

密度和温度相关的对称能*

陈列文^{1,2} 张丰收^{1,2,3}

1 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心 兰州 730000)

2 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3 (中国高等科学技术中心 北京 100080)

摘要 利用 Hartree-Fock 理论, 基于扩展的 Skyrme 有效相互作用, 在抛物线近似下, 解析地给出了零温度时对称能的密度相关形式. 同时讨论了对称能的温度相关性, 发现对称能随着温度的升高而减小, 在温度较低时, 对称能强度系数与温度的关系能较好地符合抛物线规律.

关键词 对称能 密度 温度 抛物线规律

1 引言

在以前的工作中, 采用推广的 Skyrme 有效相互作用, 在 Hartree-Fock 近似下得到了密度、温度和动量相关的平均场^[1,2]. 对于无穷大非对称核物质, 研究了核物质状态方程的同位旋相关性, 表明核物质状态方程具有较强烈的同位旋相关性, 发现在核物质饱和点处, 许多物理量与相对中子过剩 δ ($\delta = (\rho_n - \rho_p) / \rho$, ρ_n , ρ_p 及 ρ 分别表示中子、质子及总的核物质密度) 满足抛物线规律^[3]. 这些研究使得我们能够提取对称能, 并研究它的性质.

对称能一直是人们很感兴趣的问题, 在核天文学中, 它是与中子星中的质子比例、中子星演化、中子星半径及密度等相关的一个十分重要的物理量. 尽管相对论平均场理论、变分多体理论及非相对论多体理论中都对称能的性质进行了一些研究, 但是对于高密度时对称能的性质及对称能的温度相关性研究得还很不够, 不同理论甚至还给出了相互矛盾的结果^[4,5]. 关于这方面的综述性文章可参考文献 [6].

本文基于扩展的 Skyrme 有效相互作用和 Hartree-Fock 理论, 较详细地讨论了对称能的密度及温度相关性, 并提出了对称能温度相关性的抛物线规律, 从而对对称能有更进一步的理理解.

1998-10-26收稿

* 国家自然科学基金(19609033, 19875068和19847002)、中国科学院基金和国家教委基金资助项目

2 零温度时对称能的密度相关性

在扩展的 Skyrme 有效相互作用^[7]下,对核物质的波函数采用平面波近似,应用 Hartree-Fock 理论,可得到密度、温度和同位旋自由度相关的核物质状态方程,即相对中子过剩为 δ 的无穷大核物质的单核子能量可表示为^[3]

$$\varepsilon = \varepsilon(\rho, T, \delta). \quad (1)$$

由(1)式可以定义对称能为

$$\varepsilon^{\text{sym}}(\rho, T, \delta) = \varepsilon(\rho, T, \delta) - \varepsilon(\rho, T, \delta = 0), \quad (2)$$

进一步可以表示为

$$\varepsilon^{\text{sym}}(\rho, T, \delta) = \varepsilon_{\text{kin}}^{\text{sym}}(\rho, T, \delta) + \varepsilon_{\text{pot}}^{\text{sym}}(\rho, T, \delta), \quad (3)$$

(3)式右边第一和第二项分别表示对称能的动能和势能部分.当 $T = 0$ 时,忽略中子和质子的质量差,可解析地推导出对称能的动能部分

$$\varepsilon_{\text{kin}}^{\text{sym}}(\rho, T = 0, \delta) = C_{\text{kin}}(\rho) \delta^2 + D_{\text{kin}}(\rho) \delta^4 + O(\delta^6), \quad (4)$$

其中,

$$C_{\text{kin}}(\rho) = \frac{1}{3} \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{3\pi^2}{2} \right)^{2/3} \rho^{2/3}, \quad (5)$$

$$D_{\text{kin}}(\rho) = \frac{1}{81} \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{3\pi^2}{2} \right)^{2/3} \rho^{2/3}. \quad (6)$$

同样,我们得到了对称能的势能部分

$$\varepsilon_{\text{pot}}^{\text{sym}}(\rho, T = 0, \delta) = C_{\text{pot}}(\rho) \delta^2 + D_{\text{pot}}(\rho) \delta^4 + O(\delta^6), \quad (7)$$

