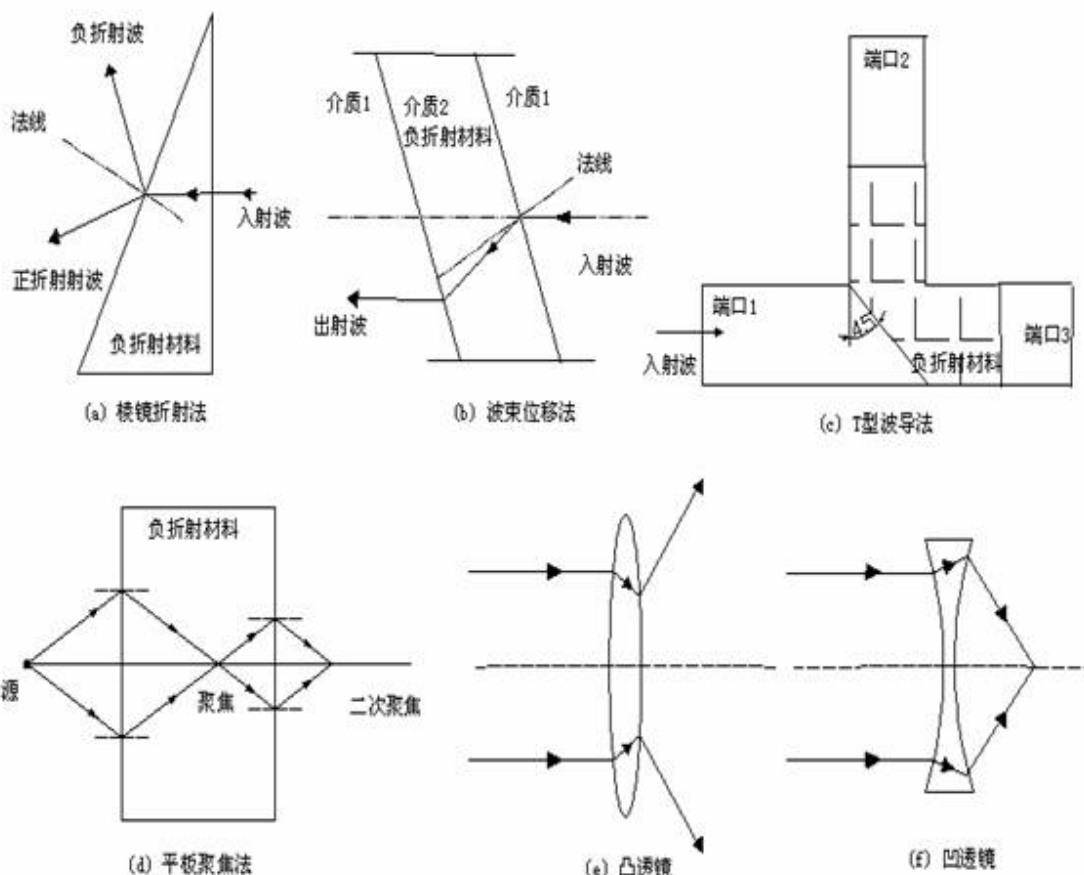




1.负折射

科技名词定义



中文名称：负折射

英文名称：negative refraction

定义：

电磁波和光波在大气中传播时，传播方向弯向地面上空，即弯曲方向与地球曲率相反的现象。电磁波在特殊条件下的对流层和电离层上部传播时才产生负

负折射现象是俄国科学家 Veselago [1] 在 1968 年提出的：当光波从具有正折射率的材料入射到具有负折射率材料的界面时，光波的折射与常规折射相反，入射波和折射波处在于界面法线方向同一侧。直到本世纪初这种具有负折射率的材料才被制备出来[2]。这种材料由金属线和非闭合金属环周期排列构成，也被称为 metamaterial。在这种材料中，电场、磁场和波矢方向遵守“左手”法则，而非常规材料中的“右手”法则。因此，这种具有负折射率的材料也被称为左手材料，光波在其中传播时，能流方向与波矢方向相反。英国科学家 Pendry 提出折射率为-1 的一个平板材料可以作为透镜实现完美成像[3]，可以放大衰势波使成像的大小突破光学衍射极限。负折射现象实验和超透镜提出时引起极大的争议，因为这些概念违反人们的直觉。

