经典物理学的几个问题 - 伽利略相对性原理

Li Xusheng

1922538071@qq.com

Abstract: 在物理学中，力学的终极概念得到了因果解释.对物理学来说，力的概念（力场的概念）是个必须加以分析的概念.物理学确定了力的数值，在个别情况下，当质点无摩擦地运动时（即摩擦力可以忽略时）力可以是坐标的函数.这种函数的形式应由引力论、弹性理论、电动力学理论中对引力、弹性力、电力、磁力的研究给出，并且这种研究与力学不同，完全按另一种方式进行，这些力已不再是终极概念，恰恰相反，现代科学的任务正是要用物理的或数学的方法把它们从另外的量推演出来.

[Li X. **经典物理学的几个问题 - 伽利略相对性原理.** *Academ Arena* 2014;6(12):49-65]. (ISSN 1553-992X). http://www.sciencepub.net/academia. 9

Keywords: 物理学; 力学; 因果;分析;数学; 方法

相对运动概念在应用到自由度数很大甚至无限大的系统时就会受到限制.可是只要我们回到那种不可分割的，整体连续的表象，只要我们放弃单个物体位置和运动的参数变化以及为些所必备的坐标系，那么绝对运动和相对运动的对立就被撤消了.对某一宏观体积中质点的热运动来说，相对性的概念就没有什么用途.不过当我们规定系统的自由度数不太大，并且可以不间断地记录每一质点的位置和速度，那么相对性的概念还可以保持下来.这样，要是可以把宇宙气体（不去研究里面个别质点的位置和速度）同连续介质组成一体的话，牛顿的绝对空间或许就获得唯理论的意义.当绝对空间具有洛仑兹那种全部充满空间以太的特征的时候，绝对空间也同样会获得唯理论的意义.（尽管已为后来的一系列实验所驳倒）

在物理学中，力学的终极概念得到了因果解释.对物理学来说，力的概念（力场的概念）是个必须加以分析的概念.物理学确定了力的数值，在个别情况下，当质点无摩擦地运动时（即摩擦力可以忽略时）力可以是坐标的函数.这种函数的形式应由引力论、弹性理论、电动力学理论中对引力、弹性力、电力、磁力的研究给出，并且这种研究与力学不同，完全按另一种方式进行，这些力已不再是终极概念，恰恰相反，现代科学的任务正是要用物理的或数学的方法把它们从另外的量推演出来.

划分物理学和力学的界限也就把场方程和运动方程加以区分.或许正如前面所指出的那样，既然忽略了离散存在质点和场的相互作用，所以场方程和运动方程都是线性的.在用抽象的理论认证某个质点的时候在力学上就把这个质点看成是一种纯属被动的实体，而力也就施加在它上面，同时又和这个质点本身无关，这也正是解决力学问题的前提.在场论中力场被相应地看成所谓被动的一面，看成是不依赖于场的粒子（即场源）的函数.根据力来确定运动，根据力与坐标的关系确定力是牛顿在《自然哲学的数学原理》中所提出的两个问题.在解决第一个问题时，牛顿依据的是他所阐明的运动公理.同时在《原理》中还解决了另一个问题，确定了把力(引力)和坐标联系起来的函数的形式.如所周知，这是古典物理学的出发点.以后物理学的其他部门就是按牛顿的引力场的式样构成的.

在物理学发展的影响下，当力学把标量也包括到自己的基本概念之中的时候，已知力和初始条件就能决定质点位置的牛顿运动方程将要被另一种方程所取代.

就科学思维能力和风格的影响来说只有极少数的科学发现可以同广义坐标方法相提并论.把空间中质点的位置，即古典力学的原始的形象和被当成是多维“空间”的点的系统的位形相对应，从几何的观点来说这是在拉格朗日把四维时空引入科学之后所采取的下一个步骤.当达朗贝尔在《百科全书》【4】的量度一文中写到他的一些“机敏的熟人”把时间看成是第四维时候，他可能就是指拉格朗日和其他一些人.但是，把第四维的概念引入科学还是当拉格朗日在《分析力学》中用四维解析几何的形式阐明古典力学原理之后.也正是由于《分析力学》才把 n 维空间的观念引入到科学之中.多维空间的理论由于柯西（Couehy）、凯尔【5】、普留凯尔（Pluker）【6】、黎曼（Reimmsnn），特别是格拉斯曼(Grassmaum)【7】之在《广延性的理论》【1】(1844)中的努力在形式化方面得到了很大发展.这一发展以新的、有力的研究方法丰富了数学的内容，使变革几何学的原理成为可能，同时为相对论，量子力学准备了富有成效的多维几何学的解释.

推动这一发展的首要因素就是拉格朗日把力学系统的状态看成是多维空间的点这一天才的设想和促使数学家继续建立形式化理论的观念，然而，此时不能把物理思想的概念和形式化的理论体系的

概念单纯地加以对应.从历史上来说,这种单纯地与形式化的理论体系的概念相对应既是十八世纪后半期和十九世纪前半期形式化理论体系物理学从力学和力学概念的发展中获得解放的重要前题，有时也是重要的方面，而力学概念的发展也刺激了这种解放.

拉格朗日研究了由 n 个质点构成的系统.这些质点的位置用 n 个因子来描述，每因子又由三个数组成，则位置即被 3n 个坐标 x1y1z1，x2y2z2，…，xnynzn 来描述.如果通过具有相应下标的 q1，q2，…，qn 表示上述每个坐标，那么系统的位形就可以用具有 3n 个坐标 q 的点来代表，或者说用具有 3n 个分量的矢量 q 来代表.这样，系统从一个位置到另一个位置的变化就可以表示为 q 点的位移，或表示为具有分量 dq1，dq2，…，dqn 的 3n 维矢量 dq.假若系统在三维空间中运动，它的位置的变化可以用 3n 维的轨迹来代表，而 3n 维轨迹则是 q 点位移的结果.

在拉格朗日的力学中，广义坐标不仅可以是质点系的笛卡尔坐标.而且也可以是描绘该系统位形的任何一种参数.对一个受到引力或弹性力作用的质点系统来说，每一时刻作用在系统中各点上的力(因而也就是加速度)由广义坐标所决定.物体的速度不影响加速度，并且当已知系统位形时，速度有可能取不同的值.如果速度可以取不同的数值,那么，既使已知加速度(即力)，下一时刻系统的位形也是不确定的.所以为确定系统在未来每一时刻的行为不仅必须给出已知时刻的坐标，而且还要给出速度.有这两种量就可以详尽无遗地描述出系统的状态.

状态的概念是同古典物理学的基本前提紧密相关的，这一点要引起注意.当我们从原始的、直接给出的、不可分割的混乱的图景中区分出个别的物体和运动的时候，我们是把在空间中改变自己位置的物体的一系列自身同一的状态认为是某种过程,这是力学最原始的表象.力学之原始形象则是坐标随时间改变的自身同一的物体.坐标的变化并不能为怀疑运动客体与自身同一提供任何根据.我们完全完全可以“识别出”在每一个相继时刻的物体.这一力学的基本前提（运动客体的自身同一性）是以坐标的连续变化加以保证的.倘若原则上能够把物体在一个位置和另一位置的间隔上的每一个点都记录下来，那么就可以断言出现在我们面前的是同一个物体.物理客体这种个体性(在上述情况下运动客体的个体性）是由每一个接继的状态同已知状态的单值的依存关系所保证的，也就是说可以由以下这种可能性所保证；即知道物体在某一时刻的状态就可以预见每一个相继时刻的状态（同样是原则上的）.这样，所谓状态这一概念标志若干物理量的综合,而这种综合以单值的形式同每一个相继时刻的，每一个相似的综合联系在一起.根据这种状态的连续性和单值的依存关系就可推出运动的微分方程.当已知初始条件时借助此方程就能绝对准确地预言物体以后的全部运动.在把这种关系运用于物体系统时，拉格朗日就把力学系统的个体性和自身同一性这些具有质的特征的概念，翻译成分析的语言，而这些概念则是由它们和状态之单值的连继的依存关系所保证.引入广义坐标和广义速度(公式)后运动微分方程表现出古典机械论的决定论的观念.

现在我们讨论一下为描述或者说为预见系统后继状态所必须的广义坐标（和广义速度）的数目问题.假若系统由一个质点构成,此时广义坐标和普通坐标一致，即广义坐标数 f 等于 3.若系统有两个质点，那么需要 6 个广义坐标，f=6，即第一个质点要三个普通坐标,第二质点也是三个.若这两个质点彼此是以不变的距离相联系(即有一个约束条件)这时有 5 个广义坐标就足够了.数 f 总等于系统自由度数.每个质点在三维空间要三个数，n 个质点的自由度数是 3n 减去 K 个约束条件 f=3n－K.给出与广义坐标数目相同的广义速度，不仅可以确定位置，也可以确定系统状态.

借助于广义坐标对任何计算系统都能够求得运动方程.拉格朗日在引入了函数 $L(q\dot{q}t)$（等于封闭系统的动能和势能之差）之后，得到了运动方程.后来赫姆霍茨称这个函数为动势.用动势（拉格朗日函数）把运动方程改写为下形式：

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial L}{\partial q_i}=0$$

所论系统有多少个自由度（f=3n－K)，就有多少个拉格朗日方程.

在引入广义坐标 qi 和广义速度 $\dot{q}_i$ 之后，下一步就是引入广义动量 pi,它是拉格朗日函数 L 对广义速度 $\dot{q}_i$ 的一阶导数. $p_1=\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1}$，$p_2=\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2}$，等等，pi 被叫作广义动量是因为在笛卡尔坐标系中（q1=x，q2=y，q3=z）它与动量在三个坐标轴上的投影一致.然而它被称之为广义动量这是因为例如在极坐标中 q1=ρ，q2=φ，.p1 具有动量的量纲，而 p2 具有动量矩的量纲.

