

文章编号: 1007-4627(2005)01-0027-03

## 中子皮厚度与中子星半径\*

李俊<sup>1,2</sup>, 沈刚<sup>1,2</sup>, G. C. Hillhouse<sup>3</sup>, 孟杰<sup>1,2,4,#</sup>

(1 兰州重粒子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000;

2 北京大学物理学院, 北京 100871;

3 Department of Physics, University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa;

4 中国科学院理论物理研究所, 北京 100080)

**摘要:** 在相对论平均场理论框架下在拉氏量密度中引入同位旋相关的高阶修正项, 研究了中子皮厚度和中子星半径的关系. 利用有效相互作用 PK1 得到<sup>208</sup>Pb 的中子皮厚度最小可达 0.17 fm, 这与近期 Skyrme-HF 模型得到的结果一致. 随着同位旋相关的高阶修正项系数的变化,<sup>208</sup>Pb 的中子皮厚度和中子星半径的变化趋势相同.

**关键词:** 相对论平均场; 同位旋相关高阶修正项; 中子皮; 中子星

**中图分类号:** O571.21 **文献标识码:** A

### 1 引言

有效相互作用的相对论平均场理论<sup>[1]</sup>被广泛地应用于描述核物质和有限核系统的性质, 并且取得了很大的成功. 它不但可以成功地描述稳定谷附近核的性质<sup>[2]</sup>, 而且也可以被用来预言丰中子或丰质子的奇特核的性质<sup>[3-5]</sup>. 为了更准确地得到中子星的性质, 必须了解极端不对称核物质在高压状态下的物态方程, 但实验所能提供的仅仅是核物质在饱和密度的性质. 因此, 研究极端不对称核物质性质的密度相关性将有助于把核物质的物态方程外推到高密情况.

由于<sup>208</sup>Pb 的中子皮与中子星物质在相同密度下的物质组成是相同的, 因此对<sup>208</sup>Pb 的中子分布和中子皮性质的研究可以对中子星的研究提供重要的信息. 一般地, 相对论平均场模型给出的<sup>208</sup>Pb 中子皮的厚度为 0.2—0.3 fm, 而一般实验给出的结果为 0.0—0.2 fm. 因此, 文献<sup>[6]</sup>在相对论平均场模型的拉氏量中引入介子间的非线性耦合项, 降低了<sup>208</sup>Pb 中子皮的理论计算结果. 在此基础上, 我们在相对论平均场理论拉氏量密度中引入同位旋相关的高阶修正项, 来研究中子皮和中子星这两种不对

称核子物质体系.

### 2 理论简介

相对论平均场模型的出发点是包含重子 B, 介子  $\sigma$ ,  $\omega$  和  $\rho$  及其相互作用的有效拉氏量密度. 关于相对论平均场理论的详细阐述及其对有限核和中子星的描述可参见文献<sup>[4, 7, 8]</sup>以及其引用的参考文献. 新增加的同位旋相关的高阶修正项的具体形式为

$$l' = 4\Lambda_\nu g_\rho^2 \boldsymbol{\rho}_\mu \cdot \boldsymbol{\rho}^\mu g_\omega^2 \omega_\mu \omega^\mu - \bar{\psi}_{G\rho} \gamma^\mu \left[ \Gamma_1 \frac{g_\sigma \sigma}{m} + \Gamma_2 \left( \frac{g_\sigma \sigma}{m} \right)^2 \right] \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\rho}_\mu \psi, \quad (1)$$

其中等号右边第一项为文献<sup>[5]</sup>中引入的介子间的非线性耦合项, 其中  $\Lambda_\nu$  为  $\omega$  和  $\rho$  介子之间的耦合系数. 第二项为同位旋相关的高阶修正项,  $\Gamma_1$  和  $\Gamma_2$  为  $\sigma$  与  $\rho$  介子之间的耦合系数.

### 3 计算结果与讨论

本文采用有效相互作用 PK1<sup>[9]</sup> 分别计算了

收稿日期: 2004 - 08 - 31

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(G2000077407); 国家自然科学基金资助项目(10025522, 10221003, 10047001)

作者简介: 李俊(1972—), 男(汉族), 湖北枣阳人, 博士研究生, 从事核物理理论研究.

