

第一章 效应与科学家联袂而往

效应和科学发展是一种什么关系？效应是科学（含技术的内容）的核心，一部人类的科学技术发展史就是效应的发现、完善和应用的历史。效应不是自己走出来的，是被科学大家发现的，所以，对效应学科的研究必须以人为本，坚持科学发展观。在第一章里，将通过几位科学家发现效应的过程，说明效应、效应发现在科学中，在科学发展中的位置。

效应与科学的关系，首先表现在每一学科领域都有一些特殊的人，他们在认识世界进行科学探索中发现他们所研究那个领域中的某个或某些效应，而这种效应一旦被发现，就呼唤出一位或一批科学家。下面从科学技术史中代表一个时代的伟大人物中选其重要者做一介绍，以期说明效应与科学家联袂而往的密切关系。得效应的科学大家们在寻找效应过程中的思维个性常常不是证明与他人的一致性，而是证明自己的见解与他人的不一致性。

第一节 牛顿发现引力效应而得划时代的伟大科学家桂冠

艾萨克·牛顿(Isaac Newton, 1642—1727)是代表了一个时代的伟大科学家，特别是于1686年在英国剑桥大学三一学院撰写的《自然哲学之数学原理》(以下简称《原理》)更是一部不朽著作。他力图将自然现象诉诸于引力效应与效应有关的形式。书中致力于科学发展，从两个方面考察效应，一方面的形式是理性的，讲究精确地演算、完备地推导；另一方面的形式是实用的，注重细心地实验、缜密地观测。牛顿是最早使用效应的伟大自然科学家之一。牛顿明

确指出：“我们的职责仅在于找出明显效应的原因。”^①对效应地位说得何等明确！

一、牛顿在《原理》中发现的引力效应

(1) 牛顿在《原理》的第三编宇宙体系中求月球使海洋运动的力时，做了如下的推论：“由于月球驱动海洋的力比重力等于 1 比 2.871 400，很显然这种力……仅仅在海潮中才表现出明显的（海潮）效应。”^②这里说的是月球对海洋的引力效应或海潮效应。

(2) 牛顿在《宇宙体系》（以下简称《体系》）中论及制约较远行星的力时明确地指出：“使木星偏离其直线路径沿轨道环绕的力，并非指向地球的中心。火星与土星很好地符合这一结论。”^③牛顿为这些力寻找和推论的中心是“绕此中心半径所掠过面积应当是均匀的；那就是太阳，我们已就火星与土星的情形作过近似的证明，而木星则有足够的精度”。虽然太阳和行星都在平行方向上受到某种其他力的同等推动；但这种力既不会改变行星之间的相互位置，“也不产生明显的效应：我们的职责仅在于找出明显效应的原因。”^④这说的是太阳对行星的引力效应。

二、牛顿在《体系》中发现的引力效应

(1) 美国哈佛大学科学史教授 I. Bernard Cohen 在《牛顿对万有引力的发现》中由《体系》初稿引出的两段话是 I. Bernard Cohen 和 Anne Whitman 由拉丁文译出的。这两段关于引力效应的话是：“事实是，吸引力在两者上都存在。太阳吸引木星和其他行星。木星吸引其卫星，同样卫星彼此吸引，也吸引木星，所有的行星都彼此吸

牛顿：《自然哲学之数学原理》，566页，武汉，武汉出版社，1992。

② 牛顿：《自然哲学之数学原理》，486页，武汉，武汉出版社，1992。

④ 牛顿：《宇宙体系》，566页，武汉，武汉出版社，1992。

引。”^①一个吸引另一个的两个作用，“但由于它们存在于两个物体之间，它们并不是两个不同的效应（相互吸引），只是作用在两个末端的同一效应而已。”^②两个物体产生引力效应的原因是“由于一根联结它们的绳子收缩而相互牵引。这个作用的起因是两方面的，而这两个物体各自的配置，就其作用在两个物体上而言作用本身也同样是两方面的；但就作用在两物体之间来看，它又是单一的。”^③“并不存在一种太阳去吸引木星的效应和木星去吸引太阳的另一种效应，而只存在一种效应使得太阳与木星互相接近。”^④这里用的效应是相互吸引效应。引力效应也称吸引效应。

