



科学发现的故事(一)

郭一平 主编

# 目录

数学中的乐园 .....	1
集合论的酝酿和创立 .....	5
康托尔的遭遇 .....	9
伟大的历史丰碑 .....	13
自然科学中的一首流行曲 .....	27
迈耶的贡献 .....	31
“没有任何毁灭，未曾有任何损失” .....	36
《论力的守恒》 .....	41
热力学第一定律的发现 .....	46
争鸣引出金凤凰 .....	51
麦克斯韦的贡献 .....	55
1879 年柏林科学院悬奖 .....	62
仅有发明家还是不够的 .....	65
电磁波和光波同一性的证明 .....	70
智力大解放 .....	75
迈克耳孙实验和长度收缩假说 .....	84
思维方式的另一奇妙世界 .....	98
科学史上的奇迹 .....	134
孤独者的路 .....	147

## 数学中的乐园

集合论作为数学中最富创造性的伟大成果之一，是在 19 世纪末由德国的康托尔(G. Cantor, 1845~1918) 创立起来的。但是，它萌发、孕育的历史却源远流长，至少可追溯到两千多年前。

集合论是以集合概念为基础，研究集合的一般性质的数学分支学科。集合作为数学的一个基本而又简单的初始概念，通常是指按照某种特征或规律结合起来的事物的总体。例如，太阳系所有行星的总体，某图书馆所有藏书的整体， $n$  次代数方程根的总体，自然数的总体以及直线上所有点的总体等等。事物所组成的集合是无限多样的。按集合中事物的数目是否有限，可把集合分成两类：有限集合和无限集合。无限集合是集合论研究的主要对象，也是集合论建立的关键和难点。集合论的全部历史都是围绕它而展开的。

早在集合论创立之前两千多年，数学家和哲学家们就已经接触到了大量有关无限的问题。希腊古代的学者最先注意并考察了它们。

例如，公元前 5 世纪，爱利亚学派的芝诺(Zeno)，在研究运动和时间、空间的关系问题时，提出了一连串的悖论。其中著名的有四个，通常称为芝诺悖论。这四个悖论中的前三个，就与无限直接有关。它们是：

1. 两分法悖论：一个物体从 A 地出发，永远不能到达 B 地。因为若从 A 地到达 B 地，首先要通过 A 与 B 之间的道路的一半；但要通过这一半，必须通过这一半的

一半，即道路的  $1/4$ ；而要通过道路的  $1/4$ ，又必须通过这  $1/4$  的一半，即道路的  $1/8$ ；如此分下去，是永无止境的。芝诺的结论是，物体从 A 地不能到达 B 地，因为在有限时间内不能完成上述的无限过程。

2. 阿基里斯追龟悖论：神行太保阿基里斯追不上他前面的乌龟。因为当阿基里斯到达龟的出发点时，龟已经向前走了一段距离；阿基里斯再通过这一段距离时，龟又向前走了一段距离；这样下去两者永远相距一段距离，所以阿基里斯总也追不上他前面的乌龟。

3. 飞箭悖论：飞箭在任何瞬时总是处在一个确定的位置，因而在此刻处于静止状态。由于无限个静止的总和还是静止，所以飞箭是静止的。

芝诺悖论是针对当时人们对时间和空间的两种分歧观点提出来的。一种观点认为时间和空间具有连续性，因而无限可分；另一种观点认为时间和空间具有间断性，是由不可分的要素组成的。前两个悖论反驳的是第一种观点，第三个悖论反驳的是第二种观点。这三个悖论都涉及到了无限集合。在第一个悖论中，如果把 A 与 B 的距离看作 1，则涉及到无限集合  $\{1, 1/2, 1/4, 1/8, \dots\}$ ，在第二个悖论中，如果设阿基里斯的速度是龟的  $n$  倍，龟在前面  $a$  米，则涉及到无限集合  $\{a, a/n, a/n^2, a/n^3, \dots\}$ ；在第三个悖论中，如果设飞箭在第一个瞬刻处于  $a_1$  点，在第二个瞬刻处于  $a_2$  点，在第三个瞬刻处于  $a_3$  点……，则涉及到无限集合  $\{a_1, a_2, a_3, \dots\}$ 。芝诺在悖论中虽然没有明确使用无限集合的概念，但问题的实质却与无限集合有关。在数理哲学上，有两种无限方式历来为数学家和哲学家们所关注。一种是无限过程，另一种是无限整体。无限过程是指永远延伸、永远完成

不了的变程或进程，例如自然数列  $1, 2, 3, \dots, n, \dots$ 。这种进程式的无限称为潜无限。无限整体是指可以自我完成的无限过程，即把无限本身看作是一个整体，例如自然数全体组成的整体  $\{1, 2, 3, \dots, n, \dots\}$ 。这种以整体形式出现的无限称为实无限。亚里士多德 (Aristotle, 公元前 384 ~ 322)，最先提出要把潜无限和实无限区别开。他认为只存在潜无限，而不承认实无限。他举例说正整数是潜在无限的，因为任何正整数加上 1 之后总能得到一个比它大的新数。对他来说，无限集合这个概念是不存在的，因为无限多个事物或要素不能构成一个固定的整体。

亚里士多德虽在发现新的数学结果上并没有什么突出的贡献，但他对数学本性所发表的各种看法却对后人影响很大。他对无限集合的否定态度，如同下了一道禁令，束缚后来的数学家长达两千多年。以至在客观上延误了对无限集合的充分研究。例如，拜占庭的普罗克拉斯 (Proclus, 410 ~ 485) 是欧几里得《几何原本》的著名评述者。他在研究直径分圆问题时注意到，一根直径分圆成两部分，两根直径分圆成四部分， $n$  根直径分圆成  $2n$  部分。由于直径有无穷多根，所以相应地必有两倍那么多的圆部分。换句话说，由直径数目组成的无限集合  $\{1, 2, 3, 4, n, \dots\}$ ，与所分成的圆部分的数目组成的无限集合  $\{2, 4, 6, \dots, 2n, \dots\}$ ，在元素上存在着——对应的关系。这实质上已经涉及到了无限集合的一个基本特征：部分和它的整体可以建立起元素之间的一一对应关系。而这种关系的存在正是后来集合论赖以建立的基础。由于受亚里士多德潜无限观点的影响，普罗克拉斯不肯承认无限集合的存在，而是对这种对应关系采

取了回避的态度。他说：任何人只能说很大很大数目的直径和圆部分，不能说实实在在地无穷多的直径和圆部分。

事实是不依赖于人的意向为转移的客观现象，它们不会因人们认识上的落后而被长期掩盖。到了中世纪，随着无限集合的不断出现，部分能够同整体构成一一对应这个事实也就越来越明显地暴露出来。例如，数学家们注意到，把两个同心圆上的点用公共半径联起来，就构成两个圆上的点之间的一一对应关系。因为对于大圆上的任意一点  $A$ ，通过公共半径，总可找到小圆上的一点  $A'$  与它对应；反之，对于小圆上的任何一点  $B'$ ，通过公共半径，总可找到大圆上的一点  $B$  与它对应。伽利略(G. Galileo, 1564 ~ 1642)曾注意到类似的事实。他在1638年的《关于力学和局部运动两种新科学的对话和数学证据》一书中指出，两个不等长的线段上的点，可构成一一对应关系；他又注意到，正整数集合 $\{1, 2, 3, \dots, n, \dots\}$ 可以和正整数的平方集合 $\{1, 2^2, 3^2, \dots, n^2, \dots\}$ 构成一一对应关系。伽利略同样由于受传统有限集合观念和亚里士多德潜无限思想的束缚而没能正视这些事实，最后以“不合常识”为由否定了自己的发现。在科学中常常发生这样的现象，一个新的事实虽然反复地出现在人们的面前，却长期找不到它的发现者。无限集合就是这样的一个科学事实。甚至到了19世纪上半叶，绝大多数数学家还不肯承认无限集合及其特殊属性的存在。他们自由地使用着无穷小、无穷大和无穷级数，运用着自然数集、有理数集、无理数集以及实数集，毫无顾忌地说到直线上或平面上的任意点，但却回避对无限集合进行任何认真的讨论。就连负有“数学之王”盛名

的高斯(K . F . Gauss , 1777 ~ 1855)也不同意把无限集合作为数学的对象来加以研究。他在 1831 年 7 月 12 日给朋友舒马赫(Schumacher)的信中说道：“我反对把一个无穷量当作实体，这在数学中是从来不允许的。无穷只是一种说话的方式，当人们确切地说到极限时，是指某些比值可以任意近地趋近它，而另一些则允许没有界限地增加”。对分析学的奠基工作有过突出贡献的柯西(A . L . Cauchy , 1789 ~ 1857), 虽曾给出有名的极限定义(即  $\epsilon - \delta$  定义), 并对无穷级数有过深入的研究，但对无限集合，他却如同他的前人一样，不肯承认它们的存在。他认为，部分可以同整体构成一一对应关系，不过是一种逻辑矛盾。

科学家们接触到了无限，却又无力去把握和认识它，这实在是向人类智慧的尖锐挑战。对此，著名数学家希尔伯特(D . Hilbert , 1862 ~ 1943)曾深有感触地说道：没有任何问题能像无限那样，从来就深深地触动着人们的感情；没有任何观念能像无限那样，曾如此卓有成效地激励着人们的智慧；也没有任何概念能像无限那样，是如此迫切地需要予以澄清。为维护人类智慧的尊严，面对“无限”的长期挑战，数学家们是不会漠然置之的。他们为解决无限问题而进行的努力，首先是从集合论的先驱者开始的。

## 集合论的酝酿和创立

纵观科学的历史，大凡一门科学理论在其创立之前，总是要有人充当它的先驱者。这些先驱者们的见解虽然

往往并不完美，甚至含有漏洞和缺陷，但他们的工作对于新理论的建立却是十分必要的。对于无限集合，最先洞察到它的重大意义，并沿着建立明确理论方向采取积极步骤的人，是捷克数学家波尔察诺(B. Bolzano, 1781 ~ 1848)。

波尔察诺是最先明确承认并坚决维护无限集合概念的。他强调部分和整体能够建立起元素之间的一一对应关系，是无限集合的一个本质特征。他把这种对应关系称为等价关系。为说明这种等价关系的真实存在，他举出了大量事例。例如，在实数集 $[0, 5]$ 和实数集 $[0, 12]$ 之间可以

建立一一对应关系，只须建立函数关系 $y = \frac{12}{5}x$ ，其中 $x$ 为 $[0, 5]$ 的任意

元素， $y$ 为 $[0, 12]$ 的相应的元素。波尔察诺作为布拉格大学宗教哲学教授，对于无限集合的研究，其哲学意义比数学意义体现得还多。他提出和强调了有关无限集合的某些重要概念和思想，但也存在许多模糊的认识。例如他提出超限数概念，然而对这一概念的理解却是不正确的，甚至错误地认为，对于超限数无需建立运算，因而不必去研究它。波尔察诺的无限集合思想，在他生前没有得到学术界的重视。他的重要著作《无穷的悖论》在死后两年（1850年）才发表出来。

在波尔察诺那里萌发起来的集合论思想，是在康托尔手中孕育成一门数学理论的。康托尔曾就学于苏黎世大学、格丁根大学、法兰克福大学和柏林大学，深受柏林大学数学教授魏尔斯特拉斯(K. Weierstass, 1815 ~ 1897)的影响。后来他成为哈勒大学教授，一直到去世为止都在那里工作。康托尔在历史上以创立集合论而一举

成名。他解决了历代数学家所未能解决的无限集合问题中的难点，并且颠倒了许多前人的想法。他的集合论思想分散在许多文章中，这些文章主要是在 1872 年到 1897 年间相继发表的。他的 1872 年关于三角级数的论文，可作为集合论诞生前的准备工作。在这篇论文中，他首次定义和使用集合论的某些重要概念，如集合的极限点、导集、第一型集等。1874 年，他在《克列尔杂志》上以标题《论所有实代数数集合的一个性质》，较全面地阐发了他的无限集合思想。这篇革命性论文的发表，可作为集合论诞生的重要标志。

康托尔称集合 (set) 为一些确定的、不同的东西的总体，对于这个总体，人们能判断任何一个给定的东西是否属于它。他尖锐地批评了那些只承认潜无限的人，驳斥了以往数学家和哲学家反对实无限的错误论点。在他看来，如果一个集合能够和它的一部分构成一一对应，它就是无限集合。他区别了两种性质不同的集合：可列集和具有连续统的势的集。可列集是指那些能和正整数集构成一一对应的集合，如有理数集和代数数集；具有连续统的势的集则是指与实数区间  $[0, 1]$  等价的集，如无理数集和实数集。早在 1873 年他就有了这种区别。1873 年 11 月，他在给数学家戴德金 (J. Dedekind, 1831 ~ 1916) 的信中说道，他已经知道有理数是可列的 (enumerable)，但对于实数集合是否可列，他还不能给出定论。几个星期后他成功地解决了这个问题。1873 年 12 月 7 日，他写信告诉戴德金，他已证得实数集是不可列的。戴德金回信祝贺康托尔取得成功。康托尔的这项工作对于集合论的创立有着决定性的意义，因为集合论的许多原理都与可列集或具有连续统的势的集有关。

康托尔在取得最初的成功之后，就去尝试解决一些新的、更大胆的问题：一条直线上的点和整个  $R^n$  ( $n$  维空间) 中的点的对应关系。他在 1874 年 1 月 5 日写给戴德金的信中指出：一块曲面（比如说，一个包括边界在内的正方形）是否能够和一段直线（比如说，包括两个端点在内的一个直线段）一一对应起来，使得对于曲面上每一点都有直线上一个对应点？反之，对于直线上每一点，都有曲面上一个对应点？我想，回答这个问题并不是件容易事，尽管答案似乎显然是否定的，以至于证明看来几乎不必要。

康托尔原以为问题的答案是否定的，即直线上的点不可能和整个  $R^n$  中的点构成一一对应关系。可是，经过三年的尝试，他得到的答案却是肯定的。1877 年 6 月 20 日，他写信告诉戴德金，他已证得这样的对应关系是存在的。他说：“我看到了它，但我简直不能相信它。”

在创立集合论的过程中，康托尔还引进了基数、序数、超限基数、超限序数等概念，并且规定了它们的运算。基数（也称势）是集合论的基本概念之一。它是对集合的元素在数量上的一种刻划。两个一一对应的集合具有相同的基数。对于有限集合，基数就是这集合中元素的个数；对于无限集合，康托尔引进了一个全新的提法。他用符号  $\aleph_0$ （读作阿列夫零）表示自然数集的基数，用符号  $C$  表示实数集的基数。由于可列集与自然数集有一一对应的关系，所以它们的基数均为  $\aleph_0$ ；同样，与实数集有一一对应关系的不可列集的基数均为  $C$ ，字母  $C$  是连续统（Continuum）的第一个字母。 $\aleph_0$  和  $C$  有着特殊的运算性质： $\aleph_0 + \aleph_0 = \aleph_0$ ， $\aleph_0 \times \aleph_0 = \aleph_0$ ； $\aleph_0^{\aleph_0} = C$ ； $C^{\aleph_0} = C$ ； $C^C = C$ ； $\aleph_0^C = C$ ， $n$  为自然数；并且  $C$  和  $\aleph_0$  有关系  $C > \aleph_0$ 。基

数、序数等概念描述了无限在层次上的质的区别，因而它们的建立是人类对无限集合认识上的一次重大飞跃。这正如数学家古茨莫在 1915 年庆祝康托尔七十寿辰时所说的，康托尔用这些数给数学开辟了一块“新地盘”。这块新地盘，就是以无限集合为主要研究对象的集合论。

## 康托尔的遭遇

在今天，如果我们打开一本现代的数学论著，总可以读到与“集合”相关的一些内容，甚至在小学的算术和中学的数学中都已渗透了集合的思想。可是，在一百年前集合论却迟迟登不上数学的舞台，它的创立者也因之长期陷入窘境。为全面认识集合论创立的历史，我们不能不追溯一下康托尔在创立集合论过程中所经受的不寻常的遭遇。

美国现代数学史家 M. 克莱因 (M. Kline) 在评述集合论创立时期的状况时写道：康托尔的集合论是在这样一个领域中的一个大胆的步伐。这个领域，我们已经提过，从希腊时代起就曾断断续续地被考虑过。集合论需要严格地运用纯理性的论证，需要肯定势愈来愈高的无限集合的存在，这都不是人的直观所能掌握的。这些思想远比前人曾经引进过的想法更革命化，要它不遭到反对那倒是一个奇迹。反对的意见确实是耸人听闻的。康托尔的 1874 年的论文一问世，便遭到当时保守传统的数学家们的激烈反对。其中反对得最激烈的是他的老师、柏林大学数学教授克隆尼克 (L. Kronecker, 1823 ~ 1891)。克隆尼克在数学史上以直觉主义派的代表人物而著称。他

认为数学的对象必须是可构造出来的，而不可用有限步骤构造出来的都是可疑的，不应作为数学的对象。他反对无理数和连续函数的理论，认为它们是不可构造的，因而不存在的。同样，他指责康托尔的集合论和超限数理论不是数学而是神秘主义。他曾连篇累牍地攻击著名数学家魏尔斯特拉斯的无理数理论，以至弄得后者几乎老泪纵横。这一次，他对康托尔的粗暴攻击竟长达十几年之久。康托尔于 1870 年二十五岁时就被任命为哈勒大学副教授，1879 年提升为该校的教授。在当时，哈勒大学在德国只算得上二、三流的大学。康托尔希望得到柏林大学教授的职位，而且自信有能力胜任，但由于一直遭到克隆尼克的百般阻挠，终生未能实现自己的心愿。在克隆尼克的连续攻击下，容易激动和神经过敏的康托尔经受不住刺激而身体垮了。从 1884 年起，他就不时地患着严重的抑郁症，常常住到疗养院里。1918 年 1 月 6 日，他在哈勒大学附属精神病院去世。

在当时，对集合论持有否定态度的有影响的数学家并不在少数，就连 F. 克莱因 (F. Klein, 1849 ~ 1925)、彭加勒 (J. Poincare, 1854 ~ 1912) 和魏尔 (H. Weyl, 1885 ~ 1955) 这样富有创见的大数学家也没能给康托尔的工作以任何支持。彭加勒把集合论比喻为“病态数学”，并且预测说：“后一代将把集合论当作一种疾病，而人们已经从中恢复过来了。”魏尔则称康托尔关于基数  $x$  的等级是“雾上之雾”。

对于反对者的意见，康托尔是有所预料的。他虽然在精神上因经受不住攻击而常常受到折磨，甚至在疾病强烈发作时感到自己所干的工作是无聊的，但他在强烈发作过去后，头脑总是十分清醒的。他曾自述道：“我的

集合论研究的描述已经达到了这样的地步，它的继续已经依赖于把实的正整数扩展到现在的范围之外。这个扩展所采取的方向，就我所知，至今还没有人注意过。”我对于数的概念的这一扩展依赖到这样的程度，没有它我简直不能自如地朝着集合论前进的方向迈进那怕是一小步。我希望在这样的情形下，把一些看起来是奇怪的思想引进我的论证中是可以理解的，或者，如果有必要的话，是可以谅解的。实际上，其目的在于扩展或推广实的整数序列到无穷大以外。虽然这可能显得是大胆的，我却不仅希望而且相信，到了适当时机，这个扩展将被承认是十分简单、适宜而又自然的一步。但我仍是十分清楚，在采取这样一步后，我把自己放到了关于无穷大的流行的观点以及关于数的性质的公认的意见的对立面去了”。康托尔的信念是坚定的，他始终相信，实无限“既具体地又抽象地”存在着。对此，他写道：“这种观点，我认为是唯一正确的，只有少数人才有。只要有可能，我在历史上就是第一个人十分明确地站在这个立场上，并接受其全部逻辑结论，我确切地知道我不会后继无人！”康托尔为无穷集合论的生存和发展奋斗了终生，就是在其患病期间，每当病情缓解时，他仍然坚持以书信的方式与 G.皮亚诺(G. Peano, 1858 ~ 1932)等人讨论集合论的有关问题。人们常常看见他出入学术讨论会并热情洋溢地讲述自己的观点。他有句名言：“数学的本质在于它的自由性”。在无限集合面前，在传统数学观念统治着绝大多数数学家的时代，他就是采取了非常自由的思想方式。当死抱旧思想的人对他的工作加以责难时，他说出了上面那句名言。

在集合论的创立过程中，《克利尔杂志》编辑的潜科

学眼光是值得赞颂的。他们坚持科学无禁区、科学无偶像的原则，对康托尔的工作给予了最大的支持，不仅最先发表了康托尔第一篇关于无穷集合论的首创性文章，从而成为无穷集合论的接生婆和哺育者，而且不顾克隆尼克等人的阻挠，始终为康托尔传播和发展这一数学创新思想提供了发表论文的机会。

随着集合论在数学领域的广泛应用，它的生命力日渐显示出来，支持和承认它的数学家也就越来越多。1897年，在苏黎世举行的第一次国际数学家会议上，德国数学家赫尔维茨(A. Hurwitz, 1859 ~ 1919)和法国数学家阿达玛(J. Hadamard, 1865 ~ 1963)指出，康托尔的超限数理论在分析学中有着重要的应用。格丁根学派的创始人希尔伯特作为集合论的坚决支持者，热心地传播了康托尔的思想。他把康托尔开拓的无限集合理论比作为数学的一个乐园，并且向他同时代的人宣告：“没有人能把我们从康托尔为我们创造的乐园中开除出去。”他赞誉康托尔的超限算术理论为“数学思想的最惊人的产物，在纯粹理性的范畴中人类活动的最美的表现之一”。为传播康托尔的无限集合思想，他还以有名的“无限多房间的旅馆”，用通俗的语言形象地阐明了无限集合与有限集合的质的区别。英国数学家、逻辑学家、哲学家罗素(B. Russell, 1872 ~ 1970)评价康托尔的工作“可能是这个时代所能夸耀的最巨大的工作”。就违反对最激烈的克隆尼克在其晚年也不得不改变了对康托尔的态度，甚至表示要与他言归和好。1901年，伦敦数学会聘请康托尔为荣誉会员。克里斯蒂安那大学(今奥斯陆大学)、圣安德鲁斯大学分别于1902年和1911年授予康托尔荣誉博士学位。

## 伟大的历史丰碑

牛顿(IsaacNewton,1643~1727)是近代科学史上最负盛名的科学家。在他生活的那个时代,就曾有过这样的赞语:“自然界和自然界的定律隐藏在黑暗中:

上帝说:‘让牛顿干吧!’

于是,一切成为光明”

这当然只是夸张的溢美之词,但牛顿在那时能获得“上帝使者”的盛誉,足见其在人们心目中的地位何等崇高。

牛顿的不朽科学功绩是他同时为近代科学的两大支柱——力学和高等数学奠定了基础,开创了科学发展的新时代。恩格斯曾经指出:“牛顿由于发明了万有引力定律而创立了学科的天文学,由于进行了光的分解而创立了科学的光学,由于创立了二项式定律和无限理论而创立了科学的数学,由于认识了力的本性而创立了科学的力学。”

牛顿生活在资本主义生产迅速发展,技术发明和科学探索空前活跃的时代。由哥白尼开始的近代科学革命,已进入需要综合且有条件进行综合的时期。牛顿以其无与伦比的创造才能和独特的科学方法,完成了近代科学史上第一次理论大综合,在人类认识史上竖起了一座不朽的历史丰碑。正如爱因斯坦对牛顿所赞许的:“在他以前和以后,都还没有人能像他那样地决定着西方的思想、研究和实践的方向。他不仅作为某些关键性方法的发明者来说是杰出的,而且他在善于运用他那时的经验材料

上也是独特的，同时他还对于数学和物理学的详细证明方法有惊人的创造才能”。

1643年1月4日，在伽利略(G. Galileo, 1564 ~ 1642)去世将近一年之后，牛顿诞生在英格兰林肯郡一个小村庄沃尔斯索普的农户家里。他是个遗腹子，幼年时身体纤弱，学业平常，除对机械设计有兴趣外，并无特殊才华。1656年牛顿曾一度停学，回家帮助母亲料理农庄，后来在舅父支持下得以继续学习并于1661年6月进入剑桥大学的三一学院。在大学时代牛顿基本上依靠自修全面攻读了那个时代的数学和光学著作，受到巴罗(I. Barrow)教授的赏识和指点。牛顿的科学创造活动是从1665年开始的。那年仲夏伦敦瘟疫流行，学校因此关闭，牛顿回到安静的家乡度过了十八个月。他潜心于研究，进行多方面探索，发现了二项式定理；着手发明流数术(微积分)；进行关于光和颜色的一系列实验并开始把重力问题与天体运行结合起来加以研究，产生了万有引力定律的最初构想。可以说牛顿后来在数学、力学和光学方面的大多数科学成果，差不多都发端于这一时期的创造与探求。牛顿自己在1714年所写的一份备忘录里，曾回顾了他早年的这些成就，他说：“所有这些发现都是在1665年和1666年的鼠疫年代里作出来的。因为在那些年代里我年青力壮，对发明兴趣也很浓厚，比在以后任何时期，我都更致力于数学和哲学研究。”一个二十几岁的青年在不到两年时间里作出了那么多划时代的重大发现，这在科学史上是罕见的。

1667年牛顿回到剑桥大学，当选为三一学院研究员，并获得文学硕士学位。1669年由巴罗举荐接替他担任卢卡斯(Lucas)数学讲座教授。不过牛顿授课并不成

功，听课者寥寥无几。而他的那些独创性见解，除受到巴罗和哈雷(E. Halley, 1656 ~ 1742)等少数人欣赏和支持外，也很少有其他同事注意。特别是 1672 年和 1675 年，牛顿先后发表的两篇光学论文曾遭到“暴风雨般的批评”，这对他后来性格的发展有很大影响。德摩根(DeMorgan)说：“一种病态的害怕别人反对的心理统治了他的一生”。这或许过于夸张，但出师未捷，横遭打击的痛苦毕竟在牛顿心理上投下阴影，他甚至一度决定在生前不再发表其他著作。幸亏后来他并没有这样做，否则可能在历史上出现的将会是另一个样子的并不那样伟大的牛顿！

从 1679 年开始，牛顿着重研究引力问题，并在 1685 年取得完满结果。在哈雷一再请求下，牛顿又用了近一年半时间系统整理了自己的科学成果，写出了《自然哲学的数学原理》。这部巨著由哈雷协助编辑，并慷慨出资，于 1687 年用拉丁文出版。

《自然哲学的数学原理》是牛顿的代表作，被公认为科学史上最伟大的著作。在对当代和后代思想的影响上，无疑没有什么别的杰作可以同《原理》相媲美。二百多年来，它一直是全部天文学和宇宙学思想的基础。在第一版的序言中，牛顿说：“我把这部著作叫作哲学的数学原理，因为哲学的全部任务看来就在于从各种运动现象来研究各种自然之力，而后再用这些力去论证其他的现象。……我希望能用同样的推理方法从力学原理中推导出自然界的其他许多现象……这些现象都是和某些力相联系着的，……正由于我们还不知道这些力是什么，所以直到现在哲学家对自然界的探讨都以失败而告终。但是，我希望本书所奠定的原理将对这种或某些更正确

的哲学方法提供一些线索。”

《原理》一书以一系列的定義开篇，这些定义是：质量（物体的体积与其密度的乘积，用其重量来量度）；动量或运动数量（质量与速度的乘积）；和力（用它所产生的动量的变化来量度）。牛顿是第一个精确地使用这些概念的人。接着在注释中，他提出了绝对时空观念和关于相对运动和绝对运动的区分。在明确这些概念后，牛顿论述了现在以他的名字命名的三条著名的运动定律。所有这些构成了牛顿力学的基础，也是整个近代物理学的重要支柱。

《原理》共分三篇。第一篇开始先说明了流数原理，用以确定无限小量的比（这一方法是贯穿全书的最重要的数学工具），然后系统讨论了在中心力作用下质点和物体的无阻力运动。第二篇论述了阻尼介质中的运动和有关流体力学问题。第三篇应用上述结果阐明太阳系诸天体的运动，主要讨论了月球运动、潮汐、岁差及彗星运动。全书的核心是牛顿运动三定律和万有引力定律。《原理》一书以大量实验和观测为依据，进行了严格的逻辑论证和数学分析，把过去一向认为是截然无关的地球上的物体运动规律和天体运动规律概括在一个完整的力学体系之中，这是物理科学，也可以说是人类认识自然的历史中第一次理论的大综合。

《原理》出版后不久，牛顿患了神经衰弱症。虽然他仍继续作些研究工作并出版过另外一些著作。如《光学》（1704年）和《普通算术》（1707年），但总的来说并无新的建树。特别是晚年，他愈来愈转向神学研究和社 会活动。1699年他受任造币厂长，1703年当选英国皇家学会会长并一直担任到1727年去世。

牛顿所以能够作出划时代的伟大贡献，是与他在科学方法上的独创分不开的。他不仅系统地运用数学方法探求物理规律，而且把探求物理问题和进行新的数学创造结合起来，从而为整个近代数理科学的研究方法奠定了重要基础。在《自然哲学的数学原理》一书中，物理的论述与数学的推演有机结合，相得益彰，其体系之严谨、内容之深刻、论理之精辟、形式之完美，在科学著作中是少有的。J. D. 贝尔纳说：“就数学而论，只可以拿欧几里得的‘几何原本’(Elements)来和它相比；就它洞察物理的卓识和对思想上的影响而论，就只有达尔文的‘物种起源’(Origin of Species)比得上它”。这部巨著能够产生久远的社会影响，不仅因为其理论之博大精深，出类拔萃，而且由于其方法之新颖、绝妙更使人耳目一新。

牛顿的数理研究方法的主要特征是坚持寻求自然规律的数学表述与物理解释的统一。他认为：“自然哲学的目的在于发现自然界的结构和作用，并且尽可能把它们归结为一些普遍的法则和一般的定律——用观察和实验来建立这些法则，从而导出事物的原因和结果。”因此牛顿科学方法的程序是，从观察和实验出发，运用（或创造）数学工具以寻求自然现象的普遍规律与法则，然后再用这些规律与法则更广泛地建立各种事物的物理解释。在牛顿看来，数学是认识工具。他指出：“几何学是建立在力学的实践之上的，它无非是普通力学的一部分，能够精确地提出并论证测量的方法。”“在数学内我们研究力之量，以及在其种假定的状况下之力之关系。倘进入物理学的范围，则需将此项关系与现象相比较，以知某种能吸引的力有某种状况，于是可论及力之种类以及

其物理的原因与关系。”这些方法论思想是对伽利略数学——实验方法的继承与发展。

在近代科学史上，伽利略最早把系统的观察、实验和数学的分析概括结合起来，提出寻求物理原理所必具之量的公理的思想。M. 克莱因认为，这是“历来关于方法论的最深刻最有效的思想”。牛顿以其独特的创造发展了这个思想。他的创造是从两个方面进行的：一方面运用已有的数学工具探求物理问题；而另一方面为探求物理问题创造新的数学工具。这两方面的创造相辅相成，互相促进，有机结合，构成了牛顿数理研究方法的特色，并极大地影响了 18、19 世纪整个数学和物理学的发展。也正因此，人们称牛顿是数学和物理学的双重天才。

牛顿的数理研究方法在其创造活动的早期即已见端倪。在 1665 ~ 1666 年间，他一方面“发现计算逼近级数的方法，以及把任意幂次的二项式归结为这样一个级数的规则。……发现了微分算法……开始研究积分算法。”而另一方面“还开始想到重力是伸向月球的轨道的，同时在发现了如何来估计一个在天球内运动着的天体对天球表面的压力以后……从开普勒关于行星的周期是和行星轨道的中心的距离的  $3/2$  次方成比例的定律，推出了使行星保持在它们的轨道上的力必定要和它们与它们绕之而运行的中心之间的距离的平方成反比例；而后把使月球保持在它轨道上所需要的力和地球表面上的重力作了比较，并发现它们近似相等”。两个方面的研究同时进行，正反映它们之间不可分割的联系。力学运动规律的探求和重力与天体运动问题的研究始终是牛顿发明微积分、创造新的数学工具的主要动力；而微积分计算方法不断完善和成功运用，又正是牛顿创立运动三定律

和万有引力定律的关键。经过二十年努力，牛顿终于在1685年运用微积分方法证明：一个密度随着到球心的距离而变化的实心球，在吸引一个外部质点时，实际上就好像球的质量集中在它的中心一样。他还成功地把这个结果推广到密度是对称的所有球体，从而扫除了确立万有引力定律的最大障碍，大大简化了天体运动问题的计算。这样牛顿就不仅可以证明在平方反比定律的力作用下的天体，其运行轨道是以吸引体为一个焦点的椭圆，为开普勒行星运动定律提供了精确的数理解释，而且还进一步证明，反过来说，围绕处于一个焦点的力在椭圆轨道上运行的天体，它受到的作用力必定符合力的平方反比定律。据说牛顿“在没有用数学证明这个定理以前，从来没有料到有这样美妙的结果，但一经证明这个精妙的定理以后，宇宙的全部机制便立刻展开在他眼前把数学分析绝对准确地应用于实际的天文问题，现在已经完全在他能力之内了”。这一历史发展过程说明，牛顿力学所实现的伟大综合，不仅是天体运动规律与地球上物体运动规律的综合，而且也是物理学与数学的综合。

牛顿的科学创造还很好地体现了分析与综合、归纳与演绎的统一。这是牛顿不同于前辈和大多数同时代科学家的显著特点。

近代以来，开普勒继承哥白尼的日心说，在第谷·布拉赫（Tycho Brahe）大量精确观测记录基础上，概括出行星运动的三条定律。伽利略运用数学——实验方法，发现了惯性定律和地球引力场中的自由落体定律。但所有这些定律都是彼此独立的，并无内在的逻辑联系。而且它们都是对运动表象的整体描述，仅只反映出自然界物理因果关系中的结果。至于产生这些结果的动因是什

