

《脉冲星天文学》

暑期讲习班

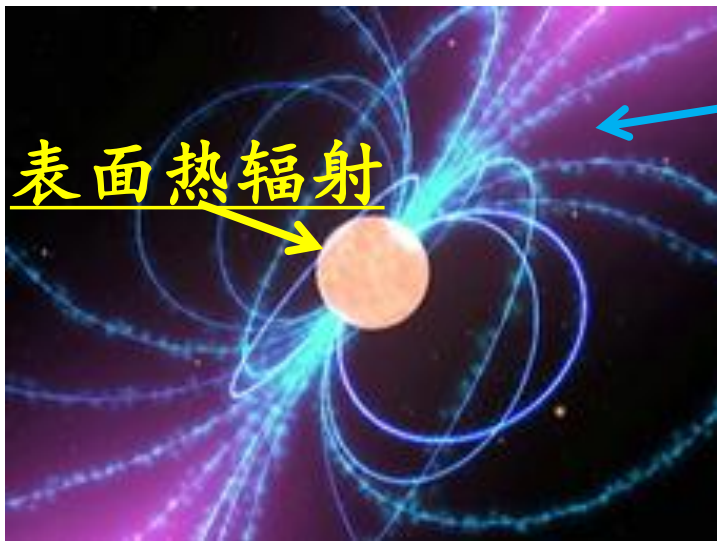
脉冲星的辐射机制和物理

(第18章和第19章)

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



磁层非热辐射

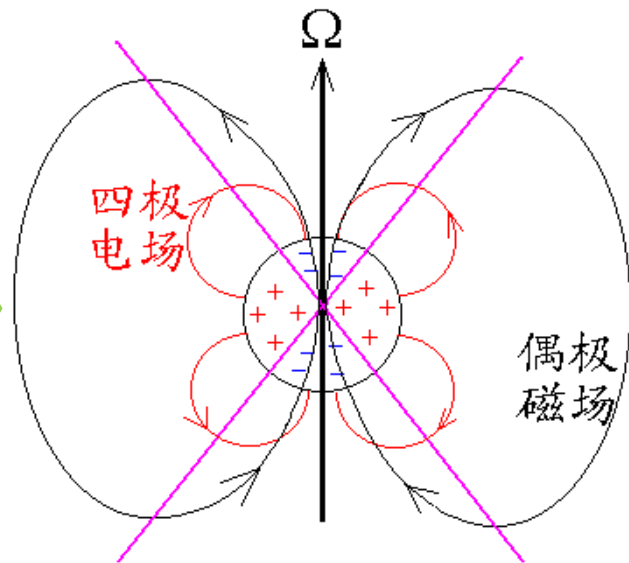
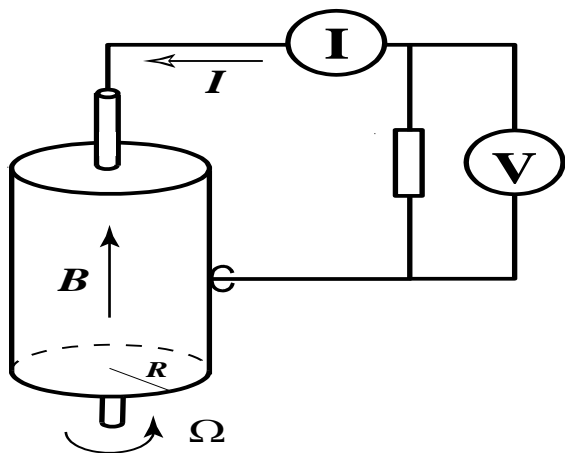
- 非相干非热辐射：X射线等高能辐射
- 相干非热辐射：射电辐射

非热辐射源于磁层中极端相对论性高能电子。这些电子如何被加速？

单极感应效应：

$$\frac{GMm}{R^2} / \frac{e\Omega RB}{c} \sim 10^{-9}!$$

表面引力 \ll 电磁力



脉冲星物理过程的秘密被光子泄露

脉冲星辐射

表面的热辐射（冷却、表面物性）①

单粒子
辐射行为

回旋辐射②

同步辐射③

Landau能级与曲率辐射④

逆Compton散射⑤

磁层中的
非热辐射

多粒子
辐射特征

粒子能谱与自吸收⑥

Maser与相干辐射⑦

脉冲星非热辐射区⑧

1, 表面的热辐射

热辐射: 处于热平衡的物体所发射的辐射

主要成分: $mc^2 < \sim kT$ 的粒子。 $m = 0$ 光子是热辐射主要成分

非热辐射: 未处于热平衡物体的辐射

比如磁场环境下非热高能电子辐射: 回旋辐射、同步辐射

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

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

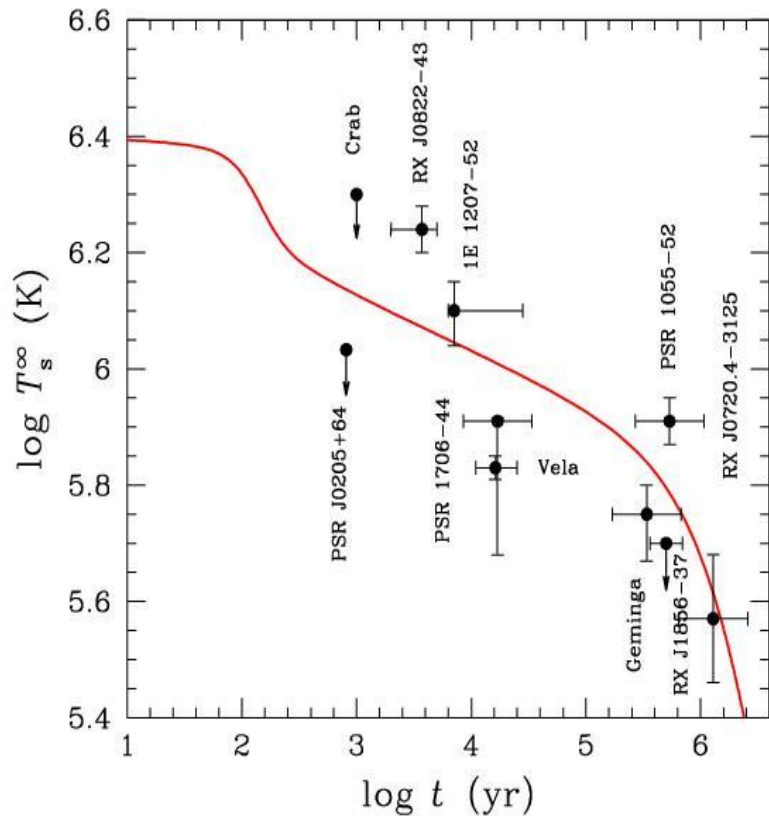
$$B(T) = \frac{c}{4} \int_0^{+\infty} \rho_{\nu}(T) d\nu = \sigma T^4$$

