

# 观察论

## ——波的传播与物体运动的视速度

袁灿伦

中国水利水电第九工程局有限公司, 中国贵阳  
福州原创物理研究所基础部, 中国福州

**摘要** 本文深化和发展了伽利略运动相对性原理, 总结出运动或波动(光)相对性和叠加性定律。分析了光的本质。分析各种波(声波、水波、电磁波或光波等)的特性及其与物体(波源)运动速度的关系。波充当了人们认知事物的信使, 用波(光)作为信号来接收、感知并认识远处的事物。对物体的观测是一种观察视角效应, 而非物体的真实运动。波源的真实运动可以超波速, 超波(光)速运动的物体在某些视角观测到的速度可以远低于波(光)速, 而低于波(光)速运动的物体在某些视角观测到的速度又会远超于波(光)速。超波(光)速运动的物体在某些视角观测, 会产生特殊的现象。物体真实运动的超波速(包括超光速)和观察时序倒置都是常见的现象。文章最后讨论了类星体的超光速等现象、观察视角效应的技术应用前景。本理论在遥感遥测、天文观测、微观探测、卫星导航、天气预报, 以及显微观测、医疗检测、动态识别等方面有广泛的应用。都通过本文导出观察视角效应公式进行校准, 可以提高观测结果精度。特别是高能对撞机、宇宙射线、宇宙辐射、核反应等高速运动体的观测技术上, 应用的效果更加显著, 达到更真实更准确的结果。

**关键词:** 运动或波动相对性和叠加性定律, 光的本质, 波的传播, 波速不变, 信号, 物体的视速度, 观察视角效应, 超波速, 时序倒置

## 一、前言

当物体系统受到扰动时, 扰动在空间传播时形成波, 如绳波、水波、声波、温度波、电磁波或光波等。除了电磁波可以在真空中传播, 其他波都只能在介质中传播。波的共同特征是反射、折射、叠加、干涉、衍射和偏振等。

除上述性质外, 波还具有以下明显的性质: 波速由介质的类型及其状态因素决定; 波的传播不受力的影响, 也不会加速或减速, 不存在加速或减速的过程。在同一均匀介质中, 波的传播方向不会改变。当波源振动时, 它立即波动, 并以恒定的波速传播。

相对于介质, 波源的运动不影响波的传播速度和方向。波从波源产生后立即传播, 此后与波源无关。每个波的产生和传播都是相互独立的, 相似的波相遇重叠, 分离后再独立传播。波传播能量, 但不传播质量。因此, 波没有质量, 也没有惯性。波的这些独特性质决定了波的独特行为, 这也明显不同于实体物质的物理性质。

人类是通过波来感知和认识事物的, 但目前对波如何传递事物的信息, 使人的感官和仪器感知和接收波, 波的传播与波源运动的关系, 人的感官或仪器接收到的信息是否真实地反映了物体的真实运动, 都没有完整深入的研究, 使人误以为观察到的就是真实的情况。

事实上, 在现有的经典物理理论和现代物理理论中, 以及在物理实验、观测和技术应用中, 都没有考虑观测角效应对观测结果的影响, 这种影响是巨大而复杂的, 忽略它会导致物理理论的错误。由于在一些物理实验和观测中得到的结果并不真实, 很多技术应用遇到了发展瓶颈。

本文讨论了线性波在各向同性均匀介质中的传播以及波作为观测信使对观测结果的影响。指出人所观察到的物体运动并不是物体的真实运动, 而只是物体的视觉运动, 并给出了各种情况下波源运动与视觉观察的关系。本文还对超光速的视觉现象进行了分析, 并对相关的物理理论和物理实验的观察进行了修正, 使理论更加准确, 物理实验和观察的结果更加真实有效。

该理论在遥感、天文观测、显微探测、卫星导航、天气预报、显微观测、医学检测、动态识别等方面有着广泛的应用前景。为了提高观测结果的精度, 利用本文推导的观测角效应对其进行修正。特别是在高能对撞机、宇宙射线、宇宙辐射、核反应等高速运动物体的观测技术中, 应用效果更加显著。通过本文的修正, 得到了更真实、更准确的结果。

本文使用的运动或波参数(位移  $S$ 、速度  $V$ 、加速度  $a$ )的下标分别为,  $w$ (wave)表示运动物体或波的参数,  $o$ (observer)表示观测者或传感器的运动参数,  $m$ (medium)表示介质的整体运动参数,  $s$ (source)表示波源的运动参数(真实速度),  $a$ (apparent)表示观测者或传感器的观测。

## 二、运动或波动相对和叠加定律

**伽利略的运动相对性原理:** 对于相对运动(位移、速度、加速度等参量), 在任意参考系中, 观

察到的相对运动参量  $c'$ ，为运动参量  $c$  与参考系的运动参量  $V_o$  的矢量差： $\vec{c}' = \vec{c} - \vec{V}_o$ 。

例如，船在河中，从船上、从河中看或从岸上看，船的运动状态是不一样的。

**运动叠加性原理：**对于叠加运动(位移、速度、加速度等参量)，在任意参考系中，观察到的叠加运动参量  $c'$ ，为运动参量  $c$  与拖曳物体的运动参量  $V_m$  的矢量和： $\vec{c}' = \vec{c} + \vec{V}_m$ 。

例如，介质整体流动拖曳着波，地球运动拖动地球上所有物体一起运动，火车拖动火车上所有物体一起运动。

复杂的情况是，运动既有相对性，又有叠加性。比如地球绕着太阳转，火车在地球上跑，人在火车上走，虫子在人身上爬……

这两个原理不仅适用于物体的所有运动，也适用于所有的波，所以我们可以得到运动相对性和叠加性定律，波动相对性和叠加性定律。

**运动或波动相对性和叠加性定律：**在任何参考系中，观察者以速度  $V_o$  运动。当整个均匀介质以速度  $V_m$  匀速运动时，波源在介质上产生速度为  $c_w$  的同心球面波，也以速度  $V_m$  随介质匀速运动而不改变形状(介质拖曳效应)。观察者在任一点观察到的波速  $c'_w$  是介质中波速  $c_w$  的与观察者速度  $V_o$  的矢量之差，与介质整体运动速度  $V_m$  的矢量之和，与波源的运动速度  $V_s$  无关。它被称为运动或波速相对和叠加通式：

$$\vec{c}'_w = \vec{c}_w - \vec{V}_o + \vec{V}_m \quad (1)$$

运动位移相对和叠加通式：

$$\vec{S}'_w = \vec{S}_w - \vec{S}_o + \vec{S}_m \quad (2)$$

运动加速度相对和叠加通式：

$$\vec{a}'_w = \vec{a}_w - \vec{a}_o + \vec{a}_m \quad (3)$$

这两个原理不仅适用于所有的运动和波，也适用于所有的电磁波(光波)速度，这样就可以得到光速相对性和叠加性定律。

**光速相对性和叠加性定律：**在任意参考系中，观察者以速度  $V_o$  运动。当均匀介质整体以速度  $V_m$  均匀运动时，光源在介质上产生光速为  $c$  的同心球面光波，也随着介质以速度  $V_m$  均匀运动，而不改变形状(介质拖曳效应)。观察者在任意一点观察到的光速  $c'$ ，为介质中的光速  $c$  与观察者速度  $V_o$  的矢量之差，与介质的整体运动速度  $V_m$  的矢量之和，而与光源的运动速度  $V_s$  无关。称为光速相对和叠加通式：

$$\vec{c}' = \vec{c} - \vec{V}_o + \vec{V}_m \quad (4)$$

光波位移相对和叠加通式：

$$\vec{S}' = \vec{S} - \vec{S}_o + \vec{S}_m \quad (5)$$

运动或波的相对性和叠加性定律是一个更普遍的定律，它不仅适用于物体运动(位移、速度、加速度)的相对性矢量相减关系和叠加矢量相加关系，也适用于波动(位移、速度)的相对性矢量相减关系和叠加矢量相加关系。

