

第二届原子核从头计算与 β 衰变前沿研讨会

2026.1.10-12, 重庆

第一性原理计算探究原子核中的同位旋对称性破缺

李健国

中国科学院近代物理研究所

合作者：左维，袁琪，李红蕙，谢萌冉，沈留媛，…

同位旋对称性破缺的起因

同位旋：1932年由Heisenberg提出,镜像原子核的性质相同



➤ 粒子物理

- ✓ u-d 夸克质量区别
- ✓ 夸克之间的电磁效应

1. p-n 质量区别:

$$m_p = 1.00782503 u, m_n = 1.00866491 u$$

2. p-n 电荷区别:

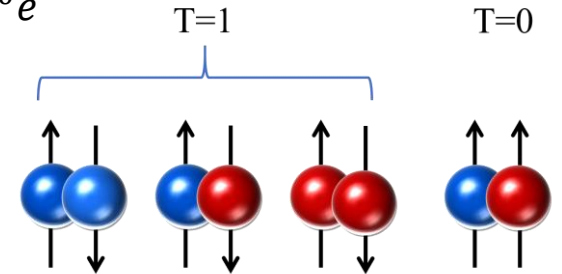
$$e_p = e, e_n = (-4.3 \pm 7.1) \times 10^{-20} e$$

➤ 核物理

- ✓ 库仑相互作用
- ✓ 核子-核子相互作用的区别

- 电荷对称性破缺 (Charge symmetry breaking--CSB) $V_{nn} - V_{pp}$ (同位旋矢量)
- 电荷无关性破缺 (Charge independent breaking--CIB) $2V_{np} - (V_{nn} + V_{pp})$ (同位旋张量)

同位旋不守恒力 (Isospin non-conserving force--INC)



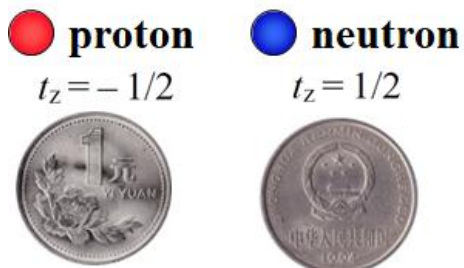
✓ 弱束缚效应

探索同位旋对称性破缺的物理机制：库仑力，核力，弱束缚效应…

原子核中的同位旋对称性破缺



➤ 同位旋：（近似的假设）



➤ 前期的理论研究主要手段：壳模型

国内：上海交通大学 孙扬 教授

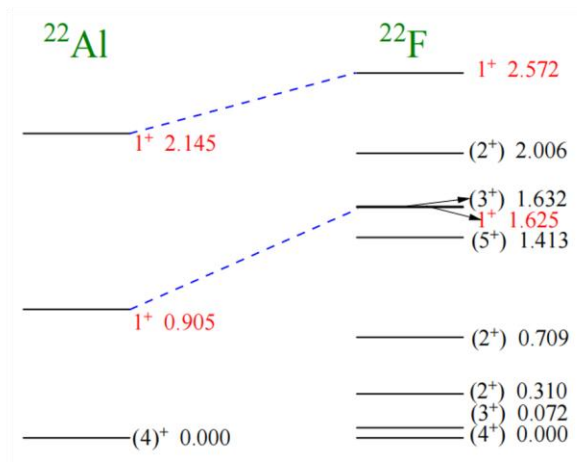
中山大学 袁岑溪 教授

国际：法国Lenzi等人

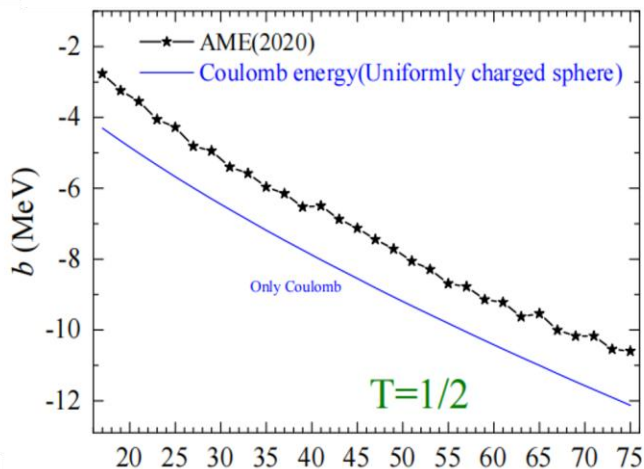
同位旋对称性破缺：实验结果

唯象手段：调整与 $1s_{1/2}$ 相关的矩阵元，重现实验结果

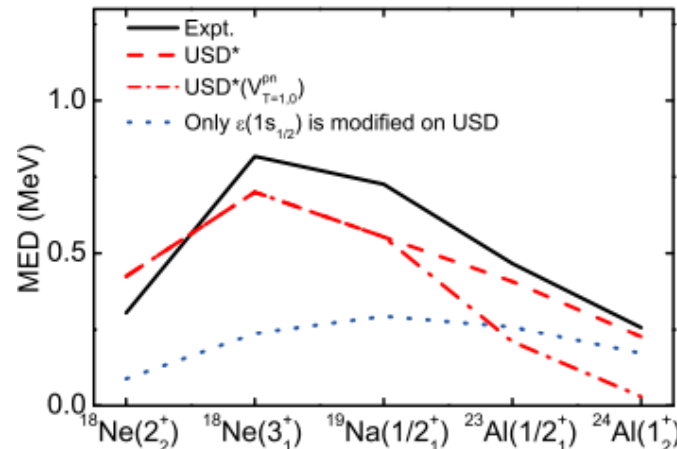
镜像核能谱
(Thomas-Ehrman shift)



同位旋多重质量方程
(Nolen-Schiffer anomaly)



J. Lee, X.X. Xu, et al., PRL 125, 192503 (2020) *Y. H. Zhang et al., PRL 109, 102501 (2012)*

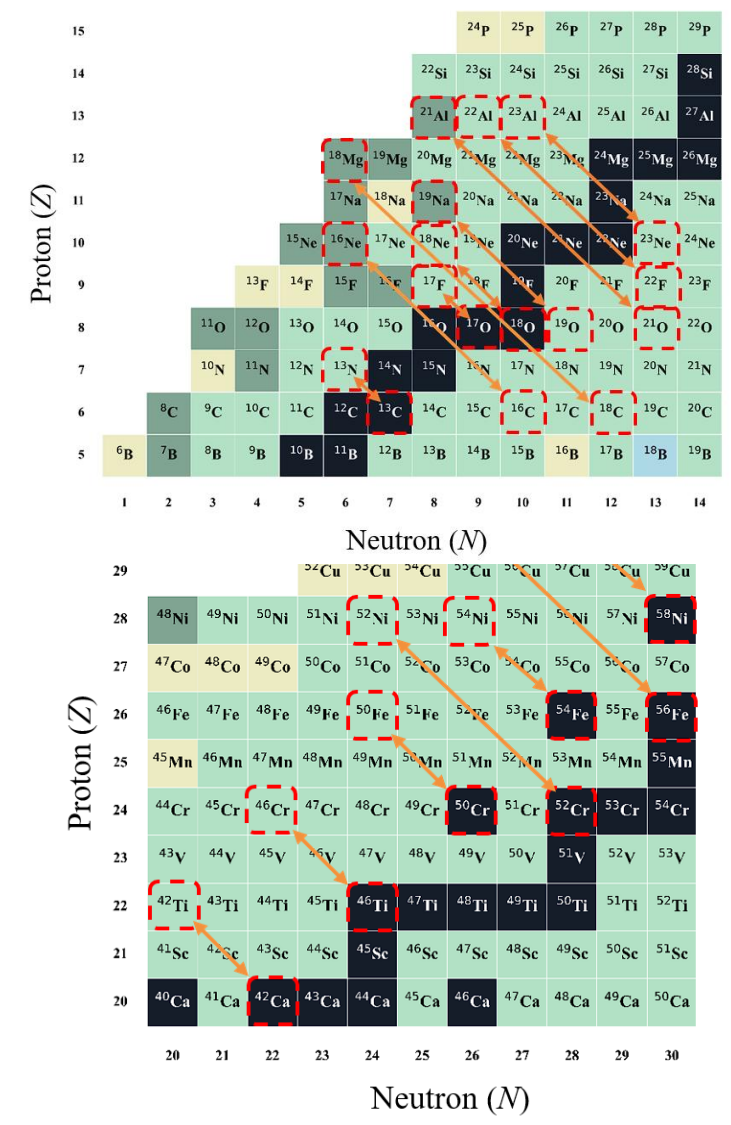
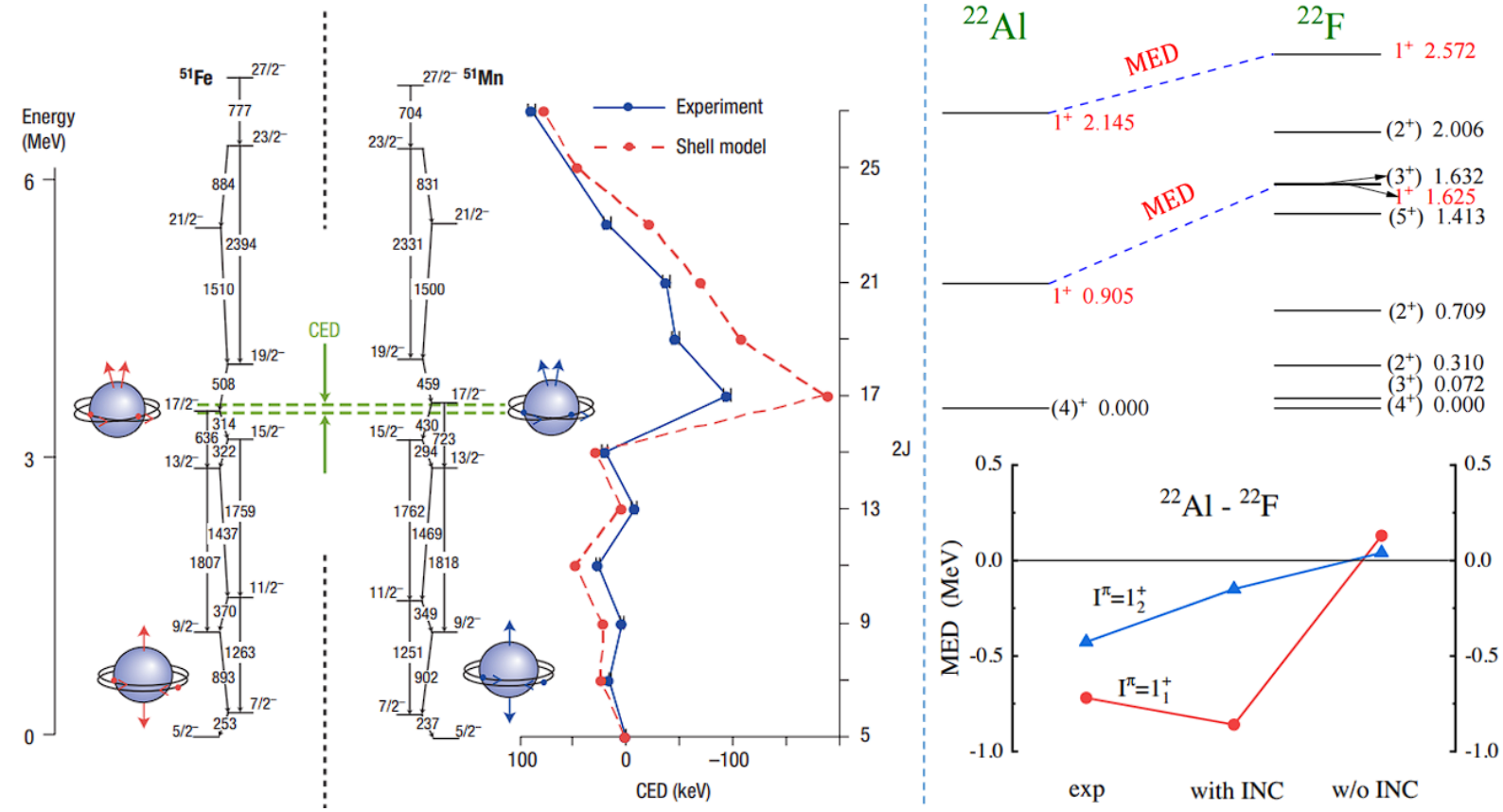


第一性原理计算中无额外参数，应用于同位旋对称性破缺研究

镜像原子核中同位旋对称性研究现状



sd- 和 pf-壳 镜像原子核中的镜像能级差对比



理论上精确描述镜像能级差依然是理论研究的挑战

质子滴线核中的 β 衰变-同位旋对称性破缺



镜像能级差异(MED)—
检验哈密顿量与波函数

$$\text{MED} = E_x(J, T, T_Z = -T) - E_x(J, T, T_Z = T),$$

Thomas-Ehrman Shift

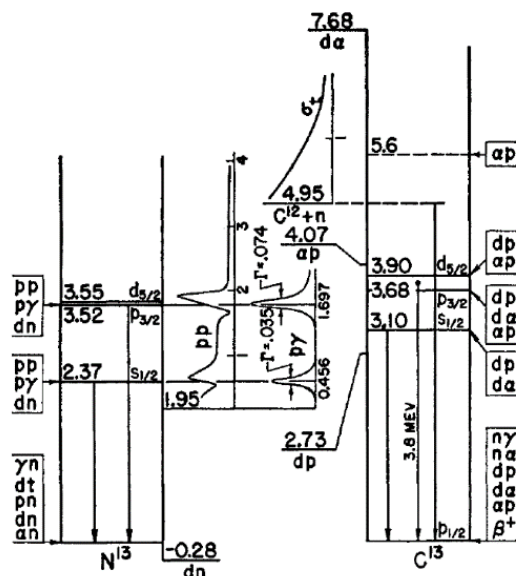


FIG. 1. The energy levels of ^{13}C and ^{13}N below 6 MeV.

Phys. Rev. 88,1109 (1952)

mirror asymmetry parameter (δ):
检验镜像多体波函数

$$\delta = \frac{ft^+}{ft^-} - 1$$



$\delta \gg 0$
isospin symmetry breaking

PHYSICAL REVIEW LETTERS 125, 192503 (2020)

Isospin Asymmetry in $^{22}\text{Si}/^{22}\text{O}$ Mirror Gamow-Teller Transitions Reveals
the Halo Structure of ^{22}Al

$^{22}\text{Si} \rightarrow ^{22}\text{Al} \ Q_{\text{EC}} = 13963 \text{ keV}$								$^{22}\text{O} \rightarrow ^{22}\text{F} \ Q_{\beta^-} = 6490 \text{ keV}$								δ (%)	
Experiment				Calculations				Experiment				Calculations					
I_i^π	E_x (MeV)	$br\%$	$\log(ft^+)$	E_x (MeV)	$\log(ft^+)$			E_x (MeV)	$br\%$	$\log(ft^-)$	E_x (MeV)	$\log(ft^-)$			Experiment	Calculations	
1_1^+	0.905	5.3 (10)	5.09 (9)	1.12 [1.69]	4.81 [4.52]			1.625	29 (4)	4.6 (1)	1.98 [1.56]	4.32 [4.56]			209 (96)	212 [−7]	
1_2^+	2.145	56.5 (51)	3.83 (5)	2.43 [2.55]	3.71 [3.72]			2.572	68 (6)	3.8 (1)	2.58 [2.51]	3.72 [3.68]			7 (28)	−3.4 [10]	

Comparing the mirror β decay of $^{22}\text{Si}/^{22}\text{O}$, we found **the largest** value of mirror asymmetry ($\delta = 209(96) \%$) in low-lying states by far, in the transition to the first 1^+ excited state.