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

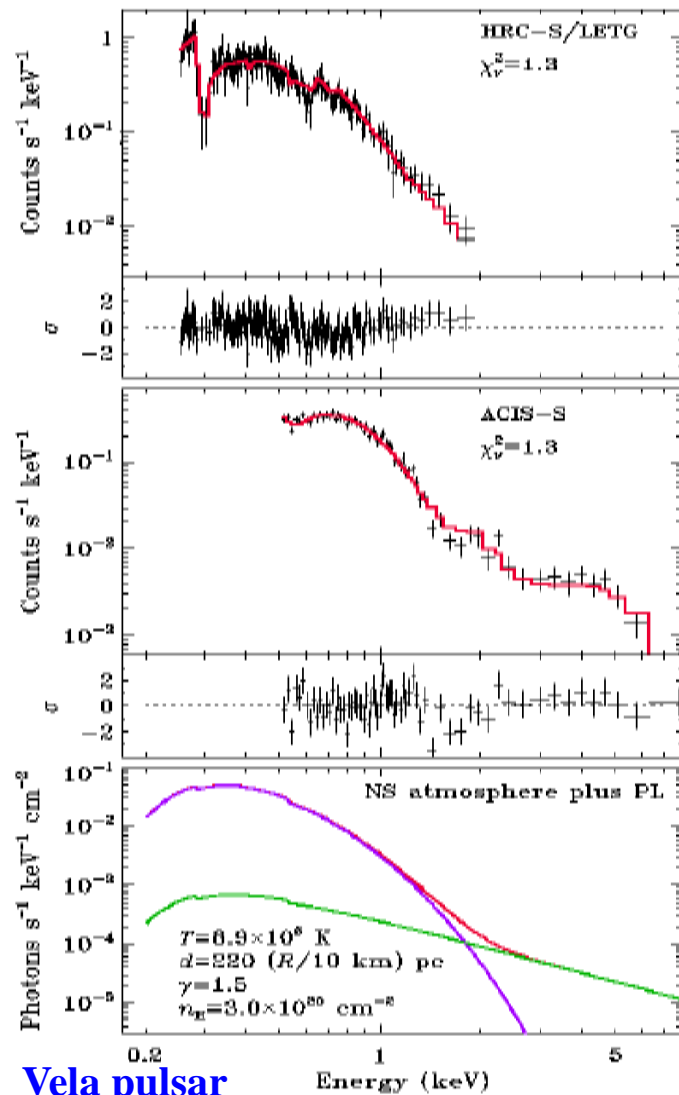
辐射场状态方程: $P(T) = \rho(T) / 3$

1, 表面的热辐射

热辐射与冷却：理论与观测



Yakovlev *et al.* (2005)



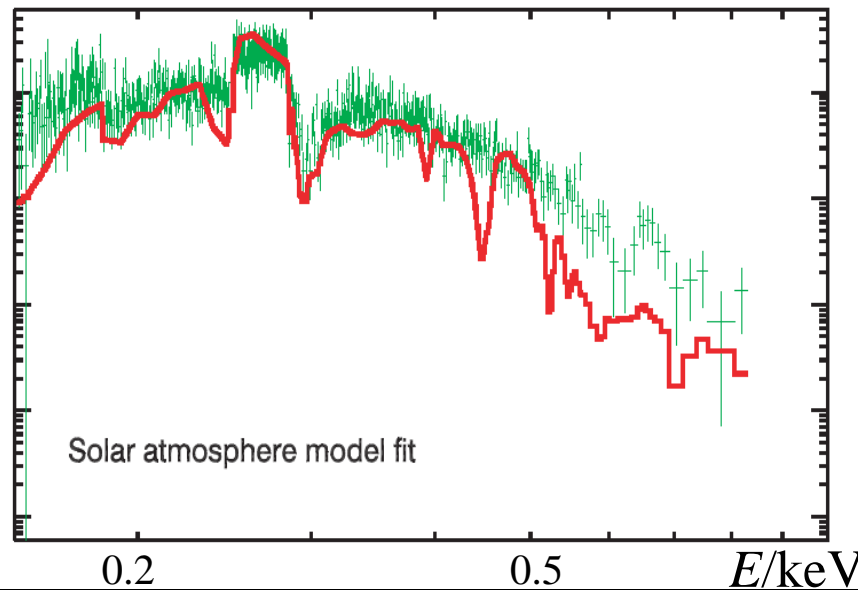
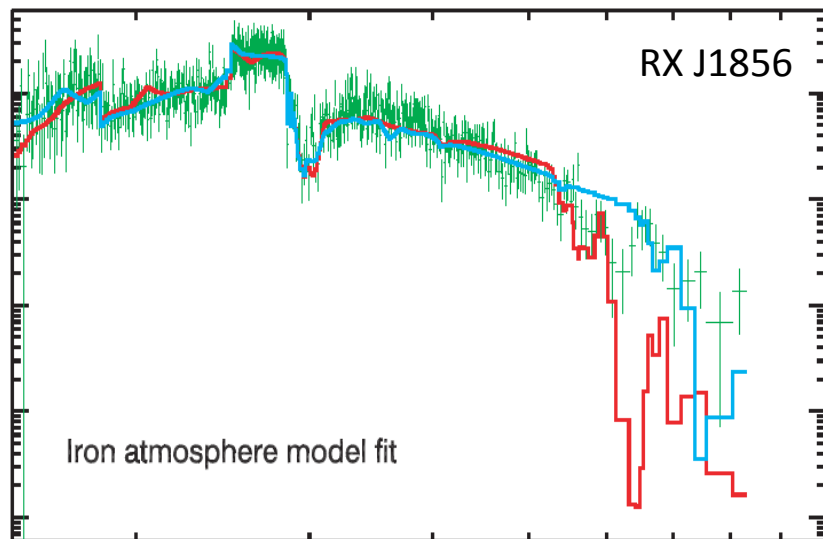
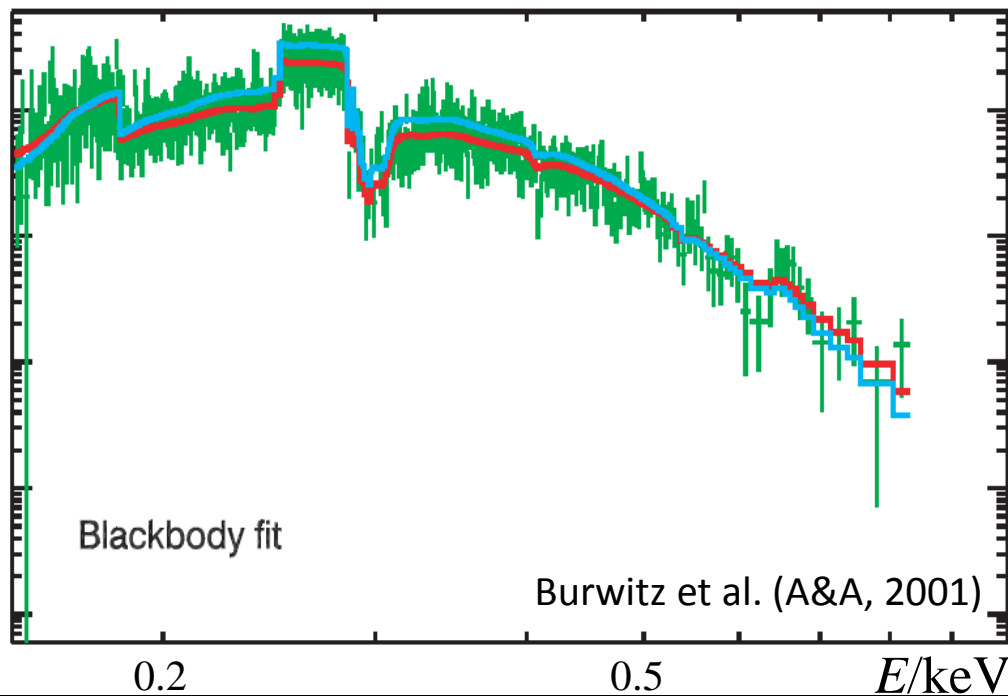
Pavlov *et al.* (2004)

