



评述

原子核协变密度泛函理论及其应用专辑

原子核自旋同位旋集体激发态和相关物理量

吴华^{①②}, 白春林^{②*}, 宋曾强^②

① 中国民航飞行学院计算机学院, 广汉 618307;

② 四川大学物理科学与技术学院, 成都 610065

*联系人, E-mail: bclphy@scu.edu.cn

收稿日期: 2015-08-03; 接受日期: 2015-11-17; 网络出版日期: 2015-12-14

国家自然科学基金(批准号: 11105094)和四川大学优秀青年基金(编号: 2082604174215)资助项目

摘要 本文介绍原子核的自旋-同位旋集体激发态, 以及研究这些集体激发态的常用 HF+RPA 或 HFB+QRPA 理论模型. 这些集体激发态的研究能够获得对自旋相关的核子-核子相互作用的信息和理解. 自洽的 Skymre HF+RPA 模型被用于研究闭壳核的 GT 和 SD(自旋偶极)跃迁, 张量相互作用对这些跃迁的主峰能量有显著效应, 这些效应对 Skyrme 张量相互作用的强度给出很强限制. 对于 N~Z 的 pf 壳原子核, 同位旋标量(IS)对相互作用对低能强 GT 态有决定性作用, 通过某些特定核的低能强 GT 态的能量很好地限制 IS 对相互作用的强度.

关键词 自旋-同位旋集体激发态, 张量力, 同位旋标量对相互作用, Gamow-Teller 跃迁, 低能强 GT 态

PACS: 21.10.Ky, 21.60.Cs, 21.60.Jz, 23.20.-g

1 简介

原子核存在各种各样的集体激发态^[1], 根据是否与自旋相关可以把这些集体激发态分为电跃迁(自旋无关)和磁跃迁(自旋相关)激发态; 根据有无电荷交换可分为正常激发态和电荷交换激发态. 自旋-同位旋激发态是原子核的一种自旋相关的电荷交换激发态, 这类激发态可以通过电荷交换反应如(n,p), (p,n), (3He,t), (t,3He)等探测到, 如图 1 所示^[2], 这些反应的微分截面可以通过角动量展开为 $L=0,1,2,3,\dots$, 其激发算符可以写为

$$\hat{O}_{LJM\pm} = \sum_{i=1}^A f(r_i) (Y_L^i \sigma_i)_{JM} \tau_{\pm}^i, \quad (1)$$

上式中 $\tau_{\pm} = \tau_x \pm i\tau_y$ 是同位旋升降算符, 对应于 $\Delta\tau = \pm 1$; $f(r_i)$ 是形状因子, 实验尚未测定, 因为对于每个确定 L 的反应截面其实是包含了很多种激发模式, 一方面这些模式中只有少数的模式难以区分, 另一方面这些模式在截面中占的比例也很难测出. 例如如图 1 中 $L=0$ 的反应截面尚未区分出主要的组成部分 Gamow-Teller (GT) 和同位旋矢量自旋单极跃迁 (IVSM) 两种激发, 其算符分别写为

$$\hat{O}_{GT\pm} = \sum_{i=1}^A \sigma_i \tau_{\pm}^i, \quad (2)$$

$$\hat{O}_{IVSM\pm} = \sum_{i=1}^A r_i^2 \sigma_i \tau_{\pm}^i. \quad (3)$$

引用格式: 吴华, 白春林, 宋曾强. 原子核自旋同位旋集体激发态和相关物理量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 012015
Wu H, Bai C L, Song Z Q. Spin-isospin collective excited states of nuclei and relevant physics quantities (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 012015, doi: 10.1360/SSPMA2015-00400

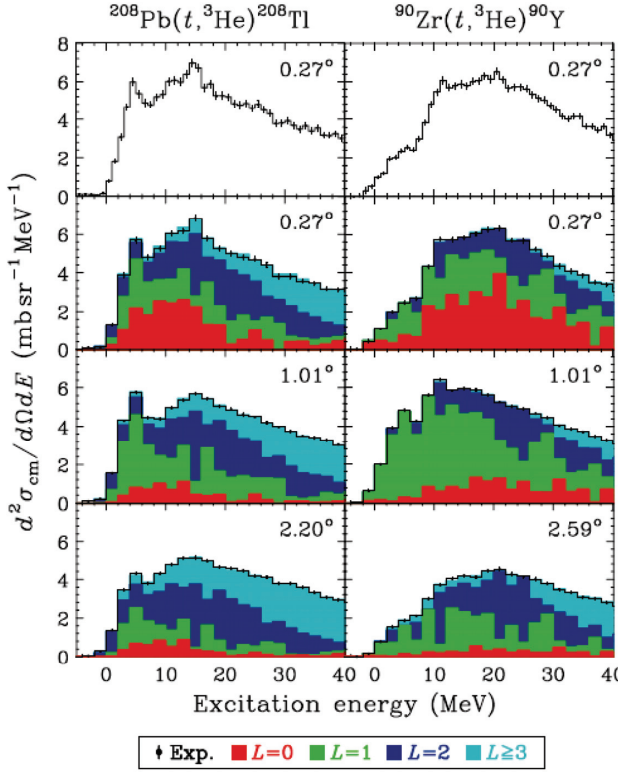


图 1 (网络版彩图)微分截面的分级展开. 图片引自文献[2]
Figure 1 (Color online) The decomposing of the cross section spectra [2].