### 三、光的本质

根据麦克斯韦电磁理论，光是电磁波，由电场和磁场交替激发，在空间中向前传播。光不仅可以在真空中传播，也可以在透明物质(实体物质)中传播。光是电磁波，电磁波也是光，光和电磁波是完全等价的概念。下同。

光具有反射、折射、叠加、干涉、衍射和偏振等共同特征。

光是一种波动的形式，而不是运动的形式。不能叫光的运动，应该叫光的传播。光传播的是波动的形式和波动的能量。光不是物质，没有质量，没有惯性，不受到力的作用和影响，不加速也不减速，不被光源拖曳，但可以被电磁场介质拖曳。在同一种均质物质中，光传播时不会改变方向。光源发光就立刻产生光，而且是匀速传播。

光源的移动不影响光传播的速度和方向。光从光源产生后立即扩散出去，从此与光源无关。每种光相互独立产生和传播，相遇时叠加，分离后独立传播。光传播能量，没有传播质量。光的这些独特性质决定了光的独特行为，这种行为也明显不同于物理物质的性质。当光被一个物体反射时，这个物体就成为一个新的光源。

光速不变原理是不正确的。相对于同种均匀物质(光的介质)，光速是一样的，这才是光速不变的真实含义。光速满足光速相对性和叠加性定律。真空是光传播的最佳介质。在真空中，相对于真空介质参考系。光速为  $c$ 。光速满足光速相对性和叠加性定律。光速不是所有速度的上限，而实体物质的运动速度可以超光速。真空是电磁波传播的最理想介质，传播速度最快(为  $c$ )，折射率最低(为 1)。

真空中虽然没有实体物质作为介质，但它以电磁场形式的物质作为介质。电场和磁场在空间交替激发并向前传播，这种波动的形式是电磁波。在电场和磁场交替激发的过程中，后面的电场和磁场减弱消失，在前面激发出电场和磁场，前面的电场和磁场是在激发过程中产生的，此消彼长。可见电磁波的传播速度，就是电场和磁场在空间交替激发并向前传播的速度，所以**电磁场就是电磁波传播的介质**。

麦克斯韦从方程组解出了电磁波方程。电磁波方程和机械波方程(弦振动方程)具有完全相同的形式。机械波方程求解的机械波速度是相对于介质的，与波源的运动无关。同理，电磁波方程求解的电磁波速度  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  (其中  $\epsilon_0$  为真空中的介电常数， $\mu_0$  为真空中的磁导率系数)，那么真空中的电磁波速度也是相对于真空中电磁波介质的电磁场而言的，与波源的运动无关。真空中电磁波介质的电磁场是真空中光速  $c$  的参考系。有了这个确定的参照系，麦克斯韦的电磁理论和伽利略的相对论原理就不矛盾了。

在实体物质中，电磁波速度为  $c_w = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{n}$  (其中  $\epsilon$  为实体物质的介电常数， $\mu$  为实体物质的磁导率系数，它们不仅与实体物质有关，还与电磁波的频率有关， $n$  为透明实体物质对光的折射率)。同理，实体物质的电磁波速度，就是相对于固体物质中的电磁波介质电磁场而言的，与波源的运动无关。实体物质中的电磁波介质电磁场是固体物质中光速  $c_w$  的参考系。

光在(透明的)实体物质中传播时，光的传播也是以电磁场作为传播介质的。(透明的)固体物质不是光的传播介质，而电磁场才是光的传播介质。电磁场在实体物质中传播较慢，光在(透明的)实体物质中传播较慢，为  $c_w = c/n$ ，实体物质的整体运动(流动)速度与电磁场在实体物质中的传播速度不同步，导致光在透明实体物质中的传播速度不同步，而是滞后。即实体物质并没有完全同步拖动电磁场，也没有完全同步拖动电磁波，都只是部分拖动。实体物质按一定比例拖动电磁场，两个作用通过整体移动(透明的)实体物质来减缓光的传播速度，这与实体物质的介电常数、密度等因素有关。

所有的波(包括电磁波)，在介质内部是体波，在介质界面是表面波。体波中既有横波又有纵波。介质界面处的表面波是横波，而介质中的体波是纵波。在介质中任何平行于传播方向的曲面都是横波，在介质中任何垂直于传播方向的曲面都是纵波。如图 1(1)所示。

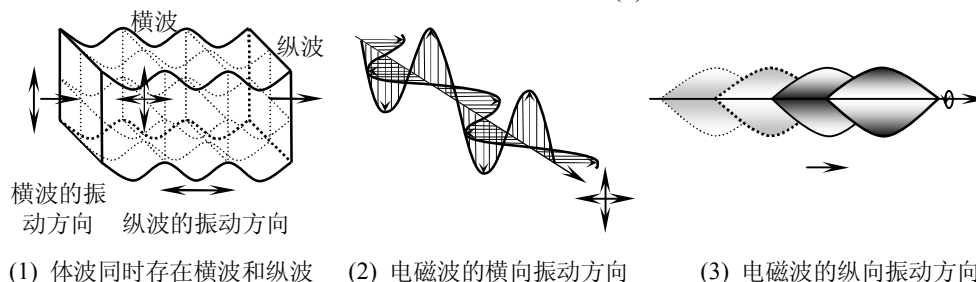


图 1. 体波、电磁波的振动方向

当电场和磁场交替激发形成电磁波时，电场波和磁场波在传播方向和垂直于传播方向同时振动，电磁波既有横波又有纵波。根据电场和磁场交替激发时的能量守恒，电场波和磁场波的相位差为 90 度。如图 1(2)和图 1(3)所示。

由于光的本质问题涉及到波动理论、麦克斯韦电磁理论和量子力学理论，情况比较复杂，迄今为止，现有的理论对光的本质问题都没有深入的认识。这里只简单介绍作者新研究的结论。作者将在后续的新量子力学文章中再次讨论光的本质问题。

这个理论可以完美的解释所有关于光的问题。在后面的文章中，作者会解释迈克尔逊-莫雷实验的零结果、双星的轨道形状和萨格纳克效应等等问题。

#### 四、波是人们认知事物的信使

有些形式的波可以被人或动物的感官所感知，或者被仪器的传感器所接收。事实上，人们就是通过作为信号的波来接收、感知和认识远处的事物的，波是人们认识事物的使者。比如用耳朵听声音，用眼睛看物体，用身体感受波动，用麦克风接收声音，用声纳探测水下地形，用超声波机、X 机、γ 机、CT 机、MRI 机(核磁共振)观察人体，用相机拍照，用摄像机拍摄，用雷达探测目标，用光学望远镜、射电望远镜观察天体，用仪器观察地震波。所有这些最终都会转化为人类感官可以感知的信号。所有的以非接触方式感知和观察事物，都是以波为信使的。

