

文章编号: 1007-4627(2004)02-0090-03

相对论无规位相近似*

马中玉

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 讨论了建立在相对论平均场基态的相对论无规位相近似研究中的一致性问题. 研究表明考虑费米海和 Dirac 海的粒子-空穴激发对核的同位旋标量巨共振的能量有很大的影响.

关键词: 相对论无规位相近似; 相对论平均场; 无海近似; 同位旋标量巨共振

中图分类号: O571.25⁺1; O572.33 **文献标识码:** A

近来, 考虑介子非线性自相互作用的相对论平均场理论(RMF)在研究球形、变形的稳定核和远离稳定线核的基态性质上取得了很大的成功^[1]. 核的巨共振激发的微观描述是由无规位相近似(RPA)研究原子核基态上关联的粒子-空穴激发得到的, 相对论无规位相近似(RRPA)是 RPA 方法在相对论的推广^[2-5]. 在相对论研究中一致性的处理尤为重要, 因为核子在原子核中受到的几十 MeV 的势能是由很大的标量势和矢量势的抵消得到的. 不一致性的处理可能使结果产生很大的偏离. 建立在 RMF 基态的 RRPA 的一致性要求相对论无规位相近似研究中的粒子-空穴的剩余相互作用与相对论平均场基态必须从同一个拉氏量来得到; 同时要求 RRPA 与 RMF 的无海近似假设相一致. 满足一致性条件, 相对论无规位相近似计算中不仅要考虑正能态的粒子-空穴激发, 还必须考虑费米海和 Dirac 海的粒子-空穴激发. 研究指出忽略 RRPA 中的一致性在讨论同位旋标量巨共振时会给出不合理的结果.

我们用格林函数方法来讨论 RRPA 计算中的一致性问题, 在谱表示下单粒子格林函数为

$$G_H(r_1, r_2; E) = \sum_p \frac{\varphi_p(r_1)\bar{\varphi}_p(r_2)}{E - \epsilon_p + i\eta} + \sum_h \frac{\varphi_h(r_1)\bar{\varphi}_h(r_2)}{E - \epsilon_h - i\eta} + \sum_a \frac{\varphi_a(r_1)\bar{\varphi}_a(r_2)}{E - \epsilon_a - i\eta}, \quad (1)$$

其中, p, h, a 分别表示为正能的未填充的粒子态、费米海内填满的空穴态和所有的 Dirac 海的负能

态, $\varphi_p(r), \varphi_h(r)$ 和 $\varphi_a(r)$ 分别为相应态的单粒子波函数. 所有被填满核子的态在能量的复平面中相应的极点或割线处在上半平面, 而没有填充的态的极点或割线在下半平面. 在 Hartree 近似下, 即只考虑单核子圈图, 核子的自能可表示为^[6]

$$\begin{aligned} \Sigma_H(x_1, x_2) = & \delta^4(x_1 - x_2) \cdot \\ & \{-ig_\sigma^2 \int d^4x_3 \Delta_\sigma(x_1 - x_3) \text{Tr}[G_H(x_3, x_3^+)] \\ & - \gamma_\mu ig_\omega^2 \int d^4x_3 \Delta_\omega^{\mu\nu}(x_1 - x_3) \text{Tr}[\gamma_\nu G_H(x_3, x_3^+)]\}. \end{aligned} \quad (2)$$

为简单起见, 这儿我们只考虑同位旋标量的标量和矢量介子, 即 σ, ω 介子. 其中 g_σ, g_ω 和 $\Delta_\sigma, \Delta_\omega$ 分别是它们相应的耦合常数和传播子, x^+ 表示时间的迟后. 从核子自能的表示可以看出所有占有的核子态, 即费米海和 Dirac 海中的粒子(处在能量的复平面上半平面的极点或割线)都对核子的自能有贡献, 而所有的 Dirac 海中的粒子的贡献是发散的, 必须作重整化处理. 相对论平均场理论是唯象理论, 介子-核子的耦合常数是由核物质的饱和性质和一系列稳定核的性质来确定. 在 RMF 理论中作了无海假设, 通过核子-介子耦合常数来唯象地包含 Dirac 海中的粒子的贡献. 在 RMF 的无海近似下, 单粒子的格林函数必须用 $\tilde{G}_{\text{RMF}}(r_1, r_2; E)$ 来代替^[7]:

$$\tilde{G}_{\text{RMF}}(r_1, r_2; E) = \sum_p \frac{\varphi_p(r_1)\bar{\varphi}_p(r_2)}{E - \epsilon_p + i\eta} +$$

收稿日期: 2004-02-09; 修改日期: 2004-03-15

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10075080, 10275094); 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000077400)

作者简介: 马中玉(1943-), 女(汉族), 浙江杭州人, 研究员, 博士生导师, 从事原子核多体理论研究.