(2) 牛顿在《体系》中说到太阳和月球的驱动力时已看到这些力足以驱动海洋。“但就我所知，它们不曾在我们的地球上产生任何别的可见效应”（地球潮汐效应、陆地的潮汐效应，牛顿认为是看不见的。后来科学家已探测到了陆地的潮汐效应）；小到运动甚至不能产生“可感觉到的微风”、不能产生“静力学实验产生任何明显效应”^⑤。

接着，牛顿又说：“如果月球与太阳举起海潮的效应（由于自运动以及太阳和月球的吸引，海洋在每天中应两次升起又两次回落）……以及它们的视在直径，相互间是相等的，则它们的绝对力……的比等于其大小的比。但月球的效应比太阳的效应约等于 $5\frac{1}{3}$ 比 1；而月球的直径比太阳直径约小于 $31\frac{1}{2}$ 比 $32\frac{1}{5}$ 或 45:46。月球的力正比于其效应，反比于其视在直径的立方而增大。”^⑥牛顿这两段话告诉我们，太阳和月球吸引海潮的效应以及效应大小的数据。

中科院上海天文台朱圣源，通过观测验证了牛顿日月的潮汐引

① ② ③ ④ I. Bernard Cohen: 《牛顿对万有引力的发现》载《科学》中译本，1981(7)，81页。

⑤ ⑥ 牛顿：《宇宙体系》见《自然哲学之数学原理》599页，武汉，武汉出版社，1992。

力效应。1976 年的天文常数系统中，地球自转角速度的平均值 ω_0 是每秒钟 15.041 007 178 669 10 角秒， ω 不断变化。

自转速度变化的原因是多方面的，由于海洋潮汐摩擦的耗散效应，使整个地球的角动量减少，从而造成地球自转的长期减慢。

每隔一个世纪后， ω_0 要发生每秒钟约为 4×10^{-7} 角秒的变化。

冰期后的效应，也就是地面上冰层的融化会造成质量的重新分布，使地球的惯性矩发生变化，从而影响到自转速度的长期和长周期变化。

而在周期为几十天或更短的高频范围内，自转速率的变化主要是由日、月的潮汐引力效应造成的^①。

(3) 牛顿进一步谈到极小物体的力是怎样的，回答是所有物体都应相互吸引，且均匀球体的吸引力在其表面附近，“正比于其直径。因此，直径一英尺的球体，其性质与地球相似对其表面附近小物体的吸引力，20 000 000 倍小于地球对其表面附近小物体的吸引力；而如此之小的力不能产生可察觉的效应。”^②“而且，即使整座大山也不足以产生任何明显的效应。”^③由天上引力效应，又说到地上引力效应，于是整个物体都在引力效应的海洋之中。引力效应使所有物体都相互吸引，且均匀球体的吸引力在其表面正比于其直径，正比于它们质量的乘积，反比于它们之间距离的平方变化。牛顿指出：“吸引一词是广义的，指物体所造成的相互趋近的一切企图”^④。引力效应存在于极小物体之间，存在于地球对其表面附近小物体的吸引力之中。

三、《原理》二版序中使用的效应

为《原理》第二版作序的是牛顿的好朋友、剑桥大学三一学院研

林圣源：《大气角动量与地球自转速率的变化》，载《自然杂志》，1985(6)，433—435 页。

③ 牛顿：《宇宙体系》，577 页，武汉，武汉出版社，1992。

牛顿：《自然哲学之数学原理》，1976 页，武汉，武汉出版社，1992。

究员、天文学和实验哲学教授罗杰·科茨，他说：研究自然哲学的人大致可分为三类。科茨的分类不是排他性的。其中，一些人给事物归结出若干种形式和若干种特质，并据此认为种种个体现象是以某种未知的方式发生的。他们坚信，物体的若干效应就是由这些物体的特质引起的。另一些人则弃绝无用而混乱的术语，致力于较为有意义的工作。第三类人，崇尚实验哲学。从最简单、合理的原理中寻找一切事物的原因，但他们决不把未得到现象证明的东西当做原理。

