



安徽大學
Anhui University

奇特核共振态的赝自旋对称性研究

Pseudospin Symmetry in Resonant States in Exotic Nuclei

第一届安徽省核物理研讨会

- 汇报人：张玥
- 导师：刘泉教授，郭建友教授

目录 CONTENTS

01

研究背景

Research Background

02

理论框架

Theoretical Framework

03

数据结果

Data Result

04

总结展望

Summary and Prospect

01

Research Background

研究背景

➤ 原子核壳模型

1963年德国科学家詹森、美国科学家梅耶因创立原子核结构的壳模型理论，获得了第六十三届诺贝尔物理学奖。



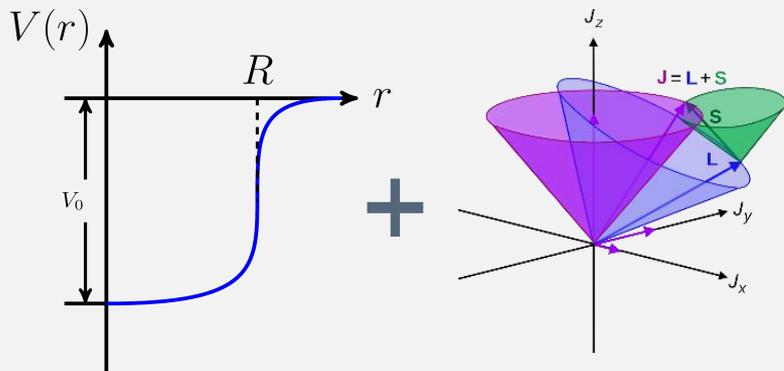
Maria Goeppert-Mayer
(1906-1972)



J. Hans D. Jensen (1907-1973)

➤ 自旋—轨道耦合

为了解释稳定核中幻数的存在，通过在壳模型中引入自旋—轨道耦合，提出了自旋对称性 (SS) 的破缺。



Mean field potential
(Woods-Saxon Potential)

Spin-orbit coupling

➤ 赝自旋伙伴态

赝自旋伙伴态($n, \tilde{l}, j = \tilde{l} \pm 1/2$): 表示能级($n, l, j = l + 1/2$) 和 ($n - 1, l + 2, j = l + 3/2$) 之间的近似简并。

➤ 赝自旋对称性: 相对论对称性

\tilde{l} is nothing but the orbital angular momentum of the lower component of Dirac spinor.

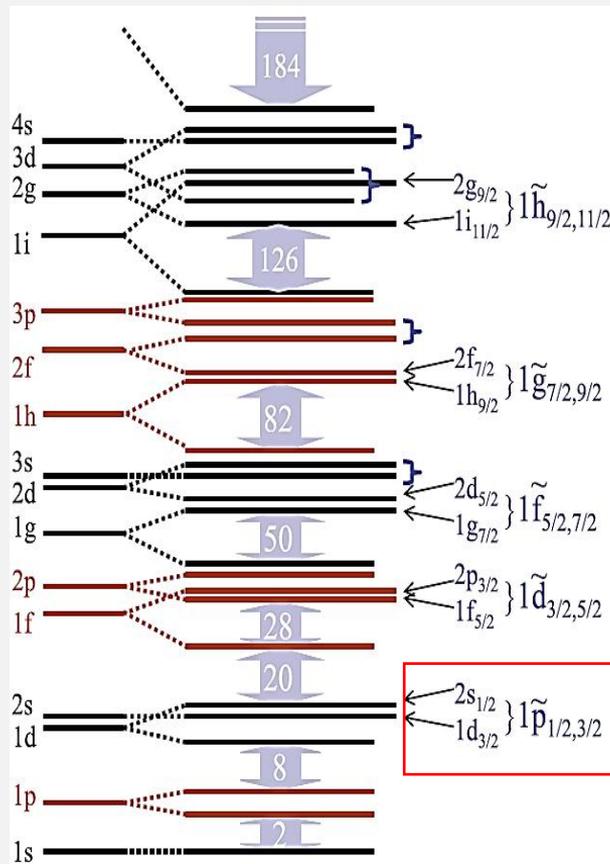
[Ginocchio (1997, 2005); Meng (1998); Liang, Meng, Zhou (2015).]

➤ 赝自旋对称性的满足条件

- $\Sigma(r) = V(r) + S(r) = 0$ [Ginocchio (1997)]
- $d\Sigma/dr=0$ 是赝自旋对称性的限制条件。 [Meng (1998)]

