

致密星

全号

2016年

三种天体物理过程

- 激波过程
- 辐射过程
- 吸积过程

7. 辐射过程

- Ghisellini, 2013, “Radiative processes in high energy astrophysics” (arXiv:1202.5949, the published version contains fewer typos)

7.1 预备知识

7.2 热韧致辐射(bremsstrahlung)

7.3 同步辐射(synchrotron)

7.4 逆Compton散射 (ICS)

7.5 同步自Compton (SSC)

7.1 预备知识

- 辐射过程经典教材：Rybicki & Lightman, 1979, “Radiative processes in astrophysics”
- 入门：Rosswog & Bruggen, 2007, “Introduction to high energy astrophysics”, 第3章
- 一般情形：辐射转移
- 光厚
- 光薄

光厚：黑体辐射

- Stefan-Boltzmann 定律： $F = \sigma T^4$

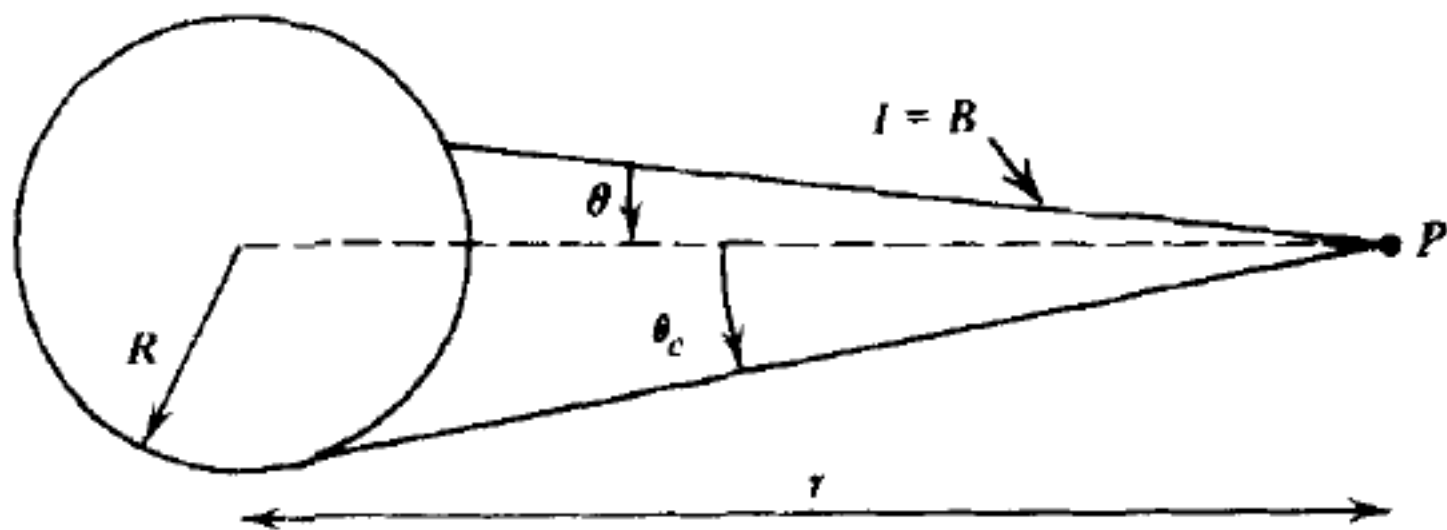
$$\sigma \equiv \frac{ac}{4} = 5.67 \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2} \text{ deg}^{-4} \text{ s}^{-1}$$

- 星体光度、通量

- 能谱： $F = \pi B \left(\frac{R}{r} \right)^2$

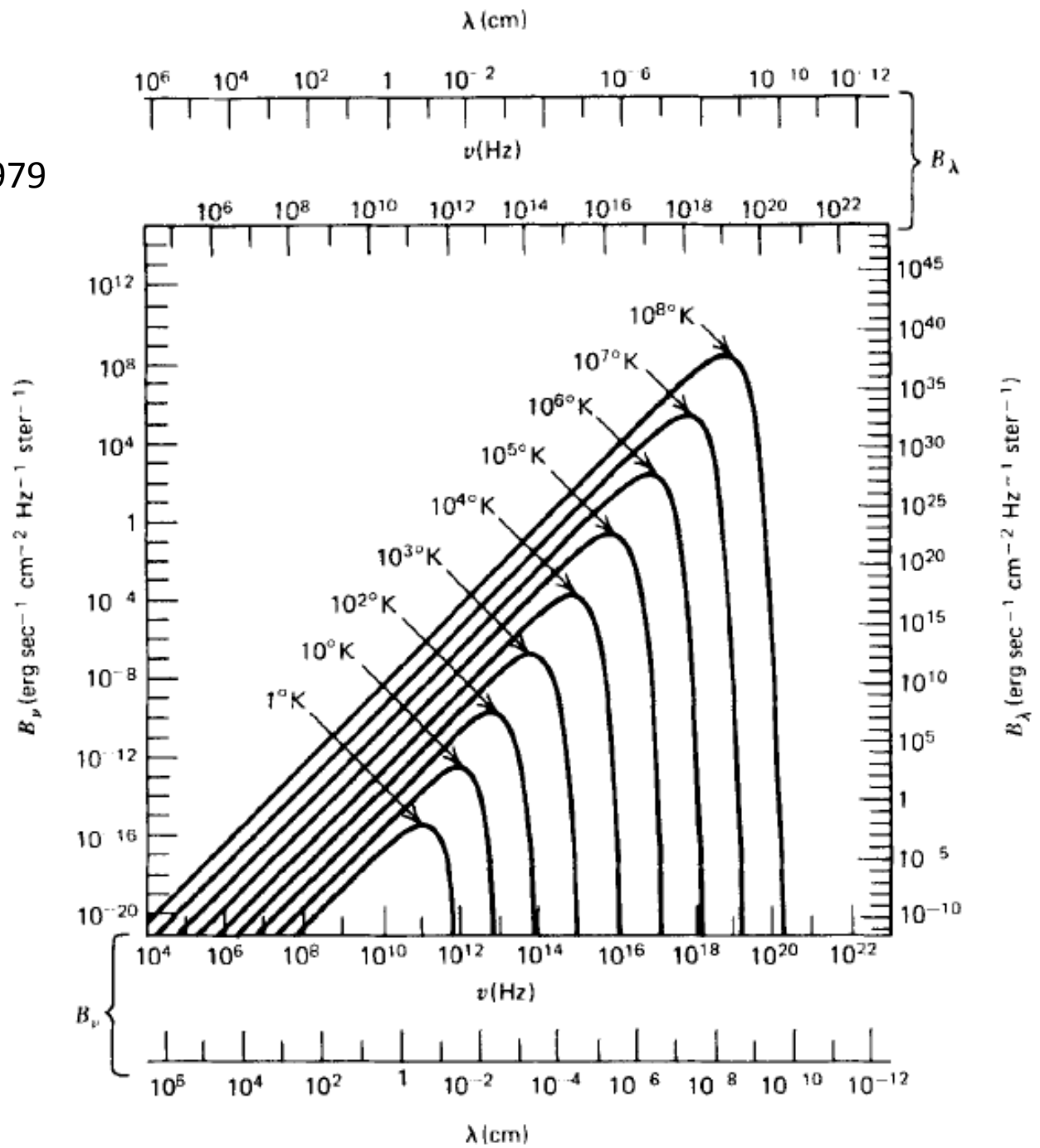
- B 为 Planck 函数 $B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3/c^2}{\exp(h\nu/kT) - 1}$