借助于广义动量可以得到替代 f 个拉格朗日方程（二阶）的 2f 个一阶方程. 如果用哈米顿函数 H=T+U 代替拉格朗日函数，这些方程就可以采取极为简单的对称形式.

拉格朗日方程和哈米顿方程在物理学中特别是在电动力学中获得广泛地应用. 可是从历史的观点上来看，物理学在此情况下从力学中所得到的东西正是它向力学所提供的东西. 当非力学的参量能够以坐标的身份出现时，这种被推广后的运动方程的形式就成为物理学发展的历史成果了.

物理学的影响使力学的基本原理相对性原理改变了形式. 我们先来看看牛顿运动方程. 在它里面作为纯力学量出现的是质点的空间坐标. 质点相对于某个坐标系运动，并且在坐标变换时，即从一个惯性系过渡到另一个惯性第时，运动方程是协变的. 下面再看具有广义坐标的拉格朗日方程. 它可以描述其他非力学的过程. 当坐标变换时拉格朗日方程是否还保持协变性呢？麦克斯韦的电动力学和以后的 Einstein 相对论指出：如果所论系统是匀速直线运动，则方程是协变的. 这样一来，相对性原理就推广到非力学的过程，并且使古典物理这获得了最终的形式. 当然古典物理学为此是要付出代价的，这就是说要放弃不变的空间距离和时间间隔，而代之以不变的四维间隔. 此时相对性原理仍旧是统一宏观物理学和力学的普遍原理. 从这种意义上说相对论是世界之古典图景的总结. 不过这种情况下，力学规律是否还能保持原来那种基本的，作为出发点的，最普遍规律的地位吗？虽然一方面不能把物理学归结为力学规律然而另一方面物理学原理又无法同力学规律分割开来.

当谈到区分力学和物理学，谈到物理学不能归结为力学的特性，总而言之，说到它们之间的相互关系的时候，必须考虑到“力学”的概念和“力学的”概念本身在历史上的变化. 这两个词的含意是在变化着的，并且随着物理思想的改变而改变. 力学发展的每一个历史阶段都是以被物理思想所决定的终极概念区别于另一个历史阶段. 而这种物理思想总要直接影响到力学的特性. 笛卡尔力学的物理前提是空间和物质的同一. 牛顿力学的物理前提是作用于自然界所有物体的引力概念. 骤然看来在拉格朗日和哈密顿力学中，似乎缺乏物理前提，力学只具有四维解析几何的形式化的性质，但是这只是意味着从物理上解释方程时，它里面的量可以和被守恒定律所联系的不同的物理量相对应. 狭义相对论的力学是同新的物理前提电动力学的概念和规律联系在一起的.

这样，当我们谈论把这样或那样的物理学原理能够归结或不能够归结为力学的时候，不仅应该考虑到在物理学中力学概念这样或那样的作用，还要考虑到物理学概念对力学的影响. 单纯地把“非力学的物理”和“力学的物理”加以对比就会忽视了那种相互作用. 实际上物理学同力学间的联系是很曲折的，必须以这种态度来研究相对论物理之力学的和非力学特性的问题.

是否可以把这些概念在历史的所有的变更都归拢在一起进而从整体上对“力学”和物理学的“力学的”特性加以讨论呢？我们要把这个问题放在同其他问题的联系中加以考察，这就是说最好把全部历史的变更都归拢在一起来讨论相对性原理，或者说讨论适用于伽利略牛顿的古典原理和 Einstein 的狭义，广义相对论的，普遍的相对性概念. 伽利略牛顿原理适应于缓慢的惯性运动；狭义相对论适用于可以和电磁振荡传播的速度相比拟的惯性运动；广义相对论适用在引力场中质点或质点系的加速运动. 上述情况都是指坐标以这样或那样的方式随时间而变化；都是指某种被个体化的，在每一时刻定域于空间中的物理客体，而此客体在保持自身不变的同时从空间的一个点转移到另一个点. 换言之，这里所研究的正是自身同一客体的一个个相继的处所. 这个客体能够以任意速度（古典的相对性原理）或以被某个恒定的（狭义相对论）或以引力场所决定的（时空弯曲、广义相对论）的速度通过这些处所. 无论取那一种观念只要指明自身同一客体相对它作运动的那个物体，则自身同一客体运动的概念就是有意义的. 这些参考物和相应的坐标空间都是平等的，即从一个坐标空间过渡到另一个坐标空间时，某些量要保持不变（相应的变换不变量），也就是说这种过渡并不表现在运动着的系统内部的物理过程的进程之中. 这个论题（即能否提所谓位置、速度、加速度的相对性）能够用到哪种坐标变换上面还应当由实验指出，把现已知晓的相对性理论都归拢起来这才是相对性原理的意义所在.

现在我们着手总结力学的概念了. 在笛卡尔的力学中，所谓物体的运动是指从物理学上区别于周围的物体运动. 当笛卡尔把物体对与其相接触的空间的运动归咎为空间，他这种做法则是力求把物体从环绕它的空间划分出来，又要把二者视为同一. 牛顿认为运动的物体有不变的惯性质量，因此他能够不考虑物体的长、宽、高而把物体看成是质点具有一定质量的，不计尺寸大小的粒子. 拉格朗日和哈米顿方程可以描述很复杂的客体的运动，它的自身同一性和个体性是以复杂的解析表示的不变性所保证. 在相对论力学中所表现的是视为同一质点的属性的极为复杂的关系. 但是所有情况，无论是具有静止质量的粒子还是用能量作为视为同一根据的光子，在较为广阔的普遍的意义上来看力学所研究的还是粒子和系统的相对运动. 从这种意义说，每一个相对论的坐标表象其意义就是“力学的”表象.

在研究相对论原理之具体的可以互相替代相互补充的变更和力学的具体形式的时候，我们就能对Einstein相对论是所谓“力学论”还是“物理论”的问题作出回答了.这个理论是力学的理论;然而这里所谓的力学就是物理概念本身长时间影响的结果.它所研究的决非具体的，狭隘意义的机械运动，而是无比复杂的物理客体的运动.

参考文献：
【1】Ф．Клейн Лекции о развитии математики в ＸＩＸ столетии М—Л，１９３７，стр．２０９—２２１
【4】［法］Ｅｎｃｙｃｌｏｐｅｄｉｅ ｏｕ ｄｉｃｔｉｏｎｎａｉｒｅ ｒａｉｓｏｎｎｅ，ｔ．ＩＶ．ｐ．１０１０．Ｐａｒｉｓ，１７５４［ｅ上有撇］
【5】Кель（身世不详）
【6】．Ｐｌｕｋｅｒ １８０１——１８７８ 德国数学家、物理学家
【7】．Ｇｒａｓｓｍａｎｎ １８０９——１８７７ 德国数学家.

2、惯性的认识

惯性定律的独立性之辩:许多物理学家认为:牛顿第一定律不具有独立性，是第二定律的一个特例.或者说，当作用到物体上的合外力为零时，物体的速度不变化，就是匀速直线运动，也就是第一定律描述的运动状况.另外一种观点:第一定律具有不可取代的地位和作用：作为惯性和力的原始定义，没有这个原始性定义,无法构建第二定律.它是第二定律的基础，应该具有独立性.

惯性定律的诞生：牛顿在“原理”中给出第一定律的名称,笛卡尔在1644年出版的《哲学原理》中,“如果物质处在运动之中，那么如果无其他原因的作用的话，它将继续以同一速度在同一直线方向上运动，既不停下，也不偏离原来的方向 【1】.”更接近牛顿第一定律的描述.伽利略在1632年出版的《关于两大世界体系的对话》和1638年出版的《关于力学和局部运动的两门新科学的谈话和数学证明》，通过“斜面的理想实验”,“乘船的理想实验”描述惯性定律.

惯性定律的真理性:它是牛顿力学的重要定律之一，因为牛顿力学在低速情况下，与实验、生产、科研及天体的运动等诸多方面,都吻合的很好.人们都相信惯性定律的真理性有充分的依据，也不会怀疑它的普遍实用性….德国物理学家赫兹曾说到:“要阐明力学的真正的基础内容，而不会不时感到为难，不会一再激起歉意，不想尽快跨过原理部分而向他们讲述一些应用例子，那是极端困难的一件事.”【2】

开普勒在他1609年发表的著作《新天文学》和1619年发表的著作《宇宙谐和论》中写道；“天体有留在天空中任何地方的性质,除非它被拖曳着.”“如果天体不赋有类似于重量的惯性，要使它运动就不需要力，最小的动力就足以使它有无限的速度，但由于天体公转需要用一定的时间，有的长些，有的短些，因此非常明显，物质必须具有能说明这些差别的惯性.”“惯性,或对运动的阻力是物质的一种特性,在给定的体积中,物质的量愈多,惯性愈强.”这大概是关于物体惯性的最早陈述.可以看出开普勒所说的惯性是指静止物体的惯性，甚至他已经认识到物体的惯性与它的质量有关，然而他显然受到亚里士多德思想的束缚，不可能思考运动物体是否具有惯性的问题.

伽利略开创了实验和理性思维相结合的近代物理研究方法,并用于研究物体的运动.他对于亚里士多德关于物体运动的粗糙的日常观察、抽象的猜测玄想和想当然的思辨推理十分不满，他通过科学实验和科学推理得到许多正确的结果,总结在他的著作《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》(1632年)和《关于力学和运动两门新科学的对话.（1638年）中，其中一个重要的结果如下.假设沿斜面AB落下的物体,以B点得到的速度沿另一斜面BC向上运动，则物体不受BC倾斜的影响仍将达到与A点相同的高度，只是需要的时间不同；当第二个斜面变成既不上升，亦不下降的水平面时，物体将一直以已获得的速度永远向前运动.伽利略的思想无疑地比他的前辈前进了一大步,他认识到不受其他物体的作用,物体可以永恒地运动，这已经很接近惯性定律，但是伽利略还没有摆脱亚里士多德的影响，他所说的水平面是和地球同心的球面，也就是说，那种不受其他物体作用的物体的永恒运动是圆周运动，因此我们还不能说伽略发现了惯性定律.