其中,

$$\begin{aligned} C_{\text{pot}}(\rho) = & -\frac{1}{8} t_0 (2x_0 + 1) \rho - \frac{1}{48} t_3 (2x_3 + 1) \rho^{\gamma+1} + \\ & \frac{1}{24} \left(\frac{3\pi^2}{2} \right)^{2/3} [-3t_1 x_1 + (4 + 5x_2) t_2] \rho^{5/3} + \\ & \frac{1}{24} \left(\frac{3\pi^2}{2} \right)^{2/3} [-3t_4 x_4 + (4 + 5x_5) t_5] \rho^{\gamma+5/3}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} D_{\text{pot}}(\rho) = & \frac{1}{432} \left(\frac{3\pi^2}{2} \right)^{2/3} [t_1 (1 + 2x_1) - t_2 (1 + 2x_2)] \rho^{5/3} + \\ & \frac{1}{432} \left(\frac{3\pi^2}{2} \right)^{2/3} [t_4 (1 + 2x_4) - t_5 (1 + 2x_5)] \rho^{\gamma+5/3}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中, γ, t_0-t_5, x_0-x_5 为 Skyrme 势参数. 许多理论研究表明^[8-14], 在相对中子过剩 δ 不大的情况下, 非对称核物质偏离饱和点时, 单核子能量与 δ 的关系近似满足抛物线规律, 即 (4) 和 (7) 式中 δ^4 项及其更高级项可以忽略. 通过 (5) 和 (6) 式以及 (8) 和 (9) 式的比较, 确实可以发现 δ^4 项的贡献是很小的, 在很大的密度范围内 ($\leq 0.8\text{fm}^{-3}$) 及几乎所有相对中子过剩区抛物线规律都能较好地成立. 这与其它多体理论的结果是相一致的^[8-14], 即零温度时, 单核子能量与相对中子过剩 δ 能够较好地满足抛物线规律

$$\varepsilon(\rho, T=0, \delta) = \varepsilon(\rho, T=0, \delta=0) + C(\rho)\delta^2, \quad (10)$$

其中,

$$C(\rho) = C_{\text{kin}}(\rho) + C_{\text{pot}}(\rho), \quad (11)$$

即所谓的对称能强度系数. 在图 1 中给出了对称能强度系数的势能部分 $C_{\text{pot}}(\rho)$ 随密度 ρ 的变化关系, 其中 SKM 表示的是本文采用 SKM 势参数时的计算结果, VMB 表示变分多体理论采用两体势 UV14 加三体势 TNI 时的计算结果, RMF 表示相对论平均场理论的计算结果^[8]. 从图 1 可以看到, SKM 和 VMB 两种情况的结果很相似, 当密度很大时, 势能部分 $C_{\text{pot}}(\rho)$ 由斥力变成引力, 这预示着致密核物质可能存在着纯中子物质的基态, 这个特点对于中子星的结构及磁性质有着十分重要的意义^[15]. 相对论平均场理论给出的结果是截然不同的, 它没有观察到对称能强度系数势能部分的消失.

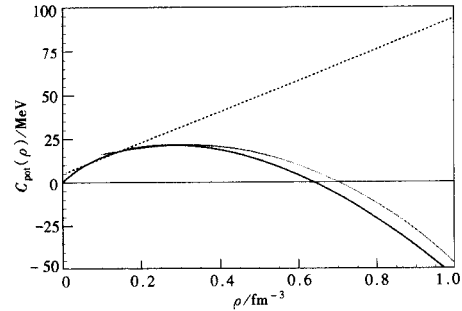


图 1 对称能强度系数的势能部分 $C_{\text{pot}}(\rho)$ 随密度 ρ 的变化关系
 ··· VMB, --- RMF, — SKM.

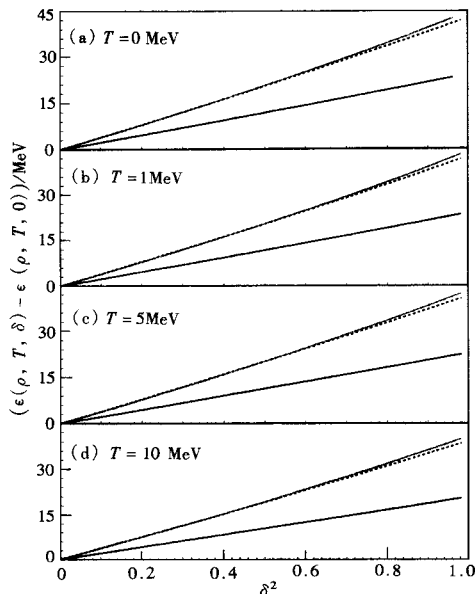


图 2 不同密度下 $\varepsilon(\rho, T, \delta) - \varepsilon(\rho, T, 0)$ 与 δ^2 的变化关系
 — $\rho=0.1\text{fm}^{-3}$, --- $\rho=0.3\text{fm}^{-3}$, ··· $\rho=0.5\text{fm}^{-3}$.