么，即为什么物理世界中的这些运动必然遵循上述定律的道理并不清楚。

牛顿的贡献在于他找到了物理定律的微分形式，从而为整个物理的分析研究开辟了一条新的道路。爱因斯坦认为：“微分定律的明晰概念是牛顿最伟大的理智成就之一”，因为“只有微分定律的形式才能完全满足近代物理学家对因果性的要求。”也许有人以为从开普勒行星运动三大定律和伽利略的惯性定律、自由落体定律，到牛顿力学体系，好像只是走了很小的一步，似乎牛顿的贡献主要是对开普勒、伽利略以来的科学成果加以综合，作出新的概括。可实际上，牛顿的工作是一个质的飞跃，是对现实物理世界进行物理分析与综合的一个根本性变革。从数学角度来看，无论是行星运动三定律或者是惯性定律和自由落体定律，都是一些积分定律，这些定律都是关于整个运动的，并不能满足物理因果性解释的要求。牛顿所作的工作，则是解决一个全新的问题：在外力作用下，质点的运动状态在一个无限短的时间内应该如何变化，以及这个变化又如何最终表现为物理运动的规律？他运用微积分方法，先找出了无限短时间内物理运动的微分形式，然后进行积分，从而合乎逻辑地得到适合于任何运动的物理定律，为自然界确立了完整的物理因果性链条。“牛顿的概念体系在逻辑上的完备性就在于：一个体系中各个物体的加速度的唯一原因，就是这些物体本身。”（A·爱因斯坦）

对于牛顿这种分析与综合相统一的研究方法，他的学生科茨(R·Cotes1682~1716)早就作过概括。他称赞牛顿“是掌握了实验哲学的人。这些人固然从尽可能简单的原理中导出了所有事物的原因，但是他们从不把没

有为现象所证明的东西作为原理。他们不作任何假设，除非把假说作为其真理性尚待讨论的一些问题，否则就不把它们引进哲学中去。因此，他们是用双重方法，也就是用综合法和分析法来进行工作的。从一些特选的现象，经过分析，他们导出了自然界的各种力，以及这些力所遵循的比较简单规律，再从这里经过综合而说明其他事物的构造。这是研究哲学时无与伦比的最好方法”。体现于牛顿科学创造活动之中的分析与综合的统一，是牛顿科学方法的精华，也是近代传统的“分析—综合”科研方法的先驱。

牛顿的科学创造也体现着归纳与演绎的统一。牛顿曾明确地提出如下四条“哲学中的推理法则”。

“法则 1 除那些真实而已足够说明其现象者外，不必去寻求自然界事物的其他原因。”

“法则 2 所以对于自然界中同一类结果，必须尽可能归之于同一种原因。”

“法则 3 物体的属性，凡既不能增强也不能减弱者，又为我们实验所能及的范围内的一切物体所具有的，就应视为所有物体的普遍属性。”

“法则 4 在实验哲学中，我们必须把那些从各种现象中运用一般归纳而导出的命题看作是完全正确的，或者是非常接近于正确的；虽然可以想象出任何与之相反的假说，但是没有出现其他现象足以使之更为正确或者出现例外以前，仍然应当给与如此的对待。”

G. 霍耳顿认为，这四条法则“反映了深信宇宙万物一致性的法则，旨在指导科学家如何提出假说。时至今日……仍然是有效的。第一条法则曾名为精简原理。第二和第三条法则叫做统一原理。第四条法则是一种信念，

没有它我们就不能使用逻辑推理方法。”

S. 梅森还特别将牛顿与胡克(R. Hooke)比较：“胡克……受培根科学哲学的经验主义和功利主义影响……，牛顿……采用的是一种比较演绎的方法论，有点像伽利略和笛卡儿采用的方法。胡克努力通过测算物体在地面以上和以下不同高度的重量，从实验上找出两物体之间引力和距离的变化，而牛顿大概是从向心力定律和开普勒的行星运动第三定律演绎出引力的平方反比定律的。……牛顿采纳的观点是，物理——数学演绎的起点应当是从实验所观察到的效果或者规律，而演绎则应当导致其他可观察效果的解释或者预测。”

考察牛顿的科学活动，我们可以看到他既重视观察实验和归纳概括，又重视理性创造和演绎推理。在《自然哲学的数学原理》一书中，大量的观测数据、实验记录和前人以及同时代科学家的成果，经过精心的科学归纳，概括为一系列定义、定律和定理，构成了全书演绎推理的基础，然后经过严密的数学推导和逻辑推演又得出了关于天体和地球上物体运动规律的新成果。《原理》本身就是归纳与演绎相统一的完整体系，其演绎的特征与其归纳特征同样明显。

体现在牛顿科学方法中的归纳与演绎的统一，是与他所运用的分析方法与综合方法的统一协调一致的。牛顿认为：“在自然科学里，应该像在数学里一样，在研究困难的事物时，总是应当先用分析的方法，然后才用综合的方法。这种分析方法包括做实验和观察，用归纳法去从中作出普遍结论，并且不使这些结论遭到异议，除非这些异议来自实验或者其他可靠的真理方面。……随着归纳的愈为普遍，这种论证看来也愈为有力。……用

这样的分析方法，我们就可以从复合物论证到它们的成分，从运动到产生运动的力，一般地说，从结果到原因，从特殊原因到普遍原因，一直论证到最普遍的原因为止。……而综合的方法则假定原因已经找到，并且已把它们立为原理，再用这些原理去解释由它们发生的现象，并证明这些解释的正确性”。

牛顿的科学方法，是人类对物理世界的认识由唯象性阶段进入论理性时期的重要标志，也是认识论发展史上的重大转折。其影响重大而深远，至今仍被看作是“新科学的经典，……举证的种种方法可以作为以后推广的泉源而受到尊敬”。

牛顿对待假说的态度，是招致批评最多的一个问题。由于牛顿一方面多次明确表示，反对在实验哲学中使用假说，而另一方面在讨论有关问题时，他又提出过一些假说，这就造成一个明显的矛盾。更为突出的问题还在于牛顿理论体系中实际包含着许多假说，但牛顿本人却始终不这样认为。因而在牛顿时代就产生了围绕假说涵义与特征的不同观点之争。

毋庸讳言，牛顿在运用假说概念时有些混乱，这也正是至今仍发生对牛顿方法论思想有不同评价的一个重要原因。但认真分析牛顿关于假说的各种表述的内涵及其应用范围，那么他的基本态度不仅可以辨明，而且也是比较清楚的。其中主要应该区别下面三种情况。

首先，牛顿谈论最多并持激烈反对态度的是有特定涵义的假说。牛顿说：“我这里所用的‘假说’一词，仅仅是指这样一种命题，它既不是一个现象，也不是从任何现象中推论出来，而是一个——没有任何实验证明的——臆断或猜测。”这种假说的特征是非常鲜明的，而其

所指的范围也很明确。它就是专指那些既非来自科学归纳，又非出于逻辑演绎的、毫无事实基础的主观捏造。所以牛顿表示：“这样一种假说，无论是形而上学的或者是物理学的，无论是属于隐蔽性质的或者是力学性质的，在实验哲学中都没有它们的地位。”毫无疑问，牛顿所坚决反对的这种特指的假说，与体现着科学性与假定性辩证统一的那种科学假说是根本风马牛不相及的。遗憾的是有些人无视这两种不同“假说”概念的根本区别，断章取义地指责牛顿反对科学假说方法。这种类似于唐·吉珂德式的战斗，当然是不可取的。

另一种情况，就是科茨曾经指出过的“把假说作为真理性尚待讨论的一些问题”。牛顿在讨论有些问题（如涉及光和颜色理论）时，曾有保留地借用过假说一词。他说这是“由于我看到过一些了不起的能手都热衷于寻找假说，好像我的论述缺乏一种假说能说明上述现象似的，而且我还发现当我抽象地谈到光和本性的时候，有些人并不懂得我的意思，但当我谈到应当用某种假说去说明它们时，人们却很快地理解了它”，因此牛顿说：“虽然我将既不采用这个也不采用任何其他一个假说，而且认为没有必要去关心我所发现的光的一些性质是否可用这个假说，或者用胡克先生的假说，或者用任何其他的假说去说明它们；但是当我叙述这个假说时，为了避免多费唇舌，并且更加恰当地把它表达出来，我将有时谈得好像我已采用了它，并且好像我还力图说明它，使人们去相信它”。所以牛顿特别强调：“我认为我应当表明这一点，以使人们不致把我的议论和我的其他议论混淆起来，或者用其中的一个来量度另一个的可靠性。”很显然，在这种情况下，牛顿仅只把假说看成是其真理

性尚待讨论的一些问题的代名词，而且有保留地在解释自己的观点时把这类假说作为一种表述手段和权宜的交流形式，并未赋予它更多的实质内容。他还特别注意到，要把这种有限制地借用“假说”的情况与前述那种特指假说的运用区别开来。但是，由于牛顿所谈论的这两种不同涵义的假说在本质上的差别是如此之大，加之他所作的表述又很不同：一个特征鲜明，另一个却含义模糊，因此他希望不要发生的混淆仍是很难免的。这是牛顿运用假说概念的不严格所造成的。不过有一点仍是清楚的，即对于这种真理性不明确情况下运用的假说，牛顿的态度是随和的，从未激烈地加以反对。特别是当他有限制地提出一些这样的假说时，总是把它们同实验哲学理论严格加以区别，因为他认为两者有天壤之别，绝对不可混同。也正因此，就出现了产生更大矛盾的第三种情况，即虽然牛顿力学体系里实际包含有不少的科学假说，如关于绝对空间、绝对时间、绝对运动以及万有引力的假设等，但牛顿始终坚决反对把它们也称之为假说。理由十分清楚，在牛顿看来这些假设不仅与他所激烈反对的特指假说大相径庭，而且也与真理性不明的那种假设全然不同。它们是构成其实验哲学的概念基础。事实上，在《自然哲学的数学原理》中牛顿是以类似于定义或公理的形式提出时间、空间、位置和运动这些概念的。他认为“必须看到，一般人不是在别的观念下，而是从这些量和可感知的事物的联系中来理解它们的。这样就产生了某些偏见；而为了消除这种偏见，最好是把它们区分为绝对的和相对的，真正的和表观的，数学的和通常的”。在相对论诞生后，人们对牛顿关于绝对时空、绝对运动的假说，提出许多批评，认为是牛顿最大的失误。

但值得深思的是，充分肯定牛顿提出这些概念的必要性和历史必然性的不是别人，恰恰是彻底否定了绝对时空的爱因斯坦。这或许会使许多人感到困惑和惊讶，但却是爱因斯坦始终不渝的一个信念。爱因斯坦在著名的《自述》中说：“牛顿啊，请原谅我，你所发现的道路，在你那个时代，是一位具有最高思维能力和创造力的人所能发现的唯一的道路。你所创造的概念，甚至今天仍然指导着我们的物理学思想，虽然我们现在知道，如果要更加深入地理解各种联系，那就必须用另外一些离直接经验领域较远的概念来代替这些概念。”爱因斯坦在去世前半个月的一次谈话中又一再强调说，回顾牛顿的全部思想，他认为牛顿的最伟大成就是他认识到特选[参考系](Privileged Systems)的作用。因为牛顿已经认识到可观察的几何量和它们在时间中的进程，并不能从物理方面完备地表征运动。所以除了物体和随时间变化的距离以外，还必须有另一种决定运动的东西，这就是“绝对空间”的关系。如果牛顿的运动定律要有任何意义，空间就必须具有一种物理的实在性，就像质点和它们的距离的实在性一样。实际上相对论并没有否定空间、时间的实在性，而只是剥夺了它们的因果的绝对性——即只起影响而不受影响的这种绝对性。所以应当肯定，牛顿关于绝对时空的假设不仅是构造其理论体系所必须的，而且也是近代以来最重要、最深刻的科学假说。但由于牛顿对假说概念的内涵有与众不同的见解，因而他提出在实验哲学中不需要假说和拒绝称他所提出的一系列假设为科学假说也就十分自然了。这种矛盾状况令人不禁想到费尔巴哈。尽管人们一致认为费尔巴哈是 19 世纪上半叶最伟大的唯物主义哲学家，可他本人却坚决

反对与当时的唯物论者为伍，甚至因此拒不承认自己是一个唯物主义者，因为在费尔巴哈心目中，唯物论是完全等同于庸俗唯物主义的。牛顿事实上是一位运用科学假说的大师，但由于他对假说概念的认识和运用比较独特，结果造成一系列的矛盾与误会。一旦辨明牛顿所运用的假说概念的不同内涵和应用范围之后，那么我们可以看出，仅仅由于牛顿坚决反对那种等同于毫无根据的胡说的特指假说，或者由于牛顿提出过“不要假说”，就认为牛顿反对科学的假设方法，并把他划归“狭隘经验论”者或“归纳经验论”者行列，甚至称牛顿为“归纳法的驴子”是很不公正的。这个历史的误会应予澄清。

### 自然科学中的一首流行曲

被誉为 19 世纪三大发现之一的能量守恒定律，是人类经历数世纪总结力学、热学、化学、电化学、生物化学、电学、磁学诸多领域，特别是电磁学和热力学的实验和观察经验后推导出的普遍性科学定律。

能量守恒是物质和运动的一个最普遍、最基本的规律，它渗透于所有的自然现象之中，并常常在力学现象中直观、明显地表现出来。因此，很早以前，在一些力学定律和某些哲学家的思想中就有了某种程度的反映。例如，亚里士多德的杠杆原理实质上包含有能量守恒原理。中世纪的科学家在发掘简单机械的原理时，也很自然地运用了能量守恒这种思想。文艺复兴时期更是这样，伽利略(G. Galileo, 1564 ~ 1642)在观察斜面运动和自由落体运动时，就直觉感到：物体在下落过程中所达到

的速度最多能够使它跳回到原来的高度。这里涉及到物体的动能和势能之间的转化及它们的总量不变原则。

法国物理学家笛卡尔(R. Descartes, 1569 ~ 1650)最早提出“运动量”守恒(即动量守恒)的思想。他给人们留下最深刻的印象是:一个粒子体系在不受外力作用时,它们的总运动量保持不变;粒子相互碰撞产生的力通过它们的运动量的改变来量度。不久,德国物理学家莱布尼兹(G. W. F. Leibniz, 1646 ~ 1716)对笛卡尔提出挑战,他引入“活力”(VisViva)的概念。他所指的“活力”,是物体的质量与它的速度的平方之积,是一个标量;而笛卡尔的“运动量”是矢量。莱布尼兹认为“活力”才是“力”的真正量度;物质受的力和它所通过的距离之积等于活力的增量。莱布尼兹的“活力”实质相当于物体的动能,其数值等于动能的两倍。后来J. 伯努利(J. Bernoulli, 1667 ~ 1748)将“活力守恒”当作莱布尼兹的“活力”原理的一个推论提出,他认为当活力消失后,它并没有丧失作功的本领,而是变成了另一种形式。显然,J. 伯努利扩大了莱布尼兹的“活力”所指的范围,把势能也列入了活力的范畴。

笛卡尔和莱布尼兹的争论持续了半个世纪,最后调合双方的是数学家达朗贝尔(J. L. D'Alembert, 1717 ~ 1783)。他指出这场争论只不过是术语的问题,实质问题是统一的,因为笛卡尔的“运动量”是力对时间的积分,而莱布尼兹的“活力”是力对空间线度的积分。这里面蕴藏有冲量积分的思想。

1787年,法国数学家拉格朗日(J. L. Lagrange, 1736 ~ 1813)在《分析力学》一书中证明,在某些粒子系统中,每一个粒子相对于参照系的位置和速度的函数,

不管发生什么运动总是保持不变。这个函数是两部分之和，一部分表示运动的动能，另一部分表示势能（当时还没有“动能”和“势能”这两个术语）。这个函数是拉格朗日函数，它对速度的偏微商等于笛卡尔的“运动量”，即现在所称的动量。由此可见，“活力”守恒或机械能守恒原理，就是由拉格朗日等一些数学家和力学家提出来的。

1807年，杨（T. Young, 1773 ~ 1829）创造了“能”这个词。1826年，蓬瑟勒（J. V. Poncelet, 1788 ~ 1867）又创造了“功”一词。从此以后，机械能守恒定律就不仅是数学家著作中那种抽象的、广义的函数形式，而是物体的具体运动形式和规律的直观写照了。

随着热机的发明及热机的广泛商用，英国爆发了第一次工业革命；与此同时，化学家们开始了对热的性质的研究，物理学家们也初步着手研究热与机械能的关系。这时对能量转化现象的观察已经超出了机械能的局限范围。

1798年，隆福德伯爵（Count Rumford, 即 B. Thompson, 1753 ~ 1814）在一篇题为《关于用摩擦产生热的来源的调研》中报道了他的机械功生热的实验。他曾在慕尼黑军工厂金工车间，用数匹马力带动一个钝钻头给一颗弹头打洞，弹头浸在华氏 60° 的水中，他发现经过一小时后，水温升高了 47° F，两个半小时后，水就开始沸腾。这表明机械功可以转化为热能。隆福德伯爵由此对热质说提出质疑，因为他看到的现象是热可以不停地产生，只要机械功不停的话，从弹壳里产生的热就会取之不尽。他最后形成了这样一种思想：热是物质的一种运动形式，是粒子的振动的一种宏观表现。究

其思想根源，它来源于化学家鲍尔哈夫(H.Boerhaave1668~1738)在1732年发表的一篇论文，鲍尔哈夫在那时就已经暗示热的本质是振动。

可是，隆福德伯爵的正确见解在半个世纪中未得到普遍承认，主要因为热质说盛行。热质说是法国大化学家拉瓦锡(A.L.Lavoisier,1743~1794)在1780年发表的《论热》(SurLaChaleur)的论文中提出来的。他根据布莱克(JosephBlack,1728~1799)的量热学实验和他自己的比热实验(比热一词是拉瓦锡最先引进的),似乎看出热是一种粒子,它可以从一个温度较高的物体流进一个温度较低的物体。他进而假设:“热质(或称热素)是一种极细微的、没有质量的粒子,它们相互排斥但又与物质粒子相互吸引,从而削弱了物质粒子间的万有引力;它们绝大多数以潜在的形式潜伏在物体中,一旦受激就会溢于物质表面变成自由形态,使物体温度升高;热质既不能产生,也不会消灭,热质在总量上是守恒的”。拉瓦锡的热质学说在法国的影响最深,但在英国一般是被否定的。

伏打电池的发明(1800年)给揭示能量转化与守恒现象开拓了更广阔的前景,热、光、电、磁和化学结合,生物的生命力在能量概念的基础上开始逐步统一起来。卡里斯尔(A.Carlisle)和尼柯尔逊(W.Nicholson)电解水的实验(1800年)表明电能和化学能可以相互转化;奥斯特(H.Oersted)发现的电流磁效应(1820年)表明电能与磁能存在某种可转化的关系;法拉第的电磁旋转现象(1821年)第一次揭示了电磁能转化为机械能的可能性;塞贝克发现的温差电(1822年)证明热能可以转化为电能、法拉第在1831年发明第一台直流发电机,第

一次实现了机械能向电磁能的转化。焦耳测量焦耳热的实验，以精确的结论总结了化学能、电能和热能之间的关系。1845年法拉第发现的磁致旋光现象，更深地揭示了电、磁、光三者之间的作用关系……所有这些表明，19世纪的能（或力）的概念已不像17世纪那样仅仅局限于机械能的范畴，也不像18世纪那样局限于机械能和热两项内容。因此，这就要求物理学家收集各个领域的发现，归纳它们的数据，从中抽象出一个既能表征各种现象的基本特点，又能表示各种力（或能）相互转化的精确形式。在这方面，卡诺、迈耶、焦耳、威廉·汤姆孙、克劳修斯，特别是亥姆霍兹作出了主要贡献。

## 迈耶的贡献

我们知道，拉瓦锡是主张热质说观点的，但他又极力批判燃素说的错误，他于1777年提出了燃烧学说，认为物质只能在氧气中燃烧。同时，他还认为呼吸是一种单纯的化学过程，类似于碳在氧中的燃烧。这一结论在19世纪初对生物化学产生了积极的影响。1842年，德国化学家李比希(Justus von Liebig, 1803~1872)在《动物化学》中提出了一个以燃烧学说为基础的动物热理论。这个理论认为：“由血液循环输送的食物元素与氧之间相互作用，是动物热的源泉”。李比希这种思想在1840年就已经形成。

之后不久，德国医生和生理学家迈耶(Julius Robert von Mayer, 1814~1878)在印度尼西亚的爪哇做了一次静脉切开手术实验。他发现流出的血十分

红艳，以致误认为错动了人体的动脉。但经过反复检查，证明流出的血仍是静脉血。迈耶由此认为，热带人的静脉血比寒带人的静脉血要红些。理由是：热带环境温度高，人体消耗热量比寒带人相对低得多，静脉血管中红血球还携带有大量剩余的氧成分。他把有机体的这种化学过程和无机的物理现象联系起来，从而产生了第一个热和机械运动的当量概念。

1842年，迈耶发表了《论无机自然界的力》，第一次提出了力（即我们所说的能量）不灭和可转化性原理以及热功当量的计算。迈耶从无机自然界中的各种能量形式中抽象出一个“力”（Krafte），指出“力”的可转化性。他根据哲学中的因果律，将“力”等效于哲学语言中的“原因”，将某一“力”的产生效果或它的变化形式称为“效应”，用“原因等于效应”（causaaequateffectum）这句话简明地概括能量守恒原因。他说：“力是原因。对于它们可以直接应用这样的基本原理：原因等于效应。如果原因c产生的效应是e，那么c=e。如果e接着又是另一效应f的原因，就有e=f，如此类推：c=e=f=……=e”。

迈耶认为，“力”跟物质都是客观存在的物质实体，其区别仅在于一个无重量，另一个有重量。为了把“力”类比于物质，以便从物质的质量守恒的定律之中平行地推出能量守恒定律，他就把物质定义为无机界中的第一种“原因”，把“力”定义为第二种“原因”。他说：“在自然界中我们找到了两类原因，我们从经验得知，它们中间不发生转换。一类由那些有重性和不可入性的性质的原因组成，即我们通常所说的物质。另一类则由那些不具备这些性质的原因构成——这些是力。根据原因等

于效应的哲学原理，我们就可以认为，‘力’是不可灭的、可转化的和无重的实体”。

这样，万有引力、机械力、磁力和光力等等都列入了迈耶的第二类原因，即无重的实体。至于热是否也属于力或运动的范畴，在迈耶的时代是不容易弄清楚的，特别热质说的盛行，要把热也列入力或运动还有很大的阻力。但是按照迈耶的理论，如果将热排除在力或运动的范围之外，则等于对这个理论的否定，因为热终究是运动的一种效果，又是运动的一种原因。如果热不属于某种能量形式，迈耶的“原因等于效应”的因果律就会不成立。

迈耶的因果律是建立在经验基础上的一个自然哲学的抽象，它受到事实的检验，这与康德的先验论的因果关系和黑格尔的“绝对精神”的辩证哲学中的逻辑思维有着原则区别。两块金属相互摩擦，运动结果产生了什么？产生了热。用机械力使一定体积的空气压缩，运动结果是什么？温度升高。一个重物从高处落到地面，结果又产生什么？重物碰撞地面产生热量。反过来问，活塞中的蒸气膨胀，蒸气失去部分热，结果产生什么效应？产生的是机械运动。迈耶通过这些事实分析，断定热也属于他的“力”或“原因”的范畴。最为可喜的是，迈耶根据空气被压缩后温度升高的事实推论热是物质中的粒子的运动。他倾向于这样的观点：当物体中的粒子的距离缩短后，物体的热量增加。他还把落体和地球当作一个整体，认为一个重物从高处落到地面，使它们的距离变成零（按他的话来说，地球的体积缩小），结果就要产生热量。从下面的一段话我们便能看出，作为医生的迈耶对热运动性质的理解已达到相当惊人的程度。他说：

“我们可以设想在落体力、运动和热之间自然存在着联系。我们知道，如果一个物体的单独粒子间运动得更接近时，热就会出现，即压缩产生热。那种束缚着最小的粒子的力和分隔这些粒子的最小的空间，必定在大质量和可测量的空间方面清楚地得到应用。一个重物的落下实际是地球体积的减少，因此必然与产生的热有某种关系。这种热必定精确地正比于重量的大小和它距离地面的原来的距离。根据这种考虑，我们很容易导出上述联系落体力、热和运动的关系。”

这里的“落体力”、“运动”可译成现代语言的势能和动能。

迈耶接着指出：“如果落体力和运动等价于热，那么热自然要等价于落体力和运动。”

迈耶在这里将他的因果律娴熟地用于分析热和机械运动的关系，第一次提出了热功当量的概念。他并根据落体的势能全部转化为热作了初步估计：“重量从大约365米的高度落下（所产生的效应）对应于给相同质量的水从0到1所加的热。”这个值显然是不够精确的。到了1845年，他就根据压缩空气产生热的实验给出了热功当量的推导和计算方法，那时他利用了气体的等压比热与等容比热的差的实验结果，并借用了理想气体的内能与体积无关的假设。

迈耶在1842年的论文中把无机界所有能量形式归纳为五类“力”，即“落体力”（重力势能）、“运动”（动能）、热（包括光的辐射能）、电（电能和磁能）以及化学亲合力（化学能）。他认为“力”是以“不可灭性和可转化性的统一”为特征的，力的转化意味着“运动的停止不可能不引起另一种运动”，“一种力一旦处于运动就

不可能消灭，仅可转化为另一种形式”，一种力与它所转化成的形式是“同一个实体的两种不同的表现”，这种实体有一个最终的形式，即所谓的“原始力”（Urkraft）。“原始力”的大意是指，任何形式的力都由它在相当条件下转变而来。这种高度抽象的德国自然哲学概念早在康德的著作中出现过，不过康德是用它来解释自然力的统一的原理，而迈耶用它来表示自然力（即能量）的可转化性和守恒性。

由此可见，能量转化与守恒原理的最初的形式是迈耶提出的。迈耶为了使这一原理由潜科学的阶段上升为一条普遍的定律，是花了很大精力的，我们可以把他成功的经验归纳为如下三条：

第一，迈耶根据李比希的动物热的理论和通过对动物热的观察得到启示。不过他比李比希进了一步，他主张“生命力”是一种化学力。他认为，过分强调“生命力”在动物热中的调节作用，就会回到神秘主义、不可知论，最终会给“力可灭”的错误论点留下一条通路。

第二，由质量守恒平行推导出能量守恒。质量守恒是化学家们发现的，在迈耶时代已成为一个科学的公理。迈耶认为，化学是处理物质的科学，物理是处理力的科学，它们应当具有共同的哲学基础，目的都在于解释物质世界。物质具有明显的特征，如重量、体积、不可入性、扩展性，等等。但是，力的本质似乎是“不为人所知的不可深入的、假设的”。虽然牛顿发现了万有引力定律，但他却力避解释引力是怎样产生的。因为这种原因，迈耶立足于阐明力的科学框架：“努力获得物质赖以转动的轴的力的科学”。为了完成这个任务，迈耶需要借助于自然哲学观。莱布尼兹认为物质本质上是能动的，力为

物质所固有，力与物质同属一体。他的基本观点是：力是物质的属性，物质是强力的体现。这种一元论哲学观点对迈耶来说是不可多得的，他据此引出了力——物质二元论，把莱布尼兹的“同一实体”分为两种实体——力和物质，既用是否有重性质将它们区别，又用物质性将它们联系。由于力和物质都遵循共同的哲学原理，物质既然守恒，力也应当守恒。

第三，从莱布尼兹的因果律引伸出结论。借助于“原因等于效应”来宣告能量不灭，是迈耶的核心思想所在。莱布尼兹在 1687 年给卡特兰(Catalan)的一封信上说过：“在全部原因和整个效应之间总是存在着一种完全等价的关系……”实际上，莱布尼兹的因果关系表现了原因和效应在时间轴上的同一，这种同一性在迈耶的理论中反映在能量守恒上。按照迈耶的思想，一种无重的实体或力（即能量）停止了，它并没有被消灭，而是转化为另一形式无重实体或力（即能量），转化前后的两个实体没有本质的区别，它们只有形式上的差异、时间先后的不同，它们在量上是统一的。

在 19 世纪中期，曾因迈耶和焦耳的热功当量的优先权发生过激烈争论。如果我们仔细考虑他们两人的思想背景，这场争论则完全是没有必要的，因为迈耶是从自然哲学的一些原理来建立他的理论进而推算出热功当量的，而焦耳更多依赖于实验和观察。

### **“没有任何毁灭，未曾有任何损失”**

迈耶从自然哲学走到了一个伟大定律的面前，英国

物理学家焦耳(Joule, 1818 ~ 1889)则从实验哲学的角度总结出这个定律的一个特殊形式的定量关系——机械功和热能的转化关系。焦耳出生于曼彻斯特一家酿酒作坊的家庭，对作坊中的热机和直流电机效率进行过长期观察，由此对机械功、化学能和电能与热能的转化产生了浓厚兴趣。当时，有一个问题使他感到大惑不解：为什么用一磅煤产生的蒸汽来驱动热机所得的效益，比用一磅锌获得的电池能量来转动一台直流电动机所得的效益还要大？他直观地发现，原因在于长导线所引起的热量损失。他通过反复实验，在 1840 年 12 月就得出了这样的结论：导线的热量损失与所通过的电流强度的平方成正比，与导线的电阻成正比。后来人们就把这种热损称为“焦耳热”，以与其他形式电流热损（如汤姆孙热）相区别。

“焦耳热”的发现无疑对焦耳是一种极大的鼓舞，因为他由此发现，隐蔽在神秘的自然界中任何复杂的转化都可以通过实验来确立起定量关系。他认为，实验应当放在哲学的高度，应当彻底摆脱经验科学的限制，从纵深和广阔的两个方向来逼近自然哲学所预言的自然规律，这就是焦耳的实验哲学的自然观。

从 1841 年到 1843 年 1 月，他连续进行实验，试图掌握热能与化学能的当量关系，但得不出明确答案。在他看来，伏打电流只是“一种传递、安排和转换化学能的宏观作用”，这种作用既不能说明热不是一种物质，也很难表明热是一种分子的振动。因为电流很可能将假设为无重实体——“热质”从电池传给空气或水，也很可能因为它改变了导线中原子的相对位置或使原子产生振动而生热。

后来焦耳终于找到了解决问题的方法，他不再去考虑无法测量的化学能和电能之间的转换关系，而去测量机械能转化为热量的比例。他的这种转变主要是由于他看到了产生电流的多种途径。在当时最盛行的获取电流的方法有两种，一是化学方法。即使用电池；二是机械方法，即使用发电机。后一种方法更适合寻找功能转化关系。于是他设计了一种特殊发电机，其电枢插在一个盛有水的密封玻璃管内，让电枢在一对固定电磁极内高速旋转，经过一定时间，包围电枢的水的温度升高。通过计算水中热量增加和所耗去的机械功算出了第一个热功当量值（1843年）。但由于电枢内部的磁滞涡流（当时还不知道有这种现象）和反感应现象，致使所测得的数值不十分精确。

经过这次实验，焦耳确信热不是法国人所说的那种无重热质，而是机械运动的结果。加上他早年受到道耳顿的原子论思想的教育，再联想到隆福德伯爵的实验，就深刻地认识到热是物质粒子的振动的宏观表现。

1845年，焦耳不再通过电流的媒介而直接测量机械功转化为热量的情况。他做了两个实验，一是通过压缩空气使空气温度升高来测量热功当量，二是人们所熟悉的浆轮实验。在他的浆轮实验中，他使一个浆轮浸在盛水的密封圆筒中，用重物使之转动。当重物下落时，带动浆轮旋转，浆轮搅拌水使水温升高。焦耳根据重物质量，下降的距离及水温的升高测得热功当量为781.5英尺磅。接着，他又把水换成鲸油或水银，分别进行测量，测得热功当量分别为782.1和787.6英尺磅。

1849年，焦耳用同样的方法测得更精确的热功当量数值为772英尺磅/B·T·U。他当时使用的热量单位是

“英制热单位”(British Thermal Unit), 简称为 B·T·U。他称功为“英尺—磅”。现在一般采用的热功当量为 778 英尺磅/B·T·U·, 即 4.18 焦耳/卡, 比焦耳所测值略高百分之一。

1849 年 6 月 21 日, 焦耳在伦敦皇家学会上宣布他的实验结果时说道:

“隆福德伯爵……业已证明……给弹壳钻孔所激发出巨大的热量不可能归于金属的热质容量所发生的变化; 而且他得到这样的结论, 钻头的运动传给了金属粒子, 这样就产生出热现象。……有许多事实, 例如……经过数日风暴袭击的海水变得温暖, 其原因很早就被认为是流体的摩擦。然而, 由于科学界早已充斥着热是一种物质〔热质〕的假说, 所以人们几乎一致地否定用那种方法(即机械方法——译者)产生热的可能性。……1845 年, ……我使用一个浆轮来产生流体摩擦, 通过搅动水、鲸油和水银, 分别获得〔热功〕当量为 781.5, 782.1, 787.6。”焦耳在提出 1849 年那个更精确的数值后, 便作了如下总结, 他说:“(1)用摩擦产生的热量, 不管是液体还是固体, 总是正比于力〔功〕的消耗;(2)能够产生具有使一磅水的温度升高 1°F 的能力的热量, 需要消耗用 772 磅重的落体通过一英尺的距离来表示的机械力〔功〕。”

1847 年 5 月, 《曼彻斯特信使报》发表了焦耳一篇题为《论物质、活力和热》的文章, 他在这篇文章中清晰、明确地阐述了能量转化和守恒的原理, 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秩序——没有任何毁灭, 未曾