对于 $L>0$ 的跃迁模式, 则一般认为探测到的是最低阶的算符所对应的激发态, 这些算符是

$$\hat{O}_{LJM\pm} = \sum_{i=1}^A r_i^L (Y_L^i \sigma_i)_{JM} \tau_{\pm}^i, \quad (4)$$

从 $L=1, 2, 3, \dots$, 分别称为自旋-偶极(SD), 自旋-四极(SQ), 自旋-八极(SO)跃迁等. 而且, 实验时对总角动量 J 的探测也是非常困难的, 近年通过使用极化的炮弹核打靶才把 SD 的不同 J 值确定出来^[3].

自旋-同位旋激发态的研究对提取核子-核子相互作用中的自旋相关部分信息有着非常重要的作用; 同时通过这些激发态还能计算原子核的 β^{4-10} 和双 β 衰变的半衰期^[11-14], 前者是天体核合成过程中的 r 过程计算的输入量, 后者的零中微子双 β 衰变($0\nu\beta\beta$)本身就能说明中微子是自身的反粒子、而且还能确定中微子质量. 因此, 原子核的自旋同位旋激发态有很重要的研究价值.

本文将在后面几部分中分别介绍被广泛用于研究原子核集体激发态的无规相位近似(RPA)理论, 张量力和闭壳核的 GT 和 SD 激发态, $T=0$ 的对相互作用和 N-Z 的核的低能 GT 态的关系. 最后给出总结与展望.

2 自治的 HF+RPA 理论

核多体问题是一个极其复杂的问题, 从微扰多极展开的角度来看, 如果把平均场理论^[15,16]看成零阶近似, 在此基础之上的自治 RPA 理论则相当于一阶近似理论. 对于闭壳核, 平均场理论能给出所有的占据和非占据单粒子态, 从一个占据态跃迁到一个非占据态称为一个组态. RPA 理论定义的集体激发态是所有可能组态的线性叠加, 其产生算符定义为

$$O^{v+} = \sum_{np} X_{np}^v a_p^+ a_n - \sum_{np} Y_{np}^v a_n^+ a_p, \quad (5)$$

其中 a_k^+ 是 k 上的核子产生算符, X 和 Y 是叠加系数, 可以通过 RPA 方程求出,

$$\begin{pmatrix} A & B \\ -B & -A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \Omega \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}, \quad (6)$$

而

$$A_{pn,p'n'} = (\varepsilon_p - \varepsilon_n) \delta_{pp'} \delta_{nn'} + \bar{V}_{pn,p'n'}, \quad (7)$$

$$B_{pn,p'n'} = \bar{V}_{pp',nn'}, \quad (8)$$

其中, ε_k 是平均场理论计算出的 k 态的单粒子能级, $\bar{V}$ 是剩余相互作用^[17].

目前, 被广泛使用的核子-核子相互作用主要包括拟合核子-核子散射实验的现实相互作用, 以及通过平均理论计算拟合原子核基态性质的有效相互作用. 其中, 由于有效相互作用可以实现自治的平均场计算而被广泛用于研究中重以上的原子核, 这些有效相互作用主要分为: 有限程 Gogny 相互作用, 零程 Skyrme 相互作用, 和相对论的介子交换相互作用(采用该相互作用的自治 HF+RPA 计算于 2008 年才实现^[18]). 这些相互作用可以分为: 中心力、自旋轨道相互作用力、库伦力、三体力(通常使用密度相关的两体力代替)、张量力、以及对相互作用力. 这些相互作用中, 张量力和对相互作用中的同位旋标量部分的强度至今尚未确定, 我们将通过接下来的研究讨论这两种相互作用的效应.

3 张量力与闭壳核的 GT 和 SD 跃迁

很多现实核力和有效相互作用提出的时候就有张量力, 现实核力长期以来很难实现对有限核的平均场计算. 在有效相互作用中, 尤其是 Skyrme 相互作用中, 张量相互作用对闭壳核的平均场仅有对自旋-轨道势的贡献, 这一贡献长期以来很少被包含^[19].

直到 21 世纪初, 放射性核束装置投入使用后在丰中子奇特核中发现了幻数的演化^[20], 为了解释这种演化需要对自旋轨道势进行修正, 所以 Otsuka 等人^[21,22]最早在壳模型计算中加入张量相互作用并成功地解决了这个问题. 这表明了张量力的重要性和在计算中加入张量相互作用的必要性. 在此之后 Skyrme 张量项被加入到平均场计算中, 其对原子核的基态性质和单粒子能级的效应被研究^[23-37]. 然而, 在这些研究中, 使用的张量项参数有很大差异, 甚至连符号的正负都不同. 这表明, 从核的基态似乎难以找到张量相互作用的特征效应以限制张量项的参数. 考虑到这些, 我们在基于 Skyrme 相互作用的 HF+RPA 理论中加入了张量项并研究了张量相互作用对 GT 和 SD 跃迁的效应^[38-44].

