

## 加速器——李浩虎

1. 直角坐标系下, 假设在时刻  $t_0$  时理想粒子的坐标为  $(x_0, y_0, 0)$ , 其速度为  $(v_{x0}, v_{y0}, 0)$ , 另外有一个粒子的坐标为  $(x_1, y_1, z_1)$ , 速度为  $(v_{x1}, v_{y1}, v_{z1})$ 。试给出该粒子在六维相空间中的坐标  $(x, x', y, y', l, \delta)$ 。注: 坐标系均采用左手系,  $\delta$  为动量分散。

解:

2. 动能为 150MeV 和 3GeV 的质子和电子的  $\beta$  和  $\gamma$  分别为多少? 质子静止质量为 938MeV, 电子静止质量为 0.511MeV。

解: 质子的静止质量为:  $m_{p0} = 938\text{MeV}$ , 电子的静止质量为:  $m_{e0} = 0.511\text{MeV}$ 。

在相对论关系中: 相对论动能为:  $E_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_0 c^2$ ,

其中  $\beta = \frac{v}{c}, \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$

对于质子: 动能为  $E_{kp} = \frac{m_{p0} c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_{p0} c^2 = \frac{938\text{MeV}}{\sqrt{1-\beta^2}} - 938\text{MeV} = 150\text{MeV}$  时,

则:  $\beta \approx 0.5$ ;  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \approx 1.16$

对于电子: 动能为  $E_{ke} = \frac{m_{e0} c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_{e0} c^2 = \frac{0.511\text{MeV}}{\sqrt{1-\beta^2}} - 0.511\text{MeV} = 3\text{GeV}$  时,

则:  $\beta \approx 1$ ,  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \approx 5871.84$

3. 试推导下图 FODO 结构的传输矩阵, 并给出其稳定性条件。透镜均采用薄透镜近似, 焦距分别为  $+f$  和  $-f$ , 从第一块聚焦透镜的中点计算至下一块聚焦透镜的中点。

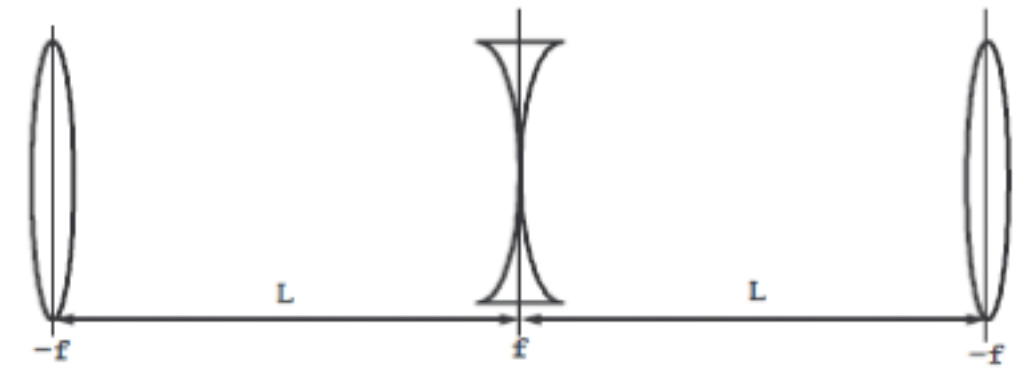
解: 薄透镜近似: 即粒子经过四极铁时横向位移不发生变化, 但角度发生改变。即粒子经过四极铁后  $x$  不发生变化, 角度

等于粒子运动轨迹的斜率:  $x' = \frac{dx}{ds}$

类似于光学透镜, 一束平行于磁铁纵向中心轴的带电粒子, 经过焦距为  $f$  的聚焦四级铁后, 会与轴相交在焦点处。斜率的变化则为:

$$\Delta x' = -\frac{x}{f}$$

如图所示: 粒子经过第一个凸透镜时位置不变, 即  $x_2 = x_1$ ,  $x_1$  为薄透镜入口,  $x_2$  为出口。



斜率的变化为:  $\Delta x' = x'_2 - x'_1 = -\frac{x}{f}$ , 即:  $x'_2 = -\frac{x_1}{f} + x'_1$ , 则由:  $\begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix}$  可知:

第一个凸透镜的传输矩阵为:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$$

之后粒子经过长为L的直线段到达凹透镜, 而在直线段中:  $x_3 = x_2 + Lx'_2, x'_3 = x'_2$ , 则由:

$$\text{矩阵表达式} \begin{pmatrix} x_3 \\ x'_3 \end{pmatrix} = M_2 \begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix} \text{可知, 直线段的传输矩阵为: } M_2 = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

对于经过凹透镜的情形: 与凸透镜类似, 只是f的符号相反, 即经过凹透镜的传输矩阵为:

$$M_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$$

之后再经过直线段达到凸透镜, 其中直线段的传输矩阵为:  $M_4 = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

