

《天体物理学》

第二章 辐射 (b)

讲授：徐仁新

北京大学物理学院天文学系

- 0, 信息载体与大气辐射窗口
- 1, 黑体辐射
- 2, 回旋辐射
- 3, 同步辐射
- 4, Landau能级与曲率辐射
- 5, Compton散射与逆Compton散射
- 6, 轫致辐射
- 7, Cherenkov辐射

5, Compton散射与逆Compton散射

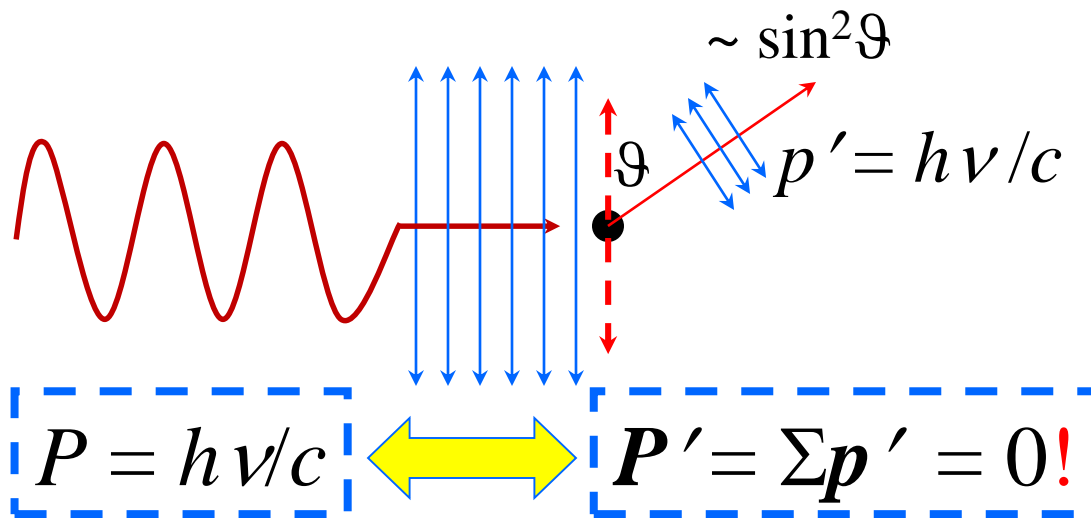
Compton过程: 自由电子与光子间的碰撞过程

Compton 散射 —— 电子动能 \ll 光子能量

逆Compton散射 —— 电子动能 \gg 光子能量 \Rightarrow 高能光子

Thomson散射: 能量 $< 511\text{keV}$ 光子被几乎静止电子散射

光子表现波动性而电子显示粒子性 \Rightarrow 经典电动力学问题!



散射截面

$$\sigma_T = (8\pi/3)r_e^2 = 6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$$

$r_e = e^2/(mc^2)$: 电子经典半径

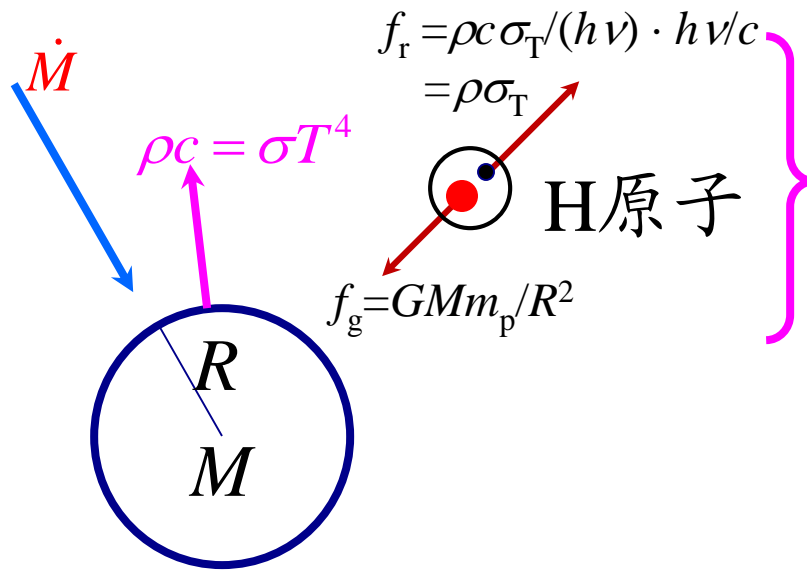
散射后

光子能量不变

电子每散射一次获得动量 $h\nu/c$

5, Compton散射与逆Compton散射

Eddington光度: 球对称吸积释能最大光度



Eddington吸积率

$$f_g = f_r \Rightarrow \dot{M}_{\text{Edd}} = \frac{4\pi m_p c R}{\sigma_T}$$

$$\frac{GM\dot{M}}{4\pi R^3} = \rho c = \sigma T^4$$

$$L_{\text{Edd}} = \frac{GM\dot{M}_{\text{Edd}}}{R} = \frac{4\pi m_p c GM}{\sigma_T} \sim 10^{38} \left(\frac{M}{M_{\text{sun}}} \right) \text{erg/s}$$

