

## 反常色散介质“超光速”现象研究的新进展\*

张元仲

(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

**摘要** 文章介绍了王力军等人的光脉冲在反常色散介质中传播实验的测量结果,说明了实验测量的不完全性,因而它不可能在是否超光速的问题上给出明确的答案.文章还介绍了近一年来相应的理论研究工作.文章作者依据物理概念和理论研究结果论证了该实验所得的负群速度本身并不超光速;如果把负群速度看成是某种能量的传播,那么超光速出现在负群速度开始时的瞬间,因而它是超距作用,违反能量守恒或动量守恒.因此,负群速度只是表观速度,能流的研究结果也证明了这一点.这就是说,该实验并没有观察到超光速传播.

**关键词** 反常色散介质,超光速,负群速度

## ON “SUPERLUMINAL” LIGHT PROPAGATION IN ANOMALOUS DISPERSION MEDIUM

ZHANG Yuan Zhong

(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** The experimental results by Wang *et al.* concerning pulsed light propagation in an anomalous dispersion medium are reviewed. We argue that the incomplete measurements make the determination of the light propagation velocity impossible. The results of recent theoretical studies are also discussed. According to basic physical concepts and theoretical results we conclude that the negative group velocity itself is not superluminal. If the negative velocity were regarded as that of some energy, superluminal propagation would occur at the beginning instant of the negative group velocity propagation so that it is an action at distance which would violate causality and energy (or energy flow) conservation laws. Thus the negative group velocity is simply an apparent velocity as we shall show from the study of energy flow. This implies that no superluminal propagation was observed by Wang *et al.*

**Key words** anomalous dispersion medium, superluminal, negative group velocity

2000年7月20日英国的《自然》杂志第277页上发表了王力军、Kuzmich和Dogariud等人的文章<sup>[1]</sup>,题目是“Gain-assisted Superluminal Light Propagation”<sup>[1]</sup>(增益超光速光脉冲传播),报道了他们的测量结果:铯原子气体在反常色散区域的群速度折射指数是-310;进入铯原子气体的光脉冲比真空中的光脉冲超前62ns通过气体池.

王力军等人所观测到的光脉冲传播到底是不是超光速传播?违背不违背因果律?与狭义相对论是否矛盾?这些都是公众最为关心的问题.但是,无论怎么仔细阅读这篇论文,不同的读者都很难对上述问题获得统一的答案.例如,在王等人的文章发表之后,一些作者使用傅里叶频谱分析方法对上述实验所涉及的反常色散介质中光脉冲传播的行为在理论

上进行了进一步的深入研究,这些研究包括普林斯顿大学的K.T.McDonald<sup>[2]</sup>、华盛顿DC的P.Sprangle等人<sup>[3]</sup>、王力军及其合作者<sup>[4]</sup>、以及我们的工作<sup>[5,6]</sup>.

\* 2001-04-13收到

- 1) 在同一期《自然》杂志第243页上,还发表了J.Marangos的题为“Faster Than a Speeding Photon”的评论文章,文中引述了社会上流传的一首打油诗,曰:“有一位女孩叫明亮,她的速度远比光速快,一天她要离家外出,按照相对论,她在前一天晚上就回到了家”.但是,这种违反因果律和能量守恒律的现象绝非相对论的科学预言,而是诗人的无限引伸和丰富的幻想.《自然》杂志被认为是国际上第一流的学术刊物,有着广泛的包括青年学生在内的非专业读者.把“诗人的幻想”作为科学预言收入到科学论文之中并在《自然》上发表,这种不严肃的做法既有损科学家和科学杂志的形象,又会误人子弟.

但是,在是不是超光速传播这个核心问题上,其结论大不相同:王力军及其合作者的结论似乎是肯定的;而其他作者的结论则是否定的.

知道了这些信息之后,人们会自然地提出这样的问题:同样的实验数据为什么会引出完全不同的解释?同样的物理模型为什么会产生完全不同的图像?本文试图通过对实验数据的分析并依据理论研究的结果回答这些疑问.简而言之,实验测量的不完全和理论模型的缺欠给人们留下了太多的想象空间.

