

γ 射线暴的能源机制

肖 飞, 李正发

湖北第二师范学院物理与电子工程系, 湖北武汉 430205

摘要: 火球模型被认为是 γ 射线暴的标准模型, 而火球产生的机制是多方面的, 其中之一就是奇异星相变, 它既解释了 γ 射线暴的短时标、高能量特征, 又避免了火球的重子污染这一最大难题. 通过对 γ 射线暴的能源机制研究, 探讨了宇宙学距离($\sim$ Gpc)处 γ 射线暴的能量来自奇异星相变的可能性, 进而认识了奇异星模型的独特优势.

关键词: 奇异星; 中子星; γ 射线暴; 能源机制.

中图分类号: P14

文章编号: 1000-2383(2008)01-0057-04

收稿日期: 2007-11-16

Energy Mechanisms of γ -Ray Bursts

XIAO Fei, LI Zheng-fa

Department of Physics and Electronic Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China

Abstract: The fireball model is universally accepted as the standard model in explaining γ -ray bursts. Phase transition of strange stars is one of the factors leading to fireball appearance, which not only can explain the short scales and high energy of γ -ray bursts, but also address the issue of baryon pollution of the fireball. On the basis of researching the energy mechanism of gamma-ray bursts, the possibility that the energy of gamma-ray bursts at cosmology distance ($\sim$ Gpc) comes from phase transition of strange stars is discussed.

Key words: strange star; neutron star; γ -ray burst; energy mechanisms.

0 引言

火球模型被认为是射线暴的标准模型, 即所谓宇宙学模型, 它认为 γ 暴起源于宇宙学距离处(Meczynski, 1996): 巨大的能量($E \sim 10^{51}$ erg)聚集在一个小体积($R \sim 10$ km)的火球内, 这火球温度很高, 光子数密度极大, 是光学厚的. 随着火球的膨胀变成光学薄时, 辐射就被观测到了(Goodman, 1996). 这一理论早在1986a就提出来了, 但是由于它要求辐射的光子谱是黑体谱, 与实际观测不符, 当时没有引起人们的重视. 随着观测的不断深入, 特别是CGRO的升空以后的研究, 这一理论模型逐渐成为人们讨论的标准模型.

从现有的观测中知道, 射线暴源自于宇宙学距离处($\sim$ Gpc). 根据观测到的 γ 光子的流量及能

谱特征, 可以推知, 若暴源在太阳系附近, 则 γ 暴释放的能量约为 $10^{26} \sim 10^{28}$ erg; 如果是在银河系中, 能量将达到 $10^{41} \sim 10^{43}$ erg; 如果是在宇宙学距离处, 能量将达到 $10^{51} \sim 10^{53}$ erg, 相差二、三十个量级, 对应的辐射机制也应有所不同(Paczynski, 2001). 本文通过对奇异星相变模型的讨论, 在 γ 射线暴能源机制上给出了独特解释.

1 奇异星

QCD理论预言, 强子物质在高温或高密度条件下将发生退禁闭相变, 产生夸克-胶子等离子体(QGP). 高能重离子碰撞以及致密星内部是生成夸克物质的理想环境. Witten(1984)在一个相当大的参数范围内证明, 奇异夸克物质系统是稳态或亚稳

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 10373007).

作者简介: 肖飞(1962-), 男, 副教授, 主要研究方向天体物理. E-mail: xiaofeixzy@126.com

态,因而使更早期预言的夸克星具有了充足的理论依据,随后人们根据各种理论方法更详尽地研究了冷密夸克物质的物态,都可以得到 Witten 初期获得的主要结论.

