

毫秒脉冲星的高能辐射*

方 军, 戴本忠

(云南大学 物理系 云南天体物理中心, 云南 昆明 650091)

摘要: 根据自恰毫秒脉冲星磁层外隙模型讨论毫秒脉冲星的高能辐射机制. 其中 X 射线由 2 个热成分和 1 个幂律成分组成, γ 射线由外隙粒子同步-曲率辐射产生. 在此基础上, 理论计算了 11 颗 X 射线波段及其他 39 颗在射电波段观测到的毫秒脉冲星, 所得理论与观测符合较好, 表明该模型能较好地解释毫秒脉冲星的高能辐射机制.

关键词: 毫秒脉冲星; 高能辐射; X 射线

中图分类号: P 145.6 文献标识码: A 文章编号: 0258-7971(2005)06-0480-05

早在第 1 颗脉冲星发现前 30 多年间, 理论物理学家就对中子星做了大量的理论研究. 第 1 颗脉冲星被发现后不久, 即被证认为是具有强磁场、高速旋转的中子星. 随着探测水平的不断发展, 使得越来越多的脉冲星被观测到, 其中包括上百颗毫秒脉冲星, 使脉冲星的研究取得了一系列进展. 但由于脉冲星物理条件极端, 而且不同脉冲星其辐射机制可能差异很大, 使得在脉冲星辐射机制的研究中还存在许多不确定成分^[1].

脉冲星有着非常短而又极为稳定的周期, 普通脉冲星脉冲周期为“秒”的量级, 而毫秒脉冲星为“毫秒”量级, 在 1.5~10 ms 之间, 第 1 颗观测到的毫秒脉冲星 B1937+21^[2], 其周期为 $P=1.5578$ ms, 至今仍然是旋转最快的中子星. 正常脉冲星的磁场和年龄分别约为 10^8 T 及 10^7 a, 而毫秒脉冲星的磁场和年龄则分别约为 10^4 T 及 10^9 a. 另一个主要的差异在于正常脉冲星和毫秒脉冲星的轨道伴星, 80% 的毫秒脉冲星都观测到了伴星的存在, 而对于正常脉冲星来说, 只有不到 1% 观测到了伴星. EGRET 对 PSR J0218+4232 的观测显示其谱指数为 2.6, 大于普通 γ 射线脉冲星的 1.5~2.0. 如果对 PSR J0437-4715 ($d=0.18$ kpc) 应用普通 γ 射线脉冲星模型, 其 γ 射线完全可以被 EGRET

观测到, 但实际并非如此. 这些特征差异表明毫秒脉冲星与普通脉冲星相比有着不同的性质^[3].

目前脉冲星高能辐射模型主要有内间隙模型 (polar cap model) 及外间隙模型 (outer gap model). 而对毫秒脉冲星也有在相应模型基础上改进的模型. Harding et al (2005) 在 polar cap model 基础上, 认为大多数毫秒脉冲星磁场较弱, 不能产生足够多的 e^\pm 屏蔽加速电场, 这使得毫秒脉冲星极冠上方的电子可被加速至很高的高度, 毫秒脉冲星可以更好地将自己的转动能转化为高能辐射能量^[4]. 本文主要根据毫秒脉冲星磁层外间隙模型^[5] 讨论毫秒脉冲星的高能辐射机制, 该模型认为毫秒脉冲星的软 X 射线 (0.1~2.4 keV) 包含 3 个成分, 即 2 个热成分和 1 个幂律成分. γ 射线产生于外隙中.

1 毫秒脉冲星的高能辐射机制

根据脉冲星磁层外隙模型, 在零电荷荷面 ($\Omega \cdot \mathbf{B} = 0$) 与光速圆柱面间存在外隙. 外隙中 $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \neq 0$, 它可使 e^\pm 加热至相对论性粒子. Zhang & Cheng^[5] 认为, 毫秒脉冲星表面具有强多极场, 其典型半径 r 为脉冲星外壳厚度量级 ($r \approx l \approx 10^5$ cm), 远小于普通模型中的星体偶极磁场半径. 假设星体上方 δr 处局部场与偶极场相等, 则

* 收稿日期: 2005-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10263001); 云南大学校青年基金资助项目(2003Q029C).

作者简介: 方 军(1984-), 男, 云南人, 硕士生, 主要从事毫秒脉冲星方面的研究工作.