**实验测量装置和原理:**王力军等人的实验使用的介质是 6cm 厚的铯原子气体池,其中有两束连续的激光穿过气体池使铯原子气体处于粒子数反转状态(我们把这两束光简称为泵浦光).当另一束激光(用来检测铯原子气体的光学性质,因而把它称为探测光束)通过气体池时,就会使铯原子从泵浦光中吸收光子而激发,随后又放出光子.这样一来就增强了那束探测光束(增益效应).这种机理使得铯原子气体表现出了如下的光学特性:不同频率(即不同颜色)的光在其中会有不同的增益和不同的速度.

**实验测量方法和测量结果:**(1)使用一束可调频的连续激光测得了铯原子气体中光波振幅的增益系数以及折射指数随光波频率的变化曲线(见图 1);(2)使两束光强接近于高斯分布的光脉冲(简称高斯光脉冲)穿过气体池,其中一束处于反常色散区域(因而,它的传播速度一般不同于真空中的光速  $c$ ),另一束与铯原子基本没有相互作用(因而,它会以真空光速  $c$  传播).放在气体池“出口”处的光电仪器记录下了这两个光脉冲通过气体池后的强度随时间的变化(见图 2).

由折射指数的变化曲线引出的结论:图 1 显示

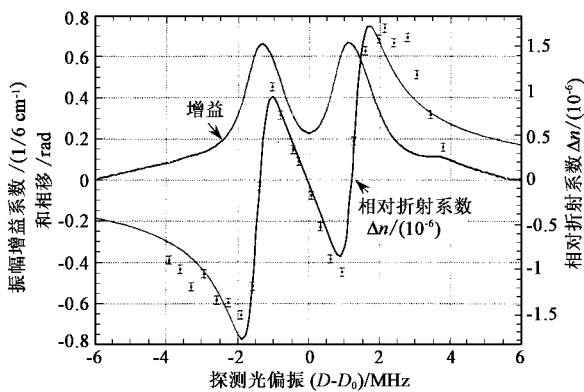


图 1 使用一束可调频的连续激光测得的铯原子气体中,光波振幅的增益系数以及折射指数随光波频率的变化曲线

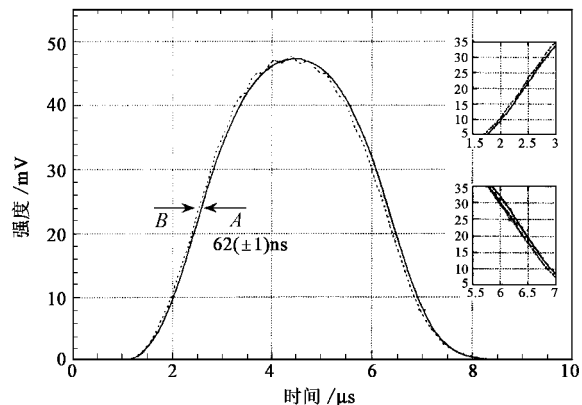


图 2 两个光脉冲通过气体池后的强度随时间的变化

的折射指数  $n$  随光波频率  $\nu$  的变化曲线包含了两类区域:正常色散区域(光波频率增加时,折射指数变大);反常色散区域(光波频率增加时,折射指数变小);上述第二项测量正是利用了铯原子气体的这种反常色散特性.一个光脉冲(或称波包)在通常的正常色散介质中传播时基本不会改变它的形状,或者说,光脉冲整体有一定的传播速度,这个速度就是群速度,定义为:  $u_g = c/n_g$ , 其中  $n_g = n + \nu dn/d\nu$  称为群速度折射指数,  $dn/d\nu$  是折射指数  $n$  随光波频率  $\nu$  的变化率.在现在的情况下,一个高斯光脉冲通过铯原子气体池后其形状会发生变化,这是因为存在色散和增益效应.由于脉冲形状发生了变化,所以脉冲的不同部分可能有着不同的传播速度.这样一来,群速度已不能简单地说是脉冲的传播速度了.尽管如此,我们仍可以按照定义并使用图 1 给出的折射指数曲线计算出群速度为:  $u_g = -c/(330 \pm 30)$ .这是个负的群速度,但其绝对值比真空光速  $c$  约小 330 倍.负号“-”是指其方向与入射方向相反,即反向“传播”.对这个负群速度如何理解是产生争议的根源之一(见下文).