Vela pulsar

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

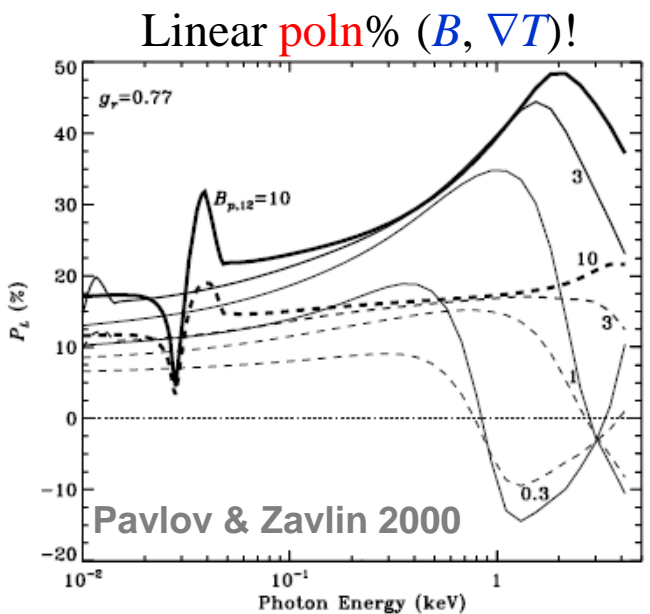


1, 表面的热辐射

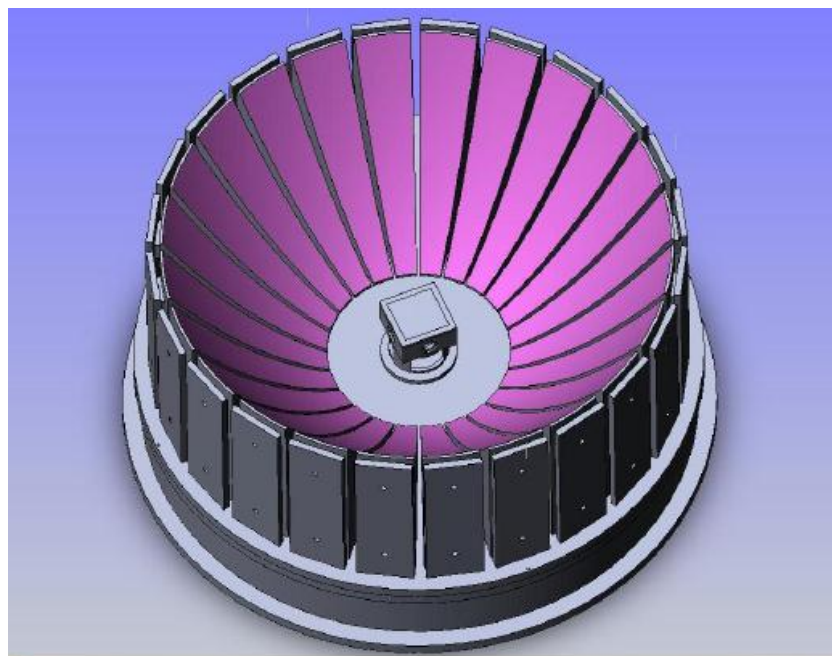
热辐射与表面物质成分: 理论与观测

强磁场形成“裸”中子星?

为何至今没有测得原子谱线



观测检验



Lightweight **A**symmetry and **M**agnetism **P**robe proposed to detect thermal X-ray polarization at ~ 0.25 keV...

2, 回旋辐射

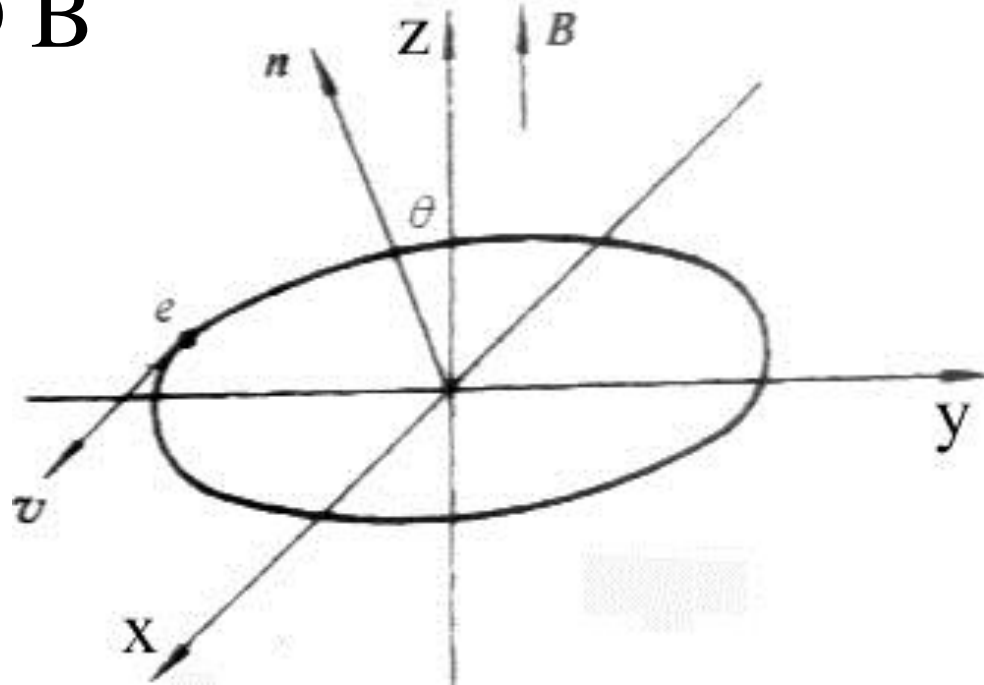
定性分析: $e(\beta \ll 1) \oplus B$

Larmor半径 $r_L = \frac{mcv}{eB}$

Larmor圆频率 $\omega_L = \frac{eB}{mc}$

狭义相对论效应:

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



圆周运动 = 两个互相垂直电偶极子

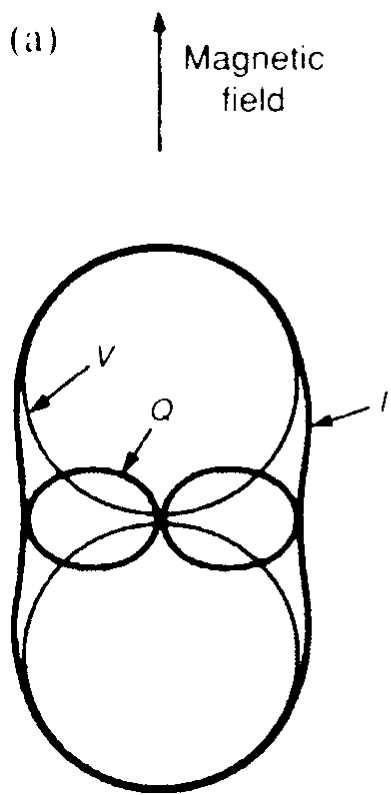
电偶极辐射: 单频、辐射能流 $S \sim \sin^2 \theta n$, 电场矢量位于 d 与 n 平面

辐射场特性:

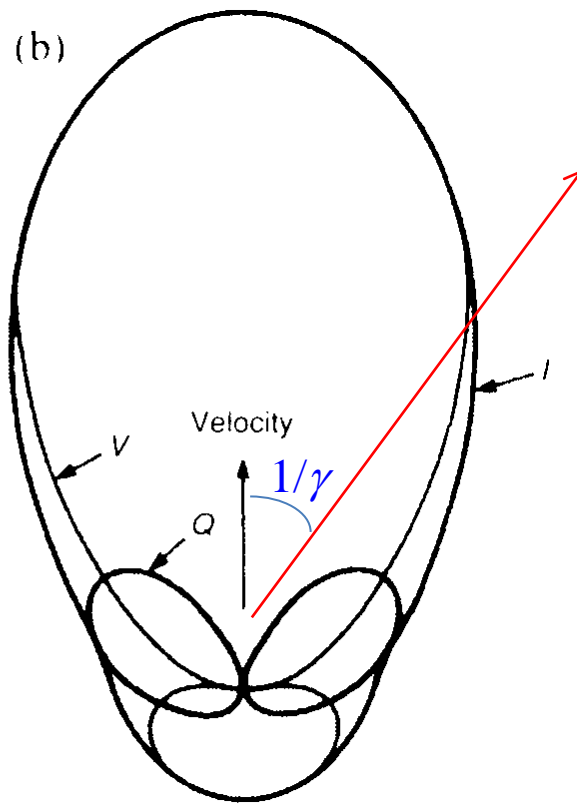
1, 单色, 2, 辐射近乎各向同性, 3, 椭圆偏振

2, 回旋辐射

计算结果示意:



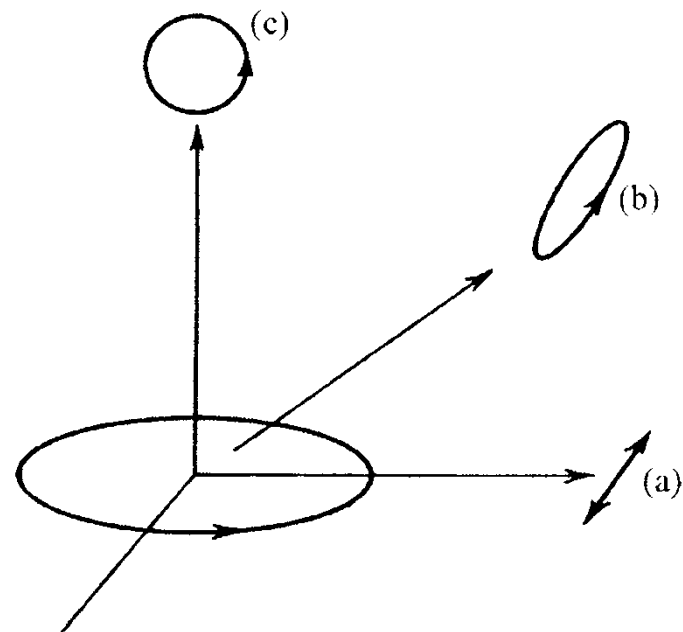
(a): 无平行磁场运动



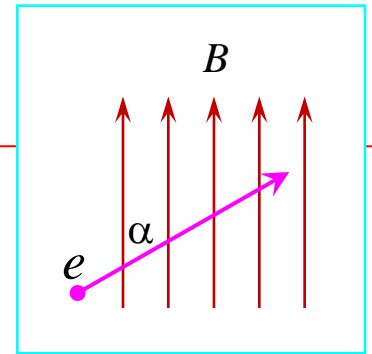
(b): 有平行磁场运动

Stokes参数: I, Q, U, V

偏振特性



2, 回旋辐射



电动力学计算结果： $e(\beta \ll 1) \oplus B$

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：

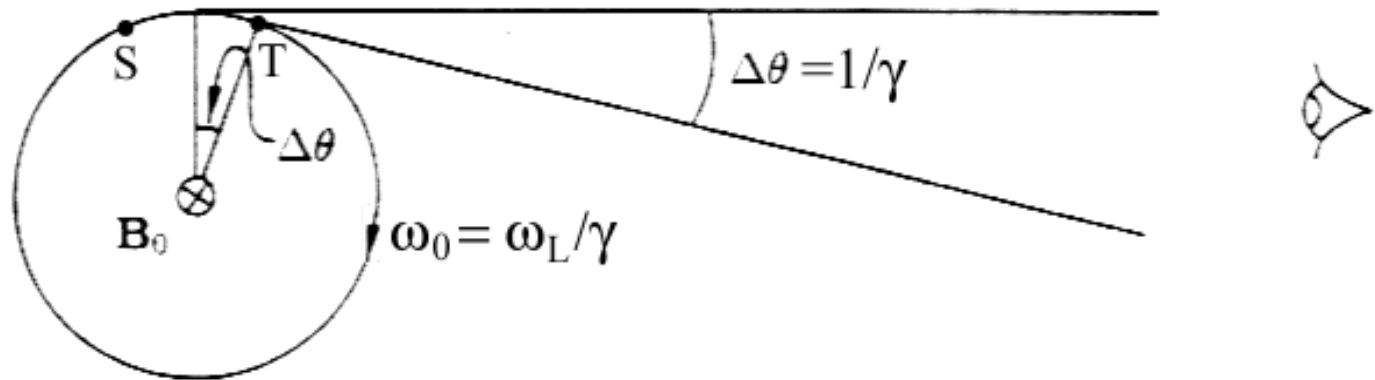
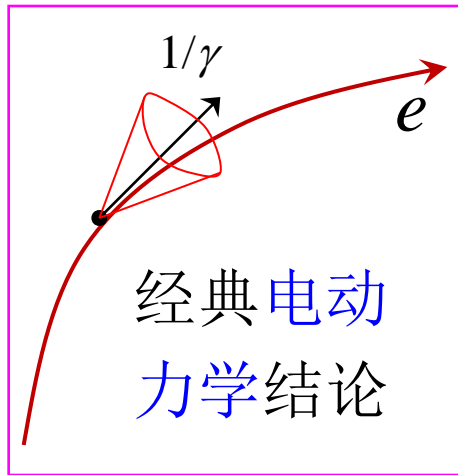
$$P_s \approx \frac{2e^2 \omega_L^2}{c} \frac{(S+1)S^{2S+1}}{(2S+1)!} \beta^{2S}$$
$$\Rightarrow P_{S+1}/P_S \sim \beta^2 \ll 1$$

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

3, 同步辐射

定性分析: $e(\gamma \gg 1) \oplus B$

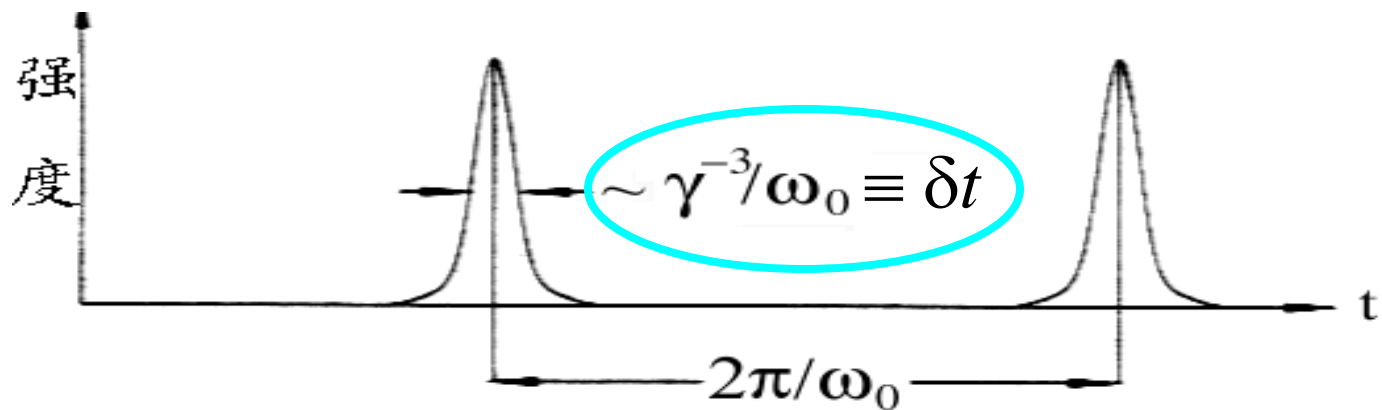
$v \cdot B = 0$ 情形



电磁场强度
辐射谱:

基频 ω_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: $= 1.1 \times 10^{-15} \gamma^2 \beta^2 B^2$ (erg/s)

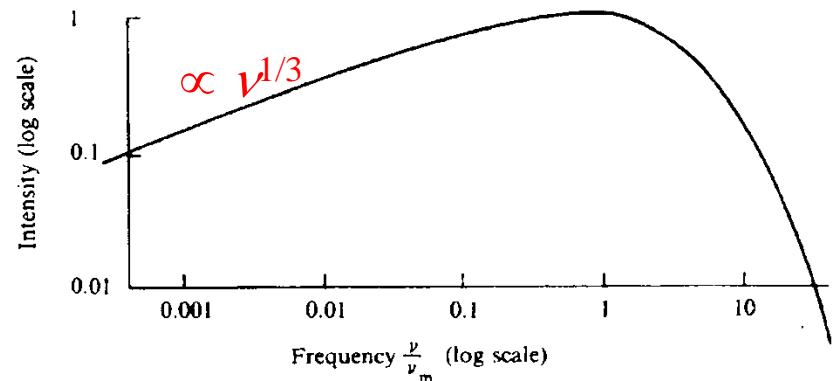
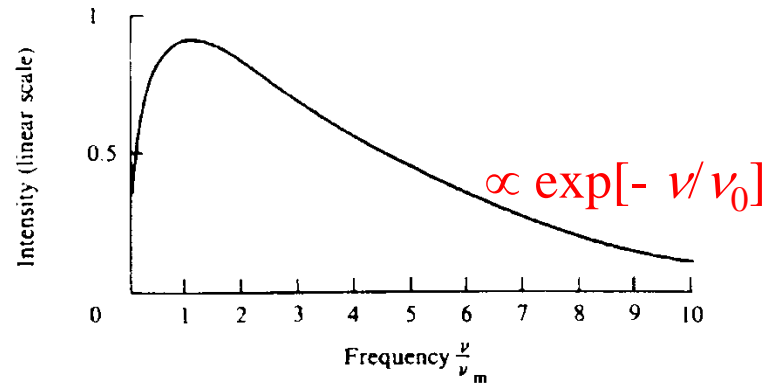
辐射平均寿命: $\tau \sim \gamma mc^2 / P$

