

中国科学技术大学物理学院
School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China

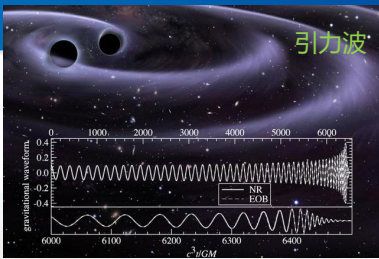
Quantum Physics

PHYS1010.04
Spring 2022

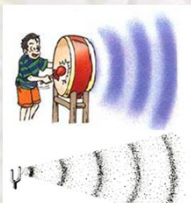
Lesson 4. 光的偏振

内容回顾：波的本质与分类

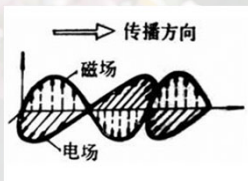
- 什么是波
 - 震源**振动**在空间或介质中的**传播**
- 波的分类
 - 依据**震源种类**，可以将波分类为：
 - 标量波：温度、密度、... ..
 - 矢量波：电磁波、... ..
 - 张量波：固体中的声波、地震波、引力波、... ..



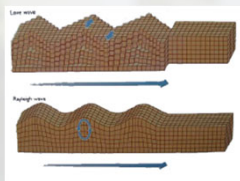
引力波




空气中的声波
— 疏密波



传播方向
磁场
电场
电磁场—矢量波



地震波—张量波



Quantum Physics

2

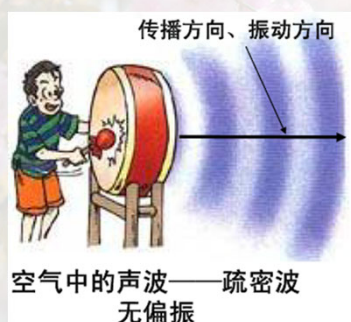
内容回顾：波的本质与分类

■ 什么是波

□ 震源**振动**在空间或介质中的**传播**

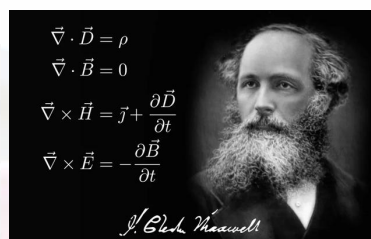
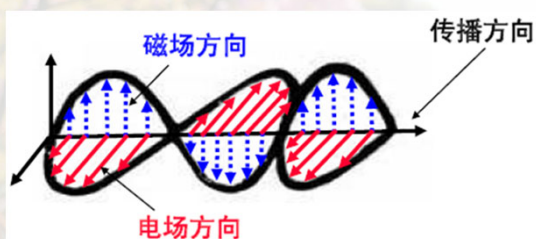
■ 波的分类

□ 依据振动方向，可以将波分为：**横波**与**纵波**



内容回顾：光波的本质是电磁波

■ **光波的本质**是变化的电场和磁场在空间中的相互激励和感生，是**交变电磁场**（**电磁振荡**）在空间中的传播



电（磁）场为**矢量场**

→ **矢量波**

感生电（磁）场**垂直**于传播方向

→ **横波、有偏振**

介质中的介电常数 ϵ 在不同空间方向上取值不同，对光传播产生不同影响

内容回顾：光波的本质是电磁波

■ 光线相关的几个方向

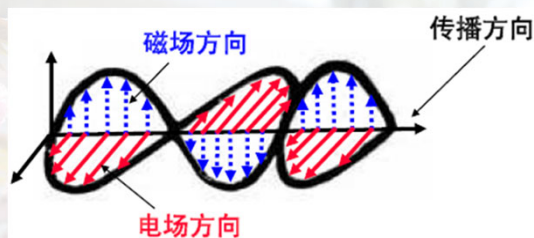
波矢量 \vec{k} 波印廷矢量 $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ 右手系

