

大規模並列計算による原子核クラスターの構造解析と反応シミュレーション



研究分担者

谷口 億字(香川高等専門学校情報工学科), 平林 義治(北海道大学情報基盤センター), 木村 真明(北海道大学理学研究院), 千葉 陽平(北海道大学理学研究院)

1. 研究の背景と目的

本共同研究では、炭素、酸素、カルシウム等の軽い原子核が持つクラスター共鳴の構造と反応研究を行った。クラスター共鳴は、原子核の基底状態とは大きく異なる構造を持つため、その構造と反応の理解は、基礎科学である原子核研究にとって重要な課題である。また、放射線の一種である陽子線や重粒子線が人体を構成する原子核に衝突することでクラスター共鳴が生成されるため、その反応メカニズムの理解は、放射線を用いた癌治療技術の開発にとっても重要な意味を持つ。そこで申請者は、大規模並列計算によるクラスターの構造解析と核反応シミュレーションを目指して共同研究を行った。

3. 結果

Isoscalar-Dipole励起

"Isoscalar dipole transition as a probe for asymmetric clustering", Y. Chiba, M. Kimura, Y. Taniguchi, Phys. Rev. C93, 034319 (2016).

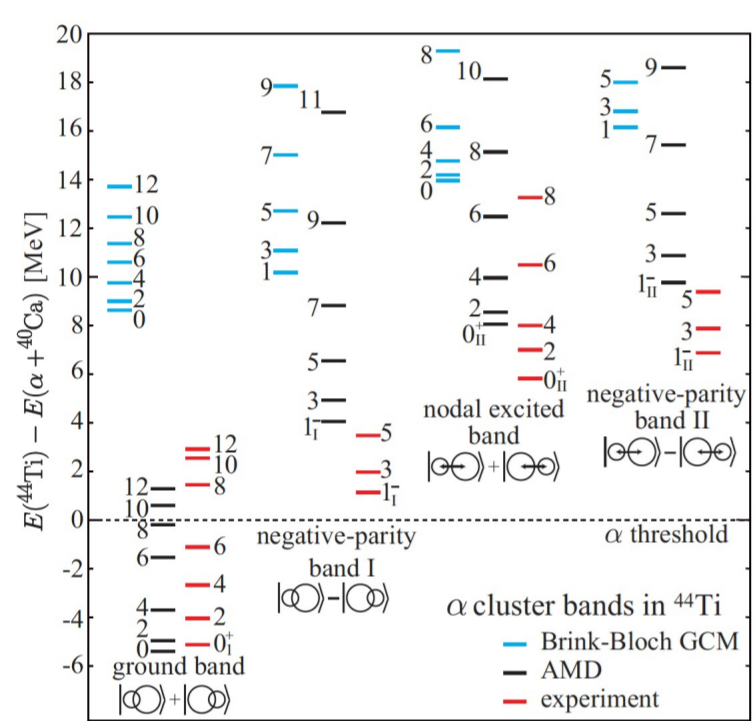


FIG. 3. The observed and calculated $\alpha + {}^{40}\text{Ca}$ cluster states in ${}^{44}\text{Ti}$ classified into four rotational bands. Energy is measured from the α threshold located at 5.1 MeV above the ground state. In the experiment and AMD results, the member states of the nodal excited band and negative-parity band II are fragmented into several levels, and the weighted averages of those levels are shown in the figure.