有任何损失；不管整部机器怎样复杂，他照常润滑而又和谐地工作。虽然有如伊扎基尔(Ezekiel)的奇观，‘轮中有轮’，而且每样东西似乎很复杂和包容在显然混乱不堪的和几乎是无穷无尽的原因、效应的变化、转变及安排的错综局面里，但那最完整的规律却保持着——这一切全都为上帝的意志所掌握。”

焦耳认为热是物质粒子的“活力”，具有潜在性，当它以潜热的形式分布于粒子之间时，就像万有引力或排斥力那样联系着各个粒子，使它们保持平衡。一旦物体（特别是气体）受到外部压力，潜热就会部分释放出来，产生宏观的机械热效应；相反，如果物体膨胀，温度一般会降低，这是因为有部分自由热因做功而转化为潜热。

这种思想对威廉·汤姆孙有着强烈的吸引力。汤姆孙是在1847年英国科学促进会牛津会议认识焦耳的。当时他刚从剑桥大学毕业不久，年仅23岁。焦耳在牛津会议上的报告引起了汤姆孙的兴趣。他根据焦耳的思想考虑了这样的情况：实际气体的行为与理想气体不同，它在经过自由膨胀后温度可能会下降。他需要焦耳的高超实验技艺来证实他的设想。1852年，他们联合起来进行实验，结果发现实际气体经过自由膨胀后一般会使温度略有下降，这就证明实际气体不仅是温度的函数，而且也是体积的函数。我们称这种现象为焦耳-汤姆孙效应。

1867年，英国科学促进会的电阻标准委员会要求焦耳根据电流的热效应来精确测量热功当量。实验是由汤姆孙设计的，实验的目的不仅是要测量热功当量，更重要的是要检验当时的电阻标准。由于焦耳这次测得热功当量与过去用浆轮实验测得值有百分之二的偏差，委员会就要求他进一步实验。他后来在1875年至1878年再

次实验肯定了浆轮实验所测得的值。

## 《论力的守恒》

历史学家从不同的角度来考察发现能量守恒定律最富有生气的年代——1820~1850年，他们有不同的观点和结论，但在这一点上总是一致的：第一次给出能量守恒的数学式子的是德国的亥姆霍兹(H. von Helmholtz, 1821~1894)。亥姆霍兹所做的，实际是先用数学概括机械能守恒定律，然后证明自然界的各种能量都遵循这个定律。

1847年7月23日，亥姆霍兹在柏林物理学会上宣读了《论力的守恒》。他在这篇论文中给出了能量守恒的数学公式，提出了能量守恒定律的哲学和实验的根据，并将它演绎到物理学各大分支。

跟迈耶一样，亥姆霍兹是由动物热现象开始，转而对能量守恒的普遍性发生了兴趣。他所属的生理力学学派在当时极力反对生理学中流行着的所谓“生命力”论，主张生物的一切活力都来源于化学力或食物的燃烧热的观点。他最初的目标是要在物理学的基础上重建生理学。他先验地相信这样两个可能：(1)所有自然现象可以转化为物理现象，而物理现象又可归结为力学过程；(2)自然界应当存在一种守恒的最终实体。他的生理学观是彻底的机械简约论，他相信所有生理过程终究可简化为物理学的、因而也就是力学的过程；既然机械能守恒，那么自然界所有能量形式（其中包括有机体中的能量）在总量上是守恒的。他的最终目标是要寻找与因果律相一

致的最终原因，这个“最终原因”他认为是所谓的“不变力”，他把不变力作为一种终极实体，这种终极实体在总数上是不变的，但在一定条件下可以部分转化为其他具体的实体或特殊力（即具体的能量形式），因而因果律在物理学中体现为能量守恒。他在《论力的守恒》的引论部分把“不变力”和能量守恒（即他所说的“力的守恒”）作为两个公理提出，以使用数学推导机械能守恒定律、进而演绎得出能量守恒定律。他说：

“论文中包含的关于命题的推导，可以建立在两个公理的基础上；或建立在不论用什么样的方法结合自然体也不可能获得在量上如此无限的机械力的公理基础上；或建立在关于自然界中所有作用都可以最终归结到吸引或排斥力的这个假设的基础上。这类力唯一决定于施力的质点之间的距离。”

亥姆霍兹所说的“不变力”是指由质点中心发出的“中心力”的能量守恒的形式。他把它称为力，甚至把能量守恒说成“力的守恒”，这是历史的局限，因为当时还没有给出严格的能量概念。虽然杨在 1807 年的《论自然哲学》中引入了能量一词，那仅仅是用来代替以往所说的“活力”（*VisViva*）。实际上力的概念和能量概念的确定只能在能量守恒定律确立以后，而不是在它之前，关于这一点普朗克（*MaxPlanck*，1858~1947）后来在《能量守恒原理》一书的前言中作过精辟的论述。一些人批评亥姆霍兹的“力的守恒”是严重的概念混淆，看来这种批评缺乏基本的历史知识。亥姆霍兹后来在 19 世纪 70 年代末才开始使用“能量”一词代替他所说的力，而他所发现的能量守恒定律在形式上和意义上都没有发生根本改变。

亥姆霍兹认为自然现象的终极原因应当可以从机械能不可能从无到有这条公理推出。假设在一个物体系统中，每个物体的运动都由中心力来控制 and 维持，这种中心力是距离的函数，而与速度和加速度无关。如今某一质点质量为  $m$ ，它在中心力作用下从距离  $r$  运动到距离  $R$  的位置，那么就有：

$$\frac{1}{2}mQ^2 - \frac{1}{2}mq^2 = -\int_r^R \phi dr \quad (1)$$

式中  $Q$  和  $q$  分别表示质点在  $R$  和  $r$  的速度。亥姆霍兹称  $\int_r^R \phi dr$  为在距离  $R$  和

$r$  之间的“张力和”(Sum of the tension)。等式左边显然是质点的动能之差，其值刚好是莱布尼兹的“活力”差的一半。他又证明这个公式对质点系统也是适用的，对于多个质点只要在此等式两边取求和的形式就行。这就是他总结的机械能量守恒定律，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。他在《论力的守恒》中将这个基本公式运用于热(第四部分)、电(第五部分)以及磁和电磁现象(第六部分)，取得预期的效果。在他以前，“活力”守恒定律(即机械能守恒定律)便已被应用到引力、波动及弹性碰撞等不会产生热效应的范围。那时，热是推广机械能守恒定律一个不可逾越的障碍，因为当时热普遍被认为是一种物质而不是一种能量形式。因此，在 19 世纪以前就连非弹性碰撞这种简单情况都被排斥在能量守恒范畴之外，更不用说电、磁和光的情况了。亥姆霍兹意识到只有先克服热的障碍才谈得上能量守恒，他认为在非弹性碰撞中能量没有任何损失，只有部分“张力和”转变成热能的形式。他根据焦耳的热功当量实验批判了热质说，捍卫了热的动力学

理论，进而证明热是微观粒子的运动、潜热是自由热转化为原子之间的“张力”的结果。在这一方面，他充分运用了归纳的方法，总结了前人（特别是隆福德伯爵和焦耳）的成果。

亥姆霍兹要追寻的是与因果律一致的终极原因（能量守恒）。按照康德的观点，因果律是自然现象可认识的前提，但属于先验的范畴。亥姆霍兹先把自然现象都简化为粒子间的吸引或排斥作用（拉普拉斯早些时候也这样做过），然后由吸引力或排斥力（即中心力）所遵守的终极定律——机械能守恒定律——出发去发掘更普遍的能量守恒定律。他的这种机械简约方法具有先验的性质。正由于这种原因，克劳修斯（R. E. Clausius, 1822 ~ 1888 年）在 1853 年批判了他这种思想，指出中心力的条件在物理学上是可能的，但在数学上并无这种必要，况且它的普遍性尚待证明，不能先验地予以认定。

值得注意的是，亥姆霍兹并不承认自己是先验论者，他宣布自己是经验主义者，他要彻底铲除德国自然哲学的最后残余。他认为这个哲学的先验思想模式对德国科学造成了巨大的破坏，他大声疾呼地要求取消假设和猜测，代之以经验主义者的科学归纳方法。他强调他的能量守恒定律是在归纳永动机不可能性的事实上创立的。他说：“根据这种方法，我提出了这样的问题：‘如果永动机不可能制成，那么自然界中的各种力之间的关系又应当是什么？’”他在 1881 年给《论力的守恒》所加的注解中再次强调指出：“……这个定律像关于真实世界中所有知识一样，已经归纳地建立起来了。在许许多多试图建造永动机的希望破灭之后，永动机的不可能性已成为一种长期归纳的结果。”

亥姆霍兹相信永动机造不成是很自然的，自从法国科学院在 1775 年宣布不再受理任何建造永动机的方案后，没有一个受过良好教育的物理学家再在这个问题上浪费时间。但是永动机的不可能性是否是发现能量守恒定律的充分条件或唯一前提，这倒很难说。普朗克曾经指出，即使永动机的不可能性的普遍意义并不亚于能量守恒原理的一般性，但它只能解决这个定律的一半问题。这就意味着不可能唯一地由这种不可能性推导出能量守恒定律。例如，隆福德伯爵虽然知道永动机是造不成的，但他在批判热质说后并不能马上发现能量守恒定律；相反，他认为热是“取之不尽”、无以计算的，理由是：物质是守恒的，而热不是物质。由此看来，经验归纳方法在发现能量守恒定律的过程中只完成了一半任务，即只证明了永动机造不成。剩下一半任务的完成先是依靠了非经验的思维模式，而后又借助了科学的演绎方法。迈耶的“原因等于效应”和亥姆霍兹将一切自然现象化为中心力的现象的机械简约论都属于先验的范畴，它们在发现能量守恒定律过程中起了极为关键的作用，这应当值得我们注意。

还有一点值得注意的是，亥姆霍兹的成功又是他继承了牛顿力学和拉格朗日力学双重传统的结果。牛顿力学处理的对象是力，它以空间、时间、质量和力为基本参量，其优点是可以将耗散力包括于其中，便于得到功函数；而拉格朗日力学处理的对象是势或能，它以空间、时间、质量和能量为基本参量，其特点是：在仅有束缚力的体系中机械能是守恒的。亥姆霍兹借助牛顿力学提出了以中心力为基础的机械简约模式，又借助拉格朗日力学完成了数学推导，从力过渡到能量，找到了力的不

变形式或与因果律相一致的终极原因——能量守恒定律。

亥姆霍兹《论力的守恒》发表后，一些物理学家反对它，他们只看到他的先验的机械简约论的一面，而没有看到他的经验归纳方法和科学演绎手段。也有一些数学家和物理学家表示支持，为他的数学推导的简明性和逻辑上的美所吸引。迪·布瓦-莱蒙 (duBois-Reymond) 属于支持他的一派，迪·布瓦-莱蒙曾与亥姆霍兹一起研究过生理热现象，他理解亥姆霍兹理论的真实意义。他读了《论力的守恒》之后深有感触地说：它将“永远是具有伟大意义的历史文献。”亥姆霍兹曾将他的这篇论著交给他的好友马吕 (H. G. Magnus, 1802 ~ 1870)，希望通过他发表出来。马吕是一位实验物理学家，与他的观点不同，反对他把物理学数学化和抽象化。因此，当他把手稿转交给波根多尔夫 (J. C. Poggendorff, 1796 ~ 1877) 时只做了一般性推荐。波根多尔夫更是一位典型的经验主义者，过去曾反对过迈耶。他认为亥姆霍兹的理论尚待用大量的事实来证明，拒绝把它发表在他主编的《物理学年鉴》上。万不得已，亥姆霍兹在迪·布瓦-莱蒙支持下把论文拿到柏林印成单行本发表出来。亥姆霍兹的理论直到 19 世纪 60 年代才得到普遍承认，这主要还得助于威廉·汤姆孙等人的大力支持。

## 热力学第一定律的发现

亥姆霍兹在总结能量守恒与转化定律时，免不了要对热质说进行批判，他的这种批判又是建立在归纳隆福

德伯爵等人的实验基础上进行的。没有这种批判，就无法将他的“中心力”守恒的思想推广到热学领域。实际上，自从卡诺(S. Carnot)以后的19世纪前半叶的热力学，是在更深刻的范围批判热质说的过程中发展起来的。热质说进入19世纪后也没有停顿下来，作为它的两条基本假设——潜热和热是状态的函数——对热力学的发展，甚至对能量守恒原理的推广，形成了极大的威胁，就连卡诺本人前期的研究，也不得不依赖热质说。截至1850年，热质说才最终因热力学第一定律的发现而被最后铲除干净，也只有到了那时能量守恒定律的证明才算大功告成。

1824年，卡诺发表了《关于火的动力》(简称)。卡诺在这部论著中提出了两个问题：(1)热机的效率是否有一极限？(2)什么样的热机工作物质最理想？这都是当时法国热机工程界最时髦的问题。在对于热机的效率缺乏清醒认识的情况下，热机工程师们只能从热机的适用性、安全性和燃料的经济性等方面来改进热机。他们为了提高效率，曾盲目建议用空气、二氧化碳或酒精代替蒸气。卡诺处理热机问题的途径截然不同，他提出了三个前提：(1)永动机是不可能的；(2)热质理论；(3)只有存在温度差时才能产生热动力。他把热机比作水轮机。水从高处流下带动水轮机旋转，而后流入低水位，水在整个过程中没有损失。热机工作情况与此类似，热质从高温热源流出推动活塞做功，而后进入热沉，热质在整个过程中也没有损失。正如他所说：“产生热动力的原因不是热质的实际损失，而是由于它由一个热的物体输运到一个冷的物体。”根据这样的类比，他得到一个结论：热动力决定于流过热机的热质的数量和两个热源的温

差。

为了解答上述两个问题，卡诺提出了以他的名字命名的理想热机和循环——卡诺热机和卡诺循环。卡诺热机由汽缸、活塞和作为工作物质的理想气体、及热源和热沉构成。卡诺循环由等温膨胀、绝热膨胀和等温压缩的正过程及绝热压缩的逆过程构成。在绝热压缩过程中热机把流入热沉的“热质”全部带回热源，恢复热机原先的状态，所需的功由正过程产生的全部热动力支付。卡诺循环由两台工作在同一热源和同一热沉之间的操作正好相反的卡诺热机来实现，是一种可逆循环。

卡诺使用反证法证明卡诺热机效率最高。假设有一台比卡诺热机效率更高的热机 A，令它完成卡诺循环的正过程，再用一台卡诺热机完成逆过程，这台卡诺热机的任务是将热源经热机 A 流入热沉的全部热质返送回热源，结果只需要由热机 A 产生的全部热动力的一部分。显然，这与永动机不可能性的前提相矛盾，因此比卡诺热机效率更高的热机不存在。作为卡诺循环的一个必然推论是：卡诺热机产生的热动力与工作物质无关。卡诺把他的理论总结为这样几句话：“热动力与用来产生它的工作物质无关，它的量唯一地由在它们之间产生效力的物体（热源和热沉）的温度来确定，最后还与热质的输运量有关。”这就是著名的卡诺定理。

卡诺在 1824 年论著中提出了另外七个定理，其中的三个在热力学发展史上占有重要的位置。第一个定理是：对于所有气体，在等温过程中吸收或放出的热量相等，只要所做的功相等。这实际上是等温过程中的热力学第一定律。第二定理是：对于所有气体，等压比热与等容比热的差都相等。第三个定律是：在相同的温差范围内，

相同的热量产生的热动力不相等，热源的温度愈低产生的热动力愈大。这个定理是对上述“卡诺定理”的重要补充，它表明热机的效率不仅与温度差有关，而且与热源的绝对温度有关。在绝对温标提出来以后，卡诺热机的效率就可以表示成：

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{\Delta T}{T_1} \quad (2)$$

式中  $T_1$ 、 $T_2$  分别表示热源和热沉的绝对温度。

卡诺的 1824 年论著未得到及时重视，原版直到 1835 年才推售完毕。关于卡诺和卡诺理论的评论也只有过两次，一次是书评、第二次出现在关于他的一篇悼词中。直到 1848 年威廉·汤姆孙在卡诺热机理论的基础上提出绝对温标概念后，才引起人们对卡诺的注意。

由于卡诺理论是以热质假说为基础的，因此尽管他完美地解决了热机效率的极限问题，却未能把他的理论与普遍的能量守恒现象联系起来。后来他接受了菲涅耳 (A. J. Fresnel) 的光的波动理论，根据热辐射和光辐射的相似性判断热是物质粒子的一种振动，从而否定了他原先坚持的热质理论。这种思想转变并未破坏他的热机理论，因为我们完全可以用热量来取代他的热质，而热量又是绝对温度的函数，这一过渡完全可以由绝对温标来实现。卡诺在晚年转向热的动力学理论研究，但很少为人所知，就连他的支持者威廉·汤姆孙也不知道。

1850 年，克劳修斯 (R. Clausius, 1822 ~ 1888) 发表了《论热的运动》。他在这篇论文中批判了热质说关于潜热的观点，提出了内能的概念，总结出热力学第一定律。

热质学说遇到的最困难的问题是绝热过程。因为在

绝热过程中没有热质的流进或流出，热量何以产生或消失？热质说论者借助于潜热来摆脱困境。他们假设热质有两种形态，即自由形态和潜在形态；自由热可感知，能用温度计测量，但潜热因束缚于每个分子而超脱人的感官；当物体（特别是气体）被压缩时，潜在的热质被“挤”了出来，变成自由的形态，使物质温度升高。克劳修斯根本否定潜热的存在，他认为在绝热压缩过程中物质温度的升高是付出了机械功的必然结果。这里存在机械功向热能转化的关系，正如焦耳实验所表明的事实那样。实际上焦耳实验近似于一种绝热过程，他所测出的热功当量反映了绝热条件下热力学第一定律的内容。克劳修斯指出，焦耳实验中浆轮所做的功几乎都用来提高水的内能，如用公式表示则有：

$$dU = -dw, (dQ = 0, \text{绝热情况})。 (3)$$

他又在这个基础上考虑到非绝热的情况。他认为在一般情况下，机械功除使热力学系统的内能  $U$  发生变化外，还会产生一定的热量传系统外部。根据这种假设他就给出了热力学第一定律的一般公式：

$$dQ = dU + dw (4)$$

当时他还没有使用符号  $d$  表示不完全微分，不过他知道热和功都不是系统的状态函数。

由此可知，热力学第一定律是经由焦耳实验提出了一个特殊形式（绝热条件下的形式），最后由克劳修斯通过批判热质说的潜热，将它提高到一种普遍的形式。热力学第一定律实质是能量守恒定律在热力学范围的具体化。虽然我们从亥姆霍兹的《论力的守恒》中可以看出，热学范围不可能超越能量守恒与转化定律的约束，然而它在这一方面只给予我们一种观念的形象，或者说一种

哲学的思考 ;如果我们要深刻了解热学领域的能量原理 ,还必须具体掌握卡诺-焦耳-汤姆孙-克劳修斯的热力学体系。

## 争鸣引出金凤凰

1820年4月,奥斯特(H.C.Oersted,1777~1851)发现了电流的磁效应,标志着电磁学的开始。接着,安培(A.M.Ampère,1775年~1836年)在1820~1827年间创立了超距论的电动力学。1831,法拉第(M.Faraday,1791~1867)发现了电磁感应定律,对超距论电动力学提出了第一次批判;1837~1838年间,他又初步提出场论的概念;至1851年,他正式提出了电磁场论的思想。1845~1846年间,诺埃曼(F.E.Neumann,1798~1895)和韦伯(W.Weber,1804~1891)发展了安培电动力学,创立起德国电动力学体系,在欧洲大陆风靡一时。1861年,英国19世纪伟大物理学家、电磁波预言者麦克斯韦(J.C.Maxwell,1831~1879)提出电位移和位移电流的概念,对超距论电动力学提出了第二次严肃的批判;1861~1865年间,他又从理论上预言电磁波的存在,建立了著名的麦克斯韦方程组。他的理论最后在1886~1888年间为赫兹(H.Hertz,1857~1894)的实验所证明,历史用光彩夺目的大字写下:电磁波发现了。

伏打电池的发明(1800年)宣告了第二类电源(相对于第一类电源——静电摩擦电源而言)时代的开始。  
恒稳持续的电流

为化学家开辟了新领域,电化学随即诞生了;它同

样为电磁学创立提供了条件。然而，在整整二十年中几乎没人考虑利用这种条件去寻找电和磁的联系。他们受到一种思想的约束：电和磁是完全不相同的物理实体——这是库仑(C . A . deCoulomb , 1736 ~ 1806)在创立他的定律后不久提出的论断。完全超脱于这种思想的奥斯特根据康德的自天力都有一个共同的根源的哲学原理，始终坚持认为电和磁不是互相独立的，它们必然存在一种尚未发现的关系。经过长期探索后，他终于发现电流可以将磁针推向与电流垂直的位置。他用“电碰撞”(conflictuselectri)的概念来解释电流磁效应。所谓“电碰撞”，是指在电流周围存在着一种环形运动的力，它可以穿透非磁性物质，但不能穿过磁体，一旦撞上磁体就会发生撞击，致使磁体的轴转到与电流相垂直的方向。这里蕴含有最原始的场的思想。奥斯的发现很快被法国物理学家接受下来，但是他的解释却被法国人所拒绝。自从库仑时代以来，他们一反其祖辈笛卡尔将一切自天力归化为物质涡旋运动的作法，跟随拉普拉斯(P . S . Laplace , 1749 ~ 1827)的简略纲领，将一切物理现象都简化为粒子间的吸引或排斥的力学现象，使超距论红极一时。被誉为“电学中的牛顿”的安培带着超距论者的一切特征走进了电磁学。他引进了术语“电动力”，意指由电流产生的动力。他像牛顿把质量分解为无数质点那样，把一个电流视为无数电流元  $ids$  的集合，进而推导出类似于质点引力公式的安培公式。安培还用实验证明，两个螺线管如通有电流，它们将跟两根磁棒那样产生相互作用。他由此认为，磁体之所以会相互作用，并不是因为他们有什么磁性粒子，而是因为它们当中存在电流，一根磁棒中的电流作用于另一根磁棒中的电流，

便产生了磁棒之间的吸引力或排斥力。这样就产生了安培的“磁就是运动中的电或电流”的思想。安培在电流的基础上统一了电和磁，或者更确切地说，他取消了磁的实体。其优点在于可将复杂的电磁现象或纯的磁现象化为可付诸数学分析的电流元形式，其做法与牛顿在处理万有引力时将奇形怪状的物体化为质点的集合的方法如出一辙。安培在这个基础上创立了电动力学。

尽管安培电动力学具有数学上的美及内含着的实体高度统一的优点，但由于它强调超距的电动力作用，忽视了电流周围的空间——场的作用，因此不能解释诸如电磁感应这类现象。早在1822年，阿喇戈(D. F. Arago, 1786 ~ 1853)和洪堡(A. von Humboldt, 1769 ~ 1859)在格林维治山用磁针振荡法测量地磁强度时就发现，金属可以阻尼磁针的振荡，这是物理学界发现的第一个电磁感应现象，但当时谁也无法解释。阿喇戈还为此做了一个铜圆盘实验，以期引起人们的兴趣。他装置了一个可以旋转的铜圆盘，盘的正上方悬吊着一根磁针，当圆盘旋转时，磁针跟着旋转。安培对此作了这样的解释：当圆盘开始旋转后，它就分离出正、负两种电粒子，电粒子运动形成电流，这种电流与磁针中的分子电流相互作用便形成了磁针转动的动力。然而，他却回答不了为什么磁针先行转动而铜圆盘也跟着旋转的原因，这就暴露出超距论电动力学的弱点。这个弱点正在于缺乏对电流周围的空间或介质即场的考虑。

这个现象直到1831年才由法拉第给予了正确解释。法拉第不受各种特设的电和磁的实体的限制，放眼于电和磁的各种可能的关系，当许多人认为奥斯特发现的电流磁效应是所有电磁关系中的唯一基本内容时，他则根

据对称性这个普遍的自然法则，判断必然存在逆奥斯特效应，即磁感生电流的效应。阿喇戈的发现和实验正体现了这样一种效应。至于产生这种效应的条件，则是他要寻找的东西。1831年底，他通过大量的实验认识到，在电流和磁体周围的空间存在着一种力的状态，这种力态一经改变或受到扰动，便能使处于这个空间的金属感生出电流。就拿阿喇戈圆盘实验来说，由于铜盘的运动扰动了磁针建立的空间稳定力态，使它自身感生出电流，这种电流与磁针的相互作用便形成了带动磁针运动的力；反过来讲，如果磁针先行运动，它产生的空间力态不断地变化，也能使铜盘产生电流，从而带动圆盘旋转。法拉第把这种力态称为“电致紧张态”（electro-tonicstate）。为了定量描述“电致紧张态”，他又引进了磁力线概念，据此总结出电磁感应定律。这是安培无法完成的业绩。

我们清楚地看到，法拉第在处理电磁感应现象时已初步用到了场的概念。康德关于“我们只有通过空间力才知道这个空间中的物质”的思想，对法拉第电磁场论的思想形成起了重要的作用。及至1837~1838年间，法拉第在研究静电感应现象时，又提出用介质中的粒子间的相邻作用代替泊松（S. D. Poisson, 1781~1840）等人的静电超距作用，提出了电力线的概念，将场引入了介质，初步确立了场论的方法。1850年11月，他在伦敦皇家学会宣读了题为《磁导力》的论文，提出了磁导率的概念，他根据物质的磁导率，即物质能让磁力线通过的能力，将物质区分为顺磁体和抗磁体。

翌年12月，他又宣读了《论磁力线》，明确指出磁力线是真实存在的实体，是场的表象。1852年，他在《论

磁力线的物理特征》和《论磁力线》两篇论文中分析了电力线、磁力线、电流力线、光线、热力线及引力线的共性和特性，在各种力线或场的基础上统一解释了各类自然力的现象。其中颇为新颖的观点是：物体的相互联系的桥梁是力线的振动，例如电流与磁体的作用是通过磁力线的振动来实现的。这里就具有关于电磁波的最原始的设想。这种设想深深地吸引年青的麦克斯韦，在他刚从剑桥大学三一学院毕业后，就开始用数学的方法总结法拉第场论思想，最后从理论上预言了电磁波的存在。

### 麦克斯韦的贡献

麦克斯韦在剑桥大学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，但他提出的电磁学概念（特别是磁力线和电致紧张态的概念）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。正如他所说：“当我开始研究法拉第时，我发觉他考虑现象的方法也是一种数学方法，虽然他不是用通用的数学符号的形式来表示；我也发现，这些数学方法能够表示为一般的数学形式，而且可以与职业数学家的形式相比美”。

麦克斯韦在下述三篇论文中奠定了电磁场数学理论的基础：

( )《论法拉第力线》(On Faraday's Lines of Force, 1855 ~ 1856)；

( )《论物理力线》(On Physical Lines of Force, )

1861 ~ 1862) ;

( ) 《电磁场的一个动力学理论》  
(ADynamicalTheorrOfElectromagneticField, 1864)。

麦克斯韦理论预言电磁波的存在也经历了三个阶段。第一阶段：通过电场和热流场、流体力场的几何类比，使力线动力学化和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，联系电扰动和磁扰动，形象地将电磁波运动表示出来，并提出了电磁场运动学方程和动力学方程。第三阶段：运用拉格朗日的分析数学方法，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波的同—性。

现在让我们循着上述三个阶段的轨迹，来分析麦克斯韦电磁波理论的成因。

早在 1842 年，W. 汤姆孙(WilliamThomson, 1824 ~ 1907)在《论均匀固体中的热的匀速运动及其与电学数学理论的联系》一文中，把拉普拉斯的势函数的二阶微分方程普遍用于热、电和磁的运动中，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。麦克斯韦在研究法拉第力线时吸收了汤姆孙这种类比方法，把它发展成研究各种力线的重要公式。例如，在一块各向同性的无限大的均匀介质中镶有一块流体源，根据不可压缩流体的性质，介质中任意一点的流体的压力为

$$P(r) = \frac{kQ}{4\pi r}$$

式中  $Q$  表示单位时间内通过包围流体源的任意封闭曲面的总流量， $r$  表示由源到所求点的距离， $k$  是与介质性质有关的系数。

这个现象是大家熟悉的，但只有从几何学的角度才能挖掘出蕴含在这个公式中更广泛的意义。麦克斯韦素有从几何图形分析问题的习惯。同样一道题，其他人只用一连串的分析数学加以解决，而麦克斯韦却要花许多时间来画几何图形，看来有点笨拙，实际这种做法却有一种很少为人所知的优点，它可以帮助分析者用最经济的办法找到那些具有共同数学关系的相似物理现象。麦克斯韦正是这样发现了电场与流体力场的相似性。试想想，在上述流体情况下，如果流体源是一点，以它为圆心作同心球，那么每一个球面上的压力是相等的，这样的圆球面就是等压面。在静电情况中，这些球面便是等势面，正如麦克斯韦所说：“在电学中势对于电，在流体力学中压力对于流体和在热力学中温度对于热，有着共同的关系。电、流体和热全都趋向于由一个地方流到另一个地方，只要势、压力或温度在第一个地方高于第二个地方，这种情况就能发生”。

这样，电学中的势等效于流体中的压力，麦克斯韦便推导出电场强度：

$$E = -\nabla V(r) = -\nabla P(r) = \frac{kQ}{4\pi r^3} r$$

只需要将  $Q$  定义为电量。如令  $D=Q/4\pi r^2$  ( $D$  在这里表示通过球面上单位面积的电通量)，就得到一个一般公式：

$$E = kD$$

对于磁场和电流的情况，类似关系有  $H = \frac{1}{\mu} B$ ，和  $E = \rho j$

麦克斯韦深刻地看出，在这些关系中，有两类性质不同的物理量，一类为强度量（ $E, H$ ），另一类属于非广延的通量（ $D, B$  和  $j$ ）；强度量与对应的非广延的通量总存在着一种线性关系。超距论电动力学是绝对做不到这一点的。

麦克斯韦完成静电学和静磁学的场论化的工作后，就在论文（ ）的第二部分着手确立电磁学的动力学场的基础。这方面关键的一步是，将法拉第的“电致紧张态”定义为电磁场的动量。这样一来，电磁场就物质化和运动化了，就像一个定型的力学实体，具有了这种实体的一切特征。正如他所说：“电致紧张态”是电磁场的一种运动性质，它具有确定的量，物理学家应当“把它当作一个物理真理接受下来，从它出发推导出能够用实验检验的定律”。麦克斯韦以电磁场动量  $A$  为基本量，重新总结了前人已发现的六条电磁学定律：

$$(1) \quad \oint A \cdot ds$$

$$(2) \quad B = \mu H$$

$$(3) \quad \oint H \cdot ds = I$$

$$(4) \quad j = \nabla \times E$$

(5)  $W = \int j \cdot A ds$  ( $W$  表示载流线圈在电磁场中能势能)；

$$(6) \quad E = -\frac{dA}{dt}$$

定律(1)和(3)说明矢量场中的广延通量可以表示对应强度量的环路积分。这样，麦克斯韦又为我们提供了一个崭新的概念，即力的环路积分不再是力，而是一个

广延通量。应当指出的是，超距论电动力学也能推导出上面六个定律，不过他们的  $A$  不是电磁场动量，而是矢量势；在他们的理论中必须有电流或磁体存在，而在麦克斯韦理论中无需考虑它们，只要有电磁场就足够了。在麦克斯韦提出电位移和位移电流后，这个问题就变得明显了。

式(3)、(4)和(5)中都含有电流的项。按照通常的概念，电流是带电粒子在导体中的运动。按照动力学，物体既然有动量，就必然有速度；按照麦克斯韦的电磁学，电磁场既然有动量，它必然具有速度。麦克斯韦按照电磁学与动力学的平行关系，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。因此，麦克斯韦不可避免地要引入位移电流的概念。

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。要做到这一点，最起码的条件是要根据已有的实验事实确定电运动和磁运动的方式。我们知道，不论在导体中还是在电解质溶液中，电都是处于平动状态，而磁的运动只能是旋转运动，因为电流产生的磁场是圆形的，况且法拉第发现的磁致光旋转现象也说明磁对偏振光作用显现一种旋进状态。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惰性轮的作用，这些电粒子只会转动而不产生平移；在两个旋转方向相反的分子间，电粒子不发生转动而产生平动，从而形成电流。这是麦克斯韦用几何方法分析问题的一个表现，是他用以建立电磁场运动学方程和动力学方程的直观工具。他在这里再次运用了动力学的方法，从亥姆霍兹(H. von Helmholtz, 1821 ~ 1894)的涡旋流体方程平行地推导出电磁场的运动学方程

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

和动力学方程

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

上述方程表明磁扰动可以产生电场，而且磁场中有电流流动，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，但它正是麦克斯韦动力学介质假说的必然结果。这两个方程，已把电磁场的波动性质勾画了出来。

麦克斯韦在论文( )中的另一项重要贡献，是从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。他的思路是耐人寻味的。自从菲涅耳时代起，光被认为是一种特设的弹性流体——以太的横向振动，其振动的传播速度为

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

此处  $k$  为光弹介质的弹性模量， $\rho$  为其密度。

麦克斯韦根据这种理论假说电磁波亦即为电磁场介质的横向振动，其波速自然取上述形式，不过电磁场介

质的密度为  $4\mu$ ， $\mu$  为磁导率。

至于它的弹性模量，已由电位移公式  $E = kD$  给出。此处  $k$  又可由  $D =$

$$\frac{Q}{4\pi r^2} \quad (Q \text{ 为电量}) \text{ 及 } E = C^2 \frac{Q}{r^2} \text{ 得到，为 } k = 4\pi C^2， \text{ 这样就得到电磁波}$$

