利略发现，小球经过的距离的比值等于所经时间的平方的比值。而且实验具有相当的精确性，以致实验虽然经过多次重复，但其间的差距甚微。

伽利略认为，促使小球沿斜面下滑的力应当是小球的重量乘以一个分数值，如图，这个分数的值就等于该斜面的高度和斜面长度之比，只要这个比（即斜度）不变，下滑的力就不变。同时，由图可推出加速度的公式。设物体自顶端沿斜面下滑和竖直下落所用的时间分别为  $t_1$  和  $t$ ，末速度同样

$$h = \frac{v}{2}t \quad l = \frac{v}{2}t_1 \quad \text{得到}$$

$$\frac{t}{t_1} = \frac{h}{l} \quad \text{再由 } v = at_1 \text{ 和 } v = gt$$

为  $v$ ，则由

$$\text{得到} \quad \frac{a}{g} = \frac{t}{t_1} \sin \alpha$$

$$\text{即} \quad a = g \sin \alpha \quad \text{则} \quad g = \frac{a}{\sin \alpha}$$

由这个关系，就不难从斜面上的加速度  $a$  求出自由落体的加速度  $g$ 。

伽利略在斜面实验中，做了许多斜度不同的斜面实验。虽然，不断变更斜面的斜度，但都得到了同一的结果：小球经过的距离的比值等于所经时间的平方的比值，即  $\frac{S}{t^2} = \text{常数}$ 。这样就完成了自由落体定律的实验

验证工作。

在斜面实验中，当斜面上倾到垂直的位置作用力就应当是物体的重量本身，物体在这一位置的下落就是自由落体了。但伽利略当时并没有给出加速度  $g$  的精确数值。

今天的教科书上，对于自由落体运动的表述：自由落体运动是初速度为零的匀加速直线运动，其特点是，在地球上同一处的地表面附近，不论是由什么物质构成的物体，也不管其质量大小，自由下落的加速度都是相同的，约等于  $9.8 \text{ 米/秒}^2$ 。这个  $9.8 \text{ 米/秒}^2$  很特殊，也很有意义，所以



物理学给它一个特殊名称，叫做重力加速度，通常用  $g$  来表示。在地球表面上， $g$  值的大小与纬度有关，在两极处的值略大于赤道位置的值。自由落体运动的规律用下列两个公式就可以概括

$$v = gt$$

$$S = \frac{1}{2}gt^2$$

为了实用方便，也常导出第三式

$$v^2 = 2gs$$

可见，自由落体运动与一般初速度为零的匀加速直线运动不同之处在于，自由落体加速度的方向总是竖直向下，大小约等于  $9.8 \text{ 米/秒}^2$  不

像  $v = at$  和  $S = \frac{1}{2}at^2$  中的  $a$  那样可以有任意的方向和大小。所以说自由落

体运动是初速度为零的匀加速直线运动的特例。在地球表面附近自由下落物体的运动都是自由落体运动，它是一种很常见的运动。

以上简述了伽利略发现自由落体运动定律的过程、思路和方法，伽利略之所以特别注重对自由落体的研究工作，是因为他认识到自由落体运动是弄清自然界所能观察到的各种运动的关键。伽利略对自由落体的研究是这样评价“这是第一次为新的方法打开了大门，这种将带来大量奇妙成果的新方法，在未来的年代里会博得许多人的重视”“一门博大精深的科学已经出现，我们的工作仅仅是一个开端”的确，自由落体运动的研究给伽利略带来了一连串的“奇妙成果”，伽利略正是以这个问题为突破口，从根本上动摇了亚里士多德的运动学，为物理学的发展奠定了基础。

## 开普勒行星运动规律

在科学发展史上，人们很早就开始探讨行星的运动问题，形成了许多种学说，其中主要的是地球中心说（简称地心说）和太阳中心说（简称日心说）。并在日心说的基础上，开普勒终于发现了行星运动规律。

### 一、行星运动学说的建立与发展

#### 1. 地心说的初步形成

在人们探讨地球、太阳及行星的运动问题上，古希腊的伟大学者亚里士多德首先提出了地球是宇宙中心的学说。他主张地球是球形的，因为球形是最完美的图形，是唯一能在自身所占据的空间范围内作任何方向的旋转的图形。亚里士多德并进一步列举月食的成因，向北向南微小的迁移所看到的天空等事实来证明地球的球形。亚里士多德还运用他的运动学理论来论证地球的形状只能是球形。并估计了地球的大小。亚里士多德进一步认为，地球是不动的宇宙中心。他解释说，既然地球上所有的重物都要落向地心，那么地球所在的位置必定是宇宙的中心，否则地球就要向宇宙的中心运动了，地球上的各种物体将如何运动也就很难想象了。他认为天体的自然运动是圆周运动。因为地球处于宇宙的中心，所以地球必然是静止不动的。

为了解释天体的运动，亚里士多德以地球为中心，把宇宙分为九个等距的层次，分别有月亮、水星、金星、太阳、火星、木星、土星和恒星，第九层是一个原动天，它是第一推动力。从这里可看出，亚里士多德所追求的是一种完美、和谐的理论。因为在他看来，宇宙应当是完美和谐的。他从美的观点出发建立一个宇宙体系，然后再尽量用逻辑来证明。

#### 2. 日心说的萌芽

亚里山大里亚时期的天文学家阿利斯塔克（前310—前230年）被恩格斯称为“古代的哥白尼”。他认为恒星和太阳在空间并不变动其位置；地球以太阳为中心沿着它的周围旋转。他推算出太阳的体积大约是地球体积的250—370倍，他认为，太阳既然是宇宙中最大的一个天体，那么宇宙的中心只能是太阳，这是提出太阳中心说的根据。但遗憾的是，他的日心说思想没有得到进一步的继承与发展。日心说在阿利斯塔克那里，只能是一种天才的猜测、智慧的火花，这颗萌芽却未能长成一棵参天的大树。

历史上除亚里士多德，阿利斯塔克外，还有许多学者，提出过相似的各种各样的学说，日地关系的各种可能都有人试探过、讨论过，但各种学说在争论中都未能占优势。

#### 3. 地心说的建立与发展

古希腊天文学家托勒玫一方面继承了亚里士多德的地心说，另一方面把它加以发展和完善。他也认为，地球是宇宙的中央，所有的重物都朝着它运动。他吸收了当时的一些新的思想，用圆周体系来代替天球层体系，从而克服了亚里士多德体系所无法解决的一些困难，把地心说推向了一个新阶段。托勒玫主张地球是静止不动的，并对阿利斯塔克的日心说提出了批评。他从太阳的升落、物体的下落、天上的浮云的飘动、鸟的飞行等观察到的事实来证实他的地球静止的观点。他提出本轮、均轮等重要概念来解释行星视运动的不规则性，使地心说具有更强的生命力。由于托勒玫对

地心说的发展与完善，再加上人们认识上的原因以及教会的支持，使地心说在天文学界统治了将近十五个世纪。

#### 4. 日心说的确立

随着科学的不断发展，托勒玫地心说的错误日益暴露出来，这就客观上要求用新的理论体系来代替它。十六世纪中叶，当年阿利斯塔克所埋下的火种，终于通过波兰天文学家哥白尼之手而燃烧成熊熊烈火，从而揭开了近代自然科学的序幕。

哥白尼在大学学习期间就对托勒玫的地心说产生了怀疑，他认为地球静止不动的观点是不能成立的，人们总习惯于把自己看作是世界的中心，这也是一种偏见。他说，托勒玫由于没有区别现象和本质，而将假象视为真实。由于感觉不到地球的自转，以致只感觉到太阳每天从东方升起而在西方下落。这正象人们坐在大船上行驶时，往往感觉不到船在运动，而只见到岸上的东西往后移动一样。同样，太阳绕地球转是假象，地球围绕太阳转才是真象。哥白尼为了彻底搞清楚行星的运动问题，他在弗洛恩堡一所教堂的阁楼上对天象进行了三十年艰苦观测。哥白尼当时的天文观测条件很差，弗洛恩堡的纬度偏北，靠近海洋、空气潮湿、仪器简陋等。而且过去的观测资料几经传抄，错误很多，有些数据甚至是伪造的。但哥白尼不畏困难，持之以恒，三十年终于取得了可观的数据，为他创立日心说提供了比较丰富、可靠的观测资料。经过哥白尼一生的努力，终于在1512年写成了初稿，1543年终于出版了天文学的不朽巨著《天体运行论》，这一科学巨著被恩格斯称为“自然科学的独立宣言”，“从此自然科学便开始从神学中解放出来……科学的发展从此便大踏步地前进。”

哥白尼在《天体运行论》中，明确地把地球从宇宙中心的位置排除出去，把它降为普通行星的一员。他认为，地球的自身有三种运动，一是自西向东绕轴昼夜自转，二是地球在金星与火星轨道间的黄道上从西向东运行，三是倾斜面的运动，即赤道面或自转轴相对于日—地联线的运动。哥白尼正是依据地球的这三种运动与各个天体固有的自身运动，简单而统一地解释了从地面上观察到的天体的周日旋转、太阳与月亮运动的快慢变化、五大行星运行中的逆行等复杂现象。这样哥白尼便创建了一个以太阳为中心的宇宙结构体系。

哥白尼的日心说比托勒玫的地心说具有内在的简单性和和谐性，而且它表述了运动的相对性思想，为理解行星的运动开辟了一条新的途径——动力学的途径。哥白尼的“日心地动”体系启发了开普勒去发现行星运动的真实规律，为牛顿力学的完成奠定了基础。

哥白尼的日心说受到了意大利哲学家布鲁诺的热情支持和宣传，他也因而被教会烧死于罗马鲜花广场。在听到判词后布鲁诺说：“你们心中的恐惧比我听到判词还要高出百倍，我愿为殉道而死！”

## 二、行星运动观测资料的积累

丹麦天文学家第谷早年对托勒玫的著作进行一些研究，同时又进行了实际的天文观测。他通过对行星在星系方位的观察和计算，发现过去的天文观测资料是不够准确的，编出的星表也有很多的误差。他认为，如果不精确地掌握恒星和行星的位置，人们永远无法了解宇宙，为此他立志要观察一千个天体，取得有关行星运动的最准确资料，编出一个完善的星表。

来。

从 1576 年起，他精确测定出长时期从地球上所看到的星体的视位置，并由此绘出一幅星体确实位置的天体图来。第谷是一位卓越的天文学家，他的天文观测准确而细致，他每天晚上都坚持观测，并认真地进行记录，可以说是二十年如一日，持之以恒进行精确的观测，并不断提高观测的精确度，当时还没有望远镜，第谷的观测是用肉眼进行的。他亲自设计与制造了当时属于世界第一流的观测仪器。他增加了仪器的尺寸，并把仪器加固在墙上，增加仪器的稳定性，为此，他还规定了各种仪器的误差范围，所以他二十年中所写下的一页页观测记录，其准确性都相当高，在他二十年对行星角位置的观测数据中，没有一个误差超过半分，比哥白尼的数据精确了二十倍。

尽管第谷积累了大量精确的天文观测资料，但由于他所信奉的宇宙体系是介于托勒玫地心说与哥白尼日心说之间的一种混合体系，并缺乏一定的数学天才，因此他未能从他大量宝贵的准确观测资料中得出应有的结论。开普勒说：“他是个富翁，但他不知道怎样正确地使用这些财富。”

1601 年，在第谷观测到第 777 颗天体时，就离开了人间。临终前，他将自己一生全部的观测资料交给他发现的“新星”——开普勒，希望他继续他的工作。第谷的一生是伟大的，他象一位优秀的制造砖瓦的工人，虽然不愿意为哥白尼学说添砖加瓦，但他却为后人留下了大量优质的建筑材料，而这些材料作用的发挥将给科学大厦的建设奠定重要的基础。

### 三、行星运动规律的发现

1600 年，在第谷看了开普勒的著作《宇宙的秘密》后，非常欣赏他的才能，便邀他作为助手，1601 年第谷去世时将他一生的观测资料交给了开普勒。开普勒在初期整理第谷的观测资料时发现，无论是托勒玫的地心说，还是他信奉的哥白尼的日心说，以及第谷提出的混合体系，都不能同第谷的行星观测资料十分吻合。他曾亲眼看过第谷的工作，深信第谷观测的可靠性与准确性，因此他想问题一定是发生在体系方面。于是他决心查明原因，揭开行星运动之谜。

#### 1. 开普勒确定主攻方向

开普勒是以他丰富的想象力和杰出的数学才能探到了一条奇迹般的出路。作为第一步，他首先在空中选定一个参考点。那时火星绕日的周期 1.88 年为已知，他选择火星为参考点，这样，对太阳和火星的观测，就成为测定地球轨道的手段，开普勒就是这样巧妙地运用了三角定点法把地球的轨道形状测了出来。

第二步，开普勒对火星的轨道进行精确测量与探索，他首先选择火星作为突破口，这是他日后成功的一个重要因素。开普勒认识到，在第谷所留下的大量观测资料中，火星的资料最为丰富，也最为典型。而且火星的运行同哥白尼体系出入最大，同时火星也是外行星中离地球最近的一颗星，视运动与轨道的变化都很显著，火星的偏心率也是较大的，这些条件决定他研究的方向。开普勒自己也说：“唯有火星才使我看透天文学的秘密，否则这个秘密将永远不会揭晓。”

#### 2. 开普勒的初步尝试

开普勒在对火星资料的研究上，起初他假定火星的轨道是圆形的，并

作圆周运动且符合哥白尼体系，这种尝试没有成功。他又在计算中把火星的正圆轨道修正为偏心圆型轨道，大约又进行了七十次的试探之后，他高兴地找到了一个方案，与事实能较好的符合。他以为这次成功了，可是按照这个方法来预测火星的位置，仍跟第谷的数据不符。其偏差是 8 分，这个差额是很小的，如果他就此满足，他也许就永远发现不了行星运动三定律了。这时，老师第谷的观测精确性在提示着、启发着他。开普勒深知，第谷的一丝不苟的工作态度，明察秋毫的洞察力和较为精确观测仪器的详细记录其误差不会超过 2 分。他坚信第谷观测的准确性，因此，这 8 分的误差绝不是合理的误差。就是这 8 分的误差使开普勒认识到，这只能是理论上的不正确造成的，即哥白尼同心圆球和本轮的图解解释不了火星的实际运动。要想获得成功，必须另辟新径，放弃对火星圆形轨道的假设，在理论上进行新的探索，建立新的假说。他说：“上天给我们一位象第谷这样精通的观测者，应该感谢神灵的这个恩赐。一经认识到这是我们使用的假说上的错误，便应竭尽全力去发现天体运动的真正规律，这 8 分是不允许忽略的，它使我走上改革整个天文学的道路。”

### 3. 开普勒发现第二定律

开普勒在经历了多次失败后，他终于对匀速与正圆轨道这两个传统观念发生了怀疑。在寻找行星在轨道上任一位置的速率与它在另一位置上速率之间的数学关系，即速率与轨道之间的关系上，他大胆作出了一个新的假设，火星绕太阳的轨道运行是变速的。从分析火星的观测资料也表明，火星在轨道上是变速的，其速率的变化情况是：接近太阳时移动较快，离开太阳时移动较慢，其轨道呈椭圆形。开普勒从浩如烟海的数据中进行艰苦的发掘工作，他是从三个不准确的假设中推导出来后来正确的结果，这是个令人惊奇的问题。开普勒在研究中发现，将轨道分为若干小段，则等时间间隔  $t$  内扫过的面积是相等的，即

$$\frac{1}{2} (v_{\perp} t) \cdot R = \frac{1}{2} (v'_{\perp} t) \cdot R'$$

$$\text{或 } Rv_{\perp} = R'v'_{\perp} = k$$

这样开普勒得到了开普勒第二定律，即等面积定律。

### 4. 开普勒发现第一定律

开普勒在发现了第二定律后就彻底抛开了原来用圆周来建立行星轨道的尝试，他确信火星不会沿太阳外围的一个偏心圆作圆周运动，只有椭圆轨道才能与所观测的资料和等面积定律相符合。太阳是位于椭圆的一个焦点上，这是开普勒的一个重要发现，被称为开普勒第一定律。开普勒第一定律和第二定律发表在 1609 年出版的《新天文学》一书中。

### 5. 开普勒第三定律的发现

开普勒第一定律和第二定律的发现，为计算各行星的准确位置提供了极大的方便，虽然第一、第二定律是从火星的研究中总结出的，开普勒发现，其他的行星也同样完全遵从这两个定律。初步的胜利没有冲昏开普勒的头脑，他感到还没有揭示出各行星运动之间的联系，即每颗行星纵然已有各自的椭圆轨道和速率，但还没有一个适合所有行星的总体模式。他想无论同一个轨道，还是不同的轨道，行星总是距太阳越近，运转得越快，这决不是巧合。这说明行星运行速度或运行周期同行星到太阳的距离之间一定有某种数的和谐性。为此，开普勒利用第谷的观测资料，用了约十年

的时间，对各种观测数据进行了艰苦的计算，一张张稿纸被写满计算的数据，一个个不眠之夜在悄悄地流逝，在经过了三千多个日日夜夜的计算与探索，开普勒终于找到了隐藏在千百万个数据中的客观规律，使杂乱无章的数字显示出了规律。下面是他经过艰苦计算所发现第三定律时的原始数据表：

	水星	金星	地球	火星	木星	土星
T (年)	0.241	0.615	1	1.881	11.862	29.457
$\bar{a}$ (平均轨道半径)	0.387	0.723	1	1.524	5.203	9.539
$T^2$	0.058	0.378	1	3.540	140.7	867.9
$a^3$	0.05796	0.3779	1	3.540	140.85	867.98

表中诸行星的数据都是以地球为标准的。地球绕日公转一周(T)为一年，与太阳的平均距离(a)算作一个单位，其余诸行星有关(T)和(a)的数据均以此为标准折算。表中属第谷留给开普勒的资料只是表中前两横行的原始数据，而前两横行内的原始数据看起来十分凌乱，怎么会想到  $T^2 = a^3$  这种规律性的关系呢？从这里可看出开普勒的智慧和耐心，这是经过十年艰苦计算与探索的结果。至此，开普勒发现了各行星之间的运行的关系：行星公转周期的平方跟它们轨道半长轴的立方成正比。这就是开普勒第三定律。开普勒在得到这个结论后写道：“这正是我十六年以前就强烈希望要探索的东西……为此目的，我参加了第谷的工作，现在我终于揭露出它的真相，认识到这一真理，这是超出我最美好期望的”。开普勒第三定律公布在1619年出版的《宇宙谐和论》中。

开普勒运用他发现的三定律同第谷的观测数据结合起来，在1627年出版了新的星表《路德福星表》，实现了第谷的遗愿。他还写了《哥白尼天文学概要》一书，指出行星运动三定律不仅适用于火星，而且适用于所有行星。他还认为我们的太阳只是一个普通的恒星，每个恒星的周围也都是一个类似于我们太阳系的世界，进一步发展了哥白尼宇宙结构体系，这是天文学研究中的一次突破。

#### 四、开普勒行星运动三定律的现代表述

开普勒第一定律（轨道定律）：所有行星都沿椭圆轨道运行，太阳位于这些椭圆的一个焦点上。

开普勒第二定律（面积定律）：太阳至行星的矢径在相等的时间内扫过相等的面积。

开普勒第三定律（调和定律）：任何两行星绕太阳运行的周期的平方同它们离太阳的平均距离（或其轨道长半径）的立方成正比。

开普勒从第谷的精确观测数据中发现的这三定律描述了行星运动的规律。其中第一定律否定了传统的圆形轨道论，修正了哥白尼的日心理论。它给我们提供了一幅太阳系的极为简单的图景，只有一些椭圆形轨道，这些椭圆大多数近似于圆，几乎所有的轨道都在同一平面内（只有冥王星的轨道倾斜的比较显著）。第二定律否定了传统的匀速运动、准确地描述了围绕太阳的任何行星的运动规律。这条定律也适用于围绕地球的月亮的运动以及围绕任何行星的卫星的运动。第三定律建立了行星之间的联

系，这样我们可以根据第三定律，从某一颗行星计算出的  $T^2/a^3$  值，去确定另一个已知轨道半径的行星绕太阳运行的周期，或已知周期求轨道半径。

### 五、开普勒行星运动规律的发现留给我们的启示

回顾开普勒行星运动三定律的发现过程，我们可以得到这样的启示：科学研究的协作与配合对科研的成功是至关重要的。第谷和开普勒两位伟大的人物，被誉为天文学界的双星。他们俩人的出身、经历、性格和特长都相差甚远，但他们又配合得那么默契和协调。第谷有一双敏锐的眼睛，他善于观察、持之以恒，而且观测数据准确可靠。但他缺乏开普勒的数学才能。如果没有开普勒，第谷辛勤积累的宝贵资料也许会成为一堆废纸。开普勒是先天不足，后天多病，再加上眼睛不好，一般说来，他不宜做一个天文学家，但他善于取长补短，发挥自己的特长，他具有丰富的想象力和很强的理论概括能力以及特有的数学天才，这些正是第谷所缺少的。开普勒的眼睛不好，但他借助了第谷的慧眼，而把自己的精力放在理论概括和计算方面，所以他取得了成功。但是如果没有第谷丰富而可靠的第一手天文观测资料，开普勒的理论研究也就成了无源之水、无本之木，那么就只能沉溺于空想之中。第谷是一个做工作的人，开普勒是一个完成工作的人。一个讲究的是观测的准确可靠，一个追求的是数学的概括与和谐；一个提供了量多优质的建筑材料，一个是第一流的建筑设计师；一个有一双明亮的眼睛，一个有一个聪慧的头脑。他们两人的结合，就必然要创造奇迹。第谷与开普勒的结合是科学史上观测数据与数学概括相结合、理论与实践相结合的光辉典范。也是后人科研协作、集体创造、相得益彰、珠联璧合的楷模。

## 牛顿第一定律

### 一、亚里士多德的运动观念

力与运动的关系问题，很早以前，就是人们关注的焦点。古希腊最伟大的哲学家和科学家亚里士多德对力与运动的关系问题作过许多探讨。亚里士多德把运动分为自然运动和受迫运动，他认为自然运动不需要力的推动，而受迫运动需要作用力的推动。作用力是产生受迫运动的原因，作用力的本质就是抵抗，克服物体趋向其自然位置的本性。他认为，要使物体不断地作受迫运动，就要使外力不断作用于物体，不断地同物体保持直接接触。一旦这种作用停止了，直接接触中断了，物体的运动也就随之停止，所以在他看来物体本身不能维持运动。

亚里士多德用他的运动观念解释了我们扔石头，石头离开手后为何还会运动一段距离。他认为，在这种状况下，石头后面的空气同石头保持着接触，当石头在手的推动下离开手的一瞬间，石头原来占据的位置就成了虚空，而大自然是厌恶真空的，所以周围的空气就立即填补了这个空间，对石头形成了一种冲力，使它又能向前移动一个位置。依此类推，石头离开手后就能继续移动一段距离。亚里士多德对自由落体运动的解释，他认为是由于重量而使物体下落，而物体之所以有重量，是因为包含水元素特别是土元素的缘故。物体所含土元素越多就越重，它趋向其自然位置——地心的要求就越强烈，由此他得出一个重要结论：物体下落速度同它的重量成正比。他继而引用马拉车，认为为了在一条平坦的路上拉车，马需要不断地用力，因此，沿直线以恒定速度运动的物体（如马车）应当受外力作用。

总之，亚里士多德在力与物体运动关系的问题上做出了不少错误的结论。即认为：受力运动与物体本质无关，取决于外力的作用，“运动者皆有推动者推动”，“在受力时，力既是产生运动，又是维持运动的原因”“沿直线以恒定速度运动的物体应当受外力的作用”等。由于亚里士多德的威望和影响，他的一些错误结论被当作信条，统治了人们近二千年的历史，直到十七世纪，人们才逐步形成正确的概念，其中伽利略做出了重要贡献。

### 二、伽利略提出惯性原理

伽利略早在比萨大学读书时就指出：亚里士多德生活在近二千年前，现在世界已发生了很大的变化。亚里士多德没有离开过地中海领域，而现在人们已完成了环球旅行。亚里士多德只了解世界上的一个小角落，他不可能永远正确而不犯错误。伽利略十分重视运动学的研究，并努力建立一门新科学。他写道：“在自然中，最古老的课题莫过于运动。尽管哲学家们对此写出了内容庞杂的著作，我却发现运动的某些性质仍是值得探讨的。”伽利略在批评亚里士多德运动观念的同时，提出了自己的力学观点。他在研究自由落体运动时，设计了一个著名的斜面实验：他在一个板条上刻出一条直槽，贴上羊皮纸使之平滑，让一个光滑的黄铜小球沿直槽下滚，并用水钟测定下落时间，伽利略在斜面成不同的倾斜角和铜球滚动不同距离的情况下作了上百次测定，从而证明了落体“所经过的各种距离



总是同所用时间的平方成正比”的自由落体定律。在此基础上，伽利略进一步提出了“等末速度假设”即静止物体不论是沿竖直方向还是沿不同斜面从同一高度下落，到达末端时具有相同的速度。伽利略进一步用单摆摆球的等高性实验作了检验。如图：拉至 AB 放开的摆球会升到对面同一水平高度上，如果在 E 或 F 处钉上小钉子，摆球仍然沿不同的圆弧上升到同一水平高度的各点。反过来，如果让摆球从这些点下落，它同样会升到原水平高度的 B 点。这说明，沿不同倾斜度的斜面（不同弧线）下落，其末速度是相等的。根据这个假设，伽利略推出了自由落体运动是作匀加速直线运动的结论。

“等末速度假设”和单摆摆球的等高性实验，把伽利略引向理想斜面实验，如图让小球从第一个光滑斜面 AB 滚下，再爬上第二个光滑斜面 BC，则当小球在第二个斜面上爬到一定高度，就停止上爬再度滚下。上爬到的这个高度（C 点）刚好等于小球在第一个斜面上开始滚下的出发点（A 点）的高度。如果从 AB 斜面滚下的小球沿 BD、BE 等斜面上爬，会得到相同的结果。而这一切都同两个斜面的夹角无关。于是伽利略推想，如果第二个斜面的倾角等于零，也就是说它是一个光滑的平面 BF，如果不考虑摩擦与空气阻力的作用，那么小球从第一个斜面滚下以后，它在第二个斜面（平面）上就永远达不到它原来出发时的高度，那它将永远滚动下去。在《关于两门新科学的对话》中，伽利略写到：“我们可进而指出，任何速度一旦施加给一个运动着的物体，只要除去加速或减速的外因，此速度可保持不变，不过，这是只能在水平面上发生的一种情形。因为在向下倾斜的平面上已经存在一加速因素；而在向上倾斜的平面上则有一减速因素。由此可见，在水平面上的运动是永久的。因为，如果速度是匀速的，它就不能减小或缓慢下来，更不会停止。”伽利略在这里基本上明确地提出了惯性原理。但伽利略在惯性原理中，所考虑的平面仅是地球表面上的“水平面”，伽利略本人也认识到，他的惯性原理只在极限意义下才正确，因为一真正的水平面必然与地表面相切，因而如果延伸得足够远，一定看得出它是向高处走而沿着它向外运动的物体最终会慢下来。而且伽利略的惯性原理仅限于地球上，并没有把它用于宇宙间使之成为普遍适用的定律。所以，伽利略的惯性原理存在着很大的局限性。

针对伽利略惯性原理的局限性，笛卡儿作了补充。笛卡儿克服了伽利略所认为的绕地球的圆周运动也是惯性运动的结论。明确指出，作惯性运动的物体永远不会使自己趋向曲线运动。他总结出两条规则：第一，物体将一直保持它的速度，除非有别的物体制止它或者减慢它的运动速度；第二，物体始终趋向于维持直线运动。至此，惯性定律已基本被发现。

### 三、牛顿总结出牛顿第一定律

#### 1. 牛顿关于力和惯性的定义

牛顿在笛卡儿、伽利略等人工作的基础上，他在《原理》一书中首先定义了力和惯性两个概念。他认为，施加于物体的力是为了改变其静止或匀速直线运动状态而施加于物体上的一种作用。仅仅在作用中，力才显示出来，作用一结束，力便从物体间消失，然后由于惯性，物体继续保持原来的状态。他写到：“物质的惰性力或固有之力，是按一定的量而存在于其中的一种反抗的能力，由于这种力，任何物体不论是静止的或是沿直线

均匀向前运动的（即匀速直线运动），都要尽力维持其现状。”牛顿又指出，“这种力总是与具有该力的物体的质量成正比，而与物质的惰性毫无区别，只是说法不同而已。由于物质的惰性，物体要脱离其静止状态或匀速直线运动状态是困难的。基于这种考虑，这种表示惰性的力可以用一个最确切的名称，叫做惯性力或者惰性力……”牛顿在此所指的“惯性力”或者“惰性力”，实质上就是“惯性”。

## 2. 牛顿总结出牛顿第一定律

牛顿把惯性原理用于地球上物体运动的解释，又用于天体，给惯性原理赋予了普遍意义，使它成为一个定律，即牛顿第一定律。其内容可简要陈述为：“任何物体都保持静止的或匀速直线运动状态，直到其它物体的作用迫使它改变这种状态为止。”

牛顿指出，在没有空气阻力妨碍或重力向下吸引的情况下，抛物体将继续其运动。一个转动陀螺，如果没有空气阻力，它就不会停止转动。彗星和行星这样较大的物体，由于在较为自由的空间中遇到的阻力较小，所以它们能在更长的时间内同时保持其进动和圆周运动。牛顿第一定律中所提到的物体是被当作质点来看待的，因而只涉及到物体的平动，而不涉及到物体的内部运动。

## 3. 牛顿第一定律的含义

牛顿第一定律揭示出，任何物体都具有一种保持其原来运动状态的特性，即惯性。当物体不受力时，它处于静止就保持静止状态不变；当它处于运动时，就保持匀速直线运动状态不变。这体现了物体具有保持它原来运动状态的特性。定律还说明了匀速直线运动与静止这两种状态在一定意义上的等价性。

牛顿第一定律是从大量的实验现象出发，归纳总结出的，它是有一定的实验基础，但自然界中不受力的孤立物体是不存在的，因此，这一定律并不能简单地按其字面意义用实验直接加以验证，这更反映了它的普遍意义。并且由牛顿第一定律得出的一切推论都与观察和实验结果相符合，这也间接证明了这一定律的正确性。

这一定律还表明，必须施加给物体一个力才能使物体改变运动状态，或由静止到运动，或由运动变为静止，或从一速度变为另一速度即力只是与运动状态的改变直接相联系的，这是由牛顿第二定律来定量描述的。

## 四、牛顿第一定律的发现留给我们的启示

从牛顿第一定律的发现过程可知，理想实验在其中起了决定性的作用。理想实验是人们在科学实验的基础上，运用逻辑推理方法和发挥想象力，在思维中把客观的实验条件和研究对象加以理想化，抽象出来的一种理想化过程的“实验”。伽利略被称为物理实验方法的先祖，同时他又创造了理想实验的方法。他在科学研究中善于运用理想实验的方法，为驳斥亚里士多德的“重物下落速度快”的错误结论，他设计了把轻重不同二物体捆在一起让其自由下落的理想实验，从而推翻了亚里士多德的落体观念。他在发现惯性原理的过程中运用了理想斜面实验，堪称物理史中的一绝。因为他所设计的理想斜面这种在纯粹理想状态下的实验，在实际当中是无法实现的。尽管我们可以创造各种条件，把运动物体所受的摩擦力和空气阻力尽量减少，但是永远不可能完全排除掉。然而，这并不能阻碍人

们根据多次越来越逼近于理想实验,运用逻辑推理方法进行科学抽象而作出应有的结论.伽利略运用理想实验所得到的结论被牛顿概括总结出牛顿第一定律,成为经典力学的建立基础.在爱因斯坦和英费尔德合著的《物理学的进化》一书中,也曾讲到一个关于惯性定律的理想实验,这对我们进一步理解牛顿第一定律是会有所帮助的.书中写道:“假如有人推着一辆小车在平路上行走,然后突然停止推那辆小车,小车不会立刻静止,它还会继续运动一段很短的距离.我们问:怎样才能增加这段距离呢?这有许多办法,例如在车轮涂油,把路修得很平滑等.车轮转动得越容易、路愈平滑,车便可以运动得愈远.……假想路是绝对平滑的,而车轮也毫无摩擦.那么就没有什么东西阻止小车,而它就会永远运动下去.”

理想实验的方法在现代物理学中发挥着越来越大的作用.爱因斯坦曾设计了“同时相对性”的理想实验,通过这一实验他确立了同时性的相对性的科学概念,成为创立狭义相对论的重要基础.理想实验根植于科学实验之中,但它具有现实实验所达不到的极度简化和纯化的程度,因而更有利于探索和揭示自然事物和现象的规律性.运用理想实验,是提出科学假说的重要途径之一,它具有加深对现实实验和研究对象性质及其运动规律的理解,还具有使逻辑证明和反驳更明确、直观及有力的作用,当然,理想实验的结论还须科学观察和实验的检验.

## 牛顿第二定律

### 一、古代人们对运动的动力学规律的认识

古人在研究了物体的惯性运动后，必然要提出打破惯性运动时外来原因与运动变化之间到底存在一个什么样的关系呢？古希腊学者伊壁鸠鲁认为：“快慢现象的产生，是由于有还是没有发生冲撞”。这样就把原子在虚空中运动的方向和速度的改变与作用力联系起来。当然这还只是一种定性的思辨性的思想，并不能成为科学定律。

### 二、伽利略提出 $F = a$ 的关系

伽利略在对落体运动的研究中，首先提出了加速度这个概念，从此将力与运动区分开来，也即将速度与加速度区分开来，并总结出“作用力按物体运动的速度的变化而成正比例地增加”即  $F = a$ 。

伽利略的思路是这样的，他在对落体运动的研究中，最先定义了匀速运动：“我们称运动是均匀的，是指在任何相等的时间间隔内通过相等的距离”，进而他又给出了瞬时速度的概念：物体在给定时刻的速度，就是物体从该时刻起作匀速运动所具有的速度。这是对速度概念的一个重要扩展。用公式表示为

$$v_{\text{匀速}} = \frac{s}{t}, v_{\text{平均}} = \frac{s}{t}, v_{\text{瞬时}} = \frac{ds}{dt}$$

关于变速运动，伽利略是从落体运动的观察和研究入手的。他大胆假定，落体运动是匀加速运动。如何对加速度进行定义呢？伽利略一开始想到的就是某些量之间呈现简单的比例关系。他第一次对加速度的定义是：落体的速度正比于所通过的距离，即

$$a = \frac{v}{s}$$

但他很快领悟到这个定义的逻辑错误。因为根据这个定义，物体通过某段距离的二倍所用的时间将和原来那段距离所用的时间相等，因为在两倍距离的情况下，其速度也是后来速度的两倍，即

$$\frac{s_1}{v_1} = t_1, \frac{2s_1}{2v_1} = t_2, t_1 = t_2$$

另外，这个定义也不能描述落体从静止到运动的过渡。伽利略对加速度又进行了重新定义，他用速度的增量  $v$  和用去的时间  $t$  成比例来定义匀加速运动：“若一物体从静止状态出发，并在相等的时间间隔内获得相等的速度增量，则称该物体的运动为匀加速运动。”这样加速度被定义为：

$$a = \frac{v}{t}$$

伽利略在斜面实验的研究中，对于  $a$  是否为恒定数值，他也没有检验过，当时也无法进行检验。

今天我们认识到，加速度是一个矢量，它不仅有大小，而且有方向，其单位在国际单位制中为米/秒<sup>2</sup>。

作为加速度概念的扩展，在一般变速直线运动中，通常还引入平均加速度和瞬时加速度概念。

平均加速度是对质点速度变化情况的粗略反映：

$$\bar{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t - t_0} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

它表示在  $t-t_0$  时间内，速度改变量  $\vec{v} = \vec{v} - \vec{v}_0$ 。  $t$  取得越短，质点速度变化反映得越真实。质点在时刻  $t$  的瞬时加速度就是在时刻  $t$  附近的平均加速度的极限值，其数学形式为：

$$\bar{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{s}}{dt^2}$$

在曲线运动中，加速度的定义为：

设物体（视为质点）沿曲线  $M$  运动，在  $A$  点的速度为  $\vec{v}_A$ ，在  $B$  点的速度为  $\vec{v}_B$ ，从  $A$  到  $B$  所经历时间为  $t$ ，则速度的变化  $\vec{v} = \vec{v}_B - \vec{v}_A$  与这变化所经历时间  $t$  的比值，称为这段时间内的平均加速度，用  $\bar{a}$  表示，即

$$\bar{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_B - \vec{v}_A}{\Delta t}$$

其方向与  $\vec{v}$  相同。当时间间隔  $t$  趋近于零（此时  $B$  点趋近于  $A$  点时），这一比值的极限称为物体在该时刻的“瞬时加速度”或“即时加速度”，即

$$\bar{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$\text{或 } \bar{a} = \frac{d^2 \vec{s}}{d^2 t}$$

加速度的方向是  $t$  趋近于零时  $\vec{v}$  的极限方向。通常  $\bar{a}$  的方向与该时刻的物体的速度方向并不一致。

对于常见的还有切向加速度、法向加速度、向心加速度等概念。

### 三、培根总结出 $F \sim m$ 的关系

英国哲学家弗兰西斯·培根 1620 年在出版的《新工具》一书中首先定义了质量，然后探讨了作用力与质量的关系。他对质量定义为“物体所含物质之量”，并提出“作用力依赖于质量。”

从上述可看出，伽利略已认识到  $F \sim m$  这一比例关系，而培根认识到  $F \sim a$  这一比例关系，但都没有进一步明确力、质量、加速度三者的内在定量关系。

### 四、牛顿关于质量、动量、力的定义

在《自然哲学之数学原理》一书中，牛顿给出了质量、动量、力等概念的定义：

对于质量，牛顿的定义为“质量：物质的量是物质多寡的量度，由其密度和体积共同量度。”

对于动量，牛顿的定义为：“动量：运动的量，是运动多寡的量度。由速度和质量共同量度。”

对于力，牛顿的定义为：“力：外加力是加于物体上的一种作用，以改变其运动状态，而不论这种状态是静止的还是沿着笔直的直线作匀速运

动。”

牛顿又指出，外力只存在于作用的过程中，一旦作用结束，它就不复存在。仅仅由于惯性一个物体才可以保持它所获得的新的运动状态，但外力的来源可以不同，如来自碰撞、压力等。

### 五、牛顿第二定律

在对于力、质量、动量等基本概念定义的基础上，牛顿提出了动力学第二定律。牛顿是这样表述的：“运动的变化与外加推动力成正比，并发生在该力的作用线方向上。”1750年瑞士数学家欧拉作了进一步的明确说明，他认为力不是与运动的变化成正比，而应当是力与运动的变化率成正比。假设作用力是个常量，我们可用数学形式写出牛顿表达式

$$\vec{F} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t}$$

对于力是个变量的情况，这个公式仍然成立，只是需要取很小的（趋近于零的）时间间隔内的动量的变化。这时上面的公式可以写成：

$$\vec{F} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t}$$

或者 
$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$$

这就是牛顿第二定律的数学表示式

当物体的质量是个常量时，牛顿第二定律的这一表达式等效于表达式  $\vec{F} = m\vec{a}$ ，实际上在这种情况下

$$\vec{F} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t} = \frac{m(\Delta\vec{v})}{\Delta t} = m \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = m\vec{a}$$

中学物理教材中的牛顿第二定律  $\vec{F} = m\vec{a}$  是物体的质量为常量，这同牛顿本人原定律的内容相符合的。

物体的质量并不总是常数，只是在经典力学中可以把物体的质量作为常数。在一般的情形下，当物体的速度接近于光速时，就不能再把物体的质量作为常数。依照相对论，质量  $m$  将等于

$$m \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

式中  $m_0$  为物体的静止质量， $v$  为物体的速度， $c$  为真空中的光速。

这样，对于高速运动的物体，牛顿第二定律的表达式  $\vec{F} = m\vec{a}$  就不能成立了。而牛顿本人给出的表达式  $\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$  却是依然正确的。这是一个很有趣的问题，好象牛顿看得更远，并预见到了物体的质量可能不是一个常量。当然，实际上牛顿不可能预见到相对论的诞生。

### 六、牛顿第二定律的理解与运用

(一) 理解牛顿第二定律要注意这样几个问题：

1. 对于同一物体，加速度  $\vec{a}$  由外加力  $\vec{F}$  唯一决定。有  $\vec{F}$  就有  $\vec{a}$ ， $\vec{F}$  消失， $\vec{a}$  亦随之消失。 $\vec{a}$  的方向永远和  $\vec{F}$  的方向一致。

2. 如作用力 $\vec{F}$ 不止一个, 则 $\vec{F} = m\vec{a}$ 中的 $\vec{F}$ 是指合力, 即  $\vec{F} = m\vec{a}$ .
3.  $\vec{F} = m\vec{a}$ 只适用于宏观物体的低速运动, 并且只适用于惯性系. 对于非惯性系还要考虑惯性力.

(二) 牛顿第二定律一般运用于这样几种情况下,

1. 已知物体所受力求物体的运动情况.
2. 已知物体的运动情况求物体所受的力, 对于  $\vec{F}$ :
  - 力的个数变化;
  - 力的方向变化;
  - 力的性质变化.

运用牛顿第二定律解决问题的基本程序为:

1. 选取研究对象, 选取时要同时考虑题目的要求和计算上的方便.
2. “隔离”研究对象, 对“隔离体”进行受力分析.
3. 分析研究对象的运动性质, 以及这种运动所遵循的规律.
4. 建立坐标系.
5. 应用  $\vec{F} = m\vec{a}$  求解.

## 万有引力定律

在很早以前，人们就在不断地探索天体运动的奥妙。亚里士多德曾提到过力的概念，他认为力是产生非自然运动的原因，力的作用只有在相互接触时才能传递，因此，对于遥远的天体，这个力是毫无用处的。开普勒为天体运动奥妙的揭开做出了重大贡献，但却未解开天体运动的动力学之谜。1645年法国天文学家布里阿德提出一个假设：从太阳发出的力，和离太阳距离的平方成反比。笛卡儿1644年提出“旋涡”假说，把行星的运动归结为动力学原因。1666年意大利的玻列利提出引力是距离的幂的某种函数。1673年惠更斯在研究摆的运动时给出了向心加速度理论。英国的胡克已经觉察到引力和重力有同样的本质，1674年他提出引力随离吸引中心距离而变化，1680年他又进一步提出了引力反比于距离的平方的假设。哈雷的伦恩从圆形轨道与开普勒定律出发，导出了作用于行星的引力与它们到太阳的距离的平方成反比。当科学的接力棒传到了牛顿手中时，他便向万有引力定律的红线冲刺了。他站在前人的肩上，发挥他卓越的才能，建立了万有引力定律，为科学做出了重大的贡献。

牛顿发现万有引力定律的过程中包含着丰富的物理学思想和物理学方法论内容，其主要的思路与运用的物理学方法大致体现在以下几方面。

### 一、运用科学想象和推理，牛顿论证了行星运行都要受到一个力的作用

牛顿对行星运动的研究工作首先是从研究月球开始的。牛顿想象，如果没有任何力作用于月球的话，根据牛顿当时已发现的牛顿第一定律可知，月球就应当做匀速直线运动。但月球是绕地球作圆周运动，所以月球必定要受到力的作用。牛顿当年写道：“没有这种力的作用月球不可能保持在自己的轨道上；如果这个力比轨道所需的力小，则它使月球偏离直线的程度不够；如果这个力比轨道所要求的力大，则它使月球偏离直线的程度太大，并使月球的轨道更靠近地球。”那么迫使月球绕地球旋转的力的性质是如何的呢？据说，有一次牛顿正在思考这个问题时，忽然看到一个苹果从树上掉了下来，他吃了一惊，同时便陷入了沉思。当时已知苹果是受重力作用而下落的，他推想，如果苹果树长得很高，熟透了的苹果会不会落地呢？当然是会的！但如果苹果树长得象月球那么高，树上的苹果是否还会落地呢，牛顿作了合理的设想，设想这种作用力的范围要比通常所想象的还要大得多，比如说，很可能一直延伸到月球那么高，因此，这样既使苹果树长得象月球那么高，苹果仍会落地的。正是这种作用力使地球对月球施加影响。同时，从开普勒第一定律（行星沿椭圆轨道绕太阳运行，太阳位于这些椭圆的一个焦点上）可知，各行星和卫星都是沿椭圆形路径运动（非匀速直线运动）因此，根据牛顿第一定律便可推知，各行星如卫星的运动都要受到一种力的作用。

### 二、运用类比方法，牛顿推证了行星运行所受到的力是一种连续地指向一确定中心的作用力

牛顿在由地面上的苹果下落联想到天上的月球也受一种力的作用，但进而思考，月球为什么不会象树上的苹果那样落地呢？这样他又联想到物



体的旋转问题：绳子的一端系着一块石头，另一端抓在我们手中，让石头作旋转运动，这时如果我们松手，石头就会沿直线轨道飞出去，这说明石头之所以作圆周运动是由于一种力拉着石头。进而类比，这块石头好比月球，而我们的手又相当于地球，手通过绳子施于石头的力又很相似于地球施于月球的作用力。牛顿接着又描述了从高山上平抛一个铅球的理想实验，他设想，从高山上铅球平抛出去，本来应当笔直的前进，可是在重力作用下，它就沿抛物线落到了地面。如果平抛速度增加，它就会落得更远一些，再增加抛出速度，则铅球可能会绕地球半圈。当抛出速度足够大时，铅球就会绕地球一圈、两圈、乃至永远绕地球作圆周运动而不落回到地面上，这说明，只要有一个指向确定中心点的力，又具有足够的初速度，则物体就可作圆周运动。把月球类比于这个铅球，则可知，月球受一个指向确定中心点的力，所以才会作圆周运动。行星也应如此。

牛顿进一步在开普勒第二定律的基础上改换问题的提法，开普勒第二定律是说：对于任何一个行星来说，它的矢径（行星到太阳的连线）在任何地点、在相等的时间内，沿轨道所扫过的面积相等。（这条定律也适用于月球绕地球的运行）牛顿则寻找在相等的时间间隔内物体若受一指向确定中心的力的作用，物体到中心连线扫过的面积存在什么规律？牛顿从数学上证明了（证明过程从略）在这种情况下，各面积之间存在相等的关系。牛顿接着又证明了这个命题的逆命题，即在任何一曲线上运动的物体，如果它到一确定点的连线在相等时间内扫过相等的面积，则物体受一指向该确定点的向心力。牛顿接着由开普勒第二定律所概括的现象推出行星或卫星受一连续的指向一确定中心的力，并且这个中心就在椭圆的一个焦点上。

### 三、运用数学方法，牛顿推导出行星运行所受到的向心力遵从平方反比定律

牛顿在由开普勒第二定律得到的存在一个连结指向一确定中心点的力作用于行星上的基础上，进一步去寻找物体在前人提出的椭圆轨道上运动时，所受的指向椭圆焦点的向心力的规律。牛顿利用了开普勒第一定律，用数学方法证明了（证明过程从略）沿所有圆锥曲线（或双曲线、抛物线、圆、椭圆等）在任何时刻的向心力必定与该物体到焦点的距离平方成反比，其数学形式为

$$F = c/R^2 \quad \text{即向心力定律}$$

式中  $R$  是从该物体中心到椭圆焦点的距离， $c$  为该物体的一个常数。

牛顿由开普勒第三定律进一步推知向心力平方反比定律，其数学推导为：

设某一行星的质量为  $m$ ，行星的运行轨道近似圆（由于行星椭圆轨道的偏心率很小，如地球为 0.0167，因而其轨道可近似看作圆）根据开普勒第二定律，可将行星视为匀速圆周运动由牛顿第二定律。

$$F = ma = m \cdot \frac{v^2}{R} = \frac{m}{R} \left( \frac{2\pi R}{T} \right)^2 = \frac{4\pi^2 mR}{T^2} \quad \text{式中 } m \text{—行星质量，} T \text{—行星}$$

运行周期， $R$ —圆周轨道半径。再由开普勒第二定律。

$$T^2 = kR^3 \quad \text{代入上式得}$$

$$F = \frac{4\pi^2 m}{kR^2} \quad \text{令} \mu = \frac{4\pi^2}{k} \text{得}$$

$$F = \mu \frac{m}{R^2}$$

式中  $\mu$  是一个与行星无关而只与太阳的性质有关的量 称为太阳的高斯常数； $m$  为行星质量。

由上式可知：引力与行星的质量成正比。

牛顿通过研究引力使不同大小的物体同时落地和同磁力的类比，得出引力的大小与被吸引物体的质量成正比，从而把质量引进了万有引力定律。牛顿又进一步用实验作了验证：他用摆做了一系列实验，实验的结果以千分之一的准确度表明，对于各种不同的物质，万有引力与质量的比例始终是一个常数。

牛顿又接着作了大胆的假设，行星受到的引力与太阳的质量有关，并用数学作了推证地球对一切物体包括太阳的引力应为

$$F = \mu' \frac{M}{R^2}$$

$\mu'$  —地球的高斯常数， $M$ —太阳的质量

太阳对地球的引力为  $F = \mu \frac{m}{R^2}$  式中  $m$ —地球的质量， $\mu$ —太阳的

高斯常数

根据牛顿第三定律有： $F = F'$  即

$$\mu' \frac{M}{R^2} = \mu \frac{M}{R^2} \quad \frac{\mu'}{M} = \frac{\mu}{m} = G$$

$G$  是一个与地球和太阳的性质都无关的恒量，所以引力的平方反比定律的数学形式为

$$F = G \frac{Mm}{R^2}$$

四、运用演绎推理方法，牛顿把引力的平方反比定律推广到一切物体，得出一切物体间均存在引力的结论

牛顿得到平方反比定律之后，寻求进一步的原因：符合这个定律的力是什么性质的力？它是由什么决定的？牛顿首先由月球运行情况探讨了使月球保持轨道运行的力与重力之间的关系。由平方反比定律可知，月球受一指向地球的力的作用，它与月球到地心距离的平方成反比。通过数学计算和实验验证，牛顿得到了月球受的向心力就是重力的结论，这样牛顿就把地面落体运动的原因和月球运行的原因归于同一了。此后，牛顿运用牛顿第三定律推知，地球对月球也有引力，地球对太阳也有吸引力。牛顿由木星卫星和木星有吸引、土星与土星卫星有吸引，行星与太阳之间有吸引力等现象出发，认为这些和月地之间的现象“系同类现象，使月球不能出离轨道的力的原因可推至于一切行星”。这样，牛顿就把天体和其运行中心之间的力都归于引力。此后，他又由土星、木星会合点附近相互间的“运动失调”以及太阳使月球的“运动失调”现象，提出行星之间和恒星与卫星之间均有引力的作用，于是才提出了万有引力的假说。这样，牛顿

由研究月球、地球，以至研究行星、恒星、卫星等推出了一切物体相互间均存在引力的结论。

### 五、运用归纳概括方法，牛顿总结出了万有引力定律，完成了万有引力定律的发现工作

牛顿对提出的万有引力假说进行了充分的论证，牛顿由原来得出的天体运行向心力平方反比定律，得出万有引力符合平方反比关系；由引力使不同大小物体同时落地，得出引力的大小和被吸引物体的质量成正比；又由牛顿第三定律，得出吸引物体和被吸引物体的区分是相对的，所以引力也和吸引物体的质量成正比，从而得出引力符合  $F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$ 。这样，

牛顿就完成了万有引力的发现工作。

牛顿发现的万有引力定律的内容为：宇宙间的任何物体之间都存在相互作用的吸引力，这种吸引力的大小与它们的质量的乘积成正比，与它们之间距离的平方成反比，作用力的方向是沿两物体的连线方向，即

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R_{12}^2}$$

G 为引力恒量（引力常数）； $m_1 m_2$  分别为两个相互吸引的物体的质量； $R_{12}$  为物体  $m_2$  与  $m_1$  的质心间距离。

### 六、运用科学观察和科学实验验证万有引力定律理论

牛顿的万有引力定律是经过科学观察和科学实验的检验后才得到普遍承认的：

1. 关于地球形状的测定牛顿根据他的引力理论指出，地球不是正球体，而是两极方向稍扁的扁球体，后经过法国科学家的几次测量证明了牛顿的推论是正确的。牛顿这个足不出户的人正确地给出了地球的形状，这显示了牛顿理论的威力。

2. 地月验证由运动学公式可计算出月球的向心加速度

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2}{T^2} R$$

已知  $R = 3.84 \times 10^8$  米； $T = 2.36 \times 10^6$  秒 得出

$$a_n = 0.27 \text{ 厘米/秒}^2$$

又由万有引力定律，引力的大小与距离的平方成反比，月球与地球间的距离约为地球半径的 60 倍，因此，其加速度应是地面加速度的  $1/60^2$

即  $a_n = \frac{980}{60^2} = 0.27$ （厘米/秒<sup>2</sup>）由此可见，计算月球向心加速度，从

引力定律出发得到的结果与用其它方法得到的计算结果相同，这也从一方面验证了万有引力定律的正确性。

3. 哈雷彗星回归周期的证实牛顿认为彗星并不象一些人所认为的是一种神秘天体，它同样应遵循力学规律。英国天文学家哈雷参照从前彗星的出现情况，运用牛顿的万有引力理论预言这颗彗星（后人称为哈雷彗星）将于 1758 年出现，后经克雷洛计算了木星和土星对这颗彗星的摄动作用，指出它将推迟于 1759 年 4 月份经过近日点，这个预言果然被证实。

4. 引力恒量的测定从地面上的实验对万有引力定律提供了直接证

明，1798 年英国物理学家卡文迪士把两个小铅球系在一根直杆的两端，用一根细线从中间吊起，然后用两只大铅球靠近小铅球，经过细线的扭曲测量了大球与小球之间的引力作用，从而得出了引力恒量之值： $G = 6.71 \times 10^{-13}$  牛顿 [ 厘米 ]<sup>2</sup>/克<sup>2</sup> 卡文迪士的实验以后又被重复了许多次，并据此计算出了地球的质量与密度，引力恒量的测定为万有引力的计算提供了可能。

5. 海王星的发现天王星发现后，人们发现天王星的轨道的理论计算总是同实验观测有出入，法国的勒维列和英国的亚当斯根据牛顿万有引力定律理论都预言有一颗新星，并计算出了它的位置。法国天文学家加尔用望远镜在计算出的指定位置上发现了这颗新星（后命名为海王星）。勒维列和亚当斯没有朝天上一瞥，只靠牛顿理论的数学计算就在他们的笔头的尖端看到了新星，这再一次显示了牛顿引力理论的力量。不到一个世纪，人们又在对海王星的仔细观测中发现了海王星的自身摄动，又提出了还存在别的行星的假说，1930 年洛韦耳天文台的汤鲍就找到了这颗被预言的冥王星。

## 相对性原理

### 一、伽利略以前人们对相对性原理的认识

在古代，一些科学家就曾假设，任何运动都是相对的，处于运动状态中的一个人，他不可能确定，是他自己还是他周围的物体在运动。在我国古代东汉（25—220年）时期成书的《尚书韦·考灵曜》中记载：“地恒动而人不知，譬如人在大舟中闭牖而坐，舟行而不觉。”这里大舟指行走平稳而已，“牖”的意思是窗。由此可知，中国古代人很早就对相对性问题有了较深刻的认识。在古代西方，一些科学家也确信，地球仅仅看上去好象是不动的，而实际上它是在运动的，只是位于地球上的人们觉察不出它的运动。

在这以后，有关运动的相对性问题的讨论一直在进行着。而这种讨论又总是试图证实地球是否运动的问题关联着。笛卡儿首创了描述物体的位置随时间变化的规律的数学框架——坐标系。托勒玫的地球中心说实际上是把地球当作了坐标原点，而哥白尼的太阳中心说则把坐标原点由地球移到了太阳上，当时反对日心说的人提出了一个尖锐的问题，“如果地球在高速运动，为什么地面上的人一点也感觉不出来呢？”伽利略为此作了许多的观察、实验与研究，他还利用惯性原理驳斥了那种认为倘若地球在运动将会把地面上物体抛到空间去的谬论。他认为使石子从行驶中的航船的桅杆顶上落下，尽管船在向前行驶并离开了石子的最初位置，但石子仍然落在桅杆脚下，而不是落到桅杆后面，当然这种情况只在船作匀速直线运动时才可能如此。伽利略还分析了类似的其它例子，由此得出相对性原理。

### 二、伽利略发现相对性原理

伽利略在1632年出版的名著《关于托勒玫和哥白尼两大世界体系的对话》中揭示了一个具有普遍意义的事实，他写道：“把你和一些朋友关在一条大船甲板下的主舱里，再让你们带几只苍蝇、蝴蝶和其它小飞虫，舱内放一只大水碗，其中放几条鱼。然后挂上一个水瓶，让水一滴一滴地滴到下面的一个宽口罐里。船停着不动时，你留神观察，小虫都同等地向舱内各个方向飞行，鱼向各个方向游动，水滴一滴一滴滴进下面的罐子里。你把任何东西扔到你的朋友时，只要距离相等，向这个方向不比向另一方向用更多的力，你双脚齐跳，无论向哪个方向跳过的距离都相等。当你仔细地观察了这些事情后（虽然当船停止时，事情无疑一定这样的），再使船以任何速度直线前进，只要运动是匀速的，也不忽左忽右地摆动，你将发现，所有上述现象丝毫没有变化，你也无法从其中任何一个现象来确定，船是在运动中还是停着不动。即使让船运动得相当快，在跳跃时，你将和以前一样，在船底板上跳过相同的距离，你跳向船尾也不会比跳向船头来得远，虽然你跳到空中去时，脚下的船底板在向着你跳时相反方向移动。你把不论什么东西扔给你的同伴时，不论你在船头还是在船尾，你也并不需要用更多的力。水滴也将象先前一样，滴进下面的罐子，一滴也不会滴向船尾，虽然水滴在空中时，船已行驶了许多距离。鱼在水中游向水碗前部用的力，不比游向水碗后部来得大；它们一样悠闲地游向放在水碗边缘任

何地方的食饵。最后，蝴蝶和苍蝇将随意地到处飞行，它们也决不会向船尾集中，并不因它们可能长时间留在空中，脱离了船，而为赶上船的运动显出累的样子。如果香冒着烟，则看到的烟将象一朵云一样向上升起，不向任何一边飘动。”从这里我们可看出，伽利略已基本得出了力学中的相对性原理。他强调船应作匀速直线运动，在这样的船中做任何力学实验都是不可测出船的运动快慢或着停着不动。