奇异夸克物质系统是一个稳定的羽衰变系统.

$$u + e^- \longleftrightarrow d + \nu_e,$$

$$u + e^- \longleftrightarrow s + \nu_e,$$

$$s + u \longleftrightarrow d + u.$$

在化学平衡时,

$$\mu_d = \mu_s, \quad (1)$$

$$\mu_d = \mu_e, \quad (2)$$

这样一个系统满足电中性:

$$\frac{2}{3}n_n - \frac{1}{3}n_s - n_e = 0. \quad (3)$$

在 MIT 袋模型下,可以算出其热力学势:

$$\Omega = \Omega_{(0)} + \Omega_{\text{int}} + B. \quad (4)$$

式(4)中 $\Omega_{(0)}$ 为理想费米气热力学势; Ω_{int} 夸克间短程微扰相互作用贡献; B 为袋常数.

通过热力学关系以及平衡方程(1)~(3),获得 SQM 的状态方程 $P = P(\epsilon)$. 对于一个无质量夸克情况,有:

$$P = \frac{1}{3}(\epsilon - 4B). \quad (5)$$

为了获得奇异星结构性质,必须研究流体力学平衡. 对于一个球对称的恒星而言,考虑广义相对论效应,流体力学平衡由 Tolman-Oppenheimer-Volkoff(TOV)方程来确定:

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{Gm(r)\epsilon(r)}{r^2} \left\{ \left[1 + \frac{P(r)}{\epsilon(r)} \right] \left[1 + \frac{4\pi r^3 P(r)}{m(r)} \right] \left[1 - \frac{2Gm(r)}{r} \right]^{-1} \right\}, \quad (6)$$

$$\frac{dm(r)}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon(r). \quad (7)$$

边界条件为: $m(0) = 0, p(R) = P_{\text{surf}}$.

将状态方程代入 TOV 方程,即可获得奇异星的结构性质和质量、半径关系:

$$\frac{dp}{dm} = -\frac{4G}{9} \left\{ \left[1 - \frac{B}{\epsilon(r)} \right] \left[\frac{\epsilon(r) - 4B + \frac{3m(r)}{4\pi r^3}}{r - 2Gm(r)} \right] \right\}. \quad (8)$$

到目前为止,大部分研究结果显示奇异星最大的质量、半径与中子星相似,但由于强相互作用具有自束缚性质,因而奇异星没有质量、半径下限,很小的奇异星是可以存在的. 不仅如此,由于奇异夸克物质与强子物质相互作用动力学差别,恒星动力学及

其热演化性质也就有本质的不同. 因而快速旋转脉冲星(如亚毫秒脉冲星)可作为奇异星存在的证据.

2 奇异夸克物质

奇异夸克物质(简称奇异物质)包含几乎等量的上夸克(u)、下夸克(d)和奇异夸克(s)以及少量的电子. 由这种物质组成的致密星称为奇异星. 在天文上,奇异物质的产生有 2 个途径:(1)早期宇宙的强子-夸克相变;(2)中子星相变为奇异星. 中子星相变又可分为一般中子星的转变和超新星核坍缩形成的中子星的转变. 前者产生中微子爆和周期空变现象,后者能驱动超新星爆发.

在观测上区别奇异星和中子星似乎不太容易. 第一,两者在质量为 $1.4 M_{\odot}$ 时有相等的半径,它们表面引力红移值没有什么差异;第二,两者在脉冲星阶段有相同的磁层,它们的射电脉冲性质基本相同;第三,奇异物质的中微子发射率和有直接 URCA 过程的中子星的中微子发射率有相同的数量级. 但由于奇异星和中子星在组成和结构上不同,人们可根据周期突变现象来区分. 研究表明奇异星的振动阻尼比中子星更快;最大转动速度比中子星更大(Colpi and Miller, 2002).

中子星相变为奇异星的机制,主要有 2 个:一是奇异物质的扩散. Olinto(1997)认为,在中子星中心产生一奇异物质种子(由于瞬间的密度涨落等原因). 因中子不带电,它们可自由扩散到奇异物质种子内,退禁闭之后变成奇异物质,这意味着奇异物质向周围扩散. 经过某一时间后,中子星就转变为奇异星. 二是经过两味夸克物质的转变. 假定中子星内部发生大范围的中子物质退禁闭,产生两味夸克物质,从两味夸克物质到三味夸克物质的相变,时标短至 10^{-7} s 量级.

