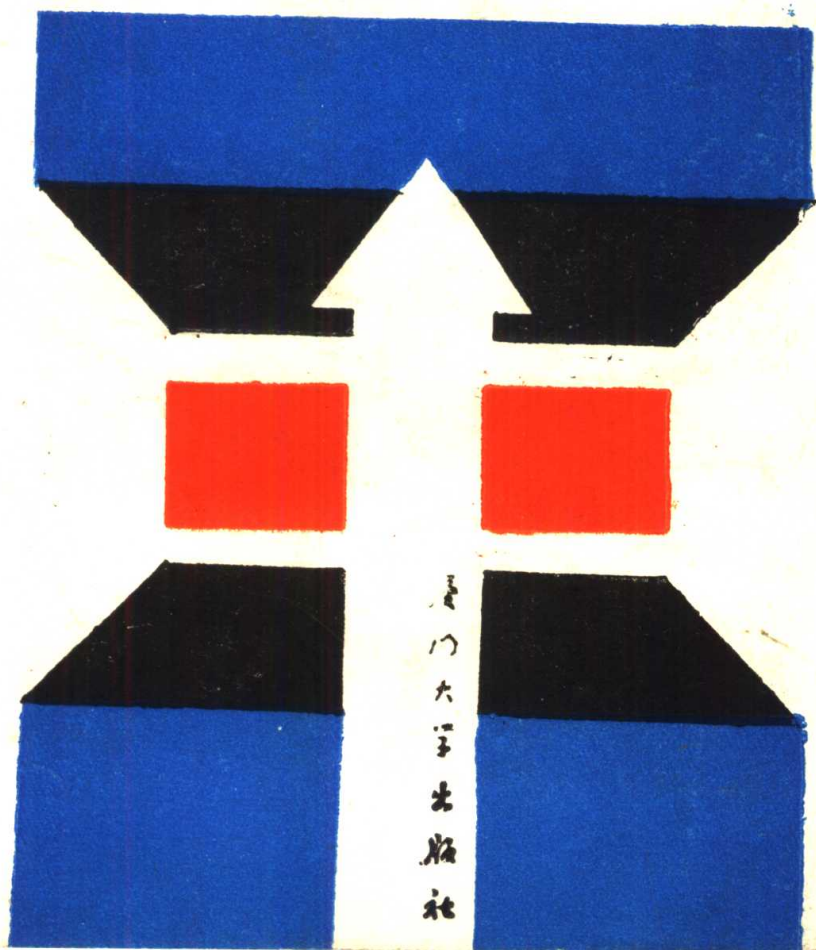


狭义相对论入门

■ 叶 壬 癸 ■



厦
門
大
學
出
版
社

内 容 简 介

本书以高中的数学和物理知识为基础，用比较轻松的笔调介绍狭义相对论。与一般狭义相对论书籍相比，本书在次序安排或具体问题的讨论方式上都有明显特色。目的是使它尽可能适于自学。

本书可作为大学《狭义相对论》课程的教材。也适合于中学物理教师、以及有志于自学相对论的读者作为自学教材。

狭义相对论入门

叶壬癸 编著

厦门大学出版社出版
福建省新华书店发行
安溪一中印刷厂印刷

开本787×1092 1/32 11.5625印张 250千字
1988年10月 第1版 1988年10月 第1次印刷

印数 1—3000册

ISBN 7—5615—0124—2

O·6 定价：2.35元

说 明

本书的主要内容是在“文革”期间既不能看参考书，也不能写书的条件下构思的，后来才形成文字。最初是希望给大量刚刚下乡的高中毕业生有一本可进行“脑力体操”的书（至于这书能否出版则不在考虑之中），让他（她）们在乡下锻炼几年之后如有机会上大学，学习数学与物理的能力不致于荒废太多。70年代以来，书稿内容几经修改并数次油印成讲义，在厦门大学（物理系及其他系）和少数兄弟院校作为狭义相对论教材，已用过十轮，同学们普遍反映它的确很适于自学。

