

# 《脉冲星天文学》

暑期讲习班

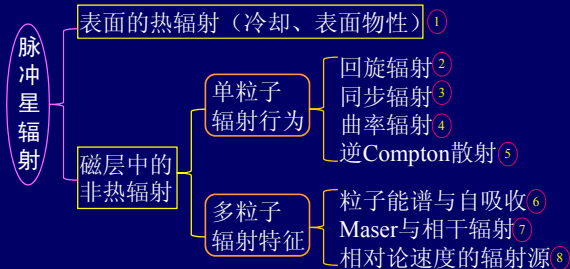
PA19. Radiation processes

---

讲授：徐仁新

北京大学物理学院天文学系

# 脉冲星物理过程的秘密被光子泄露



脉冲星磁层辐射  
位置与辐射状况



张力教授今  
天下午演讲

# 1, 表面的热辐射

**热辐射:** 中子星表面处于**热平衡**所发射辐射

**非热辐射:** 磁层中相对论粒子未处于热平衡

比如磁场环境下非热高能电子辐射: 回旋辐射、同步辐射

## 热辐射发射率

**Kirchhoff定律:**  $\psi_e(\nu, T) = \alpha(\nu, T) \cdot B(\nu, T)$

$B(\nu, T)$ 是与材料无关的函数。此定律可用热力学定律证明

**黑体辐射:** 吸收系数 $\alpha(\nu, T) = 1$ 的热辐射

可见: 黑体辐射是辐射效率最高的热辐射

# 1, 表面的热辐射

黑体辐射能量密度: Planck公式

$$\rho_{\nu}(T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/(kT)} - 1}$$

辐射通量: Stefan-Boltzmann定律

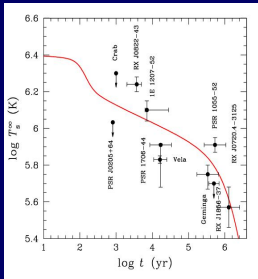
$$B(T) = \frac{c}{4} \int_0^{+\infty} \rho_{\nu}(T) d\nu = \sigma T^4$$

Wien位移定律:  $\lambda_{\max} T = 0.29 \text{ cm K}$

辐射场状态方程:  $P(T) = \rho(T) / 3$

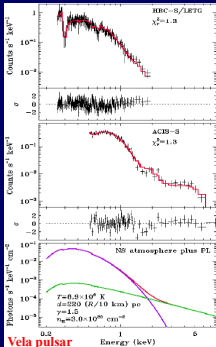
# 1, 表面的热辐射

热辐射与冷却：理论与观测



Yakovlev *et al.* (2005)

Pavlov *et al.* (2004)



Vela pulsar

Energy (keV)

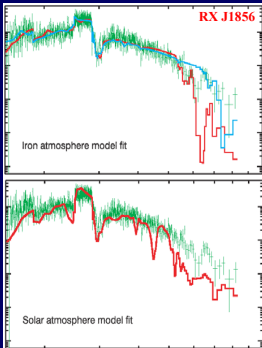
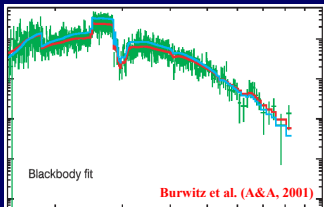
“PA19. Radiation”

<http://vega.bac.pku.edu.cn/rxxu> R. X. Xu

# 1, 表面的热辐射

热辐射与表面物质成分:  
理论与观测

为何至今没有测得原子谱线



## 2, 回旋辐射

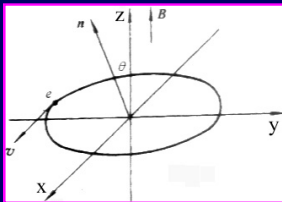
定性分析:  $e(\beta \ll 1) \oplus B$

Larmor半径  $r_L = \frac{mcv}{eB}$

Larmor圆频率  $\omega_L = \frac{eB}{mc}$

相对论效应:

$$r_0 = \gamma r_L, \quad \omega_0 = \omega_L / \gamma$$



圆周运动 = 两个互相垂直电偶极子

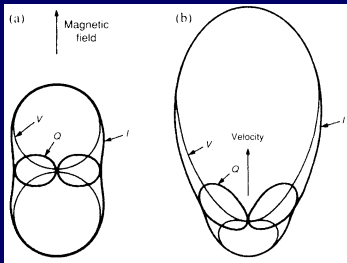
电偶极辐射: 单频、辐射能流  $S \sim \sin^2 \theta n$ , 电场矢量位于  $d$  与  $n$  平面