的速度为：

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

在真空条件下， $\mu = 1$ ，所以  $V = C$ 。

$C$  是怎样一个数值呢？根据  $E = C^2 \frac{Q}{r^2}$ ，我们知道  $c$  是电量的静电单

位对电磁单位的比值。柯尔劳施 (R. Kohlrausch) 和韦伯在 1856 年已测得这个单位比值等于 310,740,000 米/秒。这使麦克斯韦立刻想到，这个比值与布拉德雷 (T. Bradley) 用光行差的方法和菲索 (A. Fizeau) 用齿轮法及傅科 (L. Foucault) 用旋转镜面法测得的光速极为接近。他由此得到这个划时代的结论：电磁波在真空中的速度等于光速！

这个事实说明科学思想的潜流作用：从光弹介质到电磁介质发生了一整套思想及公式的平移。另外，它还说明，各专门领域的实验发现一经巧妙地结合起来，也能在它们的边沿科学中提出新的理论见解。麦克斯韦在预言电磁波速等于光速过程中运用过的“电磁波速=电学单位的比值=光速”的关系，不正是说明了这个问题吗？

1864 年，麦克斯韦在他的论文（ ）中抛弃了在论文（ ）中提出的电磁场的动力学介质的模型，而从拉格朗日的分析力学入手推导出了电磁场方程组，它们由二十分量方程（或八个矢量方程而不简单是今日教科书上的四个方程）组成。他由这个方程组推导出电磁波动方程：

$$k\nabla^2 B = 4\pi\mu (d^2B / dt^2)$$

式中  $k = 4\pi\mu c^2$ 。显然，电磁波速：

$$v = \sqrt{k / 4\pi\mu} = \frac{c}{\sqrt{\mu}}$$

与论文（ ）的结论完全一致。

1873年，麦克斯韦在《电学和磁学专论》一书中预言光压存在，第一次用电磁波理论解释了光压，并算出不光在大小上等于电磁场的能量密度。1901年，列别捷夫(P. Lebedew, 1866~1911)的光压实验证实了麦克斯韦的理论预言。

## 1879年柏林科学院悬奖

如果说从17世纪末到18世纪初欧洲大陆盛行着笛卡尔的涡旋理论而英国人信奉着牛顿学派的超力学的话，那么到了18世纪末情况就完全颠倒过来了。法国大文豪伏尔泰曾经生动描绘过涡旋论与超距论的这种对峙状态，他说：“你在巴黎看见由充满着稀薄物质的涡旋构成的宇宙；而这些东西在伦敦却荡然无存，我们什么也看不到，在你周围只有引起海潮的月亮的引力”。自从1785年库仑定律创立后，法国人抛弃了涡旋理论，至及1820~1827年，安培就在超距论基础上创立了电动力学，成为超距论电磁学派的一代宗师；相反，英国人却把超距论从电磁学中驱逐了出去，出现了麦克斯韦电磁场论的电磁学派。

法拉第在批判安培超距电动力学基础上发现电磁感应定律后，在超距论者中引起了震惊，他们不得不作些

修改，以便能够解释他们原来不能解释的现象。1845年，德国物理学家诺埃曼将安培分子电流假说推广到宏观电流情况，给产生磁作用和电磁作用的电流定义了一个位置函数——矢量势  $A$ ：

$$A = F\left(\frac{j}{r}\right)$$

此处  $j$  为电流密度， $r$  为由电流到所求点的距离。他在此基础上总结出法拉第电磁感应定律：

$$\varepsilon_i = -\oint \frac{dA}{dt} \cdot ds$$

式中  $\varepsilon_i$  表示感生电动势， $dA/dt$  为矢量势对时间的微商， $ds$  表示封闭的导线回路上的线元。这样一来，似乎超距论电动力学与法拉第的电磁学统一了。但其实不然，诺埃曼的理论仍然处处体现安培电动力学的特点，他的矢量势必须由闭合电流产生，他所求的感生电动势也是针对闭合导体而言的。如果回路中有一电容，他就无能为力了。显然，诺埃曼的电动力学仍然缺乏场或介质的概念。由于他着眼点是产生作用的电流和被作用的电流，他就无法处理在两个电流之间的动力学空间，因而也无法预言在这个空间中最活跃、最本质的现象——电磁波。

1846年，德国另一位著名物理学家韦伯提出一种假说，认为导线中的电流是由正、负电粒子的两个方向运动构成的，并在牛顿引力公式基础上建立了韦伯电作用公式：

$$F = \frac{e_1 e_2}{r^2} \left[ 1 - \frac{1}{c^2} \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{2r}{c^2} \left( \frac{d^2 r}{dt^2} \right) \right]$$

$F$  表示电粒子之间的作用力， $r$  表示电粒子  $e_1$  和  $e_2$

之间的距离。韦伯认为他的公式将库仑的静电力（第一项）、安培的电动力（第二项）和法拉第的电磁感应力（第三项）全部统一起来了。按其言，他的电动力学可以推导出安培电动力学推导不出来的现象——电磁感应现象，因此比安培的理论具有更广泛的代表性。不幸的是，他跟诺埃曼一样，没有考虑电磁场空间或介质的作用，这种力仍然属于沿直线传播的中心力，且其传播是不需时间的。韦伯公式中虽然有一个  $c$ ，但它在韦伯思想中不是电力传递的速度，而仅仅是电量的静电单位对电磁单位的比值而已。

除了安培、诺埃曼和韦伯的超距论电动力学外，还有一种准超距论电动力学。这两类电动力学的共同点是，只承认中心力的作用，而不考虑场的作用；不同的是，准超距电动力学承认电力的传递是需要时间的。1858年德国的黎曼(G.F.B. Riemann, 1826~1866)，以及1867年丹麦的洛伦茨(L. Lorenz, 1829~1891)所提出的推迟势理论属于准超距论电动力。

综上所述，19世纪中叶的电磁学处于百花齐放的时代，还没形成统一的理论。亥姆霍兹(H. von Helmholtz, 1821~1894)把这个时期的电磁学领域称为“无路的荒原”。

从1870年开始，亥姆霍兹着手统一诺埃曼、韦伯和麦克斯韦的理论。但他很快就发现，韦伯的电作用定律与能量守恒定律相矛盾，因为在韦伯的电荷系统中，势能不仅与相对距离有关，而且与相对速度有关。韦伯坚持认为，他的理论在微观条件下与能量原理相符合。论战达到了白炽化程度，严重损害了个人感情，以致在1881年的巴黎第一届国际电气工程师会议上，亥姆霍兹

极力反对用“韦伯”命名电工学实用单位。这场论争破坏了大陆电学家们对韦伯的信任，相反使他们逐步熟悉了麦克斯韦。

亥姆霍兹又认识到，如果麦克斯韦电磁场理论正确的话，诺埃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的电路的振荡的一个特例。这样就得证明麦克斯韦的位移电流的存在。于是，他是1879年以“用实验建立电磁力和绝缘体介质极化的关系”为题，设置了柏林科学院奖。这个命题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体介质产生位移电流；(3)在空气和真空中，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的电磁波实验的先导。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。

### 仅有发明家还是不够的

科学技术史上曾有过许多偶然的发现，有些产生过重要作用，而有些却未给人们留下深刻的印象。究其原因，成功者在于有较好的思想基础和科学背景。这类“偶然”发现则可以认为是科学思想发展的必然结果或历史必然的不可缺少的先导。例如，奥斯特在1820年“偶然”地发现电流的磁效应是他长期怀抱着自然力统一的思想的成果，结果必然地导致了电磁学的诞生。又如，19世纪中下叶在电的原子论处于萌芽阶段时发现的阴极射线

现象，导致了电子的发现。但是，有些偶然发现由于发现者缺乏必要的思想准备或者发现者不能从理论的高度预言它们的未来、甚至不能确认它们在当时科学技术中的地位，那么它们就很快被人们遗忘，只好等待另一些人从新的高度再次将它们发掘出来。赫兹以前的一些发明家偶然触到电磁波的事实便是最好的说明。

1871年 E. 汤姆孙 (E. Thomson) 就曾发现，当一个具有初、次级的线圈通有脉动电流时，他可以用一把小刀在附近铁桌的边角、水管、甚至三十英尺外的蒸气机上引出电火花来。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”，在隔壁的房间、地下室里、甚至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. 汤姆孙却不能由此形成电磁波的概念。

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。当时新闻界报道他的发现时说：爱迪生发现了至今还埋藏在人类无知深渊里的新原理。其实大谬不然，这个原理早在 1861 年就为麦克斯韦所提出，只不过爱迪生和那些新闻专家们一无所知罢了。等到赫兹在 1888 年实验证明电磁波存在消息公布后，爱迪生悔之莫及了。诚如他后来披露的那样：“使我感到迷离的是，为什么我没有想到利用这些成果”。

现在被列为无线电先驱之一的美国发明家多尔贝尔 (A. E. Dolbear) 早在 1882 年就实验过无线电话，并获美国专利 (第 350299 号和 355149 号)。本来，他完全有权声称发现了电磁波并去申请柏林科学院 1879 年的悬奖。可是他毕竟是位发明家，发明家不去关心科学界的

发现而科学理论家不去理会技术的发明的这种科学与技术脱节现象似不少见。因此，多尔贝尔的发现在历史上又被列为一种“早产”的知识，实为憾事！

再让我们看看一位英国人——休斯(D. E. Hughes)在1879年做过的一个实验。他将电池通过一个自动开关接于振荡线圈上，当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500码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。这就是当时还不理解的电磁波反射现象。剑桥大学的教授、麦克斯韦的老师斯托克斯(G. G. Stokes)看完他的表演后无动于衷；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。”话虽没说错，但这对还没有任何电磁波概念的休斯来说却像一瓢冷水。休斯得此一言，心情不言而喻，遂决意不再发表他的实验报告。

上述事例说明，电磁波的发现不可能属于技术方面的发现，在这方面仅有发明家是不行的。麦克斯韦的位移电流、运动的电磁场及电磁波同光波的同—性等项概念，在当时对许多物理学家来说尚且是一些十分深奥的问题，这些发明家更是无法将麦克斯韦的理论用来解释他们的这些意外发现了。因此，对电磁波的实验证明就历史地落在深刻理解麦克斯韦理论的赫兹身上了。

#### 赫兹实验证明位移电流存在

自从1879年柏林科学院悬奖以后，赫兹一直在思考采用什么样可行的方法证明位移电流的存在。问题难就难在长期来就形成了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。这种思想束缚的严重性从现在

的一些学生的言谈中仍可找到一斑，因为有些学生学过麦克斯韦方程组后虽然能从理论上接受位移电流的观点，但他们却认为这仅仅是麦克斯韦理论的一个数学模型而已。位移电流既然是一种电流，那么除了它产生的场所与传导电流不同外，它应具有传导电流的一切特点，如能产生热效应、电动力学效应和电流的磁效应等等。其中以磁效应作为检验位移电流存在的标准最为可行。1879年科学院奖悬文中业已指出这一点，这是由于亥姆霍兹联想到美国物理学家罗兰（H. A. Rowland, 1848 ~ 1901）的一个实验而得出的结论。这个实验就是罗兰在1876年做的十分著名的运动电荷磁效应实验。他将一粒子电荷镶在一个绝缘圆盘的边上，让盘快速旋转，结果使附近的一根磁针扰动了。亥姆霍兹由此得到了启发：从相对运动的观点来看，运动的电荷就好像介质中的位移电流，既然运动电荷能产生磁效应，位移电流也应当能够产生磁效应。方向既已指明，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了。路子虽然很多，未必条条可行。例如，我们可以设想用一迅变电场或磁场使一块介质交变极化，同时观察这块介质是否产生出作用于磁针的力。这种方法诚然经济，但过于直接而难以实现，因为磁针在迅变位移电流作用下是无动于衷的，正如一种极速的交流电不能使磁针运动那样。赫兹自然不会采取这种方法。

1885年，赫兹到卡尔斯鲁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种名为黎斯（Riess）线管的振荡线圈。这种线圈具有初级和次级，若给初级绕组输入一脉动电流，在次级线圈两端的狭缝中间便会产生电火花。赫兹断定这是初级线圈中电流振荡感应的

结果。他又发现，如果调整初级与次级的相对位置，火花会有明显的变化，而且当次级线圈在某些位置上时，根本不会产生电火花。敏捷的赫兹立即想到，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或振荡的，它反过来又影响次级线圈，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，认为解决柏林科学院的问题的时机到了。他说：“在变化的条件下我偶然发现了次级火花现象，……起初，我以为电扰动可能是紊乱的和无规律的，但是当我发现次级导体中存在一个中性点时，……我就信心百倍地相信柏林科学院的问题能够解决了”。

1886年赫兹设计了一种直线型开放振荡器来代替黎斯线圈中的初级线圈。做法是：将一根短而直的导线截为两段，截口处形成火花隙，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。虽然这种振子的频率需要用现代的理论来计算，特别在赫兹的时代还没有分布电容和分布电感的概念，但是赫兹还是根据开耳芬的振荡周期公式对振子的频率作了粗略的估计。赫兹计算后发现，该振荡器的频率极高，足以使次级线圈产生电火花并使附近的介质极化。1886年12月他给亥姆霍兹的一封信上说道：“我已成功地、毫无差错地显示一个直线电流的感应作用。我冒昧地希望用这种方法将会解决与这个现象有关的一两个问题”。

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”(induction=balance)，它由一个直线型开口振子和一个圆圈形带火花隙的感应检验器组成。实验时给振子输入脉动电流，使之起振，同时调整检验器

的位置，直至它的火花隙不产生火花时为止（这个位置即为赫兹所说的“中性点”位置）。如果这时将一块金属挪近“感应平衡器”，由于金属中感应出变化的电流（即涡流电流），从而产生一个附加电磁场作用于感应器，使它重新发射出电火花。这种感生电流又发射出一种附加电磁波，致使感应器的“平衡”状态被破坏，因而产生出电火花。同时，“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的话，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。赫兹先后将制成厚板的沥青、人造沥青、纸、干木、砂石、硫磺、石蜡、以及用橡皮槽盛好的 45 公升汽油挪近“感应平衡器”，预料中的现象果然发生了。

赫兹就是这样证明了麦克斯韦关于位移电流的预言，获得了柏林科学院 1879 年悬奖。赫兹这次实验构成了他的电磁波实验的第一步。他的这项实验成果载于他所写的《论绝缘体中电扰动产生的电磁效应》。

## 电磁波和光波同一性的证明

赫兹上述实验只解决了 1879 年悬奖课题的前面两条假设，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。由于这个问题很难，亥姆霍兹将它删掉了，而赫兹却认为这正是体现麦克斯韦电磁场理论的最关键问题。赫兹说：“使我惊奇的是，新理论（即麦克斯韦理论的关键不在于这两条假设，……

我觉得第三条假设包含着法拉第的，因而也就是麦克斯韦的观点的宗旨和特殊意义，在我看来，更应该把目标放在它的上面”。

任何困难的问题都不能用简单的实验来证明，如果能用比较直接的方法来观察到问题的真象，那么这个问题就不成为难题了。在受因果律约束的物理现象中，许多难于发现的实质不是从原因推出结果，而是由结果来推导原因。电磁波与光波的同—性，是麦克斯韦电磁场理论的必然结果，而空间的位移电流又是他的理论的不可缺少的前提。赫兹因此认为：要证明电磁波就是光波，首先就得确定电磁波速度是否等于光速。

在讨论赫兹如何测量电磁波的速度之前，不妨回顾一下赫兹以前其他物理学家在这方面所走过的道路。

随着有线电报在 19 世纪 30 年代的兴起，人们就开始考虑电流的速度问题。1834 年，惠斯通（C. Wheatstone, 1802 ~ 1875 年）用旋转镜面法来测量电流的速度。其做法是，在一根数英里长的导线上每隔半英里截出一个火花隙，在导线两端加上高电压的电源，结果各火花隙相继产生电火花，用旋转镜测出相邻的两个火花隙产生火花的时间间隔，便能求出电流的速度。他测得的电流速度为每秒 283,000 英里，比光速还大！这是根本不可能的。1850 年，菲索（A. Fizeau, 1819 ~ 1896 年）根据同样的原理，利用旋转齿轮的方法测得电流速度为  $1.12 \times 10^5$  英里 / 秒。随着惠斯通电报公司在 1846 年的成立，欧洲各国相继架设了许多电报线，电流的速度问题显得特别重要了，实验测定电流速度的人也就多了起来，但是他们均未得到统一的结果。鉴于这种情况，开耳芬作了错误的判断：导线中的电流

不可能有确定的速度。

麦克斯韦以前的物理学家认为电波只在导体中传播，即便达到这种认识也是付出过许多代价的。最早认识到电流是一种波动形式的是美国物理学家亨利（J. Henry, 1797 ~ 1878 年）。他在 1837 年就提出载流导线表面存在着一种电流波，并预言，如果在一根导线正中部输入电流，电流波将从导线的两个端面反射回来，以致在导线中形成驻波。33 年后，贝佐尔德（W. von Be-zold, 1837 ~ 1907 年）做了一个电流驻波实验。其实验装置是一个带有火花隙的线圈，火花隙的两端与一长导线相接。实验时用莱顿瓶通过放电的方式给线圈输入电流，由于线圈具有选频作用，它从电火花的宽频谱中选择出一个带宽狭小的电流波，结果又将它传入长导线，在导线中形成电流驻波。贝佐尔德把一块均匀撒布着石松子的玻璃板放在这根导线上，石松子在电流驻波的影响下形成疏密有致的图案。他根据图案测量出电流波长为 15 厘米。他所测量的电流驻波实际上是沿导线传播的电磁驻波。其方法对赫兹有一定的影响。

法拉第在 1857 ~ 1858 年间进行过一次电磁波速度的测量（当然那时他还没有明确的电磁波概念，他认为他是测量磁力在场中传播的速度）。他在一个很大的房子里平行放置三个线圈，中间那个是施感线圈，两边的是感应线圈。两个感应线圈与一电流计连接，连接的方式要保证从两个线圈流来的感应电流以相反的方向流过电流计。法拉第认为，如果两个感应线圈尺寸相同，并与施感线圈等距，电流计的指针就不会偏转。但如果一个感应线圈与施感线圈的距离要大些，那么电磁波到达两个感应线圈的时间就略有先后之别，电流计指针就应

当先向一边偏转而后向另一边偏转。他希望由此算出电磁波的速度。然而事与愿违，不管他怎样拉大一个线圈的距离，电流计指针始终不会偏转。显然他对电磁波的速度估计不足。这也难怪他没有这点常识，因为麦克斯韦在 1861 年才第一次预言电磁波速度等于光速。法拉第后来又动用了伦敦皇家研究院一块长度在 100 英尺以上的场地，仍然没有成功。在这样一块有限的空间，又是用如此直接的方法，是难以测量得出电磁波的速度。

1871 年，亥姆霍兹为了否定意大利人伯拉塞纳（P. Blaser-na）关于电感应速度极低的观点，做了一个很不精确的实验，他得到的电磁波速仅有 42.4 英里 / 秒，结果与光速相差甚远。1888 年 3 月，赫兹终于开始了划时代的测量电磁波速的实验。他吸收了法拉第失败的教训，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波节的间距（半波长），然后根据开耳芬在 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。

赫兹在一个长、宽、高分别为 15 米、14 米、6 米的教室里做了这个实验。沿教室纵向有两排铁柱子，实际可用空间为  $15 \times 8.6 \times 6$  立方米。他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，他使用了一个检验器，这个实验器实际相当于感应线圈，其形状与“感应平衡器”中的环形检验线圈大体相同。他用直线型振荡器作为波源，放在离锌皮 13 米远的地方。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。检验器在各种位置上对电磁驻波有不同的反应，大体情况是：处于波节处不会产生火花，处于波腹产生最强的火花。

赫兹根据这种反应测量出两个波节之间的长度，即半波长，此值为 4.8 米。他根据麦克斯韦的电磁波速等于光速的假说，算出该电磁波振动周期为  $1.55 \times 10^{-8}$  秒。他又根据开耳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  $1.4 \times 10^{-8}$  秒。这两个周期之差仅为  $0.15 \times 10^{-8}$  秒，他把这个微小的误差归结于测量的精度，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。

完成电磁波速等于光速的证明并不等于完成了电磁波和光波同一性的证明，但它是这种同一性证明中最重要的一步。同一性证明还应当包括在电磁波中显示光波的所有性质。问题十分复杂，路只能一步一步地走。英国著名电磁学家、麦克斯韦理论的追随者洛吉(O. Lodge, 1853 ~ 1936) 曾试图用一种直接的办法一下子就证明电磁波是光波，可是失败了。他在 1882 年企图通过级联变压器把电磁能变成光。这种级联变压器的每一级都能从前面一级拾取高频成分，越到后面输出的电磁波的频率就越高。洛吉希望在最后一级输出端之间看见光的产生，然而没有看见，因为最后一级输出的电磁波的最高频率才 1 亿周，离释放可见光的最低频率还很远。

赫兹在 1888 年采用了脚踏实地的办法一步一步地证明电磁波和光波的同一性。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 度的反射；他用高 2 米、孔径 1.2 米的抛物面使电磁波聚焦；他利用金属栅使电磁波偏振；他用一个硬沥青做的大棱镜使电磁波折射；……光所具有的一

切物理特性电磁波几乎都有。赫兹就这样完成了电磁波和光波的同性的实验证明，从此宣告人类发现了电磁波。

赫兹完成这项工作时年仅 31 岁。1889 年维也纳科学院授予他 Baumgartner 奖，法国科学院授予他 LaCaze 奖；1890 年他又荣获伦敦皇家学会 Rumford 奖章；1891 年都灵科学院授予他 Bressa 奖。可是，这位功勋卓著的电磁波发现者，在他还没走完第 37 个春秋的时候，就因牙疾和血液中毒而与世长逝了。从麦克斯韦预言电磁波的存在到现在，已有一百二十多年的历史；从赫兹实验证明电磁波的存在到现在，历史也已走完了一百个春秋。现在我们已经进入超大规模集成电路的时代，人类正按照莫尔定律（Moore's Law）——集成电路上的元件数平均每两年翻番的规律——发展着自己的电子工业。历史虽则不堪回首，但却应当回顾。因为我们还能从法拉第、麦克斯韦和赫兹等人身上学习到那种非同凡响的思想，那种无与伦比的原创力。我们应当从科学发展史和科学思想史的角度，找出他们的思想、方法和风格在潜科学和未来学中的地位，为人类今天的精神文明和物质文明的创造性活动奉献一件久经锤炼并将永葆锋芒的锐利武器。

## 智力大解放

自从 1892 年洛伦兹（H. A. Lorentz）提出“洛伦兹公式”以来，“洛伦兹力”便逐步变成人们熟知的概念。人们印象最深的是，可用它来计算电子在电磁场中的轨

道。洛伦兹公式仅是洛伦兹电子论的一部分，洛伦兹电子论的广泛内容及其对现代物理学诞生所起的作用，多年来都是物理学史工作者的一个重要课题。

1853年7月18日，洛伦兹出生于荷兰阿纳姆，他在那里上小学和中学，成绩总是名列前茅。他从小就具有多方面爱好，如文艺、历史等，但他特别偏爱物理学。他的语言模仿力极强，他对外文饶有兴味，能够从前后文推知外语语法关系。他在儿时曾经常到当地法国教堂作礼拜，以此练习法语，以至后来他使用法语如同操用本国语言一样熟练。

1870年，他考入莱顿大学，在那里主攻物理学和数学，他最喜欢听开塞（F. Kaiser）教授的理论天文学课程和物理学家黎克（P. L. Rijke）的课程。他在莱顿大学仅用了一年半时间就通过了所有学位课程的考试，随后又回到阿纳姆，在一所公立夜校执教，同时积极准备博士论文。他掌握了多门外语，能够流利阅读法国、德国和英国的物理学文献，打破了地区偏狭的局限，较早地进入了物理学的前沿。他在这时读了菲涅耳文集，接受了菲涅耳的光波动理论。菲涅耳的物理直觉能力、清澄的思维和深邃的洞察力，对他产生了深刻影响，以至使他也造就出这类优秀的素质。他后来在菲涅耳逝世百年的纪念会上对法国物理学同行说：“可以说，菲涅耳是我最感激的一位老师”。可是这位老师与他竟有几代人之差，他从来没有也不可能见过。

洛伦兹的学生时代，是经典电磁学理论迅速发展的时代。麦克斯韦（J. C. Maxwell）在1861年提出了位移电流的概念，在1864年完整提出了以介质的邻接作用为基础的电磁场数学理论，形成了一个与诺埃曼

(F. E. Neumann)、韦伯(W. Weber)和克劳修斯(R. Clausius)的超距论电动力学不相容的电磁学体系。由于麦克斯韦最先预言电磁波存在，理论证明光波和电磁波的同—性，引起了欧洲大陆的物理学家们的注意。但由于他的深奥的数学方法，和他那个令人难以琢磨的位移电流，使许多想直接深入他的理论的人失败了。后来的厄任费斯脱(P. Ekrenfest)把麦克斯韦的电磁场理论称为“无法深入其无限宝藏的智力原始森林”。那时的大陆物理学家，一般是从亥姆霍兹(H. von Helmholtz)的理论入手接受麦克斯韦的思想的，实验证明电磁波存在的赫兹(H. Hertz)就是其中的一位。赫兹在描述这个历史状况时说过：“曾热衷于麦克斯韦理论的许多人，即便不曾为罕见的数学困难所困倒，但终究被迫放弃了使自己的思想与麦克斯韦的思想—致的希望。虽然我对麦克斯韦的数学思想最为崇拜，但是我不总是觉得我非常确切地把握了他的理论的物理意义。因此对我来说，用麦克斯韦的书来直接指导我的实验是不可能的，我而是通过亥姆霍兹的工作得到指导的……。”

亥姆霍兹从1870年开始用超距论和能量守恒定律来介绍麦克斯韦的理论。他认为电磁力部分属于超距力，部分属于介质的极化力；例如，电磁场的强度(E、H)属于超距力，它们作用于介质，使介质中的电粒子产生位移或振荡，即产生极化，这种极化反过来又成为一个新的超距源。他根据这种设想证明，光的横向振动具有确定的传播速度，但他又同时得出光具有无限大的纵向速度的错误结论。

亥姆霍兹的方法的优越性体现在它将极化(即麦克斯韦的电位移)，具体规定为有重物质的一个电学属性。

而在麦克斯韦理论中，以太不但是电磁场（ $E$ 、 $H$ ）的载体，而且也能产生极化。为了满足这个要求，电磁场的强度量和以太的极化量（即电磁场通量  $D$ 、 $B$ ）在不同介质的交界面上都应连续的，因此麦克斯韦不能解释光的反射和折射现象。亥姆霍兹将以太的作用，即场的作用和介质的作用区分开来的作法，为洛伦兹在光的电磁理论基础解决光的反射和折射问题开辟了道路，这就构成了洛伦兹的博士论文的主要内容。

1875年12月11日，洛伦兹通过了博士论文答辩。他的论文——《论光的反射和折射理论》，明确区分了以太和物质的作用，规定以太只是场的载体，极化只能在物质中产生，从而发现在不同介质的交界面上  $E$  和  $H$  只有切向分量的连续，而  $D$  和  $B$  只是在法线方向连续，进而推导出菲涅耳的反射和折射定律。现在教科书上介绍的正是洛伦兹创造的这套方法。另外，洛伦兹又证明了光波的纵向波幅趋近于零，实际上否定了光的纵波性。1877年，乌得勒支大学（Utrecht University）授予洛伦兹数学教授职务。同年，莱顿大学授予他荷兰唯一的理论物理学教授席位，让他接替范德瓦耳斯（J. D. vander Waals）的工作。他接受了莱顿大学的聘请，当时他才25岁。他上任后的第一项研究是解决麦克斯韦方程组不能解决的光的色散问题。1878年，他在《关于光的传播速度和介质的密度和组成之间的关系》中，从介质极化与入射光的关系找到了光的色散的本质。为此，他先假设以太（场）和物质的联系是通过受激电子粒子的振荡来实现的：在没有物质的以太中，光的行为完全符合麦克斯韦方程组的要求。当光遇到有重介质时，就激发出物质中带电粒子的受迫振荡，从而产生新的光

波，与入射波发生干涉，使入射光的速度变慢，并且改变它的方向。由于介质的极化强度一方面决定于介质的性质（单位体积内能够产生电偶的数目），另一方面又决定于入射光的频率，所以介质的极化率同时决定于入射光的频率和介质中电粒子的密度。对于同一介质来说，它的大小取决于入射光的频率。洛伦兹就是这样解决了旧理论中介质的折射率是波长的函数，而极化率与波长无关的矛盾，从而用光的电磁学理论完美地解释了色散现象。

洛伦兹在这篇论文中推导出两个公式，其中一个反映了光的折射率和介质的密度的关系，它是：

$$\frac{n^2 - 1}{(n^2 + 2)d} = R \quad (1)$$

式中  $n$  为折射率， $d$  是一个与介质电粒子密度成正比的量， $R$  为折射常数，与介质的温度和压力无关。丹麦物理学家洛伦茨（L. V. Lorenz）早在 1867 年用光学的方法也推导出这个关系。现在我们将式(1)统称为洛伦兹-洛伦茨公式。

另一个公式反映了介质折射率与波长的关系，它是

$$\frac{n^2 + 2}{n^2 - 1} = \frac{A - \frac{B}{\lambda^2}}{C - \frac{D}{\lambda^2}} \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为波长， $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  均为常数。

洛伦兹 1878 年的论文的意义在于，它将以太（场）和物质（极化）进一步区分开来，同时又用粒子的振荡将二者联系在一起，即在麦克斯韦的无源电磁场中引入了“源”——电子，解释了光的色散。洛伦兹电子论的萌芽就在这种融合场论和“源”论的尝试中产生出来了。

1881年，洛伦兹与他天文学老师开塞的侄女阿利她·开塞（Aletta Kaiser）结婚。1885年，他的大女儿卢贝她（G. Luberta）出世，后来他又生了一女一男。从1878年到1892年的15年间，他平均每年发表一篇论文，不算富产。此间，他主要从事气体动能学理论研究，这在他的历史上不占重要位置。他善于社交，为人幽默、健谈，给人一种内在的和谐之感。据他大女儿回忆，洛伦兹经常抽着雪茄坐在书桌前，但从不像从事繁重脑力劳动的样子。这是他内心和外界保持高度平衡的表现。

1892年至1904年间，是洛伦兹一生最富产又最有价值的年代。他在这段时间内创立了电子论，将经典电磁学发展到了最后的高度，为相对论的诞生创造了条件。他对理论物理学的影响，不仅是用他的理论，而且还通过对青年一代物理学家的培养来实现。他十分乐意同前来莱顿拜访他的青年人交谈，他的思想是有影响力的，但他从不干涉青年人所选择的方向，也不鼓励什么学派。他与青年人总保持着亲密而又崇高的感情。爱因斯坦就是他们当中的一位。爱因斯坦说过，在他一生中洛伦兹对他的影响是最大的。

1892年，洛伦兹发表了划时代的论文——《麦克斯韦电磁学理论及其对运动物体的应用》，奠定了电子论的基础。麦克斯韦在1864年提出的电磁场方程组共有20个分量方程（合为8个矢量方程），场量除了有 $E$ 、 $H$ 、 $D$ 和 $B$ 外，还有静电势 $\phi$ 和矢量势 $A$ （即麦克斯韦的电磁场动量）。虽然麦克斯韦的整个理论是建立在电磁作用以有限速度传播的假设的基础上的，但是他的方程组中仍有与此不相协调的地方，例如在方程

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (3)$$

中，电场强度  $\mathbf{E}$  由矢量势对时间的微商和静电势在空间的梯度两项构成，等式右边第一项表明矢量势是在时间中变化的，而第二项似乎说静电势的传播不需要时间。鉴于这种不协调性，赫兹在 1884 年和亥维赛 (O. Heaviside) 在 1885 年先后对麦克斯韦方程组进行了简化，取消了  $\mathbf{A}$  和  $\phi$ ，化简为四个较为对称的矢量方程（与现在教科书上的麦克斯韦方程组的形式相似）。

洛伦兹认为赫兹铲除原麦克斯韦方程组中的势是完全必要的，但是简化后的方程还不能解释电磁场中的电荷运动。他在 1892 年的论文中结合麦克斯韦的电磁场理论和克劳修斯的电动力学，推导出电荷在场中受力的公式，即著名的洛伦兹力公式：

$$\mathbf{F} = e\mathbf{E} + \frac{c}{e}(\mathbf{V} \times \mathbf{H}) \quad (4)$$

在洛伦兹电子论中，以太和物质在力学上是互相独立的，而在电磁学中是互相联系的，联系它们的“桥梁”是电子（洛伦兹在这篇论文中用电粒子，在 1895 年改用离子，在 1899 年后才用电子一词）。同时，电子的运动又是一切电磁场的根源。这种思想比麦克斯韦更深入了一步，因为麦克斯韦从来不问及电磁场是怎样产生的，在他的理论中电磁波总是来自无穷远处。洛伦兹用电子论解释了光的反射和折射、光的色散、以及金属对光的吸收。这都是麦克斯韦电磁场理论没有解决的问题。

再让我们看看洛伦兹和麦克斯韦在处理电位移上的区别。由于麦克斯韦认为以太既是电磁场的载体，又是电位移产生的场所，因此他只能给出  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$  的关系。洛

伦兹把对电位移的认识向前推进了一步,他认为以太只能是电磁场的载体,而极化在有重介质中才能产生,所以电位移应当是电场强度和极化强度的叠加的结果,即

$$D = E + 4\pi P \quad (5)$$

式中  $P$  表示极化强度。公式(5)的意思可以解释为:电子相对于以太的位移和相对于介质的位移的矢量合成,就构成了电位移。洛伦兹在这个公式的基础上,再根据电子受电场激发而产生的受迫振荡的模式,推导出介质的介电常数:

$$\varepsilon = n^2 = 1 + \frac{4\pi e^2 N}{(k^2 - m\omega^2)} \quad (6)$$

式中  $N$  为单位体积内可极化的分子数,  $k$  为使电子恢复平衡位置的弹性系数。 $m$  和  $e$  分别表示电子的质量和电量,  $\omega$  为电磁波(即光波)的频率。用这个公式可以定量分析光的色散。