3 奇异星的冷却

Ajcock and Farhi(1996)讨论中子星相变为奇异星的机制时发现奇异星与中子星之间存在差别. 通过求解 TOV 静态平衡方程,研究奇异星的整体性质,得到的结论为:奇异星的半径随质量增大而增大. 而中子星的半径随质量增大而减小;Colpi *et al.* (1997)研究了奇异星的转动性质,发现奇异星特有

的 $m=2$ 不稳定模式(中子星没有);通过计算中微子能量损失率,Pizzochero(2003)研究了有壳奇异星的冷却,得到奇异星的表面温度比中子星的表面温度低。

通过对 X 射线观测可以严格给出致密天体的表面温度的上限。人们通过研究此天体的冷却过程,能够定出其表面温度的范围(Tsuruta, 1996)。这样表面温度差异成为人们区别奇异星和中子星的重要依据。

有 3 种机制可以改变中子星的冷却。第一种是 π 凝聚,第二种是 K 凝聚,第三种机制是超流和超导(戴子高和陆垓,1994)。因为奇异物质在零压强时稳定,所以奇异星可能有密度从 $4 \times 10^{14} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 突然变为零的表面,厚度为 1 fm。由于吸积,奇异星会有一个类似于中子星外壳的薄壳。

设冷却方程:

$$C_V \frac{dT}{dt} = -(L_V + L_r), \quad (9)$$

式(9)中 C_V 为热容量,在中子星情形下,

$$C_V^{(N)} = \pi^2 N k (kT) (p^2 c^2 + m^2 c^4)^{1/2} (pc)^{-2}. \quad (10)$$

式(10)中 N 为中子总数,取:

$$C_V^{(N)} = 9.0 \times 10^{38} T \text{ erg} \cdot \text{K}^{-1},$$

对于奇异星:

$$C_V^{(s)} = \pi^2 N k (kT) \sum_{i=u,d,s} \frac{Y_i}{p_{FiC}}, \quad (11)$$

取: $C_V^{(s)} = 1.53 \times 10^{39} T \text{ erg} \cdot \text{K}^{-1}$,

在(9)式中, L_V 为总的中微子光度。内部为均匀核物质的中子星, L_V 为:

$$L_V^{(N)} = 5.3 \times 10^{39} \left(\frac{M}{M_0}\right) \left(\frac{n_0}{n_b}\right)^{1/3} T^8 \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (12)$$

对于奇异星,有:

$$L_V^{(s)} = \begin{cases} 1.91 \times 10^{43} T^6 \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \\ 2.97 \times 10^{43} T^6 \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases}$$

(9)式中, L_r 为表面光度,且:

$$L_r = 7.1 \times 10^{36} T_s^4 \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}.$$

考虑引力红移,远处观测者所测量的表面温度为:

$$T_s^\infty = T_s [1 - 0.295 \frac{M}{M_0} R_6^{-1}]^{1/2}. \quad (13)$$

设初始温度 $T_i \approx 10^9 \sim 10^{10} \text{ K}$,这是恒星坍缩过程中形成的致密天体和超新星遗迹中观测的致密星的典型温度范围。

4 射线暴能源机制

既然奇异夸克物质比强子物质具有更低的能态,那么当中子星向奇异星相变时将会释放能量,这可以作为射线暴的能源机制,理由很简单:一个单位重子数的强子相变到夸克物质,由于结合能差 30 MeV,因而,当一个质量为 M 的中子星是相变到奇异星时释放的能量为:

$$E = Mc^2 \times \frac{30}{931} \sim 5.8 \times 10^{52} \frac{M}{M_0} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (14)$$

另外,相变时标 $T_{\text{coh}} \sim 10^{-7} \text{ s} \ll T_d \sim 0.5 \text{ s}$, (中微子扩散时标)。由于奇异星温度很低,夸克物质发生色超导相变也是不可避免的,当一个热夸克星(HQS)产生后,由于中微子冷却到临界温 T_c 时,奇异星表面产生一个色超导层,形成一个胶球,胶球衰变辐射光子,在光子辐射过程中,一部分光子与夸克产生逆 Compton 散射,从而使色超导层加热,从色超导相回到 QGP 相,然后再冷却产生新的色超导层,再释放能量,这样多次往复直至再不能产生新色超导层为止(如图 1)。