本书内容安排次序及对具体问题的讨论方式都有明显特色，目的是使它更适于自学。其中有相当一部分内容（约20%）是其它书中从未曾讨论过的，不少是属于似是而非或似非而是的问题。可以相信，弄清楚这类问题不但有趣而且有助于正确理解相对论。书中要求读者具备的背景知识不超过高中范围。虽然在全书快结束时有个别加*号的地方牵涉到某些大学课程的内容，但这些地方可以跳过不读而不影响全局。事实上，正确理解狭义相对论的基本内容并无需多少高深的数学与物理知识，决定需要的只是有兴趣，肯动脑筋。

书中从（1）到（24）是连贯一气的，只有一些附录及（10）除外。（25）以后各节则彼此相对独立〔只有（29）与（30）都依赖于（28），要先学（28）〕，读者完全可以

根据需要与兴趣颠倒次序来学习。

在全书最后附录爱因斯坦1905年发表的两篇狭义相对论论文的中文译文。翻译并附录这两篇文章是由于它们在科学史上非常重要，而一般读者又不易读到；并且也作为本书正文中只字未提爱因斯坦的一种补偿。在写本书初稿的历史条件下，提起这位伟大学者的名字可能会惹来某些麻烦，虽然在(5)有几句话提到爱因斯坦，那是作出版前修改时添上去的。

希望这本入门书能给有志学习(特别是自学)相对论的读者带来方便与乐趣。同时也希望它会有益于学哲学的年青同志正确理解科学的时空观。

作者

1988年5月26日

目 录

(1) 测量光速.....	1
(2) 光速与光源的运动速度有关吗? 与光的颜色有关吗?	6
(3) 力学相对性原理受到挑战.....	12
(4) 惯性参考系.....	17
(5) 相对论的两个公理性假设.....	22
(6) 时间计量的相对性.....	27
(7) 同时的相对性.....	41
(8) 长度计量的相对性.....	45
附: 当杆的运动方向与杆长垂直时, 杆的长度和静止时一样.....	48
(9) 再讨论同时的相对性.....	52
附: 谁年青.....	60
(10*) 时、空均匀且空间各向同性的一些推论...	65
(11) 因果律对速度的限制.....	69
(12) 超光速是存在的, 但相对论 没有因此垮台.....	74
(13) 速度应如何相加?	80
(14) 较普遍的速度合成公式.....	92
附: 另一条道路.....	106

(15) 质量和速度的关系.....	117
(16) 动量守恒要求质量守恒.....	125
(17) 质量与能量的普遍联系, $E=mc^2$	130
(18) 洛伦兹变换.....	138
(19) 时、空间隔不变.....	148
(20) 空间、时间与动量、能量, 四(维)矢量.....	156
(21) 光子的四动量.....	172
附: 再讨论“谁年青?”.....	185
(22) 把光看成波动.....	191
(23) 光行差现象的“怪异”.....	200
(24) 四维时空的力.....	206
(25) 再一次推导 $E=mc^2$	217
(26) 热量的变换.....	222
附: 相对论的冷热观.....	227
(27) 四电流密度矢量.....	235
(28*) 寻求零张量.....	250
(29*) 库仑定律加上相对论就 可推导出麦克斯韦方程组.....	260
(30*) 动量流密度、动量密度、能量密度张量...	270
(31) 综合例题.....	281
(32) 关于光速不变及其他.....	302

附：关于狭义相对论的实验基础.....	317
译文：爱因斯坦1905年发表的关于 狭义相对论的两篇论文.....	324
A. 运动物体的电动力学.....	324
B. 物体的惯性与其所拥有的 能量有关吗？.....	361