麦克斯韦方程组中的磁场旋度方程  $\nabla \times H = \frac{4\pi}{c} j$ , 要求  $j$  为传导电流

和位移电流之和。在考虑电子的运动后,还应当加上电子运动所形成的电流。然而,这还不全面。洛伦兹认为,既然介质在电场中受到极化,那么它们在电场中运动时也应当能够产生电流。这种电流应加在旋度方程右边的全电流中。这是令人费解的。但是,伦琴(W.K.Röntgen)在1888年的一次实验就已经证明确实存在这样的电流。他在一个圆盘形介质电容器的两个金属板上加电场,然后使介质盘绕中心轴旋转(金属板不动),结果在介质盘附近产生了磁场,说明介质盘中确实产生了电流。

以太是光的载体,是光速的参照系,这是19世纪物

理学家们直言不讳的看法。不过，他们对于以太的行为各有另论。一些人认为以太是绝对静止的，是一切物体运动的绝对参照系，用来支持这种观点的经验事实是布喇德雷发现的光行差现象。最早提出以太不动论的是托马斯·杨（Thomas Young）。斯托克斯（G. G. Stokes）在 1845 年提出另一种看法，他主张以太是运动的，地球运动时拖动以太，以致相对于以太的速度为零。他对光行差作了这样的解释：地球因拖动以太而改变的光的波前，从而造成地球表面的光场弯曲，因此我们观看星体时望远镜就必须有所偏斜。除此外还有第三种假说，即地球运动可以部分曳引以太，从而使相对于以太的速度小于自身的绝对速度。菲涅耳早在 1818 年就提

出了这种假说，并给出了以太的拖动系数 $(1 - \frac{1}{n^2})$ ，这就是著名的菲涅耳曳引系数。

作为检验以太倒底是被完全拖动还是被部分拖动的实验，是斐索在 1851 年所进行的光在流动水中的速度的实验。这个实验否定了斯托克斯假说，而似乎肯定了菲涅耳的部分曳引论，因为斐索根据实验计算出光

在流水中的速度为 $v = \frac{c}{n} (1 - \frac{1}{n^2})u$ 。这里 $v$ 表示光在水中的速度， $u$ 为水

流的速度， $n$  为水的折射率。公式中恰好出现了菲涅耳曳引系数。迈克耳孙（A.A. Michelson）和莫雷（E.W. Morley）在 1886 年重复斐索实验，得到了同样的结论。

鉴于这些事实，洛伦兹在 1886 年发表的《论地球的运动对光学现象的影响》一文中，批判了斯托克斯，而对菲涅耳的以太部分曳引论给予了极高评价。接着，他

在上面提及的 1892 年的论文中,根据偏振光的特殊情况推出光在运动介质中的速度,进一步从理论上肯定了菲涅耳的理论。

1895 年,洛伦兹在《运动物体中的电和光的现象的理论研究》一文中(以下简称《研究》),在菲涅耳曳引系数中加入了色散因子,得到了更为精确的光在运动介质中的速度公式:

$$v = \frac{c}{n} + \left[ \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) - \frac{1}{n} \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right] u_0 \quad (7)$$

应当说明,洛伦兹维护菲涅耳的假说,多少出于对菲涅耳的敬重,他十分敬佩菲涅耳的物理直觉和数学能力。事实上,自从 1892 年起,他就处于了矛盾的境遇。一方面,斐索的实验似乎证明以太被地球部分拖动;另一方面,迈克耳孙在 1881 年的实验,以及迈克耳孙和莫雷在 1887 年所作更精的光干涉实验,似乎证明以太被完全拖动了。因此,他一方面尽力证明菲涅耳假说是正确的,另一方面又极力维护由汤马斯·杨提出的、被麦克斯韦进一步认定的绝对静止的以太的观点。他在 1892~1895 年间发表的一系列论文充分反映了他这种二重变奏的心理。不过,他为了挽救以太这个绝对参考框架,更侧重于以太静止论。他的这种思想在他提出长度收缩假说时达到了高潮。

### 迈克耳孙实验和长度收缩假说

麦克斯韦把他的理论完全建立在以太这个绝对参考框架上,他倾向于静止以太论的观点,因此,他对如何

证明静止以太的假说不能不有所关心。他为《不列颠百科全书》（第九版第八卷）所写的“以太”条目，反映出他临终前对于观测静止以太的迫不急待但又十分失望的心情，他这样写道：“……所有从地球上实验使用的确定光速的可行方法，都决定于从一站到另一站往返来回的双程所需时间的测量。由于地球对于以太的相对速度等于地球在其轨道上的速度，[它引起的]时间的增加只是光[的绝对]传播的全部时间的一亿分之一，因此是很难观测到的”。仅从字面上很难理解麦克斯韦所说的一亿分之一是什么意思。让我们来这样分析一下：若地面上有 A、B 两站，它们的连线在地球的运动方向上，由 A 站发出的光经 B 反射又回到 A。如果地球与以太之间没有相对速度，

光去回所需时间为  $t_1 = \frac{2L}{c}$ （L 为两站之间的距离）；若以太是绝对静

止的，地球的运动速度就是相对于以太的速度（我们用  $v$  来表示），地球对于以太的关系如同河中船只相对于码头的关系，在地球上光看光的运动宛如在船上从码头射出的飞矢。这就不难看出，光在相同的距离中去与回所需要的时间不同。根据这种观点，光在 A、B 两站之间来回双程所需的时间应是

$$t_2 = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v} = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{1-v^2/c^2}$$

显然，后一种情况所需时间稍长于第一种情况所需的时间。两个时间之

$$\text{差 } \Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2L}{c} \left[ \frac{1}{1-v^2/c^2} - 1 \right] \approx \frac{2L}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^2。 \text{ 这里涉及到地球速度与}$$

光速之比的平方,  $(\frac{v}{c})^2$  只有一亿分之, 即  $10^{-8}$  ( $v \approx 30$  公里/秒,

$c=300000$  公里/秒)。当时能够达到这种测量精度的仪器的确还没有。

1879年3月19日, 麦克斯韦给美国航海年鉴局的多德(D.P.Todd)写信询问当时对木卫食的观测的方法是否已经达到可以测量地球相对以太的速度的程度。这封信引起了迈克耳孙浓郁的兴趣, 他决心寻找技术途径来解决问题。他通过光的干涉原理了解到, 如果两束相干光的光程差只有几分之一波长的变化, 就足以引起干涉条纹的位移。1881年, 当他在柏林亥姆霍兹实验室工作时, 利用贝尔(A.G.Bell)提供的100英镑经费设计出以他的名字命名的干涉仪——迈克耳孙干涉仪。他随即携带这台干涉仪到波茨坦物理天文台进行了第一次“以太风”实验。然而实验否定了“以太风”的存在(不过他本人并不认为以太不存在)。

不久, 问题又出现了。他与莫雷在1886年重复斐索的实验似乎又说明地球运动还是可以部分拖动以太的, 这至少说明地球相对以太还有一个速度, 地球理应受到“以太风”的影响。洛伦兹按照菲涅耳曳引系数重新计算了迈克耳孙1881年实验的干涉条纹的位移量, 指出迈克耳孙的理论计算要比他的计算偏大了一倍。瑞利(Lord Rayleigh)写信提醒迈克耳孙注意洛伦兹的计算。这就导致了迈克耳孙第二次“以太风”实验。这个实验是同莫雷一起做的, 即是著名的1887年迈克耳孙-莫雷光干涉实验。他们在这次实验中把光干涉仪的精度提高了一个数量级, 但仍然观察不到地球相对于以太的速度。

迈克耳孙-莫雷实验的否定结论迫使洛伦兹去寻找

新的理由，以挽救岌岌可危的绝对参考框架——以太。

1892年8月18日，他给瑞利的信

上说道：“……菲涅耳假说及他的系数 $1 - \frac{1}{n^2}$ ，如果没有迈克耳孙先

生的实验的话，……大可用来解释所有被观察的现象。我完全感到难以清除这个矛盾。但是我相信，如果我们要抛弃菲涅耳理论的话，我们将根本没有更合适的理论，因为斯托克斯先生强加给以太运动的条件是互不协调的”。洛伦兹很快就从困境中走了出来。1892年11月26日，他发表了《论地球对以太的相对运动》，提出了著名的长度收缩假说。这个假说是说：运动的物体在其运动方向上的长度略有收缩。正如他所说：“这个实验（即迈克耳孙-莫雷实验）已长期使我感到不安，最后我才想出了唯一的方法来调合它的结论与菲涅耳的理论。它由这样一个假设构成：连接一个固体上的两点连线如果开始平行于地球运动的方向，当它转过 $90^\circ$ 后就不再保持相同的长度。例如，如果令后一个位置上的长度为 $L$ ，在前一个位置上的长度则为 $L(1-a)$ ，……”

他所假设的长度收缩量为原长度的 $v^2/2c^2$ 倍，即是说，如果令物体在绝对静止时的度为 $L$ ，当它沿纵向运动时，就缩短为 $L(1 - v^2/2c^2)$ 。

与此同时，英国物理学家斐兹杰惹(G. Fitzgerald)也提出了相同的假说，但未给出具体计算。现在我们把这一假说统一称为“洛伦兹-斐兹杰惹收缩假说”。

洛伦兹后来在1895年的《研究》中，给出了更精确的收缩系数：

$\sqrt{1 - v^2/c^2}$ 。实际上，他在1892年给出的收缩量只是这个系数的二级近似。洛伦兹认为，他的长度收缩假说不仅能够解释迈克耳孙-莫雷实验的否定结果，而且可以预言在地球

上不可能观测到“以太风”的任何级的效应。值得注意的是，洛伦兹一直以为物体在运动方向上的长度的收缩是真实情况，它是由分子力产生的效应。这就与后来诞生的爱因斯坦狭义相对论形成了鲜明的对照。

### 1. 初期的洛伦兹变换和“地方时”的形式

以太是静止的，是一切物体运动的参照系，这是洛伦兹坚持不渝的信念。1895年，洛伦兹在静止以太和长度收缩假说的基础上，提出了一种坐标变换和地方时的表达式。

若令静止参照系为  $S_1(x, y, z)$ ，和另一个沿着  $X$ —轴运动的参照系为  $S_2(x', y', z')$ ，且两个参照系的  $X$ —轴重合。洛伦兹在 1895 年给出的坐标变换为：

$$x' = x\sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad y' = y, \quad z' = z \quad (8)$$

这组交换还未加入伽利略变换的式子  $x = x - vt$ ，显得空间和时间是相互独立的，仿佛使人觉得两个参照系的坐标原点永远是重合的，好像他永远只考虑参照系  $S_2$  刚刚开始运动的一瞬间，因此只考虑动坐标的

$X$ —轴收缩了  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  就行了。

与这个坐标变换配套的时间变换就是他提出的“地方时”公式：

$$t' = t - \frac{v}{c^2}x \quad (9)$$

洛伦兹“地方时”是指在运动物体上测量的时间，它与坐标系的平移速度和物体在  $X$ —轴上的坐标有关，它因物体的坐标而异，因而称为地方时。地方时表明了这样一种现象，好像放在动坐标系上的时钟走慢了。

以上便是洛伦兹在 1895 年所作的工作。

### 2. 洛伦兹对应态定理

洛伦兹在上述变换式和地方时概念的基础上，提出了电磁场的对应态定理。电磁场的状态，无外乎用电场和磁场强度（ $E$  和  $H$ ），及电位移和磁感应强度（ $D$  和  $B$ ）来决定。在任一瞬间，在空间任一点上，这四个状态参量都是单位的，即是说电磁场可以表示为这样四个单值函数的形式，正如热力学系统由温度、压强和体积来决定那样。既然地球上的光速实验没能检验出“以太风”，就说明运动参照系上的电磁场的状态与在静止参照系上观测到的电磁场的状态一样，即证明了麦克斯韦方程组的不变性。洛伦兹根据他的坐标变换和地方时推导这种关系，进而提出了对应态定理。这个定理是说：对于任何物体系，当它静止时的电磁场的状态参量是  $x, y, z, t$  的某种函数，则它运动时这些参量就是  $x', y', z', t'$  的同一形式的函数。就拿磁场强度来说，它在静止的物体系中是

$$H=f(x, y, z, t), (10)$$

当这个物体系运动时，同样有

$$H' = f(x', y', z', t'), (11)$$

有了对应态定理，就能很好地说明为什么在地球上无法用光学的实验来测知“以太风”效应。我们试举一个简单的例子：

一束几何形状的光线，它所占的空间以外的部分  $E=H=B=D=0$ ，即全部是黑暗的。根据对应态定理，若产生这束光线的光源在作匀速直线运动，也应在其余部分有  $E' = H' = B' = D' = 0$ ，这就是说原来黑暗的地方还是黑暗，原来光明的地方还是光明。从这个事推知，地球相对于以太的运动是不会影响在静止条件下的反射和折射方向的。由于干涉条纹是明暗相间布置的，因此干涉条

纹不会因地球的动与不动而有所改变。

洛伦兹就是这样解释了迈克耳孙的实验。

理解洛伦兹对应态定理并不是轻而易举的事情，即便当时好些著名物理学家也不例外。1903年，特鲁顿（F. T. Trouton）和诺伯尔（H. R. Noble）做了这样一个实验：他们将两个荷电体平行放着，用十分灵敏的扭力秤测量它们的相互作用力。按照他们的想法，如果地球相对于以太是运动的话，两个荷电体自然也在作同相的运动，从而形成两个平行的电流。这样，它们之间除产生静电力（库仑力）外，还应当产生电动力（安培力）。但是，他们始终测不出电流的相互作用。有不少人认为这个实验可以驳倒洛伦兹的静止以太的假说。其实，这是不足为证的，因为洛伦兹为保护以太而提出的对应态定理早已宣布：电磁系统在作平动时仍然保持着在静止时的一切状态，随着这个系统一起运动的观测者根本无法测知它的电动力学状态有什么改变。换句话说，生活在地球上的人无法得知地球相对于以太的运动对光学和电磁学现象的影响。

应当指出，洛伦兹对应态定理包含有相对论的萌芽，但这是他不自觉提出的。其根本原因在于他的出发点及他所做的一切精细工作，都是为了证明以太这个绝对参考框架的存在。

### 3. 洛伦兹变换的最终形式

洛伦兹在1899年发表的《运动系统中的电学和光学现象的简化理论》和在1904年发表的《在以小于光的速度运动的系统中的电磁现象》两篇论文中，结合伽利略变换和长度收缩系数，给出了洛伦兹变换的最后的公式：

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, y' = y, z' = z \quad (12)$$

同时又将地方时公式修改成

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (13)$$

另外，他还最先形成关于质量随运动速度而增加的思想。他将运动质量区分为横向质量和纵向质量。横向质量，系指在垂直于运动方向上测量的质量：

$$m_{\perp} = \frac{m_0}{(1 - v^2/c^2)^{1/2}} \quad (14)$$

纵向质量，系指在平行于运动方向上测量的质量：

$$m_{\parallel} = \frac{m_0}{(1 - v^2/c^2)^{3/2}} \quad (15)$$

洛伦兹变换与狭义相对论变换在形式上酷为相似，但不是雷同。最明显的区别在于，洛伦兹变换与反变换是不对称的，其反变换是：

$$x = x' \sqrt{1 - v^2/c^2} + vt', y = y', z = z' \quad (16)$$

显然，洛伦兹反变换是从洛伦兹正变换直接推导出来的。与此不同，狭义相对论变换和反变换是一组对称的变换。形式上的区别反映了本质的区别。

#### 4. 洛伦兹理论与爱因斯坦狭义相对论的区别

这两个理论的区别可概括为：

(1) 洛伦兹理论是以以太这个绝对参照系为出发点的，在保持麦克斯韦电磁方程组不变的条件下创立起来的“构造性”理论；而爱因斯坦狭义相对论是在相对性原理和光速不变性原理的基础上创立起来的“原理性”理论。在洛伦兹理论中，一切运动都是相对于静止以太

而言的，洛伦兹否定光在任何作匀速直线运动的参照系中都相等这一事实，而认为所谓光速不变是“地方时”和长度收缩补偿的结果。

(2) 爱因斯坦的时空变换是可倒易的，而洛伦兹变换不可倒易。洛伦兹选择以太为优先参考框架，静止在这个框架中的物体具有最大的长度，电子是圆的，时间走得最快，且是牛顿式的绝对时间，是唯一真实的时间；而相对于这个框架运动的物体会缩短，电子会变成扁圆形状，时钟会走得慢些。总而言之，不论时间还是长度，变化总是绝对的，都由相对于以太的速度单一地决定。与此相反，爱因斯坦认为这些变化是相对的，可倒易的。按照狭义相对论，在一个坐标系上的观察者观测另一个作相对运动的坐标系上的观察者所拿的尺子和时钟，他会发现尺子变短，时钟变慢；而后者在观测前者所拿的尺子和时钟，也会得到同样的结论。这就是爱因斯坦狭义相对论变换的可倒易性所在。这种倒易性不难从下述狭义相对论变换中看出：

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, y' = y, z' = z \\dx &= \frac{x' + vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, y = y', z = z'\end{aligned}\quad (17)$$

让我们将(17)式和(16)比较一下，就能看出两种变换的区别。历史上将洛伦兹反变换称为“以太反变换”，意指由运动坐标反演成静止在以太中的坐标。

在爱因斯坦狭义相对论刚刚诞生时，大多数人接受不了爱因斯坦的思想，不少人还用洛伦兹变换来理解狭义相对论。这是很自然的现象。因为人类在其数百万年的历史中，生活在地球上，人自降生落地，地球就强加

给他们应有尽有的参照物：树木、石头、河水、山丘等等。他们的一切活动，都以这些东西为参照物，慢慢把它们当作最可靠的标志方位的东西，而从来不敢设想相对运动。另外，人体本身也有不完善的地方，它只有左右对称，上下和前后就不是对称的。即便人们不参考地球上这些静止的物体，他们也会知道自己是否在做运动。假如人是一个球体，并且视神经或感光细胞均匀分布在这个球面上，如果我们用太空船将这样的两个人释放到太空中去，让他们在那里翱翔，他们相互间就不会真正感知到底是自己在运动还是对方在运动。

(3) 爱因斯坦认为，长度收缩并非真实存在，而是人为选择参照系所造成的测量结果。但是洛伦兹认为长度肯定由于运动而收缩，这种收缩是受分子力影响造成的。他在 1892 年提出长度收缩假说时曾经说过：“是什么决定着固体的尺寸和形状？显然是分子的强度。任何可以改变后者的因素也一定会影响〔物体的〕尺寸和形状。既然我们可以万无一失地假设电力和磁力是通过以太的中介而作用的，那么我们给予分子力假设同样的作用也不是什么深奥莫测的事情”。

因为这种原因，好些物理学家想测量出运动物体上的分子力状态的变化，以便证明长度收缩假说。例如，瑞利在 1902 年观测水和二硫化碳是否在地球运动方向上产生双折射现象，如果真能观测到这种现象，说明它们在运动方向的分子力发生了变化。但是，实验观测到的结果不超过理论计算的 1%。布拉斯 (D. B. Brace) 两年后重做了这个实验，结果仍然是否定的。

(4) 洛伦兹认为“地方时”只不过是数学的假定，或是一种数学辅助量，不具有真实的物理意义，而把牛顿

力学中的时间当作绝对时间，当时唯一真实的时间。与此相反，爱因斯坦认为不存在什么绝对时间，“地方时”才是度量物体的唯一真实的时间。洛伦兹直到 1915 年才真正认识到自己对时间的看法是错误的。他在 1915 年再版的《电子论》一书中坦白说道：“如果我必须写这最后一章的话，我肯定要把爱因斯坦的相对论放在一个更为突出的地位……我失败的主要原因，是我坚持变量  $t$  只能考虑为真实时间的思想和我坚持地方时  $t$  必须只能考虑为一个数学辅助量的思想的结果”。

通过这些讨论可以看出，洛伦兹理论同爱因斯坦相对论有着根本的区别，而它们的相似却只是形式和局部的。正是由于这些形式上和局部的相似，使一些人把洛伦兹理论错当为相对论的一个流派，或当作一个可以与相对论竞争的理论。如肯培尔在 1911 年还这样说：“值得注意的是还有另一个理论，洛伦兹理论。它能够解释作相对运动的系统的所有电学定律；从相对论原理出发的推导与从洛伦兹理论出发的推导是同一的，而且两组推导完全与已进行的实验相符合。”

这显然是缺乏历史分析所得到的错误结论。

洛伦兹一生所获荣誉和奖励很多，最有名的是他与他的学生塞曼在 1902 获得的诺贝尔物理学奖金，那是为了表彰他们研究磁场对光谱的影响所作出的贡献。

1896 年 10 月 31 日，塞曼在提交荷兰科学院的实验报告中，报道了他发现的磁场使钠 D - 线变宽的现象。洛伦兹随后用电子论解释这个现象。根据他的理论，光辐射的本质是电子的振荡，光的频率决定于振荡的频率，每一条光谱线定量反映出电子振荡的情况。他同塞曼经过反复研究，发现增宽的 D - 线实为三条精细线。洛伦

兹指出，本来的钠 D—线是由电子的一种直线振荡和电子的两个反向旋转的圆周运动共同产生的。它们的频率原是相同的，当加上磁场后，作直线振动的电子不受影响，而作圆周运动的两个电子一个被加速，另一个速度则减慢，它们的频率都改变了一个相同的因子，即增加或减少了一个拉莫尔进动频率，从而使原先的一条谱线分裂为三条谱线。

同时，他们又提出了可用于计算电子荷质比的塞曼公式：

$$\frac{T'-T}{T} = \frac{e}{m} \cdot \frac{HT}{4\pi} \quad (18)$$

式中 H 是磁场强度，T 和 T' 分别表示加入磁场前后的电子振荡周期。洛伦兹由此算出的电子荷质比 e/m 与汤姆孙（J. J. Thomson）根据电子在电场和磁场中的轨道计算出的结果十分接近。

洛伦兹在 1905 年曾一度想到慕尼黑大学任理论物理学教授，在莱顿大学同意免去他的物理学引论的课程后，他才放弃了离走的念头。迟至 1912 年，他最后才辞去了莱顿大学教授职务，去哈勒姆博物馆任物理厅的主任。该博物馆仿伦敦皇家研究所的样式给他建造了一个物理实验室。这时他总算有了自己的实验室，这一愿望是莱顿大学许愿多次而从未兑现过的。

洛伦兹在哈勒姆一边从事科普教育，一边加紧研究物理学的新问题，特别是相对论。同时，他还保留有莱顿大学名誉教授的席位，在那里开设“星期一午前讲座”。

洛伦兹在晚年热心于发展荷兰的科教事业，他从 1921 年起任荷兰高等教育部部长。此外，他还担负须德海防波堤的设计任务，历经数年完成了此项工程的设计。

洛伦兹一辈子在偏狭的阿纳姆、莱顿和哈勒姆生活和工作。但是他的影响却是超越国界的，他是物理学共同体中最早、最杰出的成员。他的国际学术活动能力部分来自于他的影响，部分属于他的外语才能。他在 1899 年第一次参加了国外学术活动，他应玻尔兹曼的邀请前去为德国自然科学家和医生学会的杜塞尔多夫会议的物理学分会致词。1900 年，他又为物理学第一次国际会议——巴黎会议致词。1911 ~ 1927 年间，他担任着索尔未（Solvey）会议的主席，这是他所从事的最重要的国际学术活动。第一次世界大战后，政治严重冲击了物理学界，当时许多国际性科学组织极力排斥德国成员。这种情况在美国特别严重。那个时候美国想发展原子科学，却又不想邀请朗德（A. Lande）、泡利（W. Pauli）、海森伯（W. Heisenberg）、索末菲（A. Sommerfeld）这样一批物理学家参加他们的会议，就连爱因斯坦这样一位非军国主义者也被拒之门外。洛伦兹在 1919 年至 1921 年担任荷兰科学和文学院院长时，他就利用自己的影响和地位动员本国科学家参加由协约国重组的战后国际科学组织，同时又积极主张废除排斥战败国科学家的一切条款。1925 年，他在布鲁塞尔召开的“国家研究委员会”（NRC）第三次大会上，宣读了他和塞曼，开默林-昂尼斯（H. Kamerlingh-Onnes）等五人合写的公开信，严正指出与战败国的科学家的合作是刻不容缓的事情。

洛伦兹的思想开明，他给青年物理学家指导时总能坦率谈吐自己的观点，在他的意见中掺合着期望、同情和批评。他认为发展理论物理学的途径是多种多样的，不必千篇一律遵循某一模式。他早在 1877 年担任莱顿大学教授的就职讲演时，就指出物理学的目的是要寻找能

够解释尽可能多的现象的简单的基本原理。他认为，在尚未深入现象的最根本的实质之前就宣布某一途径是唯一可靠的作法，是危险的；各种理论途径，如原子论、超距论、场论等等，都不应偏废，只有通过多种方法的比较和综合，才能找到我们所需要的最简单、最基本的原理。他在创立电子论时就曾综合使用过超距论和场论的方法，这样做既保留了麦克斯韦的以太连续场的优点，又纳入了分离的“源”——电子，结果导致了有源场论。爱因斯坦称赞他的这种作法是“智力的大解放”。这正是洛伦兹开明的思想风格的体现。

被称为“19世纪上空第一号乌云”的以太，是使洛伦兹大受挫折的问题。洛伦兹坚持以太存在的观点，不是他个人的错误，而是整个经典物理学所造成的局限。他作了最大努力将经典物理学推向了最后的高度，为现代物理学的诞生准备了尽可能多的条件，最后在爱因斯坦等人面前展示了必须进行物理学革命的必要性。这就是生活在经典物理学和物理学革命的交叠时代的他的贡献。虽然与他同时代的人中没有哪一位更能像他那样为保留以太这个绝对参考框架而竭尽全力，但也没有哪一位像他后来那样承认自己的错误，否定以太存在。在爱因斯坦创立广义相对论后，他相信广义相对论的物理空间完全能够取代他的经典电子论中的以太的作用。他积极支持爱因斯坦用统一引力场和电磁场的方法来铲除自己理论中连续场和分离粒子的二重性。

爱因斯坦是最能中肯评价洛伦兹的人，他在临终之前还念念不忘先师之德。他于1955年写道：“在两世纪之交，H.A.洛伦兹被所有国家的理论物理学家尊为领袖人物，对他是充分肯定的。然而，年青一代的物理学家

对 H. A. 洛伦兹在形成理论物理学基本原理方面所起的决定作用，不再有足够的认识了。这种奇怪的事实的原因在于，他们已经如此完全地吸收了洛伦兹的思想，以致难以认识到这种思想的高度勇敢和它们带入物理学科基础中的简明性。”

1928年2月4日，洛伦兹在哈勒姆去世，享年74岁。他被定为荷兰近代史中的最伟大的文人。在他出葬的那一天，荷兰电报电话公司停止通电三分钟，以示哀悼。荷兰皇家和政府的代表出席了他的葬礼。爱因斯坦作为普鲁士科学院的代表给洛伦兹送葬，他在墓地所致的悼词中说道：洛伦兹是“我们时代最伟大、最崇高的人”。

### 思维方式的另一奇妙世界

1905年9月，年仅二十六岁的阿尔伯特·爱因斯坦在德国权威性的《物理学杂志》上发表了划时代的论文——“论动体的电动力学”。这篇后来被称之为狭义相对论的论文是理性思维的伟大杰作，它把哲学的深奥，物理学的直观和数学的技艺令人惊叹地结合在一起。它与《物理学杂志》17卷上的爱因斯坦的另外两篇开创性的论文（光量子论文和布朗运动论文）在科学史上谱写出激动人心的篇章，全面地打开了物理学革命的新局面。狭义相对论获得了巨大的成功。它使力学和电动力学相互协调，它减少了电动力学中逻辑上互不相关的假设的数目，它对时间，空间等基本概念作了必不可少的方法论分析，它把动量守恒定律和能量守恒定律联系起来，

揭示了质量和能量的统一。它与爱因斯坦 1915 年创立的广义相对论一起，大大改变了传统的世界观和传统的思维方式，把人们带进了一个奇妙的新世界。面对科学史上这一重大的事件，人们必然会问：狭义相对论究竟是怎样创立的？被排斥在学术界之外的默默无闻的爱因斯坦为什么会捷足先得？这一伟大的智力搏斗能够给我们哪些认识论和方法论的启示？现在，让我们对世纪之交这一富有戏剧性的历史事件作一番历史的、哲学的考察吧。

从 19 世纪初光的波动说复活以来，物理学家一直对传光媒质以太议论不休，其中一个重要问题是以太和有重物质（特别是地球）之间的关系问题。其实，早在 1727 年，英国天文学家布雷德利发现，地球绕太阳公转时，由于速度变化，所观察到的恒星位置也随着变化。这就是所谓的“光行差”现象。用光的波动论来解释光行差，只要假定以太相对于太阳静止。不被地球曳引就行了。光的波动论的倡导者菲涅耳就持有静止以太说，他在 1818 年指出，地球是由极为多孔的物质构成的，以太在其中运动几乎不受什么阻碍，可以把地球表面的以太看作是静止的。斯托克斯认为菲涅耳的理论是建立在一切物体对以太都是透明的基础上，因而是不能容许的。他于 1845 年提出，在地球表面，以太与地球有相同的速度，即地球完全曳引以太。由于菲涅耳的静止以太说能圆满地解释光行差现象，物理学家大都赞同它。

如果静止以太说是正确的，那么由于地球公转速度是每秒 30 公里，在地球表面理应存在“以太流”。多年来，人们做了一系列光学和电学实验（以太漂移实验），企图量度地球通过以太的相对运动（“以太风”）。所有这

些一阶精度(地球公转速度和光速之比  $V/C \approx 10^{-4}$  的一阶量)的实验一律给出否定的结果。尤其是斐索 1851 年作的运动媒质中的光速实验,表明光现象不受地球相对以太运动的影响。1881 年,正在德国进修的迈克耳孙采纳了麦克斯韦 1879 年提出的建议,他用自己发明的干涉仪,在波茨坦进行了二阶  $[(V/C)^2 \approx 10^{-8}]$  以太漂移实验。这次实验精度还不够高,尤其是计算有错误,并未引起人们足够的重视。1887 年,迈克耳孙和莫雷合作,改进了仪器设备,在美国的克利夫兰以更高的精度重做了 1881 年的实验,依然得到否定的结果(以太漂移速度大概小于地球公转速度的  $1/60$ ,肯定小于  $1/40$ )。迈克耳孙和莫雷在同年 12 月发表的实验报告中声称:“似乎有理由确信,即使在地球和以太之间存在着相对运动,它必定也是很小的;小到足以完全驳倒菲涅耳的光行差解释。”

迈克耳孙-莫雷实验似乎否定了菲涅耳的静止以太说,而静止以太说不仅为电磁理论所要求,而且也受到光行差现象和斐索实验的支持。为了摆脱这个恼人的困境,斐索杰惹和洛伦兹分别于 1889 年和 1892 年各自独立地提出了“收缩假设”。他们认为,由于干涉仪的臂在运动方向

上以  $1 : \sqrt{1 - (v/c)^2}$  的比率收缩,从而补偿了地球通过以太时所引起的

干涉条纹的位移,于是便检测不到以太漂移。

1895 年,洛伦兹发表了长篇论文“关于动体电现象和光现象的理论研究”,这篇论文标志着一阶理论的完成。在这篇论文中,洛伦兹处理问题的方法是把动体电动力学或动体光学中的问题交换为静止系中的静体问

题，为此洛伦兹引入了“地方时”坐标  $t_L = t - vx_r/c^2$  进行变换，以区别“真实时间” $t$ 。这样，对于  $v/c$  阶而言，利用  $t_L$  而不是  $t$ ，电动力学和光学定律在动系中和静系中完全相同。洛伦兹把这个结果称为“对应态定理”，其表述如下：“设在静止以太系  $S$  中存在着  $x, y, z, t$  的函数表示的电磁状态，那么在具有相同物理结构，以一定速度  $v$  运动的惯性系统  $S_r$  中，以相对坐标和地方时  $X_r, Y_r, Z_s, t_L$  作独立变数，用与  $S$  中相同的函数所表示的电磁状态也能够存在。”

洛伦兹 1895 年的理论还有不少缺陷，尤其是再次提出了收缩假设，这是为把电磁理论从个别实验结果中拯救出来而特意虚构的。它毁坏了洛伦兹电子论的宏伟大厦，这引起了国际科学巨人彭加勒的严重关切。1895 年，彭加勒在“谈谈拉摩先生的理论”一文中首次对洛伦兹进行了批评。尤其是在 1899 年的索邦讲演中，他把批评的矛头主要针对洛伦兹 1895 年的论文。他虽然认为洛伦兹理论似乎是现有理论中缺点最少的理论，但对收缩假设这一特设假设却大为不满。他问道：收缩假设为解释检测不出精确到  $v/c$  二阶的绝对运动“助了一臂之力”，那么对于每一个高于  $(v/c)^2$  的阶，我们难道要期待新的假设再助新的一臂之力吗？对于每一个新的实验结果创立一种特设假设的作法是不自然的。如果能够利用某些基本假定，并且不忽略这种数量级或那种数量级的量，来证明许多电磁作用都完全与系统的运动无关，那就更好了，因为真正的电动力学必须严格地与唯有重物体的相对运动才是可观察的原则相一致。不过，彭加勒并未看到洛伦兹的地方时坐标假设也是特设的。在畅销书《科学与假设》（1902 年）中，彭加勒再次尖锐地批判了收

