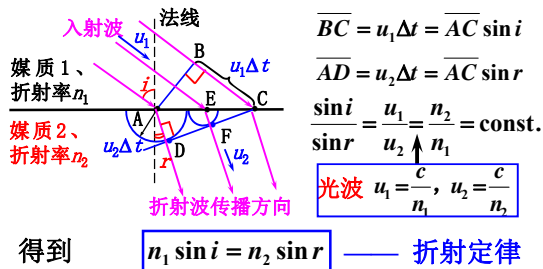


三. 波的反射和折射 (reflection & refraction)

△1. 波的反射

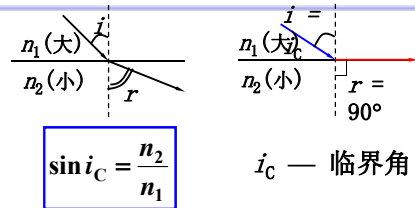
2. 波的折射: 用惠更斯作图法导出折射定律



2017/3/21

48

光密媒质→光疏媒质时, 折射角 $r >$ 入射角 i 。



当入射 $i >$ 临界角 i_c 时, 将无折射光 — 全反射。

全反射的一个重要应用是光导纤维 (光纤), 它是现代光通信技术的重要器件。

2017/3/21

1

49

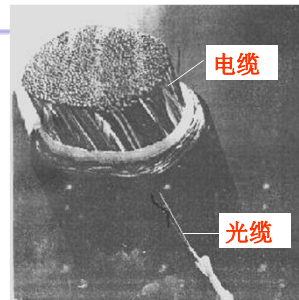


光 导 纤 维

2017/3/21

1

50



图中细光缆和粗电缆的通信容量相同

2017/3/21

1

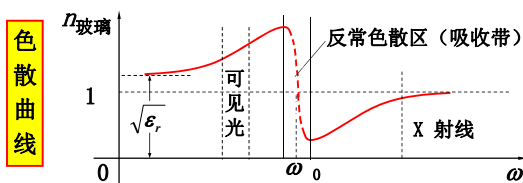
51

光纤通信容量大, 而且损耗小。

在不加中继站的情况下, 光缆传输距离可达300公里。而同轴电缆只几公里, 微波也只有几十公里。

我国电信的主干线早已全部为光缆。

近10年发展起来的导管 X 光学也应用了全反射现象。对 X 光来说, 玻璃的折射率 < 1 :



故 X 光从真空或空气射向玻璃时会发生全反射。

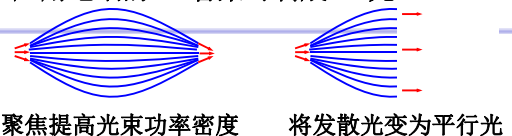
X 光以大于临界角入射到内表面光滑的玻璃管内, 就可以沿着弯曲的导管传播。

2017/3/21

1

52

应用毛细的 X 管束可制成 X 光透镜。



X 光透镜已用于:

- ▲ X 光荧光分析
- ▲ X 光衍射分析
- ▲ 深亚微米 X 射线光刻
- ▲ 医疗诊断
- ▲ X 光天文望远镜

2017/3/21

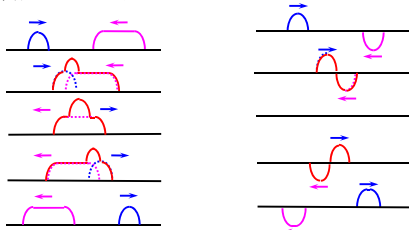
1

53

7.6 波的叠加 驻波

一. 波的叠加原理 (superposition principle of waves)

波传播的独立性:



2017/3/21 1 两不同形状的正脉冲 大小形状一样的正负脉冲

现象: ▲ 红、绿光束空间交叉相遇

(红仍是红、绿仍是绿)

▲ 听乐队演奏

(仍可辨出不同乐器的音色、旋律)

▲ 空中无线电波很多

(仍能分别接收不同的电台广播)

波的叠加原理: 几列波可以保持各自的特点 (方向、振幅、波长、频率) 同时通过同一媒质, 在它们相遇处, 质元的位移为各波单独在该处产生位移的矢量合。(亦称波传播的独立性)

2017/3/21

1

55

叠加原理由波动方程的线性所决定, 当波强度过大时, 媒质形变与弹力的关系不再呈线性, 叠加原理也就不再成立了。

★ 对于电磁波的情形:

* 麦克斯韦方程组的各个方程都是线性的,

如果 $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ 和 $\vec{B} = \mu \vec{H}$ 也是线性关系则 \vec{E} 或 \vec{H} 的每个分量的波动方程也是线性方程。

其解同样满足叠加原理。

2017/3/21

1

56

* 光波在媒质中传播时:

▲ 弱光情形, 媒质可看作线性媒质。

弱光: 光波电场强度的幅值 \ll 原子内部电子受到的电场强度 ($\sim 10^{10} \text{V/m}$)。

普通光源的光属弱光 (E 的幅值 $\sim 10^3 \text{V/m}$)。

▲ 强光情形 (激光 E 的幅值可超过 10^9V/m), 媒质非线性, 波的叠加原理不成立。

非线性光学现象: 倍频效应 混频效应
光致透明和光学双稳态

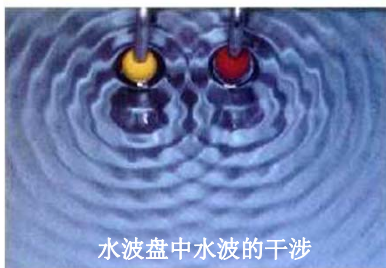
2017/3/21

1

57

二. 波的干涉现象

波叠加时在空间出现稳定的振动加强和减弱的分布叫波的干涉。



水波盘中水波的干涉

2017/3/21

1

58

相干条件: ① 频率相同;

② 振动方向相同;

③ 有固定的相位差。

两列波干涉的一般规律留待在后面光的干涉中再去分析。

下面研究一种特殊的、常见的干涉现象

—— 驻波

2017/3/21

1

59

三. 驻波 (standing wave)

能够传播的波叫行波 (travelling wave)。

两列相干的行波沿相反方向传播而叠加时，就形成驻波，它是一种常见的重要干涉现象。

1. 驻波的描述

设两列行波分别沿 x 轴的正向和反向传播，在 $x = 0$ 处两波的初相均为 0：

$$\rightarrow x: y_1 = A \cos(\omega t - \frac{x}{\lambda} 2\pi)$$

$$\leftarrow x: y_2 = A \cos(\omega t + \frac{x}{\lambda} 2\pi)$$

2017/3/21

60

$$y = y_1 + y_2$$

$$\text{令 } |A_1| = |A_2| = A$$

$$\text{如图 } A_{\text{合}} = 2A \cos \frac{x}{\lambda} 2\pi$$

各点都做简谐振动，振幅随位置不同而不同。

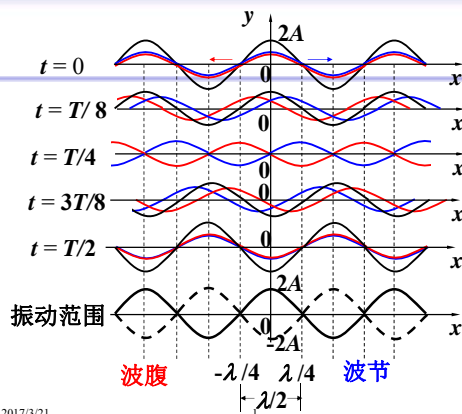
$$\therefore y = 2A \cos \frac{x}{\lambda} 2\pi \cdot \cos \omega t$$

其绝对值为振幅 相位中无 x

2017/3/21

1

61



2017/3/21

62

2. 驻波的特点：

(1) 振幅：各处不等大，出现了波腹（振幅最大处）和波节（振幅最小处）。
相邻波节间距 $\lambda/2$ ，测波节间距可得行波波长。

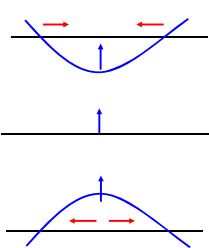
(2) 相位：没有 x 坐标，故没有了相位的传播。
驻波是分段的振动。两相邻波节间为一段，同一段振动相位相同；相邻段振动相位相反：

2017/3/21

1

63

(3) 能量：合能流密度为 $\vec{w} \cdot \vec{u} + \vec{w} \cdot (-\vec{u}) = 0$ ，
平均说来没有能量的传播，
但各质元间仍有能量的交换。



2017/3/21

64

能量由两端向中间传，
势能 \rightarrow 动能。
瞬时位移为 0，势能为 0，
动能最大。
能量由中间向两端传，
动能 \rightarrow 势能。

$A_1 \neq A_2$ 的情形：

设 $A_2 = (A_1 + \Delta A) > A_1$ ，则有

$$y = \underbrace{2A_1 \cos \frac{x}{\lambda} 2\pi}_{\text{典型的驻波}} \cdot \cos \omega t + \underbrace{\Delta A \cos(\omega t + \frac{x}{\lambda} 2\pi)}_{\text{行波}}$$

此时仍可称“驻波”，不过波节处有振动。

波在一定边界内传播时就会形成各种驻波。
如两端固定的弦，形成驻波必须满足以下条件：

$$n \frac{\lambda_n}{2} = L, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad \text{或} \quad \lambda_n = \frac{2L}{n}$$

2017/3/21

1

65

二．波在界面的反射和透射，“半波损失”

入射波 y_1 透射波 y_2 反射波 y_1'

$z_1 \leftarrow 0 \rightarrow z_2$ x

$z_{\text{大}}$ — 波密媒质
 $z_{\text{小}}$ — 波疏媒质

相对而言

入射波 $y_1 = A_1 \cos(\omega t - \frac{x}{\lambda_1} 2\pi + \varphi_1)$

反射波 $y_1' = A_1' \cos(\omega t + \frac{x}{\lambda_1} 2\pi + \varphi_1')$

透射波 $y_2 = A_2 \cos(\omega t - \frac{x}{\lambda_2} 2\pi + \varphi_2)$

2017/3/21

66

若忽略透射，则入射和反射波的波形如下：

反射波：

若 $z_1 > z_2$ 则 $\varphi_1' = \varphi_1$
即波密 \rightarrow 波疏，
反射波和入射波同相

若 $z_1 < z_2$ ，
则 $\varphi_1' = \varphi_1 \pm \pi$
即波疏 \rightarrow 波密，
反射波有相位突变 π
——半波损失