GT 跃迁可以提供核子-核子相互作用的信息, 其低能部分对 β 衰变半衰期起非常重要的作用, 进而对天体物理核合成的 r 过程有很重要的影响. 如图 2 所示的 ^{208}Pb 的 GT 强度分布中, 我们作了 3 种计算, 第 1 种计算中 HF 和 RPA 都未包含张量项, 其结果用 00 标记; 第 2 种计算仅在 HF 中加入了张量项, 其结果标记为 10; 第 3 种计算把张量项自洽地加入了 HF 和 RPA 中, 其结果用 11 标记. 从图中很容易发现张量相互作用对 GT 跃迁有 3 种效应, 第 1 种是 GT 的主峰显著下移约 3 MeV; 第 2 种效应是使约 10% 的 GT 强度移到 30 MeV 以上的能区, 这个能区是 2p-2h 的典型能区^[45], 这个效应是以往的 1p-1h RPA 理论从未得到过的, 是张量力的一种特殊 RPA 耦合效应; 第 3 种效应是使低能 GT 强度显著移动, 对 ^{208}Pb , 低能 GT 强度被显著下移了约 7 MeV, 而从文献[38]中我们可以发现使用同样的相互作用参数时对 ^{90}Zr , 张量力使低能 GT 态上移了约 5 MeV, 因此不同的闭壳原子核张量力对低能 GT 态的效应都很显著, 而具体是上移还是下移有所不同. 这些显著效应主要源于 GT 和 SQ 的 1^+ 态的算符可以耦合零阶张量 $[(Y_0\sigma_1)_1(r^2Y_2\sigma_1)_1]_0$, 这也正是张量相互作用的重要成分, 而且这种成分为中心和自旋轨道相互作用所未包含的^[39,40]. 在文献[39]中用包含这种相互作用的分离势可以较好地拟合出这样的结果.

图 3 为 ^{208}Pb 中的 SD 强度分布^[41], 其中黑色虚线代表计算时在 HF 和 RPA 中都未加入张量项, 而红色实线表示 HF 和 RPA 中都包含了张量项的计算结

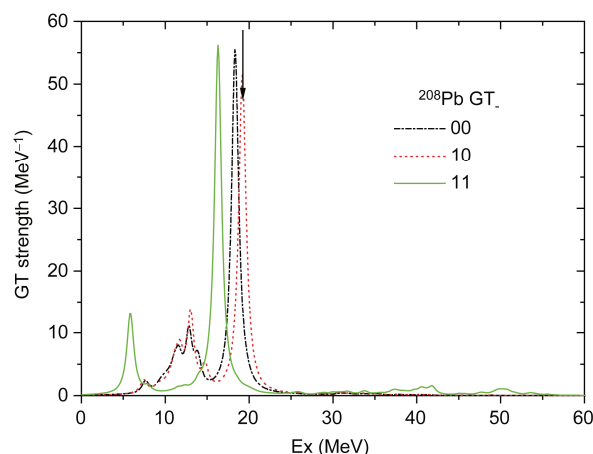


图 2 (网络版彩图) ^{208}Pb 的 GT 强度分布. 图片引自文献[38]
Figure 2 (Color online) GT strength distribution for ^{208}Pb . Figure cited from ref. [38].

果. 实验来自于文献[3], 在实验中使用了极化的炮弹核, 首次分出 SD 跃迁的 3 种跃迁模式的强度分布, 提供了很多关于核子-核子相互作用的信息. 从图 3 中可以很容易地看出未包含张量相互作用时计算的 SD1 态主峰能量比实验观测高 6 MeV 以上, 这是未加入张量相互作用的 HF+RPA 理论的普遍结果, 而包含张量相互作用后理论计算的 SD1 态主峰能量能很好地符合实验结果. 为了检验这个结果的可靠性, 我们采用了 T43 和 Sly5+Tw 两套很不同的参数, 在 T43 中张量项中的自旋三重-奇(Triplet-odd)项的参数是负值, 而在 Sly5+Tw 中为正值, 这两套参数的结果表明张量力的这个效应主要源自于自旋三重-偶(Triplet-even)项. 这一结果是张量相互作用的一个可观测效应. 这一效应在 ^{16}O 的 SD 跃迁实验中再次出现^[44,46], 此外相对论 HF+RPA 也得到类似结果^[47].