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

辐射谱为连续谱:

单能辐射谱近似为宽的、
频率为 ν_m 的单色“谱线”

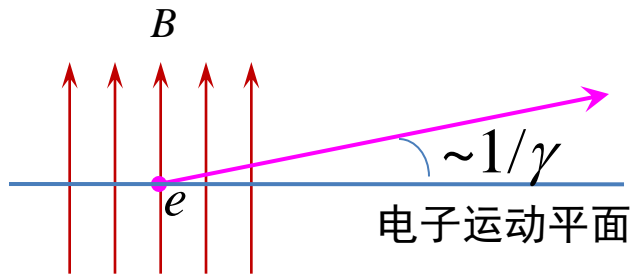
$$\nu_m \sim \gamma^3 \nu_0 \sim 1/\delta t$$



3, 同步辐射

偏振特性: $e(\gamma \gg 1) \oplus B$

$v \cdot B = 0$ 情形

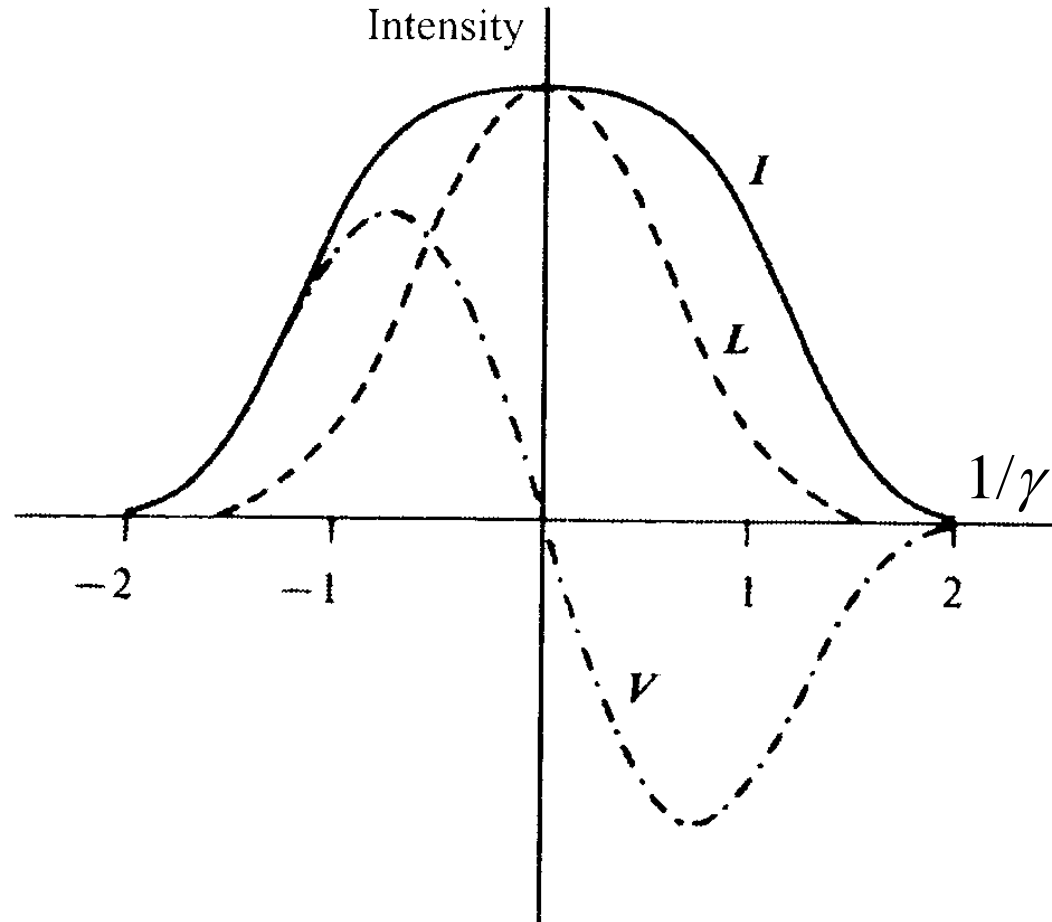


单电子辐射:

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:

园偏振叠加后抵消!



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

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

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

QED \Rightarrow 能量本征值

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

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

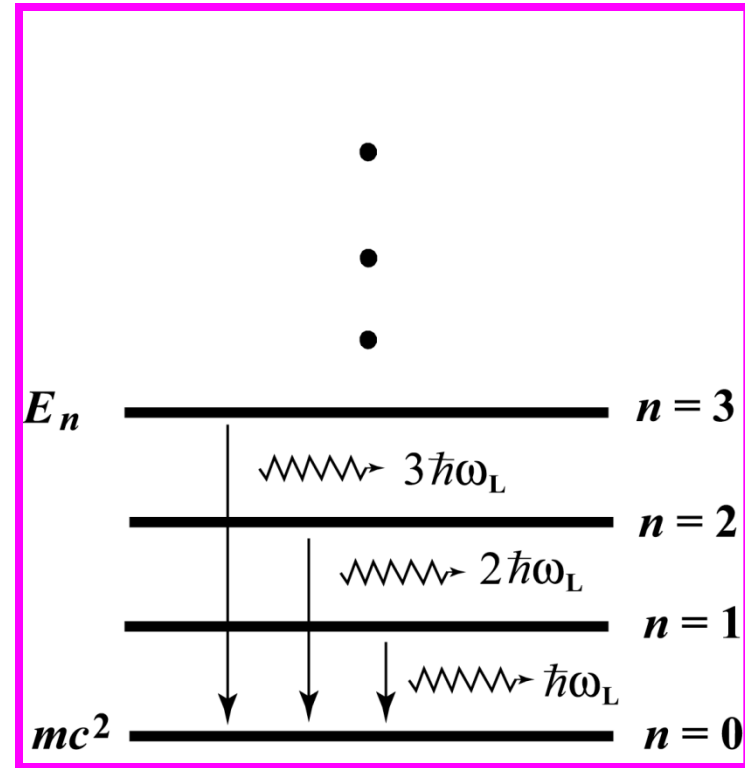
$$\left. \begin{array}{l} \text{能级间隔 } \Delta E = \hbar e B / (mc) \\ \text{定义 } \Rightarrow mc^2 = \hbar e B_q / (mc) \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{B}{B_q} = \frac{\Delta E}{mc^2}$$