所谓**光线的传播方向**指的是波印廷矢量，即**能量**的传播方向（能流方向）；**波矢量始终满足折射定律**。

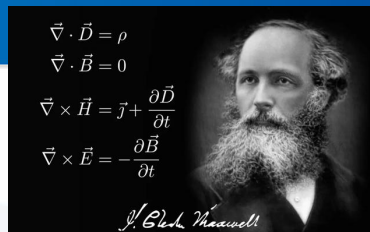
根据 $\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -u_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{cases}$

代入平面波 $\begin{cases} \vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \\ \vec{D} = \vec{D}_0 e^{i\phi} \\ \vec{H} = \vec{H}_0 e^{i\phi} \end{cases}$

$\Rightarrow \begin{cases} \vec{k} \times \vec{E} = \omega u_0 \vec{H} \rightarrow \vec{H} \perp \vec{k} \\ \vec{k} \times \vec{H} = -\omega \vec{D} \rightarrow \vec{D} \perp \vec{k}, \vec{H} \end{cases}$
 $\vec{D}, \vec{H}, \vec{k}$ 构成右手系



光是横波，光波的电、磁分量方向都与传播的方向垂直，从而出现各种偏振状态。



偏振光的分类

■ 五种偏振态

根据Maxwell方程组，沿z轴正向传播的电磁波，电场矢量在x-y面类振动

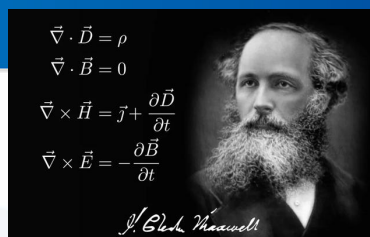
$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \begin{bmatrix} A_1 \cos(\omega t - kz) \\ A_2 \cos(\omega t - kz + \Delta\phi) \end{bmatrix}$$

迪卡尔坐标系中电场在两个方向的分量为

$$\begin{cases} E_x = A_1 \cos(\omega t - kz) \\ E_y = A_2 [\cos \Delta\phi \cos(\omega t - kz) - \sin \Delta\phi \sin(\omega t - kz)] \end{cases}$$

两个分量满足方程：

$$\frac{E_x^2}{A_1^2} + \frac{E_y^2}{A_2^2} - 2 \frac{E_x E_y}{A_1 A_2} \cos \Delta\phi = \sin^2 \Delta\phi$$



偏振光的分类

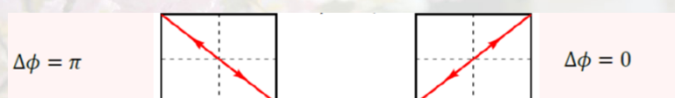
■ 五种偏振态

$$\frac{E_x^2}{A_1^2} + \frac{E_y^2}{A_2^2} - 2\frac{E_x E_y}{A_1 A_2} \cos \Delta\phi = \sin^2 \Delta\phi$$

(1) 当 $-\pi < \Delta\phi < 0$ 时

$$\frac{E_x}{A_1} = \pm \frac{E_y}{A_2} \quad \text{直线方程}$$

线偏振光 (平面偏振光) : 振动方向在一三或二四象限的直线



偏振光的分类

■ 五种偏振态

$$\frac{E_x^2}{A_1^2} + \frac{E_y^2}{A_2^2} - 2\frac{E_x E_y}{A_1 A_2} \cos \Delta\phi = \sin^2 \Delta\phi$$

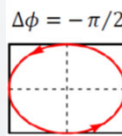
(2) 当 $\Delta\phi = \pm \frac{\pi}{2}$ 时

$$\frac{E_x^2}{A_1^2} + \frac{E_y^2}{A_2^2} = 1 \quad \text{长短轴在 } x-y \text{ 上的椭圆方程}$$