由图 2 的两条测量曲线引出的结论:为了说明问题,我们使用“赛跑”作为例子.设有 A 和 B 两队运动员,每一队中的各个运动员互相靠近,按身高排列使得他们头顶的连线与图 2 中的实线一样(即图 2 中的纵轴代表身高,横轴代表运动员的前后次序).A 队的运动员都以相同的速度  $c$  跑完全程;B 队中的每位运动员以相同的速度  $c$  跑完前一段(相应于光脉冲进入铯原子气体池之前的真空),而以不相同的速度跑完后一段(相应于实验中的 6cm 厚的铯原子气体池),并且 B 队中的运动员的相对身高发生了变化.在终点有两位裁判员分别记录下 A 和

B 两队运动员依次到达的时间(即图 2 中的实线 A 和虚线 B)。

我们能从图 2 的测量结果判断哪一队运动员跑得更快吗?显然不能!因为 B 的运动员身高发生了变化,我们又不知道变了多少.就真实的运动员而言,可以对他们进行编号;但是,我们无法对一束光脉冲的不同部分进行编号.因此,图 2 中的实线 A 和虚线 B 之间的时间次序就会存在如下几种可能的情况(为了简单扼要,我们用图 3 代替图 2;在图 3 中虚线 B 上的半高点记为  $P_1$ ,实线 A 上的半高点记为  $P_2$ ;实线 A 上的点  $P_3$  与虚线 B 上的半高点  $P_1$  之间的连线垂直于横轴,即这两点同时到达终点):

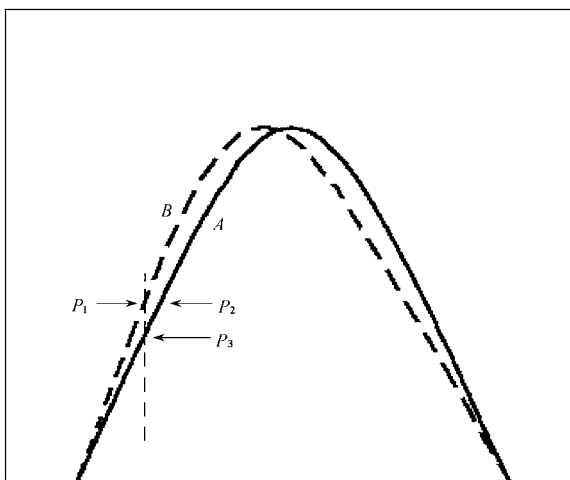


图 3

(1) 比较图 3 中的  $P_1$  点和  $P_2$  点: $P_1$  点比  $P_2$  点超前  $62 \pm 1 \text{ ns}$  ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ , 即十亿分之一秒) 到达气体池的出口,相当于群速度  $u_g = -c/(310 \pm 5)$ ;这和前面由图 1 算得的群速度  $u_g = -c/(330 \pm 30)$  在误差之内是一致的.王力军等人把这种“超前”归因于“在反常色散区域(高斯波包中)不同频率分量之间的经典相干性”(后面我们将说明这是对的);但是,他们又把虚线 B 说成是“超光速光脉冲传播”,这与上述经典相干性的解释相矛盾.

如果把超前  $62 \text{ ns}$  (即负的群速度)看成是某种真实的传播,那么它为什么是超光速?它会违反哪些物理定律?王力军博士在给定的信中坚持: $u_g = -c/330$  是类时的,但仍是超光速.他没有给出理由,我这里试着用图 4 进行解释.

图 4 中的点  $t_1$  到气体池入口( $t_0$  点)的距离是  $18.6 \text{ m}$  (以  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$  的真空光速走过这段路程需要  $62 \text{ ns}$ );在入射光脉冲  $E_A$  (忽略它的宽度)以真空光