光厚的均匀发光的球体
Rybicki & Lightman 1979



Planck 函数

Rybicki & Lightman 1979



多温黑体谱

- 温度有一个分布的情形
- 例1: 中子星表面热辐射 → 双黑体, 三黑体
- 例2: 经典薄盘的辐射 → diskBB

光薄

- emissivity and flux

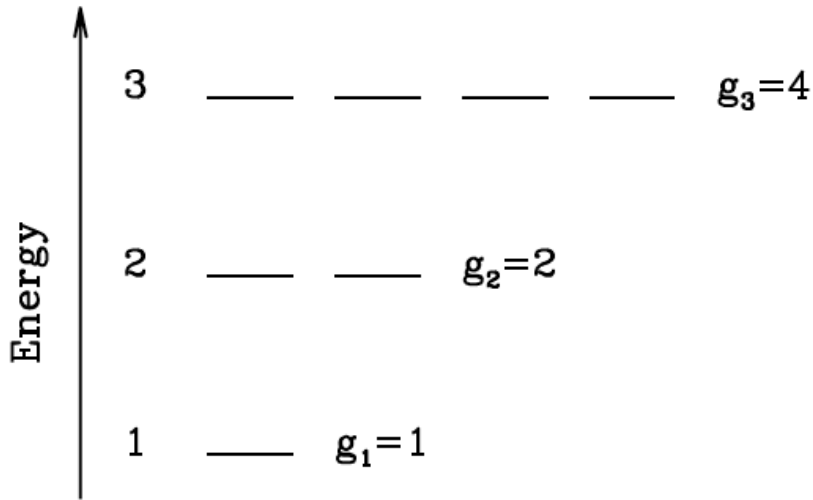
$$F_s(\nu) = 4\pi j_s(\nu) \frac{V}{4\pi d_L^2}$$

- emissivity 定义

$$j = \frac{\text{erg}}{dV dt d\Omega}$$

辐射的分类

物质是量子化的



1. 束缚-束缚跃迁（发射线）
2. 自由-束缚跃迁（复合）
3. 自由-自由跃迁（韧致）

- 及它们的逆过程（吸收线，电离，韧致吸收）
- 同步辐射又称磁韧致辐射

运动电荷的辐射：Larmor 公式

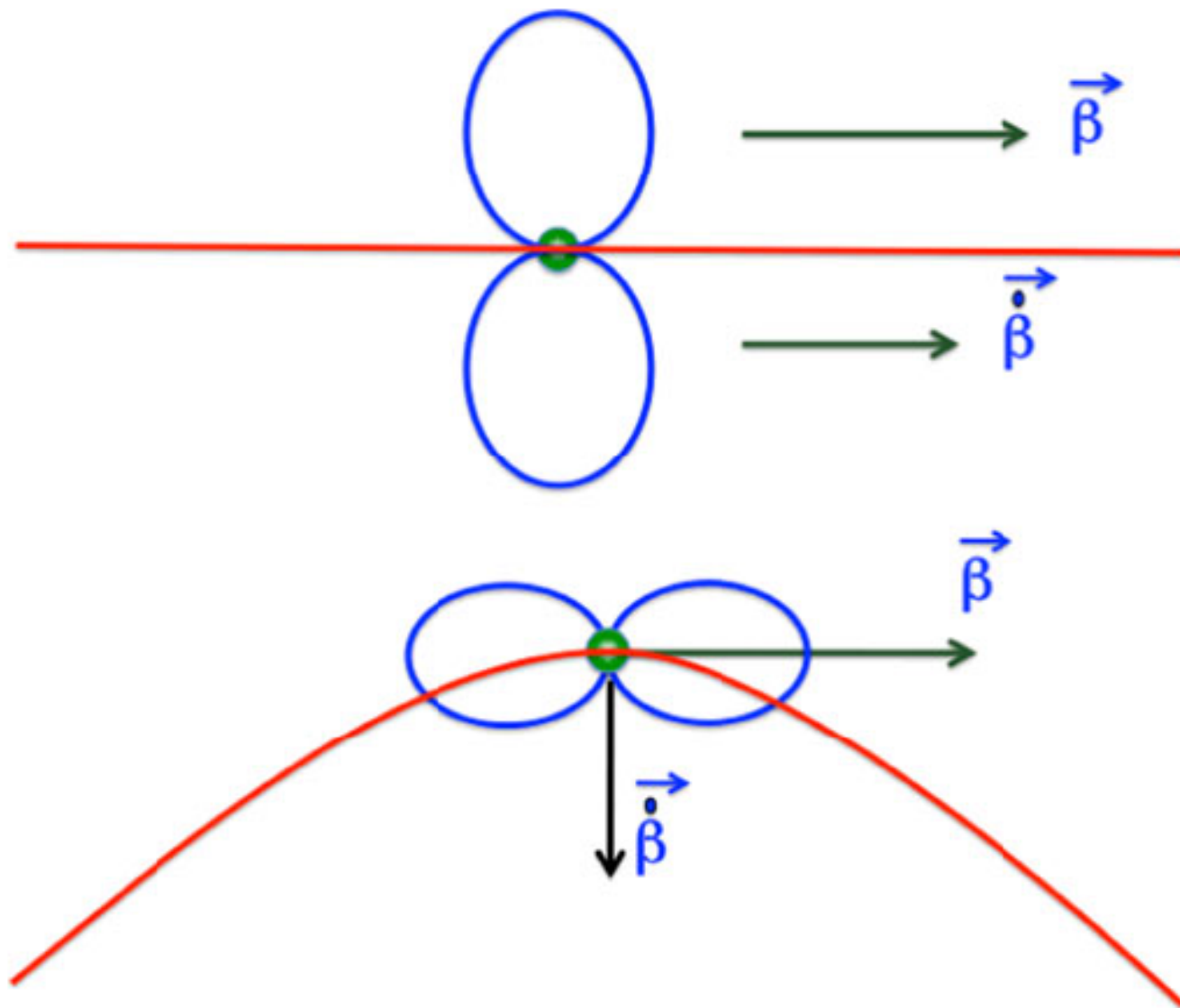
- 辐射功率的角分布：
$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{q^2}{4\pi c^3} a^2 \sin^2 \theta$$

- 总功率：

$$P = \int \frac{dP}{d\Omega} d\Omega = \frac{2\pi q^2 a^2}{4\pi c^3} \int_{-1}^1 \sin^2 \theta d(\cos \theta) = \frac{2q^2}{3c^3} a^2$$

