具有磁荷和磁矩的中子星温度分布规律的研究

周 三 庆

(湖南师范大学物理系,长沙 410081)

关键词 磁矩、中子星、温度

具有磁荷和磁矩的中子星的静态外部度规的时间分量为[1]

$$g_{00}=1-2R_g/r+\lambda q_m^2/r^2+\lambda\alpha^2p^2\cos^2\theta/r^4, \tag{1}$$

式中 $\alpha=(1-\lambda q_m^2R_g^{-2})^{\frac{1}{2}}\{1-R_g^{-1}[1-(1-\lambda q_m^2R_g^{-2})^{\frac{1}{2}}]\}^{-1}$, $R_g=\frac{GM}{c^2}$, $\lambda=\frac{G}{c^4}$, q_m 为磁荷,p 为磁矩,G 为万有引力常数,M 为中子星质量,r 为中子星半径,c 为光速.

由上述度规,经过复坐标变换,可得到具有磁荷和磁矩的旋转中子星在 Boyer Lindquist 坐标系中的外部度规,其时间分量为

$$g_{00}=1-\frac{2R_gr}{\rho^2}+\frac{\lambda q_m^2}{\rho^2}+\frac{\lambda\alpha^2p^2\cos^2\theta}{\rho^4}, \tag{2}$$

式中 $\rho^2=r^2+a^2\cos^2\theta$, $a=\frac{L}{Mc}$, L 为中子星的角动量. 在(1)、(2)式中, $\theta=\theta_p=0,\pi$, 分别对应中子星北极和南极, $\theta=\theta_q=\frac{\pi}{2}$ 对应中子星赤道. 引入天体特征参数 χ,并令 $\chi^2=\frac{q_m^2}{GM^2}$[1],将(1)、(2)式改写为

$$g_{00}=\left(1-\frac{R_g}{r}\right)^2+\frac{R_g^2}{r^2}(\chi^2-1)+\frac{\lambda\alpha^2p^2\cos^2\theta}{r^4}, \tag{3}$$

$$g_{00}=1-\frac{2R_gr}{\rho^2}+\frac{R_g^2}{\rho^2}\chi^2+\frac{\lambda\alpha^2p^2\cos^2\theta}{\rho^4}. \tag{4}$$

则

$$\alpha=(\pm1\mp\chi^2)^{\frac{1}{2}}\{1-R_gr^{-1}[1-(\pm1\mp\chi^2)^{\frac{1}{2}}]\}^{-1}. \tag{5}$$

在静态引力场存在的情况下,对于宏观物体,忽略重力场对熵和粒子数的影响,则有[2]

$$T_0=T\sqrt{g_{00}}, \tag{6}$$

即 $T\sqrt{g_{00}}$ 在整个天体内应保持恒定,式中 T 为天体的温度. 本文将运用上述两种度规及(6)式讨论两种中子星在取 χ 的几种特殊值时的温度分布规律及产生的物理原因.

一、具有磁荷和磁矩的静态中子星的温度分布

1. $\chi=1$. 由(5)式知, $\alpha=0$ (在 $r>R_g$ 处),则

$$g_{00}=(1-R_g/r)^2, \tag{7}$$

上述度规与不带电的、无转动球体的外部度规 (VGM 度规)[3]正好相同.中子星的温度分布为

本文 1990 年 11 月 26 日收到.

$$T = T_0(1 - R_g/r)^{-1}, \tag{8}$$

可知中子星表面不出现赤道与两极温度差．当 $r = R_g$ 时，$g_{00} = 0$，天体表面仍为黑洞视界面与无限红移面．这种黑洞，除具有质量外，别无其它物理量．该黑洞的温度为

