

第一章

人类对自然界的探索

未来社会对人才的要求，将越来越强调运用科学思维进行判断的能力以及创造性地解决问题的能力，为此，强调通过学习科学家的科学探究活动来理解科学家研究自然世界的基本过程和方法，以及通过这些研究所得出的结论及其说明和解释，从而领悟科学的思想观念，获得对科学的理解。

第一节 物质的宏观运动与变化规律

一、自由落体运动规律

曾被人们誉为近代科学之父的伽利略是意大利物理学家和天文学家。他所发现的落体定律乃是近代科学史上一颗闪烁的明珠。

两块轻重不同的物体从同一高度自由下落，哪块首先着地呢？早在 2000 多年以前，古希腊的学者亚里士多德认为：重物较轻物先着地。现在人们都知道这个见解是一个明显的大错误。由于亚里士多德是古希腊学者中一个最大权威，所以这一错误见解竟统治人们的思想达 1800 年之久。

到了 16 世纪，工程师出身的荷兰力学家斯台文做了如下试验：他拿两只铅球，其中一只比另一只重 10 倍，让它们从 30 英尺的高度同时落到地板上，结果二者下落时间之差不仅不是 1:10，而且它们落到地板上发出的声音听起来就像是一个声音。这样，斯台文以有力的实验事实否定了亚里士多德的错误见解。可是，持有异议的人们仍然认为重物较轻物先落地，只不过因为时间间隔很小，无法辨别出来而已。因此，在当时落体问题仍然是一个尚待证明的难题。最终是意大利科学家伽利略用实验与数学结合的方法攻克了这个难题。

（一）伽利略攻克难题的思路

1. 伽利略的理论思维实验

首先，伽利略运用理论思维去把握感性材料。他认为从现象看，确实可以看到不同物体下落有快有慢，这是由于一般落体实验总是要受到空气的阻力的。伽利略设想了一个实验，用铅、金和木做三个球。他在思想中让这三个球在水银、水和空气里下落。在水银里，只有金球往下落；在水里金球和铅球往下落，而金球下落得比铅球更快。在空气里所有的三个球都下落，这时，金球与铅球下落速度没有什么差别，只有木球下落得稍慢些。伽利略在感觉经验的基础上并没有简单从事，凭借理论思维毅然舍掉介质阻力这一非本质的因素。他想，不同重量的物体，在不同介质中下落时，介质越稀薄，物体下落的差异越小。那么要是在真空中的话，情况必然是所有的物体都以相同的速度下落。推理的结论应有实验来证明，但当时的技术水平还不能得到真空。

2. 伽利略与反正法

伽利略不仅采用对感觉材料进行理性分析的方法否定了亚里

士多德关于重物较轻物先落地的错误见解，而且还用准确严密的反证法揭露这一见解的逻辑矛盾。

从逻辑推理的要求来看，从正确的前提出发，严格遵循推理的规则，必然得出正确的结论，而不可出现相互矛盾的结果。那么，伽利略是怎样运用反证法使亚里士多德的见解漏洞百出的呢？

伽利略设问：如果把一件重的东西和一件轻的东西捆在一起，让它从高处下落，那它将是怎样一种情形呢？如果按照亚里士多德的观点来回答这个问题，就会得出两种互相矛盾的结论：第一，由于下降快的重物受到下降慢的轻物的影响，它们下落的速度应介于两者之间，即比重物慢比轻物快。第二，因为把两个物体捆在一起，它变成了一个更重的物体，所以它下落的时间比其那个重物单独下落的时间要短。也就是说，一件重的东西和一件轻的东西捆在一起从高处下落，得出两种相反的结论，既比其中那个重物单独下落时间长，又比其时间短。这显然是自相矛盾的。

3. 斜面实验

既然物体下落的速度不取决于其重量，那么它究竟与什么有关呢？经过几年的辛勤探索和思考，伽利略提出了下落速度与时间成正比的假说，伽利略设计了在科学史上相当出名的实验——斜面实验。

