

相对论平均场理论对重核中结团现象的研究

王士虎¹⁾ 郭建友

(安徽大学物理与材料科学学院 合肥 230023)

摘要 用相对论平均场理论结合结团模型对重核结团现象进行了研究. 首先将原子核分为两个部分, 然后用相对论平均场模型对原子核的核子按束缚能的高低来分布, 结果获得了与实验相一致的结团. 这表明相对论平均场模型也适用于重核结团现象的研究.

关键词 相对论平均场 重核结团

1 引言

重核结团的研究中占据很重要的地位^[1]. 自从 Sandulescu 等预言重的结团自发裂变^[2]以来, 人们陆续发现了很多重的结团自发裂变现象 (^{14}C , ^{20}O , ^{24}Ne , ^{28}Mg , $^{32,34}\text{Si}\dots$)^[3], 导致了对重结团结构的关注. 目前人们建立了许多结团模型, 如统一模型, 超非对称裂变模型分析 (ASAFM)^[4], 有效液滴模型 (ELDM)^[5], 密度依赖的结团模型 (DDCM)^[6-11]等.

除此之外, 人们建立了既包括结团的描述又包括平均场的描述的费密子的分子动力学方法 (FMD)^[12], 反对称分子动力学方法 (AMD)^[13]等, 也已经可以很好地解决轻核结团结构的模型. 最近, P.Arumugam 等^[14]用相对论平均场模型 (RMF) 给出的分布密度也对轻核结团结构给出了一个清晰的物理图象, 并且与实验结果很好的符合. 但是, 由于有些重核中存在较强的自旋-轨道耦合, 他们无法用由相对论平均场模型 (RMF) 给出的分布密度得到这些重核中的结团结构^[14].

本文根据结团放射性的理论中的一些基本假设 (原子核分成子核和结团两部分, 这两部分与单个原子核具有相似的物质密度分布)^[6-11]将原子核分成了内外两部分, 利用相对论平均场模型 (RMF) 对这两个部分结合能进行了计算, 很自然的导出了重核结团结构. 通过对目前已知的大部分具有重核结团放射性的重核进行计算, 发现与实验符合的比较好.

2 理论框架

相对论平均场理论 (RMF)^[15, 16]是一个相当成功的理论, 它解决了原子核领域的很多难题, 我们在这里同样是用它来解决重核结团的. 首先, 我们给出相对论平均场理论 (RMF) 的拉格朗日密度^[15, 17-20]:

$$\begin{aligned} L = & \bar{\Psi} \left[i\gamma^\mu \partial_\mu - m - g_\sigma \sigma - g_\omega \gamma^\mu - g_\rho \gamma^\mu \tau \cdot \rho_\mu - \right. \\ & \left. e\gamma^\mu \frac{1-\tau_3}{2} A_\mu \right] \Psi + \frac{1}{2} \partial^\mu \sigma \partial_\mu \sigma - \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 - \\ & \frac{1}{3} g_2 \sigma^3 - \frac{1}{4} g_3 \sigma^4 - \frac{1}{4} \omega^{\mu\nu} \omega_{\mu\nu} + \\ & \frac{1}{2} m_\sigma^2 \omega^\mu \omega_{\mu\nu} + \frac{1}{4} c_3 (\omega^\mu \omega_\mu)^2 - \\ & \frac{1}{4} \rho^{\mu\nu} \rho_{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho^\mu \cdot \rho_\mu - \frac{1}{4} A^{\mu\nu} A_{\mu\nu}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 Ψ 是核子的 Dirac 旋量, 对应的质量为 m . ω 和 ρ 分别是 isoscalar-scalar 和 isoscalar-vector 介子. σ 是 isovector-vector 介子. 光子场 A 提供了原子核中的电磁属性. 相关张量如下:

$$\omega^{\mu\nu} = \partial^\mu \omega^\nu - \partial^\nu \omega^\mu, \quad (2)$$

$$A^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu, \quad (3)$$

$$\rho^{\mu\nu} = \partial^\mu \rho^\nu - \partial^\nu \rho^\mu - 2g_\rho \rho^\mu \times \rho^\nu, \quad (4)$$

将拉格朗日密度代入 Euler-Lagrange 方程, 我们很快得到核子的场方程. 由于我们只涉及到原子核的基态

1) E-mail: wshihu.1@yahoo.com.cn

性质, 我们可以设介子场和光子场是静态的经典场, 核子在经典场中做独立运动.