核多体问题: $H|\Psi\rangle = E|\Psi\rangle$

1. A体哈密顿量 H

$$H = \sum_{i=1}^A \left(1 - \frac{1}{A}\right) \frac{p_i^2}{2m} + \sum_{i<j}^A \left(v_{ij}^{\text{NN}} - \frac{\mathbf{p}_i \cdot \mathbf{p}_j}{mA}\right) + \sum_{i<j<k}^A v_{ijk}^{\text{3N}}$$

2. 对A体哈密顿量做正规乘积 (Normal Order)

$$\begin{aligned}
 E &= \left(1 - \frac{1}{A}\right) \sum_i \langle i | T^{(1)} | i \rangle n_i + \frac{1}{2} \sum_{ij} \langle ij | T^{(2)} + V^{(2)} | ij \rangle n_i n_j \\
 &\quad + \frac{1}{6} \sum_{ijk} \langle ijk | V^{(3)} | ijk \rangle n_i n_j n_k \\
 H_{NO} &= \underbrace{E}_{\text{red}} + \sum_{ij} \underbrace{f_{ij}}_{\text{blue}} : a_i^\dagger a_j : + \frac{1}{4} \sum_{ijkl} \underbrace{\Gamma_{ijkl}}_{\text{green}} : a_i^\dagger a_j^\dagger a_l a_k : + \frac{1}{36} \sum_{ijklmn} \underbrace{W_{ijklmn}}_{\text{orange}} : a_i^\dagger a_j^\dagger a_k^\dagger a_n a_m a_l : \\
 f_{ij} &= \left(1 - \frac{1}{A}\right) \langle i | T^{(1)} | j \rangle + \sum_a \langle ia | T^{(2)} + V^{(2)} | ja \rangle n_a \\
 &\quad + \frac{1}{2} \sum_{ab} \langle iab | V^{(3)} | jab \rangle n_a n_b \\
 \Gamma_{ijkl} &= \langle ij | T^{(2)} + V^{(2)} | kl \rangle + \sum_a \langle ija | V^{(3)} | kla \rangle n_a \\
 W_{ijklmn} &= \langle ijk | V^{(3)} | lmn \rangle
 \end{aligned}$$

正规乘积后的两体近似(NO2B)包含三体力效应。

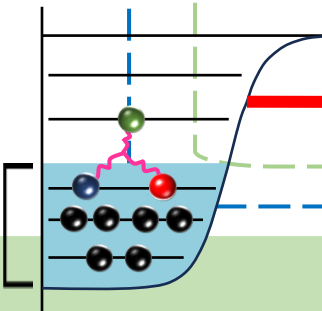
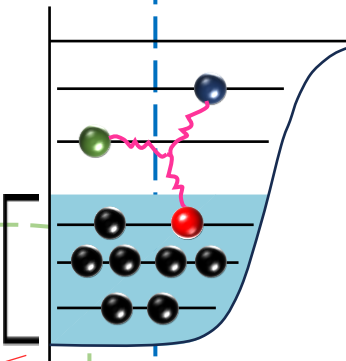
核多体问题: $H|\Psi\rangle = E|\Psi\rangle$

1. A体哈密顿量 H

$$H = \sum_{i=1}^A \left(1 - \frac{1}{A}\right) \frac{p_i^2}{2m} + \sum_{i<j}^A \left(v_{ij}^{NN} - \frac{p_i \cdot p_j}{mA}\right) + \sum_{i<j<k}^A v_{ijk}^{3N}$$

2. 对A体哈密顿量做正规乘积 (Normal Order)

$$E = \left(1 - \frac{1}{A}\right) \sum_i \langle i | T^{(1)} | i \rangle n_i + \frac{1}{2} \sum_{ij} \langle ij | T^{(2)} + V^{(2)} | ij \rangle n_i n_j + \frac{1}{6} \sum_{ijk} \langle ijk | V^{(3)} | ijk \rangle n_i n_j n_k$$
$$H_{NO} = \underbrace{E}_{\text{red circle}} + \sum_{ij} \underbrace{f_{ij}}_{\text{blue circle}} : a_i^\dagger a_j : + \frac{1}{4} \sum_{ijkl} \underbrace{\Gamma_{ijkl}}_{\text{green circle}} : a_i^\dagger a_j^\dagger a_l a_k : + \frac{1}{36} \sum_{ijklmn} \underbrace{W_{ijklmn}}_{\text{orange circle}} : a_i^\dagger a_j^\dagger a_k^\dagger a_n a_m a_l :$$
$$f_{ij} = \left(1 - \frac{1}{A}\right) \langle i | T^{(1)} | j \rangle + \sum_a \langle ia | T^{(2)} + V^{(2)} | ja \rangle n_a + \frac{1}{2} \sum_{ab} \langle iab | V^{(3)} | jab \rangle n_a n_b$$
$$\Gamma_{ijkl} = \langle ij | T^{(2)} + V^{(2)} | kl \rangle + \sum_a \langle ija | V^{(3)} | kla \rangle n_a$$
$$W_{ijklmn} = \langle ijk | V^{(3)} | lmn \rangle$$



16O core

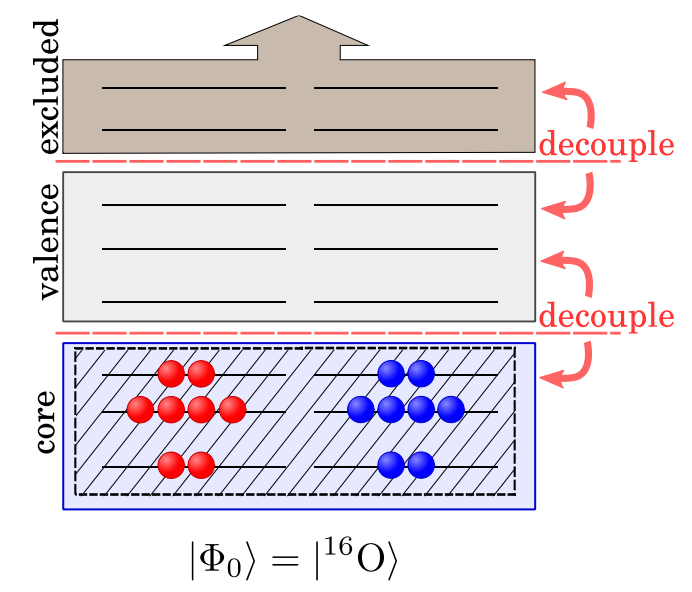
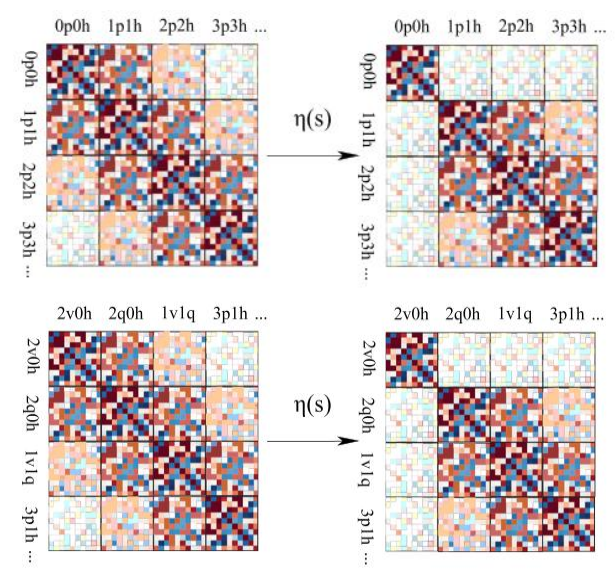
16O core

正规乘积后的两体近似(NO2B)包含三体力效应。

3. 通过连续的么正变换 U 将正规乘积的哈密顿量脱耦成价空间的有效哈密顿量

$$H_{eff}(s) = U(s)H_{NO}U^\dagger(s), (UU^\dagger = 1)$$

- 流方程: $\frac{d}{ds}H_{eff}(s) = [\eta(s), H(s)]$
- 生成子: $\eta(s) = \frac{dU(s)}{ds}U^\dagger(s) = -\eta^\dagger(s)$
- 么正变换: $U(s) = e^{\Omega(s)} = e^{\int \eta(s)ds}$



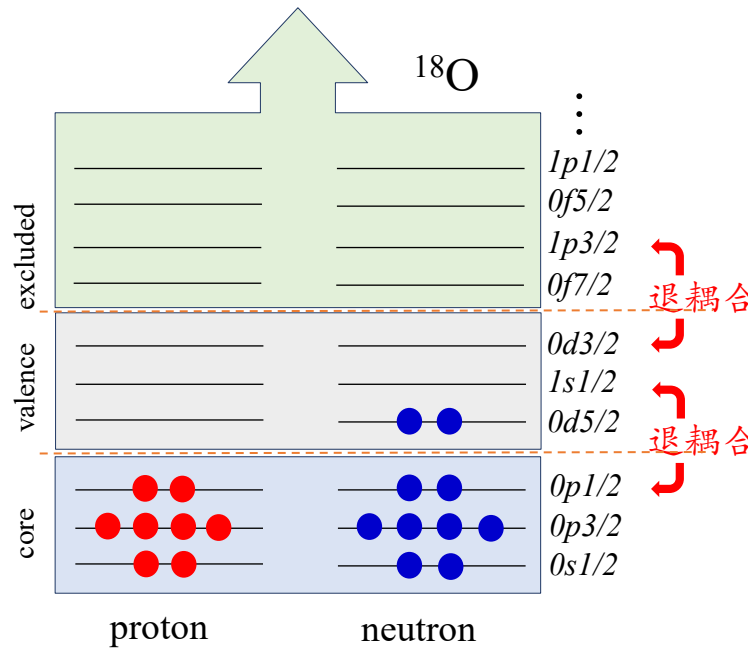
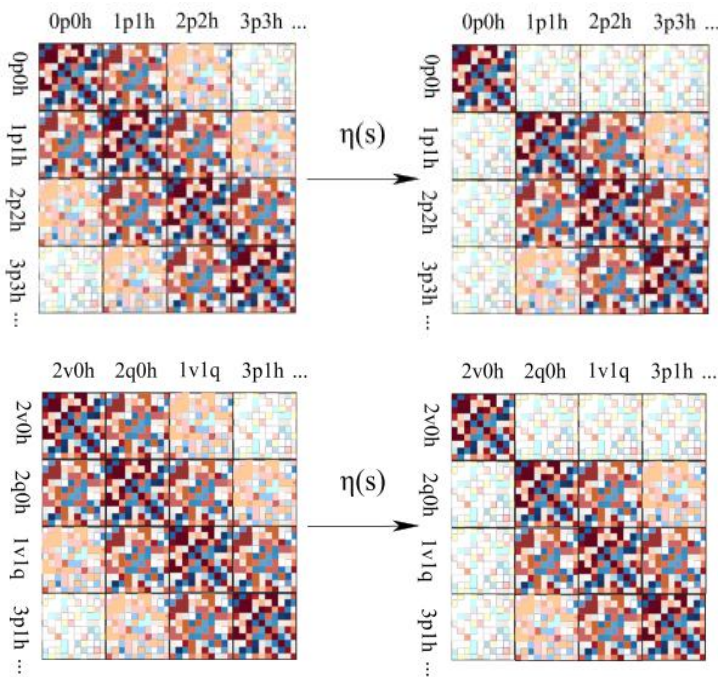
价空间-介质相似重整化群 (VS-IMSRG)

第一性原理 价空间的介质相似重整化群 (*Ab initio* VS-IMSRG)
Ab initio Valence-Space In-Medium Similarity Renormalization Group

➤ 核心理念

$$H(s) = U(s)H(0)U^\dagger(s)$$

$$= H^d(s) + H^{od}(s) \rightarrow H^d(\infty)$$



➤ 优势:

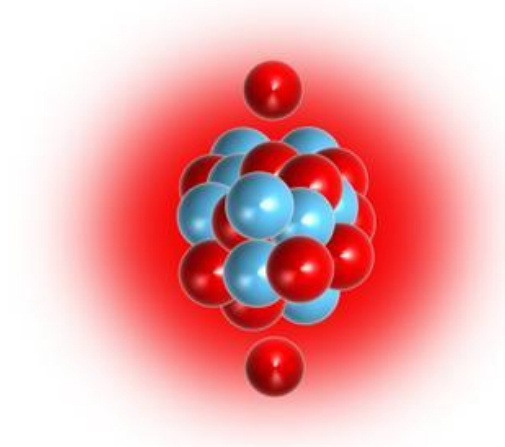
- 基于现实核力 (NN+3N)
 - 包括CSB 以及 CIB 效应
 - 同位旋对称性破缺: 接触项和交换项
- 在计算过程中, 没有引入额外的参数
- 精确处理核多体系统

壳模型能算的, VS-IMSRG都可以从现实核力出发进行计算

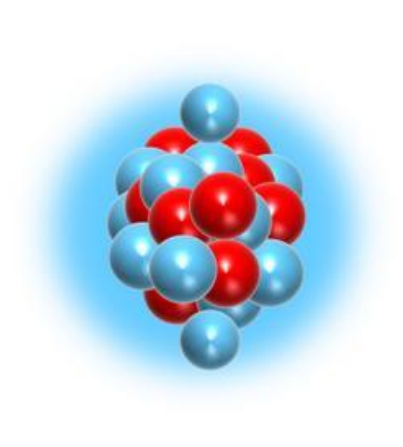
第一性原理计算探究

镜像原子核能级差中的同位旋对称性破缺

^{31}Ar

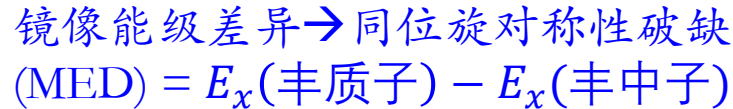


^{31}Al



PHYSICAL REVIEW C **107**, 014302 (2023)

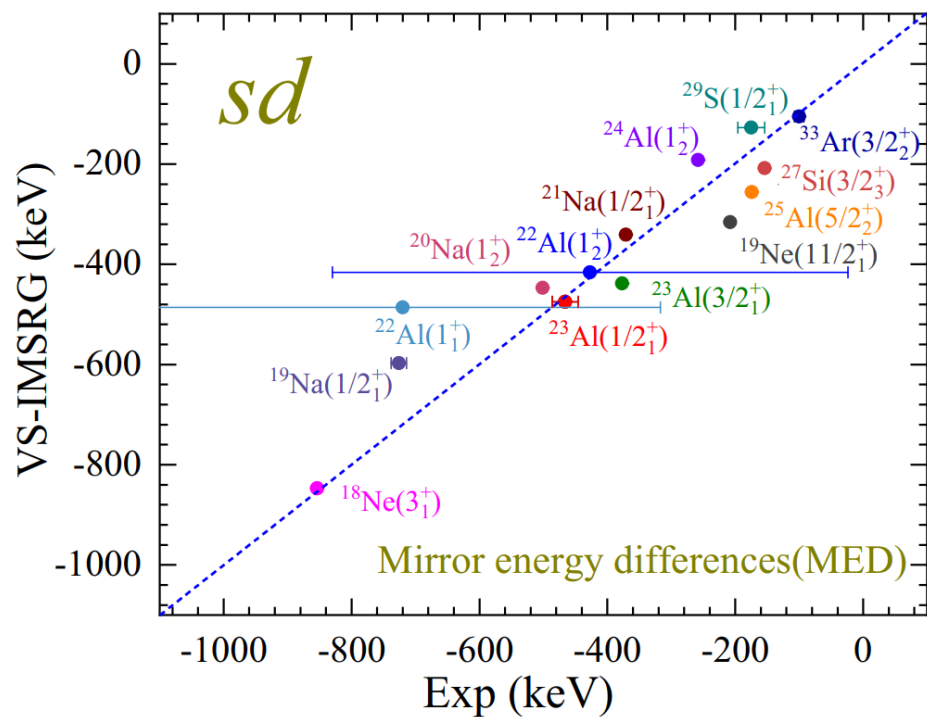
³*School of Physics, and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China*