$$T_B = \frac{\hbar c^3}{\kappa GM}, \tag{9}$$

式中 $\hbar$ 为 Planck 常数，κ 为 Boltzman 常数．取中子星的绝对临界质量 $M = 3.2M_\odot = 6.37 \times 10^{33}$kg，$\hbar = 1.055 \times 10^{-34}\mathrm{kg}^2 \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-1}$，$\kappa = 1.381 \times 10^{-23}\mathrm{J} \cdot \mathrm{K}^{-1}$，$c = 3.00 \times 10^8\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$，$G = 6.67 \times 10^{-11}\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{kg}^{-1} \cdot \mathrm{s}^{-1}$，代入(9)式计算可得

$$T_B = 4.85 \times 10^{-7}\mathrm{K}, \tag{10}$$

此温度与 Kerr-Newman 黑洞温度同数量级[2]．当 $\hbar \to 0$ 时，$T_B \to 0$，可见此温度是一种量子效应温度．由超新星爆发形成的中子星，在其形成早期，中心温度达 10^{11}—10^{12}K[4]，是一种热中子星，可见具有强磁荷($\chi = 1$)和强磁矩的大质量中子星，在塌缩过程中，只有丧失全部磁荷和磁矩并抛掉绝大部分能量成为冷中子星，才有可能塌缩成为黑洞．

2. $\chi > 1$．此时恒有 $g_{00} > 0$，天体不存在视界和无限红移面，不能形成黑洞，中子星温度分布为

$$T = T_0\left[1 - \frac{2R_g}{r} + \frac{R_g^2}{r^2}\chi^2 + \frac{\lambda\alpha^2 p^2\cos^2\theta}{r^4}\right]^{-\frac{1}{2}}, \tag{11}$$

可知中子星表面存在赤道与两极温度差．赤道温度最高．两极温度最低．取 $\chi = 2$，$p = 10^{26}$T[1]，$R = 10^4$m，及 G、M、c 等数据代入计算，可求得赤道与两极温度之比为

$$\frac{T(R,\theta_e)}{T(R,\theta_p)} = \left[1 + \lambda\alpha^2 p^2/R^4\left(1 - \frac{2R_g}{R} + \frac{R_g^2}{R^2}\chi^2\right)\right]^{\frac{1}{2}} = 1.000459. \tag{12}$$

一般中子星表面温度为 10^7K 量级，若取两极温度为 10^7K，则赤道比两极温度高 4590K（若取 $\chi = 10$，只高出 425K）．

3. $\chi \ll 1$．此时 $\alpha \approx 1$，考虑 RC 效应，χ 不是极其微小，则中子星不能形成黑洞．中子星的温度分布为：

$$T = T_0\left[1 - \frac{2R_g}{r} + \frac{\lambda p^2\cos^2\theta}{r^4}\right]^{-\frac{1}{2}}. \tag{13}$$

可知中子星表面存在赤道与两极温度差．按上述同样数据计算可求得赤道与两极温度之比为

$$\frac{T(R,\theta_e)}{T(R,\theta_p)} = \left[1 + \lambda p^2/R^4\left(1 - \frac{2R_g}{R}\right)\right]^{\frac{1}{2}} = 1.00467. \tag{14}$$

取两极温度为 10^7K，则赤道比两极温度高 46700K．

二、具有磁荷和磁矩的旋转中子星的温度分布

由(4)式知，无论 χ 取何值，旋转中子星都不存在视界和静面，即不可能塌缩为黑洞．

1. $\chi = 1$．此时 $\alpha = 0$，中子星的温度分布为

$$T = T_0\left[1 - 2R_g\left(r - \frac{1}{2}R_g\right)(r^2 + a^2\cos^2\theta)^{-1}\right]^{-\frac{1}{2}}, \tag{15}$$

在 $r = R > \frac{R_g}{2}$ 的中子星表面上，存在赤道与两极温度差．取中子星的旋转周期 $\tau = 0.033$s 及上述同样数据计算可求得赤道与两极温度之比为

$$\frac{T(R,\vartheta_q)}{T(R,\theta_p)}=\left[1+\left(\frac{a}{R}\right)^2\left(1-\frac{2R_g}{R}+\frac{R_g^2}{R^2}\right)^{-1}\right]^{\frac{1}{2}}\left[1+\left(\frac{a}{R}\right)^2\right]^{-\frac{1}{2}}=1.0000081. \qquad (16)$$