2.负折射率

如果有一个人说，太阳光越是照射我们，我们就会越冷。你肯定认为这个人是个疯子。这怎么可能呢？太阳光是电磁波，是能量，它传播到哪里，能量就流动到哪里，所到之处的能量密度(单位面积的能量)肯定会增加。处在阳光中的我们当然会越来越热了。

可是我们若走进某种材料里，就会出现一系列的怪现象。

我们都知道多普勒效应：光源远离我们时，我们看到的光的波长会增长，频率会变短，



产生红移现象；光源靠近我们，则波长变短，产生蓝移。可是在某种材料中，光源靠近我们却会产生红移，远离我们却是蓝移。

见过无限薄的凸透镜吗？现实中的凸透镜不论是老花镜还是隐形镜片，都是有厚度的，有前后两个界面，无限薄的凸透镜在现实中存在吗？存在！这种不寻常的透镜是 2001 年英国科学家提出的一种**完美透镜**。利用特殊的材料，完美透镜是可以制作出来的。

光线在一般的透明界面上既会折射也会反射，或者只是反射（全反射）。例如，我们站在河岸上，既会看到水中的鱼也会看到自己的倒影。如果某一天，“水面”一马平川，没有任何倒影，你会不会觉得恐怖？某种材料会产生这样的景象。

光速是不可超越的，可是在某种特殊材料中，却可以观察到超光速现象。

又是“某种材料”，这神秘的特殊材料到底是什么呢？

奇妙的负折射率

它就是现在科学家研究火热的具有负折射率的材料！

那么，什么是负折射率呢？

且看一般介质的折射情况：光穿过不同介质的界面时，光的传播路线会改变，不再是直线传播。一根筷子插到水中，筷子好像在水面处被折断了，水中的部分看起来向上弯折了。每个人都很熟悉这个现象，这是由于光从空气进入水中时，发生了折射，光线向下偏折了造成的。折射现象会发生，是因为光在不同介质中的传播速度不同造成的，介质中的光速越小，介质的折射率就越大，偏折就越厉害。水和空气就是不同的介质。



我们一般把真空的折射率定为 1，光在真空中的传播速度与在某种介质中的传播速度的比值，就是这种介质折射率的数值。既然光在真空中的传播速度最大，那么任何其他介质的折射率应该都不会小于 1，即自然界中介质的折射率应该都是大于 1 的正值。所以，光线若是从真空斜射入其他介质中，从旁边看，光线都应该是向下偏折的。

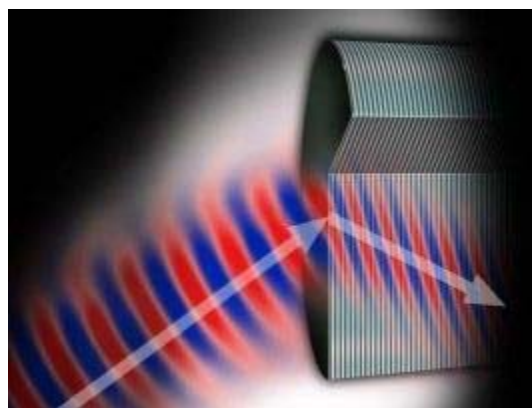
3.左手材料

左手材料

“左手材料”是指一种介电常数和磁导率同时为负值的材料。电磁波在其传播时，波矢 k 、电场 E 和磁场 H 之间的关系符合左手定律，因此称之为“左手材料”。它具有负相速度、负折射率、理想成像、逆 Doppler 频移、反常 Cerenkov 辐射等奇异的物理性质。“左手材料”颠倒了物理学的“右手规律”，而后者描述的是电场与磁场之间的关系及其波动的方向。

(1) 源于假想

本世纪以来，一种被称为“左手材料”的人工复合材料在固体物理、材料科学、光学和应用电磁学领域内开始获得愈来愈广泛的青睐，对其的研究正呈现迅速发展之势，而它的出现却是源于上世纪 60 年代前苏联科学家的假想。