1. 第一性原理计算镜像原子核能级差异

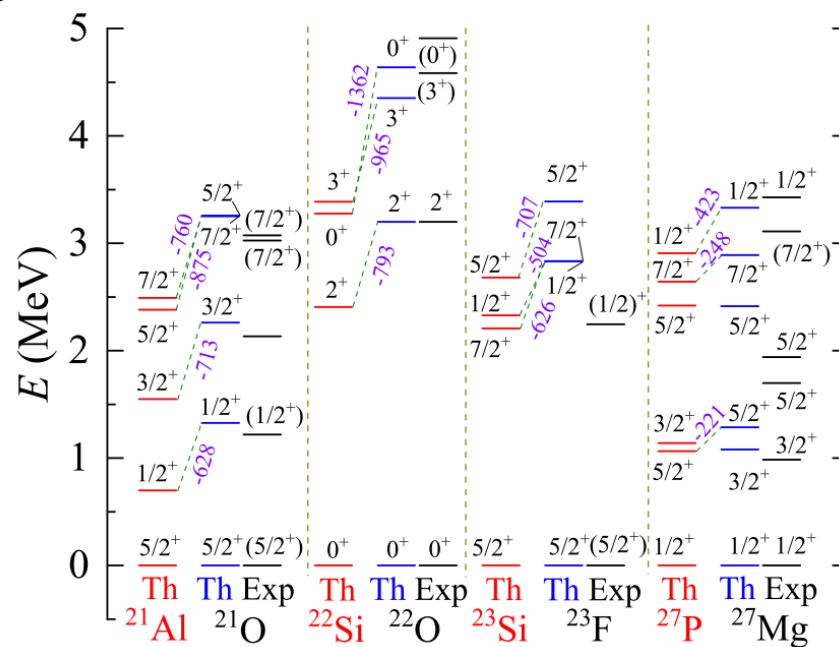
- ① 计算实验上已发现具有较大MED的镜像核相似态。

第一性原理能较好地重现实验结果



第一性原理VS-IMSRG方法可用于预测实验感兴趣的未知原子核。

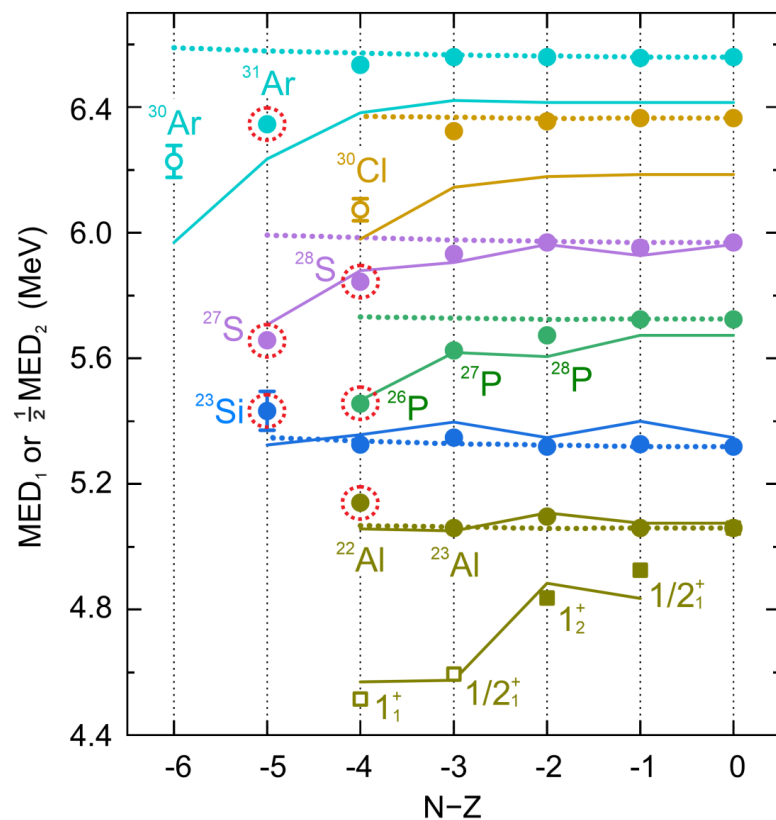
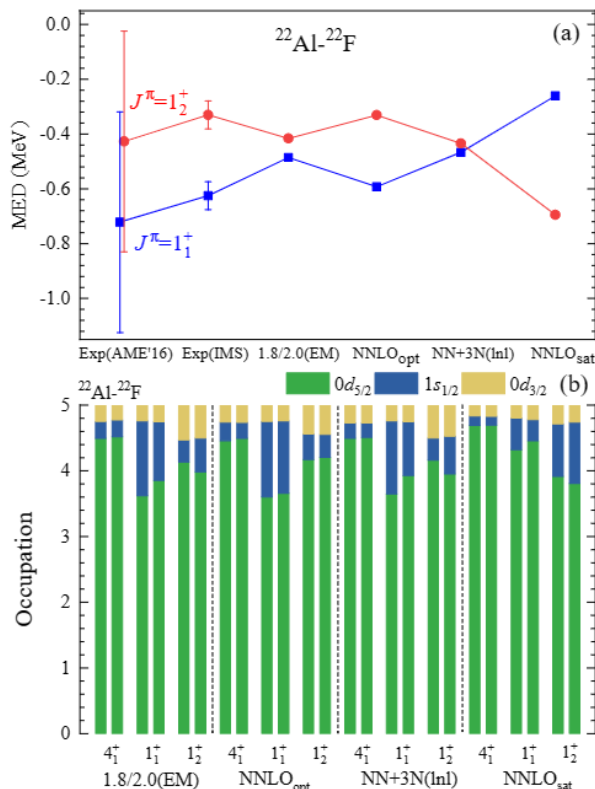
- ② 预测sd壳质子滴线区原子核的低激发谱。



- 其镜像核(对应的丰中子核)的计算结果可与实验比拟。
- 丰质子原子核的预测是可靠。

MED 较大

与近物所张玉虎研究员、王猛研究员团队合作



- ✓ 镜像原子核分离能在滴线附近偏离正常曲线
- ✓ Al 同位素激发态存在明显同位旋对称性破缺
- ✓ 滴线原子核 ^{26}P , ^{27}P , ^{27}S , ^{31}Ar 基态中存在明显同位旋对称性破缺
- ✓ 同位旋对称性破缺的机制与晕核形成机制类似
- ✓ 滴线原子核 ^{26}P , ^{27}P , ^{27}S , ^{31}Ar 具有晕结构

M.Z. Sun, Y. Yu, X.P. Wang, M. Wang, [J.G. Li*](#), Y.H. Zhang*, et al., Chin. Phys. C(2024)

Y. Yu, Y. M. Xing, Y. H. Zhang, M. Wang, X. H. Zhou, [J. G. Li](#), H. H. Li, et al., PRL(2024)

传统幻数的消失与新幻数出现

传统幻数消失



反转岛

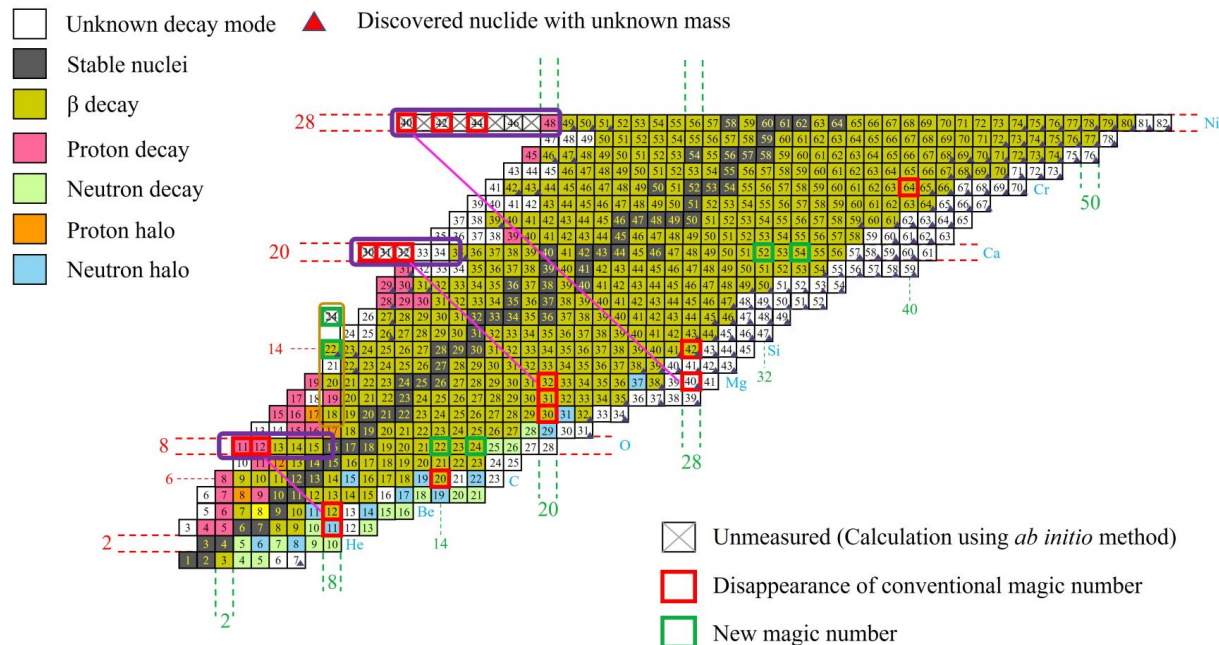
中子数为8, 20, 28, 与40附近的丰中子核区形成一片具有较大形变的原子核

$N=8$: ^{12}Be

$N=20$: ^{30}Ne , ^{32}Mg

$N=28$: ^{42}Si , ^{40}Mg

$N=40$: ^{64}Cr



新幻数出现

出现中子数为14, 16, 32与34的新幻数

$N=14$: ^{22}O

$N=16$: ^{24}O

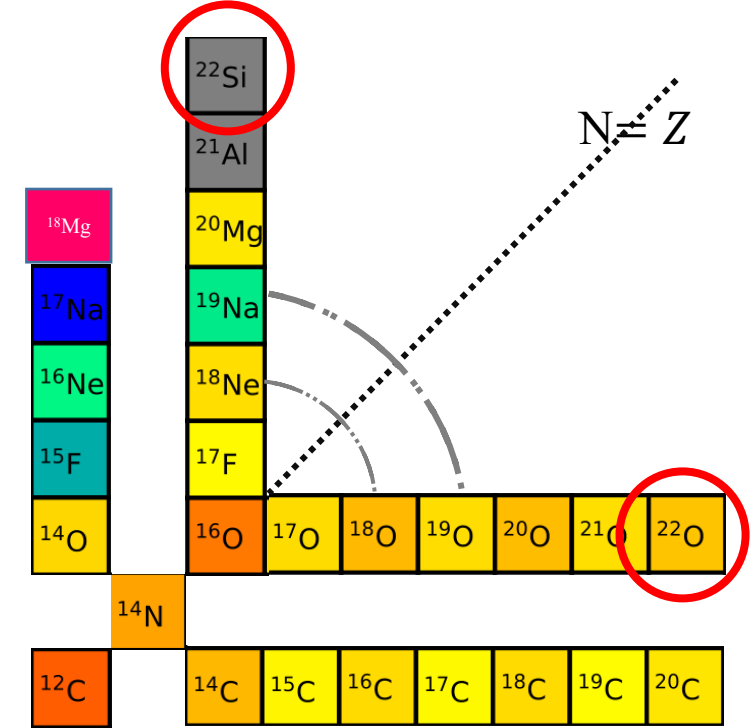
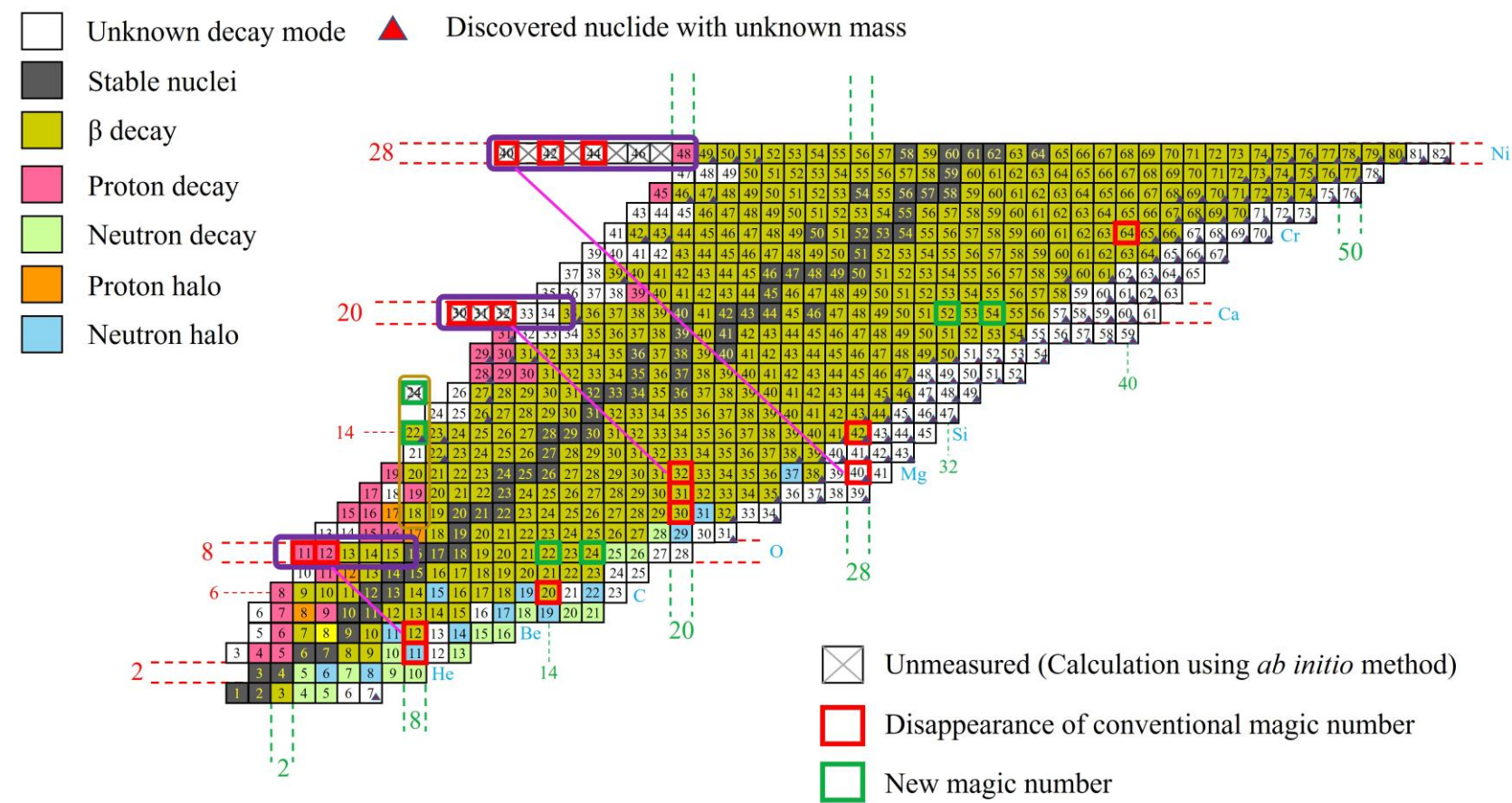
$N=32$: ^{52}Ca