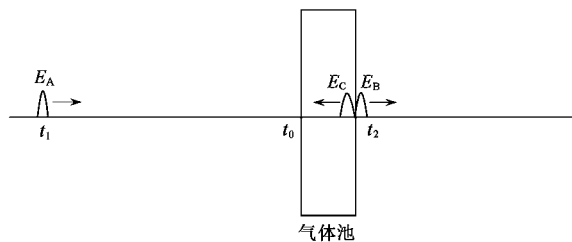


图 4

速由左向右传播到  $t_1$  点的一瞬间,气体池出口( $t_2$  点)马上出现了类似于入射光脉冲的两个光脉冲  $E_B$  和  $E_C$ ,其中  $E_B$  以真空光速向右传播,而  $E_C$  则以负群速度  $u_g$  向左传播; $62 \text{ ns}$  之后,  $E_C$  和  $E_A$  在气体池入口( $t_0$  点)汇合而互相抵消,此时  $E_B$  已朝前(向右)走了  $18.6 \text{ m}$ .在以上的讨论中,我们忽略了以真空光速通过  $6 \text{ cm}$  (气体池厚度)所用时间  $0.2 \text{ ns}$ .如果  $E_B$  和  $E_C$  能够被仪器探测到,那就是说它们有能量传给了测量仪器,他们代表着某种能量的传播.要使能量守恒,  $E_C$  的能量必须是负的;另一方面,若要使动量(能流)守恒,  $E_C$  的能量应该为正.因此,互相矛盾.从这种图像我们可以看出,“超光速传播”并不相应于负群速度本身(换句话说,  $E_C$  以负群速度往回的传播是亚光速,因为  $u_g$  的绝对值比真空光速小  $310$  倍);“超光速传播”应该发生在  $t_1$  点和  $t_2$  点之间:光脉冲  $E_A$  到达  $t_1$  点的一瞬间,  $t_2$  点马上出现光脉冲  $E_B$  和  $E_C$ .这显然是一种瞬时传播(即超距作用);正如上面说过的,它要么违反能量守恒,要么违反动量守恒;而且,在光脉冲  $E_A$  处于  $t_1$  点和  $t_0$  点之间的位置时,如果把铯原子气体池移走的话,那么在空间就会永远剩下相距  $18.6 \text{ m}$  的两个光脉冲  $E_A$  和  $E_B$ .此外,在下述意义上违反因果律:光脉冲  $E_A$  还没有到达气体池入口,它就离开了出口.所以,负的群速度不能代表某种实在的传播.再有,实验没有通过测量“运动员”  $P_1$  和“运动员”  $P_2$  到达  $t_0$  点的时间来判断它们是否同时“起跑”,因而也就没有可比性.所以说,王力军等人把“ $P_1$  点比  $P_2$  点超前  $62 \text{ ns}$ ”归因于超光速传播是缺乏依据的.

(2) 比较图 3 中的  $P_1$  点和  $P_3$  点:“运动员”  $P_1$  和“运动员”  $P_3$  同时到达  $t_2$  点,如果它们是同时进入气体池入口( $t_0$  点)的话,那么它们的速度相同,即激光脉冲在气体池中仍以真空光速  $c$  传播.同样,实验也没有测量这两个“运动员”的“起跑”时间.因而,也不能定论.

(3)比较图 3 中的  $P_1$  点和实线 A 上的其他点:这样的比较会给出与前两种情况不同的结果: $P_1$  点比实线 A 上的其他点或者快或者慢,而且一样不能定论.

理论研究结果:虽然由于实验测量不完全而不能确定上述 1, 2, 3 中的哪一种情况正确.但是,从物理概念上分析,最有可能的是上面的 2 和 3 而不是第 1 种情况,原因是存在非线性的变形.

包括反常色散在内的色散介质的研究可以追溯到物理学家索末菲(A. Sommerfeld)1907 年的工作,而后布里渊(L. Brillouin)于 1914 年做了进一步的研究<sup>[7]</sup>;他们的结论是:虽然光脉冲在色散介质中的群速度可以大于光在真空中的传播速度,也可以是无限大或是负值,但是信号传播的速度不会超过真空光速.到了八九十年代,许多物理学家从理论和实验两个方面继续研究了反常色散现象(参见文献[1]所引文献).

色散介质如果存在损耗,增益或者色散的改变率很大,那么光脉冲(波包)在其中传播时要变形.因此,如何表达变形波包的传播速度则成为一个复杂的问题.在理论上有 5 种不同的速度定义:相速度(真空光速除以折射指数)、群速度(前面已给出了定义)、信号(信息)速度、能量速度,以及波前(波头)速度.对于变形波包而言,群速度的物理意义不清楚;相反,信号速度的物理意义清楚,但难于定义.一般说来,群速度不能代表变形波包的信号(信息)速度和能量速度,更不能代表波前(波头)速度(理论研究的表明,波前速度仍然等于真空光速).什么是信号速度?回答这个问题得先弄清楚波包的构成:一列某一频率的正弦波(或余弦波),其振幅是常量(即不随时间改变);如果使这个波的振幅随时间做某种变化,那么它就成了波包;这个正弦波(或余弦波)称为载波,振幅随时间的变化称为调制(波形).广播电台发射的节目,就是把载波的振幅调制成了声音(信号)的波形.如果把一个波包看成是某种信号,那么只有在不变形的传播中波包的群速度才是信号速度.否则,信号都失真了,何谈速度.