3 计算细节

对于参数的选择, 我们对原子核采用了较好的符合重核性质的一组参数NL3. 值得注意的是, 对关联对重核的定量计算是十分重要的, 所以我们采用了简洁而有效的固定能隙的BCS (Barden-Cooper-Schrieffer) 方法处理对关联: $\Delta = \frac{12}{\sqrt{A}}$. 将对相互作用作为微扰项, 对不成对的核子采用泡利阻塞的办法处理. 在这里, 我们采用变形轴对称谐振子基展开的办法(主壳 $N_b = N_f = 20$), 参数 β_2 由核电四极矩 Q 给出. 这里的 Q 为

$$Q = Q_n + Q_p = \sqrt{\frac{9}{5\pi}} AR^2 \beta_2, \quad (5)$$

其中 $R = 1.2A^{1/3} \text{fm}$, 输入的形变参数 β 的初值选取任意合理的值.

我们以如下方式考虑要解决的问题. 先假设将某个原子核分成两部分, 则这两部分应可视为两个新的独立的原子核(当然这时原子核不一定稳定)^[6-11]. 由于原子核之间是弱关联而原子核内部是强关联, 所以两个原子核之间的作用对于原子核内部的强关联而言只是微扰. 而任意系统在无外界能量激发下基态的粒子总是向更高结合能处迁跃, 所以两个新原子核的最外层核子的迁跃运动仅仅取决于两个原子核最外层结合能的高低. 当任意一个原子核的最外层不再俘获或失去核子时, 两个原子核就稳定了. 此时, 比较小的原子核就应该是分裂出来的结团. 而原子核内部的结合能可以根据相对论平均场模型(RMF)计算, 所以我们用相对论平均场模型(RMF)可以算出这2个原子核的核束缚能(大核用形变核计算, 小核用球形核计算). 由此可以确定可能出现的结团以及结团的结构. 更复杂的问题也能依此解决.

为简化问题, 实际计算中可以先假设分裂出一个质子. 又由于对力的存在, 2个核子在一起时的结合能比单个核子高, 因此实际计算中考虑以2个核子为一个基本单位:

$$S_{2p} = E_B(Z-2, A-2) - E_B(Z, A), \quad (6)$$

$$S_{2n} = E_B(Z, A-2) - E_B(Z, A), \quad (7)$$

其中 $E_B(Z, A)$ 是质子数为 Z , 质量数为 A 的核束缚能. 与此同时, 我们还将实验所得出的结合能与之进行了

比较.

4 结果及讨论

我们知道结团要形成, 必须它本身比较稳定. 中子数目的范围随质子数而定, 而质子数是可以连续变化的. 所以, 为了减少计算量我们首先来看看中子数随质子数改变的情况. 由于纵坐标是能级差, 所以当某一点为负值, 而它的右面为正值时该点代表的结团既不俘获新的核子, 其最外层核子也不被别的核俘获(注: 由于每个原子核里都有 ${}^4\text{He}$ 结团, 所以有些原子核省略了, 纵坐标的值是大核最外层中子或质子的结合能减去小核最外层中子或质子的结合能).

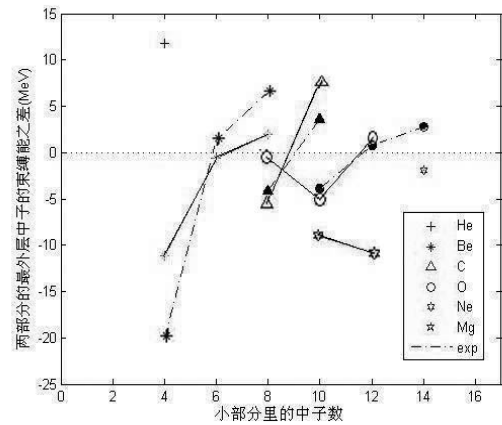


图1 Numerical relations between neutrons and protons in small parts—— ${}^{224}\text{Ra}$.

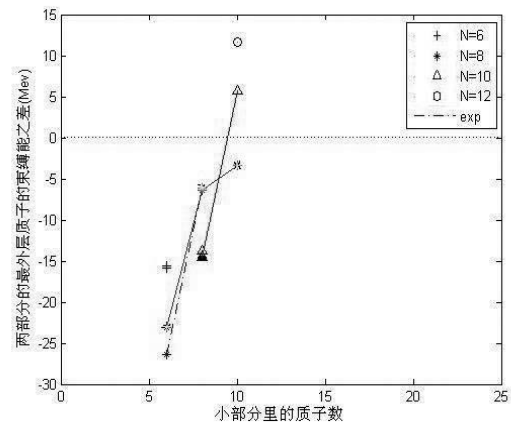


图2 Numerical relations between neutrons and protons in small parts—— ${}^{224}\text{Ra}$.