缩假设：“解释是必不可少的，而且是唾手可得的；它们总是这样；我们一点也不缺少假设。”

彭加勒的批评给洛伦兹指出了努力的方向，但是促使他最后下决心改善以前理论的，是新的以太漂移实验。按照收缩假设，如果使电容器的极板与地球运动方向成一角度，那么当给电容器充电时，应该存在使电容器极板转向地球运动方向的力偶作用。可是，在1903年，特劳顿和诺布耳用灵敏的扭秤并没有检测到这种效应。同样，假如物体在运动方向缩短，那么它的密度就会因方向而异，这样一来，透明体理应显示出双折射现象。瑞利·布雷斯分别在1902年和1904年做了实验，并未观察到预期的双折射，尽管他们两人的实验精度已分别达到 $10^{-10}$ 和 $10^{-13}$ 。

面对现实，洛伦兹抱着彻底解决问题的态度，终于在1904年完成了他的电子论集大成论文——“速度小于光速运动系统中的电磁现象”。在这篇论文中，他把对应态定理推广到二阶，收缩假设也不再是特设的，他成功地把它作为电子论的构成部分。尤其值得称道的是，他提出了后来称之为“洛伦兹变换”的关系式。尽管洛伦兹声称他的电子论是以普遍假设而不是特设假设为基础的，但还是引入了十一个特设假设。

除洛伦兹而外，彭加勒也是狭义相对论的先驱。惠特克在他的名著《以太和电学的历史》中谈到效一情况时说得好：“通常认为，彭加勒主要是一个数学家，而洛伦兹主要是一个物理学家。但是，当涉及到他们对相对论的贡献时，情况正好相反：正是彭加勒提出了一般的物理学原理，而洛伦兹却提供了许多数学表达式。”（当然，惠特克有意贬低爱因斯坦的贡献则是十分错误的）

的确，早在 1900 年之前，彭加勒就已经掌握了建造相对论的必需的材料，他已提出了类似于狭义相对论的两个基本原理，认识到牛顿的绝对时空观必须变革。

就在上述 1895 年的那篇文章中，彭加勒认为，用任何实验手段——力学的、光学的、电学的——都不可能检测到地球的绝对运动。他断言，所有以此为目标的实验注定要失败，不管他们的精度有多高。在这里，他已经意识到，采取这种立场相当于在理论上确证一个普遍的物理定律：“不可能测出有重物质的绝对运动，或者更明确地说，不可能测出有重物质相对以太的相对运动，人们所能提供的一切证据就是有重物质相对于有重物质的运动。”

1899 年，彭加勒在巴黎大学讲演时又提到这一普遍定律：“我认为，光现象很可能只依赖于物体的相对速度……，在光行差常数中，如果不忽略二阶或三阶量，这也许是正确的，但却不是严格正确的。当实验变得越来越严密，这一原理也变得越来越精确。”第二年，在巴黎举行的物理学会议上，他再次表示了同一观点：“我不相信，……除了物质的相对位移以外，更严密的观察将会使其他东西明显起来。对于所有各阶都必须找到同一解释，……〔一切〕都有助于说明，这种解释同样圆满地适应于较高阶的项，这些项的相互对消将是严格的、绝对的。”彭加勒把这个普遍定律称为“相对运动原理”，并认为它是后验的，而不是先验的。

“相对性原理”一词是彭加勒在《科学与假设》中首次使用的。1904 年 9 月在美国圣路易斯国际技术和科学的讲演中，他把该原理作为物理学六个普遍原理之一列举了出来：“相对性原理。根据这个原理，物理现象的

定律应该是相同的，不管观察者处于静止还是处于匀速直线运动。于是，我们没有，也不可能有任何手段来辨别我们是否作这样一种运动。”他再次引用迈克耳孙实验支持相对性原理。他陈述了他的信念，不管地上的实验和天文学实验的精度提得多么高，该原理都会被证明是可靠的。

在 1898 年发表的“时间的测量”一文中，彭加勒提出了光速不变公设：“〔光具有不变的速度，尤其是它的速度在一切方向上都是相同的。〕这是一个公设，没有这个公设，就无法测量光速。这个公设从来也不能用经验来验证；如果各种测量结果不一致，那么它就会与经验相矛盾。我们应该认为我们是幸运的，因为这样的矛盾没有发生……”在美国圣路易斯的讲演中，他甚至惊人地预见了新力学的大致图景：“也许我们将要建造一种全新的力学，我们已经成功地瞥见到它了。在这个全新的力学内，惯性随速度而增加，光速会变为不可逾越的极限。原来的比较简单的力学依然保持为一级近似，因为它对不太大的速度还是正确的，以致在新力学中还能够发现旧力学。”

在“时间的测量”一文中，彭加勒明确地把定义同时性的问题与定义时间的问题区别开来，这样他便比马赫更严格地分析时间概念。他集中揭露了“同时或居先”这一公认概念的循环论证，并讨论了科学家隐含地假定了的同时性的定义。他指出，在没有测量时间的情况下，是无法测量光速的，因而同时性的定性问题注定要依赖于时间的定量问题。他在《科学与假设》中再次强调：“绝对空间是没有的，我们所理解的不过是相对运动而已”；“绝对时间是没有的，所谓两个期间相等，本身只

是一种毫无意义的断语”；“不仅我们没有两个相等的时间的直觉，而且也没有发生在不同地点的两个事件同时性的直觉。”有趣的是，彭加勒还在 1905 年详尽地讨论了利用光信号使时钟同步的问题。这种讨论虽然不完全等价于爱因斯坦提出的关于同时性的描述，因为彭加勒安排了两个观察者而不是一个观察者，但却得到了相同的结果。

最近，美国科学史家米勒教授在他的关于狭义相对论历史的专著中，首次披露了彭加勒 1904 年后期到 1905 年中期给洛伦兹写的三封信。使人感兴趣的是第三封信，它包含着洛伦兹变换形成一个群的证明。这三封信中所描述的思想都写在他的经典论文“论电子动力学”中。这篇论文的缩写本于 1905 年 6 月 5 日发表，全文于 1906 年发表，它不仅是电磁世界图像最后的努力成果之一，而且他的数学方法对于进一步改制洛伦兹—爱因斯坦的理论也是重要的，因为彭加勒为了利用在具有确定的正度规  $x^2 + y^2 + z^2 + \quad^2$ （其中  $\quad = ict$ ）的“四维空间”中的不变量理论，使用了虚时间坐标。

在 1905 年中期，除了洛伦兹的扁缩电子论外，还有亚伯拉罕的刚性球电子论以及朗之万、布赫尔的可变形而体积不变的电子论，此外还有科恩的电动力学。但是在这些理论中，只有洛伦兹理论能够解释精确到  $v/c$  二阶的实验材料，它也能圆满地解释菲涅耳系数、质量依赖于速度、由电子构成的大块物质和以太之间相互作用而引起的全部结果等等。加之无与伦比的数学家彭加勒极力把它纳入优美的哈密顿-拉格朗日形式系统，并在 1905 年前后应用了诸如群论、四维矢量空间和准稳逼近等高深的数学和物理学来处理，因而洛伦兹理论被当时

的许多物理学家看作是最有前途的。

洛伦兹、彭加勒的电子论和电子动力学，虽然包罗万象、富丽堂皇，但它们毕竟只是经典物理学的宏伟建筑物，它们只是在观察上和预言上与相对论等价，而在概念上并不等价。正当那些学识渊博、声名显赫的经典物理学家们为以太问题、为电子论而绞尽脑汁，紧张地进行智力竞赛时，在瑞士的伯尔尼专利局工作的爱因斯坦，也利用业余时间，在截然不同的思想路线上全力以赴地同他的问题搏斗。

60年代以来，美国著名科学史家霍耳顿教授接连发表了几篇有份量的论文，无可辩驳地证明，爱因斯坦的狭义相对论既不是迈克耳孙-莫雷实验的必然结果，也不是洛伦兹、彭加勒思想的直接继续。爱因斯坦的思想是沿着与众不同的路线发展的。纵观爱因斯坦创立狭义相对论的全过程，他之所以后来居上，全在于他一反当时科学界的潮流，另辟蹊径，出奇制胜。讲得具体一点，是因为他看清了方向，选准了方法，找到了突破口。

众所周知，自从牛顿成功地建造起经典力学的体系以来，两百多年间，机械自然观一直是理论物理学每个研究工作者的指导思想和行动纲领。19世纪关于以太问题的理论探讨和实验研究，实际上也是物理学家在机械自然观的支配下，把经典电磁学和光学归结到经典力学基础上的持续不断的努力，为此他们挖空心思，千方百计地构造以太的机械模型。尽管这种努力并非令人满意，但是直到19世纪末，大多数物理学家并没有放弃力学基本定律一般地应当是整个理论物理学的基础，每一种物理理论都应当归结为力学的信念。情况正如爱因斯坦所说：当时物理学在各个细节上虽然已经取得了丰硕的成

果，但在原则问题上居统治地位的是教条式的顽固”。

随着电磁理论的深入发展，这种状况逐渐难以维持下去了。在麦克斯韦和洛伦兹所开辟的思想路线的指引下，在以太观念中发生了最独特，最意外的转变。麦克斯韦虽然把以太看作是一种具有复杂性质的纯粹机械性的实体，但是他和他的后继者并没有构想出一种恰当的力学模型，为麦克斯韦电磁场定律提供一种满意的力学解释。这种状况从理论物理学家的力学纲领的观点（机械自然观）来看是令人沮丧的。后来，他们逐渐习惯于承认电磁场是同力学基本概念并列的概念，而不要求对它们作力学解释了。这样一来，一些物理学家便先后放弃了机械自然观，可是却造成了一种无法长期容忍的二元论。为了摆脱面临的困境，人们采取了相反的路线，试图把力学基本概念归结为电磁学的基本概念。电磁自然观于是应运而生。

特别是到 1897 年，电子通过阴极射线荷质比的测定和塞曼效应的理论分析终于得到确证，洛伦兹电子论的基本粒子找到了。而且人们了解到，电子在阴极射线、

射线、光电效应、塞曼效应、电解、金属导电等宽广的领域中都扮演着十分重要的角色。由于这些引人注目的成果，维恩在 1900 年为洛伦兹《纪念文集》撰写的文章中正式提出了“力学的电磁基础的可能性”，并为电磁自然观正式设置了活动的舞台。维恩的目标是从洛伦兹的电磁理论推导出力学，进而推出整个物理学理论。除维恩外，当时一些从事电子荷质比测定、电子质量对速度依赖关系测定的实验家，一些致力于电子论、电子动力学和电动力学研究的理论家，例如拉摩、考夫曼、亚伯拉罕、索末菲等都拥护电磁自然观，洛伦兹和彭加勒

也试图把物理学统一在电磁自然观之下。但是，电磁自然观也面临着难以克服的困难，它并不是能起死回生的灵丹妙药。

在 19 世纪末和 20 世纪初渡过青少年时代的爱因斯坦，也明显地打上了时代的印记。当他十六岁时（1895 年），他曾思索过以太和原子可触知性这个众说纷纭的问题，并写了一篇“关于磁场的以太状态的研究”的文章，他还提出把光线发送到载流导线附近，用来检测以太的弹性形变。在联邦工业大学上学期间，他大部分时间在物理实验室工作，迷恋于同经验直接接触、想用观察和实验来研究物理学的主要问题，曾计划完成一个检测地球运动引起光速变化的实验。他在 1901 年发表的第一篇论文（“由毛细管现象所得的推论”）也是就事论事，并没有从物理学基础这一广阔的视野上看问题。但不久，他便勇敢地与当时流行的科学潮流和认识论潮流分道扬镳，以新的、更深刻的方式看待问题，以别具一格的方法处理问题。这一切究竟是怎样发生的呢？爱因斯坦之所以独具慧眼，首先在于他从马赫、彭加勒、毕尔生那里汲取了批判性思想；其次在于他从德国老一辈物理学家的著作中学习了电磁理论，并获得了思想启迪。

1897 年，爱因斯坦在好友贝索的建议下，读了马赫的《力学及其发展的批判历史概论》，后来在 1902 年，他又一次读了这本“科学历史著作的典范”。马赫“坚不可摧的怀疑态度和独立性”，对机械自然观和经典力学基本概念的尖锐批判，给了爱因斯坦以深刻的影响。爱因斯坦在 1902 年还读了彭加勒的《科学与假设》和毕尔生的《科学规范》，这两本书也批判了经典力学的有关基本概念，指出了经典力学的局限性。这一切使爱因斯坦看

到了机械自然观的“教条式的顽固”，看到以力学作为整个物理学的基础是根本行不通的。作为电现象和光现象的力学解释的以太，根本无法用经验支配，而且难于自圆其说，完全是一种多余的人为概念，是陈腐的观点。

联邦工业大学不讲授麦克斯韦电磁理论，这增强了爱因斯坦自学物理学名著的欲望。在那些年代，他每天晚上在家里如饥似渴地自学亥姆霍兹、基尔霍夫、玻耳兹曼、赫兹、弗普尔等人的著作。他从中学到了麦克斯韦的电磁理论，也受到了有益的认识论和方法论启示。同时，他看到了经典电磁理论的局限性：从中不可能推导出物质结构粒子的电的平衡，而且它会导致出错误的辐射压涨落，还会导致黑体辐射空腔中的镜的不正确的布朗运动。

在 1903 年，爱因斯坦钻研了洛伦兹的电子论（是 1895 年的理论，爱因斯坦没有看到洛伦兹 1904 年的论文）。他看到，利用洛伦兹的电子论永远也不能达到电磁世界图像的目标。因为他遇到另一个基本危机，由于普朗克对热辐射的研究使他突然意识到危机的严重性。爱因斯坦在“自述”中回忆说：“在普朗克的基本工作发表后不久，所有这些都已十分清楚，以致尽管没有一种古典力学的代用品，我还是能看出，这条温度-辐射定律对于光电效应和其他同辐射能量的转换有关的现象，以及（特别是）对于固体的比热，将会得出什么结果。可是，我要使物理学的理论基础同这种认识相适应的一切尝试都失败了。这就好像地基从下面给挖掉了，无论在什么地方也看不到能够进行建筑的坚实基础了。”爱因斯坦已敏锐地洞察到，由于力学容许振子有任意的振动方式，而电磁理论要求辐射是连续发出的，因此普朗克的

量子假设与经典力学和经典电动力学水火不容。显然，爱因斯坦这时已清醒的认识到，无论是力学还是电动力学都不能充当物理学的坚实基础；无论是机械自然观还是电磁自然观，都无法解决现实的问题。他已深知那些表面上截然不同的现象的内在联系，他开始在统一的立足点上为力学和电动力学谋求新的基础，而不是把一个化归为另一个，从而消除二者之间的张力或不相容性。

方向看清了，选用什么方法才能达到预定的目标呢？在当时，像洛伦兹等杰出的理论家都热衷于精心构造电子模型，探讨电子和以太复杂的相互作用，以此为材料来构筑电子论或电子动力学。爱因斯坦一开始也想用综合方法建立一种构造性理论，他在1903年1月写信告诉贝索，他将全面研究电子论。可是不久，他就放弃了这种方法，断然决定用探索性的演绎法解决问题，建立原理理论。爱因斯坦在“自述”中谈到了他当时的转变：“在普朗克的首创工作以后不久，这类思考已使我清醒地看到：不论是力学还是热力学（除非在极限情况下）都不能要求严格有效。渐渐地我对那种根据已知事实，用构造性的努力去发现真实定律的可能性感到绝望了。我努力得愈久，就愈加绝望，也就愈加确信，只有发现一个普遍的形式原理，才能使我们得到可靠的结果。”

促使爱因斯坦下决心采用探索性演绎法创立原理理论的动因，固然主要在于他对创立构造性理论的努力感到绝望了，但是他显然也受到了赫兹、玻耳兹曼和彭加勒的影响。赫兹在《力学原理》（1894年）中试图重构力学，他把力学体系建立在通过科学家个人的“内在直觉法则”从经验引出的公理之上，它能够导出经验预言，他认为这些规律像“康德意义上的先验判断”一样。赫

兹声称他的力学重构是演绎系统，与牛顿的《原理》有许多共同之处。赫兹强调公理描述的威力肯定会给爱因斯坦留下深刻的印象。玻耳兹曼在《力学讲义》中重构力学的下述特点，一定会强烈震撼爱因斯坦敏感的心弦：“恰恰是力学原理的不明晰性，在我看来不是同时以假设的智力图像为起点而得到的，而是从一开始就以与外部经验相联系的尝试而得到的。”在这里，玻耳兹曼的“智力图像”概念比赫兹的“外部对象的图像或符号”更自由，爱因斯坦可能由此注意到，力学的发展已使原理凌驾于经验材料之上。

要建造原理理论，第一步——也是关键性的一步——就是要找到作为演绎出发点的基本原理。爱因斯坦认为这是思维的自由创造，他的这种思想明显地受到彭加勒的影响。彭加勒在《科学与假设》中就认为，物理学虽然比较直接地以实验为基础，但它的一些基本原理也具有几何学公理那样的特征。他指出，约定是我们精神的自由活动的产品，但自由并非任意之谓，它要受实验事实的引导，又要避免一切矛盾。

狭义相对论的两个基本原理（相对性原理和光速不变原理）是怎样得到的呢？原来，爱因斯坦是经过十年的沉思，从他十六岁时无意中想到的一个悖论中得到这样的原理的。当时爱因斯坦还是瑞士阿劳中学的学生，他在冥思苦想这样一个问题：如果我以  $c$ （真空中光的速度）追随一条光线运动，那么我就应当看到，这样一条光线就好像一个在空间里振荡着而停滞不前的电磁场。可是，无论依据经验，还是按照麦克斯韦方程，看来都不会有这样的事情。从一开始，爱因斯坦直觉地看来就很清楚，从这样一个观察者的观点来判断，一切都

应当像一个相对于地球是静止的观察者所看到的那样按照同样的一些规律进行，因为观察者无法用任何实验来判明他是处在均匀的快速运动状态。虽然，这个悖论已经包含了狭义相对论的萌芽。

法拉第电磁感应实验对爱因斯坦形成相对性原理起了主导作用。在法拉第看来，当磁体相对于导体回路运动时，在回路中就产生电流，不管磁体运动或导体运动，情况完全相同，可是对两种现象的解释却截然不同。爱因斯坦无法容忍这种状况，他认为这两种情况之间的差别不可能是真实的差别，只不过是选择参考点的差别而已。就这样，电磁感应现象迫使他作出了相对性原理的公设。

其实，关于磁体和导体相对运动的例子在弗普尔的教科书《麦克斯韦电理论导论》（1894）中讨论过，在亚伯拉罕 1904 年改写的弗普尔的教科书中，亚伯拉罕把弗普尔只承认相对运动的所谓“运动学公理”称为“相对运动原理”。洛伦兹的对应态定理也有某种启示作用。尤其是彭加勒在《科学与假设》中写下了“相对性原理”这一术语，并把它推广到电磁理论，尽管他把它视为经验定律。这能够给爱因斯坦以深刻印象，足以促使爱因斯坦在 1905 年采用彭加勒的术语，把相对性原理作为狭义相对论的一个公设。

爱因斯坦有幸读了洛伦兹 1895 年的论文。洛伦兹在一阶近似的情况下全面地讨论并解决了电动力学的问题。爱因斯坦试图在下述假设条件下讨论斐索实验：洛伦兹方程不仅适用于真空参照系，而且也适用于运动参照系。爱因斯坦坚信麦克斯韦和洛伦兹的电动力学方程是正确的。而这些方程适用于运动物体参照系的假设进

一步导致了光速不变原理。

光速不变原理在表面上是和相对性原理不相容的，爱因斯坦清楚地意识到了这一点，因此他一开始想到光速不变原理时不得不抛弃它。只是在经过多年思索后，他才注意到，困难在于运动学基本概念（例如时间和同时性）的任意性。爱因斯坦是在放弃了许多无效的尝试后，终于醒悟到“时间是可疑的！”

爱因斯坦是怎样开始醒悟的呢？他晚年在“自述”中的一段话为我们提供了最好的答案“只要时间的绝对性或同时性的绝对性这条公理不知不觉地留在潜意识里，那么任何想要澄清这个悖论（即“追光”悖论）的尝试，都是注定要失败的。清楚地认识这条公理以及它的任意性，实际上就意味着问题的解决。对于发现这个中心点所需要的思想，就我的情况来说，特别是由于阅读了戴维·休谟和恩斯特·马赫的哲学著作而得到决定性进展。”爱因斯坦在“奥林比亚科学院”时期读过休谟的《人性论》。休谟的空间和时间观念对爱因斯坦的思想发展有直接影响。休谟说：“空间或外延观念只是按一定顺序分布的可见的或可感知的点的观念”，“如果没有可感觉的对象充满空间，我们就没有真正的广延的观念。”至于时间：“它总是被变化着的对象的可觉察的相继而揭示出来的”；“没有任何可变化的存在，便没有时间观念”。爱因斯坦在狭义相对论论文中借助量杆和时钟定义空间和时间，这不能不使人想起休谟的论断。谈到马赫，他在《力学》第二章的第六节和第七节“牛顿关于时间、空间和运动的观点”，“牛顿观点的概括性批判”所表达的思想，为修改空间和时间观念铺平了道路。

没有麦克斯韦-洛伦兹理论，仅有休谟、马赫的批判，

还不足以给时间和同时性下定义。因为麦克斯韦理论使修改时间和同时性问题变得紧迫，而且洛伦兹的地方时概念对爱因斯坦具有直接的启迪作用。根据麦克斯韦-洛伦兹理论，在表面看来相对性原理不成立的地方，现象却还是符合这个原理的。为了摆脱这个矛盾，只需要足够准确地表达时间概念就行了。也就是说，相对性原理的关键在于理解相对的同时性，从而在于重新定义时间，这只要把洛伦兹作为辅助量而引入的地方时直接定义为时间就可以了。由于重新定义时间不仅消除了洛伦兹理论与相对性原理的矛盾，而且也使以太成为多余的东西，因为既不需要以太作为电磁场的载体，也不需要它充当优越的静止参照系。其实，爱因斯坦开始解决这个问题时，曾花了近一年的时间修改洛伦兹的观点，结果一无所获。一个偶然的机，他在贝索的帮助下摆脱了困境。爱因斯坦意识到，时间不能被绝对地确定，在时间与信号速度之间存在着不可分割的联系。

爱因斯坦当时还意识到，凡是时间在里边起作用的一切判断，总是关于同时性的判断。因此：建成狭义相对论的决定步骤应是发现通常的同时性概念的内在矛盾。爱因斯坦曾告诉他的同班同学埃拉特，他是怎样顿开茅塞的。他说：他于1905年在伯尔尼有一天起床时想到，对于一个观察者来说是同时的两个事件，对别的观察者来说就不一定是同时的。

自从突破了同时性和时间概念这一难关之后，爱因斯坦的才思如骏马下坡，不可遏止；爱因斯坦的文辞如行云流水，天衣无缝。从构思到写成适用发表的论文，仅花费了五、六周时间。狭义相对论的建立，充分显示了爱因斯坦的天才和独创性。德布罗意在谈到爱因斯坦

时说：“他能够一眼看穿那疑难重重、错综复杂的迷宫，领悟到新的、简单的想法，使得他能够透露出那些问题的真实意义，并且给那黑暗笼罩的领域突然带来清澈和光明。”

爱因斯坦深有体会的说过：“如果把哲学理解为在最普遍和最广泛的形式中对知识的追求，那么，显然哲学就可以被认为是全部科学研究之母。”爱因斯坦的天才和独创性，与他善于进行哲学思维有十分密切的关系。

爱因斯坦从小就对哲学有浓厚的兴趣，他从十三岁开始攻读康德的《纯粹理性批判》。在“奥林比亚科学院”三年活动期间，他更是广泛地研读了许多自然科学哲学著作。例如马赫的《感觉的分析》、《力学》，休谟的《人性论》，亥姆霍兹的一些论文和讲演稿，斯宾诺莎的《伦理学》，彭加勒的《科学与假设》，毕尔生的《科学规范》等。从而造就了他的哲学头脑和哲学眼光，使他比当时其他物理学家站得高，看得远，想得深，使他认识到必须“对理论基础作批判性的思考”，以便弄清“鞋子究竟是哪里夹脚的”。积极的哲学思维，引导他闯入前人所设置的思想禁区，开拓出新的奇妙的世界。这个时期是他一生中最为活跃的时期。在他哲学自学活动结束的那一年，正是他创造科学奇迹的1905年！两者的因果联系是显而易见的。这里，我们不妨扼要地从认识论角度分析一下爱因斯坦创立狭义相对论的原因。

### 1. 怀疑的经验论是破旧的锐利武器

在创立相对论前夕，爱因斯坦由于阅读了休谟和马赫的著作而深受怀疑的经验论（即批判的经验论）的影响。爱因斯坦本人也承认，在他年轻的时候，休谟和马赫的认识论观点对他有过很大影响，并认为他当时的哲

学思想有点像马赫那样的怀疑的经验论，休谟对他的直接影响要更大些。

休谟是西方哲学史上最重要的哲学家之一。休谟认为，我们的一切观念都来自感觉，我们的一切知识都起源于经验。在他看来，宗教迷信的浮夸和独断论的形而上学是危险的，应该统统加以怀疑。休谟把他怀疑论的矛头对准了形而上学很重要的概念，即因果联结概念。休谟无可辩驳地论证说，理性决不可能先天的并且假借概念来思维这样一种含有必然性的结合。他振振有词地断言，理性在这一概念上完全弄错了，错在把这一概念看作自己的孩子，而实际上这个孩子不过是想象力的私生子，关于原因和结果的一切推理都是由习惯得来的。休谟无情地揭示了一个无法回避的事实：在独断论的形而上学那里，理性把只适合于经验范围的、只是作为心里联想而起作用的因果概念作了超验的使用，因此以往全部形而上学的知识，只不过是打上错误烙印的普通经验而已。休谟指出：“在人生的各种事情上，我们还是应当一概保持怀疑主义的态度。”“凡是曾煞费苦心反驳这种怀疑论的人，他实际上是作了没有敌手的争辩。”

如果说休谟怀疑的经验论的“火星”在18世纪激励康德在哲学领域里掀起了一场“哥白尼式革命”的话，那么在20世纪初，这颗火星也促使爱因斯坦在科学领域里掀起了同样的革命。像休谟这样的怀疑的经验论者看到人类理性在认识过程中的矛盾，要求对一个传统的观念采取怀疑的批判态度，要求一切被认为先验的东西都回到经验的基础上来，这对于反对独断论的形而上学，反对教条主义的迷信和权威崇拜无疑具有积极意义。黑格尔同列宁都充分肯定过怀疑论在历史上的作用。

至于马赫，诚如爱因斯坦所说，马赫依据怀疑的经验论哲学，把那些经验领域里排除出去，而放到虚无缥缈的先验的顶峰上去的基本观念，一个个地从柏拉图的奥林帕斯天堂拖下来，揭露出他们的世俗血统，把这些观念从强加给它们的禁忌中解放出来。马赫坚不可摧的怀疑态度大大激励了爱因斯坦，促使他大胆地抛弃传统的时间观念。

在批判学派的代表人物当中，除马赫、彭加勒外，毕尔生对爱因斯坦的影响也不容忽视。爱因斯坦在“奥林比亚科学院”读的第一本书就是《科学规范》，这是当时颇为流行的批判性的科学哲学著作。毕尔生标榜“批判是科学的生命”。他大声疾呼：“在我们这个本质上是科学研究的时代，怀疑与批判的优势不应该被视为绝望与没落的征兆，它是进步的保障之一。”“科学中最致命的症候就是，科学统治集团中那些墨守成规的人把对他们成果的怀疑和批判视为异端邪说，而且加以排斥。”引人注目的是，他在“机械论的界限”一节中还提出力学定律对微观对象是否适用的问题，对经典力学的普适性表示怀疑。

从哲学上讲，怀疑论只承认相对，否认绝对，把怀疑当作目的和归宿。黑格尔正确地把这种排斥肯定的否定的怀疑论斥之为偶然的、低级的、空洞的、是形而上学的虚妄。但是，在自然科学具体问题上表现出唯物论的经验论倾向的马赫、彭加勒、毕尔生等人的著作里，并没有怀疑论的这种消极因素，至少是没有显著地表现出来，因为他们都充分肯定了经典力学和经典物理学的价值和效用。

休谟、马赫等人们怀疑的经验论固然也有某种建设

性作用，但毕竟是一种破旧有余，立新不足的哲学，这主要是因为它是一种狭隘的经验论。这种狭隘的经验论只承认感觉和经验，轻视、排斥或完全否认理性和理性思维的作用，把科学仅仅视为一种搜集和整理经验材料的事业，它当然不能适应像狭义相对论这样充满思辨的理论的需要。例如，休谟的哲学虽然也有唯物论的成分，但他依然认为，人类精神有具有的创造力量，不外是把感官和经验提供给我们材料加以联系、置换、扩大或缩小而已。他甚至说，最生动活泼的思想还是抵不上最迟钝的感觉。显而易见，这样狭隘的经验论是难以作为立新的坚实基础的。爱因斯坦认为这种怀疑的经验论只能扑灭有害的虫豸，而不可能创造出什么有生命的东西。这是很有道理的。那么，爱因斯坦赖以立新的哲学思想是什么呢？

## 2. 唯理论的唯物论是立新的坚实基础

1956年，美国著名科学史家霍耳顿教授发表了“实在在哪里？爱因斯坦的回答”的论文，首次披露了爱因斯坦1938年1月24日写给匈牙利物理学家兰佐斯的信，为深入了解爱因斯坦的哲学思想提供了重要材料。爱因斯坦在信中表明：“从有点像马赫那种怀疑的经验论出发，经过引力问题，我转变成为一个信仰唯理论的人，也就是说，成为一个到数学的简单性中去寻求真理的唯一可靠源泉的人。逻辑简单的东西，当然就不一定是物理上真实的东西。但是物理上真实的东西一定是逻辑上简单的东西，也就是说，它在基础上具有统一性”。霍耳顿对爱因斯坦的哲学转变作了详尽的论证，他把爱因斯坦后期（1915年以后）的哲学思想称为“唯理论的实在论”。按照传统的哲学概念，它也可称为“唯理论的唯物

论”。

最近，许良英研究员发表文章指出：尽管爱因斯坦在后期唯理论思想明显占主导地位，但是从已发表的文献资料来看，他在早期虽然受休谟和马赫等人怀疑的经验论的影响，可同时也深受唯理论的影响，而且就在早期，唯理论思想已经占了主导地位。许良英列举了五个具有关键性意义的例子，论证了自己的观点。

从所列举的五例中，我们也有理由认为，即使在创立狭义相对论之前，爱因斯坦的主导哲学思想也是唯理论，唯理论的唯物论是爱因斯坦立新的坚实基础。

爱因斯坦的这种主导哲学思想可以追溯到他的少年时代。在十二岁那年，他由于读了通俗的科学书籍而失去了宗教的天堂。他相信，在我们之外有一个巨大的世界，它离开我们的人类而独立存在，它在我们面前就像一个伟大而永恒的谜，然后至少部分地是我们的观察和思维所能及的。对于这个世界的凝视深思，就像解放一样吸引着我们。从思想上掌握这个在个人以外的世界，总是作为一个最高目标而有意无意地浮现在爱因斯坦的心中。1901年4月，当爱因斯坦在《物理学杂志》发表了第一篇论文“毛细管现象所得的推论”后，他在写给格罗斯曼的信中说：“从那些看来同直接可见的真理十分不同的各种复杂的现象中认识到它们的统一性，那是一种壮丽的感觉。”爱因斯坦的这些感受、信念和认识，是同经验论格格不入的，而为唯理论所特有。在狭义相对论的创立过程中，无论从他为力学和电动力学谋求统一基础的大方向上看，还是从他采用探索性演绎法这一科学方法来看，唯理论的思想都起着基本的作用，这甚至也表现在狭义相对论论文开头的行文中。在同年发表的

光量子论文和布朗运动论文中，唯理论者所崇尚的自然界统一性思想也表现得十分明显。

霍耳顿曾经指出，爱因斯坦的“唯理论的实在论”思想是由于受了开普勒和普朗克的影响，这是有道理的。的确，在开普勒所生活的时代，人们还根本没有确信自然界是受规律支配的。他在无人支持和极少有人了解的情况下，为探索行星运动的自然规律，潜心地研究了几十年。使他获得无穷力量的，是他对自然规律存在的深挚的信仰。爱因斯坦极为赞赏开普勒这位卓越的人物，他从开普勒的成就中看到：“知识不能单从经验中得出，而只能从理智的发明同观察到的事实两者的比较中得出。”至于普朗克，他从献身科学的第一天起就坚信：“外部世界乃是独立于我们之外的绝对的东西，而去寻找那些适合于这个绝对东西的规律，在我看来就是科学生涯最美好的使命了。”正是在这种思想的指导下，他于1897年转向黑体辐射的研究，企图从黑体辐射光谱中寻找“绝对东西的规律”。普朗克全部工作方式的特点是，他总是从某些最普遍的原理出发，以它推出个别特殊结论，然后再把这些结论同经验相比较，普朗克从事科学探索的无穷毅力和耐心的源泉在于他渴望看到“先定的和谐”。他总想以最适当的方式来画出一幅简化的和易领悟的世界图像，以代替经验世界。爱因斯坦在创立狭义相对论时对普朗克的思想和工作是熟知的。

许良英在他的论文中指出，爱因斯坦的唯理论思想主要来自历史上最彻底的唯理论哲学家斯宾诺莎。这是很有见地的。由于类似的生活经历和不容于传统的独立思想，以及斯宾诺莎代表作《伦理学》中强烈的唯理论思想，使爱因斯坦少年时代所接受的朴素唯物论思想（也