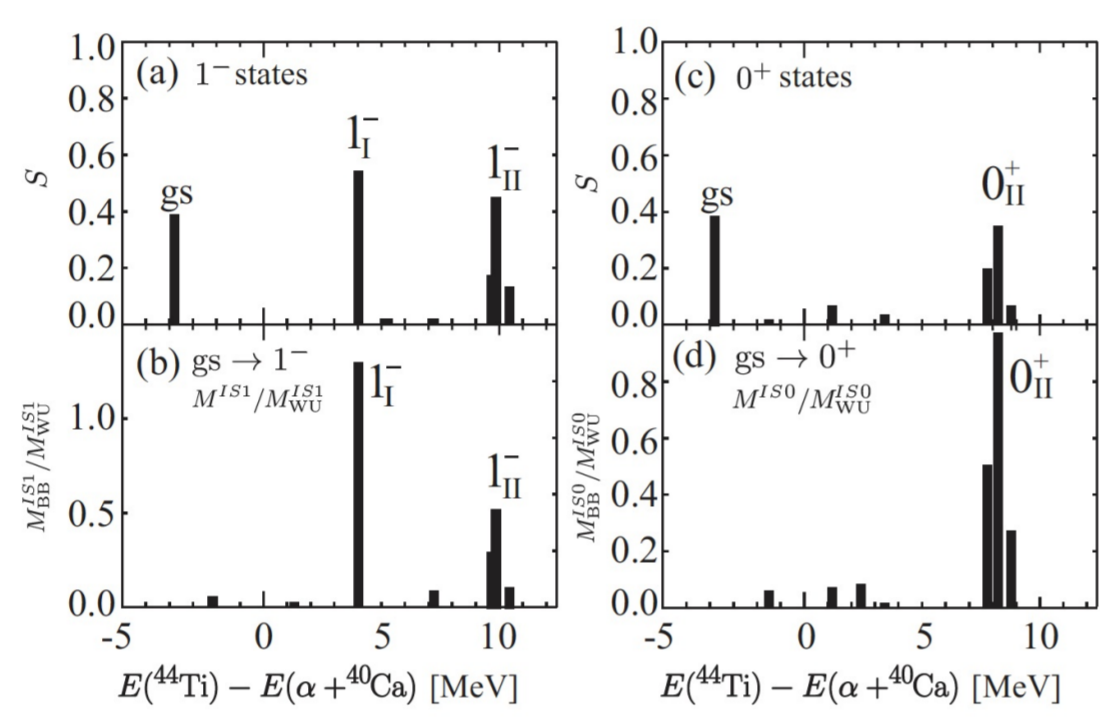


FIG. 4. (a) The amount of the cluster component S of the ground and 1^- states obtained by AMD. (b) The ratio of IS dipole transition matrix M^{IS1} to the Weisskopf estimate. (c) Same as panel (a) but for the 0^+ states. (d) Same as panel (b) but for the IS monopole transition.

非対称クラスター励起はIsoscalar-Dipole遷移で非常に強く現れる

Laplace Expansion for Reduced Width Amplitude

"Laplace expansion method for the calculation of the reduced width amplitudes", Y. Chiba and M. Kimura, Prog. Theor. Exp. Phys. in print