最早清楚表述惯性定律并把它作为原理加以确定的是笛卡儿.笛卡儿是唯理论哲学家,他试图建立起整个宇宙在内的各种自然现象都能从基本原理中推演出来的体系，惯性定律就是他的体系中的一条基本原理.他在他的《哲学原理》(1644年）一书中把这条基本原理表述为两条定律：一、每一单独的物质微粒将继续保持同一状态，直到与其他微粒相碰被迫改变这一状态为止；二、所有的运动，其本身都是沿直线的.然而笛卡儿没有建立起他试图建立的那种能演绎出各种自然现象的体系，其中许多是错误的，不过他的思想对牛顿的综合产生了一定的影响.

惯性是物理学中最基本的概念之一，也是学习物理学最早遇到的概念之一.这一极为普通和平凡的概念曾经引导许多物理学家深入思考和剖析，促进物

理学重大进展，其中蕴涵着深刻的物理思想和丰富的物理学研究方法的教益. 惯性一般是指物体不受外力作用时，保持其原有运动状态的属性. 人们对于惯性这一认识有赖于惯性定律的建立，而它则依赖于对于力的认识以及区分运动状态和运动状态改变的认识，这一点在人类认识发展史上经历了漫长的岁月. 牛顿 1661 年进入剑桥大学学习亚里士多德的运动论，1664 年他从事力学的研究，摆脱了亚里士多德的影响. 他继承了伽利略重视实验和逻辑推理的研究方法，他也继承了笛卡儿的研究成果. 他深入地研究了碰撞问题、圆周运动以及行星运动等问题，澄清了动量概念和力的概念. 1687 年出版著作《自然哲学的数学原理》，以“定义”和“公理，即运动定律”为基础建立起把天上的力学和地上的力学统一起来的力学体系. 惯 性定律就是牛顿第一定律，表述为“所有物体始终保持静止或匀速直线运动状态，除非由于作用于它的力迫使它改变这种状态.”惯性定律真正成为力学理论的出发点. 根据惯性定律，物体具有保持原有运动状态的属性，这种属性称为惯性. 不仅静止的物体具有惯性，运动的物体也具有惯性；物体惯性的大小用其质量大小来衡量. 至此，人们对于物体惯性的认识达到第一阶段比较完善的程度.

由于物体加速是受到的合外力的作用，此时物体引力质量增加，加速度减小. 惯性是物体保持运动状态的原因，不但保持原来的速度状态，而且能使物体受到一定力的作用下加速度逐渐减小. 在平动过程中，引力质量的惯性是阻碍速度的增加；在转动过程中惯性阻碍角速度的增加. 在经典物理学中，惯性原理是相对性原理的表现形式. 惯性的存在是因为场的真实存在，场在宇宙空间中的广泛存在是惯性得以体现的最根本原因. 1970 年苏联科学家罗金斯基进行的实验在 9×10^{-13} 以内证明了引力质量和惯性质量严格相等，如果注意到惯性质量与引力质量的严格相等，我们将发现，更准确的提法是，惯性来源于全宇宙物质的万有引力场. 为了弄清物体惯性运动的物理实质性原理，不妨让我们针对假定只有 A、B 两物体存在的宇宙进行分析.

如图 1-2，由于宇宙中只有 A、B 两物体存在，为了考察 A 的惯性和运动，不管 A、B 两物体之间是否发生相互作用，充当惯性参照系的唯一地只能是 B 物体. 在这样简单的宇宙中，针对 A 物体可以把牛顿第一、第二运动定律分别表述为：1、A 相对 B 保持静止或匀速直线运动，除非 B 对它施加作用力迫使它改变这种状态. 2、A 相对 B 所得加速度的大小与受到 B 的作用力成正比，与 A 的质量成反比，加速度的方向在 A、B 的连线上.

图 1-2

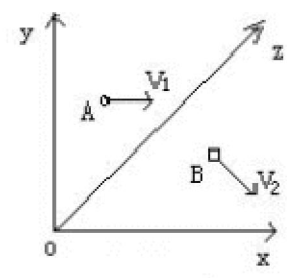


图 1-3

我们令距 B 物体 r 远处的场存在着激烈程度为 Gm/r^2 的引力场波动，G 为常数，m 为 B 的质量.（粒子的长期存在不改变其质量等物理内涵，这表明引力场波动并不向外扩散能量.）设 A 的有效截面积为 s，相对 B 以速度 v 运动，由于相对运动，属于 B 的场在单位时间内流经 A 的能流为 $\frac{Gms}{r^2}v$. 再以这个能流与能流密度及有效截面积作比，得到速度量纲的物理量 $\frac{Gms}{r^2}v/\frac{Gms}{r^2}$. 消去常量 G，并用大写字母 V 表示它，得到

$$V=\frac{\frac{m}{r^2}v}{\frac{m}{r^2}}$$

在这种简单的宇宙体系中，由于 $V\equiv v$（广义相对速度与相对速度恒等），$\frac{dV}{dt}\equiv\frac{dv}{dt}$，所以用 A 的广义相对速度代替 A 的相对速度分析惯性和运动问题，和原先完全一致，不存在任何分歧.

但当全面考察错综复杂的现实宇宙中其它物质的影响以后，某物体的广义相对速度与它的相对速度之间便存在着一些差异，我们将发现，正是这些差异的存在，直接导致了以往经典时空观的舍弃.

如图 1-3. 全面考察全宇宙物质的存在得到

$$V=\frac{\iiint\frac{\rho}{r^2}(v_1-v_2)\,d\tau}{\iiint\frac{\rho}{r^2}\,d\tau}$$

其中 V 表示考察物体（A）的广义相对速度，v_1 表示考察物体相对任一参照系的速度（这一参照系可以是惯性参照系，也可以是非惯性参照系），v_2 表示宇宙中某一物体 $\rho d\tau$ 相对同一参照系的速度，r 表示考察物体与 $\rho d\tau$ 的距离，积分范围是全宇宙空间.客观现实中，大多数物质都以星球的形式存在，通常我们可以采用广义相对速度的不连续表达式计算

$$V=\frac{\sum\frac{m_i}{r^2}(v_i-v_2)}{\sum\frac{m_i}{r^2}}$$

由于参照系之间存在着相对运动，相对速度没有唯一的值，而广义相对速度却具有唯一的值，显然，通常情况下 $V\neq v$，用计算机可以计算证明，在地球表面附近，即使考虑地球物质、远距离物质及空气的影响，只要运动物体位移的距离和时间不很大，广义相对速度和相对速度的变化率是非常接近的，即 $\frac{\Delta V}{\Delta t}\approx\frac{\Delta v}{\Delta t}$，或者 $\frac{dV}{dt}\approx\frac{dv}{dt}$.所以，如果承认牛顿第二运动定律，即 $F=m\frac{dv}{dt}$，那么就有 $F\approx m\frac{dV}{dt}$.

参考文献：
【1】李艳平，申先甲．物理学史教程．科学出版社．2003，:102
【2】《力学》湖南教育出版社，第 58 页，1985 年 1 月

附录：　　为牛顿第一定律的建立而奋斗过的人们

一、生活经验的总结者----亚里士多德

长期以来，在研究物体运动原因的过程中，人们的经验是：要使一个物体运动，必须推塔或者拉它一下，因此，人们直觉第认为，物体的运动与推、拉等行为相联系，如果不再推、拉，原来运动的物体便会停止下来.根据这类经验，亚里士多德得出结论：必须有力作用在物体上，物体才能运动；没有力的作用，物体就要静止在一个地方.这个由明显的线索得出的错误判断，维持了近两千年，直到三百多年前伽利略的出现.

二、理想实验的践行者----伽利略

伽利略注意到，当一个小球沿斜面向下运动时，它的速度增大；而当小球沿斜面向上运动时，它的速度减小，由此伽利略猜想：当小球沿水平面运动时，它的速度应该不增不减.那么，实际情况中，为什么小球沿水平面运动时，速度会越来越慢呢？原来是由于小球受到摩擦阻力的作用.并由此推断，若没有摩擦阻力，球将永远运动下去.

伽利略为了说明他的思想，设计了一个实验：让小球沿一个斜面从静止状态开始向下运动，小球将“冲”上另一个斜面.如果没有摩擦，小球将上升到原来的高度.减小第二个斜面的倾角，小球在这个斜面上仍将达到同一高度，但这是他要运动的远些.继续减小第二个斜面的倾角，球达到同一高度时会离得更远.于是他想到，若将第二个斜面平放，小球会到达多远的位置呢？结论显然是，球将永远运动下去，却不再需要什么力去推动.也就是说，力不是维持物体运动的原因.当然，我们不能消除一切阻力，也不能把第二个斜面做得无限长，所以，伽利略的实验是个“理想实验”.

三、迈向真理的接力者----笛卡尔

与伽利略同时代的法国科学家笛卡尔也研究了这个问题，他指出：如果运动中的物体没有受到力的作用，它将继续以同一速度沿同一直线运动，既不会停止下来，也不会偏离原来的方向.

四、物理基石的奠定者----牛顿

在伽利略和笛卡尔工作的基础上，在经历了一代人以后，牛顿提出了动力学的一条基本定律：一切物体总保持静止状态或匀速直线运动状态，直到有外力迫使它改变这种状态为止.这就是牛顿第一定律.

牛顿第一定律表明，物体具有保持原来匀速直线运动状态或静止状态的性质，我们把这个性质叫做惯性，因此，牛顿第一定律也叫惯性定律.由于这个定律给出了惯性的概念，所以人们说，它是物理学的基础，是奠定牛顿物理学的基石.

