

文章编号: 1007-4627(2024)01-0226-07

随机相互作用下原子核的非集体转动行为研究

沈佳杰¹, 牛子正², 姜慧^{1,†}

(1. 上海海事大学理学院, 上海 201306;
2. 上海海事大学商船学院, 上海 201306)

摘要: 随机相互作用下原子核基带能级呈现的非集体转动行为是鲁棒性的现象, 即基带能级的数学期望值与角动量的平方呈正相关关系。本文在 sd 壳和 pf 壳模型空间下计算了包括 ^{24}Mg 、 ^{28}Si 、 ^{46}Ca 、 ^{46}Ti 的偶偶核以及包括 ^{21}Ne 、 ^{43}Sc 的奇质量数原子核在随机相互作用下基带的能级结构, 验证了非集体转动行为在基态非零自旋以及奇质量数原子核下的鲁棒性, 同时指出了数学期望值与角动量的平方的线性相关性非常好, 而对于最小角动量能级大于最大角动量能级的样本, “逆”非集体转动行为也较为普遍。同时比较和讨论了偶偶核基态是否为零自旋对激发态的能级结构的影响, 结果表明, 当偶偶核基态自旋不为零时, 基带低激发态能级顺序呈现出更多随机性。

关键词: 随机相互作用; 随机两体系综; 基带; 非集体转动行为

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.41.2023CNPC54

0 引言

复杂原子核中简单规则的起源问题^[1]是原子核物理研究的重要问题之一, 随机相互作用下原子核的低激发态性质是研究该问题的重要方向。自从随机相互作用下偶偶核基态零自旋占优^[2]这一重要现象被发现以来, 大量研究工作^[3-6]沿着这一线索展开, 其中原子核在随机相互作用下集体运动的研究工作很多是基于玻色子系统^[7-10]展开的。在基于 IBM 模型^[11]的随机相互作用 sd 玻色子系统中, 振动谱和转动谱^[7-8]的特征峰在能级比的概率分布中被发现。然而对于壳模型空间下的费米子系统, 随机两体系综的基带能谱统计中并没有发现振动谱和转动谱的特征峰^[12]。文献^[2]发现了随机相互作用下偶偶核基带能级的数学期望值与角动量的平方呈正相关性, 这一特性被称为非集体转动行为。

非集体转动行为并非描述原子核集体运动的特性, 而是基带能级的数学期望值呈现出转动谱的结构。它的发现是基于基态零自旋的样本, 我们在这一基础上进一步研究了偶偶核基态非零自旋下非集体转动行为的鲁棒性, 并同时推广到奇质量数原子核^[13]。非集体转动行为即基带能级的数学期望值与角动量的平方呈强线性相关性, 且线性相关系数大多在 0.95 以上; 同时当最小

角动量能级大于最大角动量能级, 此时基带能级的数学期望值呈现出与角动量反序, 我们称之为“逆”非集体转动行为。这一现象较为普遍, 尤其是当最大角动量能级为基态时, 基带能级期望值与角动量平方的线性相关系数在 -0.9 左右。

本工作在文献^[13]的基础上, 进一步研究了更多 sd 壳和 pf 壳原子核以验证非集体转动行为的鲁棒性。我们发现, 随机相互作用下偶偶核的非集体转动行为在基态是否为零自旋的情况下略有差别, 当基态为零自旋时, 基带能级期望值与角动量平方的线性相关系数会更高。我们通过比较随机相互作用下偶偶核基态是否为零自旋的不同样本下低激发态的能级结构和能级比的概率分布, 进一步讨论了基态是否为零自旋的非集体转动行为的区别。

本文使用“Kyushu”组的壳模型程序^[14-16]对 sd 壳和 pf 壳的原子核的随机两体系综进行计算, 第 1 节介绍随机两体系综的理论框架, 第 2 节是随机两体系综在 sd 和 pf 壳的计算结果与分析, 第 3 节是总结。

1 随机两体系综理论

随机两体系综^[17-20]是基于原子核壳模型框架的嵌

收稿日期: 2023-08-08; 修改日期: 2024-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11875188, 12075169)

作者简介: 沈佳杰 (1985-), 男, 上海人, 副教授, 博士, 从事原子核结构理论研究; E-mail: jjshen@shmtu.edu.cn

† 通信作者: 姜慧, E-mail: huijiang@shmtu.edu.cn

入式高斯正交系综^[17]，是研究原子核在随机相互作用下基本性质的重要理论工具。原子核壳模型是近似描述的原子核基本理论模型。原子核壳模型理论基于泡利不相容原理提出了每个核子都在平均场下做独立运动的假设，并通过轨道自旋耦合成功地解释了实验上发现的壳层结构。壳模型哈密顿量可以分解为单体哈密顿量和剩余相互作用项。单体哈密顿量表示为

$$H_0 = \sum_{jm} \varepsilon_j a_{jm}^\dagger a_{jm},$$

式中： ε_j 是单粒子能级； $a_{jm}^\dagger$ 和 a_{jm} 分别是单粒子产生算符和消灭算符。

如果剩余相互作用项只考虑两体相互作用，忽略三体以及三体以上的相互作用，两体项可以表示为

$$H_2 = \sum_{JT} \sum_{j_1 j_2} \sum_{j_3 j_4} G_{JT}(j_1 j_2; j_3 j_4) A_{JT}^\dagger(j_1 j_2) A_{JT}(j_3 j_4),$$

