

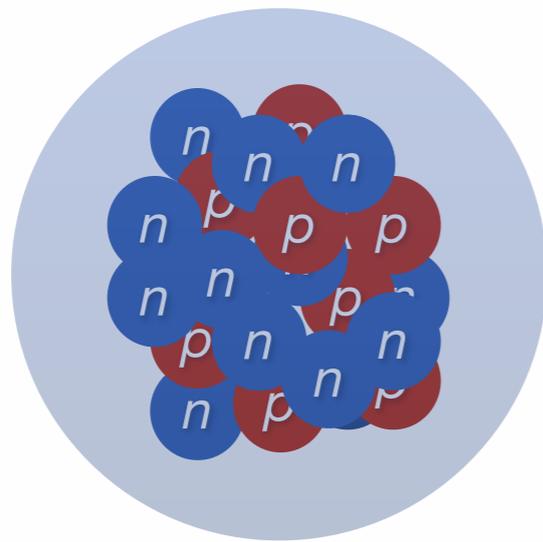
原子核中のサブユニット（クラスター）形成、核分裂 現象を目指した原子核集団運動論と大規模数値計算

市川 隆敏

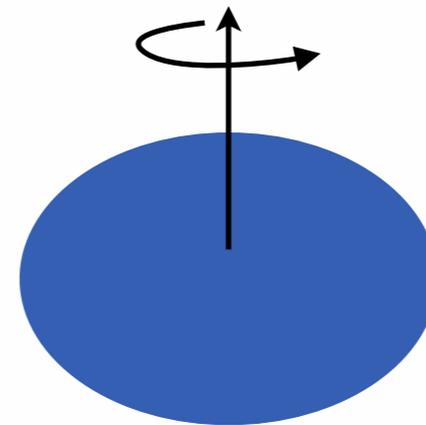
京都大学基礎物理学研究所

有限量子多体系としての原子核

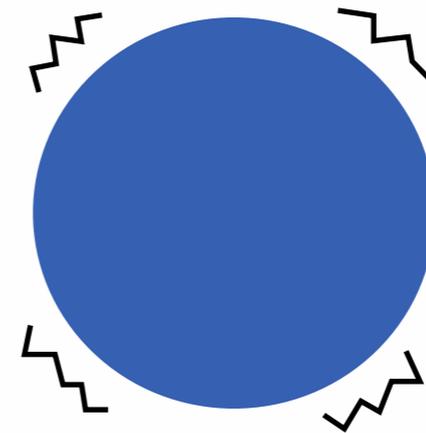
原子核 → 陽子と中性子からなる有限量子多体系



量子流体

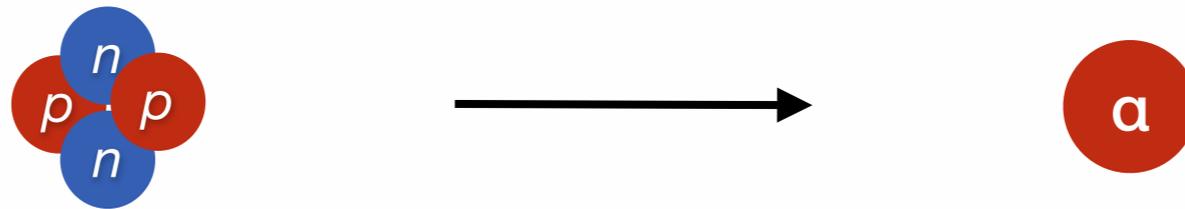


少し変形してクルクル回ったり



表面がブルブル震えたり

有限量子多体系のおもしろさ