就是自然科学唯物论思想，它本身已存在唯理论的成分）得到很大发展。斯宾诺莎终生为之奋斗的“对上帝的理智的爱”，被爱因斯坦奉为自己生活的最高目标，这就是求得对自然界的统一性和规律性的理解。因为斯宾诺莎的“上帝”，指的就是自然界。爱因斯坦也坦白地说过：“我的见解接近于斯宾诺莎的见解：赞美秩序与和谐的美，相信其中存在的逻辑简单性，这种秩序与和谐我们能谦恭地而且只能是不完全地去领悟。”“斯宾诺莎的思想对我始终是亲切的，我始终是这位哲学家及其教导的诚挚的赞美者。”斯宾诺莎的这些唯理论见解不正是爱因斯坦创立狭义相对论的哲学指导思想吗？

还应该看到，休谟、康德、彭加勒等人的思想影响，也有助于爱因斯坦唯理论思想的形成和发展。研究休谟的著作，特别是休谟对因果性概念的分析，使爱因斯坦得到了一般概念不能从经验中逻辑地推导出来的结论。不过，爱因斯坦批判了休谟由此而引申出来的不可知论。至于康德，他受到休谟的激励，认识到仅有经验材料，并不能形成概念的系列，如果没有因果性、时间、空间等先天形式或范畴，思维活动就无法进行，他由此得出可靠知识具有先验性质的结论。爱因斯坦当然反对康德的先验论，但康德强调感觉材料本身并没有向我们直接提供观念，却无疑会给爱因斯坦留下深刻的印象。尤其是，康德对独断论的形而上学的叛逆精神，康德用理性过滤神性，伸张人类理性的力量，提出理性为自然界立法的著名口号，使爱因斯坦得到极大的激励和感染。爱因斯坦后来谈到休谟和康德时说：“休谟清楚地了解到，有些概念，比如因果性概念，是不能用逻辑方法从经验材料中推导出来的。康德完全确信这些概念是不可缺少

的，他认为这些概念是任何思维的必要前提……”关于彭加勒，他在《科学与假设》中对假设在科学中的地位和作用的论述，以及他的约定主义和理性主义观点，无疑对爱因斯坦唯理论思想的形成和发展有帮助。而唯理论的唯物论，不仅是爱因斯坦创立狭义相对论的坚实的思想基础，而且指导着他一生的科学工作。

### 3. 经验约定主义是构筑理论框架的有力工具

约定主义在许多方面归功于康德，尽管他不是一个人约定主义者。康德认为，我们描述的本性与其说是取决于个人的选择，还不如说主要取决于人类思想的普遍特征。无论如何，他用下述观念为约定主义铺平了道路：我们在这个世界上发现的秩序并非与我们思想的特征毫不相干。

约定主义的创始人是彭加勒。彭加勒是在对数理科学的基础进行了敏锐的批判性的审查和分析的基础上提出约定主义的。他通过对几何学不同体系的考察得出，几何学的公理既非先验综合判断，亦非经验事实，它们原来都是约定。彭加勒发现，物理学尽管比较直接地以经验为基础，但它的一些基本原理也具有几何学公理那样的约定特征。例如惯性原理，它不是先验地支配我们的真理，也不是经验得到的事实，因为人们从来也不能用不受任何外力作用的物体做实验。因此，彭加勒得出结论说，在数学及其相关的学科中，可以看出自由约定的特征。

彭加勒认为：“约定是我们精神的自由活动的产品”。彭加勒解释说，这里的“自由”“并非任意之谓”，学者们所思考、所发现的世界并不是“他自己的任意所创造”。约定的选择除受到逻辑无矛盾要求的限制外，还要受到

实验事实的引导，特别是在物理学等与经验相关的学科中更是如此。彭加勒说：“如果我们细看一下引导科学创造者采用约定的实验，尽管这些实验多么不完善，足以证明约定合理而非任意的了。因此，人们最好时时注意这些约定的实验根源。”他阐述了实验在选择约定时能使我辨明最容易的路径。他把实验的作用比作为一位专制而聪明的王子要咨询参议会才颁布法令一样。他还把物理学的基本概念和原理喻为容纳事实的框架，这种框架并非任意所制，我们是按尺寸做的，我们能使事实适合于它，同时又不改变事实的基本东西。由此可见，彭加勒的约定主义是与他的经验主义的哲学基础密切相关的，我们不妨称其为“经验约定主义”这样似乎更能概括出它的特征。

彭加勒还阐述了约定主义的方法论意义。他认为物理学中有两类陈述——原理和定律。定律是实验的概括，它们对于相对孤立的系统而言可以近似地被证实；原理是约定的公设，它是十分普遍和严格真实的，且超越了实验所及的范围。他认为，当一定律被认为由实验充分证实时，我们可以采取两种态度。其一可以把定律提交讨论，于是它依然要受到持续不断地修正。其次可以通过选定一个约定使命题为真，从而把定律提升为原理。在彭加勒看来，经典力学和经典物理学的六大基本原理就是这样形成的。

彭加勒看到，无论是经验论还是先验论，都不能圆满地说明科学理论体系的特征。为了强调在从事实过渡到原理时，科学家应充分享有发挥能动性的自由，他于是提出约定主义。约定主义既要求摆脱孔德、马赫的狭隘经验论，又要求摆脱康德的先验论，它反映了科学界

自由创造、大胆假设的要求，在科学和哲学上都有其积极意义。

《科学与假设》对爱因斯坦的印象极深，爱因斯坦当时和他的“奥林比亚科学院”的同伴们花了几个星期紧张地读它。爱因斯坦 1921 年 1 月在题为“几何学和经验”的讲演中表示，他赞同“敏锐的深刻的思想家”彭加勒的约定主义观点，也认为“公理是人思想的自由创造”。他还表明：“从永恒的观点来看，彭加勒是正确的。”在同年 5 月的一次报告中，他在谈到关于空间的概念和判断时说：“这里也必须密切注意经验对于我们的概念的关系。我以为，彭加勒在他的《科学与假设》这本书里所作的阐述，已清楚地认识到这个真理。”在 1924 年发表的一篇书评中，他认为科学赖以建立的原则“本身却不是来自经验”，而是“纯粹的约定”，“就像词典里词的排列那样”。

爱因斯坦不仅赞成彭加勒的经验约定主义，而且根据他的科学实践，对此作了进一步的阐述和发展。这主要表现在以下三个方面：

(1)明确地阐述了科学理论体系的结构，充分肯定了约定在构筑科学理论体系中的重要作用。爱因斯坦认为，完整的科学理论体系是由基本概念、被认为对这些概念有效的基本假设（也称基本原理等），以及用逻辑推理得到的结论这三者构成的。其中在逻辑上不能进一步简化的基本概念和基本假设是理论体系的根本部分，它们是整个理论体系的公理基础或逻辑前提。它们“不能从经验中抽取出来，而必须自由地发明出来”，它们“都是一些自由选择的约定”。

(2)明确提出了“概念是思维的自由创造”，“范畴是

自由的约定”的命题，阐述了从感性经验到基本概念和基本假设的非逻辑途径和二者的微妙关系。爱因斯坦认为，要从经验得到基本概念和基本假设，只有通过那种以对经验的共鸣的理解为依据的直觉。此外，他认为也可以通过“探索”、“猜测”、“大胆思辨”、“创造性的想象”、“幻想”、“思维的自由创造”、“理智的自由发明”、“自由选择的约定”等来达到。因此，基本概念和原理在逻辑上是独立的，二者的关系不像肉汤同肉的关系，而倒有点像衣帽间牌子上的号码同大衣的关系。

(3)明确提出了选择公理基础或理论框架的内部标准（理论不应当同经验事实矛盾）和外部标准（基本概念、基本原理的“自然性”或“逻辑的简单性”）。爱因斯坦这样概括科学理论体系的特征：“从逻辑观点看来，这个体系的逻辑基础以及它的内部结构都是‘约定的’。它们之所以能站得住脚，在于这个体系在事实面前的有效性，在于它的思想的统一性，也在于它所要求的前提为数很少。”

无论是从爱因斯坦创立狭义相对论的经过来看，还是从狭义相对论论文本身来看，人们不难发现，经过爱因斯坦发展了的经验约定主义是他构筑狭义相对论的公理基础的有力工具。狭义相对论的两个基本原理就是爱因斯坦以不充分的经验材料为指导，通过思维的自由创造和理智的自由发明，所作出的约定。后来的有关论述，只是他的思想的进一步发展和系统化而已。爱因斯坦后来明确指出，相对论是说明理论科学在现代发展的基本特征的一个良好的例子。初始假设变得愈来愈抽象，离经验愈来愈远。另一方面，它更接近一切科学的伟大目标，即要从尽可能少的假设或者公理出发，通过逻辑的

演绎，概括尽可能多的经验事实。同时，从公理引向经验事实或者可证实的结论的思路也就愈来愈长，愈来愈微妙。

一切理论探索，归根到底都是方法的探索，爱因斯坦创立狭义相对论也不例外。狭义相对论不仅以其革命性的新观念和卓有成效的理论成果为人津津乐道，而且它所体现出的科学方法的新颖、精湛以及理论逻辑结构的严谨，也令人叹为观止。爱因斯坦当时所运用的科学方法，与同时代的大多数物理学家所用的科学方法大相径庭。可以毫不夸张地说，没有别具一格的科学方法，就没有举世瞩目的相对论。

在创立狭义相对论时，爱因斯坦运用了探索性的演绎法、逻辑简单性原则、准美学原则和形象思维等行之有效、颇有特色的科学方法。关于探索性的演绎法，我们前面已涉及到了；关于逻辑简单性原则，有人也做过比较详尽的论述，此处不拟再加以赘述。我们着重谈谈后两种方法。

爱因斯坦的科学方法本质上是美学的（因此可以称其为准美学方法）。在构造一种理论时，他采用的方法与艺术家所用的方法具有某种共同性，他的目的在于求得简单性和美（而对他来说，美在本质上终究是简单性）。在创立狭义相对论的过程中，他把准美学原则作为构造科学理论体系的有效工具和评价科学理论的重要标准。

有理由认为，爱因斯坦读过彭加勒的《科学与方法》。爱因斯坦看来十分赞同彭加勒关于科学美的论述，他也赋予科学美以“统一”、“和谐”、“对称”、“简单性”等含义。尽管爱因斯坦用不同的词语来阐述科学理论的美，但也许可以认为，“统一”、“和谐”是从理论的内容角度

讲的，“对称”是从理论的形式上讲的，而“简单性”则是针对理论的逻辑基础而言的。

在创立狭义相对论时，爱因斯坦十分关心各种物理理论之间形式上的不对称。他发现，电动力学和力学之间关于运动相对性是不对称的。在狭义相对论论文的开头，他就揭示出，麦克斯韦电动力学应用到运动物体上时，就要引起“似乎不是现象所固有的”“一些不对称”，他引用了导体和磁体相对运动的例子。为了消除该例中理论解释的不对称，他把力学中的相对性原理提升为公设，推广到电动力学。在光量子论文中，他为了消除力学和电动力学二者在各自的实体（粒子和场）方面存在的不对称，而提出了光量子假设。

这种准美学原则，可以称之为定性概念形式的抽象对称法。用这种方法建造的理论在内容上是统一、和谐的，在逻辑上是简单的。在创立了狭义相对论后，特别是在闵可夫斯基的工作（引入了一种形式体系，使定律的数学形式本身就保证了它在洛伦兹变换下的不变性）之后，爱因斯坦又把定量数学形式的协变对称法作为他的准美学原则之一。爱因斯坦的准美学原则，为许多后继的著名物理学家（海森伯、狄拉克、杨振宁等）所推崇。爱因斯坦集科学家和艺术家（不要忘记，他从六岁起就学音乐，是一位高明的小提琴手，并且深谙古典音乐大师的名作）于一身，他特别擅长于形象思维。他的每一项科学创造，都带有强烈的形象思维的色彩。

关于形象思维，爱因斯坦主要受到玻耳兹曼，尤其是亥姆霍兹的影响。亥姆霍兹的“感性知觉的来源和正确解释”（1894年）的论文可能强烈地影响了爱因斯坦，爱因斯坦后来在“自述”中对思维的描述与亥姆霍兹的

话多有类似。在爱因斯坦看来，思维绝大部分不用符号（词）也能进行，它是一种形象的活动，因为概念没有必要非同词联系起来不可；而且，思维在很大程度上是无意识的。

爱因斯坦这里所谓的“思维”，主要指的是形象思维。现代科学表明，大脑左半球的机能是进行受语言和逻辑支配的抽象思维；右半球的机能主要是进行要求同时或相继把感知的元素联结成某种整体的知觉，这时语言不起主要作用。因此，心理活动主要由大脑左半球主管的人，他的思维属于思想家类型，这样的人爱好抽象思维，即符号的、词语的和逻辑的思维，而心理活动主要由大脑右半球主管的人，他的思维则属于艺术家类型，这样的人喜欢整体的、综合的和形象的思维。在科学研究和艺术实践中，爱因斯坦的大脑两半球都得到锻炼，他既善于抽象思维，又长于形象思维。

音乐对爱因斯坦科学创造活动的影响比人们想象的还要大。音乐帮助爱因斯坦掌握了作曲家的创作方法，学会了作曲家的思维方式，不知不觉地训练了他的造型艺术。他通过音乐了解作曲家探索的实质，力求勾勒出反映自然界的宏伟蓝图。

世纪之交，在德语国家，有教养的科学家在科学工作中广泛使用形象思维，但是在爱因斯坦之前，从来也没有一个人有效地把它与准美学概念和思想实验结合起来。

思想实验是按照真实实验格式展开的一种复杂的形象思维和逻辑思维活动，它通过创造有假想主体干预的变化着的假想客体的形象，来揭示事物的内部规律。思想实验的一个最大特点是形象思维积极地参与其中。在

创立狭义相对论时，爱因斯坦多次运用思想实验，使他的思路步步深入。在阿劳中学时的“追光”思想实验，培育了狭义相对论的萌芽；导体和磁体相对运动的思想实验，揭示了电磁感应中并非现象所固有的不对称；两个观察者同步钟的思想实验，帮助他定义了同时性。

在爱因斯坦创立狭义相对论的过程中，从方法上讲，探索性的演绎法起了主要的作用，其他三种方法是对它的补充和强化。探索性的演绎法的关键在于，用非逻辑的方法从为数不多的经验材料中构想出可供演绎的逻辑前提；在这里，形象思维中的直觉、想象等扮演了重要角色；而思想实验则把直觉顿悟到的不甚肯定、不甚明确的基本概念和基本原理通过形象的运动和逻辑的引导，加以肯定和明确；在思想实验过程中，直觉、想象等又积极参与到构思活动中。但是，直觉、想象等也不能随心所欲地构想逻辑前提，逻辑简单性原则和准美学原则具有不可或缺的作用：它可以揭示出旧理论体系的基础的不简单、不统一，各理论体系之间的不对称、不和谐；它在形成新的逻辑前提时起指导和制约作用，即必须形成符合这两个原则的逻辑前提。逻辑简单性原则和准美学原则也是互相沟通的，因为简单性也就是美。而且，在通过思想实验确立了新的逻辑前提后，逻辑简单性原则和准美学原则还起着选择和评价逻辑前提的作用，因为经验检验在这里往往一时还是无能为力的。在以这两个原则为指导而构想和评价逻辑前提的过程中，需要思想的自由活动，需要科学的审美判断，显然这是离不开形象思维的。爱因斯坦正是把这四种科学方法有效地结合起来，才最终创立了狭义相对论。

洛伦兹和彭加勒是相对论的先驱，但他们并未达到

在概念上等价于爱因斯坦相对论那样的理论，这有科学方面的原因，也有其他方面的原因。但是，最根本的原因恐怕还在于哲学方面。

从方法论上看，洛伦兹和彭加勒基本上采取的是经验归纳法，而没有像爱因斯坦那样，顺应科学发展的趋势，大胆地采用探索性的演绎法。因此，他们最终的努力结果只能是像电子论和电子动力学这样的构造性理论，而不是像狭义相对论这样的原理理论。

从自然观上看，作为 19 世纪的经典物理学家，洛伦兹和彭加勒都深深地打上了那个时代的烙印，墨守于机械自然观，这明显地表现在他们迷恋以太上。后来，他们虽然倾向于电磁自然观，但仍然认为力学应在整个物理学大厦的逻辑结构中占据首要地位。而且，电磁自然观也不能作为统一物理学的基础。

从认识论上看，洛伦兹之所以未能达到相对论，是因为他坚持的是机械唯物主义的认识路线。这条认识路线，固然促使他把经典物理学发展到它的终极形式。但是另一方面，由于这种认识路线不了解一切科学理论的相对性，不懂得辩证法，夸大机械论的观点，因而在世纪之交特定的历史条件下，已基本丧失了其积极意义，在一定的程度上变成妨碍物理学进一步发展的阻力了。正是在这种认识论的制约下，洛伦兹把经典力学和经典物理学的基本观念视为神圣不可侵犯的教条。当一系列新实验与这些基本观念发生尖锐矛盾时，他不是积极谋求变革经典理论的框架，而是通过增加辅助假设，修修补补，力图把新事实纳入旧框架之中。

要从认识论上找彭加勒没有达到相对论的原因，情况就要复杂得多。彭加勒一方面断言，物是感觉的恒久

结合，凡不是思想的东西都是纯粹的无（因而他被认为是唯心主义者）；另一方面，他又承认认识来源于经验，科学由事实来建造。在涉及到与科学有关的问题时，他却坚持自然科学家的传统，直率地用唯物主义去议论，是一个唯物论的经验论者。经验主义是他的哲学基础，这是一个坚实的基础。经验主义不仅表现在他的大量言论上，而且也体现在他的科学活动中。彭加勒没有达到相对论，关键并不像有人所言，在于他的哲学唯心主义；因为他在科学探索活动中始终坚持的是唯物论的经验论原则。彭加勒没有达到相对论，是因为他过分拘泥于经验论。在这里，必须说明的是，彭加勒并不是一位十足的狭隘经验论者。他反对实证主义和实用主义，崇尚理性，承认科学理论和理论思维的重要作用，主张“为科学而科学”，是一个热情的理性主义者。作为一个长期从事理论科学的学者，他的理性主义的确是够“热情”的，但是当碰到具体的科学问题时，他的理性主义马上就跌落到坚实的经验主义基础上。在某些场合，他的经验论似乎还有点“狭隘”。例如，他认为“科学是一种关系的系统”，“科学仅仅是分类而已”。他虽然承认“数学物理学具有毋庸置疑的作用”，但这种作用只是“编辑目录”，“目录编得再好，也不能使图书馆增加财富”。而“实验物理学负买书之责，所以唯独它能使图书馆丰富”。他还认为：“数学物理学的作用只是提出问题，只有实验才能回答问题。”

在行动上，彭加勒就更是如此了。在世纪之交，彭加勒虽然敏锐地觉察到物理学的危机，并第一个对它进行了全面的分析和论述。但是，彭加勒把物理学危机主要看作是围绕着实验困难而发生的，因而既不包含认识

论的重新定向，也不包含本质不同的理论定向。这与爱因斯坦对物理学危机的看法截然不同：像迈克耳孙-莫雷实验这样的新的实验发现并没有使爱因斯坦看到危机，也没有给他指出新方向；但是马赫对经典力学的批判以及力学和电动力学之间的不协调却使他洞察到经典理论基础的“危机”；尤其是普朗克量子论的提出，使他突然意识到危机的严重性；他看到旧地基给挖掉了，必须抛弃过时的机械自然观和行不通的电磁自然观，使认识论和方法论都来一个转向——向唯理论回摆，采用探索性的演绎法。

彭加勒在口头上也曾表示，相对性原理是约定，但在心底深处，他仍把它视为经验定律。他心目中的相对性原理实际上是力学中的相对运动原理，它在力学中已为大量的实验所确立。在电动力学中，暂时还没有实验否定它，而且相反的假设又难与我们的思想相容，所以他怀着某种保留接受了它，但总期待着新的实验证实。对于彭加勒来说，由于相对性原理本身是一个“事实”，是实验证明的课题，因此它在任何时候都有可能被未来的实验否定，只要有一个真实的反例就会迫使他对相对性原理发生怀疑。果然，考夫曼 1906 年发表的实验数据（后证明有错误）就使得他开始怀疑相对性原理的价值。关于光速不变原理，他说罗麦在测定光速时已暗中假定它是一个“公设”，因为没有这个公设，便无法测量光速。但是，在彭加勒看来，这却是一种奇特的公设，因为它虽不能被实验证实，但是如果各种测量结果不一致，它就会与实验相矛盾，即可以被实验否定（奇怪的是，彭加勒在哲学上则认为，公设是约定的结果，而约定而成的公设是既不能为实验证实，又不能被实验否证的）。彭

加勒认为，我们自己是幸运的，因为这种矛盾并没有出现，而且可能出现的一点点不一致也能很快地加以解释。按照彭加勒的观点，光速实际上不是普通常数，它仅在绝对的以太参照系中是常数；在其他惯性系，人们会期望发现顺着运动方向和逆着运动方向的光速的差别，人们之所以检测不到这种差别，是由于伦洛兹-斐兹杰惹收缩的补偿效应的结果。由此可见，彭加勒实际上把这两个原理看作是从实验归纳出来的陈述。他未能像爱因斯坦那样，把它们提高到公设的高度来看待，并以此作为新理论体系的逻辑前提。彭加勒的经验论的某种狭隘性也表现在他对同时性概念的理解上。在彭加勒看来，局域同时性和远隔同时性的差别可以忽略不计，因为他认为同时性问题是感觉为基础的，因而是定性的，而定义时间的问题则是定量问题。对爱因斯坦而言，定义同时性和时间的问题都是定量问题。正是彭加勒过于拘泥经验论，成为妨碍他达到相对论的重要原因。要知道，在世纪之交，物理学已走进了理论的领域，而在这里经验的方法就不中用了，在这里只有理论思维才能有所帮助。

有人认为，彭加勒之所以没有达到相对论，关键在于他坚持唯心论的约定主义。在这里，我们不算讨论彭加勒的约定主义是否是唯心论的问题，我们相信，聪明的读者只要阅读一下彭加勒的原著，是不难得出自己的结论的。我们只想说明，我们的观点与上述观点针锋相对：彭加勒之所以没有达到相对论，恰恰在于他没有把他的约定主义贯彻到底。从哲学上讲，彭加勒认为像相对性原理和光速不变原理这样的基本原理都是从经验定律提升为公设的约定，它们不需要实验证实，也不能

被实验否定；可是，从物理学上讲，他又把这两个原理视为经验定律，总是对它们放心不下，期待进一步的实验检验。戈德堡在描绘彭加勒的这种矛盾处境时所说的话是有一定道理的：“当谈到物理学的本性时，尽管彭加勒可以很好地利用约定主义的立场，但是在他本人的理论物理学工作中，他却不是一个约定主义者。作为哲学家的彭加勒十分正确地认为，相对性原理可以看作是在先的约定。作为物理学家的彭加勒确实要求有这样一个原理通过经验归纳来支持，人们也可以说是‘证明’。他的哲学和他的物理学的这种矛盾浸入在他的电动力学工作的其他方面。”

以往，人们在谈到科学家的成就和他们的哲学思想时，往往说他们的成就是坚持自发唯物主义的结果，把他们的失败或失误统统归之于他们的唯心主义（如果他们的哲学思想是唯心主义的话）。洛伦兹和彭加勒的情况为那种“贴标签”式的简单化作法提供了一个绝妙的、强有力的反例。科学家的科学成就和他们本人的哲学思想之间的关系一般说来是比较复杂的，决不是从原则出发所能奏效的。只有实事求是，下苦功夫详细地占有材料（尤其是第一手材料），对具体问题进行具体的科学分析，才能得出比较合乎实际的结论来。

## 科学史上的奇迹

爱因斯坦是 20 世纪最伟大的科学家。他对科学的贡献遍及整个物理学领域。正如一些学者所指出的那样，“按照诺贝尔物理学奖颁发的标准，他至少可得五次奖

金（指狭义相对论、质能相当性、广义相对论、光量子论、布朗运动等五項工作）。然而，在爱因斯坦的科学贡献中最令人赞叹的成就还是他成功地独自创立了广义相对论。

人们普遍认为，爱因斯坦在 20 世纪科学史上占据着至高无上的地位。如果我们问那些伟大的物理学家中的任何一个人，为 20 世纪物理学做出了最重要贡献的人是谁，那么，他们将会毫不犹豫地回答：阿耳伯特·爱因斯坦。爱因斯坦的物理发现的压倒一切的重要性和他在科学史中独一无二的地位被普遍地承认，并且几乎无可争辩。著名的物理学家朗之万在评价爱因斯坦时说：“在我们这一时代的物理学家中，爱因斯坦的地位将在最前列。他现在是并且将来也还是人类宇宙中有头等光辉的一颗巨星。很难说他是否同牛顿一样伟大，或者是比牛顿更伟大，不过，可以肯定地说，他的伟大是可以同牛顿比拟的。按我的意见，他也许比牛顿更伟大一些，因为他对于科学的贡献更深入到人类思想基本概念的结构中。”另一位著名的物理学家朗道曾对 20 世纪杰出的物理学家的贡献做过一个有趣的比较。他把玻尔、海森伯、狄拉克、薛定谔等人

都列为第一等，把自己列为第  $2\frac{1}{2}$  等，唯独把爱因斯坦列为第  $\frac{1}{2}$  等。

由此可以看出爱因斯坦在 20 世纪科学史上占据多么突出的地位，而这主要是因为他独自一人成功地创立了广义相对论。

广义相对论的创立与其他物理学理论（包括狭义相对论）产生的途径完全不同，既不是为了解决理论与实验存在着的分歧，也不是为了满足理论发展的迫切需要，

并且广义相对论是一项“真正的个人的工作”，完全是爱因斯坦独自的发现。广义相对论是一门艰深难懂的理论，以致于它产生之后多年都很少有人真正弄懂它。英费尔德讲过这样一件趣事：在大战期间爱丁顿作了一个关于广义相对论的报告。在报告结束时，一位物理学家对爱丁顿说：“这是一个出色的报告。您是这个世界上懂得并熟悉它的三个人之一”。当爱丁顿露出怀疑的神情时，这位物理学家补充说：“教授先生，您不要以为这是奉承的话，您是太谦虚了”。爱丁顿回答说：“我并不感到难为情，我只是在想这第三个人是谁。”

广义相对论又是一门优美迷人的理论，以致于人们往往用鉴赏一件艺术品的眼光去审视它，赞美它。德布罗意这样写道：它的“雅致和美丽是无可争辩的。它应该作为 20 世纪数学物理学的一座最优美的纪念碑而永垂不朽”。

广义相对论这种既艰深难懂又优美迷人的特征，在玻恩的一段话中表现的最为充分确切。他写道：“我还记得，1913 年我在蜜月旅行途中随身行李里带了几本爱因斯坦的论文翻印本，它们老是好几个钟头地吸引着我的注意力，使我的新娘非常恼火。这些论文在我看来是很吸引人的，但是很难，几乎使人感到害怕。当我 1915 年在柏林遇到爱因斯坦的时候，这个理论已经有了很多改进，而且由于莱维瑞尔所发现的水星近日点的反常性得到解释更增加了一层光辉。我不仅从书刊中，而且从多次同爱因斯坦的讨论中懂得了它，其结果是，我决定绝不在这方面尝试做任何工作。广义相对论的创立那时在我看来乃是人类思索自然中的最伟大的功绩，是哲学领悟、物理直觉和数学技巧最惊人的结合，今天我还是

这样看。但是，它和经验的关联太少。我觉得它好像是一件伟大的艺术品，供人远远欣赏和赞美。”

创立广义相对论的过程是科学史上极为壮丽的一幕，是爱因斯坦多年探索的成果，是他非凡智慧的结晶，是他不懈努力的产物，从中可以使我们更加深入地理解爱因斯坦的主要思想方法。爱因斯坦说过：“用尽可能简短的形式来表述一系列概念的进展，而又足以完整地把发展的连续性彻底保存下来，那是有点吸引人的。”本文力图按照这种精神，在其他一些学者研究工作的基础之上，简要叙述爱因斯坦创立广义相对论的主要过程，以便从中得出有益于我们的启示。

### 1. 提出两条基本原理

广义相对论是建立在狭义相对论的基础上的。1905年，爱因斯坦发表了“论动体的电动力学”这篇具有划时代意义的光辉论文，创立了狭义相对论，成功地使一切物理学规律对一切惯性系保持协变，给物理学带来了革命性的变化。然而，狭义相对论还存在着无法使爱因斯坦满意的两个内在缺陷。一是狭义相对论还必须保留惯性系的优越地位，二是不可能以自然的方式把引力理论同狭义相对论联结起来。1907年，爱因斯坦发表了一篇极为重要的论文“关于相对论原理和由此得出的结论”。在这篇文章中，爱因斯坦总结了狭义相对论的思想内容及其深刻含义，并在文章的最后提出了广义相对论的两条基本原理：广义相对性原理和等效原理。他写道：“是否可以设想，相对性运动原理对于相互相对作加速运动的参考系也仍然成立？”还写道：“我们在下面将假设：引力场同参照系的相当的加速度在物理上完全等价。”通常都把这篇论文看作是广义相对论的起点。

从 1905 年爱因斯坦创立狭义相对论，到 1907 年他提出广义相对论的两条基本原理，这中间的过程最能体现出爱因斯坦思想方法的特征。他最善于“识别出那种能导致深邃知识的东西，而把其他许多东西撇开不管，把许多充塞脑袋并使它偏离主要目标的东西撇开不管”。

爱因斯坦创立狭义相对论是从消除在麦克斯韦电动力学理论中存在着一个相对于以太静止的优越参考系这一内在缺陷入手的。然而，狭义相对论虽然成功地打破了相对于以太静止的参考系的优越地位，但却不得不保留惯性系的优越地位，还没有满足爱因斯坦更基本的要求：“物理学的定律必须具有这样的性质，它们对于无论哪种方式运动着的参考系都是成立的。”在爱因斯坦看来，“全部研究的中心是这样一个问题：自然界中是否存在物理学上看来是特殊的（特别优越的）运动状态？（物理学的相对性问题）”爱因斯坦认为，在一切参考系中从事物理学研究的观察者都具有同等的地位，他们所得到的物理学规律具有同等的效力，也就是说，不存在任何特别优越的参考系，一切参考系中的观察者都是平权的。这是爱因斯坦创立广义相对论最基本的思想，也是他毕生的科学信念。这一思想的确立，如同哥白尼打破地心说，达尔文发现人是由动物进化而来的一样，是对人类中心论和唯我独尊意识的巨大冲击，是人类思想认识水平提高的重要一步。

早在 1905 年爱因斯坦创立狭义相对论时，他就开始考虑这个问题了。他曾这样写道：“当我通过狭义相对论得到了一切所谓惯性系对于表示自然规律的等效性时（1905 年），就自然地引起了这样的问题：坐标系有没有更进一步的等效性呢？换个提法：如果速度概念只能

有相对意义，难道我们还应当固执着把加速度当作一个绝对的概念吗？”爱因斯坦不满意狭义相对论保留着惯性系的优越地位，因为“更为令人满意的应当是这样一种理论，它从一开始就不区分出任何特别优越的运动状态”。

在今天看来，把狭义相对性原理推广到广义相对性原理似乎是很顺理成章的自然步骤。爱因斯坦自己也说过：“由于已经证明引进狭义相对性原理是合理的。因而每一个追求普遍化结果的人必然很想朝着广义相对性原理探索前进。”但是，要注意这必须是一个像爱因斯坦那样追求物质世界统一性，追求普遍化结果的人才行。除此之外，他还必须具有高度的哲学领悟能力和敏锐的批判精神，必须有勇气敢于向那些貌似坚如磐石的传统观念挑战。因为“直到那时为止的全部力学的基础——惯性原理——看来却不允许把相对性原理作任何推广。”广义相对性原理的提出对于物理学的发展以及哲学的进步都有着极大的革命性意义，它深深地改变了人类思想基本概念的结构。

如果说，广义相对性原理的提出是爱因斯坦具有高度哲学领悟力、追求物质世界统一性最突出的反映，那么，等效原理的提出也许就是爱因斯坦具有惊人的物理直觉、高超运用逻辑思维洞察力最集中的体现了。

尽管狭义相对论最初起源于对麦克斯韦电动力学理论的研究，但是很快它就影响到了整个物理学领域。狭义相对论诞生不久，爱因斯坦就在狭义相对论的基础之上推导出了一个他自己称之为非常有趣的重要公式： $E = mc^2$ ，揭示了质量和能量之间存在着等效关系。紧接着，1906年普朗克导出了取代牛顿质点运动方程的相对论

力学方程，建立了相对论力学。然而，在狭义相对论的框架中却无法自然地处理引力问题。这促使爱因斯坦认真地思考引力的本质，寻求从根本上解决引力问题的途径。在诸多的复杂物理现象中，爱因斯坦注意到了—一个极为平凡又不为人注意的经验事实，并发现了其中所包含着的深刻的物理意义。爱因斯坦在“相对论发展简述”这篇文章中写道：“在引力场里，一切物体都以同一加速度下落，或者说——这不过是同一事实的另一种讲法——物体的引力质量同惯性质量在数值上是彼此相等的。这种数值上的相等，暗示着性质上的相同。引力同惯性能够是同一的吗？这问题直接导致了广义相对论。谁都难以相信，这个人们不曾重视的经验事实，竟然成了广义相对论这座宏伟的大厦赖以建立的唯一的一块经验柱石。爱因斯坦本人也高兴地把对这一问题的思考说成是自己“一生中最富有成果的思想”。在爱因斯坦提出等效原理的过程中，他运用了思想实验的方法，他假想出一种合理的情况，一个观察者在—一个正在自由下落的升降机内，爱因斯坦反复思考这时这个观察者得到了什么结论。