式中 $G_{JT}(j_1 j_2; j_3 j_4)$ 为两体矩阵元， $A_{JT}^\dagger(j_1 j_2)$ 和 $A_{JT}(j_3 j_4)$ 分别是粒子对产生算符和消灭算符。

随机两体系综在壳模型理论框架上忽略单体项，而两体相互作用矩阵属于高斯正交系综(GOE)并定义为

$$\rho(G_{JT}(j_1 j_2; j_3 j_4)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{G_{JT}(j_1 j_2; j_3 j_4)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

式中两体矩阵元的分布宽度 σ 根据高斯正交系综的定义可以表示为

$$\sigma^2 = \frac{1}{2}(1 + \delta_{j_1 j_2; j_3 j_4}). \quad (2)$$

随机两体系综是建立在原子核模型框架下的量子多体系统。由于随机两体系综的独立随机变量个数远小于哈密顿量维数，因此随机两体系综仍有一些原子核信息，是研究随机相互作用下原子核性质的重要理论工具。

2 数值计算结果与分析

我们在随机两体系综框架下研究了部分原子核在随机相互作用下的非集体转动行为，包括 sd 壳和 pf 壳组态空间下的偶偶核和奇质量数原子核。文献[13]对随机两体系综做了分类，对于偶偶核我们规定正规序基带能谱为最小角动量(零自旋)基带能级小于最大角动量基带能级。根据零自旋是否为基态将正规序基带能级的随机两体系综分为样本数据 1($E_{g.s.} = E_0 < E_{I_{\max}}$)和样本数据 2($E_{g.s.} < E_0 < E_{I_{\max}}$)。非集体转动行为是基带能级正规序的一种体现。对于逆序能谱，即最小角动量(零自旋)基带能级大于最大角动量基带能级，根据最大角动量是否为基态将随机两体系综分为样本数据 3($E_{g.s.} = E_{I_{\max}} < E_0$)

和样本数据 4($E_{g.s.} < E_{I_{\max}} < E_0$)。同样地，对于奇质量数原子核，我们规定正规序能谱为最小角动量($\frac{1}{2}$ 自旋)基带能级小于最大角动量基带能级。我们根据($\frac{1}{2}$ 自旋)自旋是否为基态将正规序基带能级的随机两体系综分为样本数据 1($E_{g.s.} = E_{\frac{1}{2}} < E_{I_{\max}}$)和样本数据 2($E_{g.s.} < E_{\frac{1}{2}} < E_{I_{\max}}$)。对于逆序能谱，即最小角动量($\frac{1}{2}$ 自旋)基带能级大于最大角动量基带能级，我们根据最大角动量能级是否为基态将随机两体系综分为样本数据 3($E_{g.s.} = E_{I_{\max}} < E_{\frac{1}{2}}$)和样本数据 4($E_{g.s.} < E_{I_{\max}} < E_{\frac{1}{2}}$)。这里最大角动量 $I_{\max}$ 指的是壳模型空间下量子多体系统在角动量求和规则下所允许的最大角动量，例如 ^{24}Mg 的壳模型空间是 sd 壳内 4 个价质子和 4 个价中子的多体系统，角动量规则所允许的最大总角动量是 $I_{\max} = 12$ 。

表 1 给出了包括 ^{24}Mg 、 ^{28}Si 、 ^{46}Ca 、 ^{46}Ti 的偶偶核以及 ^{21}Ne 、 ^{43}Sc 的奇质量数原子核在随机相互作用下各样本数据在系综的占比，四种样本数据的占比分别用 P_1 、 P_2 、 P_3 以及 P_4 表示。在系综样本统计中，除了 ^{46}Ti 计算量较大，样本数为 1 000，其他原子核的随机两体系综样本数都在 50 000 以上。从表 1 中的数据可以看到，正规序基带能谱结构的两种样本数据占比远远高于逆序基带能谱结构的样本数据，通常 $P_1 + P_2 > 98\%$ 。因此正规序能谱的样本是占据主导的，这也为非集体转动行为的鲁棒性提供了样本基础。为了进一步研究非集体转动行为的鲁棒性，我们对上述核素在正规序基带能谱的样本数据 1 和样本数据 2 进行了验证。图 1 给出了 ^{24}Mg 、 ^{28}Si 、 ^{46}Ca 、 ^{46}Ti 、 ^{21}Ne 以及 ^{43}Sc 在随机两体相互作用下，基带能级的数学期望值 $\langle E_I \rangle$ 与角动量平方 $I(I+1)$ 的关系曲线。从图 1 中可以看到，在 sd 壳和 pf 壳组态空间下，无论是偶偶核还是奇质量数原子核在随机相互作用下，基带能级期望值都呈现了非常好的非集体转动行为。通过线性拟合，我们发现正规序基带能谱的样本中，无论基态角动量是否为最小角动量，基带能级的数学期望值都与角动量的平方呈线性关系。我们注意到红色的点通常在蓝色点的下面，即当最小角动量为基态时，非集体转动行为的斜率更大一些。