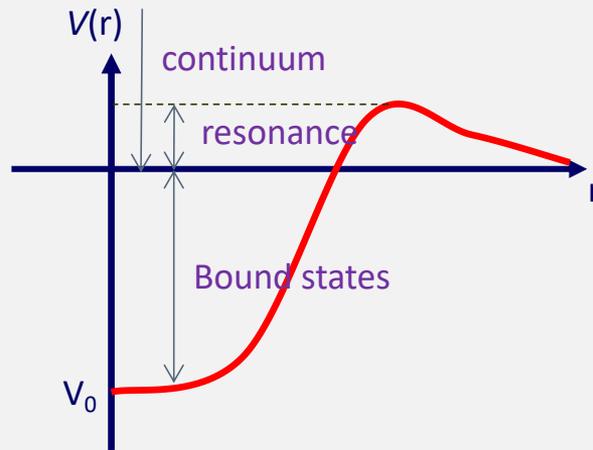
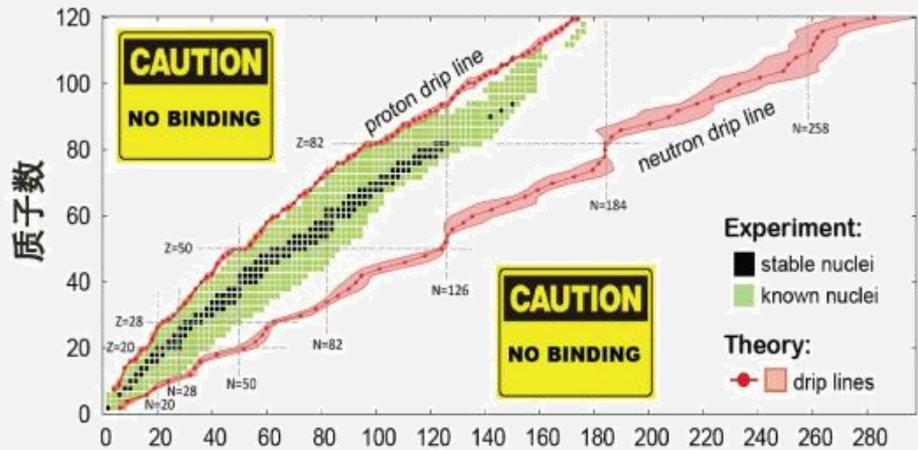
➤ 许多奇特现象已被赝自旋对称性成功解释。

核的超形变构型、同频带、赝自旋伙伴带、晕核的形成、超重核结构.....



➤ 近年来，远离 β 稳定线的原子核得到研究，**奇特现象**的研究成为热点。

➤ 在核物理领域，许多新奇现象的出现，**共振态**都在其中扮演着重要角色。



- ^{11}Li 晕的解释、Zr和Ca巨晕的预言、 ^{31}Ne 和 $^{42, 44}\text{Mg}$ 形变晕的认识都需要考虑连续谱的贡献，尤其是连续谱中共振态的贡献。在异常中质比核中，共振能级反转是传统幻数改变的原因之一。
- 单粒子共振态的能量和寿命也是天体演化过程中化学元素核合成研究的关键输入量。



奇特核单粒子共振态的赝自旋对称性研究

- 基于复动量表像 (CMR) 方法
- 采用 Woods-Saxon 势求解 Dirac 方程
- 从球形情况和形变情况出发，研究奇特核单粒子共振态的赝自旋对称性。

02

Theoretical Framework

理论框架

► 复动量表象 (CMR) 理论

在 RMF 理论中, 核子被描述为在平均场中运动的狄拉克粒子, 其狄拉克方程可以写成

$$H = \vec{\alpha} \cdot \vec{p} + \beta(M + S) + V = \begin{pmatrix} M + V + S & \vec{\sigma} \cdot \vec{p} \\ \vec{\sigma} \cdot \vec{p} & -M + V - S \end{pmatrix} \quad (1)$$

为了得到包含束缚态和共振态的解, 将上式转化为动量空间中的形式

$$\int d\vec{k}' \langle \vec{k} | H | \vec{k}' \rangle \psi(\vec{k}') = \varepsilon \psi(\vec{k}) \quad (2)$$

总角动量的第三分量 m_j 是好量子数, 狄拉克旋量可以表示为 $\psi(\vec{k}) = \begin{pmatrix} f(k) \phi_{l j m_j}(\Omega_k) \\ g(k) \phi_{\bar{l} j m_j}(\Omega_k) \end{pmatrix}$ (3)

狄拉克方程就变成

$$\begin{cases} Mf(k) - kg(k) + \int k'^2 dk' V_+(k, k') = \varepsilon f(k) \\ -kf(k) - Mg(k) + \int k'^2 dk' V_-(k, k') = \varepsilon g(k) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $V_+(k, k') = \frac{2}{\pi} \int r^2 dr [V(r) + S(r)] j_l(k'r) j_l(kr)$, $V_-(k, k') = \frac{2}{\pi} \int r^2 dr [V(r) - S(r)] j_{\bar{l}}(k'r) j_{\bar{l}}(kr)$ 。

平均场势分别由 $\Sigma(r) = V(r) + S(r)$ 和 $\Delta(r) = V(r) - S(r)$ 来表示。

利用高斯求积公式，方程④可以转化为

$$\begin{cases} Mf^{lj}(k_a) - k_a g^{lj}(k_a) + \sum_{l'j'} \sum_{b=1}^N \omega_b k_b^2 V^+(l', j', p, q, l, j, m_j, k_a, k_b) f^{l'j''}(k_b) = \varepsilon f^{lj}(k_a) \\ -k_a f^{lj}(k_a) - Mg^{lj}(k_a) + \sum_{l'j'} \sum_{b=1}^N \omega_b k_b^2 V^-(\tilde{l}', j', p, q, \tilde{l}, j, m_j, k_a, k_b) g^{l'j''}(k_b) = \varepsilon g^{lj}(k_a) \end{cases} \quad (5)$$