$N=34$: ^{54}Ca

传统幻数消失与新幻数形成的物理机制

丰质子原子核中壳结构是如何演化？同位旋对称性破缺对丰质子原子核中壳演化影响

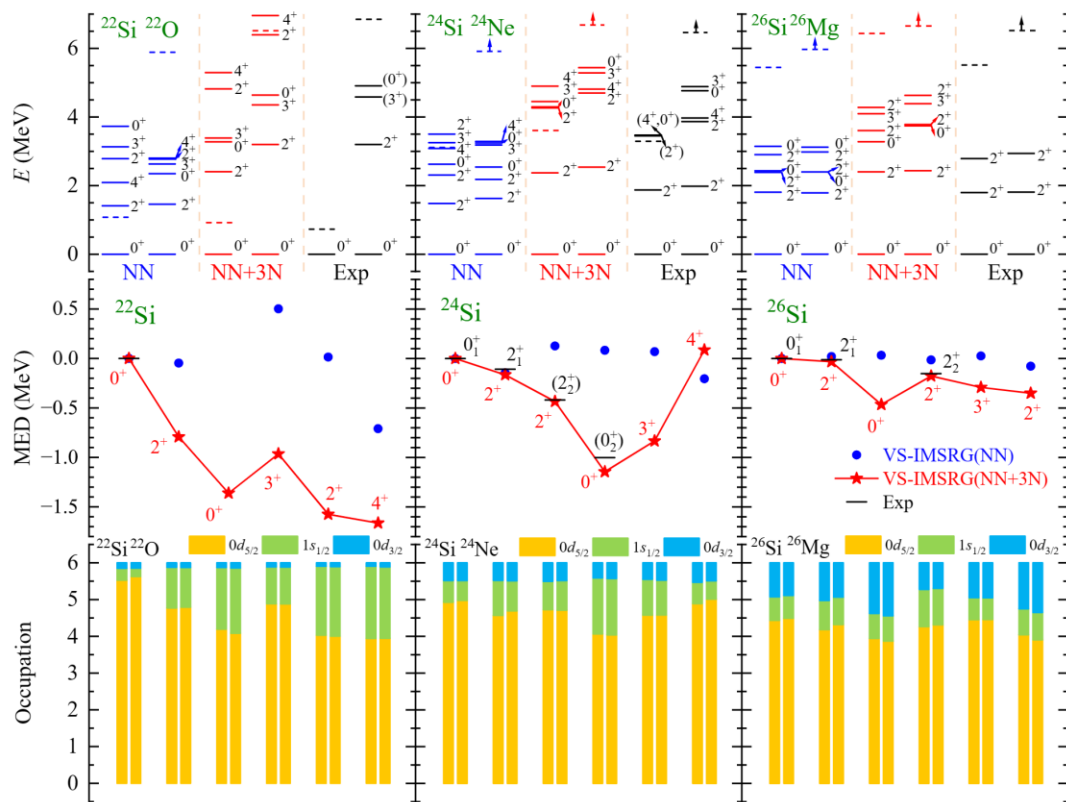
壳结构演化—同位旋对称性破缺



- ✓ 传统幻数的消失与新幻数产生
- ✓ 丰质子原子核中壳结构演化规律？ 同位旋对称性破缺的效应

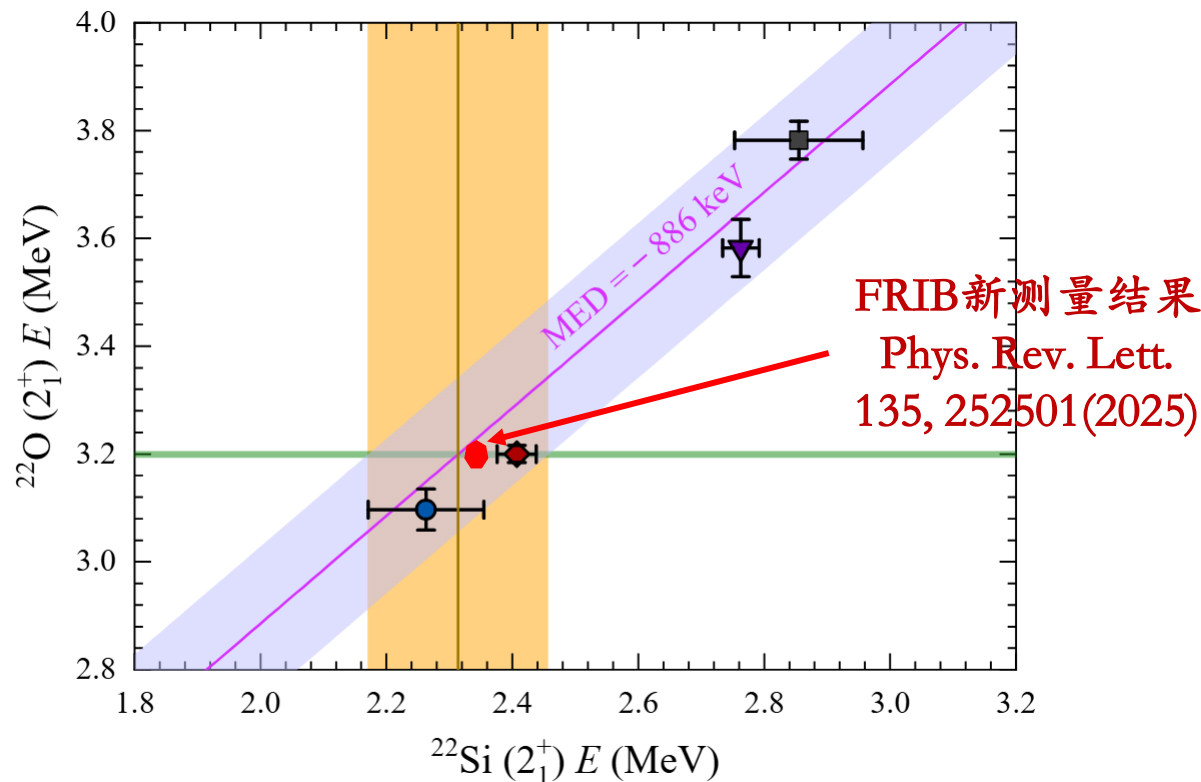
- ✓ 丰中子双幻核: ^{22}O
- ✓ ^{22}Si - ^{22}O 中的同位旋对称性破缺

2. ^{22}Si 双幻核结构---新幻数



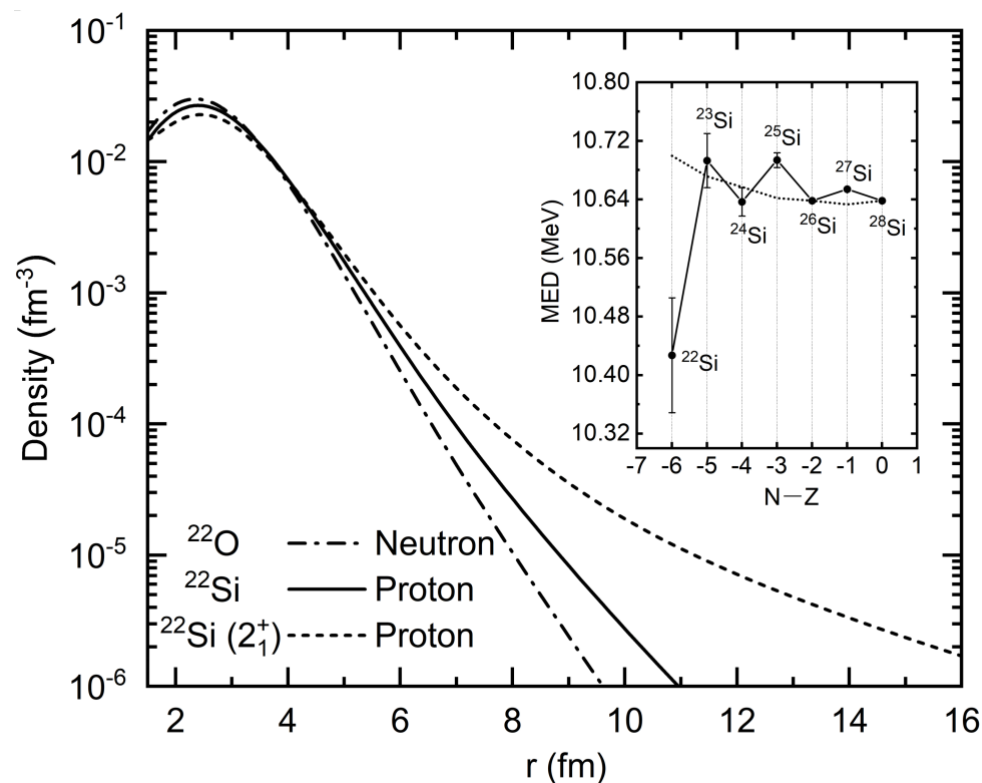
- 计算给出的 ^{22}Si 与 ^{22}O 的 $E(2_1^+)$ 的位置分别为2.4与3.2 MeV, Thomas-Ehrman shift 效应; 计算显示 $^{22}\text{Si}/^{22}\text{O}$ 的 0^+ 与 2^+ 的组态非常接近
- 尽管 ^{22}Si 的 $E(2_1^+)$ 较低, 但是与 ^{22}O 相近, ^{22}Si 依然表现幻数性质。

^{22}Si 的壳结构对于认识丰质子原子核中的壳结构演化很关键



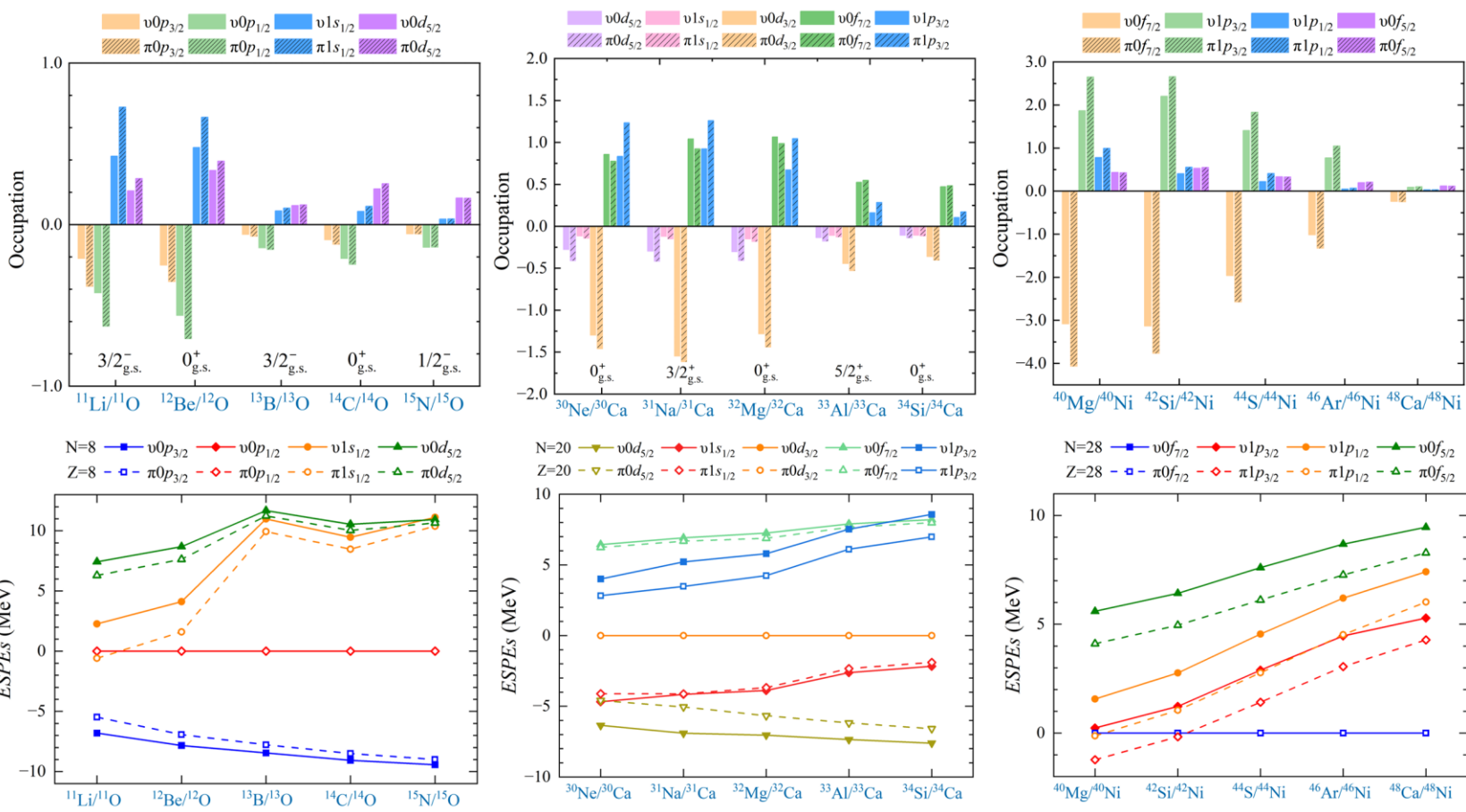
不同核力给出的 ^{22}Si 的MED值均比较接近

J.G. Li,* H. H. Li, S. Zhang, Y. M. Xing,* W. Zuo,* *Phys. Lett. B* 846, 138197 (2023)



Y. M. Xing, Y. F. Luo, Y. H. Zhang,[†] M. Wang, X. H. Zhou, **J. G. Li*** et al.,
PRL 135,012501 (2025) (共同通讯作者)

3. $Z=8$ 、20 和28 的丰质子反转岛是否存在

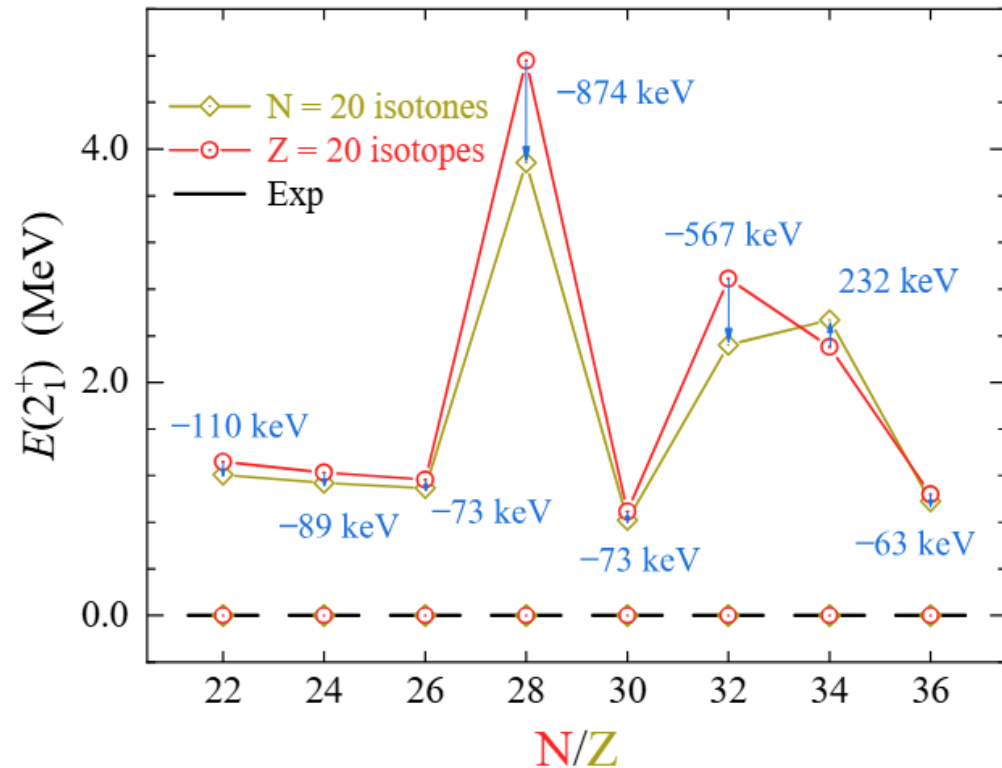
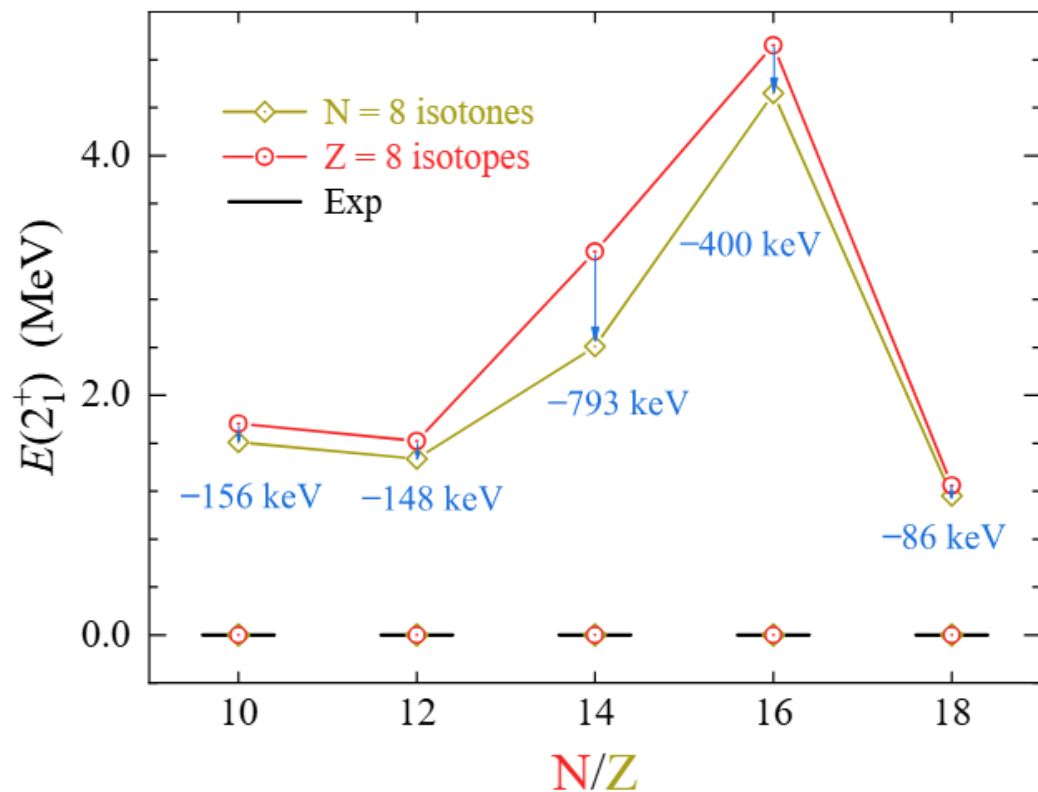


