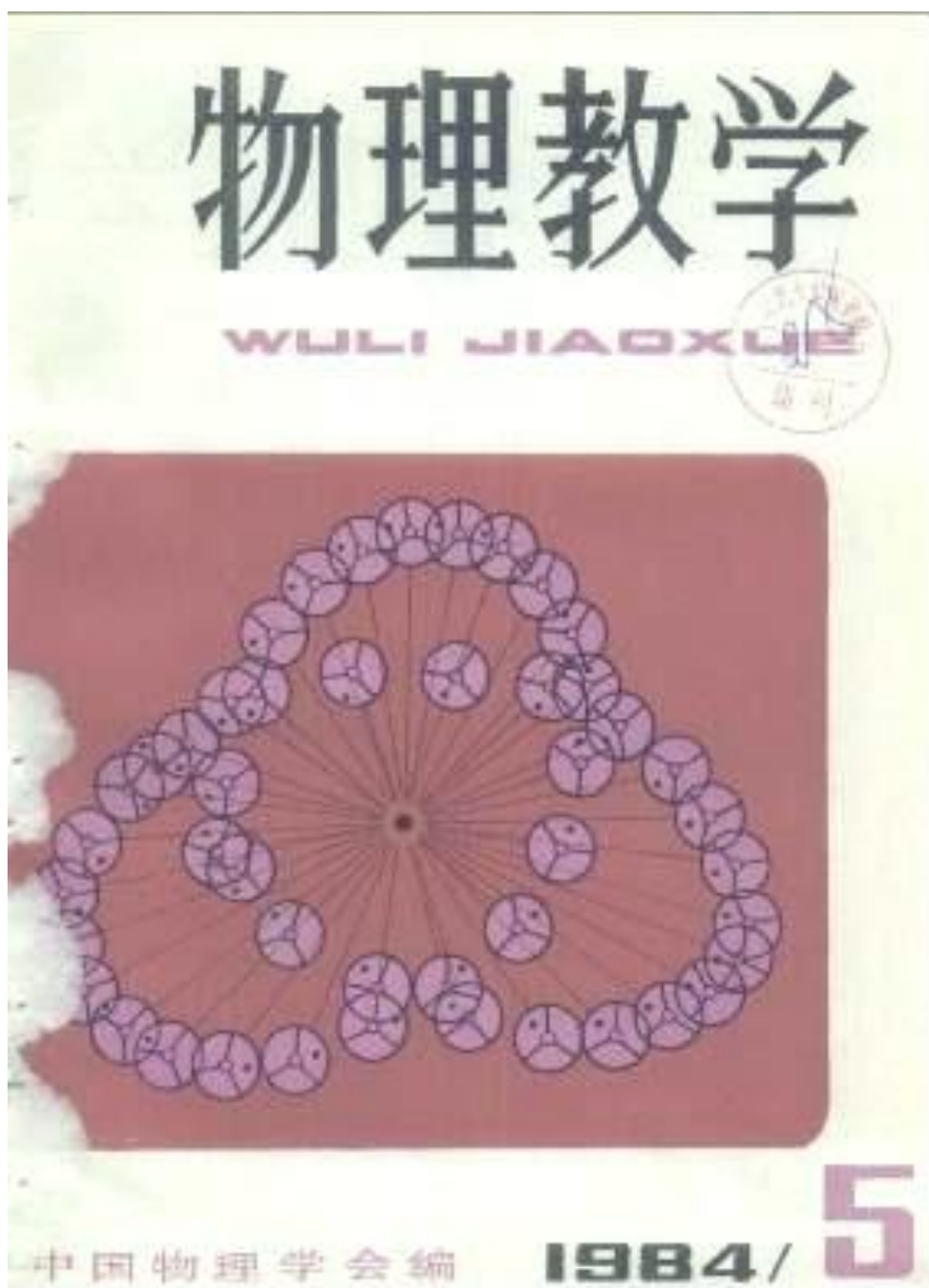


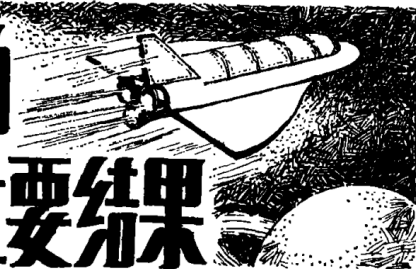
张元仲先生 38 年谈论同时相对性的一篇小论文及其赏析

解说者注：我们 20 郎当的时候，独立、叛逆、向学、成长。吸吮性的学习，激荡了青春也膨胀了时代。1980 年代前后几年，大师们在前台以平和的语气写“小论文”。这些文章深刻、理性、系统，具有长久的说服力。张元仲先生 1984 年写给中学生写的一篇文章，就是这种“小论文”。近 40 年来，这篇文章只有一次引用，也就是几乎没有人注意。但是，38 年来很多关于相对论的和麦克斯韦方程的研究和讨论，深度尚不能和这篇论文相比拟。文章的关键词是“同时”或者“同时相对性”，出现了 24 次，无非极言“同时相对性”是狭义相对论的核心。2005 年，杨振宁先生的名篇《爱因斯坦：机遇与眼光》也认为同时相对性才是狭义相对论的灵魂：“正是 26 岁的爱因斯坦敢于质疑人类关于时间的原始观念，坚持同时性是相对的，才能从而打开了通向微观世界的新物理之门。”本文将介绍并赏析张元仲先生 1984 的这篇“小论文”。

张元仲，关于狭义相对论的基本假设和主要结果，物理教学，1984 年第 5 期第 1-3 页。



关于狭义相对论的 基本假设和主要结果



中国科学院理论物理研究所 张元仲

第一自然段是引言，不录。下面是第二自然段。

首先,我们需要承认下面的一些前提:存在惯性观察者(或说惯性参考系),存在标准的时钟和刚性尺子。惯性观察者使用标准时钟和标准尺子测量物理事件的时空位置,建立起时间和空间坐标。不同的观察者(即相互作用匀速直线运动的参考系)测量同样的物理事件建立起各自的时空坐标。狭义相对论中的坐标变换(洛伦兹变换),正是在这些不同的惯性系的时空坐标之间建立起了联系。为了建立这种联系,需要引入二个必要的假说——相对性原理和光速不变原理。

赏析:在时空中发现了两个事件或曰一对事件,不同的观测者都声称记录到了一对事件。由于这些观测者的相对运动状态不同,记录的时空间隔不同,例如一个的记录是 $(\Delta x, \Delta t)$,另外一个的记录是 $(\Delta x', \Delta t')$ 。洛伦兹变换的意义是,如果这两个不同的记录满足洛伦兹变换,则,这两个人记录的是同一对事件。