考虑到张量力对原子核集体激发态的显著效应, 我们用 ^{208}Pb 和 ^{90}Zr 的 GT 和 SD 实验数据对张量相互作用的自旋三重-偶和自旋三重-奇的项的强度给出了很强的限制, 限制的标准是理论计算的主峰与实验观测的主峰的差距在 2.5 MeV 以内. 根据这个标准, 我们在众多已有的包含张量相互作用的参数中仅找到 T21, T32, T43, T54 这 4 套参数满足这一标准. 此外, 我们把张量相互作用微扰地加入已有的 SGII 相互作用中, 从图中可以看出, 自旋三重-偶张量项的强度大约为 $450 < T < 650 \text{ MeV fm}^5$, 而自旋三重-奇项的强度变化则是在 $-550 < U < 300$ 很大的范围. 从该

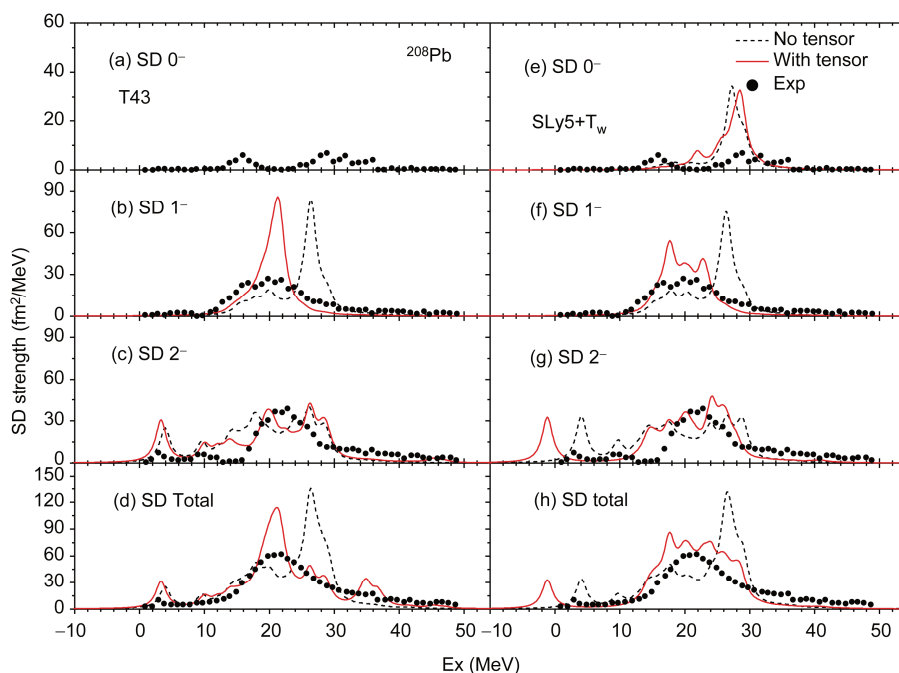


图 3 (网络版彩图) ^{208}Pb 的 SD 强度分布. 图片引自文献[41]

Figure 3 (Color online) SD strength distribution for ^{208}Pb . Figure cited from ref. [41].

图中我们可以看出, 对 T 的限制主要源于 SD 跃迁的 1^- 态能量, 在此基础上, 利用 GT 的主峰可以用于限制参数 U . 值得指出的是, 不是在所有的 Skyrme 参数中加入张量相互作用都能得到相应的张量相互作用的可取值范围, 在 SGII 中加入张量相互作用后能得到如此大的范围(见图 4), 源自于 SGII 参数本身有较合理的 G' 因子, 这给张量相互作用更大的选择范围, 而如果原有的 Skyrme 参数的 G' 不太合理则只能给出较小的可供选择的张量相互作用参数的选择范围, 甚至不能给出可供选择的范围.

因此, 张量相互作用对 GT 和 SD 两种自旋-同位旋跃迁的主峰有很强的效应. 这些效应表明在理论研究时加入张量相互作用的必要性, 反过来这些效应也可以用来对张量相互作用的参数给出很强的限制或用于选择包含张量相互作用的判据.

4 同位旋标量对相互作用和低能 GT 态

核子之间的对相互作用被广泛地认为是源于原子核的奇偶质量差, 以及偶偶核与相邻的奇 A 核的低能激发谱的显著不同. 对相互作用实际上是质子-质子和中子-中子对相互作用(他们是同位旋矢量(IV)的, 质子中子的 IV 部分则由电荷无关性定出)的引入很好地

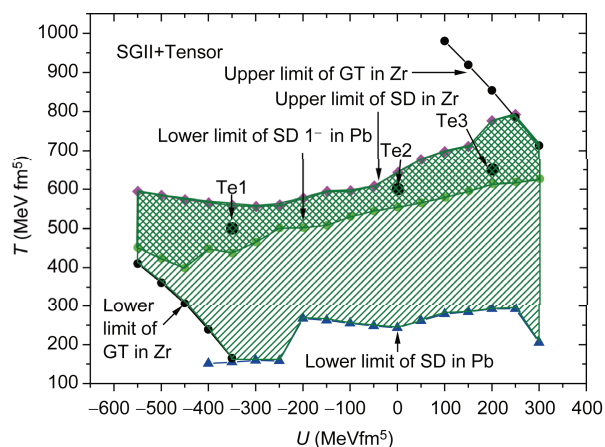


图 4 (网络版彩图)SGII 中加入张量相互作用的强度范围. 图片引自文献[43]

Figure 4 (Color online) The constrained region of tensor interaction added on the top of SGII. Figure cited from ref. [43].