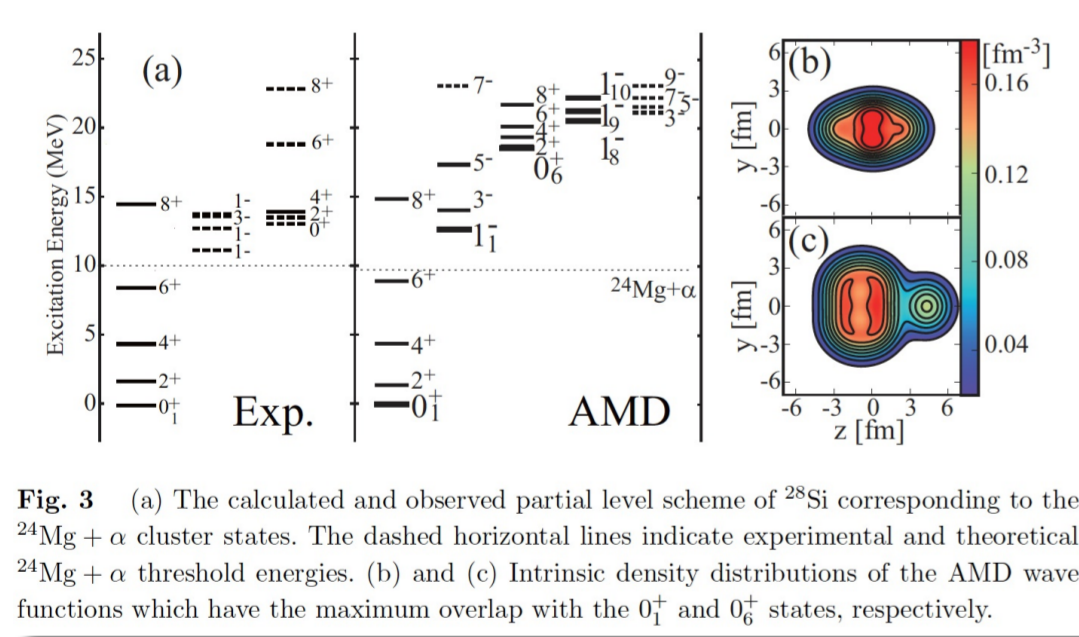


FIG. 3 (a) The calculated and observed partial level scheme of ${}^{28}\text{Si}$ corresponding to the ${}^{24}\text{Mg} + \alpha$ cluster states. The dashed horizontal lines indicate experimental and theoretical ${}^{24}\text{Mg} + \alpha$ threshold energies. (b) and (c) Intrinsic density distributions of the AMD wave functions which have the maximum overlap with the 0_1^+ and 0_2^- states, respectively.