- 问题：一个速度为零的电荷是否有辐射？
- 处理相对论运动的电子：Larmor公式
+Lorentz变换！

Larmor公式的角分布

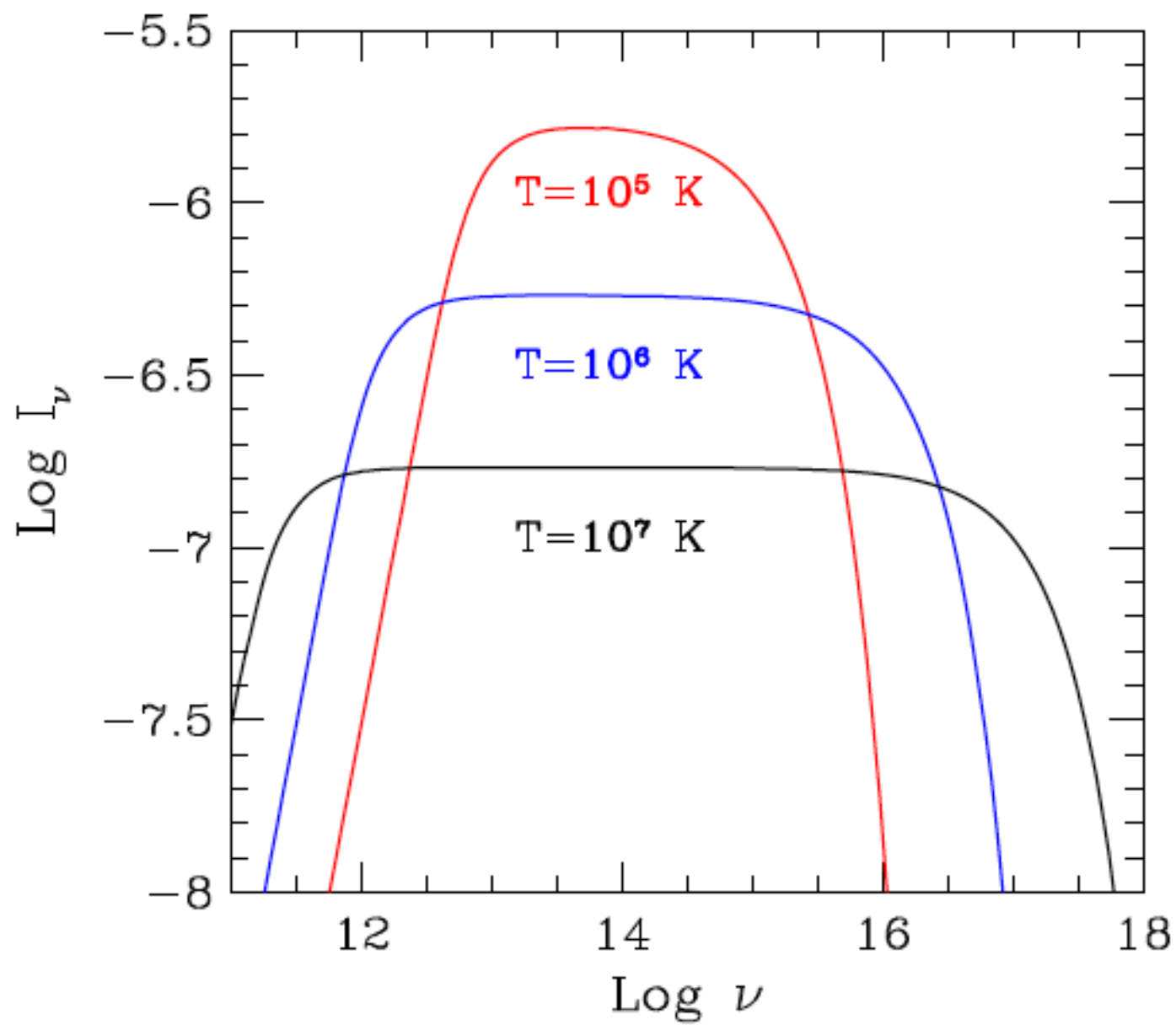


7.2 热韧致辐射

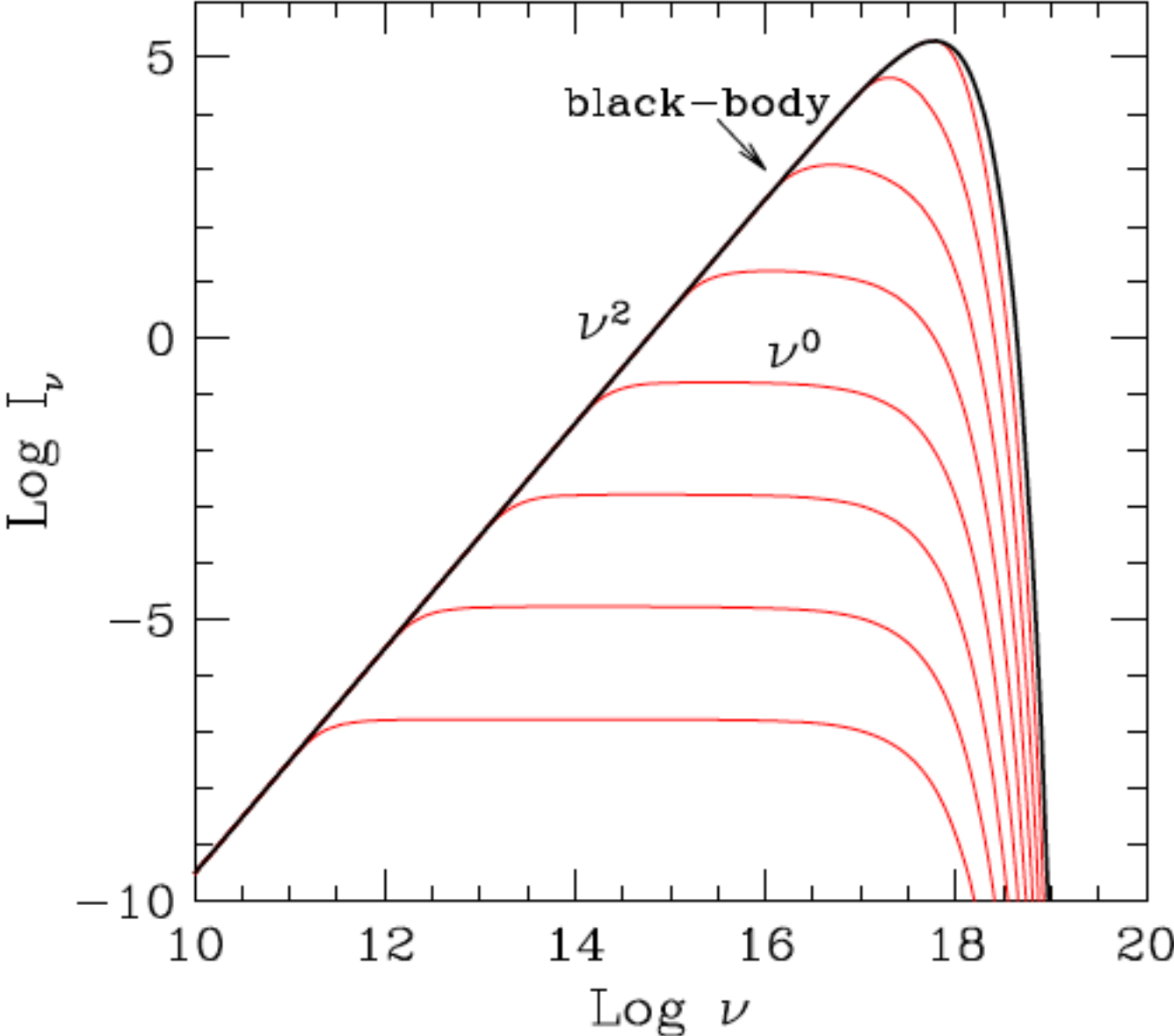
- 等离子体内电子和离子间Coulomb 碰撞
- emissivity:

$$j(\nu) = \frac{8}{3} \left(\frac{2\pi}{3} \right)^{1/2} \frac{n_e n_p e^6}{m_e^2 c^3} \left(\frac{m_e}{kT} \right)^{1/2} e^{-h\nu/kT} \bar{g}_{\text{ff}}$$
$$= 5.4 \times 10^{-39} Z^2 n_e n_i T^{-1/2} e^{-h\nu/kT} \bar{g}$$

cgs单位



from bremsstrahlung to blackbody: 光厚



7.3 同步辐射

- 高能粒子在磁场中回旋加速造成的辐射
- 相对论形式的Larmor公式:

$$P_e = P'_e = \frac{2e^2}{3c^3} [a'_{\parallel}{}^2 + a'_{\perp}{}^2] = \frac{2e^2}{3c^3} \gamma^4 [\gamma^2 a_{\parallel}^2 + a_{\perp}^2]$$

- 平行速度方向加速可以忽略
- 求解粒子在磁场下运动:

$$\mathbf{F}_L = \frac{d}{dt}(\gamma m \mathbf{v}) = \frac{e}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

$$a_{\parallel} = 0$$

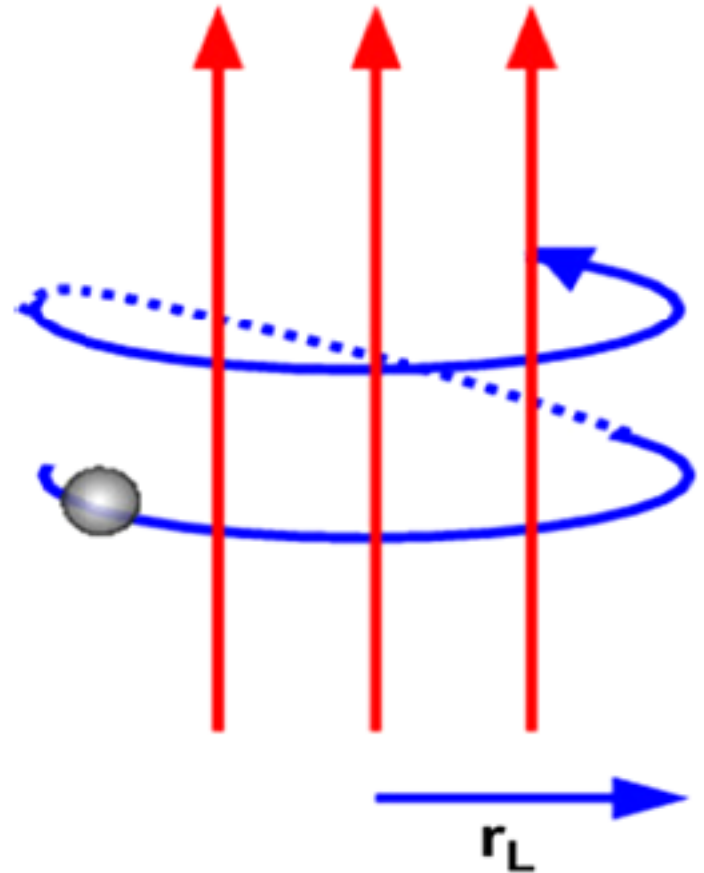
$$a_{\perp} = \frac{evB \sin \theta}{\gamma mc}$$

Larmor radius:

$$r_L = \frac{v_{\perp}^2}{a_{\perp}} = \frac{\gamma mc^2 \beta \sin \theta}{eB}$$

fundamental frequency:

$$\nu_B = \frac{eB}{2\pi \gamma mc} = \frac{\nu_L}{\gamma}$$



单个电子的同步辐射功率

- 一般情形:
$$P_S = \frac{2e^4}{3m^2c^3} B^2 \gamma^2 \beta^2 \sin^2 \theta$$

- 对pitch angle平均并整理:

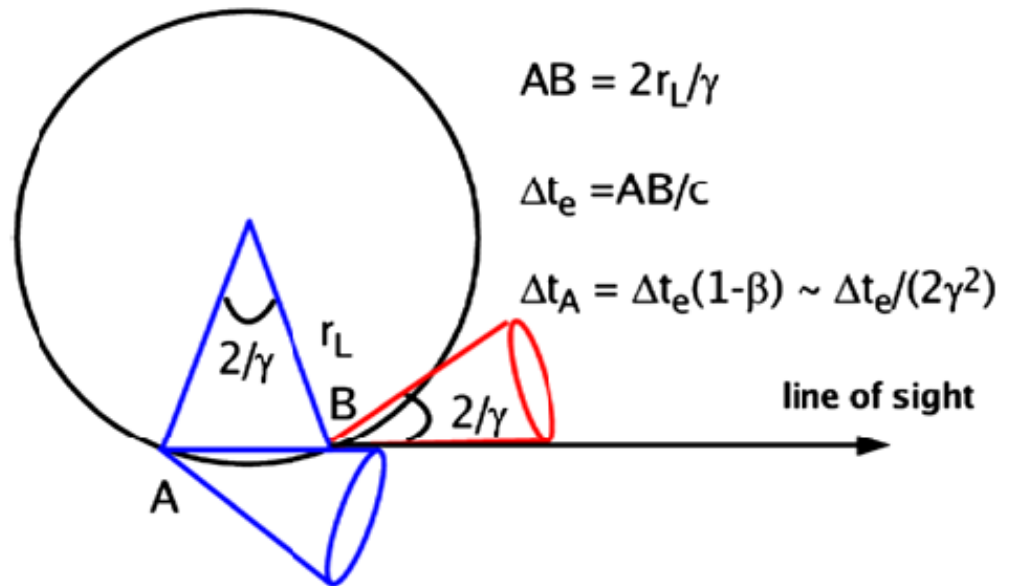
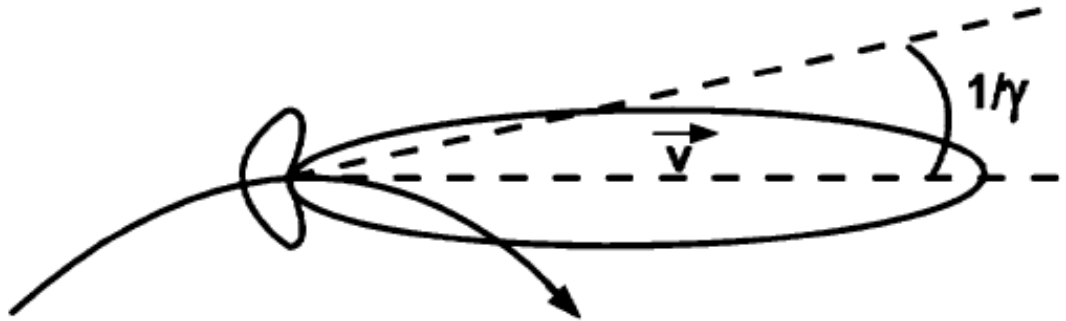
$$\langle P_S \rangle = \frac{4}{3} \sigma_{TC} U_B \gamma^2 \beta^2$$