(2) 物理解析

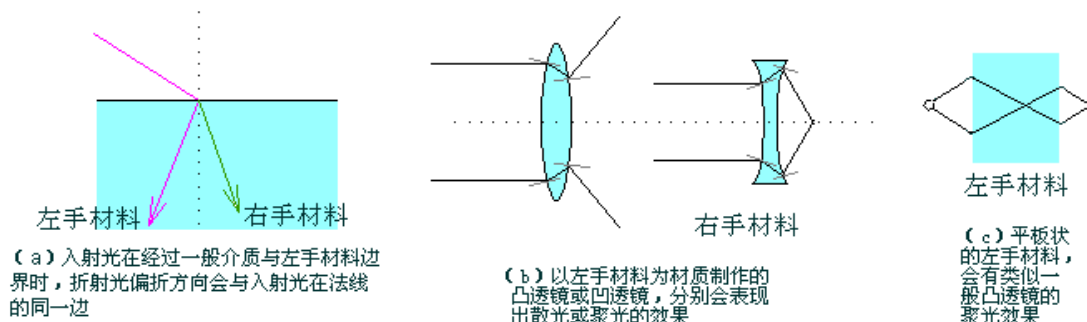
物理学中，介电常数 ϵ 和磁导率 μ 是描述均匀媒质中电磁场性质的最基本的两个物理量。在已知的物质世界中，对于电介质而言，介电常数 ϵ 和磁导率 μ 都为正值，电场、磁场和波矢三者构成右手关系，这样的物质被称为右手材料(right-handed materials,RHM)。这种右手规则一直以来被认为是物质世界的常规，但这一常规却在上世纪 60 年代开始遭遇颠覆性的挑战。1967 年，前苏联物理学家 Veselago 在前苏联一个学术刊物上发表了一篇论文，首次报道了他在理论研究中物质电磁学性质的新发现，即：当 ϵ 和 μ 都为负值时，电场、磁场和波矢之间构成左手关系。他称这种假想的物质为左手材料(left-handed materials,LHM)，同时



指出，电磁波在左手材料中的行为与在右手材料中相反，比如光的负折射、负的切连科夫效应、反多普勒效应等等。这篇论文引起了一位英国人的关注，1968 年被译成英文重新发表在另一个前苏联物理类学术刊物上。但几乎无人意识到，材料世界从此翻开新的一页。

(3) 主要特点

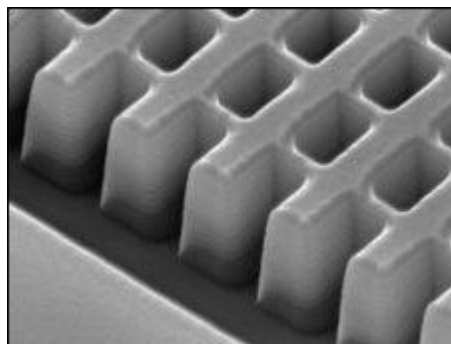
由于左手材料的显著特点是它的介电常数和磁导率都是负数，所以有人也称之为“双负介质（材料）”，通常也被称为“负折射系数材料”，或简称“负材料”。



(4) 研发历史

左手材料的研究发展并不一帆风顺。在这一具有颠覆性的概念被提出后的三十年里，尽管它有很多新奇的性质，但由于只是停留在理论上，而在自然界中并未发现实际的左手材料，所以，这一怪诞的假设并没有立刻被人接受，而是处于几乎无人理睬的境地，直到时光将近本世纪时才开始出现转机。原因在于英国科学家 Pendry 等人在 1998~1999 年提出了一种巧妙的设计结构可以实现负的介电系数与负的磁导率，从此以后，人们开始对这种材料投入了越来越多的兴趣。2001 年的突破，使左手材料的研究在世界上渐渐呈现旋风之势。

2001 年，美国加州大学 San Diego 分校的 David Smith 等物理学家根据 Pendry 等人的建议，利用以铜为主的复合材料首次制造出在微波波段具有负介电常数、负磁导率的物质，他们使一束微波射入铜环和铜线构成的人工介质，微波以负角度偏转，从而证明了左手材料的存在。