# 联系人: 孟杰, E-mail: mengj@pku.cn

$^{208}\text{Pb}$ 的中子和质子密度分布以及质量为 1.4 倍太阳质量的中子星的半径. 具体步骤为: 对于每一个给定的介子间的非线性耦合项系数  $\Lambda_v$  (或同位旋相关的高阶修正项系数  $\Gamma_1$  或  $\Gamma_2$ ), 利用有效相互作用 PK1, 在费米动量  $k_F=1.15\text{ fm}^{-1}$  处, 核物质的对称能  $\sim 26.08\text{ MeV}$ , 确定重子与  $\rho$  介子的耦合常数  $g_\rho$ , 然后用于计算  $^{208}\text{Pb}$  和中子星. 关于有限核和中子星的计算细节可参见文献[4, 8].

图 1 给出了对于不同的  $\Lambda_v$  和  $\Gamma_1$  时,  $^{208}\text{Pb}$  的中子和质子的密度分布情况. 从图 1 中可以看出, 对于所有的  $\Lambda_v$  和  $\Gamma_1$  的组合,  $^{208}\text{Pb}$  的质子密度分布几乎保持不变; 对于不同的  $\Lambda_v$  和  $\Gamma_1$  的值, 中子密度分布不同. 随着  $\Lambda_v$  和  $\Gamma_1$  的增加,  $^{208}\text{Pb}$  中心的中子密度增加, 从而导致中子皮的厚度减小. 例如, 当  $\Lambda_v$  和  $\Gamma_1$  都为零时, 中子皮的厚度  $S$  为  $0.277\text{ fm}$ , 而当  $\Lambda_v=0.03, \Gamma_1=0.10$  时, 中子皮的厚度减小到  $0.185\text{ fm}$ . 这是由于引入的修正项在高密度时使核物质对称能的密度依赖性变软的缘故. 同样地, 如果考虑  $\Lambda_v$  和  $\Gamma_2$ , 也会给出相同的结论.

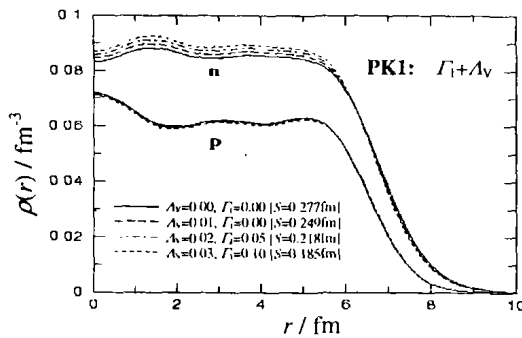


图 1 采用不同的  $\Lambda_v$  和  $\Gamma_1$  时,  $^{208}\text{Pb}$  的中子和质子密度分布

图 2 给出了  $^{208}\text{Pb}$  的中子皮厚度  $S$  与质量为 1.4 倍太阳质量的中子星的半径  $R$  之间的关系. 图中圆

圈为只考虑  $\Lambda_v$  时的情况. 每一条实线为  $\Lambda_v$  不变,  $\Gamma_1$  (上) 或  $\Gamma_2$  (下) 增加时, 质量为 1.4 倍太阳质量的中子星的半径与  $^{208}\text{Pb}$  的中子皮厚度的变化情况, 图中箭头表示  $\Gamma_1$  或  $\Gamma_2$  增加变化的趋势. 计算得到  $^{208}\text{Pb}$  的中子皮厚度最小可达  $0.17\text{ fm}$  左右, 这与近期 Skyrme-HF 模型得到的结果一致.