取两极温度为 10^7K，则赤道比两极温度只高 81K，无明显温差．当中子星半径塌缩至 $r=\frac{R_g}{2}$ 时，$g_{00}=1$，$T=T_0$，即旋转中子星表面温度均匀分布．除非中子星磁荷激发的磁场和磁矩的磁场作用抵消，或中子星在塌缩过程中全部失去磁荷和磁矩，否则这种情况不可能出现．

2. $\chi>1$．此时中子星的温度分布为

$$T=T_0\left[1-\frac{2R_g r}{\rho^2}+\frac{R_g^2}{\rho^2}\chi^2+\frac{\lambda\alpha^2p^2\cos^2\theta}{\rho^4}\right]^{-\frac{1}{2}}. \qquad (17)$$

可知中子星表面存在赤道与两极温度差．利用上述同样数据计算可求得赤道与两极温度比为

$$\frac{T(R,\theta_q)}{T(R,\theta_p)}=\frac{R}{R^2+a^2}[(R^2+a^2)(R^2+a^2-2R_gR+R^2\chi^2)+\lambda\alpha^2p^2]^{\frac{1}{2}}[R^2-2R_gR+R_g^2\chi^2]^{-\frac{1}{2}}=1.000459. \qquad (18)$$

取两极温度为 10^7K，则赤道比两极温度高 4590K．

3. $\chi\ll1$．此时 $\alpha=1$．中子星的温度分布为

$$T=T_0\left[1-\frac{2R_g r}{\rho^2}+\frac{\lambda p^2\cos^2\theta}{\rho^4}\right]^{-\frac{1}{2}}, \qquad (19)$$

可知中子星表面亦存在赤道与两极温度差．经同样数据计算可求得赤道与两极温度比为

$$\frac{T(R,\theta_q)}{T(R,\theta_p)}=\left[1-\frac{2R_gR}{R^2+a^2}+\frac{\lambda p^2}{R^2+a^2}\right]^{\frac{1}{2}}\left[1-\frac{2R_g}{R}\right]^{-\frac{1}{2}}=1.00472. \qquad (20)$$

取中子星两极温度为 10^7K，则赤道比两极温度高 47200K．

三、讨　论

上述结果表明，具有磁荷和磁矩的两种中子星表面存在赤道与两极温度差，磁荷愈小，温度差愈大，当 $\chi\ll1$ 时，可相差数万 K．这样大的温差的存在，将导致热流和物质流产生，使得中子星表面处多数粒子(包括磁单极子)向极区聚集，形成极冠区很强的射电辐射．对旋转中子星而言，考虑中子星自转角动量和粒子角动量的耦合作用，聚集在极区的粒子数将比静态中子星多，辐射将更强．当中子星自转轴与磁轴成一角度时，将产生一种具有极短周期性的射电脉冲发射．上述温差效应的产生主要是中子星强大磁矩 p 在磁 R-N 弯曲时空中产生的静磁场所致．且磁矩 p 沿 $\theta=0$ 的方向(中子的轴向磁矩)，可知场是辐射对称的，所以沿 p 的方向，即中子星表面两极处温度最低．但具有强磁荷的中子星，表面温差效应不显著，这可能是由于中子星内部的强磁荷在其表面激发的径向磁场削弱了磁矩的静磁场的作用．由此我们推测，射电脉冲星可能是一种具有较小磁荷和较大磁矩的高密度快速旋转中子星．又根据文献[1,5]的研究，中子星的磁荷与其年龄成正比，因而脉冲星的年龄可能较其它中子星短．

参　考　文　献

[1] 王永久等，中国科学，A辑，1984，10:935．
[2] 刘辽，广义相对论，高等教育出版社，1987，11，150．
[3] 钱尚武，物理学报，28(1987)，258．
[4] 李有成，天体物理学报，7(1987)，4:266．
[5] 彭秋和等，中国科学，A辑，1985，5:466．