牛顿属于第三类人，他采用“综合的和分析的，由某些遴选的现象运用分析推断出各种自然力以及这些力所遵循的较为简单的规律，由此再动用综合来揭示其他事物的结构。”他认为，牛顿正是采用了这种无与伦比的最佳方法来进行哲学推理，极其幸运地推导出关于宇宙体系的解释，成为“唯有他是第一位由现象证实重力存在的哲学家。”^①“已到了这种地步，必须承认太阳，地球及所有伴随太阳的天体都相互吸引。所以，物质的最小粒子，其每一个必定都有其各自正比于其物质质量的吸引力，正如地表物体所表现的那样。这些力在不同距离上也反比于其距离的平方……同一种类的效应，其已知特性相同，则产生于同一种类的原因，并具有相同的未知特性。”^②科茨所使用的效应是牛顿发现的引力效应，或吸引效应，或万有引力效应。

四、爱因斯坦谈牛顿的惯性效应

爱因斯坦在《什么是相对论》中也谈到“惯性的效应”。他说，下面这早已知道的经验事实，使这条广义相对论原理的建立比较容易。这事实是：物体的重量和惯性是受同一常数支配的（惯性质量同引力质量的相等）。试设想有一个坐标系，他对于另一在牛顿意

① 牛顿：《自然哲学之数学原理》，ⅩⅩⅡ，武汉，武汉出版社，1992。

② 牛顿：《自然哲学之数学原理》，ⅩⅩⅦ，武汉，武汉出版社，1992。

义上的惯性系作匀速运动。依照牛顿的教导，出现在这个坐标系中的离心力，应当被看做是惯性的效应。但这些离心力完全像重力一样，是同物体的质量成比例的……“离心力看做是万有引力。”^① 爱因斯坦在这里明确地指出牛顿引力效应的重要意义。

五、安培谈牛顿的引力效应

安培认为，万有引力效应是对所有运动的高度简化。

在牛顿以前，物理学家普遍假设一些粒子的流体运动来解释各种物质的相互作用。例如，假设物体能发射某种物质流来解释物体的直线运动；假设某种稀薄尘埃或以太涡旋来解释物体的圆周运动。牛顿在《原理》中摒弃了所有这类假说，把物体的所有运动都简化为万有引力的效应。安培为这种高度简化的方法和牛顿的洞察力所深深吸引。他开始就决心把牛顿的全套方法用于电磁学研究。所以，麦克斯韦(J.C.Maxwell)把安培称为“电学中的牛顿”。

六、引力效应的渊源

(1) 牛顿建立起来的引力效应的物理学知识体系——牛顿力学——就是仿照欧几里得的《几何原本》建立起来的，同时在理性形式上也采用定义、命题、定律、推论等思维形式，用数学证明命题。引力效应是牛顿用数学推论演绎出来的。牛顿总结人类对力学和几何学的发展，得出“实用力学包括一切手工技艺，力学也由此得名。”^② “但由于匠人们的工作不十分精确，于是力学便这样从几何学中分离出来，那些相当精确的即称为几何学，而不那么精确的即称为力学。”^③ 几何学和力学的关系则是“几何学以力学的应用为基础”，“通常似乎将几何学与物体的量相联系，而力学则与其运动相联系。”^④ “理性的力学是一门精确地提出问题并加以演示的科学，

① 爱因斯坦：《什么是相对论》，载《爱因斯坦文集》，第一卷，112页，北京，商务印书馆，1976。

② ③ ④ 牛顿：《自然哲学之数学原理》第一版序言，Ⅺ，武汉，武汉出版社，1992。

旨在研究某种力所产生的运动，以及某种运动所需要的力”。“哲学的全部困难在于：由运动现象去研究自然力，再由这些力去推演其他现象；……在第三编中，我示范了把它们应用于宇宙体系，用前两编中数学证明的命题由天文现象推演出使物体倾向于太阳和行星的重力。再运用其他数学命题由这些力推算出行星、彗星、月球和海洋的运动。我希望其他的自然现象也同样能由力学原理推导出来，有许多理由使我猜测它们都与某些力有关，这些力以某些迄今未知的原因驱使物体的粒子相互接近，凝聚成规则形状，或者互相排斥离散。”^①等，从而演绎出引力效应。

