

奇妙的左手材料*

徐耿钊 张伟华 朱星[†]

(北京大学物理学院 北京 100871)

摘要 左手材料最早由前苏联科学家 Veselago V G 在 20 世纪 60 年代从理论上提出来的,是指一种介电常数 ϵ 和磁导率 μ 同时为负值的材料.它具有诸如负群速度、负折射率、理想成像、逆 Doppler 频移、反常 Cerenkov 辐射等种种奇异的物理性质.经过多年的沉寂之后,近几年在实验上取得了突破性的进展,重新引起了人们的重视.尤其是在 2003 年,还被 *Science* 杂志评为当年十大科技进展之一.文章介绍了左手材料的概念和基本原理,并回顾了这一领域近年来的发展.

关键词 左手材料,负群速度,负折射率,理想透镜,隐失场

Magic left-handed materials

XU Geng-Zhao ZHANG Wei-Hua ZHU Xing[†]

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Left-handed materials, of which the dielectric constant ϵ and the magnetic permeability μ are simultaneously negative, were first discussed theoretically by a Russian physicist named Veselago V G in the 1960s. They have many strange properties such as negative group velocity, negative refractive index, perfect imaging, inverse Doppler effect and abnormal Cerenkov radiation. After many years of dormancy, key experimental advances have been obtained recently, attracting much attention again and winning a place among the 10 breakthroughs selected by *Science* in 2003. We introduce the concept and basic principles of this material, and review the developments of recent years.

Key words left-handed materials, negative group velocity, negative index of refraction, perfect lens, evanescent field

1 左手和右手

大自然恩赐我们每个人左右对称的一双手,不仅我们日常生活离不开它,而且为我们研究自然提供了一种天然的表征方法:把拇指伸直指向相同的方向,另外四指握拳,则他们肯定指向相反的旋转方向.符合左手这种关系的称为左旋,反之称为右旋.螺栓上的螺纹就是这样一个例子,它有左旋和右旋两种.常见的螺栓一般都是右旋的,它顺时针旋转能旋进螺母里并上紧.左旋的螺栓也有,例如固定汽车轮胎时就会用到:汽车左面和右面轮胎用的螺栓旋转方向刚好相反.物质对线偏振光的旋光性,有机化

合物的旋光异构现象等等,也都可以用这种方式来表征.拇指指向的是光传播的方向,另外四指指向的是偏振面旋转的方向.举一个例子:构成生命的基本物质是蛋白质,它是由氨基酸组成的,绝大多数氨基酸都有 *D/L* 两种旋光异构体.有趣的是构成我们生命的几乎所有氨基酸都是 *L* 型的,其水溶液表现出右旋旋光性.

不仅如此,在数学上,矢量的外积运算 $C = A \times B$ 也可以用这种方法来表示:右手握拳,四指的方向为由 *A* 转到 *B*,则拇指指向的方向就是 *C* 的方向,

* 国家自然科学基金(批准号 10074002)资助项目

2004-03-05 收到初稿,2004-06-01 修回

[†] 通讯联系人. E-mail: zhuxing@pku.edu.cn

并垂直于 A 和 B 确定的平面. 这样由 A, B, C 构成的矢量组遵守右手定则. 反之, 其中任何一个矢量的方向旋转 180° , 即满足 $C = -(A \times B)$, 这时 A, B, C 构成的矢量组就遵守左手定则.

学过电动力学的人都会知道, 在一般介质中, 一束平面电磁波的波矢 k 、电场强度 E 和磁场强度 H 构成的矢量组就遵守右手定则, 而电磁波能量也将沿 $(E \times H)$ 的方向传播, 和 k 的方向是一致的, 如图 1(a) 所示. 这样就出现一个有趣的问题: 是否存在这样一种介质, 当平面电磁波在其中传播的时候, 只将 E 和 H 这两个矢量中的任何一个的方向转 180° , 使得 k, E, H 三者构成的矢量组遵守左手定则, 而电磁波能量沿与 k 相反的方向传播? 前苏联理论物理学家 Veselago 在 1964 年最早研究了这个问题, 他假想了一种介电常数 ε 和磁导率 μ 同时为负值的介质, 能实现这个构想, 因此这种介质被称为“左手材料”(left-handed materials 简称 LHM), 如图 1(b) 所示^[1, 2].

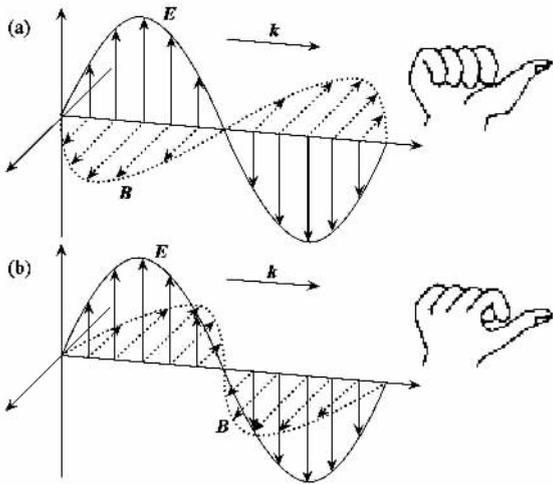


图 1 平面电磁波传播的示意图
(a) 在正常材料中 (b) 在左手材料中

2 左手材料的基本原理

电磁波在介质中的传播行为是由其介电常数 ε 和磁导率 μ 决定的. 一束平面波在各向同性均匀介质中传播, 其波矢 k 和频率 ω 满足色散关系

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} n^2 \left(\text{其中 } n^2 = \varepsilon\mu, \quad c^2 = \frac{1}{\varepsilon_0\mu_0} \right),$$