力学相对性原理今天可叙述为：在彼此作匀速直线运动的惯性系内，所作的任何力学实验都相同，都不能确定该惯性系相对于其他惯性系是否运动。因为首先提出这个原理的是伽利略，因此又称为伽利略相对性原理。

伽利略总结出了相对性原理，但伽利略的研究仅局限于地球，他确信，位于地球上的人们是觉察不出地球的运动，就好比一条船在作匀速直线运动时，处于它的封闭的船舱中的旅客觉察不出船的运动一样。但是地球的运动即不是匀速的，也不是直线运动，地球是围绕太阳旋转，并绕自身的轴而自转，这些伽利略已明确地证实了。伽利略认为，位于地球表面的物体的运动与匀速直线运动相差甚小。尽管如此，这种差别还是客观存在的，那么人们自然而然地就会提出，位于地球上的人是否能用实验发现自己运动的非匀速性和非直线性呢？如果可能的话，怎样去发现呢？伽利略当时没能解决这些问题。

### 三、牛顿的绝对时空观与相对性原理

牛顿在建立经典力学体系中，研究了伽利略留下的问题，他不仅研究了位于地球上的人能否感觉到地球是在作加速运动的问题，而且研究了这一问题的一般形式。

牛顿对于伽利略的一些结论，处于匀速直线运动中的人是可能发现他自身的运动的，而物体的速度是一个相对的量，不存在任何某个特殊的、绝对静止的物体系统。地球和太阳在宇宙中也不拥有特殊的地位。尽管牛顿对这些都很理解，但他认为，一个物体的位置和速度只能是相对其他物体而言的，宇宙中尽管不可能有“真正静止”的某种物体，但自然界中还是存在某种可以看作是静止的东西。这种静止的某物就是绝对空间。牛顿的绝对空间是一切物体的存身处，它是静止不动的，任何物体相对于这个绝对空间的位置和速度都是绝对的。另外他还提出了绝对时间的概念。牛顿的绝对时空观可以归纳为如下几点：存在着绝对时间和相对时间、绝对空间与相对空间之分，在绝对时空中的运动是绝对运动，在相对空间中的运动是相对运动。绝对时空是与任何客观物质及外界状况无关的。我们通常所感觉到的只是相对空间，绝对空间是人们感受不到的。牛顿认为，尽管我们探知到速度和位置是相对的，但力学加速度是绝对的，并可由实验证明。假定物体间的相互作用可以超越绝对真空，可以不要任何媒介地在瞬时中发生。上帝凭自己的永远和普遍存在构成时间和空间，并给行星的运动以第一推动。

牛顿认为，运动不仅由速度，也由加速度来描述，加速度是由力决定的，所以是个绝对量，这样加速度可以相对于绝对空间而存在。为此牛顿在《自然哲学之数学原理》中描述了一个著名的水桶实验，这是一个任何人都可自己容易重复做出来的实验：水桶挂在一条扭得很紧的绳子上，然

后放手，于是出现在下图中所描述的关键性的观察结果：

1. 开始时，桶旋转得很快，但水几乎静止不动，在粘滞力经过足够的时间使它转动起来之前，水面是平的，完全同水桶被放手前一样。

2. 水和桶一起转，水面变成了凹面。

3. 桶突然被停止住，但整个水还是继续在转，而水面保持凹形。

牛顿指出，很清楚，桶和水的相对运动并不是决定水面曲率的因素。这现象的根本原因，一定是水在空间的绝对转动及其伴随加速度。牛顿并进一步指出，地球由于本身转动而鼓出作为支持他的看法的证据。牛顿就把这样的运动看作是相对于绝对空间的运动。

牛顿的绝对时空的观念没有一点成效，它对物理学没有作用，并在物理学的发展进程中被彻底抛弃了。

#### 四、伽利略变换

由伽利略相对性原理可知，对于同一力学过程，尽管可以选择不同的惯性参照系来描述，但是它们遵从的基本规律却是同一的，所采用的运动方程的形式是相同的。因为运动的描述要涉及时间和空间，当观察者从一个惯性系变换到另一个惯性系时，不同惯性系之间必然存在时间和空间的变换关系，可以通过这些变换，使力学规律在不同的惯性系中有相同的形式。如图考虑两个惯性系  $s'(x', y', z', t')$  和  $s(x, y, z, t)$   $S'$  相对于  $S$  以匀速度  $v$  沿  $x$  轴方向运动，并在时间  $t = 0$  时，两原点  $o'$  与  $o$  重合，则同一事件在此两个参考系中的时间和空间坐标之间有如下的伽利略坐标变换关系

$$\begin{cases} x = x' + vt' \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases}$$

伽利略变换的特点：从上式中可看出，时间坐标与空间坐标相互无关；任何两点间的空间间隔在任何惯性系中都一样；任何惯性系中时间间隔都一样。这个变换与经典力学规律（如牛顿运动定律）在不同惯性系中具有相同形式相一致。伽利略变换的出现，是人们不断认识时间、空间性质上的一个发展阶段。伽利略变换中包含着伽利略、牛顿的不受物体运动状态影响的“绝对质量”，不受运动状态影响的“绝对空间”，和不受运动状态影响的“绝对时间”等基本概念。

相对性原理和伽利略变换是在经典力学范围内得出来的，在牛顿时代，由于牛顿力学的巨大成就，曾一度使人们认为任何物理现象都必须由牛顿力学作出最终的解释，认为世界上一切事物，由太阳系中的行星到人身体内的原子，都准确地遵从相同的力学定律。这是机械的观点。

伽利略相对性原理和伽利略变换只适用于经典力学范围，就连在经典电磁学中也不是普遍成立的，在高速微观世界中就更没有它的立足之地了。

#### 五、爱因斯坦的相对性原理和洛伦兹变换

为了解决牛顿力学或相对性原理所遇到的困难，1905年，年轻的爱因斯坦在十九世纪末、二十世纪初一系列完全超越于牛顿力学的新发现的

推动下，提出了两条基本的假设，并在这个基础上建立了狭义相对论。这两条基本假设是：相对性原理：在所有惯性系中，物理定律是相同的，即具有相同的形式。光速不变原理：在所有惯性系中，真空中光的速率恒为  $c$ 。爱因斯坦的相对性原理超越了伽利略相对性原理，它包括了牛顿力学定律在内的所有的物理定律。爱因斯坦相对性原理的基础是光速不变原理，是空间、时间跟物质运动存在着不可分割的联系。

爱因斯坦的相对性原理也可表述为，物理定律在洛伦兹变换下不变。洛伦兹变换是指狭义相对论中，时间和空间坐标从一个惯性参考系到另一个惯性参考系的变换关系。

若惯性系  $s' (o'x'y'z', t')$  相对另一惯性系  $s (oxyz, t)$  以匀速度  $v$  沿  $x$  方向运动，并在时间  $t = 0$  时，两原点  $o'$  与  $o$  重合，则同一事件在这两参考系中的时间、空间坐标间有如下的洛伦兹变换关系：

$$\begin{cases} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{cases}$$

按照这一变换：在不同参考系中时间间隔不同；两点间的空间间隔在不同惯性系中也不相同；时间坐标与空间坐标密切有关。这反映了一新的时空观，使人们对时间、空间性质有了新的认识。在  $v$  比  $c$  小得多时，洛伦兹变换过渡为伽利略变换。

回顾伽利略相对性原理发现的过程，我们从伽利略身上可以学到这样一个宝贵的经验，即善于从人们熟视无睹的平凡事件中，挖掘出不平凡的道理。他那敏锐的观察力使他在科学上做出了许多杰出的贡献。我们很多人都坐过船，也或多或少地体验过船在平稳航行时，船内的一切力学现象都同船静止时一样。但是很少有人思索这其中的道理，它的确太平凡了，以至有些人虽坐过船却未曾注意到这些现象。可是伽利略对此现象的观察很有兴趣，也很深刻，像个小学生一样，凡事先要问个“为什么？”如他仔细观察当船匀速直线前进时，船舱中的小虫子翅膀抖动得是否比平时更快一些，是否会显得更加疲劳一些；人往不同方向跳，是否会跳得一样远等。这在常人看来似乎有点可笑，但发现相对性原理的毕竟是伽利略。又如青年时的伽利略在一次到教堂作礼拜时，看到教堂内的吊灯被风吹得来回摆动，这现象也太平常了，很多人不止一次两次的看到过，但是伽利略却注意到了其中的奥妙，这现象启发他去深入探索，终于发现了单摆的等时性。这样的事例在伽利略身上、在许多科学家身上还有许许多多。正如伽利略所说：“致力于伟大的发明，从最微贱的开头开始，并且认识到神奇的艺术就蕴藏在琐细的和幼稚的事物之中，这不是平凡人能做的事，这些概念和思想只有出类拔萃的人才会想得出来。”



## 动量

动量是物理学的一个基本概念,它是在量度物体的运动的研究与实验中引入与形成的.早在十七世纪初,意大利物理学家伽利略首先引入了“动量”这个名词,伽利略的定义是指物体的重量与速度的乘积,这是用来描写物体遇到阻碍时所产生的效果的.

法国杰出的数学家和哲学家笛卡儿继承与发展了伽利略提出的动量概念.1644年,他在《哲学原理》一书中写道:“当一部分物质以两倍于另一部分物质的速度运动,而另一部分物质却大于这部分物质两倍时,我们应该认为这部分的物质具有相同的运动.”显然,笛卡儿是把物质的多少(质量)和速度的乘积(即  $mv$ )作为动量——物体“运动的量”的量度的.但由于那时“质量”的概念尚未建立,而且笛卡儿还未考虑到速度的方向性,因此动量的意义还未十分明确.

荷兰科学家惠更斯在研究物体碰撞问题时做出了突出的贡献.他在研究中发现动量是个矢量,在计算动量时,考虑到了速度的方向性.这是对动量概念的一大发展,但是惠更斯与笛卡儿一样还没有明确的质量概念,并常常把重量概念与质量概念混用,因此这时的动量概念还是处在形成与发展过程中.

1687年,英国物理学家牛顿在《自然哲学之数学原理》的巨著中,首次十分明确地定义了质量的概念,紧接着就定义了动量.他说:“运动的量是用它的速度和质量一起来量度的.”在这里,牛顿关于运动量度的思想是同笛卡儿、惠更斯等一致的,但因为建立了质量的概念和明确了速度的方向性,把动量作为一个矢量.因此,这是物理学的发展史上第一次真正建立了动量的概念.牛顿还通过他所总结出的牛顿第二定律,揭示出了在物体的相互作用中,正是动量这个物理量反映着物体运动变化的客观效果.

笛卡儿、惠更斯、牛顿等关于动量概念的思想,并没有得到一些科学家的赞同,并由此引起了一场长达半个多世纪的关于物质运动量度的争论,并在这场争论中,使动量概念得到了进一步的明确与发展.发起这场争论的首先是德国哲学家、科学家莱布尼兹,他在1686年发表的《关于笛卡儿和其他人在确定物体的运动量中的错误的简要论证》一文中,对笛卡儿学派及其他人的关于动量量度提出了批判.他认为,不能用物体(质量)与速度的乘积来衡量运动的量,而应该用质量与速度平方的乘积来衡量运动的量.莱布尼兹从这个观点进一步论证说,使一磅重的物体下落四尺和使四磅重的物体下落一尺,在这两种情况下,所得的“力”相等(这里力指功),因为它们引起的形变相同.他从更一般的情况举例说,把质量为  $m$  的物体举高  $h$  的“力”,将同样能把质量为  $m/n$  的物体举高  $nh$ ,当这两个物体落回原地时其运动量必然相等.由进一步的计算可知,如果第一个物体落回原地时速度为  $v$ ,则第

二个物体落回原地的速度为  $\sqrt{n}v$ .按照笛卡儿的量度则有  $mv$  和  $\frac{m}{n}\sqrt{n}v$ ,

表明它们的运动量(动量)不相等;而按照莱布尼兹的量度则有

$mv^2 = \frac{m}{n}(\sqrt{n}v)^2$  表明两物体落下时有相等的运动量.莱布尼兹由此得

出结论：笛卡儿的关于运动的量度（动量）是同落体定律相矛盾的，所以宇宙中真正守恒的东西正是总的“活力”（ $mv^2$ ），它才是物体运动量的真正量度。后来科里奥利又建议用  $\frac{1}{2}mv^2$  代替  $mv^2$ ，这就是今天所说的

动能 莱布尼兹在批判笛卡儿关于运动量量度的同时也看到了笛卡儿提出的量度在某些情况下是适用的，所以他又于 1696 年指出运动的量度可以分为“死力”（ $mv$ ）和“活力” $mv^2$ 。用他的说法，“死力”可用物体的质量和该物体由静止状态转入运动状态时获得的速度的乘积来度量，即用动量的变化来量度“死力”的大小，而宇宙中真正量度是“活力”。

关于两种量度的争论，长达半个多世纪，其中有不少著名的数学家、物理学家、哲学家都参加了这场讨论。1743 年法国力学家达朗贝尔（1717—1788）在《动力学论》一书的序言中对这场争论作了“最后的判决”，他指出了两种量度的同样有效性，他认为“力”的量度可以分为两种情况：当物体平衡时，力用质量与物体虚速度的乘积即动量来量度，当物体受阻而停止时，则可以用质量乘速度的平方（即动能）来量度。在这里谈到了动量的变化和力的作用时间有关，即

$$f = \frac{mv}{t}$$

动能的变化和力的作用距离有关即

$$f = \frac{mv^2 / 2}{S}$$

但因为

$$S = \bar{v}t = \frac{v}{2}t$$

（设末速度为 0，初速度为  $v$ ）

可见以上两式是完全等价的。所以，达朗贝尔认为这场争论只是一场“咬文嚼字”式的无意义的争论，两种量度同样有效，它们是从不同的侧面来反映物质的运动。在经过了大约一百三十年后，由于能量概念的建立和能量守恒定律的发现，使关于物质运动的量度问题更为明确。恩格斯在 1880 年所写的《运动的量度——功》一文中，根据当时科学的最新成就，揭示了两种量度的本质，对这场争论作出了真正科学的分析。恩格斯说：“机械运动确实有两种量度，每一种量度仅适用于一定范围之内的一系列现象。在不发生机械运动‘消失’而产生其他形式的运动情况下（如简单机械的平衡条件下的运动传递、完全弹性碰撞的运动传递等），运动的传递和变化可以用  $mv$  去量度。当发生了机械运动‘消失’而其他形式的运动产生，即机械能和其他形式的能（包括位能、热能、电磁能、化学能）相互转化的过程时，都应当用  $\frac{1}{2}mv^2$  去量度。这两种量度虽然并不矛盾，但仍包含了不同的意义。”至此，动量的物理意义真正地明确了，动量这一物理学的重要概念真正形成与建立起来了。

随着物理学研究深入到微观高速的世界中，在物体运动的速度  $v$  很大可与光速  $c$  相比拟时，就必须用相对论的动量表示式，即

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \vec{v},$$

其中， $m_0$  为物体在静止时的质量。静止质量为零的光子，其动量的大小为

$$p = h \nu / c$$

其中  $h$  为普朗克常数； $\nu$  为电磁辐射的频率，方向为辐射的方向。有了动量的概念，牛顿第二定律的表述为

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

即物体动量对时间的变化率等于合外力，并与合外力同方向。

## 动量守恒定律

### 一、动量守恒定律的哲学思考

早在公元四世纪时，古希腊的原子论者伊壁鸠鲁就指出：“原子在虚空中被带向前进而没有东西与它相碰撞时，它们以相等速度运动。”这表明，在不受外力阻碍情况下，运动将永不消灭的思想。古代的许多哲学家都具有这种思想，认为自然界中的运动是永恒的，它永远不会不留痕迹地消失，也不会从虚无中创生出来。由于这些哲学家所说的运动包括各种各样的变化，而对于这种广义的变化不可能建立某种通用的量度单位。因而古代关于运动既不能创生，也不能消灭的这种一般性的概念，不可能用严格的数学语言加以表现，因而长期以来有关自然界中运动守恒的思想也只能是一种定性地描述与哲学的思辨。

当历史进入十七世纪，法国哲学家和科学家笛卡儿继承了古代哲学家关于自然界中的运动是永恒的思想，并在他的哲学活动和科学活动中认为，已经发展的初具规律的力学是自然界一切现象的基础。自然界中所发生的一切变化应当能够用物质的机械运动来解释。而机械运动在当时已经是可量度的。机械运动的量度可以通过测量物体的速度和物体的“量”来进行。笛卡儿认为所谓物体的“量”可以理解为物体的线度、体积、重量、质量。在这里，用今天的语言说，物体的“量”是指物体的质量，但在当时，还没有对质量进行严格确切的定义。笛卡儿认为，物体的动量可以用物体的速度与物体的“量”（质量）来度量。并声称，世界上所有物体总的动量是不变的。当两个物体发生相互作用时，例如碰撞时，虽然每个碰撞物体的速度改变了，因而它们各自的动量也改变了，但参与碰撞的物体的总动量仍然是个常量。笛卡儿在1644年出版的《哲学原理》一书中指出：“物质有一定的量的运动，这个量是从来不增加也不减少。当一部分物质以两倍于另一部分的物质的速度运动，而另一部分物质的量却大于这一部分物质两倍时，我们应该认为这两部分的物质具有等量的运动。当一部分的运动减少时，另一部分运动就相应的增加。”他还认为动量守恒是自然界一条根本规律，他并从这条规律中导出了惯性原理。

从这里可看出，动量守恒定律的建立是守恒思想发展的必然结果，但在这里还缺乏相应的实验探索与理论研究。

### 二、动量守恒的实验研究

#### 1. 伽利略关于碰撞问题的实验研究

伽利略是第一个用实验研究碰撞问题的。他的实验设计如图所示：在可以绕中心轴旋转的天平臂上有两个重物处于平衡状态，其中一个重物由两个水桶A、B组成，这两个水桶的一个(B)挂在另一个(A)下面，两个水桶间有一定距离。上面的一个水桶(A)的底上有一可开可关的孔，在水桶中盛有水，整个系统用重物W调节，使之处于平衡状态。伽利略设想，碰撞物体的运动是这样的。即如果它的质量（当时没有质量概念）和速度越大，它所具有的矩（力矩）就越大，因此，预期出现这种情况，阀门一打开，平衡就被破坏，平衡重物这边升高，要使重新平衡，需在平衡重物这边再加一重物，这重物可视为水柱的碰撞量度。但是，在最初时刻平衡被

破坏，当水柱全部到达下面水桶(B)时，原来的平衡又重新建立。伽利略的这个实验并没有回答碰撞量度的问题。而是提到了一个结论：碰撞作用力是无限大的。他在讨论中，把压住重物的力(死力)与运动重物的力(活力)区分开来，这是在运动量度方面跨出重要的一步。

## 2. 惠更斯的系统实验研究

自伽利略以后，不断有人进行有关碰撞的实验研究工作，其中惠更斯通过他的系统的弹性碰撞的实验研究，总结出了动量守恒定律的雏形。他的实验设计与进行的步骤是这样的。

首先，惠更斯从最简单的情况入手，他先实验的是两个质量相同的球，以大小相同的速度发生对心碰撞。惠更斯考虑到，由于这两个球完全相同，它们在碰撞前的速度大小(方向相反)也相同，所以预期它们在碰撞后的速度大小也就应当相同，没有任何理由可以认为，碰撞后一个球的速度大于另一个球的速度。实验结果完全符合惠更斯的预想，两个球在碰撞后以大小相同的速度向相反方向运动，也即每个球在碰撞前后的速度大小不变。这样很容易得到：在碰撞前与碰撞后两个球的总动量是不变的。即总动量是守恒的。

其次，惠更斯使问题稍为复杂一些，实验研究两个运动速度大小不同的球的弹性碰撞问题。他的实验是这样进行的：设想一个人站在一条小船上，小船以恒定的速度顺流航行。这个人两只手各握着两根绳子的一端，这两根绳子的另一端各系着一个完全相同的球。实验时，这个人的两只手以相对于小船大小相同的速度渐渐靠近，并使两球发生对心碰撞。对于船上的实验者来说，两个球碰撞前后所发生的一切现象同上面第一个实验中所说的碰撞情况完全一致。即两个球碰撞前速度大小一样，碰撞后两个球以(相对于小船)大小相同的速度向相反的方向运动。整个碰撞过程的总动量也是不变的。

但现在我们换一个角度重新考察一下上面小船上的碰撞实验：对于刚才小船上发生的碰撞过程，站在岸上的人将看到什么现象呢？现在具体分析一下：如果小船的速度是  $v_0$ ，碰撞前两只球相对于小船的速度都是  $v$ ，那么站在岸上的观察者看到的两个球的速度大小是不同的。一只球是  $v + v_0$ ，另一只球是  $v - v_0$ ，实际这是两个速度大小不同的球的碰撞问题。在碰撞后，站在岸上的观察者看到，两个球的速度都变了：碰撞前速度为  $v_0 + v$  的球在碰撞后的速度大小为  $v - v_0$ ，而碰撞前速度大小为  $v - v_0$  的球在碰撞后的速度大小为  $v + v_0$ 。

这里可以得到一个普遍性的结论，两个完全相同的球在发生弹性碰撞时将互相交换速度。因此，从动量的角度可得出，两个球在碰撞前后的总动量是不变的，所以动量是守恒的。第三，惠更斯研究更一般化的问题，通过实验研究两个质量不同的球以不同速度运动时的弹性碰撞问题。因为这个问题比较复杂，惠更斯把它分为两步进行。

第一步，分析研究这类碰撞中的一个简单情况：相碰撞的两个球的速度大小反比于它们的质量大小，即这两个球满足关系式

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{m_2}{m_1}$$

惠更斯经过相当详细地讨论与实验探索之后证明：在这种情况下，两个球

在碰撞后也互相交换它们的速度。（这个结论实际上是错误的）

第二步 惠更斯运用相对性原理进行讨论假设上面第一步中所讨论的特殊情况的碰撞发生在运动中的小船上，那么对于站在岸上的观察者来说，他所看到的将是最一般的碰撞问题：两个不同的球，以不同的运动速度相碰撞。因而可以很容易计算出在一般情况下两球碰撞后的速度大小。

这样，两个球的中心弹性碰撞问题就以普遍的形式得到了解决。

惠更斯通过实验和推理相结合的研究方法对完全弹性碰撞作了详尽的研究，得出了一系列重要的结论。其中动量守恒定律是他主要贡献之一，他写道：“两个物体所具有的运动量在碰撞中都可以增多或减少，但是它们的量值在同一个方向的总和却保持不变，如果减去反方向运动量的话。”这是动量守恒定律的较完善表述，因为它明确指出了动量的方向性，认为动量是个矢量，所以守恒的不是动量的算术和，而是它们的矢量和，实际上这是把矢量概念引进了物理学，为矢量力学的建立作了概念的准备。

惠更斯在他的研究中还发现：“在两个物体的碰撞中，它们的质量和速度平方的乘积的总和，在碰撞前后保持不变。”这里第一次提出了  $mv^2$  这个物理量。这个结论是完全弹性碰撞中机械能守恒定律的具体表现。

至此，动量守恒定律已在实验探索中被发现出来了。但是诸如伽利略、笛卡儿、惠更斯等人都未能将“质量”这个概念弄清楚，他们常把“质量”“重量”等概念混用，没有给予明确的概念。只有牛顿，在明确定义了质量概念，又进一步明确地定义了动量的概念后，动量守恒定律才真正建立起来，并由牛顿通过他的力学理论把动量守恒定律从理论上推导出来。

### 三、动量守恒定律的理论推导

动量守恒定律不仅从实验中可以获得，而且还可以从理论上推导出来。1687年，牛顿在《自然哲学之数学原理》中，从牛顿第二定律和第三定律中导出了动量守恒定律，并把它作为一条推论在《原理》中列出。其具体的推导过程今天可以简便如下：

设两物体质量分别为  $m_1$  和  $m_2$ 。在相互作用之前的速度分别为  $v_1$  和  $v_2$ ；相互作用后的速度分别为  $v'_1$  和  $v'_2$ 。根据牛顿第二定律，物体1受物体2的作用力是

$$\begin{aligned} F_{12} &= m_1 a_1 \\ &= m_1 \frac{v'_1 - v_1}{t} = \frac{m_1 v'_1 - m_1 v_1}{t} = \frac{p'_1 - p_1}{t} \end{aligned}$$

物体2受物体1的作用力为

$$\begin{aligned} F_{21} &= m_2 a_2 \\ &= m_2 \frac{v'_2 - v_2}{t} = \frac{m_2 v'_2 - m_2 v_2}{t} = \frac{p'_2 - p_2}{t} \end{aligned}$$

根据牛顿第三定律可知

$$F_{12} = -F_{21}$$

因此 
$$\frac{p'_1 - p_1}{t} = -\frac{p'_2 - p_2}{t}$$

整理可得：

$$p_1 + p_2 = p'_1 + p'_2$$

即两物体的总动量在相互作用前后保持不变。如果系统内相互作用的物体有三个或更多，则同样可证明系统的总动量也是守恒的。

以上的推导用到了牛顿第二定律和第三定律，并非动量守恒定律依赖于牛顿定律，动量守恒定律是独立于牛顿定律的一个定律。从上面介绍的它的建立过程可知，动量守恒定律是人们在研究碰撞问题时被认识和总结出来的，并由此为建立牛顿运动定律奠定了基础。

#### 四、动量守恒定律的现代表述

动量守恒定律现代可以表述为：在不受外力或在合外力为零的情况下，物体系的总动量保持不变。

$$\text{即当 } \sum_{i=1}^n F_i = 0 \quad \text{则}$$

$$\sum_{i=1}^n m_i v_i = \text{恒量}$$

在理解与运用动量守恒定律时要注意如下几个问题：1. 自然界中不受外力作用的系统是不存在的，在此等价的条件是系统所受的外力的合力为零。这就要注意，动量守恒定律所反映的是一个物理过程服从的规律，为使这一过程动量守恒，系统所受外力的合力应始终为零，这样才能保证系统的总动量在该过程中，时刻为一恒矢量。

2. 动量是矢量。因此，我们所说的物体系统的总动量是指组成物体系统的所有物体动量的矢量和，而不是代数和。在物体系统所受合外力为零的情况下，组成物体系统所有物体的动量的矢量和是恒量，而它们的代数和却不一定守恒。

3. 在合外力为零的情况下，尽管物体系统的总动量恒定不变，但组成系统的各个物体的动量却可能不断地变化。

4. 如果物体系所受合外力不为零，但相互作用的内力远大于合外力，这时可以近似忽略合外力的作用，而认为动量仍然是守恒的，如炸弹的爆炸问题等。

5. 若系统的合外力不为零，则该系统的总动量是不守恒的。但如果系统在某个方向上所受合外力为零，那么在这个方向上系统的动量仍然是守恒的。

6. 由动量守恒定律成立的条件可知，只有外力作用才能改变系统的总动量。系统的内力作用，无论多么强烈或多么复杂，它只能改变个别物体的动量，而不会改变系统的总动量。

7. 动量具有瞬时性和相对性。因此系统中物体相互作用前后的总动量必须是作用前后，各物体在同一时刻的动量。而且描述系统各物体的动量必须是相对于同一惯性参照系的。

随着物理学的不断发展，人们对动量守恒定律的理解与认识也不断深化与提高。人们已经知道，动量守恒定律不仅适用于宏观系统，也适用于微观系统；不仅适用于低速状态质量不变的情况，也适用于微观高速的质量可变的情况，它是比牛顿定律更具普遍意义的一条物理规律。

# 热 学

## 温 度 计

温度计是利用物质的某些物理属性（如气态、液态和固态物质的体积，金属或半导体材料的电阻等）随温度的改变而改变的原理所制成的测量温度的仪器。在物理学的发展史上，温度计的设计与制作是随着人们对热现象的认识不断深入和科学技术的发展而不断提高与完善的。

### 一、中国古代的测温技术

#### 1. 经验性的光学高温测温术

早在温度计出现之前，中国古代人们在烧制陶器和冶炼金属的过程中，就已逐渐学会了以观察“火候”来定性地判断温度的高低。在实践中，火候在相当程度上可以起到温度计的作用。如《考工记》中曾记载通过观察炼铜的火焰以判定冶炼进程的方法。《韩非子》中也有相似的记载，这种根据火焰色来判断炉内冶炼温度的方法，实际上是利用了受热挥发出来的各种物质原子的发射光谱以及辐射能谱的强度分布特性来确定温度高低，它不再是单纯凭感觉判明温度高低，克服了判定温度中的主观性和不定性，这种方法在今天的某些冶炼过程中仍被采用。

#### 2. 用冰验温和用体温为标准的简易测温方法

在中国古代，还有一种利用某些标准的恒定温度，如冰和人的体温，来确定温度高低的办法。如利用瓶中盛水视其结冰，来判断天气寒冷。用观察瓶中冰和水的变化（冰的溶解和水的凝固）来判明气温的下降或上升的趋势。还有人用人的体温为标准的测温方法。这些都是一种简单的测温装置和测温方法。

#### 3. 我国古代的温度计

明末清初，传教士来华，温度计也传入中国。1673年北京观象台制成的温度计是由比利时传教士南怀仁引进，类似于伽利略的验温器。此后，我国的黄履庄自制过空气温度计。

### 二、伽利略温度计

世界上最早的温度计是伽利略制造的。1593年他发明了根据气体的热胀冷缩的性质而制造的验温器。由于当时还没有温度的概念，所以人们称它为能指示物体“热”的程度的仪器。这个仪器的构造如图所示。一根细长的玻璃管一端开口，另一端带有一个鸡蛋大小的空玻璃球泡，玻璃球泡很容易被加热。先给球泡加热使里面的空气跑出一部分，然后把管子的开口端插入盛水的容器中，带色的水就会沿着管子上升到一定的高度，形成一个高于外部水面的水柱。这样就做成了一个测量气温的温度计。随着温度的变化，瓶泡中所包含的空气会膨胀或收缩，颈中的水柱就会上下运动。如当天气转热的时候，玻璃管中的水柱就会降低，天气越热下降的越多，而当气温变冷时，玻璃管中的水柱就会上升。水柱上升的高度随玻璃泡中空气的冷热程度引起的热胀冷缩程度而变化。从伽利略的温度计的设计中可以看出，这种温度计数值大小不仅受温度变化的影响，而且还受大气压强起伏的影响。如果气温没有变化而大气压发生了变化，观察者将会



误认为气温发生了变化,另外这个装置还没有刻度,只不过是个验温器.尽管伽利略的温度计很不完善,但他是试图对不确定的热的感觉转变为对物体热状态的客观表示的第一人,这毕竟是世界上最早的温度计.

### 三、伽利略温度计的改进

#### 1. 用水作测温物质的温度计

所有早期的温度计都含有空气,因而它受到大气压变化的明显影响.法国物理学家让·雷(1582—1630)对伽利略温度计作了第一次改进.他还是用水作为测温物质,简单地倒转了伽利略温度计,把水注入玻璃球泡而将空气排出水管,制成了以水作为测温物质的温度计.由于水的热膨胀系数比空气小得多,所以必须恰当地选择玻璃球泡和玻璃管径的相对大小,以保证液面在整年的气温变化过程中,在整个玻璃管的长度内升降.当时让·雷没有封闭玻璃管的上端,所以由于水的蒸发给测量带来了误差.

#### 2. 用酒精作测温物质并有刻度

意大利的学者继续对伽利略温度计进行改进.他们也是用一根玻璃管,下端是一个玻璃球泡,内装酒精作为测温物质,上端开口用火漆封住,这样温度计的读数就不再受到液体蒸发和大气压强变化的影响.他们还沿玻璃管挂一串小珠,作为读数标尺,成为有刻度的温度计.这种温度计的出现,使人类在冷热现象探索中迈出了重要的一步.虽然温度计的刻度是任意的,但是它对一定的温度计来说,确是起到了固定标度的作用,他们用这种温度计观测到冰的熔点是个常数.

### 四、布利奥的水银温度计

早期的温度计都含有空气,随后采用液体作测量物质.自出现能把管口进行密封的技术后就用水银作为测温物质了.第一次把水银用作测温物质的是巴黎天文学家布利奥,他于1659年制造了第一个水银温度计.他把水银密封在一根内径很细而且均匀的玻璃管中,管的下端是一个玻璃泡,在管和泡里有适量的水银,管上有刻度.水银面的位置随着温度的改变而升降,从水银面达到的刻度上可以读出温度数值来.

温度计的特性是能随温度的变化而有明显改变,而且这个变化是可以重复出现的.由于水银的体膨胀系数小,约为气体体膨胀的万分之二,所以为了在温度每升降1度时,能使水银柱有明显的变化,在测温泡不能任意增大的限制下,玻璃管必须充分细才可以.水银在 $-40^{\circ}\text{C}$ 时会凝固,当温度低于 $-40^{\circ}\text{C}$ 时,温度计内就要换用别的液体.

### 五、阿蒙顿的空气温度计

法国人阿蒙顿(1663—1705)注意到空气的压强变化可用于温度的测量,设计了一种根据空气压强来测量温度的温度计.并在1702年制造了如图所示的空气温度计.阿蒙顿使用了U形玻璃管,玻璃管的一端接上空气玻璃泡A.将水银注入U形管及玻璃泡的一部分.当测温时,A泡中空气的压力变化,这种变化用玻璃泡中水银面的高度与玻璃管中水银面的高度之差显示出来.阿蒙顿选择冰水和沸水为固定点,在此范围内均匀分度.阿蒙顿发现,在充有一定数量的空气的容器中,从冰的熔点加热到水的沸点时,空气的压强增加三倍.他尚不知道水的沸点取决于大气压强,因而,他不能得到更高的准确度.他指出了气体膨胀的一般规律,给出了

实验验证，建立了气压的变化正比于温度变化的关系。这实际上相当于给出了后来发现的盖·吕萨克定律的实验证明：即

$$\frac{p}{p_1} = \frac{1+at}{1+at_1}$$

式中  $p$ 、 $p_1$  是温度分别为  $t$ 、 $t_1$  时的压强。

阿蒙顿的气体温度计不能适应实际测量的要求。尽管如此，科学家们利用这些不完善的测温仪器发现了在一定条件下水在凝固或沸腾时的温度是不变的。

## 六、现代气体温度计

现代气体温度计有两种，一种是定容气体温度计（气体的体积保持不变，压强随温度改变），另一种是定压气体温度计（气体的压强保持不变，体积随温度改变）。如图是定容气体温度计的示意图。测温泡 B（材料由待测温度范围和所用气体决定）内贮有一定质量的气体，经毛细管与水银压强计的左臂 M 相连。测量时，使测温泡 B 与待测系统相接触，上下移动压强计的右臂 M'，使左臂中的水银面在不同的温度下始终固定在同一位置 o 处，以保持气体的体积不变。当待测温度不同时，气体的压强不同，这个压强可由压强计两臂水银面的高度差  $h$  和右臂上端的大气压强求得。这样就可由压强随温度的改变来确定温度。实际测量时，还必须考虑到各种误差来源（如测温泡和毛细管的体积会随温度改变，毛细管中那部分气体的温度与待测温度不一致等等）对测量结果进行修正。

定压气体温度计的结构比定容气体温度计复杂，操作和修正工作也麻烦得多。除在高温范围外，实际工作中一般都使用定容气体温度计。

## 温 标

温度的数值表示法叫做温标，目前常用的有华氏温标、列氏温标、摄氏温标、开氏温标等，下面就这几种温标的建立过程作一简单考察。

### 一、华氏温标

荷兰人华伦海特（1686—1736）从1709年开始制造读数一致的温度计。在1714年他得知阿蒙顿在水银膨胀方面的研究后，开始制造水银温度计并发明了净化水银的方法，并成功地制造了能在标尺的全量程内给出相同指示的温度计。

华伦海特在制造温度计开始时只选择两个高度的固定点：一个固定温度相当于他妻子的体温，定为 $100^{\circ}\text{F}$ （以现在的精确测量可知，人的体温约为 $99^{\circ}\text{F}$ ），另一固定点是 $0^{\circ}\text{F}$ ，相当于水银柱在北爱尔兰某个冬日所降低到的最低高度（华伦海特大概想避免引入负的温度，他假定北爱尔兰的严冬是地球上最冷的地方）。他将这两点之间的距离分成100个等分，每一分称为1度。他觉察到这样规定仍是不确定的。到了1724年他发表成果时，他画上了水的沸点为 $212^{\circ}\text{F}$ ，在 $32^{\circ}\text{F}$ 与 $212^{\circ}\text{F}$ 中间分为180等分。今天的华氏温标是采用三个固定点： $0^{\circ}\text{F}$ 、 $32^{\circ}\text{F}$ 和水的沸点 $212^{\circ}\text{F}$ 。

华氏温标的单位叫做华氏度，写作 $^{\circ}\text{F}$ 。1华氏度为1摄氏度的 $\frac{5}{9}$ 。华氏温度 $t_{\text{F}}$ 与摄氏温度 $t$ 的换算关系为

$$t_{\text{F}} = 32 + \frac{9}{5}t$$

或

$$t = \frac{5}{9}(t_{\text{F}} - 32)$$

华氏温标至今仍在一些国家采用。

### 二、列氏温标

法国博物学家列奥米尔（1683—1757）认为水银的膨胀系数小，所以致力于制造一个既方便又能达到精确度要求的酒精温度计。他在1730年给酒精温度计制定新的刻度法。为了解决温度计刻度不一致的困难，他只取一个固定点，即雪的熔点作为 $0^{\circ}\text{R}$ 。他通过实验发现酒精与 $\frac{1}{5}$ 的水混合的体积如果在水的冰点时为1000单位，当它达到水的沸点时体积变为1080单位。因此1730年他制作的酒精温度计是采用水的冰点为零点（ $0^{\circ}\text{R}$ ），水的沸点为 $80^{\circ}\text{R}$ ，在这两个固定点中间分成80等份。但他的温度计所得结果并不好，而且不同温度计也不一致。后来日内瓦的德吕斯（1727—1817）提出采用列氏温标的水银温度计，列氏温标才得以广泛流传。

列氏温标的单位称为“列氏度”用 $^{\circ}\text{R}$ 表示。1列氏度为1摄氏度的 $\frac{4}{5}$ 。列氏温度 $t_{\text{R}}$ 与摄氏温度 $t$ 的换算关系为

$$t_{\text{R}} = \frac{4}{5}t$$

### 三、摄氏温标

1742 年瑞典天文学家摄尔修斯（1701—1744）首创一种新的温标，即摄氏温标，也称百分温标。他采用了百分刻度法，用水银作测温物质，以水的沸点为零度（0°），冰的熔点定为 100°，这样一来，温度越高，度数越低，使用起来不大方便，后来摄尔修斯接受了他的同事施特默尔的建议，把两个定点的标值对调过来，最后确立了规定在 101.325KPa（1 大气压）下，水的冰点为零度，沸点为 100 度，中间分为 100 等分，每等分代表一度。摄氏温度的单位叫做“摄氏度”，用  $^{\circ}\text{C}$  表示。

当前普遍采用的是国际实用摄氏度，为了统一摄氏温标与热力学温标，国际计量大会在 1960 年对摄氏温标作了新的规定：摄氏温标由热力学温标导出。摄氏温标所确定的温度用  $t$  表示，它的定义为

$$t = T - 273.15$$

这就是说，规定热力学温度 273.15K 为摄氏温标的零点。摄氏温度的单位仍叫摄氏度，写成  $^{\circ}\text{C}$ ；用摄氏度表示的温度差也可以用开表示。

值得注意的是，在新的定义下，摄氏温标的零点与冰点并不严格相等，但根据目前的实验结果，两者在万分之一度内是一致的，沸点也不严格地等于 100°，但差别不超过百分之一度。

#### 四、开氏温标（热力学温标）

早在十八世纪初阿蒙顿就提出绝对零度的概念，而绝对温标的建立却是在十九世纪。英国物理学家威廉·汤姆生（1824—1907）（1892 年被封为开尔文勋爵）1848 年提出绝对温标的概念故称开氏温标，亦称热力学温标。

开氏温标的建立，解决了在温度问题上的长期混乱。开氏温标不依赖于任何一种特定物质的特定性质。它是建立在“卡诺循环”基础上的、理想的科学的温标，为温度计构成一个比任何其他温标好得多的基础，是现在最终的参考温标，被 1927 年第七届国际计量大会采用作为最基本的温标。1954 年第十届国际计量会议决定，为科学上使用简便和准确起见，采用绝对零度，即以水的三相点为 273.16K。水的三相点变成一个单一的固定点（三相点是指纯冰、纯水和水蒸气平衡共存的温度），热力学温度被作为基本温度，符号是  $T$ ；其单位是开尔文，简称开，根据定义，1 开等于水的三相点的热力学温度的  $1/273.16$ 。

1848 年开尔文在建立开氏温标的过程中，在论文中写道：“按照卡诺所确立的动力与热之间的关系，在由热的作用得到的机械功的数量关系中，只包括热量和温度间隔的因素；又因为我们有独立地测量热量的确定的方法，所以就为我们提供了温度间隔的一个量度，根据它可以确定绝对的温度差”，“这一温标系统中的每一度都有同样的数值；也就是说，只要一单位热从温度为  $T$  的物体 A 传至温度为  $(T-1)$  的物体 B，则不论  $T$  是什么数值，都将给出同样的机械效应。这样的温标应该称为绝对温标，因为这个温标的特点是它完全不依赖于任何特殊物质的物理性质。”

1852 年，在开尔文与焦耳合作的一篇论文中，专门用一节讨论了“基于热的机械作用的一种绝对温标”。他们利用摄氏温度  $t$  和气体膨胀系统  $E$ ，把温度  $T$  定义为

$$T = \frac{1 + Et}{E}$$

开尔文当时利用了  $E=0.003665$  这个数值，得出

$$T = 272.85 + t$$

今天教科书中一般都是以卡诺定理来推出开氏温标。其方法为：根据卡诺定理，一个工作于两个热源之间的可逆机，其效率  $\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$  仅与

这两个热源的温度有关，而与工作物质的性质无关。可引入的一个与测温物质和测温属性无关的温标  $T$  并称为热力学温标。可用它来标示热源的温度，它的比值与系统和这两个热源间传递热量  $Q_1$  和  $Q_2$  的比值相等 ( $Q_2/Q_1 = T_2/T_1$ )。

### 五、温标与温度计

从以上几种温标的建立过程可以得出一个共同的特征：即建立一种温标需要包含三个要素：

1. 选择某种物质（称为测温物质）的某一随温度变化的属性（称为测温属性）来标志温度
2. 选取参考点（固定点）
3. 对测温属性随温度的变化关系作出规定。

当温度改变时，不仅气体、液体、固体的体积会随着变化，物质的许多其他物理属性，如一定容积气体的压强、一定压强气体的体积、金属导体的电阻、两种金属导体组成的热电偶的电动势等等，都会发生变化。一般说来，任一物质的任一物理属性，只要它随温度的改变而发生线性显著的变化，都可选用来标志温度，即制作温度计。如下表列出了几种常用的温度计及其选用的测温属性。

几种常用的温度计

温度计	测温属性
定容气体温度计	压强
定压气体温度计	体积
铂电阻温度计	电阻
铂—铂铑电偶温度计	热电动势
液体温度计	液柱长度

当然用这些温度计进行实际测量温度时，所得结果并不严格相同。这是因为不同物质或同一物质的不同属性随温度的变化关系不同。如果规定了某一物质的某种属性随温度作线性变化，从而建立了温标，则其他测温属性一般就不再与温度成严格的线性关系。按照国际规定，热力学温标是最基本的理想温标。

## 热的本性

人们对热的本性的认识经历了一个漫长的时期，从中国古人对热的本性的直觉思辩到近代热的运动学说的牢固建立，许许多多的学者、实干家都为此献出超人才智、付出艰辛劳动，这其中有思想家的猜测、有哲学家的思辩、有实验家的探索，还有理论学家的概括，他们都为此付出了勤劳与智慧。

### 一、中国古代对热的本性的认识

热是什么？在中国古代，不少思想家对这个问题作过直觉的猜测。在殷商时期形成的“五行说”中，就把火看成是构成宇宙万物的基本元素之一，在“阴阳八卦说”中也曾把热（“火”）看作一种基本物质元素。墨家更明确地提出：“木，合水土火，火离木然（燃）”，即热（“火”）包含在木里面，燃烧则是热（“火”）离开了木而产生的一种现象。这种见解与十八世纪流行于西欧的燃素说十分类似。南北朝成书的《关尹子》中则说：“曰寒暑温凉之变，如瓦石之类，置之火则热，置之水即寒，呵之即温，吹之即凉。特因外物有来有去，而彼瓦石实无去来。”这段论述把冷热的原因归之于“外物”的来去。北宋的刘画也从五行观念出发，猜想温度变化是一种“内物”在起作用，提出了“金性苞水，木性藏火，故炼金则出水，钻木而生火。”无论是“内物”还是“外物”都是把热（“火”）看作是实体物质。明末清初的王夫之在批判五行“常胜论”时提出，“且火入水中而成汤，彼此相涵而固不相害也”。这是一种明确的热质观念，不仅指出了“火”流入水中可以产生升温效应，而且指出火本身并不发生增损消长，这是“热质”守恒的一种猜测。

此外，也有用运动的观念来解释冷热的，如唐代柳宗元在《天对》中曾提出过：“一（元气）以统同，吁炎吹冷，交错而功”即认为当元气缓慢地吹动时，便造成炎热的天气；迅疾地吹动时，则造成寒冷的天气，把冷热和元气运动快慢相联系，也可以说是热的运动说思想的萌芽。

当然，由于历史条件的限制，不可能对热的本性有比较深入的认识，仅可能是一些直觉的思辩与猜测而已，这也是中国古代物理学发展过程中的一个特点。

### 二、古代原子论对热的本性的解释

关于热的本性，在西方古代也存在着不同的看法。古希腊的原子论者把热描绘成一种特殊的、不可直接觉察到的物质；其结构与所有其他的物质一样也是由原子构成的；它能很快扩散到整个物体，大概还具有一定的重量。这个观点是与人们的经验常识较接近的。虽然这个图象的某些细节，比如对于这个假想的热质的精确重量争论不已，但是从整体上看，在解释包括两个热的物体彼此相接触时最终要达到温度平衡在内的大多数随机的观察结果上，这个观点还是可行的。

### 三、热动说的初步形成

随着热学的发展，在十七世纪，以有限的实验事实为基础，对于热现象的本质的探讨又较广泛的开展起来。在一些著名的学者中间如培根、笛卡儿、波义耳、胡克、牛顿、惠更斯、欧拉和拉普拉斯等都把热看作是一

种看不见的微粒的运动，即热的运动说，简称热动说。波义耳曾经做过用力学方法产生热的实验，他认为钉子被敲打之后能变热，是由于运动被阻而产生的。

弗兰西斯·培根（1561—1626）是一位唯物主义的哲学家。培根的热动说观点也是十分明确的。他的方法论观点主要是认为：寻求与发现真理的道路有两条，一条是从感觉与特殊事物飞跃到最普遍公理，再从这些公理出发，推出中间原理；另一条是从感觉与特殊事物中引申出公理，然后逐渐上升，最后达到最普遍的公理。他认为前者属于“自然的猜测”，是轻率的、不成熟的认识道路；后者是“自然的解释”，是可靠的、成熟的认识道路。为此他提出科学认识的新工具——归纳逻辑。他的归纳法有三部分，一是归纳事实；二是排斥法，从否定的东西出发，经过反复的排斥，达到肯定的东西；三是通过整理得出结论，并由实验验证。他强调经验在认识中的作用，认为只有用实验才能真正认识自然界。他说：“科学好象一座金字塔，它的唯一基础是历史和经验。”培根在对热现象的分析研究中，自始至终的运用他的归纳法。在研究热的本性时，培根用归纳法列举了28个具有热的例证，32个缺乏热的例证，41个比较例证。他着重归纳了热与各种现象的关系，如热与光没有必然联系；热与火有密切联系；热与水没有必然联系；热与气没有必然联系；热与摩擦、碰撞有必然联系，摩擦与碰撞均能生热而没有否定的例证。通过上述归纳，他认为热具有以下特点：热是一种扩大的运动，它可以使物体膨胀；热是一种上升运动，热向上传导；热不是整个物体的一律运动，而是较小部分的运动；热是一种较快的分子运动。培根说：“我所以说运动是类，热是种，我并不是说热能生运动，或运动能生热（在一些情形下自然是如此的），乃是说热的精英和本质就是运动，并不是别的”所以培根的热的运动说观点是十分明显的。

在十七世纪科学发展水平影响下 科学家对热的运动的论证手段还不是强有力的，而且还缺乏足够的实验根据，所以不能形成科学理论。

#### 四、热质说的初步形成

在热动说初步形成的同时，十七世纪物质原子论的思想得到复兴，热是某种特殊物质实体的观点也得到流传。

1638年，法国学者伽桑狄（1592—1655）以极大的热情重新发掘和宣传了古代的原子论思想。他假设各种物质都是由大量在各个方向运动的坚硬粒子所组成；各种不同物质粒子的不同形状使它们以不同形式进行结合，并表现出不同的特性。他用这个假说对物质三态的区别进行了解释：在固体内部，硬粒子结合得很紧密，粒子之间强大的力使它们保持着确定的规则排列；在液体内部，相距较近的粒子之间的力使它们不易分散开来；在气体中，相距很远的粒子之间不存在相互作用力，各个粒子作自由运动。伽桑狄认为热和冷也都是由特殊的“热原子”和“冷原子”引起的。这就走向了通向热质说的道路。波义耳则站在早期的热动说和热质说的交叉路口上。他在物理学研究中倾向于热是运动，而在化学研究中又倾向于热是微粒。早期的热动说只是一种哲学学说，缺乏精确的实验根据，当对热的研究走向实验阶段时，就不可避免地出现了热质说，即把热看作是一种物质，一种特殊状态的“无重物质”，即热质（或热素）热质的多少和在

物体之间的流动就会改变物体热的程度。

纵观历史，在整个十七世纪和十八世纪初无论是热质说还是热动说，都没有牢固的确立，因为一方面热学中的某些重要概念（如热与温度的区别、比热、潜热等），还没有严格肯定，再者计温术和量热学尚不完善。

## 五、热质说的发展

十七世纪热质说初步形成之后，在十八世纪到十九世纪初得到极大的发展，达到了它的全盛时期，其主要代表人物是英国学者布莱克，他比较成功地回答了热质说流传和发展过程中遇到的混合热是否守恒、潜热与摩擦生热等问题，使热质说形成了比较系统的理论。

在混合热是否守恒的问题上，起初人们还不能把温度与热量这两个概念区分开来。比如同体积的 40 度的水和 80 度的水相混合，两杯水的温度均为 60 度，在热质说看来，这是极容易解释的，因为热质是不灭的，两杯水一共含有  $40 + 80 = 120$  个单位的热质，混合后每杯平均 60 个单位，它们的温度均为 60 度。可是当把 100 度的水与同体积的 150 度的水银混合后，其平均温度不是所预料的 125 度而是 120 度。这个现象看起来同热守恒相矛盾，并会导致热质消灭的结论。为了解决这一困难，布莱克提出了“比热”的概念，由于水银的比热小；所以水银下降了 30 度所放出的热量，只能使水上升 20 度，这就维持了混合热守恒定律。热量守恒定律可这样表述：在 A 和 B 组成的系统对于外部是绝热的、独立的系统时，A 失去的热等于 B 得到的热。系统中任一物体的热量改变可根据下式算出：

$$Q(\text{卡}) = \text{物体的质量}(\text{克}) \times \text{比热}(\text{卡/克} \cdot \text{度}) \times [\text{末温度} - \text{初温度}(\text{以 } \text{度} \text{ 为单位})]$$

这样在当时热质说与热动说的论战中，极有力地使热作为一种物质的观念占了上风。热的物质论基于热的守恒这一思想，是因为那个时代大多数实验都是在非常特殊的条件下进行的，从而得出热是守恒量的结论。并认为热是一种实体物质，它不能创生也不能被消灭，但可以从一个物体流向另一物体。

在潜热问题上，当时人们发现 0 度的冰变成 0 度的水时，需要加热，但温度未变，似乎一部分热凭空消失了；而当 0 度的水变成 0 度的冰时，温度也未变，却放出了热量，似乎这部分热量又凭空产生了。这个现象也是早期的热质说无法解释的。为了让这些事实和现象能归纳到热质说的理论体系中，布莱克又提出了“潜热”的概念。他认为冰化水时所吸收的一部分热被束缚在物体内部，所以不表现为温度。而当水结冰时，这部分潜热又被释放出来，从而这些现象又可成功地用热质说来解释。

对于摩擦生热现象，早期的热质说也无法解释。1744 年俄国的罗蒙洛索夫（1711—1765）用摩擦生热的现象来反对热质说。他说，在冰冷的冬天，好象不该有热质了，可是为什么两只冰冷的手相摩擦就会生热呢？这热质是从哪儿来的？布莱克运用潜热概念认为物体通过摩擦把内部的潜热挤出来了。

布莱克不愧是一位修补大师，这样经过他对热质说的多次修改与补充，使热质说形成了比较系统的理论。它的基本观点是：热质是一种微小的、看不见的物质微粒。拉瓦锡的说法是：“热质或光是非常微细的、非常有弹性但没有重量的流体，它由四面八方包围我们的星球，或难或易



地渗透到一切物体和它的组成部分里” 不同的物体有不同的比热，是因为物体对热质的吸收能力不同。 物态变化时，要吸收或放出潜热，当热质处于潜热状态时，不表现为温度，当热质处于自由状态时，就表现为温度。 摩擦与碰撞能把处于潜伏状态的热质挤出来，所以摩擦与碰撞能生热，或者说摩擦可以减小物体的比热。 热质具有相互排斥的本性，所以热质能从高温物体流向低温物体，物体受热就会膨胀。 物体的热传导过程就是热质的流动过程，但总的热量是守恒的，因为热质既不能创造，也不能消灭。

热质说能说明和解释一些热现象，在历史上曾起到一定作用。瓦特在热质说和潜热的理论基础上改进了蒸汽机，卡诺在热质说的基础上研究了热力学。恩格斯说：“被热质说所统治的物理学却发现了一系列非常重要的热学定律。”所以，1738 年法国科学院就热的本质问题征奖，三名获奖者全都主张热质说。

可以说，十八世纪是热质说的极盛时期，在与热动说的论战中明显地占了上风。可是到了十八世纪末，热质说又遇到了一些难题：热质是否有重量？如何解释某些物体的热缩冷胀现象？为什么摩擦能源源不断地产生热？而对这些问题热质说又受到了新的严峻挑战。

## 六、热动说的发展

在热质说发展的十八世纪，热动说处于低潮时期，但热质说也遇到了许多问题，如热质是否有重量，人们众说纷纭，莫衷一是。当时许多人都曾研究过这一问题。但所得结果相差甚远。如波尔哈夫说金属烧红后重量不变；布丰宣布金属烧红后重量会增加；罗布克用更精确的天平重复布丰的实验，结果是混乱的，有时变重，有时变轻；英国人佛迪斯则声称水在结冰时放出潜热后，重量增加了约十万分之一。伦福德经过反复实验则确认热没有重量，他指出，如果把热看作是一种运动，那热量的变化就不会引起重量的变化。

伦福德的研究过程是这样的：1798 年伦福德在慕尼黑兵工厂负责制造大炮的工作。他发现，用钻头钻炮筒时，炮筒的温度会升得很高，这使他非常惊讶。于是他想通过实验来弄清热的来源问题。他的实验是这样进行的：他用一个钝钻头钻一个炮筒，半小时转了 960 圈，炮筒的温度就由  $60^{\circ}\text{F}$  升高到  $130^{\circ}\text{F}$ 。伦福德想所产生的热量是否来自周围的空气？他接下去进行的实验是用活塞把钻头周围空气隔离开来。结果所生的热并未减少。他又考虑到活塞是同空气接触的，那同活塞直接接触的这部分空气对热的产生是否有影响呢？于是他又把钻头、活塞和炮筒都放在一个密封的箱子里，箱内还盛了水。钻头钻了两个半小时，箱内的水就沸腾了。当他看到不用火烧水就会沸腾时，感到十分兴奋。于是得出结论，这热不是从空气中来的，也不可能来自于水，因为在这里水是吸收热的物体；也不可能来自比热的减少或化学变化，因为在这种情况下比热和化学性质都没有发生变化。结论只能有一个，即热量是从摩擦中产生的。

摩擦生热本来是一个极平常的现象，原始人就是用这种方法创造出足够的热来点燃木草的，即所谓的钻木取火。摩擦生热的例子数不胜数，而且热质说也对摩擦生热的现象进行了解释，但是在这极平常的现象中，伦福德敏锐地注意观察到，产生的热是如此的大量，以至使水沸腾，这使问

题变得如此突出而引入注目。他特别注意到这热可持续不断的产生，这使热质说对摩擦现象的解释变得不足为信。伦福德认为，能够无限产生的决不可能是物质，而只能是一种运动。通过实验，他进一步得出结论：“在推敲这个问题时，我们一定不能忘记考虑那个最显著的情况，就是在这些实验中，由摩擦所产生的热的来源似乎是无穷无尽的”“任何与外界隔绝的一个物体或一系列物体，所能无限连续供给的任何东西决不可能是具体的物质；……除了只能把它认为是‘运动’以外，我似乎很难构成把它看作为其他东西的任何明确的观念”。

热质说是建立在热质的守恒概念的基础上的；而正是在这一点上，伦福德的实验以确凿的证据证明，摩擦不但能生热，而且能产生任意数量的热，这使热质说在普遍的热量守恒定律的有效性方面遭到了失败，从而动摇了热质说的统治地位。

在伦福德完成实验的第二年，21岁的戴维（1778—1829）完成了一个独创性的实验，这一实验的设计别具匠心、巧妙高超，他在真实装置中使两块冰相互摩擦，并使周围的温度比冰还低。实验发现，冰块摩擦后就逐渐融化了。戴维分析指出，使冰块融化的热不可能从周围的空气而来，因为周围空气的温度比冰还低；这热也不可能来自潜热，因为冰融化时是吸收潜热、而不是放出潜热。由此戴维得出了同伦福德相同的结论：热质是不存在的，热现象的直接原因是运动，戴维的真空中冰块摩擦实验被称为判决实验，它由此而判决了热质说的“死刑”，为热动说提供了有力的实验证据，并为热动说的发展铺平了道路。

## 七、热动说的最后胜利与留给人们的启示

在伦福德、戴维之后，一大批物理学家从事热的运动学说的研究。1857年克劳修斯在研究理想气体的分子的热运动时，证明气体的绝对温度由其分子的平均平动能所决定，对热力学定律作出了动力学描述。后来麦克斯韦与玻尔兹曼等人证明任何物体都是如此。1878年焦耳最后确定了热功当量，迈尔、焦耳、亥姆霍兹等人发现了能量守恒与转化定律，这时期，热质说被彻底抛弃了，人们认识到热运动是宏观物体内部分子、原子等微观粒子的一种永不停息的无规则运动。是物质的一种基本运动形式。热运动越剧烈，物体的温度就越高。热运动是大量微观粒子所构成的一种运动形式，就单个粒子来看，由于它受到其它粒子的复杂作用，其运动过程变化万端，具有很大的偶然性，但在总体上却体现了确定的规律性（统计规律性）。这样从1620年培根研究热算起，经过两个半世纪的努力，终于牢固地确立了热动说，发现了热的本性。

在热动说牢固确立后，进一步探索热的微观本质已成为物理学家们的迫切任务。在克劳修斯、麦克斯韦、玻尔兹曼、范德瓦尔斯等人的努力下，建立起了分子运动论。在吉布斯的系综理论、波尔兹曼、吉布斯、丁铎尔等研究的涨落理论和布朗运动，以及由玻色、费米、泡利等建立量子统计理论的基础上建立了探讨热的微观本质的“统计力学”，使人们对热的本性的认识更为深刻了。

回顾人们对热的本性的认识过程，留给人们许多物理学思想与物理学方法的启示，其中一点就是热质说的兴衰留给人们许多思考。虽然热质说

作为一个错误的学说最终要退出历史舞台,但热质说也曾在热学的发展进程中,起过不少积极的作用.比如在热质说的观念指导下,布莱克发现了比热和潜热,从而形成了量热学的理论与方法;瓦特依据热质说理论改进了蒸汽机,促进了社会生产力的高度发展;傅立叶在热质说的基础上建立了热传导理论,他发表的《热的分析理论》一书成为数学物理学历史上的划时代巨著;卡诺依据热质传递的理论发现了卡诺循环;热学中的热量、热容量、热量单位卡等,都是源子热质说的.当然随着物理学的不断发展,热质说就失去了它的积极作用,变成阻滞物理学发展的障碍.所以我们对热质说在热学发展过程中的作用还是应该肯定的,要以历史发展的观点,一分为二的来正确对待这一学说在历史发展中的作用.