椭圆偏振光: 电场矢量的末端轨迹构成椭圆; 迎着光线看, 末端轨迹逆时针转动为**左旋**椭圆偏振光, 顺时针转动为**右旋**椭圆偏振光。



$\Delta\phi = \pi/2$



$\Delta\phi = -\pi/2$

偏振光的分类

■ 五种偏振态

$$\frac{E_x^2}{A_1^2} + \frac{E_y^2}{A_2^2} - 2\frac{E_x E_y}{A_1 A_2} \cos \Delta\phi = \sin^2 \Delta\phi$$

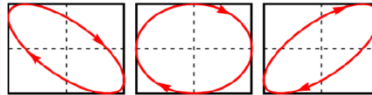
(3) 一般情况下为任意的椭圆方程

$-\pi < \Delta\phi < 0$ 左旋

$0 < \Delta\phi < \pi$ 右旋

椭圆偏振光: 电场矢量的末端轨迹构成椭圆; 迎着光线看, 末端轨迹逆时针转动为**左旋**椭圆偏振光, 顺时针转动为**右旋**椭圆偏振光。

$\Delta\phi = 3\pi/4$
右旋



$\Delta\phi = \pi/4$
右旋

$\Delta\phi = \pi/2$

$\Delta\phi = -3\pi/4$
左旋



$\Delta\phi = -\pi/4$
左旋

$\Delta\phi = -\pi/2$

偏振光的分类

■ 五种偏振态

$$\frac{E_x^2}{A_1^2} + \frac{E_y^2}{A_2^2} - 2\frac{E_x E_y}{A_1 A_2} \cos \Delta\phi = \sin^2 \Delta\phi$$

(4) 特别地, 当 $\Delta\phi = \pm \frac{\pi}{2}$ 且 $A_1 = A_2$ 时

$$E_x^2 + E_y^2 = 1 \quad \text{圆方程: 圆偏振光}$$

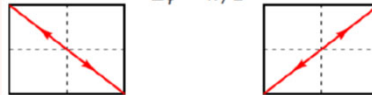
$\Delta\phi = 3\pi/4$
右旋



$\Delta\phi = \pi/4$
右旋

$\Delta\phi = \pi/2$

$\Delta\phi = \pi$



$\Delta\phi = 0$

$\Delta\phi = -\pi/2$

$\Delta\phi = -3\pi/4$
左旋



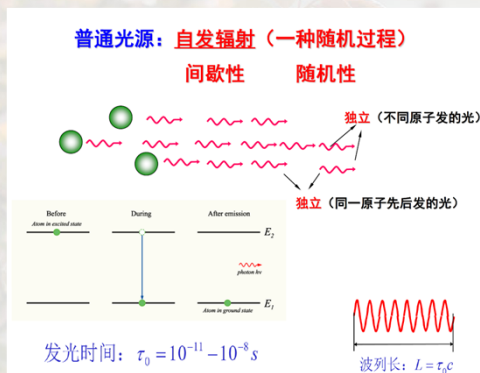
$\Delta\phi = -\pi/4$
左旋

偏振光的分类

• 光源发光的微观机制

发光机制：原子和分子等微观客体内部的能量发生改变（需要量子力学的解释）

特征：不同原子或分子所发射的波列在**振动方向**和初始相位上相互独立，没有联系，而且每个原子或分子发光的持续时间很短，**长时间平均看**，**振动在任何方向均不占优**，沿传播方向轴对称分布

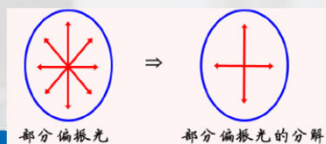


自然光:

在垂直于传播方向上，都具有相同的平均振幅和能量的光波

部分偏振光:

介于自然光和线偏振光之间，振动方向随机变化，但存在优势方向，该方向振幅最大，与优势方向垂直的方向振幅最小。可以分解为两个振幅不等、振动方向垂直，相互之间没有固定相位差的线偏振光。



