含有反常质子的反常中子星

曲钦岳　汪珍如　初　一　陆　埮
（南京大学天文系）

在文献[1]和[2]中，我们已经论证了可能存在两类中子星——由正常中子物态构成的正常中子星和由反常中子物态构成的反常中子星．文献[1]和[2]用的都是均匀星体模型近似．文献[3]讨论了非均匀星体模型，也得到了同样的结论．

按照李政道等所提出的反常核态理论[4]，自然界可能存在一种强作用的同位标量O^+介子，它与核子间的耦合相当于将核子的静止质量由m_n换成

$$m_{eff} = m_n + g\phi, \tag{1}$$

其中ϕ为介子场，g为耦合常数．当核子数密度n较低时，介子核子体系的最低能态为$\phi \approx 0$，即$m_{eff} = m_n$，这是正常核态；当n超过某一临界值n_c后，体系的最低能态为$\phi \approx -m_n/g$，即$m_{eff} \approx 0$，这就是反常核态．在文献[1]和[2]中，我们曾认为星体全部是由反常中子组成的．但是，反常中子和反常质子之间有不同的电磁性质，因而仍然会有电磁质量差．这种质量差使如下的弱蜕变过程仍能进行

$$N_a \longrightarrow P_a + e^- + \bar{\nu}, \tag{2}$$

其中N_a，P_a分别代表反常中子和反常质子．由过程(2)产生的电子将处于完全简并状态．当其费米能量ε_{Fe}达到反常中子费米能量ε_{Fn}与反常质子费米能量ε_{Fp}之差时，即当下式成立时

$$\varepsilon_{FN} - \varepsilon_{Fp} = \varepsilon_{Fe}, \tag{3}$$

反常中子的弱蜕变才被禁戒，反常中子才成为稳定的．

由于反常中子和反常质子的m_{eff}都近于零，在极高的密度下，它们都成为相对论性粒子，由(3)式可得，在这种情况下反常质子的数目与反常中子的数目相比将是不可忽略的．因此有必要把文献[1—3]中所进行的研究再向前推进一步，讨论包含有反常质子的反常中子星．

本文仍先讨论均匀星体模型近似．对于均匀星体模型，有如下的方程[2]

$$M = \frac{4\pi}{3}\rho \cdot R^3, \tag{4}$$

$$N = 2\pi n R^3(\chi - \sin\chi\cos\chi)/\sin^3\chi, \tag{5}$$

其中$\sin\chi = \left(\frac{2GM}{R}\right)^{1/2}$，$M$、$R$和$N$分别为星体的质量、半径和核子总数，$n$为核子数密度，$\rho$为能量密度，其表式为(采用$\hbar = C = 1$的单位制)

$$\rho = U_\phi + \varepsilon_N + \varepsilon_p + \varepsilon_e, \tag{6}$$

(6)式中的U_ϕ为ϕ场的势能，ε_N、ε_p和ε_e分别为反常中子、反常质子和电子的能量密度，它们的表达式分别为：

$$U_\phi = \frac{m_\sigma^2 m_N^2}{8g^2},$$

本文1981年7月13日收到．

$$\varepsilon_N = n_N \int_0^{P_{FN}} (P^2 + m_{eff}^2)^{1/2} p^2 dp \Big/ \int_0^{P_{FN}} p^2 dP,$$

$$P_{FN} = \frac{(3\pi^2 n_N)^{1/3}}{1 - \beta n^{1/3}},$$

$$\varepsilon_p = n_p \int_0^{P_{Fp}} (P^2 + m_{eff}^2)^{1/2} p^2 dp \Big/ \int_0^{P_{Fp}} p^2 dp,$$

$$P_{Fp} = \frac{(3\pi^2 n_p)^{1/3}}{1 - \beta n^{1/3}},$$

$$\varepsilon_e = n_p \int_0^{P_{Fe}} (P^2 + m_e^2)^{1/2} P^2 dP \Big/ \int_0^{P_{Fe}} P^2 dP,$$

$$P_{Fe} = (3\pi^2 n_p)^{1/3},$$

其中 m_σ 为 σ 介子的质量，n_N 和 n_p 分别为反常中子和反常质子的数密度，

$$\beta = \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{1/3} (0.8\alpha),$$

α 为排斥力程，P_{FN}、P_{Fp} 和 P_{Fe} 分别为反常中子、反常质子和电子的费米动量.