我们知道，在当时要测量物体下落的实际情况不是一件容易的事。因为要想测量速度，就需要测量时间。然而，在伽利略生活的时代，除了每隔大致相同的时间间隔报一次时的装置外，没有更好的时钟。于是伽利略自己制造了一个漏水钟作为计时器。¹由于物体下落过于迅速，用水钟测准时间显然极为困难。伽利略以高超的技能设计了一个斜面装置。使用斜面装置可以“稀释”或“冲淡”引力，随心所欲地测量落体情况。伽利略取一个 7m 多长，厚约三指

的一根带有凹槽的光滑板条。然后他选用了各种不同密度的、形状大小相似的、不同重量的光滑小球，如铜球、玻璃球等，让它们分别沿斜面的凹槽滚下。斜面越接近水平，小球滚得越缓慢，就越便于观察和测量。

伽利略发现，小球沿斜面滚下，时间增大到两倍，距离就增加到四倍；时间增大到三倍，距离就增加到九倍……就是说，小球所通过的距离与时间的平方成正比。而斜面倾角的大小并不影响这种关系。可以看出，伽利略做了两大类实验：其一是，当斜面倾角一定时，一切物体不论轻重其下落的距离与所用时间的平方之比为一常数；其二是，当斜面的倾角改变时，下落的距离与时间的平方的比值也随之改变，但规律的形式不变。当倾角为 90° 时，小球就是在做落体运动。这时 $S = gt^2/2$ ，其中 S 为下落距离， t 为下落时间， g 为重力加速度。伽利略将数学方法与科学实验结合起来，不仅发现了落体定律，在这之后他又获得了另外两个发现，这就是惯性原理和抛物体飞行轨迹的理论。伽利略在科学研究方法上的卓越贡献，为自然科学研究开辟了新途径。

（二）伽利略的实验方法

伽利略在实验落体运动前用反正法对命题进行了逻辑证明，那么什么是反正法呢？

1. 反正法

证明有两种基本类型：直接证明和间接证明。直接证明是根据已确定的规则从所运用的论据中直接推出需要证明的论题；间接证明则通过证明与论题相排斥的论题为假，然后得出论题为真的结论。反正法就属于间接证明。

（1）反正法的涵义及逻辑依据：反正法也叫归谬法。归谬法

就是先假定要反驳的论题是真的，然后由它逻辑地推导出一些自相矛盾或非常荒谬的结论来，从而证明原命题不是真的。

反正法的逻辑依据是逻辑学的排中律，即两个完全矛盾的命题“C 是 D’”与“C 不是 D”不会全错，其中必有一个是对的。所以，只要证明其中一个是错的，则根据排中律，另一个就必然是对的。反正法就是不直接证明“C 是 D’，是对的，而间接地去证明“C 不是 D’，是错的，以达到证明“C 是 D’，是对的的目的。例如，伽利略在推翻亚里士多德的“重物较轻物下落快”这一错误观点时，他首先假定“重物较轻物先落地”是对的而进行逻辑推理的。伽利略指出：如果一块轻石头 A 捆在一块重石头 B 上下落，那么根据重物较轻物下落快的论断，就会导致两个互相矛盾的结论：一是 (A + B) 比 B 重，因此，(A + B) 的下落速度比 B 快；一是速度慢的 A 加在速度快的 B 上，会降低 B 的下落速度，因此，(A + B) 的下落速度比 B 慢。这样从一个命题中引出两个互相矛盾的结果。由此可知，原命题是错的。

(2) 反正法的作用：反正法和直接证法同属逻辑证明的范畴。有时虽然可用直接证法，但反正法要来得简便，我们宁愿用反正法；亦有时根本没有条件用直接证法，那就必然用反正法了。比如，在伽利略时代，无法创造真空条件，因此无法直接证明“重物较轻物先落地”是错的，只好使用反正法。