- 同步辐射冷却时标:

$$t_{\text{syn}} = \frac{E}{\langle P_S \rangle} \sim \frac{7.75 \times 10^8}{B^2 \gamma} \text{ s} = \frac{24.57}{B^2 \gamma} \text{ yr}$$

同步辐射典型频率

- 典型时标:

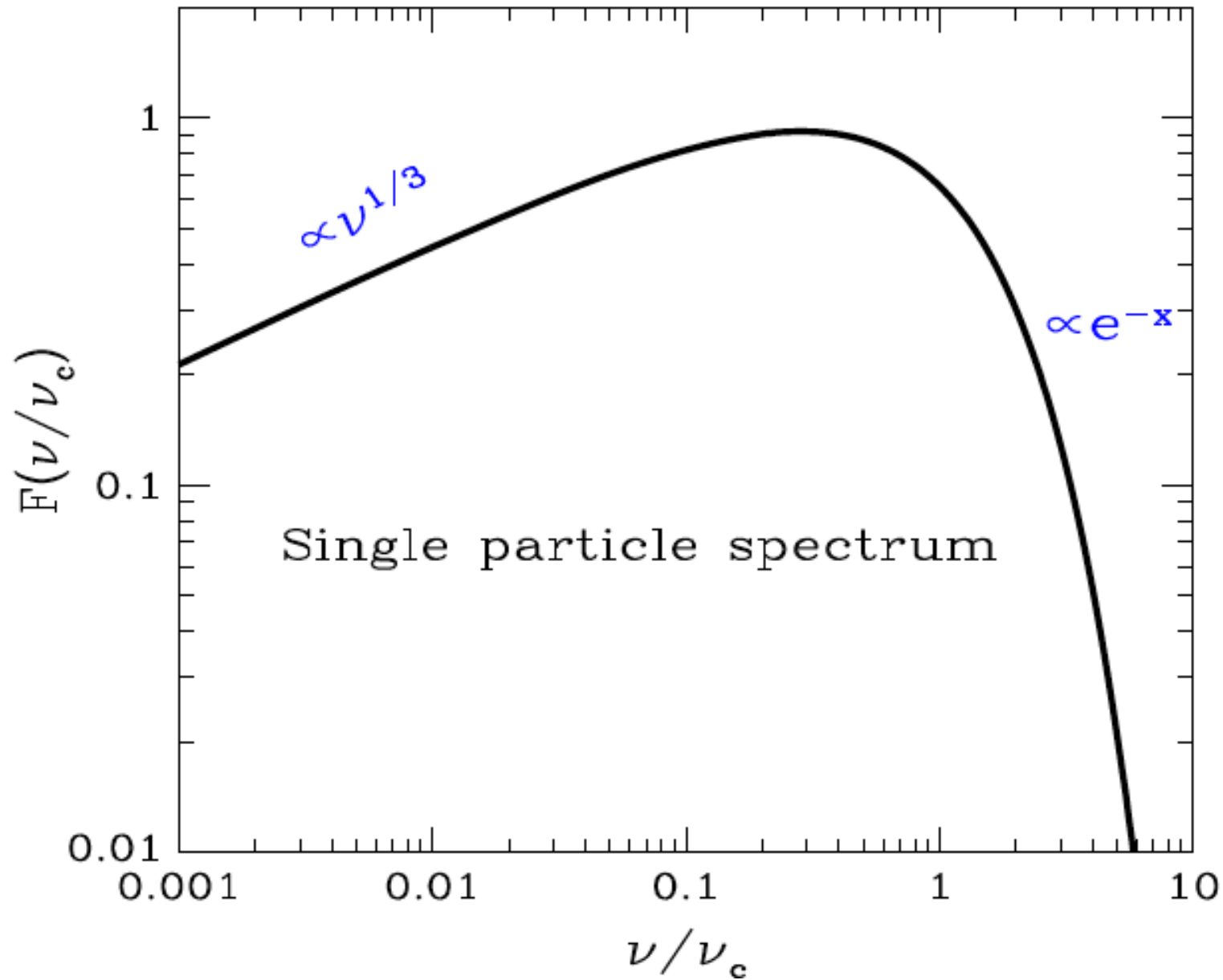


典型频率

- 可以认为单个电子的功率主要集中在一个频率：

$$\nu_s = \frac{1}{2\pi \Delta t_A} = \gamma^3 \nu_B = \gamma^2 \nu_L = \gamma^2 \frac{eB}{2\pi m_e c}$$

单个电子的同步辐射能谱



电子系的同步辐射

- 幂率分布的电子系统:

$$N(\gamma) = K \gamma^{-p} = N(E) \frac{dE}{d\gamma}; \quad \gamma_{\min} < \gamma < \gamma_{\max}$$

- emissivity: 求积分

$$j_s(\nu, \theta) = \frac{1}{4\pi} \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} N(\gamma) P(\gamma, \nu, \theta) d\gamma$$

$$\propto K B^{(p+1)/2} \nu^{-(p-1)/2}$$

$$j_s \propto \nu^{-\alpha} \quad \text{幂率的电子能谱, 得到幂率的辐射能谱, 其中: } \alpha = \frac{p-1}{2}$$