- ✓ 第一性原理计算能很好的重现 $N=8, 20, 28$ 反转岛区原子核性质;
- ✓ 计算给出丰质子原子核 $Z=8, 20, 28$ 也存在反转岛;
- ✓ 跨壳激发成分: 丰质子核 > 丰中子核;
- ✓ 丰质子原子核的形变比其镜像的丰中子核大; 丰质子反转岛可能比丰中子的反转岛区域更加。

H. H. Li, [J.G. Li](#),* M. R. Xie, W. Zuo, PLB(2025)

存在 $Z=8$ 、20 和28 的丰质子反转岛，且其形变比镜像的丰中子核大

3. 丰中子核中发现的新幻数在丰质子核中是否存在？



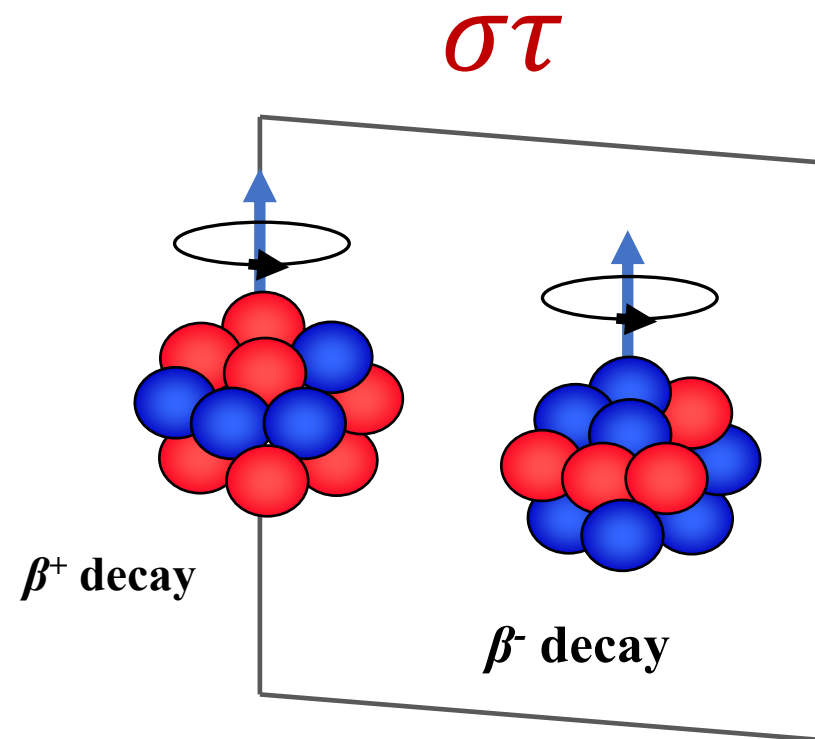
- ✓ ^{22}O , ^{24}O 是双幻核
- ✓ 预言 ^{22}Si , ^{24}S 也是双幻核
- ✓ ^{22}Si 中存在较大 MED 值

- ✓ $^{52}\text{Ca}(N=32)$, $^{54}\text{Ca}(N=34)$ 是双幻核
- ✓ 预言 $^{52}\text{Ge}(Z=32)$, $^{54}\text{Se}(Z=34)$ 也是双幻核

H. H. Li, [J.G. Li](#),* M. R. Xie, W. Zuo, PLB(2025)

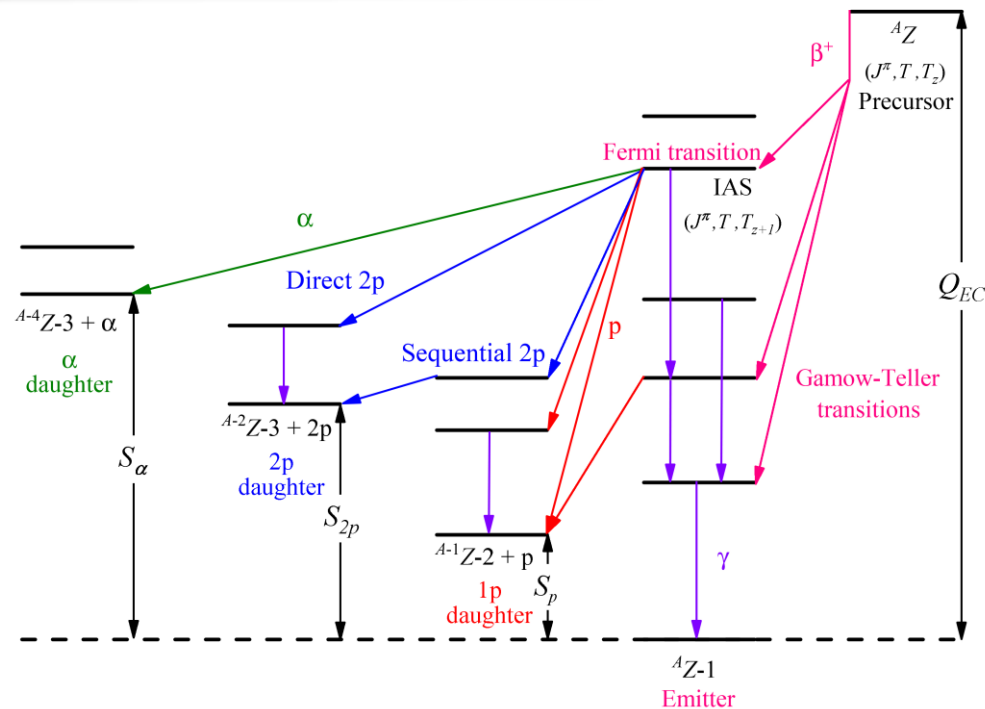
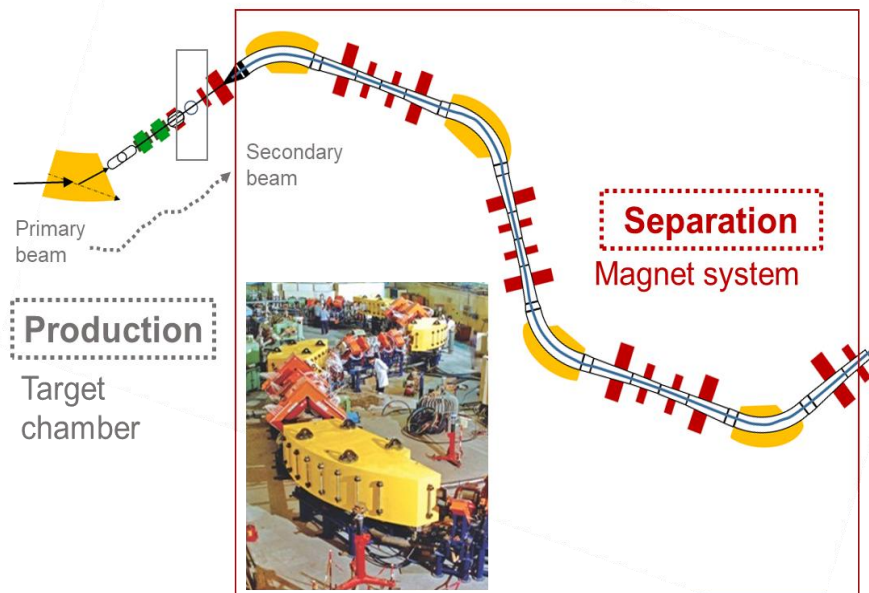
第一性原理计算探究

镜像原子核 β 衰变中的同位旋对称性破缺



mirror nuclei

exchange the proton and neutron number



PHYSICAL REVIEW LETTERS 125, 192503 (2020)

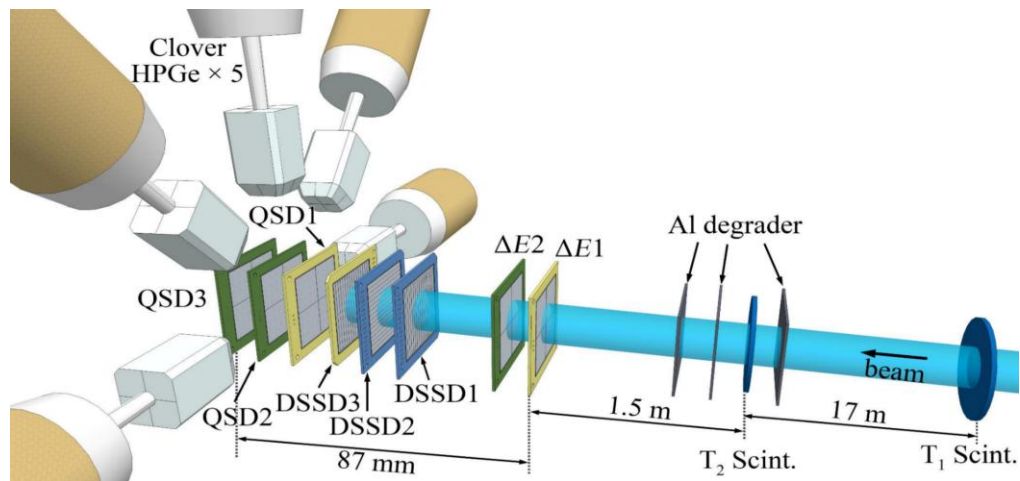
PHYSICAL REVIEW LETTERS 129, 242502 (2022)

Large Isospin Asymmetry in $^{22}\text{Si}/^{22}\text{O}$ Mirror Gamow-Teller Transitions Reveals the Halo Structure of ^{22}Al

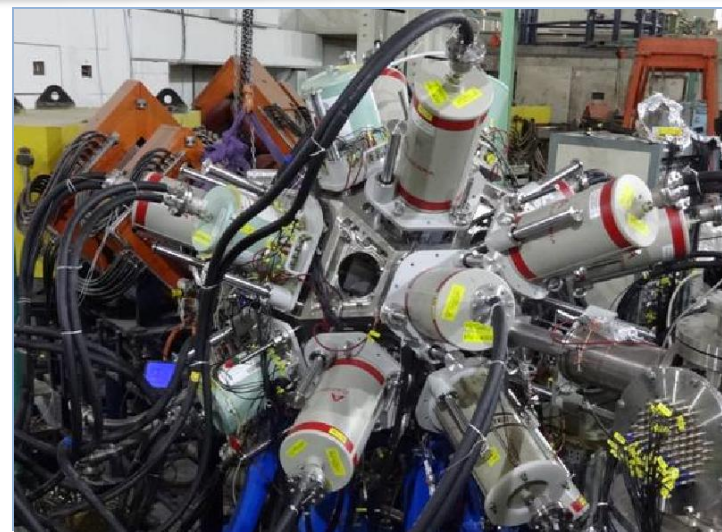
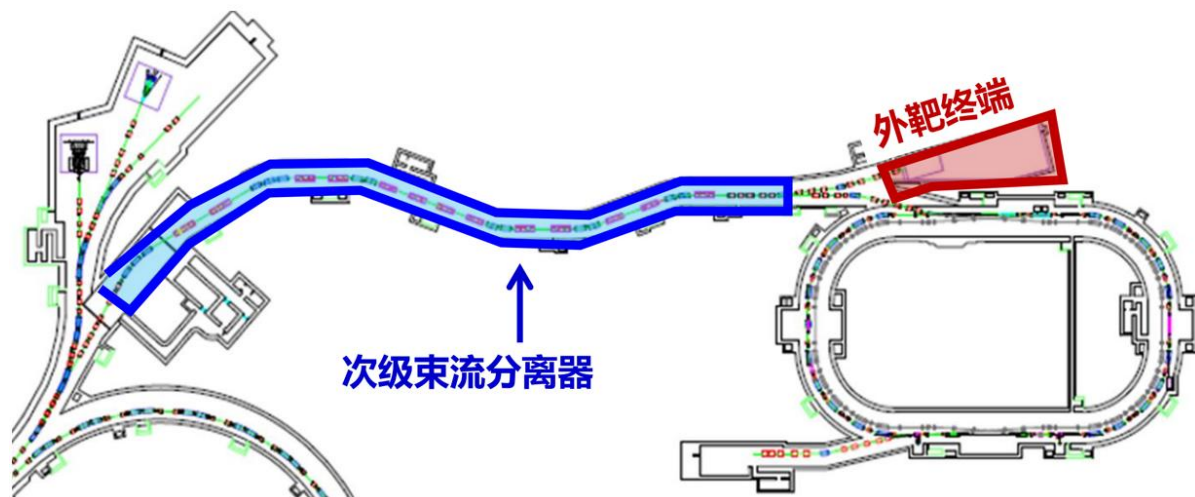
J. Lee (李晓菁),^{1,*} X. X. Xu (徐新星),^{1,2,3,4,5,*} K. Kaneko (金子也和),⁶ Y. Sun (孙扬),^{7,2,3,4} C. J. Lin (林承健),^{3,8,8} L. J. Sun (孙立杰),^{3,7,9} P. F. Liang (梁鹏飞),¹ Z. H. Li (李智焕),¹⁰ J. Li (李晶),¹⁰ H. Y. Wu (吴鸿毅),¹⁰ D. Q. Fang (方德清),^{11,12} J. S. Wang (王建松),^{2,4,13} Y. Y. Yang (杨彦云),^{2,4} C. X. Yuan (袁岑溪),¹⁴ Y. H. Lam (蓝乙华),² Y. T. Wang (王玉廷),^{12,15} K. Wang (王康),^{2,12} J. G. Wang (王建国),² J. B. Ma (马军兵),² J. J. Liu (刘嘉健),^{1,2} P. J. Li (李朋杰),¹ Q. Q. Zhao (赵青青),¹ L. Yang (杨磊),³ N. R. Ma (马南茹),³ D. X. Wang (王东玺),³ F. P. Zhong (钟福鹏),³ S. H. Zhong (钟善豪),³ F. Yang (杨峰),³ H. M. Jia (贾会明),³ P. W. Wen (温培威),³ M. Pan (潘敏),^{3,16} H. L. Zang (臧宏亮),¹⁰ X. Wang (王翔),¹⁰ C. G. Wu (武晨光),¹⁰ D. W. Luo (罗迪雯),¹⁰ H. W. Wang (王宏伟),¹² C. Li (李琛),¹² C. Z. Shi (施晨钟),¹² M. W. Nie (聂茂武),¹² X. F. Li (李秀芳),¹² H. Li (李贺),¹² P. Ma (马朋),² Q. Hu (胡强),² G. Z. Shi (石国柱),² S. L. Jin (金仕纶),² M. R. Huang (黄美蓉),² Z. Bai (白真),² Y. J. Zhou (周远杰),² W. H. Ma (马维虎),² F. F. Duan (段芳芳),^{17,2} S. Y. Jin (金树亚),^{2,4} Q. R. Gao (高祺锐),² X. H. Zhou (周小红),^{2,4,5} Z. G. Hu (胡正国),^{2,4,5} M. Wang (王猛),^{2,4,5} M. L. Liu (柳敏良),^{2,4} R. F. Chen (陈若富),^{2,4} and X. W. Ma (马新文)²

Observation of a Strongly Isospin-Mixed Doublet in ^{26}Si via β -Delayed Two-Proton Decay of ^{26}P