在复动量空间中求解方程⑤，可同时得到束缚态和共振态。

$$\text{坐标表象中波函数表示为 } \psi(\vec{r}) = \langle \vec{r} | \psi \rangle = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \begin{pmatrix} \int k^2 dk i^l j_l(kr) f(k) \phi_{ljm_j}(\Omega_r) \\ \int k^2 dk i^{\tilde{l}} j_{\tilde{l}}(kr) f(k) \phi_{ljm_j}(\Omega_r) \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$f^{lj}(r) = i^l \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{a=1}^N \omega_a k_a^2 j_l(k_a r) f^{lj}(k_a) \quad (7)$$

其中径向分量为

$$g^{lj}(r) = i^{\tilde{l}} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{a=1}^N \omega_a k_a^2 j_{\tilde{l}}(k_a r) g^{lj}(k_a)$$

$$\text{坐标空间中的径向密度定义为 } \rho_{m_j}(r) = \sum_{lj} [f^{lj}(r) f^{lj}(r) + g^{lj}(r) g^{lj}(r)] \quad (8)$$

03

Data Results and Discussion

数据结果

- 2022年，我们用Dirac-CMR方法研究了球形核 ^{132}Sn 的共振态的赝自旋对称性及其对Woods-Saxon势形状的依赖性。

[Liu Q, Zhang Y, et al. PLB 824, 136829 (2022)]

Reviewer #1: The authors do a detailed analysis of the energies and wavefunctions for bound states and resonant states, and widths for resonant states, using phenomenologically determined Woods Saxon potentials used in RMF calculations. They conclude that pseudo-spin symmetry is a good symmetry. Their results are of interest and should be published.

Dirac-CMR理论

+

球形核 ^{132}Sn

+

共振态赝自旋对称性

Physics Letters B 824 (2022) 136829



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb



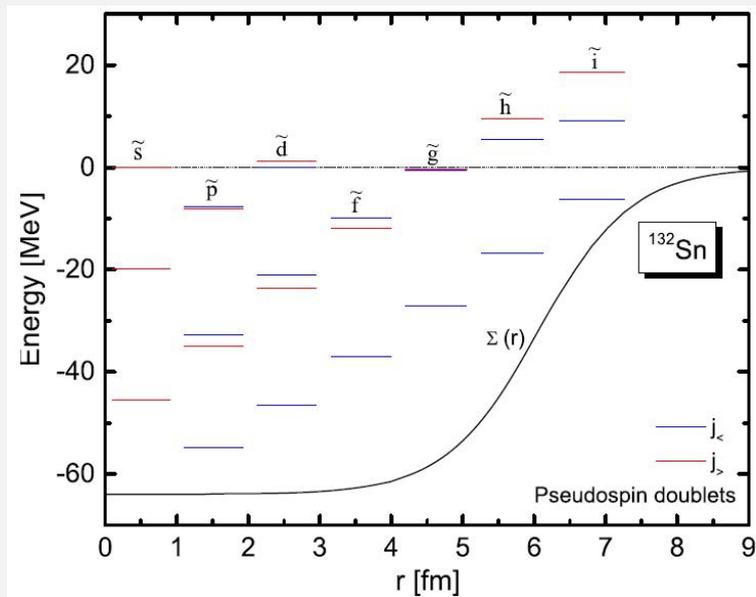
Pseudospin symmetry in resonant states and its dependence on the shape of potential

Quan Liu (刘泉), Yue Zhang (张玥), Jian-You Guo (郭建友)*

School of physics and Optoelectronic Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China