对光脉冲(波包)的理论研究通常采用的是傅里叶频谱分析方法.一个高斯型的波包就是把载波的振幅调制成像一座孤立的“山峰”(如图 2 中的实线 A),当然严格说来它的“山脚”(即波头和波尾)应当延伸到无穷远处.按照傅里叶分析,这样的光脉冲的电场或磁场的强度是由无穷多个不同频率的正弦波叠加而成.介质的色散就是指不同频率的正弦波会

以不同的速度传播.所以,光脉冲通过介质后的变形是由于它所含的不同频率的正弦波(因速度不同)的错位以及非线性增益造成的,介质越厚变形越大,以至于面貌全非<sup>[5]</sup>.

由于实验中的铯原子气体池只有 6cm 厚,光脉冲的变形很小.但是,理论计算<sup>[3]</sup>表明,正是这很小的形变造成了图 2 中 B 曲线左移(即时间上前移)了 62ns.实验的原始数据并非如图 2 所示.具体地说,A 和 B 两条曲线的“波峰”并非一样高.为了使它们的相对位置看起来更直观而做了“归一化”:对其中一条曲线的纵轴乘上一个系数使得 A、B 两曲线的波峰一样高.当然,这需要找到图 2 中虚线“波峰”的精确位置.可是,B 曲线的顶部是明显的锯齿形,读者无法判断峰值在何处.我把此问题提给了王力军本人,王在信中回答说:他们能够确定峰值的位置,而且 B 的峰值比 A 的峰值一样超前 62ns.如前所述,按照 McDonald 和 Sprangle 等人,以及我们的理论分析,B 曲线与 A 曲线之间的位移来源于不同频谱的错位和非线性增益.更直观地说,通过铯原子气体池的那束光脉冲(在与 A 曲线归一化之后)其前沿被放大了而后沿被缩小了;实际上,在归一化之前其前沿和后沿都被放大了,只是前沿比后沿被放大的程度更大.

负的群速度是表观的速度而非能量的传播速度.对高斯型光脉冲的电场和磁场强度的理论计算也能给出“波峰”在铯原子气体池中的位置随时间的变化:大约以负的群速度  $u_g = -c/310$  从出口处向入口处移动;但是,这不是某种实在东西的传播过程而是一种类似于商店门前霓虹灯光的移动.为了确定这种移动是否伴随着能流,我们计算了铯原子气体池中高斯型光脉冲平均的能量密度和能流密度矢量(坡印亭矢量).能流密度矢量应当等于能量密度乘以它的移动速度.我们的计算结果是<sup>[6]</sup>:负的能量密度大约以负的群速度  $u_g = -c/310$  从出口处向入口处移动.由于光脉冲与铯原子气体之间的相互作用,我们由电磁理论计算出的电磁场能量密度只是铯原子气体内能中的电磁部分.当然,能量密度是负值还不好解释;“负”或许表示“从铯原子气体中提取能量”.

“负群速度”的例子:McDonald 在通信中向我提供了一个理解“负群速度”的直观例子,转述在此,供读者参考:有一排汽车首尾相接地匀速前进;第一辆突然加速,之后又恢复原速,这时第一辆和第二辆之间拉开了一个空隙;紧接着,第二辆突然加速,追上

第一辆后也恢复原速,因此那个空隙就移到了第二辆和第三辆之间;依此类推,空隙将以一个负的速度向后移动.这种移动并不携带能量;真实的物质或能量(汽车)是以一个正的速度向前传播的.