另外的推导方式

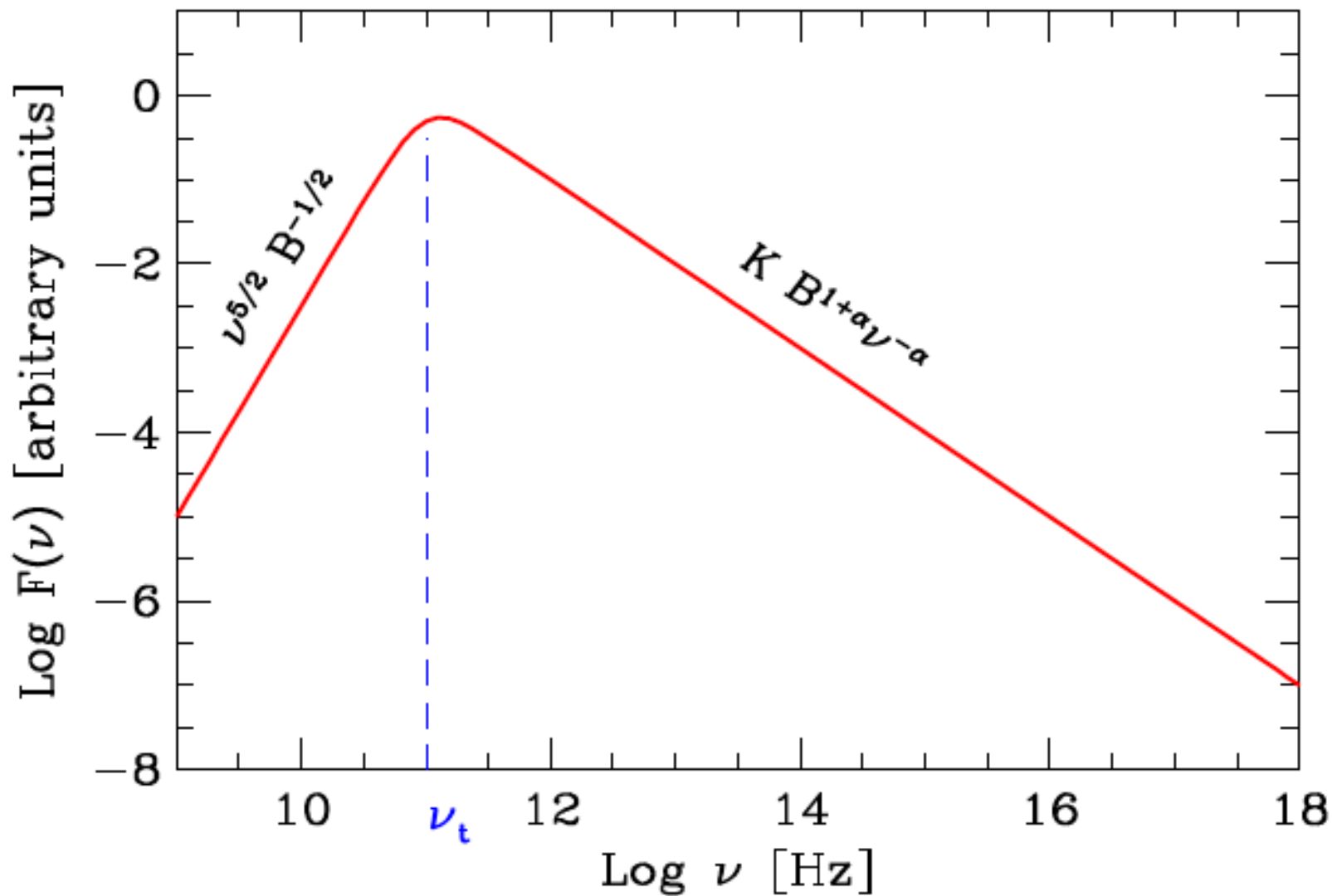
- 频率和Lorentz 因子关系:

$$\nu_s = \gamma^2 \nu_L; \quad \nu_L \equiv \frac{eB}{2\pi m_e c}$$

- 则:

$$j_s(\nu) d\nu = \frac{1}{4\pi} P_s N(\gamma) d\gamma$$
$$\propto K B^{(p+1)/2} \nu^{-(p-1)/2}$$

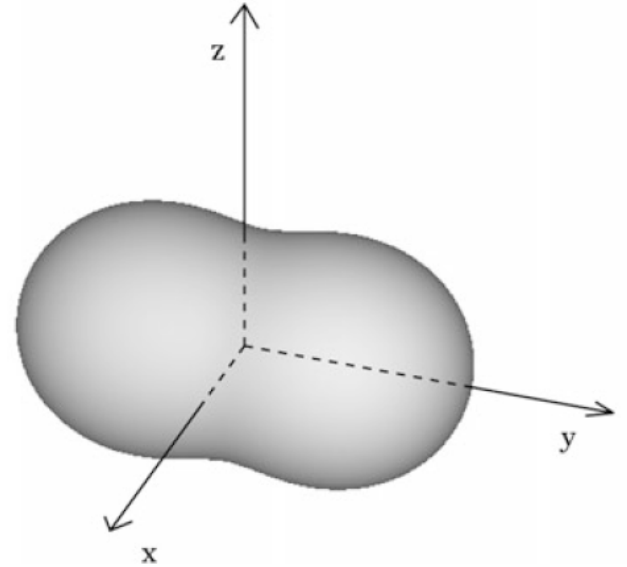
同步辐射全波段能谱



7.4 逆Compton 散射： 电子静止情形

- Compton 散射截面：

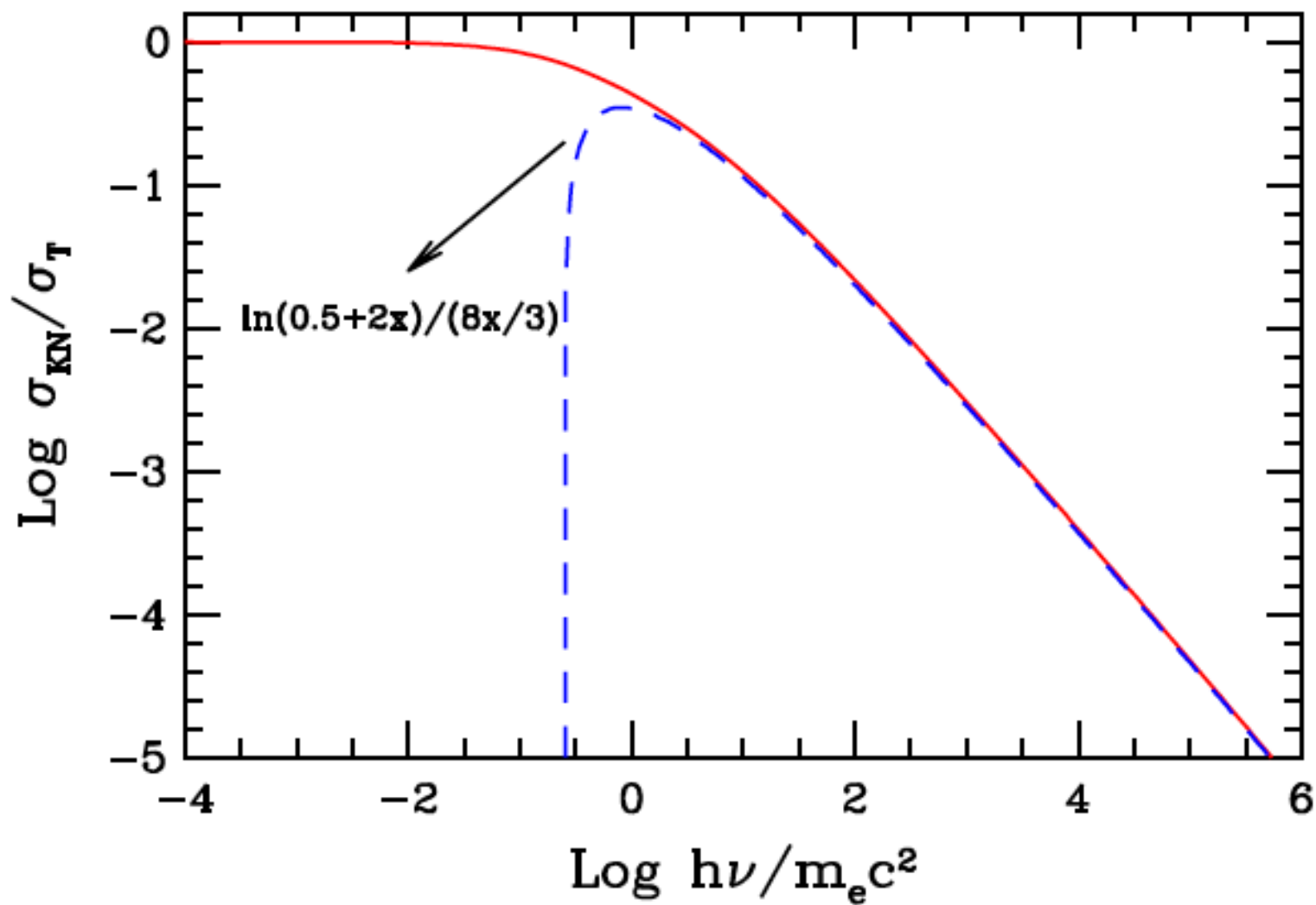
$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{unpol}} = \frac{1}{2}r_0^2(1 + \cos^2\theta)$$