1. 测量光速

历史上第一位试图测量光速的人，应首推伽利略。生活于16—17世纪之间的伽利略，曾打算测量光的速度。他让两个人A及B分别位于可相望的山头，每人都带着一盏有“快门”的灯。A先把灯的快门打开，B看见A的灯光后，立刻打开自己的灯，让A记下从自己开灯到见到B灯的光所经历的时间 t 。设两个山头的距离为 l ，则 t 就是光来回走了 $2l$ 路程所需时间，因此光速 c 为：

$$c = \frac{2l}{t}.$$

用这种方法测量光速，在原理方面是正确的，但是由于光的速度太大了，人的手及眼睛的反应太迟钝，要靠人的感官的反应来测量光在两个山头来回所需时间 t ，是办不到的。现在已知道，光速大约为每秒30万公里，就算两个山头相距15公里， $2l$ 为30公里，光走过30公里路程只需0.0001秒，人手对事物的反应，一般需要0.1秒的时间。要想用人手的动作来测量万分之一的秒的时间是不行的。因此，伽利略的实验未能成功，没有结果。

要是有两个山头既可以相望又相距极远，并且有很强的光源，事情就好办了。可是地球上无法找到距离很远又可以

相望的两个山头，两个象珠穆朗玛峰那样高的山头，即使周围都是海洋，也只能在700公里距离内可以相望。这样的距离，按照伽利略所采用的方法来测量光速，仍然没有希望。因为光在700公里距离内来回跑一趟，只不过约需0.005秒，凭人的感官仍然无法测出这样短的时间。看来，要找很长的距离，只能在天上想办法。

太阳距地球 1.5×10^8 公里，即一亿五千万公里，太阳本身就是很强的光源，在一亿五千万公里外，看起来还是那样耀眼，真是距离又远又可以相望。可惜的是，太阳不能作为测量光速用的光信号源，因为没人给太阳安上一个“快门”，让它按时发出光信号。不过别担心，我们下面将介绍，天空中有够强的按时发出光信号的光源存在，天体间的距离也足够遥远，人类正是从天文观测第一次突破光速测量关的。

为了更容易理解天文观测如何突破光速测量关，让我们先看看一个测量声音速度的例子。

设某寺庙有大钟 S ，每逢过旧历年（春节）时都要在半夜里撞108下。为了讨论方便，设钟声很准确每5秒响1次，并且让我们把习惯上叫做第一响的钟声改为第零响（严格说来，在很多场合，计数应从零开始比较合理，比如年龄的计算）。某人听到第零响钟声时，看一下表是 t_0 时刻，这时他开始从所在的 A 点漫步回家并耐心地计数钟声。当听到第100响时，他到达途中 B 点，但此时手表所指示的时刻并非 $t_0 + 500$ 秒，而是 $t_0 + 502$ 秒，这位某人立即明白，这第100响钟声迟到2秒是由于它比第零响多走了一段路程所致。如果设他知道 $SB - SA = 700$ 米，这700米就是第100响钟声

比第零响多走的路程，因而他就可以算出，声音速度是

$$\begin{aligned} V &= 700 \text{米}/2 \text{秒} \\ &= 350 \text{米}/\text{秒} \end{aligned}$$