(2) 牛顿的引力效应有其深厚的历史理论渊源。这渊源可分为间接的和直接的。间接的渊源是对地球直径测定的数据。第一位测得地球直径的是公元前二世纪的大学者埃拉托斯特尼，他测得的数据接近现代测得的数据。第二位是波西多留斯，他测得的数据比第一位的小一点。第三位是法国人皮伽耳，他于1672年重新计算得出的数据与第一位测得的接近。这些数据的测定很是符合牛顿的精确的计算的品格。

牛顿引力效应取得的直接理性源于伽利略关于力学的三个实验定律，开普勒关于天体运动的三个测量定律，惠更斯等人关于向心力的发现。牛顿的引力效应是在这三个定律发现的基础上，并进行了科学地修正完善。牛顿在做开普勒第二定律实验时，将滚出去的玻璃球又拣回来，反复实验发现球的滚动并非等速运动，它在斜面上的滚动速度越来越快，到平面上滚动的速度越来越慢，显然玻璃球在滚动中是受了外力的作用。于是牛顿想到伽利略第二定律：当外力加于物体时，它的运动方向与效率的改变、与该外力成正比，并和外力取同一方向。那么外力从哪里来呢？加大木板的斜度到木板与地面呈直立时，牛顿发现玻璃球的滚动速度近于落体速度。牛顿沉思着，想把

^① 牛顿：《自然哲学之数学原理》，第一版序言，XVI，武汉，武汉出版社，1992。

伽利略三大定律修正完善成为全部机械力学的坚实基础。

七、引力效应与流数术和反射望远镜

(1) 牛顿发明流数术（微积分），为计算引力效应找到了工具。1665年英国发生瘟疫，牛顿为躲避瘟疫，回到了老家。避疫的二三年是他一生中创造力火花最旺盛的年月。根据伽利略的发现，自由落体的速度随时间而增大，他思绪停留在自由落体的轨迹该是怎样的呢？为此，他发明了流数术。他把落体的速度看做物体的位置相对于时间的变化量，把加速度看作速度相对于时间的变化量。在已知物体运动规律的条件下，微分可以从物体的位置（及轨迹）求出其速度；反之，积分可以从物体的速度求出其轨迹。牛顿在《原理》前写作了《分析学》、《流数法》和《求积术》有了先进的数学工具，做出了超过前人的发现，提出了引力效应。

(2) 牛顿发现引力效应，还得力于 1671 年他创制了反射望远镜，能够观察行星运动的轨迹，研究其规律从而发现了潮汐效应，并做出科学解释，预言了地球不是正球体，他由此证明了岁差现象。牛顿为了研制反射望远镜，亲自动手炼铜熔砷，加锡，不顾毒气的薰烤，熔炼出合金，制成了世界上第一台反射望远镜，它的结构仍为今天所仿造。

八、引力效应的发现和发表

牛顿引力效应的发现到公布于世经过了相当长时间。牛顿不断地思索着是什么力量使得那些行星毫无止境地围绕着太阳运转呢？如果一块石块在空中沿一个圆转动，还要一个人用一根绳子拉着，行星做圆周运动是什么东西拉着？吉伯、开普勒、胡克都曾想过，或许是太阳对行星有一种看不见的吸引力，使行星既不跑到其他什么地方去，也不停顿在一个什么地方？牛顿认为他们的说法有道理。于是，牛顿推想月球绕地球转，地球对月球有引力效应，这种引力效应就是月球绕地球运转时所需的向心力，并推广到其他行星

和太阳的关系。牛顿根据当时的已知条件进行了计算。

有的学者说，牛顿计算出地面上的质量是 1 克的物体受到地球吸引力为 980 达因，月球中心到地球中心的距离是地球半径的 60 倍。算出月亮上 1 克物体受 0.27 达因的地球吸引力。牛顿在 1665 年或 1666 年第一次计算了引力效应（或引力定律），但拖延到 1672 年才公布这一发现。原因是牛顿得到的地球上纬度间距为 60 英里即 98 公里的不准确数据，计算出月球上 1 克物体绕地球运行所需的向心力是 0.23 达因，结果使他对地球表面引力强度的计算值与实验值不合；直到皮卡德 (J. Picard) 在法国测定地球的纬度长为 $68\frac{1}{3}$ 英里后，引力效应才得到证实。