J. J. Liu (刘嘉健),¹ X. X. Xu (徐新星),^{1,2,3,4,5,*} L. J. Sun (孙立杰),^{3,7,9} C. X. Yuan (袁岑溪),^{8,*} K. Kaneko (金子也和),⁹ Y. Sun (孙扬),^{4,13} P. F. Liang (梁鹏飞),² H. Y. Wu (吴鸿毅),¹⁰ G. Z. Shi (石国柱),¹ C. J. Lin (林承健),^{3,11} J. Lee (李晓菁),² S. M. Wang (王思敏),^{12,13} C. Qi (齐冲),¹⁴ J. G. Li (李健国),¹ H. H. Li (李红惠),¹ Latsamy Xayavong,¹⁵ Z. H. Li (李智焕),¹⁰ P. J. Li (李朋杰),¹⁰ Y. Y. Yang (杨彦云),¹ H. Jian (简豪),¹ Y. F. Gao (高雨枫),¹⁴ R. Fan (范锐),¹⁴ S. X. Zhu (查思贤),¹⁴ F. C. Dai (戴凡超),¹⁴ H. F. Zhu (朱浩锐),¹⁴ J. H. Li (李金海),¹⁴ Z. F. Chang (常志芳),¹⁴ S. L. Qin (覃淑娟),¹⁴ Z. Z. Zhang (张朝展),⁸ B. S. Cai (蔡博帅),¹⁴ R. F. Chen (陈若富),¹ J. S. Wang (王建松),^{16,1} D. X. Wang (王东玺),³ K. Wang (王康),^{1,17} F. F. Duan (段芳芳),^{1,18} Y. H. Lam (蓝乙华),¹⁴ P. Ma (马朋),¹ Z. H. Gao (高志浩),^{1,18} Q. Hu (胡强),¹ Z. Bai (白真),¹ J. B. Ma (马军兵),¹ J. G. Wang (王建国),¹ C. G. Wu (武晨光),¹⁰ D. W. Luo (罗迪雯),¹⁰ Y. Jiang (蒋颖),¹⁰ Y. Liu (刘洋),¹⁰ D. S. Hou (侯东升),¹⁴ R. Li (李忍),¹⁴ N. R. Ma (马南茹),³ W. H. Ma (马维虎),^{1,12} G. M. Yu (余功明),^{1,19} D. Patel,^{1,20} S. Y. Jin (金树亚),¹⁴ Y. F. Wang (王德峰),^{1,21} Y. C. Yu (余悦超),^{1,21} L. Y. Hu (胡力元),¹⁰ X. Wang (王翔),¹⁰ H. L. Zang (臧宏亮),¹⁰ K. L. Wang (王凯龙),¹ B. Ding (丁兵),¹ Q. Q. Zhao (赵青青),² L. Yang (杨磊),³ P. W. Wen (温培威),³ F. Yang (杨峰),³ H. M. Jia (贾会明),³ G. L. Zhang (张高龙),²² M. Pan (潘敏),^{22,3} X. Y. Wang (汪小雨),²² H. H. Sun (孙浩瀚),^{14,3} H. S. Xu (徐珊珊),^{14,3} X. H. Zhou (周小红),^{14,3} Y. H. Zhang (张玉虎),^{14,3} Z. G. Hu (胡正国),^{14,3} M. Wang (王猛),^{14,3} M. L. Liu (柳敏良),¹ H. J. Ong (王惠民),^{1,23} and W. Q. Yang (杨维青)¹

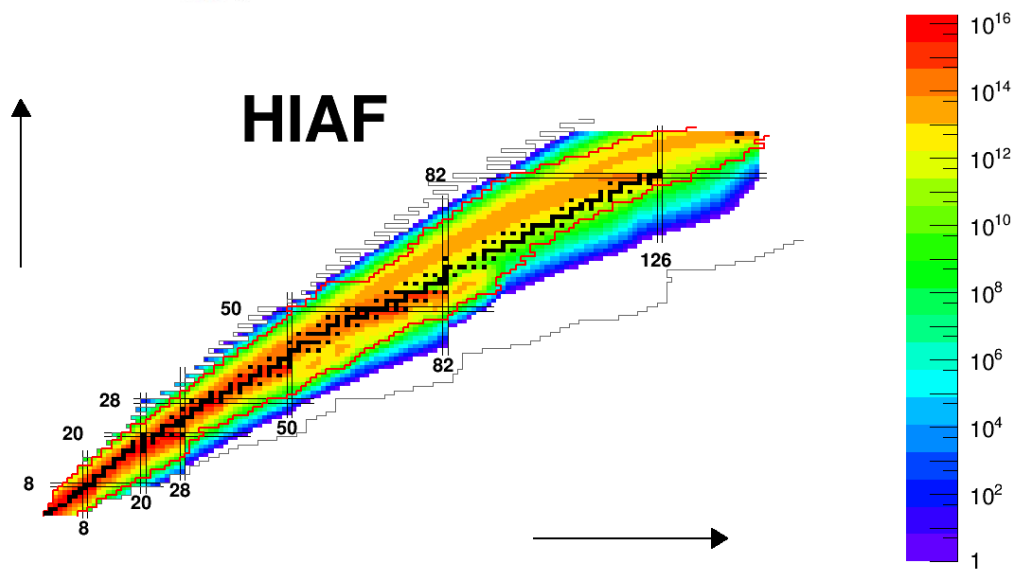


近物所 β 衰变实验工作-IMP-DRAGON



精细衰变谱学：

- 衰变寿命
- 衰变能量
- 衰变纲图
- 衰变分支比
- 激发态能级寿命 (LaBr_3)



研究原子核结构、检验理论模型、寻找新物理，如新幻数、形状共存、集体性质等

极大的δ

$^{22}\text{Si} \rightarrow ^{22}\text{Al} \ Q_{\text{EC}} = 13963 \text{ keV}$						$^{22}\text{O} \rightarrow ^{22}\text{F} \ Q_{\beta^-} = 6490 \text{ keV}$						$\delta \text{ (%)}$	
Experiment				Calculations		Experiment				Calculations			
I_i^π	$E_x \text{ (MeV)}$	$br\%$	$\log(ft^+)$	$E_x \text{ (MeV)}$	$\log(ft^+)$	$E_x \text{ (MeV)}$	$br\%$	$\log(ft^-)$	$E_x \text{ (MeV)}$	$\log(ft^-)$	Experiment	Calculations	
1_1^+	0.905	5.3 (10)	5.09 (9)	1.12 [1.69]	4.81 [4.52]	1.625	29 (4)	4.6 (1)	1.98 [1.56]	4.32 [4.56]	209 (96)	212 [-7]	
1_2^+	2.145	56.5 (51)	3.83 (5)	2.43 [2.55]	3.71 [3.72]	2.572	68 (6)	3.8 (1)	2.58 [2.51]	3.72 [3.68]	7 (28)	-3.4 [10]	

J. Lee et al. PRL. 125.192503 (2020)

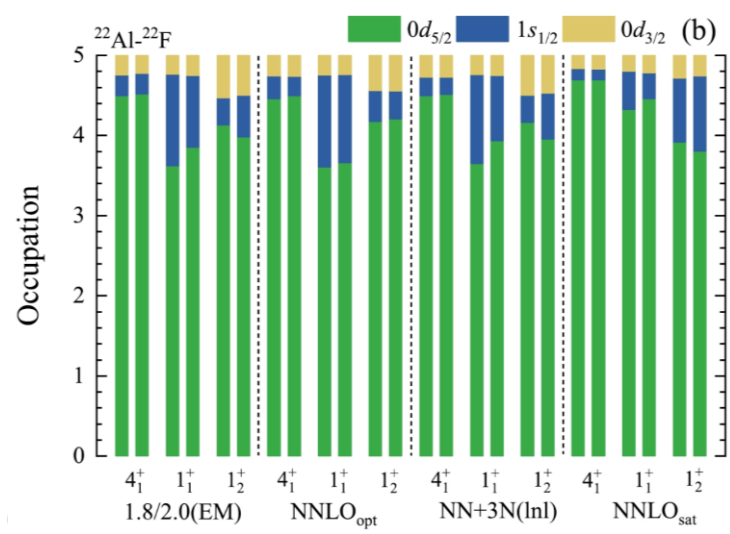
$$\delta = (|M_{GT}^-|^2 - |M_{GT}^+|^2) / |M_{GT}^+|^2$$
$$M_{GT}^\pm = \langle f || \mathcal{O}(GT_\pm) || i \rangle$$

实验测量

弱束缚

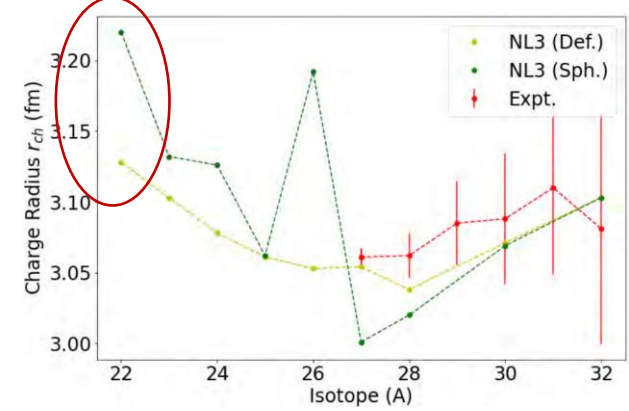
Atom	Events	ME _{IMS} (keV)	ME _{AME20} (keV)	Δ ME (keV)	Δ ME _{th1} (keV)	Δ ME _{th2} (keV)	S _p /S _{2p} (keV)	N _p (2s _{1/2})
²² Al	296	18 103(10)	18 200(400)#	-97(400)	125(69)	134(16)	90(10)/3825(10)	0.246
²³ Si	7	23 537(119)	23 950(500)#	-413(514)	297(145)	243(155)	1855(119)/1945(119)	0.575
²⁶ P	284	10 998(11)	10 970(200)#	28(200)	-129(69)	-205(12)	118(15)/3531(11)	0.722
²⁷ S	32	17 418(39)	17 490(400)#	-72(400)	-515(104)	-516(41)	869(41)/987(40)	1.421
²⁸ S	189	4178(14)	4070(160)	108(160)	-181(69)	-209(15)	2240(14)/3259(14)	1.184
³¹ Ar	188	11290(16)	11330(200)#	-40(200)	-277(80)	-429(26)	674(29)/194(21)	1.760

Y. Yu et al., PRL. 133.222501 (2024)



M. Z. Sun et al., CPC. 48.034002 (2024)

相对论平均场计算：形变密度计算
随着中子数的减小，电荷半径持续增大



Brooke Jayne Rickey, Doctoral dissertation

Data from R. N. Panda et al., Physics of Atomic Nuclei 81 (2018)

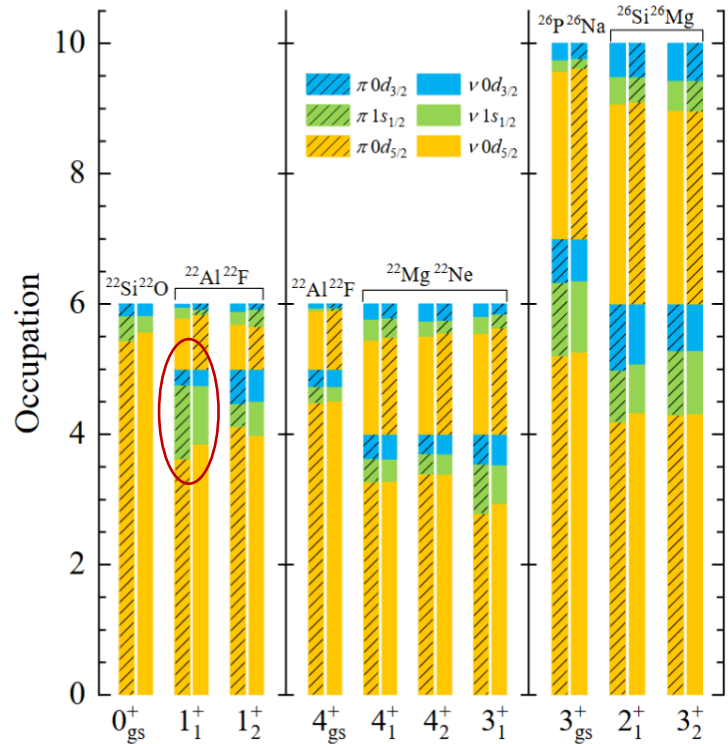
包括连续态耦合的粒子+转子模型：
出现大的形变时可形成基态质子晕。
S. E. Campbell et al., PRL. 132.152501 (2024)

用相对论密度泛函理论对空间分布
进行计算：不支持²²Al基态的晕结构。
P. Papakonstantinou et al., arXiv:2501.07759 (2025)

存在较大争议！

通过镜像核 β 衰变对称性破缺研究 ^{22}Al 质子晕性质

J_i^π	$^{22}\text{Si} \rightarrow ^{22}\text{Al}$			$^{22}\text{O} \rightarrow ^{22}\text{F}$			δ (%)			MED (keV)	
	$ M_{\text{GT}}^+ ^2$			$ M_{\text{GT}}^- ^2$							
	Expt.	OB+TB	OB	Expt.	OB+TB	OB	Expt.	OB+TB	OB	Expt.	EM1.8/2.0
1_1^+	0.0310 (58)	0.0837	0.1028	0.096 (20)	0.4381	0.4656	209(96)	424	353	-720	-472
1_2^+	0.563 (61)	0.8008	0.8334	0.60 (12)	0.6205	0.6175	7(28)	-23	-26	-427	-396



$$\delta = (|M_{\text{GT}}^-|^2 - |M_{\text{GT}}^+|^2) / |M_{\text{GT}}^+|^2$$

$$M_{\text{GT}}^\pm = \langle f | \mathcal{O}(\text{GT}_\pm) | i \rangle$$

Halo-like structure



Large MED
Large δ

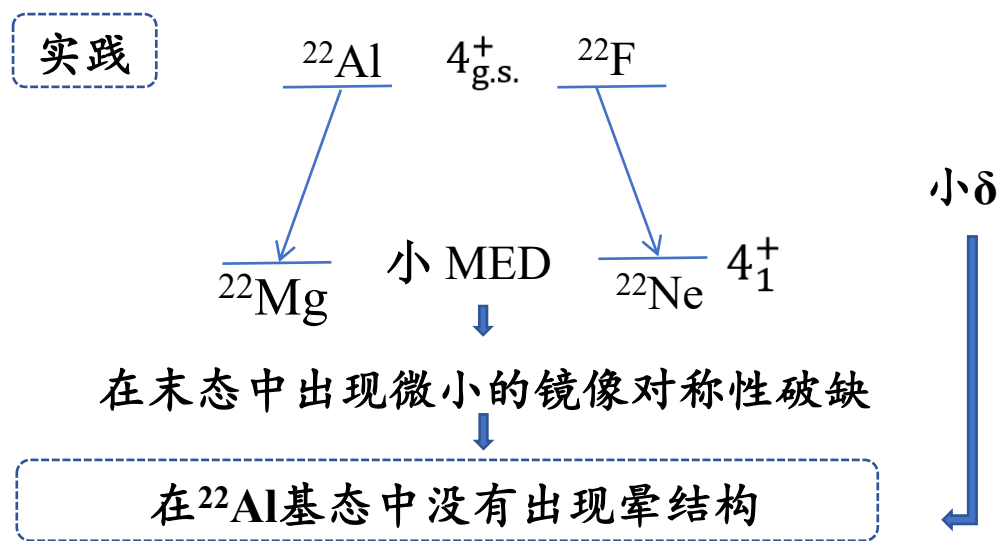
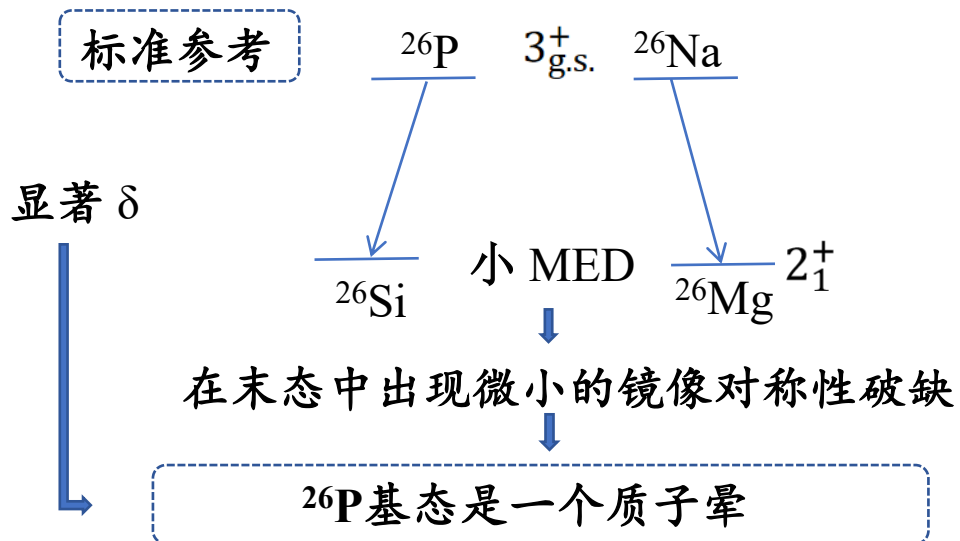
我们的结果支持一个类似质子晕的结构存在于 ^{22}Al 非束缚激发态 1_1^+ 中。