在大约 300 多年前（1676年），人们就利用和上述测量声速类似的方法，第一次定出光的速度。你自然会问，光信号源在哪里？谁相当于漫

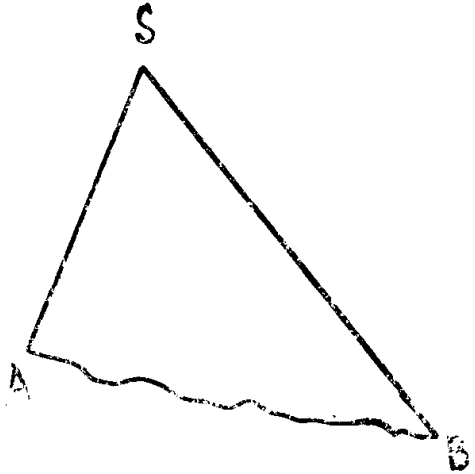


图1. 1

步的人？回答是，木星的卫星定期进入木星的影子里发生的木卫食，就是一种光信号源（木星的卫星按时变暗），类似于大钟按时发出钟声信号；地球相当于漫步的人，以每秒30公里的速度在轨道上漫游，绕太阳公转。现在已知木星有二十个左右的卫星，其中有4个比较亮，1610年1月7日晚伽利略用望远镜第一次指向木星时就发现了这4个卫星。这4个当中最靠近木星的一个不到两天就会进入木星的影子里一次，发生木卫食，就和月亮进入地球的影子里发生月食一样道理，只不过月食比较不常见。我们设图1. 2中地球在E处时，木星在J处，木卫在M处发生食，设这次食为第零次食，当地球沿轨道“漫步”到E'时，木卫发生第k次食。设此时木星在J'，木卫在M'。人们从长期观测已知木卫平均每经过时间T（=42小时28分16秒）就发生一次食，可是人们发现上述的第k次食并不发生于零次食之后再过kT的时刻，而

是发生于比 kT 还晚一些的时刻 $kT+t$ 。可见，第 k 次食额外推迟的时间 t 就是光走过图中 $M'E'-ME$ 这段距离所需的时间，因为第 k 次食的信号比零次的要多走 $M'E'-ME$ 这一段路程才能到达地球。所以光速 c 为

$$c = \frac{M'E' - ME}{t}$$

在这个式子中， $M'E'$ 与 ME 可以由天文上的知识求得，因为地球与木星绕太阳公转的规律及木卫绕木星公转的规律早已知道。1676年就是利用上面所说的方法，求得光速 $c=214,300$ 公里/秒。这个数字从现在看来是很不准确的，但在当时能够令人信服地求出光速达每秒几十万公里，已经是很了不起的了。

今日的科学技
术，与300年前相
比，是大大进步
了。现在已经能够很
准确地测量光在两
三米距离内来回一
趟所需的时间。近
十几年来激光技术
与电子技术的发展
，更使光速的测量
达到了极高的精度
，已成为目前世界
上最精密的测量之
一。根据最新测量
，光速的数值为

$$c=299,792,458 \text{ 米/秒。}$$

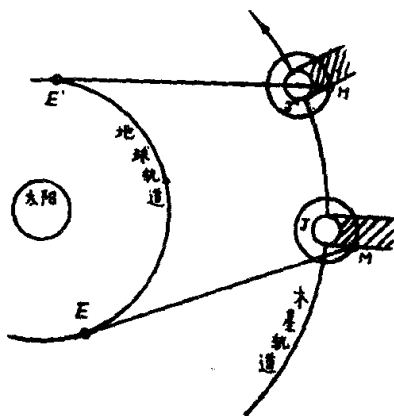


图1.2

或

$$c=299792.458\text{公里/秒}.$$

这就是我们这一节的结论。在这里我们要着重说明，在本书中，所有“光速”这个词，如果没有特别声明，都指真空中的光速，并且将专门用小写字母 c 表示这个速度。

2. 光速与光源的运动速度有关吗？

与光的颜色有关吗？

我们在上一节最后给出的光速数值，并没有说明是什么样的光的速度。既没有说明光是从什么样的光源发出的，也没有说明光源是静止的或是运动着的。看来我们可能有疏忽之处，因为光速可能与光源的运动有关，也可能与光的颜色有关。如果真是这样，我们讲光速而没有具体说明是什么光的光速，这就不对了。

大家知道，子弹的速度和发射子弹的源(枪)的运动速度有关。从疾驰的汽车上向前方射出的步枪子弹，其相对于地球的速度为子弹出枪口的速度与汽车的速度之和，子弹的速度受到子弹发射源运动的影响。光速是否也有这个性质？光速是否与光源的运动速度有关？这个问题，我们没有先验的理由可以回答。回答这样的问题，还得依靠实验。由于光速非常大，这个实验很难做。你让光源以每秒1公里的速度运动，如果光速的确受光源运动的影响，每秒30万公里的光速最多也只变化每秒1公里而已。要测量这样微小的速度变化(30万分之一)，就象在体重秤上要测出由于呼吸一次对你的体重所产生的影响一样的困难。虽然如此，由于科学技术的不断发展，目前做这类实验还是有可能的。不过在几十年前，要想直接测量光源的运动对光速的可能影响，是办不