通讯作者: 戴本忠, 男, 云南人, 副教授.

$$B_s^0 \left(\frac{l + \delta r}{l} \right)^{-3} = B_d^0 \left(\frac{R + \delta r}{R} \right)^{-3}, \quad (1)$$

外隙回流粒子回流过程中通过曲率辐射不断发出光子^[6]. 由于在 $R \sim R + \delta r$ 处场强为强局部场, 其曲率半径很小, 外隙回流粒子在将通过曲率辐射损失其大部分剩余能量. 由于强磁场的存在, 将产生 e^\pm 对, 能量存于一有效面积为 A_{eff}^1 的星体表面, 并产生热软 X 射线. 其光度、面积、有效温度分别为

$$L_X^{\text{th}1} \approx 1.4 \times 10^{25} f_m \left(\frac{B_d^0}{10^4 \text{T}} \right) P_{-3}^{-\frac{5}{3}} \text{ W}; \quad (2)$$

$$A_{\text{eff}}^1 \approx \pi (\delta r)^2; \quad (3)$$

$$T_m^1 = \left(\frac{L_X^1}{\sigma A_{\text{eff}}^1} \right)^{\frac{1}{4}} \approx 3.0 \times 10^6 \left(\frac{B_d^0}{10^4 \text{T}} \right)^{\frac{1}{4}} P_{-3}^{-\frac{5}{12}} \delta r^{-\frac{1}{2}} \text{ K}. \quad (4)$$

f_m 为外隙相对尺度, $P_{-3} = P/(10^{-3} \text{ s})$, σ 为玻耳兹曼常量.

尽管回流粒子不断损失能量, 但到达星体表面附近时仍剩有一定能量, 并将能量存于一面积为 A_{eff}^2 的区域中, 产生较硬 X 射线. 其光度、面积、有效温度分别为

$$L_X^{\text{th}2} \approx m_e c^2 \left(\frac{\gamma(R)}{(1 + (\gamma(R + \delta r)/\gamma_s(R)))^3} \right)^{\frac{1}{3}}; \quad (5)$$

$$A_{\text{eff}}^2 \approx \frac{B_d^0}{B_s^0} f_m \pi r_p^2; \quad (6)$$

$$T_m^2 \approx 7.8 \times 10^6 \left(\frac{B_s^0}{10^7 \text{T}} \right)^{\frac{1}{4}} P_{-3}^{-\frac{1}{6}} \left(1 + \left(\frac{\gamma(R + \delta r)}{\gamma_s(R)} \right)^3 \right)^{-\frac{1}{12}} \text{ K}. \quad (7)$$

$\gamma_s(R) = (m_e c^2 l^2 / (2e^2 \delta r))^{1/3}$, $l_5 = l/(10^5 \text{ cm})$, $r_p = (R^3/R_L)^{1/2}$, R_L 为光速圆柱面半径.

外隙中带电粒子将在很短时间内被加速到相对论性能量, 并达到稳态, 由此可估计出外隙相对尺度

$$f_m \approx 7.0 \times 10^{-2} P_{-3}^{\frac{26}{21}} \left(\frac{B_d^0}{10^4 \text{T}} \right)^{-\frac{4}{7}} \delta r_s^{\frac{2}{7}}. \quad (8)$$

回流粒子回流过程中产生的曲率光子与星体表面上约 δr_s 处在强局部场下产生次级 e^\pm 对, 这些 e^\pm 对通过同步辐射产生幂律 X 射线, 有

$$\frac{\delta r_s}{R} \approx \frac{l}{R} \left[\left(\frac{15 B_s^0}{B_q} \cdot \frac{E_\gamma}{2 m_e c^2} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right], \quad (9)$$

$B_q = 4.4 \times 10^9 \text{ T}$, 可见, 如果

$$(15 B_s^0 / B_q) \cdot (E_\gamma / (2 m_e c^2)) > 1,$$

则星体表面可产生次级 e^\pm 对.

幂律 X 射线光度为

$$L_X^{\text{non}} \approx 2 \times 10^{-4} f_m^{-\frac{1}{4}} P_{-3}^{-0.25}.$$

$$\left(\frac{B_d^0}{10^4 \text{T}} \right)^{-0.75} \left(\frac{r_s}{R} \right)^2 \left(\frac{r_{\text{in}}}{R_L} \right)^{-\frac{19}{8}} L_{\text{sd}}, \quad (10)$$

$L_{\text{sd}} = 3.8 \times 10^{28} (P/\text{ms})^{-4} (B/10^4 \text{ T})^2 \text{ W}$, 为自旋能损率.