表 1 随机两体系综四种样本数据的占比

核素	P_1	P_2	P_3	P_4
^{24}Mg	60.84	37.03	0.75	1.38
^{28}Si	72.55	27.30	0.02	0.13
^{46}Ca	61.76	37.64	0.14	0.47
^{46}Ti	36.10	62.80	0.40	0.70
^{21}Ne	21.30	76.63	0.24	1.83
^{43}Sc	21.15	78.18	0.14	0.53

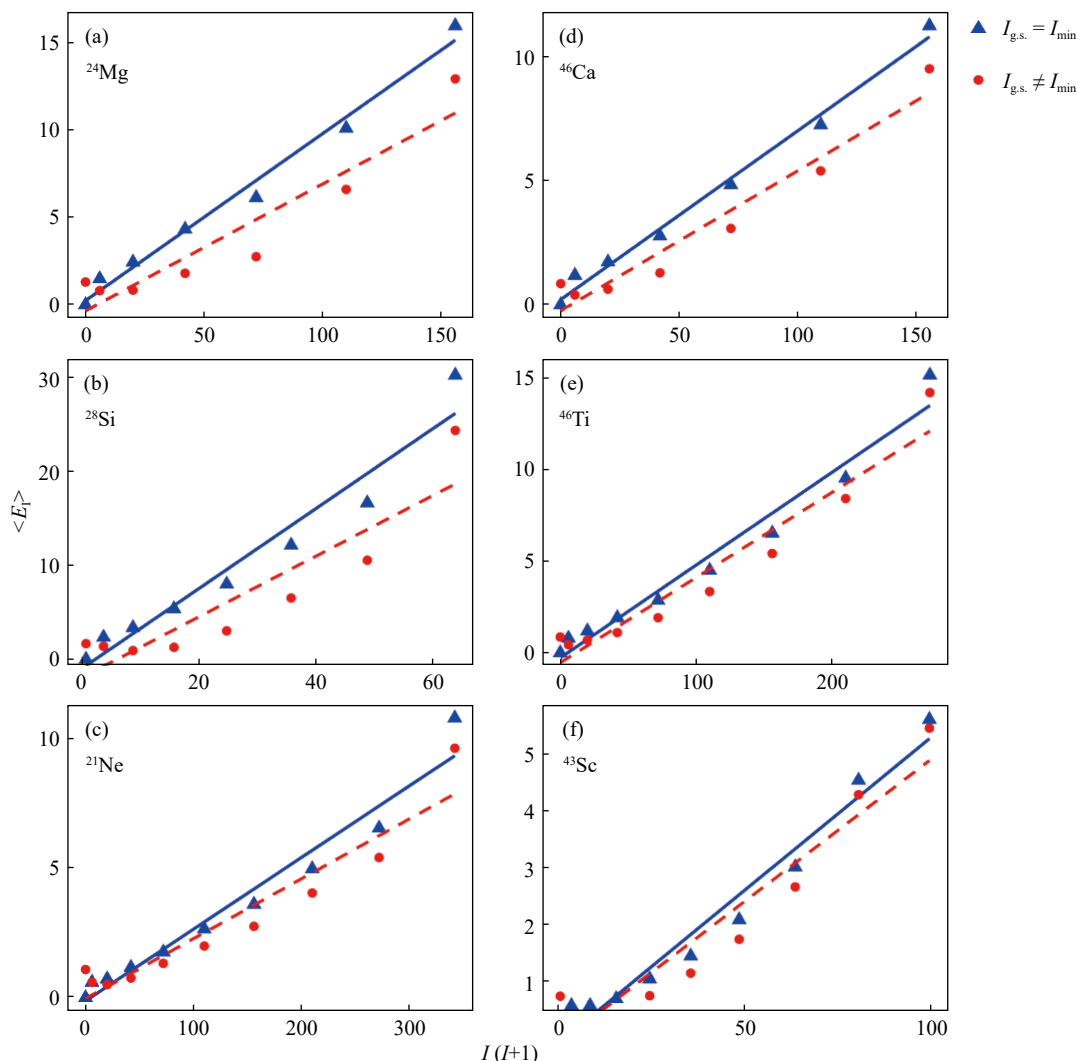


图 1 随机相互作用下原子核的非集体转动行为(在线彩图)