解释了这两个现象. 质子中子间存在的 IS 同位旋标量对相互作用证据是 $N=Z$ 的奇-奇核结合能比想象的大, 而这种奇-奇核与相邻的奇 A 核的低能激发谱差别不显著, 这种现象用只包含 IV 对相互作用的平均场理论无法解释.

但由于到目前为止自洽地包含 IS 对相互作用的平均场理论很难提取出 IS 对相互作用的强度, 所以

一直没有被广泛接受的确定其强度的方法. 为了解决这个问题我们尝试从集体激发态寻找其他便于提取对相互作用强度信息的可观测效应.

我们编写了基于 Skyrme 相互作用的 HFB+QRPA 理论程序, 研究了 $N=Z+2$ 的球形偶-偶核中的低能强 GT 态^[48]. 我们的研究对比实验数据, 指出在少数特定的 $N \approx Z$ 的核中, IS 的对相互作用能把 GT 强度从高能区域移动到低能区域, 并在低能区域形成非常强的 GT 态这一 IS 对相互作用的可观测特征效应^[49]. 如图 5 所示, ^{42}Ca 的 GT 强度分布情况. 计算中我们保持 IV 对相互作用强度不变, 系统地调节了 IS 和相应的 IV 对相互作用强度的比例, 该比例从 $f=0.0, 0.5, 1.0, 1.05$ 和 1.1 , 并对包含和不包含张量相互作用的计算进行对比. 从图 5 中容易发现 $f=1.0-1.1$ 时, (i) 移动到低能区域的 GT 强度的数量(占总强度的 80% 以上)和移动的能量值都很大, 他们远大于在研究 β 衰变时 IS 对相互作用使少量 GT 强度下移的幅度; (ii) IS 对相互作用在这些特定核中对低能 GT 态起决定性的作用, 其他相互作用(如张量力)的效应都被其压制了; (iii) 这些低能 GT 态强度很高, 误差小, 更容易精确测量. 在对比中我们发现 ^{46}Ti 的计算结果

也能和 ^{42}Ca 的类似. 这些低能强 GT 态是至今为止最理想的限制 IS 对相互作用强度的可观测效应.

根据计算的强 GT 态和 IAR 主峰能量差可以很好地限制 IS 对相互作用的强度. 如图 6 所示, $A=42-58$ 的 $N=Z+2$ 的原子核的 GT 和 IAR 主峰能量差. IS 对相互作用的强度是相应的 IV 对相互作用强度的 $1.0-1.05$ 倍时, ^{42}Ca , ^{46}Ti 的 GT 和 IAR 主峰能量差都能很好地符合实验结果, 这也表明在这两个核的低能强 GT 态中 IS 对相互作用压制住了其他的相互作用; ^{50}Cr 的低能 GT 态的强度和能量一定程度上受张量相互作用的影响, 因此 SGII 和 SGII+Te3 的结果有一定差别; 而 ^{54}Fe 和 ^{58}Ni 的低能 GT 态的强度和能量都受张量相互作用的显著影响, 因此 3 个相互作用给出的结果有非常大的差异. 值得指出的是, 在 $f=1.0-1.05$ 时 ^{42}Ca 和 ^{46}Ti 的累积强度求和也能很好地符合实验结果(见文献[49]), 因此 ^{42}Ca 和 ^{46}Ti 的限制是最可靠的. 值得指出的是在文献[50]中使用了其他种类的对相互作用, 利用其他低能激发态也得到类似的结果.

通过以上的讨论, 我们可以发现 IS 对相互作用仅在某些特定核的低能 GT 态中起决定性的作用, 而这些核的低能 GT 态的数据可以用于很好地提取 IS 对相互作用的强度.

5 结论和展望

本文介绍了原子核的自旋-同位旋集体激发态, 如 GT 和 SD 态等, 并介绍了 Skyrme 张量相互作用对中重以上闭壳核的 GT 和 SD 态的显著效应, 通过这些效应可以为张量相互作用提供很强的限制. 但由于目前的 Skyrme 相互作用的中心和自旋轨道耦合相互作用部分还存在一定的不确定性, 得到的对张量相互作用的限制随 Skyrme 参数的不同而有所不同. 此外对某些参数, 即使加入张量相互作用也很难较好地符合中重和重闭壳核的 GT 和 SD 跃迁主峰的能量. 而且, 目前我们对张量相互作用强度的限制仅从较少核的自旋-同位旋激发态给出, 还要用更多的核和更多的激发态进行限制. 此外, 还要从基态性质进行检验. 这是我们即将进行的工作.