外隙粒子的同步-曲率辐射产生 γ 射线, 其光度由下式给出

$$L_\gamma = 3.8 \times 10^{28} f_m^3 P_{-3}^{-4} \left(\frac{B_d^0}{10^4 \text{T}} \right)^2 \text{ W}. \quad (11)$$

2 理论模型与观测比较

在所有 1 000 多颗脉冲星中, 现观测到的毫秒脉冲星约有 120 颗^[7], 其中 11 颗已在 X 射线波段观测到脉冲现象. 我们利用上述模型对已在 X 射线波段观测到的毫秒脉冲星进行理论计算, 计算结果见表 1.

表 1 中, 第 1 列为毫秒脉冲星的名字, 第 2 列为观测到的脉冲周期, 第 3 列为脉冲星磁场, 第 4 列为观测到的 X 射线光度, 第 5 列为自转能损, 第 6 列为外隙相对尺度, 第 7、第 8 列分别为软 X 射线及硬 X 射线的有效温度, 第 9 列为模型计算的 X 射线辐射光度, 最后 1 列为模型计算的 γ 射线辐射光度.

表 1 中给出的 11 颗 X 射线的理论计算结果的模型参数分别为: 对 J0751+ 1807, B1821- 24, J0218+ 4232, 用参数 $l_5 = 1$, $B_s/B_d = 100$, $r_{\text{in}}/R_L = 0.5$. 对 B1957+ 20, B1927+ 21, 用参数 $l_5 = 1$, $B_s/B_d = 100$, $r_{\text{in}}/R_L = 0.8$. 其他 6 颗的参数为 $l_5 = 0.1$, $B_s/B_d = 100$, $r_{\text{in}}/R_L = 0.95$. 其中 X 射线的观测光度 L_X^{obs} 为 0.1 ~ 2.4 keV 波段内的观测值. 图 1 中我们分别给出了 11 颗毫秒脉冲星的自转能损与 X 射线辐射光度以及 γ 射线辐射光度的相关分析, 线性回归方程分别为

$$\log L_X = 1.92 \pm 1.02 + (0.82 \pm 0.04) \log L_{\text{sd}}, \quad (12)$$

表 1 对 11 颗 X 射毫秒脉冲星的理论计算结果

Tab. 1 The results of theoretical model for 11 MSPs observed in X-ray band

毫秒脉冲星	$\frac{P}{ms}$	$\log\left(\frac{B}{T}\right)$	$\log\left(\frac{L_X^{obs}}{W}\right)$	$\log\left(\frac{L_{sd}}{W}\right)$	f_m	$\frac{T_m^1}{10^6 K}$	$\frac{T_m^2}{10^6 K}$	$\log\left(\frac{L_X^{theo}}{W}\right)$	$\log\left(\frac{L_Y^{theo}}{W}\right)$
B1957+ 20	1.60	4.14	24.93	28.04	0.180	0.67	2.89	24.96	25.81
J0751+ 1807	3.47	4.23	24.60	26.88	0.417	0.63	2.51	24.36	25.76
J1012+ 5307	5.25	4.45	23.20	26.60	0.229	2.18	2.23	23.83	24.68
J1024- 0719	5.16	4.49	22.30	26.71	0.213	2.21	2.29	23.85	24.69
J1744- 1134	4.07	4.27	22.48	26.68	0.212	2.14	2.14	23.83	24.66
J0437- 4715	5.75	4.54	23.98	26.62	0.228	2.21	2.30	23.84	24.69
B1821- 24	3.05	5.35	26.20	29.34	0.081	0.84	4.95	26.15	26.07
J0218+ 4232	2.32	4.63	25.50	28.38	0.150	0.72	3.50	25.49	25.90
J2124- 3358	4.93	4.36	23.18	26.53	0.238	2.15	2.15	23.80	24.66
J0030+ 0451	4.87	4.35	23.18	26.53	0.361	2.15	2.15	23.80	24.66
B1937+ 21	1.56	4.61	25.76	29.03	0.094	0.75	3.82	25.73	25.94