随机两体相互作用下原子核正规序(最小角动量基态能级小于最大角动量基态能级)基带(给定角动量下的最低本征态)样本能级期望值 $\langle E_I \rangle$ 与角动量平方 $I(I+1)$ 的曲线关系。其中纵坐标表示基带能级期望值, 横坐标为 $I(I+1)$ 。图中蓝色的三角表示基态角动量为最小角动量的样本给出的基带能级期望值, 红色的原点表示基态角动量非最小角动量的样本给出的基带能级期望值 蓝色直线和红色直线分别是两种样本的基带能级期望值的线性拟合曲线。其中子图(a)表示 ^{24}Mg , 子图(b)表示 ^{28}Si , 子图(c)表示 ^{21}Ne , 子图(d)表示 ^{46}Ca , 子图(e)表示 ^{46}Ti , 子图(f)表示 ^{43}Sc 。

为了进一步比较正规序的两种样本数据, 我们对比了图1中各曲线的线性相关度。我们在表2中统计了随机两体相互作用下原子核正规序基带的样本的能级期望值 $\langle E_I \rangle$ 与角动量平方 $I(I+1)$ 的 Pearson 相关系数^[21], 其中 C_1 和 C_2 分别表示样本数据1和样本数据2获得的 Pearson 相关系数。Pearson 相关系数是衡量线性相关性的一个关键指标, 其取值范围为-1到1之间。当其绝对值大于0.8, 则可以认为两个变量具备非常强的线性相关性; 当其绝对值在0.6到0.8之间, 则为比较强的线性相关性; 当其绝对值在0.4到0.6之间, 则为中等的线性相关性; 当其绝对值在0.2到0.4之间, 则为较弱的线性相关性。根据表2的结果发现, 能级期望值与角动量平方的 Pearson 相关系数普遍在0.95以上, 这证

明了正规序基带样本的能级期望值与角动量平方的线性相关度非常强。我们注意到通常 $C_1 > C_2$, 既当最小角动量为基态时, 能级期望值与角动量平方的 Pearson 相关系数要普遍高于非最小角动量为基态的样本数据。

表 2 非集体转动行为的 Pearson 相关系数

核素	C_1	C_2
^{24}Mg	0.993	0.942
^{28}Si	0.977	0.920
^{46}Ca	0.995	0.971
^{46}Ti	0.984	0.965
^{21}Ne	0.975	0.943
^{43}Sc	0.985	0.960

随机两体系综中基带为逆序能谱 ($E_{I_{\max}} < E_{I_{\min}}$) 的样本占比非常小, 根据表 1 的统计数据, $P_3 + P_4 < 2\%$ 。与图 1 类似, 图 2 给出了上述原子核在随机两体相互作用下, 基带能级的数学期望值与角动量平方的关系曲线。

图中可以看到, 在 sd 壳和 pf 壳组态空间下, 无论是偶偶核还是奇质量数原子核在随机相互作用下, 基带能级期望值都呈现了“逆”非集体转动行为, 即基带能级的数学期望值与角动量的平方呈负相关性关系。