对于 IS 对相互作用, 目前基于 Skyrme 相互作用的 HFB+QRPA 理论结果结合最新的实验结果指出,

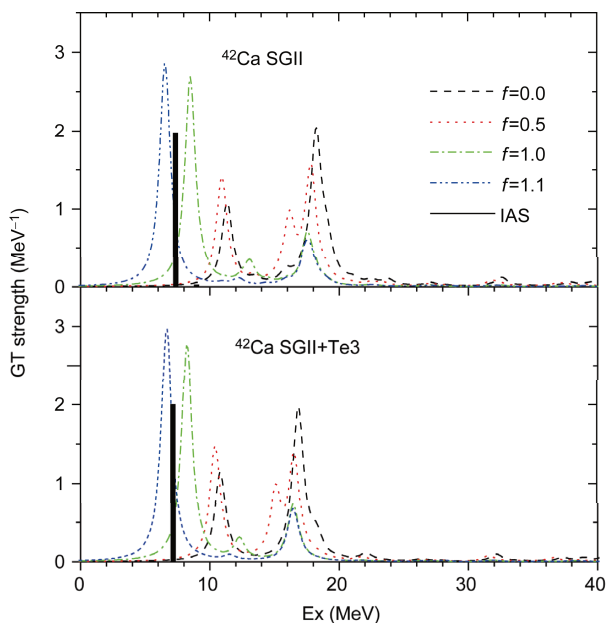


图 5 (网络版彩图) ^{42}Ca 的 GT 强度分布, 包含张量相互作用和不包含张量相互作用的情况. 图片引自文献[49]

Figure 5 (Color online) GT strength distributions of ^{42}Ca , calculated with and without tensor force. Figure cited from ref. [49].

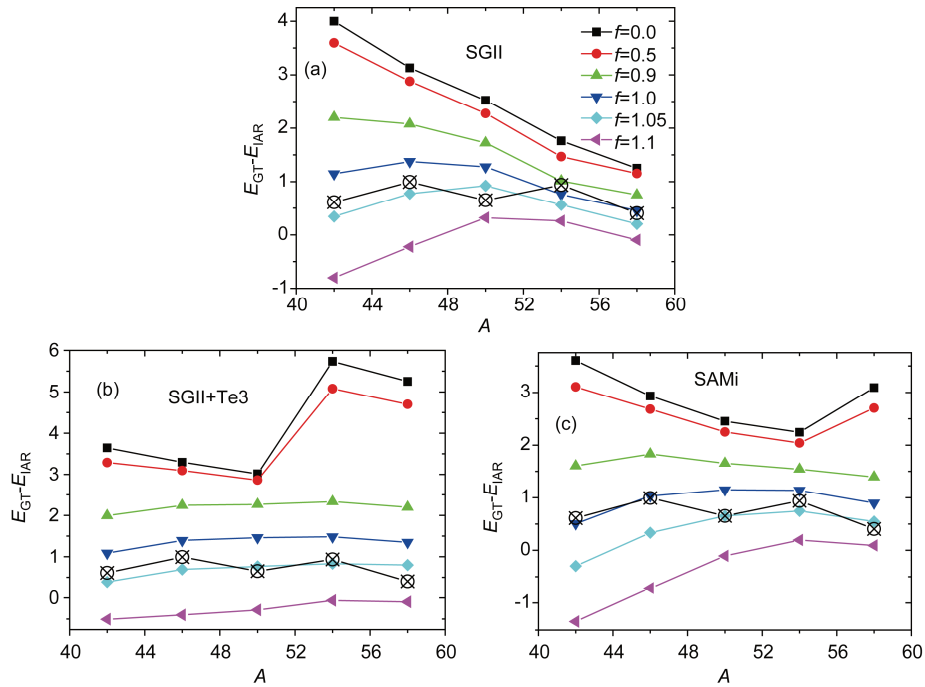


图 6 (网络版彩图)GT 和 IAR 主峰能量差. (a) 图中使用参数 SGII, 未加张量力; (b) 图中使用了加入张量力的参数 SGII+Te3; (c) 图中使用未加入张量力的参数 SAMi. 图片引自文献[49]

Figure 6 (Color online) GT and IAR main peak energy differences. (a) SGII is used without including tensor force; (b) the parameter SGII+Te3 which included tensor force is used; (c) the parameter SAMi without tensor force is used. Figure cited from ref. [49].

IS 对相互作用对某些特定原子核如 ^{42}Ca 和 ^{46}Ti 的低能强 GT 态的形成以及能量和强度都有决定性的作用. 通过 IS 对相互作用的这种特征效应加上系统的

HFB+QRPA 计算, 我们建议 IS 对相互作用的强度是相应 IV 对相互作用强度的 1.0–1.05 倍. 但这一结论还需要更多实验数据进行检验, 并更好地确定其强度范围.