上述说明，牛顿不是贸然的，而是非常严谨地对待科学问题。这就是说，引力效应经过严格论证，所以等待是必要的。

可以毫不夸张地说，牛顿由于发现了引力效应（或吸引效应，或万有引力效应）而成为划时代的伟大科学家。从中看出，发现效应与成为科学家有极大的相关性，也说明了发现效应的重要性或重要地位。

第二节 爱因斯坦是多方位发现效应的划时代的伟大科学家

爱因斯坦 (Albert Einstein, 1879—1955) 是美籍德国人。因对理论物理学做出杰出贡献和对光电效应的科学论证，荣获 1921 年诺贝尔物理学奖。

中国的大物理学家周培源为《爱因斯坦文集》作序时写道：爱因斯坦于 1905 年“在相对论、光电效应和布朗运动这三个不同领域里齐头并进”，都取得奇迹般的科学成果，极大地影响于后世。

爱因斯坦在 1952 年 6 月给塞利希的信中，对相对论的发展及其阶段做过具有权威性的描述。他说，相对论的发展有三个阶段。“这三个发展阶段是由普遍原理逐步强化而达到的。

第一个阶段：狭义相对论。限制性原理是：物理方程对于真空中的光速对之不变的一切坐标系都适用。

第二个阶段：广义相对论。限制性原理是：方程对于彼此由连续的坐标变换相联系的一切坐标系都适用。这个理论实际上唯一地决定了引力场的本性和规律。但是却给电磁场的理论表示留下很大的余地。

第三个阶段：广义引力场（或统一场论）。经过对引力场显而易见的推广，人们终于建立起了一种关于总场的相对性理论。”^①

一、爱因斯坦科学地革命地破解光电效应而得诺贝尔奖

光电效应的最早迹象是赫兹（Heinrich Hertz, 1857—1894）于1887年注意到的，是在证实麦克斯韦的光的电磁理论的正确性决定性实验中发现的。一年后霍尔瓦克斯，接着勒纳德、斯托列托夫，都在研究荷电体的本性像一个自由电子，各自宣布了关于光电效应的几个惊人的规律。

1888—1890年，俄国斯托列托夫获得光电效应的重要实验规律。概括起来有如下三个要点。

(1) 单位时间内从受光的金属极板上放出的电子数与入射光的强度成正比。

(2) 光电子的初动能随着入射光的频率直线地增加，而与入射光的强度无关。

(3) 光电效应的产生不需要显著的时间。按照光的波动理论，光的能量是与光波的振幅成正比，不能解释光电效应的实验规律。

爱因斯坦经过5年沉思，于1905年在《物理学杂志》上连续发表了5篇重要论文，首肯光电效应的存在，并把普朗克的量子观点科学地、革命性地并且是成功地引进光学科学研究中。

^① 爱因斯坦：《相对论发展的三个阶段》，（爱因斯坦文集），第三卷，389页，北京，商务印书馆，1976。

1905年3月17日，爱因斯坦完成了《关于光的产生和转化的一个启发性观点》重要论文，发表在德国《物理学杂志》上。这篇论文是辐射量子论的开端，明确提出光电效应的基本规律。

现代教科书中通常认为，这篇论文是爱因斯坦关于光电效应的论文。爱因斯坦在给他的朋友哈比赫特的信中，自己也认为是非常革命的一篇。论文内容十分丰富，然而爱因斯坦讨论光电效应的篇幅才不到4页。就是这4页文字简洁击中问题的本质。

爱因斯坦写于1905年6月，发表于1905年9月的《德国物理学杂志》的《论动体的电动力学》，是相对论的第一篇论文，是物理学中有划时代意义的历史文献，发现了狭义相对论效应。

（《世界科学》1981年第11期 Emil Wolf著《爱因斯坦在光的本性方面的研究》一文中说：关于光电效应的一些疑难问题大多都由P. 勒纳 P. Lenard 在1898—1902年间的系统实验揭示了。勒纳发现，出射电子的能量和照射在金属表面上的光的强度无关，但和光的频率有关；而且还发现，当光强增加时，出射电子的数目增加，但它们的能量却不增加。然而，根据波动理论观点，由光波携带的能量是用光强来测量的。当光强增加时，有较多的能量可以用来传给电子，因而电子的能量一定也增大了，刚好与勒纳的观测相矛盾。