对于电子而言，有：

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

而对于质子，有：

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

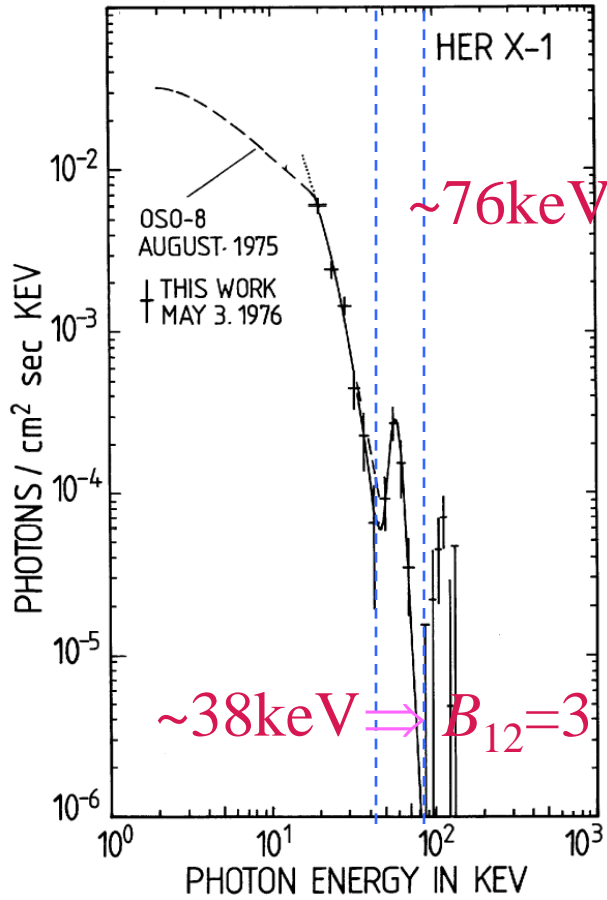


$B \ll B_q$ 情形下的Landau能级

∴ 确定了Landau能级间隔就可测得天体磁场

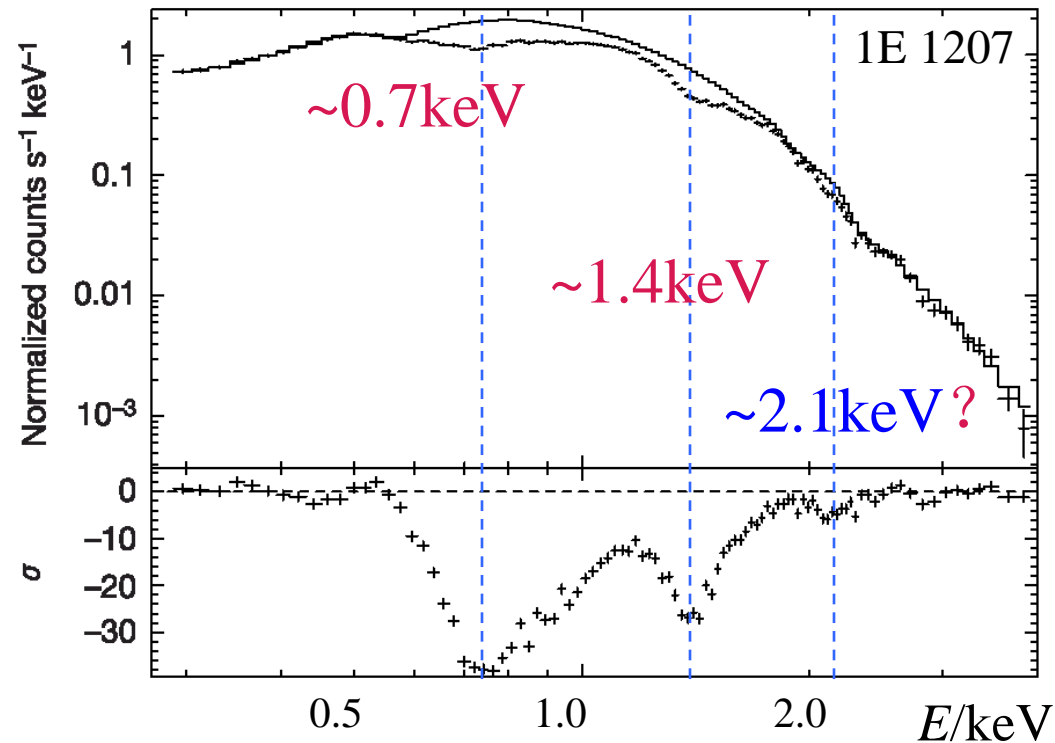
4, Landau能级与曲率辐射

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



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

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



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

Bignami et al., 2003 Nature, 423, 725

4, Landau能级与曲率辐射

• Hydro-cyclotron waves of the surface *e*-sea

(**电子集体行为?** Xu, Bastrukov, Weber et al. 2012, PRD 85, 023008)

The governing equations:

$$\rho \frac{\partial \delta \mathbf{v}}{\partial t} = \frac{1}{c} [\delta \mathbf{j} \times \mathbf{B}] + \eta \nabla^2 \delta \mathbf{v},$$

$$\mathbf{j} = \rho_e \delta \mathbf{v}, \quad \rho = m_e n, \quad \rho_e = e n.$$

To introduce stream function χ

$$\nabla \cdot \delta \mathbf{v} = 0 \quad \longrightarrow \quad \chi(\theta, \phi)$$

Oscillations in plane perpendicular to \mathbf{B}

$$\chi(\theta, \phi) = \psi(\theta) \cos(\phi \pm \omega t)$$

$$\nabla_{\perp}^2 \psi(\theta) \pm \frac{\omega_c}{\omega} \psi(\theta) = 0$$

The Legendre polynomial:

$$\nabla_{\perp}^2 P_{\ell}(\theta) + \ell(\ell + 1)P_{\ell}(\theta) = 0$$

Spectrum of the hydro-oscillations:

$$\omega_{\pm}(\ell) = \pm \frac{\omega_c}{\ell(\ell + 1)}, \quad \omega_c = \frac{eB}{m_e c}, \quad \ell \geq 1.$$



1E1207: ($B = 7 \times 10^{11} \text{G}$)

ℓ	1	2	3	4	5	6
$\omega(\ell)/\text{keV}$	4.2	1.4	0.7	0.4	0.3	0.2

SGR1806: ($B = 1.86 \times 10^{13} \text{G}$)

ℓ	1	2	3	4	5	6	7	8
$\omega(\ell)$	108	36	18	10.8	7.2	5.1	3.8	3.0
ω_{obs}	$17.5 \pm .5$	$11.2 \pm .4$	$7.5 \pm .3$	$5.0 \pm .2$

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

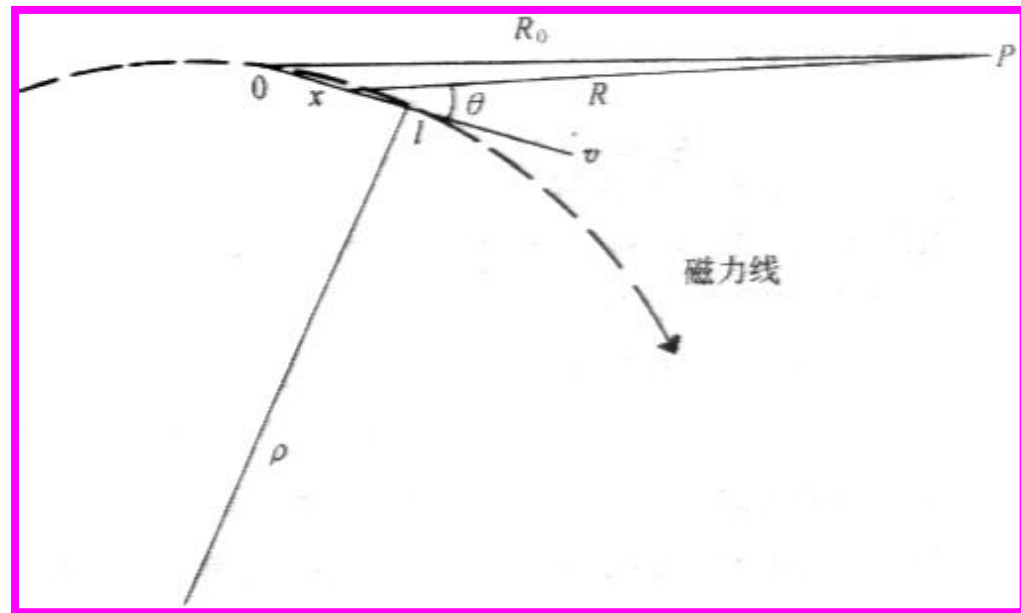
将曲率辐射类比于回旋半径为曲率半径 ρ 的同步辐射

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 (r_0 代以 ρ):

$$\nu_m \approx \frac{3}{2} \gamma^3 \left(\frac{c}{2\pi\rho} \right) \quad \text{对于确定}\rho, \text{曲率辐射谱亦可近似看作“线”谱}$$