第三自然段抄录了光速不变原理的内容。

光速不变原理是说:光在真空中总是以恒定不变的速度传播着,这个速度的大小与光源的运动状态无关。

第四自然段是文章的核心。

引进光速不变原理的目的,在于定义不同地点的时钟的同时性。时间是物理学中最基本的测量量之一。惯性观察者仅仅有了时钟是不够的,因为这些个别的时钟放置在空间的各个地点只能孤立地记录(定义)当地的时间,不把这些放置在各地的时钟进行同步,就无法比较发生在各地的不同事件之间的先后次序。怎样调节各地的时钟的指针使它们同步起来呢?这需要有一种在它们之间建立起联系的媒介。回忆一下牛顿经典力学。在那里,或者假定钟的移动对钟的速率不产生影响,因而可以通过一只移动的标准钟把各地的时钟对准;或者假定存在瞬时传播(传播速度为无限大)的信号,各地的钟用这种信号进行较准(绝对同时)。但是,人们并没有找到这种信号。实际使用的仍然是光信号。把光传播的极高速度近似看成无限大,这样做对研究低速运动的现象并不会带来可观测的影响,这是因为测量仪器不是绝对精确的。所以,惯性观察者只有时钟和尺子是不充分的,还必须把不同地点的时钟进行校准。牛顿力学隐含了这个问题:狭义相对论则把这个问题提到了至关重要的位置上。如何来校准不同地点的时钟呢?所谓“对钟”,就是定义同时性。如果采用光信号(至今还找不到能代替光信号的媒介物)对钟,就必须事先知道光信号的传播速度。可是如何才能事先知道光的传播速度呢?如果观察者用实验去测量它就必须事先把各地的钟对准。这样就陷入了循环:对准时钟需要先知道光速,测量光速又需要先对准时钟。所以,单向光速(指在同一个参考系内光沿任意方向传播的速度)的不变性是无法用现有的实验手段作出判断的。因此,光速不变原理包含有科学假设,它并非是经验的总结。做这种假设的目的,只在于定义同时性。除了单向光速不变性的问题外,其他的内容,例如往返平均光速的不变性、光速与光源运动的无关性、不同惯性系中光速的相等性等问题,是可以实验检验的。总之,凡是只需要一只钟来测量的物理量,就可以用实验测量。几十年来,各种类型的实验结果与光速不变原理是相容的。这些结果已包含在《狭义相对论实验基础》的书中,近来并没有很多新的实验。