如果观察者随波源(物体)一起运动，两者之间没有距离和相对运动，它们的运动状态完全相同，此时就不需要信使。在这种情况下，观测者观测到的波源(物体)速度才是波源的真实运动速度，称为跟随观测，否则，观测到的就不是波源(物体)的真实运动情况了。

当人们研究物体的运动规律时，它们的距离是不同的。人不能跟随着远处的物体一起移动，就用电磁波(光波)照射物体，或以物体为波源，通过接收物体反射或发出的波信号来观察物体的运动情况。通常是物体发出光波或者反射光波，通过光信号观察物体的运动，人类接收到的信息绝大多数都是用眼睛看到物体发出的光波信号。

本文将线性波用为携带信息的信号(如声波、水波、电磁波(光波))，分析线性波在各向同性均匀介质中的传播，研究波与物体运动的关系。下面将以低速直观的声波或水波为例进行分析，进而推广到包括电磁波或光波在内的所有波。

## 五、运动观察者观察到的波的速度

假设波源在静止的水面上产生同心圆水波，作为观测者的无人机以速度  $V_o$  贴近水面飞行，跟随某个波峰观测水波的速度。我们讨论移动的观察者在图 2 的  $x$  方向观察到的波速。有四种情况。

**5.1** 观察者的速度与波速方向相反时，如图 2 中左边 A 点所示。当观察者悬停时，观察者观察到的波速为  $c_w > 0$ ；当观察者速度为  $V_o$  时，观察者观察到的波速为  $c_w + V_o > 0$ 。

**5.2** 观察者的速度与波速方向相同时，如图 2 中右边 B 点所示。当观察者始终在这个波峰的后面时，观察者速度小于波速  $V_o < c_w$ ，观察者观察到的波速为  $c_w - V_o > 0$ ；

**5.3** 观察者的速度等于波速  $V_o = c_w$ ，如图 2 中右边 C 点所示，观察者观察到的波速为  $c_w - V_o = 0$ 。

**5.4** 当观察者的速度大于波速  $V_o > c_w$  时，如图 2 中右边 D 点所示，观察者观察到的波速为  $c_w - V_o < 0$ 。

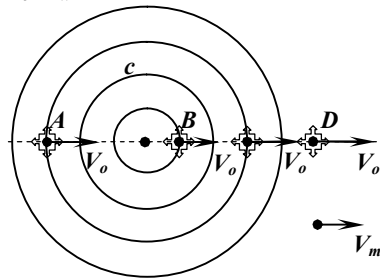


图 2. 运动观察者观察到的波的速度

当整个水以速度  $V_m$  均匀流动时，水面上产生的同心圆水波也以速度  $V_m$  随着水均匀流动，而不改变形状。观察者在任一点观察到的波速  $c'_w$ ，为水中的波速  $c_w$  与观察者速度  $V_o$  的矢量之差，与水的整体运动速度  $V_m$  的矢量之和：

$$\vec{c}'_w = \vec{c}_w - \vec{V}_o + \vec{V}_m \quad (6)$$

声波和电磁波(光波)也是如此，这个公式适用于所有的波动。

## 六、波速相对和叠加通式的推导

在图 3 中，波源以速度  $V_s$  向  $x$  方向运动，并且波以速度  $c_w$  向各个方向传播。每一时刻波源都在激发出球面波，形成连续的球面波阵面，向各个方向扩散。波源在运动过程中的每一个位置又不断地激发出球面波，形成连续的多波阵面。

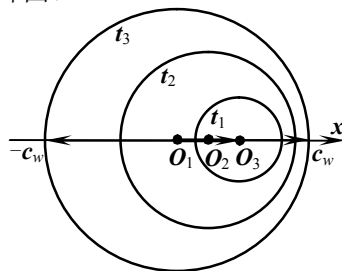


图 3. 波源运动时产生的多波阵面的传播

现在考虑波源沿  $x$  方向运动的简单情况。如果以波源为参考系，观察多波阵面在  $x$  方向的位置，进而观察多波阵面的传播速度。经过时间  $t$  后，在  $x$  正方向上，波源从  $O_1$  点运动到了  $O_3$  点，波源运动位移为  $V_s t$ 。波源在此位置处刚产生波，在  $t_0$  时刻产生的波的波前传播到了  $c_w t$  的位置。以波源为参考系的观察者观察到的波速为  $c'_w = (c_w t - V_s t) / t = c_w - V_s$ 。在  $x$  负方向，在  $t_0$  时刻产生的波的波前传播到了  $-c_w t$  的位置，以波源为参考系的观察者观察到的波速为  $c'_w = (-c_w t - V_s t) / t = -c_w - V_s$ 。这符合相对矢量相减关系。在其它方向上，以波源为参照系的观测者观测到的波速符合速度矢量多边形的相减关系。即波源为参考系的观察者观察到的波速为

$$\vec{c}'_w = \vec{c}_w - \vec{V}_s \quad (7)$$

如果观察者相对于波源运动速度为  $V_o$ ，根据波速的相对矢量相减关系，则上式还要减去观察者

相对于波源的运动速度  $V_o$ ，则上式为

$$\vec{c}'_w = \vec{c}_w - \vec{V}_s - \vec{V}_o \quad (8)$$

如果均匀介质的整体移动速度为  $V_m$ ，则介质拖动波整体移动。根据波速叠加的矢量相加关系，那么就还要加上介质的整体移动速度  $V_m$ ，上式为

$$\vec{c}'_w = \vec{c}_w - \vec{V}_s - \vec{V}_o + \vec{V}_m \quad (9)$$

如果观察者静止，就意味着观察者以速度  $-V_s$  相对于光源向相反的方向运动，根据波速的相对矢量相减关系，这个公式就还要减去速度  $-V_s$ 。

$$\vec{c}'_w = (\vec{c}_w - \vec{V}_s - \vec{V}_o + \vec{V}_m) - (-\vec{V}_s) = \vec{c}_w - \vec{V}_o + \vec{V}_m \quad (10)$$

这个计算结果表明，观察者观察到的光速不变，与光源的运动速度  $V_s$  无关(不含  $V_s$  了)。

如果观察者以速度  $V_m$  运动，则上式就变为**波速叠加通式**：

$$\vec{c}'_w = \vec{c}_w - \vec{V}_o + \vec{V}_m \quad (6')$$

例如，在  $x$  的正方向，静止的观察者看到的光速是  $c'_w = (c_w - V_s) - (-V_s) = c_w$ ；在  $x$  的负方向，静止的观察者看到的光速是  $c'_w = (-c_w - V_s) - (-V_s) = -c_w$ 。

该公式应用了上述运动或波速的相对和叠加定律，其速度参数包括波速相对性的矢量相减关系和波速叠加的矢量相加关系。

## 七、波的多普勒效应与波障

当波源相对于介质运动时，就会出现多普勒效应。点波源波在介质中产生球面波。如果波源运动，就会挤压前面的波前，使波长变短，频率变高，产生蓝移。同时后波前变得稀疏，波长变长，频率变低，产生红移。