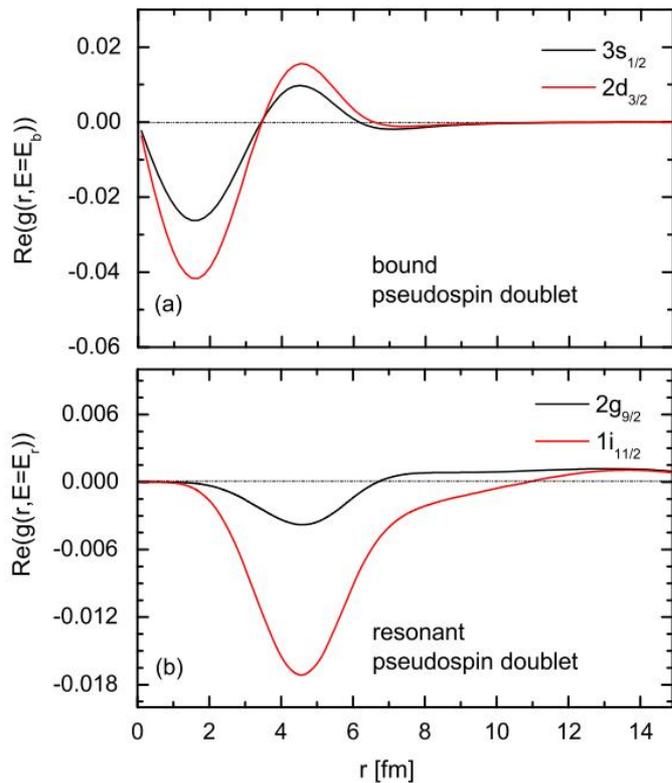


► 球形核共振态的赝自旋对称性：以 ^{132}Sn 为例



• 图1: ^{132}Sn 赝自旋伙伴态的单粒子能级。

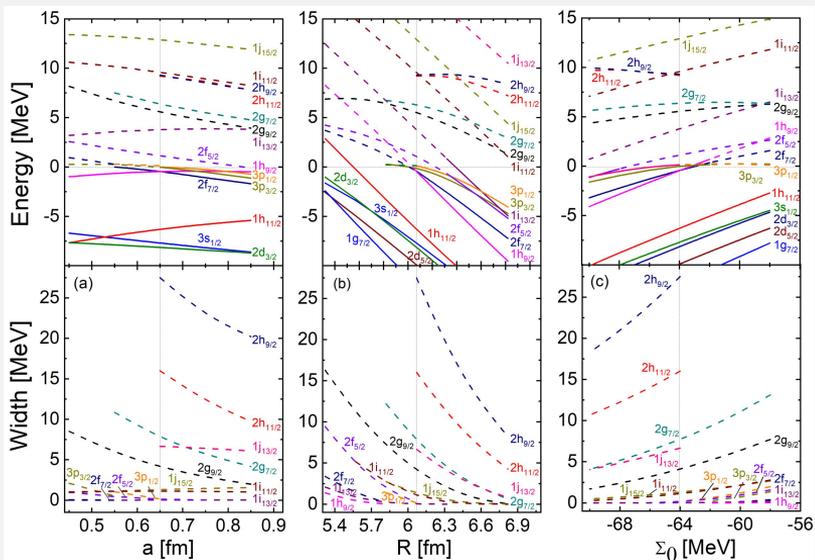
- 共振态和束缚态的赝自旋双重态能量、波函数均表现出近似简并性。



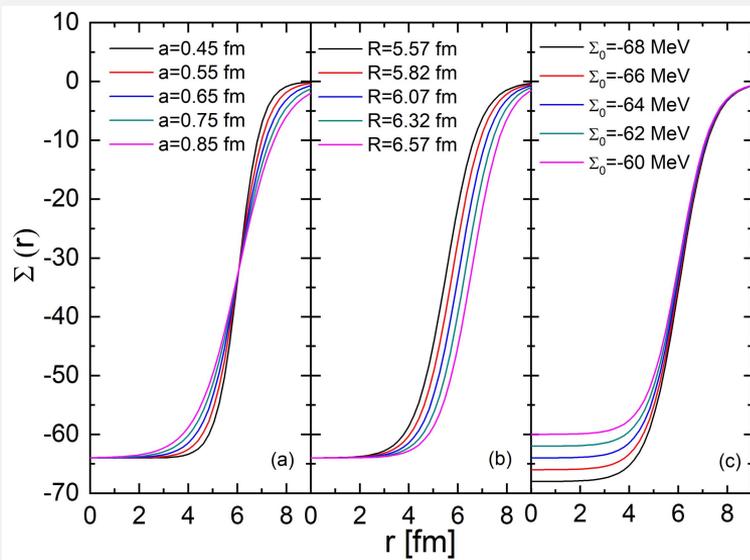
• 图2: ^{132}Sn 赝自旋伙伴态的波函数。

➤ 赝自旋伙伴态与势场参数的关系

- 势形状的变化对解释原子核从稳定核到奇特核的变化以及奇特现象的产生有重要意义。研究赝自旋伙伴态与势形状的关系,并用 Σ 势随势场参数的变化关系来解释。



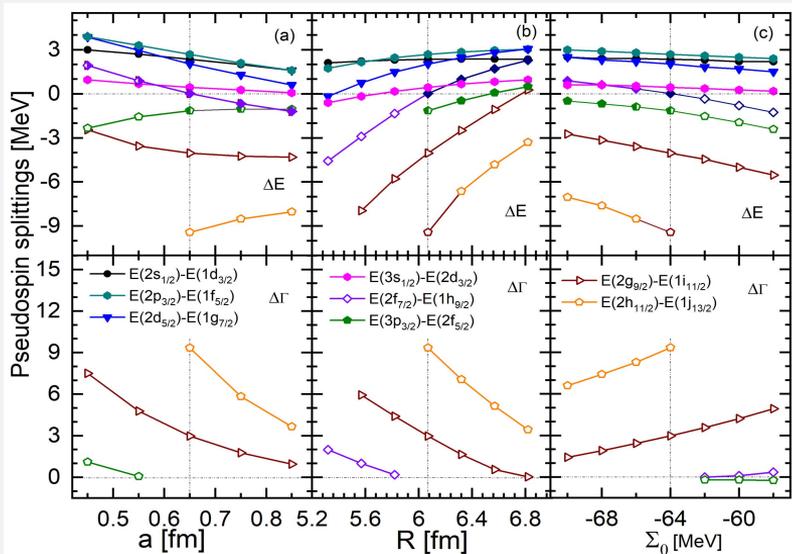