其中 n 代表折射率, c 是真空中光速. 如果不考虑任何能量的损耗, 在正常的介质中, n, ε, μ 均为正实数. 若 ε 和 μ 同时变为负实数, 从表面上看, 这个色

散关系不受任何影响. 但从根本上看, 则是来源于电磁场的 Maxwell 方程组. 让我们回到 Maxwell 方程组的旋度方程和介质方程来看:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t},$$

$$B = \mu\mu_0 H, \quad D = \varepsilon\varepsilon_0 E.$$

对于单色平面波 E 和 H 的解都正比于 $e^{i(k \cdot r - \omega t)}$, 代入上面的式子中, 就有

$$k \times E = \frac{\omega}{c} \mu H, \quad k \times H = -\frac{\omega}{c} \varepsilon E$$

这里频率 ω 和真空光速 c 都是正实数. 从这组等式可以看出在正常材料中, 即 ε 和 μ 都是正数时, k, E, H 遵守右手定则. 而当 ε 和 μ 同时变为负数时, 它们将遵守左手定则, 也就是说 k 将指向 $-(E \times H)$ 的方向^[1, 3]. 下面我们将看到这时会发生一系列有趣的现象.

首先来看电磁波能量的传播, 即群速的方向. 这个方向由 Poynting 矢量 $S = E \times H$ 决定. 在正常材料中 k 和 S 总是同方向, 即相速和群速方向是一致的. 但在左手材料中, 这两个方向却正好相反, 因此左手材料又被称为“负群速度”(negative group velocity)材料. 在正常材料中, 波源和观察者如果发生相对移动, 会出现 Doppler 效应: 两者相向而行, 观察者接收到的频率会升高, 反之会降低. 类比声波在空气中的传播, 一列火车迎面开来的时候会听到笛声逐渐变尖, 而远离而去的时候音调就会逐渐降低. 但在负群速度材料中正好相反, 因为能量传播的方向和相位传播的方向正好相反, 所以如果二者相向而行, 观察者接收到的频率会降低, 反之则会升高, 从而出现逆 Doppler 频移^[1, 4]. 图 2 示意地给出了这样的一个例子, 反射界面相对于波源后退, 反射波的频率会相应发生变化.

在左手材料中, 相速与群速方向正好相反的一个推论就是反常 Cerenkov 辐射^[1, 5]. 电动力学告诉我们, 在真空中, 匀速运动的带电粒子不会辐射电磁波. 而当带电粒子在介质中匀速运动时会在其周围引起诱导电流, 从而在其路径上形成一系列次波源, 分别发出次波. 当粒子速度超过介质中光速时, 这些次波互相干涉, 从而辐射出电磁场, 称为 Cerenkov 辐射. 正常材料中, 干涉后形成的波前, 即等相面是一个锥面. 电磁波能量沿此锥面的法线方向辐射出去, 是向前辐射的, 形成一个向后的锥角, 即能量辐射的方向与粒子运动方向夹角 θ 由下式确定

$$\cos\theta = \frac{c}{nv},$$

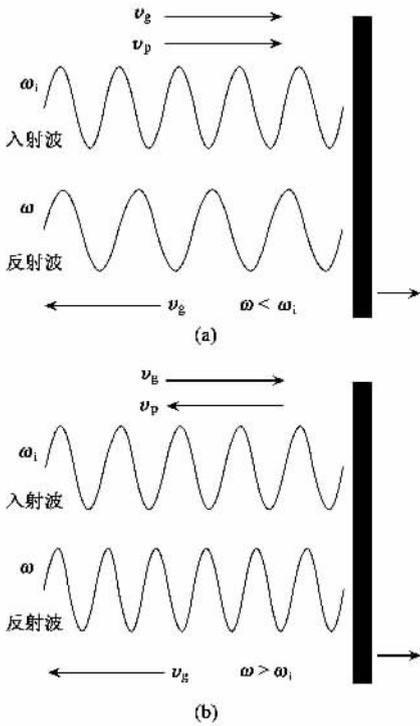


图2 一列电磁波垂直射向正在相对于波源后退的边界(v_g 代表群速, v_p 代表相速, ω_i 代表入射波频率, ω 代表反射波频率)
(a)正常材料中, 反射波频率会降低 (b)“ 负群速度介质 ”中, 反射波频率会升高

其中 v 是粒子运动的速度. 而在负群速度介质中, 能量的传播方向与相速相反, 因而辐射将背向粒子的运动方向发出, 辐射方向形成一个向前的锥角. 图 3 示意了这两种情况下的 Cerenkov 辐射情形.