爱因斯坦认为勒纳的观测是光的微粒性质的清楚的证明！如果光是由能量量子组成的，每个能量量子的大小为 $h\nu$ ，量子透入到金属表面层中，它们的能量至少部分地转化为电子的动能。最简单的情况是光子把它的全部能量转移给一个电子，并且这点能量足够使电子获得自由。在离开金属时，电子损失这点能量的一部分变成使它离开金属所需要的某个功（ W ）。爱因斯坦导出的射电子极大动能的公式

$$(E \text{ 动能})_{\text{极大}} = h\nu - W$$

完好地解释了勒纳的观测。

爱因斯坦1906年3月写于伯尔尼，发表于德国《物理学杂志》的《论光的产生和吸收》，论述了光量子假说和光电辐射之间的关

系，给出了伏打效应和光电散射之间的定量关系，一个负的基元电量子（电荷 ϵ ）要从金属运动到气体中，必须至少带有能量 V_ϵ ，因此一种光要把负电从金属中打出来，只有当这种光的“光量子”具有不小于 V_ϵ 的能量值时才有可能。于是得到

$$V_\epsilon \leq \frac{R}{N} \beta \nu$$

或者

$$V \leq \frac{R}{A} \beta \nu$$

这里， A 是一克分子单价离子的电荷，这里的 ν 就是能引起光电效应的光的最小频率。

“于是，如果 V_1 和 V_2 分别表示在金属 M_1 和 M_2 中引起光电效应的光的最小频率，那么对于这两种金属的伏打电压差，下列方程应当成立：

$$-V_{12} = V_1 - V_2 = \frac{R}{A} \beta (\nu_1 - \nu_2)$$

或者，当 V_{12} 用伏打来计量，

$$V_{12} = 4.2 \times 10^{-15} (V_2 - V_1)$$

在这个公式中，很大程度上包含了下述完全而又普遍有效的命题：一种金属的正电序愈大，在该金属中引起光电效应最低光频就愈小。是否应当认为这个公式也在定量的方面反映了事实，弄清楚这一点该是有很意义的吧。^① 进一步描述引起光电效应的光的最小频率问题。

二、爱因斯坦发现尺缩效应和钟慢效应而创立狭义相对论

1. 两个基本前提

所有相对论效应都受光速为最大的条件限制，没有任何坐标系

^① 爱因斯坦：《论光的产生和吸收》（爱因斯坦文集）第二卷，134—136页，北京，商务印书馆，1976。

的运动速度能够达到或超过光速。爱因斯坦就是根据这个思考于26岁时以大胆革命的精神创立了狭义相对论。而创立狭义相对论是以光速不变假设和狭义相对性原理为两个基本前提的，即用这两个基本前提，尤其光速不变假设重新审定了“同时”的概念，并从这两个前提出发重新推得了一种新的坐标变换——洛伦兹变换。

2. 洛伦兹变换

洛伦兹出于拯救以太学说，坚持认为麦克斯韦方程在绝对参考系中才成立，去找出在运动参考系中的相应方程，并引入所谓的坐标时间， $t' = t - (vx/c^2)$ 。同时，为了解释迈克尔孙-莫雷实验，提出运动尺的长度受到以太的作用将会缩短的假说。最后，他发现了下列变换：

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

这就使“真空”麦克斯韦方程的数学形式保持不变。而洛伦兹并不认为 x' 、 y' 、 z' 与 t' 可以作为运动参考系中的真实坐标，它们仅仅具有数学意义。

庞加莱的工作则是侧重于变换性质方面。他在把变换的上边式子定名为洛伦兹变换的同时，又找到了电荷密度和电流密度的变换公式，对洛伦兹工作的一些空隙做了补充。这就清楚地表明，洛伦兹变换仅仅是光速不变的同时规定所决定的，由此更加分清运动学和动力学的界限，使人们在涉及动力学问题时，才需要狭义相对性原理。