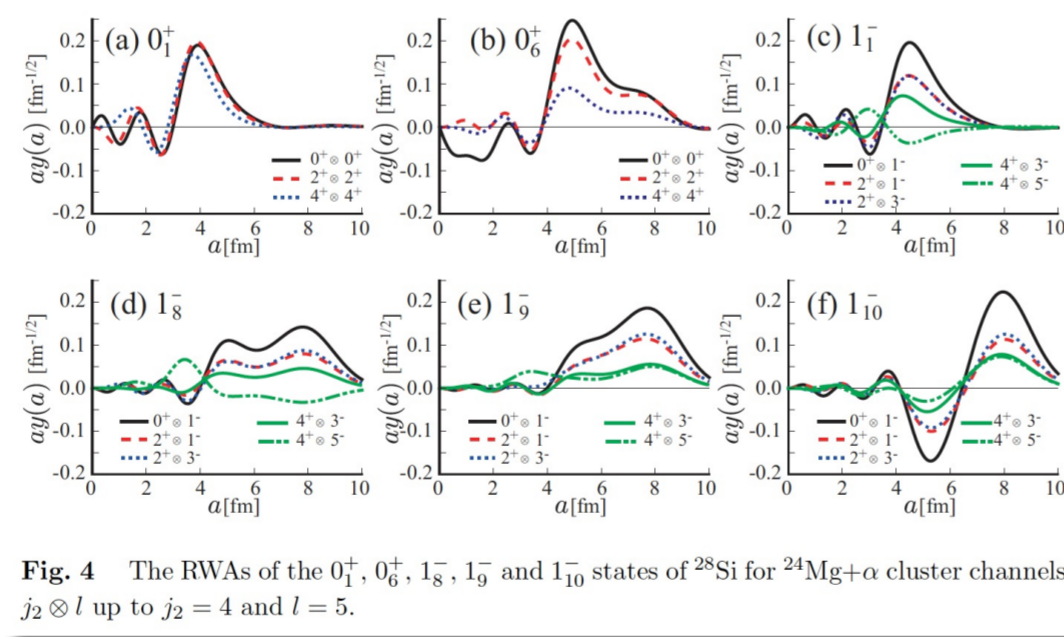
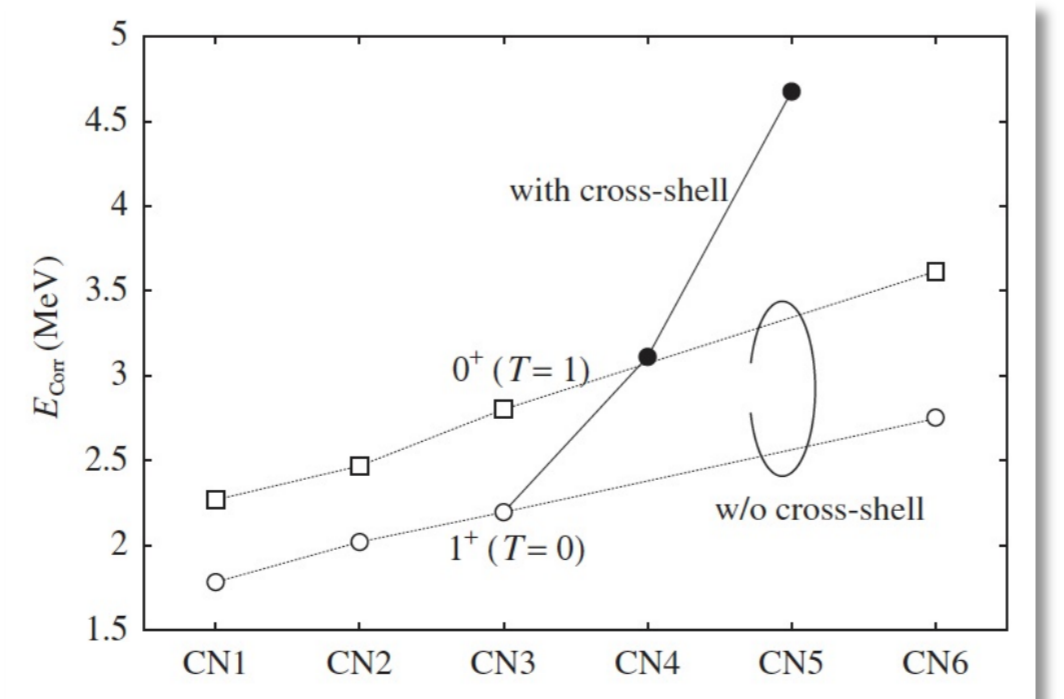
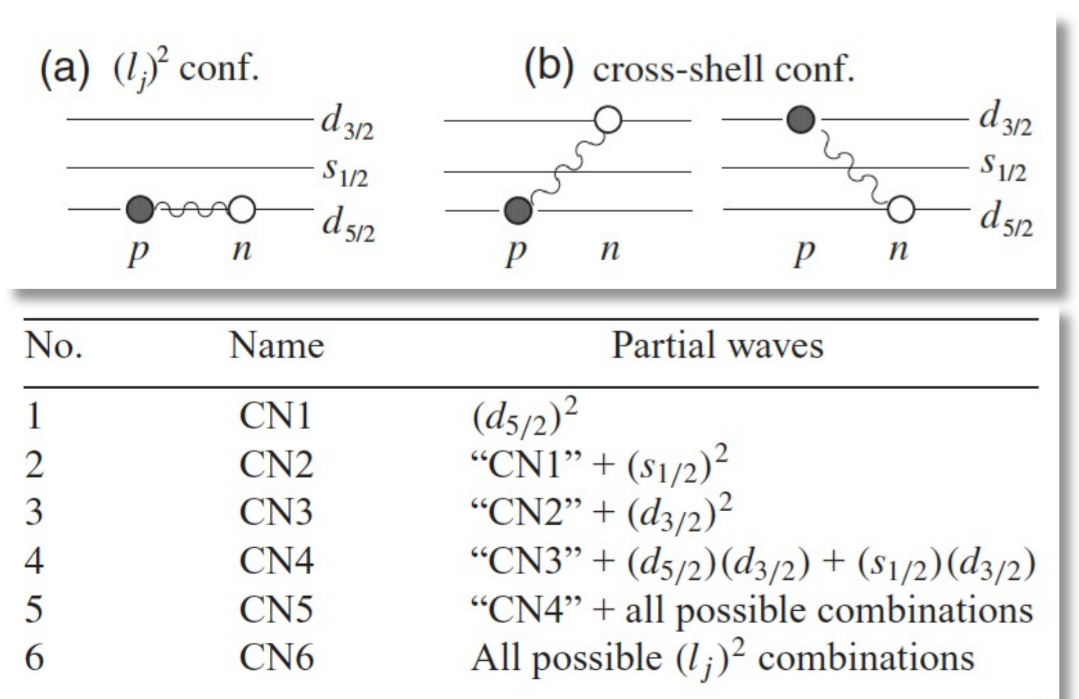


FIG. 4 The RWAs of the 0_1^+ , 0_2^- , 1_1^- , 1_2^- and 1_3^- states of ${}^{28}\text{Si}$ for ${}^{24}\text{Mg} + \alpha$ cluster channels $j_2 \otimes l$ up to $j_2 = 4$ and $l = 5$.

AMD波動関数をLaplace展開する手法を用いることで、RWAを広い一般性をもって解析することが可能となった

Deuteron-Like Correlation

"Deuteron-like neutron-proton correlation in ${}^{18}\text{F}$ studied with the cluster-orbital shell model approach" H. Masui and M. Kimura, Prog. Theor. Exp. Phys. 2016, 053D01 (2016).