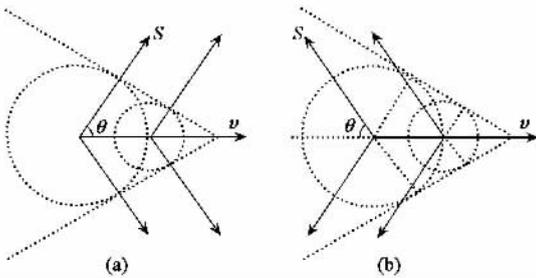


图3 Cerenkov 辐射的示意图(v 代表粒子运动速度方向, S 代表能量辐射方向, 夹角为 θ) (a)正常材料中 (b)左手材料中

电磁场不仅具有能量, 而且具有动量, 其动量密度(即单位体积的动量)由下式确定 :

$$g = \epsilon_0 (E \times B).$$

在正常材料中, ϵ 和 μ 均为正值, 平面波 k, S, g 方向全都是一致的. 当遇到一个界面发生反射的时候, 动量方向会改变, 从而形成光压, 这个现象最早由

Lebedev P N 于 1901 年在实验中观察到. 而在左手材料中 g 和 S 的方向相反, 在发生反射的时候会形成“ 负光压 ”^[1].

上面这些都是平面电磁波在左手材料中传播时会发生的奇妙现象. 当电磁波经过正常材料与左手材料界面的时候, 也将会有令人吃惊的事情发生. 电磁波从介质 1 射向介质 2, 在界面处要满足 Maxwell 方程的边界条件 :

$$E_{t1} = E_{t2}, \quad H_{n1} = H_{n2},$$

$$\epsilon_1 E_{n1} = \epsilon_2 E_{n2}, \quad \mu_1 H_{t1} = \mu_2 H_{t2},$$

这里 t 代表平行于界面的分量, n 代表垂直于界面的分量. 当 1, 2 两种介质都是正常材料的时候, 折射就按照我们熟悉的 Snell 定律发生, 折射角 θ_2 和入射角 θ_1 满足下面关系 :

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_2 \mu_2}}{\sqrt{\epsilon_1 \mu_1}},$$

如图 4(c)所示. 当 1 是正常材料, 而 2 是“ 左手材料 ”的时候, 即 $\epsilon_1 > 0, \mu_1 > 0, \epsilon_2 < 0, \mu_2 < 0$ 时, 界面上 E 和 H 的平行分量的方向还是一致的, 而垂直分量的方向却反了过来, 再加上在介质 2 内 k, E, H 三者遵守左手定则, 因而这时会发生反常的折射. 折射光和入射光出现在界面法线的同一侧. 这时能流 S 和波矢 k 的传播分别如图 4(a)和图 4(b)所示. 如果将 Snell 定律做一推广, 定义左手材料的折射率为负值

$$n_2 = -\sqrt{\epsilon_2 \mu_2},$$

θ_2 也相对于传统的折射角看作负角度, 这样这种情形也能符合 Snell 定律的形式. 因此, 左手材料又称为“ 负折射率 (negative index of refraction, 简称 NIR) 介质 ”^[1, 3].

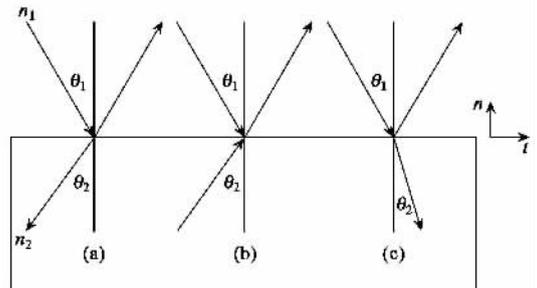


图4 电磁波在介质界面的折射

(a)从正常材料到左手材料能流的折射 (b)从正常材料到左手材料时波矢的折射 (c)是从正常材料到正常材料的折射

在这种界面上发生的负折射现象很自然地会让

人想到这可以用来聚焦成实像,如图 5(b)所示.而且还可以用正常材料和左手材料搭成如图 5(c)所示的结构,使得光线在其中形成许多闭合的路径,而又没有任何反射面存在,形成一种所谓的开放腔体(open cavity).那么这种成像与传统的透镜成像相比有什么优点呢?如图 6(a)所示,透镜成像中焦距 f 是一个很重要的参数,物距像距的关系由牛顿公式确定,而放大倍数等于像距与物距的比例.这样距离透镜远近不同的物平面成像在不同的像平面上,放大倍数也不一样,过近的甚至成不了实像.而负折射成像不存在这样的问题,如图 6(b)所示.物距与相距之比仅由两种材料折射率之比的绝对值决定,它更像我们日常生活中常见的平面镜成虚像时的情形.而且,透镜都有一条确定的光轴,而负折射成像时候没有这样的光轴,它不受傍轴条件的限制,成像在整个界面上是平移不变的.这些特点使它能够对 一个三维物体完全复原出一个三维实像.^[6]