最后需要说明的是，因为不可能把自然界的任何物体完全孤立起来，也就是说，不受力作用的物体是不存在的，所以，牛顿第一定律是利用逻辑思维对事实进行分析的产物，不可能用实验直接验证.

3、伽利略变换

科学遵循的原则是，在充分必要的条件下越简单越好.卢瑟福认为“一个好的理论应该连酒吧女郎都能看懂.”

1、惯性系：

力学的发展经牛顿总结成动力学三定律，牛顿三定律及其导出的各定理在伽利略变换下，对所有惯性系都有相同形式.这一表述通常称为力学相对性原理，伽利略变换不同惯性系的时空变换导出基于两

个基本假定：一是相对性原理，另一个是时间和尺长在不同惯性系是相同的.

惯性系族：相对作匀速运动的所有惯性系称为惯性系族

设惯性系 $\bar{S}$ 相对惯性系 S 是同族惯性系，惯性系时空的均匀性决定了同一事件点在惯性系 S 与 $\bar{S}$ 中对应坐标矢 $\mathbf{r}=(x,y,z,t)$ 与 $\bar{\mathbf{r}}=(\bar{x},\bar{y},\bar{z},\bar{t})$ 满足如下线性关系：

$$\left.\begin{aligned}\bar{x}&=a_{11}x+a_{12}y+a_{13}z+a_{14}t\\ \bar{y}&=a_{21}x+a_{22}y+a_{23}z+a_{24}t\\ \bar{z}&=a_{31}x+a_{32}y+a_{33}z+a_{34}t\\ \bar{t}&=a_{41}x+a_{42}y+a_{43}z+a_{44}t\end{aligned}\right\} \quad (1\text{-}1)$$

$$\left.\begin{aligned}x&=a'_{11}\bar{x}+a'_{12}\bar{y}+a'_{13}\bar{z}+a'_{14}\bar{t}\\ y&=a'_{21}\bar{x}+a'_{22}\bar{y}+a'_{23}\bar{z}+a'_{24}\bar{t}\\ z&=a'_{31}\bar{x}+a'_{32}\bar{y}+a'_{33}\bar{z}+a'_{34}\bar{t}\\ t&=a'_{41}\bar{x}+a'_{42}\bar{y}+a'_{43}\bar{z}+a'_{44}\bar{t}\end{aligned}\right\} \quad (1\text{-}2)$$

即 $\bar{\mathbf{r}}=\mathbf{A}\mathbf{r}$ ， $\mathbf{r}=\mathbf{A}^{-1}\bar{\mathbf{r}}$

惯性系空间的各向同性要求同一个惯性系在空间转动下不变，也即惯性系的空间是 Euclid 空间，为了适当简化推导过程我们选择 $\bar{t}$ 在 S 系的空间投影为 S 系的 x 轴，同样选择 t 在 $\bar{S}$ 系的空间投影为 $\bar{S}$ 系的 $\bar{x}$ 轴，各自建立正交性的时空坐标，也即有

$$\mu\mathbf{x}=(\bar{\mathbf{t}}\cdot\mathbf{x})\mathbf{x}+(\bar{\mathbf{t}}\cdot\mathbf{y})\mathbf{y}+(\bar{\mathbf{t}}\cdot\mathbf{z})\mathbf{z} \quad (2\text{-}1)$$

$$\mu'\bar{\mathbf{x}}=(\mathbf{t}\cdot\bar{\mathbf{x}})\bar{\mathbf{x}}+(\mathbf{t}\cdot\bar{\mathbf{y}})\bar{\mathbf{y}}+(\mathbf{t}\cdot\bar{\mathbf{z}})\bar{\mathbf{z}} \quad (2\text{-}2)$$

在（2-1）式两边同时点乘 $\mathbf{y}$ 或 $\mathbf{z}$ ，由时空标架的正交性易得

$\bar{\mathbf{t}}\cdot\mathbf{y}=0$ ， $\bar{\mathbf{t}}\cdot\mathbf{z}=0$

于是 $a_{42}=0$ ， $a_{43}=0$ ； $a'_{42}=0$ ， $a'_{43}=0$

同理 $\mathbf{t}\cdot\bar{\mathbf{y}}=0$ ， $\mathbf{t}\cdot\bar{\mathbf{z}}=0$

$a_{24}=0$ ， $a_{34}=0$ ； $a'_{24}=0$ ， $a'_{34}=0$

$$\bar{\mathbf{t}}=a_{41}\mathbf{x}+a_{44}\mathbf{t} \quad (3\text{-}1)$$

$$\mathbf{t}=a'_{14}\bar{\mathbf{x}}+a'_{44}\bar{\mathbf{t}} \quad (3\text{-}2)$$

在（3-1）两边点乘 $\bar{\mathbf{y}}$ 或 $\bar{\mathbf{z}}$ 可得

$\mathbf{x}\cdot\bar{\mathbf{y}}=0$ ， $\mathbf{x}\cdot\bar{\mathbf{z}}=0$

即 $a_{21}=0$ ， $a_{31}=0$ ； $a'_{21}=0$ ， $a'_{31}=0$

在（3-2）两边点乘 $\mathbf{y}$ 或 $\mathbf{z}$ 可得

$\bar{\mathbf{x}}\cdot\mathbf{y}=0$ ， $\bar{\mathbf{x}}\cdot\mathbf{z}=0$

$a_{12}=0$ ， $a_{13}=0$ ； $a'_{12}=0$ ， $a'_{13}=0$

综上即有

$$\bar{x}=a_{11}x+a_{14}t$$

$$\bar{t}=a_{41}x+a_{44}t$$

$$\bar{y}=a_{22}y+a_{23}z$$

$$\bar{z}=a_{32}y+a_{33}z$$

即 S 系到 $\bar{S}$ 系的线性变换可分解为 $\mathbf{x}-\mathbf{t}$ 到 $\bar{\mathbf{x}}-\bar{\mathbf{t}}$ 的变换与 $\mathbf{y}-\mathbf{z}$ 到 $\bar{\mathbf{y}}-\bar{\mathbf{z}}$ 的变换. 其中 $\bar{\mathbf{y}}-\bar{\mathbf{z}}$ 到 $\mathbf{y}-\mathbf{z}$ 的变换是 Euclid 空间的刚性转动，于是可在 $\bar{S}$ 系作旋转使 $\mathbf{y}$ 与 $\mathbf{z}$ 同 $\bar{\mathbf{y}}$ 与 $\bar{\mathbf{z}}$ 对应平行，即有：

$$\left.\begin{aligned}\bar{x} &= a_{11}x + a_{14}t \\ \bar{y} &= \rho y \\ \bar{z} &= \rho z \\ \bar{t} &= a_{41}x + a_{44}t\end{aligned}\right\} \quad (4\text{-}1)$$

对应的有，

$$\left.\begin{aligned}x &= a'_{11}\bar{x} + a'_{14}\bar{t} \\ y &= \rho'\bar{y} \\ z &= \rho'\bar{z} \\ t &= a'_{41}\bar{x} + a'_{44}\bar{t}\end{aligned}\right\} \quad (4\text{-}2)$$

令 $a_{11}a_{44} - a_{14}a_{41} = \lambda$

有 $a'_{11} = \frac{a_{44}}{\lambda}$，$a'_{14} = -\frac{a_{14}}{\lambda}$，$a'_{41} = -\frac{a_{41}}{\lambda}$，$a'_{44} = \frac{a_{11}}{\lambda}$，$\rho\rho' = 1$

2、间隔的定义

定义：$S_{12} = [c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2]^{1/2}$

注：两事件的间隔既不是空间距离，也不是时间间隔，

而是两者的某种组合

对光讯号联系的两事件易知： $S_{12}^2 = S_{12}'^2 = 0$

3、间隔不变性

考虑两无限接近的事件，则

因为ds^2和ds'^2都是长度平方的量纲，k, k'系均是惯性系，是平权的，所以两者之间必定是线形变换。可设： $ds = ads' + b$

对于光讯号联系的两个事件，$ds = ds' = 0 \Rightarrow b = 0$

$$ds = ads'$$

$$k: ds^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

$$k': ds'^2 = c^2dt'^2 - dx'^2 - dy'^2 - dz'^2$$

i）显然 a 不可能是空间和时间的函数，这是因为空间和时间是均匀的，若 a 是空间和时间的函数，则在同一坐标系中，同样两个事件之间的间隔将是不确定的.

ii）因光的速度在空间各个方向一样，故 a 与两个参考系之间相对速度的方向无关.

∴a=a(v)

另一方面：$ds' = a'ds$

考虑到ds和ds'之间的比例系数与速度方向无关

$$\Rightarrow a = a'$$

$$\therefore a = \pm 1 \xrightarrow{\text{由变换的连续性}} a = 1$$

$$\therefore ds' = ds$$

$$s'^2 = s^2 \qquad \text{间隔不变性}$$

常期以来，时间绝对性和杆长绝对性在人们认识上是根深蒂固的，在物体运动速度远小于光速的牛顿力

学范围内，实验或观测不会对这些观念提出挑战.如果不是因为在解释与光速有关的实验结果发生困难；如果不是因为电磁场方程不满足伽利略变换下的形式不变，人们是不会轻易放弃这些假定的.