辐射场特性:

1, 单色, 2, 辐射近乎各向同性, 3, 椭圆偏振

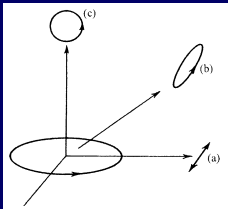
## 2, 回旋辐射

计算结果示意:



Stokes参数:  $I, Q, U, V$

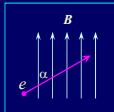
偏振特性



(a): 垂直于磁场运动 (b): 平行于磁场运动



## 2, 回旋辐射



辐射功率计算结果： $e(\beta \ll 1) \oplus B$

单个电子的辐射功率： $P = 1.6 \times 10^{-15} \beta^2 B^2 \sin^2 \alpha$  (erg/s)

各向同性平均功率： $\bar{P} = 1.1 \times 10^{-15} \beta^2 B^2$  (erg/s)

辐射频率为  $S\omega_0$  ( $S = 1, 2, 3, \dots$ )，谱功率为：

$$P_s \approx \frac{2e^2 \omega_L^2}{c} \frac{(S+1)S^{2S+1}}{(2S+1)!} \beta^{2S}$$

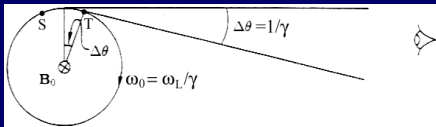
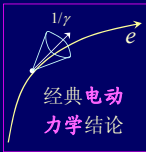
$$\Rightarrow P_{S+1}/P_S \sim \beta^2 \ll 1$$

角分布： $\sim (1 + \cos^2 \theta) d\Omega$

# 3, 同步辐射

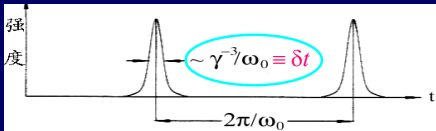
定性分析:  $e(\gamma \gg 1) \oplus B$

$v \cdot B = 0$  情形



电磁场强度  
辐射谱:

基频  $\omega_0$   
 $\omega_m \sim 1/\delta t$



# 3, 同步辐射

电动力学计算结果:  $e(\gamma \gg 1) \oplus B$

单个电子的辐射功率:  $P = 1.6 \times 10^{-15} \gamma^2 \beta^2 B^2 \sin^2 \alpha$  (erg/s)

各向同性平均功率:  $\bar{P} = 1.1 \times 10^{-15} \gamma^2 \beta^2 B^2$  (erg/s)

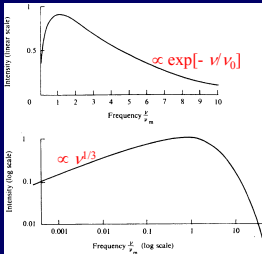
辐射平均寿命:  $\tau \sim \gamma mc^2/P$

$$\tau \sim \frac{5.1 \times 10^8}{\gamma \beta^2 B^2 \sin^2 \alpha} \text{ (s)}$$

辐射谱为连续谱:

单能辐射谱近似为宽的、  
频率为  $\nu_m$  的单色“谱线”

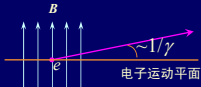
$$\nu_m \sim \gamma^3 \nu_0 \sim 1/\delta t$$



# 3, 同步辐射

偏振特性:  $e(\gamma \gg 1) \oplus B$

$v \cdot B = 0$ 情形

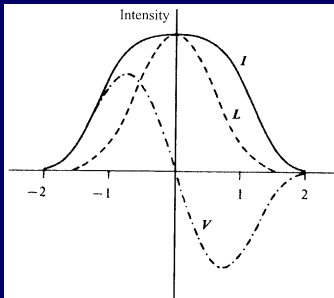


**单电子辐射:**

电子运动平面观测为线偏振  
在电子运动平面上下园偏振反向

**多电子辐射:**

圆偏振叠加后抵消!