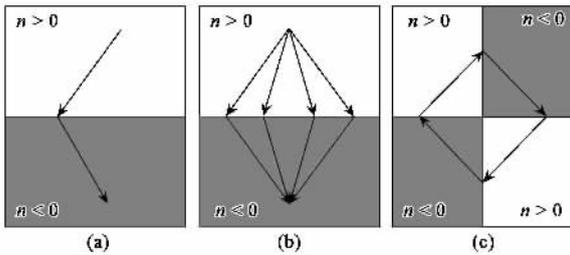


图 5 有趣的例子

(a)负折射现象 (b)聚焦成实像 (c)形成开放腔体

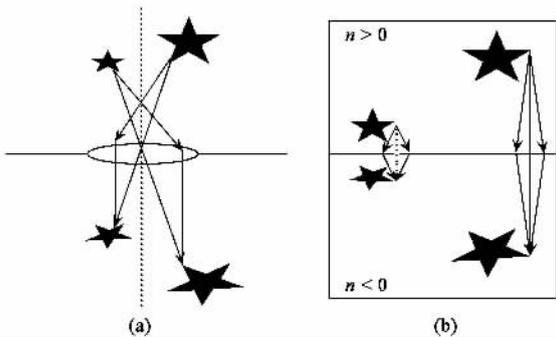


图 6 不同成像方式的示意图

(a)透镜成像 (b)负折射成像

更进一步地,左手材料板还可以制成能成实像的透镜,如图 7 所示.再让我们考虑一个无限小电偶极子置于透镜跟前,选 z 为光轴,将它发出的电磁波沿 $x-y$ 平面做二维傅里叶展开:

$$E(\mathbf{r}, t) =$$

$$\sum_{\sigma, k_x, k_y} E(k_x, k_y) \exp[i(k_z z + k_x x + k_y y - \omega t)],$$

对应其中每一个分量(k_x, k_y),有

$$k_z = +\sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - k_x^2 - k_y^2}, \quad \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 > k_x^2 + k_y^2.$$

透镜的作用就在于在一段距离以外再将这些分量重新集合起来.但在这个过程中,反映物平面细节信息的分量,也就是 k_x 和 k_y 很大的分量丢失了,因为这时

$$k_z = +i\sqrt{k_x^2 + k_y^2 - \left(\frac{\omega}{c}\right)^2}, \quad \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 < k_x^2 + k_y^2.$$

这些分量随将距离的增加而指数衰减,无法传播到像平面,只能在物点附近形成隐失场.因此光学透镜成像的分辨率总有一个可以和波长 λ 相比拟的极限.而左手材料透镜将不会丢失这些信息,会将所有能量,包括隐失场在内,完全复制到像点.这正是因为在 ϵ 和 μ 全为负值的时候,能流方向和波矢方向总是相反的,因而在这种介质内,

$$k_z = -\sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - k_x^2 - k_y^2}, \quad \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 > k_x^2 + k_y^2,$$

$$k_z = -i\sqrt{k_x^2 + k_y^2 - \left(\frac{\omega}{c}\right)^2}, \quad \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 < k_x^2 + k_y^2,$$

如图 7(a)所示.这样它不会损失任何信息,能量百分之百透过.正因为这一点,这种透镜被称为“理想透镜(perfect lens)”^[3,7,8].

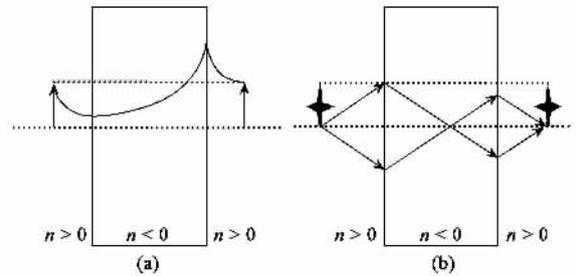


图 7 负折射率介质透镜示意图 (a)隐失场成分成像示意图;

(b)一个物体经过左手材料平板透镜成立等大的实像

Veselago 提出了左手材料的概念,并且预言了它将在 Doppler 频移、Cerenkov 辐射、辐射压、Snell 折射以及透镜成像等方面具有种种奇妙的性质,他将这些天才的设想发表在了《苏联物理学进展》(Sov. Phys. Usp.)1968 年 1 月和 2 月的合刊上^[1].但那以后,这篇文章一沉睡就是将近 30 年.原因也很简单,在自然界中找不到这种 ϵ 和 μ 同时为负值的物质.

3 制造人工结构来实现左手材料的初步探索和争论

自然界虽然没有天然的左手材料,但是存在 $\epsilon < 0$ 和 $\mu > 0$ 的物质,这首先想到的就是等离子体,包括气体等离子体(plasma)和金属内自由电子的等离子体激元(plasmon),其介电常数

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

这里 ω_p 为等离子体振荡的本征频率,当 $\omega < \omega_p$ 时,就可以使介电常数为负值.此外,当年 Veselago 还曾经提出过设计特定的各向异性介质,例如环形结构,有可能实现磁导率为负值^[13].

20 多年过去以后,英国皇家学院院士 Pendry 教授重新开启了这方面的研究.他在理论上仔细地研究了导线(wires)阵列^[9,10]和有缺口的环形共振器(split-ring resonators,简称 SRRs)阵列^[11]的电磁性质.对于前者,主要是为了在一段有限的金属导线内产生等离子体激元,得到上面形式的介电常数 ϵ .而共振器形状如图 8(a)所示,当有垂直于环面的磁场振动时,环内产生振荡电流和电荷,从而产生有效的磁导率

$$\mu(\omega) = 1 - \frac{F\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 - i\omega\Gamma}$$

它在低频下将是负值(会有一个小的虚部).这些工作极大地推动了这一领域的发展.