逻辑证明在建立科学理论体系的过程中是一种重要的手段，它能使科学理论的逻辑结构严密起来，为科学理论体系的结论在逻辑上提供立论的依据，增强理论的说服力。另外，有些理论观点尽管是正确的，由于缺乏严谨有力的论证，就很难发挥应有的作用。例如，生物进化的思想从古代到近代有不少人提出过，但是未能战胜神创论和物种不变论，直到达尔文等人对生物进化论做了全面的科学论证，并对物种不变论作了有力反驳后，才使这

个问题得到科学的解决。反正法与直接证法相比，往往需要较广泛的知识 and 较高的逻辑思维能力。

2. 实验方法

科学对自然界的认识开始于观察，通过观察去搜集有关自然界的信 息。实验则可以人为地创造条件，促使认识所需要的信息出现。为了更有效、更深入地认识自然，抓住本质，发现规律，除了潜心观察大自然的奇迹以外，我们还得进行科学的实验。在单纯的观察中，人的认识、人的能动性无法超出被观察对象所处的环境和运动状态的局限。而在实验中，人的认识的能动性才能得到最大程度的发挥，通过实验所设置的条件，改变物质运动的状态，把它的规律性充分揭示出来，因此实验是一种能动性的实践。实验也是探索自然、认识自然的最重要的手段。

(1) 实验方法的涵义：所谓实验方法是实验者根据科研题目确定的目标，运用一定的条件及物质手段（科学仪器和设备），在人为地变革、控制或模拟客观事实的条件下进行的某种操作或开展的某些活动。从本质上讲，实验方法就是人们为了认识自然而去进行变革自然的实践，在变革自然的实践中去认识自然的科学认识方法。

(2) 实验方法的特点：实验离不开观察，观察是实验中一个必不可少的组成部分。它们都是搜集客观事实、获取感性材料的基本方法，是形成、发展和检验自然科学理论的实践基础。所以，实验与观察是相互联系、相互补充、相互渗透的科学方法。但实验与观察相比又具有如下的特点：

实验可以有目的地、人为地造成各种相互作用的条件，促使科学认识所需要的某种相互作用过程或物质运动形式发生，让认识对象的本质和规律性充分表现出来，人们就可以更有效地获取为认识它们所必需的经验材料。比如，在人们即使借助仪器也

无法直接观察到原子内部结构的条件下，卢瑟福却通过 α 粒子散射实验来认识原子结构。他用 α 粒子流撞击极薄的金箔，发现绝大多数入射粒子都能径直穿过金箔，好像通行无阻。只有极少的入射粒子向后弹回。这样为数极少的粒子还不到入射粒子的万分之一。以后卢瑟福又同盖革及马斯登经反复验证，证明这个实验的结果准确无误。正是根据这一实验事实，卢瑟福于 1911 年正式提出了他的有核原子结构模型。

实验能简化、纯化研究对象。在自然界里，现象往往是比较复杂的，事物经常处于与其它事物的普遍联系之中。实验可以借助于各种仪器、设备，人为地控制过程发生的条件，把事物从其在自然条件下存在的多方面的联系中逐一分离出来，分别对它们做单一因素的考察；可以把各种次要的、偶然的因素暂时舍去，集中研究最主要的东西；可以把各种干扰因素减小以至排除，使我们需要认识的某种属性或联系以比较纯粹的形态展现出来。又如，卢瑟福把放射性物质放在厚薄不同的双层玻璃管的夹层中，并事先将夹层抽成真空，结果发现 β 粒子可穿过管壁，而 α 粒子滞留在玻璃管的夹层之间，这就为单独认识 α 粒子的属性创造了必要的条件。