- 散射光是部分偏振的
- 总散射截面

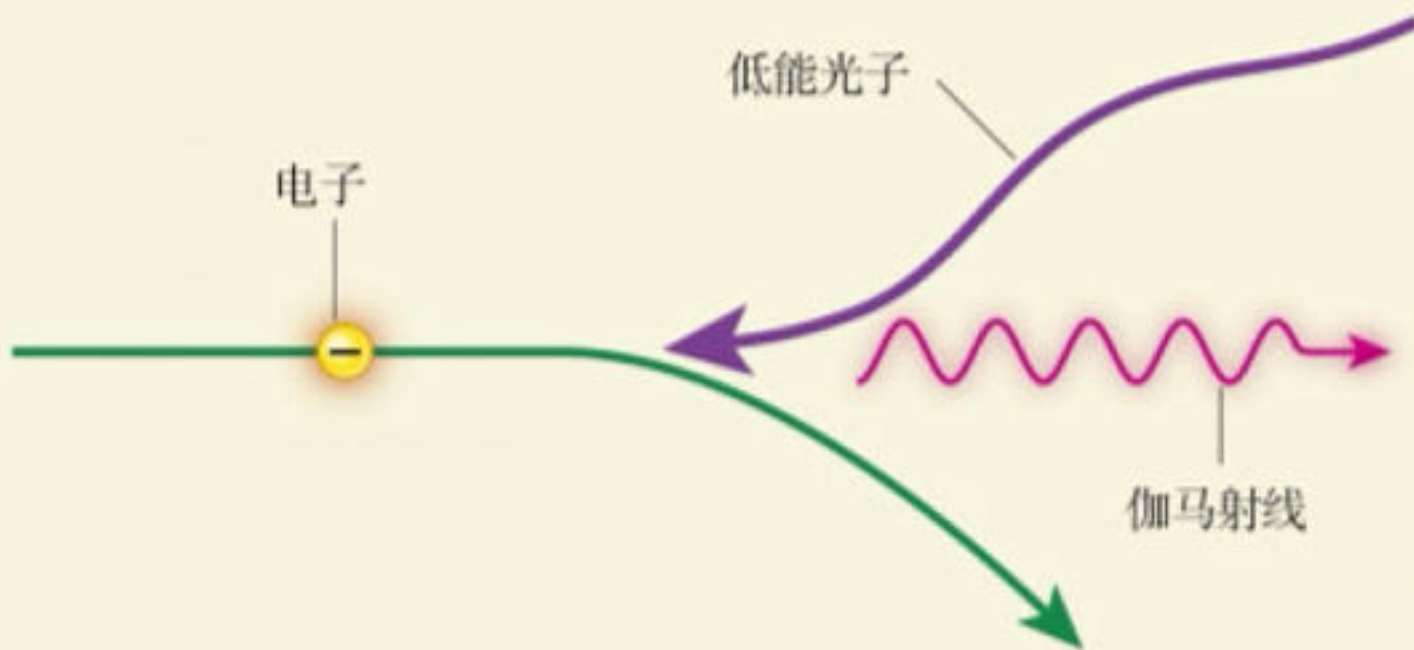
$$\begin{aligned}\sigma_{\text{T}} &= \int \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{unpol}} d\Omega = \frac{2\pi r_0^2}{2} \int (1 + \cos^2\theta) d\cos\theta = \frac{8\pi}{3} r_0^2 \\ &= 6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2\end{aligned}$$

光子能量很高时



逆康普顿散射

在银河系中穿行的高能电子，可能会与一个光子发生剧烈的正面碰撞。就像棒球撞到在空中挥舞的球棒，光子撞到高能电子后，会携带着比原来高得多的能量从碰撞中射出。逆康普顿散射主要以伽马射线形式存在。



逆Compton散射

- 高能电子和光子之间的散射
- 光子获得能量： $\langle x_1 \rangle = \frac{4}{3} \gamma^2 x$

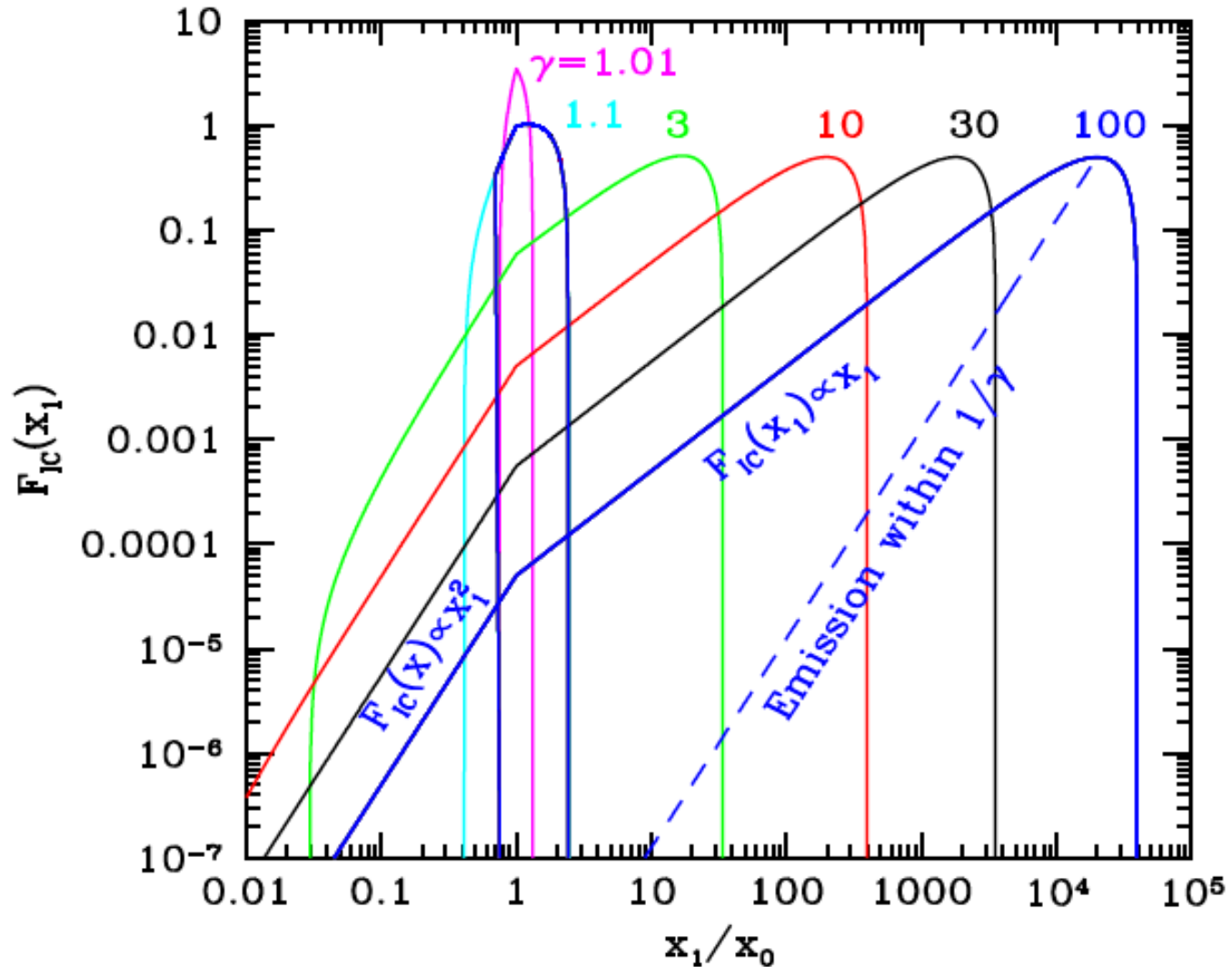
- 单个电子的ICS的功率：

$$P_c(\gamma) = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma^2 \beta^2 U_r$$