## 能量守恒与转化定律

能量守恒与转化定律是自然科学中关于物质运动的最重要的普遍定律之一。能量守恒与转化定律的发现过程中蕴藏着丰富的物理学思想，高度体现了物理学方法的重要意义。整理它被发现的脉络，可以看出能量守恒与转化定律发现的线索过程与方法如下：

第一阶段，有关能量守恒与转化定律的多方面的经验事实的累积和概括。

在十九世纪以前，人们早已熟知有关机械动能与重力势能相互转化的种种现象，如落体、抛物、杠杆、碰撞、单摆、行星运动等；机械能转化为热能的现象，如摩擦生热；化学能与热能相互转化的现象，如某些化合物合成时放热、分解时吸热；静电、静磁能与机械能相互转化的现象，如摩擦生电、带电体吸引轻物、磁铁吸铁等；18世纪下半叶，蒸汽机的改进和逐步推广使用，使人们对热能转化为巨大的机械能产生了深刻的印象；18世纪与19世纪之交，人们制作了电堆、实现了化学能向电能的转化，获得了持续电流；又通过电解实现了电能向化学能的转化；19世纪20年代，人们发现了温差电偶和电流通过电阻生热的现象，实现了电能与热能的相互转化。与此同时，人们也发现了电流的磁效应，电流与电流的相互作用，揭示出了电和磁的紧密联系，找到了电磁能向机械能转化的途径。30年代初，感生电流的发现，找到了机械能持续转化为电能的途径。在18世纪下半叶拉瓦锡提出了燃烧的氧化理论以后，在19世纪上半叶，德国的生理学家们对动物热的研究形成了热潮。总之，到了19世纪30年代一幅机械运动、电磁运动、热运动、化学运动、生命运动相互联系、相互转化的图景已逐渐展现在人们的眼前，为能量守恒与转化定律的发现奠定了广泛坚实的基础。

第二阶段，能量概念的形成和发展

在人们已广泛了解各种运动形式、各种能量之间的相互转化的大量经验事实之后，又在力学、化学、热学、电学、生理学等学科经历了一系列的观念的突破，以及能量概念的创造与形成。

人们生活的自然界中虽然时时刻刻都充满着各种运动形式相互转化的现象，但要正确理解这些现象并从大量经验事实中概括出各种能量相互转化与能量守恒的概念和理论，首先必须突破一系列传统观念的束缚，逐步形成和明确能量的概念。

1. 在力学领域中，逐步形成了“功”与“能”的概念。早在1644，法国的笛卡儿就认为，自然界存在着一个守恒的运动量，即物体的质量乘以速度（ $m \times v$ ），以后物理学家们称之为“动量”。而德国的莱布尼兹则认为守恒的量是“活力”即物体的质量乘以速度的平方（ $m \times v^2$ ），并指出，力和路程的乘积等于“活力”的增加。这两大学派就运动的量度问题进行了长达半个多世纪的争论。1807年英国物理学家托马斯·杨最早提出“能”的概念，并认为动能等于质量乘速度的平方。从此“能”的概念便正式被引进了物理学。1829年科里奥利提议把 $\frac{1}{2}mv^2$ 称作活力

（即今天的动能）。1826年法国工程师蓬瑟勒首次引入了“功”的概念，并把千克力·米作为功的单位。1853年英国科学家兰金最早用“能量守

恒”这个表述：“人们已经知道能量守恒定律，即宇宙的一切能量（现实的和潜在的）之和是不能改变的”。

2. 在热学领域中，第一宣告了“永动机不可能”。从古到今，世界各国都出现过种种永动机的设计，设计者试图制成某种不用任何外加的动力就能够永远不息地运转做功的机器。到了17、18世纪，史特芬、卡诺等人已认为以纯机械的方法制造永动机是不可能的。以后人们进一步相信，用任何其他方法制造永动机也是不可能的。1775年法国皇家科学院决议不再接受审查有关永动机的任何设计。第二，突破热质说的羁绊。热质说的早期提出者是古希腊的德谟克利特、伊壁鸠鲁、古罗马的卢克莱修等人。在近代，它又受到法国的伽桑狄的支持。尽管17世纪的英国的培根、牛顿等把热看成是物质的一种运动，但这种观点缺乏实验根据。不久被人遗忘。18世纪中叶布拉克把热质说发展成定量的理论，把热量与温度相区分，提出了潜热和比热的观念，对热学发展有所贡献，但他对本质的理解是错误的。1777年拉瓦锡提出燃烧氧化说，但却进一步支持了热质说。到了1798年伦福德在钻炮膛的实验中发现，热不是物质，也不守恒，它可以无止境地通过摩擦而产生；1799年戴维做了摩擦真空中的金属使金属上的蜡融化；摩擦周围温度在冰点以下的冰，使之融化的两个实验。伦福德和戴维的实验发现给热质说以严重的冲击，为能量守恒与转化定律的发展开辟了道路。

### 3. 蒸汽机的发明与使用

人类在发现了把机械运动转化为热（摩擦生火）之后，又经过多少万年的实践和艰苦的探索，才把热转化为机械运动，发明了蒸汽机。我国古代的走马灯，古希腊的蒸汽球都是热转化为机械能的小型装置。1695年法国人丹尼斯·巴本在德国发明了第一部蒸汽机，在汽缸中产生蒸汽推动活塞上升，活塞到达顶点时，把汽缸冷却降压使活塞下降。他的设计有很大的理论价值。不久英国人萨弗里和纽科默也发明了空气蒸汽机，并于1712年有效地应用于矿井排水和农田灌溉。1769年英国的瓦特在此基础上加上一个分离冷凝器，使蒸汽机在原则上达到现代的水平。1784年瓦特又试制成双冲程蒸汽机，不久便广泛应用于各个工业部门。但在当时，如何提高蒸汽机效率的问题就自然成为科学研究的重要课题。这样，科学家们又深入地开展了对热的本质，热与机械能之间关系的研究。

### 4. 在电学、化学、生物学领域中相继建立和发展了“能量”概念。

在电学领域，19世纪初，为了解释电池电源的来源，伏打提出了接触说，并认为能量可以凭空产生。1829年罗吉特，1837年法拉第等撰文指出不可能凭空创造能量，认为伏打电流的真正来源是化学作用。1842年格罗夫也重申了不能凭空创造能量的论断。在电磁学领域，1831年法拉第确立了电磁感应定律，找到了磁转化为电的规律。他还发明了第一台直流发电机，实现了机械能向电磁能的转化。1833年楞次提出了确立感生电流方向的楞次定律。楞次定律实际上是能量守恒和转化定律在电磁现象中的特例。1840年焦耳开始测量焦耳热的实验，以精确的结论总结了化学能、电能和热能之间的关系。1845年法拉第又发现了磁致旋光现象，更深刻地揭示了电、磁、光三者之间的作用关系。

1777年法国的拉瓦锡提出了燃烧的氧化说，否定了1703年施塔尔提出的燃素说，这是化学史上的革命性进展。1804年俄国的格斯提出热化

学定律，指出化学反应中所释放的热量是一个同中间过程无关的恒量。这实质上已揭示了化学变化过程中的能量守恒关系。

在生物学领域中，十九世纪初，以德国的米勒为首的生理学派开始了动物热来源的研究，德国的李比希指出，由血液循环输送的食物元素与氧之间的相互作用是动物热的源泉。

上述的科学实验研究与科学发现的事实，使得科学家们通过他们自己的科学实践，逐渐领悟到各种现象的相互联系和相互转化的思想。这就要求物理学家们概括各个领域的发现，归纳他们的结论，从中抽象出一个既能表征各种现象的基本特点，又能表示各种能相互转化的精密的定律形式。这样长期的科学实验和理论研究为能量守恒与转化定律的最后确立奠定了坚实的基础。

### 第三阶段，实验研究与测定验证

19世纪30年代、40年代，物理学已经不满足于关于能量守恒的哲学思辨，而要求精密的实验测定与验证。而且特别关注于热功当量的计算与测定，关注于能量守恒的实验验证。

在热功当量的计算和实验测定中，S·卡诺在1830年的笔记中得出了热功当量值为370千克力·米/千卡，1842年迈尔利用空气的定容与定压比热算出了热功当量值为365千克力·米/千卡，他又在1845年的论文中推导出的结果为367千克力·米/千卡；1845年霍尔茨曼、1843年柯尔丁、1854年伊伦通过间接摩擦实验，1858年又通过铅的压碾实验等都得出了相近的热功当量的数值。

而在这方面，工作做得最多并最精确的是英国科学家焦耳。1838年焦耳发现了焦耳定律： $Q=I^2Rt$ ，1843年焦耳又发表文章表明：新的电动机不可能是永动机。1843年8月焦耳在他的实验中发现：测量使一发电机运转所需的机械功和由发电机所产生的电流所生成的热的比值为460千克力·米/千卡。同年他又测定水流过细管时产生的热，得到一个热功当量的值。1844—1845年，焦耳用压缩空气所需要的功和产生的热量得出的热功当量值为443.8千克力·米/千卡，用水的摩擦得到的热功当量值为488.3千克力·米/千卡。1847年他又测得的结果为428.9千克力·米/千卡，1850年为423.9千克力·米/千卡，1878年为423.9千克力·米/千卡，相当于4.154焦耳/卡。

1879年—1880年，美国物理学家罗兰改进了计温术，考虑到水的比热随温度的变化，做了更为精确的实验测定热功当量的数值，以后，达松伐耳、米库列斯库、格里菲斯等也都曾做过热功当量值的测定工作。1948年，第九届国际重量和计量大会采纳的热功当量值为4.1868焦耳/卡。近来，人们采用的热功当量值为4.184焦耳/卡，这一数值已成为近代物理学中的一个重要常数。

在热功当量的计算与测定的同时，人们也进行了关于能量守恒的一些重要实验验证。如焦耳的关于空气的压缩和膨胀的实验，伊伦的关于铅的压碾的实验（1858年），艾德隆特关于金属线的张力的实验（1865年），维奥耳关于佛科电流的实验以及佩罗特关于水的蒸发的潜热的实验等。以上这些关于热功当量的计算与测定，关于能量守恒的实验验证为能量守恒与转化定律的最后发现和形成提供了可靠的有力证据。

第四阶段，能量守恒与转化定律的文字表述及数学表述与论证。

在 1842 年前后的十多年时间内，不同国家的十多位科学家差不多同时独立地从几个不同的角度和途径提出了具有划时代意义的能量守恒与转化定律。其中迈尔、焦耳和亥姆霍兹做出最杰出的有代表意义的贡献。

### 一、迈尔对能量守恒与转化定律的研究与表述

历史上一般认为最早发现能量守恒与转化定律的是德国人迈尔。他从事有关能量守恒与转化问题的研究是从对生理现象的分析开始的。他把有机体的化学过程和无机物理现象联系起来，从而产生了热和机械运动有一定当量关系的思想。1842 年迈尔发表了第一篇论文《论无机自然界的力》，在这篇论文中涉及到能量守恒与转化定律的有下列几方面：一是定义了“力”（即能量）的质的转化而在量上的守恒。他认为：“能量是不灭的，能转化的无重量的实体”。二是列出了重力场中的能量守恒定律

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2$$

三是确立了能量之间数值上的当量关系的概念和确定热的机械当量的数量关系。他所计算出的热功当量值为 365 千克力·米/千卡。迈尔在 1845 年的文章中研究了能量的五种形式、运动的五种形式，并进而描绘了运动转化的 25 种情况，作出了否定热质和其他的无重量的物质的结论。迈尔还把自然力（能量）的守恒与转化原理推广到生物机体中，指出了在机体内发生着化学能转化为自然能量的复杂过程，并说明地球上的各种能量都是太阳供给的，如植物把太阳的光和热转化为化学能，动物通过消化食物又把这种化学能转化为体热和肌肉运动的机械能。他研究了太阳能的来源问题，提出光辐射伴随着质量的损失，以及太阳质量的变化对行星运转周期的影响等。

尽管迈尔对能量守恒与转化定律作出了杰出的贡献，但迈尔的工作不仅没有得到应有的评价，反而遭到了一些粗暴、侮辱性的攻击，加上他两个孩子夭亡，迈尔在沉重打击下曾于 1849 年跳楼企图自杀而留下终生残疾，但他还是以足够的力量写出了《论热的机械当量》的小册子，以明确的论证保护了自己的优先权，并进一步发展了关于能量普遍不灭性和严格可转换性原理，并且大胆地完整地把这个原理推广到化学、天文学和生命进程中去。在 1878 年他逝世前，终于亲眼看到了人们给予他的尊敬和荣誉，这是因为能量守恒与转化定律是根据一系列完全不同的事例而得到普遍承认的结果。

### 二、焦耳对热功当量的计算和测定以及对能量守恒与转化定律的表述

在十九世纪四十年代以前的这个时期，人们从许多不同方面对普遍的能量守恒与转化定律进行了广泛的探索。但是只定性地知道热可以转化为其他能量形式中的一种能量是不够的，必须具体确定不同形式能量间的数值当量或换算因子。首先是建立热运动和机械运动之间的定量关系。在这方面，英国的焦耳做出了杰出的贡献。他极力想从实验上证明能量的不灭。他先后用了四十年的时间，做了四百多次实验，把热与功之间的联系完全找出来了。对于能量转化不但得到了实验的证实而且还取得了转化时

的数量关系，为确立能量守恒与转化定律奠定了坚实的实验基础，这些在上文已有介绍。

焦耳不仅单纯从实验上研究热功当量，而且在研究过程中同时也阐明了他对热的本质的认识以及能量守恒与转化定律。1847年5月，焦耳发表了题为《论物质、活力和热》的文章，他在这篇文章中清晰、明确地阐述了能量守恒与转化定律，他说：“……自然现象，不管是机械的、化学的、或是有生命的、几乎完全包括在通过空间的吸引、活力和热的相互变化之中。这就是宇宙中维持着的秩序——没有任何毁灭未曾有任何损失，不管整部机械怎样复杂，它照常润滑而又和谐地工作”。

由此可见，焦耳与迈尔从不同方面以不同方法探索了能量守恒与转化定律。焦耳的工作一开始也没有得到人们的重视。1844年英国皇家学会拒绝他宣读论文。1847年英国科学促进会只让他报告实验提要。他在介绍其实验结果时，引起了威廉·汤姆逊的注意，如果不是他从会上站起，以他明智的观察使与会者对这个新学说产生了浓厚兴趣的话，会议就会对这个新思想不加考虑了。正是焦耳多年来始终如一的全部实验工作，使人们接受了包括各种能量形式的广义的守恒定律。

### 三、亥姆霍兹对能量守恒与转化定律的数学论证与文字表述

17世纪到18世纪，力学是物理科学中最先发展成为定量的、有严密数学表述的理论科学的一个学科。19世纪上半叶，热学、电磁学、化学也开始向定量的理论科学发展。以18世纪高度发展的分析力学为基础，有可能为能量守恒定律作出严密的数学表述。为了使能量守恒定律能为广大自然科学家所接受，为了使能量守恒定律的引入能进一步促进物理科学的发展也有必要为能量守恒作出严密的、广泛适用的数学表述，这是迈尔所没有完成也无力完成的工作，也是焦耳从未打算进行的工作。这项工作是由具有较高的数学和力学素养的亥姆霍兹最先进行的。他使能量守恒定律具有了严密科学的形式。亥姆霍兹继承标量力学的传统，把力学的能量守恒原理的数学表述推广到其他物理科学之中，从而得到普遍的能量守恒定律的数学表述。1847年7月，亥姆霍兹在柏林物理学会报告了他的著名论文《论力之不灭》。该文正文共分六节，全面阐述了他的能量守恒与转化的思想以及能量守恒与转化定律的数学表述与论证。论文的主要内容是：

1. 活力（能量）不灭原理。他首先假定，“不可能连续地从无产生能量”，然后得出：“没有一个由一些物体构成的系统，这些物体彼此占有相对的位置，受到它们相互施加的力从而发生运动，直到它们达到另一个确定的位置”，根据守恒原理，“这系统由第一位置运动至第二位置所获得的功的量总是等于这个系统由第二位置运动至第一位置时所失去的

量。”否则就可以建造永动机。由此对于落体可得到  $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$ 。

他通过数学计算证明，由质点组成的系统，如果能量不灭原理普遍成立，质点彼此之间的力必为中心力。

2. 力之不灭原理。如果是作用于  $r$  方向的力  $F$  的强度，那么



$F_x = -\frac{x}{r}\Phi$ ,  $F_y = -\frac{y}{r}\Phi$ ,  $F_z = -\frac{z}{r}\Phi$ 由牛顿第二定律与活力不灭原理, 得到

$$\frac{1}{2}mQ^2 - \frac{1}{2}mq^2 = -\int_r^R \Phi dr$$

式中  $Q$ 、 $q$  为切线速度,  $r$ 、 $R$  为距离. 右边的积分他称之为应力(即势能). 他进一步把这个关系推广到质点组系统. 这就是他的机械能守恒定律, 经过演绎到物理学各分支后, 就成为能量守恒定律的基本公式.

3. 力之不灭原理在力学定理中的应用. 亥姆霍兹把上述定律用于对其它物理过程的分析. 他指出: 无摩擦的力学过程, 引力作用下的运动, 不可压缩的液体、气体和理想弹性体的运动都服从于上述规律. 并进一步分析了这一定律在光的衍射、电磁现象、电作用、以至生物机体中的实际应用.

4. 热的力(能)当量.

5. 电过程中的力(能)当量.

6. 磁和电磁的力(能)当量.

最后, 亥姆霍兹也简要探讨了有机生物, 认为植物吸收了太阳能, 贮存了化学能. 动物吸收了植物中能氧化的化合物, 消耗化学能, 产生热和机械能. 另外还有人介绍说, 亥姆霍兹还给出了热力学第一定律的数学表述:

$$dU_A = dQ - dW$$

即闭合体系  $A$  的内能  $U_A$  的变化等于输入的热量  $dQ$  减去体系对外所做的功  $dW$ .

亥姆霍兹 1847 年的论述, 在当时也没有立即得到普遍的赞同, 他的理论直到 1860 年才得到普遍承认.

除了迈尔、焦耳、亥姆霍兹之外, 这一时期还有不少科学家从不同角度对能量守恒与转化定律作了一定的研究和描述, 如卡诺、格罗夫、柯尔丁等人.

第五阶段, 能量守恒与转化定律的发展与完善.

经迈尔、焦耳、亥姆霍兹等人的工作, 能量守恒与转化定律已基本上形成了, 但当时对能量守恒与转化定律用的还是“力的守恒定律”这一不确切的名称. 1853 年,  $W$ ·汤姆逊给能量下了一个较确切的定义. 1860 年他用能量守恒定律代替力的守恒定律. 1873 年恩格斯强调能量守恒定律应从质和量两个方面去理解, 从而给予了这一定律以全面科学的解释和肯定.

在亥姆霍兹以后, 麦克斯韦根据法拉弟的电磁场的观念, 把电磁场的能量定位在空间体积之中. 1884 年坡印亭发展了一个适用于变化场的能流理论. 爱因斯坦的能量质量定律进一步把能量与质量相联系, 相对论把能量与动量组合成为四维空间中的一个矢量. 普朗克的量子论、爱因斯坦的光量子理论揭示了能量变化的不连续性, 揭示了光与辐射的频率与能量的关系. 能量守恒与转化定律以及它的数学表述, 作为自然科学的基石, 随着自然科学的发展, 不断地受到考验、丰富与发展.

今天的教科书上一般把能量守恒与转化定律表述为: 物体的任何一种

运动形式（如机械热、电磁、化学等）在一定条件下都能以间接或直接的形式转化成另一种运动形式，在转化过程中，作为物质运动度量的能量恒保持不变。

能量守恒与转化定律同细胞学说、进化论一起被恩格斯称为十九世纪自然科学的三大发现，它直接证明了物质运动的永恒性，为马克思主义哲学提供了重要的自然科学基础。

从能量守恒与转化定律的建立的历史，给了我们许多启发，同时也可看出这一定律发现的几个特点。其一是经历的时间漫长，从实践经验的积累到理论概括、数学表述的完成有几十万年的历史；其二是涉及的学科广泛，包括了力学、热学、电磁学、光学、化学、生物学、生理学等各个自然科学学科。其三是参加研究的科学家人数众多，直接或间接对这一定律的发现做出杰出贡献的就有几十位之多。其四是不同的科学家最后得出这一定律的时间几乎相同，大体都在十九世纪四十年代前后。这些特点说明能量守恒与转化定律的发现具有历史的必然性。这个定律的发现对后来的科学发展起到了巨大的指导作用，目前能量守恒与转化定律已成为自然界少数几个最基本、最重要的自然规律之一。

## 热力学第二定律

### 一、热力学第二定律建立的理论基础

在生产实践中，法国人巴本发明了第一部蒸汽机，英国人纽可门制作的大规模把热变为机械能的蒸汽机从 1712 年起在全英国煤矿普遍使用，其后经瓦特改进的蒸汽机十九世纪已在工业上得到广泛应用，提高热机的效率问题成为当时生产中的重要课题。

#### 1. 卡诺的热机理论

十九世纪二十年代，法国工程师卡诺从理论上研究了一切热机的效率。他的目的是“从足够普遍的观点”去研究“由热得到运动的原理”。他说：“为了以最普遍的形式去研究由热得到运动的原理，必须不依赖于任何机械和任何特殊的工作物质，必须使所进行的讨论不仅能应用于蒸汽机，而且建立起能应用于一切可以想象的热机原理，不管它们用什么物质，也不管它们如何运转。”从这里可以看出卡诺所运用的研究问题的热力学方法，他是从分析蒸汽机的基本结构和工作过程入手，忽略了一切次要因素，以普遍理论的形式作出了关于消耗热而得到机械功的结论。当时卡诺还信奉热质说，他认为蒸汽机的工作过程总要伴随着热质的流动和重新分配，他把蒸汽机与另一种原动机水车相类比，他认为：“我们可以恰当地把热的动力和一个瀑布的动力相比，瀑布的动力依赖于它的高度和水量；热的动力依赖于所用的热质的量和我们称之为热质的下落高度，即交换物质的物体之间的温度差。”这样卡诺得到，结构最简单的热机至少有一个高温热源和一个低温热源，这个热机必然由两个等温过程和两个绝热过程所组成的一个循环，这就是所谓的“卡诺热机”。卡诺据此得出了一个基本结论：热机必须工作于至少两个热源之间，热机的效率仅仅取决于热源的温差，而与采用什么工作物质无关。卡诺依据热质守恒思想和永动机不可能制成的原理，进一步证明：在相同温度的高温热源和相同温度的低温热源之间工作的一切实际热机，其效率都不会大于在同样的热源之间工作的可逆卡诺热机的效率。在热机理论的研究中，卡诺出色地运用了类比和建立理想模型的方法，通过同水车的类比，构思了一个理想的热机，揭示了热机中热向机械运动转化的本质过程。在实践上，卡诺的工作为提高热机效率指明了方向；在理论上，他的结论已经包含了热力学第二定律的基本思想。恩格斯在《自然辩证法》一书中曾分析到：卡诺“他差不多已经探究到问题的底蕴，阻碍他完全解决这个问题的，并不是事实材料的不足，而只是一个先入为主的错误理论。”也就是卡诺信奉的是错误的热质说。

卡诺的研究成果一直没有引起法国物理学界的重视，也只有少数人理解了它的重要性。法国工程师克拉贝龙在研究卡诺的著作后，于 1834 年首次以简明的几何形式把卡诺的热机循环过程表示出来，并进一步证明了卡诺热机在一个循环中所做的功，等于循环曲线所包围的面积。

#### 2. 热力学温标的建立

温度概念的形成，是热学发展中的第一个台阶，而温度的测定，长期以来也被认为是热学中的一个重要问题，因此也就成为人们关注的研究课题。到了十九世纪，这一课题的研究进入了精巧细致地进行实验研究的阶

段。英国物理学家威廉·汤姆逊对当时的温标不满意，他想建立一个与物质的性质无关的绝对温标。他根据卡诺的理论，一切理想热机在同样的热源和冷源之间工作时，其效率都相等，与使用的工作物质无关。威廉·汤姆逊由此提出了一种热力学温标，从理论上解决了各种经验温标不相一致的问题。他在1848年发表的《建立在卡诺热机之动力论基础上和由雷诺的观察结果计算出来的一种绝对温标》的论文中写道：“按照卡诺所确立的动力和热之间的关系，在由热的作用得到的机械功的数量关系中，只包括热量和温度间隔的因素；又因为我们有独立地测量热量的确定的方法，所以就为我们提供了温度间隔的一个量度，根据它可以确定绝对的温度差。”“我所建议的温标特点，是任何一度都具有相同的值。这就是说，当一单位的热从温度为 $T$ 的物体A传给温度为 $(T-1)$ 的物体B，则不论 $T$ 的数目是多少，都将给出同样的机械效果。这正好可以用‘绝对温标’这个名称，因为它的特点是和任何特殊物质的物理性质完全无关的。”为了纪念他的功绩，后人将这一温标称为“开氏温标”，也称“热力学温标”。在1927年，第七届国际计量大会上，将这一温标定为最基本的温标，并经1960年第十一届国际计量大会规定用单一固定点（水的三相点 $273.16\text{K}$ ）来定义，其符号是 $T$ ，单位为开尔文 $\text{K}$ 。同时摄氏温度 $t$ 定义为 $T - T_0$ ， $T_0 = 273.15\text{K}$ 。由这一定义知，热力学温度相差一度，摄氏温度也相差一度。绝对温标的零度为绝对零度（ $0\text{K}$ ），它是不可能达到的极限温度。

## 二、热力学第二定律的物理表述

### 1. 热力学第二定律的克劳修斯表述

卡诺提出有温度差就能够产生动力的断言是正确的，但是，定量的热和它产生的功之间的关系，并由此导出有关热的本质和定律的结论还没有被讨论清楚。因此引起了物理学家的继续思考。德国物理学家克劳修斯正是在这种情况下，开始研究这方面的问题。1850年，克劳修斯在德文版的《物理学和化学年报》第79卷上发表了题为《论热的动力和由此推出的热学理论的普遍定律》的论文。在论文中克劳修斯认为卡诺的结论是正确的，但需要另外的方法加以证明。他认为，卡诺认为热量是由一个热体转移到一个冷体，就要做功是正确的，但卡诺认为这种转移并无热的损失，而热的量保持不变这一观点是没有根据的。他认为每当借助于热而得到功的时候，所消耗的热量与所产生的功成正比；而当消耗同样的功时，同样多的热量又会被传递到较高温度的热源。单有这一基本定律是不够的。还必须有另一个定律与之相补充，这个定律被克劳修斯表述为：“在没有任何力的消耗或其他变化的情况下，就把任意多的热量从一个冷体移到一个热体，这是和热的素来行为相矛盾的。热到处都表现为这样的企图，要使所出现的温度差消失并因而要从较热的物体转移到较冷的物体。”这就是当时克劳修斯对热力学第二定律的表述。

1851年，威廉·汤姆逊把克劳修斯的表述改述为：“一台不借助于任何外界作用的自动机器，把热从一个物体传到另一个温度比它高的物体，这是不可能的”。后来克劳修斯也重新把它表述为“热从冷的物体传向热的物体不可能无补偿地发生”。今天教科书上，一般把克劳修斯表述写为“热量自发地从低温物体向高温物体传递而不引起任何其它影响是不可能的”。“不引起任何其它影响”这一点很重要，没有这个限制，热量由

低温物体向高温物体传递是可能的，如在卡诺热机的逆循环过程中，便可将热量由低温物体传到高温物体，但是以外界做功为代价，“引起了其它影响”。

## 2. 热力学第二定律的开尔文表述

几乎与克劳修斯同时，威廉·汤姆逊也研究着同一课题。并于 1851 年发表论文《热的动力理论》。在论文中，他阐述了自己对热力学定律的见解，他采取与卡诺信奉的热质说相反的热动力说，以修改卡诺的理论。他明确指出：“热的动力论的全部理论是建立在分别由焦耳以及卡诺和克劳修斯提出的两个命题之上的。”他接着指出：

“命题（焦耳）：当我们以不论什么方式，从单纯的热源中产生出或以纯粹的热效应消耗掉等量的机械效应，那么所失去的和产生的热量是相等的。”

“命题（卡诺和克劳修斯）：如果一台热机在作逆向工作时，它每一部分运动的物理学和力学的作用都将全部逆转过来，那么从一定的热量所产生的机械效应与任何具有相同热源和冷源的热动力机是一样多的。”

关于命题的证明，汤姆逊采用了两种不同的方法，一种是用克劳修斯的表述来证明，另一种是用他自己提出的公理来证明。这个公理表述为：“利用无生命物质的作用，把物质的任何部分冷到比它周围最冷的客体的温度以下，以产生机械的效应，这是不可能的。”这是当时汤姆逊表述的热力学第二定律。

现在教科书中通常的热力学第二定律的开尔文表述为：从单一热源吸收的热量在循环过程中全部转变为功，而不引起任何其它影响是不可能的。这里的单一热源是指温度均匀且保持不变的物体。这里的“任何其它影响”指的是对外界造成的影响。另外这里强调的是循环过程。若不是循环过程，从单一热源吸热全部转变为功是可能的，如气体等温膨胀做功这时系统没有回到原来的状态，外界也造成了影响，因而并不违反热力学第二定律。如果开尔文表述不成立，那么它就可以借助于某一物质（例如海水、土壤等等）的冷却，使之放出热量，而无限地变为有用的机械功，这样就变成可以制造永动机，通常称之为第二类永动机。但实践表明，第二类永动机是不可能制造的。

## 3. 热力学第二定律的两种物理表述的等价性

热力学第二定律的克劳修斯表述和开尔文表述是等价的，只要其中的一种表述成立，另一种表述也成立。这种等效性可用反证法证明，如果一种表述不成立，另一种表述也必不成立。我们假设克劳修斯的表述不成立，即假定热量  $Q_2$  可自发地从低温热源传到高温热源，且不引起任何其它影响。在高温热源与低温热源之间安置一台卡诺热机，它自高温热源吸收热量  $Q_1$ ，对外做功  $A$ ，并向低温热源放出热量  $Q_2$ 。如把这两件事联合起来，则自高温热源吸收了热量  $Q_1 - Q_2$ ，且完全转变为宏观功  $A = Q_1 - Q_2$ ，便导致了“单源热机”的出现。既然按开尔文表述不可能有单源热机，这就反证了克劳修斯表述的正确性。当然也可假设开尔文表述不成立，则可证明克劳修斯表述也必定不成立。

热力学第二定律的克劳修斯表述实际上是说热传导过程是不可逆过程，开尔文表述实质是说功转变为热是不可逆过程。所以，热力学第二定

律实际上指出了一切涉及热现象的实际的宏观过程的不可逆性，两种表述的一致性也指出了各种不可逆过程均有内在联系。因此只要选出一种与热现象有关的实际宏观过程，并指出其不可逆性，就可以用来作为热力学第二定律的一种表述，这就是热力学第二定律可以采用多种定性表述的原因。后来人们也把热力学第二定律表述为：不可能制造第二类永动机。或者表述为：孤立系统中实际发生的过程总要使系统的熵增加。

### 三、热力学第二定律的数学表述

热力学第二定律由克劳修斯和汤姆逊建立后，人们对它难以理解。为此，从1854年开始克劳修斯进行了大量的研究工作，力求寻找一个简单的一般形式以及证明方法，为理论提供一个可靠的基础，1865年克劳修斯在论文《关于热的动力理论的主要方程的各种应用上方便的形式》一文中，首次引入了“熵”的概念，并推导出了热力学第二定律的数学表述。他的思路是这样的：

首先，结合汤姆逊建立的热力学温标，克劳修斯从对可逆卡诺循环的分析中得到一个等式：

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

式中  $T_1$ 、 $T_2$  分别为高温热源和低温热源的温度， $Q_1$ 、 $Q_2$  分别为工作物质在高温热源和低温热源吸收和放出的热量。这表明热源所吸收或放出的热量与该热源的温度之比是一个常数。如果吸收的热量取正值，放出的热量取

负值，则上式可写为： $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$

此式表明，在可逆卡诺循环中，温比热量之和为零，此式称为克劳修斯等式

其次，克劳修斯将这个结果推广到任意可逆循环过程，于是得出

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

这称为一般的克劳修斯等式。

第三，克劳修斯指出，可逆循环是一种理想循环，而对于实际的自发过程，即不可逆循环可推得

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} < 0$$

对于任意的不可逆循环，则有一般的克劳修斯不等式

$$\oint \frac{dQ}{T} < 0$$

第四，引进“熵”的概念。克劳修斯指出在可逆循环中积分  $\oint \frac{dQ}{T}$

总等于零，因而  $\frac{dQ}{T}$  必定是一个量的全微分，它只与系统当时的状态有关，而与系统到达这个状态所经历的途径无关。如果用  $S$  表示这个量，则我们可以规定：

$$ds = \frac{dQ}{T}$$

克劳修斯把他所引入的这个函数  $S$  称为系统的“熵”，表示系统的“转变含量”，是对热的转化程度的测度。

#### 第五、推导出热力学第二定律的数学表述

通过对热力学的可逆过程和不可逆过程的考察，应用熵的概念，可以推导出：

1. 热力学第二定律的数学表述的积分式形式为：

$$S_d - S_c \int_c^d \frac{dQ}{T}$$

式中不等号指不可逆过程，等号指可逆过程。

2. 热力学第二定律的数学表述的微分形式为：

$$dS \frac{dQ}{T}$$

式中不等号指不可逆过程，等号指可逆过程。

3. 封闭系统的基本热力学方程。将热力学第一定律的表达式  $dQ=dU + dA$  代入热力学第二定律的微分形式可得：

$$TdS = dU + dA$$

这就是封闭系统的基本热力学方程。式中等号指可逆过程，不等号指不可逆过程。

# 熵

## 一、熵的概念引入的基础

人们在长期的生产、生活中早已发现，在自然界的许许多多的物理现象中，有些变化可以自发发生与进行，而有些变化则不能自发进行。例如水会自动地由高处向低处流，但水不会自发地由低处流到高处；热能自发地从高温物体传递给低温物体，但热不会自发地由低温物体传递给高温物体；气体的扩散可自发地进行，一滴墨水也可自发均匀散布在一杯水中，但气体与墨水不会自发地聚集起来；物体摩擦会生热，但热不能使物体自发地相互摩擦。面对这些现象，人们进行了长期的探讨。十九世纪中叶，由迈尔、焦耳、亥姆霍兹等人的发现的能量守恒与转化定律也被称为热力学第一定律，它指出，一切物理过程都必须遵循能量守恒与转化定律，对于热现象来说，热不会消灭，只能转化，而这种转化也必须遵从热力学第一定律。热力学第二定律进一步指出，热的转化是有一定条件的，有些情况可以转化，而有些情况则不可能发生转化。热力学第三定律指出，绝对温度的零度是不能达到的。而绝对零度则是表明，物质的一切运动包括热运动都不复存在了。所以这一定律说明了热不可能全部转化为其他运动。就热力学第二定律而言，实质上它明确指出了与热现象有关的一切宏观自发过程都是不可逆的，也即在外界条件不变的情况下，过程不能沿着原来的途径复原。

从热学的发展史来看，一方面，热力学第零定律（热平衡定律）的建立，确立了一个态函数温度，它是物体冷热程度的量度；热力学第一定律的建立又为我们确立了一个新的态函数内能，它是物质间能量转化多少的量。很自然的，在热力学第二定律建立后，我们就要寻找一个作为在一定条件下确定过程进行方向的标志的一个新的态函数。另一方面，一切热力学过程都满足热现象在内的能量守恒与转化定律，但是能满足的却不一定都能实现，热力学第二定律就给出了答案，对于一切热现象有关的过程都是不可逆的。在热传导方面，热自动由低温物体传向高温物体的过程是不可能，其判据为温度；在扩散现象中气体分子自动从密度小的地方迁移到密度大的地方也是不能实现的，其判断进行方向的标准是密度；在液体流动中，水不会自动由低水位流向高水位，其判据为压强；在电荷运动现象中，静止的正电荷从低电势向高电势运动也是不可能的，其判据为电势。等等，对于这些不同的现象，判断其自发过程进行的方向和限度的标准有必要寻找一个共同的量，能判断所有自发过程进行的方向。所有这些都要求在物理学中有必要引入一个新的物理量，于是克劳修斯提出了熵的概念。

## 二、熵的概念的形成过程

在汤姆逊建立的热力学温标和卡诺热机理论的基础上，经过克劳修斯和汤姆逊的研究，1850年克劳修斯提出了热力学第二定律的克劳修斯表述，接着开尔文又提出了热力学第二定律的开尔文表述，至此，热力学第二定律已建立起来。克劳修斯为了给出热力学第二定律的数学表述，进行了大量的研究工作。他在研究可逆卡诺热机时曾注意到，当可逆卡诺热机完成一个循环动作时，虽然工作物质从高温热源所吸收的热量（ $Q_1$ ）和它



在低温热源所放出的热量 ( $Q_2$ ) 是不等的, 但是以热量除以相应的热源温度所得的量值, 在整个循环中却保持常数、即

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

或 
$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

这里的  $T_1$ 、 $T_2$  分别是高、低温热源的热力学温度。在上式中  $Q_1$ 、 $Q_2$  都是正的, 是工作物质所吸热量和所放热量的绝对值。如果采用热力学第一定律中对  $Q$  规定的代数符号, 则上式应改写为:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

此式表示, 当可逆卡诺热机的工作物质从某一初态出发, 经历了一个循环又回到原来状态后, 量  $\frac{Q}{T}$  在整个可逆卡诺循环四个过程之和为零。克劳修斯把这个结果进一步推广到任意的可逆循环过程, 于是得出:

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

这一结果是克劳修斯在 1854 年的《论热的动力理论的第二原理的另一形式》的论文中给出的。

克劳修斯指出, 可逆循环是一种理想循环; 只有在这种理想循环中, 上述积分才为零。而在自发的自然过程中, 这个积分只能为负。1865 年, 克劳修斯把上述积分推广到更一般的循环过程, 得出  $\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$

等号适用于可逆循环, 不等号适用于不可逆循环。

当  $\oint \frac{dQ}{T} = 0$  时, 则在积分号内的表述式  $\frac{dQ}{T}$

必定是一个量的全微分, 它只与物体的状态有关, 而与物体到达这个状态的路径无关。于是克劳修斯用  $S$  来表示这个量, 规定为:

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

对  $S$  的名称, 克劳修斯是这样描述的: “如果我们要对  $S$  找一个特殊的名称, 那末我们可以象把对量  $U$  所说的称为物体的内能含量一样, 对  $S$  也可以说是物体的转变含量。但是我认为更好的是, 把这个科学上如此重要的量的名称取自于古老的语言, 并使它能用于所有新语言之中, 那末我建议根据希腊字  $\epsilon\nu\tau\rho\omicron\pi\epsilon$ , 即 ‘转变’ 一字, 而把量  $S$  称为物体的熵 (Entropie)。我故意把字 Entropie (熵) 构造得尽可能与字 Energie (能) 相似, 因为按照这些词所命名的这两个量, 就其物理意义来说, 彼此变得如此接近, 以致在名称上有某种相同性, 在我看来似乎是恰当的。”

克劳修斯进一步指出: “为了构成热转变功或反过来功转变为热的当量值, 就必须把热量视其产生于功或者转变为功而取正或负, 并且用所涉及的绝对温度去除。” 很明显, 这个当量值就是  $S$ 。1867 年 9 月克劳修斯在一次讲演中, 把热力学第二定律又另一种表述为: “对于任何一个再复杂的过程, 只要其中一个或几个物体经受任意的可逆变化, 那末所出现的

一切转变的代数和必须等于零。”这样，克劳修斯用他提出的“熵”的概念重新来表征了热力学第二定律所描述的运动变化过程 and 方向，与此同时他又指出，在一个不与外界发生相互作用，即不与外界发生物质交换和能量交换的孤立系统，熵的变化总是大于或等于零，这就是熵增加原理。它从一个侧面表明了自然界里某些局部过程的不可逆性，它也是第一个对时间反演不可逆的物理学规律，这在物理学理论发展中是一个很大的进步。

### 三、热寂说的错误

克劳修斯在提出了“熵”的概念，并总结出了熵增加原理后，进一步把这一原理外推到宇宙，得出了物理学史上有名的宇宙“热寂说”的错误结论。1865年，克劳修斯曾在一篇论文中认为，自然界所有发生的变化能以一个确定的方向进行，这个方向是属于能自发地、不用补偿地发生。但是，与此相反的方向的变化，必须同时伴随着发生正的变化来补偿。如果把这一原理应用于整个宇宙，就会得出宇宙必定不断地趋于一个终态的结论。并写道：“热的动力理论的两条基本原理可简单的表述为相应的宇宙基本原理：(A)宇宙的能量是个常数；(B)宇宙的熵趋向于一个极大值。”两年后，克劳修斯在一次讲演中再次认为：“宇宙越接近于其熵为一最大值的极限状态，它继续发生变化的机会就越减少，而如果最后完全达到了这个状态，那末也就不会再出现进一步的变化，宇宙就将处于一个死寂的永远状态。”虽然克劳修斯也曾谈到这个状态的到来是如此的缓慢，但他认为终究找到了宇宙的极限状态。开尔文也有相似的观点，他从他提出的热力学第二定律出发，得出了一个结论：目前在物质世界中存在着的普遍倾向是机械能的耗散；在没有比等当量的耗散更多的情况下，任何机械能的复原在无生命物质的过程中是不可能的，而且可能也是从来没有用有机物质实现过的。不论是具有植物生命的物质，还是服从动物意志的物质；在已经过去了的有限时间内，地球上必定曾经是不适宜于象现在这样组成人居住的，而将来来到的有限时间内，地球上的条件也将是这样。除非曾经发生过或者将来会发生这样的一些过程，它们在目前世界上已知过程所遵从的定律下，是不可能发生的。”1929年英国的金斯进一步把宇宙的死寂状态描述为：“能量还是保存着，但已失去一切活动的的能力，它无力再使宇宙运动起来，正如一潭死水不能使水车转动起来一样，我们将处在一个死寂的、虽然也可能是热的宇宙中。”“宇宙也象凡人一样，它唯一可能的生命就是走向坟墓。”

热寂说提出来后，受到了许多物理学家和科学家的反对。恩格斯在1869年3月21日致马克思的信中认为，热寂说的实质是主张能量不是在量上，那也是在质上消失了，最后必然要假设神的外来推动。恩格斯深刻地指出：“运动不灭不能仅仅从数量上去把握，而且还必须从质量上去理解。”热寂说是违反了能量转化原理的，因为热寂说认为，一切运动形式最终都变为热运动，而由此就不再转化为其他运动形式，这一点是违反各种运动形式之间转化是无限性的能量转化原理的。恩格斯猜测放射到太空中去的热一定有可能通过某种途径转变为另一种运动形式，并能重新集结和运动起来。近几十年来，天文观测的某些新发现，开始表明恩格斯的假说是正确的。随着科学的发展，这一问题必能得到更为满意的解释。另一方面，热寂说的错误还在于把适用于一定条件下的物理定律，无限制地推

广到宇宙，推广到无限的时间，而给物理定律以绝对的定义，这种错误也是我们要加以避免的。

#### 四、熵的概念的物理意义的探讨

熵的概念提出后，其物理意义也使人难以理解。1877年玻尔兹曼从理论上证明了熵和概率的关系，并得出了熵  $S$  与系统的热力学状态的几率  $W$  之间的关系式

$$S = k \ln W$$

1900年，普朗克引进了玻尔兹曼常数  $k$ ，把这个关系式表示为：

$$S = k \ln W$$

通过这个关系，玻尔兹曼把分子的力学过程与系统的热力学过程统一起来，并指出了熵  $S$  是与热力学几率相联系的。孤立系统的自发过程的方向性，正相应于系统从热力学几率较小的状态向热力学几率较大的状态过程，这也正是熵增加原理。这揭示了热力学第二定律的统计本质，并表明，熵自发减小的过程不是绝对不可能，而是几率非常小而已。从这里也可解释1871年麦克斯韦曾提出一个理想实验：把温度相同的气体分隔成  $A$ 、 $B$  两部分，中间有一小孔，有一个“妖精”守在小孔处，并能打开或关闭小孔。这个小妖不断使快分子从  $A$  跑到  $B$ ，慢分子不断从  $B$  跑到  $A$ ，这样在不消耗功的前提下，使快分子聚集在  $B$  从而使  $B$  气体温度升高；慢分子聚集在  $A$  而使  $A$  气体温度降低，如果这种现象真的发生了，则热力学第二定律就无效了。“麦克斯韦妖”一直对物理学家有很大的吸引力。如果麦克斯韦的设想成立，则守在小孔旁的小妖，必须能够识别出快分子与慢分子，从而只允许快的分子从  $A$  跑到  $B$ ，慢分子从  $B$  跑到  $A$ 。1951年布里渊指出，妖精要能识别分子，首先要照亮分子，这就要输入能量，引起熵的增加，由此断定这样的妖精是存在的。从概率论的观点看来，既然要考虑到一切可能发生的情况，上述情况并非没有可能，只是其概率比起速度快的分子可以通过、速度慢的分子也可以通过的概率要小很多很多，以致在现实生活中，根本没有发生的可能。

在微观上，由于分子的热运动，物质系统的分子要从有序趋向混乱，熵的物理意义就是系统中的微观粒子热运动所引起的无序性的定量量度。从式  $S = k \ln W$  可知熵变大，意味着系统从几率较小的状态变到热力学几率较大的状态，或认为系统趋于更无序的状态，即接近于平衡的状态。熵增加原理是一切物理过程或化学过程能否自发实现的判据。

熵的概念的提出，是对科学发展一大贡献，普里高津曾说：“自那以后，研究复杂系统的倾向就继续不断。……人们的兴趣从物质转到了关系、联系和时间。”熵的概念不仅在物理学上得到深化，而且渗透到其他许多学科中，在现代新兴科学理论中，熵的概念也扮演了一个重要的角色，人们对它的认识还在不断加深。

# 分子运动论

## 一、分子运动论的早期发展

早在二千多年前,中国古代和古代希腊的一些学者就曾提出过物质是由原子组成的假说.认为万物都是由原子组成的,不同的原子组成了世界上不同的物质,而且原子是在不停地运动着.虽然这些仅是一些哲学主张,但它也影响了后来的分子运动论的发展.

十七世纪,随着近代自然科学的诞生,古代原子论的思想又得到复兴,热与物体内部粒子的运动问题也被提了出来.1658年,法国学者伽森弟提出物质是由分子构成的假设,假想分子是硬粒子,能向各个方向运动,使它们以不同形式进行结合并表现出不同的特征.他用这个假说进一步解释了固、液、气三种聚集态.他认为在固体内部,硬粒子结合得很紧密,粒子之间强大的力使它们保持着确定的规则排列;在液体内部,相距较近的粒子之间的力使它们不易分散开来;在气体中,相距很远的粒子之间不存在相互作用力,各个粒子作自由运动.1678年胡克提出,空气是由大量快速运动的粒子组成的,它们对器壁的频繁碰撞,形成了空气对器壁的压力和压强.瑞士物理学家伯努利在1738年出版的《流体动力学》一书中,进一步发展了这种学说.他从胡克的基本假设出发导出了压强与所占体积成反比的玻意耳定律,并且根据这个推导结果指出,这个定律在必须考虑分子本身所占体积的情形下,是需要修正的.这一结果第一次显示了分子运动假说的优越性.伯努利还讨论了气体压强随温度的变化,他说:“气体的压强不仅随体积的减小而增大,而且随温度的升高而增大.正如人们所熟知的,热随着内部粒子运动的加剧而增强.因此,任何体积固定的气体的压强的增大都意味着气体粒子的更剧烈的运动.”伯努利还指出,在体积不变的情况下,压强将正比于粒子速度的平方而变化,这是因为随着速度的增加,碰撞的次数和强度都同样地增加.俄国学者罗蒙诺索夫在1746年发表的《关于热和冷原因的思索》和1748年发表的《试拟建立空气弹力的理论》两篇论文中,明确提出热是分子运动的表现,在讨论气体的一些性质时,提出了气体分子运动时无规则的这个重要思想,还肯定了动量守恒原理在分子运动中的正确性.

尽管以上有许多真知灼见,但由于当时“热质说”占统治地位.热是运动的表现的观点,没有被公认,因而建立在分子无规则运动基础上的分子运动论,没有引起人们的注意,也没能得到很快地发展.