星体的平衡及稳定条件分别为

$$\left(\frac{\partial M}{\partial n}\right)_N = 0, \tag{7}$$

$$\left(\frac{\partial^2 M}{\partial n^2}\right)_N > 0. \tag{8}$$

由(4)、(5)、(6)和(7)式计算的结果绘于图 1—3. 计算中取 $m_\sigma \simeq 1.15\text{GeV}$，$g^2/4\pi = 15$，$\alpha$ 分两种情形，$\alpha = 0.60f$ 和 $\alpha = 0.62f$. 在文献[2]的计算中采用的是级数展开法，并取到后牛顿近似. 本文不用级数展开，而用准确公式计算. 从图 1—3 可以得出如下的几点结论：(1)在反常中子星中含有很大数量的反常质子，n_p/n_N 随着 n 的增大而增大，最大可达 0.35；(2)含有反常质子的反常中子星的质量比相应的未考虑反常质子的恒星质量低一些，这正是所预期的. 因为反常质子的出现必然降低反常中子的费米能量，从而使总能量降低，使物态变软；

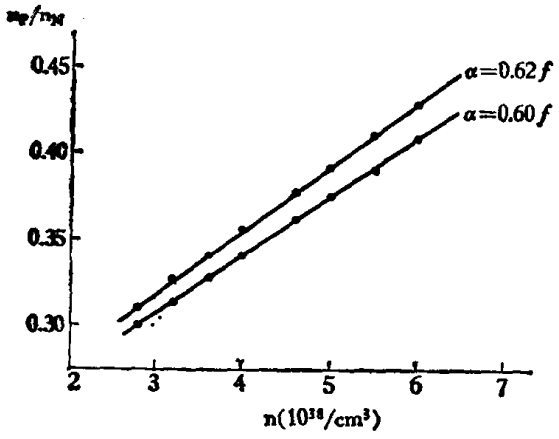

图 1 n_p/n_N 随 n 的变化

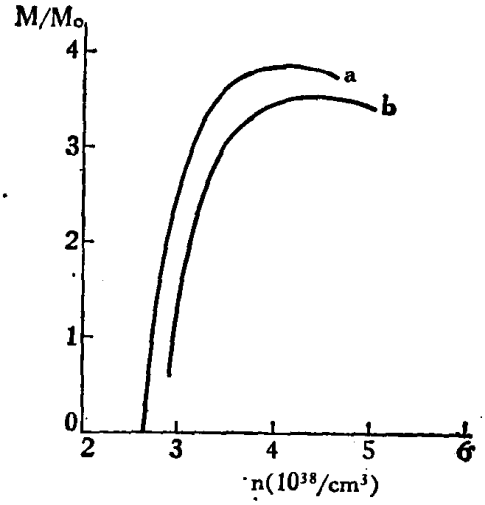

图 2a 反常中子星的质量 M 与数密度 n 的关系 ($\alpha = 0.60f$)