综上所述可知: FODO 结构的传输矩阵为:

$$M = M_4 M_3 M_2 M_1 = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{L}{f} - \left(\frac{L}{f}\right)^2 & 2L + \frac{L^2}{f} \\ -\frac{L}{f^2} & 1 + \frac{L}{f} \end{pmatrix}$$

M 的本征值方程为:  $\det(M - \lambda I) = 0 \Rightarrow \lambda^2 + \left[ \left(\frac{L}{f}\right)^2 - 2 \right] \lambda + 1 = 0$ ,

计算可得 M 的本征值分别为:

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} \left( 2 - \left(\frac{L}{f}\right)^2 \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{L}{f}\right)^4 - 4 \left(\frac{L}{f}\right)^2}, \lambda_2 = \frac{1}{2} \left( 2 - \left(\frac{L}{f}\right)^2 \right) - \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{L}{f}\right)^4 - 4 \left(\frac{L}{f}\right)^2}$$

根据稳定性判据:  $-1 \leq \frac{1}{2} \text{Tr}(M) \leq 1$ , 其中:  $\text{Tr}(M)$  是矩阵 M 的迹, 则有:

$$\text{Tr}(M) = \lambda_1 + \lambda_2 = 2 - \left(\frac{L}{f}\right)^2, \text{ 则: } -1 \leq \frac{1}{2} \text{Tr}(M) \leq 1 \Rightarrow -1 \leq \frac{1}{2} \left( 2 - \left(\frac{L}{f}\right)^2 \right) \leq 1$$

即 FODO 结构的稳定性条件为:  $\left| \frac{L}{2f} \right| \leq 1$

4. 设一块二极磁铁长度为L, 使粒子水平弯转角度为 $\theta$ , 求该二极铁的弯转半径和传输距

阵。

解：设粒子的运动速度为  $v$ ，弯转半径为  $\rho$ ，在二级磁场中： $B_x = B_z = 0, B_y = B_0$

由粒子在磁场中的运动方程： $\frac{mv^2}{\rho} = qvB$ ，可得弯铁半径为： $\rho = \frac{mv}{qB}$ 。

横向运动标准方程的统一形式为： $u'' + F_u(z)u = G_u(z)\delta$

其中：水平方向（x 轴）： $x'' + (K + \frac{1}{\rho^2})x = \frac{1}{\rho}\delta$ ，即： $F_x = K + \frac{1}{\rho^2}, G_x = \frac{1}{\rho}$ ；

垂直方向（y 轴）： $y'' - Ky = 0$ ，即： $F_y = -K, G_y = 0$ 。

而对均匀磁场（分离作用）的扇形二级磁铁，有： $K = 0, \rho \neq 0$ ，

即： $F_x = K + \frac{1}{\rho^2} = \frac{1}{\rho^2}, G_x = \frac{1}{\rho}$ ； $F_y = -K = 0, G_y = 0$ 。