## 二、分子运动论定性理论的形成

### 1. “新原子学说”的提出

十九世纪初,随着化学原子论的确立,分子概念也被提了出来,分子无规则运动的现象也由实验所呈现出来.1803年英国化学家道尔顿通过对大气的成分、性质以及气体的扩散和混合现象的研究而提出了他的新原子学说的基本要点.他认为,一切化学元素都是由不可分割的原子组成的;各种元素的原子以其不同的形状、性质而区别,并具有特定的质量;不同元素的原子以简单整数的比例相结合而形成各种化合物的原子.当时由于“分子”概念尚未建立,道尔顿把不同原子组成的分子称为“复杂原

子”。

## 2. “分子”概念的形成

1811年意大利物理学家阿佛加德罗，进一步发展了道尔顿的原子论的思想，首次引入了“分子”的概念，并把它与原子概念相区别。他的基本观点为：在同温同压条件下，气体元素及化合物或混合物在相同体积中包含相同数目的分子。原子是参加化学反应的最小质点，而分子是游离状态下单质或化合物能独立存在的最小质点。分子是具有一定特性的物质的最小组成单位。分子由原子组成。单质的分子由相同元素的原子组成，化合物的分子由不同元素的原子组成。阿佛加德罗的分子假设在当时也没有受到重视，到了1860年，由于意大利化学家康尼查罗在一次国际会议上的热情阐述和论证，才为阿佛加德罗的学说争得了它应有的历史地位和普遍的承认，并支持了物理学中分子运动论的发展。

## 3. “布朗运动”的发现

1827年英国植物学家布朗由于长期的观察研究，导致了他在分子运动论方面的新发现。布朗开始观察一种植物花粉团粒悬浮在水面上的形态，其结果看到很多团粒在作无规则的运动：有些团粒时刻在更换位置，有些改变形态，有些还在不停地旋转……，反复实验观察之后，他作了如下记录：“我确信这种运动不是由于液体的流动所引起的，也不是由于液体的逐渐蒸发所引起的，而是属于团粒本身的运动。”为了进一步证实这种看法，布朗把观察的对象扩大到其它植物的花粉团粒上，发现存在同样的运动。布朗开始认为这种运动的原因是植物生殖器官雌雄交配的结果。但是在一次实验观察中，他偶然用捣烂已死的植物叶子的碎片，竟然也发现有同种不规则运动的存在。他再次把实验观察的对象扩展到不仅对活的和死的植物体，而且还遍及一切有机物以至烟灰、泥土、矿物质等无机物的微尘，对它们在水中的现象进行一一仔细的观察研究，结果发现，一切有机物的或无机物的、有生命的或无生命的物质的微小团粒，悬浮在静止的水面上，都会作无休止的无规则运动。从而揭开了自然界普遍存在的分子运动的奥秘。后人把布朗发现的这种悬浮在液体或气体中的宏观微粒（直径约 $1\mu\text{m}$ ，称为布朗微粒）所作的不停的无规则运动称为布朗运动。1863年有人提出这是水分子不均匀碰撞的结果，从而为分子的存在提供了一个佐证。1877年，德耳索指出这是由于微粒受到周围分子碰撞的不平衡而引起的一种起伏运动。布朗运动所显示出来的恰恰是液体中分子运动的结果，液体中分子急剧地做直线运动，但由于分子之间的不断碰撞而不断地改变方向，悬浮在液体中的微粒正是由于受到液体分子的各个方向的不断碰撞而呈现无规则的运动。分子小到不但用肉眼看不见，就是到了二十世纪三十年代后期电子显微镜的问世以后，人们所能看到的也只限于很大很大的有机分子，而从放大镜中观察到的布朗运动却是研究分子运动的极为有利的根据之一。1905年爱因斯坦从统计力学观点最终建立了布朗运动的理论，给分子运动的研究提供了理论依据。接着法国的佩兰根据爱因斯坦及他人的理论研究成果，做了多年的关于布朗运动的实验，并由此相当精确地测定了阿佛加德罗常数和分子的各个有关的数据。因此，布朗运动是微观分子运动的宏观表现，也是分子存在热运动和分子间存在空隙的有力证据。

### 三、分子运动论的复兴与发展

十九世纪前半叶，由于工业生产的需要，物理学得到了迅速的发展，分子运动论在此时也得到了复兴，进入了全面的发展时期。其中具有代表性的物理学家有赫拉伯斯、瓦特斯顿、焦耳和克伦尼希等。

在 1816—1821 年间，英国物理学家赫拉伯斯明确提出了分子运动论的一些假说。他认为，物质由坚硬的原子组成；气体的原子以很大的速度在各个方向上作直线运动；热是由原子的运动引起的，并且正比于它们原子的动量。赫拉伯斯根据以上假说，分析了装在不同体积容器内处于相同温度下的同种气体的压强，导出了气体定律，并根据他的假设定性地解释了物质的相变和扩散现象，并提出了温度与气体分子速度有关的概念。

1846 年英国物理学家瓦特斯顿提出了他的气体分子运动论理论。他认为，分子是一种弹性球，“象玻璃和象牙一样是完全弹性的。”它们在容器内的每一方向上自由地作直线运动，直到它们彼此碰撞或与器壁碰撞；在这些过程中粒子的全部活力保持不变。他推导出了理想气体定律，得到了能均分定理的一个特殊形式。

1848 年 10 月，焦耳提出了一个报告，他基于测定热的机械当量方面的实验得出“热和机械力是可以由一个转化为另一个的，因而热就是有重量的粒子的活力，或者是能产生活力的吸引或排斥的某种状态。”他还根据赫拉伯斯关于气体粒子直线运动的假设，计算了在 0 和 1 个大气压下氢粒子的速度，并得出了粒子的速度与温度的平方根成正比例的结论。

1856 年德国物理学家克伦尼希发表了《气体理论原理》的论文，提出了热是一种运动的形式。并提出了理想气体模型：分子都是弹性小球，它们在没有相互作用时作匀速直线运动，只有在发生碰撞时才发生相互作用。并根据这一模型求出了气体压强公式。

由于种种原因，赫拉伯斯、瓦特斯顿、焦耳的工作没有引起人们的重视。但克伦尼希的工作却引起了普遍的重视，大大推进了分子运动论的研究工作，使分子运动论的理论得以复兴。

### 四、分子运动论定量理论的建立

当知道热和机械运动、化学运动、电磁运动等一样也是运动的一种形式，而不是一种特殊的物质（热质）之后，人们进一步对热运动作了定量的比较系统的研究，使分子运动论得以建立起来。在分子运动论方面做出大量工作的有许多学者，其中克劳修斯、麦克斯韦、玻尔兹曼的工作尤为重要，他们是分子运动论的主要奠基者。

#### （一）克劳修斯在分子运动论方面的主要贡献

1. 首次引入了一个新的概念——统计的概念。克劳修斯在 1857 年发表的题为《论热运动形式》一文中首次引进了统计概念。他指出，单个分子的碰撞是由大量不同条件、错综复杂的因素的组合决定的，要精确确定每个分子的详尽过程是不可能的，也是无意义的，因为影响系统的宏观性质的只是大量分子运动的平均效果。统计概念指明了个别分子运动和客观现象之间的联系，因此，它是建立定量的分子运动论的基础。

2. 正确导出了玻意耳-马略特定律和盖吕·萨克定律。克劳修斯以分子所占有的空间可忽略；分子间的碰撞时间无限小；分子力的影响无限小

为出发点，借用分子的速率在各方向都相等这一简化了的统计法，推导出气体压强公式：

$$p = \frac{1}{3} nmv^2$$

式中  $n$  是单位体积内的分子数， $m$  是分子的质量， $v$  是分子的速度。

以压强公式再附以一定的条件，可以推导出玻意耳-马略特定律和盖吕·萨克定律。如果分子运动速度不变，则压强与密度成正比，这就是玻-马定律；如果密度不变，温度正比于速度的平方，则可导出盖吕·萨克定律，这就初步显示了气体分子运动论的成就。

### 3. 首次引进分子运动自由程的概念。

为了解决气体分子的巨大运动速度与缓慢扩散的矛盾，1858 年克劳修斯发表了《关于气体分子运动的平均自由程》的论文，首次引进了分子运动的平均自由程的概念。他认为，分子只在前后相邻的两次碰撞之间，才走过一段直线路程，称为分子的自由路程，由于分子之间的频繁碰撞而使路径连续曲折，所以分子在某一特定方向上的移动速度就很小了。并计算出了气体分子的平均自由程。现在公认的平均自由程公式为

$$l = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \alpha^2 n_0}$$

式中  $l$  为分子的平均自由程， $\alpha$  为分子作用球直径， $n_0$  为单位体积内的分子数。平均自由程的引入，为分子运动论提供了一个重要的物理量，它给出了分子在连续两次碰撞间所走过的距离，从而更好地描绘了分子运动的图象。

### (二) 麦克斯韦对分子运动论的主要贡献

1860 年麦克斯韦在《气体动力论的说明》一文中，首先认识到分子的速度各不相同而得到了速度分布率。麦克斯韦指出，即使在同样的温度下，气体分子的速度大小及方向都可能有许多数值，有些分子速度为零，有些分子的速度远大于其他一些分子的速度，当分子数目极大时，分子的速度按一定的统计规律分布。由此，他提出了气体分子速度分布律——麦克斯韦速度分布律。在推导过程中，他运用了三个假设条件：一是认为分子在各方向上的速度分布相同；二是速度在三维坐标上分量的分布彼此无关；三是速度分布不受外界影响。最后麦克斯韦求出：

$$f(v) = \frac{4}{a^3 \sqrt{\pi}} v^2 e^{-\frac{v^2}{a^2}}$$

这就是著名的麦克斯韦速度（速率）分布律，式中的  $a$  为最可几速度。

麦克斯韦在热学中引进了统计方法和几率的概念，这一工作也具有开创性的意义。麦克斯韦除了提出速度分布率外，还对测定分子平均自由程和分子的平均直径，对气体转移现象的理论，对气体的扩散、粘滞性等作出了贡献。

### 三、玻尔兹曼对分子运动论的主要贡献

奥地利物理学家玻尔兹曼把分子运动论理论的研究推向了高峰。玻尔兹曼在接受了麦克斯韦速度分布律的规律后，进而考虑到麦克斯韦的分布律，只反映了气体平衡态下的情况，其中没有时间因子，他试图建立起非

平衡态分布的运动方程，于是在 1868—1871 年间，他第一次考虑到重力对分子运动的影响，把麦克斯韦速度分布律推广到有外力场作用的情况，得出了粒子按能量大小分布的规律，即更加普遍的玻尔兹曼速率分布率，并用他在 1872 年提出的 H 定理加以证明。玻尔兹曼得到的气体分子在重力场中按高度分布的规律可以很好地说明大气的密度和压强随高度变化的现象。

玻尔兹曼在对热力学第二定律的统计解释中提出著名的 H 定理，并获得了宏观热力学中的熵与分子运动论中的函数 H 之间的关系式，得到了熵与几率函数 W 的表达式  $S=k\ln W$ 。找到了熵和 H 函数的联系，熵和几率函数的联系，这样熵的物理意义就清晰了。熵反映了大量分子无规则运动的程度，一个体系的大量分子只能自发地向越来越不规则的运动状态过渡。玻尔兹曼对气体分子运动论的贡献还有其他方面。

由于许多物理学家并经过几代人的共同努力，分子运动论理论终于建立起来了，它不仅揭示了宏观热过程与分子的微观运动状态之间的联系，而且表明了热是大量分子的无规则运动的表现，一个宏观系统的热力学状态是由组成该系统的大量分子的统计规律决定的。这也说明热运动和机械运动是完全不同的运动形式。单个分子的运动遵从牛顿力学规律，大量分子的运动则不服从牛顿力学规律，必须用统计的方法进行研究，它们遵从的是统计规律性。

分子运动论中，分子与原子的真实性，为后来的实验所证实；分子热运动的真实性为爱因斯坦和佩兰等对布朗运动进行理论上和实验上的研究成果所证实。到二十世纪初，分子运动论就成为无可置疑的正确理论。但随着人们对微观世界的研究，显示了分子运动论有它内在的局限性。这就促使了后来统计力学、量子力学、量子统计的形成与发展。

目前在中学物理教科书中只涉及到分子运动论的一些基本概念，这些概念可概括为：1. 宏观物体是由大量微粒——分子或原子组成的。

2. 物体内的分子在不停地运动着，这种运动是无规则的，其剧烈程度与物体的温度有关。

3. 分子之间有相互作用力。

运用分子运动论可以来解释气体、液体、固体的性质及其热现象，如物体的体积、压强和温度的关系，物质的比热，液体的表面层现象，流体中的输运过程，相平衡和相变现象等。

## 电 磁 学

### 库仑定律

库仑定律是静电学中第一个定量的基本规律，它是由法国物理学家库仑于 1785 年建立起来的。从库仑实验方案的设计，实验仪器和装备的发明与制造，实验数据的处理与实验结果的归纳都是一种比较典型的由实验归纳法来发现物理规律的范例。

#### 一、库仑以前对静电相互作用力的定量研究

十八世纪中叶以后，人们在已知同种电荷相斥和异种电荷相吸的基础上，提出了相互作用力的测量问题。当时有许多科学家进行了这方面的研



究。如 1750 年前后，埃皮努斯在实验中发现，当发生相互作用的电荷之间的距离缩短时，两者之间的吸引力或排斥力便增加。1755 年富兰克林做了绝缘金属桶实验，观察到金属导体表面不带电的事实；1766 年普利斯特利从一系列实验中证明：当中空的金属容器带电时，除了靠近开口的地方外，金属容器内表面上没有任何电荷，它对空腔内部的电荷没有作用。普利斯特利运用类比方法根据牛顿在推出万有引力定律时曾证明过的，如果引力服从平方反比定律，则均匀的球壳内物体应无引力作用，从而推理出，电荷之间的相互作用力反比于它们之间距离的平方。但这种推论毕竟不是证明，仅仅根据现象之间的类比而得出的结果，还必须经受实验检验。

1769 年英国爱丁堡大学的约翰·罗比森（1739—1801）直接用实验定量测量了两个带电小球之间的作用力。他的实验装置如图所示，两带电小球之间产生斥力，这斥力被支起的转臂受到的重力所平衡，调整支梁的角度，即可测出不同距离的斥力。罗比森假设斥

力用  $F \sim \frac{1}{r^n}$  表示，指数  $n$  不是准确为 2，而是  $n = 2 + \delta$ 。他测得  $\delta = 0.06$ ，应在误差范围内，于是他得出电力服从平方反比定律的结论。他的结果直到 1801 年才发表。

卡文迪许对两电荷间的相互作用力的研究更为系统。他研究的方法和思路是：

第一步进行理论上的推导。

1773 年卡文迪许相信引力和电力之间的相似性。他首先从理论上给予了推导。他在电力相互作用类比于牛顿球壳内的引力相互作用，他假设一个均匀的金属壳上面分布了面电荷  $\sigma$ 。如图所示，考察球壳内任一点  $A$ ，通过  $A$  点和球心  $O$  作一直线，这条直线的延长线分别于球壳交于  $C$ 、 $C'$  点，对应地取面积  $S$  和  $S'$  点，容易看出，面积  $S$  和  $S'$  正比于它们到  $A$  点距离  $\overline{CA}$ 、 $\overline{C'A}$  的平方，也就是说， $S$  和  $S'$  面上所带电量正比于它们到  $A$  点的距离的平方。若  $A$  点有一点电荷，且静电力服从平方反比律，则  $S$  和  $S'$  所带电荷分别作用在位于  $A$  点的电荷上的合力必等于零。整个球壳上均匀分布电荷时，位于球壳内任一位置的点电荷所受的总合力始终等于零。如果在该球壳内有两个或两个以上的同号电荷，它们之间的相互斥力作用迫使它们向着外壳运动，最后分布在球的外表面，所以带电金属球壳内表面不可能存在净电荷。反之，若测得金属球壳内表面不存在净电荷的话，则电力必服从平方反比律。

第二步，设计与制作实验仪器

根据以上原理，卡文迪许设计了一个由金属球壳和一个同心的金属球组成的实验装置，麦克斯韦曾在《电磁学通论》中记述了卡文迪许的实验仪器如下：卡文迪许在绝缘支架上固定一个金属内球，用一个轴连着两个木质框架，每个框架上装有一个半球壳。在框架合拢时，两个半球壳便成为一个与内球同心的绝缘球壳。内球用一根短导线与两个半球接通，短导线用一丝线系牢，以便从该装置中撤除导线而不放电。

第三步，定性实验检验内球带电情况

卡文迪许使用以上仪器，先用莱顿瓶使两个半球壳带电，然后，装上内球并与半球壳接通，且预先用验电器测出它们的电位。接着便抽动丝线

撤除导线，再撤去两个半球壳并使之放电。最后用木髓球验电器测量内球的带电情况（木髓球验电器是当时最为精密的验电器），其结果证明：内球无任何电荷。

#### 第四步，定量实验检验

卡文迪许根据斥力反比于略为偏离距离 2 次方的假设，计算内球上的电荷与半球壳上的电荷之比，发现如果这种偏离为 1/50（指方次偏离 2 的值），那么内球上的电荷就等于整个装置上电荷的 1/57。由于未检测到任何带电的迹象，表明电力与距离成反比的方次与 2 的差值不大于 0.02。

卡文迪许的结论是：电力  $F$  与距离的  $n$  次方成反比，即

$$F \propto \frac{1}{r^n} \quad n = \alpha + \delta$$

式中  $\delta = 0.02$

卡文迪许采用的这种间接测量方法由麦克斯韦作了改进，提高了测量的精确度，麦克斯韦测得不会超过 1/21600 的结论。1936 年，美国物理学家普林斯顿和劳顿利用现代科学仪器如高压低频电流发生器及电子放大器等，重复了卡文迪许的实验，证明了不会超过  $2.0 \times 10^{-9}$ ，1971 年威廉士等又把值的上限提高到  $(2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$ 。

卡文迪许的实验研究和发现是在 1773 年，这早于后来库仑实验十几年，但是，遗憾的是由于卡文迪许没能及时发表他的研究成果，因此对当时的科学界没能起到应有的作用。约在卡文迪许实验发现的一个世纪之后，即在 1879 年麦克斯韦发掘整理出版了题为“尊敬的亨利·卡文迪许的电学研究”一书，才把卡文迪许的工作公布于世。

## 二、库仑发现库仑定律的思路和方法

（一）精心设计制作库仑扭秤进行实验测量，发现同号电荷之间斥力与距离的平方成反比。

### 1. 精心设计制作库仑扭秤

库仑在不知道卡文迪许的研究工作的情况下，在十八世纪七十年代进行了一系列的静电实验研究。他详细地测定了毛发和金属丝的扭转弹性，发明了灵敏度很高的扭秤。库仑用与卡文迪许不同的方法研究了电荷间的相互作用力，他利用扭秤直接测定了两个点电荷之间的电力相互作用与距离的关系，验证了人们的猜测： $F \sim \frac{1}{r^2}$ 。

库仑扭秤的构造如图所示，在一个直径和高都是 12 英寸的玻璃圆筒 CD 上，盖有直径为 13 英寸的玻璃罩，其上钻了两个洞。中间 f 处装有一个高为 24 英寸的玻璃管，在这个玻璃管上端，装有夹有悬丝的分度头 B。悬丝为银丝，其下端悬挂着浸过蜡的麦秆 R。麦秆的一端 A 为一个小木球，另一端贴一小纸片 P，用作平衡并防止横杆的振动。大圆筒的中间有 0~360° 的分度，它的零点与顶部分度头的零点一致。当丝无扭转时，使小木球处于 0° 位置，悬丝顶端的指示为 0°。在盖板的侧洞中引入另一木球 E，球 E 大小与 A 完全一样。

### 2. 进行实验测量：

使装在麦秆 R 上的大头针带电后与球 E 接触，使球 E 带电，球 E 和球

A 互相接触，使球 A 带同号电荷，由于斥力，两球分开，库仑的实验记录如下：

测试次数	小球间角距离	悬丝扭转角
第一次	36 °	36 °
第二次	18 °	126 ° + 18 ° = 144 °
第三次	$8\frac{1}{2}$ °	$567\frac{1}{2}$ ° + $8\frac{1}{2}$ ° = $575\frac{1}{2}$ °

### 3. 分析实验数据，发现斥力反比于距离的平方

由于悬丝扭转角的大小与扭力成正比，库仑实验中，当悬丝扭转 360 ° 时，两球间的斥力是 1/340 克林，所以在上述第一次实验中，两球相距 36 °，其所产生的扭力是  $36\text{ °} = \frac{1}{3400}$  克林。在第二次试验中，两球相距 18 °，但这时测微计已经转动 126 °，所以就所产生的斥力来说，这 18 ° 等于 144 °。结果是，第二次实验中两球的距离，只等于第一次实验中两球距离的一半，可是后者的斥力却四倍于前者。在第三次实验中，悬丝扭转 567 °，而两球相距只 8.5 °，结果，全部扭力是 576 °，即四倍于第二次实验，而第三次实验中两球的距离，则比第二次实验中的距离的一半还少半度。

这三次实验的结果说明，两球带有同性电荷以后，其相互斥力，与两球距离的平方成反比。这样通过多次测试，库仑确定了同号电荷之间的斥力与距离的平方成反比的关系。

(二) 精心设计制作库仑电摆进行实验，发现异号电荷之间的引力服从平方反比关系

库仑的扭秤装置不适合研究异号电荷之间引力的规律，库仑通过探索，从力学的万有引力的一些实验中得到启发。在单摆实验中，单摆的周期为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

若重力近似万有引力，则存在

$$mg = G \frac{mM}{r^2}$$

把后式代入前式，得

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{GL}{M}} \cdot r$$

以上是万有引力遵从平方反比规律的前提下得出的必然结果。库仑设想，如果异号电荷之间的引力也服从与距离平方成反比的规律，则对于电摆也应存在

$$T \propto r$$

的结果。于是库仑设计制作了一个电摆进行实验。

库仑电摆实验装置如图，用直径为 1 英尺的铜球 G 模拟地球。铜球 G



$$\vec{f} = k \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}$$

式中  $k$  为比例系数。力的方向沿着它们连线方向，电荷同号时为斥力，异号时为引力。 $k$  的值一般由实验来测定，通常令  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$ ， $\epsilon$  为介质的介电常数。

为纪念库仑的贡献，把电量的单位命名为库仑。库仑的定义是：若导线中载有 1 安培的稳恒电流，则在 1 秒内通过导线横截面积的电量为 1 库仑。即 1 库仑=1 安培·秒。

库仑定律是通过宏观带电体的实验总结出来的。进一步研究表明，库仑定律对原子内的质子、电子等微观带电体也适用。

## 电 流

对电学的研究，在十九世纪以前尽管出现了某些定量的定律，如库仑定律，也开始了“动态”问题的研究，但基本上还是以定性研究为主，以“静态”现象的研究为主，电的研究只限定在静电的范围内，电流的发现，打开了使电学进入一个更富有成果的领域的道路。

### 一、鱼生电现象的发现

从很早时候起，人们就已经知道有几种水生动物有引起电击的能力。当莱顿瓶发明以后，人们就开始考虑莱顿瓶的放电和这些水生动物的电击是否有什么类似性或内在的联系。十八世纪中叶，乘坐一条英国船的人们带了几条具有电击能力的鱼回伦敦，于是生物学家、生理学家们就开始对它们进行研究。结果发现，只有当你用两手同时去触及鱼的头部和下部时，才会受到电击，人们就称这种鱼为电鳗或电妖鱼。后来又证明了这种鱼能被用来给莱顿瓶充电。这时人们完全相信这种电击也是一种放电现象。

### 二、“动物电”的发现

鱼生电的现象，引起了意大利生物学家伽伐尼(1737—1798)的注意，因为他当时正在研究青蛙腿的肌肉收缩现象。一次偶然的机，使他发现了“动物电”。伽伐尼的发现记载在《论在肌肉运动中的电力》一文中，他写道：“在1780年的一天，我解剖了一只青蛙，并把它放在桌上，在不远的地方有一架起电机，当我的一个助手用一把解剖刀触及青蛙腿内侧的神经时，青蛙的四肢立即剧烈地痉挛起来。”“帮助我做电学实验的另一个人回忆说，他注意到这时在起电机上发生了一个电火花，我自己当时正在从事另一件工作，但当他使我注意到这一现象时，我很愿意自己试一试，以发现其中的道理，于是我也在别人引出一个火花的同时，用刀尖去触动这一条或那一条神经，并且跟以前完全一样，同一现象又重现。”

为了进一步实验，进行观察，在可控制的条件下核实这一结果，伽伐尼又做了一个实验：用两把叉子，一个叉尖是铜的，另一个是铁的，在碰蛙腿的神经和肌肉时，每碰一下，蛙腿就立即收缩。所以伽伐尼相信，这个现象与电鳗的电击是类似的。他又想，空气中的电是否也会使青蛙腿产生同样的效应呢？于是他把蛙腿神经的一端用导线连接到一根绝缘的金属棒上，将金属棒放置在屋顶上，同时使蛙腿神经的另一端接地。他发现，在雷雨天，这条青蛙腿会不时地抽搐。

接着，伽伐尼又做了一个实验。他把解剖了的青蛙挂在铜钩上，铜钩插到青蛙的脊髓中，铜钩就挂在花园里的一个铁丝网附近。他发现，有时候当青蛙的肌肉碰到铁栏杆时，青蛙的肌肉就发生抽搐。并且，即使在晴朗的日子里，这种现象也一样发生。因此伽伐尼断定，在这种情况下蛙腿的抽搐不是雷电引起的。为了证实这个结论，伽伐尼在室内重复了这个实验。他把青蛙的脊椎神经与铜钩相连接，并把青蛙放在一块铁板上。实验表明，当铜钩一接触铁板，青蛙的肌肉就抽搐。

经过不同条件的多次实验之后，伽伐尼发现，只要青蛙的肌肉和神经由一种以上的金属所连接，并能形成一个闭合回路时，就能引起青蛙肌肉

的抽搐。由于职业的本能，他设想这是由神经传到肌肉的一种特殊电液所引起的，金属起着传导的作用，这种电后来被称为“动物电”或“伽伐尼电”。1792年，伽伐尼又简单地应用两种不同金属组成的环和蛙腿接触而使蛙腿引起痉挛，这是第一个伽伐尼电池。由于这一观点是论述生物体中的问题，而且他实验研究的目的也不正确，所以对物理学家们没有什么大的影响，所以对物理学也没有引起什么大的变化。

伽伐尼的实验公布后，人们讨论这种“动物电”的性质时有这样几种观点：

1. 认为“动物电”和莱顿瓶的放电是类似的。
2. 认为“动物电”和普通电不是一种电液。
3. 认为不应当把这一现象归之于神经系统中所包含的一种假想的液体上去。伏打就是持这种观点的人。

### 三、伏打的实验与思考

意大利物理学家伏打（1745—1827）起初也接受了伽伐尼的观点，并称赞这是科学发展史上一项具有划时代意义的伟大发现，但在进一步的研究中，他很快就将这一效应的物理因素放到了首要地位。伏打在重复了伽伐尼的实验以后，就提出了疑问：“如果通过青蛙肌肉的不是‘动物电’，而是用某种已知的方法获得的电，那么青蛙的肌肉是否也抽搐？”他又再次做实验，结果发现，象在伽伐尼实验中所看到的情况一样，青蛙的肌肉同样也会发生抽搐。完成了这些实验研究之后，伏打得出结论：青蛙只是象一台仪器那样记录了电荷的通过，不存在任何特殊的“动物电”。

### 四、伏打的“金属电”理论

伏打在实验后，不同意“动物电”的说法，那么自然会提出：为什么在伽伐尼的实验中，青蛙的肌肉会记录到有电荷通过呢？在这种情况下电是从那儿来的呢？他在进一步的实验中发现，当用一块金币和一块银币顶住舌头，再用导线将它们连接起来时，舌头感到了苦味。他还将两种金属连接起来，一端含在嘴里，一端接触眼皮上部，在接触的瞬间产生了亮光的感觉。根据这些实验结果，伏打假设，当两种不同的金属相接触时就会产生电，从而提出了所谓“金属电”的理论。实际上，伽伐尼也曾注意到，青蛙肌肉抽搐的程度随构成回路的金属种类不同而不同。但伽伐尼却没有认真对待这一现象，也未曾加以分析和认真思考，而伏打却从这一现象中看到了建立新理论的可能性。

伏打认为，在每一种金属中都含有电液体，如果金属不带电，则其中的电液体处于静止状态，因而也不显示自己的存在。如果把两种不同的金属连接起来，则它们内部的电平衡被破坏，电液体就要运动。某一定量的电液体从一种金属转移到另一种金属，使之重新建立平衡。其结果就使两种金属都呈带电状态，一种金属带正电，另一种金属带负电。伏打的这种想法得到了实验验证。他成功地表明，当两种金属直接接触时，其中一种金属确实带正电，而另一种金属则带负电。伏打就这样发现了所谓的接触电势差。接着伏打做了这样一个实验，在固定于普通验电器的铜盘上，放置用另一种金属制成的、有键柄的同样的圆盘以代替小球，如图所示。两个圆盘重叠时，则许多地方相互接触。当伏打提起上面的圆盘，验电器上的

小薄片便明显地张开。伏打认为这是由于两个圆盘接触时，它们之间出现了“电势差”，当提起上面圆盘时，由圆盘组成的电容器的电容量减少，所以其间的电势差也就增加了，表现为验电器上小薄片明显地张开。这验证了不同金属接触产生“电势差”的假设。伏打称这种电为“金属电”或“接触电”。

伏打的“接触电”还不能满意地解释伽伐尼实验。事实上，当两种金属导线组成闭合电路时，两个不同的接触点将产生相反的“电势差”，因而，不可能使回路中有恒定的电荷流动。伏打注意到伽伐尼实验回路中还有青蛙的肌肉存在。为此，他指出导体可以分成两大类：第一类导体是金属和固体；第二类导体是液体。为了解释伽伐尼实验，他又提出了附加的假设：只有第一类导体之间的接触才会产生电势差。这样，两种金属的一端产生“电势差”，而与第二类导体接触的一端并不产生“电势差”，肌肉仅仅是连接电路的导线。由金属接触而遭破坏的电液体平衡通过肌肉而恢复电平衡。于是，电平衡的不断破坏和恢复，使回路中始终有电液体在流动。

## 五、伏打电堆的发明

伏打对伽伐尼实验的解释虽然是不全面的，但是，这促使伏打产生了制造一种电流电源的想法。不久，伏打把大量铜圆片和铁或镀锌的圆片交替放置，中间再用一层层曾浸过盐水的纸片或布片隔开，制成了一种后人称之为“伏打电堆”的装置，用以产生持续电流。伏打电堆是我们今天用于照明和许多其他设备上的现代电池的雏形。1800年3月20日，伏打从科摩写信给当时国际上科学思想交流的中心——英国伦敦皇家学会，公布了他的发明。他在信中写道：“……是的，我向各位报告的这种仪器，无疑会使你们感到惊奇，它只是许多良导体按一定顺序排列起来的集合，有三十片、四十片、六十片或更多的铜片，用银片则更好，每一片上都镀上锡，或者最好是镀上锌，片与片之间隔以一层水，或者其他比普通水导电性更好的液体，如盐水、碱水等。也可以使用在这些液体中充分浸泡过的硬纸板或皮革等等。这些夹层插在一对对或一组组不同的金属对之间，交替放置的顺序总是不变，这就是我的新仪器的全部结构。我说过，这是模仿莱顿瓶或电池的效用而制成的，可以产生和它们同样的电击。诚然，它与上述电池高度充电时的能力差不多，就放电时所能产生的力、爆炸的声响、火花的大小和放电的距离来说，它只相当于一个容量很大的而只充电到很低程度的电池。但是除此之外，它的优点和效能都是这些电池无法与之相比的，因为它不必像这些电池那样要靠外界的电来预先充电，只要我们一碰它，它就能发出电击，而不管碰它的次数是多么频繁。”

伏打电堆的发明为人类获得比较稳定的持续电流提供了电源，使电学从对静电的研究进入到对动电的研究，导致了电化学、电磁学等一系列重大的科学发现。伏打电堆是人类制造的第一个直流电源，但当时对伏打电堆的工作原理的解释是错误的，在它发明后不久，某些科学家就提出了这一点。

关于伽伐尼电流产生的原因，伏打把它归结于不同金属的接触。按照伏打的理论，伏打电堆在工作期间不发生任何变化。但电流沿导线流动，使它发热，可以使莱顿瓶充电……。可是，伏打电堆本身在完成这些工作



的同时却不发生任何变化，这意味着什么呢？这意味着出现了永动机！永动机就是本身不发生变化，而使周围其它物体发生变化的一种不现实的想法。到十八世纪末，科学界已经广泛地承认不可能存在永动机。所以，有许多科学家都否定伏打关于伏打电堆工作原理的理论。意大利的法布隆尼、德国的李特尔分别于 1796 年和 1799 年提出了“化学说”，认为伽伐尼电流来源于电池中的化学反应。1800 年英国的尼科尔逊和卡利斯尔将连接电堆两极的导线浸入水中，在导线上分别析出了氢和氧，从而认识到氢和氧是水被电解的产物，并且认为电池内也应有类似的化学反应。英国化学家戴维也从同一年开始了关于电解的定量研究。他发现了电池的电动势与电解析出物的质量成正比，由此看出化学力与电力是有联系的。1834 年法拉第在电解研究中得到的电化学当量定理，1887 年尼乌斯提出的电离理论，都支持了化学说。现在我们把电解看成是伽伐尼电流产生的原因，电池中仅仅发生了能量的转换。

## 六、电动势、电流、电流强度的现代定义

**电动势：**自从伏打发明第一个电池以后，人们又发明了多种将其他形式的能量转化为电能的装置，如化学电池、温差电池、太阳能电池、原子电池等。为了说明不同的电源形成电流的能力不同，而引进电动势的概念。电动势是指电源内部非静电力将单位正电荷从电源负极移至正极所做的功。常用符号  $\mathcal{E}$  表示。设非静电力将正电荷  $q$  从电源负极移至正极所做的功为  $W$ ，则电动势为  $\mathcal{E} = \frac{W}{q}$ 。由于非静电力所做的功等于电源内其它形式的能量转移为电能的值，因此也可把电动势理解为电路中因其他形式的能量转换为电能所引起的电势差。电池的电动势等于外电路断路时电池两极间的电势差值。为纪念伏打对电学的贡献，后人采用伏特作为电动势、电压的国际单位，简称伏，国际符号： $V$ 。

**电流：**电路中的电流是由电源形成的，如图所示。由于电源对电荷做功的作用，正电荷将被迫沿着以  $I$  标明的箭头方向运动。在电源内非静电力迫使正电荷由低电位（负极）移动到高电位（正极）即在电池中化学能或其他形式能转换为电能，然后在电源的外部电路中，在静电力作用下，正电荷从高电位移到低电位，形成闭合电流  $I$ 。所以概括地说：电荷作定向宏观移动形成电流。

**电流强度：**为了描述电流的强弱而引入电流强度这一物理量。它表示在单位时间内通过导体任一横截面积的电量。常用符号  $I$  表示。若在时刻  $t$  至  $t + \Delta t$  时间内，通过导体任一横截面的

电量为  $q$ ，则时刻  $t$  通过任一横截面积的电流强度  $I(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$ 。

电流强度是标量，只能描述导体中通过某一横截面电流的整体特性。利用电流的磁效应、热效应和化学效应可测定电流强度。量度电流强度的仪表有电流表和安培表等。单位为  $A$ 。

## 欧姆定律

欧姆定律以简明的形式，清晰的概念描述了电路中电流强度、电压和电阻的相互关系。欧姆当初在创立欧姆定律的过程中并非一帆风顺。他曾为挑选哪些物理量作为电路定律的基本量，以及实验仪器的制作与选择、实验方案的设计以及实验数据的处理归纳等方面都付出过大量的创造性劳动。更为可贵的是他并没有停留在经验定律的阶段，而是通过理论推导进一步加深了对定律的深刻认识。欧姆发现欧姆定律的思路与方法大致如下：

### 一、确定研究方案，自制测量仪器

在欧姆着手开拓电路定律这块处女地时，电流强度、电势差（包含电动势的含义）和电阻等概念都尚未提出，更谈不上有现成的测量仪器和实验方案。但是其它物理学家的的工作所提供的信息，一直在启发着欧姆的研究，并使欧姆从中得到正面和反面的教益。欧姆首先确定关于电路的实验研究方案是探讨电流产生的电磁力的衰减与导线长度的关系。为了测量电流强度（电磁力），欧姆独创地应用库仑的方法制造了扭力秤。他把导线沿子午线方向放置，在导线上方放一用线悬挂着的磁针，当导线中有电流流过时，磁针就发生偏转，因此用磁针偏转的角度就可以测出电流的强度。

### 二、欧姆研究不同金属导线的导电率

欧姆研究了其他科学家有关金属导电的研究成果。英国科学家戴维曾研究过金属导电，他得出，金属的导电性与由这种金属制成的导线在单位长度上的质量成正比。1825年，法国物理学家贝克勒耳（1788—1878）指出，同一金属的各种导线的导电性相等的条件是它们的长度之比等于它们的横截面积之比。同年英国人巴劳（1776—1862）发现，在同一电源条件下，通过导线的电流强度与导线长度平方根成反比，与导线直径成正比。欧姆比较了这些结论都各不相同，于是欧姆决心进行自己的实验研究，以阐明金属导线的导电性质。

欧姆在实验构思时，曾特别注意到巴林的发现，电流在整条导线上是不变的。欧姆认为，在同一电源下，电路中电流恒定就意味着导线导电的不变性，于是他着手拉制各种不同金属的导线，使它们有相同的线径，将这些线径相同的导线分别接入电路，如果保持扭力秤的偏转角恒定，则所用导线的长度就必然反映各种金属导体的相对电导率。他以铜的电导率为基准，定为1000，实验测得其它金属的电导率为：金574，银356，锌333，黄铜280，铁174，铂771，锡118，铅97，……。欧姆在1825年7月发表了上述结果。欧姆的这次实验较为粗糙，一个明显的错误是银的电导率低于铜。后来，欧姆发现这个错误是因为拉制的银导线有一层油膜，使实际的线径太小的缘故。

### 三、电阻定律的发现

欧姆进一步用同样材料但不同粗细的各种导线做实验，结果得到：如果导线的长度与横截面积成正比，则电导率相等。这样，欧姆就得出了电阻定律。在今天的教材中，电阻是指描述电路中两点间在一定电压下决定

电流强度的一个物理量。一般用  $R$  表示。电阻在数值上等于物质两端的电压  $V$  与通过物质的电流强度  $I$  之比。即  $R = \frac{V}{I}$

不同物质的电阻，差别很大。金属导体的电阻最小。绝缘体的电阻最大，半导体的电阻介于导体和绝缘体之间。导体的电阻大小与导体的材料和几何形状有关。对于由一定材料制成的横截面积均匀的导体，其电阻  $R$  与其长度  $l$  成正比，与其横截面积  $s$  成反比。即

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

式中系数  $\rho$  称为电阻率，由导体材料决定，这就是现代形式的电阻定律。

电阻随温度的变化而变化。金属导体的电阻随温度的升高而线性增加，半导体的电阻随温度的升高而按指数规律减小。在国际单位制中，为纪念欧姆，将电阻的单位命名为欧姆，常以符号  $\Omega$  表示。1 欧姆定为电势差为 1 伏特时，恰好通过 1 安培电流的电阻。

欧姆通过电阻定律的发现，使他进一步认识到导体的电阻是电路方程中一个必要的基本量，这样，欧姆在以后的实验设计中就把电阻列为观察量，以便列入电路方程。

#### 四、精心设计实验进行观察测量

在欧姆的实验中，起初他使用伏打电堆作为电源进行实验，由于电流不稳定，未能得到理想的效果。后来他接受波根道夫（1796—1877）的建议，1822 年改用由德国物理学家塞贝克（1780—1831）发现的温差电现象，用铜和铋制成了一个温差电池作电源，才保证了电流的稳定性。但是，如何测定电流强度，这是当时尚未解决的一个难题。开始时欧姆想用电流的热效应，通过热胀冷缩来测定电流强度，但这种方法很难得到精确的结果。后来他通过设计一个电流扭秤，才得到了理想的结果。下面是欧姆实验的装置结构：

图(1)是欧姆设计的温差电源的结构。abb'a' 是用铋铸成的  $\square$  形框架。铋框架每条腿上铆接铜片 abcd 和 a'b'c'd'。铜片也弯成  $\square$  形。铜框架的另一只腿浸在水银盆 m、m' 中。ab 端插入保持沸腾的水中，a'b' 插入冰水混合物中，以稳定温差电池两端的温差。m、m' 即为温差电池的输出端。扭力秤的磁针与铜片 bc 平行，以显示电路电流的强弱。

图(2)是欧姆 1826 年的实验装置。1 为扭力秤玻璃罩，上部为扭力秤调零和微调装置。2 为扭力秤磁针，3 是铋框架，4 为铜片框架，5 为观察刻度目镜。m、m' 为水银盂。

欧姆利用上面的实验装置，选用了八根粗细相同而长度分别为 2、4、6、10、18、34、66、130 英寸的铜导线，编为 1、2、3、4、5、6、7、8 号，顺次将它们接入外电路进行实验，测出每一次磁针的扭转角  $X$ ，从而得出了一组数据，下面是 1 月 8 日和 11 日的实验数据。

观察日期	每组 实验 次序	不同导体接入时的扭转 X							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1月8日	I	$326\frac{3}{4}$	$300\frac{3}{4}$	$277\frac{1}{4}$	$238\frac{1}{4}$	$190\frac{3}{4}$	$133\frac{1}{4}$	$83\frac{1}{4}$	$48\frac{1}{2}$
1月11日	II	$311\frac{1}{4}$	287	267	$230\frac{1}{4}$	$183\frac{1}{2}$	$129\frac{1}{4}$	80	46
	III	307	284	$263\frac{3}{4}$	$226\frac{1}{4}$	181	$128\frac{3}{4}$	79	$44\frac{1}{2}$
1月15日	IV	305	$281\frac{1}{2}$	259	224	$178\frac{1}{2}$	$124\frac{3}{4}$	79	$44\frac{1}{2}$
	V	305	282	$258\frac{1}{2}$	$223\frac{1}{2}$	178	$124\frac{3}{4}$	78	44

1月8日测量的数据比11日和15日略为偏高，欧姆认为是由于8日的气温很低，他把热电偶的冷端放在窗台上，其实际温度很可能低于零度，即是说温差电池的温度差略高于100，造成电动势的偏高，因而磁针读出的读数略大。

### 五、分析处理数据，概括总结出经验公式

欧姆根据他五次测得的八根导线的的数据，确定给出了如下关系式：

$$X = \frac{a}{b + x} \quad (1)$$

式中：X表示电流的电磁力，根据毕奥——萨伐尔定律，电磁力与电流强度成正比，所以X实际上是对应于电流强度，a和b为电路的两个参数；x表示实验导线的长度。欧姆认为b是由电路的不变部分（除实验导线以外的电路）来决定的，它是不变部分的当量长度；a是决定于温差电池的温度差（亦即温差电动势）。上述实验中b是相同的，a值分别为7285，6905，6885，6800。他经过计算，结果与实验相符。在(1)式中，实际上X对应于电流强度，a对应于电源电动势，X和b分别对应于外电路的电阻和电源的内电阻。上式实际上就是我们今天所说的全电路欧姆定律。欧姆在以后的实验中，使用不同尺寸的黄铜线，并把温差电池两端的温度加以改变，多次重复上述实验，都得到了与上式一致的结果，从而证明了这一公式的正确性。欧姆经过如此反复实验、推理、计算，从数据的归纳到公式的演绎，最后确立了后来以他的名字命名的欧姆定律。

### 六、运用数学方法，从理论上论证欧姆定律

欧姆定律不仅是一个实验定律，用数学方法也能获得论证。1827年欧姆出版了著名的《伽伐尼电路的数学研究》一书，对他所发现的重要定律从理论上作出了论证，并提出了欧姆定律的另一形式：

$$X = KS(a/l) \quad (2)$$

式中S表示导线的横截面积，K表示电导率，a表示导线两端的电势差，如果用当量长度即电阻  $l' = l/Ks$  代入上式即得

$$X = a/l' \quad (3)$$

欧姆明确表述：在伽伐尼电路中，电流的大小与总电压成正比，与电路的总电阻成反比。这就是部分电路欧姆定律，是欧姆经常使用的形式。

欧姆在电路研究中充分运用了科学实验的可控性，从而分别弄清了电

阻、电动势与电流强度的含义，并进一步定义了电动势

$$V_1 - V_2 = a \quad (4)$$

即不同金属的接触电动势  $a$  等于它们相互接触时产生的电势差。比较严格的说法，就是在电路电流趋于零的情况下，电源电动势等于它的路端电压。

### 七、运用类比方法，推导出欧姆定律的微分形式

欧姆运用类比方法，把电与热进行类比，从而提出了电荷从导体一端传到另一端的传递量与两端间的电势差的关系为：

$$dQ = KS \frac{dV}{dx} dt \quad (5)$$

此式与热扩散公式完全类同。式中  $dV/dx$  表示电势梯度， $dQ$  表示在时间  $dt$  内通过导线的电量。由此式可立即得到电流强度  $I$  与电流密度  $j$  为：

$$I = KS \frac{dV}{dx} \quad (6)$$

$$j = K \frac{dV}{dx} \quad (7)$$

(7)式即为欧姆定律的微分形式，对于一段均匀导体，则可推导出部分电路欧姆定律。

### 八、欧姆定律发现以后

欧姆定律发现以后，并没有立即得到普遍承认，其主要原因是：(1)当时的物理学家重复欧姆的实验时，用的是化学电源，不能得到与欧姆同样的结论；(2)欧姆定律是关于伽伐尼电路的定律，它是否普适一切电学电路还有待于进一步证明；(3)当时德国物理学界的中心课题是接触电动势的起源，人们无暇系统地研究欧姆的电路理论。在当时，斯威格自始至终是欧姆的支持者，欧姆的大部分论文都是发表在他主编的《化学和物理学杂志》上。费希纳(1801—1887)在教科书中最先采用了欧姆定律，并给予了高度评价。欧姆的工作也受到了亨利和惠斯通的高度称赞。惠斯通根据英国科学家克里斯蒂(1785—1865)提出的电桥原理，运用欧姆定律使之系统化、理论化，从而发明了惠斯通电桥。1841年欧姆获得英国皇家学会授予的柯普勒奖章，这才引起德国科学界和政府对于欧姆的关注。1849年他被聘为慕尼黑大学非常任教授。1852年才转为正式教授。1854年去逝。1845年德国物理学家基尔霍夫(1824—1887)扩展了欧姆理论，提出了复杂电路的计算定律在分支电流关系中，基尔霍夫引入了电荷守恒的思想。

### 九、欧姆定律的现代表述

欧姆定律是电学中基本定律之一。它表征稳恒条件下的电流、电压与电阻间的依存关系。它是欧姆在1827年所发现的。欧姆定律现代表示为：

#### (1)部分电路的欧姆定律

通过部分导体的电流强度和导体两端的电压成正比，与导体电阻成反比。即：

$$I = \frac{V}{R}$$

式中  $I$  为电流强度,  $V$  为电压,  $R$  为电阻.

(2) 全电路的欧姆定律

通过闭合电路的电流, 等于电路中电源电动势 除以电路中的总电阻 (外电阻  $R$  与电源内阻  $r$  之和) 即

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

(3) 欧姆定律的微分形式

欧姆定律的微分形式表示为

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

式中  $\vec{j}$  为电流密度、 $\vec{E}$  为电场强度,  $\sigma$  为导体的电导率. 其微分形式表示空间任一点处物理量  $\vec{j}$ 、 $\sigma$ 、 $\vec{E}$  之间的关系, 更为细致地描述导体的导电规律. 它适用于稳恒情况及非稳恒情况.

(4) 交流电路中的欧姆定律

在交流电路中, 交流电路欧姆定律形式为

$$Z = \frac{\dot{V}}{\dot{I}}$$

式中  $Z$  为一段电阻的阻抗,  $\dot{V}$  和  $\dot{I}$  分别为该段电路的复数电压和复数电流.

## 电流的磁效应

人们很早就注意到电现象和磁现象的相似性，十八世纪八十年代，传统派库仑曾经论证过电和磁是物质的两个完全不同的方面，它们的作用定律都遵从平方反比规律，这在数学上很相似，但它们的性质却完全不同，要使电和磁之间相互转换似乎是不可思议的，因而根本不去寻找电磁效应。另一些人则根据电与磁的相似性，认为电与磁这两种现象之间存在着某种联系。尤其是电池的发明，更激发了一些人去发现这种关系的尝试。紫外线的发现者、德国科学家李特尔（1776—1810）认为，化学现象、电、磁之间具有某种关联，并亲自做了一些实验，其后到1805年间，一些人做了同样的实验，结果没有看到预期的现象，于是物理学家不再关心这个问题了。这个时期，物理学家所关注的主要是电流的化学作用。在上述的一些早期实验中意大利人罗马诺西（1761—1835）在1802年寻找伏打电池组对磁针的影响时，曾无意识地观察到电流的磁效应，但由于当时人们在寻求电池组的两极和磁铁两极之间的类似性时，仅仅预料到电池组和磁铁之间存在着静力作用。囿于这种先入之见，罗马诺西没有意识到自己所观察到的事实的意义，也不打算进一步深入研究它。这样，历史的重任就落在丹麦物理学家奥斯特的肩上。

奥斯特信仰康德的哲学。康德认为，人只能体验到两种基本力，即吸引和排斥，其它电、热、光都是这两种基本力在不同的条件下的变形。奥斯特为康德“基本力”的设想所激励，总是思考着如何通过实验来证明康德的预见。他坚信自然力的统一。1803年奥斯特曾说过，我们的物理学将不再是关于运动、热、空气、光、电、磁以及我们所知道的任何其它现象的零散的汇总，而我们将把整个宇宙容纳在一个体系中。1809年奥斯特又进行了“磁针的变化和倾角与各种物理力之间的关系”的研究工作。1812年奥斯特在柏林发表一篇“关于新发现的化学自然定律的看法”，他提出进行电流实验，以便弄清楚电在其潜在状态中是否对磁具有作用的问题。1813年他明确预言了电流的磁效应，但是当时他认为磁效应不会沿着电流方向发生，因而实验中他总是把导线置于磁针垂直的方向上，结果都失败了。在1818年至1819年间奥斯特在一直寻找电与磁的关系。1820年奥斯特考虑到前人沿电流方向放置磁针企图发现磁效应的失败，又联想到热和光是向四周散发的，也许电流的磁效应也存在同样的规律。所以他认为，实验成功的关键，可能在很大程度上决定于磁针放置的位置。

1820年7月21日在哥本哈根出版的一本拉丁文小册子《电流对磁针的作用的实验》上记载了奥斯特成功地发现电流的磁效应。在实验中奥斯特发现载流导体周围产生了一个环形磁场。他将一枚小磁针靠近一根通有电流的铁丝时，小磁针发生了偏转。当他将磁针放在通电铁丝的上方时，磁针的N极指向一个方向，但在磁针放到通有电流铁丝的下方时，小磁针N极指向另外一个方向。他在小册子中曾写到：在自由悬挂着的磁针上方，由北向南流动的伽伐尼电，把磁针的北端推向东，而在相反的方向上，在磁针下面流过的伽伐尼电，把磁针的北端推向西。奥斯特进一步做过许多实验，如用铂、金、银、黄铜、铁、铅、镉和汞作导线，通电流时都能使磁针偏转。他又在导线与磁针之间放置玻璃、木块、水、树脂和石头等，

结果发现，都不影响磁针的偏转；但用黄铜针、玻璃针和橡皮针代替磁针时，却不发生偏转。这样就确定了电流的磁效应。

奥斯特的发现首先说明了理论对实验的指导作用，不仅仅是实验者已有的物理学知识，也包括哲学思想对实验探索的指导意义。在当时多数物理学家的注意力集中在伽伐尼电池的研究时，奥斯特则以他深邃的洞察力和想象力开辟了电与磁联系的新领域。使吉尔伯特等提出电和磁是两种绝然无关的现象的观点两个世纪后被奥斯特的发现所打破。使历来认为两个无关的现象——电和磁建立了联系。这就为以后电磁场理论的发展奠定了基础，开创了电磁学研究的新纪元。奥斯特的发现是公布于1820年7月用拉丁语写出的小册子上，紧接着它很快就被译成德语、英语、法语等公开发表了。这一发现立即在科学家中间引起了极大的反响，使许多人立即开始着手研究这个现象，取得了许多重大的成果。如奥斯特发现电流磁效应后的几个月中，德国的斯威格（1779—1857）重复做了奥斯特的实验，让一根导线在罗盘上方平行于磁针，通电后记下磁针偏转的角度，然后把导线移到罗盘下方通过同样大小的反向电流，发现磁针也偏同样的角度。于是他在罗盘上下同时通过大小相等方向相反的电流，发现磁针的偏转角增加了一倍，进而把导线往罗盘上缠绕，每绕一圈，偏转角就增加一倍。斯威格把这个绕以导线的罗盘起名为“放大器”。这就是最初的电流计。以后，波根多夫（1796—1877）指出，这种电流计的线圈匝数增加到某一极限后，其放大倍数将不再与匝数成正比。这显然是导线电阻增长引起电流递减所产生的结果，这是欧姆定律等内容才能说明的问题。

斯威格的罗盘放大器一发表，马上被英国物理学家威廉·汤姆逊改进为电报接收器。他用生丝吊着磁针，平时恒指南北，在磁针外圈绕着导线，一旦有电讯到来，磁针偏转，生丝上的小镜反射的光点就移动。汤姆逊的电流计类似于今天的光点式电流计。只不过用可动的轻绕组代替了磁针，用强大的永磁体代替天然的地磁场。电流计的出现，为电磁研究和技术应用提供了精密和灵敏的测量仪器。

在奥斯特发现电流磁效应的第二年，英国化学家戴维进一步发现，凡是在铁和钢块外面绕上通电的金属导线时，该铁块或钢块就变成了电磁铁，电磁铁很快便被用于研究与技术中。

奥斯特的发现公布于世后，如毕奥、萨伐尔、安培、法拉弟第一批物理学家迅速在电磁学这块处女地上开垦，取得了丰硕的成果。电磁感应定律

### 一、法拉弟创造性地提出“磁能生电”的课题

1820年丹麦物理学家奥斯特发现了电流的磁效应，在物理学界引起了强烈的反响。人们长期认为电与磁是两种性质不同的东西，彼此没有关系。由于奥斯特的发现，人们看到了电与磁之间存在着某种联系。法拉弟在称赞奥斯特的工时说：“它猛然打开了一个科学领域的大门，那里过去是一片黑暗，如今它充满了光明。”随后，许多国家的科学家纷纷做各种实验，力图搞清电与磁的关系，尤其是法国科学家安培在这方面做了许多工作。他在了解了奥斯特的发现后，立即就提出了这样的思想：既然磁与磁之间、磁体与电流之间有作用力，那么电流之间是否也有作用呢？



1820年9月30日，在奥斯特实验传到巴黎的一个星期后，安培就向科学院报告，两根平行载流导体，如果电流方向相同，就互相吸引；如果方向相反就互相排斥。不久安培又发现通电的螺线管具有和磁相同的作用。他将导线绕成一个螺线管并通过电流，这时，旁边小磁针的转动表明螺线管的一端相当于北极，另一端相当于南极。若改变电流的方向，极性也随之改变。两个通电的螺线管之间，也遵循同性磁极相斥，异性磁极相吸的规律，同磁铁之间的相互作用完全一样。这说明电流与磁体之间、电流与电流之间的作用，同磁体与磁体之间的作用，具有相同的性质。在这些实验的基础上，安培于1822年提出了关于磁的本质的假说，认为一切磁现象均起源于电流，即分子电流假说。他说磁就是电流或运动中的电荷；磁体的相互作用可归结为电流的相互作用，这种作用力称为“电动力”。因此，人们把他在1820年—1827年间提出的理论称为电动力学。安培对电学发展的贡献是杰出的，所以后来麦克斯韦称他为“电学中的牛顿”。安培曾试图通过磁的作用在导线中形成电流，但未能成功。

当法拉第了解到奥斯特的发现后，也立即做了许多实验。1821年圣诞节的早晨，法拉第第一次表演了磁针围绕电流的转动，完成了沃拉斯顿在1820年曾经做过但没有成功的实验，从而成功地证明了电磁力是一种旋转力。在此之前，他还花了好几个月的时间调研了有关电磁学研究的文献，重复了别人做过的实验，最后写出了一篇《电磁学发展历史概况》，这就成为他的电学研究的起点。

通过对电磁学发展历史概况的考察，使法拉第敏锐地意识到这一领域是科学的前沿、生长点，他决心另辟新径开创新局面。他首先想到磁生电的问题。1822年他在笔记里写到：“磁能生电”吗？这是一个富有创造性的课题，正如爱因斯坦所说：它“标志着科学的真正进步”这个创造性课题的提出，法拉第一方面是受奥斯特发现的启发，另一方面也是他从小所受教育，所进行的工作影响的必然结果。在法拉第看来，既然自然力是统一的，任何一种物理关系即因果关系，都应存在着它的反作用，即对称性。由A能产生B，亦必然能由B产生A。既然静电能感应静电、磁能感生磁，电流能产生磁，那么依此类推，磁也应能产生电流，电流也应能产生电流。这是在自然界和谐统一的自然图景上，用类比方法产生的课题。法拉第之所以在头脑中具有自然界和谐统一的图景，主要是当时科学新成就的影响。当时自然科学的发展已提供了自然界是和谐统一的认识，尤其是电学的发展已揭示了电与化学的关系、电的热效应和光效应，以及电流的磁效应等等的联系。他就是在这种时代背景下开始接受教育和训练的。他在学徒时期，就深受自然力统一思想的影响，后来当他在1813年以助手身份随戴维到欧洲大陆作学术考察时，又亲眼目睹欧洲那些科学大师们也正是这样思考和研究问题的，他们都是力图从不同侧面揭示自然界的统一。同时，法拉第自己的实践经验越多，实验研究越多，获得的例证也越多，相信自然界和谐统一的信念也越坚定，正是在这种思想认识上，再加上奥斯特发现的触动和启发，使他产生了“磁能生电”的研究课题，并立志为此而努力探索。

## 二、持之以恒的实验探索

在形成“磁能生电”的研究课题后，法拉第持之以恒的实验探索为电

磁学的研究铺开了一条广阔的道路。正如他的传记作家克劳塞所形容的那样，法拉第“他从象庇斯伽山那样的高处，下眺自然界中还没有为人征服的方面拿出预言家的眼光，画出应该遵循的途径。他使后继的人得到一种线索，可以领导他们在那荆棘丛生的知识路途中安全渡过。”

法拉第在开始电学实验前，在他对电磁学发展进行历史调研过程中，对电磁学发展中存在哪些未解决的、或可以研究的问题是有较广泛的考虑的。如1821年电磁转动研究，9月3日—10日通电导线绕磁铁转；12月21日—25日通电导线绕地磁转动；1822年电解水和电流对偏振光的影响的研究；1823年磁铁绕通电导线转；1824、1825、1828年对电磁感应的研究；1828年研究光谱与电流的作用；1831年5月研究热电作用等。这些研究都集中在电、磁、化学、光和热等的关系，遗憾的是结果几乎都是否定的，但是他还是确信自然力的统一性和可转换性，继续坚持实验研究。可以说，深信自然力的统一性，不可破灭性和可转化性的观念是法拉第一切工作的出发点，他的这一思想不仅指导了他自己已经完成的工作，同时也引导他自己的研究方向，从而在实验失败面前不动摇。如在《电学实验研究》的第二十四章中，记载了他探索电力和重力关系的计划和设想，并设计了有关实验，但结果没有成功。法拉第写道：“当我们的实验就此结束时，实验结果还是否定的，虽然如此，我们仍深信在重力和电之间存在着联系而决不因此动摇。”法拉第在“磁能生电”的研究中也是这样，在失败面前还继续他的实验研究。如《法拉第日记》中关于电磁感应的几段记载：

“1824年12月28日，指望流过一导线的电磁流在向导线靠近的强力磁极的影响下，会在导线的其他部分显示出反作用的某种效应——但未能看到任何这类效应。实验采用的是功率由2对至30对4极板的电池。电路分别做成长、短的，用中等的铜线或很纯的银线，把磁针放入电流计内，磁极放入一螺线管内，等等，尽管磁极强的使导线的弯处在它的作用下绕过它，但磁铁对电流却似乎毫无影响，因为若有影响，则电流强度的变动将会通过放在导线较远部分旁边的磁针显示出来。”

“1825年11月28日，伏打电池连接导线的感应实验”都无效应。

“1828年4月22日，用清洁铜线做一个环，把端点焊死，用线把它同一段导线固定在一起，让一个强力条形磁铁极穿过环，用其他磁铁移近导线，无论放在何处都观察不到什么效应。”

……

从1822年至1831年的十年中，法拉第为了完成“磁能生电”的设想，做了无数次实验，在电磁感应现象的探索上常常以失败告终，在他的实验日记中，常记有“失败”“没有结果”“无任何效应”的字样。这些实验的设计与构思常常是很巧妙的，他通过类比方法在传统观念范围内，凡可能影响电磁相互作用的因素他几乎都考虑到了，所以他时而改变电流或磁铁的强度，时而改变导线的材料、粗细、长度、形状和相对位置、耦合关系，以及测量的仪器精确度等等，其设计思想不能说不全面、不严密、不精细了，但为什么仍一再失败呢？今天我们会看到，其失败的主要原因还在于受到已有知识的局限，缺乏正确理论的指导。在法拉第时代，过去已知的静电感应、磁铁感应以及电流的磁效应，都是一种静态和稳态关系，如法拉第在形成“磁能生电”课题时就设想，因为从伏打电池中产生的电

流价格昂贵，如果磁能生电，地球本身就是一个大磁体，就可以源源不断地产生电力了。究竟如何使磁体在导线中产生电流，他当时并不清楚。实际上他认为磁体本身就可以源源不断地产生电，这种想法颇有点象第二类永动机的设计。在这样的一个思想前提下，法拉第在实验设计和实验观察上一心只注意寻找静态的稳定的感生电流，而忽视了对动态过程的观察，以致未注意到拉闸、合闸的瞬间电流计的变化。或许即使看到了也不认为是“有用的结果”，而放过去了。当然，客观上还有一个原因，就是为了避免电流磁效应的影响，检测感生电流的电流计一般都用较长导线连接，离实验装置远些为好，这是当时探索电磁感应实验设计的一个共同特点，这样就不利于观察动态过程的实验现象。例如在法拉第同时代有个瑞士物理学家科拉顿，他曾试图用磁铁在线圈中获得电流。为了不使磁铁影响电流计，他特地把电流计放在延长到隔壁房间里的导线旁，他用磁铁棒在线圈内插入、拔出，然后再跑到隔壁房间去观察电流计有无变化。这样每次观察的结果都令他失望。因而他失去了发现电磁感应现象的机会，因为这种实验设计本身就预先排除了对动态过程的观察。

在法拉第稍前的一些时期，也有许多人试图发现电磁感应现象，如1820年安培和菲涅耳就进行了与奥斯特发现相反的方向，用通过磁作用想获得电流的尝试。他们认为，电流的磁化作用表明线圈中的电流在铁中引起了分子电流，那么作为它的反作用，可以期待磁铁的分子电流能使磁铁周围的线圈产生电流。他们在作出这种推论后，分别做了一些实验，其中某一实验还产生了实际的感应电流。可是这一尝试，预期的想法和实际的发现的效应不一致，因此安培和菲涅耳既没有正确解释实验中所看到的现象，也没有向确定产生这种现象的条件的发展方向。他们所期待的是由静止的磁铁或稳恒的电流来产生电流。

由于当时电磁学知识中，还没有动态、瞬时效应的概念，虽然起初法拉第曾自发地感到各种运动形式是可以相互转化的，但还不清楚转化还必须具备一定的条件，还必须遵从能量守恒与转化的规律，所以他没有认真思索过这样的问题：如果静磁本身能源源不断地产生电流，那导线里不断发出的热能又是从哪儿来的呢？因而他怎么也不会想到，从而也不会去注意动态、瞬时效应。这就是法拉第（还有科拉顿、安培、菲涅耳等）长期研究失败的原因。本来磁铁与线圈就处于相对运动状态，在几分钟内就可获得成功的事情，却花费了多年的精力和宝贵的时光，这说明了理论的指导作用。如果没有正确理论的指导，单靠勤奋，盲目地去探索，往往事倍功半，甚至一事无成。这是在科学史上被反复证明了的一条真理。但是开拓者总带有一定的盲目性，因为他们走的是前人从未走过的道路。如果摆在面前通向目标的道路，清楚平坦，人所共知，那走在这条路上的人也就不成为其开拓着了。

法拉第执着的追求，不怕失败与挫折，持之以恒地坚持“磁能生电”的实验研究，真是功夫不负有心人，他终于经过无数次的失败，在确定课题的十年之后成功了。

### 三、抓住偶然的机遇，发现电磁感应现象

只有打破原有认识的局限性，才能创新。而机遇往往是造成突破、做出创新的重要条件。由于偶然性的发现，看到新现象的端倪，及时抓住进

行研究，就可能获得科学上重要的突破和创新。科拉顿、安培、菲涅耳等人对电磁感应的研究夭折了，而法拉第突破静态感应的观念，认识到感应现象的动态特征正是通过抓住偶然的机遇而深入探究获得成功的。