- 图3: ^{132}Sn 赝自旋伙伴态能量和宽度随各个势场参数的变化情况



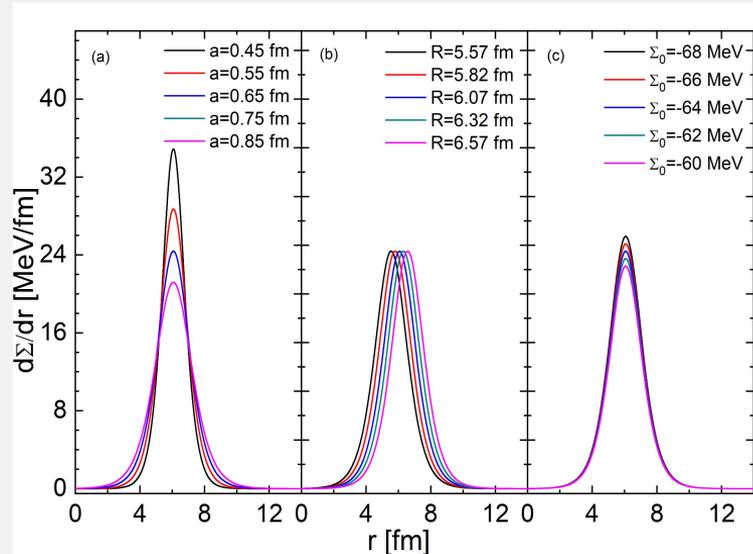
- 图4: Σ 势及其随势场参数的变化关系。

► 赝自旋伙伴态之间劈裂与势场参数的关系

- 赝自旋伙伴态的质量与势形状的关系是一个有趣的话题。研究表明赝自旋双重态之间的能量和宽度劈裂对势参数很敏感，这一点可以通过 Σ 势的导数随势场参数的变化来说明。

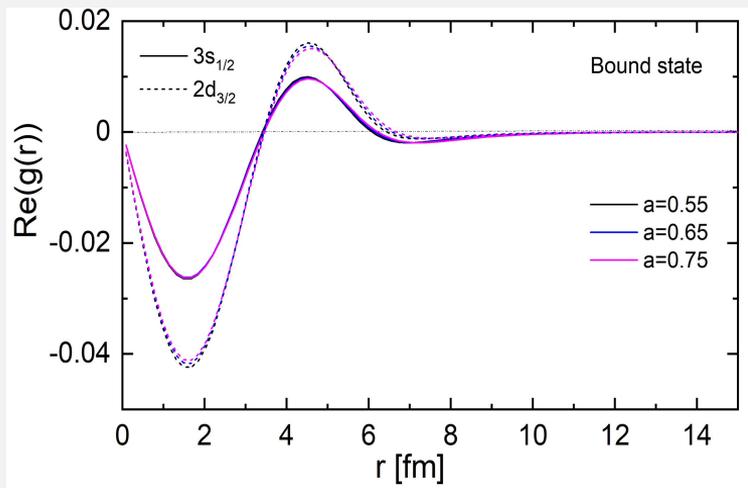


- 图5: ^{132}Sn 赝自旋伙伴态的能量劈裂和宽度劈裂随参数的变化。



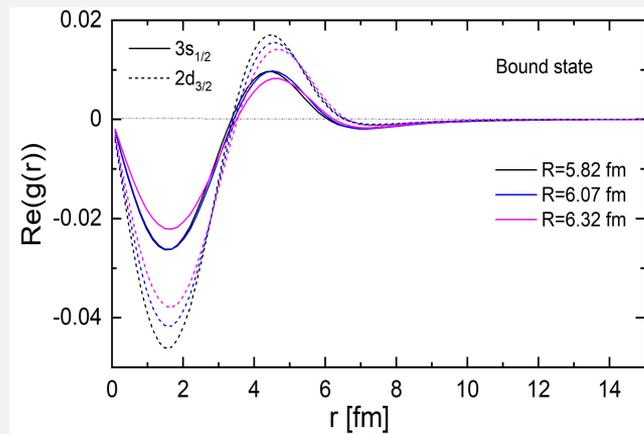
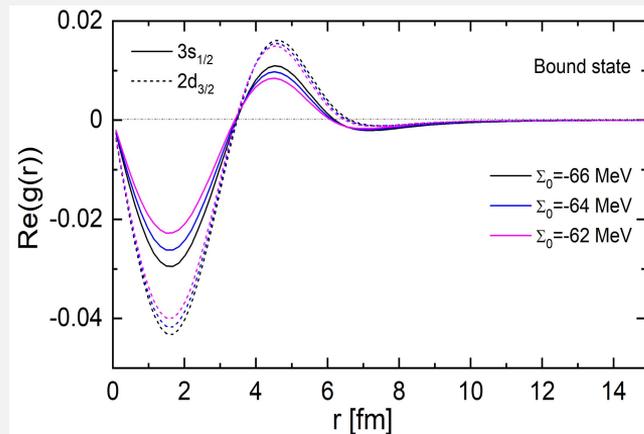
- 图6: Σ 势的导数及其随势场参数的变化关系。