赏析:今天还有一些物理学者,依然对“同时相对性”的革命性没有感觉,不清楚当年“同时相对性”是颠覆牛顿绝对时空的“窄门”。

张先生的这一段讲解了同时相对性和时空一体之间的关系,为什么从这里才能摆脱牛顿的绝对时空观念。当年,击穿了我心脏的不是同时相对性,而是使我理解了什么是“科学假设”。科学假设不是经验的总结,而是人类的理性对困境的摆脱。用光信号对钟必须知道光信号的传播速度,可是知道光的传播速度需要把各地的钟对准,这样就陷入了逻辑循环!如何斩断逻辑循环?引入基本假设!即引入单向光速的不变性!我需要深刻理解同时相对性的时候,已经湖南大学副教授,需要对本科生解答“双生子佯谬”的时候了。

2005年,杨振宁先生考察了狭义相对论的发展历史,考察对相对论有贡献的巨人们,结论是:“洛伦兹有数学,但没有物理学;庞加莱有哲学,但也没有物理学。正是26岁的爱因斯坦敢于质疑人类关于时间的原始观念,坚持同时性是相对的,才能从而打开了通向微观世界的新物理之门。”(杨振宁,第22届国际科学史大会大会报告,2005年7月,北京。发表于《科学文化评论》2005年第4期第10-16页)2005年12月,杨先生在香港中文大学也以同样的题目做了一场演讲,听到杨先生有言及此,感同身受,几乎颤栗。

第五自然段是光速不变性的实验检验。

上面已经谈到，除了单向光速的不变性不能用实验检验外，其他诸如平均回路光速的不变性、光速与光源运动的无关性以及光速与光的能量的无关性等方面，都已被大量的实验所证实。这些实验结果，明显地与经典力学中的速度相加公式相抵触。在这种矛盾面前，是放弃经典的速度相加定理还是放弃相对论？或者两者是否都可以不要？显然，经典速度相加定理与光速的实验矛盾，因而应当对它进行修改。但是，光速不变原理的引入目的在于定义同时性。如果不要光速不变原理，就必须找到另外一种用来定义同时性的信号和方法。而且，这种新的方法不能与光速不变原理中已经被实验证明了的内容相抵触。然而，在实践中并没有找到这种新方法。既然不能放弃光速不变原理，那末能不能对它进行修改呢？这个问题的回答也是清楚的：要修改它，只能修改那些没有或不能被实验证明的部分，这部分就是单向光速的不变性。长期以来，特别是六十年代以来，人们从理论上分析过这种可能性，得到的结论是：在保持平均回路光速不变的前提下，可以假定单向光速可变；作这种修改所得的结果对于可观察的效应而言与狭义相对论的结果没有差别；也就是说，如果在实践中仍用光信号对钟，那么光速的这种单向性就不可能测得出来。既然如此，就没有理由不采用最简单的假设——单向光速不变性。至此，我们可以这样说，要想放弃光速不变原理除非在实验上发现回路光速不变性或光速与光源运动的无关性不真实。

赏析：光速不变原理是基本原理，而基本原理不能直接实验检验。能测量的无非间接后果。这一点也明显地包含在爱因斯坦 1905 年的原文中。光速不变原理的基本性是单向光速的不可直接检验性。