实验还可以创造各种特殊的或极端的条件，使我们的认识得以扩展和深化。在自然界中，一切自然规律都是在一定的条件下起作用的，条件不同，规律的表现形式也不同。通过实验，我们可以人为地创造出在自然状态下难以遇见或无法达到的条件，这样就可以使在自然状态下不易觉察的现象和不易发现的规律表现出来，从而使我们对自然界的认识更加深化、更加全面。例如，超高压、超高温、超低温、超真空等，这些极端条件在现实的自然界里是罕见的、不易得到的，只有在人为的作用下才能实现。又如，卢瑟福使 α 粒子受激发光，通过观察它的光谱线认

识其性质，就是借助于那个特制的抽真空的双层玻璃来实现的。假如没有那种人为的真空条件，仅靠观察方法去寻觅 α 粒子在真空中的行为，在当时条件下是完全不可能的。又如，有的化学实验需要在氯气或氧气中进行，这就需要人为创造的特殊条件。还有汞在超低温时电阻为零，正是荷兰物理学家昂尼斯 1911 年在 -269 的实验条件下发现的。

实验可以重复，而重复实验可以增大我们认识的可靠性、准确性。人们在自然条件下进行观察虽然也可以重复，但为了重复观察往往要等很长时间，又必须服从于某种机会。特别是这种重复的条件总会发生不同程度的变化，这就给人们的认识带来了意外的困难。实验条件由于是人为的、受控的，可以按研究工作的需要使被研究的事物、现象或过程几乎在同一条件下反复重现。反复才能保证观察的准确性。

实验可以加速或延缓、再现或模拟某些自然过程。例如，为了研究地球气象的变化，中国科学院大气物理所就是通过大气模拟实验进行的。它将距地面几万米的整个大气层的运动在实验室里模拟出来，大气环流模型的转台每半分钟左右转一圈，能模拟一天的气候变化。三个多小时就能模拟一年的气候变化。

⑥实验方法是一种经济可靠的认识和变革自然的方法。人类对自然界的认识是一种不断探索、反复实践的过程，往往要经过多次失败才能获得成功。由于实验方法相对于生产实践来说，规模小、周期短、费用少，即是出现失败，损失也较小，加之实验的安全因素比生产易于控制，因此，在技术领域，新产品必须经过多次试验才能投入生产。

(3) 实验方法在科学研究中的作用：

实验可以为验证假说或理论的正确性提供标准。例如，伽利略就是通过在斜面上的反复实验来研究自由落体规律的，同时

也是从实践上对“重物较轻物先落地”这一谬论的有力否定。还有许多验证是只能通过实验进行的。如李正道、杨振宁关于弱相互作用下宇称不守恒的发现，这个发现在 1957 年由吴健雄所作的钴—60 β 衰变实验给出决定性的验证。要用这个办法验证宇称是否守恒，问题的关键是测定钴—60 衰变出来的电子的运动方向与钴—60 原子核的自旋方向相同或相反的机率是否一样。显然，这样的验证只有用实验才能完成。因为我们至今也无法观察单个的钴—60 原子核的 β 衰变，而只能观察许多钴—60 原子核衰变的集体效应。而这许许多多钴—60 原子核的自旋方向是杂乱无章的，我们如何判定衰变产生的电子方向与核自旋方向的一致性呢？而吴健雄却用实验手段把这个问题解决得非常漂亮：首先，她造成一个强磁场，通过这个外加磁场把核自旋磁体整齐地排列起来，使所有的钴—60 原子核的自旋都指向同一方向；其次，她又造成一个摄氏 -272 以下的超低温环境，消除由于钴—60 原子核热振动对其自旋方向可能引起的畸变效应。这才为李、杨的重要发现作出了出色的验证。

实验是获得新假说、新理论的直接来源，是掌握科学知识的手段。诺贝尔奖的颁发也体现了实验手段的重要。以物理奖为例，从 1901 年到 1978 年，得奖项目中属于实验技术的或基本上是从实验性工作的约占百分之六十以上，理论性的或基本上属于理论性研究的只占百分之四十左右。