参考文献

- 1 Bohr A, Mottelson B R. Nuclear Structure. New York: Benjamin, 1969
- 2 Miki K, Sakai H, Uesaka T, et al. Identification of the β^+ isovector spin monopole resonance via the ^{208}Pb and $^{90}\text{Zr}(t, ^3\text{He})$ reaction at 300 MeV/u. Phys Rev Lett, 2012, 108: 262503
- 3 Wakasa T, Okamoto M, Dozono M, et al. Complete sets of polarization transfer observables for the $^{208}\text{Pb}(\bar{p}, \bar{n})$ reaction at 296 MeV and Gamow-Teller and spin-dipole strengths for ^{208}Pb . Phys Rev C, 2012, 85: 064606
- 4 Engel J, Bender M, Dobaczewski J, et al. β decay rates of r-process waiting-point nuclei in a self-consistent approach. Phys Rev C, 1999, 60: 014302
- 5 Liang H Z, Van Giai N, Meng J. Isospin corrections for superallowed Fermi β decay in self-consistent relativistic random-phase approximation approaches. Phys Rev C, 2009, 79: 064316
- 6 Minato F, Bai C L. Impact of tensor force on β decay of magic and semimagic nuclei. Phys Rev Lett, 2013, 110: 122501
- 7 Niu Z M, Niu Y F, Liang H Z, et al. β -decay half-lives of neutron-rich nuclei and matter flow in the r-process. Phys Lett B, 2013, 723: 172–176
- 8 Zhi Q, Caurier E, Cuenca-García J J, et al. Shell-model half-lives including first-forbidden contributions for r-process waiting-point nuclei. Phys Rev C, 2013, 87: 025803
- 9 Niu Z M, Niu Y F, Liu Q, et al. Nuclear $\beta^{\pm}/\text{EC}$ decays in covariant density functional theory and the impact of isoscalar proton-neutron pairing. Phys Rev C, 2013, 87: 051303(R)

- 10 Niu Y F, Niu Z M, Colò G, et al. Particle-vibration coupling effect on the β decay of magic nuclei. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 142501
- 11 Griffiths A, Vogel P. Double-beta decay to excited 0^+ states: Decay of ^{100}Mo . *Phys Rev C*, 1992, 46: 181
- 12 Avignone F T, Elliot S R, Engel J. Double beta decay, Majorana neutrinos, and neutrino mass. *Rev Mod Phys*, 2008, 80: 481
- 13 Fang D L, Amand F, Vadim R, et al. Neutrinoless double- β decay of ^{150}Nd accounting for deformation. *Phys Rev C*, 2010, 82: 051301(R)
- 14 Yao J M, Song S L, Hagino K, et al. Systematic study of nuclear matrix elements in neutrinoless double- β decay with a beyond-mean-field covariant density functional theory. *Phys Rev C*, 2015, 91: 024316
- 15 Vautherin D, Brink D M. Hartree-fock calculations with Skyrme's interaction. I. Spherical nuclei. *Phys Rev C*, 1972, 5: 626–647
- 16 Bender M, Heenen P H, Reinhard P G. Self-consistent mean-field models for nuclear structure. *Rev Mod Phys*, 2003, 75: 121
- 17 Rowe D J. *Nuclear Collective Motion*. London: Methuen, 1970
- 18 Liang H Z, Nguyen V G, Meng J. Spin-isospin resonances: A self-consistent covariant description. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 122502
- 19 Stancu F, Brink D M, Flocard H. The tensor part of Skyrme's interaction. *Phys Lett B*, 1977, 68: 108–112
- 20 Ozawa A, Kobayashi T, Suzuki T, et al. New magic number, $N=16$, near the neutron drip line. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 5493
- 21 Otsuka T, Suzuki T, Fujimoto R, et al. Evolution of nuclear shells due to the tensor force. *Phys Rev Lett*, 2005, 95: 232502
- 22 Otsuka T, Matsuo T, Abe D. Mean field with tensor force and shell structure of exotic nuclei. *Phys Rev Lett*, 2006, 97: 162501
- 23 Brown B A, Duguet T, Otsuka T, et al. Tensor interaction contributions to single-particle energies. *Phys Rev C*, 2006, 74: 061303(R)
- 24 Dobaczewski J. Opportunities with Exotic Beams: Proceedings of the Third ANL/MSU/JINA/INT RIA Workshop. Duguet T, Esbensen H, Nollett K M, et al, eds. Singapore: World Scientific, 2006
- 25 Colò G, Sagawa H, Fracasso S, et al. Spin-orbit splitting and the tensor component of the Skyrme interaction. *Phys Lett B*, 2007, 646: 227–231
- 26 Brink D M, Stancu F. Evolution of nuclear shells with the Skyrme density dependent interaction. *Phys Rev C*, 2007, 75: 064311
- 27 Lesinski T, Bender M, Bennaceur K, et al. Tensor part of the Skyrme energy density functional: Spherical nuclei. *Phys Rev C*, 2007, 76: 014312
- 28 Long W H, Sagawa H, Giai N V, et al. Shell structure and ρ -tensor correlations in density dependent relativistic Hartree-Fock theory. *Phys Rev C*, 2007, 76: 034314
- 29 Grasso M, Ma Z Y, Khan E, et al. Evolution of the proton sd states in neutron-rich Ca isotopes. *Phys Rev C*, 2007, 76: 044319
- 30 Zou W, Coló G, Ma Z Y, et al. Tensor correlations and evolution of single-particle energies in medium-mass nuclei. *Phys Rev C*, 2008, 77: 014314
- 31 Zalewski M, Dobaczewski J, Satula W, et al. Spin-orbit and tensor mean-field effects on spin-orbit splitting including self-consistent core polarizations. *Phys Rev C*, 2008, 77: 024316
- 32 Moreno-Torres M, Grasso M, Liang H, et al. Tensor effects in shell evolution at $Z, N=8, 20$, and 28 using nonrelativistic and relativistic mean-field theory. *Phys Rev C*, 2010, 81: 064327
- 33 Dong J M, Zuo W, Gu J Z, et al. Effects of tensor interaction on pseudospin energy splitting and shell correction. *Phys Rev C*, 2011, 84: 014303
- 34 Wang H K, Gao Z C, Chen Y S, et al. The structure of the spherical tensor forces in the USD and GXPF1A shell model Hamiltonians. *Chin Phys C*, 2011, 35: 753–757
- 35 Song C Y, Yao J M, Meng J. Tensor coupling effects on spin symmetry in the anti-lambda spectrum of hypernuclei. *Chin Phys Lett*, 2011, 28: 092101
- 36 Hellemans V, Heenen P H, Bender M. Tensor part of the Skyrme energy density functional. III. Time-odd terms at high spin. *Phys Rev C*, 2012, 85: 014326
- 37 Bi A, Hiyama E, Zhou X R, et al. Tensor correlation, pairing interaction, and deformation in Ne isotopes and Ne hypernuclei. *Phys Rev C*, 2013, 87: 014333
- 38 Bai C L, Sagawa H, Zhang H Q, et al. Effect of tensor correlations on Gamow-Teller states in ^{90}Zr and ^{208}Pb . *Phys Lett B*, 2009, 675: 28–31
- 39 Bai C L, Zhang H Q, Zhang X Z, et al. Quenching of Gamow-Teller strength due to tensor correlations in ^{90}Zr and ^{208}Pb . *Phys Rev C*, 2009, 79: 014301(R)
- 40 Bai C L, Zhang H Q, Zhang X Z, et al. Effect of tensor force on charge-exchange spin-dependent multipole excitations. *Chin Phys Lett*, 2010, 27: 102101
- 41 Bai C L, Zhang H Q, Sagawa H, et al. Effect of the tensor force on the charge-exchange spin-dipole excitations of ^{208}Pb . *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 072501
- 42 Bai C L, Zhang H Q, Zhang X Z. Tensor effects on spin-dependent charge-exchange transitions. *Nucl Phys A*, 2010, 834: 65c–68c