Eddington光度

5, Compton散射与逆Compton散射

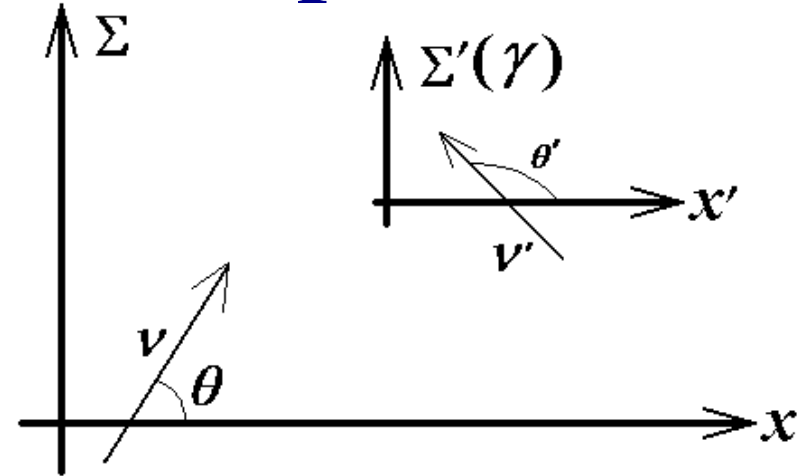
不同参考系中的光子

狭义相对论 \Rightarrow

$$\nu' = \gamma \nu (1 - \beta \cos \theta), \quad \tan \theta' = \frac{\sin \theta}{\gamma (\cos \theta - \beta)}$$

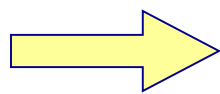
若 $\gamma \gg 1$, 且 $\{\theta \in (0, \pi), \theta \neq 0\}$, 则:

$\nu' \sim \gamma \nu$; $\tan \theta' \rightarrow 0^-$. 在 Σ' 系光子频率增加 γ 倍, “迎头而来”



逆Compton散射 (ICS)

为了避免直接处理极端相对论粒子辐射的复杂性, 做Lorentz变换: 即从实验室系变换到电子静止系, 再变换回原实验室系。



出射光子 $\nu' \sim \gamma^2 \nu$, 几乎沿电子方向

高能电子 \oplus 低能光子 \Rightarrow **ICS是高能辐射有效机制!**

5, Compton散射与逆Compton散射

ICS辐射功率

$$P_{\text{comp}} = (32\pi/9)r_e^2 c \rho \gamma^2 \sim 2.6 \times 10^{-14} \rho \gamma^2 \text{ (erg/s)}$$

$$\text{对比: } P_{\text{sy}} \sim 1.1 \times 10^{-15} \gamma^2 \beta^2 B^2 \sim 2.5 \times 10^{-14} \rho_B \gamma^2 \text{ (erg/s)}$$

Sunyaev-Zeldovich (SZ) 效应

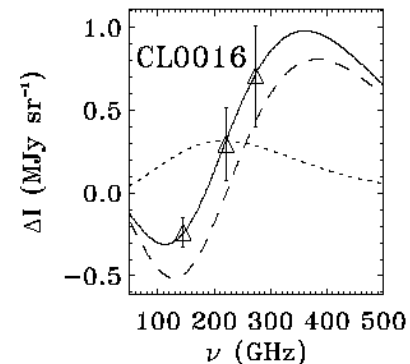
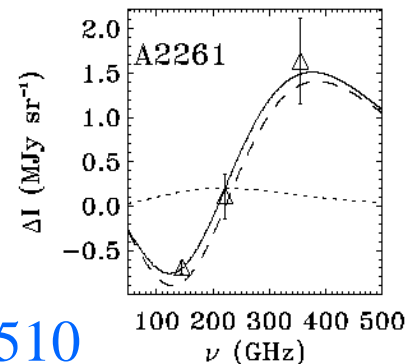
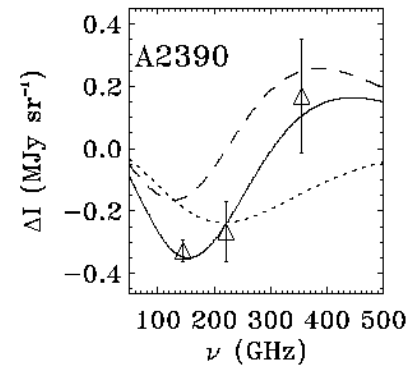
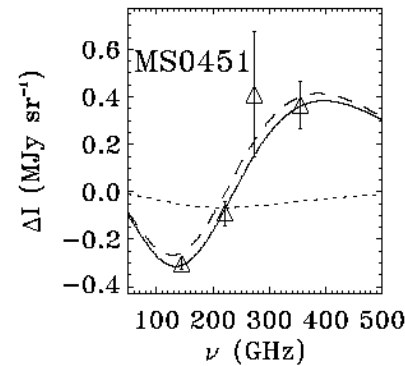
星系团中高温 ($\sim \text{keV}$) 热电子
对CMB (2.7K) 的散射