3 对称能的温度相关性

前面讨论了零温度时关于对称能的抛物线规律, 其它许多理论模型所讨论的也是零温度时的情况. 那么人们自然要问, 有限温度时抛物线规律是否仍然成立? 对称能随温度的变化规律又是怎样的? 这些都是值得探讨的.

图 2(a) — (d) 分别给出了温度 $T=0, 1, 5$ 和 10MeV 时几个不同密度下 $\varepsilon(\rho, T, \delta) - \varepsilon(\rho, T, 0)$ 与 δ^2 的变化关系. 从图中可以清楚地看到, 不同温度和不同密度时, $\varepsilon(\rho, T, \delta) - \varepsilon(\rho, T, 0)$ 与 δ^2 能很好地满足线性关系, 即在有限温度时, 对称能的抛物线规律仍然能很好地成立, (10) 式可重新表示为

$$\varepsilon(\rho, T, \delta) = \varepsilon(\rho, T, 0) + C(\rho, T)\delta^2, \quad (12)$$

由(12)式可以得到在抛物线近似下的密度和温度相关的对称能强度系数

$$C(\rho, T) = \varepsilon(\rho, T, 1) - \varepsilon(\rho, T, 0). \quad (13)$$

图 3 给出了温度 $T = 0, 1, 5$ 和 10MeV 时 $C(\rho, T)$ 随密度的变化关系. 从图中可以清楚地看到, 随着温度的升高, 对称能强度系数逐渐减小. 在一定的温度下, 对称能强度系数在开始时随密度的增大而增大, 然后达到最大值再逐渐减小、消失、甚至变成负的. 这与变分多体理论在零温度时的计算结果完全一致^[8]. 图 4 给出了密度 $\rho = 0.05, 0.1, 0.16$ 和

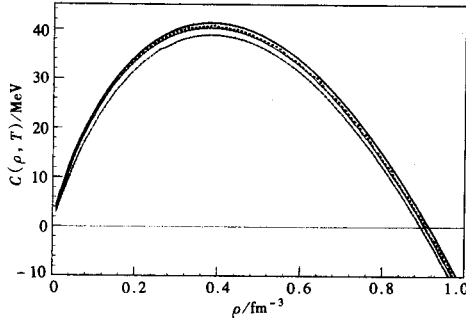


图 3 温度 $T=0, 1, 5$ 和 10MeV 时 $C(\rho, T)$ 随密度的变化关系

— $T=0\text{MeV}$, --- $T=1\text{MeV}$, ··· $T=5\text{MeV}$,
- · - $T=10\text{MeV}$.

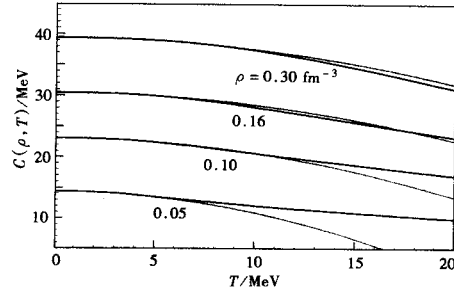


图 4 密度 $\rho=0.05, 0.1, 0.16$ 和 0.3fm^{-3} 时 $C(\rho, T)$ 随温度 T 的变化关系 (实线) 及用抛物线规律进行最小二乘拟合的结果 (拟合范围为 $0 \leq T \leq 5\text{MeV}$) (虚线)

0.3fm^{-3} 时 $C(\rho, T)$ 随温度 T 的变化关系. 从图中可以看到, 在不同密度下, 随着温度的升高, 对称能强度系数逐渐减小. 在温度较低时, 对称能强度系数与温度的关系能较好地符合抛物线规律, 尤其当密度较高时符合得更好. 例如, $\rho = 0.16\text{fm}^{-3}$ 时, 抛物线拟合的结果为

$$C(T) = 30.4926 - 0.01895T^2 \quad (\text{MeV}). \quad (14)$$

可见对称能对于温度是不太敏感的, 对于 $\rho = 0.16\text{fm}^{-3}$, 当温度从 0 增加到 10MeV 时, 对称能的减小还不到 2MeV . 当温度很高时, 抛物线规律不再成立. 相对而言, 对称能较敏感地依赖于核物质的密度.