(4) 实验方法的类型：随着科技的飞速发展，具体的科学研究项目、目的和要求各不相同，因此实验方法有多种类型。

按实验中质和量的关系可分为定性实验和定量实验。一般说来，定性实验要解决的是“有没有”或“是不是”的问题。定性实验是要判定研究对象具有哪些性质，判定某种物质的成分、结构或者鉴别某种因素是否存在，以及某些因素之间是否具有某种

关系的一种实验方法。它是定量实验的基础。定量实验是可以精确测定实际对象的某些量值的实验。如测光速，测定自来水中钙、镁的含量等。

根据实验手段是否直接作用于实验对象，可分为直接实验和模拟实验。直接实验是通过实验设施直接作用于实验对象的条件下，观察实验对象所显示的各种信息；模拟实验是先设计出反映实验对象属性的模型，然后通过模型实验来研究原型的性质及其运动规律，或模拟原型的结构或功能设计出新产品的实验。

根据实验的直接目的又可分为探索性实验、验证性实验、析因实验、对照实验和判决性实验等。

从宏观来说，实验可分为物质实验和理想实验。物质实验是建立在一定物质基础上所开展的活动，上述实验均属于物质实验，大家比较熟悉。下面主要介绍理想实验。

3. 理想实验

理想实验又称思想实验，它是人们为了一定的研究目的在思维中设计、塑造的理想过程。一方面它与物质实验有原则的区别，它并不是在实验室的物质条件下使研究对象进行客观的实实在在的运动变化的过程，而是在头脑中运用想象、逻辑推理、数学推导等手段假想某种过程，是一种思维活动而不是物质的变化。另一方面，思想实验又与物质实验有密切联系，它以真实的科学实验为基础，从中抓住本质的东西，略去非本质的东西，经过典型化、系统化、理想化后将实验搬到大脑中进行。设计的这个实验过程不是完全无根据的主观臆造，而是要立足于客观实际，又必须遵循事物运动的客观规律和逻辑原则，使整个过程沿着科学的合理的途径去演变，以产生出某种逻辑上的必然结果。从这个角度上讲，思想实验可以看作物质实验在思维中的延伸。

(1)理想实验的佳作：伽利略曾设想过这样一个实验：当一个球从斜面上滚下而又滚上第二个斜面时，球在第二个斜面上所达到的高度同它在第一个斜面上开始滚下的高度恰好相等。如果第二个斜面倾斜角度很小，球在这个斜面的远处达到与第一个斜面同样的高度为止。如果第二个斜面的斜度等于零，则球从第一个斜面滚下后将以恒定的速度在平面上无限制地运动下去。这个实验是以斜面完全光滑和球运动时无摩擦力为前提的，这在实际中是无法实现的，而只能在思维中把握它的运动。

(2)理想实验的优点：理想实验把科学抽象的作用和科学实验的作用统一在一起，所以比起单纯的科学实验或单纯的科学抽象来说都有特殊的优点。

理想实验与物质实验相比可大大节约实验设备的投资，它可以赤手空拳进行实验；还可以大大缩短实验过程，只要设计合理，很快可出实验结果。因为实验过程是高度发挥思维能动性的过程，所以能使实验条件及过程达到纯化、简化和强化。比如，在实验室里摩擦力不可能完全消除，绝对的真空也不存在，但在思维中可以很容易将不必要的干扰完全消除掉，塑造理想的实验。这可以使客观事物和过程的内在联系更清晰地展现出来，使我们作出更深刻的科学结论。

思想实验与单纯的科学抽象相比，单纯的科学抽象只能在现成的经验材料中进行，透过现象抽出本质。而思想实验可以想象一定的变化过程，立足实际又不受实际的限制，充分发挥思维的创造性；同时它又是动态地研究、考察事物，能简单明确地揭示事物的变化规律。