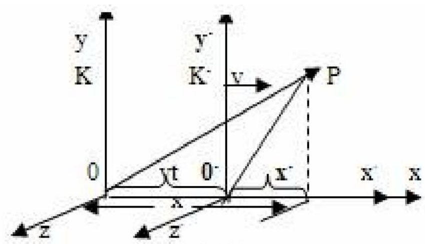
如所周知，伽利略-牛顿力学的基本定律（称为惯性定律）可以表述如下：一物体在离其他物足够远时，一直保持静止状态或保持匀速直线运动状态.这个定律不仅谈到了物体的运动，而且指出了不违反力学原理的、可在力学描述中加以应用的参考物体或坐标系.相对于人眼可见的恒星那样的物体，惯性定律无疑是在相当高的近似程度上能够成立的.现在如果我们使用一个与地球牢固地连接在一起的坐标系，那么，相对于这一坐标系，每一颗恒星在一个天文日当中都要描画一个具有莫大的半径的圆，这个结果与惯性定律的陈述是相反的.因此，如果我们要遵循这个定律，我们就只能参照恒星在其中不作圆周运动的坐标系来考察物体的运动.若一坐标系的运动状态使惯性定律对于该坐标系而言是成立的，该坐标系即称为“伽利略坐标系”.伽利略-牛顿力学诸定律只有对于伽利略坐标系来说才能认为是有效的.（摘自《浅说》第 4 节、伽利略坐标系的全文）

在物理学中几乎没有比真空中光的传播定律更简单的定律了，光在真空中沿直线以速度 c=300，000 公里 / 秒传播.无论如何我们非常精确地知道，这个速度对于所有各色光线都是一样的.因为如果不是这样，则当一颗恒星为其邻近的黑暗星体所掩食时，其各色光线的最小发射值就下会同时被看到.荷兰天文学家德西特根据对双星的观察，也以相似的理由指出，光的传播速度不能依赖于发光物体的运动速度.关于光的传播速度与其“在空间中”的方向有关的假定即就其本身而言也是难以成立的.总之，我们可以假定关于光（在真空中）的“速度= c”是恒定的这一简单的定律已有充分的理由为学校里的儿童所确信.谁会想到这个简单的定律竟会使思想周密的物理学家陷入智力上的极大的困难呢？让我们来看看这些困难是怎样产生的.当然我们必须参照一个坐标系来描述光的传播过程.我们再次选取我们的路基作为这种参考系.如果沿着路基发出一道光线，根据上面的论述我们可以看到，这道光线的前端将相对于路基以速度 c 传播，现在我们假定我们的车厢仍然以速度 v 在路轨上行驶，其方向与光线的方向同，不过车厢的速度当然要比光的速度小得多.我们来研究一下这光线相对于车厢的传播速度问题.显然我们在这里可以应用前一节的推论，因为光线在这里就充当了相对于车厢走动的人.人相对于路基的速度 W 在这里由光相对于路基的速度 c 代替.W 是所求的光相对于车厢的速度.我们得到： W=c-v 于是光线相对于车厢的传播速度就出现了小于的情况.…（摘自《浅说》第 7 节、光的传播定律与相对性原理的表面抵触的第一、二、三段）.

每一个运动着的三维坐标系都有各自独立的一个三维空间度量和一维时间度量，构成四维度量.在同一个坐标系里 ，能量的读数是连续变化的.在相对运动着的不同坐标系里 ，各自的四维度量应该是不同的，这也是因为在相对运动着的不同坐标系里，能量的读数是不同的缘故.然而坐标系主要表现为数学的概念，而能量是客观存在的.为了保证坐标系之间能量特征（包括动能和势能的差值等等）的连续性、一致性，坐标系之间的度量必须建立相应的变换关系.

伽里略的时空变换，是这样来认识两个相对运系统中，物质运动变化的时空关系的.在惯性系统中，有两个相对做匀速运动的物理系统 Σ' 和 Σ.在 t=t' =0 时，两个系统重合.当 Σ' 相对 Σ 以速度 V 向 X 方向运动的同时，从原点射出一光信号，光在两个系统中经过时间 t' 和 t 到达同一点 P.对于光从原点到 P 点这个同一事件，伽利略认为时间是相等的，空间是变化了的，空间的变化用速度迭加来处理.

伽利略时空变换如下：



$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad \text{——(1)} \qquad \begin{cases} x = x' + vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad \text{——(2)}$$

[图 1]

（1）式和（2）式，就是伽利略时空变换表达式，伽利略变换对于两个空坐标之间的时空关系的表述是正确的；伽利略变换，对于相对运动系统中，物质运动变化的时空关系就不正确了.研究相对运动系统内物质运动变化的规律，必须用相对论的时空变换来处理，才能得到正确的结果.

4、场概念的兴起

自牛顿时代以来最重要的发明：场，用来描写物理现象最重要的不是带电体，也不是粒子，而是带电体之间与粒子之间的空间中的场，这需要很大的科学想象力才能理解.场的概念已被证明是很成功的，由

这个概念便产生了描写电磁场的结构和支配电和光现象的麦克斯韦方程.相对论加强了场的概念在物理学中的重要性，但是我们还不能建立一种纯粹是场的物理学.直到目前为止，我们仍然需要认定场与实物两者并存.

康德的认识论指出：人不能认知不合乎自己思维模式的知识，这也就是 Einstein 所说的“现象与理论之间没有逻辑桥梁”.

场开始是作为表述粒子间传递作用力的方式而提出的.为了帮助人们形象地理解电力和磁力现象，在一百多年前，法拉第和麦克斯韦想象出场的概念.此后物理学家们一直认为那些力线本质上是虚构的，只是为帮助人们更好地理解自然定律的一种手段.但时至今日,越来越多的物理学家相信,这些场可能是客观存在的,并具有重大的物理意义.Einstein 根据相对论首先提出：围绕在物体或粒子周围空间的各式各样的场应被认为是一种实在的东西.静止电荷周围的空间存在着一种特殊的物质称为电场.在高压输电线附近存在着环绕电线的磁力线和强大的电场，这样的环形磁力线和电场顺着输电线由发电站延伸到变压器.静电荷周围空间存在的静电场被认为是由不能被探测到但却围绕在电荷周围空间的虚光子构成的,电荷间的相互作用力是因为电荷间相互交换虚光子造成的.

Einstein：我一生的主要工作：结合对空间、时间和引力的新认识，创立相对论；提出质能等价定律和统一场论（未完成）；对量子论发展的贡献.1938 年，Einstein：相对论是从场的问题上兴起的.场是从牛顿时代以来最重要的发明.实物可以看作是场特别强的一些区域，因而，场是唯一的实在【1】.

1954 年，Einstein：我认为非常可能，物理学不能建立在场的概念上.如果是这样，那么，我的全部空中楼阁（包括引力理论在内），甚至连其他现代的物理理论也一样，将荡然无存【2】.954 年，Einstein：如果以场作为基本概念的客观描述是不可能的话，那么，就得找到一种完全避免连续统（连同空间和时间）的可能性.但是，这样一种理论中可以使用什么样的基本概念，我没有一丁点主见【3】.

参考文献：

【1】Einstein,英费尔德.物理的进化.上海科学技术出版社，1962.178~181.

【2】许良英等编译.Einstein 文集第三卷.北京：商务印书馆，1979.504.

【3】 1954 年 10 月 28 日 Einstein 致玻姆的信 . 大自然探索：1987 年第一期

5、以太论的复兴

机械振动只有在弹性介质中传播才形成机械波，在弹性介质中应用牛顿定律和胡克定律，即可建立机械波的波动方程，一维横波的波动方程为 $\frac{N}{\rho}\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right)=\left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}\right)$.系数 N/ρ 为横波的波速的平方，即 V=$\sqrt{N/\rho}$，若弹性介质中传播的是纵波，以杨氏模量 E 代替切变模量 N，ρ 为介质密度.

由于机械波只能在介质中传播，因此可以建立介质这一特定惯性系，所表述的波动方程只适用于这一特定惯性系，由介质的弹性模量和密度所决定的波速也是相对于这一特定惯性系的，并且波速于波源的运动状况无关.即波速于与波源相对于介质的运动无关.即波速与波源相对于介质的运动无关.

机械波的波动方程和波速这些性质是否也适用于电磁波(包括光波)呢？电磁波有类似于机械波的波动方程，那么，电磁波的波动方程是相对于什么样的参考系建立的？真空中光速近似为3×10^8m/s,这传播速度是相对于什么参考系的.

1861 年，英国物理学家麦克斯韦总结前人的实验规律基础上，推导真空中电磁波的波动方程，其一维形式的真空波动方程为：$\frac{1}{\varepsilon_0\mu_0}\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}=\frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$ 式中 E 是电场强度，ε_0 是真空介电常数，μ_0 是真空磁导率.以 C^2 代表 $\frac{1}{\varepsilon_0\mu_0}$，则 $C^2=\frac{1}{\varepsilon_0\mu_0}=9\times10^{16}m^2/s^2$ 这 C 恰好就是真空中光速.

1887 年，H. 赫兹从实验上证实了电磁波的存在，并将电磁现象与光统一起来.但是电磁波的波动方程是根据麦克斯韦的真空形式，在导出真空电磁波波动方程之始，人们就没有找到合适的参考系，而不像机械波的波动方程导出中需要用到依赖于介质的胡克定律. 这是一个既重要，在当时又是使人十分困惑的问题，而牛顿力学的成功及其在当时物理学所处的支配地位，以及对机械波所采取的合理解释，都促使人们去构思和寻求一个适用于电磁波波动方程的特定惯性系.于是人们假定真空中充满被称为以太（ether）的介质，一维形式的在真空波动方程及真空中光速是在以太这一特定惯性而言的.

由波动学可知波的传播速度 u 为：$u=\sqrt{\frac{G}{\rho}}$ 或 $u=\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 或 $u=\sqrt{\frac{K}{\rho}}$，其中，G 为固体的切变模量，E 为固体的弹性模量，K 为液体或气体的体积模量，ρ 为媒质的密度.

总之，不管波是在固体还是在液体中传播，波的传播速度都与媒质模量的二分之一次方成正比，都与媒质密度的二分之一次方成反比. 根据麦克斯韦的电磁场理论，光速 $c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$，光速应该是随着介电常数 ε 和磁导率 μ 变化的变量.