假设观测者静止，波源运动，观察结果如图 4 所示。有四种情况。

**7.1** 波源速度小于波速  $V_s < c_w$ ，偏前的波产生蓝移，频率变高；偏后的波产生红移，频率变低，如图 4(1)。

**7.2** 波源速度等于波速  $V_s = c_w$ ，偏前的波产生蓝移，频率变高。所有的波阵面都在前端与波源拥挤在一起，波的密度达到最大，产生波障(音障或光障)现象。偏后的波产生红移频率变低，仅达到原来的一半，如图 4(2)。

假设一个观察者静止在图 4(2)中最右边的位置上，波源在每个点发出的波都同时传播到这个点。此时，观测者可以同时看到各个位置的波源，视速度为无穷大。也就是说，波源经过各个点，发生连续位移  $\Delta S \neq 0$ 。而观察者观察到的波都是同时到达的，即  $\Delta t = 0$ ，所以有  $V_a = \Delta S / \Delta t \rightarrow \infty$ ，观察者看到的波源的速度是无穷大。

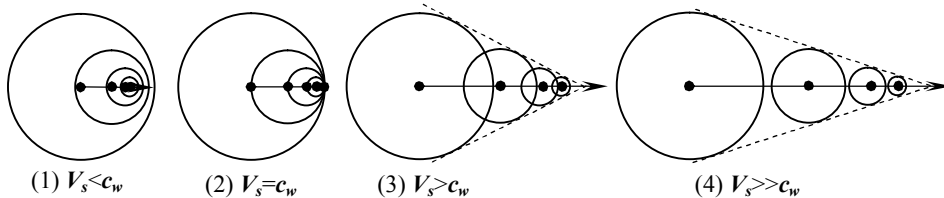
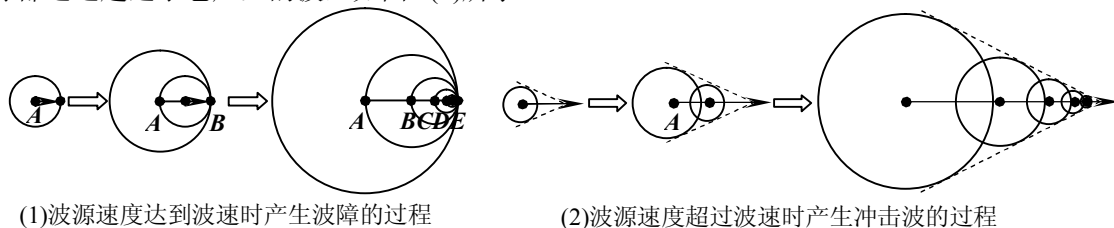


图 4 波的多普勒效应和激波

**7.3** 波源速度大于波速  $V_s > c_w$ ，所有波前都集中在后端的锥形区域，波的密度也很高。每时每刻，波源都超越了它产生的波。波源突破波障后形成的现象，称为激波(冲击波)，如图 4(3)。此时，波前前方的观察者观察到波源的视速度为负。波源超越过波障形成激波后，激波前沿区域的超波速观察者就无法观测到波信号了。

**7.4** 当波源速度远大于波速  $V_s \gg c_w$  时，波峰的密度变得很小，各球面波没有交点。在每个时刻，波源都远远超过了它产生的波，如图 4(4)所示。



(1)波源速度达到波速时产生波障的过程

(2)波源速度超过波速时产生冲击波的过程

图 5. 产生波障和冲击波的过程

当波源静止，观测者运动时，也会观测到多普勒效应。例如，行驶车辆中的人听到路边静止物

体的声音。波速是可以被超越的，超波速是非常普遍的现象(包括超光速)。

当波源运动时，每个时刻每个位置产生的波是独立的，以相同的速度传播。当波源的移动速度达到波速时，并且当波源从  $A$  点移动到  $B$  点时， $A$  点产生的波前也传播到了  $B$  点。这时可以认为波源在  $B$  点开始产生另一个波(当然，波源在运动过程中也在不断产生一系列的波)。 $B$  点波源产生的波向四周传播，同时  $A$  点产生的波也向四周传播。当在  $B$  点产生的波向左传播到  $A$  点并且也向右传播到  $C$  点时，在  $A$  点产生的波正好传播到  $C$  点以重合。因此，后面产生的每个波前都经过前一个波前的中心，所有的波前都叠加在最前面，形成一个波障，如图 5(1)所示。当波源的速度超过波速时，后面产生的每个波前都会超过前一个波前的中心，形成冲击波，如图 5(2)所示。

## 八、静止观察者的观察视角效应

### 8.1 视速度

曾纪晴在文【1】中引入了“光测速度”的概念，认为光测速度与实际速度之间的误差与观测物体运动的位置有关，是一种“观测位置效应”。

本文对文献【1】中“光测速度”的概念及波传播的特性进行了深入分析。假设波源以速度  $V_s$  移动，并以速度  $c_w$  连续发射球面波。 $A$  点和  $B$  点之间的距离为  $S$ ，当波源从  $A$  点匀速运动到  $B$  点时，观察者  $C$  观察到的是波信号，图中的弧线就是波前。观察者  $C$  到  $A$  点和  $B$  点的距离分别为  $S_A$  和  $S_B$ ，波源在  $A$  点和  $B$  点的时间分别为  $t_a$  和  $t_a+S/V_s$ 。观察者  $C$  在时间  $t_a+S_A/c_w$  探测到来自  $A$  点的波信号，在时间  $t_a+S/V_s+S_B/c_w$  探测到来自  $B$  点的波信号，如图 6 所示。那么  $A$  点和  $B$  点的波传播到点  $C$  的时间间隔为：

$$\Delta t = (t_a + \frac{S}{V_s} + \frac{S_B}{c_w}) - (t_a + \frac{S_A}{c_w}) = \frac{S}{V_s} + \frac{S_B - S_A}{c_w} \quad (11)$$

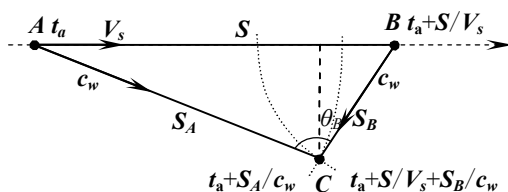


图 6. 视速度

如果观察者和物体一起运动，跟随观察物体的运动，结果才是真实的运动情况。用其他观察方法观察到的都不是真实的，而是扭曲的。就像看到(观察到)的“像”一样，有实像、虚像、正像、倒像、放大像、缩小像、同步变形像、扭曲变形像(哈哈镜)。洛伦兹变换不过是扭曲变形的哈哈镜。

那么， $A$ 、 $B$  两点间距离  $S$ ，运动速度  $V_s$ ，时刻  $t_a$  和  $t_a+S/V_s$  才是物体真实的运动情况。

如果把观察者  $C$  检测到的波信号作为观察物体运动的手段，我们实际上能观察到的就是物体发出的波信号。因为波的传播需要时间，所以检测到它在  $A$  和  $B$  两个点发出的波信号，并传播到观察者的  $C$  点的时间要滞后于实际时间。这种方法得到的物体运动只是观察效应，并不是物体的真实运动情况。

被探测物体的速度是通过  $A$  点和  $B$  点发出的波与传播到  $C$  点的时间间隔计算出来的，这样得到的速度称为视速度(表观速度) $V_a$ ，实际上，以非接触的方式观察物体的运动，只能通过物体发出的波信号来观察，只能得到它的视速度。

根据(11)式，由静止观察者  $C$  在点  $A$  和  $B$  之间检测到的物体的表观速度为：

$$V_a = \frac{S}{\frac{S}{V_s} + \frac{S_B - S_A}{c_w}} = \frac{V_s}{1 + \frac{S_B - S_A}{S} \cdot \frac{V_s}{c_w}} \quad (12)$$