紧接着,美国加州大学圣迭戈分校物理系的 Smith 等又走出了关键一步,他们把上述着两种结构做在一起,并在微波实验中首次实现了在同一块材料里 ϵ 和 μ 同时为负值^[12].

进一步地,他们在 0.25mm 厚的 GIO 纤维玻璃板正反面分别用模板刻蚀的技术镀上了铜制的环形共振器和直导线,再做成阵列,如图 8(b)所示,单胞大小为 5mm.然后他们把这样的材料切成直角梯形棱镜的形状,夹在两块铝制圆盘之间,其中一块的中心有轴,一个 X-波段微波波导作为探测器可以绕这个轴转动.相距 1.2cm 的两块铝板(与两个圆盘的距离一样)和相距 9.3cm 的两块吸波材料共同引导下,微波垂直射在棱镜背面,电场偏振方向平行于金属线,如图 8(c)所示.图中黑色粗箭头示意地表示正常材料折射的方向.实验测量了探测器接收到的能量和角度 θ 的关系,结果如图 8(d)所示.实线和虚线分别代表左手材料和同样形状的聚四氟乙烯

(Teflon).聚四氟乙烯测量值如预计的那样, $n_{\text{Teflon}} = 1.4 \pm 0.1$.左手材料折射率的测量值确实是负值 $n_{\text{LHM}} = -2.7 \pm 0.1$,这样他们又首次在实验中观察到了负折射现象^[13].

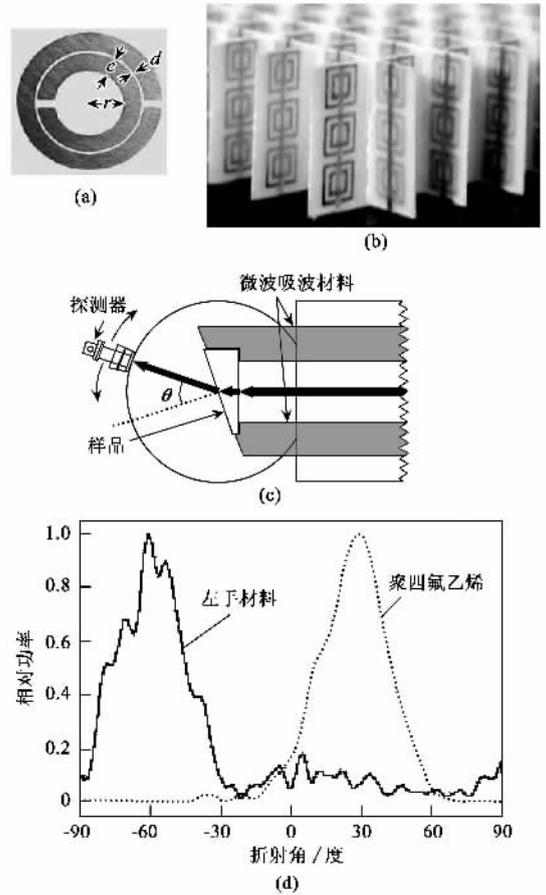


图 8 Smith 等人的实验

(a) 环形共振器 SRRs (b) 实验中所用的人工“左手材料”(c) 实验装置示意图 (d) 正常材料(虚线)和人工“左手材料”(实线)的实验结果对比

这一实验又重新激发了人们对负折射率材料的兴趣,争论也随之而来.以 Pendry 和 Smith 等为主和众多的置疑者们展开了近两年的论战.

Valanju、Walser 和 Valanju 等人把折射率 n 分为相速的折射率 n_p 和群速的折射率 n_g ,两种从群速和相速的定义

$$v_g = d\omega/dk \quad v_p = \omega/k$$

出发,通过一些理论计算认为所谓“负折射率材料”只是相速的折射率 n_p 可以是负的,而携带物理信号的群速的折射率 n_g 永远是正的.而且群速如果出现负折射,将违反因果率以及任何携带信息的物理量的传播速度不能超过光速这个上限等等目前认为的基本物理规律.理想透镜也因此根本就不可能聚焦

和成像. 针对上面这个实验, 他们认为能量折射的方向还是正的. 但在界面附近电磁场空间分布高度不均匀, 在相速发生负折射的方向有隐失场存在. 又引用这个实验中的数据, 探测器距离界面只有 15cm 约 5λ , 因此基本上是一种近场行为. 他们认为, 在远场还是应该得到正折射的结果^[14].

对此 Pendry 和 Smith 认为他们的计算有问题, 也从群速和相速的基本定义出发, 认为群速也负折射将不会违反任何现有的基本物理规律^[15].

另外, 针对理想透镜, 一些科学家也表达了不同看法, 认为这将导致出现无穷大的能量密度^[16], 将违反“不确定原理”^[17]等等^[18]. 对这些, Pendry 教授也一一进行了反驳^[19-21].

这些争论持续了将近两年, 双方都进行了大量的理论计算来证明自己的观点. 但在当时, 到底谁对谁错还有待于实验工作的进一步开展.

4 2003 年的新进展

2003 年一系列实验工作的成功进行为这一争论暂时画上了一个句号, 并被 Science 杂志评为了当年十大科学进展之一^[2].