中国科学技术大学物理学院

Quantum Physics

11

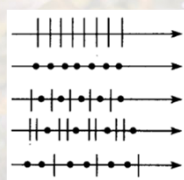
偏振光的分类

• 偏振度

各个方向最大振幅和最小振幅对应的光强 I_{\max} 和 I_{\min} 的比值

$$P \stackrel{\text{def}}{=} \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \in [0, 1]$$

自然光的偏振度为0，线偏振光的偏振度为1，部分偏振光介于两者之间



常用短划线和点表示光的偏振状态:

传播方向: 箭头

短划线: 偏振方向平行于屏幕

点: 振动方向垂直于屏幕

多少: 表示那种振动方向占优势



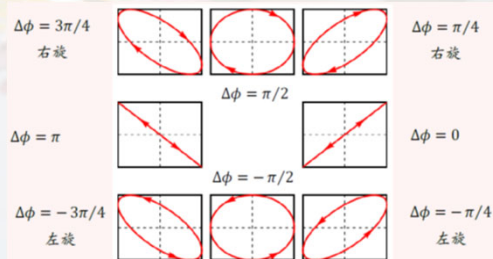
中国科学技术大学物理学院

Quantum Physics

12

偏振光的分类

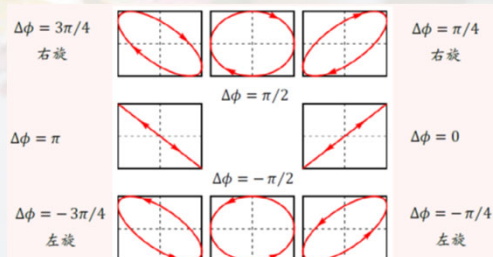
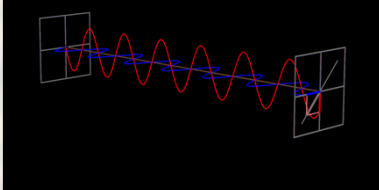
- 几种偏振态的物理图像：在某一时刻，电场矢量的端点在垂直于光传播方向的截面内形成的轨迹