L. Y. Shen, M. R. Xie, Q. Yuan and [J. G. Li*](#), submitted to PRC

通过镜像对称性破缺研究 ^{22}Al 质子晕性质



	J_i^π	$ M_{GT}^+ ^2$		$ M_{GT}^- ^2$		δ (%)		MED (keV)	
		Expt.	EM1.8/2.0	Expt.	EM1.8/2.0	Expt.	EM1.8/2.0	Expt.	EM1.8/2.0
$^{26}\text{P}/^{26}\text{Na} \rightarrow ^{26}\text{Si}/^{26}\text{Mg}$	2_1^+	0.3630	0.2322	0.5272	0.4617	46(13)	99	-13(16)	-30
	3_2^+	0.0692	0.0470	0.1288	0.1565	86(86)	233	-165(20)	-68
	4_1^+		0.0283	0.0066	0.0196		-31	-49.2	72
$^{22}\text{Al}/^{22}\text{F} \rightarrow ^{22}\text{Mg}/^{22}\text{Ne}$	4_2^+	0.4160	0.5869	0.5586	0.8553	34.3	46	-229.4	-237
	3_1^+	0.1316	0.2229	0.1884	0.3824	43.2	72	-188.1	-285

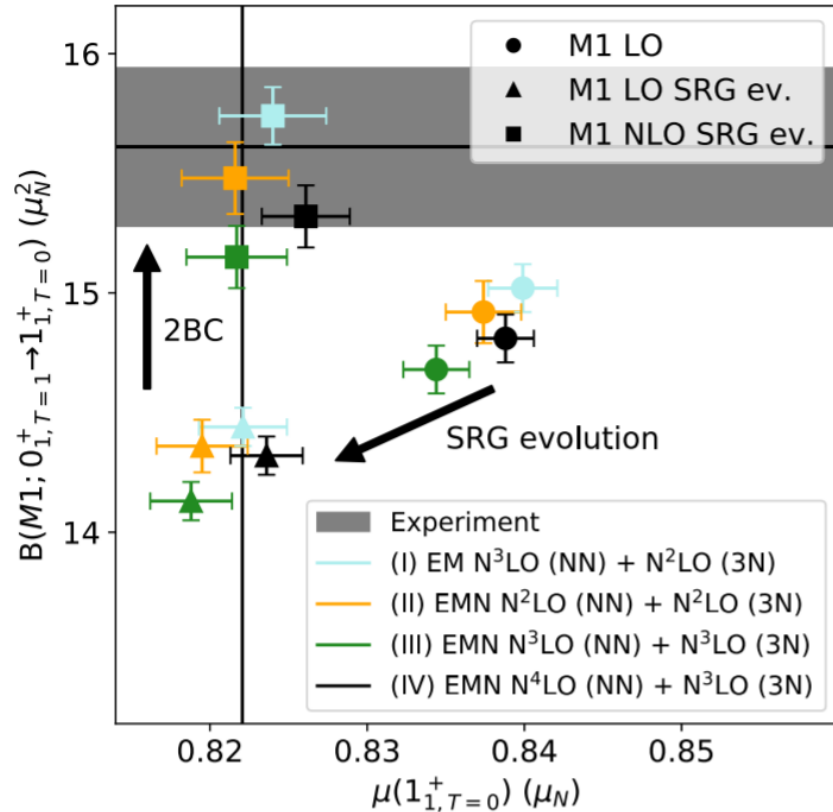


^{22}Al 基态不是一个质子晕态

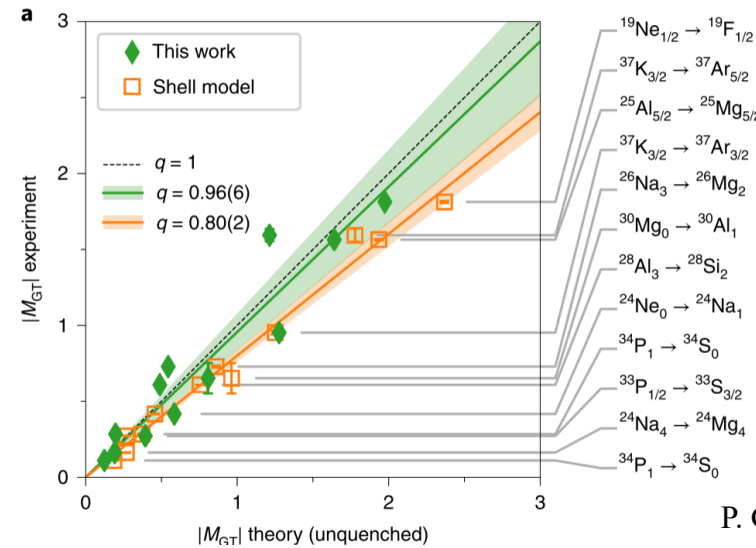
L. Y. Shen, M. R. Xie, Q. Yuan and [J. G. Li*](#), submitted to PRC

两体流对电磁观测量与GT跃迁的修正

更准确地描述磁矩与M1跃迁

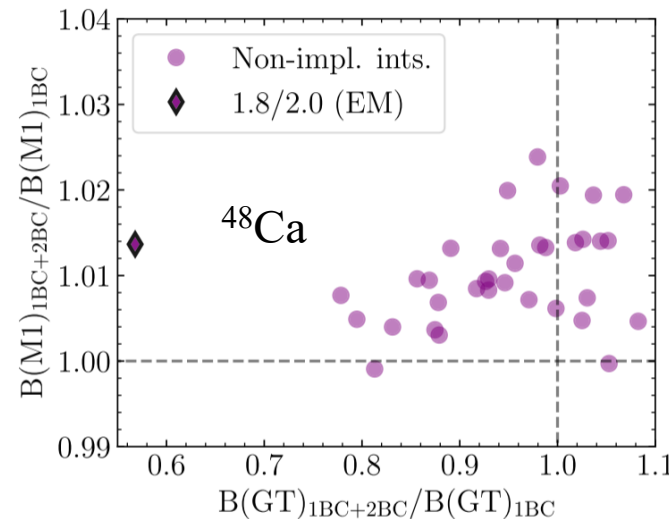


U. Friman-Gayer et al., PRL 126, 102501 (2021)



P. Gysbers et al., Nature Physics 15, 428–431 (2019)

有助于解决GT跃迁中的 quenching puzzle



C. Brase et. al., arXiv:2504.08711

2BC对M1和GT跃迁的不同修正效果

手征有效场论以核子和 π 介子为自由度，考虑低能 QCD 的所有基本对称性，并按照 Q/Λ_χ 的幂次展开，其中 Q 为动量（一般取 π 介子质量）， Λ_χ 为手征对称性破缺的能标（一般取 ρ 介子质~1GeV）。

核力，核流的逐阶展开

原子核流算符：描述核子与外部探针（如光子或弱场）的相互作用的算符
矢量流，轴矢流，.....

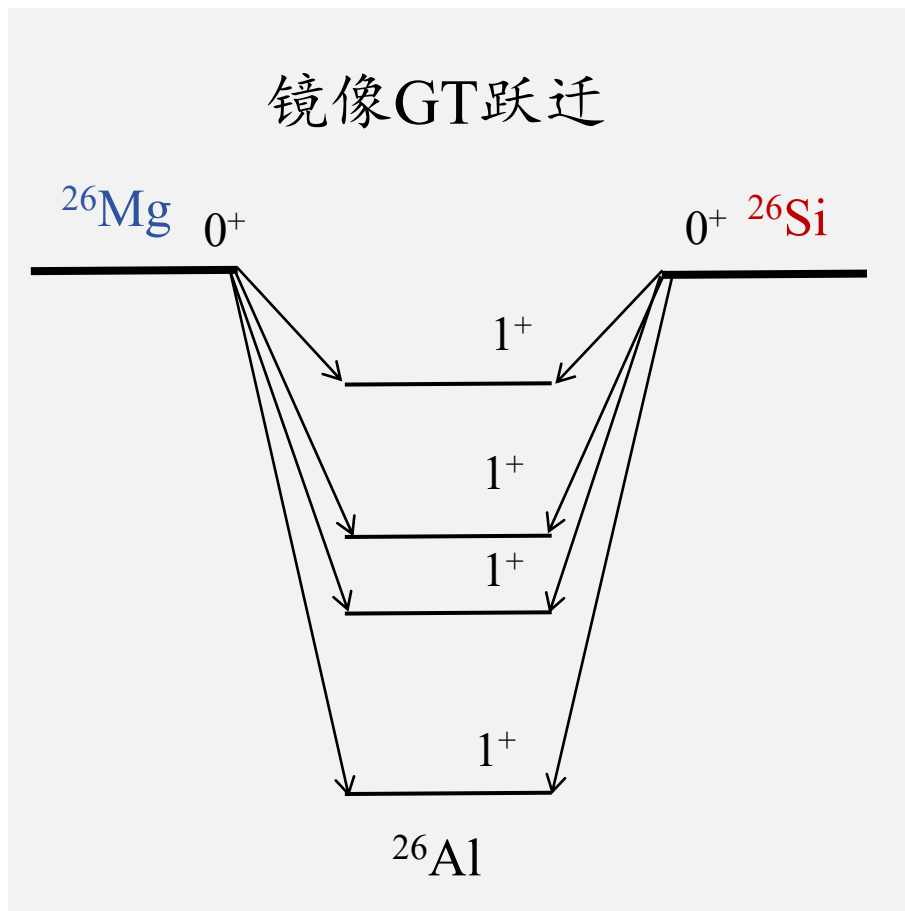
Table 1 Chiral expansion of the nuclear electromagnetic current operator up to N³LO. LO, NLO, NNLO and N³LO refer to chiral orders Q^{-3} , Q^{-1} , Q^0 and Q , respectively. The single-nucleon contributions are given in Eqs. (2.7) and (2.16) of [149]

Order	Single-nucleon	Two-nucleon	Three-nucleon
LO	–	–	–
NLO	V_{1N} : static + V_{1N} : 1/m	V_{2N} : 1π , Eq. (78)	–
NNLO	V_{1N} : static	–	–
N ³ LO	V_{1N} : static + V_{1N} : 1/m + V_{1N} : off-shell	V_{2N} : 1π , Eq. (82) + V_{2N} : 2π , Eq. (299) + V_{2N} : cont, Eq. (89)	–

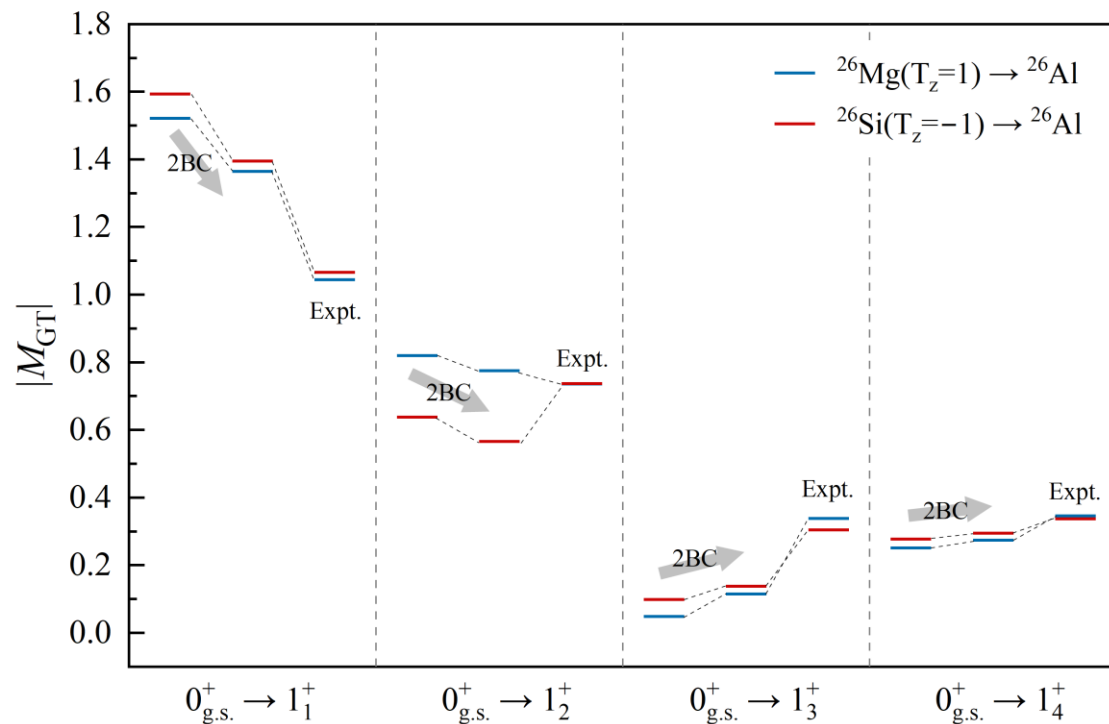
Table 3 Chiral expansion of the nuclear axial current operator up to N³LO. LO, NLO, NNLO and N³LO refer to chiral orders Q^{-3} , Q^{-1} , Q^0 and Q , respectively

Order	Single-nucleon	Two-nucleon	Three-nucleon
LO	A_{1N} : static, Eq. (102)	–	–
NLO	A_{1N} : static, Eq. (105)	–	–
NNLO	– + A_{2N} : cont, Eq. (141)	A_{2N} : 1π , Eq. (127)	–
N ³ LO	A_{1N} : static, Eq. (114) + A_{1N} : 1/m, UT', Eq. (109) + A_{1N} : 1/m ² , Eq. (111)	A_{2N} : 1π , Eq. (129) + A_{2N} : 1π , UT', Eq. (136) + A_{2N} : 1π , 1/m, Eq. (133) + A_{2N} : 2π , Eq. (138) + A_{2N} : cont, UT', Eq. (145) + A_{2N} : cont, 1/m, Eq. (144)	A_{3N} : π , Eq. (148) + A_{3N} : cont, Eq. (151)

Hermann Krebs, Eur. Phys. J. A 56, 234 (2020)



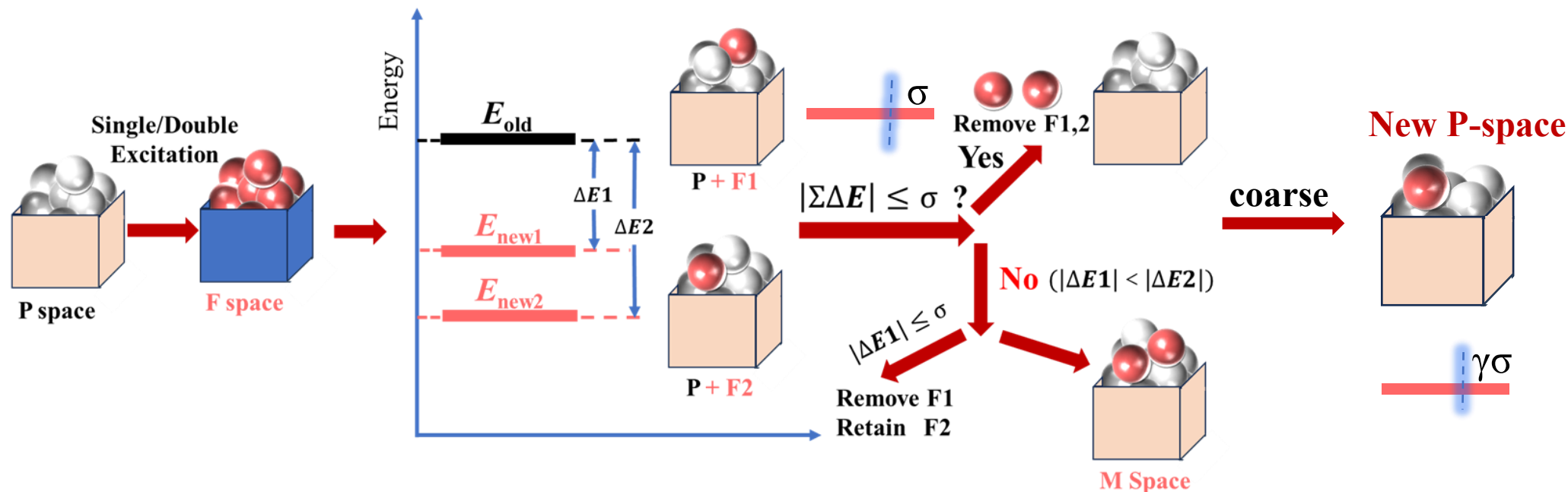
初步计算结果



- 镜像 $|M_{GT}|$ 基本一致；
- 两体流对理论计算结果有显著改善。

未来将重点关注 β 衰变中的对称性破缺，探究同位旋非守恒力的影响；

什么是Adaptive Configuration Interaction方法?