当初 Smith 等人的实验有两个大漏洞: 一是探测器装在离样品较近的一个确定的圆周上, 没有采集样品其他距离上的数据, 因而也就无法排除掉观察到的只是一种近场现象的可能. 二是电磁波的入射角是固定的, 整个实验中只有一个, 而只有对同一块样品在不同入射角下测得的折射率全一样, 才能说明这确实像预言中的那样遵守 $n < 0$ 时的 Snell 定律.

对于这两个漏洞, 首先是美国 Boeing Phantom Works 小组的 Parazzoli, C G 等人重复了 Smith 等人前面的实验, 但他做了两个主要的改进: 一是不再由波导将微波导引到样品背面, 而是在远处用透镜将微波聚焦到样品表面, 样品处于一个完全开放的空间中; 二是样品和探测器之间的距离可调, 在距离样品 33cm 和 66cm 两个不同的地方采集数据, 如图 9 所示. 同时他们还对这个系统进行了模拟计算. 与同样形状的聚四氟乙烯样品相对照, 实验数据和模拟计算非常吻合, 都显著而清晰的展示了负折射现象, 如图 9 所示^[22].

同时, 美国 MIT 的 Houck 等人还是用图 8 中的样品作为人造的左手材料, 在一个平板波导中进行实验. 他对于正常材料和左手材料都使用了倾角不

同的两块样品, 使得可以在不同入射角下测量出射波的分布. 实验结果显示, 不同入射角下测量到的负折射率是一致的, 完全符合 Snell 定律, 如图 10 所示^[23].

在很多人看来, 这两个实验基本上结束了这两年的争论^[24].

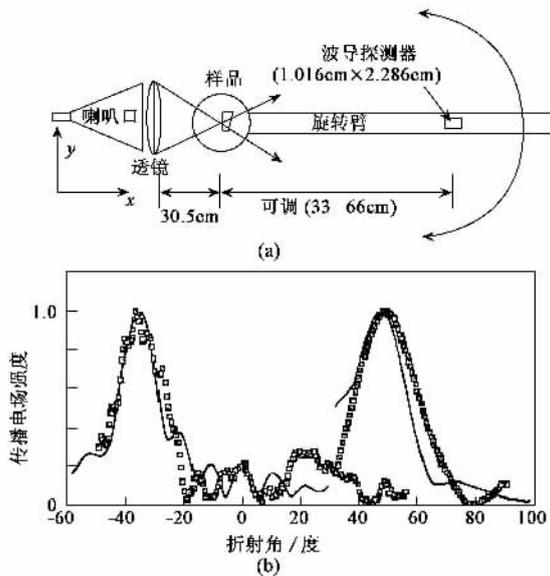


图 9 Parazzoli 等人的实验

(a) 实验装置示意图^[22] (b) 实验结果和模拟计算(红点和蓝点分别是左手材料和聚四氟乙烯(Teflon)的实验数据, 红线和蓝线分别是二者的模拟结果^[24])

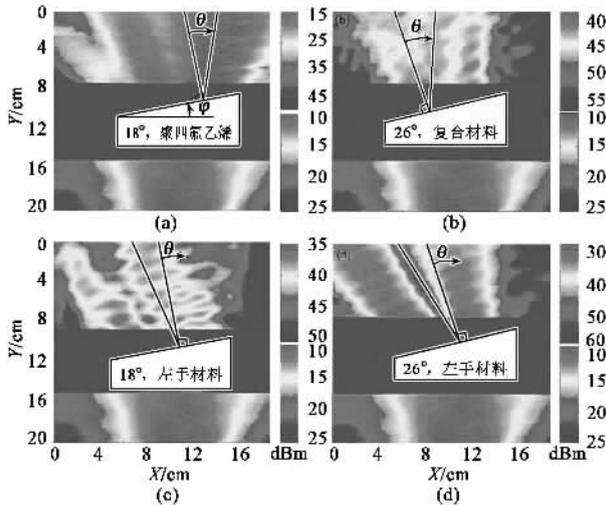


图 10 Houck 等人的试验结果

(a) 聚四氟乙烯材料 $\varphi = 18^\circ$ $n = 1.5$; (b) 正常复合材料 $\varphi = 26^\circ$ $n = 1.3$ (c) 左手材料 $\varphi = 18^\circ$ $n = -0.36$; (d) 同种左手材料 $\varphi = 26^\circ$ $n = -0.35$ ^[23]

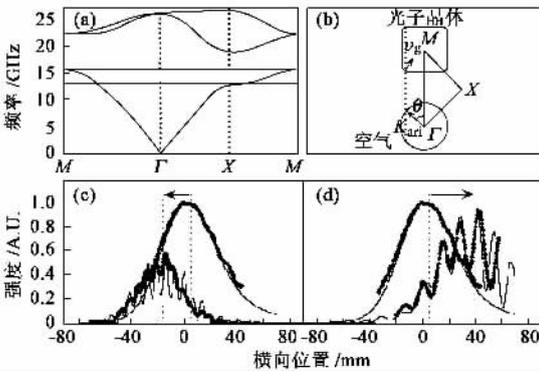


图 11 光子晶体负折射实验

(a) 实验中所用光子晶体的能带结构,阴影部分是能够发生负折射现象的频率范围 (b) k 空间的等频面,介质界面的法线为 Γ - M 方向 k 是微波从空气中入射的方向 θ 是入射角 v_g 是晶体内的群速方向 (c) 光子晶体的负折射,红点和绿点分别是在晶体前表面和后表面功率分布的测量值,红线和绿线是 FDTD 计算值 (d) 聚苯乙烯 (polystyrene) 的正折射,红点和蓝点分别是在晶体前表面和后表面功率分布的测量值,红线和蓝线是 FDTD 计算值^[27]