5, Compton散射与逆Compton散射

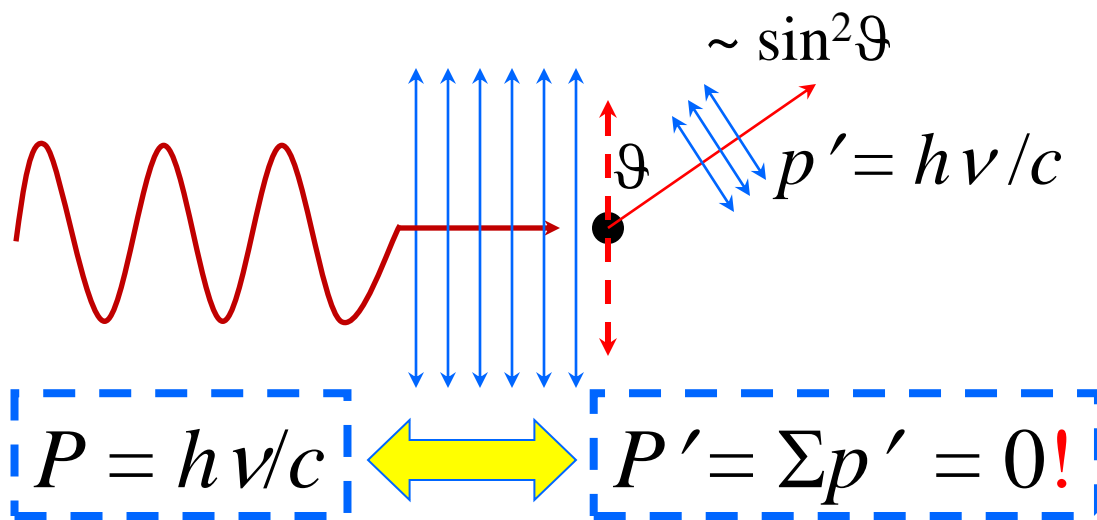
Compton过程: 自由电子与光子间的碰撞过程

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 $h\nu/c$

Eddington光度

5, Compton散射与逆Compton散射

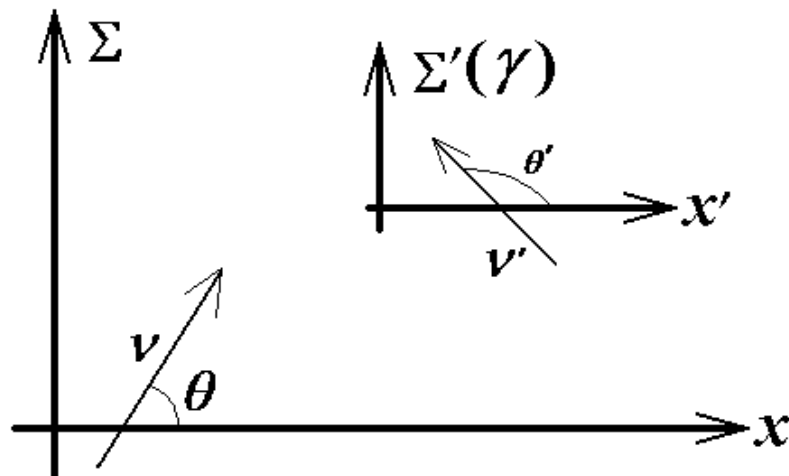
不同参考系中的光子

狭义相对论 \Rightarrow

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

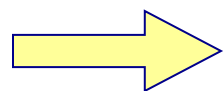
若 $\gamma \gg 1$, 且 $\{\theta \in (0, \pi), \theta \neq \sim 0\}$, 则:

$\nu' \sim \gamma \nu$; $\tan \theta' \rightarrow 0^-$ 。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过程在脉冲星磁层动力学与辐射研究中的重要性:

- RICS在脉冲星gap sparking过程中起关键作用
- 射电辐射轮廓可被低频电磁波被电子ICS理解

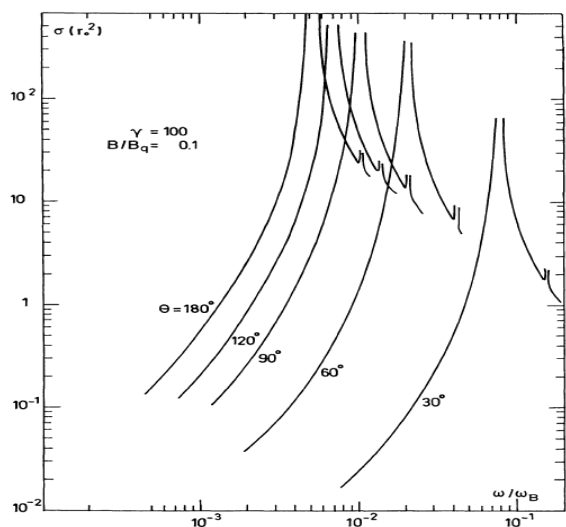


Fig. 1. Total cross sections (unpolarized) in units of r_0^2 vs. frequency ω in units of ω_B , for different photon incoming angles $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$

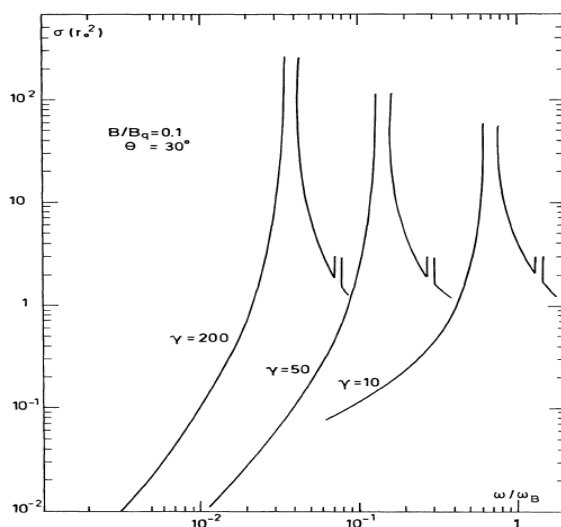
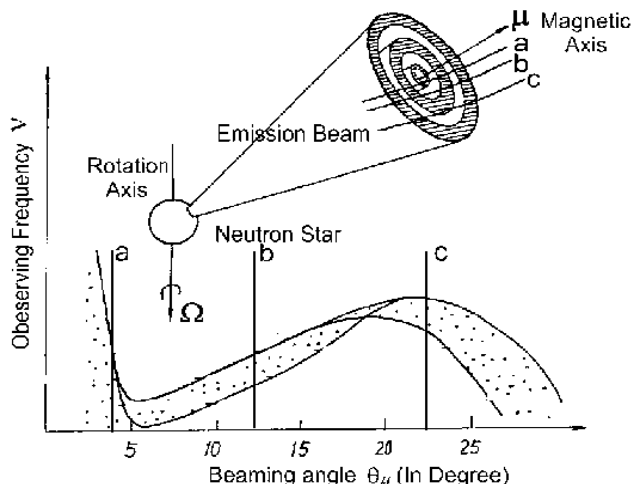


Fig. 2. Same as Fig. 1, but for different electron energy $\gamma = 10, 50, 200$



Xia, Qiao, et al. 1985, A&A, 152, 93

Qiao 1992

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 ν_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, $\alpha = (1-s)/2$;