到的。但是人们早在几十年前，就已经从一些间接的现象，论断光速不受光源运动的影响。我们这里介绍一个可能是最易懂的例子，这就是对双星的观察现象进行分析，使人信服地论证了光速与光源的运动速度无关。

所谓双星，指的是彼此间相距不太远，相互间引力明显发生作用的两个恒星。大家知道，太阳就是一个恒星，但太阳不是双星。不要因为太阳不是双星就认为双星在宇宙间很少见。事实上，两颗恒星互相接近构成双星系统的很常见。根据力学知识可知，这样两个恒星构成的双星系统，在万有引力支配下，都会绕着共同的质量中心作椭圆轨道运动，就如地球绕太阳作椭圆轨道运动一样，因为都是受万有引力支配的。只不过地球和太阳构成的系统，由于太阳的质量远大于地球，二者的共同质量中心在太阳上面，因此地球只好绕太阳转。双星的这种轨道运动，在天文学上早就知道了，不是什么新鲜事。问题是光速是否受光源运动的影响，可以从双星运动的观测，得到令人信服的结论。

设图2.1中 A 、 B 为双星，为了方便起

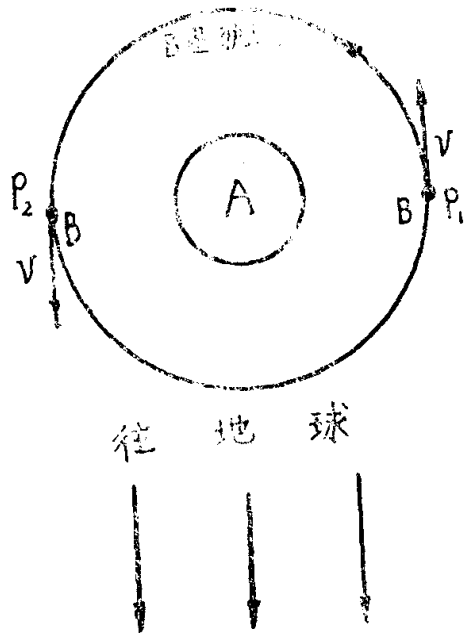


图2.1

见，设 A 质量远大于 B ，因而这个系统的运动可以简单地看成是 B 星绕 A 星作轨道运动。

A 自身的轨道运动可以忽略，因为质量中心就在 A 附近。也为了方便起见，我们更设 B 绕 A 的运动轨道为圆形，并且这轨道平面扩展后通过地球或差不多通过地球。这些假设都不影响我们所讨论问题的本质，只是使讨论方便而已。

当 B 在图中 p_1 位置时，其运动速度是在远离地球，如果光速受光源运动影响的话，在 p_1 处的星光应以比较慢的速度射向地球。设这个双星系统距离地球为 l ， B 星在轨道上的运动速度为 v ，平常的光速为 c ，则 B 在 p_1 处所发的光到达地球需时间 $l/(c-v)$ ，当 B 跑到 p_2 处时，由于在该处 B 星的速度是在接近地球， B 星所发的光从 p_2 到达地球只需时间 $l/(c+v)$ 。这两个时间之差为

$$\Delta t = \frac{l}{c-v} - \frac{l}{c+v} = \frac{2lv}{c^2 - v^2}.$$

从天文学上可知，恒星距离地球极其遥远， l 很大，因此，即使 v 不很大， Δt 也很可观。比方说，设 l 为 50 光年（光年是天文学上常用来表示距离的一种单位，1 光年就是光在 1 年中所走过的距离，约等于 10 万亿公里）， v 为 30 公里/秒，也就是 $v = 0.0001c$ ，则

