# 第四章 3 光的干涉

## 问题？

肥皂膜看起来常常是彩色的，雨后公路积水上面漂浮的油膜，也经常显现出彩色条纹。



这些彩色条纹或图样是怎样形成的？

我们知道：如果两列机械波的频率相同、相位差恒定、振动方向相同，就会发生干涉。光是一种电磁波，那么光也应该会发生干涉现象。怎样才能观察到光的干涉现象呢？

## 光的双缝干涉

### 演示

**光的双缝干涉**

在暗室中用氦氖激光器发出的红色激光照射金属挡板上的两条平行的狭缝（图 4.3–1甲），在后面的屏上观察光的干涉情况（图 4.3–1 乙）。

图 4.3–1 用氦氖激光器做双缝干涉实验

甲 实验装置（屏在挡板右侧，没有画出）

乙 屏的照片

反射镜

金属

挡板

激光源

如何解释这个现象呢？如图 4.3–2，让一束单色光投射到一个有两条狭缝 S1 和 S2 的挡板上，狭缝 S1 和 S2 相距很近。狭缝就成了两个波源，它们的频率、相位和振动方向总是相同的。这两个波源发出的光在挡板后面的空间互相叠加，发生干涉现象：来自两个光源的光在一些位置相互加强，在另一些位置相互削弱，因此在挡板后面的屏上得到明暗相间的条纹。

图 4.3–2 双缝干涉的示意图

S1

S2

屏

双缝

单色光

明暗相间的条纹

具体地说，如图 4.3–3，狭缝 S1 和 S2 相当于两个频率、相位和振动方向都相同的波源，它们到屏上 P0 点的距离相同。由于 S1 和 S2 发出的两列波到达 P0 点的路程一样，所以这两列波的波峰或波谷同时到达 P0 点，也就是相位仍然相同。在这点，两列波叠加后相互加强，因此这里出现亮条纹。

图 4.3–3 双缝干涉的原理图

S1

S2

P2

单色光

P1

P0

屏

挡板

再考察 P0 点上方的另外一点 P1，它距 S2 比距 S1 远一些，两列波到达 P1 点的路程不相同，两列波的波峰或波谷不一定同时到达 P1 。如果路程差正好是半个波长 *λ*，那么，当一列波的波峰到达P1 时，另一列波正好在这里出现波谷。这时两列波叠加的结果是互相抵消，于是这里出现暗条纹。

对于更远一些的 P2 点 ，来自两个狭缝的光波的路程差更大。如果路程差正好等于波长*λ*，那么，两列光波的波峰或波谷会同时到达这点，它们相互加强，这里也出现亮条纹。距离屏的中心越远，路程差越大。每当路程差等于 *λ*，2*λ*，3*λ*，… 时，也就是每当路程差等于 *λ*，*λ*，*λ*，…时，两列光波得到加强，屏上出现亮条纹；每当路程差等于 *λ*，*λ*，*λ*，… 时，两列光波相互削弱，屏上出现暗条纹。

综合以上分析，可以说，当两个光源与屏上某点的距离之差等于半波长的偶数倍时（即恰好等于波长的整数倍时），两列光波在这点相互加强，这里出现亮条纹；当两个光源与屏上某点的距离之差等于半波长的奇数倍时，两列光波在这点相互削弱，这里出现暗条纹。

“两个光源与屏上某点的距离之差等于半波长的偶数倍”，包括了“距离之差为 0”这种情况。这时在 P0 点出现亮条纹。

光的干涉实验最早是英国物理学家托马斯·杨在 1801 年成功完成的。托马斯·杨的时代没有激光。他用日光照亮一条狭缝，通过这条狭缝的光再通过双缝，发生干涉。这就是历史上著名的杨氏双缝干涉实验，它有力地证明了光是一种波。