2002 年 7 月，瑞士 ETHZ 实验室的科学家们宣布制造出三维的左手材料，这将可能对电子通讯业产生重大影响，相关研究成果也发表在当月的美国《应用物理快报》上。

2002 年底，麻省理工学院孔金瓯教授从理论上证明了左手材料存在的合理性，并称这种人工介质可用来制造高指向性的天线、聚焦微波波束、实现“完美透镜”、用于电磁波隐身等等。左手材料的前景开始引发学术界、产业界尤其是军方的无限遐想。

2003 年是左手材料研究获得多项突破的一年。美国西雅图 Boeing Phantom Works 的 C. Parazzoli 与加拿大 University of Toronto 电机系的 G. Eleftheriades 所领导的两组研究人员在实验中直接观测到了负折射定律；Iowa State University 的 S. Foteinopoulou 也发表了利用光子晶体做为介质的左手物质理论仿真结果；美国麻省理工学院的 E.Cubukcu 和 K.Aydin 在《自然》杂志发表文章，描述了电磁波在两维光子晶体中的负折射现象的实验结果。基于科学家们的多项发现，左手材料的研制赫然进入了美国《科学》杂志评出的 2003 年度全球十大科学进展，引起全球瞩目。

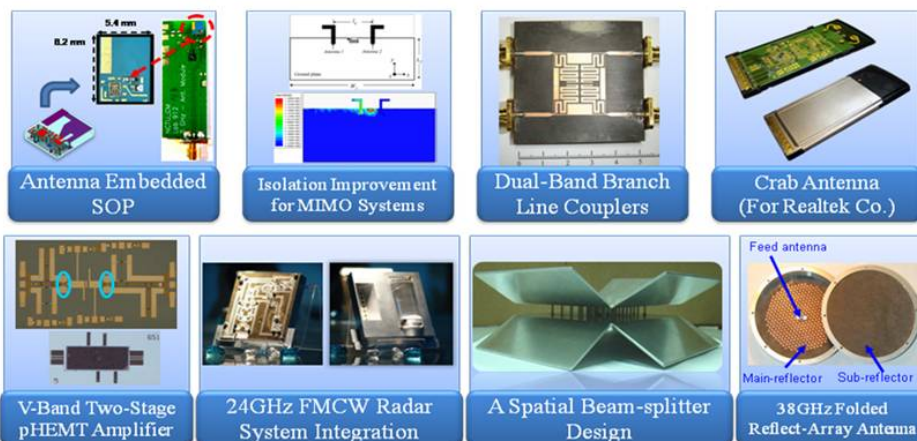
2003 年，哈尔滨工业大学吴群教授带领的课题组全面开展了左手材料的相关研究工作。截至目前，在左手材料领域，共承担国家自然科学基金项目 4 项，国家 973 项目子课题 2 项；在国际、国内一流学术期刊上发表 SCI 检索论文 57 篇，EI 检索论文 103 篇，在国际、



国内学术会议上获优秀论文奖 4 次，特邀报告 4 次；受国防科技出版基金资助出版学术专著 1 部；已授权发明专利 2 项。主要研究方向涵盖了四大方面：“左手材料激发机理分析与电磁特性分析”、“性能优良的左手材料构造与验证”、“左手材料在新型微波器件中的应用”和“基于左手材料的隐身技术”。

2004 年国际学术界开始出现上海科学家的身影。“973”光子晶体项目首席科学家、复旦大学的资剑教授领导的研究小组经过两年的研究与巧妙设计，利用水的表面波散射成功实现了左手介质超平面成像实验，论文发表于著名的《美国物理评论》杂志上，即刻引起学术界的高度关注，被推荐作为《自然》杂志焦点新闻之一。同济大学波耳固体物理研究所陈鸿教授为首的研究小组从 2001 年开始对左手材料展开研究，经过两年的研究，在基础理论和材料的制备与表征方面取得了重大进展，成果在国际物理学著名刊物上发表，2004 年在国际微波与毫米波技术大会上作大会报告，并将在 2005 年日本召开的国际微波与光学技术研讨会上作邀请报告。