$$\Delta t \approx \frac{2 \times 50 \text{ 年} \times c \times 0.0001c}{c^2}$$

$$= 0.01 \text{ 年}$$

$$\approx 3.6 \text{ 天}.$$

（我们在计算这些数字时，从分母中略去了 v^2 ，因为 v^2 比 c^2 小得太多了。）

就是说，由于双星距地球极其遥远，如果光速受光源运动影响的话，只要 $l=50$ 光年， $v=30$ 公里/秒，就足够使得由 p_2 到地球的光比由 p_1 的少花3.6天的时间。如果 B 星绕 A 星的周期恰为7.2天的话， B 星在 p_1 外发出的光就会与半周期后从 p_2 发出的光同时到达地球，这就出现了这样的怪现象：在地球上将看到 B 星同时既在 p_1 又在 p_2 。总之，由上面的分析可知，如果光速受光源运动速度影响的话， l ， v 越大， B 星在轨道上不同位置发出的光到达地球所需时间就会千差万别，我们观测 B 星的运动就会受到更大的歪曲，根本不可能看到 B 星会在轨道上老老实实按部就班地照力学规律运动。观测到的事实是怎样的呢？事实是，很多的双星距地球大于50光年， v 也大于30公里/秒，周期比7.2天还短的也有，可是从来没有看到类似上面所说的由于光速受光源运动的影响而引起的怪现象。看到的总是每个星皆顺序连续通过轨道上的所有点，绝不出现 B 星既在 p_1 点又在 p_2 点或诸如此类的怪事。因此，人们得出结论，光速不受光源运动速度的影响。

好吧，光速与光源运动速度无关，双星的分析很有说服力，难道光速与光的颜色也无关吗？要知道，不管在水中或在玻璃中，红光都比绿光跑得快，难道在真空中光速就与光的颜色无关吗？要回答这个问题，仍然可以请双星帮忙。

为了讨论方便，我们设某双星系统中 A 星体积大而且很暗， B 星比较小但很亮。这样的假设并不影响我们所讨论问题的本质，只是使得讨论更形象化些而已。

当图2.2中 B 星跑到I处时，开始被 A 星遮住。跑到II处时， B 星又开始露面。假设 B 星原是白色的，如果红光比

绿光速度大(比方说),则B星被遮住前一瞬间所发的光,其中红光部分先到达地球,白光扣除红光部分后剩下的绿光,由于走得慢些,要晚些才到达,因此我们将看到B星被遮前的最后一瞬间是绿色的。反过来,B星在II处开始露面时,我们会看到它先是红色的,等到绿光也到达地球时,我们才会看到B星恢复白色。总之,

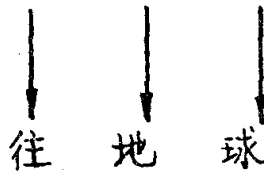
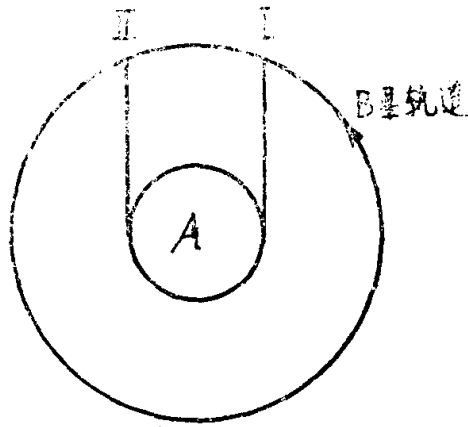


图2. 2

只要各种颜色的光在真空中速度有极少许差别,由于恒星距离遥远,速度的少许差别就会使同时发出的各色光到达地球有先有后,人们就将看到B星被遮前与刚露面时出现截然不同的颜色。事实是什么情况呢?人们从来没看到某个双星的某个成员周期性地按上面所说的那种方式变色。因此,人们只能得出结论说,各种颜色的光在真空中传播的速度皆相同。现在已知道,光是电磁波,光的颜色不同也就是频率不同。无线电广播用的也是电磁波,雷达用的也是电磁波,医院透视用的X光线也是电磁波等等。它们之间的差别仅仅是频率不同而已。各种频率的电磁波在真空中传播的速度皆相同,都