$$\sum_h \frac{\varphi_h(r_1)\bar{\varphi}_h(r_2)}{E-\epsilon_h-i\eta} + \sum_{\bar{h}} \frac{\varphi_{\bar{h}}(r_1)\bar{\varphi}_{\bar{h}}(r_2)}{E-\epsilon_{\bar{h}}+i\eta}, \quad (3)$$

$\tilde{G}_{\text{RMF}}(r_1, r_2; E)$ 也是建立在 Dirac 方程解的完备基上的，同时满足 Dyson 方程。

在相对论平均场基态的相对论无规位相近似方程可以用响应函数方法来建立，通过求解 Bethe-Salpeter 方程来得到关联的极化矩阵，极化矩阵的虚部相应于原子核对外场的响应，即核的巨共振的强度^[4]。在动量表象中关联的极化矩阵的 Bethe-Salpeter 表示为

$$\begin{aligned} \Pi(Q, Q; k, k', E) = & \Pi_0(Q, Q; k, k', E) - \\ & \sum_i g_i^2 \int d^3k_1 d^3k_2 \Pi_0(Q, \Gamma_i; k, k_1, E) \cdot \\ & \Delta_i(k_1 - k_2, E) \Pi(\Gamma_i, Q; k_2, k', E), \quad (4) \end{aligned}$$

Q, Γ_i 分别为外场和介子-核子顶角算符， i 表示不同的介子，并且对所有的介子求和。 Π_0 和 Π 分别为非微扰的粒子-空穴极化算子和关联的极化算子。原子核的巨共振激发的强度为动量为零时关联的极化算子的虚部：

$$R(Q, Q; E) = \frac{1}{\pi} \text{Im} \Pi(Q, Q; E). \quad (5)$$

用 $\tilde{G}_{\text{RMF}}(r_1, r_2; E)$ 来代替 $\tilde{G}_{\text{H}}(r_1, r_2; E)$ ，非微扰的粒子-空穴极化算子不仅有正能的粒子-空穴激发，还包含费米海和 Dirac 海态之间组成的粒子-空穴对激发。

图 1 给出了采用相对论平均场参数 NL3 在相对论无规位相近似计算的 ^{208}Pb 的同位旋标量和同位旋矢量的多极巨共振激发的强度。从图中可以看到 RRPA 计算的结果与实验值很好地符合，说明 RMF 的有效拉氏量不仅能很好地描述核基态性质，而且也能合理地描述核的巨共振激发态。从图中也可以看出费米海和 Dirac 海态之间组成的粒子-空穴对激发对核的同位旋标量巨共振的影响很大，特别是与核的不可压缩性相关的同位旋标量巨单极共振。如果 RRPA 的一致性没有正确处理，得到结果会有很大的偏差。通常认为考虑费米海和 Dirac 海态之间组成的粒子-空穴对激发对消除质心运动伪态是重要的^[7]，由于费米海和 Dirac 海态之间组成的粒子-空穴对之间的矩阵元很小，而且粒子-空穴激发能很大，对核的巨共振的能量的贡献可能很小。为了理解这个结果，我们仔细地研究了费米海

和 Dirac 海态之间组成的粒子-空穴对激发对核的同位旋标量巨单极共振的贡献^[8]。分析表明，对于粒子-空穴激发的剩余相互作用同样存在着标量场和矢量场贡献的抵消。由于核子波函数的 Dirac 结构，矢量场对费米海和 Dirac 海态之间组成的粒子-空穴对的矩阵元变得很小，使得标量场和矢量场贡献抵消的情况被破坏，标量场的贡献变得尤为重要。这种情况，如图 1 中所示，在标量场起主要作用的核的巨共振激发时存在，如核的同位旋标量巨共振，而在以同位旋矢量、矢量介子为主的核的同位旋矢量巨共振激发中它们的贡献很小。

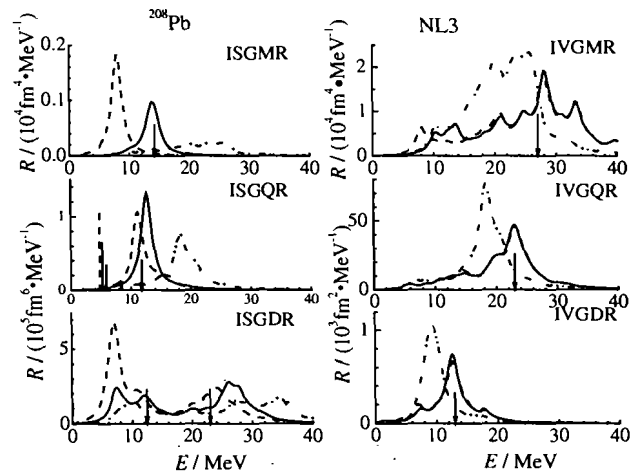


图 1 ^{208}Pb 的同位旋标量和同位旋矢量巨多极共振强度随能量的分布

GMR, GQR 和 GDR 分别为核的巨单极、巨四极和巨偶极共振，IS 和 IV 分别表示同位旋标量和同位旋矢量；- - - 和 - 分别表示为非微扰的粒子-空穴激发强度和巨共振强度，--- 是不考虑费米海和 Dirac 海态之间组成的粒子-空穴对激发时计算的巨共振强度，↓ 表示实验值。计算采用相对论平均场参数 NL3。