➤ 赝自旋伙伴态波函数与势场参数的关系



• 图7-9: 坐标空间下 ^{132}Sn 束缚态赝自旋伙伴态的波函数随参数变化。

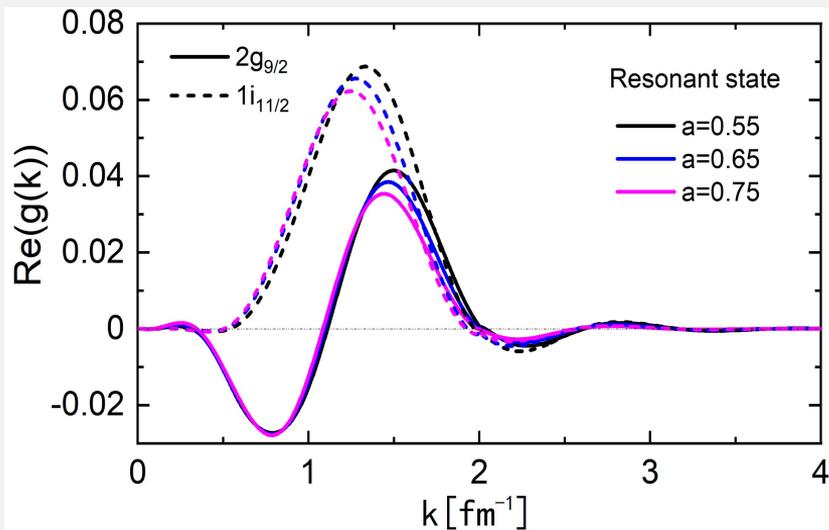
- 研究表明, 波函数劈裂的变化趋势与能量劈裂的变化趋势保持一致。



➤ 赝自旋伙伴态波函数与势场参数的关系

主要创新点

考虑到共振态波函数在坐标空间不收敛，首次在动量空间下给出共振态波函数，并对其波函数劈裂进行了定量的考察。（由海森堡不确定原理，动量空间中的波函数是局域的。）



$$\Delta G = \int_0^{\infty} |r^2 [g_{<}(r) - g_{>}(r)]^2| dr,$$

计算得到不同a值对应的波函数劈裂比值为2.04:1.83:1.29，表明波函数劈裂随a的增大而减小，与能量及宽度劈裂随a的变化一致。

- 图10：动量空间下 ^{132}Sn 共振态赝自旋伙伴态的波函数随参数变化。

- 2023年，我们用Dirac-CMR方法首次研究了形变核 ^{170}Yb 共振态的赝自旋对称性。

[Zhang Y, et al. PLB 838, 137716 (2023)]

Reviewer #1:

This paper investigates pseudo spin symmetry in deformed nuclei. The authors study pseudo spin symmetry breaking in resonant states in deformed nuclei. This is new and deserves to be published. However I have some grammatical corrections and a question about the physics.

Dirac-CMR理论

+

形变核 ^{170}Yb

+

共振态赝自旋对称性

Physics Letters B 838 (2023) 137716



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Physics Letters B

journal homepage: www.elsevier.com/locate/physletb



Pseudospin symmetry in resonant states in deformed nuclei

Yue Zhang, Yu-Xuan Luo, Quan Liu*, Jian-You Guo

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China

Article history:

Received 19 December 2022

Received in revised form 19 January 2023

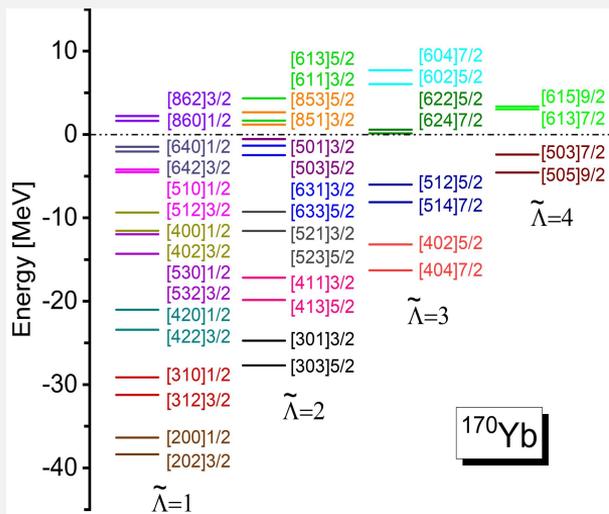
Accepted 19 January 2023

Available online 23 January 2023

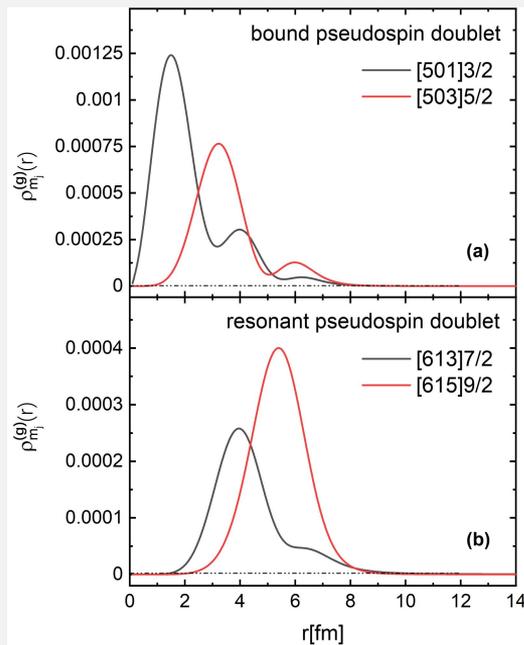
Editor: B. Balantekin

► 形变核共振态的赝自旋对称性：以 ^{170}Yb 为例

^{170}Yb 实验形变值：0.32



$\tilde{\Lambda}$	$[N, n_3, \Lambda]\Omega$	$E_r[\text{MeV}]$	$\Gamma[\text{MeV}]$
1	$[860]1/2$	1.635	29.091
	$[862]3/2$	2.217	25.045
2	$[851]3/2$	1.188	30.651
	$[853]5/2$	2.674	24.819
3	$[622]5/2$	0.590	0.090
	$[624]7/2$	0.137	0.000
4	$[613]7/2$	3.028	0.580
	$[615]9/2$	3.359	0.019



- 图1: $\beta_2=0.32$ 时 ^{170}Yb 赝自旋伙伴态的单中子能量。

- 表1: $\beta_2=0.32$ 时 ^{170}Yb 四个共振态赝自旋伙伴态的能量和宽度。

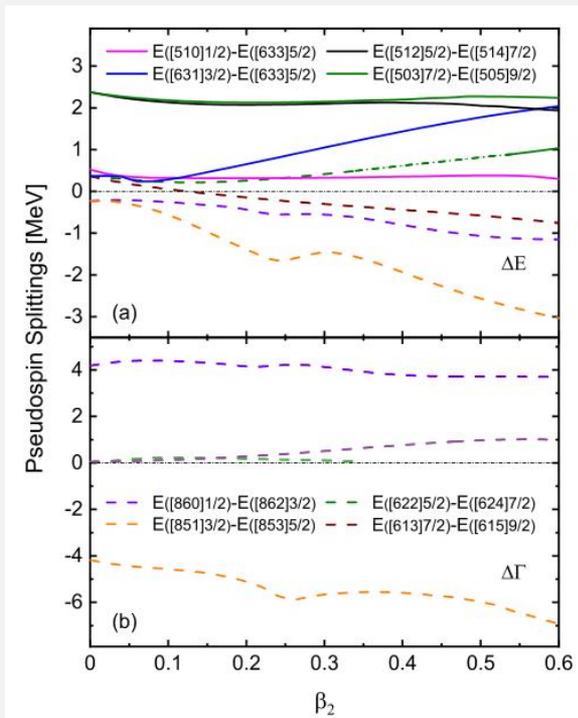
主要创新点

- 首次发现形变核共振态中存在赝自旋对称性。

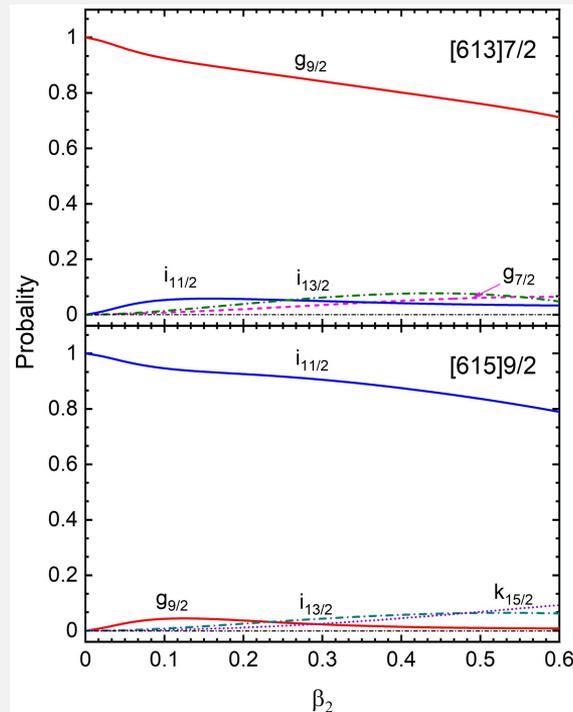
- 图2: $\beta_2=0.32$ 时 ^{170}Yb 赝自旋伙伴态径向密度分布的下分量实部。

主要创新点

- 检验了形变核共振态赝自旋对称性与形变参数的关系，并从组态的角度对其进行了解释。
- 赝自旋对称性是形变依赖的，随着形变的增加，赝自旋对称性变差。其原因是随着形变的增加，不同的球形组态发生了混合。