在垂直方向（y 轴）： $y'' = 0$ ，轨迹走直线，即匀强扇形二级磁铁在垂直方向等同于长  $L = \rho\theta$  的漂移段，则其传输矩阵为：

$$M_y = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} ;$$

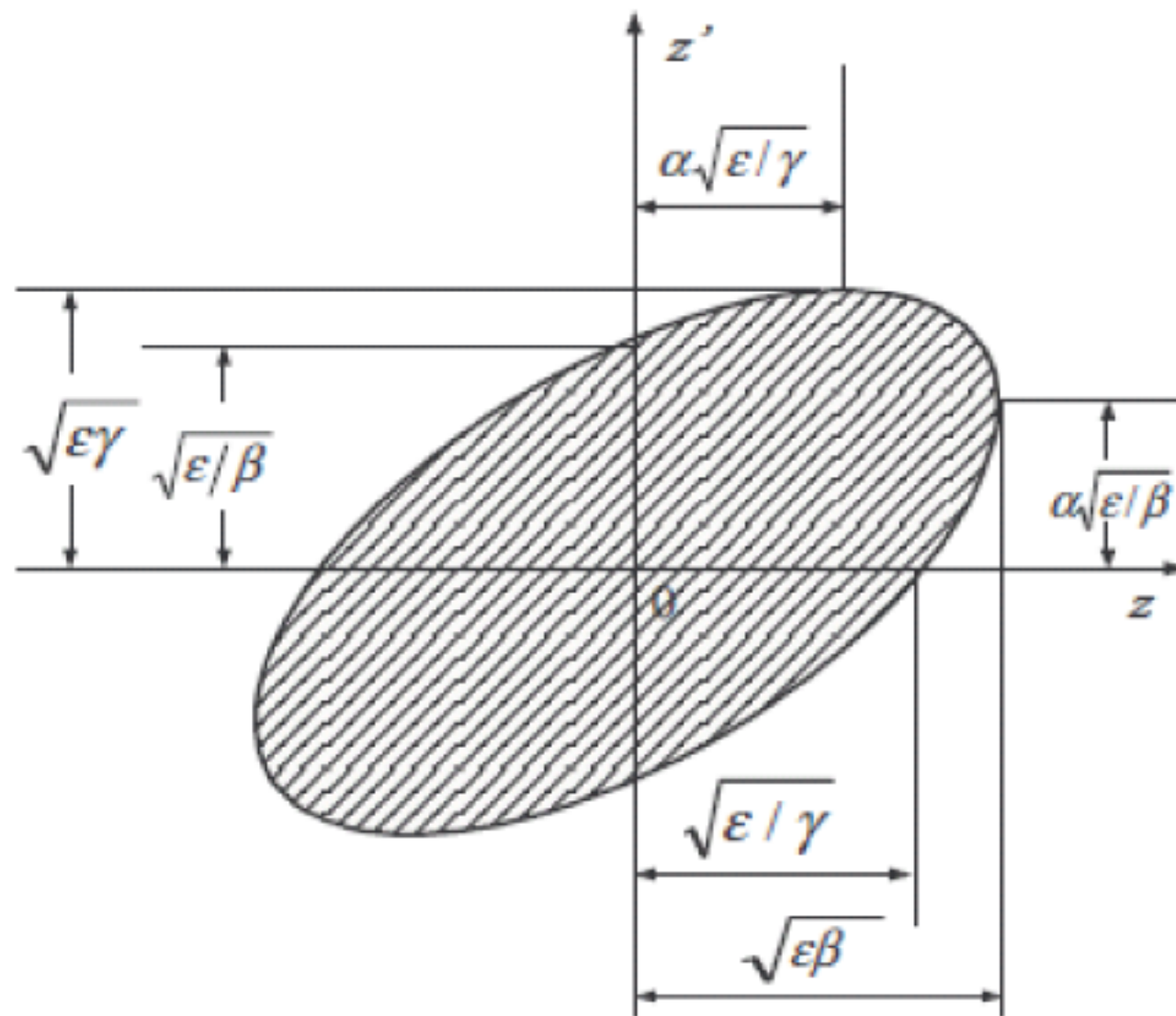
在水平方向（x 轴）：相当于有效长度为  $L$  的“厚器件”，则根据厚器件传输矩阵的解的形式，有：

$$M_x = \begin{pmatrix} \cos \theta & \rho \sin \theta \\ -\frac{1}{\rho} \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

5. 已知在某处的束流 twiss 参数为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ，束流发射度为  $\epsilon$ ，试在相空间坐标系中画出该束流的形状，并标出一些特殊点的坐标。

解： $\beta(s) \equiv \frac{w^2(s)}{k}, \alpha(s) \equiv -\frac{1}{2} \frac{d\beta(s)}{ds} \equiv -\frac{1}{2} \frac{d}{ds} \left( \frac{w^2(s)}{k} \right), \gamma(s) \equiv \frac{1+\alpha^2}{\beta}, K\beta = \gamma + \alpha'$

$$x(s) = \sqrt{\beta(s)}\epsilon \cos[\psi(s) + \delta]。$$



### 6. 简单解释自动稳相的工作原理。

答：自动稳相原理指的是：在一些共振加速器中，通过某些加速器参数的调制，便可使处在某种平衡相位下加速的理想粒子的运动与高频电场完全同步，能量连续增长；而在相位和能量上，在一定范围内偏离理想粒子的非理想粒子则将围绕理想粒子作相振动，最后同理想粒子一起被加速至终能量。

7. 上海光源工作在 3.5GeV 时，其水平自然发射度为 3.9nmrad，每圈的同步辐射功率为 1.44MeV，假设电子能量降低至 2.75GeV 时，其水平自然发射度和每圈的同步辐射功率为多少？

解：电子能量为：
$$E_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = m_0 c^2 \gamma$$

其中：
$$\beta = \frac{v}{c}, \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

辐射功率为：
$$P_\gamma = \frac{2}{3} \frac{e^2 c}{4\pi\epsilon_0} \frac{\beta^4 \gamma^4}{\rho^2}$$
， $\rho$  为圆周轨道半径。

水平自然发散度为：
$$\epsilon_{x0} = C_q \frac{\gamma^2 \left\langle \frac{H}{\rho^3} \right\rangle}{J_x \left\langle \frac{1}{\rho^2} \right\rangle}$$
，在同一个光源中： $H, \rho, C_q, J_x$  是相同的。