相对论无规位相一致性处理的重要性还可以通过与时间相关的相对论平均场(TDRMF)在小振幅极限下的等价性来讨论^[9]。在 TDRMF 计算中，尽管在每个时刻都作了无海假设，而相对论密度矩阵的变化在一套静态的正交完备基的展开不仅包含所有的正能解，还包含所有的 Dirac 海的解。我们的研究表明，只有考虑费米海和 Dirac 海态之间组成的粒子-空穴对激发的 RRPA 计算结果才与小振幅极限下 TDRMF 计算结果完全一致。我们还讨论了同位旋标量巨单极共振能量逆权重的求和规则，严格的相对论无规位相一致性处理满足求和规

则^[10].

采用相对论无规位相近似, 我们进一步研究了远离 β 稳定线核的巨偶极共振, 得到在能量小于 10 MeV 的共振强度^[11]. 研究了核的自旋-同位旋激发, Gamow-Teller 共振, 讨论了相对论效应对 Gamow-Teller 共振强度压低的影响^[12].

总之, 我们用建立在相对论平均场基态的相对论无规位相近似研究了核的同位旋标量和同位旋矢量巨多极共振, 得到与实验结果很好的符合. 对相对论研究中, 特别是相对论无规位相近似研究中的一致性问题的深入细致的分析和研究. 一致性要

求相对论无规位相近似研究中的粒子-空穴的剩余相互作用必须与相对论平均场基态从同一个拉氏量来得到; 同时要求 RRPA 计算与 RMF 的无海近似假设相一致. 满足一致性条件, 相对论无规位相近似计算中不仅要考虑正能态的粒子-空穴激发, 还必须考虑费米海和 Dirac 海的粒子-空穴激发. 讨论了 RRPA 一致性处理, 考虑费米海和 Dirac 海的粒子-空穴激发的重要性. 从能量逆权重的求和规则和与时间相关的相对论平均场理论的等价性等多方面讨论了费米海和 Dirac 海的粒子-空穴激发的作用.

参 考 文 献:

- [1] Ring P. Prog Part Nucl Phys, 1996, 37: 197.
 [2] L'Huillier M, Giai N V. Phys Rev, 1989, C39: 2 022.
 [3] Ma Z Y, Giai N V, Toki H, *et al.* Phys Rev, 1997, C55: 2 385.
 [4] Ma Z Y, Toki H, Giai N V. Nucl Phys, 1997, A627: 1.
 [5] Ma Z Y, Toki H, Chen B Q, *et al.* Prog Theo Phys, 1997, 98: 917.
 [6] Serot B D, Walecka J D. New York-London, 1986, 16: 1.
 [7] Dawson J F, Furnstahl R J. Phys Rev, 1990, C42: 2 009.
 [8] Ma Z Y, Giai N V, Wandelt A, *et al.* Nucl Phys, 2001, A686: 173.
 [9] Ma Zhongyu. Commun Theor Phys, 1999, 32: 493; 马中玉. 原子核物理评论, 2001, 18(4): 286.
 [10] Ring P, Ma Zhongyu, Giai N V, *et al.* Nucl Phys, 2001, A694: 249.
 [11] 曹李刚, 刘 玲, 陈宝秋等. 物理学报, 2001, 50: 638.
 [12] Ma Z Y, Chen B Q, Giai N V, *et al.* Eur Phys J A, in press, nucl-th/0308021.

Relativistic Random Phase Approximation*

MA Zhong-yu

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The fully consistent relativistic random phase approximation (RRPA) built on the relativist mean field (RMF) ground state is presented. The fully consistent RRPA requires that the nuclear RMF wave function and the RRPA renormalization are calculated in a same effective Lagrangian. A theoretically complete treatment of the RRPA at the mean-field level with no sea approximation must include not only the usual particle-hole states, but also the pairs formed from the occupied Fermi states and Dirac states. Effects of inclusion of Dirac sea states in various multipole excitations are investigated. Considerable effects on the isoscalar giant multipole resonances are observed.

Key words: relativistic random phase approximation; relativistic mean field theory; no sea approximation; isoscalar giant resonance

* Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10075080, 10275094); Major State Basic Research Development Program in China(G2000077400)