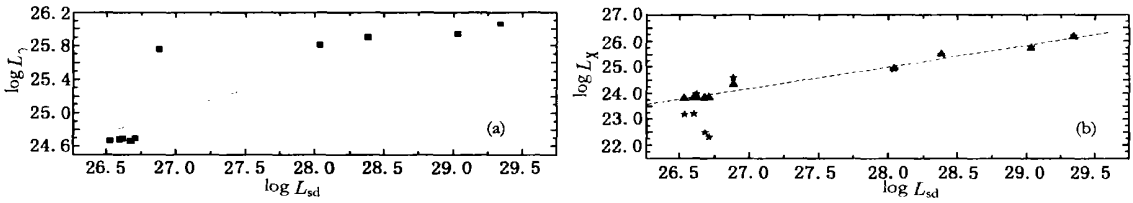


图 1 对 11 颗 X 射线毫秒脉冲星的理论分析结果, (a) 为自转能损与 γ 射线辐射光度的分布, (b) 为自转能损与 X 射线辐射光度的分布, 三角形为理论计算结果, 星形为观测数据

Fig. 1 The theoretical results for 11 MSPs observed in X band. (a) panel is for the correlation of spin down power and γ ray luminosity, (b) panel is for the correlation of spin down power and X ray luminosity

关联系数为 $R = 0.99(p < 0.0001)$;

$$\log L_Y = 10.91 \pm 2.53 + (0.52 \pm 0.09) \log L_{sd}, \quad (13)$$

关联系数为 $R = 0.86(p = 1.29 \times 10^{-4})$.

利用我们的模型对 39 颗在射电波段观测到的毫秒脉冲星做理论计算, 理论计算的模型参数为 $l_s = 1, B/B_d = 100, r_{in}/R_L = 0.5$. 结果见表 2, 其中第 1 列为毫秒脉冲星的名字, 第 2 列为观测到的脉冲周期, 第 3 列为周期导数, 第 4 列为磁场强度, 第 5 列为自转能损 L_{sd} , 第 6, 7 列分别为模型计算的 X 射线辐射光度以及 γ 射线辐射光度.

39 颗射电波段观测到的毫秒脉冲星计算结果的相关分析见图 2, 相关分析结果为

$$\log L_X = 11.16 \pm 0.74 + (0.49 \pm 0.03) \log L_{sd}, \quad (14)$$

相关系数为 $R = 0.95(p < 0.0001)$;

$$\log L_Y = 23.26 \pm 0.32 + (0.09 \pm 0.03) \log L_{sd}, \quad (15)$$

相关系数为 $R = 0.79(p < 0.0001)$.

从以上分析可以看出(表 1), 毫秒脉冲星基本上可分为 2 类: 第 1 类, $L_X \approx 10^{25} W$, 理论与观测值符合得很好. 对第 2 类毫秒脉冲星, $L_X \approx 10^{23} W$, 其光度较小, 理论结果与观测比较有一定偏大. 对 11 颗 X 射线脉冲星, 我们得到自旋能损率与 X 射线光度、 γ 射线光度之间的关系分别为: $L_X^{obs} \propto L_{sd}^{1.12 \pm 0.18}$, $L_X^{theo} \propto L_{sd}^{0.82 \pm 0.04}$, $L_Y \propto L_{sd}^{0.53 \pm 0.03}$. 而对于 39 颗射电脉冲星, 自旋能损率与 X 射线光度、 γ 射线光度之间的关系分别为: $L_X^{theo} \propto L_{sd}^{0.49 \pm 0.03}$, $L_Y^{theo} \propto L_{sd}^{0.09 \pm 0.01}$. 理论结果与观测都给出 X 射线辐射光度 L_X 与自转能损 L_{sd} 有相同的系, 即: $L_X \propto L_{sd}^{\delta}$. 由此可得出, 只要采用适当的模型参数加以限制, 可使理论与观测一致.