根据洛伦兹变换，才有了著名的两个运动学效应：尺缩效应和钟慢效应。

狭义相对论的数学形式虽比较简单，但不像“光速不变效应”、“尺缩效应”、“钟慢效应”那样容易理解。其实这些运动学效应都跟“同时”的规定有关。“同时”是相对的，从本质上看，这些运

动学效应都是按照特定方式规定“同时”的结果。

3. 运动学效应的尺缩效应

这一现象是由麦克雷(W. H. McCrea)首先提出的,以后又由韦斯科夫(V. F. Weisskopf)、特雷尔(J. Terrell)与彭罗斯(R. Penrose)进一步阐明。

尺缩效应,是指运动着的尺在其运动方向上缩短。它是同时钟变慢效应相对称着的。即一根高速飞行的尺的长度,从地面上“同时”(奥妙在于同时相对性效应)进行测量尺的前端和末端,是先测了前端,后测了末端,对其距离的测量过程的距离概念的相对性效应。尺缩是客观的,但与观察者的选择有关。没有涉及收缩是否与本身的物质材质或属性变化有关。

尺缩效应并非是爱因斯坦首先提出的,早在1893年由斐兹杰拉德和洛仑兹先后提出过,即有名的斐兹杰拉德-洛仑兹收缩假说,其表述与相对论的命题完全一样,即运动的尺在运动方向上缩短。二者在字面上是一样的命题,定量关系的数学表达式也一样。但意义不一样,看其所处的理论体系。洛仑兹主张收缩假说是从属于电子论的。爱因斯坦的尺缩结论是以思想实验为依据,认为尺缩是客观的但与观察者的选择有关。换句话说,只有对于不随尺运动的参照系尺缩效应是有的。这么说表现了洛仑兹收缩也是相对的,它并没有涉及收缩是否是尺本身的物质结构或属性的变化,这是很重要的一点。

尺缩效应显示“距离概念的相对性”,也就是相对空间概念代替了传统的绝对空间概念。

“距离概念的相对性”是狭义相对论的空间观的重要内容。但是相对性不等于主观性,距离概念也不能归结为主观的。

4. 运动学效应的钟慢效应

运动学效应的钟慢效应是爱因斯坦从同时性的相对性直接导出的结论,也是爱因斯坦对时间看法的另一个基本观点。

从一个坐标系看来相对于它而运动的钟走得较慢,这就叫做钟

慢效应或时间膨胀。

钟慢效应表现了时间的相对性，表现了时间受运动的影响和制约，还表现在运动的钟变慢依钟的运动速度为转移。钟愈接近于真空中的光速作相对运动的速度，钟走得愈慢。它们之间的比例关系是确定的，究竟慢多少不是任意的。钟慢的规律由洛仑兹变换的第四方程作了数学描述，钟慢效应是可以计算的，因而是可以检验的。还表现了时间间隔对于坐标系的运动状态的依赖性。这表明，把钟慢效应限制在相对运动的坐标系并不是无条件的，把运动的钟变慢作为运动学的效应并不是无条件，是从动力学意义上而不是从运动学意义上说到运动的钟。

钟慢效应以及所有狭义相对论的效应都受这样一个条件所限制，即光速为最大的速度，没有任何坐标系的运动速度能够达到光速或超过光速。

当钟以飞鸽的时速运动时，钟慢效应难以发现和觉察到，甚至可以说难以表现出来。因为其速度较之于光速太小太小了。

5. 相对性原理

相对论的核心思想是“相对性原理”。先是在狭小意义上运用（仅仅涉及惯性系）后来又在广泛意义上运用（推广到加速系）这就使得相对论有“狭义”和“广义”之分。

6. 飞船速度的奇特效应

相对论告诉我们，当宇宙飞船的速度接近光速时，航天员的动作会迟钝，航天员的表会走慢，航天员的尺会变短，用地球上时间衡量航天员的每一分钟都变长了。这就是时间膨胀的含义；而且，飞船越接近光速，宇航员的表越慢，尺越短；当飞船达到光速时，时间完全停止，尺缩短为零。

由于这些奇特效应。当宇航员用缩短的尺、走慢的表（现在化的一分钟等于两分钟）测射出物体的速度比观察者用“正常”度量测量的要大得多；宇航员的尺是正常的，别人的速度在减慢，长度缩短了。飞船如果超光速，则时间会倒退。