(3)理想实验在科学发展史上的作用：一方面，理想实验是批判错误论点、推动科学前进的有力手段。例如，亚里士多德的运动学观点，认为力是速度的原因，力一旦停止作用，运动就会停

止。其中重要因素是对摩擦力的作用没有分析清楚。伽利略在思想实验中将摩擦力的作用完全排除，一旦撤掉作用于物体的力，物体将作匀速直线运动——惯性定律。这就有力地批判了亚里士多德的论点。另一方面，理想实验也是科学发现的重要方法。由于思想实验可以创设出现实过程中不能遇到的理想化的特殊条件，因此就可以揭示凭感性经验无法感知的特殊性质和联系，从中得出深刻的科学发现。爱因斯坦成功地运用思想实验创立相对论就是很好的范例。

理想实验只是一种逻辑推理的思维过程。它的作用只限于逻辑上的证明与反驳，而不能用来作为检验认识正确与否的标准。相反，由理想实验所得出的推论，都必须由观察和实验的结果来检验。

二、电磁场理论

麦克斯韦(1831~1879)是继法拉第之后，集电磁学大成的伟大科学家。他依据库仑、安培、毕奥、萨伐尔、法拉第等前人的系列发现和实验成果，利用数理综合、演绎推理等理论思维模式建立了第一个完整的电磁理论体系。他不仅科学地预言了电磁波的存在，而且揭示了光、电、磁现象本质的统一性，完成了物理学上的一大伟业。这一科学成果奠定了现代电力工业、电子工业和无线电工业的基础。那么，麦克斯韦的电磁理论大厦是在什么基础上建立起来的呢？

(一) 电磁感应现象的发现和发展

在 19 世纪以前，人们基本上把电和磁作为两个独立的互不相关的现象加以研究。但电和磁的现象之间究竟有什么联系，当

时有些人对此有所察觉并进行思考。到 19 世纪 20 年代，对电磁现象研究作出重大贡献的科学家有：丹麦哥本哈根大学物理学教授奥斯特、法国物理学家安培、毕奥、萨伐尔及英国物理和化学大师法拉第等。

1. 奥斯特发现电流磁效应

奥斯特从 1807 年开始研究电和磁的关系达 13 年之久。1820 年 7 月 21 日，他正在给学生作电学的演示实验，当他给导线通电时，偶然发现与导线平行放置的磁针偏转了。接着他把导线的两端交换位置后重新联到电池上，使电流的方向相反，结果磁针向相反方向偏转。后来，他又让导线和磁针处于不同的相对位置进行实验，发现当磁针与导线平行放置时磁针的偏转角度最大，而当磁针与导线垂直放置时它几乎不发生偏转。他通过多次实验证明了电流的磁效应。奥斯特的发现引起了人们很大的兴趣。实际上，奥斯特的发现也奠定了电动机基本原理的雏形。

2. 动电转化为磁力的定律

法国物理学家安培立即认识到奥斯特发现的重要性，他在 1820 ~ 1825 年间进行了一系列精心设计的电磁学实验。麦克斯韦称之为“科学中最光辉的成就之一”。安培摆脱了采用天然磁石或人造磁石的方法，直接对电流间作用力进行定量研究。安培发现不但磁针受电流周围力的作用，电流本身也互相发生作用，安培定律决定了两电流间的相互作用力。这一发现是“电动力学”基本定律的起点，“电动力学”这个名称是在他的著作中第一次出现的。他发现的安培定则，是表示电流和它所引起的磁场之间的关系的定则。安培定律的数学表达式为： $dF = BI dl \sin\theta$ (1825 年)

1820 年，法国物理学家毕奥与萨伐尔根据实验结果，同时表述了以他们名字命名的毕奥—萨伐尔定律： $dB = Idl \sin\theta / r^2$ 。该定

律主要描述了电流和由它所引起的磁场之间的相互关系。就电路中一元段 $d\mathbf{l}$ 来说，在其周围某点由它所产生的磁场强度为 $d\mathbf{B}$ ， I 为电流强度， r 为该元段到某点的距离， θ 为 $d\mathbf{l}$ 与 r 之间的夹角。整个电路的磁场等于各元段磁场的矢量和。