19 世纪，以太论获得复兴和发展，这首先还是从光学开始的，主要是托马斯·杨和菲涅耳工作的结果. 杨用光波的干涉解释了牛顿环，并在实验的启示下，于 1817 年提出光波为横波的新观点，解决了波动说长期不能解释光的偏振现象的困难. 以太这一假定是出于以机械波的模式来理解电磁波，可是，由于光速比机械波在介质中的传播速度要大得多，因此，以太就必须有非常大的弹性模量和非常稀薄的质量密度（$\nu=\sqrt{N/\rho}$）而且还必须是透明的等等特征. 尽管必须赋予以太这些难以捉摸的属性，但是它处在光速所相对的参考系这一重要概念环节上，而被人们作为不可缺少的概念接受下来了. 进一步的问题便是从相对于以太运动的物体上（例如地球）作光速测量，从测量结果与真空中光速数值相比较，以间接证实以太的存在.

菲涅耳用被动说成功地解释了光的衍射现象，他提出的理论方法(现常称为惠更斯-菲涅耳原理)能正确地计算出衍射图样，并能解释光的直线传播现象. 菲涅耳又进一步解释了光的双折射，获得很大成功. 1823 年，他根据杨的光波为横波的学说，和他自己在 1818 年提出的：透明物质中以太密度与其折射率二次方成正比的假定，在一定的边界条件下，推出关于反射光和折射光振幅的著名公式，它很好地说明了布儒斯特数年前从实验上测得的结果. 菲涅耳关于以太的一个重要理论工作是导出光在相对于以太参照系运动的透明物体中的速度公式. 1818 年他为了解释阿拉果关于星光折射行为的实验，在杨的想法基础上提出：透明物质中以太的密度与该物质的折射率二次方成正比，他还假定当一个物体相对以太参照系运动时，其内部的以太只是超过真空的那一部分被物体带动(以太部分曳引假说). 利用菲涅耳的理论，很容易就能得到运动物体内光的速度.

19 世纪中期，曾进行了一些实验，以求显示地球相对以太参照系运动所引起的效应，并由此测定地球相对以太参照系的速度，但都得出否定的结果. 这些实验结果可从菲涅耳理论得到解释，根据菲涅耳运动媒质中的光速公式，当实验精度只达到一定的量级时，地球相对以太参照系的速度在这些实验中不会表现出来，而当时的实验都未达到此精度. 在杨和菲涅耳的工作之后，光的波动说就在物理学中确立了它的地位. 随后，以太在电磁学中也获得了地位，这主要是由于法拉第和麦克斯韦的贡献.

在法拉第心目中，作用是逐步传过去的看法有着十分牢固的地位，他引入了力线来描述磁作用和电作用. 在他看来，力线是现实的存在，空间被力线充满着，而光和热可能就是力线的横振动. 他曾提出用力线来代替以太，并认为物质原子可能就是聚集在某个点状中心附近的力线场. 他在 1851 年又写道：“如果接受光以太的存在，那么它可能是力线的荷载物.”但法拉第的观点并未为当时的理论物理学家们所接受． 到 19 世纪 60 年代前期，麦克斯韦提出位移电流的概念，并在提出用一组微分方程来描述电磁场的普遍规律，这组方程以后被称为麦克斯韦方程组. 根据麦克斯韦方程组，可以推出电磁场的扰动以波的形式传播，以及电磁波在空气中的速度为每秒 31 万公里，这与当时已知的空气中的光速每秒 31.5 万公里在实验误差范围内是一致的． 麦克斯韦在指出电磁扰动的传播与光传播的相似之后写道:“光就是产生电磁现象的媒质(指以太)的横振动”. 后来，赫兹用实验方法证实了电磁波的存在. 光的电磁理论成功地解释了光波的性质，这样以太不仅在电磁学中取得了地位，而且电磁以太同光以太也统一了起来.

麦克斯韦还设想用以太的力学运动来解释电磁现象，他在 1855 年的论文中，把磁感应强度比做以太的速度. 后来他接受了汤姆孙(即开尔文)的看法，改成磁场代表转动而电场代表平动． 他认为，以太绕磁力线转动形成一个个涡元，在相邻的涡元之间有一层电荷粒子. 他并假定，当这些粒子偏离它们的平衡位置即有一位移时，就会对涡元内物质产生一作用力引起涡元的变形，这就代表静电现象.

关于电场同位移有某种对应，并不是完全新的想法，汤姆孙就曾把电场比作以太的位移. 另外，法拉第在更早就提出，当绝缘物质放在电场中时，其中的电荷将发生位移. 麦克斯韦与法拉第不同之处在于，他认为不论有无绝缘物质存在，只要有电场就有以太电荷粒子的位移，位移的大小与电场强度成正比. 当电荷粒子的位移随时间变化时，将形成电流，这就是他所谓的位移电流. 对麦克斯韦来说，位移电流是真实的电流，

而现在我们知道，只是其中的一部分(极化电流)才是真实的电流. 在这一时期还曾建立了其他一些以太模型，不过以太论也遇到一些问题. 首先，若光波为横波，则以太应为有弹性的固体媒质. 那么为何天体运行其中会不受阻力呢？有人提出了一种解释：以太可能是一种像蜡或沥青样的塑性物质，对于光那样快的振动，它具有足够的弹性像是固体，而对于像天体那样慢的运动则像流体. 另外，弹性媒质中除横波外一般还应有纵波，但实验却表明没有纵光波，如何消除以太的纵波，以及如何得出推导反射强度公式所需要的边界条件是各种以太模型长期争论的难题.

为了适应光学的需要，人们对以太假设一些非常的属性，如 1839 年麦克可拉模型和柯西模型. 再有，由于对不同的光频率，折射率也不同，于是曳引系数对于不同频率亦将不同. 这样，每种频率的光将不得不有自己的以太等等. 以太的这些似乎相互矛盾性质实在是超出了人们的理解能力. 19 世纪 90 年代，洛伦兹提出了新的概念，他把物质的电磁性质归之于其中同原子相联系的电子的效应. 至于物质中的以太，则同真空中的以太在密度和弹性上都并无区别. 他还假定，物体运动时并不带动其中的以太运动. 但是，由于物体中的电子随物体运动时，不仅要受到电场的作用力，还要受到磁场的作用力，以及物体运动时其中将出现电介质运动电流，运动物质中的电磁波速度与静止物质中的并不相同.

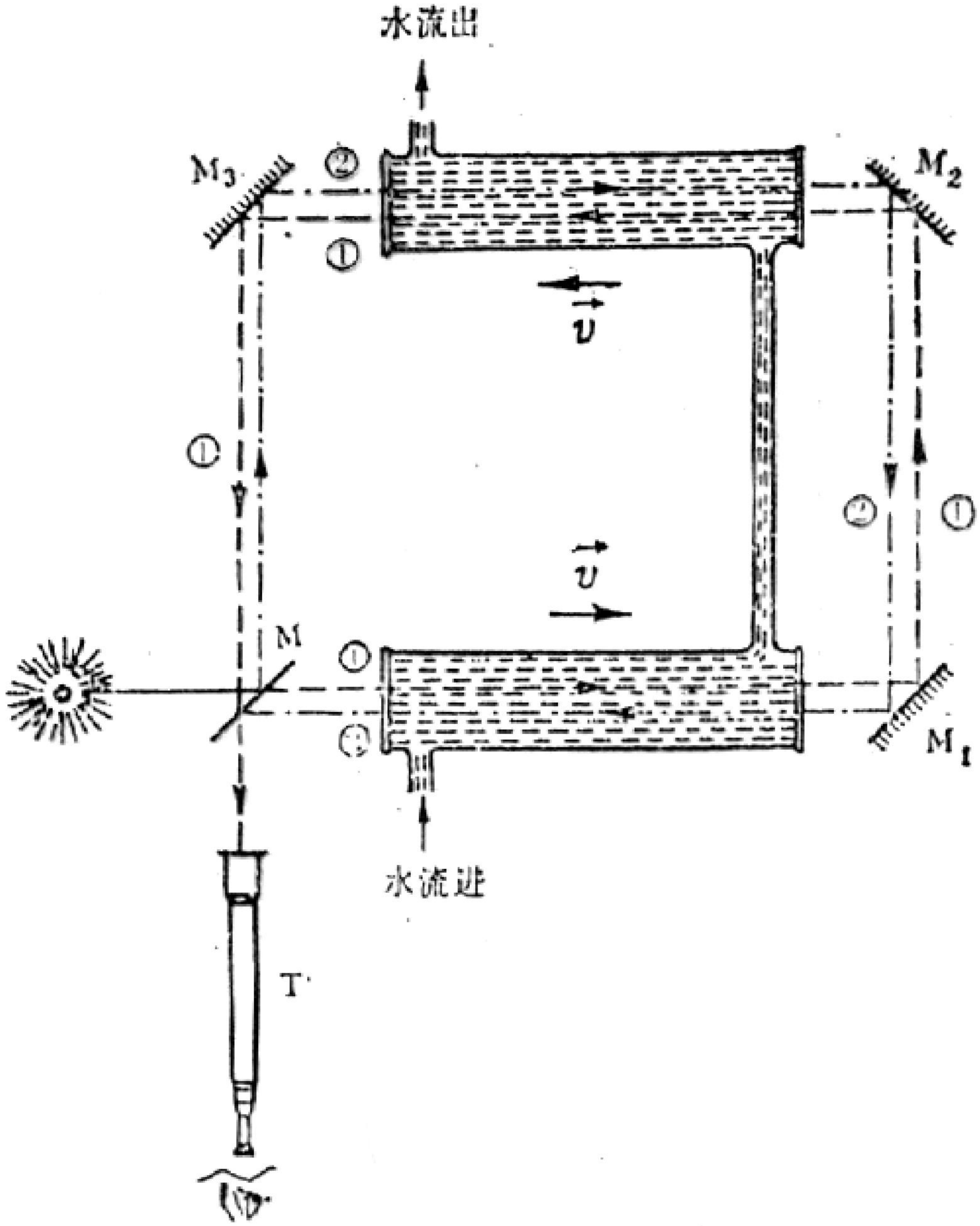
在考虑了上述效应后，洛伦兹同样推出了菲涅耳关于运动物质中的光速公式，而菲涅耳理论所遇到的困难(不同频率的光有不同的以太)已不存在. 洛伦兹根据束缚电子的强迫振动，可推出折射率随频率的变化. 洛伦兹的上述理论被称为电子论，它获得了很大成功.