当电子能量  $E_{k1} = m_0 c^2 \gamma_1 = 3.5\text{GeV}$  时，辐射功率：
$$P_{\gamma 1} = \frac{2}{3} \frac{e^2 c}{4\pi\epsilon_0} \frac{\beta_1^4 \gamma_1^4}{\rho^2} = 1.44\text{MeV}$$

$$\text{水平自然发散度: } \varepsilon_{x01} = C_q \frac{\gamma_1^2 \left\langle \frac{H}{\rho^3} \right\rangle}{J_x \left\langle \frac{1}{\rho^2} \right\rangle} = 3.9 \text{nmrad} \Rightarrow C_q \frac{\left\langle \frac{H}{\rho^3} \right\rangle}{J_x \left\langle \frac{1}{\rho^2} \right\rangle} = \frac{3.9}{\gamma_1^2}$$

当电子能量  $E_{k2} = m_0 c^2 \gamma_2 = 2.75 \text{GeV}$  时,

$$\frac{E_{k1}}{E_{k2}} = \frac{m_0 c^2 \gamma_1}{m_0 c^2 \gamma_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{3.5}{2.75}, \gamma_2 = \frac{2.75}{3.5} \gamma_1, \text{ 且由计算可知: } \beta_1 \approx \beta_2 \approx 1$$

$$\text{则辐射功率: } P_{\gamma_2} = \frac{2}{3} \frac{e^2 c}{4\pi\epsilon_0} \frac{\beta_1^4 \gamma_1^4}{\rho^2} \left( \frac{2.75}{3.5} \right)^4 = P_{\gamma_1} = 1.44 \times \left( \frac{2.75}{3.5} \right)^4 \approx 0.55 \text{MeV}$$

$$\text{水平自然发散度: } \varepsilon_{x02} = C_q \frac{\left\langle \frac{H}{\rho^3} \right\rangle}{J_x \left\langle \frac{1}{\rho^2} \right\rangle} \gamma_2^2 = \frac{3.9}{\gamma_1^2} \gamma_2^2 = 3.9 \times \left( \frac{2.75}{3.5} \right)^2 \approx 2.4 \text{nmrad} .$$

## X 射线与物质相互作用——高兴宇

1. 可见光光谱和 X 射线光谱都能用于元素分析, 他们各有什么特点?

答: 可见光光谱: 属于红外~紫外波段范围内, 是连续谱或准单色的, 亮度或能量低, 为太阳的亿万分之一, 谱是发散与不相干的;

X 射线光谱: 属于远红外~硬 X 射线波段范围内, 是连续可调的, 亮度或能量高, 为太阳的 10 亿倍, 具有高准直和准相干性。

2. 同步辐射光源有几种类型?

答: 有三种类型: 弯转磁铁光源、扭摆器光源、波荡器光源。

弯铁 (BM) 光源: 扇形辐射。电子通过一个偏转磁铁发光。

扭摆器 (wiggler) 光源: 无序叠加。由多个方向相反的磁铁对组成, 磁铁的周期较长而周期数 N 较少, 电子并不象在弯铁中那样一次发光通过, 而是多次变更运动方向而在一个相同的立体角内发光, 但光子相互之间没有任何关联 (非相干)。

波荡器 (undulator) 光源: 有序相干。由多个磁铁对组成, 电子在极性相反的磁铁组内做幅度很小的正弦波运动, 各周期中产生的辐射是相干的。

3. 上海光源电子能量为 3.5GeV, 弯铁的磁场强度 1.27T, 临界能量为 10.35keV。合肥光源

电子能量为 0.8GeV, 计划中的新北京光源电子能量为 5GeV, 若使用相同强度的弯铁, 它们的临界能量分别是多少? 处在什么波段? 若使用磁场强度为 6T 的扭摆器, 则上海光源、合肥光源和新北京光源的临界能量又是多少?

$$\text{解: 临界能量: } \varepsilon_c = \frac{h}{2\pi} \omega_c = 2.22 \frac{E^3 (\text{GeV})}{R (\text{m})} (\text{keV}) = 0.665 B(T) E_c^2 (\text{GeV})$$

$$\text{由 } \varepsilon_c = h \frac{c}{\lambda_c} \text{ 可知: } \lambda_c = \frac{hc}{\varepsilon_c},$$

X射线的波长范围为： $0.01\text{Å} \sim 100\text{Å}$  ( $E_\gamma = 100\text{eV} - 1000\text{keV}$ )，通常把X射线分为两个波段：

软X射线： $10 \sim 100\text{Å}$  ( $100\text{eV} \sim 2\text{keV}$ )

硬X射线： $0.01 \sim 10\text{Å}$  ( $2 \sim 1000\text{keV}$ )