假设波源从点  $A$  移动到点  $B$  的时间为  $t_s=S/V_s$ ，波从  $A$  到  $C$  的传播时间为  $t_A=S_A/c_w$ ，波从  $B$  到  $C$  的传播时间为  $t_B=S_B/c_w$ ，则(12)式为：

$$V_a = \frac{V_s}{1 + \frac{t_B - t_A}{t_s}} \quad (13)$$

波源以速度  $V_s$  从  $A$  点运动，并经过时间  $S/V_s$  后到达  $B$  点。如果已知视速度为  $V_a$ ，则从(12)式可得波源的真实运动速度  $V_s$  为：

$$V_s = \frac{V_a}{1 - \frac{S_B - S_A}{S} \cdot \frac{V_a}{c_w}} \quad (14)$$

## 8.2 在波源运动方向上观察的视速度

在波源运动方向上，观察者在 A 点，称为居后观察， $S=S_B$ ， $S_A=0$ ， $S_B-S_A=S$ ，则(12)式为：

$$V_a = \frac{V_s}{1 + \frac{V_s}{c_w}} = \frac{c_w V_s}{c_w + V_s} \quad (15)$$

在波源运动方向上，观察者在 B 点，称为居前观察， $S=S_A$ ， $S_B=0$ ， $S_B-S_A=-S$ ，则(12)式为：

$$V_a = \frac{V_s}{1 - \frac{V_s}{c_w}} = \frac{c_w V_s}{c_w - V_s} \quad (15')$$

如果已知观察到的波源的视速度  $V_a$ ，则可以获得波源的真实运动速度  $V_s$ ，其逆变换(14)式为：  
居后观察：

$$V_s = \frac{V_a}{1 - \frac{V_a}{c_w}} \quad (14'-1)$$

居前观察：

$$V_s = \frac{V_a}{1 + \frac{V_a}{c_w}} \quad (14'-2)$$

(15)和(15')式的图象如图 7，图象中的每一点都有明确的物理意义。运动速度  $V_s$  和视速度  $V_a$  的取值范围都在  $-\infty \sim +\infty$ ，它们都经过原点  $O$ ，两条渐近线是  $V_a = \pm c_w$  和  $V_s = \pm c_w$ ，渐近线的无穷远点对应着波源速度达到波速  $V_s = c_w$ 。

当波源运动方向反向时，图 7 中 A、B 两点位置互换，也就是两坐标轴都反向。即图象的左半轴  $-V_a = -V_s / (1 + (-V_s) / c_w)$  (图 7(1))，变换为图象的右半轴  $V_a = V_s / (1 - V_s / c_w)$  (图 7(3))。图 7(1)和图 7(3)以原点  $O$  为中心，具有中心对称性，所以只需要分析图象的右半轴即可。

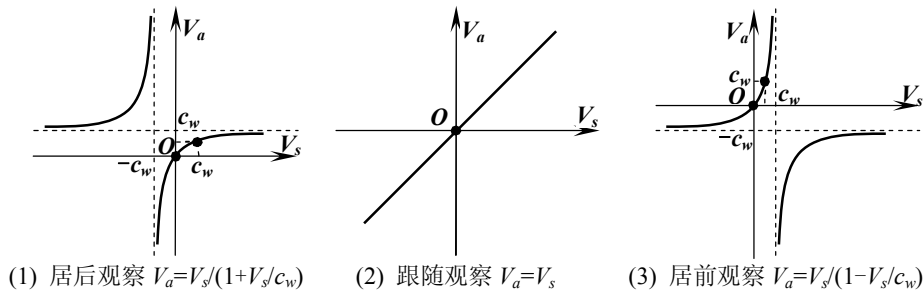


图 7. 在波源运动速度方向上，视速度-运动速度  $V_a = V_s / (1 \pm V_s / c_w)$  的图象

实际上，如果波源是运动的，就没有固定的 A 点和 B 点。观察者只要在波源的后方观察，都可当作 A 点，这称为居后观察。只要观察者在波源的前方观察，都可当作 B 点，这称为居前观察。只要观察者跟随波源一起运动，都可当作中点，这称为跟随观察。

**8.2.1 居后观察**，观察者在波源处 A 点，波源的视速度都不会超过波速  $V_a < c_w$ 。当波源运动速度达到波速时  $V_s = c_w$ ，由(15)式可知，其视速度只达到波速的一半  $V_a = c_w / 2$ 。当波源运动速度趋近于无穷大时  $V_s \rightarrow \infty$ ，由(14)式可知，其视速度只趋近于波速  $V_a \rightarrow c_w$ 。如图象 7(1)。

**8.2.2 跟随观察**，观察者跟随波源一起运动，即其视速度与波源运动速度相等，观察到的速度为真实速度  $V_a = V_s$ ，如图象 7(2)。

**8.2.3 居前观察**，观察者在波源前方 B 点，有几种情况。当波源运动速度达到波速的一半时  $V_s = c_w / 2$ ，由(15')式可知，其视速度就可以达到波速  $V_a = c_w$ 。当波源运动速度在  $c_w / 2 < V_s < c_w$  范围时，由(15')式可知，其视速度都不会低于波速  $V_a > c_w$ 。

当波源运动速度达到波速时  $V_s = c_w$ ，由(15')式可知，其视速度就可以趋近于无穷大  $V_a \rightarrow \infty$ ，此时将出现波障现象。当波源运动速度超过波速时  $V_s > c_w$ ，由(15')式可知，其视速度为负值，并趋近于负无穷大。随着波源运动速度增大，其视速度值(绝对值)反而减小，此时出现了激波现象。

当波源运动速度远远大于波速时  $V_s \gg c_w$ ，其视速度为负值，且趋近于渐近线  $V_a = -c_w$ 。其视速度值(绝对值)不会低于波速，并且平稳地趋近于波速  $|V_a| \rightarrow c_w$ 。如图象 7(3)。

当波源的速度远大于波速时， $V_s \gg c_w$ ，其视速度为负，并趋近于渐近线  $V_a = -c_w$ 。它的视速度(绝



对值)不会低于波速, 会平滑地逼近波速 $|V_a| \rightarrow c_w$ 。例如图像 7(3)。

### 8.3 在波源运动的其它方向上观察到的视速度

波源运动时依次经过各点, 不断发出的球面波均传播到观察者  $C$  点, 观察者到各点方向与竖直方向的视角分别为  $\theta_A$  和  $\theta_B$ , 如图 6。当  $\theta_A < \theta_B$  时, 称为偏后观察, 当  $\theta_A = \theta_B$  时的那一瞬间, 称为居中观察, 当  $\theta_A > \theta_B$  时, 称为偏前观察。设观察者到波源运动方向的距离为  $d$ , 则  $S_A = d / \cos \theta_A$ ,  $S_B = d / \cos \theta_B$ 。

当波源以速度  $V_s$  从  $A$  点运动时, 实际上并没有固定的  $B$  点, 经过时间  $S / V_s$  后到达  $B$  点。此时刻波前传播到了  $C$  点, 处于此时刻波前的观察者  $C$  正好检测到波源在  $A$  点发出的波信号, 则有  $S / V_s = S_A / c_w$ 。将  $S_A = S c_w / V_s$  代入(11)式, 就得到观察者  $C$  检测到的物体的视速度为:

$$V_a = \frac{S}{S_B} c_w = \frac{S_A}{S_B} V_s = \frac{\cos \theta_A}{\cos \theta_B} V_s = \frac{S}{t_B} = \frac{t_A}{t_B} V_s \quad (16)$$