在法拉第提出“磁能生电”的设想，并进行10年的实验探索失败后，1831年8月29日，法拉第用一根7/8吋粗的软铁棒弯成一个外径6吋的圆环，在软铁棒上用导线缠绕，组成A、B两组线圈。用一根较长的铜导线将B线圈两端连结起来，在离铁环3呎远的那段连线下面平行放置着一个磁针。他意外地发现，当A线圈与电池组接通的瞬间，B线圈连线下的磁针立即产生一个明显的偏转，然后来回摆动，最后稳定在原来的位置上，接下去尽管A线圈电流持续保持着，磁针却不再有任何反应。当切断与电池连线的瞬间，磁针向相反方向偏转，几次振荡后又回到原来的位置。这偶然的发现使法拉第敏锐地意识到，他寻找了10年的磁产生电可能是一种动态瞬时效应，而根本不象他原来苦苦探寻的那种稳恒电流。法拉第立即抓住了这偶然的发现。他在9月23日给他朋友的信中写到：“我现在又忙于电磁的研究，并且认为抓住了一点好东西；但是还不能说明白。它可能是杂草而不是鱼，竭尽全力，我终究可以把它拉出来。”法拉第抓住了这一新的线索，研究立即顺利地展开了。在新观点的指导下，他设计和变换各种条件进行了大量的实验。仅从1831年8月29日到第二年的6月11日，他的实验记录的编号从1编到了441。这说明了研究的大量、细致和深入。

法拉第通过对一系列有关实验研究的总结1831年11月24日向英国皇家学会提出了他的研究报告。后来，法拉第概括出五类情况可以产生感生电流：

1. 变化着的电流；
2. 运动着的稳恒电流；
3. 变化着的磁场；
4. 运动着的磁铁；
5. 在磁场中运动的导体。

他还把电磁感应现象分为两类：一类是由伏打电池电流产生的作用称为伏打电感应或电磁感应；另一类是由普通磁铁产生的感应称磁电感应。至此，法拉第发现了他为之奋斗10年的电磁感应现象。

下面是法拉第发现电磁感应现象时所设计的几个典型实验：图(1)是1831年8月29日采用的装置，法拉第利用此装置第一次发现了感应电流是瞬态的。

图(2)是将线圈绕在铁柱上放在两个棒形永久磁铁之间，当磁铁与铁柱接触或断开，就有电流产生（1831年9月24日）。

图(3)单将铁棒放在永久磁铁的两极之间，使铁棒磁化也能产生感生电流。

图(4)将磁铁直接插入或拔出空心螺线管，有感生电流产生（1831年10月17日）

法拉第在发现电磁感应现象的基础上，又发明了人类历史上第一台感应发电机。他将铜线圈放在磁铁两极之间，又用一狭长的铅片放在铜线圈的边缘，作为收电用的电刷，这电刷又接上一个电流计。当铜线圈旋转时，电流计上的指针也随着转动了。一种持续电流便从电刷上传出来了。从此

开始了人类广泛利用电能的新时代。

#### 四、电磁感应定律的内容

法拉弟发现电磁感应现象后，又进行了一系列定量的实验研究工作，在 20 年后出版的《论磁力线》中，给出了电磁感应定律的定量表述。1845 年诺依曼把这一定律用今天的数学形式表达出来：

当线圈（回路）中磁感应通量发生变化时，在线圈（回路）中就产生电动势。感生电动势的大小跟磁通量对时间的变化率的负值成正比即

$$\varepsilon = -K \frac{d\phi}{dt}$$

在国际单位制中  $K=1$

$$\text{所以 } \varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

上式即为电磁感应定律的数学表达式。式中的负号反映了感生电动势的方向。若把上式用到一个绕有  $N$  匝的线圈，则

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(N\phi)}{dt}$$

式中， $N\phi$  一般称为通过线圈的磁通链数。若把电磁感应定律的数学表达式用于导体切割磁力线的情况则

$$= Blv \sin$$

式中  $B$  为磁感应强度， $l$  为导体的长度

$v$  为导体运动的速度， $\theta$  为  $B$  方向与  $v$  方向的夹角。

若采用积分形式表示，则在稳恒磁场中运动着的导体内所产生的“动生电动势”为

$$\varepsilon = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

$v$  为导体运动的速度， $B$  为磁感应强度。由磁场变化而产生的“感生电动势”为

$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{ds} \text{ 式中 } \vec{B} \text{ 为磁感应强度，} \vec{E} \text{ 为电场强度。}$$

电磁感应现象和电磁感应定律的发现揭示了电和磁相互之间存在着紧密依存的关系。麦克斯韦方程组以此为主要根据之一。电磁感应现象和电磁感应定律广泛应用于发电机、电动机、变压器、感应加热等方面。

## 电磁场理论

在法拉第发现电磁感应现象的那一年，英国诞生了一位伟大的科学家——麦克斯韦，他因创立电磁场理论而成为十九世纪最伟大的物理学家。麦克斯韦创立电磁场理论的思路与方法大致如下。

### 一、历史的前奏

在麦克斯韦以前，解释电磁相互作用有两种相互对立的观点。一种是超距作用学说，即在研究两个电荷之间相互作用力时，忽略中介空间的作用，电荷会超越空间距离而互相作用，库仑、韦伯、安培等人都是主张用超距作用学说来解释电磁相互作用的。这种学说当时拥有数学基础。另一种是媒递作用学说，认为空间有一种能传递电力的媒质（称作以太）存在，电荷间通过媒质互相作用。法拉第通过实验揭露了空间媒质的重要作用，他认为在空间媒质中充满了电力线，即通过场来传递，但媒递作用学说还没有数学基础，不易被人接受。也使其发展受到了阻碍。麦克斯韦功绩就在于建立了电磁场理论并促进了它的发展。他中学时曾在数学和诗歌比赛中获第一名，这显示了他的数学才华与丰富的想象力方面的潜力。他年轻时曾读过法拉第的《电学实验研究》，对法拉第的物理思想（如电力线和场的思想）十分推崇，同时也发现了它的弱点。麦克斯韦对电磁相互作用的超距观点早就表示“不能接受即时传播的思想”，在法拉第的物理思想影响下，他决心“为法拉第的场概念提供数学方法的基础”。

### 二、麦克斯韦创立电磁场理论

麦克斯韦创立电磁场理论可分为三个阶段：

第一阶段，统一已知电磁定律

麦克斯韦于1856年发表了他的第一篇论文《论法拉第的力线》，在这篇文章中，他试图用数学语言精确地表述法拉第的力线概念，他采用数学推论与物理类比相结合的方法，以假想流体的力学模型去模拟电磁现象。他说：“借助于这种类比，我试图以一种方便的和易于处理的形式为研究电现象提供必要的数学观念”他的目标是想据此统一已知的电磁学定律。麦克斯韦为达到此目的，他运用了“建立力学模型——引出基本公式——进行数学引伸推导”的解决科学问题的思路和方法。

第一步，建立力学模型

首先运用类比方法，麦克斯韦把电磁现象和力学现象做了类比，认为可以建立一种不可压缩流体的力学模型来模拟电磁现象。这种流体模型为：一是没有惯性，因而也就没有质量；二是不可压缩；三是可以从无产生，又可消失。显然这是一种假设理想流体。麦克斯韦在这篇文章中写道：“我企图把一个在空间画力线的清楚概念摆在一个几何学家的面前，并利用一个流体的流线的概念，说明如何画出这些流线来”“力线的切线方向就是电场力的方向，力线的密度表示电场力的大小”。他企图阐明电力线和电力线所在空间之间的几何关系。他还试图通过类比凭借已知的力学公式推导出电磁学公式，寻求这两种不同的现象在数学形式上的类似。

第二步，引出基本公式早在1842年，W·汤姆逊就曾把拉普拉斯的势函数的二阶微分方程，普遍用于热、电和磁的运动，建立了这三种相似现

象的数学联系。1847年，他又在不可压缩流体的流线连续性基础上，论述了电磁现象和流体力学现象的共同性。麦克斯韦正是吸收了W·汤姆逊这种类比方法，把它发展成为研究各种力线的重要工具。例如麦克斯韦把电学中的势等效于流

体力学中的压力  $\left\{ P(r) = \frac{KQ}{4\pi r} \right\}$ ，得出若静电场中有电荷e，则在r远处的电势

$$U = \frac{e}{r} \quad (1)$$

麦克斯韦据此方式相继推导出了静电磁场、稳恒电磁场以至瞬变电磁场的基本公式。其中最重要的一个就是电场的泊松方程：

$$\nabla^2 V = -4 \quad (2)$$

式中V为电势，为自由电荷密度。

第三步，进行数学引伸

根据电场的泊松公式可直接写出稳恒电磁场的两个基本方程：

$$\nabla(\epsilon_0 E) = \nabla \cdot D = 4 \quad (3)$$

$$\nabla B = 0 \quad (4)$$

对于瞬变电场，麦克斯韦类比了力学中的惯性力公式，从假想流体的

惯性力出发，建立了电场强度公式  $\vec{E} = -\frac{d\vec{A}}{dt}$  ( $\vec{A}$ 为电场的势矢量) 并

由此推出磁场产生电场的公式：

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5)$$

结合电场的泊松公式，可得运动电荷产生磁场的公式：

$$\nabla \times \vec{H} = 4 \vec{j} \quad (6)$$

在上述公式中，式(3)说明了静电场的性质(是一种无旋场)；式(4)说明了磁场的性质(是一种涡旋场)；式(5)说明了电场可以由随时间变化的磁场产生；式(6)说明了磁场可以由运动的电荷产生。从(3)、(4)、(5)、(6)方程看，这已基本具备了麦克斯韦方程组的雏形，只是未列入位移电流。

第二阶段，提出位移电流概念

麦克斯韦在完成了统一已知电磁学定律的第一阶段工作后，又投入到第二阶段工作中。他于1862年发表了具有决定意义的论文《论物理学的力线》。麦克斯韦在这篇著作中，突破了法拉弟的电磁观念，创造性地提出了自己理论的核心部分——位移电流的概念。在这一工作中，他一方面结合数学推论以逻辑手段揭示了旧电磁理论的内在矛盾，另一方面则构造了一个与以前的流体力学模型不同的、新的电磁以太模型。

麦克斯韦按照电磁学和动力学的类比关系发现，交变电流通过含有电容器的电路时，按照原有的认识，由于电荷不能在电容器极板之间移动，因此传导电流将中断，这同实际电流的连续性发生矛盾。而且如果电流仅限于导体，电磁场也就失去了意义。为了解决这些矛盾，他依据电磁学与动力学的类比关系和电磁现象的对称性，认为在交变电流电路中，电容器一个极板上变化的电场会引起感生磁场，变化的磁场又会在电容器的另一

极板上引起感生电场，产生交变电流，故变化电场的作用就相当于传送电流，但它不是电荷的传导，而是电荷的位移。这样麦克斯韦就在无导体存在的磁场中引入了“位移电流”的概念。这样位移电流和传导电流迭加起来在电容电路中的总流线是闭合的。位移电流概念的引入，是麦克斯韦理论的关节点，也是他的重大发现，即发现了电场变化激发磁场变化的现象。而法拉弟的电磁感应定律，是说明磁场变化激发电场的现象。这样，一个变化的电场和磁场以对称的形式联系起来，是法拉弟电生磁、磁生电思想的精确化和完善化。

为了在电磁场中形象地勾勒出位移电流的形状，必须给它塑造一个模型。麦克斯韦说：“电解质被电流带动在固定方向上的迁移和偏振光受到磁力作用在固定方向上旋转，就是曾经启发我把磁考虑为一种旋转现象而把电流当作平移现象的事实。”麦克斯韦根据这两个基本条件假设电磁场介质中充满着涡旋分子（在真空中则是涡旋以太），在这些涡旋分子之间夹着许多小的电粒子。涡旋轴代表磁力线的方向，涡旋旋转速度表示磁场强度的大小。在两个同向旋转的分子中间的电粒子起着隋性轮的作用，这些电粒子只会转动而不会产生平移；在两个旋转方向的分子间，电粒子不发生转动而产生平动，从而形成电流。

如右图，六方形表示涡旋分子，小圆圈表示电粒子，磁场方向由“+”“-”表示。“+”表示磁场穿出纸面，“-”穿入纸面。放在A B线上形成了位移电流。

麦克斯韦从这个涡旋模型出发，利用它进行唯象的思考，从物理意义上认定位移电流的存在，并把它与传导电流并列起来，进而引进  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

一项，实现玻恩所说的“数学上的完美”。麦克斯韦进一步以位移电流的概念为物理基础，根据力学定律进行数学模拟，以弹性力学中的力、粒子流密度、及对旋涡转速的影响分别模拟电场强度、传导电流和磁场强度，从而建立起全电流的电磁场方程：

$$\nabla \times \vec{H} = 4\pi \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

### 第三阶段，揭示电磁场动力学本质

1864年，麦克斯韦又发表了第三篇著名的论文《电磁场的动力理论》。在这篇论文中，麦克斯韦舍弃了他原来提出的力学模型而完全转向场论的观点，并明确论述了光现象和电磁现象的统一性，奠定了光的电磁理论的基础。

麦克斯韦首先谈到由于电磁相互作用不仅与距离有关，而且依赖于相对速度，不应以超距作用为出发点。他仍然假设产生电磁现象的作用力是同样在空间媒质中和在电磁物质中进行的，在真空中有以太媒质存在，这种以太媒质弥漫整个空间，渗透物体内部，具有能量密度，并能够以有限速度传播电磁作用。麦克斯韦借助于以太媒质这种力学图象来描述真空场的概念，把以太媒质作为介电常数  $\epsilon=1$ （真空场）的“电介质”。当电介质极化时，在分子范围内发生微观电荷移动的现象，这种微观电荷移动产生一种瞬息电流。他假设在真空中，由于以太媒质的存在，电场变化时同样也有位移电流出现。位移电流和传导电流一样，也按照毕奥——萨伐尔定律的规律产生磁场。位移电流和传导电流叠加起来的总电流（即全电



流)线是闭合的。在真空位移电流概念的基础上,麦克斯韦建立了由二十个分量方程组成的电磁场方程组。麦克斯韦还采用拉格朗日与哈密顿的数学方法,推导出电磁场的波动方程。方程表明,电场和磁场以波动形式传播,二者相互垂直并都垂直于传播方向。若在空间某一区域中的电场发生了变化,在它邻近的区域就会产生变化的磁场;这个变化的磁场又会在较远的区域产生变化的电场,变化的电场与变化的磁场不断相互产生,就会以波的形式在空间散开,即以波的形式传播,称为电磁波。电场与磁场具有不可分割的联系,是一个整体,即电磁场。在麦克斯韦推出的方程中,他引入了一个电磁场能量方程,他指出,在超距作用理论中,能量只能存在于带电体、电路和磁体中,而根据新的理论,能量则存在于电磁场和这些物体中。这样,能量就被定域于整个电磁场空间,从而深刻地揭示了电磁场的物质实在性。它同时还说明了电磁波就是能量的传播过程。从平面电磁波的定量研究中,麦克斯韦证明了决定电磁波传播速度的“弹性模量”与电介质的性质相联系,“介质密度”与磁介质的性质相联系,从而求出了电磁波的传播速度公式,得到了与《论物理的力线》中相同的结论,即真空中电磁波的速度恰好等于光速,这使麦克斯韦得出了:“光是一种按照电磁定律在场内传播的电磁扰动”的结论。

1868年,麦克斯韦发表了一篇论文《关于光的电磁理论》,明确地创立了光的电磁学说。他说:“光也是电磁波的一种,光是一种能看得见的电磁波。”这样,麦克斯韦就把原来相互独立的电、磁和光都统一起来了,成为十九世纪物理学上实现的一次重大理论综合。1873年麦克斯韦出版电磁理论的经典著作《论电和磁》在这部著作中,麦克斯韦对电磁理论作了全面系统和严密的论述,并从数学上证明了方程组解的唯一性,从而表明这个方程组是能够精确地反映电磁场的客观运动规律的完整理论。这样,经几代人的努力,电磁场理论的宏伟大厦终于建立起来了,从而实现了物理学史上的第二次理论大综合。

### 三、麦克斯韦方程组的内容

麦克斯韦在1864年发表的著名论文《电磁场的动力学理论》一文中提出了一套完整的方程组。他最先是分量形式给出的,而且物理量的名称和符号都与现代采用的不一样。经后人加以整理,电磁场的方程得到进一步完善,形成如今称为麦克斯韦方程组的形式。

#### 1. 麦克斯韦方程组的微分形式

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{D} &= \rho / \varepsilon \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

式中:  $\rho$  是自由电荷的体密度;  $\vec{j}$  是传导电流密度;  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  是位移电流密度。

#### 2. 麦克斯韦方程组的积分形式

$$\oiint_{\Sigma} \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iiint_V \rho d\tau$$

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\iint_{\Sigma} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s}$$

$$\oiint_{\Sigma} \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = -\iint_{\Sigma} \left( \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{s} \text{ 有介质时, 需要补充}$$

三个描述介质性质的方程式。对于各向同性介质来说，有：

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

式中  $\epsilon_r$ ,  $\mu_r$  和  $\sigma$  分别是介质的相对介电常数、相对磁导率和电导率。

根据上述方程组，原则上可以解决各种宏观电磁学问题。

## 电磁波

电磁波从麦克斯韦的理论预言到赫兹实验的发现大致经历了以下的过程。

### 一、麦克斯韦的理论预言

麦克斯韦在剑桥大学读书时，就熟读了法拉第发表的各辑《电学实验研究》，使他感到惊奇的是，法拉第虽然不是数学家，但他提出的许多电磁学概念，特别是磁力线和电致紧张态概念，含有丰富的数学思想。在他看来，如果用数学符号和公式将法拉第的成果总结出来就得到一种处理电磁场的动力学方法。麦克斯韦在他总结出的电磁场理论中预言了电磁波的存在。麦克斯韦对电磁波的理论预言过程可分三个阶段。

第一阶段：运用类比方法，建立电学量与磁学量的定量关系，并总结出六条电磁学定律。

麦克斯韦通过电场和热流场、流体力场的几何类比，使力线动力学化，使电致紧张态动量化，进而在电磁场能动性基础上，建立各种电学量和磁学量的定量关系。

第二阶段，通过特设的电磁场模型，提出位移电流和电位移的概念，将电扰动与磁扰动联扣起来，形象地将电磁波的运动表征出来，同时提出了电磁场运动学方程和动力学方程。

麦克斯韦在总结出六条电磁学定律后认为按照动力学，物体既然有动量，它必然具有速度。按照麦克斯韦电磁学，电磁场既然有动量它也必然具有速度。麦克斯韦按照电磁学与动力学的类比，发现电磁场的速度应当是电流。这样一来，如果仍然将电流仅限于导体，电磁场就失去了意义。为此，麦克斯韦创造性地引入了位移电流的概念。麦克斯韦为了在电磁场中形象地勾勒出位移电流的形状，他又塑造了电磁场介质的动力学模型，并运用了动力学的方法，从亥姆霍兹的涡旋流体的方程类比推出电磁场的运动学方程

$$\vec{j} = \frac{1}{4\pi} \nabla \times \vec{H}$$

和动力学方程

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt}$$

电磁场动力学方程表明，磁扰动可以产生电场，电磁场运动学方程表明，磁场中有电流流动，不论电磁场中是否存在导体都应如此。这是传统观念所不能接受的，但它也正是麦克斯韦动力学介质假说的必然结果。麦克斯韦通过这两个方程已把电磁场的波动性质勾画出来了。

麦克斯韦在《论物理力线》一文中进一步以电磁场属于一种动力学介质的假设出发，推导出电磁波速等于光速。麦克斯韦根据电磁场介质的动力学模型认为电磁场应为横向振动，其波速类比弹性流体的横向振动的传播公式

$$v = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$$

因电磁场介质的密度为  $4\pi\mu$ ， $\mu$  为磁导率，弹性模量  $k$  推得  $k=4\pi c^2$  代入上式可得电磁波的速度为

$$V = C / \sqrt{\mu}$$

在真空中， $\mu=1$  所以

$$V=C$$

而  $C$  根据  $E = C^2 \frac{Q}{r^2}$  知， $C$  是电量的电磁单位对静电单位的比值。科尔劳

施和韦伯曾在 1856 年已测得这个单位的比值  $C$  为 310740000 米/秒，这使麦克斯韦联想到，这个比值与布雷德利用光行差的方法和斐索用齿轮法以及傅科用旋转镜面法测得的光速极为接近，他由此得出了一个划时代的结论：

电磁波在真空中的速度等于光速，  
这个推理过程可归纳为：

“电磁波速=电学单位的比值=光速”这样一个推理思路。

第三阶段，运用拉格朗日的分析力学方法，从电磁场的势能和动能着手推导出电磁场方程组，进而预言电磁波与光速的一致性。

麦克斯韦在《电磁场的一个动力学理论》中抛弃了在《论物理力线》中提出的电磁场的动力学介质的模型，而是从拉格朗日的分析力学方法入手推导出了电磁场方程组，并由这个方程组进一步推导出电磁波动方程：

$$K\nabla^2\vec{E}=4\pi\mu(d^2\vec{E}/dt^2)$$

式中  $K=4\pi c^2$  显然，电磁波速：

$$V = \sqrt{K/4\pi\mu} = c / \sqrt{\mu}$$

这与前文的结论一致。

1873 年，麦克斯韦在《电学和磁学专论》一书中预言光压在大小上等于电磁场的能量密度。1901 年列别捷夫的光压实验证实了麦克斯韦的理论预言。

至此，麦克斯韦从理论上作出了电磁波是存在的，而且电磁波与光波具有同一性。

## 二、柏林科学院悬奖验证电磁波的存在

在整个十九世纪的中叶，电磁学的发展处于百花齐放的时代，除了麦克斯韦建立的电磁场理论外，还出现了德国物理学家纽曼提出的电动力学理论和德国物理学家韦伯提出的电动力学理论，他们属于超距论电动力学。他们只承认中心力的作用，而不考虑场的作用；另外还有德国的黎曼于 1858 年、丹麦的洛伦茨于 1867 年提出的推迟势理论的准超距电动力学，他们承认电力的传递是需要时间的。

从 1870 年开始，亥姆霍兹着手统一纽曼、韦伯和麦克斯韦的理论，但是没有成功。亥姆霍兹又认识到，如果麦克斯韦电磁理论正确，那么纽曼的电动力学可以作为麦克斯韦理论的一个特殊情况，即是说把闭合电路的振荡当作有电容器电路的振荡的一个特例。如果是这样就需要首先证明麦克斯韦的位移电流的存在。于是，他在 1879 年以“用实验建立电磁力和绝缘介质极化的关系”为题，设置了柏林科学院奖。这个命题是建立在如下三条假设的基础上

1. 如果位移电流存在，必定会产生磁效应。
2. 变化的磁力必定会使绝缘介质产生位移电流。
3. 在空气或真空中，上述两个假设同样成立。

亥姆霍兹后来考虑到第三条假设的证明太难，就把它删掉了。这次悬奖便成了赫兹电磁波实验的先导。不过他当时认为困难太多，没有接受亥姆霍兹交给他的攻关任务，以致白白耽搁了数年的时间。

### 三、赫兹以前的电磁波实验

在赫兹电磁波实验之前，已有许多人进行了有关实验，但是这些探索者由于缺乏必要的思想准备，或者发现者不能从理论高度给以阐述，甚至不能确认它们在当时科学技术中的地位，从而即使发现了电磁波的存在也未被人们重视而很快被人遗忘，只好等待另一些人从新的高度再次将它们发掘出来。这样，在赫兹以前的科学家有几次偶然发现了电磁波，但未能被重视和认可。例如，1871年E·汤姆逊就曾发现当一个具有初、次级的线圈通有脉动电流时，他可以用一小刀从附近铁桌的边角、水管，甚至30英尺外的蒸汽机上引出电火花来。后来，他又把这个振荡线圈放在一个房间里，用一个由一对碳极做成的“接收器”，放在隔壁的房间，地下室里，甚至放在那座六层楼房的顶楼，都能发现“接收器”的间隙中有电火花产生。这是一个十分强大的电磁波产生的效应，然而E·汤姆逊缺乏理论上的指导，未能由此形成电磁波的概念。又如1875年爱迪生也发现过类似现象，他曾观察到继电器工作时衔铁之间会产生电火花。但他没有利用和充分认识到它的重要意义。爱迪生后来说：“使我感到迷离的是，为什么我没有想到利用这些成果。”又如美国发明家多比尔，早在1882年就实验过无线电话，并获美国专利。本来，他完全有权声称自己发现了电磁波而去申请柏林科学院的悬奖，但他毕竟只是一个发明家，他不去关心科学理论界的理论与发现，而科学理论家也不去理会技术家的发明，这种理论家与实践家相脱离的现象在现实中并不少见。再如，1879年英国人休斯做过一个实验：他将电池通过一个自动开关接于振荡线圈上，自动开关有节奏地打开和关闭时，线圈产生了间歇振荡，引起接在次级线圈上的麦克风“咔嚓”作响。休斯把麦克风拿到457米外的地方都还能听到这种声音。当他站在墙边时，这种声音会更大。这就是他当时还不理解的电磁波及其反射现象。当时剑桥大学教授、麦克斯韦的老师斯托克斯看完休斯的表演后无动于衷，只是冷冰冰地说了这样一句话：它完全可用已有的理论加以解释。话虽没有说错，但这对还没有任何电磁波概念的休斯来说，却象一瓢冷水浇在头上。自此，休斯决意不再发表他的实验报告。从这里我们还看到了权威对一些创造性人才的成长和某些发现发明起了压抑的作用。

尽管以上这些科学家相继发现了电磁波，但由于各种原因，未能被重视和承认。在这种情况下，对电磁波实验验证就历史地落在了赫兹的身上。

### 四、赫兹实验证实了电磁波的存在

自从1879年柏林科学院悬奖以后，赫兹一直在思考采用什么方法来证明位移电流的存在。这个问题难就难在长期以来形成的一种凝固不变的思想，即认为电流只限于导体中电粒子的运动，充其量只能是自由电荷在

真空或空气中的流动。位移电流既然作为一种电流，它就应该能产生热效应、电动力学效应和电流的磁效应等，其中以磁效应作为检验位移电流的存在最为可行。剩下的问题就是寻找具体的方法来观察位移电流的磁效应现象。

第一步赫兹用实验证实位移电流的存在

1. 设计实验方案，搞清实验原理

1885年赫兹到卡尔斯鲁厄高等工业学校担任实验物理学教授，有幸发现该校实验室里有一种名为里斯线管的振荡线圈。这种线圈具有初级和次级，若给初级线圈输入一脉冲电流，在次级线圈两端的狭缝中间便会产生电火花。赫兹判定这是初级线圈中电流振荡感应的结果。他想，既然初级线圈中的振荡电流能激起次级线圈的电火花，那么它应当具有使介质产生位移电流的能力，根据麦克斯韦的理论，这种位移电流也应是迅变和振荡的，它反过来又会影响次级线圈，使它产生的电火花发生明显的强弱变化。赫兹抓住了这个思路，形成了成熟的实验方案，这样解决柏林科学院的悬赏的时机成熟了。

2. 制作实验仪器

赫兹根据上述的实验方案和设计原理，自制实验仪器和装置。1886年赫兹巧妙地设计和制作了一个直线型开放振荡器。如图30(1)将一根短而直的导线截为两段，截口头形成火花隙，两个外端各焊上一个金属球或一块金属板，以增加振子的电容。赫兹粗略计算发现，该振荡器的频率极高，足以使次级线圈产生电火花和使附近的介质极化。

1887年，赫兹在直线型振荡器的基础上设计了一台“感应平衡器”。如图(2)：A-A'是直线振荡器，B是带有火花间隙的感应圈，在这里起检验器的作用。实验时，经A-A'输入脉冲电流，使之起振同时调整B的位置，直到它的火花隙不产生火花为止。如果这时将一块金属C靠近“感应平衡器”，由于C中感应变化的电流（涡旋电流）这种电流产生一个附加电磁场作用于感应器B使它重新发射出电火花。也可以这样说：直线振荡器产生的电磁波激起金属块中的感生电流这种感生电流又发射出一种附加电磁波，致使感应器B的“平衡”状态被破坏，因而产生出电火花。

3. 赫兹实验验证电磁波的存在

赫兹制造出了“感应平衡器”，证明是否存在位移电流（电磁波）就非常容易了。“感应平衡器”中的直线振荡器的振荡，不仅能使金属产生迅变的感生电流，也应当能使附近的介质块产生极迅速的交替极化，从而导致迅变的位移电流。如果麦克斯韦的理论预言正确，这种位移电流非但能够产生，而且必定要反过来影响“感应平衡器”的平衡状态，通过计算预测，其介质产生的效应大小和在金属中产生的电流引起的效应相同。赫兹首先把书堆积成1.5米宽0.5米高1米的纸块进行实验得到了预想的结果。于是他又先后将制成厚板的沥青、人造沥青、纸、干木、砂石、硫磺和石蜡以及用橡皮槽盛好的45公升汽油靠近“感应平衡器”时预料的现象都发生了。赫兹作了粗略的估计：被电介质块极化的电流（位移电流）造成“感应平衡器”的平衡状态的破坏程度，大约等于一根细金属导线中感应电流所造成的破坏程度。1887年11月，赫兹向科学院报告了这个结果。人们一直有许多疑问的麦克斯韦所预言的位移电流（即电磁波）从此得到了可靠的实验验证。

4. 赫兹获奖

赫兹用实验证明了电磁波的存在，从而获得了柏林科学院 1879 年的悬奖。赫兹的这次实验构成了他的电磁波实验的第一步，他的这项成果载于他所写的《论绝缘体中电扰动产生的电磁效应》一文中。

#### 第二步赫兹证明电磁波与光波的同—性

赫兹在完成了电磁波的产生与检验之后，打算更直接地证明麦克斯韦的理论，即从实验上证明在空气中传播的波的存在。因为赫兹前面所完成的实验只解决了 1879 年柏林科学院悬奖课题中的前两条假设。至于第三条假设，空气中或真空中同样存在极化和位移电流还没有解决。赫兹认为这正是体现麦克斯韦电磁场理论的实质的关键性问题。赫兹认为，只要证明了电磁波与光波的同—性，第三条假设就一并得到了解决。为了证明电磁波同光波的同—性，赫兹进行实验证明：

#### 首先，证明电磁波速度等于光速

在赫兹测量电磁波速度之前，惠斯通、斐索、亨利、贝佐尔德、法拉弟、亥姆霍兹等都试图测量电磁波的速度，但无一人成功。1888 年 3 月，赫兹终于开始了他的划时代的测量电磁波速度的实验。他吸取了前人测量电磁波速度失败的教训，不去直接测量电磁波的速度，而是用驻波的方法先测出一个驻波节的间距（半波长），然后根据开尔芬在 1853 年建立的振荡器的频率公式计算出电磁驻波频率，最后算出电磁波速。

赫兹根据上面的实验方案进行了他测量电磁波速的实验。赫兹在一个长 15 米、宽 14 米、高 6 米的教室里做了这个实验。他先在教室纵向的一面墙上钉上一块高 4 米宽 2 米的锌皮，用来反射电磁波，以形成驻波。为了测量和检查这条驻波，赫兹设计制作了一个相当于感应线圈，其形状与“感应平衡器”中的 B 大体相同的检验器。他用直线型振荡器作为波源，放在离锌皮 13 米的地方。他把检验器装在小车上使它能随小车沿驻波方向前后移动。检验器处于电磁驻波的波节处不会产生火花，处于波腹处则产生最强的火花。赫兹根据这种反应测量出两个波节之间的长度（半波长）为 4.8 米。他根据麦克斯韦的电磁波速等于光速的假设，算出该电磁波振荡周期为  $1.55 \times 10^{-8}$  秒。他又根据开尔芬的振荡周期公式算出他的电磁波源（直线型开放振荡器）的谐振周期为  $1.40 \times 10^{-8}$  秒。这两个周期之差为  $0.15 \times 10^{-8}$  秒，他把这个微小的误差归结于测量精度的影响，从而肯定了电磁波速等于光速。他把这项重要的实验成果总结在《论空气中的电磁波和它们的反射》一文中。

接着，进一步证明电磁波具有光波的性质。赫兹在 1888 年一步一步地证明电磁波与光波的同—性。他用一根直径为 3 厘米、长为 26 厘米的偶极振荡器发射电磁波，经过金属面反射形成了波长只有 66 厘米的短波；他用金属面成功地使电磁波作了  $45^\circ$  的反射，并进一步证明了电磁波的反射遵循光波的反射定律；他用高 2 米、孔径 1.2 米的抛物面使电磁波聚焦；利用“金属栅”使电磁波偏振，从而证明电磁波是平面偏振波；他用一个硬沥青做的大棱镜使电磁波折射。赫兹还做了电磁波的干涉实验等，从而证明了电磁波和光波一样具有直进、反射、折射、偏振、干涉等性质，完成了电磁波和光波同—性的证明，从此宣告了人类发现了电磁波。

### 五、电磁波发现以后

赫兹于 1888 年 3 月基本结束了电磁波实验工作，从此赫兹转向理论分析。在进行各种电磁波实验的时候，赫兹是依据亥姆霍兹的理论进行现象分析的，现在既然证明了麦克斯韦理论的基本正确性，那么就该利用麦克斯韦理论及公式从理论上解释一切现象。赫兹运用麦克斯韦理论首次对一维电振子向周围辐射的电磁波的形状进行了理论解析。

由于赫兹认识上的局限性，在他发现电磁波以后，没有预见到他的发现会改变技术世界的面貌，他公开否认利用电磁波实现通信的可能性，但这并不影响他的工作的重大意义。赫兹发现电磁波时，年仅 31 岁。1889 年维也纳科学院、法国科学院，1890 年伦敦皇家学会、1891 年都灵科学院等分别给予他各种奖励。可是，这位功勋卓著的电磁波发现者，在他还没有走完人生的第 37 个春秋的时候，由于牙疾和血液中毒而过早地离开了人世。但他的智慧火花，燃起了新技术的火炬，播下了无线电电子学的火种。在历史走完了一百多年后的时间里电磁波在人类文明上扮演了一个十分重要的角色。

为纪念电磁波的发者赫兹，后人将频率单位命名为赫兹。1 赫兹定义为在周期性过程中每秒重复一次。



# 光 学

## 光的直线传播

人们对光的直线传播的认识由来已久.古代中国和古希腊时期都对光的直线传播规律有较系统完整的实验和理论研究.

### 一、中国古代人们对光的直线传播特性的认识和应用

#### 1. 墨家对光的直线传播特性的论述

为了论证光的直线传播特性,墨家做了世界上最早的小孔成像实验,并给予了精辟的解释.在公元前五世纪的《墨经》中曾写到:“景倒在午有端”意思是说,发光体发出的光线在隔屏的小孔处交聚成一点,由此给出的影是倒立的.《经说》中解释道:“景:光之人,照若射.下者之人也高;高者之人也下.足蔽下光,故成景于上;首蔽上光,故成景于下.在远近有端与于光,故景库内也”意思是说,成倒像的原因是由于光的直线行进,光照人,经人体反射后犹如射箭那样直进.通过小孔在屏幕上见到的人之下部在远处,人的高部在低处.其原因是:发自足部的光线,被隔屏遮蔽了下面部分,所以成影在上;发自头部的光线,被隔屏遮蔽了上面部分,所以成像在下.在光路上的或远或近处存在一个小孔,所以在屏幕上成的像是倒立的.光线通过小孔,人体位置由远而近,暗室内(库内)屏上的倒像由小而变大,如图 31.

#### 2. 沈括对光的直线传播的论述

我国北宋时期的沈括,为了说明光是沿直线传播的这一特性,曾在《梦溪笔谈》中叙述了一个有趣的现象.有一天,一只老鹰在天空飞翔,老鹰的影子透过窗户的缝隙投射到屋子里的墙上.老鹰从东飞到西,而影子却从西移向东.如图,这便是小孔成象的左右互换性,从而说明光线是沿直线传播的.

#### 3. 赵友钦的“小罅光景”实验

我国宋末元初的赵友钦,曾对光的直线传播特性进行研究.他在“小罅光景”中详细地记述了多个光学实验,其中一个是利用壁间小孔成像的实验,由这个实验,赵友钦得到了小孔成倒像的基本规律.还有一个是在二层楼房内进行的大型实验.这个实验是以烛光为光源的较复杂、较完备的实验设计.这个实验讨论四部分问题:在物距与像距不变的条件下,改变光源强度的成像规律;当光源的强度、小孔的大小和物距不变时,改变像距时的成像规律;当光源强度、小孔的大小、像距三者不变时,改变物距时的成像规律;当孔相对大时,得出像和孔的形状相同的结论.从这些实验中,赵友钦不仅证明了光的直线传播性质,而且正确地说明了光源、小孔、像三者之间的各种关系.并定性说明了:物体表面的照度随光源强度的增大而增大,随距离的增大而减小的结论.

赵友钦从实际出发,运用实验手段,有目的地探索自然规律.在科研方法上,他采用边实验边推理、边操作边分析的方法.在实验技术也达到相当高的水平.他成功地运用“对比实验”来研究自然现象,给后来者以许多启发.赵友钦的实验研究比西方最早的系统实验研究者伽利略还要早二、三百年的时间,遗憾的是他的实验精神和用实验探索规律的方法没有

在我国后来的自然科学研究中得到继承和发扬光大。

#### 4. 小孔成像实验分析

一支蜡烛放置在一个具有针孔的屏幕 A 前如图所示,自蜡烛光焰上每一点发出的光,通过针孔后均投射到与屏幕 A 平行的黑色接收屏幕 B 上,且形成一个与火焰 S 的形状完全相似的像 S',各像点间的相对位置与各物点间的相对位置一一对应,只是上下左右位置各自颠倒而已。这一有名的针孔成像实验,足以证明光是以直线传播的。

### 二、西方对光的直线传播性质的描述

公元前三世纪,希腊的欧几里德也提出了光的直线传播特性。如他在《光学》一书写道:“我们假想光是以直线进行的”并用此解释了人眼能看见物体的原理。

1704 年牛顿在《光学》一书中解释了光的直线传播性质,他认为微粒从光源飞出来,在真空或均匀物质内由于惯性而作匀速直线运动所以光线就沿直线传播。

### 三、证明光线直线传播性质的本影与半影实验与理论解释。

远在公元前五世纪,我国的墨家利用光的直线传播讨论了物体的投影。经:“景二,说在重。”说:“景二,光夹。一光一。光者,景也。”意思是说,一个物体有两个投影(本影和半影)是由于它受到两个光源重复照射的结果。两个光源照射一个物体,其投影夹持着一个本影;一个光源照射一个物体,则只有一个本影。影就是光被遮挡之处。如图所示。

与此相联的是墨家还根据物和光源相对位置的变化,以及物与光源本身大小的不同来定影的大小及其变化。

经:“景之大小,说在𠄎(yí斜)正、远近。”

说:“木𠄎,景短大;木正,景长小。光小于木,则景大于木,非独小也,远近。”这就是说,杆影的长短粗细,是由于木杆的放置相对光源有正斜、远近不同所致。木杆斜置,杆影就短些、粗些;木杆与光线正交,杆影就长些细些。若光源形体大于木杆,则杆影恒比木杆大;光源形体大于木杆时,杆影并非一定比木杆小(“非独小也”),杆影的大小还随着木杆距离光源的远近而起变化(见图 35 甲、乙、丙)

### 四、光的直线传播定律的现代表述

光的直线传播定律的现代表述,是牢固地建立在大量的实验基础之上的,它可以表述为:“在均匀媒质中,光沿直线传播,即在均匀媒质中,光线为一直线”

光不但在真空中有直线传播的性质,而且在空气、水、玻璃等由同一物质所构成的均匀透明体中,都具有直线传播的性质。

## 光的折射定律

### 一、托勒密对折射现象的实验研究

公元二世纪，希腊人托勒密（90—168）通过实验研究了光的折射现象。

1. 实验设计：托勒密的实验设计如图所示：在一个圆盘上装上两把能绕盘中心 S 旋转的中间可以活动的尺子。将圆盘面垂直立于水中，水面到达圆心处。

2. 实验方法：实验时转动两把尺子使之分别与入射光线和折射光线重合。然后把圆盘取出，分别按照尺的位置测出入射角和折射角。

3. 实验结果：托勒密通过上述的方法测得从空气中射入水中的光线折射时的一系列对应值为：

入射角(i)	折射角(r)	
	托勒密测得值	现代值
10 °	8 °	7 ° 29'
20 °	15 ° 31'	14 ° 52'
30 °	22 ° 30'	22 ° 1'
40 °	29 °	28 ° 49'
50 °	35 °	35 ° 4'
60 °	40 ° 30'	40 ° 30'
70 °	45 ° 30'	44 ° 48'
80 °	50 °	47 ° 36'

4. 数据分析：托勒密通过分析以上数据，得出结论：折射角和入射角是成正比关系。今天我们知道这个结论是不正确的，它只有在入射角很小的情况下才近似成立。

5. 留给我们的沉思：从托勒密的实验设计实验方法到实验数据的收集可以说是完全正确的。他的实验结果也是相当精确的，与现代值几乎没有多大的差别。但是托勒密可惜的是未能从正确的数据中发现正确的规律，从这里可看出对实验数据正确处理，加上正确理论的指导在发现规律中的重要性。托勒密是第一个用实验方法测定入射角和折射角的人，他曾求出具有单位半径的圆中弧与所对应的弦长数字，并巧妙地用数学方法编制了表（相当于现代的正弦三角函数表），他当时对折射角和入射角的测量是相当精确的。如果他当时把关于光折射的实验数据与他所编制的这份表作一比较的话，他就会不难发现入射角的正弦与折射角的正弦之比对给定的两种介质来说是一个常数，这样他就会发现折射定律，然而他却没有这样做，以致错过了一次发现的机会。

### 二、开普勒对折射规律的修正

德国人开普勒在汇集前人光学知识的基础上，断定托勒密关于折射规律的结论是不正确的。于是他开始便想通过实验发现折射定律，但实验最后没有成功。他便转向从理论上加以探索。他得出的折射定律是：折射角

由两部分组成，一部分正比于入射角，另一部分正比于入射角的正割；只有在入射角小于  $30^\circ$  时，入射角和折射角成正比的关系才成立，显然，开普勒关于折射定律的研究和修正比托勒密前进了一步，但还没能给出正确的折射定律。

### 三、斯涅耳发现折射定律

荷兰数学家斯涅耳（1591—1626）于1620年前后，通过实验确立了开普勒想发现而没有能够发现的折射定律。他注意研究了水中的物体看起来象飘浮的现象，做了如下实验：当在空气中的O点观察水中的A点时，犹如在B点一样，如图(A)所示。斯涅耳发现，对于任意入射角存在以下

关系(B)图所示：
$$\frac{DC}{DA} = \frac{DE/\sin i}{DE/\sin r} = \frac{\csc i}{\csc r} = \text{常数}$$

斯涅耳没有用理论推导，而是用实验又验证了它。斯涅耳对折射定律作了如下表述：

在不同的介质里，入射角和折射角的余割之比总是保持相同的值。由于余割和正弦成反比，所以这个叙述等价于现代折射定律的表达式。

### 四、笛卡儿进一步完善了光的折射定律

法国人笛卡儿，他以媒质中球的运动作类比，试图说明折射定律。如图所示，假设球在媒质中运动，当进入媒质时，球速的水平分量不变，垂直部分增大，中的光速变成中光速的u倍。其结果球在媒质内部偏转，而所需时间仅为通过媒质中所需时间的1/u。因此根据几何关系，可得在这段时间内，球在水平方向前进的距离BE等于CB/u。所以

$$\frac{CB}{AB} / \frac{BE}{BD} = \frac{\sin i}{\sin r} = u = \text{常数}$$

式中i为入射角，r为折射角。

笛卡儿第一次给出了折射定律的现代表述形式。

### 五、费马对折射定律的发展与理论论证

法国人费马（1601—1665）从理论上得到费马原理，并用演绎方法从费马原理中推导出折射定律。

1. 费马从理论上得到费马原理。

费马从理论上推导出：光沿着光程为极值的路径传播。设某空间介质的折射率连续变化，光由A点传播到B点就必循一曲线，如图所示它的总光程为

$$l = \int_A^B n ds$$

根据变分法原理，光程为极值的条件为

$$\delta l = \delta \int_A^B n ds = 0$$

此式即为费马原理的数学表达式。由费马原理可以推导出反射定律和折射定律，并可证明它们的光程为极值。

2. 费马用演绎方法导出折射定律

费马在前人发现折射定律的基础上对光的折射定律又有了新的发

展。费马认为，导出折射定律可以采取另一种截然不同的思考方法。他假定不同媒质对光的传播表现出不同的阻力，他首先指出，光在不同媒质中传播时，所走路程取极值，即遵从费马原理。即是说，光从空间的一点到另一点，是沿着光程为极值（最小、最大或常量）的路程传播的。

借助于光程这个概念可将光在媒质中所走过的路程折算为光在真空中通过的路程，这样便于比较光在不同媒质中所走路程的长短。1661年费马运用费马原理成功地导出了折射定律。

## 六、光的折射定律的现代表述

折射定律是几何光学的基本定律之一。是在光的折射过程中，确定折射光线与入射光线之间关系的定律。当光从一种介质射向另一种介质的平滑界面时，一部分光被界面反射，另一部分光透过界面在另一种介质中折射，折射光线服从折射定律：折射光线 AB 位于入射光线 SA 和法线 AN 所决定的平面（称为入射面）内，折射光和入射光分别在法线的两侧，入射角  $i$  与折射角  $r$  有如下关系式：

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{21}$$

式中  $n_{21}$  是一个与角度大小无关的常数，称为第二介质对第一介质的相对折射率。但由于光是电磁波，所以该定律可从惠更斯原理导出，并得：

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2} = n_{21}$$

该式进一步给出了折射率  $n_{21}$  与两边介质中的光速  $V_1$  和  $V_2$  之间的关系。该定律同样适用于声波和无线电波。

## 光的干涉

### 一、光的干涉现象的发现

在光学发展史上,意大利科学家格里马第是第一个发现光的干涉现象的人.他做了一个简单的实验,其实验设计如下:在房子的窗户板上打两个紧挨着的小孔,太阳光经过这两个小孔射入室内形成两个锥形光柱.将一个屏放在两个光柱相互重叠的地方,此时可以发现,屏上一些地方的亮度反而比只用一个光柱照射时的还要暗些.格里马第从这一实验中得出结论:两根光柱相加并不总是使亮度增加.他通过类比方法,把光的干涉现象和石块投入水中激起水波的现象作了类比.但他对此干涉现象没有作出深刻的理论分析.

英国物理学家胡克(1635—1703)研究了另一种相干现象,他通过实验研究了用肥皂水形成的薄膜和云母薄片上光的干涉.胡克提出光是一种振幅很小的快速振动,还试图分析薄膜干涉时彩色的成因.他提出在薄膜上观察到彩色必须满足三个条件:膜的厚度有一定的限度;膜必须是透明的;在膜的背面必须有好的反射体.他认为,一束最弱的成分领先而最强的成分随后的倾斜而混杂的光脉冲,在网膜上的印象是蓝色;一束最强的成分领先而最弱部分随后的倾斜而混杂的光脉冲,在网膜上的印象是红色.虽然这种解释是不正确的,但其中它包含了两束光的位相差等现代干涉理论的某些观点,胡克关于光的这些理论研究,对于由笛卡儿提出的光是以太压力的模型过渡到光的波动说起了重要的作用.

牛顿设计并进行了“牛顿环”实验,研究了薄膜干涉问题,从而发现了“牛顿环”现象.牛顿亲自制造了仪器进行实验,他把一块平凸透镜放在一块双凸透镜上面,使平凸透镜的平面向下,然后慢慢压紧,围绕中心便陆续冒出各种颜色的圆环.如果使上面的平凸透镜慢慢抬起离开下面的双凸透镜,则带有颜色的圆环又在中心相继消失,这就是著名的“牛顿环”现象.牛顿还发现色环的颜色有一定的排列次序;当压紧两透镜时,色环的直径会不断增大,其周边的宽度则减小,若是抬起上面的透镜,色环的直径就会缩小,其周边的宽度则增大.牛顿还测量了环的半径,发现它和透镜的曲率半径、空气膜的厚度有一定关系.“牛顿环”现象实际上是两束光发生“干涉”的结果.但是由于牛顿是倾向于光的微粒说的观点,因此对这种光的波动性的表现没有作进一步的实验探索 and 理论研究.

### 二、光的干涉理论的建立

格里马第、胡克、牛顿等人相继发现了光的干涉现象,但是都没有得出正确的解释,也没有建立起光的干涉的正确理论.到了十九世纪初经过托马斯·杨、菲涅耳等人的工作,光的干涉理论终于形成与建立起来.

1. 托马斯·杨运用类比方法首次把光的干涉概念引入了物理学.

1800年托马斯·杨在《关于光和声的实验和问题》的论文中,根据自己的实验,对当时占统治地位的光的微粒说提出怀疑,为惠更斯的波动理论进行辩护.他通过对声波的研究,提出在声波互相重叠时出现加强和减弱的现象即声波的干涉现象.并摒弃了互相重叠的波只能加强的观念,提出了在某些条件下,重叠的波也可以互相减弱甚至抵消的思想.杨氏在

观察了水波的干涉现象后得到了启发，并联想到光的干涉。他运用水波的干涉现象类比提出了光的干涉现象。他说，设想有一组水波，它们以某个不变的速度沿平静的湖面运动，并进入一个狭窄的水道，水道是与湖相联通的。现在我们再设想，在某个因素的作用下形成了另一组同样的波，它与第一组波一样以相同的速度到达该水道。这两组波相互并不干扰，它们的作用将结合在一起。如果它们到达水道后，一组波的波峰与另一组波的波峰相重合，那么将形成一组波峰更高的波。但如果一组波的波峰与另一组波的波谷相重合，那么波峰将恰好填满波谷，水面将保持平静。我假设，如果以与此相同的方式将两束光混合在一起，则会出现与水波叠加类似的效应。我把这一现象称为光的干涉现象。

#### 2. 杨氏提出相干条件。

杨氏对干涉现象的研究，提出了产生干涉现象的基本条件是：只有同一光线的两部分才能发生干涉现象。按照现代的说法，即只有两束相干光才能产生干涉。

#### 3. 杨氏发现干涉定律

1801年杨氏在一篇论文中提出了他发现的关于光干涉的定律：“凡是同一光线的两部分沿不同的路程进行，而且方向准确地或接近于平行，那么当光线的路程差等于波长的整数倍时，光线相互加强，而在相干部分的中间态上，光线为最强，这波长对各种不同颜色的光各不相同”在这里杨氏还第一次明确地提出了波长、光程的概念和相干光这一名词。

托马斯·杨还做了一个著名的杨氏双缝干涉实验，他第一个提出干涉现象与衍射现象之间的密切联系等。虽然杨氏对光的波动说作出了杰出的贡献，但他的工作没有受到当时科学界的承认，而且还受到了恶意的攻击，他的论文被斥为“没有任何价值”，他所发现的干涉原理被说成是“荒唐的”和“不合逻辑的”。致使杨氏的发现被埋没了整整二十年。

#### 4. 光的干涉理论的进一步发展

法国科学家菲涅耳（1788—1827）1815年独立地得到了干涉和衍射方面的规律，同时他称赞了托马斯·杨的杰出工作。使杨氏的干涉理论得到了科学界承认，并使杨氏恢复了对光学的研究工作。菲涅耳用光的干涉的思想补充了惠更斯原理，提出著名的惠更斯——菲涅耳原理，并进行了有名的双面镜和双棱镜的干涉实验。使光的干涉理论更加完善。菲涅耳在光学研究中更多地应用了数学分析进行定量计算的方法，他把正确的物理思想与高超的实验技巧相结合，使他在光学的研究中得到了许多内容深刻和准确定量的成果。他还与阿拉果共同用实验研究了偏振对干涉现象的影响，于1819年得出了相互垂直的两束偏振光不相干涉的原理，从而进一步丰富与发展了光的干涉理论。

### 三、光的干涉规律的现代表述

#### 1. 光的干涉现象

由两个（或两个以上的）光束，在满足一定条件下迭加时，在迭加区的不同地点呈现稳定的互相加强或减弱的现象，称为干涉现象。通常两个独立的光源或同一光源上的两个不同部分都不会产生干涉现象。运用某些方法，如光的反射或折射，可以将同一光源发出的光分成两个光束，当这两光束在空间经不同路径而重新聚合时，就能实现干涉现象。

两束光在交迭区域中的加强和减弱形成“干涉图样”，能产生干涉现象的光称为“相干光”，产生相干光的光源称为“相干光源”，产生干涉的条件称为“相干条件”。

## 2. 光的相干条件

产生光的干涉的必要条件：

两光波具有相同的振动频率； 两光波在相遇点有固定的位相差；  
若要得到振动最弱点的振幅为零的干涉现象，除了具有上面两个条件外，还要满足下面两个条件：

两光波在相遇点有相同的振动方向；

两光波的振幅相同。

若两光波在相遇点所产生的振动不在同一方向，则该点的合成振动将不是简谐振动，因而不能产生干涉现象。若两光波在相遇点的位相差固定，随时间作无规则且迅速的变化，由这种变化引起的光强改变的次数在观察或测量所需要的时间间隔  $t$  内几乎是无限大，在相遇点只能获得  $t$  间隔内的平均光强。这与两光波在该点单独产生的光强度之和无区别，因而无干涉现象。所以，只有满足上述、  
、  
三条条件才能产生干涉现象。但是，要使产生明显的干涉现象，还必须满足产生光的干涉的充分条件。

产生光的干涉的充分条件：

两光波在相遇点产生的振动的振幅相差不悬殊；

两光波在相遇点的光程差不太大。

若两光波在相遇点所产生的振幅相差悬殊，则该点的合成振动的振幅将与单一光波在该点所产生的振动的振幅没有明显的差别，因而实际观察不出干涉现象，如果两光波在相遇点光程差很大，则在一光波的波列已通过时，另一光波相应的波列尚未到达，两相应的波列间无重叠，因而无干涉现象出现。若光程差为中等大小，两相应波列部分重叠，将出现不很明显的干涉现象。故仅当两光波的振幅相差很小、两光波的光程差很小时，方能观察到明显的干涉现象。当两光波的振幅相等时，还可观察到干涉条纹中最暗处光强为零的清晰的干涉图样。

## 3. 光的干涉的种类

光的干涉可以分为两大类，一类是分波阵面的干涉，即从同一光源发出的光波的波阵面上分离出两部分或更多部分，再经两个或多个光具组后，在相遇区域产生干涉现象。如杨氏双缝干涉实验、菲涅耳双棱镜干涉实验和菲涅耳双面镜干涉实验等。

另一类是分振幅的干涉，利用透明薄板的两个表面对入射光的依次反射，将入射光的振幅分解为若干部分，由这些部分光波相遇产生的光波干涉，即为分振幅的干涉。如牛顿环实验、迈克耳逊干涉仪等。

在分振幅干涉中，如干涉条纹对应于同一入射角称为等倾干涉；干涉条纹对应于同一厚度的称为等厚干涉。

利用光的干涉可以测量微小的角度、微小的长度、检查表面的质量，测量长度的微小改变等。

## 四、几个著名的干涉实验方法分析

由光的干涉规律可知，为了观察到稳定的光的干涉现象，就必须创造



特殊的条件。这些条件可归结为：在任何瞬时到达观察点的，应该是从同一批原子发射出来但经过不同光程的两列光波（例如反射或折射等方法）。各原子的发光尽管迅速的改变，但任何位相改变总是同时发生在两列波中，因而它们到达同一观察点时总是保持着不变的位相差，只有经过这样特殊装置的两束光才是相干的。所以历史上进行的一些著名的光的干涉实验都是采用以上的实验设计原理进行设计实验的。

### 1. 杨氏干涉实验

托马斯·杨在 1801 年以极其简单的装置和巧妙的构思，做到了用普通光源来实现光的干涉。这一实验设计，不仅是许多其它光的干涉实验的装置原型，在理论上还可以从中得到许多重要的概念和启发。

杨氏干涉实验装置如图所示。让光源照射到开有小孔 S 的不透明的遮光板（称为光阑）上，后面置有另一块光阑，开有两个小孔  $S_1$  和  $S_2$ 。从针孔  $S_1$  和  $S_2$  中发出的两组球面光波互相干涉，结果在屏幕 D 上形成一个对称而强度有变化的图样。若用单色光作光源，则在屏幕上可以观察到干涉图样。当时杨氏利用了惠更斯对光的传播所提出的次波假设（即惠更斯原理）解释了这个实验。

后来为了提高干涉的亮度，实验中 S、 $S_1$ 、 $S_2$  用三个相互平行的狭缝，即称之为杨氏双缝干涉。并且可以用目镜代替屏幕进行直接观测。在激光出现后，用激光作光源进行实验，则在屏幕可观察到稳定清晰的干涉条纹，还可用目镜放大或用照相机摄像。在杨氏实验装置中一般要求双孔间距  $d$  在  $0.1\text{mm} \sim 1\text{mm}$  之间，横向观测范围在  $1\text{cm} \sim 10\text{cm}$  之间，幕与双孔屏的间隔在  $1\text{cm} \sim 10\text{cm}$  之间。

从杨氏实验中可以得出，从同一列波的波面上取出的两个次波源，总是相干的。后来的一切分波阵面干涉装置的设计思想都是源于杨氏这一精巧的构思。杨氏在分析干涉条纹的特征时推得：双孔干涉条纹的间距：

$$x' = \frac{\lambda D}{d}$$

即光的波长为：

$$\lambda = \frac{x' \cdot d}{D}$$

杨氏由此式算出了光的波长。这是人类历史上第一次由实验测得的光的波长。而且杨氏干涉实验在光学发展上是一个决定性的判决实验，由此导致了光的波动理论复兴的开端。

### 2. 菲涅耳双棱镜实验

1817 年法国物理学家菲涅耳设计进行了著名的菲涅耳双棱镜实验，如图：缝光源 S 发出的光经过一个顶角 很小（约  $1^\circ$  左右）的薄棱镜 P，借助于棱镜的折射，将自 S 发出的光束分为两束 ac 和 bd，并沿不同方向传播，这两束光好像自图中所示的虚光源  $S_1$  和  $S_2$  发出的一样，在两束光重叠的 bc 区域产生干涉条纹。测量出由双棱镜所产生的干涉条纹宽度  $x$ ，则可由下式计算出光波的波长

$$\lambda = \frac{x \cdot d}{L_1 + L_2}$$

式中  $L_1$  和  $L_2$  分别为光源及屏幕到棱镜 P 的距离  $d$  为两虚光源  $S_1$  和  $S_2$  之间

的距离， $x$  为幕上相邻两个条纹的距离。接着菲涅耳又完成了两束光干涉的双面镜实验。

### 3. 迈克耳逊干涉仪

一种用分光束法产生双光束干涉的精密光学仪器。是由美国物理学家迈克耳逊在 1881 年提出，故名。如图所示，从单色光源  $S$  发出来的光，在平行平面玻璃板  $G_1$  上镀有一薄层银的半反射面  $A$ ，光在  $A$  上分成光强近于相等的两束，它们分别从平面镜  $M_1$ 、 $M_2$  上反射回到  $A$  而重新会合，在透镜  $L_2$  的焦平面  $F$  上形成等倾条纹。 $M_2$  是固定的，而  $M_1$  安装在一个可以平移调节的座架上。通常在  $G_1$  与  $G_2$  之间放一块与  $G_1$  相同且与  $G_1$  平行的补偿板  $G_2$ 。当  $M_1$  与  $M_2$  对  $A$  面互成镜象关