重陽子の相関が ${}^{18}\text{F}$ のような比較的強く束縛される系においても現れる

2. 構造解析の手法

Anti-symmetrized Molecular Dynamics (AMD) approach

$$\Psi_A^{AMD} = \Psi_A^{int} \Psi_A^{cm},$$

$$\Psi_A^{cm} = \left(\frac{|2AM|}{\pi^3} \right)^{1/4} \exp \{ -A(\mathbf{R} - \mathbf{Z})^T M (\mathbf{R} - \mathbf{Z}) \},$$

$$\mathbf{R} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^A \mathbf{r}_i, \quad \mathbf{Z} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^A \mathbf{Z}_i.$$

原子核の波動関数を反対称化したGauss波束で記述

個別の構造を仮定すること無く原子核の構造を統一的に解析することが可能

Cluster-Orbital Shell Model (COSM) approach

$$\Psi_k = \sum_{\alpha_1 \alpha_2} C_{\alpha_1 \alpha_2}^{(k)} \Phi_{\alpha_1 \alpha_2}$$

$$\Phi_{\alpha_1 \alpha_2} \equiv \mathcal{A} \left\{ [\phi_{\alpha_1} \otimes \phi_{\alpha_2}]_{TM}^{JM} \right\}$$

価核子の波動関数をGaussの重ね合わせで正確に記述

Inversion Doublets

"Inversion doublets of reflection-asymmetric clustering in ${}^{28}\text{Si}$ and their isoscalar monopole and dipole transitions", Y. Chiba, M. Kimura, Y. Taniguchi, Phys. Rev. C 95, 044328 (2017).

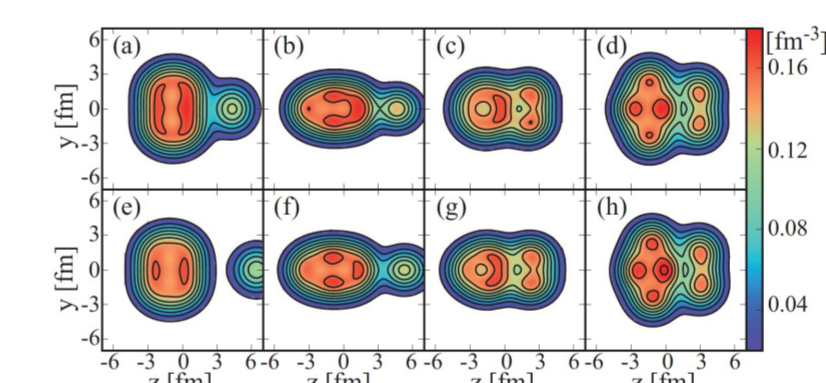


FIG. 4. Intrinsic matter density distributions obtained by d constraint. (a), (b), (c), and (d) respectively show the ${}^{24}\text{Mg} + \alpha$ (T), ${}^{24}\text{Mg} + \alpha$ (A), ${}^{16}\text{O} + {}^{12}\text{C}$, and ${}^{20}\text{Ne} + {}^8\text{Be}$ configurations with $J^\pi = 0^+$, while (e), (f), (g), and (h) show the $J^\pi = 1^-$ partners having the same configurations.

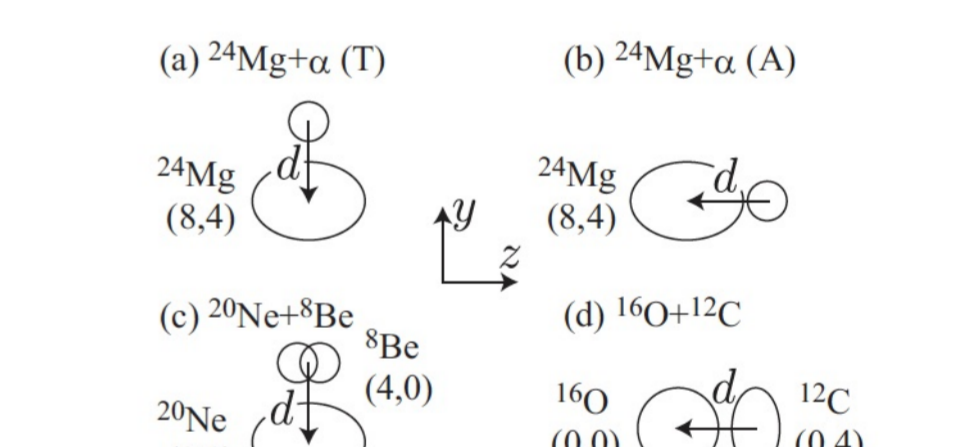


FIG. 8. Schematic figure for the various cluster configurations and their duality.