1879 年，麦克斯韦提出借助于木星卫星蚀来判明整个太阳系相对于以太运动的思想. 太阳和整个太阳系一起在某个方向上运动. 在此路径上当木星处于太阳之前的时候由于木星绕太阳旋转需时为地面上的二十年，这样在地面一年期间其位置变化较小. 在一年中木星移动了三十度. 总之，在其宇宙的运动中是处于太阳的前面. 同时，在一年期间地球转了整整一圈，这样，在此一年期间内就像辽密尔所做的那样，能够求得为使光线通过达到地球的距离恰好是地球轨道半径所必须的时间间隔之差. 六年之后，木星在其宇宙的轨道中已处于地球的后面，这时就可以确定其卫星蚀的提前或落后. 如果太阳系在其宇宙的运动中不拖带以太，那么就可以通过比较第一种情况和第二种情况的量来确定其相对于以太的运动. 在第一次观察时，木星和它的卫星是位于太阳之前，这样，光就迎着其宇宙运动传播，并且其速度应是以太的光速加上太阳系相对于以太的速度. 在第二次情况下，相对于太阳系的光速应等于上述速度之差. 但是，只有当经过六年的天文观测查明木星卫星蚀的推迟有周期性差值时，这些计算才可证明太阳系的绝对运动. 事实是天文观测仍未发现这种周期性的变化. 这样，观测木星卫星蚀的推迟也没有提供太阳系的绝对运动的任何一种证据.

费涅尔理论曾断言：以太部分地被运动物体所拖曳. 费涅尔本人这时就是以被确定的以太结构的概念为出发点的. 以太在宇宙空间的密度等于某个恒定的数值. 处于物体中以太的密度则是另一种数值. 当物体运动时，分布于物体前面的以太进入此物体. 并且在它里面获得新的，更高的密度，这种被浓集的以太以另外的速度相对于物体运动. 在物体中以太的密度和它的速度之间存在着某个确定的关系. 费涅尔把这个关系算出来了. 这就是折射系数. 换言之，就是真空中的光速和它在物质中的传播速度之比永远等于在物体中以太浓集度的平方根，也就是等于在物体中以太的密度和宇宙中自由以太密度之比的平方根. 这样，费涅尔就给出了拖曳系数的力学解释. 即此系数相当于以太在物体中的浓集度.

企图发现物体相对于以太运动的牛顿促进了另一种假说，即完全拖曳以太的假说. 1845 年，斯托克斯假定以太完全参与物体的运动，其结果就是光学现象的相对原理. 在运动的介质中，比如，在地球表面上，光学现象就象在静止的介质中一样以相同的形式发生. 为了解释宇宙空间中以太的静止性和在物体中以太的运动，这就使得斯托克斯详细制定了以太的复杂的假说. 正如日后证实的那样，这个概念是同力学的基本规律相抵触. 与此同时， 以太只是部分被运动物体所拖曳的实验也做出来了.

1851 年，菲索设计了一个干涉仪，一对光线通过有水流的管子，一束光迎着水流进行，另一束顺着水流. 若是水自已拖曳以太，其结果将是干涉条纹有确定的移动. 事实上观察到了某些移动，然而它并没有同完全拖曳的假说相对应. 在算出了相应于被观察到的条纹的拖曳系数之后，菲索得到相应于费涅尔拖曳公式的数值. 斐索水流实验.



以太被水流部分拖拽.

爱因斯坦评价说："麦克斯韦和他的后继者都没有给以太想出一种机械模型，为麦克斯韦电磁场定律提供一种令人满意的力学解释.这些定律既清楚又简单，而那些力学解释却既笨拙又充满矛盾."

6、光速的测量

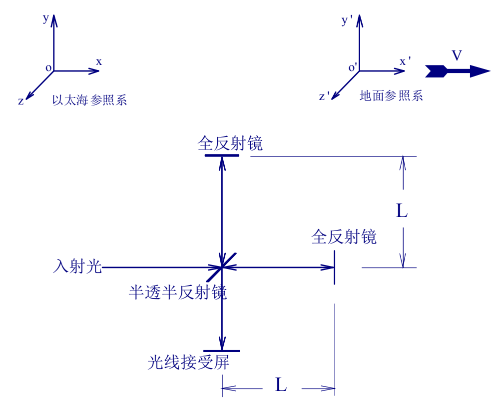
光波或电磁波在真空或介质中的传播速度,光速的测定在光学的发展史上具有非常特殊而重要的意义.它不仅推动了光学实验的发展,也打破了光速无限的传统观念；虽然从人们设法测量光速到人们测量出较为精确的光速共经历了三百多年的时间，但在这期间每一点进步都促进了几何光学和物理光学的发展，尤其是在微粒说与波动说的争论中，光速的测定曾给这一场著名的科学争辩提供了非常重要的依据，最终推动了相对论理论的发展.根据现代物理学，所有电磁波，包括可见光，在真空中的速度是常数，即是光速.强相互作用、电磁作用、弱相互作用传播的速度都是光速，根据广义相对论，万有引力传播的速度也是光速，且已于 2003 年得以证实.

在光速的问题上物理学界曾经产生过争执，开

普勒和笛卡尔都认为光的传播不需要时间，是在瞬时进行的. 但伽利略认为光速虽然传播得很快，但却是可以测定的. 1607 年，伽利略进行了最早的测量光速的实验. 伽利略的方法是，让两个人分别站在相距一英里的两座山上，每个人拿一个灯，第一个人先举起灯，当第二个人看到第一个人的灯时立即举起自己的灯，从第一个人举起灯到他看到第二个人的灯的时间间隔就是光传播两英里的时间. 但由于光速传播的速度实在是太快了，这种方法根本行不通. 但伽利略的实验揭开了人类历史上对光速进行研究的序幕. 1676 年罗麦发现木星卫星公转的周期不是不变的. 当地球在绕日运行的轨道上离开木星时周期略长；当地球接近木星时周期略短. 这一事实表明光不是瞬时传播的.

1676 年，丹麦天文学家罗麦第一次提出了有效的光速测量方法. 他在观测木星的卫星的隐食周期时发现：在一年的不同时期，它们的周期有所不同；在地球处于太阳和木星之间时的周期与太阳处于地球和木星之间时的周期相差十四五天. 他认为这种现象是由于光具有速度造成的，而且他还推断出光跨越地球轨道所需要的时间是 22 分钟. 1676 年 9 月，罗麦预言预计 11 月 9 日上午 5 点 25 分 45 秒发生的木卫食将推迟 10 分钟. 巴黎天文台的科学家们怀着将信将疑的态度，观测并最终证实了罗麦的预言. 罗麦的理论没有马上被法国科学院接受，但得到了著名科学家惠更斯的赞同. 惠更斯根据他提出的数据和地球的半径第一次计算出了光的传播速度：214000 千米/秒. 虽然这个数值与目前测得的最精确的数据相差甚远，但他启发了惠更斯对波动说的研究；更重要的是这个结果的错误不在于方法的错误，只是源于罗麦对光跨越地球的时间的错误推测，现代用罗麦的方法经过各种校正后得出的结果是 298000 千米/秒，很接近于现代实验室所测定的精确数值.

十八世纪，科学界是沉闷的，光学的发展几乎处于停滞的状态. 继布莱德雷之后，经过一个多世纪的酝酿，到了十九世纪中期，才出现了新的科学家和新的方法来测量光速. 1849 年，法国人菲索第一次在地面上设计实验装置来测定光速. 他的方法原理与伽利略的相类似. 他将一个点光源放在透镜的焦点处，在透镜与光源之间放一个齿轮，在透镜的另一测较远处依次放置另一个透镜和一个平面镜，平面镜位于第二个透镜的焦点处. 点光源发出的光经过齿轮和透镜后变成平行光，平行光经过第二个透镜后又在平面镜上聚于一点，在平面镜上反射后按原路返回. 由于齿轮有齿隙和齿，当光通过齿隙时观察者就可以看到返回的光，当光恰好遇到齿时就会被遮住. 从开始到返回的光第一次消失的时间就是光往返一次所用的时间，根据齿轮的转速，这个时间不难求出. 通过这种方法，菲索测得的光速是 315000 千米/秒. 由于齿轮有一定的宽度，用这种方法很难精确的测出光速. 1850 年，法国物理学家傅科改进了菲索的方法，他只用一个透镜、一面旋转的平面镜和一个凹面镜. 平行光通过旋转的平面镜汇聚到凹面镜的圆心上，同样用平面镜的转速可以求出时间. 傅科用这种方法测出的光速是 298000 千米/秒. 另外傅科还测出了光在水中的传播速度，通过与光在空气中传播速度的比较，他测出了光由空气中射入水中的折射率. 这个实验在微粒说已被波动说推翻之后，又一次对微粒说做出了判决，给光的微粒理论带了最后的冲击.