对Planck谱偏离 ΔI 依赖于:

星系团的大小和距离

Hubble常数

星系团的重子丰度等



astro-ph/0303510

6, 轫致辐射

又称“自由-自由”跃迁

自由运动电子受离子Coulomb场作用加速运动而产生的辐射

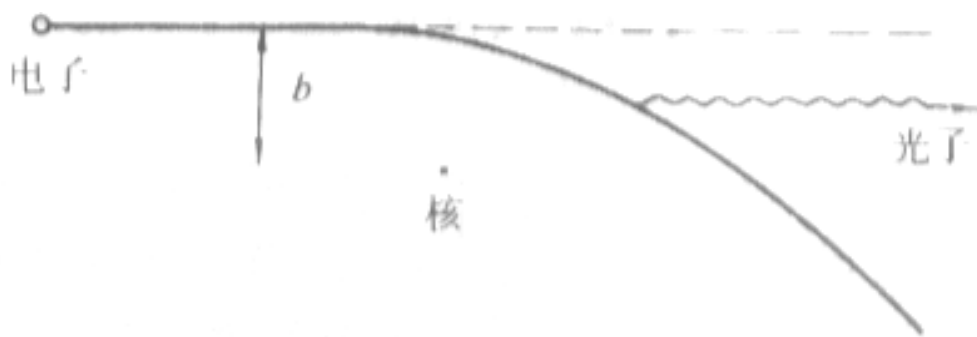
辐射功率

速度为 v 的一个电子在正电荷数 Z 、数密度 N_z 的离子背景上运动时产生轫致辐射

的功率:

$$P \approx \frac{16}{411} N_z Z^2 r_e^2 mc^2 v$$

轫致辐射是等离子体冷却的主要因素。



7, Cherenkov辐射

又称介质中的“电磁激波”

起源于介质粒子被运动电荷激发而产生电磁振荡的集体效应

辐射方向

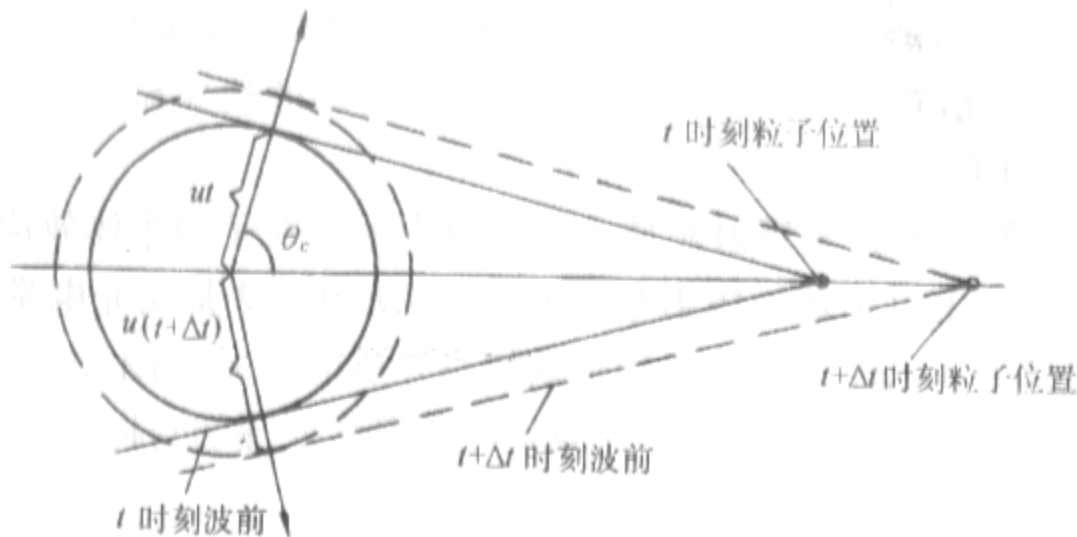
$$\theta_c(\omega) = \cos^{-1} \frac{1}{\beta n}$$

特点:

- 1, 加速度不是必须的
- 2, 不在 $1/\gamma$ 束内
- 3, 因减速, θ_c 内均有

应用之一

水中宇宙线探测: 相对于空气中探测而言, 张角 θ_c 大且功率强



总 结

- 0, 信息载体与大气辐射窗口
- 1, 黑体辐射
- 2, 回旋辐射
- 3, 同步辐射
- 4, Landau能级与曲率辐射
- 5, Compton散射与逆Compton散射
- 6, 轫致辐射
- 7, Cherenkov辐射

作 业

习题：

4、6