## 干涉条纹和光的波长之间的关系

### 思考与讨论

光的双缝干涉条纹特征，如条纹间距、宽度等，能反映出光的波长、频率等信息吗？

如图 4.3–4，波长为 *λ* 的单色光照射到双缝上。两缝中心之间的距离为 *d* ，两缝 S1、S2 的连线的中垂线与屏的交点为 P0，双缝到屏的距离 OP0 = *l*。

图 4.3–4 导出相邻亮条纹距离的表达式

单色光

P1

*x*

*l*

M

*d*

*θ*

P0

S1

S2

*r*1

*r*2

O

我们考察屏上与 P0 的距离为 *x* 的一点 P1 ，两缝与 P1 的距离分别为 P1S1 = *r*1 、P1S2 = *r*2 。

在线段 P1S2 上作 P1M = P1S1 ，于是，S2M = *r*2 － *r*1 。由于两缝之间的距离 *d* 远远小于缝到屏的距离 *l*，所以，能够认为 △S1S2M 是直角三角形。根据三角函数的关系有

*r*2 － *r*1 = *d*sin*θ*

另一方面

*x* = *l*tan*θ* ≈ *l*sin*θ*

消去 sin*θ*，有

*r*2 － *r*1 = *d*

当角 *θ* 很小时，用弧度表示的 *θ* 与它的正弦 sin*θ*、正切 tan*θ*，三者近似相等。

根据上一节的分析，当两列波的路程差为波长的整数倍，即 *d* = *nλ* （*n* = 0，±1，±2 …）时出现亮条纹，也就是说，亮条纹中心的位置为

*x* = *n* *λ*

相邻两个亮条纹或暗条纹的中心间距是

∆*x* = *λ* （1）

根据这个关系式可以测出波长。

### 思考与讨论

不同颜色的单色光产生的干涉条纹会有什么不同？请你作出猜想，并在下节的实验中验证。

根据（1）式可知，条纹之间的距离与光波的波长成正比，因此能够断定，不同颜色的光，波长不同。实验中确实发现，各种颜色的单色光都会发生干涉，但条纹之间的距离不一样。用黄光做这个实验，条纹之间的距离比用红光时小；用蓝光时更小。

## 薄膜干涉

### 做一做

**用肥皂膜做薄膜干涉实验**

在酒精灯的灯芯上撒一些食盐，灯焰就能发出明亮的黄光。把铁丝圈在肥皂水中蘸一下，让它挂上一层薄薄的液膜。把这层液膜当作一个平面镜，用它观察灯焰的像（图4.3–5）。这个像与直接看到的灯焰有什么不同？

图 4.3–5 灯焰在肥皂膜上所成的像

灯焰的像和“问题”中提到的现象，都是液膜前后两个面反射的光共同形成的。来自两个面的反射光相互叠加，发生干涉，也称薄膜干涉。如图 4.3–6，通常而言，不同位置的液膜，厚度不同，因此在膜上不同的位置，来自前后两个面的反射光（即图中的实线和虚线波形代表的两列光）的路程差不同。在某些位置，这两列波叠加后相互加强，出现了亮条纹；在另一些位置，叠加后相互削弱，出现了暗条纹。

图 4.3–6 薄膜前后两个面的反射光

明

暗

明

肥皂液膜

如果用另一种颜色的光做这个实验，由于光的波长不同，导致从肥皂膜的前后两面反射的光将在别的位置相互加强，所以，从肥皂膜上看到的亮条纹的位置也会不同。薄膜上不同颜色的光的条纹的明暗位置不同，相互交错，所以，看上去会有彩色条纹。

薄膜干涉在技术上有很多应用。例如，可以在光学元件的表面镀一层特定厚度的薄膜，增加光的透射或者反射，还可以利用薄膜干涉的原理对镜面或其他精密的光学平面的平滑度进行检测。