但透射波总是与入射波同相

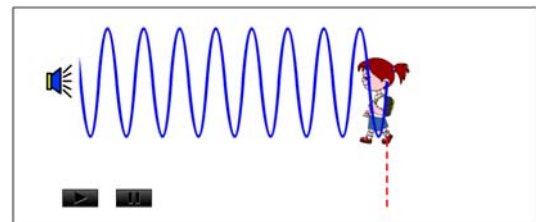
波疏媒质 波密媒质 波节 $\frac{\lambda}{2}$

驻波 相位突变 π

波密媒质 波疏媒质 波腹

驻波 相位不变

一 波源不动, 观察者相对介质以 v_0 运动



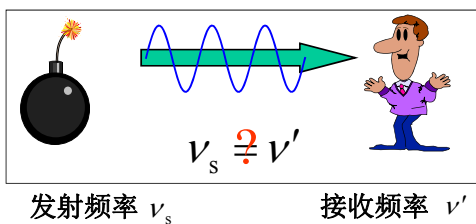
2017/3/21

1

69

7.7 多普勒效应 (Doppler effect)

人耳听到的声音的频率与声源的频率一定相同吗？



2017/3/21

1

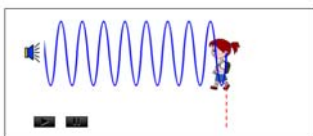
68

观察者接收的频率

设波源频率为 ν ($\lambda = \frac{u}{\nu}$)

观察者向波源运动 $\frac{u}{\nu} = \frac{u + v_0}{\nu'}$ $\nu' = \frac{u + v_0}{u} \nu$

观察者远离波源运动 $\nu' = \frac{u - v_0}{u} \nu$



2017/3/21

1

70

二 观察者不动, 波源相对介质以 v_s 运动



2017/3/21

1

71

$$T' = \frac{\lambda - v_s T}{u} = \frac{\lambda_b}{u}$$

$$\nu' = \frac{1}{T'} = \frac{u}{\lambda - v_s T} = \frac{u}{u - v_s} \nu$$

2017/3/21 1 72

观察者接收的频率

波源**向**观察者运动 $\nu' = \frac{u}{u - v_s} \nu$

波源**远离**观察者运动 $\nu' = \frac{u}{u + v_s} \nu$

2017/3/21 1 73

三 波源与观察者同时相对介质运动 (v_s, v_o)

$$\nu' = \frac{u \pm v_o}{u \mp v_s} \nu$$

v_o 观察者**向**波源运动 **+** , 远离 **-**
 v_s 波源**向**观察者运动 **-** , 远离 **+**

2017/3/21 1 74

若波源与观察者不沿二者连线运动

$$\nu' = \frac{u \pm v_o'}{u \mp v_s'} \nu$$

2017/3/21 1 75

当 $v_s \gg u$ 时, 所有波前将聚集在一个圆锥面上, 波的能量高度集中形成**冲击波** (shock wave) 或**激波**, 如核爆炸、超音速飞行等。

$\frac{v_s}{u}$ ——— **马赫数**
(Mach number)

冲击波带

对超音速飞机的最小飞行高度要有一定限制。

2017/3/21 1 77

超音速的子弹在空气中形成的激波 (马赫数为2)

2017/3/21 1 77

电磁激波 — 切连柯夫辐射 (Cerenkov radiation)

高能带电粒子在介质中的速度超过光在介质中的速度时, 将发生锥形的电磁波—切连柯夫辐射。它发光持续时间短 (数量级 10^{-10}s) 不易引起脉冲重叠, 可用于探测高能带电粒子。也可用来作起始脉冲和截止脉冲。

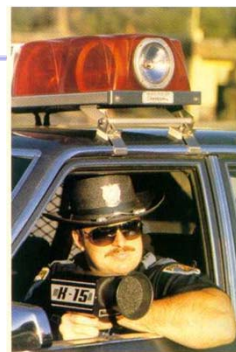
四. 多普勒效应的应用:

- ▲ 测速 (固、液、气)
- ▲ 多普勒红移 (“大爆炸” 宇宙论)
- ▲ 卫星跟踪

2017/3/21

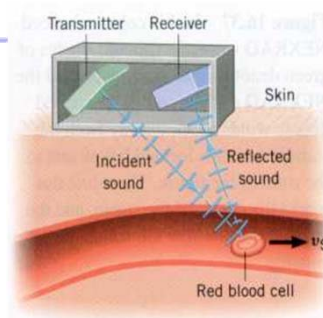
1

78



警察用多普勒测速仪测速

2017/3/21



超声多普勒效应测血流速

1

79