可以看出, 观察到波源的视速度, 与观察者到波源运动方向的距离无关, 而只与观察者的视角有关。当观察者处于不同位置且视角相同时, 观察到的视速度都相同。如果波源做匀速运动, 那么静止观察者观察到波源的视速度, 却是非均匀的可变速度。视速度与波源的运动速度之比, 等于观察视角的余弦之比。观察到的视速度, 是一种观察视角效应, 我们称  $\cos \theta_B / \cos \theta_A$  为观察视角效应因子, 那么, 视速度就等于波源的运动速度乘上观察视角效应因子。

当波源移动到  $A$  点和  $B$  点时, 发出的波的波前依次到达观察者  $C$  点。对于图 7 中的两条弧线的交点, 视速度的范围在  $V_s / (1 + V_s / c_w) \leq V_a \leq V_s / (1 - V_s / c_w)$  之间。其图象为图 7 中三个图象合并在一起后, 与渐近线围成的区域, 如图 8。

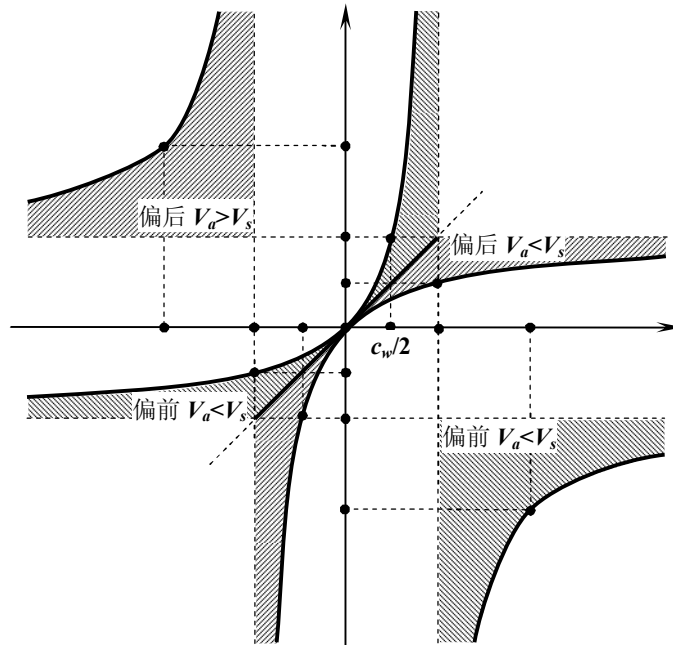


图 8. 不在波源运动方向上观察到的波源的视速度, 范围在  $V_s / (1 + V_s / c_w) < V_a < V_s / (1 - V_s / c_w)$  之间

8.3.1 偏后观察,  $V_s / (1 + V_s / c_w) \leq V_a \leq V_s \leq c_w$ , 视速度小于波源运动速度, 且小于波速;

8.3.2 居中观察,  $V_a = V_s \leq c_w$ , 视速度等于波源运动速度, 且小于或等于波速;

8.3.3 偏前观察,  $V_s \leq V_a \leq V_s / (1 - V_s / c_w)$ , 视速度始终大于波源的运动速度。当波源运动速度达到波速时  $V_s = c_w$ , 视速度趋近于无穷大  $V_a \rightarrow \infty$ , 此时出现波障现象。当波源运动速度超过波速时  $V_s > c_w$ , 视速度为负值  $V_a < 0$ , 此时出现激波现象。

## 九、运动观察者的观察视角效应

波源以速度  $V_s$  从  $A$  点运动到  $B$  点的过程中, 观察者从  $D$  点以速度  $V_o$  同方向运动到  $E$  点。波源在  $A$ 、 $B$  两点发出的波, 经过  $D$  点和  $E$  点后继续传播, 相交于  $C$  点, 如图 9。

设  $AB = S$ ,  $AD = S_A$ ,  $BE = S_B$ ,  $DE = S_o$ ,  $DC = S_C$ ,  $EC = S_D$ , 由相似三角形  $\triangle ABC$  和  $\triangle DEC$  关系可得:

$$\frac{S}{S_o} = \frac{S_A + S_C}{S_C} = \frac{S_B + S_D}{S_D} \quad (17)$$

$$\frac{S_A}{S_B} = \frac{S_C}{S_D} \quad (18)$$



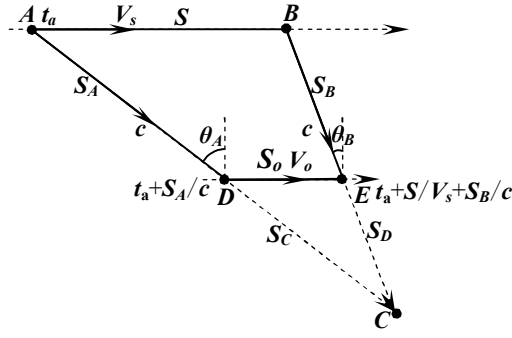


图 9. 运动观察者的观察视角效应

以 C 点为第二个观察者，观察者 D 点也作为波源，在 C 点观察运动波源 A 点和 D 点的视速度。在 D 点观察到的波源 A 的视速度设为  $V_{a(D \rightarrow A)}$ ，在 C 点观察到的波源 A 的视速度设为  $V_{a(C \rightarrow A)}$ ，在 C 点观察到运动观察者 D 的视速度为  $V_{a(C \rightarrow D)}$ 。当波源从 A 点发出的波前传播到运动观察者 D 点时，观察者刚好运动 D 点。当波源运动到 B 点时，波源 A 点发出的波前传播到 E 点，此时观察者刚好运动到 E 点。两者时间间隔相同，即  $\Delta t = S/V_s + (S_B - S_A)/c_w = S_o/V_o$ ，则运动观察者 D 观察到波源 A 的视速度为

$$V_{a(D \rightarrow A)} = \frac{S}{\frac{S}{V_s} + \frac{S_B - S_A}{c_w}} = \frac{S}{S_o} V_o \quad (19)$$

结合(11)、(16)、(17)和(18)式，在 D 点观察到的波源 A 的视速度为：

$$V_{a(D \rightarrow A)} = \frac{S}{\frac{S}{V_s} + \frac{S_B - S_A}{c_w}} = \frac{V_s}{1 + \frac{S_B - S_A}{S} \cdot \frac{V_s}{c_w}} = \frac{S}{S_B} c_w = \frac{S_C}{S_D} V_s = \frac{S_A}{S_B} V_s = \frac{S}{S_o} V_o = \frac{\cos \theta_B}{\cos \theta_A} V_s \quad (20)$$

在 C 点观察到的波源 A 的视速度为

$$\begin{aligned} V_{a(C \rightarrow A)} &= \frac{S}{\frac{S}{V_s} + \frac{S_B + S_D - S_A - S_C}{c_w}} = \frac{V_s}{1 + \frac{S_B + S_D - S_A - S_C}{S} \cdot \frac{V_s}{c_w}} \\ &= \frac{c_w S}{S_B + S_D} = \frac{V_s (S_A + S_C)}{S_B + S_D} = \frac{S_C}{S_D} V_s = \frac{S_A}{S_B} V_s = \frac{S}{S_o} V_o = \frac{\cos \theta_B}{\cos \theta_A} V_s = V_{a(D \rightarrow A)} \end{aligned} \quad (21)$$