偏振光的分类

- 几种偏振态的物理图像：在某一时刻，电场矢量的端点在垂直于光传播方向的截面内形成的轨迹

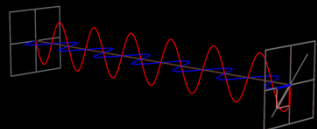
线偏振光，相位延迟为零



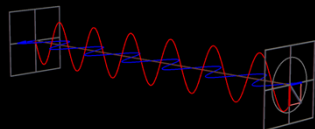
偏振光的分类

- 几种偏振态的物理图像：在某一时刻，电场矢量的端点在垂直于光传播方向的截面内形成的轨迹

线偏振光，相位延迟为零



圆偏振光，相位延迟为 $\pi/2$

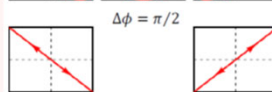


$\Delta\phi = 3\pi/4$
右旋



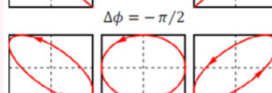
$\Delta\phi = \pi/4$
右旋

$\Delta\phi = \pi$



$\Delta\phi = 0$

$\Delta\phi = -3\pi/4$
左旋

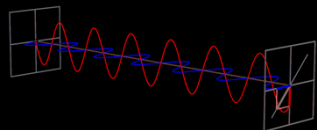


$\Delta\phi = -\pi/4$
左旋

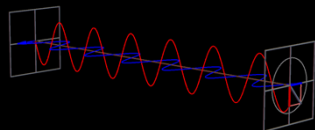
偏振光的分类

- 几种偏振态的物理图像：在某一时刻，电场矢量的端点在垂直于光传播方向的截面内形成的轨迹

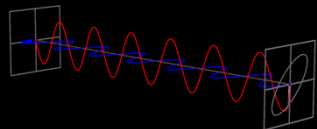
线偏振光，相位延迟为零



圆偏振光，相位延迟为 $\pi/2$



椭圆偏振光，相位延迟 $\pi/4$

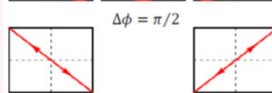


$\Delta\phi = 3\pi/4$
右旋



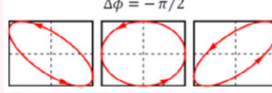
$\Delta\phi = \pi/4$
右旋

$\Delta\phi = \pi$



$\Delta\phi = 0$

$\Delta\phi = -3\pi/4$
左旋

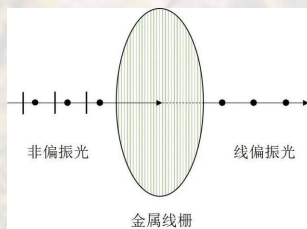


$\Delta\phi = -\pi/4$
左旋

偏振片

- 只允许某一个振动方向（线偏振）通过，该方向为透振方向或**透光轴**

可以分为金属线栅偏振片、纳米粒子偏振片、二向色薄膜偏振片等类型



线栅的间距小于入射光波长。非偏振光入射到金属线栅上，**平行**于线栅排列方向的偏振光分量**被金属线栅反射**，或因为对金属线栅的内部电子做功而被**吸收**，**垂直**于线栅排列方向的偏振光分量**透过**线栅继续传播，从而得到线偏振光。

兰德（Edwin Herbert Land）发明的 H-偏振片是以具有网状结构的**聚乙烯醇高分子材料**为片基制成，大分子在网格中定向排列（类似于金属线）。入射光波**沿着**高分子长链方向的电场分量能推动电子运动做功，被**强烈吸收**，**垂直**长链方向的电场分量能够**透过**。

消光比(ER)是近完美线偏光的最大透过率与最小透过率的比值。当偏振片的轴和信号偏振方向平行时，透射达到最大值；偏振片旋转 90° 之后，透射达到最小值。

常规偏振片的消光比在**1000:1-100000:1**之间。

<https://www.lbtek.com/course.html>

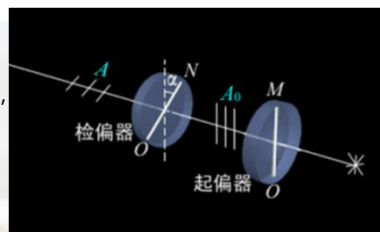
偏振片

- 只允许某一个振动方向（线偏振）通过，该方向为透振方向或**透光轴**
- 从自然光或部分偏振光**获得线偏振光——起偏器**

- 自然光经过起偏器后，称为线偏振光，振动方向平行于透光轴
- 再经过**检偏器**（与起偏器的透光轴夹角为 α ），则透射光波的振幅为 $A = A_0 \cos \alpha$ ，强度为

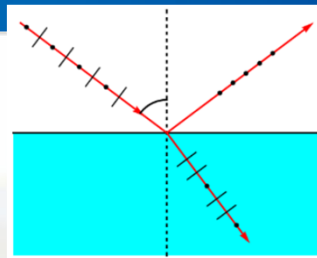
$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad \text{马吕斯定律}$$

- 当 $\alpha = 90^\circ$ 时，出射光强为零，产生**消光现象**
通常利用消光现象校准两个偏振片的透光轴



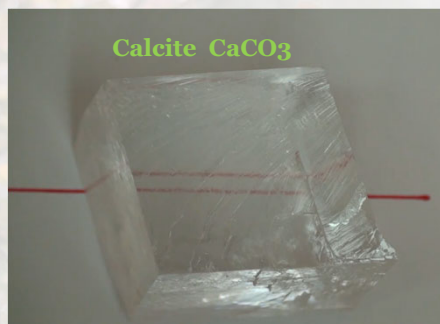
反射和折射中的偏振问题

- 实验表明：自然光在两种不同介质界面的反射和折射，产生的反射光和折射光均为部分偏振光
- 理论解释：波动光学（略，参考 A. 伽塔克《光学》Ch.24）
- 反射光中垂直于入射面的振动分量占优，折射光中平行于入射面的振动分量占优
- 改变入射角度，反射光和折射光的偏振度会变化
- 存在一个临界角度 $\theta_b = \arctan \frac{n_2}{n_1}$ ，在该角度入射，**反射光是振动面和入射面垂直的线偏振光**——布儒斯特定律
- 利用布儒斯特定律可以测量不透明材料的折射率也可以制备线偏振光（作为起偏器）