从图1, 2可知, ${}^{224}\text{Ra}$ 中有 ${}^4\text{He}$ 结团(这点我们在其他原子核的分析中可以看到, 因为每个原子核都一样, 所以我们省略了)还有 ${}^{18}\text{O}-{}^4\text{He}={}^{14}\text{C}$ 结团. 其中, 我们注意到 ${}^{16}\text{C}$ 对最外层的两个核子的束缚极小,

在小结团受到大结团作用时(该作用相对结团内部作用来说极小)会失去两个中子. 所以就不考虑 ^{20}O 时最外层质子的情况.

5 结论

我们通过以上分析可以看到大部分本文所讨论的原子核都符合重核的结团放射性实验的数据. 更进一步得到了重核内部的结团结构. 这样, 我们可以对原

子核的结构获得更深入的了解. 由于本理论只涉及到结合能的计算, 在具体应用中几乎不存在限制条件.

但是, 我们也注意到某些核子的分析结果与实验存在一定差距. 这有可能是由于原子核衰变时使 α 结团发生了分裂, 也有可能是由于(RMF)的误差. 该理论的成功说明考虑了BCS的RMF可以对重核的结团结构作出较好的描述, 这也为结团现象的研究开辟了一条新的途径.

参考文献(References)

- 1 Greiner W. Z. Phys., 1994, **A349**: 315
- 2 Sandulescu A, Poenaru D N, Greiner W et al. Sov. J. Part. Nucl., 1980, **11**: 528
- 3 Rose H J, Jones G A. Nature (London), 1984, **307**: 245
- 4 Poenaru D N et al. Z. Phys., 1986, **A325**: 435
- 5 Duarte S B et al. At. Data Nucl. Data Tables, 2002, **80**: 235
- 6 XU Chang, REN Zhong-Zhou. Phys. Rev., 2003, **C68**: 034319
- 7 XU Chang, REN Zhong-Zhou. Phys. Rev., 2004, **C69**: 024614
- 8 REN Zhong-Zhou, XU Chang, WANG Yong-Qin et al. Nucl. Phys., 2004, **A738**: 318
- 9 XU Chang, REN Zhong-Zhou. Nucl. Phys., 2005, **A753**: 174
- 10 XU Chang, REN Zhong-Zhou. Nucl. Phys., 2005, **A760**: 303
- 11 REN Zhong-Zhou, XU Chang, WANG Zai-Jun. Phys. Rev., 2004, **C70**: 034304
- 12 Feldmeier H, Schnack J. Rev. Mod. Phys., 2000, **72**: 655
- 13 Kanada-En'yo Y, Horiuchi H. Prog. Theor. Phys., 2001, **142**(Suppl.): 205
- 14 Arumugam P, Sharma B K, Patra S K. Phys. Rev., 2005, **C71**: 064308
- 15 Serot B D, Walecka J D. Adv. Nucl. Phys., 1986, **16**: 1
- 16 Serot B D. Rep. Prog. Phys., 1992, **55**: 1855
- 17 Gambhir Y K, Ring P, Thimet A. Ann. Phys., 1990, **198**: 132
- 18 Sugahara Y, Toki H. Nucl. Phys., 1994, **A579**: 557
- 19 Panda P K, Patra S K, Reinhardt J et al. Int. J. Mod. Phys., 1997, **E6**: 307
- 20 Gmuca S. Nucl. Phys., 1992, **A547**: 447

Relativistic Mean Field Study of Clustering in Heavy Nuclei

WANG Shi-Hu¹⁾ GUO Jian-You

(Department of Physics, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract The clustering phenomenon in heavy nuclei is discussed in this paper within the relativistic mean field (RMF) approach. The clusters can be observed in experiments are obtained through the calculated nucleon binding energy distributions according to the RMF theory after the atomic nucleus is divided into two parts, instead of the usual method of analysis to the calculated nucleon density distributions because of the stronger spin-orbit couple in heavy nuclei. The results indicate that the RMF theory is well suited for the study of clustering in heavy nuclei.

Key words RMF, clustering in heavy nuclei

1) E-mail: wshihu.1@yahoo.com.cn