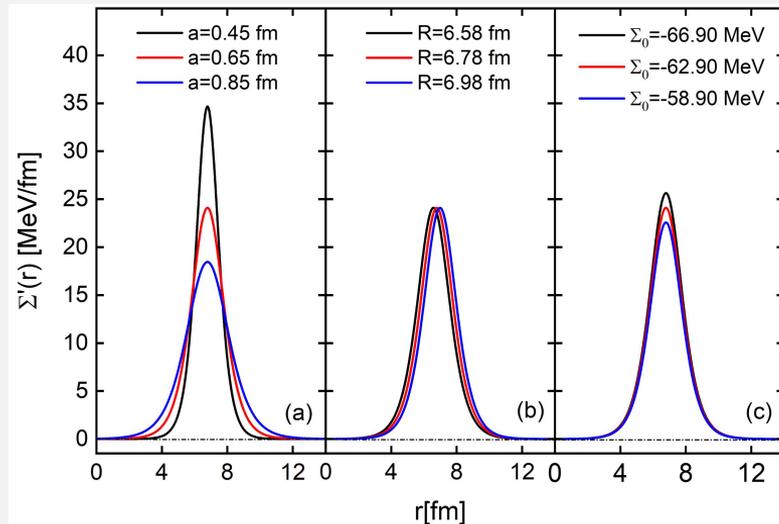
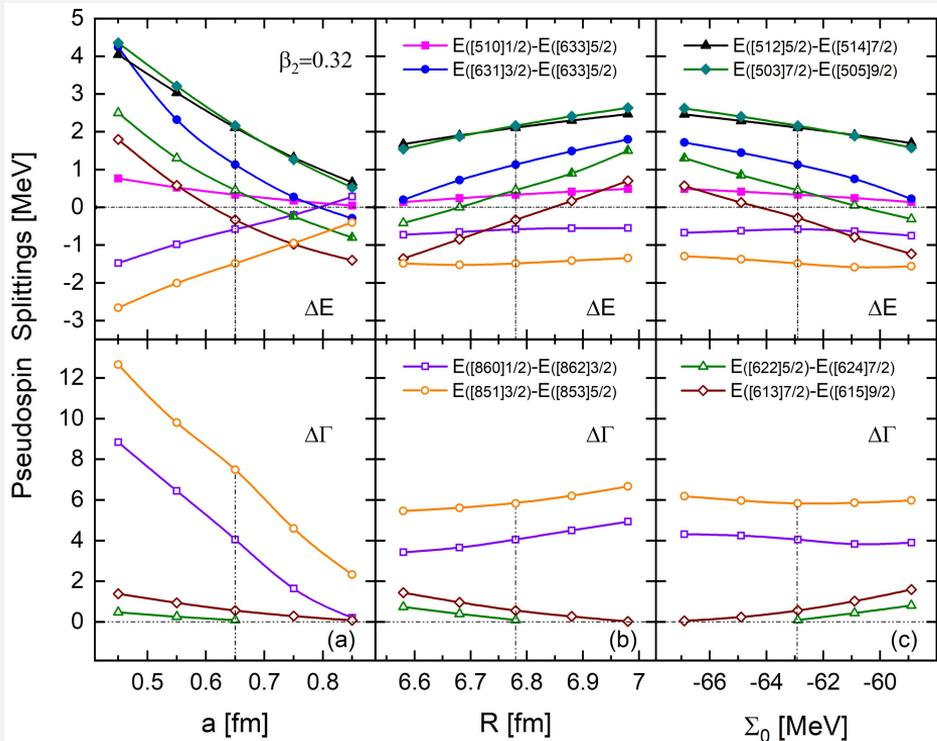


- 图3: ^{170}Yb 赝自旋伙伴态单中子能量劈裂和宽度劈裂随四极形变 β_2 的变化。



- 图4: ^{170}Yb 共振态赝自旋伙伴态 $[613]7/2$ 和 $[615]9/2$ 的主要占据几率随 β_2 的变化。

► 赝自旋伙伴态之间劈裂与势场参数的关系



• 图5: $\beta_2 = 0.32$ 时 ^{170}Yb 赝自旋伙伴态能量和宽度劈裂随势场参数的变化

• 图6: Σ 势及其随势场参数的变化关系。

04

Summary and Prospect

总结展望

➤ 总结

球形核

- 以 ^{132}Sn 为例，从能量、宽度和波函数角度，证实球形核共振态中确实具有赝自旋对称性。
- 考察了势场形状与赝自旋对称性质量的关系，对理解从稳定核到奇特核的变化及性质有重要意义。

➤ 主要创新点：

首次在动量空间下给出共振态波函数，并对其波函数劈裂进行了定量的考察。

赝自旋对称性

形变核

- 以 ^{170}Yb 为例，从能量、宽度和径向密度分布角度，证实形变核共振态中确实具有赝自旋对称性。
- 重点考察了形变参数与赝自旋对称性质量的关系，对理解形变奇特核的性质有重要意义。

➤ 主要创新点：

首次研究了形变核共振态的赝自旋对称性。

► 展望

- 相对论框架下的复动量表象（CMR）方法尚未应用于对形变核共振态自旋对称性的研究。后续将进一步完善程序，以自旋对称性为研究主题进行探索，完善对形变核共振态中相对论对称性的研究。
- 采用 RMF-CMR 计算输出的自洽势场，研究形变核中共振态的赝自旋对称性与自旋对称性，推进对相对论对称性的探索。
- 通过计算方法和实验手段，探究核子之间相互作用与赝自旋对称性之间的关系，如研究核子-核子相互作用的对称性、强度等参数等对赝自旋对称性的影响



Thank you for your criticism and correction!

感谢各位专家批评指正!