## 科学漫步

**光的本性**

光到底是什么？这个问题早就引起了人们的注意，不过在很长的时期内人们对它的认识却进展得很慢。

到 17 世纪时，科学界已经形成了两种学说。一种是光的微粒说，认为光是从光源发出的一种物质微粒，在均匀的介质中以一定的速度传播，牛顿支持微粒说。另一种是光的波动说，是惠更斯首先提出的，认为光是在空间传播的某种波。 微粒说和波动说都能解释一些光现象，但又不能解释当时观察到的全部光现象。

到了 19 世纪初，人们在实验中观察到了光的干涉和衍射现象，这是波动的特征，不能用微粒说解释，因而证明了波动说的正确性。19 世纪 60 年代，麦克斯韦预言了电磁波的存在，并认为光也是一种电磁波。此后，赫兹在实验中证实了这种假说，至此，光的波动理论取得了巨大的成功。

但是，19 世纪末又发现了新的现象——光电效应，这种现象用波动说无法解释。爱因斯坦于20 世纪初提出了光子说，认为光具有粒子性，从而解释了光电效应。不过，这里说的光子已经不同于过去说的“微粒”了。

现在人们认识到，光既具有波动性，又具有粒子性。

## 练习与应用

本节共 4 道习题。第 1 题是通过光的干涉现象认识光的本性；第 2 题考查在光的干涉现象中如何判断亮条纹和暗条纹的位置，还从光的干涉引申到了声波的干涉；第 3 题是对光波的双缝干涉的计算，判断看到的是亮条纹还是暗条纹；第 4 题定量分析影响薄膜干涉条纹间距的相关因素。

1．光的干涉现象对认识光的本性有什么意义？

**参考解答**：干涉是波的特性，光的干涉现象说明光是一种波。

2．两列光干涉时，光屏上的亮条纹和暗条纹到两个光源的距离与波长有什么关系？

声的干涉也遵循类似的规律。设想在空旷的地方相隔一定位置的两个振动完全一样的声源，发出的声波波长是 0.6 m，观察者 A 离两声源的距离分别是 4.5 m 和 5.4 m，观察者 B 离两声源的距离分别是 4.3 m 和 5.5 m。这两个观察者听到声音的大小有什么区别？

**参考解答**：亮条纹到两光源的距离差为半波长的偶数倍，暗条纹到两光源的距离差为半波长的奇数倍。

对于观察者 A 所在位置，两声源的距离差 Δ*x*1 = 5.4 m − 4.5 m = 0.9 m，是半波长的 3 倍，故 A 位于振动减弱点；对于观察者 B 所在位置，两声源的距离差 Δ*x*2 = 5.5 m − 4.3 m = 1.2 m，是半波长的 4 倍，故 B 位于振动加强点。所以，观察者 A 听到的声音比观察者 B 要弱。

3．在双缝干涉实验中，光屏上某点 P 到双缝 S1 和 S2 的路程差为 7.5×10−7 m，如果用频率 6.0×1014 Hz 的黄光照射双缝，试通过计算分析 P 点出现的是亮条纹还是暗条纹。

**参考解答**：暗条纹

提示：根据波速的公式得光的波长 *λ* = = m = 5.0×10−7 m，路程差与半波长之 = = 3。路程差为半波长的奇数倍，故为暗条纹。

4．劈尖干涉是一种薄膜干涉，如图 4.3–7 所示。将一块平板玻璃放置在另一平板玻璃之上，在一端夹入两张纸片，从而在两玻璃表面之间形成一个劈形空气薄膜，当光从上方入射后，从上往下看到的干涉条纹有如下特点：

