高能天体物理笔记

GasinAn

2025 年 6 月 15 日

Printed in China

目录

第一章　高能辐射机制简述

1.1　辐射传播相关物理量的定义

$I_\nu(\theta,\phi)$: specific intensity (brightness, 亮度), 单位面积, 单位时间, 单位频率, 法线方向单位立体角穿过的能量,

$$I_\nu(\theta,\phi) = \frac{dE}{dA\,dt\,d\nu\,d\Omega}. \tag{1.1}$$

若法线方向沿 z 轴正方向, 且不要求法线方向穿过,

$$I_\nu(\theta,\phi) = \frac{dE}{(dA\cos\theta)\,dt\,d\nu\,d\Omega}. \tag{1.2}$$

J_ν: 平均强度,

$$J_\nu = \frac{1}{4\pi}\int I_\nu(\theta,\phi)\,d\Omega. \tag{1.3}$$

在自由空间，沿视线方向，辐射强度不变.

F_ν: monochromatic energy flux (单色能流量): 单位面积, 单位时间, 在单位频率间隔穿过的能量,

$$F_\nu = \int I_\nu(\theta,\phi)\cos\theta\,d\Omega. \tag{1.4}$$

$\mathcal{F}$: energy fluence (能流): 单位面积穿过的能量,

$$\mathcal{F} = \int F_\nu\,dt\,d\nu. \tag{1.5}$$

$u_\nu(\theta,\phi)$: radiative energy density 辐射能量密度,

$$u_\nu(\theta,\phi) = \frac{dE}{(dA\,c\,dt)\,d\nu\,d\Omega}, \tag{1.6}$$

$$u_\nu(\theta,\phi) = \frac{1}{c}I_\nu(\theta,\phi). \tag{1.7}$$

$$u_\nu = \frac{4\pi}{c} J_\nu. \tag{1.8}$$

整理: specific intensity / brightness

$$dE_\nu(\Omega) = I_\nu(\Omega)\, dA_\perp(\Omega)\, dt\, d\Omega\, d\nu, \tag{1.9}$$

net flux

$$\begin{aligned} dE_\nu &= F_\nu\, dA\, dt\, d\nu & (1.10)\\ &= \int_\Omega I_\nu(\Omega)\, dA_\perp(\Omega)\, dt\, d\Omega\, d\nu & (1.11)\\ &= \int_\Omega I_\nu(\Omega)\, dA \cos\theta\, dt\, d\Omega\, d\nu & (1.12)\\ &= \left(\int_\Omega I_\nu(\Omega) \cos\theta\, d\Omega\right) dA\, dt\, d\nu, & (1.13) \end{aligned}$$

momentum flux

$$dP_{\perp\nu}(\Omega) = dp_{\perp\nu}(\Omega)\, dA\, dt\, d\nu, \tag{1.14}$$

$$\begin{aligned} dP_{\perp\nu}(\Omega) &= dP_\nu(\Omega) \cos\theta & (1.15)\\ &= (dE_\nu(\Omega)/c) \cos\theta & (1.16)\\ &= (I_\nu(\Omega)/c) \cos^2\theta\, d\Omega\, dA\, dt\, d\nu, & (1.17) \end{aligned}$$

energy density

$$\begin{aligned} dE_\nu(\Omega) &= u_\nu(\Omega)\, dV_\perp(\Omega)\, d\Omega\, d\nu & (1.18)\\ &= u_\nu(\Omega)\, dA_\perp(\Omega)\, cdt\, d\Omega\, d\nu, & (1.19) \end{aligned}$$

$$dE_\nu(\Omega) = I_\nu(\Omega)\, dA_\perp(\Omega)\, dt\, d\Omega\, d\nu, \tag{1.20}$$

$$\begin{aligned} J_\nu &= \frac{\int I_\nu(\Omega)\, d\Omega}{\int\, d\Omega} & (1.21)\\ &= \int (I_\nu(\Omega)/4\pi)\, d\Omega. & (1.22) \end{aligned}$$