在 C 点观察到的观察者 D 的视速度为

$$V_{a(C \rightarrow D)} = \frac{S_o}{\frac{S_o}{V_o} + \frac{S_D - S_C}{c_w}} = \frac{V_o}{1 + \frac{S_D - S_C}{S_o} \cdot \frac{V_o}{c_w}} = \frac{S_o}{S_D} c_w = \frac{S_C}{S_D} V_o = \frac{S_A}{S_B} V_o = \frac{\cos \theta_B}{\cos \theta_A} V_o \quad (22)$$

从(19)、(20)、(21)和(22)式可得

$$\frac{S_A}{S_B} = \frac{S_C}{S_D} = \frac{V_{a(C \rightarrow A)}}{V_s} = \frac{V_{a(C \rightarrow D)}}{V_o} \quad (23)$$

$$V'_a = V_{a(C \rightarrow A)} - V_{a(C \rightarrow D)} = \frac{S_A}{S_B} (V_s - V_o) = \frac{\cos \theta_B}{\cos \theta_A} (V_s - V_o) \quad (24)$$

$$\frac{V_{a(D \rightarrow A)}}{V_{a(C \rightarrow D)}} = \frac{V_s}{V_o} = \frac{\cos \theta_B}{\cos \theta_A} \quad (25)$$

(21)式也说明了，观察者在相同视角观察到的波源视速度都相同，而与观察距离无关。

(24)式为波源相对于运动观察者的视速度，即波源和观察者之间的相对视速度。运动观察者和静止观察者观察到的波源的视速度，等于速度相对矢量相减关系，再乘以观察视角效应因子。其图象相当于上述图 7 和图 8 平移了  $V_o$ ，图略。

如果波源和观察者的位置互换，由于视角相同且方向相反，那么观察到的视速度也是大小相等且方向也相反的。即：

$$V_{a(D \rightarrow A)} = -V_{a(A \rightarrow D)} \quad (26)$$

如果观察者的运动方向是任意的，与波源的运动方向有一个角度  $\alpha$ ，则取与波源的运动方向上的速度分量  $V_o \cos \alpha$  来计算观察到的视速度，而垂直方向上的速度分量  $V_o \sin \alpha$  对观察到的视速度没有

影响，则(24)和(25)式分别为：

$$V'_a = V_{a(C \rightarrow A)} - V_{a(C \rightarrow D)} = (V_s - V_o \cos \alpha) \cdot \frac{\cos \theta_B}{\cos \theta_A} \quad (27)$$

$$\frac{V_{a(D \rightarrow A)}}{V_{a(C \rightarrow D)}} = \frac{V_s}{V_o \cos \alpha} = \frac{\cos \theta_B}{\cos \theta_A} \quad (28)$$

可以看出，运动观察者观察到的视速度也是一种观察视角效应，运动观察者观察到波源的视速度，等于运动观察者的视速度乘以视角效应因子  $\cos \theta_B / \cos \theta_A$ 。与上述静止观察者观察到的视速度相同。

由(24)式可以看出：

**9.1** 当观察者静止时  $V_o=0$ ，或观察者运动速度远远小于波源运动速度时  $V_o \ll V_s$ ，则观察到波源的视速度为  $V_{a(C \rightarrow A)} = V_s \cos \theta_B / \cos \theta_A$ ，即为上节静止观察者的观察视角效应的情况。

**9.2** 当运动观察者速度小于波源运动速度  $0 < V_o < V_s$  时，则观察到的波源的视速度，小于观察者静止时观察到的波源的视速度  $V'_a < V_a$ 。

**9.3** 当运动观察者速度等于波源运动速度时  $V_o = V_s$ ，则  $V'_a = V_{a(C \rightarrow A)} - V_{a(C \rightarrow D)} = 0$ ，两者视速度相等  $V_{a(C \rightarrow A)} = V_{a(C \rightarrow D)}$ 。两者相对静止，相对视速度为零  $V'_a = 0$ ，此时运动观察者观察到的波源视速度才是波源真实的运动速度，观察者和波源之间虽然相距很远，也属于一种跟随观察。当观察者速度大于波源速度时  $V_o > V_s$ ，则观察到波源的视速度方向相反  $V'_a < 0$ 。

**9.4** 当观察者静止时  $V_o = 0$ ，则波源的相对视速度为  $V'_a = V_s \cos \theta_B / \cos \theta_A = V_a$ ，即为(16)式，波源的相对视速度成为波源的视速度。

**9.5** 当波源静止时  $V_s = 0$ ，则波源的相对视速度为  $V'_a = -V_o \cos \theta_B / \cos \theta_A$ ，波源的相对视速度与波源的视速度方向相反。

**9.6** 当观察者和波源在同一直线上运动时，则  $\cos \theta_B = \cos \theta_A = 1$ ，波源和观察者之间的相对视速度为  $V'_a = V_{a(C \rightarrow A)} - V_{a(C \rightarrow D)} = V_s - V_o$ ，为相对运动关系，即观察者速度和波源速度的相对性矢量相减关系：

$$\vec{V}'_a = \vec{V}_s - \vec{V}_o \quad (29)$$

**9.7** 由(25)式可看出：运动波源的视速度和运动观察者的视速度之比，等于两者的运动速度之比，也等于观察视角效应因子。

**9.8** 已知观察者的运动速度  $V_o$ ，如果已观察到的波源的相对视速度  $V'_a$ ，并且测出观察视角  $\theta_A$  和  $\theta_B$ ，则由(24)式的逆变换，可得波源的真实运动速度  $V_s$ (逆变换)为：

$$V_s = V_o + V'_a \cdot \frac{\cos \theta_A}{\cos \theta_B} \quad (30)$$

## 十、观察视角的时序倒置和非同时性问题

当波源运动速度大于波速时，居前观察者或偏前观察者先接收到波源到达终点时发出的波信号，而后接收到波源从起点时发出的波信号，出现了观察时序倒置现象，此时观察到波源的视速度为负值。但是这种时序倒置现象都只是以波为信使时的观察视角效应，而不是真实发生了时序倒置。

子弹飞到了目标以后，枪声才传播到人耳；超音速飞机飞到了目的地后，声音都还未传到；快艇早已靠岸了，而出发点的水波却无法传播到岸。这些都是普遍现象。

实际场景中有很多物体，当它们静止时，会一直不断地发出许多波信号(如光波信号)。这些波信号传播到观察者处需要时间，只有与观察者距离相等的物体同时发出的波信号才是同时到达观察者的。然而与观察者距离不相等的物体同时发出的波信号都不是同时到达观察者的。

所有的场景都是同时看到的，但是只有那些离我们同样距离的场景发出的光才是同时发出的。我们同时看到的那些远近不同的景物，都不是同时发出光的。

物体运动时不断发出波信号，每一时刻发出的波信号彼此独立，这些波信号依次传播到静止观察者处的距离都不相同，所需时间也不相同，所观察到的波信号都不是同时发出的。

许多物体以相同的速度和方向运动，它们发出的波信号依次传播到静止观察者。只有那些与观察者距离相等的物体，同时发出的波信号，才是同时到达观察者的。而那些与观察者距离不相等的物体，它们同时发出的波信号都不是同时到达观察者的。