等效原理的提出是朝创立广义相对论迈出的最重要的一步。有了等效原理，通过“从理论上—来考查那些相对于—一个均匀加速的坐标系而发生的过程，我们就获得了关于均匀引力场中各种过程的全部历程的信息”。

## 2. 找到合适的数学工具

广义相对性原理和等效原理的提出，为广义相对论奠定了坚实的思想基础，但是，要在这两条基本原理的基础之上建起—门完整的物理学理论还有许多困难。首先遇到的—个难题就是怎样去描述引力场，为此必须找

到一个适当的数学量。如果说，爱因斯坦提出广义相对论的两条基本原理主要依靠的是哲学领悟和物理直觉，那么，把广义相对论发展成一门完整的物理学理论就要依靠物理直觉再加上深奥精致的数学技巧了。起初，爱因斯坦对相对论的数学表述形式并不热心，但是对引力问题的深入研究使得他和数学的关系越来越密切。他不仅通过接触数学家去了解数学的最新发展，而且不断地从物理学的研究中向数学提出新的要求，希望数学家给予合作。为了找到一个能准确描述引力场的适当的数学量，爱因斯坦进行了长期的艰难探索。

广义相对论的两条基本原理要求所建立的定律对于四维连续区中的坐标的非线性变换保持协变。为此，爱因斯坦再一次显示出他天才的创造力，他通过对转动的刚体圆盘上的观测者的严格分析，发现其时空坐标的定义会出现巨大的问题。爱因斯坦发现，“在转动圆盘上，或者普遍地说，在一个引力场中，欧几里得几何学的命题并不能严格地成立”，并得出结论：“当引力场存在时，几何学就不是欧几里德几何学”。由此看来，要解决引力问题，必须从非欧几何中找到一个合适的数学量去描述引力场。幸好爱因斯坦对高斯的曲面论很熟悉，因为他在上大学时对微分几何课很感兴趣。后来爱因斯坦曾在回忆中写道：“盖塞教授关于微分几何的讲授也吸引了我，这是教学艺术的真正杰作，在我后来为建立广义相对论的努力中帮了我很大的忙。”经过长期艰苦的探索，爱因斯坦终于发现：“高斯的曲面论与广义相对论间最重要的接触点就在于度规性质，这些性质是建立两种理论的概念的主要基础。”爱因斯坦认识到，“引力场影响乃至决定时空连续区域的度规定律”，度规就是他寻找多年

的描述引力场的适当的数学量。正如泡利所说：“这样把两个先前完全不相干的课题——度规和引力——融合在一起，必须看成是广义相对论的最光辉的成就。”爱因斯坦本人也这样认为，他说：“为什么建立广义相对论还需要七年时间呢？其主要原因在于，要使人们从坐标必须具有直接的度规意义这一观念中解放出来，可不是那么容易的。”找到了能够适当地描述引力场的数学量，发现引力和度规之间的联系；引力问题就归结为一个纯数学的问题了”。这是建成广义相对论完整理论至关重要的一步。

### 3. 建起广义协变的引力场方程

在找到了合适的描述引力场的数学量——度规张量之后，下一步的关键问题是：对于度规张量是否存在着一个对于非线性变换能够保持协变的微分方程，因为只有这样的微分方程才有可能是引力场方程。

为了解决这一难题，爱因斯坦同他的好朋友、大学时代的同学、数学家格罗斯曼进行了卓有成效的合作。他们广泛地考查了当时已有的数学理论，很快就发现，“广义相对论所需要的数学工具已经在‘绝对微分学’中完全具备，这种‘绝对微分学’以高斯、黎曼和克里斯托菲关于非欧几里得流形的研究为基础，并由里奇和勒维契维塔建成一个体系，并且已应用于理论物理学的一些问题上。”爱因斯坦和格罗斯曼密切合作，取得了重要的成果。1913年，他们联名发表了一篇重要文章“广义相对论纲要和引力论”，这篇文章的物理部分由爱因斯坦执笔，数学部分由格罗斯曼执笔，这是他们把爱因斯坦深刻的物理思想与同它相适应的数学方法结合在一起的一次勇敢的尝试。爱因斯坦对于格罗斯曼在他建立广

义相对论的过程中给予他的支持和帮助，做了极高的评价，他怀着感激的心情在“广义相对论的基础”一文中写道：“他不仅代替我研究了有关的数学文献，而且在探索引力场方程方面也给我以大力支持。”后来，爱因斯坦和格罗斯曼又连续联名发表了另外三篇重要文章，这些文章是广义相对论发展过程中重要的步骤，他们的工作使广义相对论已近于完成。接着，爱因斯坦又做了两年时间的努力，在这期间，他利用自己已经掌握了数学技巧，运用他天才的物理直觉，不断深入思考，不断修正自己的理论，终于在1915年11月25日完成了广义相对论的完整理论，建立起广义协变的引力场方程。这是一件辉煌的成就，从爱因斯坦当时写给朋友们的信中，我们可以看到爱因斯坦内心的喜悦。他在11月28日（即完成广义相对论后的第三天）写信给索末菲说：“上个月是我一生中最激动、最紧张的时期之一，当然也是收获最大的时期之一。”同年12月9日，他在写给朋友贝索的信中说：“如今实现了最大胆的梦想：普遍协变性。”

从1907年爱因斯坦提出广义相对论的两条基本原理，到1915年他成功地完成广义相对论的完整理论，在这整整八年的时间里，爱因斯坦进行了艰苦卓绝的奋斗，克服了难以想象的困难。后来爱因斯坦自己回忆起这段时间时说：“从已得到的知识来看，这愉快的成就简直好像是理所当然的，而且任何有才智的学生不要碰到太多困难就能掌握它。但是，在黑暗中焦急地探索着的年代里，怀着热烈的想望，时而充满自信，时而精疲力竭，而最后终于看到了光明——所有这些，只有亲身经历过的人才能体会。”

爱因斯坦创立的广义相对论的确“是人类思索自然

中的最伟大的功绩，是哲学领悟、物理直觉和数学技巧最惊人的结合”；应该作为 20 世纪数学物理学的一个最优美的纪念碑”。

认真总结爱因斯坦在创立广义相对论的过程中成功的经验，从而使我们得到应有的启示，是一项很有意义的工作。许多学者已经对此做了广泛的探讨。许良英教授在“爱因斯坦的科学方法的特点”一文中对爱因斯坦的科学方法的特点做了概括性的总结，认为爱因斯坦科学探索方法的基本前提是坚持自然科学唯物论的传统，核心是统一性的思想，突出表现是独立的批判精神，而最能显示他的非凡的科学创造才能的是善于运用逻辑思维的洞察力，善于深入事物的本质。

从爱因斯坦创立广义相对论的过程中，尤其是在他提出广义相对性原理和等效原理的过程中，我们可以清楚地看到爱因斯坦的确非常自如地运用着这些方法。他在成功地建立起狭义相对论之后，很快着手把相对性原理从惯性系向非惯性系推广，竭尽全力要使物理学定律在一切参考系中具有同等的地位；在成功地把力学规律和电磁学规律统一于狭义相对论的框架之后，立即着手用同样的方法去解决引力问题，力图建立起相对论的引力理论；这些都充分表现出爱因斯坦对物质世界统一性的强烈追求。在创立广义相对论的过程中，他勇于大胆怀疑牛顿绝对空间的权威地位，对一切基本概念及其基本关系进行批判性的考查，这是他得以成功的前提条件，也显示出爱因斯坦所具有的高度的独立的批判精神。而他从人们司空见惯、习以为常的惯性质量与引力质量相等这一经验事实中悟出等效原理，从对转动的刚体圆盘所进行的分析中发现在引力场中几何学是非欧几何，找

到度规张量作为描述引力场的数学工具，则是他惊人的物理直觉和特别擅长逻辑思维洞察力的体现。

应该指出，爱因斯坦一方面非常坚定地按照自己的哲学信念、科学思想去从事自己的研究工作，一方面又十分虚心地向别人学习，善于吸取别人的研究方法和研究成果。这一点在他为最终完成广义相对论的理论，寻找引力场方程的努力中表现得尤其突出。爱因斯坦本来并不重视数学对物理学发展所起的重要作用，但是当他察觉出自己不对了时，就虚心求教，刻苦学习自己并不熟悉的新知识，这也是导致他获得成功的一个重要原因。爱因斯坦从来不掩饰自己的错误，在他建立广义协变的引力场方程的尝试中，他也曾走过很长一段弯路，一度甚至准备放弃广义协变的要求，但是，他始终保持探索的精神，从不满足已经取得的成果，随时准备修正错误。一旦发现自己有错，无论是自己发现的，还是由别人以任何一种方式指出来的，他都立即公开加以修正，丝毫没有一点虚荣。他有一句名言：“谁要是把自己标榜为真理和知识领域里的裁判官，他就会被神的笑声所覆灭。”

从爱因斯坦创立广义相对论的过程中，我们可以看到，创立广义相对论最初的动因是出于他的哲学信念和科学理想，是出于他对物质世界统一性的追求；提出广义相对论的两条基本原理靠的是他惊人的物理直觉、独立的批判精神和杰出的逻辑思维洞察力；而找到适当的数学工具并最终完成这一艰巨的工作则在于他具有勇于开拓、不断进取和虚心求教的精神。从1907年到1915年，爱因斯坦在长达八年的时间里，以献身科学的热情，呕心沥血解决了对他来说也是极为困难的一系列数学上和物理上的难题。广义相对论不但是他的哲学领悟、物

理直觉和数学技巧高度结合的产物，而且是他那种非凡智慧和艰苦劳动高度结合的结晶。为此人类永远值得骄傲和自豪。

从爱因斯坦创立广义相对论的过程中，的确可以总结出许多很有启发性的研究方法来。但是如果以为爱因斯坦的方法是做出伟大科学发现的最佳方法甚至唯一方法，那就大错特错了。因为从许多伟大的科学发现的个例研究中，我们会发现，许多科学大师各自运用着完全不同的方法，各有各的特色，然而却同样取得了很大的成功。这表明在方法论上也并不存在什么特别优越的方法。自以为掌握着比其他方法更为优越的方法，其结果只能是排斥其他方法，带来阻碍科学发展的恶果。我们研究爱因斯坦创立广义相对论的方法，并不是要证明他的方法比其他科学大师的方法优越，而只是想说明，爱因斯坦曾经运用这样的方法取得过巨大的成功，值得我们重视。

我们绝对不应该把任何方法（无论它曾是怎样的成功）当做教条。方法不是教条，任何方法一旦被推向极端当做教条来对待，就会变成束缚人们思想的枷锁。爱因斯坦说过这样一段话：“寻求一个明确体系的认识论者，一旦他要力求贯彻这样的体系，他就会倾向于按照他的体系的意义来解释科学的思想内容，同时排斥那些不适合于他的体系的东西。”一个追求某种方法论体系的人也会犯类似的错误。著名科学哲学家费耶阿本德非常激烈地抨击一切企图把方法变成教条的人，他甚至把自己专门研究方法论的著作命名为《反对方法》。

一些从事方法论研究的人，总是不由自主地希望为科学研究找出一套规范的方法，结果往往事与愿违。用

爱因斯坦的话来说就是，因为只有科学家“自己最晓得，也最确切地感觉到鞋子究竟是在哪里夹脚。”费耶阿本德则更直截了当地说：“一个科学家，不像一个小孩子，需要一个方法论爸爸和一个理性妈妈给他安全和指引，他能够照顾好自己。”一切从事科学研究的人都应该勇敢地进行探索和尝试，大胆采用对自己最为合适的方法，创造自己最需要的方法，去解决那些自己所要解决的问题，爱因斯坦在创立广义相对论时正是这样做的。一切从事科学方法论的人都应该为科学工作者这样做找到合理的论证，向他们指出，历史上曾经有各种各样的人，运用各种各样的方法，做出过伟大的科学贡献，也许，这才是爱因斯坦创立广义相对论这一科学史上的奇迹所能够给予我们的最好启示。

## 孤独者的路

波动力学这个术语，现已很少出现于通行的量子物理学教科书当中了，我们这个时代的人都不过将它看成是量子力学理论框架中一种描述的表象而已。但翻一翻历史，就可知道波动力学在量子理论的发展史上，实在是扮演了一个非同寻常的角色。20年代中期，正当旧量子论“山穷水复疑无路”之时，是它首先异军突起，然后又与矩阵力学汇合一处，使量子论的发展进入了“柳暗花明又一村”的境地。从那时起，量子力学便开始统治了微观领域的物理学研究，并与相对论并驾齐驱，成为现代物理学的两大支柱之一。

追溯波动力学的起源，研究这一重大科学发现的历

史过程，考查科学大师们作出发现时的思想方法，无疑可从中获取许多有益的启示。

波动力学的建立过程有几个特别值得注意的地方，有趣的是，它们与相对论的建立过程有点类似。例如：波动力学不是群体努力的结果，而是游离于当时主流之外的个别孤立学者的创造，因而这个理论最后虽然广为流行，却始终没有成为联系一批志同道合者的纽带。与此相反，在它的等价理论即矩阵力学的旗帜之下，一批物理学家们联合协作，形成了量子力学的正统学派，最终主导了量子理论发展的历史潮流。另外，波动力学与相对论在对待经典理论的态度上是类似的，即一方面宣布了与经典理论决裂，如相对论的光速不变原理、波动力学的波粒二象性等；另一方面又竭力维护某些经典原则，如连续性概念等。这些特点，说明波动力学的创立者德布罗意和薛定谔等人，在思想方法上与爱因斯坦有共同之处，也反映了当时的社会环境和某些历史条件等因素对他们的影响。这些都是研究历史的人应当加以注意的重要方面。

1900年到1922年，是旧量子论萌芽和发展的时期，它总共经历了三次重大的进展，这就是：1900年10月，普朗克关于黑体辐射问题的研究所导致的能量子概念（或假设）的产生，量子论的历史由此开始；第二个重大进展来自爱因斯坦的早期工作，他于1905年在德国的权威杂志《物理学杂志》（*Annalen der Physik*）第17卷上接连发表了三篇论文，其中的第三篇讨论了量子论问题，首次提出光量子假设，并成功地解释了光电效应等问题。爱因斯坦的贡献在于，他把普朗克首创的量子化概念向前推进了一大步，指出不仅辐射的发射和吸收过

程是量子化的，而且辐射本身也是量子化的。这实际上已从某个侧面暗示了微观现象中的一个本质特性——波粒二象性；旧量子论的最后一次重大进展，是尼尔斯·玻尔于 1913 年间完成的，他第一个将量子假设运用到原子结构问题，在氢和类氢原子的光谱线系解释上，取得了巨大的成功。

随着量子论的成长，旧量子论在理论物理学中的地位也逐渐为世人所公认，这是研究深入到微观领域后的必然趋势。1900 年，当普朗克发表他的黑体辐射理论时，的确很少有人能看出这一工作的划时代意义，虽然就在普朗克的公式发表后不到一周，实验物理学家们便证明了这是在全频率范围内与实验结果完全符合的唯一公式，大家认为它不过是个较好的经验公式而已，原因是它没有一套较完整的理论作基础。难怪有人查找当时的文献时发现：“从 1900 年到 1904 年，几乎找不到有关普朗克工作的论文，……在那些日子里，普朗克似乎完全被遗忘了。”

及至 1905 年爱因斯坦发表关于光量子假设的论文，尤其是 1907 年他将此假设运用于固体比热的研究成果发表时，量子论已为同行们所注目；当 1913 年玻尔的论文发表时，很快就引起了巨大反响，量子论终于触及到当时物理学家最为关注的重大课题——原子结构问题上来了，量子理论由此一跃而成为与相对论一样受到高度重视的现代物理学理论。

随着旧量子论的飞跃发展，研究者的队伍和布局发生了一些变化，这种变化对量子理论后来的发展带来了不可忽视的影响。据洪德考察，世纪之交，理论物理学曾有较多个研究中心，遍布欧洲各主要国家；而到 1916

年（玻尔从英国回到丹麦哥本哈根）之后，新的研究中心便逐渐取代了昔日的老中心，其中最活跃的要数哥本哈根、格丁根和柏林，它们彼此间的交流也很充分，甚至形成了所谓哥本哈根——格丁根轴心。科学共同体无疑是科学理论发展的组织保证，这种共同体的排他性却并非在任何时候都对科学的发展有利，波动力学所经历的曲折道路也许就是一个明证。

20年代初，旧量子论停滞不前了，人们逐渐认识到：作为其最高成就的玻尔理论，很可能是经典概念向某些更高级新概念的过渡，德布罗意后来曾写道：“从一切迹象来看，我们必须着手建立一个新的力学，量子概念应该在其基本公理中就取得自己的位置，而不像旧量子理论那样是附加上去了。”

#### 从波粒二象性起始

波动力学与矩阵力学的差异，首先在于其着眼点的不同。海森伯曾强调他只注意那些可观察到的东西，由此便摒弃了不甚可靠的电子轨道概念；而波动力学从一开始就侧重于对微观现象中所谓波粒二象性的揭示，其根源来自爱因斯坦 1905 年的论文以及后续的某些研究工作。爱因斯坦起先所考虑的光量子只不过是一团数值为  $h\nu$  的能量，以后又认为它或许还应该有动量  $h\nu/c$ 。至此，从理论上讲，光子的概念基本上已经形成。

但是，大多数物理学家或者并不特别看重这个事实，或者竭力在现有理论的基础上消除这个矛盾。德布罗意这位早年曾攻读过历史学，后来才改学物理的法国年轻学者，则抓住了这个从别人那里漏出来的重要问题，并逐渐领悟了其中的奥秘。环境也给他幸运的机会。德布罗意的哥哥 M·德布罗意，是法国当时研究 X 射线的专

家，他拥有一间私人实验室。德布罗意就是在这里，从研究 X 射线开始迈进科学殿堂的，并从中受到了最初的启迪。他曾写道：“关于 X 射线的研究使我确信，辐射现象中‘波动’特征和‘粒子’特征在理论上的综合是必需的，……”。但在如何进行这种综合的问题上，德布罗意则深受相对论的影响。他像爱因斯坦那样，将辐射场看成光量子气体，借助于相对论假设这些光量子气体的能量与动量分别为：

$$\begin{cases} W = hv \\ W/c = hv/c = h/\lambda \end{cases}$$

这就是著名的爱因斯坦—德布罗意关系。由此出发，再利用统计力学和热力学的某些定律，德布罗意就推出了黑体辐射问题中的维恩定律。他将这个结果写进了 1922 年发表的一篇论文中。然而，当他把这篇论文拿给郎之万看时，这位著名学者的评论是：“你的想法很有趣，但你的气体与真实光毫不相干。”

德布罗意并未因此而放弃努力，他在同年的另一篇题为“论干涉和光量子理论”的论文中，进一步致力于协调爱因斯坦的光量子假设与干涉、衍射现象的矛盾文中，他首次提出必须将这些光量子同某种周期性因素相联系。为了寻找这种周期性因素，德布罗意转入研究分析力学与波动光学两种理论体系形式上的相似性。这种历史分析和类比的方法在波动力学的发展中起了至关重要的作用。

1923 年夏，美国物理学家 A. H. 康普顿作出了一项以他的名字命名的重要实验发现，这可以说是一次判决性实验。争论了二百多年的老问题，即光究竟是波还是粒子的问题在这里基本上得以澄清：光既是粒子也是波。

虽然这个事实使人们大惑不解，德布罗意却从这里找到了突破口。他的考虑是：在狭义相对论中，光子与物质是相互关联的，它们都可以表达为能量的形式，既然物质本身就有质量，那么光子是否也应该具有某种固有质量呢？这个想法现在看来不正确，因为光子是没有静止质量的，但当时这种想法却启发过德布罗意的思路：如果具有一定质量的光子有波动性质，那么与光子类似的实物粒子（例如电子）为什么不能同样地也具有这种性质呢？

德布罗意后来还谈到他当时的另一条思路，他说电子也具有波动性质的问题几乎是由它自身提示出来的，这是因为把光的波动和粒子特性联结起来的作用量子，也出现在原子的电子能级等问题中，也就是说，作用量子与电子的性质有密切的关系，或许它也是联系电子的波粒二象性的纽带。

这年9月，德布罗意发表了论文“波动与量子”，一般认为这就是波动力学的肇始。

德布罗意仍然是从相对论的方法入手的。他首先假设：对某固定观察者具有静止质量  $m_0$  和速度  $V = \beta c$  的运动粒子，具有某种“内部”周期现象，其频率是  $m_0 c^2 / h$ ，这里  $m_0 c^2$  是粒子的内能。他认为，在这个固

定观察者看来，粒子的即时能量应为  $m_0 c^2 \sqrt{1 - \beta^2}$ ，因而与此相关的周期现象的频率是  $\nu = \nu_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$ 。由于运动时钟的滞后效应，固定观察

者所看到的内部周期现象的频率将是一个较小的值： $\nu_{\Delta} = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ 。

与前面的频率相对照，二者之间有差异。这个差异很重要，“它曾极大地吸引了我的注意力，通过对此差别

的思索，便决定了我的整个研究趋向。”

为解决这个矛盾，德布罗意引入了一个“同运动体相连结的，虚设的波”，它具有前面所定义的频率  $\nu$ ，且以速度  $V = c/\lambda$  传播，德布罗意证明：如果一开始运动体内部的周期现象与此波相同，则两者以后处处都必定保持一致，也就是说，它们实际上是同一的。由此，德布罗意明确提出：“任何运动粒子皆伴随着一个波，粒子的运动和波的传播不能相互分离。”

在此之后不到两个月，他又相继发表了两篇论文，不但引进了“相波”概念，而且进一步证明了粒子的速度严格等于相波的群速度。在原子结构问题中，他根据稳态波-驻波的概念，自然而然地得到了索末菲量子化条件。这一系列成功，使德布罗意着手构造他的“新力学”，即自由粒子的波动力学。他假定，当粒子运动时，其相波波速的行进，在每个空间点上都与波的等位面正交，推广到由于有力场存在而弯曲的路径或速度变化的情形中，德布罗意参考并引用了几何光学中的费马原理（最小光程原理），他发现这种粒子的运动当然也能表述为莫培督原理（最小作用量原理）的形式，于是，“几何光学和动力学的两大原理之间的基本联系，由此得以完全的明朗”。他指出，一般情况下，粒子的运动由费马-莫培督原理描述，而当粒子经过某些其线度可与相波的波长相比较的特殊装置时，则它的运动有如光要产生干涉或衍射那样，要由类似于波动光学的新力学来描述了。德布罗意的分析实例是电子的运动，他写道：“电子穿过足够狭窄的小孔时，其流线也应显示出衍射现象，”而且，“正是从这个方向才有可能看到我们的观念在实验上得到证实。”他的这一设想后来由英国的 G. P. 汤姆孙，

美国的戴维孙和革末各自独立地实现了。

德布罗意也讨论了“新力学”与过去的、包括牛顿以及爱因斯坦等人的理论在内的“旧力学”之间的关系，他把这种关系形象地类比为历史上两个旧理论的关系，他写道：“自由粒子的新力学与旧力学之间的关系，恰如波动光学与几何光学的关系。”这种类比是建立在熟悉那两个理论体系的基础上的，所以比较恰当，可以说这是德布罗意思想方法很有特色的一个侧面，它与薛定谔的思想方法不谋而合。这是波动力学建立过程中的一个特点——与旧理论保持了一种微妙的联系。

在一年左右的时间里，德布罗意完成了他的主要贡献，这就是所谓物质波思想和自由粒子的波动力学。1924年下半年，他开始将自己的想法详细整理并使之系统化，其结果便是当年11月向巴黎大学理学院提交的题为“关于光量子理论的研究”的博士论文。此文共分为七章：(1)相波；(2)莫培督和费马原理；(3)定态的量子化条件；(4)两电荷中心同时运动时的量子化；(5)光量子；(6)x线和r线的漫散射；(7)光量子与统计力学。此外，他还在论文的引言中进行了一番历史回顾。

德布罗意的探索虽然大胆而新颖，但只确定了一个大方向，就像他本人在论文的结尾中所写的：“相波的周期现象的定义仍遗留着某些模糊之处……目前此理论应看作是一个形式上的方案，它的物理内容还未能充分确定，因而也还是一个不成熟的学说。”

尽管以J.佩兰为主席、其成员包括郎之万等著名物理学家组成的答辩委员会高度评价了德布罗意的独创性，但无人相信物质波的物理实在性，因为这只是一个“形式上的方案”。在大多数人看来，他的想法只是一些

转瞬即逝的思想火花。

这一划时代工作在法国遭到某种冷遇，难怪欧洲其他国家的学者对它视而不见了。

L. 英费尔德在纪念相对论诞生五十周年的一篇报告中曾这样写道：“在我们这个时代，重要的工作是会很快看出来的……”但他也叹息德布罗意的遭遇是个很特殊的例外。

其实，也有人注意到德布罗意工作的重要意义，郎之万就是其中之一。早在 1924 年 4 月，郎之万就在第四届索尔未会议上提到了德布罗意的想法，与会者几乎无人感兴趣，甚至会议记录也只字未提此事。唯一的例外是爱因斯坦，因为他恰好当时正在研究一种新的物理统计方法，他看出德布罗意的思想与此有关（也许这也是他们思想方法上有某种联系的例证），便向郎之万索取德布罗意的论文。论文副本大约是在同年 12 月送到爱因斯坦手中的，爱因斯坦敏锐地直觉出这一工作的重要意义。他在引用德布罗意的工作时写道：“我将更详细地讨论这个阐释，因为我相信它包含了比仅仅是一个类比更多的东西。”

1924 年之后，波动力学的发展陷于停顿，但对玻尔理论感到不满意的其他物理学家们并没有放弃对新的理论途径的寻求，其中的佼佼者正是一群在玻尔本人的关怀下成长起来的青年学者，这批以哥本哈根格丁根为中心的青年物理学家创立了量子力学的另一分支——矩阵力学。

这是 1925 年发生的事情。此时，薛定谔正在苏黎世大学任教，并兼任大物理学家德拜的助手。薛定谔是如何将一度中断了的波动力学又重新推向前去的呢？这里

面有好几个头绪。首先，爱因斯坦给了他重要的影响。薛定谔过去一直在致力于分子运动的统计力学方面的研究，所以很快注意到爱因斯坦于 1925 年 2 月发表的、关于理想气体量子理论的第二篇论文（也就是提到德布罗意工作的那篇文章），并从中受到影响。薛定谔本人在 1926 年 4 月给爱因斯坦的一封信中曾谈起过：“如果不是您的第二篇关于气体简并的论文提示了我注意到德布罗意思想之重要性的话，恐怕我的整个事情都还未能开始呢。”这大概是薛定谔第一次注意到德布罗意的工作，不过可能还没有引起他的高度重视。

据德拜的回忆，当初在慕尼黑大学时，曾由德拜、薛定谔等人一块儿组织过一些讨论，德布罗意的论文发表后（即 1925 年发表的博士论文），他们曾进行过讨论。由于难于理解，德拜就让薛定谔仔细钻研一下，然后给大家讲解。“正是这个准备过程使他进步了。作了报告后不过数月之久，他的正式论文就发表出来了。”

1961 年狄拉克在悼念薛定谔逝世的文章中也谈到了这个问题，也说这是薛定谔本人告诉他的。为了把德布罗意波的观念推广到束缚粒子的运动，薛定谔曾导出过一个波动方程，但与实验结果相对照很难吻合，这使他极为失望并放弃了这个方程。实际上，这个考虑了相对论效应的方程现在看来基本上是正确的，只是没有自旋因子，因为自旋当时还不为人所知。几个月之后，当薛定谔重新回到这个问题上时，他略去了相对论效应，终于得出正确结果。

近年来的研究表明，薛定谔是从两个方面接近并最终接受了德布罗意的观念的。其一是气体量子论。1925 年薛定谔曾先后写过三篇这方面的论文，在年底完成的

最后一篇文章中，他已经应用了德布罗意的物质波思想来解决气体量子统计中的问题。克莱茵认为这篇文章应视为薛定谔波动力学的序曲。其二是原子结构问题。早在 1922 年，薛定谔曾在《物理学期刊》上发表过一篇“论单电子量子轨道的一个值得注意的性质”的论文，他对电子轨道进行研究，曾得到过与德布罗意对索末菲量子化条件的解释极为相似的结果，正如他自己于 1925 年 11 月给爱因斯坦的一封信中所写的那样：“在我看来，德布罗意对量子规则的解释与我在 1922 年 12 月 13 日《物理学期刊》上的文章有关，在那里我证明了每个

准周期中，魏尔‘规范因子’  $\exp(-\int \varphi_i dx_i)$  的一个值得注意的性质。数学上我以为是等价的，只不过我的表述比较刻板，不够优雅，没有表明真正的普遍性而已。”

综上所述，从纯粹科学本身来看，薛定谔之所以接受并发展了德布罗意的思想，是因为他自己早已有过类似的观念或思想倾向，加上爱因斯坦的影响和德拜的敦促，使他终于踏上了建立波动力学的道路。有两位美国的研究者从外部因素考察了这个问题。他们指出，薛定谔属于极少数几位对德布罗意其人没有先入为主的偏见的量子理论家之一，这是他能公正对待德布罗意学说的前提。实际上，当时欧洲各国的理论物理学家，尤其是处于量子论研究中心的哥本哈根格丁根的学者们，肯定有过许多机会了解德布罗意的工作情况，遗憾的是他们都没有理会这个新思想。据拉曼和福曼的看法，一个重要原因是德布罗意在前期的研究工作中曾给大家留下了一个不好的印象，对他本人的成见终于引起对他所提出的观念的轻视。

薛定谔建立波动力学的论文正式发表于 1926 年 3

月，题目为“作为本征值问题的量子化”，这是他四篇系列论文中的第一篇。文中，薛定谔利用哈密顿-雅可比微分方程，针对氢原子的具体情形，最后导出了一个函数的本征值方程：

$$\Delta^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E + \frac{e^2}{r} \right) \psi = 0$$

这就是定态下的薛定谔方程。或波动方程。玻尔的氢原子能级作为方程中函数的本征值，自然而然地出现了。

我们现在已经知道，薛定谔方程的引入方式并不是唯一的，其正确性只能由它所得出的结果是否正确来加以保证。事实证明，薛定谔方程在低速微观领域是十分正确的。波动方程的建立标志了波动力学的诞生。孤独的研究者，通过曲折的（也许本该是平坦一些的）道路，终于达到了一个光辉的顶点。

薛定谔在后续论文中，一方面应用新方法求解一些实际问题，一方面也在继续充实和完善波动力学的理论框架，例如微扰方法等。当然，他最为关切的问题，也是波动力学中的一个关键问题，就是函数或波函数的物理意义。意味深长的是，这最后画龙点睛的一笔，竟是由矩阵力学的中坚人物玻恩完成的。

薛定谔从一开始就尝试着给波函数一个确切的含义，他认为此函数代表着电荷在实际空间中的连续分布，也就是说，波函数所代表的波是真实空间中的真实波。在他系列论文的第四篇里，他仍坚持这一解释，并定义 $\rho$ 为电荷分布的“权重函数”，而电荷密度是： $P=e\rho$ 。这个解释与他强调连续波动图象的信念很有关系，薛定谔直至晚年也没有放弃这一信念。为了说明电

子电荷总是集中于一点这个人所共知的事实，他提出了一种“波包”理论，但这个理论很快就被证明是站不住脚的，因为任何此类波包在空间中都必然要快速地发散，而电子实际上是稳定存在着的。此外，对于多粒子系统，多维波的图像就更难以装进三维的实际空间中去了。许多无法克服的困难，使薛定谔不得不放弃具体的电磁波式的解释，但他并没有因此而寻得正确的途径。

相反，玻恩却一举解决了波动力学的这个重大问题。当波动力学出现的时候，玻恩正致力于自由粒子与原子间碰撞问题的研究，他看出波动力学的描述方法更为便利，就采用了这种理论。运用的结果使他认识到，波动力学并没有回答碰撞之后各粒子的状态问题，而只是给出了碰撞后各种状态的可能性。这就促使他提出了波函数的统计解释：“粒子的运动遵循着统计规律，而统计性则按因果律在坐标中传播。”至此，波动力学彻底确立起来了。

1926年，薛定谔最先从数学上证明了波动力学与矩阵力学的等价性。从此，波动力学和矩阵力学同样成为完整的量子力学理论中的描述表象，但形式上的融合并不等于实际上的融合，这主要反映在不同的主导思想上。孤立者仍然是孤立者，在旷日持久的争论中，哥本哈根学派的力量毕竟要强得多。

由薛定谔继承和发展了德布罗意的思想，说明两人在思想方法上有共同之处。一个明显的例证是：德布罗意在形成物质波概念的过程中，一再借助过相对论的某些观点和方法，薛定谔则首先导出了相对论性波动方程，这与爱因斯坦的思想是相通的，即坚持对运动的时空描述。此外，两人都早就注意到分析力学的类比分析。但

也应该看到，他们两人之间仍存在着某些认识上的重大差别，例如对波粒二象性问题的看法。德布罗意的认识显然比较正确，他后来之所以着重强调物质波概念，是因为这是一个与传统观念相悖的新概念；而薛定谔只注意于波动一面，他甚至认为粒子可以统一到波动图像中去。但薛定谔也突破了德布罗意观念上的很多局限性，例如德布罗意曾利用驻波来解释电子轨道运动，薛定谔则抛开了轨道概念，直接引入了代表状态的波函数。这表明薛定谔的革命性与他的保守性有密切联系，他强调波动概念，使他坚持波的连续性，则使他否定量子跳跃等不连续的量子现象。这种矛盾认识是使他后来脱离了量子物理学主流的基本因素，也是我们称他为一个“孤独者”的主要原因。