狭义相对论与因果律:狭义相对论中的质量-能量关系和质量-速度关系预言,一个静质量不为零的物体被加速到光速需要无穷大的能量.因此,这样的物体其运动速度不可能达到光速,更不可能超过光速.但是,光子的静质量是零,不受上述结论的约束.可是,狭义相对论中的坐标变换(洛伦兹变换)还给出如下结果:假设在两个不同地点相继发生了两个物理事件,如果这两个物理事件是由超光速信号联系起来的(即它们的空间距离除以它们的时间差而得到的数值比真空光速大),那么总可以找到另一个惯性系,在这个惯性系中的观察者看来那两个物理事件的先后次序被颠倒了.爱因斯坦为了避免这种矛盾而提出:自然界中不存在超光速现象.其实,狭义相对论本身并没有排除光在其他物质的作用下不会运动得比它的真空光速更快.我曾大胆地对爱因斯坦的这种论证提出如下的怀疑<sup>[8]</sup>:在相对论中,物理的时间应当由固有时间间隔(即同一只钟指示的时间差)代表,而不应该用上述的坐标时间间隔作为因果次序的判据.为此,我已建议使用固有时判断因果次序;这样,若在某一个惯性系中满足因果律,那么在一切惯性系中都会满足因果律,因为固有时间间隔在洛伦兹变换下保持不变.我这里之所以提到修改爱因斯坦对因果律的解释,是因为在反常色散介质中除了负的群速度外还存在大于真空光速的正的群速度,而这种情况除了被爱因斯坦的解释排除外并不与其他物理定律矛盾.相反,修改后的解释允许这种超光速的情况存在.

小结:在铯原子气体中,光脉冲的波前(波头)总是以真空光速向前传播;由于变形,正常色散介质中的群速度定义已不适用于现在的情况;负的群速度只是一种表观的速度,并非描述某种真实事物的传播;如果把负的群速度看成是某种真实事物的传播,那么必然伴随超距作用,因而违反能量守恒或违反动量守恒;况且,理论模型是以通常的电磁理论为基础的,这种电磁理论并不包含超距作用,那么“负的群速度”所伴随的超距作用从何而来?能量的计算结果说明:向后传播是负的能量密度;正能量密度是向前传播的.总之,McDonald和Sprangle等人和我们

全都得到了相同的结论:王力军等人的实验没有观察到超光速传播.

当然,频谱分析模型并不是一种描写光脉冲从真空到介质传播过程的时间演化理论,它不能清晰地给出传播图像,因而有待改进和发展;负能量密度如何理解也有待研究;如何改进实验方法以便能够判断B曲线上的 $P_1$ 点该和A曲线上的哪一点比较才会给出传播速度也有待寻找;总之,所有这些都是今后科学研究的重要课题.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Wang L J, Kuzmich A, Dogariu A. Nature, 2000, 277: 406
- [ 2 ] McDonald Kirk T. Negative Group Velocity, E print: ArXiv: Physics/0008013
- [ 3 ] Sprangle P, Penano J R, Hafizi B. Comments on Superluminal Laser Pulse Propagation, E print: ArXiv: Physics/0010033
- [ 4 ] Wang L J, Private Communications
- [ 5 ] Huang C G, Zhang Y Z. Negative Group Velocity and Pulse Distortion in Anomalous Dispersion Medium Submitted to Phys. Rev. E
- [ 6 ] Huang C G, Zhang Y Z. Poynting Vector, Energy Density and Energy Velocity in Anomalous Dispersion Medium, E print: ArXiv: Physics/0104005, submitted to Phys. Rev. Lett
- [ 7 ] Brillouin L. Wave Propagation and Group Velocity. In: New York, Academic Press, 1960
- [ 8 ] Zhang Y Z. Has Superluminal Light Propagation been Observed? E print: ArXiv: Physics/0009034



## 作者简介

张元仲,男,1965年毕业于中国科学技术大学近代物理系;1965—1970年在中国科学院物理研究所,先后从事受控热核反应、光电测量等研究工作;1970—1978年从事相对论研究;1978年至今,在中国科学院理论物理研究所.先后在相对论、粒子理论、引力理论、弦场论、黑洞物理、暴涨宇宙学、等效原理、反常色散介质中光的传播等领域从事研究工作;现任中国科学院理论物理研究所研究员、博士生导师、《物理》杂志副主编.中文专著:《狭义相对论实验基础》,科学出版社(1979,1983,1994)出版发行;英文专著:《Special Relativity and Its Experimental Foundations》,新加坡 World Scientific出版公司(1998)出版发行.