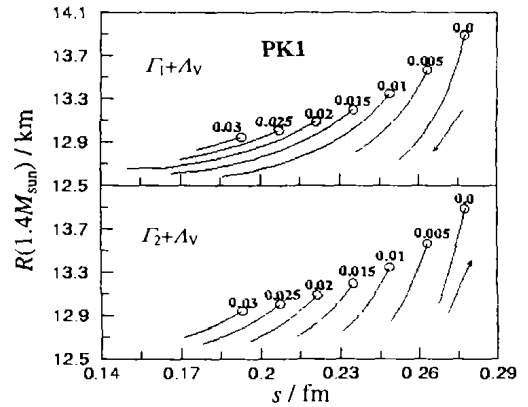


图 2 对于不同的  $\Lambda_v$  和  $\Gamma_1$  (上) (或  $\Gamma_2$  (下)), 1.4 倍太阳质量中子星的半径与  $^{208}\text{Pb}$  的中子皮厚度之间的关系. 图中圆圈为只考虑  $\Lambda_v$  时的情况.

### 4 结论

在相对论平均场理论中引入了同位旋相关的高阶修正项, 研究了  $^{208}\text{Pb}$  中子皮与中子星半径的关系. 得到的  $^{208}\text{Pb}$  最小中子皮与近期 Skyrme-HF 模型得到的结果一致. 基于  $^{208}\text{Pb}$  的中子皮厚度与中子星性质之间的这种关联, 如果实验上能够对  $^{208}\text{Pb}$  的中子半径或者中子皮厚度进行精确测量, 不仅可以对相对论平均场模型做出进一步的检验, 也会对中子星的物态方程、半径、质量以及壳层结构等性质提供重要信息.

### 参 考 文 献

[1] Serot B D, Walecka J D. *Advance in Nucl Phys*, 1986, **16**: 1.  
 [2] Ring P. *Prog Part Nucl Phys*, 1996, **37**: 193.  
 [3] Meng J, Ring P. *Phys Rev Lett*, 1996, **77**: 3 963.  
 [4] Meng J. *Nucl Phys*, 1998, **A635**: 3.  
 [5] Meng J, Ring P. *Phys Rev Lett*, 1998, **80**: 460; Meng J, Tanihata I, Yamaji S. *Phys Lett*, 1998, **B419**:1.  
 [6] Horowitz C J, Pickarewicz J. *Phys Rev Lett*, 2001, **86**: 5 647.  
 [7] Ban S F, Li J, Zhang S Q, *et al.* *Phys Rev*, 2004, **C69**: 045805.  
 [8] 李俊, 班淑芳, 贾焕玉等. *高能物理与核物理*, 2004, **28** (2): 140.  
 [9] Long W H, Meng J, Giai N V, *et al.* *Phys Rev*, 2004, **C69**: 034319.

**Abstract:** Provenance characteristic is an important scientific parameter to identify ancient porcelain wares unearthed from sites and graves. The porcelain samples of Si-Long-Kou kiln of Zhejiang Province, Hong-Zhou kiln of Jiangxi Province and Yao-Zhou kiln of Shanxi Province have been analyzed with neutron activation analysis (NAA). The experimental data were studied with statistic methods. The results show that the chemical compositions of porcelain body samples for three kilns were different. The difference was able to be identified. The body materials of both Si-Long-Kou Yue kiln and Hong-Zhou kiln of Jiangxi were similar. The samples of Yao-Zhou kiln in north of China existed obvious difference.

**Key words:** celadon; provenance property; neutron activation analysis

(上接第 28 页)

## Thickness of Neutron-skin in $^{208}\text{Pb}$ and Radius of a 1.4 Solar Mass Neutron Star\*

LI Jun<sup>1,2</sup>, SHEN Gang<sup>1,2</sup>, G. C. Hillhouse<sup>3</sup>, MENG Jie<sup>1,2,4</sup>

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

2 School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

3 Department of Physics, University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa;

4 Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** By adding isospin dependent high order correction terms to existing relativistic mean field models, the thickness of neutron-skin in  $^{208}\text{Pb}$  and the radius of 1.4 solar mass neutron star are studied. The effective interaction PKI would lead the thickness of neutron-skin to a minimum of 0.17 fm which agrees with the analysis from Skyrme-HF models. The coupling constants of the isospin dependent high order correction terms tend to change, the thickness of neutron-skin and the radius of neutron stars change simultaneously.

**Key words:** relativistic mean field; isospin dependent high order correction; neutron-skin; neutron star

\* **Foundation item:** Major State Basic Research development Program (G2000077407); National Natural Science Foundation of China (10025522, 10221003, 10047001)