研究成果展示



2009 年初，美国杜克大学和中国东南大学合作，最近成功研制出微波段新型“隐形衣”，这一研究成果发表在年初出版的《科学》杂志上。作为东南大学毫米波国家重点实验室副主任，崔铁军教授在计算电磁学和新型人工电磁材料等领域做出了很多原创性的研究成果。崔铁军教授课题组和杜克大学史密斯教授课题组于 2006 年开始合作，在新型人工电磁材料的理论分析、设计、实验和应用上取得了一系列成果，为新型“隐形衣”的研制打下了坚实基础。

2009 年 11 月，东南大学毫米波国家重点实验室以崔铁军和程强为首的研究团队成功地制作出人造电磁学收集器，在微波环境中，它能够像宇宙中的“黑洞”一样去吸收环境中的微波。该成果引起了世界科技界的高度关注，10 月 15 日，《自然》网站也以“科学家研制出可携带黑洞”为题介绍了这项研究成果。

左手材料在本世纪初已迅速成为科学界的研究热点。据不完全统计，在国际主要学术刊物上，2000 年与 2001 年所发表的关于左手征材料的研究论文数量分别是 13 篇与 17 篇，2002 年上升至 60 篇，2003 年上升到 100 篇以上。



(5) 应用前景

左手材料的巨大应用前景源于它的制造实现。Pendry 在 2000 年就曾建议制作“超级透镜”（也称“理想透镜”）以实现左手材料的应用，这一建议在 2004 年被变成了现实，科学家利用左手材料已经成功制造出平板微波透镜。2004 年 2 月，俄罗斯莫斯科理论与应用电磁学研究所的物理学家宣布他们研制成功一种具有超级分辨率的镜片，但是他们的技术要求被观察的物体几乎接触到镜片，这一前提使其在实际应用中难以操作。同年，加拿大多伦多大学的科学家制造出一种左手镜片，其工作原理与具有微波波长的射线有关，这种射线在电磁波频谱中的位置紧邻无线电波。两国科学家的研究成果获得科学界的高度赞赏，被美国物理学会评为 2004 年度国际物理学会最具影响的研究进展。

此外，根据左手材料不同凡响的特性，科学家已预言可以应用于通讯系统以及资料储存媒介的设计上，用来制造更小的移动电话或者是容量更大的储存媒体；等效的负折射媒质电路可以有效减少器件的尺寸，拓宽频带，改善器件的性能。未来，左手材料将会在无线通信的发展中起到不可忽略的作用。



(6) 列入重点项目

简介

左手材料的研究已引起我国有关科学界的关注。除上海科学家以外，香港科技大学、中科院物理研究所、南京大学、北京大学、西北工业大学等单位均有科学家先行涉足这一领域的研究。国家自然科学基金委将左手材料和负折射效应的研究列入了 2005 年重点交叉项目指南中，在数理部和工程与材料学部联合的“准相位匹配研究中的若干前沿课题”主题中将“左手材料相关基础性问题研究”列为主要探索内容之一，在数理部和信息学部联合的“周期和非周期微结构的新光子学特性”主题中将“周期及非周期微结构中在太赫兹、近红外及可见波段的负折射效应研究”列为主要探索内容之一。同时，基金委信息学部将“异向介质理论与应用基础研究”列入 2005 年重点项目指南，异向介质即是左手材料的另一个名称。



(7) 国内主要单位

哈尔滨工业大学：从 2003 年开始，哈尔滨工业大学吴群教授带领的课题组全面开展了左手材料的相关研究工作。截至目前，在左手材料领域，共承担国家自然科学基金项目 4 项，国家 973 项目子课题 2 项；在国际、国内一流学术期刊上发表 SCI 检索论文 57 篇，EI 检索论文 103 篇，在国际、国内学术会议上获优秀论文奖 4 次，特邀报告 4 次；受国防科技出版基金资助出版学术专著 1 部；已授权发明专利 2 项。主要研究方向涵盖了四大方面：“左手材料激发机理分析与电磁特性分析”、“性能优良的左手材料构造与验证”、“左手材料在新型微波器件中的应用”和“基于左手材料的隐身技术”。