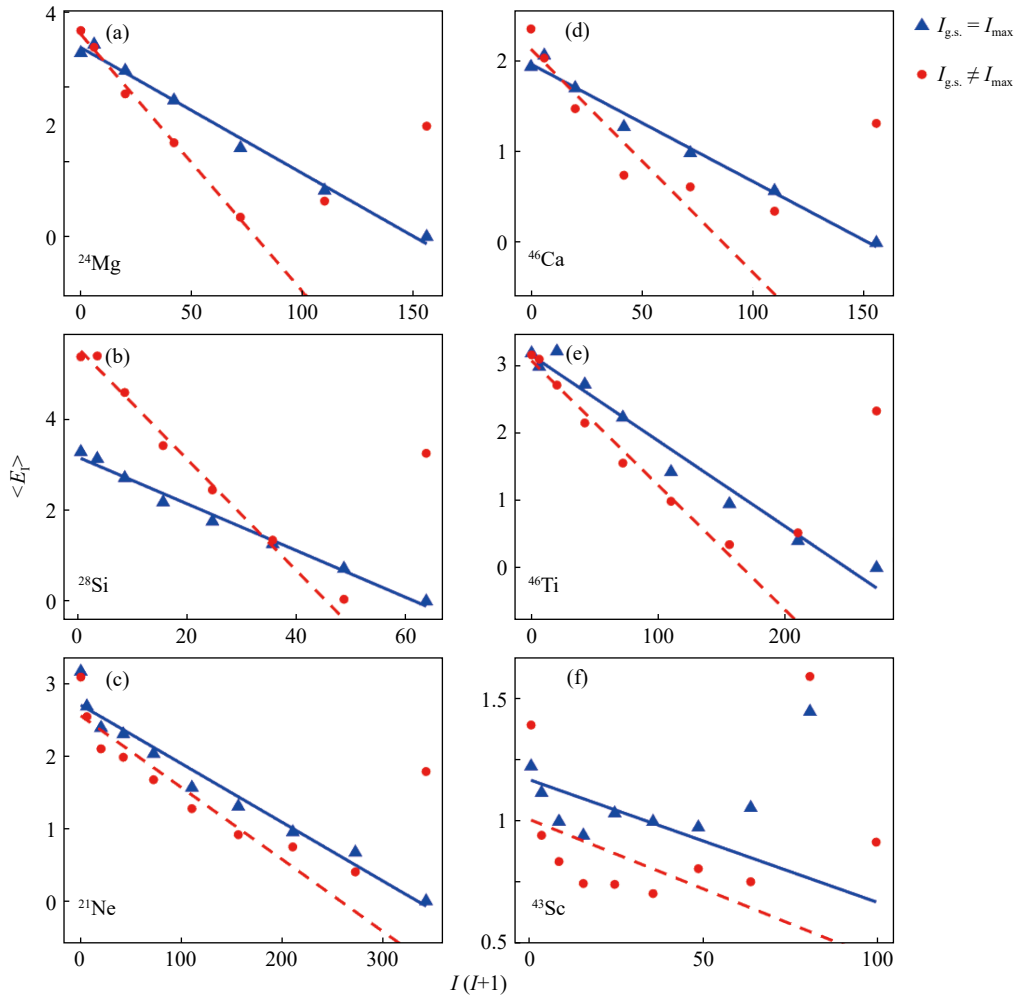


图 2 随机相互作用下原子核的“逆”非集体转动行为(在线彩图)

随机两体相互作用下原子核逆序基带样本能级期望值与 $I(I+1)$ 的曲线关系。其中, 纵坐标表示基带能级期望值, 横坐标表 $I(I+1)$ 。图中蓝色的三角表示基态角动量为最大角动量的样本给出的基带能级期望值, 红色的原点表示基态角动量非最大角动量的样本给出的基带能级期望值蓝色直线和红色直线分别是两种样本的基带能级期望值的线性拟合曲线。其中子图表示与图 2 一致。

表 3 统计了随机两体相互作用下原子核逆序基带的样本的能级期望值 $\langle E_I \rangle$ 与角动量平方 $I(I+1)$ 的 Pearson 相关系数, 其中 C_3 和 C_4 分别表示样本数据 3 和样本数据 4 获得的 Pearson 相关系数。我们可以看到, 当最大角动量为基态时, 即样本数据 3 的基带能级的数学期望值与角动量平方呈现了非常强的负线性相关性, 大部分 Pearson 相关系数小于 -0.9 ; 当基态不是最大角动量时, 即样本数据 4 的基带能级的数学期望值与角动量平方呈现了较强的负线性相关性, 大部分 Pearson 相关系数小于或接近 -0.6 。从图 2(f) 可以看到, 有一个明显的例外是 ^{43}Sc 。由于 ^{43}Sc 的 $I = 17/2$ 能级期望值比较高,

破坏了原有的负相关性。如果计算该系综的 Pearson 相关系数时不考虑 $I = 17/2$ 的能级, 则可以得到 $C_3 = -0.804$ 以及 $C_4 = -0.308$, 与其他结果基本一致。

表 3 “逆”非集体转动行为的 Pearson 相关系数		
核素	C_3	C_4
^{24}Mg	-0.995	-0.635
^{28}Si	-0.989	-0.699
^{46}Ca	-0.991	-0.593
^{46}Ti	-0.985	-0.585
^{21}Ne	-0.984	-0.703
^{43}Sc	-0.458	0.146

随机相互作用下, 偶偶核通过基于壳模型计算的随机两体系综无法找到基带能谱分布的振动与转动特征峰^[12]。文献[13]通过高自旋的比值证实了随机相互作用下偶偶核基态无论是否为零自旋, 其基带能级结构是一致的。这里对低激发态能级结构进行进一步的对比。从图1可以看到, 样本数据1和样本数据2给出的数据点及其线性拟合对高自旋态具有相当高的一致性, 而在低激发态不完全一致。根据文献[7-8]对基带能级比 R 的定义:

$$R = \frac{E_{4_1^+} - E_{0_1^+}}{E_{2_1^+} - E_{0_1^+}}. \quad (3)$$

我们在图3给出了 ^{22}Ne 、 ^{24}Mg 、 ^{28}Si 、 ^{46}Ca 、 ^{44}Ti 以及 ^{46}Ti 在随机两体相互作用下在基态为零自旋以及不为零自旋情况下的概率分布。根据文献[12], 当 R 的值等于2和10/3是振动谱和转动谱的特征值, 从图中可以看到, 无论是基态零自旋的样本还是基态非零自旋的样本, R