第六自然段讨论相对性原理。

狭义相对论的另一个假设是相对性原理：一切物理定律在相对作匀速直线运动的所有惯性系中都具有相同的形式。将这个原理与经典物理学中的力学相对性原理进行比较，可以看出两者并没有本质的差别。狭义相对性原理不过是力学相对性原理的推广。它们的本质是一样的；用简单的语言说，就是不存在绝对运动。因此，检验相对性原理最重要的是测量绝对运动的效应。“以太”的引入为绝对运动找到了基础。但是“以太”的概念随着物理学的发展在不断地改变着形式。为适合实验结果，以太被赋予了許多奇特的物理性质：它无所不在；任何有质物体在其中运动并不受到阻力，而且物体内部可以部分地带走它；在以太中运动的时钟要变慢；运动的尺子要缩短；如此等等。但是，为测量以太的存在所设计的各种实验都没有得到正确的结果。到头来，这些实验却都成了相对性原理和光速不变原理的实验证据。回顾历史，我们当然要问：以太的引入给物理学的发展带来了什么作用呢？爱因斯坦抛弃了以太，建立了相对论。这对物理学的进展所起的巨大作用是人所共知的：没有相对论，就不会有相对论量子力学，不会有量子电动力学，不会有量子场论和各种基本粒子的理论，也不会有其他的（诸如在天体物理学中的）重要应用。物理学不是纯粹的概念的集合，而是物理概念加方程式。因此，要想用以太去反驳相对论，还必须用以太的观念重新建立起新的时空理论。就是说，还必须把以太概念公式化，并应用于上述各种领域。但是，现有“以太”的知识离此目的还相距甚远。

赏析：建立一个检验理论是改造狭义相对论的一个科学途径，而这个检验理论不能只有该概念的不同，必须提供数学推导，然后提供一些和实验可以比较的结果，这些结果必须是一些代有小数点的数。现在的所有实验的结果，都指向相对性原理和光速不变原理，没有其它选择。

第七自然段区分了动力学和运动学。

上面谈了相对论的两个基本原理。根据这两个原理建立的狭义相对论，给出了许多新的效应。洛伦兹变换是相对论的最基本的方程式，它包含了各种运动学效应。诸如长度收缩，时钟变慢，同时性的相对性，速度相加公式，极限速度等等，都可以由洛伦兹变换直接推导出来。物体运动的动力学定律则可以由洛伦兹变换和相对性原理加以限制：任何物理定律在洛伦兹变换下保持形式不变。下面我们将简单谈谈相对论的一些主要结论。

赏析：洛伦兹变换可以直接给出运动学效应。所谓运动学方程，仅仅局限于对运动的数学描述，例如长度，时间，速度，加速度，等等，不涉及这些量和其它量之间物理联系。相对性原理并不针对这些方程，至少不主要针对这些方程。相对性原理有两方面的含义，第一个是说，动力学方程的形式，不能依赖于参考系；第二个说，不同参考系中的方程，必须可以用洛伦兹变换相互联系起来。

第八、九自然段再次回到同时相对性。

关于同时性的相对性：两个事件在一个惯性系中是同时发生的，在其他惯性系中看来将不再是同时的事件了。这种同时性的相对性与牛顿物理学中的绝对同时性不同。其原因是牛顿理论中时间的同时性是用瞬时传播的信号定义的，而相对论的同时性是用光信号定义的。自然界中存在着以有限速度传播的光信号，但不存在以无限速度传播的其他信号。因此，相对论的同时性定义更符合实际。由于同时性的相对性与同时性的定义直接相关，所以它象单向光速不变性一样，是不能用现有的实验手段进行检验的。

关于时钟变慢。由洛伦兹变换推得的时间变慢的关系或是两个惯性系的时间坐标的关系式。其中，一个惯性系相对于时钟静止，这个惯性系读出的时间是固有时间间隔；另一个惯性系相对于时钟是运动的，测量运动的钟从一点到另一点的时间间隔需要由该惯性系中相应两点的两只时钟的读数之差给出，这样的时间间隔称为坐标时间间隔。显然，固有时间间隔与同时性的定义无关；坐标时间间隔与同时性的定义有关。由一次洛伦兹变换给出的时间变慢公式是固有时间间隔与坐标时间间隔之间的关系式。在实验中，可观测的量是固有时间间隔。通常所说的“时钟佯谬”，是将固有时间间隔与坐标时间间隔进行比较时出现的。当我们把坐标时间间隔进一步改换成另一个固有时间间隔时（这样做需要引入第三个惯性系），运动的钟变慢的效应就是唯一的结论了，即在哪个参考系中进行计算，其结果都是相同的。