3. 动磁转化为电的发现——法拉第

奥斯特的发现引起了法拉第的深思，电既能产生磁，磁能否产生电呢？法拉第出生于伦敦一个铁匠家庭。由于家境贫寒，他小学没有毕业就去当报童、装订书徒工。由于他酷爱读书、勤奋好学，22岁时当了著名化学家戴维的实验助手。当时，法拉第受到古典哲学中辩证思想的影响，认为电和磁之间是辩证关系。他从1822年起开始寻找磁产生电的效应并为此进行了大量的实验。起初，法拉第想从一根放在“强磁铁”附近的导线中得到电流，但是不论他把导线放在什么位置上，都没有观察到与导线相连的电流计有任何反应。法拉第经过近10年的研究，终于在1831年获得重大成功。他把两根线圈分别绕在一个用软铁做的铁环的两侧，其中一个线圈与电流计相连，另一个线圈两端与电池相连。在实验中他发现，在接通电路的瞬间，电流计指针发生了剧烈的摆动；在切断电流时，电流计指针又出现摆动，不过其摆动方向恰好与前次相反。这个实验事实证明，一个线圈中感应电流不是由稳定电流感生的，而是由变化电流感生的。接着法拉第又进行了一系列的实验，充分验证了他的发现。他把一个绕在空心纸筒上的线圈两端与电流计相连，当他把磁铁迅速插入或拔出时，均可看到电流计指针的明显摆动。这些现象说明，运动着的磁场能够产生电，而稳定的磁场则不能。法拉第在一系列电磁感应实验的基础上出版了《电学实验研究》一书，并提出了著名的电磁感应定律：当穿过闭合线路的磁通量发生变化时，线路里感生电动势的大小与穿过闭合线路的磁通量变化率成正比。其数学表

达式为： $\varepsilon = -d\phi/dt$ (1831 年)。

法拉第发现的电磁感应定律是发电机的理论基础，它开创了人类利用电力的新时代。电磁感应是在彼此并不直接接触的空间发生的，那么，它们是凭着一种什么力量相互作用的呢？在法拉第之前，一种叫“超距作用”的观点占统治地位。这种观点认为：电荷或磁极周围的空间除了距离之外，一无所有。而法拉第却不赞同这种观点。他认为，电和磁的相互作用是通过具有物理实在性的“场”来传递的。他用电力线和磁力线表示电场和磁场的空间分布。并用此形象地描述电磁感应现象：当导线切割磁力线时，就引起感应电流；反之，电力线的运动就产生磁场。法拉第在科学实验的基础上，发挥其丰富的想象力，创造了力线的物理图象。法拉第提出的“电场”、“磁场”的概念不仅改变了那种“超距作用”的观点，也为后来电磁理论的建立打下了一个坚实的基础。

法拉第的“电磁实验研究”在科学界引起了不同的反响。不管如何，对电磁学实验进行系统的数理分析，对电磁学理论进行必要的数学描述，即把实验电磁学推向理论电磁学的发展阶段已成为 19 世纪 50 年代电磁学所面临的任务。

（二 麦克斯韦及其电磁理论

电磁场理论的发展，受益于力线形象的启发确实是很大的。法拉第提出场的概念是牛顿之后物理基本概念的重要发展，当时几乎所有物理学家都把它看成离经叛道的妄想。后来是英国青年物理学家麦克斯韦接受了这种大胆的思想，并利用当时数学家在理论力学方面的研究成果，把法拉第电磁场的直觉演绎成定量的精确的数学方程式。