的分布曲线都无法找到振动谱和转动谱特征峰。基态为零自旋的能级比的概率分布峰值要明显高于基态为非零自旋的情况, 这是由于 0^+ 、 2^+ 以及 4^+ 的能级顺序呈现出随机性。能级比 R 的分布峰值在零附近。

在对比基带能级比 R 基础上, 进一步定义能级比 R' 为

$$R' = \frac{E_{6_1^+} - E_{0_1^+}}{E_{4_1^+} - E_{0_1^+}}. \quad (4)$$

图4进一步给出了上述核素在随机两体相互作用下, 基带能级比 R' 在基态为零自旋以及不为零自旋情况下的概率分布。基态为零自旋的能级比的概率分布峰值要明显高于基态为非零自旋的情况。基态为非零自旋的分布曲线比较平缓, 峰值并不明显。这也进一步说明了随机两体相互作用下偶偶核正规序基带的非集体转动行为对基态是否为零自旋在低自旋上是不同的。这也解释了为什么基态零自旋下基带能级期望值 $\langle E_I \rangle$ 与角动量平方 $I(I+1)$ 的线性相关性更加好。

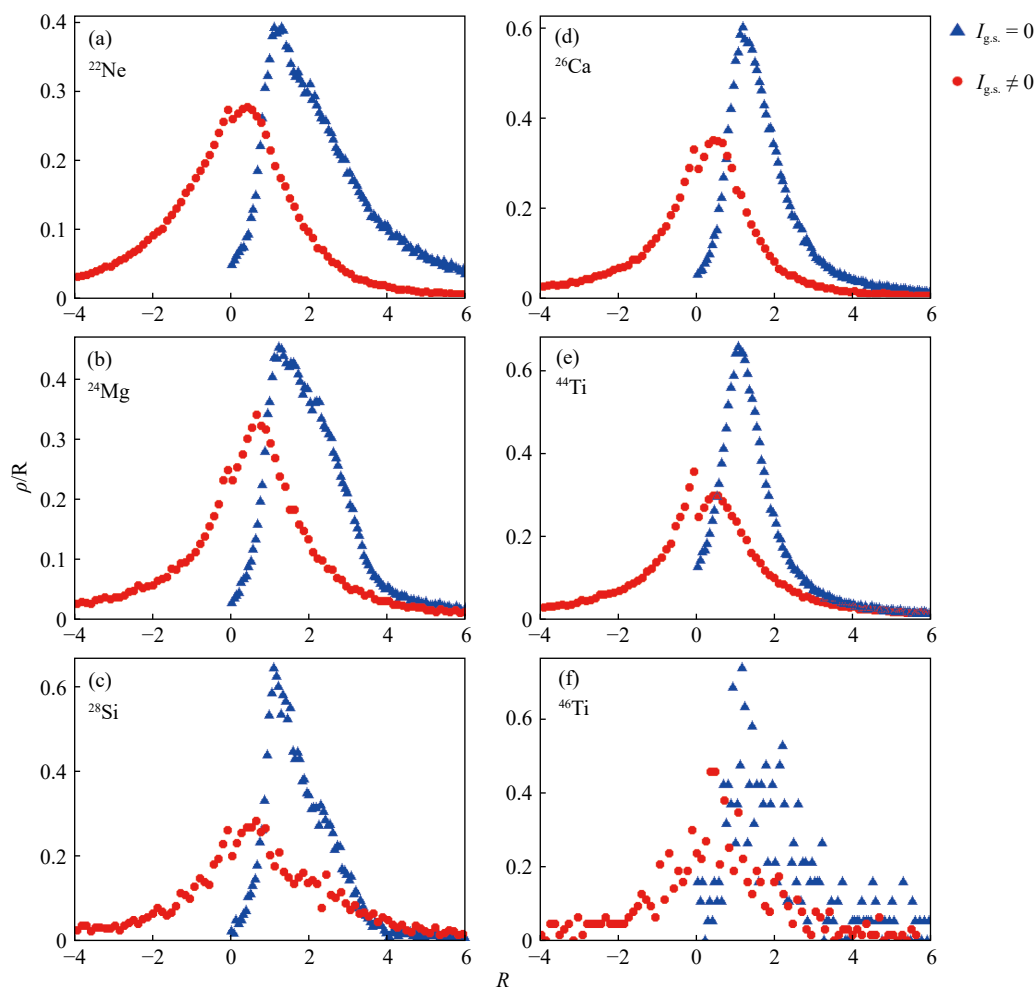
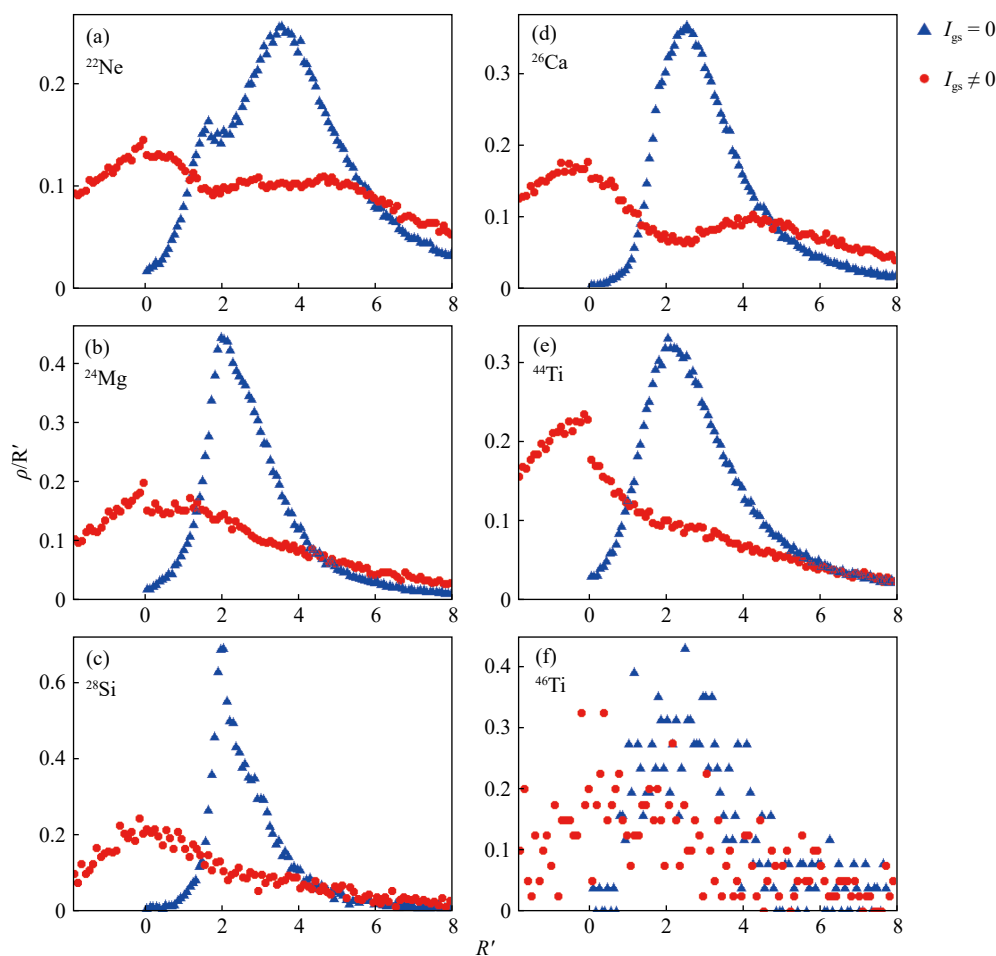