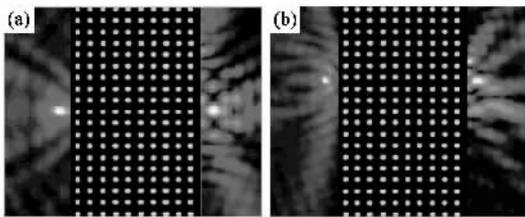


图 12 平板透镜成像的实验

(a) 二维平板透镜成像(左边的亮点是源,右边的是像) (b) 将源向上移动 4cm,像也随之向上移动了 4cm^[28]

前面提到的这些实验所用的样品都离不开金属线和金属环,要利用其中自由电子气的振荡.此外,随着人工光子晶体结构研究的发展,有人提出了不借助金属,完全用电介质材料组成的光子晶体来实现左手材料.通过对材料折射率的空间分布进行周期性调制,改变其色散关系 $\omega(k)$,形成类似于电子在晶体中那样的能带结构.可以经过特殊设计,使得在某些波段,群速 $v_g = \nabla_k \omega(k)$ 和相速方向相反,具有左手材料的特点^[6, 25, 26].而且随着现代微加工技术的发展,这类人造光子晶体结构的左手材料更有可能进入到可见光范围.2003年,土耳其 Bilkent 大学物理系的一个小组在实验中用白宝石短棒构成的正方点阵结构实现了二维光子晶体的负折射现象,如图 11 所示.作为对照,他们用普通聚苯乙烯 (pol-

ystyrene) 小球构成的板材代替光子晶体重复了这个实验.可以看到,实验结果与 FDTD 计算结果良好吻合,清楚地展示了负折射现象^[27].

接着,美国西北大学用类似结构的光子晶体实现了平板透镜的成像.他们为了验证这种透镜不像传统透镜那样具有一个确定的主光轴,将源向上移动了 4cm,结果像也同样向上移动了这么多就距离,如图 12 所示^[28].

同样还是对于这类光子晶体构成的左手材料,美国 Iowa 州立大学物理系的 Fotinopoulou 等人运用时域有限差分方法 (finite-difference time-domain, FDTD) 对电磁波在它和正常材料界面处的行为进行了模拟计算.结果表明,在一束 Gaussian 光束照射到界面上的最初几十个周期的时间内,折射波是束缚在界面附近几个波长范围内的,而后才在负折射方向传播出去,从而进一步证明,负折射现象不违反因果律及光速上限等现有的基本物理规律^[29]

此外,在这一年还有报道称观察到了逆 Doppler 频移现象^[4]

面对这些进展, Pendry 教授回顾道,进入一个新的科学领域就像走进一间漆黑的房间,一开始什么都看不见,不是碰倒家具就是与别人冲撞和争吵,但随着时间推移,光线总会慢慢地从窗子照进这个房间,眼睛看到的会越来越清楚,而碰撞和争吵会越来越少.他自己正聆听着这光明到来的脚步声^[24].

5 应用与展望

迄今为止,所有成功开展的实验验证都是在微波波段进行的.由于在纳米尺度上的加工技术和光的耦合及探测技术的限制,还没有进行到可见光的范围.随着现代纳米科学和微加工技术的发展,将有可能制造出可见光范围的这种材料,尤其是光子晶体结构的左手材料.这种材料具有诸多以前各种材料均不具备的奇妙的电磁性质,它对光的反常折射使之可以方便的用来做集成光路里的光引导元件;它制成的微透镜拥有更高的分辨率,使之可以应用在光学高密度存储和微加工等方面.甚至它的反常 Cerenkov 辐射现象还可以有助于探测高能带电粒子.因此,可见光范围的这种材料一旦制成,将有广泛的应用前景.

致谢 作者感谢与 J. B. Pendry 教授的有启发性的讨论.

参 考 文 献

- [1] Veselago V G. Sov. Phys. Usp. ,1968 ,10 509
 [2] Breakthrough of the Year ,8 About-face. Science ,2003 ,302 : 2043
 [3] 蔡定平. 物理(双月刊,台湾) 2002 24(4) 558
 [4] Seddon N ,Bearpark T. Science ,2003 ,302 :1537
 [5] Luo C ,Ibanescu M ,Johnson S G *et al.* Science ,2003 ,299 : 368
 [6] Notomi M. Phys. Rev. B ,2000 ,62(16) :10696
 [7] Pendry J B. Phys. World ,2001 ,14(9) :#7
 [8] Pendry J B. Phys. Rev. Lett. ,2000 ,85(18) :3966
 [9] Pendry J B ,Holden A J ,Stewart W J *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1996 ,76(25) :#773
 [10] Pendry J B ,Holden A J ,Robbins D J *et al.* J. Phys. Condens. Matter ,1998 ,10 :#785
 [11] Pendry J B ,Holden A J ,Robbins D J *et al.* IEEE Trans. Microwave Theory Tech. ,1999 ,#7 :2075
 [12] Smith D R ,Padilla W ,Vier D C *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2000 ,84(18) :#184
 [13] Shelby R A ,Smith D R ,Schultz S. Science ,2001 ,292 :77
 [14] Valanju P M ,Walser R M ,Valanju A P. Phys. Rev. Lett. , 2002 ,88(18) :#87401