表 2 对 39 颗射电波段观测到的毫秒脉冲星的理论计算结果

Table. 2 The results of theoretical model for 39 MSPs observed in radio band

毫秒脉冲星	$\frac{P}{\text{ms}}$	$\frac{\dot{P}}{10^{-20} \text{ss}^{-1}}$	$\log\left(\frac{B}{\text{T}}\right)$	$\log\left(\frac{L_{\text{sd}}}{\text{W}}\right)$	$\log\left(\frac{L_{\text{X}}^{\text{theo}}}{\text{W}}\right)$	$\log\left(\frac{L_{\text{Y}}^{\text{theo}}}{\text{W}}\right)$
J1959+ 2048	1.61	1.69	4.22	28.20	25.56	25.83
J0034- 0534	1.88	0.51	4.28	28.04	24.92	25.75
J0024- 7204O	2.64	3.04	4.46	27.81	24.99	25.84
J1909- 3744	2.95	1.47	4.32	27.35	24.64	25.79
J2229+ 2643	2.98	0.19	3.88	26.45	24.19	25.66
J0613- 0200	3.06	0.96	4.24	27.12	24.50	25.76
J1640+ 2224	3.16	0.29	3.99	26.55	24.23	25.68
J2317+ 1439	3.45	0.24	3.96	26.36	24.15	25.66
J1721- 2457	3.50	0.59	4.16	26.73	24.29	25.72
J0024- 7205E	3.54	9.85	4.78	27.94	24.95	25.89
J1600- 3053	3.60	0.94	4.27	27.89	24.36	25.75
J1704- 5340	3.65	3.93	4.58	27.50	24.66	25.83
J2129- 5721	3.73	2.07	4.45	27.19	24.49	25.79
J2019+ 2425	3.73	2.07	4.45	27.19	24.49	25.79
J2159+ 1210F	4.03	3.20	4.56	27.28	24.52	25.82
J0024- 7204Q	4.03	3.41	4.57	27.31	24.54	25.82
J0024- 7203U	4.34	9.52	4.81	27.66	24.71	25.88
J2033+ 1734	4.51	1.30	4.39	26.74	24.28	25.75
J1713+ 0747	4.57	0.82	4.29	26.52	24.21	25.72
J1643- 1224	4.62	1.85	4.47	26.86	24.33	25.77
J2129- 1210E	4.65	17.8	4.96	27.84	24.80	25.91
J2322+ 2057	4.81	0.97	4.34	26.53	24.21	25.73
J1732- 5049	5.31	1.38	4.44	26.55	24.23	25.75
J1857+ 0943	5.36	1.78	4.49	26.65	24.26	25.76
J1823- 3021A	5.44	338.5	5.64	28.91	25.50	26.09
J0711- 6830	5.49	1.49	4.50	26.62	24.25	25.76
J1518+ 0205A	5.55	6.00	4.77	27.13	24.43	25.83
J1629- 6902	6.00	1.00	4.39	26.26	24.15	25.72
J1955+ 2908	6.13	2.95	4.63	26.70	24.28	25.78
J1300+ 1240	6.22	11.4	4.93	26.27	24.47	25.87
J2129+ 1209H	6.74	2.40	4.61	26.48	24.22	25.77
J1045- 4509	7.47	1.77	4.57	26.22	24.17	25.74
J0024- 7204T	7.59	29.4	5.18	26.42	24.53	25.91
J1918- 0642	7.65	2.40	4.64	26.32	24.20	25.76
J1455- 3330	7.99	2.42	4.65	26.27	24.19	25.76
J1730- 2340	8.12	2.02	4.61	26.17	24.17	25.74
J1757- 5322	8.87	2.62	4.69	26.17	24.18	25.75
J1804- 2717	9.34	4.20	4.80	26.30	24.22	25.78
J1435- 6100	9.35	2.45	4.69	26.07	24.16	25.75

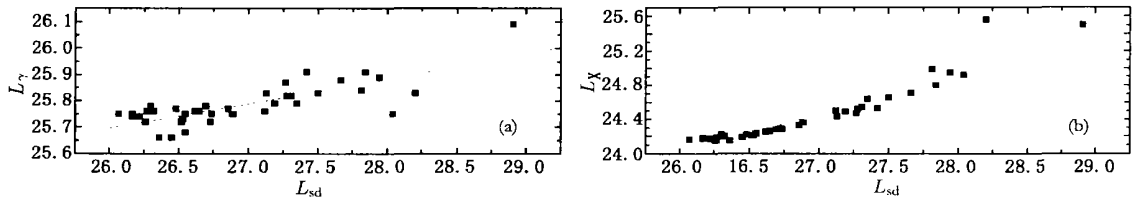


图 2 对 39 颗射电毫秒脉冲星的理论分析结果, (a) 为自转能损与 γ 射线辐射光度的分布, (b) 为自转能损与 X 射线辐射光度的分布

Fig. 2 The theoretical results for 39 MSPs observed in radio band. (a) panel is for the relation of spin down power and γ ray luminosity, (b) panel is for the relation of spin down power and X ray luminosity