图 4.3–7

（1）任意一条明条纹或暗条纹所在位置下面的薄膜厚度相等；

（2）任意相邻明条纹或暗条纹所对应的薄膜厚度差恒定。

现若在如图所示装置中抽去一张纸片，则当光入射到劈形空气薄膜后，从上往下可以观察到干涉条纹发生了怎样的变化？

**参考解答**：条纹变疏

提示：光线在空气膜的上、下表面处反射，并发生干涉，从而形成干涉条纹。设空气膜顶角为 *θ*，Δ*l* 为两相邻亮条纹的间距，如图所示。两处光的路程差分别为 *δ*1 = 2*d*1，*δ*2 = 2*d*2。因为 *δ*2 – *δ*1 = *λ*．所以 *d*2 – *d*1 = 。由几何关系可得 = tan*θ*，即 Δ*l* = 。当抽去一张纸片时，*θ* 减小，Δ*l* 增大，即条纹变疏。



# 第 3 节 光的干涉 教学建议

## 1．教学目标

（1）了解相干光源，知道光的干涉条件，知道杨氏干涉实验的设计原理。

（2）通过光的双缝干涉实验，认识双缝干涉图样的特征。

（3）知道光的路程差的概念，知道产生明暗条纹的条件和相邻两个亮（暗）条纹中心间距与波长的关系。

（4）知道薄膜干涉的原理并能解释一些现象。

## 2．教材分析与教学建议

光的干涉是机械波干涉知识在光学领域的延伸，二者的本质都是波的叠加。通过这部分内容的教学可以使学生对干涉现象的物理过程有更具体的了解，进一步加深学生对光的波动性的认识。

本节从肥皂膜彩色条纹出发，引出光的十涉问题，再通过分析光的双缝干涉实验原理，来探究光的干涉条纹特征和产生条件。然后利用数学推导得到干涉条纹、相邻两个亮（暗）条纹中心间距与波长的关系，并对实验现象进行解释。最后利用光的干涉知识分析肥皂膜条纹的成因。光的双缝干涉条纹特征和产生条件是重点，相邻两个亮（暗）条纹中心间距与波长的关系的推导和对用肥皂膜做薄膜干涉实验时产生彩色条纹的原因的解释是难点。

### （1）问题引入

本节以肥皂膜和油膜上的彩色条纹是如何形成的作为引入问题。这一由“美丽的条纹”引出的问题其实只是一个引子，因为从知识和思维的角度，直接解决这一问题还有很大难度。教师可以继续提问：“美丽的条纹”中的关键特征——“条纹”让你想到了什么现象？

### （2）光的双缝干涉

光的双缝干涉现象在日常生活中比较少见，学生对双缝干涉现象的认识依赖于实验。因此，成功地做好用氦氖激光器演示光的双缝干涉的实验，是促使学生正确理解本节知识的关键。这个演示实验最好在暗室里进行。若在教室做此实验，应将四周的窗帘拉上，以确保看清干涉条纹。在对光源的介绍上，教师只需要向学生说明要看到干涉现象，除了频率相同外．还要满足振动情况相同等条件，不提及相位差等概念，避免加重学生理解上的负担。教师应引导学生仔细观察明暗条纹的特点，还可以让学生在距离光源不同的位置用白纸作为接收屏，学生不仅可以近距离观察到白纸上出现了等间距排列的明暗相间的条纹，还能看到屏与光源的距离越大，条纹间距越大等现象。这一方面增加了学生的兴趣，另一方面也为以后的教学作了铺垫。在演示结束后，教师应强调这样的结论：干涉是波独有的特征，杨氏双缝干涉实验证明了光是一种波。

### （3）对实验现象的解释

因为学生有波的叠加的知识，教师可以提出问题让学生讨论：屏上哪些地方应该出现亮纹，哪些地方应该出现暗纹？引导学生归纳得出：当两列波的路程差为半波长的偶数倍时，光振动在该点加强，形成亮条纹；当两列波的路程差为半波长的奇数倍时，光振动在该点减弱，形成暗条纹。