双折射现象与波晶片

- 双折射现象——方解石中的重影



Double Refraction, Birefringence



猜测：存在**两种**不同折射率，分别对应一个像。

折射定律：

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Q: 为什么**同一块晶体**会对**同一束光线**传播产生**不同的（折射率）**影响呢？
这种现象是不是**任何情况**下都存在呢？



双折射现象与波晶片

- 双折射现象——方解石中的重影



重影

消失

再次出现

Q: 为什么**同一块晶体**会对**同一束光线**传播产生**不同的 (折射率) 影响**呢? 这种现象是不是**任何情况下**都存在呢?

A: 重影的出现并不是无条件的, 只有在特定角度下才会形成; 晶体的双重折射率应该是和晶体的结构 (取向) 有关系。



中国科学技术大学物理学院

Quantum Physics

21

双折射现象与波晶片

- 定义: 一束入射到介质中的光经折射后变为两束光
 - 一束遵循折射定律, 称为**寻常光** (o光, ordinary ray)
 - 一束不遵循折射定律, 称为**非常光** (e光, extraordinary ray)



正入射 → 光束不偏移 → o光
光束偏移 → e光



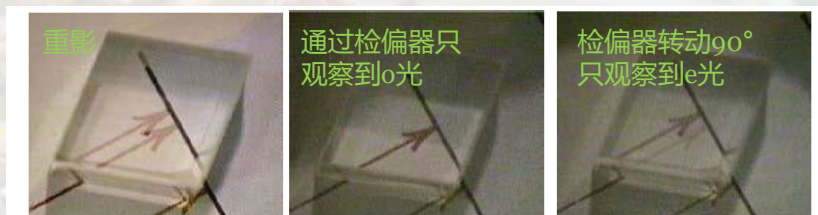
中国科学技术大学物理学院

Quantum Physics

22

双折射现象与波晶片

- 定义：一束入射到介质中的光经折射后变为两束光
 - 一束遵循折射定律，称为**寻常光**（o光，ordinary ray）
 - 一束不遵循折射定律，称为**非常光**（e光，extraordinary ray）
 - 折射后的两束光是振动方向相互垂直的**线偏振光**
 - o光和e光是相对晶体而言的，只在晶体内部才有意义



o光和e光 → 均能通过检偏器也会消失 → **线偏振光**
 相互垂直的检偏器一次只能看到一个像 → **振动方向正交**

双折射现象与波晶片

- 双折射现象是有晶体的结构决定的（晶体是其组成原子、离子或分子按照一定的周期性规律排列形成的、有特定几何外形的固体）
- 双折射晶体中的光波相速度与光的偏振方向有关，也就是存在依赖于偏振的两个折射率（**主**折射率 n_o 和 n_e ，注意e光折射率依赖于传播方向）
- 利用晶体双折射可以制作**相位延迟片**（**波晶片**）：在不同偏振态之间引入相位差
- 波晶片的**快轴**和**慢轴**：由于主折射率存在大小差异，相应偏振的光波传播速度不同，有快有慢

双折射现象与波晶片

- 四分之一波晶片：线偏振光经过后，出射光的**快轴**分量会比**慢轴**分量多增加 $\pi/2$ 的相位
- 二分之一波晶片：线偏振光经过后，出射光的**快轴**分量会比**慢轴**分量多增加 π 的相位
- 一般波晶片：线偏振光经过后，出射光的**快轴**分量会比**慢轴**分量多增加相位

$$\Delta\phi = 2\pi d(n_1 - n_2)/\lambda$$

d 为波晶片厚度， λ 为工作波长， n_1 和 n_2 为两个主折射率



双折射现象与波晶片

- 电场的两个振动分量满足方程

$$\frac{E_x^2}{A_1^2} + \frac{E_y^2}{A_2^2} - 2\frac{E_x E_y}{A_1 A_2} \cos \Delta\phi = \sin^2 \Delta\phi$$