关于对称能的温度相关性, 即使在定性上目前还没有一个明确的定论, 不同的模型计算甚至给出了截然相反的结论^[4, 5]. 本文的计算结果表明, 随着温度的升高, 对称能逐渐减小, 对于这种现象的一种可能的解释是: 对称能本质上是一种量子效应, 随着温度的升高, 量子效应逐渐减弱, 导致对称能相应地减小.

4 小结

采用 Hartree-Fock 理论, 基于扩展的 Skyrme 有效相互作用, 在抛物线近似下, 解析地给出了零温度时对称能的密度相关形式. 结果表明对称能强度系数在开始时随密度的增

大而增大,然后达到最大值再逐渐减小、消失,甚至变成负的.这与变分多体理论在零温度时的计算结果完全一致.同时,讨论了对称能的温度相关性,发现对称能随着温度的升高而减小,在温度较低时,对称能强度系数与温度的关系能较好地符合抛物线规律.

关于对称能在高密度时的性质以及对称能的温度相关性,目前研究得还很不够,不同理论甚至还给出了相互矛盾的结果.关于这些都有待于核物理实验及核天文学观测的进一步验证.本文的研究希望能增进人们对对称能的更深一步的理解.

参 考 文 献

- 1 Zhang Fengshou, Ge Lingxiao. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1992, **16**(7):666—669
(张丰收, 葛凌霄. 高能物理与核物理, 1992, **16**(7):666—669)
- 2 Zhang Fengshou. Z. Phys., 1996, **A356**:163—170
- 3 Zhang Fengshou, Chen Liewen. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1999, **23**(12):1190—1196
(张丰收, 陈列文. 高能物理与核物理, 1999, **23**(12):1190—1196)
- 4 Donati P et al. Phys. Rev. Lett., 1994, **72**(18):2835—2838
- 5 Jean D J et al. Phys. Lett., 1995, **B356**:429—433
- 6 Li B A, Ko C M, Bauer W. Int. J. Mod. Phys., 1998, **E7**(2):147—229
- 7 Ge L X, Zhuo Y Z, Norenberg W. Nucl. Phys., 1986, **A459**(1):77—92
- 8 Wiringa R B, Fiks V, Fabrocini A. Phys. Rev., 1988, **C38**(2):1010—1037
- 9 Lattimer J M et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **66**(21):2701—2704
- 10 Siemens P J. Nucl. Phys., 1970, **A141**(2):225—248
- 11 Lagaris I E, Pandharipande. Nucl. Phys., 1981, **A369**(3):470—482
- 12 Baym G, Bethe H A, Pethick C J. Nucl. Phys., 1971, **A175**(2):225—271
- 13 Thorsson V, Prakash M, Lattimer J M. Nucl. Phys., 1994, **A572**(3/4):693—731
- 14 Prakash M, Ainsworth T L, Lattimer J M. Phys. Rev. Lett., 1988, **61**(22):2518—2521
- 15 Kutschera M, Wojcik W. Phys. Rev., 1993, **C47**(3):1077—1085

Density and Temperature Dependent Symmetry Energy*

Chen Liewen^{1,2} Zhang Fengshou^{1,2,3}

1 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator,
Lanzhou 730000)

2 (Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

3 (CCAST (World Laboratory), Beijing 100080)

Abstract Within the framework of Hartree-Fock theory by using the extended Skyrme effective interaction, the density dependence of symmetry energy is derived analytically with parabolic approximation at zero-temperature. It is shown that the parabolic approximation is applicable within a rather large density region and almost for all relative neutron excess. The symmetry energy depends on density terms of $\rho^{2/3}$, ρ , $\rho^{\gamma+1}$, $\rho^{5/3}$ and $\rho^{\gamma+5/3}$. At finite temperatures, the parabolic approximation between symmetry energy and relative neutron excess is still appropriate. In addition, the temperature dependence of symmetry energy is predicted. It is found that the symmetry energy decrease with increment of temperature and the parabolic law between symmetry energy and temperature is satisfied at lower temperatures.

Key words symmetry energy, density, temperature, parabolic law

Received 26 October 1998

* Project (19609033, 19875068 and 19847002) Supported by National Natural Science Foundation of China, the Science Foundation of the Chinese Academy of Sciences and the Science Foundation of the Chinese Educational Commission