- [15] Pendry J B ,Smith D R. Phys. Rev. Lett. ,2003 ,90(2) : 029703
 [16] Garcia N ,Niето-Vesperinas M. Phys. Rev. Lett. ,2002 ,88 (20) :207403
 [17] Williams J M. Phys. Rev. Lett. ,2001 ,87(24) :249703
 [18] t'Hooft G W. Phys. Rev. Lett. ,2001 ,87(24) :249701
 [19] Pendry J B. Phys. Rev. Lett. ,2003 ,91(9) :#99701
 [20] Pendry J B. Phys. Rev. Lett. ,2001 ,87(24) :249704
 [21] Pendry J B. Phys. Rev. Lett. ,2001 ,87(24) :249702
 [22] Parazzoli C G ,Greegor R B ,Li K *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2003 ,90(10) :#107401
 [23] Houck A A ,Brock J B ,Chuang I L. Phys. Rev. Lett. , 2003 ,87(13) :#137401
 [24] Pendry J B. Nature ,2003 ,#23 :22
 [25] Kosaka H ,Kawashima T ,Tomita A. Phys. Rev. B ,1998 ,58 (16) :#R10096
 [26] Pendry J B. Phys. Rev. B ,2002 ,65 :201104
 [27] Cubukcu E ,Aydin K ,Ozby E *et al.* 2003 ,#23 :#04
 [28] Parimi P V ,Lu W T ,Vodo P *et al.* Nature ,2003 ,#26 :#04
 [29] Foteinopoulou S ,Economou E N ,Soukoulis C M. Phys. Rev. Lett. ,2003 ,90(10) :#107402

· 物理新闻和动态 ·

三维中子成像在医学中的应用

对人体的诊断,现在医学上常用的手段是 X 射线、核磁共振、超声波等。在某些情况下还可以使用同位素辐射。最近在美国 Pittsburgh 召开的医学物理学家年会上,美国 Duke 大学的 C. Floyd 教授领导的研究组在年会上首次展示了他们利用中子形成的三维图像的新技术。

在医学诊断中利用成像的技术方面,为什么一定要使用中子呢?这是因为与具有相同能量的其他粒子相比,一方面,中子的穿透深度较大,也就是说,它可以探测到其他粒子达不到的禁区内的组织结构;另一方面,中子对存在于人体内部的化学元素具有极好的分辨能力。

Floyd 教授的研究组将这种新技术称为“中子受激辐射断层摄影术(neutron stimulated emission computed tomography, 简称为 NSECT)”。NSECT 是用 1—10 MeV 能量的快中子照入人体,当快中子进入人体后将引起体内的原子核辐射出 γ 射线,根据这些光子的特征能量就可反映出体内不同深度处原子核的化学特性。这种 NSECT 技术只对两个最轻的原子无法显示,一个是氢原子,因为它的光子辐射能量要

超过 25 MeV;另一个是氦原子,它不存在核激发态,因而无光子可辐射。

在这次年会上,C. Floyd 教授的研究组展示了由快中子激发引起的 γ 射线形成的三维图像。图像将一种人工合成的铁-铜样品内的铁、铜原子清晰地分辨开,并显示出它们在样品内的分布状态。研究组的下一步工作是要用 NSECT 技术去诊断早期的胸部肿瘤。由于微量示踪元素的浓度在良性与恶性肿瘤组织内具有明显的差别,根据在组织体内化学元素浓度的变化,中子能在肿瘤开始形成以前分辨出它的生理特征,而不必要等到肿瘤形成以后再使用切片或其他常规诊断方法来确诊。

由于单个的中子对人体的损害要大于相同能量下的 X 射线。研究组经过初步的计算表明,对胸部肿瘤作一次精确诊断所需的辐射剂量相当于一次早期胸部肿瘤 X 射线检查的剂量。为了能达到真正的医用目的,研究组准备发展一套实验性的系统,用它可以将活体内的铁原子分布图像化,这样就可以直接测出活体内的血色沉着病(hemochromatosis)而不必要再进行活体组织检测法,因为在活体组织内发生这种病时就会出现铁原子的超量。

(云中客 摘自 The annual meeting of the American Association of Physicists in Medicine. Meeting Paper WE - D - 315 - 6 , July 2004)

“世界物理年”纪念品热卖中

为了向全社会广泛宣传“2005——世界物理年”,中国物理学会订做了一批印有“世界物理年”标识的纪念品,品种包括手表、雨伞、钥匙扣、瓷杯、太阳帽、签字笔、圆珠笔、直尺、铅笔,价格从 1 元至 150 元不等。数量有限,欢迎选购。

有关纪念品的图片及价格,请查阅中国物理学会网站:www.cps-net.org.cn.

联系人:谷冬梅(010-82649019),王树辉(82649117)。