**教学片段**

**决定条纹间距的条件**

提出问题：为什么频率相同、振动情况相同的两列光会产生明暗相间的干涉图样呢？我们来探究一下干涉现象的原理。

引导分析：首先来回顾一下机械波的干涉。

若在两列相同的波相遇的某点总是波峰与波峰相遇或波谷与波谷相遇，则该点是振动的加强点（例如两波源连线中垂线上的点），把加强点连起来就是加强区。若某点是波峰与波谷相遇的点，则该点是振动的减弱点，这些点的连线是减弱区。振动加强区与减弱区是相互间隔的，其分布是稳定的。

分析说明：光也是一种波，频率相同、振动情况相同的两列光波在空间中的叠加同样应该出现振动加强和振动减弱交替分布的现象。反映在屏幕上：振动加强区，光能量较大——亮；减弱区，光能量较小——暗，所以得到明暗相间的干涉条纹。

结合图 4–7 讲解如下。

提出问题：思考一下 S1、S2 的中垂线与屏的交点 A 是亮条纹还是暗条纹，你能解释吗？

分析推测：结合机械波知识，归结到路程差上，可以根据以下线索引导学生逐层分析。

①中垂线与屏的交点 A 距离两波源的路程差为 0，所以总是波峰与波峰相遇或波谷与波谷相遇，应该是亮条纹，我们称之为中心亮纹。

②与中心亮纹相邻的第一条亮纹（两侧各一条）称为第 1 级亮纹，它到两波源的路程差为一个波长 *λ*，所以也是波峰与波峰相遇或波谷与波谷相遇，出现亮条纹。

③依次推导，到两波源的路程差为两个波长，即为 2*λ* 的条纹称为第 2 级亮纹；到两波源的路程差为三个波长，即为 3*λ* 的称为第 3 级亮纹……到两波源的路程差为 *n* 个波长，即为 *nλ* 的称为第 *n* 级亮纹。

问题引导：对于任意一点，在什么条件下出现亮条纹，什么条件下出现暗条纹？

（有条件的学校，这一段内容最好用动画动态显示，有利于学生理解干涉图样与路程差的关系。）

小结：两光源发出的光波到达某点的路程差为半波长的偶数倍，即 *δ* = *nλ*（*n* = 0，1，2，3，…）时，光振动在该点加强，形成亮条纹；当两列波的路程差为半波长的奇数倍，即 *δ* = （*n* = 0，1，2，3，…）时，光振动在该点减弱，形成暗条纹。于是得到明暗相间的干涉条纹。

### （4）干涉条纹和光的波长之间的关系

这部分内容是下一节实验的理论基础。在推导相邻亮（暗）条纹间距公式时，引导学生对数值作出合理的近似，特别要把近似的前提条件讲清楚。第一个近似是直角近似，前提是两缝距离远小于缝到屏的距离；第二个近似是正切值约等于正弦值，前提是角度足够小。

屏上亮条纹或暗条纹的位置距 O 点的距离用 *x* 表示，屏上任意一点的振动加强或减弱的情况决定于该点到光源 S1 和 S2 的距离之差（路程差 *δ*）*r*2 – *r*1，在 *δ* 等于半波长偶数倍的位置产生亮条纹，在*δ* 等于半波长奇数倍的位置时产生暗条纹。寻求 *r*2 – *r*1 与 *d*、*l* 和 *x* 的关系，推出 *r*2 – *r*1 = *d* 。公式推导过程中，要对亮条纹中心位置的公式 *x* = *n* *λ* 引起重视，一是它表示亮条纹中心到双缝连线的中垂线与屏的交点的距离，二是公式中的 *n* 表示条纹的级数。学生对于公式 *x* = *n* *λ*（*n* = 0，± 1，± 2，…）的表述方法不习惯，讲述时要从具体的中心亮纹，第 1 级、第 2 级……亮纹或暗纹入手，归纳出一般的表述。例如，产生亮条纹的条件是 *δ* = *r*2 – *r*1 = 0，*λ*，2*λ*，…和 − *λ*，− 2*λ*，…（“−”的意义是 *r*2 < *r*1，位置在 O 点的下方），从中归纳出 *δ* = *d* = *nλ*，解出 *x* = *n* *λ*（*n* = 0，±1，±2，…），然后具体说明 *n* = 0，±1，±2，…所对应的 *x* = 0，± *λ*，± 2 *λ*，…的意义，使学生理解这种数学表述的含义。