则：

- 若用与上海光源相同强度的弯铁： $B(T) = 1.27\text{T}$ ，则对于

上海光源：临界能量为  $\varepsilon_c = 0.665B(T)E_e^2(\text{GeV}) = 0.665 \times 1.27 \times 3.5^2 = 10.35\text{keV}$

属于硬X射线波段。

合肥光源：临界能量为  $\varepsilon_c = 0.665B(T)E_e^2(\text{GeV}) = 0.665 \times 1.27 \times 0.8^2 = 0.54\text{keV}$

属于软X射线波段。

北京光源：临界能量为  $\varepsilon_c = 0.665B(T)E_e^2(\text{GeV}) = 0.665 \times 1.27 \times 5^2 = 21.11\text{keV}$

属于硬X射线波段。

- 若使用磁场强度为6T的扭摆器，即磁场强度为： $B(T) = 6\text{T}$ ，则：

上海光源的临界能量为： $\varepsilon_c = 0.665B(T)E_e^2(\text{GeV}) = 0.665 \times 6 \times 3.5^2 = 48.88\text{keV}$ ；

合肥光源的临界能量为： $\varepsilon_c = 0.665B(T)E_e^2(\text{GeV}) = 0.665 \times 6 \times 0.8^2 = 2.55\text{keV}$ ；

北京光源的临界能量为： $\varepsilon_c = 0.665B(T)E_e^2(\text{GeV}) = 0.665 \times 6 \times 5^2 = 99.75\text{keV}$

4. 铅的原子序数82，密度  $11.35\text{g/cm}^3$ 。对X光机产生的8keV的X射线的质量吸收系数是  $220.7\text{cm}^2/\text{g}$ ；对同步辐射的20keV的X射线的质量吸收系数是  $68.99\text{cm}^2/\text{g}$ 。铅对应X光机和同步辐射的X射线的半吸收厚度分别是多少？如果需要让X射线强度衰减到原来的1%，需要多厚的铅？

解：由  $I = I_0 e^{-\mu t} = I_0 e^{-\mu_m t_m}$  可知，当  $I = \frac{1}{2} I_0$  时，半吸收厚度为： $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$ ，

其中：质量吸收系数  $\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$ ，质量吸收系数质量厚度为： $t_m = \rho t$ 。则：

- 铅对应X光机的吸收系数为： $\mu = \rho \mu_m = 11.35\text{g/cm}^3 \times 220.7\text{cm}^2/\text{g} = 2497\text{cm}^{-1}$ ，

半吸收厚度为： $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{\ln 2}{2497\text{cm}^{-1}} = 2.78\mu\text{m}$

- 同步辐射的X射线的吸收系数为： $\mu = \rho \mu_m = 11.35\text{g/cm}^3 \times 68.99\text{cm}^2/\text{g} = 783\text{cm}^{-1}$

$$\text{半吸收厚度为: } t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{\ln 2}{783\text{cm}^{-1}} = 8.8\mu\text{m}$$

如果需要让 X 射线强度衰减到原来的 1%，即  $I = 1\%I_0$ ，则有： $I = I_0e^{-\mu t} = 1\%I_0$

$$\text{需要铅的厚度为: } t = \frac{\ln 100}{\mu} = \frac{\ln 100}{783\text{cm}^{-1}} = 58.8\mu\text{m}$$

5. 铝的原子序数为 13，密度  $2.699\text{g/cm}^3$ ，20keV 时的质量吸收厚度为  $3.094\text{cm}^2/\text{g}$ 。半吸收厚度、X 射线强度衰减到原来 1% 的厚度分别是多少？

解：由  $I = I_0e^{-\mu t} = I_0e^{-\mu_m t_m}$  可知，当  $I = \frac{1}{2}I_0$  时，半吸收厚度为： $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$ ，

其中：质量吸收系数  $\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$ ，质量吸收系数质量厚度为： $t_m = \rho t$ 。则：

$$\text{吸收系数为: } \mu = \rho\mu_m = 2.699\text{g/cm}^3 \times 3.094\text{cm}^2/\text{g} = 8.35\text{cm}^{-1}$$

$$\text{半吸收厚度为: } t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{\ln 2}{8.35\text{cm}^{-1}} = 0.083\text{cm}$$

当 X 射线强度衰减到原来的 1%，即  $I = 1\%I_0$ ，则有： $I = I_0e^{-\mu t} = 1\%I_0$

$$\text{需要铅的厚度为: } t = \frac{\ln 100}{\mu} = \frac{\ln 100}{8.35\text{cm}^{-1}} = 0.55\text{cm}$$