系时在  $A$  面会合的两分光束光程差等于零。图中  $M_2'$  是  $M_2$  在  $A$  半反射面中的像，故在  $F$  上的等倾条纹可以看作是在反射面  $M_1$  和虚反射面  $M_2'$  之间的平行空气层上产生的。条纹的形状是以焦点为中心的同心圆。 $M_1$  向  $M_2'$  移近  $\lambda/2$ ，则向中心收缩一个条纹；反之移远  $\lambda/2$ ，则在中心冒出一个条纹。测出条纹变化的数目，就可计算  $M_1$  移动的距离。迈克耳逊曾用此仪器做了如下三个重要实验：1887 年测量以太漂移的迈克耳逊莫雷实验；1892 年首次系统地研究光谱线的精细结构；1895 年首次直接将光的波长与标准米进行比较。

迈克耳逊干涉仪的设计是光的干涉现象的典型应用。

## 光的衍射

十七世纪以后人们相继发现自然界中存在着与光的直线传播现象不完全符合的事实，这就是光的波动性的表现。其中最先发现的就是光的衍射现象，并进行了一些实验研究与理论探讨。

### 一、光的衍射现象的发现

意大利物理学家格里马第（1618—1663）首先观察到光的衍射现象，在他死后三年出版的书中描写了这个实验。他使光通过一个小孔引入暗室（点光源），在光路中放一直杆，发现在白色屏幕上的影子的宽度比假定光以直线传播所应有的宽度为大。他还发现在影子的边缘呈现2至3个彩色的条带，当光很强时，色带甚至会进入影子里面。格里马第又在一个不透明的板上挖一圆孔代替直杆，在屏幕上就呈现一亮斑，此亮斑的大小要比光线沿直线传播时稍大一些。当时格里马第把这种光线会绕过障碍物边缘的现象称为“衍射”，从此“衍射”一词正式进入了光学中。但当时格里马第未能正确解释这一现象，他知道他所观察到的这一衍射现象是与光的直线传播相矛盾的，也是与当时处在统治地位的光的微粒说相矛盾的。他认为，光是一种稀薄的、感觉不到的光流体。当光遇到障碍物时，就引起这一流体的波动。

格里马第把光与水面波进行类比，他认为光的这种衍射现象正类似于将石子抛入水中时，在石子周围会引起水波一样，因为放在光的传播路程上的障碍物在光流体中引起了波动，这些波传播时将超出几何阴影的边界。

光的衍射现象的另一个发现者是胡克，在他所著并被看作物理光学开始形成的标志之一的《显微术》一书中，记载了他观察到光向几何影中衍射的现象。牛顿也曾重复过类似的实验，他观察了毛发的影、屏幕的边缘和楔的衍射等，从中得出结论：光粒子能够同物体的粒相互作用，且在它们通过这些物体边缘时发生倾斜。但是这一切没有对光学发展起到应有的影响。

### 二、光的衍射理论的建立

#### 1. 定性解释光的衍射现象的理论——惠更斯原理。

惠更斯在前人工作的基础上，对光的衍射理论作了进一步的发展。在讨论光的传播时，他类比了声音在空气中的传播。以光速的有限性论证了光是媒质的一部分依次地向其他部分传播的一种运动，且和声波、水波一样是球面波。他提出了以他的名字命名的描述光波在空间各点传播的原理——惠更斯原理。该原理可概述如下：光源发出的波面上每一点都可看作一个新的点光源，它们各自向前发出球面次波（或称子波），新的波面是与这些次波波面相切的包络面。如图所示：S为点光源， $S_1$ 为t时刻自点光源S发出的波面， $S_2$ 为t+ $\Delta t$ 时刻的波面，虚线所画的半球面为次波波面，半径为V $\Delta t$ （V为光波在各向同性的均匀介质中的传播速度）。诸次波的包络面即为新波面。

惠更斯原理把光的传播归结为波面的传播，用它来定性解释光的衍射现象。如图所示，平面波传播时，为前方宽度为a的开孔所阻挡，故只允

许平面波的一部分通过该孔。若按光的直线传播观点，开孔后面的观察屏上只有 AB 区域内才被平行光照亮，而在 AB 以外的阴影内应是全暗的。但按惠更斯原理，开孔平面上每一点都可向前发出球面次波，这些次波的包络面在中间是平面，而在边缘处却是弯曲的，即光波通过开孔的边缘不沿原光波方向行进，故波面传到观察屏上，必然使 AB 外的阴影区内光强不为零，这就是光的衍射现象。

惠更斯原理只能对光的衍射现象作定性解释，而不能对观察屏上的衍射光强分布作定量分析。

## 2. 定量分析光的衍射现象的理论：惠更斯——菲涅耳原理。

菲涅耳在自己的研究工作中，把重点放在光的衍射上，为了克服惠更斯原理的局限性，他基于光的相干性，认为惠更斯原理中属于同一波面上的各个次波的位相完全相同，故这些次波传播到空间任一点都可以相干，他在惠更斯原理中包络面作图法同杨氏干涉原理相结合建立了自己的理论，这就是后人所称的著名的用来分析光的衍射现象的基本原理——惠更斯——菲涅耳原理。它的内容可作这种简单叙述：光传播的波面上每点都可以看作为一个新的球面波的次波源，空间任意一点的光扰动是所有次波扰动传播到该点的相干迭加。

根据惠更斯——菲涅耳原理，欲求波阵面 S 在空间某点 P 产生的振动，需要把波阵面 S 划分为无穷多个小面积元  $S$ ，如图所示：把每个  $S$  看成发射次波的波源，从所有面元发射的次波将在 P 点相遇。一般说来，由各面元  $S$  到 P 点的光程是不同的，从而在 P 点引起的振动，其振幅正比于  $S$ ，而反比于从  $S$  到 P 点的距离  $r$ ，并且和  $r$  与  $S$  的法线之间的夹角  $\theta$  有关，至于次波在 P 点所引起振动的位相与  $r$  有关。由此可见，应用惠更斯——菲涅耳原理去解决具体问题，实际上是个积分问题。在一般情况下其计算是比较复杂的。但是对于一些特定条件下的衍射，处理则可简化。

这样，惠更斯——菲涅耳原理克服了惠更斯原理的不足，为定量分析和计算光的衍射光强分布提供了理论依据。

## 三、光的衍射实验的典型分析

### 1. 菲涅耳衍射实验分析

圆孔衍射，将一束光（如激光）投射在一个小圆孔上（圆孔可用照相机物镜中的光阑）在距离孔 1—2 米处放置一块毛玻璃屏，则在屏上可以观察到小圆孔的衍射花样。其实验如图所示。圆屏衍射。当一点光源发出的光通过圆屏边缘时在屏上也将发生衍射现象。

运用惠更斯——菲涅耳原理可分析出，不论圆屏的大小与位置怎样，圆屏几何影子的中心永远有光。如果圆屏足够小，只遮住中心带的一部分，则光看起来可完全绕过它，除了圆屏影子中心有亮点外没有其它影子。这个初看起来似乎是荒唐的结论，是泊松于 1818 年在巴黎科学院研究菲涅耳的论文时，把它当作菲涅耳论点谬误的证据提出来的。但阿拉果做了相应的实验，证实了菲涅耳理论的正确性。

### 菲涅耳波带片。

根据菲涅耳半波带的分析，可制作一种在任何情况下，合成振动的振幅均为各半波带在考察点所产生的振动振幅之和，这样做成的光学元件叫

做菲涅耳波带片（简称波带片）。波带片的制法可先在绘图纸上画出半径正比于序数  $K$  的平方根的一组同心圆，把相间的波带涂黑，然后用照像机拍摄在底片上，该底片即为波带片。另外还可通过光刻腐蚀工艺，获得高质量的波带片。波带片还可分为同心环带波带片、长条形波带片、方形波带片等。波带片可代替普通透镜，并具有许多优点。菲涅耳波带片给惠更斯——菲涅耳原理提供了令人信服的证据。

## 2. 夫琅和费衍射

单缝衍射。夫琅和费在 1821 年 ~ 1822 年间研究了观察点和光源距障碍物都是无限远（平行光束）时的衍射现象。在这种情况下计算衍射花样中光强的分布时，数学运算就比较简单。所谓光源在无限远，实际上就是把光源置于第一个透镜的焦平面上，使之成为平行光束；所谓观察点在无限远，实际上是在第二个透镜的焦平面上观察衍射花样。在使用光学仪器的多数情况下，光束总是要通过透镜的，因而这种衍射现象经常会遇到，而且由于透镜的会聚，衍射花样的光强将比菲涅耳衍射花样的光强大大增加。

单缝衍射的实验装置如图 49 所示：使来自光源  $S$  的光（例如激光）经望远镜系统构成的扩散  $L_1$  直接投射到一狭缝  $BB'$  上。在狭缝后面放置一透镜  $L_2$ ，那么在透镜  $L_2$  的焦平面上放置屏幕  $DD'$  上将产生明暗交替的衍射花样。

在平常的环境下，用一单丝灯  $S$ ，观察者手执刻有单缝的一块挡板（例如用两块刀片拼成的单缝）在适当距离处面对光源，使缝与灯丝平行，通过狭缝即可观察到衍射花样。因为光源发出的是白光，故衍射条纹呈现彩色，此时眼睛水晶体的作用相当于上述实验装置中的透镜  $L_2$ ，视网膜相当于屏幕。

夫琅和费单缝衍射的光强分布的计算与衍射花样的特点可由惠更斯——菲涅耳原理计算与分析得出。

圆孔衍射。如果在观察单缝衍射的装置中，用一小圆孔代替狭缝，设仍以激光为光源那么在透镜  $L_2$  的焦平面上可得圆孔衍射花样。其光强分布及衍射花样特点可同样由惠更斯——菲涅耳原理计算得出。

## 四、光的衍射现象与光的直线传播的联系

惠更斯——菲涅耳原理主要是指出了同一光波面上所有各点所发次波在某一给定观察点的迭加。从这里很容得出结论：当波面完全不遮蔽时，所有次波在任何观察点迭加的结果乃形成光的直线传播。如果波面的某些部分受到遮蔽，或者说波面不完整，以致这些部分所发次波不能到达观察点，迭加时缺少了这些部分次波的参加，便发生了有明暗条纹花样的衍射现象。至于衍射现象是否显著，则和障碍物的线度及观察的距离有关。总之不论是否直线传播，也不论有无显著的衍射花样出现，光的传播总是按惠更斯——菲涅耳原理的方式进行。光的直线传播只是衍射现象的极限表现。这样通过惠更斯——菲涅耳原理的理论解释，进一步揭示了光的直线传播与衍射现象的内在联系，使光的衍射理论得到了进一步的发展和完善。

## 光的色散

### 一、中国古代对光的色散现象的认识

中国古代对光的色散现象的认识最早起源于对自然色散现象——虹的认识。虹，是太阳光沿着一定角度射入空气中的水滴所引起的比较复杂的由折射和反射造成的一种色散现象。中国早在殷代甲骨文里就有了关于虹的记载。当时把“虹”字写成“𠄎”。战国时期《楚辞》中有把虹的颜色分为“五色”的记载。东汉蔡邕（132—192）在《月令章句》中对虹的形成条件和所在方位作了描述。唐初孔颖达（574—648）在《礼记注疏》中粗略地揭示出虹的光学成因：“若云薄漏日，日照雨滴则生虹”说明虹是太阳光照射雨滴所产生的一种自然现象。公元八世纪中叶，张志和（744—773）在《玄真子·涛之灵》中第一次用实验方法研究了虹，而且是第一次有意识地进行白光色散实验：“背日喷呼水成虹霓之状，而不可直也，齐乎影也”。唐代以后，不断有人重复类似的实验，如南宋蔡卞进行了一个模拟“日照雨滴”的实验，把虹和日月晕现象联系起来，有意说明虹的产生是一种色散过程，并指出了虹和阳光位置之间的关系。南宋程大昌（1123—1195）在《演繁露》中记述了露滴分光的现象，并指出，日光通过一个液滴也能化为多种颜色，实际是色散，而这种颜色不是水珠本身所具有，而是日光的颜色所著，这就明确指出了日光中包含有数种颜色，经过水珠的作用而显现出来，可以说，他已接触到色散的本质了。

在我国从晋代开始，许多典籍都记载了晶体的色散现象。如记载过孔雀毛及某种昆虫表皮在阳光下不断变色的现象，云母片向日举之可观察到各种颜色的光。李时珍也曾指出较大的六棱形水晶和较小的水晶珠，都能形成色散。到了明末，方以智（1611—1671）在所著《物理小识》中综合前人研究的成果，对色散现象作了极精采的概括，他把带棱的自然晶体和人工烧制的三棱晶体将白光分成五色，与向日喷水而成的五色人造虹、日光照射飞泉产生的五色现象，以及虹霓之彩、日月之晕、五色之云等自然现象联系起来，认为“皆同此理”即都是白光的色散。所有这些都表明中国明代以前对色散现象的本质已有了较全面的认识，但也反映中国古代物理学知识大都是零散、经验性的知识。

### 二、西方牛顿以前对光的色散的认识

在光学发展的早期，对颜色的解释显得特别困难。在牛顿以前，欧洲人对颜色的认识流行着亚里士多德的观点。亚里士多德认为，颜色不是物体客观的性质，而是人们主观的感觉，一切颜色的形成都是光明与黑暗、白与黑按比例混合的结果。1663年波义耳也曾研究了物体的颜色问题，他认为物体的颜色并不是属于物体的带实质性的性质，而是由于光线在被照射的物体表面上发生变异所引起的。能完全反射光线的物体呈白色，完全吸收光线的物体呈黑色。另外还有不少科学家，如笛卡儿、胡克等也都讨论过白光分散或聚集成颜色的问题，但他们都主张红色是大大地浓缩了的光，紫光是大大地稀释了的光这样一个复杂紊乱的理论。所以在牛顿以前，由棱镜产生的折射被假定是实际上产生了色，而不是仅仅把已经存在的色分离开来。

### 三、牛顿对光的色散的实验探索与理论研究

#### 1. 设计并进行三棱镜实验

当白光通过无色玻璃和各种宝石的碎片时，就会形成鲜艳的各种颜色的光，这一事实早在牛顿的几个世纪之前就已有了解，可是直到十七世纪中叶以后，才有牛顿通过实验研究了这个问题。

牛顿首先做了一个有名的三棱镜实验，他在著作中记载道：“1666年初，我做了一个三角形的玻璃棱柱镜，利用它来研究光的颜色。为此，我把房间里弄成漆墨的，在窗户上做一个小孔，让适量的日光射进来。我又把棱镜放在光的入口处，使折射的光能够射到对面的墙上去，当我第一次看到由此而产生的鲜明强烈的光色时，使我感到极大的愉快。”牛顿的实验设计如下图：通过这个实验，在墙上得到了一个彩色光斑，颜色的排列是红、橙、黄、绿、青、蓝、紫。牛顿把这个颜色光斑叫做光谱。

#### 2. 进一步设计实验，获得纯光谱

牛顿在上述实验中所得到的光谱是不纯的，他认为光谱之所以不纯是因为光谱是由一系列相互重叠的圆形色斑的像所组成。牛顿为了获得很纯的光谱，便设计了一套光学仪器进行实验，其实验设计如图所示：用白光通过一透镜后照亮狭缝S，狭缝后放一凸透镜以便形成狭缝S的像I。然后在透镜的光路上放一个棱镜。结果光通过棱镜因偏转角度不同而被分开，以至在白色光屏上形成一个由红到紫的光谱带。这个光谱带是由一系列彼此邻接的狭缝的彩色像组成的。若狭缝做得很窄，重叠现象就可以减小到最低限度，因而光谱也变得很纯。

#### 3. 牛顿提出解释光谱的理论

牛顿为了解释三棱镜实验中白光的分解现象，认为白光是由各种不同颜色光组成的，玻璃对各种色光的折射率不同，当白光通过棱镜时，各色光以不同角度折射，结果就被分开成颜色光谱。白光通过棱镜时，向棱镜的底边偏折，紫光偏折最大，红光偏折最小。棱镜使白光分开成各种色光的现象叫做色散。严格地说，光谱中有很多各种颜色的细线，它们都平滑地融在相邻的细线里，以至使人觉察不到它的界限。

#### 4. 设计实验验证上述理论的正确性

为了进一步研究光的颜色，验证上述理论的正确性，牛顿又做了另一个实验。实验设计如图所示：

牛顿在观察光谱的屏幕DE上打一小孔，再在其后放一有小孔的屏幕de，让通过此小孔的光是具有某种颜色的单色光。牛顿在这个光束的路径上再放上第二个棱镜abc，它的后面再放一个新的观察屏V。实验表明，第二个棱镜abc只是把这个单色光束整个地偏转一个角度，而并不改变光的颜色。实验中，牛顿转动第一个棱镜ABC，使光谱中不同颜色的光通过DE和de屏上的小孔，在所有这些情况下，这些不同颜色的单色光都不能被第二个棱镜再次分解，它们各自通过第二个棱镜后都只偏转一定的角度，而且发现，对于不同颜色的光偏转的角度不同。

通过这些实验，牛顿得出结论：白光能分解成不同颜色的光，这些光已是单色的了，棱镜不能再分解它们。

#### 5. 单色光复合为白光的实验

白光既然能分解为单色光，那么单色光是否也可复合为白光呢？为此

牛顿进行实验。如图 55 所示，把光谱成在一排小的矩形平面镜上，就可使光谱的色光重新复合为白光。调节各平面镜与入射光的夹角，使各反射光都落在光屏的同一位置上，这样就得到一个白色光斑。

牛顿指出，还可以用另一种方法把色光重新复合为白光。把光谱画在圆盘上成扇形，然后高速旋转这个圆盘，圆盘就呈现白色。这种实验效果一般称为“视觉暂留效应”。眼睛视网膜上所成的像消失后，大脑还可以把印象保留零点几秒种。从而，大脑可将迅速变化的色像复合在一起，就形成一个静止的白色像。在电视屏幕上或电影屏幕上，我们能够看到连续的图像，其原因也正在于利用了人的“视觉暂留效应”。

#### 6. 牛顿对光的色散研究成果。

牛顿通过一系列的色散实验和理论研究，把结果归纳为几条，其要点如下：

光线随着它的折射率不同而颜色各异。颜色不是光的变样，而是光线本来就固有的性质。

同一颜色属于同一折射率，反之亦然。

颜色的种类和折射的程度为光线所固有，不因折射、反射和其它任何原因而变化。

必须区别本来单纯的颜色和由它们复合而成的颜色。

不存在自身为白色的光线。白色是由一切颜色的光线适当混合而产生的。事实上，可以进行把光谱的颜色重新合成而得到白光的实验。

根据以上各条，可以解释三棱镜使光产生颜色原因以及虹的原理等。

自然物的颜色是由于该物质对某种光线反射得多，而对其他光线反射得少的原因。

由此可知，颜色是光（各种射线）的质，因而光线本身不可能是质。因为颜色这样的质起源于光之中，所以现在有充分的根据认为光是实体。

#### 7. 牛顿对于光的色散现象的研究方法的特点。

从以上可看出牛顿在对光的色散研究中，采用了实验归纳——假说理论——实验检验的典型的物理规律的研究方法，并渗透着分析的方法（把白光分解为单色光研究）和综合的方法（把单色光复合为白光）等物理学研究的方法。



## 光的传播速度

光的干涉和衍射现象说明光具有波动性,光的偏振现象进而说明光是横波.而光以有限速度传播以及光速的精确测定,在建立光的电磁波学说方面也曾起了重大的作用.光速是物理学中最重要的基本常数之一,也是所有各种频率的电磁波在真空中的传播速度.狭义相对论认为:任何信号和物体的速度都不能超过真空中的光速.在折射率为  $n$  的介质中,光的传播速度为:  $v=c/n$ .在光学和物理学的发展历史上,光速的测定,一直是许多科学家为之探索的课题.许多光速测量方法那巧妙的构思、高超的实验设计一直在启迪着后人的物理学研究.历史上光速测量方法可以分为天文学测量方法、大地测量方法和实验室测量方法等.

### 一、光速测定的天文学方法

#### 1. 罗默的卫星蚀法

光速的测量,首先在天文学上获得成功,这是因为宇宙广阔的空间提供了测量光速所需要的足够大的距离.早在 1676 年丹麦天文学家罗默(1644—1710)首先测量了光速.由于任何周期性的变化过程都可当作时钟,他成功地找到了离观察者非常遥远而相当准确的“时钟”,罗默在观察时所用的是木星每隔一定周期所出现的一次卫星蚀.他在观察时注意到:连续两次卫星蚀相隔的时间,当地球背离木星运动时,要比地球迎向木星运动时要长一些,他用光的传播速度是有限的来解释这个现象.光从木星发出(实际上是木星的卫星发出),当地球离开木星运动时,光必须追上地球,因而从地面上观察木星的两次卫星蚀相隔的时间,要比实际相隔的时间长一些;当地球迎向木星运动时,这个时间就短一些.因为卫星绕木星的周期不大(约为 1.75 天),所以上述时间差数,在最合适的时间(上图中地球运行到轨道上的 A 和 A' 两点时)不致超过 15 秒(地球的公转轨道速度约为 30 千米/秒).因此,为了取得可靠的结果,当时的观察曾在整年中连续地进行.罗默通过观察从卫星蚀的时间变化和地球轨道直径求出了光速.由于当时只知道地球轨道半径的近似值,故求出的光速只有 214300km/s.这个光速值尽管离光速的准确值相差甚远,但它却是测定光速历史上的第一个记录.后来人们用照相方法测量木星卫星蚀的时间,并在地球轨道半径测量准确度提高后,用罗默法求得的光速为  $299840 \pm 60\text{km/s}$ .

#### 2. 布莱德雷的光行差法

1728 年,英国天文学家布莱德雷(1693—1762)采用恒星的光行差法,再一次得出光速是一有限的物理量.布莱德雷在地球上观察恒星时,发现恒星的视位置在不断地变化,在一年之内,所有恒星似乎都在天顶上绕着半长轴相等的椭圆运行了一周.他认为这种现象的产生是由于恒星发出的光传到地面时需要一定的时间,而在此时间内,地球已因公转而发生了位置的变化.他由此测得光速为:

$$C=299930 \text{ 千米/秒}$$

这一数值与实际值比较接近.

以上仅是利用天文学的现象和观察数值对光速的测定,而在实验室内限于当时的条件,测定光速尚不能实现.

## 二、光速测定的大地测量方法

光速的测定包含着对光所通过的距离和所需时间的量度,由于光速很大,所以必须测量一个很长的距离和一个很短的时间,大地测量法就是围绕着如何准确测定距离和时间而设计的各种方法.

### 1. 伽利略测定光速的方法

物理学发展史上,最早提出测量光速的是意大利物理学家伽利略.1607年在他的实验中,让相距甚远的两个观察者,各执一盏能遮闭的灯,如图所示:观察者A打开灯光,经过一定时间后,光到达观察者B,B立即打开自己的灯光,过了某一时间后,此信号回到A,于是A可以记下从他自己开灯的一瞬间到信号从B返回到A的一瞬间所经过的时间间隔 $t$ .若两观察者的距离为 $S$ ,则光的速度为

$$c=2s/t$$

因为光速很大,加之观察者还要有一定的反应时间,所以伽利略的尝试没有成功.如果用反射镜来代替B,那么情况有所改善,这样就可以避免观察者所引入的误差.这种测量原理长远地保留在后来的一切测定光速的实验方法之中.甚至在现代测定光速的实验中仍然采用.但在信号接收上和时间测量上,要采用可靠的方法.使用这些方法甚至能在不太长的距离上测定光速,并达到足够高的精确度.

### 2. 旋转齿轮法

用实验方法测定光速首先是在1849年由斐索实验.他用定期遮断光线的方法(旋转齿轮法)进行自动记录.实验示意图如下.从光源 $s$ 发出的光经会聚透镜 $L_1$ 射到半镀银的镜面A,由此反射后在齿轮 $W$ 的齿 $a$ 和 $a'$ 之间的空隙内会聚,再经透镜 $L_2$ 和 $L_3$ 而达到反射镜 $M$ ,然后再反射回来.又通过半镀银A由 $L_4$ 集聚后射入观察者的眼睛 $E$ .如使齿轮转动,那么在光达到 $M$ 镜后再反射回来时所经过的时间 $t$ 内,齿轮将转过一个角度.如果这时 $a$ 与 $a'$ 之间的空隙为齿 $a$ (或 $a'$ )所占据,则反射回来的光将被遮断,因而观察者将看不到光.但如齿轮转到这样一个角度,使由 $M$ 镜反射回来的光从另一齿间空隙通过,那么观察者会重新看到光,当齿轮转动得更快,反射光又被另一个齿遮断时,光又消失.这样,当齿轮转速由零而逐渐加快时,在 $E$ 处将看到闪光.由齿轮转速 $v$ 、齿数 $n$ 与齿轮和 $M$ 的间距 $L$ 可推得光速 $c=4nvL$ .

在斐索所做的实验中,当具有720齿的齿轮,一秒钟内转动12.67次时,光将首次被挡住而消失,空隙与轮齿交替所需时间为

$$\frac{1}{2} \times \frac{1}{720} \times \frac{1}{12.67} = \frac{1}{18244} \text{秒}$$

在这一时间内,光所经过的光程为 $2 \times 8633$ 米,所以光速 $c=2 \times 8633 \times 18244=3.15 \times 10^8$ (m/s).

在对信号的发出和返回接收时刻能作自动记录的遮断法除旋转齿轮法外,在现代还采用克尔盒法.1941年安德孙用克尔盒法测得: $c=299776 \pm 6\text{km/s}$ ,1951年贝格斯格兰又用克尔盒法测得 $c=299793.1 \pm 0.3\text{km/s}$ .3. 旋转镜法

旋转镜法的主要特点是能对信号的传播时间作精确测量.1851年傅科成功地运用此法测定了光速.旋转镜法的原理早在1834年1838年就已

为惠更斯和阿拉果提出过,它主要用一个高速均匀转动的镜面来代替齿轮装置.由于光源较强,而且聚焦得较好.因此能极其精密地测量很短的时间间隔.实验装置如图所示.从光源  $s$  所发出的光通过半镀银的镜面  $M_1$  后,经过透镜  $L$  射在绕  $O$  轴旋转的平面反射镜  $M_2$  上  $O$  轴与图面垂直.光从  $M_2$  反射而会聚到凹面反射镜  $M_3$  上,  $M_3$  的曲率中心恰在  $O$  轴上,所以光线由  $M_3$  对称地反射,并在  $s$  点产生光源的像.当  $M_2$  的转速足够快时,像  $S$  的位置将改变到  $s'$ ,相对于可视  $M_2$  为不转时的位置移动了  $s$  的距离可以推导出光速值:

$$C = \frac{4wl\omega}{s}$$

式中  $w$  为  $M_2$  转动的角速度.  $l_0$  为  $M_2$  到  $M_3$  的间距,  $l$  为透镜  $L$  到光源  $S$  的间距,  $s$  为  $s$  的像移动的距离.因此直接测量  $w$ 、 $l$ 、 $l_0$ 、 $s$ ,便可求得光速.在傅科的实验中: $L=4$  米,  $L_0=20$  米,  $s=0.0007$  米,  $w=800 \times 2$  弧度/秒,他求得光速值  $c=298000 \pm 500\text{km/s}$ .

另外,傅科还利用这个实验的基本原理,首次测出了光在介质(水)中的速度  $v < c$ ,这是对波动说的有力证据.

### 3. 旋转棱镜法

迈克耳逊把齿轮法和旋转镜法结合起来,创造了旋转棱镜法装置.因为齿轮法之所以不够准确,是由于不仅当齿的中央将光遮断时变暗,而且当齿的边缘遮断光时也是如此.因此不能精确地测定象消失的瞬时.旋转镜法也不够精确,因为在该法中象的位移  $s$  太小,只有 0.7 毫米,不易测准.迈克耳逊的旋转镜法克服了这些缺点.他用一个正八面钢质棱镜代替了旋转镜法中的旋转平面镜,从而光路大大的增长,并利用精确地测定棱镜的转动速度代替测齿轮法中的齿轮转速测出光走完整个路程所需的时间,从而减少了测量误差.从 1879 年至 1926 年,迈克耳逊曾前后从事光速的测量工作近五十年,在这方面付出了极大的劳动.1926 年他的最后一个光速测定值为

$$c=299796\text{km/s}$$

这是当时最精确的测定值,很快成为当时光速的公认值.

## 三、光速测定的实验室方法

光速测定的天文学方法和大地测量方法,都是采用测定光信号的传播距离和传播时间来确定光速的.这就要求要尽可能地增加光程,改进时间测量的准确性.这在实验室里一般是受时空限制的,而只能在大地野外进行,如斐索的旋轮齿轮法当时是在巴黎的苏冷与达蒙玛特勒相距 8633 米的两地进行的.傅科的旋转镜法当时也是在野外,迈克耳逊当时是在相距 35373.21 米的两个山峰上完成的.现代科学技术的发展,使人们可以使用更小更精确地实验仪器在实验室中进行光速的测量.

1. 微波谐振腔法  
1950 年埃森最先采用测定微波波长和频率的方法来确定光速.在他的实验中,将微波输入到圆柱形的谐振腔中,当微波波长和谐振腔的几何尺寸匹配时,谐振腔的圆周长  $D$  和波长之比有如下的关系:  
 $D=2.404825 \lambda$ ,因此可以通过谐振腔直径的测定来确定波长,而直径则用干涉法测量;频率用逐级差频法测定.测量精度达  $10^{-7}$ .在埃森的实验中,

所用微波的波长为 10 厘米，所得光速的结果为  $299792.5 \pm 1\text{km/s}$ 。

## 2. 激光测速法

1790 年美国国家标准局和美国国立物理实验室最先运用激光测定光速。这个方法的原理是同时测定激光的波长和频率来确定光速 ( $c = \lambda \nu$ )。由于激光的频率和波长的测量精确度已大大提高，所以用激光测速法的测量精度可达  $10^{-9}$ ，比以前已有最精密的实验方法提高精度约 100 倍。

## 四、光速测量方法一览表

除了以上介绍的几种测量光速的方法外，还有许多十分精确的测定光速的方法。现将不同方法测定的光速值列为“光速测量一览表”供参考。

根据 1975 年第十五届国际计量大会的决议，现代真空中光速的最可靠值是：

$$c = 299792.458 \pm 0.001\text{km/s}$$

而理论值  $c = 1 / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 299792.50\text{km/s}$ 。这也说明以上光速测量方法是正确的。

光速测量一览表

年代	测量者	测量方法	测量对象	光速值 ( km/s )
1727	布莱德雷	光行差法		301000
1849	斐索	齿轮法	群速	313000
1851	傅科	旋转镜法	群速	$298000 \pm 500$
1933	迈克耳逊等	旋转棱镜法	群速	$299774 \pm 2$
1941	安德森	克尔盒调制器	群速	$299776 \pm 6$
1950	埃森	谐振腔法	相速	$299792.5 \pm 1$
1951	贝格斯特兰	光电测距仪	群速	$299793.1 \pm 0.3$
1956	艾奇	光电测距仪	群速	$299792.2 \pm 0.1$
1957	韦德莱	雷达测距仪	群速	$299792.6 \pm 1.2$
1958	弗罗默	微波干涉仪	相速	$299792.5 \pm 0.1$
1961	卡特科斯基等	电荷的静电单位与电磁单位的比值		$299791.96 \pm 0.8$
1964	兰克等	光谱法	相速	$299792.8 \pm 0.4$
1966	卡洛路斯等	声调制法	群速	$299792.47 \pm 0.15$
1972	贝依等	氦-氖激光	相速	$299792.462 \pm 0.018$
1972	贝艾德	二氧化碳激光	相速	$299792.460 \pm 0.006$
1973	美国国家标准局	测氦-氖激光的	相速	$299792.4574 \pm 0.0011$
1974	美国国立物理实验室	测 $\text{CO}_2$ 激光的	相速	$299792.4590 \pm 0.008$

## 光的本性

人们对光的本性的认识经历了漫长的岁月,大约在十七世纪形成了两种对立的学说,即光的波动说与微粒说,但在以后很长一段时期内,微粒说占据统治地位,而波动说几乎消声匿迹.历史发展到十九世纪初,由于一连串的和众多科学家的努力使光的波动说再次复兴,并压倒了微粒说.二十世纪初,爱因斯坦提出了光的量子说,康普顿证实了光的粒子性,使人们对光的本性又有全新的认识,乃至到今天,人们认识到光具有波粒二象性.人们对光的本性的认识过程可概括为:

光的波动说 光的微粒说 光的波动说 光的量子说 光的粒子说  
光的波粒二象性.

### 一、光的波动说的形成

十七世纪形成了关于光的本性的两种学说,历史上主张光的波动说有笛卡儿、胡克、惠更斯等人.

#### 1. 笛卡儿借助于以太来说明光的传播过程

十七世纪上半叶,法国物理学家笛卡儿(1596—1650)曾用他提出的“以太”假说来说明光的本性.他用以太中的压力来说明光的传播过程.如果一物体被加热并发光,这意味着,物体的粒子处于运动状态并给予这一媒质的粒子以压力.这一媒质被称为以太,它充满了整个空间.压力向四面八方传播,在达到人眼后引起人的感觉,他把人们对物体的视觉比喻为盲人用手杖来感知物体的存在.他把光的颜色设想为起源于以太粒子的不同的转动速度,转得快的引起红色的感觉,转得慢的对应于黄色,最慢的是绿色和蓝色.他的主张是强调媒质的影响,以“作用”的传播为出发点,特别是以接触作用或近距作用为出发点,把光看作压力或者脉动运动的传播,因而笛卡儿被认为是光的波动说的创始人.

#### 2. 胡克把光波与水波类比指出光的波动性

胡克在1665年出版的《显微术》一书,明确提出光是一种振动.他以钻石受到摩擦、打击或加热时在黑暗中发光的现象为例,认为发光体的一部分处在或多或少的运动中,又因金刚石很硬,肯定它是一种很短的振动.在分析光的传播时,胡克提到了光速的大小是有限的,并认为“在一种均匀媒介中,这一运动在各个方向都以相等的速度传播”,因此发光体的每一个振动形成一个球面向四周扩展,犹如石子投入水中所形成的波那样,而射线和波面交成直角.胡克还把波面的思想用于对光的折射现象的研究,提出了薄膜颜色的成因是由于两个界面反射、折射后所形成的强弱不同、超前落后不一致的两束光的叠合.这里已包含着波阵面、干涉等不少波动说的基本概念.

#### 3. 惠更斯把光波与声波类比提出惠更斯原理,发展了光的波动学说

荷兰物理学家惠更斯(1629—1695)在十七世纪七十年代,从事光的波动论的研究,1690年出版了他的著名著作《论光》.惠更斯从光的产生和它所引起的作用两方面来说明光是一种运动.他的研究发现:“光线向各个方面以极高的速度传播,并且光线从不同的地点出发时,光线在传播中相互穿过而互不影响.当我们看到发光的物体时,决不会是由于该物体有任何物质传输到我们这里,好象一粒子弹或一只箭穿过空气那样”从

这里可看出，惠更斯从光束在传播中相互交叉时并不彼此妨碍的事实得出上述结论的。他把光的传播方式和声音在空气中的传播作比较，明确地指出了光是一种波动的思想。他又根据光速的有限性论证了光是从媒质的一部分依次向其他部分传播的一种运动，他认为光和声波、水波一样是一种球面波。

惠更斯不但从现象上解释各种光的波动现象，而且试图从理论的高度总结出普遍的规律，他提出了著名的惠更斯原理。他叙述说：“关于这些波的形成过程还必须指出，当光在物质中传播时，物质的每一个粒子都应当把它的运动不仅传递给位于它与发光点的连线上近旁的粒子，它也必然把运动传递给所有与它接触并阻碍它运动的其它粒子。因此，在粒子的周围就应当形成波，而该粒子则是波的中心”。运用这个次波原理，惠更斯不但成功地解释了反射和折射定律，而且还解释了方解石的双折射现象。

惠更斯没有给波动过程以严密的数学描述。没有提到波长的概念，他的次波包络面也没有从一定位相的迭加所造成的强度分布来考虑，只不过是光传播的一种几何的定性说明，故仍旧停留在几何光学的观念范围内。由于他认为光波和声波一样是一种纵波，因此他无法解释光的偏振现象；而且惠更斯所谓的波动实际上只是一种脉冲而不是一个波列，也没有建立起波动过程的周期性概念，因此，用他的理论无法解释颜色的起源，也不能说明干涉、衍射等有关光的本质的现象。

总之，十七世纪，由笛卡儿、胡克、惠更斯等人所建立起的光的波动学说还是很不成熟的。

## 二、光的微粒说的形成

在光的波动学说形成过程中，关于光的本性另一种对立学说——光的微粒说也逐步建立起来了。

1. 牛顿在对光的色散现象的研究中提出了光的微粒说。牛顿在光学研究中，从光的色散现象中得出结论；单色的光束是不能再改变的。它们可以说是光的“原子”，就象物质的原子一样。支持光的微粒说的人们认为：单色光是由单一粒子构成的，白光则是各种光粒子的混合物，棱镜只是将它们分类，使各种光粒子有不同的偏转角度。因而牛顿及其追随者把色散现象看作是微粒说的一个证明。而在当时很不完善的波动说却很难解释光的色散问题。惠更斯虽然他知道牛顿的这一研究成果，但在他的著作中却避开而不谈这一问题。

2. 牛顿根据光的直线传播性质，提出光是微粒流的理论。牛顿在1704年出版的《光学》一书中，根据光的直线传播性质，提出了光是微粒流的理论。他认为光的直线传播是由于这些微粒从光源飞出来，在真空或均匀物质内由于惯性而作匀速直线运动。他说：“光线是否是发光物质发射出来的很小的物体？因为这样一些物体能够直线穿过均匀媒质而不弯曲到影子区域里去，这正是光线的本性。”

3. 牛顿在解释光的折射定律、衍射、干涉等现象的过程中进一步发展和完善了光的微粒说。

牛顿在分析折射定律时，坚持微粒说的观点，认为光在光密媒质中的速度大于光疏媒质中的速度（实际上这是一种错误观点），但这在当时无法用实验加以检验的。牛顿解释光的衍射现象时认为，当光粒子通过障碍

的边缘时，由于两者之间有引力作用，使光束进入了几何阴影区。这种解释在当时曾被多数人所接受。牛顿在解释光的干涉现象时，认为当光投射到一个物体上的时候，可能激起物体中以太粒子的振动，就好像投入水中的石块在水面上激起波纹一样。他甚至设想可能正是由于这种波依次地赶过光线而引起干涉现象。在解释薄膜干涉时，牛顿已接触到光的周期性概念。

从以上可看出，牛顿对光的本性的看法基本上是倾向于微粒说的观点，但其中也包含一些波动性的观点。而牛顿当时的支持和崇拜者们却把牛顿推举为微粒说的代表。

### 三、光的波动说与微粒说的斗争中，微粒说取得初步胜利，占统治地位。

当光的波动说和微粒说初步形成后，这两种对立的观点进行了激烈地争论和斗争。以惠更斯等为代表的光的波动说和以牛顿为代表的光的微粒说各持己见。它们都能解释一些光学现象。但也各有一些局限性，限于当时的条件有时也难以明确判断其正误。如按照微粒说，可推导出光的折射定律为

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_2}{v_1} = n$$

式中  $i$  为入射角、 $r$  为折射角、 $n$  为折射率。 $v_1$  和  $v_2$  分别为第一种媒质与第二种媒质中的光速。由疏媒质进入光密媒质时  $v_2 < v_1$ ，即光疏媒质中的光速  $v_1$  大于光密媒质中的光速  $v_2$ 。而按波动说，惠更斯推导出

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{则 } v_2 < v_1$$

由于当时在实验技术上还没有办法精确测定媒质中的光速，因此对上述彼此对立的两种观念谁是谁非还无法判断。

在两种学说的争论中，由于牛顿当时的显赫声望与权威，而且光的微粒说也成功地解释了光的直线传播特性、光的反射和折射等现象再加上微粒说与当时关于物质结构的原子说不相矛盾，所以十七世纪的多数物理学家都赞同光的微粒说，这样一直持续到十八世纪末，致使微粒说在光的本性的争论中在十九世纪以前一直占统治地位，也为人们认识光的本性提供了重要的依据，使光的波动说几乎消声匿迹。只有极少数的物理学家捍卫并发展“以太”的波动理论。他们中有瑞士的欧拉（1707—1783）、伯努利（1700—1782）和俄罗斯的罗蒙诺索夫（1711—1765）等。

微粒说尽管在光的本性争论中占上风，但牛顿严谨的治学态度，使他始终认为虽然做过许多光学实验，但始终做得还很不充分，对光的本质只能提出一些问题，还停留在假设阶段，牛顿希望“留给那些认为值得努力去把这个假说应用于解释各种现象的人们去思考”。

### 四、光的波动说的复兴

在十八世纪由于光的微粒说占统治地位，使光的波动理论实际上没有什么进展。十九世纪初由于一大批物理学家的共同努力，使光的波动学说再度复兴，并取得了极大的成功。

#### 1. 托马斯·杨的开创性研究工作

英国年轻的学者托马斯·杨（1773—1829）面对以声望显赫的牛顿为代表的微粒说认为，尽管他也仰慕牛顿的大名，但并不因此非得认为牛顿是万无一失的，他也会弄错，而且由于他的权威也许有时甚至阻碍了科学的进步。更何况牛顿在他的《光学》著作中，已提出过对光的本性可以进一步探究。虽然周围的环境对托马斯·杨的波动理论的研究工作起了压抑的影响，但他还是坚持探索。他通过仔细地观察在两组水波交迭处发生的现象：“……一组波的波峰与另一组波的波峰相重合，将形成一组波峰更高的波。如果一波的波峰与另一组波的波谷相重合，那么波峰恰好填满波谷……”由此他提出的著名的“干涉原理”也称“波的迭加原理”，并在光学中首次引入了“干涉”的概念。他所表述的干涉原理是：“两个在方向上或者完全一致、或者很接近的不同光源的波动，它们的联合效应是每一种光的运动的合成。两束光在交叠处由于运动的合成会产生光强度的重新分配，形成明暗相间的干涉条纹。同时他指出了产生干涉现象的条件。他首次完成了著名的双缝干涉实验和其他一些干涉实验，总结出：为了显示光的干涉，先必须使从同一光源出来的光分成两束，经由不同的途径，然后重新迭合在一起，即可观察到干涉现象。杨氏第一次成功地测定了光的波长。但杨氏的发现没有受到科学界的重视，反而引来了一些粗暴的攻击。从这里可看出，光的微粒说在当时不可动摇的地位。直到二十年之后，法国物理学家菲涅耳在法国独立地研究了光的理论，并特别称赞杨的工作之后，杨才恢复早斯的光学研究。托马斯·杨的工作是一种开创性工作，它从根本上证明了波动理论的正确性，为波动说的复兴奠定了基础。

2. 菲涅耳的杰出的实验研究与理论研究成果使光的波动说再度复兴。

菲涅耳的光学研究中，他首先观察了从点光源发射出的光束在遇到细线阻挡时出现的条纹。如果将通过细线一边的光在它到达屏之前把它拦住时，影内的条纹就失去了。菲涅耳认为条纹的出现同细线两边光的迭加有关。而当时许多物理学家却认为这种现象并不是由于光波的迭加，因为微粒说早就提出对衍射的解释。菲涅耳从理论研究中发现了著名的惠更斯—菲涅耳原理：“在任何一点的光波振动可以看作是在同一时刻传播到那一点上的光的元振动的总和，这些振动来自所考察的波的以前位置未受阻拦的所有部分的作用”。运用这个原理，就能以严密的数学方法计算出衍射带的分布，并解释光在均匀媒质中的近似的直线传播现象和干涉现象。

菲涅耳曾做过许多实验，它提出了“相干光”这个概念，即只有同一光源的同一点发出的光才是相干的。他设计和进行了著名的双面镜和双棱镜实验，并测定了光的波长，明确指出光和声的波动性就是产生衍射和干涉现象的原因。菲涅耳还用不同的波长解释光的不同颜色。1818年菲涅耳的有关衍射论文获法国科学院举行的一次竞赛的头奖和荣誉论文的称号。泊松从菲涅耳理论中推论出在一个圆形不透明障碍物的阴影中心应当出现一个亮点，不久被阿拉哥的实验所证实。1808年，马吕斯（1775—1812）偶然发现光在两种媒质界面上反射时的偏振现象，为了解释这种现象，杨氏1817年指出了光波和弦上传播的波动类似的假设，认为光波是一种横波。菲涅耳进一步完善了这一观点，并导出了菲涅耳公式。这样，由于杨氏和菲涅耳等人的杰出工作，终于使光的波动说再度复兴，并得到了极大的完善和发展，使光的波动说在光的本性的争论中在十九世纪占据



了统治地位，使十七、十八世纪盛行一时的微粒说不得不退居“二线”。

### 3. 光的波动说的发展与其局限性

光的波动说在经托马斯·杨和菲涅耳等人的努力再度复兴之后，在十九世纪中叶和后半叶又得到了很快地发展。1845年法拉弟发现了光的偏振面在强磁场中会发生旋转的现象，揭示了光和电磁现象之间的内在联系。1852年，德国物理学家韦伯（1804—1891）发现并测定了电荷的电磁单位与静电单位的比值等于光在真空中的传播速度，进一步说明了光和电磁之间的内在联系。1849年法国物理学家菲索测定了光速，1862年傅科又使用旋转镜法得到了更加精确的测定值，并测定了光在水中的速度小于在空气中的速度，从而给光的波动说以充分精确的实验证明。光速的测定为光的电磁理论提供了有力的证据。1864年麦克斯韦电磁场理论的建立使光的波动说达到了成功的顶峰。

至此光的波动说似乎十分圆满了，但是把波动看作“以太”中的机械弹性波，就必须赋予以太许多附加甚至相互矛盾的性质，如光是横波，则“以太”必须有非常大的切变弹性，而这种性质只有固体才具有，因此波动说仍然面临困难。而且随后的实验发现也证明了光的波动说具有一定的局限性。

## 五、光的量子说

1900年普朗克提出量子假设，1905年爱因斯坦发表论光的量子理论著名论文，题目是《一个关于光的产生和转化的启发性观点》。他指出，用连续空间函数表示能量的光波理论，当应用于光的产生和转化等现象时，会导致与经验相矛盾的结果。对于黑体辐射、光致发光、光电效应这些现象如果用光量子的假设来说明，似乎更容易理解。他发展了普朗克提出的能量子概念，认为电磁辐射的能量可以分成一小份、一小份的“微粒”式结果，这些能量颗粒就是光量子，简称光子。它的大小用  $h\nu$  表示。（ $h$ —普朗克常数， $\nu$ —光的频率）。光量子适用于一切光的产生与转化问题，在自由空间中光量子是一种存在的“实体”，爱因斯坦用光量子概念圆满地解释了经典物理理论无法解决的实验事实：光电效应。

因为按照光的波动说，它是与光电效应的实验事实相矛盾的。其一，按照光的波动说，在光的照射下，金属中的电子将从入射光中吸收能量，从而逸出金属表面。逸出时的初动能应决定于光振动的振幅，即决定于光的强度。因而光电子的初动能应随入射光强度而增加。这与光电效应的实验结果不符。其二，根据波动说，如果光强足够供应从金属释出光电子所需要的能量，那么光电效应对各种频率的光都会发生，但实验事实是每种金属都存在一个红限  $\nu_0$ ，对于频率小于  $\nu_0$  的入射光，不管入射光的强度多大，都不能发生光电效应。其三，按照光的波动说，金属中的电子从入射波中吸收能量必须积累到一定的量值，才能释放电子，显然入射光越弱，能量积累的时间越长。但事实是当物体受到光的照射时，无论光怎样弱，只要频率大于红限频率，光电子几乎是立刻发射出来的。

爱因斯坦则根据光的量子理论成功地解释了光电效应，并总结出了光电效应方程式

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A$$

十年后密立根的实验完全证实了爱因斯坦光电效应方程及理论的正确性，从而确立了光的量子理论。

## 六、光的粒子性

1923 年美国物理学家康普顿在实验中又发现：伦琴射线被轻的原子散射后，波长发生了变化。后来用重原子散射时，也观察到这个现象，并且这时的康普顿效应更加复杂。

按照经典电磁理论，光是波长很短的电磁波。光的散射可作这样的解释：当电磁波通过物体时，将引起物体内部带电粒子的受迫振动，从入射光中吸收能量。而每个振动着的带电粒子可看作振动电偶极子，它们向四周辐射，这就成为散射光。又根据光的波动说观点，带电粒子受迫振动频率应等于入射光的频率，所以散射光的频率应与入射光的频率相同。可见光的波动理论能够解释波长不变的散射，但不能解释康普顿效应。

康普顿用光子的概念成功地解释了康普顿效应。他假设入射光是由许多光子组成，这些光子不但具有能量  $h\nu$ ，而且具有动量  $h\nu/c$ 。这样问题就转化为普通的质点碰撞问题了，即具有动量和能量的光子与原来处在静止状态的电子相碰撞。碰撞过程遵循能量守恒与动量守恒定律。这样计算出的数值与实验结果相符，从而证实，光确实具有粒子性。

## 七、光的物质性

光照在物体应该给被照物以压力，这早在十七世纪初开普勒解释彗星尾巴形状时就已提出，1899 年俄国物理学家列别捷夫（1866—1912）首次成功完成了光压实验，进一步证实了光的物质性。通过光压实验，它有力地证明了光不仅具有能量，而且还具有动量，这无疑证明了光的物质性，证明了光和实物一样，是物质的一种形式。光是物质，这是人们对光的本性进一步深化认识。

## 八、光的本性的现代观点

经过多代人的努力，今天使我们对光的本性有更深入、更全面的认识。光是一种物质，光具有波动性和粒子性。即所谓的波粒二象性。光是由光子组成的，光子在很多方面具有经典粒子的属性，但光子的出现几率是按波动光学的预言来分布的。由于普朗克常数极小，频率不十分高的光子能量和动量很小，在很多情况下，个别光子不易显示出可观测的效应。人们平时看到的是大量光子的统计行为，只有在一些特殊场合，尤其是牵涉到光的发射与吸收等过程时，个别光子的粒子性会明显地表现出来，波长越短、粒子性越明显。

# 原子物理与现代物理学

## 电 子

### 一、人们对电的本性的认识

人类对电现象本质的认识过程是漫长而曲折的。十八世纪中叶，人们曾提出过“电流质说”，其中以富兰克林为代表的提出了“单流质说”。他认为，电是一种“电的流质”，它是以一定正常的数量存在于一切物体中，它没有重量，弥漫于整个空间，并能毫无阻挡的渗透于任何物体之中。如果物体中这种流质的密度正常时，物体为中性；如果物体中流质的密度低于正常量，则物体带负电；如果物体中这种流质的密度大于正常时，则物体带正电。同时还认为电流质是守恒的，只能被重新分配而不能创造和消失。另一派是以库仑为代表的提出了“双流质说”。认为，处于中性状态的物体之所以不显示有电的性质，是由于它含有数量相等的两种无重量的流质；带有正电的物体就是所含正的流质比负的流质多；带有负电的物体就是其中负的流质较多。并主张，同种电流质的粒子相排斥，异种电流质的粒子相吸引。无论是“单流质说”还是“双流质说”，它们的核心都是把电看作一种物质粒子，十八世纪末、十九世纪初动电发现后，“电流质说”已为人们普遍接受。

### 二、电子概念的初步形成

#### 1. 电解定律表明基本电荷的存在

1833年，法拉第从实验中发现，“在电解中产物之量与通过的电量成正比，而与电压、电极面积及液体的导电率无关”，1836年他又通过一系列实验得出：“由相同的电量产生的不同电解物，有固定的‘当量’关系”，从而建立了著名的电解当量定律。尽管法拉第本人坚持电的流质说，但是，这个定律却是基本电荷存在的有力证据。法拉第的电解定律使许多物理学家相信电的原子性概念。1853年希托夫（1824—1914）在研究离子迁移率时，就运用了电子性概念；1874年斯通尼（1826—1911）根据法拉第电解定律，就主张把电解中一个氢离子所带的电荷作为一个“基本电荷”，并认为任何电荷都是由一些“基本电荷”组成的。德国物理学家韦伯在解释安培的分子电流假说时，曾于1871年提出了一个很接近现代观点的原子结构模型。1878年拉摩和洛仑兹在创立的“电子论”中，也曾赋予物质中电荷的负荷体以一个基本的电量。1881年，德国物理学家亥姆霍兹在谈到法拉第电解定律的意义时说：“法拉第定律最令人惊异的结论，也许是这样：如果我们接受元素物质由原子组成的假说，就不可避免地要作出结论说，电，不论是正电或负电，都可分成单元，其行为如同电的一样”。1890年，斯通尼首次引入“电子”来表示负的基本电荷的负荷体。

#### 2. 阴极射线的发现促使人们形成电子概念

十七世纪尽管人们已发现了低压气体放电现象，但人们没有对它进行更多的研究。直到十九世纪中叶由于电灯业的发展，真空技术和对低压气体放电现象的研究再次受到人们重视。1838年，法拉第在进行稀薄气体

放电现象的实验时，他在一根玻璃管的两端封闭且接上两根铜线，作为电极，并将玻璃管内抽成真空。当在两个电极上分别加上正、负电压时在玻璃管内可观察到明显的辉光，法拉第认为在两极之间有电荷在流动。并发现了后来称之为的“法拉第暗区”。1858年，德国学者普吕克（1801—1868）在利用盖斯勒放电管研究气体放电时发现了阴极射线。并在1859年的报告中指出，在放电管的管壁上发现了绿色荧光，并发现在磁铁的影响下，荧光光斑的位置会发生移动。为了判断这种射线是否确实是从阴极射出来的，1869年，普吕克的学生希托夫进一步将真空管的真空度提高到十万分之一大气压，用点状的阴极发出阴极射线，并在阴极和阳极之间放置一块障碍物进行实验，发现在障碍物后的玻璃壁上产生很清晰的障碍物的影子，这既说明射线是从阴极射出的，也证明了阴极射线是沿直线传播的。1871年，瓦莱根据阴极射线为磁场偏转的事实，提出了阴极射线是由带负电的粒子的假说。1879年英国科学家克鲁克斯（1832—1919）在前人实验的基础上系统地、精确地观察了通电玻璃管的放电现象，支持和发展了瓦莱的带电微粒说。他在真空管的阴极和它相对的玻璃片之间，放置一个用云母片做成的“马耳他十字架”，通电后在玻璃管壁上观察到了十字架的阴影；当他把一块磁铁移近玻璃管时，发现十字架阴影发生移动；他还进一步把云母翼片的风轮放在阴极前面，当阴极射线照射到风轮时，轮子就会转动。克鲁克斯根据这些事实认为，阴极射线是由带负电的“分子流”组成，是管中残留气体分子碰到阴极上，从阴极得到了负电荷而形成的“分子流”。1895年法国物理学家皮兰在阳极对面安上一个法拉第圆筒后，验电器的金箔全面张开，进一步证明了阴极射线是带负电的粒子流。尽管如此，在当时围绕着“阴极射线是什么？”的问题出现了一场大争论。在德国以赫兹为首的大多数物理学家都认为阴极射线是一种电磁波，而在英国和法国以克鲁克斯为主的大多数物理学家都认为阴极射线是带电的粒子流，这一争论持续了一、二十年促使人们进行了许多有意义的实验，推动了物理学的发展。对于阴极射线的本质，最后由英国著名物理学家J·J汤姆逊回答了这一问题。

### 三、电子的发现

#### 1. 电子的速度与荷质比的测定

从1886年起，直到二十世纪三十年代，在长达五十年的时间里，英国物理学家J·J汤姆逊一直从事气体放电现象的观察和研究，他通过不同的实验方法，证明了阴极射线是带负电的粒子流。汤姆逊的实验是在克鲁克斯管的两旁分别加了电场和磁场，发现阴极射线都会发生偏转。只有带电的粒子才会既受到电场的作用，又受到磁场的作用。他从阴极射线和带负电荷的粒子在磁场作用下遵循同样的路径，证明了阴极射线是带负电的粒子组成。1897年汤姆逊采用以下两种方法，测定了阴极射线微粒的速度和荷质比 $e/m$ 。