### （5）薄膜干涉

薄膜干涉是教学的难点，学生要通过观察来认识薄膜干涉条纹的特点，能依据干涉原理解释单色光的干涉条纹，构建模型解释蜡烛火焰在肥皂薄膜中所成的干涉图样。要完成这一难点内容的学习，需要教师很好地进行教学设计。

教师要从三个方面进行引导。第一是干涉原理：相干的两列光波来自薄膜何处？第二是条纹特征：基本上都是水平的，上面宽，下面窄。第三是如何构建薄膜形状，使其能够解释条纹的特点。

**教学片段**

**薄膜干涉**

问题 1．用肥皂薄膜观察酒精灯火焰的像，你应该在薄膜哪侧观察？

问题 2．你看到的像是怎么样的？这个像和平面镜中的像一样吗？

问题 3．教材图 4.3–5 中的像为什么有明暗相间的条纹？是哪两列光波发生干涉的？

问题 4．条纹有什么特点？你建构的模型是怎样的？它能够很好地解释条纹的特点吗？

问题 5．如果你的模型不能很好地解释条纹特点，怎么办？

问题 6．将教材图 4.3–5 中的酒精灯换成蜡烛，你观察到的实验现象是怎么样的？

问题 7．节前“问题”中肥皂薄膜的彩色条纹如何解释？

薄膜干涉有许多应用，在解释如何利用薄膜干涉检查光学平面平整度的过程中，注意引导学生弄清楚两列干涉光的来源。耍弄清楚这一点，首先要明确薄膜的特征，其次要明确薄膜是空气膜。要认识到明暗条纹是等厚或等高线，才能分析条纹与被测面的凹凸关系。若条纹向左弯曲，说明该处向下凹；反之，若条纹向右弯曲，说明该处向上凸起。

## 3．“练习与应用”参考答案与提示

本节共 4 道习题。第 1 题是通过光的干涉现象认识光的本性；第 2 题考查在光的干涉现象中如何判断亮条纹和暗条纹的位置，还从光的干涉引申到了声波的干涉；第 3 题是对光波的双缝干涉的计算，判断看到的是亮条纹还是暗条纹；第 4 题定量分析影响薄膜干涉条纹间距的相关因素。

1．干涉是波的特性，光的干涉现象说明光是一种波。

2．亮条纹到两光源的距离差为半波长的偶数倍，暗条纹到两光源的距离差为半波长的奇数倍。

对于观察者 A 所在位置，两声源的距离差 Δ*x*1 = 5.4 m − 4.5 m = 0.9 m，是半波长的 3 倍，故 A 位于振动减弱点；对于观察者 B 所在位置，两声源的距离差 Δ*x*2 = 5.5 m − 4.3 m = 1.2 m，是半波长的 4 倍，故 B 位于振动加强点。所以，观察者 A 听到的声音比观察者 B 要弱。

3．暗条纹

提示：根据波速的公式得光的波长 *λ* = = m = 5.0×10−7 m，路程差与半波长之 = = 3。路程差为半波长的奇数倍，故为暗条纹。

4．条纹变疏

提示：光线在空气膜的上、下表面处反射，并发生干涉，从而形成干涉条纹。设空气膜顶角为 *θ*，Δ*l* 为两相邻亮条纹的间距，如图 4–8 所示。两处光的路程差分别为 *δ*1 = 2*d*1，*δ*2 = 2*d*2。因为 *δ*2 – *δ*1 = *λ*．所以 *d*2 – *d*1 = 。由几何关系可得 = tan*θ*，即 Δ*l* = 。当抽去一张纸片时，*θ* 减小，Δ*l* 增大，即条纹变疏。