东南大学：东南大学毫米波国家重点实验室崔铁军教授为主的课题组长期从事计算电磁学与左手材料的研究，并于 2009 年获得重大突破，先后与美国杜克大学合作研制成功“隐身衣”，独立制作出可吸收微波频段的“黑洞”。崔教授的课题组在左手材料的研究与应用方面不断延伸、发展。

中科院物理所：该所的磁学国家重点实验室广泛开展新型磁性功能材料的探索和研究，研究和探索各种新型磁性材料，如铁磁性形状记忆合金，各种高频（直到 10-100G 范围）具有高磁导率，低损耗（如 DC-DC convertor 材料和左手材料）等；该所的微加工实验室在低维人工结构制作与应用研究方面重点开展了二维不同结构光子晶体与左手材料、超导量子结构与器件等的研究。

香港科技大学：该校的纳米科技研究所所长陈子亭教授是国际知名的凝聚态物理与光子晶体理论研究专家，主要从事光子晶体与左手材料方面的研究。

南京大学：该校电子科学与工程系的冯一军教授主要从事电磁场与微波技术，新型人工电磁材料及微波器件等研究，目前承担新型人工电磁介质的理论与应用研究（国家重点基础研究发展计划 973 项目）和左手人工电磁材料和微波器件（教育部博士点基金项目）。

同济大学：波耳固体物理研究所的陈鸿教授、张治文教授等人在左手材料与负折射效应的基础理论、表征手段和器件应用等方面已取得突破。

复旦大学：以资剑教授（“973”项目首席科学家）、周磊教授等为首，在左手材料超平面成像、表征与器件应用（微波天线）等方面已取得重大进展，目前正与同济大学、华东师范大学、中科院上海微系统所、中科院上海技术物理所、中科院物理研究所、南京大学、美国



UCLC 和 AMES 等研究机构开展这一领域的合作研究。该校的理论物理、凝聚态物理和光学三个专业学科均为国家重点学科和博士点。

上海理工大学:以光学与电子信息工程学院庄松林院士为首。庄院士长期从事应用光学、光学工程和光电子学的研究，他设计了百余种光学系统及仪器，是国内率先开展光学系统 CAD 的研究者；在复物体的位相恢复研究中提出多种光学方法，开创了该领域研究的新方向；所研制的 CdSe 硒化镉液晶光阀达到了当时国际先进水平。

(8) 扩展阅读:

• 1

左手材料 (Left-Handed Metamaterials) 是近年来材料科学和物理学领域的研究热点之一。谈到左手材料，还得先从右手材料说起。在经典电动力学理论中，介电材料的电磁特性由介电常数 ϵ 和磁导率 μ 两个宏观参数描述。自然界中物质的 ϵ 和 μ 都是正数，当电磁波穿越其中时，描述电磁波传播特征的两个物理量电场方向 E 、磁场方向 H 和电磁波的传播方向 K 构成与三维空间坐标呈一一对应的右手螺旋关系 (见图 1)，这就是物理学中经典的“右手定则”。这种规律被认为是物质世界的常规，是物理界不可动摇的基本定律，相应地，自然界中存在的符合“右手定则”的介电材料即为右手材料。

• 2

在经典电动力学中，如果物质的 ϵ 和 μ 一正一负，电磁波将无法在其中传播。但是，如果 ϵ 和 μ 两者都是负数时，情况会怎样呢？1968 年，前苏联物理学家 Veselago 等人首次提出了大胆的假设，即如果人们能够制造出介电常数 ϵ 和磁导率 μ 均为负值的材料，那么“右手定则”将被推翻，取而代之的是电场方向 E 、磁场方向 H 和电磁波的传播方向 K 构成与三维空间坐标呈一一对应关系的左手螺旋关系 (见图 2)。至此，原本看似天经地义的物理学常规定律“右手定则”开始遭遇颠覆性的挑战。但是，由于当时 Veselago 等人的工作还仅限于纯理论性的研究，自然界中并未发现这类材料，也没有在实验中得到进一步验证，因此这一假设在学术领域长期未被接受。