第一种方法：让阴极射线通过一条狭缝进入法拉第筒，测算电量、能量，并用磁场使其偏转，再测算轨道半径，以求得“微粒”的速度和它的荷质比 $e/m$ 。

设微粒的质量为 $m$ ，微粒的速度为 $v$ ，微粒所带的电量为 $e$ ， $N$ 为一定时间内进入法拉第筒内的微粒数。显然，法拉第筒所获得的电量为

$$Q=Ne$$

若进入法拉第筒内的微粒的动能因碰撞全部转变成热能，则微粒流的动能的大小可由温度计温度变化测算得到，并且其量值为

$$W = N \cdot \frac{1}{2} mv^2$$

然后，用磁场使射线偏转，以  $R$  表示微粒轨道的曲率半径，则有：

$$Bev = \frac{mv^2}{R}$$

由以上三式可得：

$$\frac{e}{m} = \frac{2W}{B^2 R^2 Q}$$

这样，只要测出  $W$ 、 $Q$ 、 $R$  就可算出  $e/m$ 。汤姆逊用这种方法测得：

$$v \sim 5 \times 10^9 \text{ 厘米/秒}$$

$$\frac{e}{m} \sim 2 \times 10^7 \text{ 电磁单位/克}$$

第二种方法：同时利用静电场和磁场使阴极射线发生偏转。先加上一定强度的电场使射线向一方偏转；然后，再加一垂直磁场，使射线向相反方向偏转，调节磁场强度使光斑回到原来的位置。此时，两种场作用在射线上的力是大小相等方向相反的，即

$$evB = eE$$

式中  $E$  是电场强度  $B$  是磁感应强度  $e$  是电子的电荷  $v$  是电子的速度。所以

$$v = E/B$$

另外，再用磁场使粒子发生偏转，此时

$$evB = \frac{mv^2}{R}$$

式中  $R$  为粒子在磁场中运动所形成圆弧的半径。由以上三式可得：

$$\frac{e}{m} = \frac{E}{B^2 R}$$

这样通过测出  $E$ 、 $B$ 、 $R$  就可求得  $v$  与  $\frac{e}{m}$ 。

汤姆逊用这两种方法做实验时，使用了不同气体（空气、氢气、二氧化碳）和不同材料（铝、铁）做电极进行的，得到了相同的荷质比数值。说明  $e/m$  值与阴极材料无关。明确地证实了阴极射线是带负电的粒子。1897年10月汤姆逊把他对电子的发现公布在长篇论文《阴极射线》一文中。

汤姆逊所得结论可以归纳为三方面：

(1) 原子不是不可分割的，因为借助于电力的作用，快速运动的原子的碰撞、紫外线或热，都能够从原子中分离出带负电的粒子。

(2) 这些粒子具有相同的质量并带有相同的负电荷，无论它们是从哪一种原子中得到的，并且它们是一切原子的一个组成部分。

(3) 这些粒子的质量小于一个氢原子的质量的千分之一。

汤姆逊起初把这种粒子叫做微粒，后来才被称为“电子”。2. 电子的电荷测定

为了证实基本电荷的存在，在测出电子的荷质比  $e/m$  后，还要测定电

子的电荷。

最早测  $e$  值的方法是汤姆逊的研究生杨森德提出的。他测量的设计思想是利用化学电解实验，从电极上获取带电的氧气，再除去臭氧，而使离子形成“云”。通过观测它们的下降速度，并利用斯托克斯定律计算小水滴质量的方法，1897年测得电子电荷为  $2.3 \times 10^{-19}$  库仑。次年汤姆逊先用 X 射线使小水滴带电，测得

$$e = 6.5 \times 10^{-10} \text{ 静电单位。}$$

1895年初 C·T·R 威尔逊建立了第一个在无尘大气中凝集水蒸气的装置。1896年他用一个原始的 X 射线管照射云室而产生了浓雾，于是他假定凝聚核心是离子。随后他发现具有饱和水蒸气的空气，由于膨胀而突然冷却变成过饱和汽的情况下，只要有凝聚核存在，就会形成水滴“云”。由于他利用当时的先进的 X 射线的电离作用，从而使云所带的电成为可以控制的。C·T·R 威尔逊当时测得  $e$  值为  $6.5 \times 10^{-10}$  静电单位。而用紫外线时测得  $e$  值为  $6.8 \times 10^{-10}$  静电单位。H·A·威尔逊为了减小水滴蒸发所产生的误差，在云室中放置了两块铜板，使它们与高压电源相接，这样可以通过电场加快带电水滴“云”的下降速度，缩短落下时间，从而减小因蒸发而引起的误差。这样“云”在重力作用下的下降速度  $v_1$  和在重力和电场力同时作用下的下降速度  $v_2$  的比值满足下式：

$$\frac{mg}{mg + eE} = \frac{v_1}{v_2}$$

他记录了 11 次测量结果，从  $2 \times 10^{-10}$  到  $4.4 \times 10^{-10}$  静电单位，平均值为  $3 \times 10^{-10}$  静电单位。

1906年美国物理学家密立根(1868—1953)在1906年重复 H·A·威尔逊的实验，测得  $e = 4.03 \times 10^{-10}$  静电单位。1909年起，密立根改用小油滴进行实验，这是一个很重要的改进。因小水滴蒸发太快，在现场中只能观察几秒。油滴实验以其清晰的物理原理证明了电荷有最小单位。1913年他利用油滴实验测得  $e = (4.774 \pm 0.009) \times 10^{-10}$  静电单位。后来，他又不断改进和重复进行测量 1917 年公布的结果为

$$e = (4.770 \pm 0.005) \times 10^{-10} \text{ 静电单位。}$$

汤姆逊曾提出过电子电量是电量的最小值，物体的带电量是最小值的整数倍。现在人们公认的基本电荷  $e = 1.66021 \times 10^{-19}$  库仑。但目前有人声称发现了分数电荷，但却未被公认。有关分数电荷的寻找目前还在进行中。基本电荷——电子的电量是否基本，目前还是一个有待进一步检验的谜。

### 3. 电子的质量

1881年，J·J 汤姆逊在题为《带电体运动产生的电磁效应》的论文中，用麦克斯韦电磁理论分析了带电体的运动，提出带电微粒的质量除有力学质量  $m_0$  外，还应有一电磁质量  $m_e$ 。这个假说，后被洛仑兹、彭加勒、阿伯拉罕等人发展，他们指出电子的总质量为

$$m = m_0 + m_e$$

荷兰物理学家洛仑兹指出，电子的质量将随它的运动速度的增加而增加，并导出了电子质量与速度的关系式

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

式中  $m_0$  为电子的静质量。1901 年考夫曼（1871—1947）用放射性镭放射出的  $\beta$  射线（电子流）进行实验发现了电子质量随速度变化而变化的事实，从而证实了洛仑兹导出的关系式。

在科学家们测出了电子的荷质比和电子的电量  $e$  后，就可求得电子的质量。最后的结果为： $m_e = \frac{1}{1830} m_H$

即电子的质量为氢原子质量的  $1/1830$  倍。

电子是人们发现的微观世界的第一个基本粒子，它打破了原子不可分割的传统观念，标志着人类对物质微观结构认识的开始。而汤姆逊也成为“最先打开通向基本粒子物理学大门的伟人。”

## X 射线

### 一、X 射线的发现源于对阴极射线的研究

X 射线的发现，源于对阴极射线的研究。在十七世纪，皮卡德首次观察到低压气体的放电现象。到了十八世纪人们对低压气体放电现象进行了一些实验研究，但没能获得实质性进展。十九世纪中叶由于真空技术的发展和生产的需要，人们又十分重视对低压气体放电现象的研究，1838 年法拉第在实验中发现了后来被称作法拉第暗区。1858 年普吕克的实验研究使对真空放电现象的研究得到了实质性的进展。普吕克在利用盖斯勒放电管研究气体放电时发现了阴极射线，从而使阴极射线的研究成了当时物理学研究的一大课题。在这一课题上集中了世界各国许多优秀的物理学家，同时在这一课题的研究上也取得了一批重大的成果。如 J·J 汤姆逊在对阴极射线的研究中，发现了微观世界中的第一个基本粒子电子，从而打破了原子不可分割的观念，为微观世界的研究和探索奠定了重要的基础。在对阴极射线的研究中另一个重大成果，就是 X 射线的发现。

### 二、X 射线发现的过程

德国维尔茨堡大学校长、物理学家伦琴（1845—1923）为了探明阴极射线的性质做了大量的实验研究。1895 年 11 月 8 日晚，伦琴在维尔茨堡大学物理研究所的大楼里进行实验。他要试验一支希托夫——克鲁克斯管的能力，从架上选择了一支梨形放电管，为了防止外界对放电管的影响，同时也不使管内的可见光漏出管外，于是他用黑纸把放电管团团地包起来，再联到高压感应圈的电极上。关闭了所有的门窗。实验时，他发现了一个奇异的现象，在一米以外的桌面上有一种闪烁的微光。他起初怀疑黑纸没有包好，于是又仔细地检查放电管的包裹情况，再接通电源，绿色的亮光又出现了。伦琴使劲揉揉自己的眼睛，划了一根火柴想看个究竟，使他十分惊奇的是绿色的亮光是从桌上的一块涂有亚铂氰化铂的荧光屏上发出来的。他全神贯注地继续进行实验，他把屏反转过来，屏仍然发出荧光；将屏逐渐移远，即使移到远离放电管两米以外，仍有荧光，只是稍弱一些。这是阴极射线所达不到的。因为当时已知阴极射线在空气中只能穿过几厘米，而现在在远离管子两米以外的屏上仍有荧光，所以，伦琴确信这是用阴极射线无法解释的新现象。

伦琴确信自己已发现了一种新的射线。他随手拿起一本书挡在管子与屏之间，结果发现这种射线能穿透书本而使屏发光，他又用玻璃、橡胶等物体实验，同样表明这种射线能够通过。伦琴抑制不住内心的激动，赶忙写信把这一新的发现告诉他的朋友：“我高兴极了……我终于发现了一种光，我也不晓得是什么光……无以名之，就把它叫做 X 光吧。”

伦琴为了进一步研究这种新的射线及其特性，他连续六个星期吃住在实验室，废寝忘食地用各种方法反复进行实验研究。他发现这种射线能穿透千页的书本、2—3 厘米厚的木板、几厘米厚的橡胶板、15 毫米厚的铝板等等。这表明这种射线的穿透能力是十分强的。但实验发现 1.5 毫米厚的铅片几乎就能完全把这种射线挡住。在继续实验时，他突然惊异地看到自己的手出现在荧光屏上的竟是一具骨骼的像。



由于这种射线能使照相底片感光，因此伦琴自己摄制了一些有趣的照片。这些照片有罗盘仪、装有砝码的木盒、他夫人的带着戒指的左手等。

在经过伦琴仔细研究之后，1895年12月28日把他一个多月的研究成果写在《论一种新的射线》的论文里，递交给了维尔茨堡物理学医学学会。这篇论文主要阐述了产生这种射线的方法、装置和射线穿透各种物质的本领，并把这种不知名的射线称为X射线。他还初步总结出新射线的如下性质：

1. 新射线来自于被阴极射线击中的固体，固体元素越重，产生出来的新射线越强；

2. 新射线是沿直线传播的，不被棱镜反射和折射，也不被磁场偏转；

3. 新射线对所有物体几乎都是透明的；

4. 新射线可使荧光物质发光，使照相底片感光，能显示出装在盒子里的砝码、猎枪的弹膛和人身指骨的轮廓。

1896年元旦，伦琴把他的论文和用X射线摄制的第一批照片的复制品分别寄给了著名的一些物理学家。他的论文在发表后的三个月内被印行五次，第五版同时用英、法、意、俄等国文字印行。他的X射线照片1896年1月4日被列为由柏林物理研究所举办的“纪念柏林物理学会成立五十周年”展览会展品，1月5日维也纳《新闻报》抢先第一个做了报道。次日，伦敦《每日记事》向全世界发布了发现X射线的报道：1896年1月中旬，伦琴在柏林皇宫里向德皇和宫廷上层人士作了关于新射线的报告和实验表演；1月23日又向物理学界、医学界作了一次报告。报告结束时，有人提议将这种射线定名为“伦琴射线”，伦琴却谦虚坚持早先选定的“X射线”的名称。

伦琴不满足于已有的发现，他继续进行实验研究以探究X射线的本质，并在1896年3月发表了第二篇有关X射线的论文《论一种新的射线》（续篇），接着又于1897年发表了X射线的第三篇论文《关于X射线性质的进一步观察》。X射线的发现对物理学的进一步发展有深远影响，它展示了物理学尚有极待探索的未知领域，打开了物理学研究的新局面。由于伦琴的贡献，1901年12月10日被授予诺贝尔物理学奖，成为世界科学家中第一个获得诺贝尔奖金的物理学家。后人为纪念伦琴的发现，将X射线称作伦琴射线，也曾将射线照射量的单位命名为伦琴，但现在已不常用这个单位了。目前的单位是库仑/千克。1伦琴=2.58×10<sup>-4</sup>库仑/千克。

### 三、X射线的进一步研究

伦琴在进一步研究X射线的性质中，于1897年3月制造了第一个X射线管用以产生X射线。X射线一般由高速运动的电子撞击在物体上而产生的。X射线管的构造，一般是由一个热阴极（电子发射极）和一个阳极（或称作靶）的大型真空管。在阳极和热阴极的两端加上几十或更高的高电压，这样，阴极所发的电子就被电场加速，打在阳极上，射线就从阳极上发射出来。由于电子打在上面使其温度升高很大，一般用的射线管的靶子是熔点高的金属制成的。

X射线，人目不能见，但照射在某些物体上会使这些物体发荧光，有些物体这样发出的荧光是很强的。X射线还能使照相底片感光，还能使气体电离，它能透过一般光线透不过的物体。除了用电子撞击靶和用高能光

子辐照靶以外，某些放射性同位素衰变时也会产生 X 射线。

X 射线的本质和光一样，是一种电磁波，但它的波长比可见光短得多，大约在一埃左右，或更短一些，这同加在射线管上的电压有关。X 射线也会发生反射、折射、干涉、衍射、偏振等现象。

X 射线的发现，为物质结构的研究开辟了一个新的时代。首先，利用 X 射线照射金属板，打出了电子，激励人们去探索物质原子的电结构。其次，X 射线的波动性和它在晶体中的衍射，开辟了一种新的物质结构分析的新方法。1911 年，英国物理学家巴克拉发现了元素的特征 X 辐射，即发现当 X 射线被金属散射时，散射后的 X 射线的穿透本领随金属的不同而不同。即每种元素产生它自己的“标识 X 射线”为此巴克拉荣获 1917 年的诺贝尔物理学奖。德国物理学家劳厄在 1912 年提出 X 射线通过晶体会出现干涉现象的设想，并得到实验证实。劳厄的这一发现，一方面证明 X 射线的波动本性，另一方面证明了晶体的原子点阵结构。他因此获得 1914 年的诺贝尔物理学奖。1913 年英国物理学家布拉格父子提出 X 射线在晶面的选择反射理论，并建立布拉格公式计算晶格常数的方法形成一门独立的 X 射线结构分析学科。为此，他们父子共同获得 1915 年度的诺贝尔物理学奖。1914 年英国青年物理学家莫塞莱发现原子序数与元素的“标识 X 射线”波长的关系，奠定了 X 射线光谱学的基础。瑞典物理学家西格班扩展了莫塞莱的工作，精确地测定了各种元素的 X 射线谱，并荣获 1924 年度的诺贝尔物理学奖。再次，X 射线在医疗诊断、工业探伤等方面获得应用，也促进了物理实验技术的发展。

X 射线的发现留给我们许多有益的启示：首先，伦琴发现 X 射线具有一定的偶然性，但在这偶然性的背后留给我们许多的思索。伦琴并不是第一个看到 X 射线产生荧光的人，早在 1879 年克鲁克斯、1890 年美国的古兹皮德与詹宁斯、1892 年德国的勒纳德，都曾看到过这个现象，可是他们的注意力都集中在管内的阴极射线上了，对于管外出现的这个不太引人注目的荧光，只是稍稍一瞥，都未加深究。甚至在 1890 年美国的一所研究所也曾偶然得到了一幅照有实验室物体的 X 光照片。然而，当时该所的研究成员不知道怎样去解释这种现象，更没有深入地去研究这种现象。终究失去了发现 X 射线的良机。为什么只有伦琴才成为发现 X 射线的第一人呢？劳厄在评价伦琴的成就时说：“伦琴的发现之伟大，从下述事实即可想而知：为数众多的、往往是杰出的物理学家在伦琴之前利用同样的辅助手段进行了实验，然而他们未发现这些现象。这种向完全未被研究的领域进军，除了敏锐的目光以外，还要求巨大的勇气和自制力。”伦琴的发现从他工作研究的特点来看，是偶然中的必然，伦琴一生都非常重视实验，他说：“实验是最有力最可靠的手段，它能使我们揭开自然界的秘密，在解决对某一假说是保留还是摒弃这样一个问题上，实验应当构成‘最高一级的审判法院’。对每一个现象应该首先从一切细节上尽可能最准确地进行观察和描述只有在此之后才可以大胆地加以解释。”伦琴的成功在于他能在实验中不放过意外的发现，追根究底，抓住不放，从而在预定目标之外获得了意外的成果。科学不仅需要埋头实验的苦干精神，而且还需要敏锐的观察、周密的思考，抓住偶然的机遇，深入探究。X 射线发现后，柏林科学院曾致词伦琴时说道：“科学史告诉我们，在每一项发现中，功劳和幸运独特地结合在一起；在这种情况下，许多外行人也许认为幸运是

主要的因素。但是，了解您的创作个性特点的人将会懂得，正是您，一位摆脱了成见的、把完善的实验艺术同最高的科学诚意和注意力结合起来的 研究者，应当得到作出这一伟大发现的幸福。”伦琴的成功也正在这里。放射性

## 一、放射性现象发现的序曲

X 射线发现以后，射线热几乎弥漫了整个欧洲，当时众多的物理学家都踏上了研究 X 射线的征途。1896 年 1 月，法国科学家彭加勒（1854—1912）在巴黎科学院的会议上作了关于伦琴发现 X 射线的报告，在会上他还把伦琴寄给他的 X 光照片拿给大家看。最后，彭加勒在自己的报告中提出了一个当时科学家都很感兴趣的问题：是否大多数的荧光物质在太阳光的照射下都能发出 X 射线呢？因为彭加勒在阅读伦琴的论文时，特别注意一个细节：X 射线产生的地方，正是放电管壁上出现荧光的地方。所以彭加勒在想，也许所有能发出强烈荧光的物质都会在太阳光照射下发出 X 射线。用实验来验证彭加勒这个设想是比较容易的，只要用光照射荧光物质，看旁边用黑纸包着的底片是否感光就可以了。于是许多法国物理学家都抢着去做这个实验。从 1896 年 2 月开始，沙尔用硫化锌，涅文格罗夫斯用硫化钙做了实验，都声称底片被荧光物质感光，表明产生了 X 射线，这样看来彭加勒的设想是正确的。甚至还不断有人声称自己发现了新射线，如所谓的 Y 射线、Z 射线、N 射线、黑射线、铀射线等等，发现者都说自己的发现同伦琴的发现一样真实可靠。可是有的发现者在获得奖金、奖章之后，后来证明他的实验发现纯属虚构。可以说在那一段时间里，是泥沙俱下、鱼龙混杂、真假难分。对于彭加勒设想的检验，特罗斯特院士说，用不着那些容易打碎的放电管，也用不着复杂昂贵的电装置，只要把一小块磷光物质放在太阳光下照射，这物质就会发出 X 射线。

法国物理学家贝克勒尔在听了彭加勒的报告之后，对 X 射线的研究也发生了浓厚兴趣。他在科学院会议之后，便立即进行实验工作，以检验彭加勒提出的令人感兴趣的问题。他用许多磷光物质作实验，发现它们在强光下都发出了 X 射线。但他与众不同的是，他觉得底片上的斑痕不够清晰，对此感到不满意。于是他改用荧光作用强烈的氧化铀作为研究的对象，并再次精心设计了研究方案。他用一张黑纸包好一张感光底片，在底片上放置两小块铀盐和钾盐的混合物，为了感光斑痕的清晰，它在其中的一块铀盐与底片之间放了一枚银元，然后把这些东西放在阳光下照射几小时，冲洗底片后，发现底片被感光了，底片上留下了银元的影象。因为太阳光是透不过黑纸的，所以贝克勒尔认为，铀盐在太阳光的照射下发出了 X 射线，正是这种 X 射线穿透黑纸，在底片上感了光。这也就验证了彭加勒提出的问题，大多数的荧光物质在太阳光的照射下都能放出类似于 X 射线那样的射线。在 1896 年 2 月 24 日的法国科学院例会上，贝克勒尔报告了这个发现和推论。

## 二、放射性现象的发现

贝克勒尔在检验了彭加勒的设想后，继续用铀盐做实验。并想继续用阳光来照射，但是自 2 月 26 日起，连日阴云密布，不见阳光。贝克勒尔

只好把实验的东西原封不动地锁在抽屉里。直到3月1日，天气才变晴朗，贝克勒尔想马上着手进行实验。严谨细心地贝克勒尔一想到感光板是否会因黑纸漏光而曝光，于是他决定冲洗一张底片检查一下，他原想铀盐未经过日晒，即使黑纸漏光，冲出的底片一定是很模糊不清的。但结果却使他大吃一惊，感光板由于受到很强的辐射而变黑，并留下了那块铀盐的清晰的像。这既不是黑纸漏光所致，且未受到太阳光的照射，也无从激发出X射线。从而使贝克勒尔领悟出这是由于铀盐本身发出某种透过黑纸并使感光板感光的辐射。深入思考之后，贝克勒尔得到了如下的结论：铀盐即使不受太阳光照射，它也会不断地放射出射线来。3月2日，他在科学院的学术会议上报告了他的这一新发现。这样，彭加勒原来的设想是否对呢？贝克勒尔又用硫化锌、硫化钙等重复过去的实验，并尽量排除外界的干扰，结果使他大为吃惊；过去底片统统是由于包裹漏光而至，现在实验底片不漏光，所以放在荧光物质下面在太阳光下曝晒也未发现任何X射线的影子。他又用更强的电弧光、镁光来照射各种荧光物质，结果仍然如此。这说明实验是检验科学理论的唯一标准，这种检验也是一个反复进行的过程。当科学实验时外界的干扰不能完全排除时，就会干扰实验的结果，造成假象，导致我们的错误判断，一旦我们排除了干扰，科学实验又成了我们检验科学理论的唯一标准。人们对彭加勒设想验证的曲折过程就体现了这一点。

贝克勒尔为了进一步证实他的新发现，他又把铀盐放在暗室里，再用小盒子、大箱子密封，不让铀盐接触一点阳光，后来发现底片上仍然留下了清晰的痕迹。若用较纯的铀，则效果更佳。经过一系列的系统的实验研究，表明金属铀放出的射线很强烈，只要有铀元素存在，就有这种辐射现象，象X射线一样，这种辐射能使空气电离，而且“这种射线不依赖于任何的激发方式：光的、电的、热的，于是它是一种新型的自发现象。”贝克勒尔在5月18日的科学院例会上，他宣布铀盐会自发地放射出射线，后人称这种射线为贝克勒尔射线，这种现象就是后来所称谓的“放射性”现象。贝克勒尔的发现是继伦琴之后，迈出的进入二十世纪物理学的决定性一步。后人为纪念贝克勒尔开创放射性研究的功绩，将放射性强度单位命名为“贝克勒尔”，简称“贝克”。1贝克勒尔定义为：放射性物质每秒发生一次放射性衰变时，则其放射性强度规定为1贝克勒尔。

### 三、放射性元素的发现

贝克勒尔对放射性的发现打开了一个新的领域，吸引了许多物理学家投身于这个领域的研究。法国科学家居里夫人和她的丈夫居里，在得知贝克勒尔的发现之后，对此产生了极大的兴趣，随即投入了这一新领域的研究工作。1897年9月，居里夫人的第一步工作是测量射线使空气电离时所引起的弱电流，并用静电计验证了贝克勒尔的发现，对铀发出的射线的电离性质进行精密的测量。她所用的设备只是一个简单的“电离室”，一个居里测电器和一个压电石英静电计。实验结果发现，铀的辐射强度跟它在化合物中的含量成正比，而与化合物中其它元素无关，并与铀所处的物理、化学条件无关。而且铀的辐射也不受光或温度变化的影响。1898年居里夫人和德国的施密特发现钷也具有与铀类似的辐射。她第一个采用“放射性”这个词来描述这一现象。

居里夫人在对铀的放射性进行研究之后，又提出了一个新的问题，除了铀和钍具有放射性质外，其他元素是否也具有同样性质？

居里夫人不仅对氯化物和氧化物作了检查，她又从自然博物馆得到了许多矿石。在实验中，她发现沥青铀矿发射出的放射性比铀和钍的含量所预计的应有强度大得多。多次实验结果都是相同的，于是她提出了一个大胆的假定：在这些矿物中一定含有放射性更强而未被人们所知的一种新元素。为了实验，居里夫人的丈夫居里也暂时放弃了自己关于晶体的研究，与夫人一起共同致力于新放射性元素的探索。他们搞到了几吨沥青铀矿，在一个小木棚里，在原始的条件下以极大的毅力进行实验研究工作。居里夫人在《自传》中曾描述到：“对于达到这样的目的，设备是极其简陋的，而常常要对大量的矿物进行精细地化学处理。对于我们的重大且困难的事业来说，我们没有奖金，没有适宜的实验室，没有任何帮助。这就好象平地起家一样。”更困难的是对被研究的物质一无所知，她说：“开始时对于要分离的这种物质的化学性质我们一无所知，我们所知道的只是它放射一些辐射，必须借助于这些辐射去寻觅”。经过艰苦的努力，居里夫妇终于在1898年7月从铀矿里分离出极少量的黑色粉末，这些黑色粉末含有一种新元素，其放射性比相同数量的铀强400倍，为了纪念居里夫人的祖国波兰，居里夫妇把这个元素命名为“钋”。

1898年12月，居里夫妇又提炼出一种放射性新元素，其放射性比钋还要强，命名为镭。但消息公布后，物理学家和化学家都抱谨慎的态度，由于当时镭的原子量还没有测定，甚至有人故意挑衅地提出：“没有原子量就没有镭，镭在哪里？拿出来看看嘛！”居里夫妇为了让人们能看到纯的钋和镭，并对它进行深入的研究，又在低矮的木棚里继续艰苦工作了四年的时间，终于在1902年从8吨铀沥青铀矿渣中提炼出微量的氯化镭，并初步测出镭的原子量为225，镭的射线为铀的二百万倍，从而使科学家们确信这种新元素的存在。

居里夫妇不仅从实验中发现了新的放射性元素钋和镭，而且也从理论上对放射性元素的本质进行了探讨，他们认为，辐射过程是物质的一种自发发射过程，它伴随着放射性物质重量的减少和能量的递减，这个过程是与元素的演化相联系的。1903年，居里夫人就她发现的结果，写出了博士论文。同年，贝克勒尔和居里夫妇因在发现天然放射性现象方面所做出的巨大贡献而分享1903年度的诺贝尔物理学奖。1911年，居里夫人又因发现的新元素钋和镭而单独获得诺贝尔化学奖，由此她成为第一个在不同学科内两次荣获诺贝尔奖的科学家。1899年，德比恩根据居里夫妇的建议，在沥青铀矿中探索新的放射性元素，而发现了新元素“钷”。1900年，德国物理学家多恩指出，当镭发生衰变时，会产生一种气态元素，这个元素被命名为氡。后来，人们陆续发现了许多放射性元素。后人为纪念居里夫妇的贡献而将放射性强度的单位命名为“居里”。且1居里=3.7×10<sup>10</sup>贝克勒尔。

#### 四、放射性现象的理论研究

自1896年贝克勒尔的发现公布后，各国的科学家都开始从事新射线的研究工作，积累了大量的实验数据和原始资料，但是无法从理论上给放

射性现象以完满的解释。居里夫妇发现镭后，进一步促进了人们对放射性现象研究的热潮。1899年，贝克勒尔使用居里夫妇提供的镭样品，发现镭发射出的射线能被磁场偏转。英国物理学家卢瑟福在他的老师J·J·汤姆逊的指导下，对放射性现象进行实验研究和理论分析。他指出，假若铀原子和镭原子是不稳定的，每种原子都以一定速度蜕变，则容易解释放射性现象。1897年，卢瑟福发现铀放射出来的射线不是一种。他发现了一种穿透本领不如电子束强的射线，称为 $\alpha$ 射线，另一种称作 $\beta$ 射线。1900年法国化学家维拉德又发现，镭射线中还有第三种射线，它被叫做 $\gamma$ 射线。卢瑟福设计了让这些射线通过磁场的实验，根据射线被磁场偏折程度，他判断 $\alpha$ 射线粒子带正电， $\beta$ 射线带负电， $\gamma$ 射线的粒子不带电。经过系统仔细的研究，卢瑟福于1902年提出了原子自然衰变的理论，即原子在自发蜕变过程中，一种物质会变成另一种物质。这个理论打破了从道尔顿时代以来所牢固建立的原子不变的概念，对化学和物理学的发展起了极大的促进作用。卢瑟福通过元素的蜕变实验，发现一些放射性元素在放出射线以后，会逐渐减弱其放射性程度，最后变成另一种元素。1905年，卢瑟福证实镭和铀等放射性元素发生一系列自发蜕变后，转变成稳定的元素铅。1907年卢瑟福在助手盖革和马斯顿的帮助下，设计了一种计测镭放出 $\alpha$ 粒子的方法，从而发现在千分之一克镭里，每秒钟能放射出十三万六千个 $\alpha$ 粒子，这是一个了不起的发现。它表明，人们第一次在实验室里观察到单个原子核。卢瑟福由实验数据推算出 $\alpha$ 粒子的电荷数是氢离子电荷的2倍，质量是氢离子的4倍，同氦一样。于是他大胆宣布 $\alpha$ 粒子就是带电的氦。在发现原子核以后，他又进一步明确 $\alpha$ 粒子就是氦核。并用实验证明了氦是在镭的放射性衰变时形成的。 $\gamma$ 射线是波长比X射线更短的电磁波。卢瑟福因在元素蜕变及其放射化学方面的贡献而荣获1908年的诺贝尔化学奖。领奖时他曾风趣地说：“我一生中，曾经历过各种不同的变化，但最大的变化要算这一次了——我竟从物理学家一下子变成了化学家。”

# 能量子

## 一、经典物理学所面临的挑战

物理学发展到十九世纪末，历经三百年的历史，可以说几乎达到了完备成熟的阶段。由伽利略和牛顿等人奠定的经典力学，经过欧拉、拉格朗日和哈密顿等人的工作，已经建立严格的数学形式和完整的结构体系。由法拉弟和麦克斯韦等建立的电磁场理论，用一组极其优美的方程，把当时已知的电、磁和光现象都统一起来了，使电磁学成为经典物理学中一个完整的分支。能量守恒与转化定律的发现，不仅为建立热力学奠定了基础，同时也使客观世界中一切物质的运动，不论它们是以热、声、光、电、机械、化学等什么形式出现，都有一个统一的量度标准——能量。人们对物质运动过程的探索，也从宏观现象进入到分子运动的领域，通过麦克斯韦、玻尔兹曼、吉布斯等人的努力经典物理学的另一个分支——经典统计力学也建立起来了。所以说，在十九世纪末，经典物理学的各个分支，如力学、光学、热力学、统计力学、电磁学等等都已经高度发展并几乎完备成熟了。这时，似乎所有的基本问题都已经研究清楚了，科学受到了人们从来未有过的崇敬。物理学家们怀着无比自豪的心情跨入了二十世纪。1900年元旦，著名的英国物理学家开尔文勋爵在新年献词中十分满意地宣布：在已经基本建成的科学大厦中，后辈物理学家只需做一些零碎的修补工作就行了。可是就在物理学大厦将要落成之际，科学实验却发现了一系列经典物理学无法解释的事实，如1895年11月8日德国物理学家伦琴发现X射线；1896年法国物理学家贝克勒尔和居里夫妇发现天然放射性现象；1897年英国物理学家J·J汤姆逊发现了电子。这被称为世纪之交的三大发现猛烈地冲击着经典物理学中关于质量、能量、运动等基本概念，人们为了寻求新的实验现象的理论解释，不得不回过头来，对已有的理论作出新的检验。在物理学界这种“山雨欲来风满楼”之际，一个新的未知领域——微观世界已初露头脚，物理学正面临着革命的前夜。而带头走入微观领域大门的是著名物理学家普朗克。

## 二、选择有利的突破口

普朗克是在物理学已达“顶峰”时投身到物理学事业中。1875年在普朗克17岁时，他的老师约利曾劝说他不要研究物理，因为“在这一学术领域里，已经没有什么本质上的新的东西有待发现了。”而普朗克逆水行舟，选择了物理学作为自己科学的探索目标。随着世纪之交一系列新的实验事实的发现，客观上要求科学家需要对原有理论的基本概念和基本假设作一番根本的改造，需要提出新的概念，建立新的假说来解释新的实验事实。也就是说，需要构建一个新的理论。但是要提出新概念，建立新理论并不是一件轻而易举的工作。它需要对原有理论有着深刻的理解和研究，需要有深邃的洞察力，也需要不囿于传统、大胆革新的创新精神。然而，有时甚至需要抓住偶然的机遇，在攻克科学堡垒的战斗中，突破口的选择就成了成败的关键因素。在十九世纪末，许多方面，如X射线的研究、元素放射性现象的研究、原子结构问题的研究，在这些领域中都集中了大批优秀的物理学家，但是在这些领域中却未能打开通向微观世界的大

门。而普朗克却从黑体辐射的研究中打开了向微观世界进军的突破口。

### 三、黑体辐射的早期研究

十九世纪上半叶，人们已认识到光谱、热辐射和光辐射是统一的。伴随着生产技术的发展，十九世纪后半叶，科学界加强了对热辐射问题的研究。对于热辐射问题，当时是以绝对黑体为典型来进行研究的。德国物理学家基尔霍夫首先研究了封闭空腔内的热辐射问题，并于 1859 年证明：绝对黑体的发射本领是一个与发射物质性质无关而由温度和波长来决定的普适函数。

1879 年，奥地利物理学家斯忒藩在对其他物理学家所作的许多实验结果进行分析比较后发现，热辐射的总能量和绝对温度的四次方成正比，（ $E = T^4$  为常数）。1884 年玻尔兹曼从理论上对此作了论证。这就是所谓的斯忒藩—玻尔兹曼定律。进一步的研究，是对确定的温度  $T$  求出辐射能量按频率的分布函数（ $\rho(\nu, T)$ ）。1893 年，维恩把热力学理论与多普勒原理相结合用来处理空腔辐射，推出：物体辐射时，最强光的波长与绝对温度成正比的维恩位移定律，并得到：

$$\rho(\nu, T) = \nu^3 f(\nu/T)$$

对于  $f(\nu/T)$  的具体函数形式，理论上难以给出。为了给出这个函数，维恩参考实验测定数据，作了如下猜测：

$$\rho(\nu, T) = \alpha \nu^3 e^{-\frac{\beta \nu}{T}}$$

其中  $\alpha$ 、 $\beta$  为常数，这就是著名的维恩位移定律。维恩的辐射公式，在以后几年为进一步的实验所证实，其有效性直至 4000K 的条件下未遇到任何怀疑。这个公式也与帕邢在不久后对各种固体物质进行实验得出的经验公式大致相同。后来人们才知道，维恩“位移定律是经典物理学所能作出的最大的进展，这就是说，它到达了量子论的门槛。”但是维恩位移公式缺乏严格的理论论证，普朗克正是企图弥补维恩公式在理论推导上的欠缺而加入到对热辐射问题的研究行列中的。所以，维恩的工作，就成为了普朗克进一步研究的出发点。

### 四、普朗克重新推导维恩公式

1894 年普朗克开始系统研究黑体辐射问题。1895 年，他发表了有关这个问题的第一篇论文。他的研究方法是，首先设想空腔里的电磁辐射是由于一些电磁谐振子产生的，而平衡状态的辐射的正常分布则只能通过辐射场与吸收和发射辐射的谐振子发生相互作用而得到，由于空腔辐射与腔壁材料的性质无关，所以也就与谐振子的种类无关。这样，他就可以不必考虑谐振子的具体结构，而采用最简单的线性赫兹振子作用研究的模型。普朗克这种在研究工作的开始，选取一个尽量简化的模型作为研究对象尽量避免一些与研究目的无关的其他因素，这在方法论上是十分可取的。当然，由于开始时对研究对象了解的不深，模型的选取可能并不十分合适，但这在以后的研究中可逐渐加以完善，如果一开始就把研究对象搞得很复杂，就可能导致研究工作无法进行。在用热学理论推导维恩公式时，普朗克首先通过使略带阻尼的谐振子发射与吸收相等，得到了谐振子平均能量  $U$  与辐射能量密度  $\rho$  之间的关系，即



$$Uv = \frac{c^3}{8\pi v^2} \rho_v$$

其中  $c$  为常数， $v$  为谐振子的发射频率。然后他得出了具有频率  $v$  和能量  $U$  的一个谐振子的熵的定义：

$$S = -\frac{U}{av} \ln \frac{U}{e^{bv}}$$

其中  $a$ 、 $b$  为常数。再据热力学定理进行数学计算，就可推导出与维恩公式相类似的公式

$$\rho_v = \frac{8\pi b v^3}{c^3} e^{-\frac{av}{T}}$$

实际上，公式中的  $b$  就是后来的普朗克常数  $h$ ，只不过普朗克当时未能进一步阐明它的物理意义，所以没能引起人们的重视。

### 五、维恩公式的实验检验与“紫外灾难”

正当普朗克进行理论探讨的时候，实验物理学家也在加紧对黑体辐射问题的研究。1895年维恩和卢默尔提出了一个可供实验测量的绝对黑体模型，早些时候美国科学家兰利发明了测辐射热仪，这样人们就可通过对黑体小孔发出光谱的测量而直接从实验上精确地检验黑体辐射定律。接着，卢默尔与另一名实验物理学家普林塞姆合作进行黑体辐射实验。他们不断改进实验技术和数据处理方法，以消除实验误差，并把实验扩展到红外区域，在1899年卢默尔的实验报告中，肯定了维恩—普朗克公式在短波范围内与实验相符，而在长波（ $12 \times 10^{-6} \sim 18 \times 10^{-6} \text{m}$ ）范围则有明显的偏离。这说明维恩辐射公式并不是一个真正符合客观实际的辐射公式，需要作进一步的修正。当时，另外两名实验物理学家鲁本斯和库仑鲍姆利用测量长波的新方法，在一个更大的范围内对黑体辐射的长波部分进行了测量，结果发现在这一部分，辐射强度的增加与温度成正比。这个结果与英国物理学家瑞利在1900年6月发表的一篇关于黑体辐射定律的论文中所得出公式长波部分相同。瑞利根据经典理论导得了一个辐射定律。他导得的公式错了一个因子8，后被金斯所纠正。这就是

$$\rho(v, T) = \frac{8\pi v^2}{c^3} KT$$

这个式子称为瑞利—金斯定律，式中  $c$  是光速。当频率较低时（长波范围），瑞利—金斯定律的理论值与实验结果符合得很好，但是当频率较高时（短波范围），就与实验结果表现出很大的差异。从公式也不难看出，由于辐射能量与频率的平方成正比，所以当频率极高时，必出现趋于无穷大，即在紫色端发散。这一结果后来被荷兰物理学家埃伦菲斯特称之为经典物理学的“紫外灾难”。由于瑞利—金斯公式的根据是经典物理学的基本理论，且在推导过程中思路清楚、方法正确，所以这一定律的失败说明了经典物理学理论在整体上所面临的巨大困难。这就是开尔文将“紫外灾难”称之为物理学晴空中的一朵“乌云”，这朵“乌云”带给了物理学的一场革命。

### 六、普朗克公式的获得

1900年10月7日，鲁本斯和他的妻子一起去拜访普朗克，当他们谈

到鲁本斯最近的实验时，鲁本斯把他所得到的在长波部分的结果告诉了普朗克，并告诉他这个结果与最近瑞利所得出的定律是一致的。普朗克得到这一消息后立即工作。他的思路是这样，既然在长波范围，鲁本斯得出了正确结果，而在短波范围维恩—普斯克公式正确，那么，如果把这两种极限情况下得出的结果结合在一起，是否可得出一个新的公式来了呢？于是普朗克利用内插法，把在短波和长波两种极限情况下成立的二式各自向中间部分延伸并联结起来，并加以数学变换，最后得到了著名的普朗克公式

$$\rho_{\nu} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{b\nu}{e^{\frac{b\nu}{kt}} - 1}$$

式中  $b, c$  为常数。普朗克在 10 月 19 日的德国物理学会一次会议上，在题为《论维恩光谱定律的完善》的报告里公布了这个结果。会议的次日，鲁本斯就告诉普朗克，他把普朗克公式与自己实验和测量的数据详细地作了比较，发现二者在任何情况下都符合得很好。以后，又有许多人做过实验，证明普朗克公式确实在可能测量到的所有波长和所有温度下都是成立的。得出了普朗克公式以后，普朗克就已经站到了量子论的大门口，下一步就是如何打开这扇大门了。

### 七、能量子假说的提出

实验结果与新辐射公式的精确一致，给普朗克以很大的鼓舞，但也同时给他留下了一个关键的理论问题，就是要找出这个定律所蕴含的深刻物理意义。普朗克自己也清醒地认识到：“即使是人们承认这个公式的绝对精确性和适用性，这个辐射公式依然只具有形式上的意义，因为人们只将它看成是一个侥幸猜中的规律而已。因此，从我将这个公式提出的那天起，我就从事研究，设法揭示出这个公式真正的物理意义……”

但如何从理论上严格导出与经验相符的经验公式是对普朗克一个严峻的考验。最终他选择了玻尔兹曼的方法。普朗克知道，“这个问题（指辐射能的分布）对于物理学是至关重要的……因此，一个理论上的解释必须以任何代价非把它找出来不可，不管这个代价多高”这个代价是指：除了维护热力学的两条定律之外，普朗克“准备牺牲我以前对物理定律所抱的任何一个信念”普朗克“生性喜欢平和，不愿进行任何凶吉未卜的冒险”，但现在别无他路，在“逼上梁山”的形势下，也只能“孤注一掷”仿效玻尔兹曼用热力学统计方法来建立熵与几率的关系，并最后推导出公式

$$\rho = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

这样，普朗克经过紧张八个星期的工作后，在德国物理学会的圣诞会（1900 年 12 月 24 日）上宣读了题为《关于正常光谱的能量分布定律》的论文。在这篇论文中他提出了具有重大意义的能量量子化的假设。即

1. 黑体的腔壁是由无数个带电的谐振子组成的，这些谐振子不断地吸收和辐射电磁波，与腔内的辐射场交换能量。

2. 这些谐振子所具有的能量是分立的，它的能量与其振动频率成正比，其关系可以写成

$$= h\nu$$

式中的  $h$  即为普朗克常数。当谐振子与腔壁内的辐射场交换（吸收或辐射）能量时，也只改变 的整数倍， 是谐振子能量的最小单位，即“量子”。

普朗克在这篇论文中强调指出，“我们采取这种看法——并且这是整个计算中最主要的一点——认为  $E$ （谐振子的能量）是由一些为数完全确定的、有限而又相等的能量子组成的。而对于这个有限而又相等的部分，我们应用了自然常数  $h=6.55 \times 10^{-27}$  尔格·秒”。所以，人们通常把 1900 年 12 月 24 日作为量子论的诞生之日。

## 八、量子概念建立的意义和普朗克的认识

普朗克的能量量子化假设，大胆抛弃了经典物理学中物理量连续变化的旧观念，它不仅是对经典物理学的改造，而且是一次革命。后来的事实证明，随着普朗克量子的提出，物理学理论发生了巨大的变革，它奠定了量子理论的基础，揭开了人类探索微观世界的序幕。

普朗克能量量子化的概念，不仅与当时的物理学家们早已习惯了的方法相差甚远，而且与人们的普通常识也不相同，以至在量子假说提出后的最初五年时间里，并未引起物理学界的积极响应。瑞利和金斯不相信，马赫与彭加勒反对，洛仑兹甚至到 1911 年还在怀疑。德国有一本《自然科学与技术史手册》，在 1908 年出第二版，列举了 1900 年全世界 120 项发现与发明，就是没有提到普朗克的发现。而普朗克虽然已经敲开了量子世界的大门，他完全可以大胆地闯进去，搞取更多丰硕的果实。然而，他犹豫了，在以后的十五年里，普朗克还尽量想把他的能量量子纳入经典物理学的框架，他说：“经典理论给了我们这样多有用的东西，因此必须以最大的谨慎对待它、维护它。”十五年动摇、徘徊、倒退的痛苦，终于使普朗克认识到能量量子的概念是完全不能用经典物理学解释的。

普朗克尽管有许多局限，但毕竟是在科学变革时代的一个新理论的开拓者，他放出了量子幽灵，而这个幽灵最终改变了人们对世界的看法。正如科学家劳厄所说：“只要自然科学存在，它就将永远不会让普朗克的名字被遗忘。”

## 原子结构

自从 1897 年 J·J 汤姆逊发现电子后，人们立即开始了建立各种原子结构模型的尝试。由于原子是中性的，而电子是带负电的，这表明原子中还有与电子等量的正电荷的存在。那么原子结构模型就是要解决正电荷的性质，正、负电荷的分布，正、负电荷之间的相互作用以及原子的稳定性、周期性、光谱和放射性等问题。物理学家们曾从不同角度提出了不同的模型。下面简单介绍其中在原子结构理论发展进程中有代表性的几种模型的建立过程和方法。

### 一、开尔文运用数学方法建立原子结构数学模型

1897 年在汤姆逊发现电子后不久，开尔文运用数学方法，首先从数学上讨论了原子结构。他认为原子是由若干个电子与电子相抵消的正电的广延构成，电子在正电内部旋转。他还讨论了这种原子之间的作用力、正电形成均匀球时处于稳定平衡的电子分布等等。开尔文是在 1897 年阐述了这种思想，全面地进行讨论是在 1901 年进行的。

### 二、勒纳德假设的动力子模型

勒纳德通过研究光电子在物质中的吸收情况，而形成了有关原子结构的思想。勒纳德从 1895 年起，根据他的研究结果，认为原子是由相同的构成要素组成的，只是物质不同，构成要素的数目不同罢了。他在 1903 年具体论述了他假设的这种原子结构。首先他注意到高速电子能够在物质中通过相当大的距离而不改变其速度，于是他认为原子并没占满依据气体运动论等所推断出的  $10^{-8}$  厘米大小的范围，原子是比该范围小得多的要素间隔的集合。他大体估计出这种小要素的半径在  $0.3 \times 10^{-10}$  毫米以下，勒纳德把它称之为动力子。因为动力子是中性原子的构成要素，所以它自身也必然是中性的。在这里，勒纳德把电偶设想为动力子的模型，并认为它的正电荷是具有大质量的。氢原子是由一个乃至数个动力子构成。从这里可看出勒纳德提出的原子结构的动力子模型在某些方面正确地反映了原子的现实，但是在此基础上，此模型再也没有得以发展。

### 三、长冈半太郎运用类比方法提出土星模型

1904 年，长冈半太郎在题为《用粒子系统的运动学阐明线光谱、带光谱和放射性》的论文中，根据麦克斯韦的土星卫环理论，推测原子的结构，运用类比方法，把原子类比于土星提出了一个原子结构的“土星模型”。他在这篇文章中写道：“我要讨论的系统，是由许多质量相等的质点，联结成角度相等的圆，互相间以与距离平方成反比的力相互排斥。在圆的中心有一大质量的质点，它对其它质点以同样定律的力吸引着。如果这些互相排斥的质点以几乎相同的速度绕着吸引中心旋转，只要吸引力足够大，则即使有小的干扰，这系统一般仍将保持稳定。”这一模型，实际上已提出了原子内有个中心（核）及原子内部存在着相互作用的库仑力，电子绕着中心旋转等概念。只是对于核的大小的数量级及原子的稳定性等问题，尚未给以足够的重视与阐明。

### 四、汤姆逊提出正电子球模型

J·J 汤姆逊根据开尔文提出来的实心球的设想，对原子结构进行了长期的研究，于 1904 年发表了题为《论原子结构：关于沿一圆周等距分布的一些粒子的稳定性和振荡周期的研究》的论文，在这篇文章中他设想原子是由带负电荷的电子与另一部分带正电荷的主体组成的。为了解释原子中电子质量远小于原子质量的事实，他假设带正电荷部分的主体象流体一样均匀地分布在球形的原子体积内，而带负电荷的电子，则象“葡萄干”一样“浸浮”在球体内某些固定的位置上。另外他假设，原子光谱是由于固定位置上的电子受到正电荷的作用力作简谐振动的结果。汤姆逊提出的这种正电子球模型是在 1910 年之前影响最大的一个模型。它的重要意义在于：它提出了原子内部是有结构的，打破了原子内部带正负电荷的物体相互对称的概念，标志着原子科学的一个新时代的开始。因此人们称他为：“一位最先打开通向基本粒子物理学大门的伟人”。但是，从汤姆逊的模型中只能算出一个特征频率，这与氢原子光谱中观察到的存在的许多频率谱线的事实相矛盾的。

## 五、卢瑟福在实验的基础上运用类比方法提出原子结构的行星模型

卢瑟福提出行星模型的过程是这样的：

### 1. 精心设计实验

卢瑟福为了研究原子结构，精心设计了著名的  $\alpha$  粒子散射实验。整个实验设计的非常巧妙，它不仅实验目的明确，思考周密，而且还能抓住关键，出奇制胜。 $\alpha$  粒子散射实验的目的是为了探明原子内部电子和其它粒子的分布状况，以检验 J·J 汤姆逊提出的原子的正电子球模型，即认为正电荷均匀地分布在整个球体中，而带负电荷的电子则一粒粒地散布在里面。他认为，要实现这一实验目的，唯一的方法是打碎原子。而为了打碎原子，他又选择了  $\alpha$  粒子作为“炮弹”。他还对实验的过程和结果作出预测，认为当  $\alpha$  粒子穿过原子时，有的会发生偏转，有的会反射回来，这是他经过周密思考提出来的实验设计的基本思想。根据这一实验设计思想，卢瑟福精心设计了巧妙的实验装置，其装置如图。这个装置共分三部分。实验源：由放射源 R 放射出  $\alpha$  粒子流。实验对象是一张极薄的金箔，作为粒子轰击的目标；实验效果显示装置是一闪烁屏 S，用以收集实验数据，当一个  $\alpha$  粒子打在屏 S 上时，屏上就发出一个脉冲，荧光屏 S 与放大镜 M 组合在一起，可以调节不同的角度，对被散射的  $\alpha$  粒子进行观察。

### 2. 实验观察的数据结果

按照汤姆逊的正电子球模型， $\alpha$  粒子是应该很容易地穿过金箔中的原子，不应该发生大角度散射现象。但是实验的结果表明，当  $\alpha$  粒子射向一片极薄的金属箔时，大多数  $\alpha$  粒子顺利穿过原子，一部分发生了偏折，极少数被弹回来。实验测得，散射角大于  $90^\circ$  的比例为  $1/8000$ ，而根据汤姆逊模型算出的结果应该是  $1/10^{3500}$ ，这一结果使得当时习惯于用汤姆逊模型来思考问题的科学家们大为惊讶。

### 3. 分析实验结果得出结论

卢瑟福对实验数据进行了严密的数学计算和理论分析，他利用长冈半太郎的土星模型进行计算，得出的结果与实验值基本相符。于是卢瑟福得出结论：在原子内大部分地方没有大质量的粒子，所以大多数  $\alpha$  粒子能顺

利地穿过；在原子内部有一体积小而质量极大的核，少数  $\alpha$  粒子就是和它发生了强烈的相互作用，所以才反弹回来，形成大角散射；另一些  $\alpha$  粒子之所以发生偏转，是因为在靠近质量集中的地方通过而受到影响。这一结果否定了卢瑟福的导师汤姆逊所提出的正电子球原子模型。4. 运用类比方法，提出原子结构的行星模型

卢瑟福根据  $\alpha$  粒子的散射实验事实认为，必须放弃汤姆逊的原子模型。他认为，原子是由一个原子核和核外电子组成的，原子核所占体积甚小（约十万分之一），但却具有原子总质量的 99.97%。这同太阳系的情况十分相似，太阳作为太阳系的中心，它具有太阳系总质量的 99.87%，但所占空间也极小。并且，已经知道原子核与电子之间的电吸引力（库仑定律  $F = K \frac{QQ'}{r^2}$ ）与太阳和行星之间的吸引力（万有引力  $F = G \frac{mm'}{r^2}$ ）

的数学形式也是相似的，均与距离的平方成反比。于是卢瑟福作出类比：既然太阳系是由处于核心的太阳和环绕它运行的一系列行星所构成，那么原子不是也宛如太阳系吗？它也可能是由带正电荷的原子核和环绕它运行的带负电的电子构成的。这就是卢瑟福于 1911 年正式提出的原子结构的“行星模型”，这个类比推理可用下表表示：

		太阳与行星之			
太阳系	太阳体 积甚小甚大	太阳质量 (占 99.87 %)	行星质 量甚小	间的引力 $F = G \frac{mm'}{r^2}$	太阳系是由 行星环绕太 阳构成的
		原子核与电子之			
原子	原子核 体积 甚小	原子核质量 甚大 (占 99.97 %)	电子质量 甚小	间的引力 $F = K \frac{QQ'}{r^2}$	?