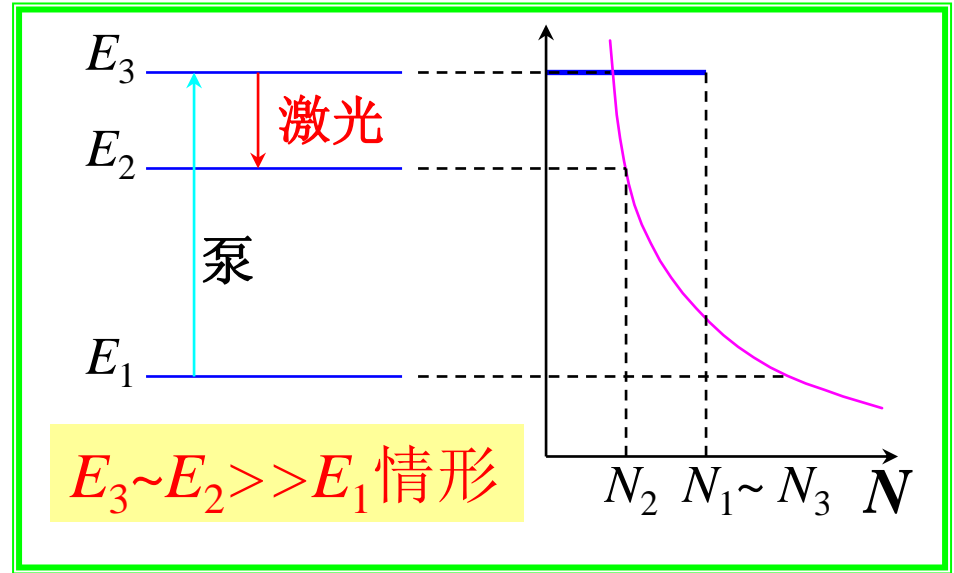
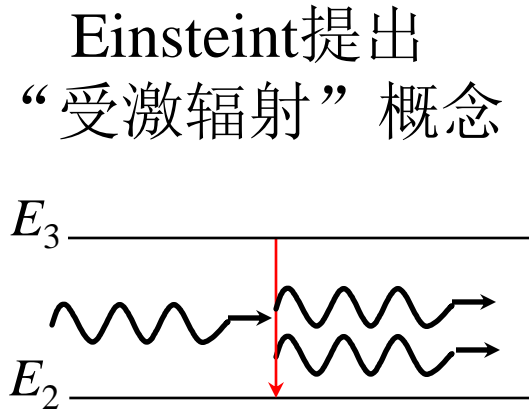
对于曲率辐射, $\alpha = (1-s)/3$ 。

自吸收效应:

当集体电子于某一频率辐射**亮温度**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: 很难产生高亮温度的连续谱



脉冲星射电辐射源于**相干辐射**

非相对论荷
电粒子辐射

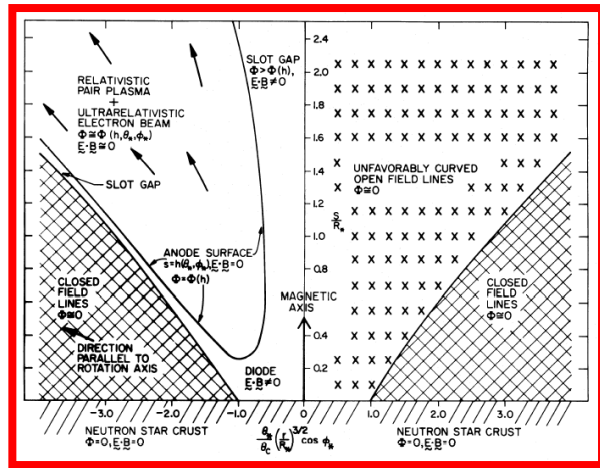
$$\begin{cases} \vec{E} = \frac{q}{cR} [\vec{n} \times \{(\vec{n} - \vec{\beta}) \times \dot{\vec{\beta}}\}]_{\text{ret}} \\ \vec{B} = [\vec{n} \times \vec{E}]_{\text{ret}} \end{cases}$$

功率: $P \sim q^2$

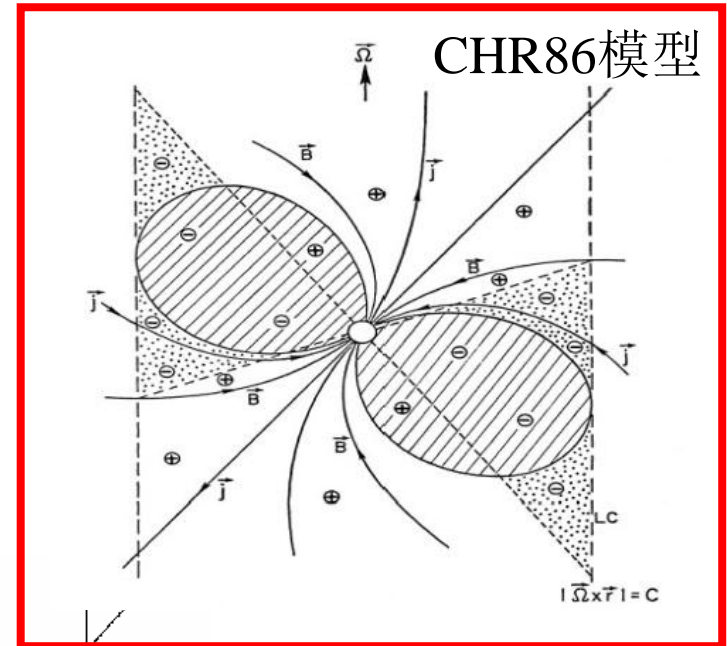
当集体电子分布区域远小于 $\lambda/2$ 时, 电子集体可看作电荷 Ne 的单荷电粒子辐射, 功率 $P \sim N^2$ 。

流动不稳定性可能造就相干。

8, 脉冲星非热辐射区

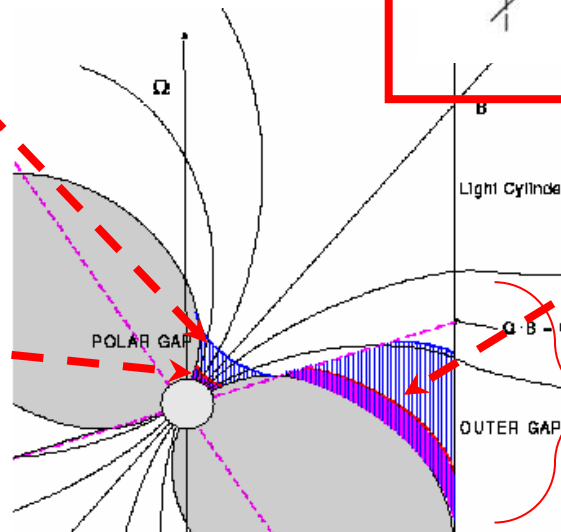
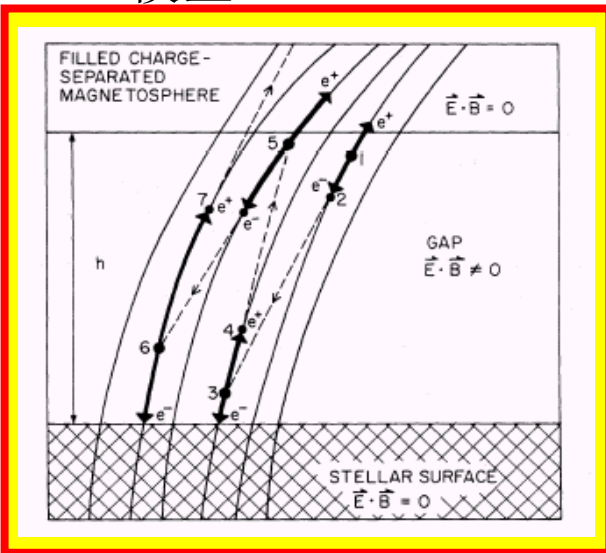


SCLF模型



CHR86模型

RS75模型



Qiao et al.环间隙模型

总结

脉冲星辐射

表面的热辐射（冷却、表面物性）①

单粒子
辐射行为

回旋辐射②

同步辐射③

Landau能级与曲率辐射④

逆Compton散射⑤

磁层中的
非热辐射

多粒子
辐射特征

粒子能谱与自吸收⑥

Maser与相干辐射⑦

脉冲星非热辐射区⑧