7. 爱因斯坦对电磁效应的革新

爱因斯坦的相对论效应是解释电磁力的。他在《相对论发展简述》(1921年2月17日出版的美国《自然》周刊,排在最前面)中指出,使用磁效应概念是“按照这个观念,一切物理过程都涉及作用的连续性(同超距作用大不相同),或者用数学语言来说,它们都用微分方程来表示。麦克斯韦用‘真空位移电流’的磁效应的概念,并假定由感应所产生的动电场(electro-dynamic field)和静电场两者本质上相同,成功地处理了静电物体的电磁过程。”^①

爱因斯坦在自述中说,在我的学生时代最使我着迷的问题是麦克斯韦理论。这理论从超距作用力过渡到以场作为基本变数而使它成为革命的理论。光学并入电磁理论,连同光速同绝对电磁单位制的关系,以及折射率同介电常数的关系,反射系数同金属体的传导率之间的定性关系——这真好像是种启示。“在这里除了转变为场论,即转变为用微分方程来表示基本定律外,麦克斯韦只需要一个唯一的假设性的步骤——在真空和电介质中引进位移电流及共磁效应,这种革新几乎是由微分方程的形式性质规定了的。谈到这里,我情不自禁地要说,在法拉第—麦克斯韦这一对同伽利略—牛顿这一对之间有非常值得注意的内在相似性——每一对中的第一位都直觉地抓住了事物的联系,而第二位则严格地用公式把这些联系表述出来,并且定量地应用了它们。”^②

8. 物理效应

爱因斯坦用物理效应论述时空,他在《相对论的意义》中的两个片断中说,好像迫使我们认为空间—时间连续区在物理上是具有客观性质的,正像从牛顿的立场来看“时间是绝对的”(tempus est absolutum)同“空间是绝对的”(spatium spatii absolutum)这两个陈

爱因斯坦:《相对论发展简述》,《爱因斯坦文集》,第一卷,149页,北京,商务印书馆,1976。

^② 爱因斯坦:自述,《爱因斯坦文集》,第一卷,15页,北京,商务印书馆,1976。

述是调和一致的，“从狭义相对论的立场来看，我们则应当说空间和时间的连续区是绝对的”（*continuum spatii et temporis est absolutum*）。在这后一陈述中，“绝对的”（*absolutum*）不仅意味着“物理上实在的”，而且也意味着“在其物理性质上是独立的，它具有物理效应。但本身却不受物理条件的影响。”^①

三、爱因斯坦发现进动效应、弯曲效应和红移效应而创立广义相对论

《广义相对论的基础》是爱因斯坦关于广义相对论的第一篇完整的论文，爱因斯坦在文中发现了广义相对论效应：在任何参考系中，物理规律都有相同的数学形式，表示运动总是通过物体之间相互关系的变化和相互比较表现出运动的相对性的。指出广义相对论效应，在一个小体积范围内的万有引力与在某一加速运动的参考系中的惯性力是相互等效的。由此，爱因斯坦广义相对论的引力方程有两个部分：一是线性方程，二是非线性方程。在这两个方程下，爱因斯坦发现第一个水星在近日点进动效应；第二个星体的光线穿过太阳引力场的弯曲效应；第三个强引力场发射的光谱线向红端移动效应。

1. 进动效应

第一个水星在近日点进动效应。爱因斯坦推论说：“按照广义相对论，度规张量规定没有电磁效应的情况下量杆和时钟的行为以及可以自由位移的固体运动”^②。有水星近日点进动效应。爱因斯坦又预言，“如果金星和地球的轨道的偏心率比实际要大的话，实验观测可能发生同样效应。”^③

① 爱因斯坦：《相对论的意义中的两个片断》，《爱因斯坦文集》第一卷，159页，北京，商务印书馆，1976。

② 爱因斯坦：《评M·E·梅耶松的〈相对论的演绎法〉》，《爱因斯坦文集》，第三卷，370页，北京，商务印书馆，1976。

③ 爱因斯坦：《引力场获得伟大成功》，《爱因斯坦文集》，第三卷，63页，北京，商务印书馆，1976。