所以，原子可能是由电子环绕原子核构成的。

原子结构的行星模型的代表述：一切原子都有一个核，它的半径小于  $10^{-12}$  厘米，原子核带正电，它的电荷是  $+Ze$ ，原子的半径为  $10^{-8}$  厘米，电子的位置必须扩展到以核为中心，以  $10^{-8}$  厘米为半径的球内或球面上；为了构成平衡电子必须像行星一样绕核旋转着。

#### 5. 进一步的实验验证

1911 年到 1913 年期间，盖革和马斯顿在卢瑟福的指导下继续做了一系列  $\alpha$  粒子的散射实验，得到的结果为：“整个实验记下了 10 万次以上的闪烁，我们所有的研究结果都与卢瑟福教授的理论符合得很好，为下述假说提供了有力的证据，即原子中心有很强的电荷，这个中心比原子直径要小得多。”

#### 6. 卢瑟福的原子行星模型的局限性

卢瑟福的原子行星模型取得很大的成功，但是随着物理学的发展，新的实验事实的发现，也表现出了很大的局限性。首先，根据经典电磁理论，电子的绕核运动是加速的，它应该产生一个和它运动频率相同的电磁波，连续地辐射电磁能量，这样电子轨道半径将随着能量的减少而缩减，最终落在原子核上，这样原子将被破坏而不复存在，但事实并非如此；其次，

由于电子绕核频率的改变，这样它应该向外辐射连续光谱，这与所观察到的原子的线光谱相矛盾；再次，根据卢瑟福原子行星模型可以计算出，原子的“寿命”仅为  $10^{-12}$  秒，这与原子是一个稳定的系统的事实相矛盾的。这些矛盾的存在，不仅表明卢瑟福的原子模型还不完善，而且又一次预示着，对原子世界需要一个不同于经典物理学的新理论。

## 六、玻尔的原子结构理论

针对卢瑟福原子行星模型的局限性，玻尔进一步发展了原子结构理论。玻尔的思路与方法如下：

第一，玻尔首先接受了卢瑟福的原子行星模型。

玻尔于 1911 年到 1912 年期间作为访问学者曾在 J·J 汤姆逊和卢瑟福的实验室里工作和学习，并参加了  $\alpha$  粒子散射的实验工作，玻尔坚信卢瑟福的原子行星模型是符合客观事实的，当然他也很清楚这一理论所面临的困难。同时玻尔当时也了解普朗克和爱因斯坦的量子概念，这给玻尔克服卢瑟福的原子行星模型的局限，发展原子结构理论创造了条件。所以玻尔首先是接受了卢瑟福的原子行星模型。他认为，原子的稳定性只涉及到核外电子的运动状态。

第二，玻尔引进“定态”假设。

玻尔深入研究了卢瑟福的原子模型以后，发现这种模型把电子看作如行星绕太阳一样绕着原子核运行，这就是导致在原子的稳定性问题上失败的关键。他指出，原子应具有高度的稳定性，尤其是被扰动以后必然能够回复到原来状态的特性，是任何行星系不具备的。玻尔的研究思想是从原子稳定性出发，探索原子结构模型。他认为，电子运动的轨道，应完全取决于原子系统本身的物理参数，如电子和原子核的质量、电量等。这样的轨道只有一个需要确定的参数，即轨道半径。他从量纲分析发现，电子的电量  $e$  和质量  $m$ ，只有引入普朗克常数  $h$  以后，才能产生长度量纲，即半径等于  $h^2/me^2$  的圆轨道。引入普朗克常数  $h$  后，标志着普朗克量子化思想引进到卢瑟福的原子模型中。玻尔认为，轨道电子的概念必须保留。他假设，原子内电子运动的轨道不是任意的，只有动量矩  $p$  等于  $h/2\pi$  的整倍数的那些轨道才是可能的即满足

$$mvr = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

式中， $n$  只能取 1, 2, 3, … 等整数， $r$  是电子轨道的半径。上式是确定可能的量子化轨道的量子条件。电子在这些轨道上运动时是稳定的，不辐射能量。

第三，玻尔提出“跃迁”的概念。

玻尔在引进“定态”概念后，又进一步受到惠丁顿所研究的“具有一定能量的阴极射线才能激发出次级阴极射线”和尼科耳逊为解释在日冕和银河星云中观察到新谱线而引进普朗克常数  $h$  的启发，重新考虑了“定态”的意义，从而形成了一个极其重要的物理概念，即光谱线是受激的原子发射出来的。他结合当时氢原子光谱线的普遍公式

$$\gamma = RC \left\{ \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right\}$$

式中， $m=1, 2, 3, \dots$ ； $n=m+1, m+2, \dots$ 。将上式两边同时乘以普朗克常数

$h$ ，可得出能量的关系式：

$$E = h\gamma = Rhc \left\{ \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right\} = E_2 - E_1$$

式中  $E_2$ 、 $E_1$  反映了不同定态的能量，其差值对应于不同定态的能量差，这种能量差以光的形式释放出来。由此说明，光谱的光源是电子在定态之间的“跃迁”而形成的。

#### 第四，玻尔原子模型的完成

玻尔通过引进“定态”和“跃迁”两个重要物理概念，将基本作用量子引进了原子系统。1922年，玻尔在接受诺贝尔奖时所作的演讲中谈到这两个假设时说：

“1913年我用了两个假设的形式提出了这样一种表述：

(1)在原子系统设想的可能运动状态中存在着所谓的‘稳定态’，在这些状态中，粒子的运动虽然在很大程度上遵循经典力学规律，但这些状态独特的稳定性不能用力学来解释。原子系统的每个变化只能是从一个稳定态完全跃迁到另一个稳定态。

(2)与经典电磁理论相反，稳定原子不发生辐射，只有在两个定态之间跃迁才产生电磁辐射。辐射的特性相当于以恒定频率作谐振动的带电粒子按经典规律产生的辐射，但频率与原子的运动不是单一关系，而是由下面的关系来决定：

$$h\nu = E_2 - E_1$$

式中  $h$  是普朗克常数， $E_2$  和  $E_1$  是原子在两个稳定态，即辐射过程中的始态和末态的能量值。反之，用这种频率的电磁波照射原子时，可引起吸收过程，使原子从后一稳定态跃迁回前一个稳定态”。

这样，玻尔原子模型的图象是：电子在分立的、特定的、被称之为定态的轨道上绕着很重的原子核运行，当电子在这些轨道之间跃迁时，发出线光谱，谱线频率通过普朗克常数与定态的能量差联系起来。

玻尔的原子结构理论，成功地解释了25年来未能解释的氢原子光谱规律，并对里德伯恒量作出了理论上的证明，预告了氢和氦的一些新谱线的存在。玻尔理论还建立了经典概念与量子概念之间的定量关系。

玻尔理论发表后，不少物理学家难以接受。例如著名物理学家瑞利曾认为玻尔理论“对我没有用”，斯特恩尽管后来对玻尔思想的发展做出了许多贡献，但开始时也曾说过：“假如玻尔理论碰巧是对的话，我们将退出物理学界”但是不久，玻尔理论的核心——定态能级理论就为弗兰克—赫兹实验所证实。

#### 七、玻尔原子理论的局限性与原子结构理论的进一步发展

玻尔原子理论尽管取得了极大地成功。但限于历史条件，玻尔理论还没有从根本上脱离经典物理学的理论框架，对量子化条件的引进也没有从理论上给以适当的解释，因此被人称之为“普朗克的量子概念与经典力学的混合”。卢瑟福也曾在给玻尔的信中说：“普朗克的概念与经典力学相结合，造成了理解上的极大困难，这样看问题的根据是什么？对您的假设，我有个问题，而您也一定完全清楚，这个问题是：当电子由一种稳定态变为另一种状态时，怎么能知道它应该以什么样的频率运动呢？我觉得您是不得已才假设电子能事先知道将跳到哪个轨道上”而且玻尔的原子模型只



适应于氢原子，而对其它较复杂的原子就无能为力了，但玻尔理论毕竟打破了经典物理学一统天下的局面，开创了揭示微观世界基本特征的前景。

1924年以后，根据微观粒子波粒二象性和量子假设建立和发展起来的量子力学，彻底冲破了经典物理学的束缚，形成了更完整的、更准确的、应用面更为广泛的关于原子的理论。按照量子力学，原子中电子的分布远非上述模型所能表达。原子中电子的状态应由解有关薛定谔方程得出的波函数来描述，波函数在空间中某一点的强度（振幅绝对值的平方）则表征在这一点上找到电子的几率。量子力学对原子的许多复杂现象作出了较满意的解释。

## 质子和中子

### 一、质子的发现

英国物理学家卢瑟福在 1911 年根据  $\alpha$  粒子的散射实验提出了原子结构的有核模型，即原子中有一个半径为  $10^{-15} \sim 10^{-14}\text{m}$  的带正电的中心体，称为原子核，它集中了原子的绝大部分质量，所带电量为  $Ze$ ，其中  $Z$  为原子序数， $e$  为电子电量。在原子核外散布着  $Z$  个带负电的电子。该模型提出后，人们自然会想到，“原子核是什么”、“原子核是由什么构成的，它是由单个的粒子，还是由若干个更小的带正电荷的粒子所组成的”、“原子核能不能再分裂”等问题。总之是要探讨原子核的结构问题。

当贝克勒尔首次发现放射性现象后，人们对放射性现象进行了大量的研究，并在放射出的射线中相继发现了  $\alpha$  射线、 $\beta$  射线和  $\gamma$  射线，这样，人们自然就要问，这些射线究竟是来自原子中的电子，还是来自核。答案是容易找到的，因为  $\alpha$  粒子带正电，比电子重几千倍，所以  $\alpha$  粒子不可能来自电子。电子的能量很低，而实验测定放射出的  $\alpha$  射线和  $\beta$  射线的能量却为几十万电子伏，因此这两种射线也不可能来自电子。这样很显然， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  三种射线均来自原子中的原子核。既然原子核可以放出带正电的  $\alpha$  射线、带负电的  $\beta$  射线和不带电的  $\gamma$  射线，这充分说明原子核的内部结构也是相当复杂的。

卢瑟福在对放射性现象的研究中，为了确定  $\alpha$  射线的本性，进行多年的实验研究工作。早在 1899 年，卢瑟福依据放射性辐射的穿透本领，发现并区别了放射性辐射中的  $\alpha$  射线与  $\beta$  射线；1903 年，卢瑟福把放射性辐射置于磁场中，发现了  $\alpha$  射线和  $\beta$  射线在磁场中的偏转，并计算出了  $\alpha$  射线的荷质比和氢原子相同；1903 年，他同罗伊兹用光谱方法最后证实  $\alpha$  粒子就是氦离子，从而确定了  $\alpha$  粒子的本性。当时已知各种放射性元素都会放射出  $\alpha$  粒子，各种原子核的带电量都是氢核的整数倍，那么， $\alpha$  粒子和氢核是否都是原子核的一个组成单位呢？科学家们假定，原子核是由  $\alpha$  粒子（可能还有氢原子）和电子所组成的。1913 年，原子核中包含有足够数量的  $\alpha$  粒子和电子的原子核模型已被人们普遍接受。

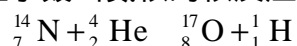
原子核既然是由粒子构成的，可否用一个粒子击出一个或几个粒子，从而发现原子核的结构呢？这对卢瑟福来说是轻车熟路。因为早在 1911 年卢瑟福就曾用  $\alpha$  粒子打开了原子的大门而发现了原子的有核结构。1919 年卢瑟福又想用  $\alpha$  粒子这炮弹来轰击原子核的大门。于是他选用天然放射性物质镭释放出的  $\alpha$  粒子去轰击氮原子核，这是世界上最早实现的人工核反应，也是人类有史以来首次通过有意识的行为改变了原子核。通过这一实验卢瑟福发现了质子。

卢瑟福的实验设计如图所示，在一个密闭的（通过阀可充入氮等各种气体）黄铜罐 A 中，放置一  $\alpha$  粒子源，在罐的右端开一个窗口，并用银箔 F 封住，在外面放一涂有硫化锌的荧光屏 S，再用望远镜 M 进行观察。卢瑟福用这个装置对  $\alpha$  粒子轰击氮核的过程进行了仔细的研究。在标准大气压下，一般  $\alpha$  粒子在空气中的射程是 2.6—11.5 厘米，卢瑟福所用的  $\alpha$  粒子的射程事前已测定是 7 厘米，因此只要荧光屏距  $\alpha$  粒子源稍大于 7 厘米，从荧光屏上就观察不到闪光。但是实验中当把空气换成氮气后，竟从

荧光屏上观察到了闪光。而且粒子的射程可达 40 厘米，因此，卢瑟福认为这是一种新的粒子。它是由  $\alpha$  粒子打入氮核内，使氮核发生了反应而放出的“新粒子”。为了进一步了解这种新的粒子的性质，卢瑟福就在这个实验装置里加进电场和磁场，并根据它在电场和磁

场中的偏转测定它的质量和电荷，从而确定了新粒子就是质子。用  ${}^1_1\text{H}$

表示。其  $\alpha$  粒子轰击氮核的核反应过程可用方程式表示为：



至此，质子被发现了！卢瑟福发现质子所用的方法，是世界上第一次用人工方法使原子核发生了转变，为研究原子核的组成提供了一种崭新的方法。卢瑟福在 1919 年发表的《 $\alpha$  粒子与轻原子的碰撞》的论文中公布了这一发现，并在“氮的反常效应”部分写道：“……氮原子（核）由于在与快速  $\alpha$  粒子相碰时所产生的巨大的力的作用而解体，而此时释放出的氢原子（质子）乃是氮核的组成部分。”

为了了解卢瑟福实验中发现的质子是  $\alpha$  粒子直接从氮核中打出来的，还是  $\alpha$  粒子打进氮核后形成了不稳定的复核，然后发生衰变时放出来的，1925 年，英国科学家布莱凯特做了云雾室实验重复了卢瑟福的工作，并从拍摄到的二万多张云雾室照片中得到了八张照片，进一步证实了卢瑟福的发现，并证实了上面的后一种设想是正确的。后来，人们又用同样的方法，用  $\alpha$  粒子分别轰击硼、氟、钠、铝、磷等，都产生了质子，发生类似的转变，因此确认了质子是原子核的组成部分之一。质子的原意是“第一个”、“最重要”的意思。

## 二、中子的发现

### 1. 原子核中存在中性粒子假说的提出

在卢瑟福发现质子后，物理学界认为，原子核是由带负电的电子和带正电的质子所组成。1920 年卢瑟福认为，存在一种电中性粒子，这种粒子不能被束缚在任何容器之中。他想象这种粒子大概是由当时已知的质子和电子结合而成的，因为质子带正电，电子带负电，二者结合就变成中性。当时，在卢瑟福领导下的实验室和其他实验室都在寻找这种中性粒子，但都未找到。

在卢瑟福预言原子核中存在中性粒子的同时，许多实验现象都与原子核的质子——电子假说相矛盾。如 1925 年，乌伦贝克和古兹米特据光谱实验测知，电子具有自旋，它的量子数等于  $1/2$ ，质子的自旋也是  $1/2$ 。这样，对氮核来说根据原子核的质子——电子假说，它应由 14 个质子和 7 个电子组成，因而这些粒子的总自旋数应取分数值。然而实验表明，氮原子核的自旋等于 1。原子核的“质子——电子”假说遇到的另一个困难是，依据测不准关系，把电子束缚在很小的核内，它的动量将有很大的不确定性，因而，它在核内停留的时间不可能超过几分之一秒，这与原子的稳定性是相矛盾的。这些迹象表明原子核中可能还存在着其它一些粒子。

### 2. 原子核内存在中性粒子的探索性实验

1930 年，德国物理学家玻特和贝克尔，用天然放射性元素钋放出的射线去轰击铍时，发现从铍中放射出一种穿透力极强的射线，在穿透 2 厘米厚的铅板后强度只减少 13%，而且这种射线无论在电场中还是在磁场中都不发生偏转。这种中性辐射在当时已知的由被轰击物质产生的各种形

式的辐射中，唯一能穿透厚铅板的中性射线是 射线，所以这两位物理学家认为，他们发现的只是高能 射线。但这些所谓的 辐射的能量几乎是入射的 射线能量的十倍，这种不合理的关系未使他们看出问题，所以没有能再向前迈出关键的一步。

法国物理学家居里夫妇的女儿女婿约里奥·居里夫妇，重复了玻特的实验。1931年他们进一步用来自铍的新射线去轰击石蜡时发现，这种从铍放射出的新射线能从石蜡中打出强质子束来。这表明石蜡在这种“铍射线”照射下会发射出大量的质子。这种实验现象是用当时已知的 射线效应无法解释的。但是，小居里夫妇却比较固守前人的研究成果，因为他们发现 粒子轰击铍后产生的辐射是中性的，就自然假定是中性的 射线，并用在那个时代在解释光量子学说获得极大成功的康普顿效应作为解释他们实验的理论依据。于1932年1月11日，向巴黎科学院报告了这一结果。小居里夫妇把这一现象解释为 光子同质子的康普顿效应。实际上，小居里夫妇实验中的散射要比当时已知的任何类似的散射时产生的作用要强一百万倍，这样按他们的解释，这一实验现象要违反能量守恒和动量守恒的，而实际情况是应该满足能量守恒和动量守恒的，而他们并没有顾及这一矛盾而放弃他们的解释，也未能再进一步深入地去探索，因而白白错过了发现中子的机会。

3. 中子的发现 1932年1月底，约里奥·居里夫妇的论文传到了卡文迪许实验室。英国物理学家查德威克(1891—1974)把论文的内容告诉了卢瑟福。卢瑟福听后感到非常惊讶，同时他指出，应该相信约里奥·居里夫妇的观察结果，但至于如何解释那又是一回事。查德威克也不相信约里奥·居里夫妇的解释。他经过深入地思考意识到，反冲质子有这样大的能量绝不可能是光子碰撞的结果，而很可能就是十年前卢瑟福所预言的中性粒子的碰撞所致。于是他立即进行实验，用钋源放射出的 粒子去轰击铍，终于发现了中子。他写道：“我开始时没有固定的看法，虽然我很自然想到中子的问题。我相当肯定不能把约里奥·居里夫妇观察到的现象看作是一种由康普顿效应所引起的，因为我不止一次探索过它。我深信是一种新奇的东西。经过几天的紧张工作，我证明了这种奇怪的效应是由一个中性粒子引起的，并且我还能够测量它的质量，卢瑟福在1920年所假设的中子终于出现了。”

#### 4. 中子的性质和质量的测定

查德威克发现中子后，又进一步对它进行非常细致的研究。首先是探索中子的性质，他在实验中用中子流去照射各种轻、重不同的物质，结果发现中子流与 射线的性质有很大差别。因通常的 射线照射到物质上时，物质密度越大，对 射线吸收越强，而中子流的性质刚好相反，密度越小的物质越容易吸收它。其次查德威克测定中子的质量。在实验中查德威克发现，当用中子流去轰击氢原子时，氢核会被打出去，这说明中子具有一定的质量。但由于中子不带电，因而无法使它在磁场和电场中的偏转来计算它的质量。查德威克想，当中子穿过物质时，它将与物质中的原子核发生弹性碰撞，从而把能量传递给原子核，使被碰撞的原子核运动，只要测出被碰原子核的速度，就可根据能量守恒定律和动量守恒定律把中子的质量推算出来。查德威克用中子分别轰击氢原子和氮原子，结果打出了一些氢核和氮核，他测得氢核和氮核的最大速度分别为  $3.3 \times 10^9$  厘米/秒。

和  $4.7 \times 10^8$  厘米/秒。从而计算出中子的质量是质子质量的 1.15 倍。(现代的精确值，质子的质量为 1.007825，中子的质量为 1.008665) 查德威克所发现的中子，并不象当年卢瑟福预言的是质子和电子的复合体。而是与卢瑟福预言性质一样的全新粒子。

中子的发现再次表明，机遇只偏爱有准备头脑的人。查德威克的成功原因之一是对中子概念早有思想准备，并在此之前进行了一些实验试图发现中子但未成功。所以当中子出现时，查德威克能令人信服的发现它。而约里奥·居里夫妇却没有这个思想准备，他们不重视学术交流，1920 年卢瑟福在巴黎讲学时预言了中子的存在，但约里奥·居里夫妇认为与其听一次学术报告，还不如自己在实验室里做实验，所以就没有去听讲。以至中子在他们实验中出现了，而他们却不认识它。事后约里奥·居里说：“大多数物理学家包括我们自己在内，没有注意到这个假设。但是它一直存在于查德威克工作所在的卡文迪许实验室的空气里。因此最后在那儿发现了中子，这是合情合理的，同时也是公道的。”“要是我们夫妻俩听过卢瑟福的贝克利演讲的话，就不会让查德威克捷足先登了。”约里奥·居里失之交臂的发现，使他未能象他的岳母居里夫人那样获得两次诺贝尔奖。查德威克因发现中子而获得 1932 年的休斯奖章。1935 年度的诺贝尔物理学奖。

中子的发现使人们对原子核结构有了新的认识。1932 年苏联科学家伊凡宁科在《关于中子作用的假说》一文中提出：“原子核仅由中子和质子所构成，不含电子”。海森堡在《论原子核的构造》的论文中阐明了原子核是由质子和中子组成的，进而科学家们发现了核作用力的存在，为粒子物理的发展开辟了道路。中子的发现为打开原子核大门找到了一把“金钥匙”。

## 狭义相对论

狭义相对论是现代物理学的理论基础之一。它是关于物质运动与时间、空间关系的理论。十九世纪后期，人们根据经典时空观解释与光的传播等问题有关的一些实验或天文观察的事实时，导致一系列尖锐的矛盾。为此爱因斯坦于1905年提出了一种新的时空观和高速（可与光速相比拟的）运动物体的运动规律，对以后物理学的发展起着重大作用。这就是狭义相对论。狭义相对论的建立过程与思路大致是这样的。

### 一、爱因斯坦以前人们对时空的认识

人们对时空的认识，是随着社会与科学的发展而不断加深的。在物理学的发展进程中，最早对时空有系统认识的是古希腊的亚里士多德。他认为，大地是球形的，地球是宇宙的中心，一切物体都有达到它天然位置的倾向，这样，他把空间与物体的位置联系起来。亚里士多德又进一步把时间与物体的运动联系起来，认为时间是描述运动的数。哥白尼《天体运行论》的出版，又提出了地球是绕太阳运行的，太阳是宇宙的中心，这样使地球失去了它在空间中的优越地位。伽利略在对时空作进一步考察后，提出了相对性原理，即一个相对于惯性系作匀速直线运动的系统，其内部所发生的一切力学过程，都不受到系统作为整体的匀速直线运动的影响。进而考虑两个惯性参照系  $s$  与  $s'$ ，令  $s'$  沿  $X$  轴方向以速度  $v$  作匀速直线运动，则两参照系中的坐标变换为：

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

这就是所谓的伽利略坐标变换。从上述变换式中可知，在作相对运动的、不同的坐标系中测定的时间是相同的，即  $t' = t$ 。因此在伽利略看来时间是绝对的、普适的。由  $x' = x - vt$ ，式中包含了空间不变性，即绝对空间的观点：认为在两个惯性系中量得同一尺或物的长度是相同的。牛顿在建立经典力学体系后，进一步丰富与发展了时空的概念，同时牛顿为了能找到一个使经典力学体系成立的参考系，而引入了绝对空间与绝对时间的概念。牛顿的绝对空间认为，空间象一个大容器，它为物体的运动提供了一个场所。无论是物体放进去也好，取出来也好，这个空间本身并不会发生什么变化。牛顿认为这种绝对的空间按其实质永远是均匀和不动的，与任何外界情况无关。牛顿为了证明绝对空间的存在，还专门设计了一个著名的水桶实验，以此来证明绝对空间的确实存在。牛顿的绝对时间认为，“绝对的、真的及数学的时间，按其自身并按其本质来说在均匀地流动着，与外界任何现象都没有关系。此时间也可名为延续”。而且从“宇宙时钟”敲响的时候起，整个宇宙都对好了自己的钟表，时间的快慢到处都一样。

由于牛顿的绝对时空观完全离开了物质和物质的运动而独立存在，同时还存在着许多问题与矛盾，如绝对时空与伽利略相对性原理不相容，绝对运动又无法去测定等等，对这些问题牛顿本人也清楚地认识到了，正如爱因斯坦所言：“牛顿自己比他以后的许多博学的科学家都更明白他的思

想结构中固有的弱点。”正因为如此，牛顿的绝对时空从一开始就相继受到了许多科学家的反对，如莱布尼兹、惠更斯、见克莱等。其中十九世纪后半叶的马赫出版的《力学史》较有影响，在《力学史》中，马赫对牛顿的绝对时间与绝对空间提出了尖锐的批评。他认为牛顿力学的绝对时空观缺乏经验事实的根据，是站不住脚的，他对牛顿的水桶实验作了新的解释。这一观点后来深深地影响了爱因斯坦。正如爱因斯坦在后来 1946 年的《自述》中写到的：“是恩斯特·马赫，在他的《力学史》中冲击了这种教条式的信念，当我还是一个学生的时候，这本书正是在这一方面给了我深刻的影响。”

马赫对牛顿绝对时空的批判只是定性的，1889 年爱尔兰物理学家菲茨杰拉德在《以太和地球的大气层》一文中提出了“收缩”假说，这个假设是指保持静止“以太”的观念，而认为物体在“以太”中运动时，在运动方向上其长度会发生收缩，这一假说成功地解释了地球在“以太”中运动所造成的光程差。1904 年洛伦兹在《运动物体小于光速的电磁现象》一文中提出，只要假定相对运动的坐标系之间存在一定的数学变换关系，则麦克斯韦方程组对于各匀速运动的坐标系就会保持不变。这就是有名的洛伦兹变换。后来，洛伦兹给出了洛伦兹变换的具体形式：

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{array} \right.$$

但洛伦兹认为  $t$  不代表真正的时间，只是为了方便而引入的，他认为只有  $t$  才是真正的时间。从这里我们可看出，洛伦兹尽管提出了洛伦兹变换，但还只是在牛顿绝对时空观上的修修补补，而不能从根本上解决问题。在洛伦兹之后，著名物理学家彭加勒在 1906 年出版的《科学与假设》中说，没有什么绝对的空间，我们所理解的不过是相对的运动而已，绝对时间也是不存在的，所谓两个事件经历的时间相等，这种说法是毫无意义的。我们既可以把力学事实归入欧几里德空间，也可以归入非欧几里德空间。彭加勒还把相对性原理从力学现象扩大到各种物理现象。他还预言：“也许，我们应该建立一个全新的力学，在这个力学中，惯性将随着速度而增大，因为光速将变成不可逾越的极限。不过我们只窥见这个力学的一斑”。彭加勒所预言的新力学后来由爱因斯坦独创性的完成。

## 二、爱因斯坦关于“以太”的思考

在物理学的发展进程中，首先是笛卡儿为填补德谟克利特“虚空”的物质内容，于 1644 年在出版的《哲学原理》一书中首次引入了“以太”的概念。这种“以太”是一种特殊的、易动的物质，弥漫在整个空间中。当科学发展到十九世纪中叶，法拉第、麦克斯韦建立了电磁场理论，人们当

时把“以太”看作是电磁场的物质基础，同时又认为电磁现象是“以太”的运动表现。在这种情况下，为了解释多种多样的电磁现象，而只好赋予“以太”以多种不同的性质，如惯性、弹性、透明性等等，这些性质又往往相互矛盾，如当时认为“以太”是传播电磁波的介质，而电磁波的速度又快得难以想象，这样“以太”的密度也应大得难以想象，可是“以太”又被赋予了没有重量，透明的东西等等，给“以太”赋予的这么多相互矛盾的性质是无论如何也统一不起来的，因而形成了许多“以太之谜”。为了澄清这些问题，科学家从事了多方面的研究。最后其研究的焦点就逐渐集中到“以太”与物体运动的关系上，集中到“以太”是否存在的问题上。如果“以太”是绝对静止和弥漫在整个空间的，那么这正好对应着牛顿的绝对时空观，这样就更增加了人们研究“以太”的兴趣。赫兹曾认为，以太跟随物体一起运动，可是1851年法国的菲索所做的流水对光速影响的实验否定了这个看法。荷兰的洛仑兹设想以太不随物体一块运动，那么物体运动时就要产生“以太风”，这种“以太风”，人们从十九世纪中后叶一直寻找到二十世纪初。人们曾进行过许多次的实验，先证明了在一阶效应内( $v/c$ )不存在“以太风”，其次由迈克耳逊莫雷又设计了一个属于二阶效应( $v^2/c^2$ )的实验，通过多次测定，完全否定了“以太”相对地球的运动。这样问题的核心就集中在“以太”是否存在的抉择上。爱因斯坦后来回忆说：“我最早考虑这个问题时，并不怀疑以太的存在，即不怀疑地球穿过以太运动”。但是当我知道迈克耳逊的实验结果时，我很快得出结论，如果我们承认迈克耳逊的零结果是事实，那么地球相对于以太运动的想法就是错的。这是引导我走向狭义相对论的最早想法。”这样，“最明显地一条路似乎是认为并没有以太这样的东西”。爱因斯坦就这样否定了“以太”的存在，以他的独创精神毅然摒弃了统治物理学近三个世纪的“以太”学说，开创了物理学的新时期。

### 三、爱因斯坦关于“光速”的思考

十七世纪以前，人们一般认为光速是无限大的。伽利略对此表示怀疑，他曾试图测量光速，但限于当时的测量手段，结果没有成功。1676年丹麦天文学家罗默首次测量光速获得成功。在这以后，菲索于1849年、傅科于1862年、迈克耳逊在1925—1926年相继对光速作了精确的测量，人们发现光速同光源的运动、光的频率、光的传播方向都没有任何关系，即光速是一个常数。这一结果就同经典力学的速度合成公式、伽利略变换以及伽利略相对性原理产生了矛盾。另一个矛盾就是如果把电磁场理论运用于运动惯性系，则对于以不同速度运动的两个惯性系，按速度合成公式，电磁场方程中的 $C$ （光速）就要有两个不同的数值，这样电磁场方程在两个不同的惯性系中就要有两种不同的形式。这一推理结果是同相对性原理相矛盾的。相反，如果按相对性原理，则电磁场方程无论在哪个惯性系中都应有相同的形式和相同的 $C$ （光速），这又同经典速度合成公式相矛盾。面对这些矛盾如何去解决呢？爱因斯坦在后来的回忆中曾写道，爱因斯坦从16岁的（1895年）起就开始思考这些问题“如果我以光速追随光波将会看见什么？”直到1905年这个问题一直在爱因斯坦的脑海中盘旋而未能得到解决。爱因斯坦想，麦克斯韦电磁场方程不仅在真空静止参考系中成立，在运动惯性系中也完全应该成立。这样一来就得承认光速的



不变性。但光速不变是与速度合成法则和伽利略相对性原理相矛盾，这问题的关键出在哪里呢？爱因斯坦经过十年沉思，“放弃了许多无效的尝试”“终于醒悟到时间是可疑的！”在确立了时间是不能绝对定义的之后，爱因斯坦就在光速不变与速度合成法则之间作了选择。放弃牛顿力学中的速度合成法则。爱因斯坦说：“我解决的办法是分析时间这个概念，时间不能绝对定义，时间与速度之间有不可分割的联系。使用这个新概念，我第一次完满地解决了整个困难。”同时，爱因斯坦又考虑到：“绝对静止的概念，不仅在力学中，而且在电动力学中也不符合现象的特性，倒是应当认为，凡是对力学适用的一切坐标系，对于上述电动力学和光学的定律也一样适用。”这样爱因斯坦在经过十余年的沉思与探索、在解决了一切矛盾之后，在1905年春用了五个星期的时间，以光速不变原理和相对性原理两个公设为基础创立了狭义相对论。

#### 四、狭义相对论的公设、推论及意义

1905年，爱因斯坦完成了科学史上的不朽篇章《论动体的电动力学》，宣告了狭义相对论的诞生。它以光速不变原理和狭义相对性原理作为两条基本公设：

1. 光速不变原理：在任何惯性系中，真空中的光速  $c$  都相同；
2. 相对性原理：在任何惯性参考系中，自然规律都相同。

这两条原理表面上看是不相容的，但只要放弃绝对时间的概念，那么这种表面上的不相容性就会消除。由这两条公设，根据静体的麦克斯韦的电磁场理论，就可以得到一个简单而又不自相矛盾的动体的电动力学。这样，爱因斯坦就从根本上解决了牛顿力学与麦克斯韦电磁场理论的矛盾，在新的、更高的基础上把两者统一起来了。

公设是原则性的，还要推导出具体的、可供检验的结论，才能构成完整的科学学说或理论。

首先，狭义相对论的时空观是一次大变革，它把原来认为是毫无联系的时间、空间和物质的运动联系起来，揭示了它们之间的依赖关系在高速运动的情况下，物体的长度会缩短。

$$\text{即：} \quad l = l' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

时钟会变慢，即

$$t = t' / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

物体的质量随物体运动的速度而变化

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

也就是说，物体的质量、空间、时间都是相对的，都随物体运动状态的变化而变化。

其次，狭义相对论把原来认为独立存在的时间与空间联结为一个统一的“世界”——四维时空连续区。并具体揭示了时间与空间内在联系的具体形式，即时空变换关系式

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{array} \right.$$

第三，狭义相对论成功地解释了多普勒效应、光行差以及迈克耳逊—莫雷实验等。

第四，爱因斯坦根据狭义相对论推导出了著名的质量能量关系，用现行的公式可表示为：

$$E = mc^2$$

第五，导出了能量与动量的关系

$$E^2 = c^2 p^2 + E_0^2$$

并把动量守恒和能量守恒这两定律统一起来。

第六，由狭义相对论可推导出，发生于不同地点的两个事件，其先后顺序（包括“同时”）在不同惯性系看来是不同的，但因果关系仍成立。

第七，速度相加满足

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$$

其中  $v$  为运动参考系相对静止参考系的速度， $u$  为物体相对运动参考系的速度（设与  $v$  同方向）， $u'$  为物体相对静止参考系的速度。由此可见，任何物体的速度（包括能量传播速度）不可能超过光速。

以上结论与实验事实相符，但只有运动速度很大时，效应才显著。在一般情况下，相对论效应极其微小，因此经典力学可认为是相对论力学在低速情况下的近似。

爱因斯坦自 1905 年关于相对论的第一篇论文问世后的短短几年里，就把狭义相对论的基本原理应用到各个领域，建立了相对论电动力学和动力学的体系。爱因斯坦在《相对性：狭义相对性的本质》中，对狭义相对论取得的成果作了一个概括的说明：“狭义相对论导致了对空间和时间的物理概念的清楚理解，而且由此认识到运动着的量杆和时钟的行为。它在原则上取消了绝对同时性概念，从而也取消了牛顿所理解的那个即时超距作用概念。它指出在处理同光速相比不是小到可忽略的运动时，运动定律必须加以怎样的修改。它导致了麦克斯韦电磁场本质上的同一性的理解，它把动量守恒和能量守恒这两条定律统一成一条定律，而且指出了质量同能量的等效性。从形式的观点来看，狭义相对论的成就就可以表征如下：它一般地指出了普适常数  $c$ （光速）在自然规律中所起的作用，并且表明以时间为一方，空间坐标作为另一方，两者进入自然规律的形式之间存在着密切的联系。”八十多年来，狭义相对论的结论已得到大量事实的验证。相

对论早已成为人类最宝贵的科学财富之一 ,成为现代科学最重要的成果之一 .

# 光电效应

## 一、光电效应现象的发现

物质在光的作用下发射电子，这个现象是赫兹(1857—1894)最早在实验中发现的。当时他用紫外光照射有火花间隙的F电极，如图所示。实验发现火花很容易地在电极间通过，调整F的间隙大小，使在变压器T和电容器C组成的线路中，火花很难跳过，这时如果用水银灯Hg的光来照射由纯锌构成的电极F，则电容器的放电就相当容易的发生。这一发现公布在1887年撰写的题为《论紫外光对放电的影响》一文中。

后来，霍尔瓦西斯(1859—1922)和赫兹的助手勒纳德(1862—1947)，以及俄国科学家斯托列托夫(1839—1896)等人继续深入研究了这一现象，并发现了许多出乎意料的结果。

## 二、光电效应的实验装置与实验结果

早期的研究光电效应的实验装置如图所示电极C和P封在高真空容器中，光经石英窗照射到负电极C上，光电效应产生的光电子受电场加速向电极P迁移而形成光电流。实验发现光电流的大小与照射光的强度成正比，且当照射光中的紫外线越强，光电效应就越强。用一定强度和给定频率的光，照射电极C，所得到的光电流I和两极间的电位差V的实验曲线如图所示。

总结所有的光电效应实验的结果，其实验规律有如下几方面：

1. 阴极(发射光电子的金属材料)发射的光电子数和照射光强度成正比。

2. 光电子脱出物体时的初速度和照射光的频率有关而和发光强度无关。也就是说，光电子的初动能只和照射光的频率有关而和发光强度无关。

3. 仅当照射物体的光频率不小于某个确定值时，物体才能发出光电子，这个频率 $\nu_0$ 叫做极限频率(或截止频率)，相应的波长 $\lambda_0$ 叫做红限波长。不同物质的极限频率 $\nu_0$ 和相应的红限波长 $\lambda_0$ 是不同的，下表是实验测得的几种金属材料的红限波长。

金属	铯	钠	锌	银	铂
红限波长( $\text{\AA}$ )	6520	5400	3720	2600	1960

4. 从实验知道，产生光电流的过程非常快，一般不超过 $10^{-9}$ 秒；停止用光照射，光电流也就立即停止。这表明，光电效应是瞬时。

## 三、经典电磁理论遇到的困难

光电效应现象及其上述的实验规律，使经典电磁理论无法对此作出完整的解释。

首先，经典电磁理论认为，由于光是电磁波，在光的照射下，金属中的电子将从入射光中吸收能量，从而逸出金属表面。逸出时的初动能应决

定于光振动的振幅，即决定于光的强度。这样，光电子的初动能应随入射光的强度的增加而增加，但实验表明，光强增加仅使光电流增加，而与电子的动能无关。

其次，在经典电磁理论中，不管是什么频率的光，只要光强足够供应发射光电子所需的能量，都能激发出光电子。但实际上，每种物质的表面都存在一个截止频率  $\nu_0$ ，对于频率小于  $\nu_0$  的入射光，不管光强有多大，都不能产生光电效应。

第三，从经典电磁理论看来，从光与金属表面开始碰撞到光电子发射之间，有一个可测的滞后时间，在这段时间里，电子从光束吸收能量并积累到足以脱离原子的束缚而逃逸出去。但实验中根本测不出这个滞后时间，光的入射和光电子的发射是同时发生的。如果按照经典理论计算，在把光强控制到刚好能发生可观察的光电效应的情况下，电子竟要经过 500 年才能积累足够发射出去的能量。

从这里可看出，经典理论无法对光电效应作出满意解释，为此，要求人们探索新的理论。

#### 四、爱因斯坦的光量子（光子）理论

正当物理学家们为光电效应所表现出的这些性质感到迷惑不解的时候，1905 年爱因斯坦在《关于光的产生和转化的一个启发性观点》不朽论文中，大胆地提出了光量子（光子）假说正确解释了光电效应，以及荧光、紫外光使气体电离等一系列有关光的产生和转化的现象。

爱因斯坦在《关于光的产生和转化的一个启发性观点》一文中，清楚地阐明了他解决问题的思路。他是从分析已有理论形式上的不对称和理论之间的矛盾出发的，目的则是为了提出一种新的假说或方法来消除这种不对称性或者矛盾，以求达到在逻辑上新的统一。他用那种高屋建瓴，直接从原有理论存在的主要矛盾出发的方式，所以在文章的一开头就气势不凡的写道：“在物理学家关于气体或其他有重物体所形成的理论观念同麦克斯韦关于所谓空虚空间中的电磁过程的理论之间，有着深刻的形式上的分歧。……按照麦克斯韦理论，对于一切纯电磁现象因而也对于光来说，应当把能量看作是连续的空间函数，而按照物理学家现在的观点，一个有重客体的能量，则应当用其中原子和电子所带能量的总和来表示。一个有重物体的能量不可能分成任意多个、任意小的部分，而按照光的麦克斯韦理论（或者更一般地说，按照任何波动理论），从一个点光源发射出来的光束的能量，则是在一个不断增大的体积中连续地分布的。”这样，爱因斯坦在一开头就一针见血地指出了麦克斯韦的电磁理论和物质的原子理论之间的深刻分歧在于能量连续性和不连续性之间的矛盾。接着，他进一步指出，波动理论虽然在描述纯粹光学现象，如反射、折射、衍射、色散等等时是十分成功的，但这些观测都只同时间平均值有关，而不是同瞬时值有关，所以，当人们把这种理论应用到光的产生和转化现象上去时，这个理论会导致和经验相矛盾。原有的理论既有局限，就必须提出新的假说和理论来突破原有理论的局限，于是爱因斯坦认为，在研究诸如黑体辐射、光致发光、光电效应以及其它一些有关光的产生和转化等瞬间发生的现象时，要采用“光的能量在空间不是连续分布的这种假说来解释，”也就是说，“从点光源发射出来的光束的能量在传播中不是连续分布在越来越大

的空间之中，而是由个数有限的，局限在空间各点的能量子所组成，这些能量子能够运动，但不能再分割，而只能整个地被吸收或产生出来。”

根据爱因斯坦提出的光量子理论就可以对光电效应进行解释了。根据光量子理论，当光子照射到物体上时，它的能量可以被物体中的某个电子全部吸收。电子吸收光子的能量以后，能量增加，不需要积累能量的过程。如果电子吸收的能量  $h\nu$  足够大，能够克服脱离原子所需要的能量（即电离能量） $I$  和脱离物体表面时的逸出功  $W$ ，那末电子就可以离开物体表面脱逸出来，成为光电子，这就是光电效应。

爱因斯坦给出的光电方程为

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + I + W$$

式中  $\frac{1}{2}mv^2$  是脱出物体的光电子的初动能。

金属内部有大量的自由电子，这是金属的特征，因而对于金属来说， $I$  项可以略去，爱因斯坦光电方程为

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W$$

从方程中可以得出：

1. 光子能量  $h\nu$  小于  $W$  时，电子不能脱出金属，因而不能产生光电效应，这就说明了为何存在红限。

2. 光电子的能量决定于光子的频率，光子的频率越高，光电子的能量就越大。而光的强度只能影响光子的数目，从而成功地解释了经典理论所不能解释的光电效应。

爱因斯坦的光量子理论虽然成功地解释了光电效应，但它并没有被广大物理学家所承认。因为，一方面这一理论与经典电磁理论是完全相违背的。普朗克也认为这一理论“太过份了”甚至到 1913 年他仍持否定态度。另一方面，当时有关光电效应的实验并不精确，而且那时实际上并没有任何

实验数据能说明，在爱因斯坦推导的方程中（ $\frac{1}{2}mv^2 = Ve = h\nu - W$ ），电位差  $V$  与频率  $\nu$  的关系是什么性质的，也不能说明式中假设的物理量  $h$  是否就是普朗克常数。后来密立根还举出了至少五个需要验证的预言。所以，爱因斯坦的光量子假说和光电方程，能否得到承认，关键还要经受实验的定量检验。

## 五、光量子理论的实验验证

### 1. 密立根实验

正当理论物理学家拒绝承认光量子假说的时候，实验物理学家尽管对爱因斯坦这种十分大胆地想法抱有怀疑态度，但自从爱因斯坦的论文问世的 1905 年起，就有人开始用实验来验证这一假说了。特别是在美国，好几所大学的实验室都在进行这一工作。其中有典型代表性的是芝加哥大学的实验物理学家密立根所进行的实验。

密立根起初认为爱因斯坦的假设不仅“大胆得不可思议”，而且是“粗枝大叶的”。他之所以要研究光电效应，其目的就是要否定爱因斯坦关于能量为  $h\nu$  的光量子假说。密立根精心设计了一套消除金属表面氧化膜的

极为复杂的装置，他想借此提高实验的精确度，并采取了一系列措施，尽可能消除一些以前其他实验物理学家无法处理的误差。这个实验的操作技术也是十分复杂的。密立根实验的示意图如下所示：当一定频率的单色光照射到金属板 B 时，引出电子逸出。A 极相对于 B 极有任意的电压  $-V$ ，它有抑制电子向 A 极运动的作用。AB 间的光电子电流可以测量。如果承认爱因斯坦光电方程正确，则当  $eV > E_k$  时，没有一个电子能达到 A 极，当  $eV < E_k$  时，AB 间有电流出现，如果  $v_0$  是电

流恰为零时的电势（截止电势）则有  $eV_0 = h\nu - w$ ， $V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{w}{e}$  说

明截止电势  $V_0$  与照射光的频率有关，若改变入射光的频率  $\nu$ ，则截止电势  $V_0$  对频率  $\nu$  的图线将是一条直线。如图，由这条直线的斜率可以求出常数  $\frac{h}{e}$ ，由直线与  $\nu_0$  轴的截距可以求出与材料有关的常数  $\frac{w}{e}$ ，密立根算出的  $h = 6.56 \times 10^{-27}$  尔格·秒 和普朗克算出的  $h = 6.55 \times 10^{-27}$  尔格·秒 很相近，图象中的直线方程可写作

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = h(\nu - \nu_0)$$

或 
$$h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + h\nu_0 = \frac{1}{2}mv_m^2 + w$$

至此，不管密立根开始对爱因斯坦假说如何怀疑，但实验结果却无情地否定了他的怀疑。这样，爱因斯坦的光量子假说和光电方程在提出的十年后被密立根的实验完全证实了。

## 2. 康普顿效应

1922 年—1923 年间，美国物理学家康普顿（1892—1962）在实验中发现：散射 X 射线中有和入射 X 射线波长  $\lambda_0$  相同的射线，也有波长  $\lambda > \lambda_0$  的射线，这表明除了波长不变的散射外，同时还有波长变大的散射，即康普顿效应。实验结果还表明，在原子量小的物质中，康普顿散射较强；在原子量大的物质中，康普顿散射较弱。波长的改变  $\lambda - \lambda_0$  随散射角  $\phi$  而异；当散射角增加时，波长的改变也随之增加；在同一散射角下，对于所有散射物质，波长的改变  $\lambda - \lambda_0$  都相同。而经典电磁理论只能解释波长不变的散射，而不能解释康普顿效应。

1923 年，康普顿用爱因斯坦的光量子理论完满地解释了他的实验结果（康普顿效应）：根据爱因斯坦的光量子理论，设光子具有的能量为  $h\nu$ ，动量为  $h\nu/c$  这里  $h$  是普朗克常数， $\nu$  为光的频率  $c$  为真空中的光速。那么按照光子和自由电子的弹性碰撞理论（弹性碰撞遵从动量守恒定律和动能守恒定律），康普顿效应就能够在理论上得到和实验相符合的解释。这就再一次证明了爱因斯坦理论的正确性。

爱因斯坦光量子理论的意义，不仅在于对光电效应和康普顿效应作了正确解释，而且使关于光的本性的探讨前进了一步，为波粒二象性的提出作了准备。1921 年爱因斯坦由于“在理论方面的贡献和发现了光电效应定律”而荣获 1921 年的诺贝尔物理学奖。密立根由于他在“基本电荷和光电效应”方面的研究成果，而获得 1923 年的诺贝尔物理学奖。康普顿因发现康普顿效应并用爱因斯坦光量子理论给予完满解释而荣获 1927 年

诺贝尔物理学奖 .



# 物质波

## 一、物质波概念形成的基础

在二十世纪以前的经典物理学中，波和粒子是物质的完全不同的两个概念。粒子存在于空间的某一区域，与不连续性相联系，通常用体积、长度、动量、能量等物理量来描述它的状态和状态的变化。而波是弥漫于空间，与连续性相联系，通常用波长、频率、位相、强度等物理量来描述。在解释物理现象时，粒子的观点总是与波动的观点相对立的、互相排斥的，是一种典型的“非此即彼”的关系。历史上关于光的本性的探讨就是一个典例，在十七世纪以前，同时产生了光的微粒说和波动说，在这二者的争论中，由于几何光学发展的需要和微粒说的倡导者——牛顿的影响，把光看作是快速粒子流的微粒说占主导地位。随着物理光学的研究的深入，十九世纪初，光的波动说异军突起，占了主导地位。麦克斯韦电磁场理论的成功，又进一步加强了光的波动说的地位。但时隔不久，在研究光与物质的相互作用问题又重新发现波动说面临的巨大困难。特别是对光电效应的研究，虽然可以上溯到赫兹，但一直是光的波动说难以完满解释的现象。二十世纪初，普朗克提出了能量子概念，从此物理学进入了一个新的时期。1905年，爱因斯坦在普朗克“能量子”假设的启发下，提出了光量子（光子）的理论，指出，一束单色光，是一束以光速  $c$  运动的粒子波，这些粒子称为光量子，即光子。每个光子都有一定的能量，对于频率为  $\nu$  的光，每个光子的能量为  $\epsilon = h\nu$ ， $h$  为普朗克常数。光束的能量就是这些光子能量的总和，一定频率的光，光子的数目越多，光的强度就越大。以此完满地解释了光电效应现象。从此使人们对光的本性有了进一步的认识。即从光的干涉、衍射、偏振等现象表现出光的波动性质，而从光电效应等光与物质相互作用的现象中又表现出光的粒子性。这样历时三个多世纪的波动说和微粒说的争论，由光的波粒二象性的观点所代替，为微观粒子波粒二象性的提出打下了坚实的基础。

## 二、物质波概念的孕育时期

德布罗意的物质波概念是逐步形成的，是吸收了其他学者物理思想中的精华，并受到他们工作的许多启发而独创性地建立起来的。

### 1. 爱因斯坦有关光的波粒二象性的启发。

1905年爱因斯坦为解释当时的一些实验事实，如光电效应，曾在普朗克的“能量子”概念的基础上提出了光量子的假说。1909年爱因斯坦又从普朗克关于光辐射量子理论工作中的不自洽性出发，反过来根据普朗克辐射公式来研究黑体辐射的能量的涨落现象。结果表明，光应该具有波动一面，同时又有粒子一面的双重结构。但是在当时，爱因斯坦的光量子假说没有受到人们的认真对待，或者说，没有被看出它的深远影响，正如海森伯后来所说，“爱因斯坦的二象性在当时只是被当作不太深刻的矛盾而未被理睬。”但爱因斯坦的这一波粒二象性思想对德布罗意的影响至深。

### 2. 莫里斯的实验研究工作的影响

德布罗意的兄长莫里斯是一位研究 X 射线的实验物理学家。当时，X

射线的研究是一个非常热门的课题，莫里斯十分熟悉同行的工作成果。例如莫里斯利用 X 射线验证了玻尔原子模型，提出了 X 射线的微粒性。劳厄于 1912 年发现了晶体的 X 射线衍射，既可用于决定 X 射线的波长又证明了原子的点阵结构。布喇格曾经指出要探索一种理论能阐明 X 光的波动和粒子的两重性。莫里斯将这些情况都同德布罗意交谈过；同时也强调指出了 X 光应当是波和粒子的一种组合。德布罗意从中受到了很大的影响，在当时大部分物理学家致力于设法消除光的二象性，或至少相信这种二象性在一个扩充了的和修改了的波动理论中或可予以克服，但德布罗意却不同，他深信波粒二象性的正确性。

### 3. 布里渊的物理思想的吸收

布里渊在关于玻尔量子条件的研究工作中，设想了一种存在于原子核近旁的“以太”层，电子在其中运动，这运动在“以太”层内部掀起的波因相互干涉而形成环形的驻波。这一情况的发现，布里渊认为，可以作为对玻尔的神秘的量子条件的一种物理解释。但是，布里渊的理论要借助于当时物理学已经摒弃了的“以太”介质，并且在数学上也遇到了困难，使得物理学家难以接受。然而由于一种尚未明了的原因，布里渊把自己的上述工作寄给了德布罗意，从而使德布罗意从中吸收了布里渊的物理思想的精华，并认真地把光的二象性假说同对玻尔模型的研究结合在一起考虑。

### 4. 康普顿散射实验的促进作用

1923 年 4 月 23 日，康普顿宣布了关于用光子和电子相互碰撞解释 X 射线散射中波长变长的实验结果，这就是著名的康普顿效应。康普顿运用爱因斯坦的光量子概念给予了完满的解释。这对光量子进行艰苦思索的德布罗意来说是一个极大的促进。从这个在一般人看来是粒子本性的最终的判决性实验中，德布罗意看到了解决问题的线索。光量子的理论要求，光子的能量须由  $h\nu$  来定义。德布罗意认为，在一个粒子理论中能量项由  $h\nu$  来定义是不能令人满意的。于是他宣称，“仅此一端就提供了一个必要性，即在光的理论中应该同时引进粒子概念和周期性概念”

## 三、物质波概念的建立过程

德布罗意在光的波粒二象性的基础上，在许多物理学家的思想、研究和实验工作的影响与启发下，终于明确提出了“物质波”的概念，为现代物理学的发展做出了巨大的贡献。1929 年德布罗意在接受诺贝尔物理奖时所作的《电子的波动性》的讲演中较详细地谈到了他提出物质波时的情形。他说：“人们无法理解，为什么对光来说，需要有两种相互矛盾的学说，即波动说和粒子说。为什么原子中的电子只有可能进行某些运动，而按经典概念它应有无穷多种运动。这就是我重新开始理论物理研究时，物理学家所面临的哑谜。当我思考这些困难时，主要有两个问题吸引我。第一个问题是，不能认为光子理论是令人满意的，因为它是用  $E=h\nu$  这个关系式来确定光微粒的能量的，其中包含着频率  $\nu$ ，可是纯粹的粒子理论不包含任何定义频率的因素。对于光来说，单是这个理由就需要同时引进粒子的概念和周期的概念。另一个问题是，确定原子中电子的稳定运动涉及到整数，而至今物理学中涉及整数的只是干涉现象和本征振动现象。这使我想到了，不能用简单的微粒来描述电子本身，而应当赋予它们以周期的概念。于是我得出了指导我进行研究的的全部概念，对于物质和辐射，尤其是

光，需要同时引进微粒概念和波动概念。”1923年夏天，德布罗意已形成了这样一种思想：把波粒二象性加以推广，使物质粒子（特别是电子）也包括在内。正是由于这一思想，他于1923连续发表了三篇文章，系统地阐述了波粒二象性思想，并在1924年他的博士论文中详细地阐述了他的物质波思想及其实际应用。

德布罗意于1923年9月10日在法国科学院《会议通报》第177卷上发表了有关物质波的第一篇论文《波和粒子》。在这篇文章中从与粒子能量相联系的频率 $\nu$ 出发，作了一个大胆的设想，认为“一般的”物质也具有波粒二象性的性质，因而提出了物质波的概念。他认为，一个能量为 $E$ ，动量为 $P$ 的粒子与频率为 $\nu$ 和波长为 $\lambda$ 的波相当。仿照爱因斯坦关系，粒子的能量、动量与相应的频率和波长的关系为

$$E = h\nu \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

这就是德布罗意关系式。

德布罗意利用物质波的概念成功地分析了玻尔的量子化条件的物理基础，从而推导出玻尔量子化条件。初步检验了物质波概念的正确性。德布罗意的推导是这样的：他假设电子具有波动性，则有关系式

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

又从索末菲的条件

$$pdq = nh$$

出发，而推导出

$$dq = n$$

这说明电子的轨道必须是波长的整数倍。如果轨道是一个圆，则下式成立。

$$2\pi r = n\lambda \quad (r \text{ 为电子绕核的轨道半径})$$

再利用德布罗意关系 $p = \frac{h}{\lambda}$ ，可以得出玻尔量子化条件为：

$$\text{角动量} = r \cdot p = n \frac{h}{2\pi}$$

两个星期以后，1923年9月24日，德布罗意在论述物质波的第二篇文章《光量子，衍射和干涉》一文中进一步引进了“相波”的概念，在谈到粒子的波动现象的实验验证可能性时，德布罗意曾预言，穿过一个相当小的孔的电子流将显示出衍射现象。“正是在这一方向上，或可寻得我们观点的实验验证。”在这篇文章中德布罗意还讨论了他所要求的“新力学”和以往的“旧理论”，包括牛顿和爱因斯坦在内的动力学之间的关系。他说，波动理论并不否认辐射的微粒结构，这是它不同于先前的波动理论的地方，而新旧理论的关系恰好象是波动光学和几何光学之间的关系。德布罗意宣称：“经过对此深思熟虑，可以看出，我们所提出的这种综合就是在与十七世纪光学和动力学的类比中发展完成的。”

同年的10月8日，德布罗意又发表了有关物质波的第三篇论文《气体运动、费马原理和莫泊丢原理》，在这篇文章中，德布罗意再次详细地叙述了有关上篇文章中简要提出的这种类比。在给出了费马原理和莫泊丢变分原理的一致性以后，德布罗意总结说：“几何光学的和动力学的两条

伟大原理之间的基本联系由此得以完全明朗。”

1924年上半年，德布罗意进一步发展了他的理论。在1924年11月27日提交的博士论文《关于量子理论的研究》中，除了涉及上面三篇论文中提到的主要内容外，他进一步指出：“我们认为几何光学和动力学的这两个重要原理之间的深刻关系的这个思想，可以作为将波和量子综合起来的重要指南。”在这篇文章中，德布罗意还得到了稍后以他名字命名的波长与动量的关系式

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

这个式子和  $E=h\nu$  一起，后来被称为爱因斯坦——德布罗意关系。

从上面的四篇论文可看出，德布罗意所提出的物质波概念主要思路是运用类比推理的科学思维方法。首先他从光与力学的质点这两个对象之间有若干属性相同或相似，并且在两个对象的数学方程式相同或相似的情况下，推论出它们在其它方面的属性（波动性）上也相同或相似。其思路可简列为如下形式：

根据	}	<p>光具有粒子性和波动性，光的运动服从光线的最短路径的费马原理，它的数学方程式为 <math>\int n dl = 0</math></p> <p>力学的质点运动具有粒子性，质点运动服从力学最小作用的莫泊丢变分原理，它的数学方程式为 <math>\int w = \int p dl = 0</math></p> <p>比较可知，光和质点都具有粒子性且其数学形式 <math>\int w = 0</math> 与 <math>\int p dl = 0</math> 相同。</p>
----	---	--

推出结论：物质质点也可能具有波动性。

德布罗意在运用协变类比方法推导出实物粒子也具有波动性以后，进一步运用类比推理方法得到德布罗意关系式。其推理是依据光和实物粒子这两个对象的各个属性（粒子性和波动性）在协变关系中地位相同或相似，推出它们应具有数学关系形式也相同或相似。其类比推理可归纳为：

根据	}	<p>光具有粒子性和波动性，并且有方程式 <math>E = h\nu</math></p> <p><math>\nu = \frac{h}{p}</math>（E代表能量，h代表普朗克常数，<math>\nu</math>代表频率，p代表动量，<math>\lambda</math>代表波长）</p> <p>实物粒子也具有粒子性和波动性（波动性德布罗意在前面类比中已推导出和预言过）</p>
----	---	---

推出结论：实物粒子也可能具有数学关系式

$$E = h\nu = \frac{h}{\lambda} mv$$

这样，德布罗意在他的理论中主要是提出了物质波的概念和德布罗意关系式。他的理论确实使人感到耳目一新，匠心独创。他从物理学最基本的假定出发所作出的类比推理，其严密性是无懈可击的，而理论的独创性

更给人以深刻的印象。但由于缺乏实验验证，并没有引起人们的注意。但当德布罗意的导师朗之万(1872—1946)将德布罗意的博士论文寄给爱因斯坦时，爱因斯坦大加赞赏，称赞说：“瞧瞧吧，看来疯狂，可真是站得住脚呢！”并认为他揭开了“自然界巨大面罩的一角”，经过爱因斯坦的推荐，人们才开始重视对物质波的理论研究和实验验证。

#### 四、物质波概念的实验验证

1923年德布罗意曾预言，电子应该显示波的特性。美国物理学家戴维孙(1881—1958)和助手革末(1896—1971)曾观测到电子束垂直地打击镍靶(单晶)时，反射的电子束强度不是到处相同的。德布罗意的假说发表后，他们才认定这是电子波动性的证据。1925年他们又作了精密的测量。从实验测得的电子束的波长为 $1.65 \times 10^{-8}$ 厘米，这个数值和根据德布罗意关系式计算出的值 $1.66 \times 10^{-8}$ 厘米吻合得极好。1927年英国物理学家J·J汤姆逊之子乔治·汤姆逊用高能电子束穿透金属膜，并用照相术记录了电子的衍射花样，测出了电子束波长也与德布罗意关系式的计算值一样，从而有力地证实了物质波的存在。有趣的是J·J汤姆逊发现了电子，而他的儿子又证明了电子的波动性。父子俩都因为电子荣获了诺贝尔物理学奖。这样，德布罗意关于电子波动性的思想得到了直接的实验验证。人们正是利用了电子束具有波的性质，1937年才能使放大7000倍的可供研究用的电子显微镜试制成功。人类在微观世界的视野随着电子显微镜的改进而不断扩大。现在人们利用电子显微镜可以看到原子。中子是1932年发现的，1936年人们又证明中子束也具有波的性质。X射线衍射、电子衍射、中子衍射是现在研究物质结构常用的实验方法。比这略早几年，氦原子射线、氢原子或氢分子射线的衍射实验都有人相继做出来了，证明它们都显示波的性质。这些都充分证明了德布罗意的物质波概念具有普遍意义。

#### 五、物质波概念的发展

德布罗意独创性地提出了物质波的概念，并从实验上得到了验证。但是关于物质波的物理图景，或者其物理对应物，尚晦隐不明。德布罗意为此进行了艰苦的探索。从博士论文发表到1929年，他发表了一系列这方面的文章。这些文章总括起来，形成了一个“双重解理论”的系统性工作。但在数学上遇到了困难。1960年前后，德布罗意作出了可以和纯几率解释相比较的双重解理论的框架，指出了他的理论所遇到的困难，并提出了这样的希望：“我非常希望富有物理洞察力的青年物理学家们和富有经验的数学家们，对我所提出而不能真正加以辨明的那些假设发生兴趣。”另一方面，其他一些物理学家如薛定谔等人也从理论上研究了德布罗意物质波的特性。薛定谔把德布罗意的物质波思想加以推广并给予数学的表述，建立了波动力学。1926年在他发表的一系列题为“作为本征值问题的量子化”的论文，提出了表述原子过程的动力方程，即薛定谔方程，标志着波动力学的建立。在这同时，由海森堡、波恩、约当等人创立了矩阵力学。从而建立了量子力学体系。德布罗意因提出物质波概念于1929年、海森堡因创立矩阵力学于1932年、薛定谔因创立波动力学于1933年分别获得了诺贝尔物理学奖。

回顾德布罗意物质波概念提出的历史，可以看出，这是一次伟大的综合。完全对立的波和粒子观念，由此第一次既是互相排斥，又是彼此协调地贯穿在一切物理现象之中。这种波与粒子的对立，从牛顿起一直贯穿中物理学中。物理学家们先前的一切努力，总是企图以一者纳入另一者中，德布罗意开辟了一条新路。德布罗意这种思维模式就是美国学者卢森堡所称谓的“两面神思维”。两面神是罗马的门神，他有两个面孔，能同时朝向两个相反的方向。卢森堡认为：“两面神思维所指的，是同时积极地构想出两个或更多并存的和（或者）同样起作用的或同样正确的相反的或对立的概念、思想或印象。在表现违反逻辑或者违反自然法则的情况下，具有创造力的人物制定了两个或更多并存和同时起作用的相反物或对立面，而这样的表述产生了完整的概念、印象和创造。”德布罗意实物粒子的波粒二象性、爱因斯坦光的波粒二象性等概念就是两面神思维的典型事例。两面神思维是现代思维的一个重要方面。

从德布罗意物质波概念的提出，我们还可得到这样的启示，科学具有诱发性，一个理论会诱发另一个理论的产生。从能量子概念引出了光量子概念，光量子概念又引出了物质波概念。德布罗意说：“我们任何时候都不应忘记（科学史证明了这一点），我们认识的每一成就提出的问题，比解决的问题还要多；在认识的领域内，新发现的每一片土地都可使我们推测到，还存在着我们尚未知晓的无边无际的大陆。”