1928 年，卡娄拉斯和米太斯塔德首先提出利用克尔盒法来测定光速.1951 年，贝奇斯传德用这种方法测出的光速是 299793 千米/秒.光波是电磁波谱中的一小部分，当代人们对电磁波谱中的每一种电磁波都进行了精密的测量.1950 年，艾森提出了用空腔共振法来测量光速.这种方法的原理是，微波通过空腔时当它的频率为某一值时发生共振.根据空腔的长度可以求出共振腔的波长，在把共振腔的波长换算成光在真空中的波长，由波长和频率可计算出光速.当代计算出的最精确的光速都是通过波长和频率求得的.1958 年，弗鲁姆求出光速的精确值：299792.5±0.1 千米/秒.1972 年，埃文森测得了目前真空中光速的最佳数值：299792457.4±0.1 米/秒. 光速的测定在光学的研究历程中有着重要的意义. 虽然从人们设法测量光速到人们测量出较为精确的光速共经历了三百多年的时间，但在这期间每一点进步都促进了几何光学和物理光学的发展，尤其是在微粒说与波动说的争论中，光速的测定曾给这一场著名的科学争辩提供了非常重要的依据.

7、迈克尔逊实验

（1）麦克尔逊 1881 年的干涉实验：1881 年，麦克尔逊专门设计了一个被后人命名为“麦克尔逊干涉实验”的光学实验来检验这个假说是否正确.

根据矢量合成法则，如果光线确实是在与绝对空间保持绝对静止状态的“以太”海中以恒定不变的速度进行传播，在相对于“以太”海以速度 V 运动的地面参照系中，光线在纵向光路前进的速度等于 $\sqrt{C^2-V^2}$ ，在横向光路上向右前进的速度为 C－V，经镜面反射后返回向左前进的速度为 C＋V. 这样，两束相干光在纵向光路上与横向光路上走过的时间之差将等于：

$$\Delta T = \frac{2L}{\sqrt{C^2-V^2}} - \left(\frac{L}{C+V} + \frac{L}{C-V}\right)$$

$$= \frac{2L}{\sqrt{C^2-V^2}} - \frac{2LC}{C^2-V^2}$$

$$= \frac{2L}{\sqrt{C^2-V^2}}\left(1 - \frac{C}{\sqrt{C^2-V^2}}\right)$$

当人们在水平地面上把麦克尔逊干涉仪转动 90 度时，先前的纵向光路和横向光路正好对调，麦克尔逊干涉仪在转动 90 度的前后两种状态下，两束相干光在互相垂直的光路上走过的时间之差刚好相反，总差值为 2 倍的 ΔT. 这样，人们从光线接受屏上就应该看到由传播方向互相垂直的两路相干光所形成的干涉条纹将发生移动，但实验的结果是没有发现干涉条纹有任何移动.

（2）、迈克尔逊 1913 年的实验

这个实验采用了如图 1 的装置，光线 *A* 镜时，分为两支. 一支是 *A>B>C>D>E>A*，另一支是 *A>E>D>C>B>A*， *C* 和 *E* 是旋转的镜子，*A* 是一个半透射镜，*B* 和 *D* 是反射镜，按照迈克尔逊的分析，这两支光线的时间差是

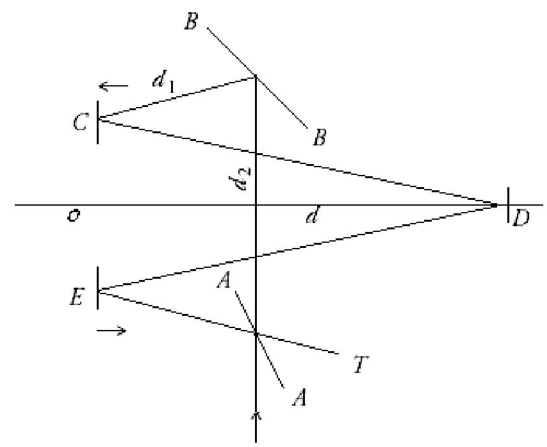


图 1

$T_1 - T_2 = (4d/\lambda)(2-r)(v/V)$ --(10)

式中各符号的意义：

V 未反射前的光速（原文用的符号）；

v 旋转反射镜的线速度；

d *o* D 的距离；

r = 2 对应弹性碰撞理论；

r = 1 对应反射镜为新光源的理论；

r = 0 对应光速与源速无关的理论.

他所采用的实验装置， *d* = 600 厘米，旋转镜的中心距 *l* = 26.5 厘米，碳弧光源. 取光平均波长 λ = 0.60$^{\mu}$. 在他的报告中，给出了 1000 转/分条件下的实验数据，列入下表：

	1	2	3	4	5	6	7	
Δ	3.8	3.1	3.2	4.3	3.0	3.93	3.83	3.81 = 考虑权重后的平均值
权重	1	1	1	2	2	3	4	3.76 = 计算位移（ *v* = 0）

这里 *Δ* 是干涉条纹的位移.

根据（10）式，得出以下结果

$r = 0$ $\Delta = 8(dr/\lambda V) =$ 3.76--- （11）

$r = 1$ $\Delta = 4(dr/\lambda V) =$ 1.88--- （12）

$r = 2$ $\Delta = 0$ ------- （13）

因为实验结果和（11）式比较接近，所以迈克尔逊认为，该实验证明了光速与源速无关.

表 2.2 光速与光源运动的无关性实验

研究者	方法	光源速度（以 c 为单位）	结果
de Sitter (1913) Zurhellen (1914)	双星观测		$k<10^{-6}$
Heckmann (1960)	河外星系的较差光行差	$\sim10^{-3}$	零结果
Tolman (1910)	洛埃干涉仪（以太阳边缘作为光源）	$\sim10^{-5}$	零结果
Majorana (1919); Tomaschek (1924)	迈克尔逊干涉仪（以水银灯、恒星、太阳或月亮等作光源）	$\sim10^{-7}$ -10^{-4}	零结果
Бонч-Бруевич (1960)	相角调制	$\sim10^{-5}$	$k=0.02\pm0.07$
Beckmann 和 Madics (1965)	洛埃干涉仪（运动反射镜作光源）	1.52×10^{-7}	$k\lesssim0.05$
Kantor (1962)	干涉仪（其中有运动的玻璃片）	1.56×10^{-7}	$k=0.67$
James 和 Sternberg (1963)	观察垂直通过运动玻璃板的光线产生的偏离		$k\leqslant0.025$
Rotz (1963)	三光束干涉仪	2×10^{-7}	$k\leqslant0.1$
Babcock 和 Bergman (1964)	干涉仪（其中有运动的玻璃片）	1.25×10^{-7}	$k\leqslant0.01$
Beckmann 和 Mandics (1964)	干涉仪（其中有运动的玻璃片）		$k\leqslant0.1$
Waddoups 等 (1965)	干涉仪（其中有运动的云母片）		$k\leqslant0.14$
Sadeh (1963)	飞行时间（符合观测正负电子湮灭产生的两 γ 光子）	0.5	$k\leqslant0.3$
Alväger 等 (1963, 1964)	飞行时间（比较 C^{12*} 和 O^{16*} 的 γ 辐射速度）	0.03	$k\leqslant0.1$
Fillippas 和 Fox (1964)	飞行时间（符合观测飞行 π^0 介子衰变的两 γ 光子）	0.2	$k\leqslant0.4$
Alväger 等 (1964, 1966)	飞行时间（测量飞行 π^0 介子衰变的 γ 光子的速度）	0.99975	$k\leqslant10^{-4}$

注：表 2.2 中的 k 由方程 (2.8) 定义：$c'=c\pm kv$。

在 1903 年，特鲁顿——诺贝利用一个可自由转动的定向充电平板电容器做过检测地球相对以太空间绝对运动速度的实验.人们普遍认为，如果地球有相对“以太”的运动，带有异号电荷两极板电容器就应有趋向于平行运动方向上的转动.

同物质粒子没有任何相互作用的“以太”粒子与绝对空间保持着绝对静止状态的假说本来已经很牵强，原先以为光线是在这种“以太”海中以恒定不变的速度进行传播的设想又遭到了实验的否定，人们只能判定：在宇宙空间并不存在与物质粒子没有任何相互作用的“以太”粒子.

对于这个结论，19 世纪末的物理学家并不是马上都能够接受.Lorentz 在当时就提出了一个物质分子力“收缩假说”，他认为在横向光路上，由于迈克尔逊干涉仪以速度 V 相对于“以太”海运动，物体在这个方向上将发生分子力收缩，克尔逊干涉仪的横向臂长将按照 1 ：$\sqrt{1-V^2/C^2}$ 的比例缩短.于是，两束相干光在纵向光路上与横向光路上走过的时间之差修正为：

$$\Delta T = \frac{2L_{纵}}{\sqrt{C^2-V^2}} - \frac{2L_{横}C}{C^2-V^2}$$

$$= \frac{2L}{\sqrt{C^2-V^2}}\left(1-\frac{C}{\sqrt{C^2-V^2}}\sqrt{1-V^2/C^2}\right) = 0$$

这样，麦克尔逊干涉仪在转动 90 度的过程中，干涉条纹不发生移动的现象似乎就得到了理论上的解释.中国学者证实光速在 10^{-19} 精度上无方向差异.扮演无限大速度的角色，就要具备无限大速度的性质，因此有检验真空光速不变的方程【1】

$$c' = c \pm KV \qquad (4)$$

其中 c 是光源静止时的光速，c'是相对于观察者以速度±V 运动的光源发射的光信号的速度，K 是由实验确定的参数.K=0 是相对论期望的结果，K=1 是发射理论（弹道假说）的情况.

文献【2】收入的 16 例实验结果为：有 3 例 K=0，其余 13 例 K 值在 10^{-6}—0.67 之间，实验并没有真正证实 K=0，但相对论支持者们认为 K=0.

参考文献：

【1】张元仲，狭义相对论实验基础，北京：科学出版社，1979 年，56.
【2】G.van Bieshroeck,1932,*Astrophys.*,75,64.

12/21/2014