图3 随机相互作用下原子核基带能级比 R 的分布(在线彩图)

随机两体相互作用下偶偶核正规序基带在基态为零自旋(蓝色三角形)以及非零自旋(红色圆点)下能级比 R 的概率分布。其中子图(a)表示 ^{22}Ne , 子图(b)表示 ^{24}Mg , 子图(c)表示 ^{28}Si , 子图(d)表示 ^{46}Ca , 子图(e)表示 ^{44}Ti , 子图(f)表示 ^{46}Ti 。

图 4 随机相互作用下原子核基带能级比 R' 的分布(在线彩图)

随机两体相互作用下偶偶核正规序基带在基态为零自旋(蓝色三角形)以及非零自旋(红色圆点)下能级比 R' 的概率分布, 其中子图表示与图 3 一致。

3 总结

随机相互作用下原子核的低激发态, 尤其是基带的性质一直是受关注的话题, 我们在文献[13]的基础上进一步研究了随机两体系综的基带能级结构。在 sd 壳和 pf 壳组态空间下, 对部分偶偶核和奇质量数原子核的随机两体系综的基带能级进行了统计, 进一步验证了非集体转动行为的鲁棒性。基带能级的数学期望值与角动量的线性相关度非常接近于 1。另一方面, 当基带能级是逆序时, 则基带能谱呈现出“逆”非集体转动行为, 即基带能级的数学期望值与角动量的平方呈负线性相关。

随机相互作用下偶偶核在基态为零自旋时, 非集体转动行为的线性相关度要高于基态不是零自旋的情况。这是因为当基态不是零自旋时, 基态角动量通常是其它低自旋态, 因此基带的低激发态能级顺序比较混乱, 这也造成了非集体转动行为的 Pearson 相关系数略低。需要指出的是, 对于基带高自旋态, 基带能级的数学期望值与角动量的平方的线性相关度非常好, 因此, 即使基态