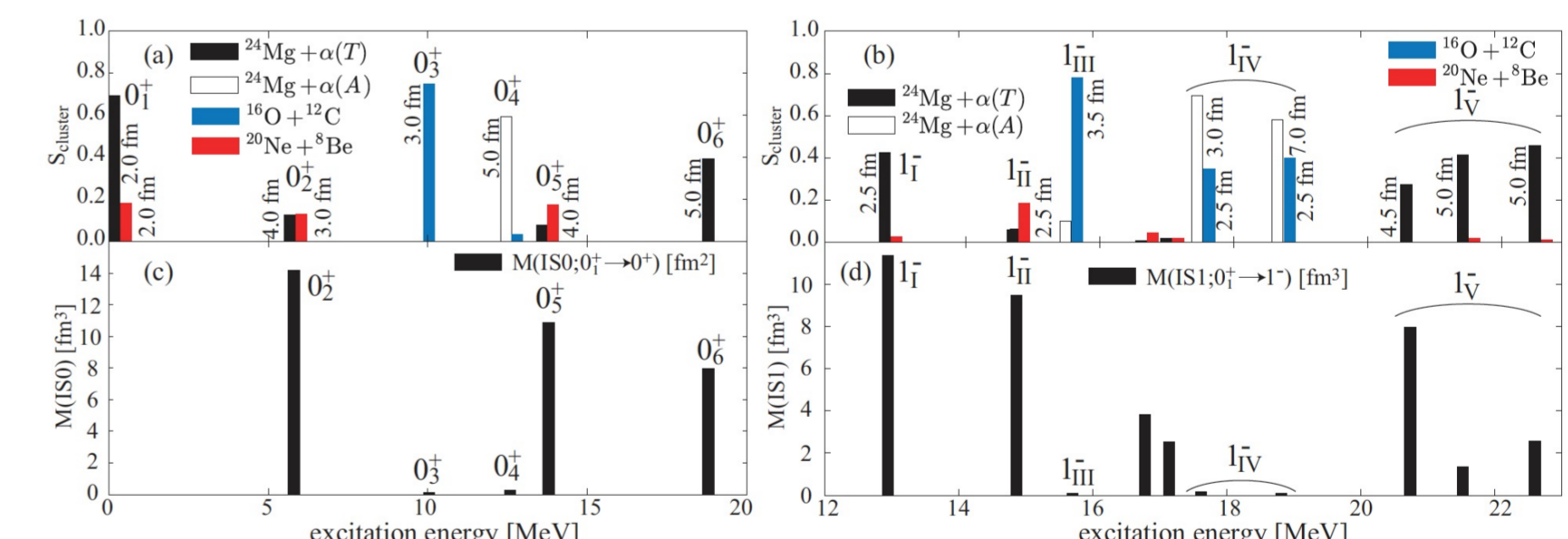


FIG. 9. (a) The cluster S factors for the ground and excited 0^+ states. (b) Same as (a) but for the excited 1^- states. (c) The IS monopole transition matrix from the ground state to the excited 0^+ states. (d) The IS dipole transition matrix from the ground state to the excited 1^- states. The values indicate the intercluster distance of the configuration which has the largest overlap in units of fm.

Isoscalar-MonopoleおよびDipole遷移がInversion Doubletsの解析に有用であることを示した

4. まとめ

軽い原子核のクラスターが持つ構造とその励起エネルギーを原子核構造模型によって解析した。フッ素、スカンジウム、銅原子核が持つ重水素クラスター構造を、クラスター軌道殻模型を用いて解析し、特にフッ素原子核において、コア核からのスピン-軌道が重水素クラスター形成に重要な関わりを示し、基底状態においてクラスター状態の発達が顕著である事を示した。また、反対称化分子動力学を用いた数値計算により、マグネシウム、シリコン原子核に現れるヘリウムクラスター、炭素クラスターのエネルギーを求めた。