麦克斯韦 1831 年出生于爱丁堡一个律师家庭。他的父亲颇

为关心当时的科学技术，这使麦克斯韦自幼受到一定的影响。麦克斯韦 10 岁入爱丁堡中学，14 岁就发表了与数学有关的科学论文。16 岁进入爱丁堡大学学习物理。三年后，19 岁的麦克斯韦考入剑桥大学三一学院主攻数学，为他尔后把数学分析和实验研究紧密结合创造了条件。

他以法拉第的力线概念为指导，透过这些似乎杂乱无章的实验记录，看出了它们之间实际上贯穿着一些简单的规律。于是，他发表了第一篇电磁学论文《论法拉第的力线》。在这篇论文中，法拉第的力线概念获得了精确的数学表述，并且由此导出了库仑定律和高斯定律。这篇文章还只是限于把法拉第的思想翻译成数学语言，还没有引导到新的结果。1862 年，麦克斯韦提出，电位移矢量是随时间变化的。他把电位移矢量随时间的变化率称为位移电流。在法拉第的电场和磁场理论的基础上，麦克斯韦认为，在位移电流的周围空间同样产生磁场，这种磁场与运行电流所产生的磁场完全一样。由于位移电流是与电位移与电通量的变化率联系着的，即位移电流所形成的电场是交变的电场。根据电磁感应原理，交互的电场必然产生交变的磁场，交变的磁场又必然产生交变的电场。这样，麦克斯韦就以他的“位移电流”为起点、以法拉第的“力线”和“场”为基础，建立起了以电场和磁场这两种相互联系、交相变化的场为基础的统一的电磁场论。这一年，麦克斯韦以上述理论为基础发表了第二篇电磁学论文：《论物理学的力线》。在这篇论文中，麦克斯韦明确地阐述了他所首创的位移电流与电磁场等电磁学的新概念，系统地论述了他的电磁场论。由于电磁场论的建立，电磁波、光的电磁说以及电磁场的数学模型，在这篇论文中差不多都具有了初步的雏型。在这篇论文中最初谈及光的电磁理论时，他认为，“光是引起电磁现象的那种介质中的横向波。”麦克斯韦实际上已初步预计到电

磁波的存在。不过，他当时尚未具体研究电磁场的波的过程，同时也未提出电磁波的速度问题。

1862 年以后，麦克斯韦在研究电场与磁场的变化过程时，认识到电磁场的相互变化过程实质上是一种波的传播过程。即交变的电场与交互的磁场在空间由近及远的传播过程，实质上是一种波的传播过程。到了 1865 年，麦克斯韦明确地预言了电磁波的存在，并认为电磁波是一种以“以太”为介质的波。同时他还根据他的电磁场论中的有关数学模型，推算出了电磁波的速度。这样，麦克斯韦就向人们明确地提出了电磁波存在的科学预言。1864 年，他的第三篇论文《电磁场的动力学理论》从几个基本实验事实出发，运用场论的观点，以演绎法建立了系统的电磁理论。1873 年出版的《电学和磁学论》一书是集电磁学大成的划时代巨著，全面总结了 19 世纪中叶以前对电磁现象的研究成果，建立了完整的电磁学理论体系。

这期间，麦克斯韦有的放矢地选择了当时电磁学的四个定律即库仑定律、高斯定律、安培定律和法拉第定律为靶子，开始了自己的研究工作并建立了一组微分方程。这组方程以微分形式描述电场性质、磁场性质，揭示变化的电场与磁场的关系，揭示变化的磁场与电场的关系。

按照麦克斯韦的理论，不仅传导电流能产生磁场，空间电场的变化也会产生磁场。同样，变化的磁场不仅能在导体中感生出电流，而且也能在空间产生电场。交变的电场和磁场互相激发就形成了连续不断的电磁波。

麦克斯韦还发现，电磁波的速度只随介质的电和磁的性质而变化，电磁波在“以太”（真空）中传播的速度与光在真空中传播的速度基本相当。光和电磁波在本质上是相同的，光是一定波长的电磁波，这就是麦克斯韦创立的光的电磁学说