# 4, Landau能级与曲率辐射

磁场强中相对论电子运动的量子效应

$$l \sim r_L \sim mc^2/(eB) \sim B^{-1}, \quad \lambda \sim \hat{\lambda} = \hbar / (mc)$$

$$l \sim \lambda \Rightarrow B \sim B_q \equiv m^2 c^3 / (e \hbar) = 4.414 \times 10^{13} \text{G}; \quad \text{临界磁场}$$

QED  $\Rightarrow$  能量本征值

$$E_n = \sqrt{c^2 p_{\parallel}^2 + m^2 c^4 \left(1 + 2 \frac{B}{B_q} n\right)}$$
$$n = n_L + s + \frac{1}{2} = 0, 1, 2, \dots \quad (n_L = 0, 1, 2, \dots, \quad s = \pm \frac{1}{2})$$

较弱磁场近似 ( $B \ll B_q$ , 但非小到量子效应可以忽略)

$$E_n = mc^2 + n \hbar \omega_L + \dots \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

# 4, Landau能级与曲率辐射

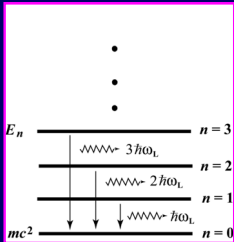
$$\left. \begin{array}{l} \text{能级间隔} \Delta E = \hbar eB/(mc) \\ \text{定义} mc^2 = \hbar eB_q/(mc) \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{B}{B_q} = \frac{\Delta E}{mc^2}$$

对于电子而言, 有:

$$\Delta E_e = 11.6 B_{12} \text{ keV}$$

而对于质子, 有:

$$\Delta E_p = 6.3 B_{12} \text{ eV}$$

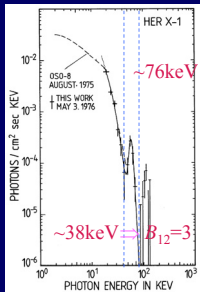


$B \ll B_q$  情形下的Landau能级

∴ 确定了Landau能级间隔就可测得天体磁场

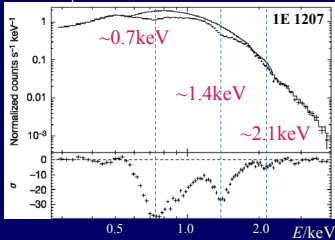
# 4, Landau能级与曲率辐射

$$\Delta E_e = 11.6B_{12} \text{ keV}, \quad \Delta E_p = 6.3B_{12} \text{ eV}$$



$$\Delta E_e = 0.7 \text{ keV} \Rightarrow B = 6 \times 10^{10} \text{ G}$$

$$\Delta E_p = 0.7 \text{ keV} \Rightarrow B \sim 10^{14} \text{ G}$$



Truemper et al., 1978, ApJ, 219, L105

Bignami et al., 2003 Nature, 423, 725

“PA19. Radiation”

<http://vega.bac.pku.edu.cn/rxxu> R. X. Xu

# 4, Landau能级与曲率辐射

Landau能级激发态的时标

$$\tau \sim 10^9 \gamma^{-1} B^{-2} \sim 10^{-18} \gamma_3^{-1} B_{12}^{-2} \ll \text{运动学时标} \sim L/c > 10^{-4}$$