Calculation ΔE :

对 F 中每个 SD 都有:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \langle \Psi_P^{(1)} | \hat{H} | \Psi_P^{(1)} \rangle & \langle \Psi_P^{(1)} | \hat{H} | \Phi_F^{(k)} \rangle \\ \langle \Phi_F^{(k)} | \hat{H} | \Psi_P^{(1)} \rangle & \langle \Phi_F^{(k)} | \hat{H} | \Phi_F^{(k)} \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_P & V \\ V^* & E_F \end{pmatrix}$$

对角化 2×2 矩阵, 得到两个本征值: λ_1 和 λ_2 ($\lambda_1 \leq \lambda_2$); 选择其中与 E_P 差异最小的得到 $\Delta E = \lambda - E_P$, 此处称为 ϵ

Chose important SDs:

每个 SD 都有对应的贡献 ϵ , 将 SD 按照 $|\epsilon|$ 降序排序; 从小往大累加 $|\epsilon|$ 至规定的阈值 σ , 将这些 SD 舍弃:

$$\sum_{\Phi_I \in F^{(k)} \setminus Q^{(k)}} |\epsilon(\Phi_I)| \leq \sigma.$$

$$\text{Removed } \Sigma \epsilon = \text{PT}$$

Coarsing wave function:

对角化总模型空间得到的本征态:

$$|\Psi_P^{(k)}\rangle = \sum_{\mu=1}^{d_k} C_{\mu} |\Phi_{\mu}\rangle$$

保留前 $\Sigma |C_{\mu}|^2 \geq 1 - \gamma * \sigma$ 的 SDs; 作为新的 P 空间进行迭代直至收敛

使用二阶微扰的思想计算激发空间对初始空间的贡献, 实现重要组态的筛选

➤ 我们使用ACI在pf-shell进行中等规模的计算。 ^{52}Fe : 6p6n, $D=109954620$, 1×10^8

当只存在 σ 截断, 不使用粗粒化时:

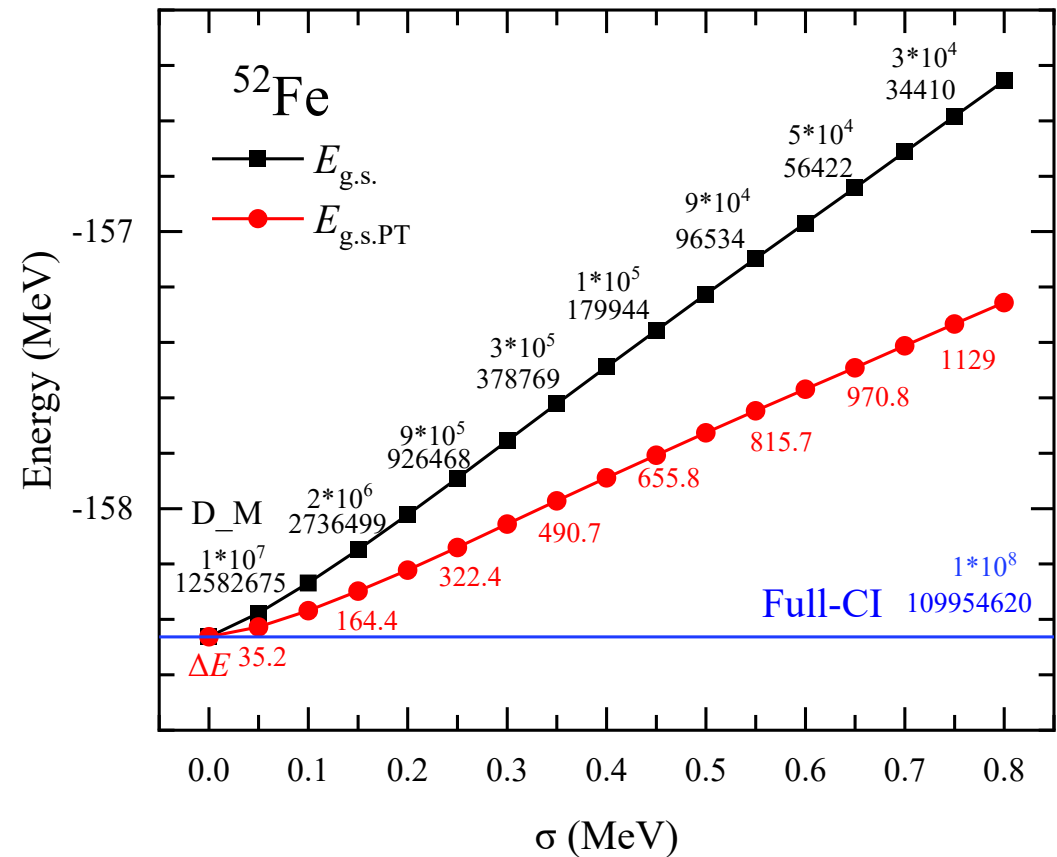
全空间为 1×10^8 , 经测试:

我们通过 1×10^7 个斯莱特行列式, 在PT修正之后得到能量损失 $\Delta E = 35.2 \text{ keV}$ 的收敛解。

通过 1×10^5 个斯莱特行列式, 在PT修正之后得到能量损失 $\Delta E = 655.8 \text{ keV}$ 的收敛解。

全空间斯莱特行列式较多, 由于被截断斯莱特行列式过多产生的突变并没有出现。

但在初始 $\sigma = 0.05 \text{ MeV}$ 时出现了非线性的结果



I. ^{52}Fe 基态不同截断参数下的维度变化

对于中等维度的原子核体系, 截断效果较为显著

➤ 我们使用ACI在pf-shell进行中等规模的计算。 ^{56}Ni : 8p8n, $D=1087455228$, 1×10^9

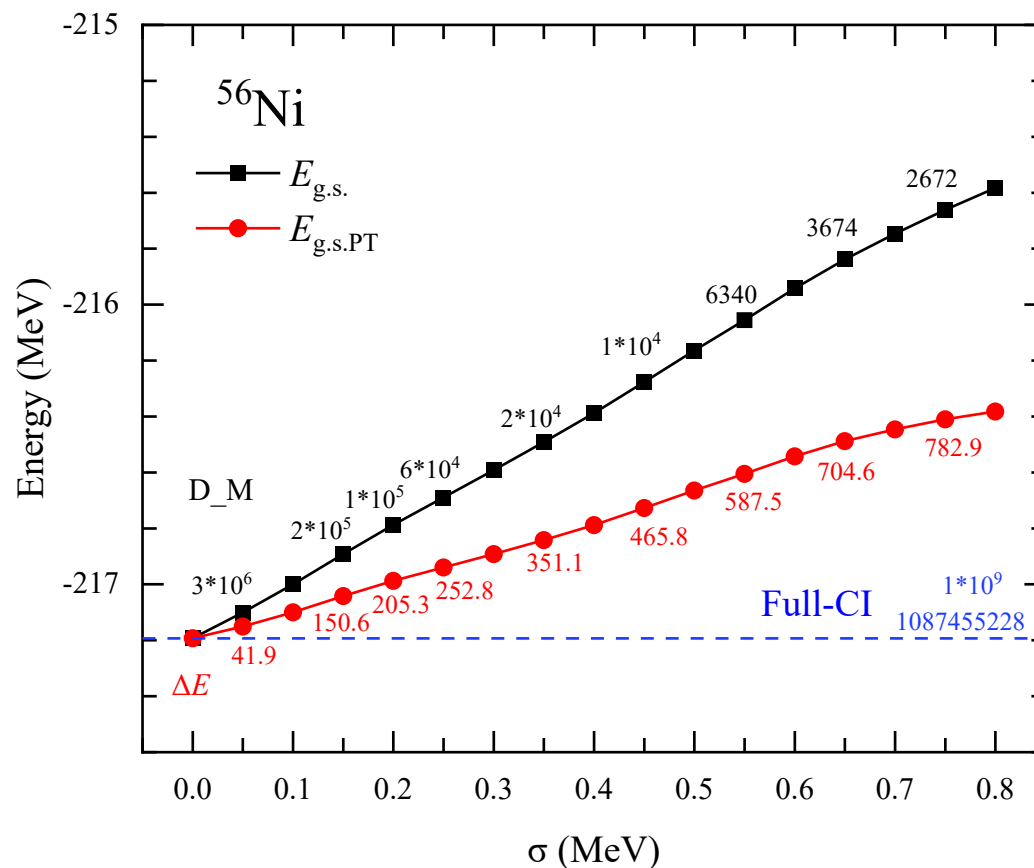
当只存在 σ 截断, 不使用粗粒化时:

全空间为 1×10^9 , 这里的基态精确能量来自于 k-shell 无截断的结果。

经测试:

我们通过 3×10^6 个斯莱特行列式, 在PT修正之后得到能量损失 $\Delta E = 41.9 \text{ keV}$ 的收敛解。

通过 1×10^5 个斯莱特行列式, 在PT修正之后得到能量损失 $\Delta E = 205.3 \text{ keV}$ 的收敛解。

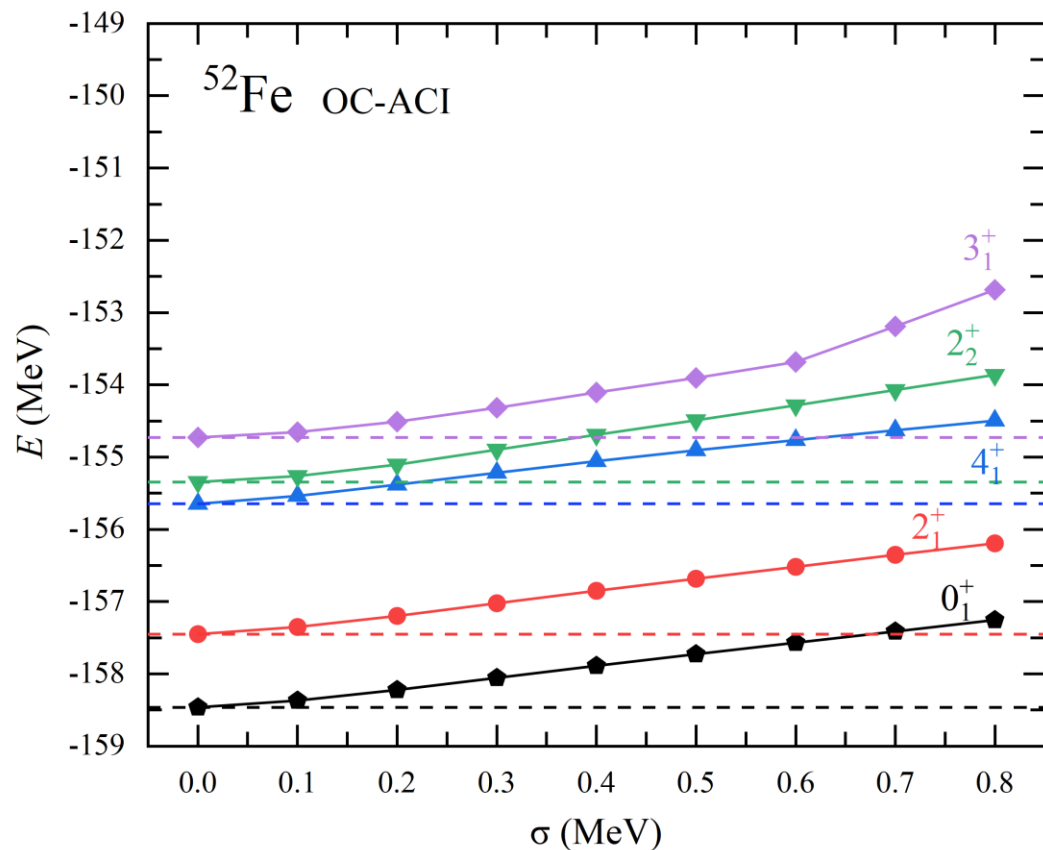


II. ^{56}Ni 基态不同截断参数下的维度变化

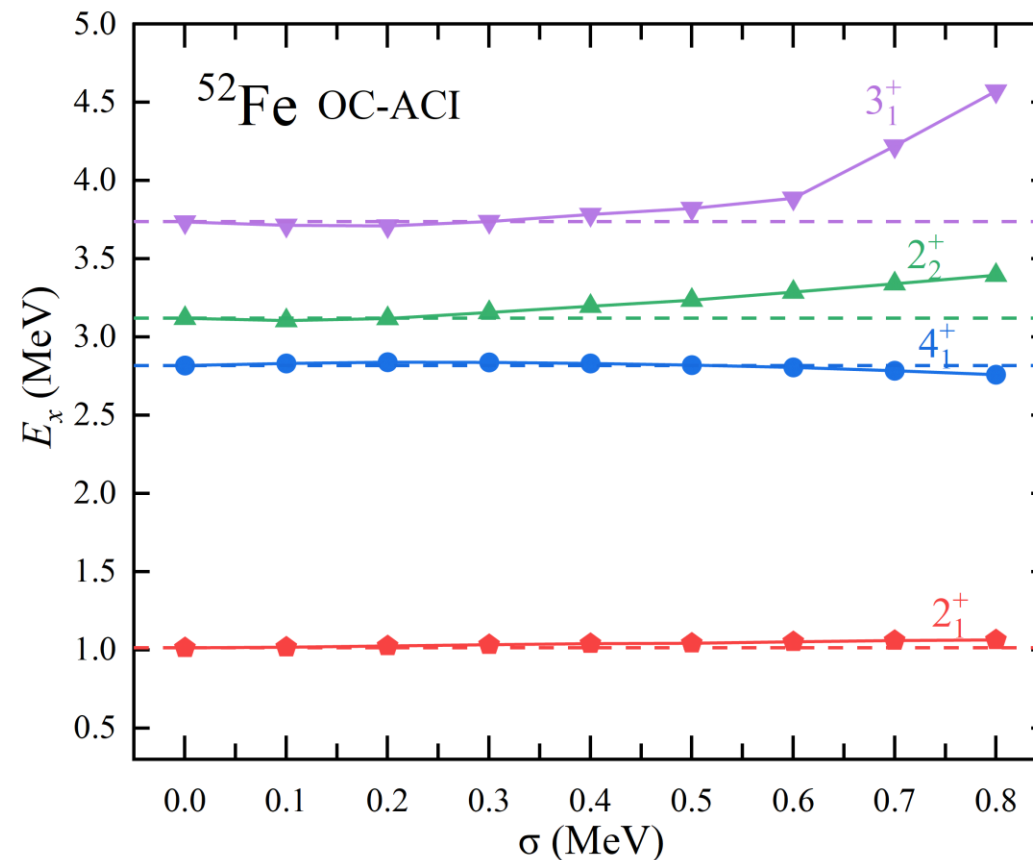
对于更大维度的原子核体系, 截断效果更显著



- 我们计算了 ^{52}Fe 的前五个态来评估 ACI 方法对激发态的计算情况:



X. ^{52}Fe 基态和低激发态计算结果



XI. ^{52}Fe 低激发态激发能计算结果

小截断范围内的激发态结果依旧呈现线性趋势

1. 第一性原理计算探究镜像原子核能级差异

- ✓ Thomas-Ehrman shift 主要是由弱束缚的价质子占据 $1s_{1/2}$ 导致;
- ✓ 同位旋对称性破缺效应导致 ^{22}Si 的 2^+ 激发能较低;
- ✓ 同位旋对称性破缺对丰质子原子核壳结构演化的影响;

2. 第一性原理计算探究镜像原子核 β 衰变中的同位旋对称性破缺

- ✓ ^{22}Al 基态不具有晕核的特性;
- ✓ 镜像原子核 β 衰变中同位旋对称性。

3. 自适应重要组态选择壳模型

请各位老师批评指正!