$$I_{\nu 1}(\Omega)\, dA_{\perp 1}(\Omega)\, dt\, d\Omega_1\, d\nu = I_{\nu 2}(\Omega)\, dA_{\perp 2}(\Omega)\, dt\, d\Omega_2\, d\nu, \tag{1.23}$$

$$d\Omega_1 = dA_{\perp 2}(\Omega)/r^2, \quad d\Omega_2 = dA_{\perp 1}(\Omega)/r^2, \tag{1.24}$$

$$I_{\nu 1}(\Omega) = I_{\nu 2}(\Omega). \tag{1.25}$$

1.2 辐射转移

$$\begin{aligned} ddE_\nu(\Omega) &= \epsilon_\nu(\Omega)\, dV_\perp(\Omega)\, dt\, d\Omega\, d\nu && (1.26)\\ &= \epsilon_\nu(\Omega)\, dA_\perp(\Omega)\, ds\, dt\, d\Omega\, d\nu && (1.27)\\ &= dI_\nu(\Omega)\, dA_\perp(\Omega)\, dt\, d\Omega\, d\nu && (1.28) \end{aligned}$$

$$dI_\nu(\Omega) = \epsilon_\nu(\Omega)\, ds, \tag{1.29}$$

$$\begin{aligned} dS_\perp(\Omega) &= \sigma_\nu\, dN_\perp(\Omega) && (1.30)\\ &= \sigma_\nu n\, dV_\perp(\Omega) && (1.31)\\ &= \sigma_\nu n\, dA_\perp(\Omega)\, ds, && (1.32) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ddE_\nu(\Omega) &= -I_\nu(\Omega)\, dS_\perp(\Omega)\, dt\, d\Omega\, d\nu && (1.33)\\ &= -I_\nu(\Omega)\sigma_\nu n\, dA_\perp(\Omega)\, ds\, dt\, d\Omega\, d\nu && (1.34)\\ &= -I_\nu(\Omega)\alpha_\nu\, dA_\perp(\Omega)\, ds\, dt\, d\Omega\, d\nu && (1.35)\\ &= dI_\nu(\Omega)\, dA_\perp(\Omega)\, dt\, d\Omega\, d\nu && (1.36) \end{aligned}$$

$$dI_\nu(\Omega) = -I_\nu(\Omega)\alpha_\nu\, ds, \tag{1.37}$$

1.3 辐射机制

1.3.1 黑体辐射

热平衡: 宏观无热量交换. 热辐射: 辐射源热平衡. 黑体辐射: 辐射源热平衡 + 辐射全被辐射源吸收 $\Rightarrow$ 辐射热平衡.

$\hbar\omega/kT \ll 1$, $\propto \omega^2$ $\hbar\omega/kT \gg 1$, $\propto e^{-\hbar\omega/kT}$. $\hbar\omega_{\mathrm{W}}/kT \approx 2.82$.

1.3.2 加速带电粒子的电磁辐射

$$\vec{A}(t,\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int \frac{\vec{j}(t-|\vec{r}-\vec{r}'|,\vec{r}')}{|\vec{r}-\vec{r}'|}dV' \tag{1.38}$$

$\vec{r}_e(t)$, $\vec{j}(t,\vec{r}') = q\delta(\vec{r}' - \vec{r}_e)\vec{v}_e$, $K = 1 - \frac{\vec{r}-\vec{r}_e}{|\vec{r}-\vec{r}_e|}\vec{v}_e$,

$$\vec{A}(t,\vec{r}) = \left[\frac{q\vec{v}_e}{K|\vec{r}-\vec{r}_e|}\right]\bigg|_{t=t-|\vec{r}-\vec{r}_e|} \tag{1.39}$$

电场中单电子的辐射

$I_\parallel/I_\perp \approx 1/\gamma^2$, $\omega \approx \gamma v/b$.