6. 气体探测器、荧光探测器、半导体探测器和 X 光 CCD 原理的测量原理有什么相同和区别？各有什么有缺点，主要用于哪方面测量？

答：

- 气体探测器：气体电离室：结构简单、耐辐射、体积可以很大。

原理：X 射线导致原子电离，产生离子和自由电子。

在气体中：无外加电场：离子与电子复合。

有外加电场：离子和电子分别向相反方向漂移，直至被收集。

- 荧光探测器（闪烁探测器）：

原理：某些物质（闪烁体）受到照射时，原子内的电子从入射粒子接受的量能大于其禁带宽度时，便被激发跃迁至导带。然后，再经过一系列物理过程回到基态。根据退激的机制不同而发射出衰落时间很短的荧光（约 10 纳秒）或是较长的磷光（约 1 纳秒或更长）。

闪烁探测器的特点：

- ① 探测效率高、灵敏体积大；
- ② 能量分辨率不如半导体探测器好；

③ 对环境的适应性较强、价格低；

④ 是广泛使用的辐射探测器。

小型化：半导体光电倍增管，具有高的量子转换效率和低功耗，便于闪烁探测器的微型化和提高空间分辨率。

空间分辨：使用微通道板代替 PMT：空间分辨、时间相应、多级放大。

- 半导体探测器：用于 X 射线强度、荧光能谱测量。

原理：产生一个空穴对的最低平均能量  $\varepsilon$  是一定的，因此由一个 X 射线光子造成的空穴对的数目  $N = \Delta E / \varepsilon$ 。

优点：

固体密度高，可以做得小巧；

电离能低、能量分辨率高；

速度快，使用方便。

缺点：辐射损伤严重；需要冷却。

- X 光 CCD：

直接测量型：直接测量 X 射线，适用于软 X 射线。

间接测量型：转换为可见光用可见光 CCD 测量，适用于硬 X 射线。

特点：大面积、高速度。

**7. X 射线成像方式有哪几种？X 射线相衬成像有几种实现方式？**

答：• X 射线成像方式：

① 强度成像（密度成像、吸收成像）：投射 X 射线强度与所经过路径上的物质的吸收系数  $\mu_m$  和密度  $\rho$  有关。

② X 射线相衬成像：把位相差变成强度差，从强度成像结果反演位相差结果，重构得到位相成像。

③ 双色减影成像。

- 相衬成像方式：干涉法、衍射增强法、位相衬度直接成像法。

**8. X 射线电子谱有哪些应用？**

答：元素定性分析：各种元素都有它的特征的电子结合能，因此在能谱图中就出现特征谱线，可以根据这些谱线在能谱图中的位置来鉴定周期表中除 H 和 He 以外的所有元素。

元素定量分析：X 射线光电子能谱定量分析的依据是光电子谱线的强度（光电子峰的面积）反映了原子的含量或相对浓度。

固体表面分析：表面研究包括分析表面的元素组成和化学组成，原子价态，表面能态分布。测定表面原子的电子云分布和能级结构等。

X 射线光电子能谱是最常用的工具，在表面吸附、催化、金属的氧化和腐蚀、半导体、电极钝化、薄膜材料等方面都有应用。

化合物结构鉴定：X 射线光电子能谱法对于内壳层电子结合能化学位移的精确测量，能提供化学键和电荷分布方面的信息。

## X 射线荧光分析（XRF）和 X 射线吸收谱（XAFS）



## 黄宇营

1. 什么叫特征 X 射线荧光，通过测量特征 X 射线荧光的能量和强度能得到什么信息？写出 XRF 最小检测限公式，说明其中各物理量的意义。同步辐射微束 XRF 使用哪四种聚焦技术？

答：

- 特征 X 射线荧光：当入射到样品的 X 射线能量足以激发样品所含原子的内层电子，被逐出的电子为光电子，同时在轨道上形成空穴，原子处于不稳定的状态，此时，外层高能级的电子自发向内层跃迁，填补该空穴，使原子恢复到稳定的低能态，同时，辐射出二次 X 射线，该射线能量由原子壳层能级差决定，具有该元素特征，叫做特征 X 射线荧光 (X-Ray Fluorescence, XRF)。
- 根据探测来自样品的特征 X 射线的能量 (或波长)，可以分析样品中有何种元素；而计算相应特征 X 射线强度，便可以得到该元素的含量以及分布。
- 最小检测限 (Minimum Detection Limit, MDL)：能够探测到的某个元素的最低含量。

$$\text{最低检测限公式为： } MDL = 3 \frac{\sqrt{N_B}}{N_x} C_x = 3 \sqrt{\frac{N_B}{N_x^2}} C_x$$