不是零自旋, 基带能级的数学期望值与角动量的平方的 Pearson 相关系数也接近于 1, 非集体转动行为是鲁棒的。

此外, 我们通过比较基带低激发态的能级比的概率分布讨论了随机相互作用下偶偶核在基态是否为零自旋下低激发态能级结构的区别。随机相互作用下偶偶核的基带能级比的分布统计中并没有找到振动和转动特征峰。对基态为零自旋的样本, 能级比分布的峰值在 1 附近。我们发现当偶偶核基态自旋不为零时, 能级比分布的峰值在 0 附近, 基带低激发态能级顺序呈现出随机性。

综上所述, 随机相互作用下无论是偶偶核还是奇质量数原子核, 基带能级的非集体转动行为是鲁棒的。当基带能级是正规序时, 无论基态角动量是否为最小角动量, 基带能级的数学期望值与角动量的平方呈强线性相关性。

参考文献:

- [1] The DOE/NSF Nuclear Science Advisory Committee, arXiv: 0809.3137, 2007.

- [2] JOHNSON C W, BERTSCH G F, DEAN D J. *Phys Rev Lett*, 1998, 80: 2749.
- [3] KOTA V K B. *Phys Rep*, 2001, 347: 223.
- [4] WEIDENMULLER H A, MITCHELL G E. *Rev Mod Phys*, 2004, 81: 539.
- [5] ZHAO Y M, ARIMA A, YOSHINAGA N. *Phys Rep*, 2004, 400: 1.
- [6] ZELEVINSKY V, VOLYA A. *Phys Rep*, 2004, 391: 311.
- [7] BIJKER R, FRANK A. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 420.
- [8] BIJKER R, FRANK A. *Phys Rev C*, 2000, 62: 014303.
- [9] YOSHIDA N, ZHAO Y M, ARIMA A. *Phys. Rev. C*, 2009, 80: 064324.
- [10] LU Y, ZHAO Y M, YOSHIDA N, et al. *Phys Rev C*, 2014, 90: 64313.
- [11] IACHELLO F, ARIMA A. *The Interacting Boson Model*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [12] JOHNSON C W. *Rev Mex Fis*, 1999, 45(S2): 25; 2006, 52(S4): 44.
- [13] SHEN J J, JIANG H, FU G J. *Phys Rev C*, 2021, 104: 054319.
- [14] TAKADA K, SATO M, YASUMOTO S. *Prog Theor Phys*, 2000, 104: 173.
- [15] YASUMOTO S, SHIMIZU Y R, TAKADA K. *Prog Theor Phys*, 2000, 110: 1037.
- [16] YASUMOTO S, SHIMIZU Y R, TAKADA K. *Prog Theor Phys*, 2006, 116: 107.
- [17] WIGNER E P. *Ann Math*, 1958, 67: 325.
- [18] FRENCH J B, WONG S S M. *Phys Lett B*, 1970, 33: 447; WONG S S M, FRENCH J B. *Nucl Phys A*, 1972, 198: 188.
- [19] BOHIGAS O, FLORES J. *DOI: Phys Lett B*, 1971, 34: 261; BOHIGAS O, FLORES J. *Phys Lett B*, 1971, 35: 383.
- [20] MON K F, FRENCH J B. *Ann Phys (NY)*, 1975, 95: 90.
- [21] PEARSON K. *Proc R Soc London*, 1895, 58: 240.

The Research of “non-collective” Rotational Behavior for Nuclei in the Presence of Random Interactions

SHEN Jiajie¹, NIU Zizheng², JIANG Hui^{1,†}

(1. School of Science, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The non-collective rotational behavior of the yrast band is robustness for nuclei in the presence of random interactions, where the mathematical expectation of the energy levels of yrast state is positively correlated with the square of the angular momentum. In this paper, the even-even nuclei, including ^{24}Mg 、 ^{28}Si 、 ^{46}Ca 、 ^{46}Ti , and odd-mass nuclei, including ^{21}Ne 、 ^{43}Sc , were calculated in the sd shell and pf shell model spaces in the presence of random interactions, which verifies the robustness of the non-collective rotational behavior in even-even nuclei with nonzero-spin ground state and odd-mass nuclei. Additionally, the linear correlation between the mathematical expectation of energy levels and the square of angular momentum is very good. When the minimum angular momentum level is higher than the maximum angular momentum level, the phenomenon of “reverse” non-collective rotation is also prevalent. Furthermore, we compare and discuss the influence of the ground states of even-even nuclei on the structure of yrast band, the results show that the even-even nuclei with nonzero-spin ground state will exhibit more randomness of the yrast band.

Key words: random interaction; two-body random ensemble; yrast band; non-collective rotational behavior

Received date: 08 Aug. 2023; Revised date: 27 Feb. 2024

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11875188,12075169)

† Corresponding author: JIANG Hui, E-mail: huijiang@shmtu.edu.cn