- 43 Bai C L, Zhang H Q, Sagawa H, et al. Spin-isospin excitations as quantitative constraints for the tensor force. *Phys Rev C*, 2011, 83: 054316
- 44 Bai C L, Sagawa H, Coló G, et al. Spin-dipole excitations in ^{16}O and tensor correlations. *Phys Rev C*, 2011, 84: 044329
- 45 Bertsch G F, Hamamoto I. Gamow-Teller strength at high excitations. *Phys Rev C*, 1982, 26: 1323
- 46 Wakasa T, Okamoto M, Takaki M, et al. Complete set of polarization transfer observables for the $^{16}\text{O}(p, n)^{16}\text{F}$ reaction at 296 MeV and 0 degrees. *Phys Rev C*, 2011, 84: 014614
- 47 Liang H Z, Zhao P W, Meng J. Fine structure of charge-exchange spin-dipole excitations in ^{16}O . *Phys Rev C*, 2012, 85: 064320
- 48 Fujita Y, Fujita H, Adachi T, et al. Observation of low- and high- energy Gamow-Teller phonon excitations in nuclei. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 112504
- 49 Bai C L, Sagawa H, Coló G, et al. Low-energy collective Gamow-Teller states and isoscalar pairing interaction. *Phys Rev C*, 2014, 90: 054335
- 50 Carlsson B G, Toivanen J. Low-lying states in near-magic odd-odd nuclei and the effective interaction. *Phys Rev C*, 2014, 89: 054324

Spin-isospin collective excited states of nuclei and relevant physics quantities

WU Hua^{1,2}, BAI ChunLin^{2*} & SONG ZengQiang²

¹ *School of Computer Science, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;*

² *School of Physics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China*

This paper are dedicated to introduce and study the spin-isospin collective excited states of nuclei, together with the relevant HF+RPA or HFB+QRPA models which are widely used for the studies of these collective excited states. Studying of these collective excited states may attain some insights and information for the spin-dependent nucleon-nucleon interactions. Previously the self-consistent Skyrme-HF+RPA model has been applied to study the GT and SD transitions in closed-shell nuclei, where the tensor force produces strong effects on the main peak energy, which provides strong constraint for the strengths of Skyrme tensor terms. For the pf shell nuclei with $N \sim Z$, the Isoscalar (IS) pairing force plays a determinant role for the low energy strong GT states, which may well constrain the strength of IS pairing through the excitation energies of these strong GT states in certain nuclei.

spin-isospin collective excited states, tensor force, isoscalar pairing interaction, Gamow-Teller transition, low-energy GT state

PACS: 21.10.Ky, 21.60.Cs, 21.60.Jz, 23.20.-g

doi: 10.1360/SSPMA2015-00400