其中  $N_B$  是某元素  $x$  一个荧光峰的背景计数， $N_x$  是元素荧光计数， $C_x$  是元素表面浓度。

- 微焦技术：聚焦光学毛细管、KB 镜、菲涅耳波带片透镜、复合透镜技术。

2. 写出 X 射线穿过物质后的强度公式，并说明其中各物理量的意义。

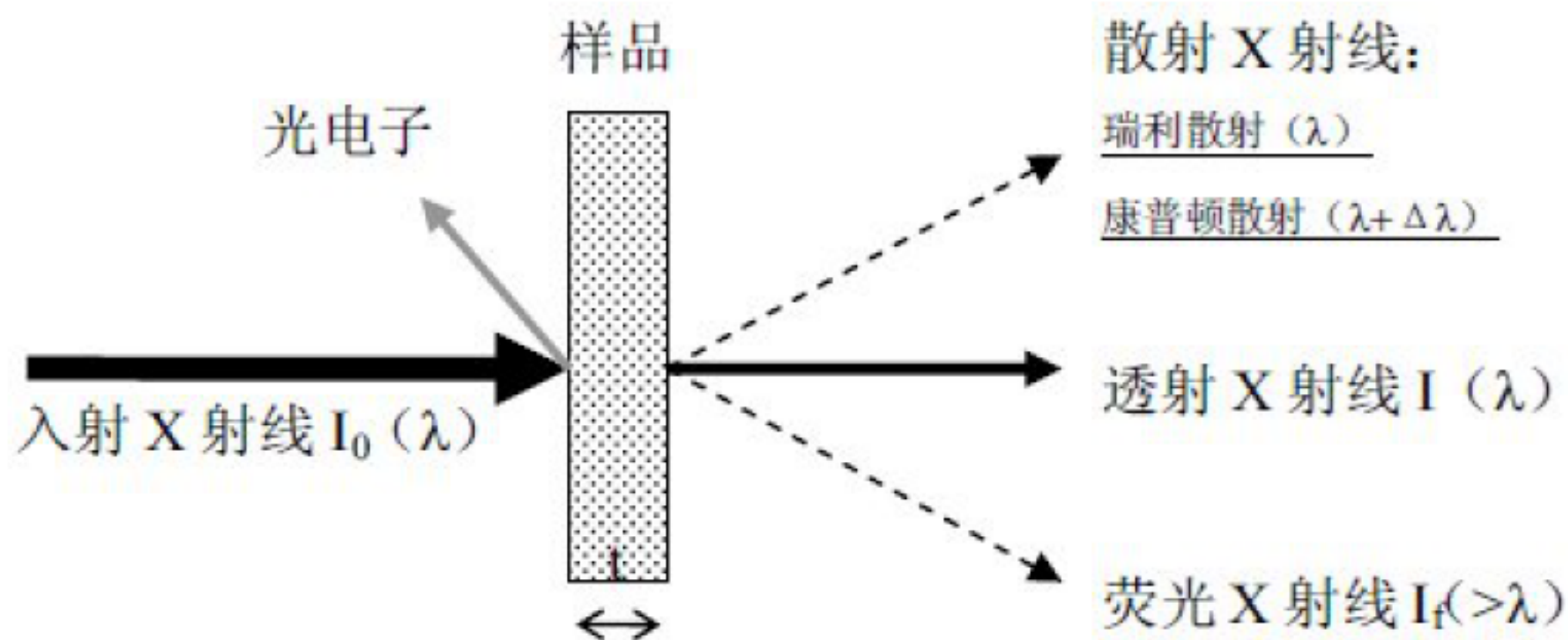


图 1-4 X 射线与物质的相互作用示意图

X 射线穿过物质后的强度为： $I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\mu_i(\lambda) \rho_i t]$

其中  $\mu_i(\lambda)$  代表元素  $i$  相对于波长为  $\lambda$  的入射光的质量衰减系数， $\rho_i$  为  $i$  元素的密度，

$t$  为样品厚度， $I_0(\lambda)$  为入射 X 射线的强度。

3. 什么是全反射 X 射线荧光分析 (TXRF)? 它的特点是什么? 同步辐射 TXRF 又具有哪四个特点?

答: 通常将小于全反射临界角、固定角度下的 X 射线荧光 (XRF) 分析叫做全反射 X 射线荧光 (TXRF)。

X 射线全反射的特点为:

- X 射线反射率 R: 在全反射发生时, 反射率接近 100%。
- X 射线穿透深度  $Z_n$ : 发生全反射时,  $Z_n$  只有几个纳米。根据量子力学的概率密度函数理论, 只有很少量的 X 射线光子穿透了基体, 由此带来的本地散射大大减小。发生 X 射线全反射的表面上方形成驻波场: 波长相同的两束或多束单色 X 射线在不同方向传播时若有固定的方位差, 会发生显著的干涉现象, 在全反射发生的表面上方形成 X 射线驻波场。

同步辐射 TXRF 具有高通量、高度准直、能量连续可调、宽能谱、线偏振等优异的特点。

4. 请从光与物质相互作用的角度简要描述 XAFS 信号产生的物理机制。XAFS 谱可以分成哪两个部分? 各用什么理论解释?