曲线 a——不包含反常质子；
曲线 b——包含有反常质子

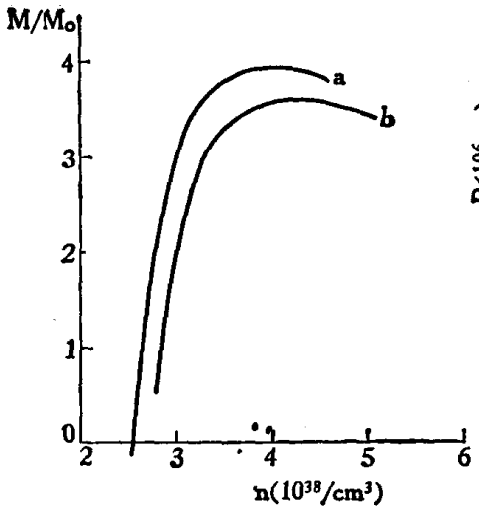

图 2b 反常中子星的质量 M 与数密度 n 的关系($\alpha = 0.62f$)

曲线 a——不包含反常质子;
曲线 b——包含有反常质子

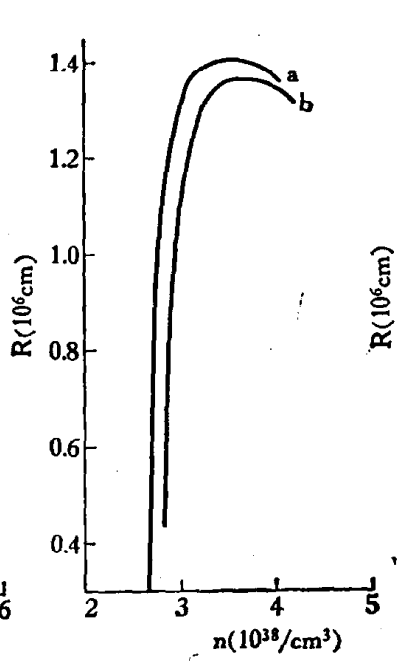

图 3a 反常中子星的半径 R 与数密度 n 的关系 ($\alpha = 0.60f$).

曲线 a——不包含反常质子;
曲线 b——包含有反常质子

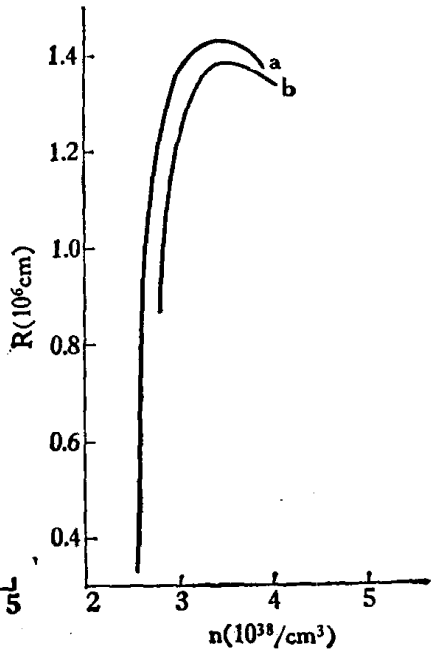

图 3b 反常中子星的半径 R 与数密度 n 的关系 ($\alpha = 0.62f$)

曲线 a——不包含反常质子;
曲线 b——包含有反常质子

(3) 含有反常质子的反常中子星的极大质量约为 $3.5M_{\odot}$，与不包含反常质子的反常中子星比较起来，极大质量出现于更高的密度值.

含有反常质子的非均匀的反常中子星模型正在计算之中，将另文发表.

包含在反常中子星内的数量巨大的反常质子将使反常中子星表现出许多奇妙和新颖的电磁性质和辐射性质. 由于正常中子星中质子只占极小的比例，而在反常中子星中却含有大量反常质子，正常态与反常态之间的相变必然伴有强大的中微子辐射. 这些性质的研究将是十分重要和有趣的.

参 考 文 献

[1] 方励之、陆埮、罗辽复、曲钦岳、汪珍如，天文集刊，1978,1: 1.
[2] 方励之、曲钦岳、汪珍如、陆埮、罗辽复，中国科学，1978,4: 406.
[3] 方励之、谢光中，科学通报，**24**(1979),4: 167.
[4] Lee, T. D., *Rev. Mod. Phys.*, **47** (1975), 267.