如果奇异星质量 $2M_\odot \geq M > 0.015M_\odot$,其总的射线暴能量为:

$$4 \times 10^{54} < E_{\text{GRB}} < 1.2 \times 10^{52} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (15)$$

γ 射线暴爆发时标为:

$$t = 81 \frac{M_{\text{HQS}}}{M_0} \left(\frac{5 \text{ km}}{R_{\text{HQS}}}\right)^2 (s), \quad \text{大质量星} \quad (16)$$

$$t = 2 \left(\frac{M_{\text{HQS}}}{0.01M_0}\right) \left(\frac{1 \text{ km}}{R_{\text{HQS}}}\right)^2 (s). \quad \text{小质量星} \quad (17)$$

当 R_{HQS} 取值为 $10^7 \sim 10^9 \text{ mm}$,则 γ 射线暴爆发时标为: $0.1 \sim 100 \text{ ms}$ 。

上述计算基本满足观测上的要求,即:(1)爆发

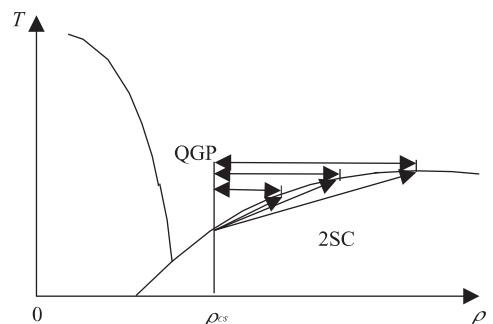


图 1 奇异星相变

Fig. 1 Phase change of strange star

能量 $E_0 \geq 10^{51} \text{ erg}$; (2) 能产出毫秒时标的快速变化; (3) 每星系大约每 10^6 yr 才发生一次 γ 暴. 因此, 剩下的工作是寻找奇异星的存在证据, 这对于解决射线暴的能源机制将有重要的意义.

5 结论

γ 射线暴的能源机制现在还远没有解决, 其中很可能会包含着一种全新的天体物理过程. 虽然奇异星模型能够避免重子污染这一最大难题, 但至今没有观测到奇异星存在的直接证据. 观测结果仍显得有些零乱, 因此 γ 射线暴的本质是仍然值得关注的重大课题.

References

- Ajcock, C., Farhi, E., 1996. A neutron star and a strange star. *Astrophys.*, 310:261—262.
- Colpi, E., Olinto, A., Miller, J. C., et al., 1997. The neutron star and strange star change. *Nature*, 387:783—785.
- Colpi, M., Miller, J. C., 2002. The observational feature of strange stars. *Ap. J.*, 388:513—515.

- Dai, Z. G., Lu, T., 1994. Strong force for effect of strange star observation. *Astronomy Journal*, 43:2—6 (in Chinese with English abstract).
- Goodman, J., 1996. The fireball model of γ -ray bursts. *Ap. J.*, 328:47—43.
- Mieczynski, B., 1996. The progress of gamma-ray bursts. *Ap. J.*, 308:43—45.
- Olinto, A., 1997. The strange star change. *Phys. Letter.*, 192:71—74.
- Paczynski, B., 2001. The energy source of γ -ray bursts. *Acta Astronomica*, 41:257—259.
- Pizzochero, P. M., 2003. The strange star colling. *Phys. Rev. Lett.*, 66:425—426.
- Tsuruta, S., 1996. Influence and the strange stars. *Comments Astrophys*, 11:151—153.
- Witten, E., 1984. The strange star. *Phys. Rev.*, 30:272—274.

附中文参考文献

- 戴子高, 陆埏, 1994. 强作用对奇异星观测作用的影响. *天文学报*, 43:2—6.