对比同步辐射：

$$\langle P_S \rangle = \frac{4}{3} \sigma_T c U_B \gamma^2 \beta^2$$

单个电子单一种子光子ICS能谱



接下来

- 对电子系的分布积分：

$$N(\gamma) = K \gamma^{-p} = N(E) \frac{dE}{d\gamma}; \quad \gamma_{\min} < \gamma < \gamma_{\max}$$

emissivity

$$\epsilon_c(h\nu_c) = \frac{1}{4\pi} \frac{(4/3)^\alpha}{2} \frac{\tau_c}{R/c} \frac{U_r}{h\nu_0} \left(\frac{\nu_c}{\nu_0} \right)^{-\alpha}$$

$$\alpha = \frac{p-1}{2}$$

- 对种子光子场积分

$$\epsilon_c(\nu_c) = \frac{1}{4\pi} \frac{(4/3)^\alpha}{2} \frac{\tau_c}{R/c} \nu_c^{-\alpha} \int_{\nu_{\min}}^{\nu_{\max}} \frac{U_r(\nu)}{\nu} \nu^\alpha d\nu$$

7.5 同步自Compton

- 磁场中的高能电子产生同步辐射并和同步光子发生散射
- ICS过程的种子光子用同步辐射的光子场代替

$$U_s(\nu) = \frac{3R}{4c} \frac{L_s(\nu)}{V} = 4\pi \frac{3R}{4c} j_s(\nu)$$

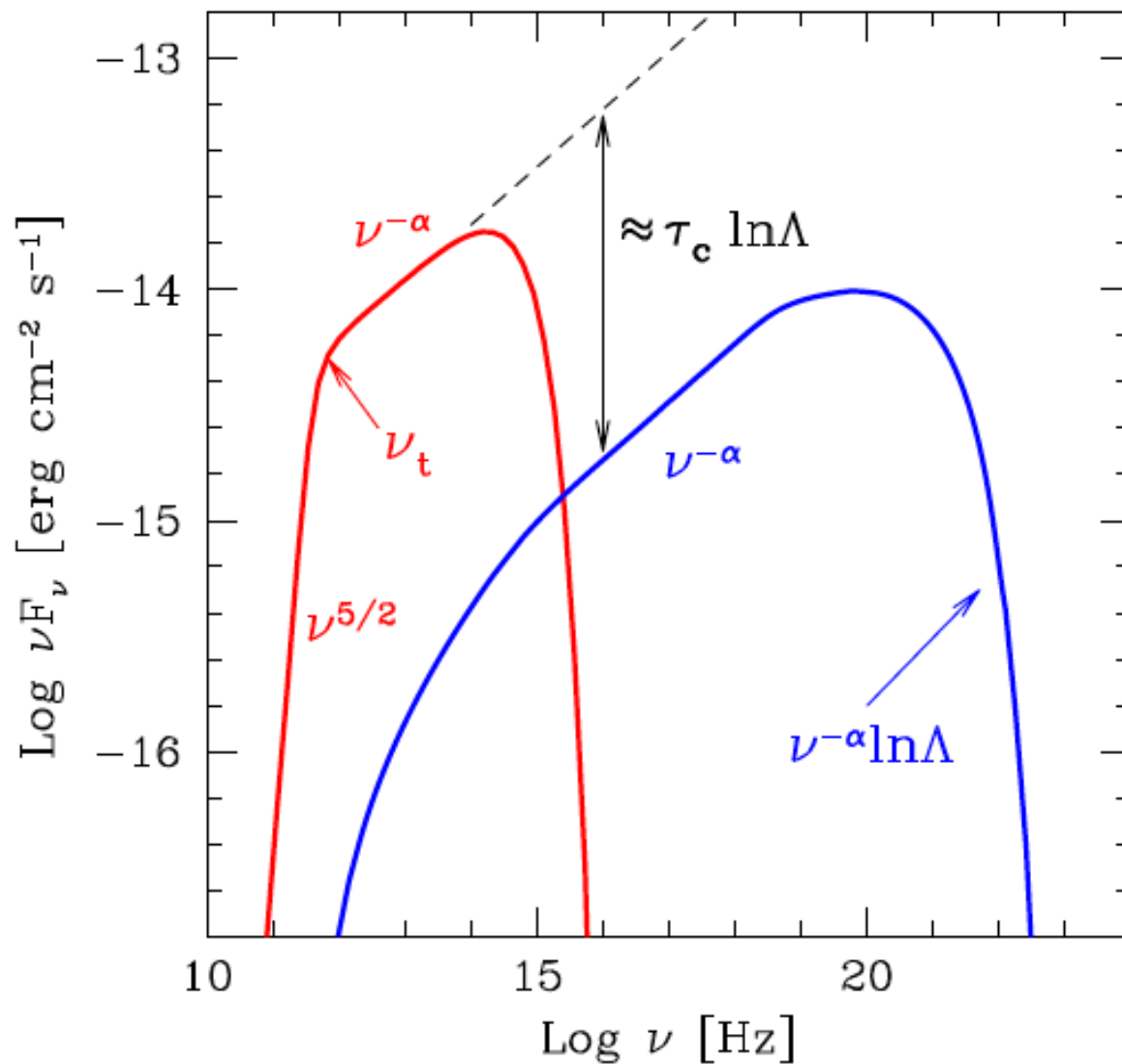
synchrotron emissivity

$$j_s(\nu) = j_{s,0} \nu^{-\alpha}$$

SSC emissivity

$$j_{\text{SSC}}(\nu_c) = \frac{(4/3)^{\alpha-1}}{2} \tau_c j_{s,0} \nu_c^{-\alpha} \int_{\nu_{\text{min}}}^{\nu_{\text{max}}} \frac{d\nu}{\nu}$$

SSC emissivity
$$j_{\text{SSC}}(\nu_c) = \frac{(4/3)^{\alpha-1}}{2} \tau_c j_s(\nu_c) \ln \Lambda$$



没有涉及的内容

- 辐射转移
- 相对论beaming
- bremsstrahlung, synchrotron, ICS, SSC等丰富而有趣的细节

思考题

1. 完成Ghisellini (2013) SSC的全文阅读
2. SNR, pulsar, GRB, AGN等领域SSC观测和理论的文献阅读

均可作为期末文献阅读报告的选题