本文模型给出了毫秒脉冲星的软 X 射线由 2 个温度约为 10^6 K ($T^1 < T^2$) 的热成分和 1 个幂律成分组成, 这与观测一致. 如对于 PSR J0437-4715, $\log L_X = 23.98$, Becker & Trümper(1999)^[8] 给出其可由温度为 1.2×10^6 K, $3.0 \pm 0.5 \times 10^6$ K 的 2 个热成分拟合. 若选用参数 $l_5 = 0.2$, $B_s/B_d = 400$, $r_{in}/R_L = 0.9$, 则有 $T^1 = 1.18 \times 10^6$ K, $T^2 = 3.41 \times 10^6$ K, 此时幂律成分极小 $L_X^1 \approx 20 L_X^{\text{non}}$; 对 PSR J0218-4232, 由观测可知其 X 射线主要为幂律成分, 由本文计算时用的参数, 有 $L_X^{\text{non}} \approx 3 L_X^1$. 可见, 本文模型可对毫秒脉冲星 X 射线辐射给予很好的解释.

3 总结与讨论

本文在理论模型基础上讨论了毫秒脉冲星的 X 射线以及 γ 射线的高能辐射. 脉冲星外隙中约有一半粒子回流, 回流粒子回流时发出曲率光子, 这些光子在星体表面附近产生次级正负电子对 e^\pm , 非热 X 射线由这些 e^\pm 同步辐射产生. 原回流粒子遇到强表面场时发出曲率光子加热极冠, 产生热软 X 射线, 较硬 X 射线由原回流粒子将剩余能量存于极冠一小区域产生. 高能 γ 射线则由外隙粒子同步-曲率辐射产生. 我们的理论计算可对现有毫秒脉冲星观测结果给予很好的解释, 对毫秒脉冲星进一步更为精确的研究还有待于更多新的观测数据.

参考文献

- [1] 李宗伟, 肖兴华. 天体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [2] BACKER D C, KULKARNI S R, HEILES C, et al. A millisecond pulsar[J]. Nature, 1982, 300: 615-618.
- [3] CHENG K S, Ronald E Taam. On the origin of X ray emission from millisecond pulsars in 47 tudanae[J]. Ap J, 2003, 598: 1 207-1 216.
- [4] Alick K Harding, Vladimir V Usov, Alex G Muslimov. High energy emission from millisecond pulsars[J]. Ap J, 2005, 622: 531-543.
- [5] ZHANG L, CHENG K S. X-ray and gamma ray emission from millisecond pulsars[J]. A & A, 2003, 398: 639-646.
- [6] 尤峻汉. 天体物理中的辐射机制[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [7] <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/> [OL].
- [8] BECKER W, TRÜMPER J. The X-ray emission properties of millisecond pulsars[J]. A & A, 1999, 341: 803-817.
- [9] POSSENTI A, CERUTTI R, COLPI M, et al. Re-examining the X-ray versus spin down luminosity correlation of rotation powered pulsars[J]. A & A, 2002, 387: 993.
- [10] ZHANG L, CHENG K S. Ap J, 1997, 488: 370.

The expected high energy radiation from anomalous X-ray pulsars

WANG Jiar guo, JIANG Ze jun

(Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: Based on the new version of outer gap model, the expected high-energy emission from anomalous X-ray pulsars (AXPs) has been studied. In this model, the magnetic geometric effects have been taken into account, and the typical fractional size of outer gap is represented by the outer gap size at an average distance $\langle r \rangle$, which is the function of the magnetic inclination angle (α). Then the fractional size of outer gap can be expressed as $f(P, B, \langle r \rangle(\alpha))$, which is the function of the period (P), magnetic field (B) and α . The X-ray luminosity and energy flux of AXPs have been calculated, then to compare the results with previous calculations and analyze the differences. The expected high energy radiation for some typical AXPs (such as 4U 0142+615 (AXP 0142+615), 1E 1841-045, PSR J1809-1943) have been studied.

Key words: anomalous X-ray pulsars; outer gap model; high energy radiation

* * * * *

(上接第 484 页)

The high-energy emission from millisecond pulsars

FANG Jun, DAI Bei zhong

(Department of Physics, Yunnan University, Yunnan Astrophysics Center, Kunming 650091, China)

Abstract: The significant progresses on both the theoretical and observational researches on millisecond pulsars (MSPs) have been obtained in recent years. The high energy emission of MSPs is discussed. The backflow of charged particles from the outer gap produce the X-rays, which consist of two thermal components and one power law component. The gamma rays are produced in the outer gap through synchro-curvature radiation. Furthermore, the luminosities of 11 MSPs which have been observed in the X-ray band and 39 MSPs which have been observed only in the radio band temporarily are calculated. The theoretical results are good consistent with the observations.

Key words: millisecond pulsars; high energy emission; X-ray