热韧致辐射 $\tau \gg 1$, $\propto \omega^2$, $\tau \ll 1 \wedge \hbar\omega/kT \ll 1$, $\approx \mathrm{const}$, $\hbar\omega/kT \gg 1$, $\propto e^{-\hbar\omega/kT}$.

非热韧致辐射

1.3.3 磁场中单电子的辐射

$evB = \gamma m\omega^2 r = \gamma m\omega v$, $\omega_\mathrm{g} = eB/\gamma m = \omega_\mathrm{cycle}/\gamma$.

回旋辐射

同步辐射 周期 $2\pi/\omega_\mathrm{g}$, 宽度 $\approx 1/\gamma^3\omega_\mathrm{g}$.

$\omega/\omega_\mathrm{c} \ll 1$, $\propto \omega^{1/3}$, $\omega/\omega_\mathrm{c} \gg 1$, $\propto e^{-\omega/\omega_\mathrm{c}}$. $\omega_\mathrm{c} = 3\gamma^2 eB/2m = (3/2)\gamma^3\omega_\mathrm{g}$.
$\tau \gg 1$, $I(\omega) \propto \omega^{5/2}$, $\tau \ll 1$, $N(E) \propto E^{-p}$, $I(\omega) \propto \omega^{-(p-1)/2}$.

1.3.4 光子散射

Thomson 散射

$m_e c^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_e}$

$$\frac{d\sigma_\mathrm{T}}{d\Omega} := \frac{\frac{dE_\mathrm{out}}{dtd\Omega}}{S_\mathrm{in}} = \frac{\frac{dE_\mathrm{out}}{dtd\Omega}}{\frac{dE_\mathrm{in}}{dtdA}}, \quad S_\mathrm{in}\sigma_\mathrm{T} = \frac{dE_\mathrm{out}}{dt} \tag{1.40}$$

Compton 散射

$\hbar\omega/m_e c^2 \ll 1$, $\sigma \approx \sigma_\mathrm{T}$, $\hbar\omega/m_e c^2 \gg 1$, $\sigma \propto \omega^{-1}$.

逆 Compton 散射

$\omega \leq 4\gamma^2\omega_0$. $\omega \ll 4\gamma^2\omega_0$, $\propto \omega$

第二章　银河系内

2.1　星际介质

$?/xD=\theta$, $?/(1-x)D=\alpha$, $\alpha=[x/(1-x)]\theta$, $\theta_{\rm sca}=\theta+\alpha=[?/x+?/(1-x)]/D=?/x(1-x)D$, $\theta=(1-x)\theta_{\rm sca}$.

$\sqrt{1+\delta^2}\approx 1+\frac{1}{2}\delta^2$, $xD(1+\frac{1}{2}\theta^2)+(1-x)D(1+\frac{1}{2}\alpha^2)$, $\frac{1}{2}xD\theta^2+\frac{1}{2}(1-x)D\alpha^2=\frac{1}{2}xD\theta^2+\frac{1}{2}(1-x)D[x^2/(1-x)^2]\theta^2=\frac{1}{2}xD\theta^2+\frac{1}{2}D[x^2/(1-x)]\theta^2$, $\frac{1}{2}x+\frac{1}{2}[x^2/(1-x)]=\frac{1}{2}x/(1-x)$

2.2　XB

第三章　银河系外

3.1　一般星系

^{26}Al 衰变, 1.089 MeV 谱线.

色色图: 较软能段硬度比 $\frac{M-S}{H+M+S}$-较硬能段硬度比 $\frac{H-M}{H+M+S}$.

3.2　AG

多波段, 强度高.

3.2.1　AG 分类

3.2.2　AGN 统一模型

3.2.3　射电宁静 AGN

区域: AGN 核心区域, 靠近 BH, 吸积盘内侧.

3.2.4　宽线, 窄线, 反响映射

3.2.5　射电噪 AGN

视超光速

Doppler 增亮

3.3　GRB