⇒ 电子“束缚于磁力线”运动

类比于同步辐射讨论

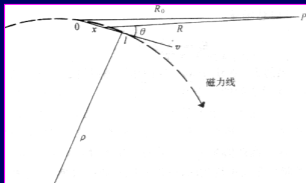
将曲率辐射类比于回旋半径为曲率半径 $\rho$ 的同步辐射

同步辐射 $r_0 = c/(2\pi\nu_0)$

$$\nu_m \sim \nu_c = (3/2)\gamma^3 \nu_0$$

⇒ 峰值频率 $\nu_m$  ( $r_0$ 代以 $\rho$ )

$$\nu_m \approx \frac{3}{2} \gamma^3 \left( \frac{c}{2\pi\rho} \right), \quad P_{\text{curv}} = \frac{2e^2 c}{3\rho^2} \gamma^4 \approx 10^{-31} \left( \frac{E_e}{\text{eV}} \right)^4 \left( \frac{\rho}{\text{meter}} \right)^4 \text{ erg/s}$$





# 5, Compton散射与逆Compton散射

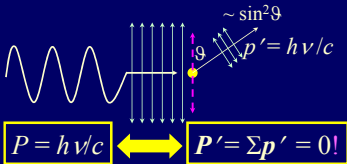
Compton过程: 自由电子与光子间的碰撞过程

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

不同参考系中的光子

狭义相对论  $\Rightarrow$

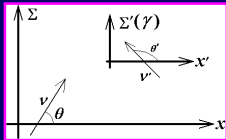
$$\nu' = \gamma\nu(1 - \beta \cos\theta), \quad \tan\theta' = \frac{\sin\theta}{\gamma(\cos\theta - \beta)}$$

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

$\nu' \sim \gamma \nu$ ;  $\tan\theta' \rightarrow 0$ 。在  $\Sigma'$  系光子频率增加  $\gamma$  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!

# 6, 粒子能谱与自吸收

## 粒子能谱效应:

在磁场中运动的单个电子主要辐射在峰值频率 $\nu_m$ 附近。因此,若集体电子具有幂率能谱,则这群电子的总辐射也应该为幂率能谱:

$$N(E) \sim E^s \quad \Rightarrow \quad P(\nu) \sim \nu^\alpha$$

对于同步辐射,  $\alpha = (1-s)/2$ ;

对于曲率辐射,  $\alpha = (1-s)/3$ 。

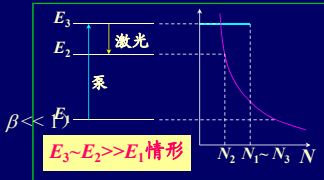
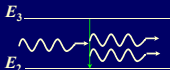
## 自吸收效应:

当集体电子于某一频率辐射**量温度**接近辐射该频率电子等效动力学温度时,辐射将被这群电子吸收,即“自吸收”。自吸收严重时可呈现热辐射特征。

# 7, Maser与相干辐射

正常Maser: 很难产生高量温度的连续谱

Einstein提出  
“受激辐射”概念



脉冲星射电辐射源于相干辐射

非相对论荷  
电粒子辐射

$$\begin{cases} \vec{E} = \frac{q}{cR} [\vec{n} \times \{(\vec{n} - \vec{\beta}) \times \dot{\vec{\beta}}\}]_{\text{ret}} \\ \vec{B} = [\vec{n} \times \vec{E}]_{\text{ret}} \end{cases}$$

功率:  $P \sim q^2$

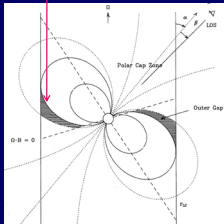
当集体电子分布区域远小于  $\lambda/2$  时, 电子集体可看作电荷  $Ne$  的单荷电粒子辐射, 功率  $P \sim N^2$ 。

流动不稳定性可能造就相干。

# 8, 相对论速度的辐射源

- 接近光速圆柱辐射区的运动速度也接近光速  $\Rightarrow$  辐射的**束效应**!
- 高能辐射很可能起源于光速圆柱附近的**外间隙** (out gap)

即使高能辐射是各向同性的 (其实因电子沿磁力线运动, 辐射各向异性), 因这一效应, 高能辐射也出现周期性调制



# 总结