发生的任何事件，都以光波的形式向外传播光信号，使我们看到事件的发生。我们看到事件同时发生，其实各个事件并不一定是同时发生的。观察者距事件的距离不同，事件的发出光同时射入观察者眼中，看到了事件同时发生，可是真实的事件并不是同时发生的。我们耳朵听到的、眼睛看到的、仪器检测到的世界，都不是真实的世界，都只是观察视角效应。

## 十一、超波速现象实例

产生水波和声波的物体，以水波和声波的传播速度运动是常见的现象，以超过水波传播速度和

声波传播速度运动也是常见的现象。在核反应装置中经常发生的切伦科夫辐射【2】，就是在水中运动的高能电子速度超过光在水中的传播速度。

对于光源以光速运动，甚至以超光速运动，已有很多发现，如中微子超光速现象【3~5】，类星体超光速现象【6~8】。虽然在这方面有大量的研究【6~11】，然而却从来没有给出过一个令人信服的物理解释【3】。

用本文的理论可以很好地解释这些现象。切伦科夫辐射的高能电子运动速度肯定超过光在水中的传播速度，同水中行船超波速的情况相同，在此不作详细解释。现以光波为例解释类星体超光速现象。在地球上观察天体时，天体以各种速度向各个方向作复杂运动，地球上的观察者不可能跟随这些天体一起运动，地球也不可能与天体等速同向运动，也就不可能观察到天体的真实运动速度，只能观察到天体的视速度。

观察天体远离地球的运动，就是居后观察或偏后观察。由图 7(1)和图 8 可知，即使天体的真实运动速度达到了光速甚至超光速，观察到的视速度都小于天体的真实运动速度，并且不会超过光速，但这并不排除天体的真实运动速度超过了光速。

只有当天体向地球方向运动时，也就是居前观察或偏前观察时，由图 7(3)和图 8 可知，观察到的视速度才能大于天体的真实运动速度。当天体向地球方向的运动速度小于光速时，观察到的视速度都要大于天体的真实运动速度。当天体的真实运动速度达到光速的一半时，观察到的视速度就能够达到光速。如果只观察到了天体的视速度超过了光速，并不意味着天体真实运动速度超过了光速。

当天体向地球方向运动，当天体的真实运动速度达到光速时，观察到的视速度就趋近于无穷大了，此时产生了光障现象。当天体的真实运动速度超过光速时，天体就突破了光障，产生了光的激波。只有观察到了天体的光障现象，天体的真实运动速度才达到了光速。只有观察到了天体的光的激波现象，天体的真实运动速度才超过光速。地球运动速度远远小于巨大天体的运动速度时，由(27)式可知，观察到的巨大天体的视速度也远远小于其真实的运动速度。

对于类星体超光速现象，现在还只是观察到了视速度超光速现象，其真实运动速度是否超过了光速，需要进一步观察类星体是否产生了光障现象或光激波现象后，才能够确定。

## 十二、观察视角效应的技术应用

根据逆变换(14'-1)、(14'-2)式或(30)式，设计电子电路或程序的模块，加入到上述各种设备中，将已观察到的波源的视速度  $V_a$  转换为可处理的电信息输入到模块中，经过电子电路处理或程序计算后，输出波源的真实运动速度  $V_s$ ，才是被观察物体的真实运动速度，如图(10)所示。其技术应用前景非常广泛。

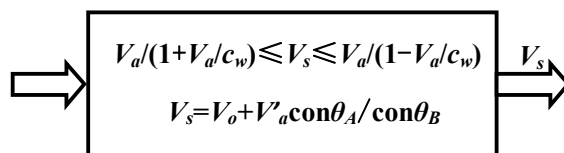
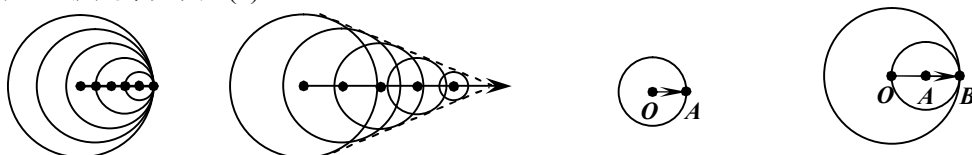


图 10. 真实运动速度-视速度转换模块

### 附录：相关资料中的音障和冲击波的示意图都有误

相关资料【12】中的音障和冲击波的示意图都有误，本文图 4(2) 和图 4(3)才是正确的，分析如下。

波源运动时，在每个时刻每个位置产生的波都独立并等速传播，波源运动速度达到波速时，波源从  $O$  点运动到  $A$  点时，在  $O$  点处产生的波的波前也传播到了  $A$  点，此时刻波源在  $A$  点处开始产生另一个波，(当然波源在运动过程中都在不断产生一系列波)，如附录图(3)。波源在  $A$  点处产生的波向四周传播，此时在  $O$  点产生的波也同时等速向四周传播，当在  $A$  点处产生的波向左传播到  $O$  点的同时也传播到了  $B$  点，此时在  $O$  点产生的波也刚好传播到了  $B$  点处重合。这样，波源在运动过程中不断产生的一系列波的波前都在波源处重合，形成波障，如附录图(4)。波障示意图中，每个后面的圆都经过前面那个圆的圆心，就是本文图 4(2)。冲击波示意图中，每个后面的圆都超过前面那个圆的圆心，就是本文图 4(3)。



(1)资料中音障示意图 (2)资料中冲击波示意图 (3)波源速度达到波速时产生的波障的过程 (4)波源速度达到波速时产生的波障的过程

附录图 波障示意图

## 致谢:

本文作者感谢福州原创物理研究所梅晓春所长的大力支持和帮助  
本文作者感谢中国科学院曾纪晴博士的有益讨论

## 参考文献

- 【1】 Zeng TH, Zeng JQ. The optical measurement speed of moving bodies and the observer's position effect. *Physics Essays*, 2023, 36(1):94-99  
<http://physicsessays.org/browse-journal-2/product/2005-13-tianhe-zeng-and-jiqing-zeng-the-optical-measurement-speed-of.html>
- 【2】 陈钢, 超光速电子切仑柯夫发射线与类星体辐射的关系[J], *四川师范大学学报(自然科学版)*, 1988(04):55-61
- 【3】 闫岩, 光速现在安全了[J], *科学新闻*, 2012(3): 18-18,
- 【4】 冯志文, 中微子超光速实验重启[N], *科技日报*, 2011-10-31
- 【5】 宋斌, 中微子速度挑战相对论[N], *光明日报*, 2011-9-29
- 【6】 钱善璿, Krich ba um, T.P.Witzel,等, 3C345 VLBI核心的可能的视超光速运动[J], *天文学报*, 1992(04)
- 【7】 罗辽复, 须重明, 超光速膨胀现象[J], *自然杂志*, 1987(07):25-28+82
- 【8】 陈建生, 类星体3C273的超光速膨胀[J], *自然杂志*, 1981(10):68+84
- 【9】 黄志洵.《超光速研究——相对论,量子力学,电子学与信息理论的交汇点》[J]. *中国传媒大学学报: 自然科学版*, 1999(4):30-30.
- 【10】 杨新铁.超光速现象理论基础探讨[J]. *北京石油化工学院学报*, 2002, 10(4): 27~32
- 【11】 王育竹, 光的群速减慢和超光速研究[A], *中国光学学会 2004 年学术大会论文集[C]*, 2004 年
- 【12】 宋明玉, *大学物理(第 3 版)*, 清华大学出版社, 112, (图 5.22 马赫锥)

370773476@qq.com  
2021 年 11 月 5 日