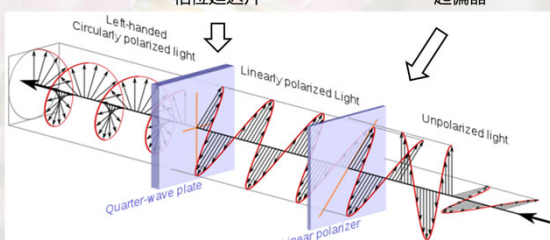
- 线偏振光入射，初始 $\Delta\phi = 0$ 或 π ，经过四分之一波片，额外增加 $\pi/2$ 的相位
- 变换后的两个振动分量间的相位差为 $\Delta\phi' = \pi/2$ 或 $3\pi/2$ ，为（椭）圆偏振
- 反之，（椭）圆偏振经过四分之一波片可以变为线偏振光

调节电场矢量的端点轨迹方程，也就是调节两个垂直振动分量间的**相位差**，以及 A_x 与 A_y 的**相对大小**

相位延迟片

起偏器

利用一个起偏器和一片四分之一波片产生圆偏振光



注意光轴的位置

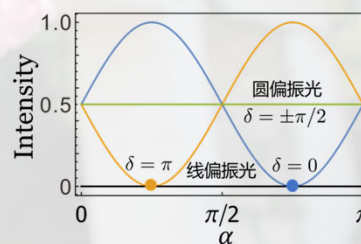
<https://en.wikipedia.org/wiki/Waveplate>

五种偏振光的区分

• 转动检偏器

- 自然光 → 光强不变 (定义)
- 线偏振光 → 光强改变且在某一特定角度消光 (定义)
- 部分偏振光 → 光强改变、但不消光 (定义)
- 圆偏振光 → 光强不变
- 椭圆偏振光 → 光强改变、但不消光

只用一片检偏器仅能鉴别出线偏振光
无法完全区别五种偏振态



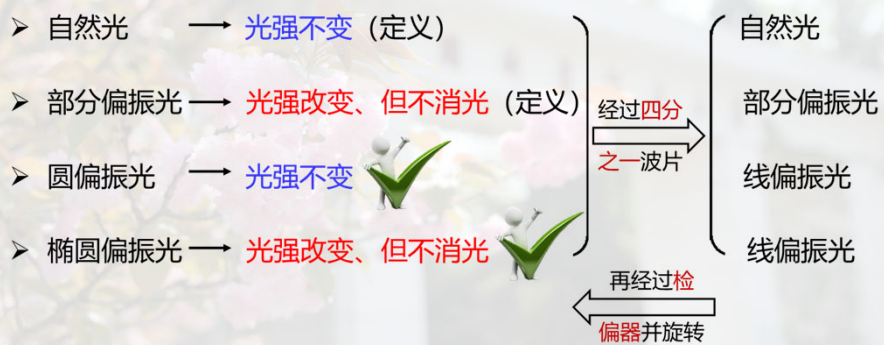
五种偏振光的区分

• 转动检偏器+四分之一波片

- | | | |
|--------------------------|--------------|-------|
| ➤ 自然光 → 光强不变 (定义) | } 经过四分之一波片 → | 自然光 |
| ➤ 部分偏振光 → 光强改变、但不消光 (定义) | | 部分偏振光 |
| ➤ 圆偏振光 → 光强不变 | | 线偏振光 |
| ➤ 椭圆偏振光 → 光强改变、但不消光 | | 线偏振光 |

五种偏振光的区分

- 转动检偏器+四分之一波片+检偏器



作业

- 讲义p37页12-15题