第十自然段讨论了狭义相对论和牛顿力学的关系

关于洛伦兹变换与伽利略变换的关系问题，我们要强调的是，无穷小洛伦兹变换一般说来并不同于伽利略变换。当把光速 c 取成无限大时，洛伦兹变换就退化成伽利略变换，这正表明伽利略变换包含着用瞬时传播的信号对钟的假设。但是，当把光看成有限速度(30 万公里/秒)时，无穷小洛伦兹变换指的是两个惯性系的相对速度 v 比光速 c 小很多，将洛伦兹变换按 (v/c) 展开成泰勒级数保留到 (v/c) 的一阶项。这种无穷小洛伦兹变换与伽利略变换进行对比可知，空间变换式相同，时间变换式多出一个 $(x/t)v/c^2$ 的项，这一项称为同时性因子项。如果描述的对象是匀速直线运动的质点，则 $x/t = u$ 就是该质点的速度。只有当 u/c 也是无穷小时，才可以把这个同时性因子项当作 (v/c) 的二阶小项而被略去。此时，无穷小洛伦兹变换变得与伽利略变换相同。然而，如果质点的速度 u 接近于光速 c ，这时同时性因子项成为 (v/c) 的一阶项而不能被忽略。在此情况下，无穷小洛伦兹变换与伽利略变换不同。典型的例子是缓慢运动的电磁学实验。其中，电磁体的运动速度的 v ，电磁信号的速度是 $\frac{x}{t} = c$ 。因此，同时性因子项 $\left(\frac{x}{t}\right)\frac{v}{c^2} = \frac{v}{c}$ 是一阶项，不能被略去。正是因为有这一项存在，才使得在洛伦兹变换下成为协变的电磁场方程得以解释象单极电机这类电磁学实验。通常所说的在低速下洛伦兹变换成为伽利略变换应当是指 v 和 u 同为低速的情况。

赏析：这一段具有现实意义(你懂的)。单极电机是一个慢速转动的导电体，在不同观测者看来能产生相互矛盾的现象。在这一段里，张先生解决这一类矛盾的方法，如果一个介质的运动速度是慢速的，不能指望伽利略变换能给出正确结果！这是因为，伽利略变换中的速度仅仅是不同参考系的相对速度，这个速度可以任意小，但是，电磁信号传递速度是天生相对论性的，光速是一个自然常数，不能处理为无限大。有些项，看上去是二阶小量，其实是一阶。在略去二阶项的时候，必须是同一个量的一阶项存在；有一些看上去的“二阶项”，由于没有更小的一阶项，其实是零级项。

第十一自然段讨论质能关系

关于质速关系和质能关系。质速关系的证明是靠电磁力进行的。因此会涉及到电荷是否随速度改变的问题。对其他的电磁现象的分析表明，电荷与运动速度无关。因而，这类实验才成为质速关系的证据。对质能关系的理解，我们不应把质量和能量混合一谈。质量和能量是物质的两种不同的属性。实际测量也表明了两者的差别：能量是通过功的转换(固有能量转变为动能，动能可以做功)直接观测的；质量并不能直接进行观察，而是通过动力学定律表现出来的。质能关系只是表明了能量的改变量与惯性质量的改变量(当质量的数值用能量的单位表示时)在数值上的相等性。

赏析：质能关系即 $E = mc^2$ 。对于这个关系的认识有很多种。例如，质量和能量是物质的同种属性，只是量度的方式不同。张先生认为，质量和能量是物质的不种属性，质能关系是两

种不同的量之间的关系。还有一种说法和热力学有关。一切能量都是热力学意义上的内能，而内能总可以通过传热和做功来改变；根据兰道尔的信息擦除定理，信息可以表现为热量，因此也可以表现为能量，也就可以表现为质量。简而言之，质量也可以是信息的一种形式。这些理解都可以接受。物理学研究的正道是：执其一端，走到无路可走之处！

第十二自然段讨论超光速，不录。

第十三自然段是文章的最后一段，再次回到同时相对性。

总之，我们想说的是，狭义相对论与牛顿经典物理学的根本差别不在于相对性原理，而在于光速不变原理，即在于不同的同时性定义。

赏析：相对论何奇？不在相对性原理，而是同时相对性也！

原文链接