答: X 射线照射到物质上时, 会与物质发生相互作用, 部分光子被物质吸收和散射, 使透过物质后的 X 射线光强减弱。

X 射线吸收精细结构 (XAFS): 即吸收边附近及其高能延伸段存在着一些分立的峰或波状起伏。实验上实际测量范围是从边前 200eV 到边后 1000eV。由于不同能量范围的精细结构的产生机理不同, XAFS 谱可以分为 X 射线吸收近边结构 (XANES) 和扩展 X 射线吸收精细结构 (EXAFS)。

- X 射线吸收近边结构 (XANES): 吸收边前约 20eV 到边后约 30eV 或更高处的这一段吸收谱。低能 X 射线吸收近边结构 (XANES) 其形成原因是入射 X 射线的光子能量较小, 还不足以使光电子电离, 而是使光电子跃迁到外层的空轨道。由于电子轨道的能量较小, 因此形成尖锐的分离峰。低能 XANES 主要用来探测吸收原子外层的电子结构。
- 扩展 X 射线吸收精细结构 (EXAFS): 边后约 30eV 或更高处之后的吸收谱。EXAFS 谱的短程有序物理机制是: 当 X 射线被原子吸收后, 从原子 K 层 (假设是 K 边 XAFS) 射出光电子。如果吸收原子周围没有其他原子, 它就会像单原子气体那样, 激发出的光电子将仅处于出射态, 远离吸收原子传播, 在这种情况下, 终态就不会随着入射光的能量发生振荡, 即不会产生 EXAFS; 如果吸收原子近邻有其他原子围绕, 出射光电子波将受到周围原子的散射, 产生背散射光电子波, 两波在吸收原子处发生干涉。当吸收原子周围环境不变时, 改变 X 射线光子能量, 出射和散射光电子波之间的相位差也随之改变, 干涉情况发生变化, 干涉加强使跃迁矩阵元比孤立吸收原子时的值大, 干涉相消则反之, 这样就使平滑的吸收线出现了振荡现象, 即产生 EXAFS。即短程有序把 EXAFS 谱的波状起伏归结于光电过程中出射光电子波与近邻原子背散射回的光电子波相干涉的结果。

5. XAFS 数据采集模式有哪三种方法? 请解释它们的适用特点。

答: XAFS 探测方法都是测量样品的吸收系数与入射 X 射线光子能量的关系, 一般有透射法、荧光法、俄歇电子法。

- 透射法: XAFS 谱可以通过透射法直接测量得到。
- 荧光法: 由于物质吸收 X 射线产生的荧光光子数与吸收系数成正比, 故可以通过荧光法

间接测量吸收系数，从而得到 XAFS 谱。

- 俄歇电子法：荧光产生过程与俄歇电子产生过程是相互竞争的，同时由同一种空穴产生，故也可通过俄歇电子法间接得到 XAFS 谱。

6. 对于粉末样品，常用制样方式有哪几种？

答：压片法：将经过粉碎研磨的样品加压成形。

熔融法：把粉末样品与熔剂按一定得的比例混合，在高温下共熔，使样品与熔剂形成均匀的玻璃体。

7. 已知  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ，则波长为 0.01 nm 的光子能量为( )

- (A) 12.4 eV      (B) 124 eV      (C)  $12.4 \times 10^5 \text{ eV}$       (D) 0.124 eV

解：能量： $E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = 6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s} \times \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{0.01 \times 10^{-9} \text{ m}} = 19.89 \times 10^{-15} \text{ J} = 12.4 \times 10^4 \text{ eV}$

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

8. 什么是内标法？

内标法是将一定重量的纯物质作为内标物加到一定量的被分析样品混合物中，然后对含有内标物的样品进行色谱分析，分别测定内标物和待测组分的峰面积（或峰高）及相对校正因子，按公式和方法即可求出被测组分在样品中的百分含量。SR-TXRF 的多元素定量分析可以用添加内标元素（样品中不含的元素）的方法得到，即待测元素函数含量：

$$C_x = \frac{I_x/S_x}{I_{\text{int}}/S_{\text{int}}} \frac{m_{\text{int}}}{m_{\text{sample}}}$$

其中： $I_x$  为内标元素相对灵敏度因子， $m_{\text{int}}$  为内标元素质量， $m_{\text{sample}}$  为待测样品质量。

## 散射与衍射——王劼

1. 散射强度曲线对 q-4 定律的偏离的物理意义
2. 什么是散射中的相？理想两相体系的特点？
3. x 射线小角散射是弹性散射，其重要特点是什么？
4. 试推导球对称的理想的两相连续体系的散射强度。
5. 试从理想两相体系的散射强度表达式推导介质中球形粒子的散射强度。