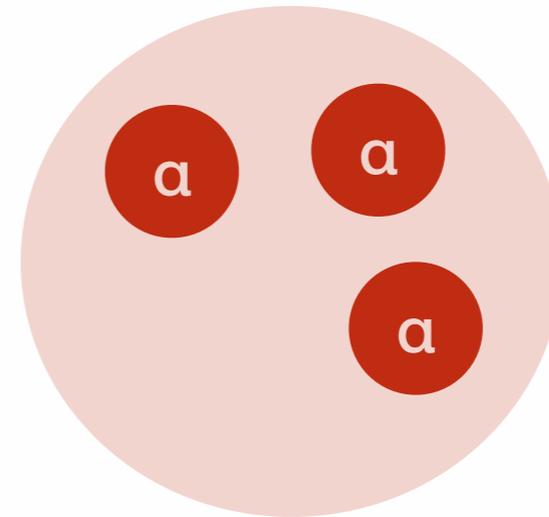


核子が4個集まってより安定な α クラスターを作る

有限量子多体系のおもしろさ

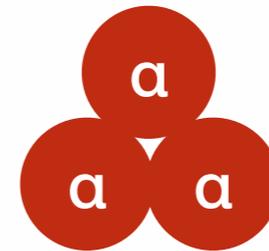
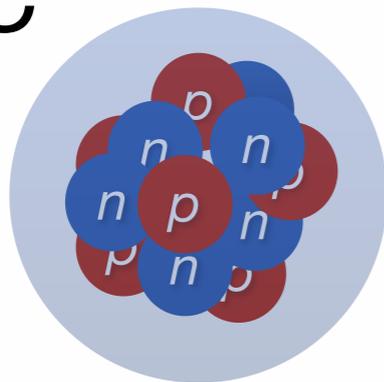


棒状に並んだり



ガス状に広がったり

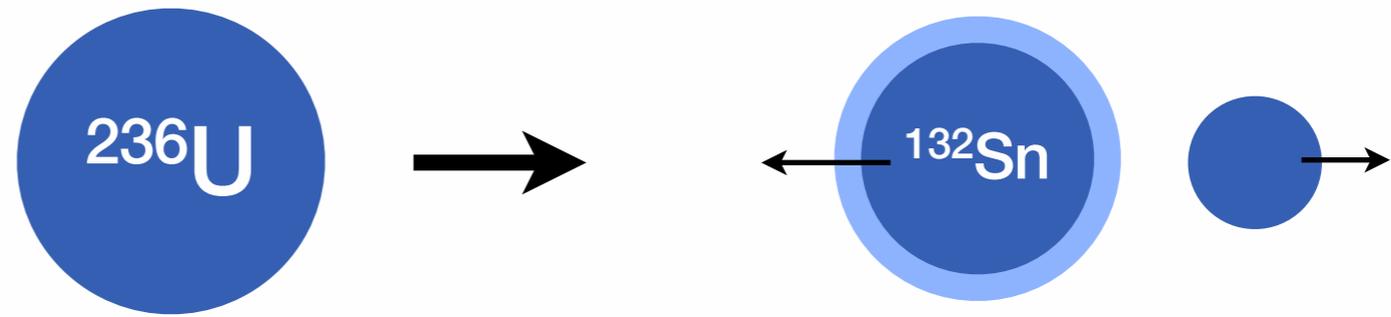
^{12}C



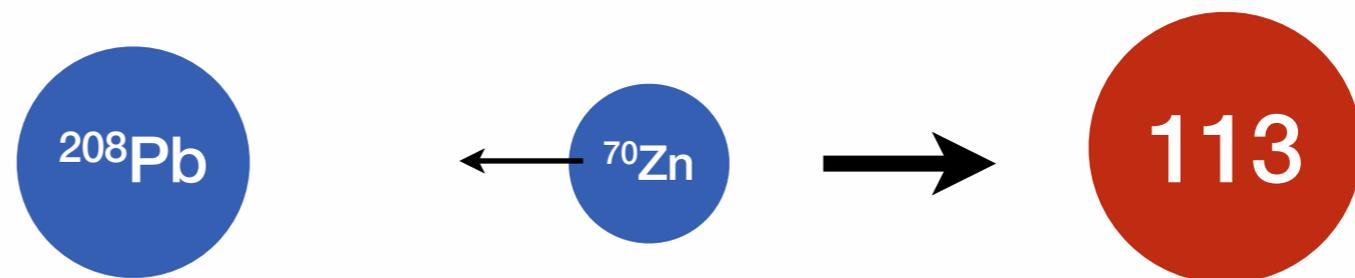
正三角形にならんだり

有限量子多体系のおもしろさ

重い核では
二つに分裂したり



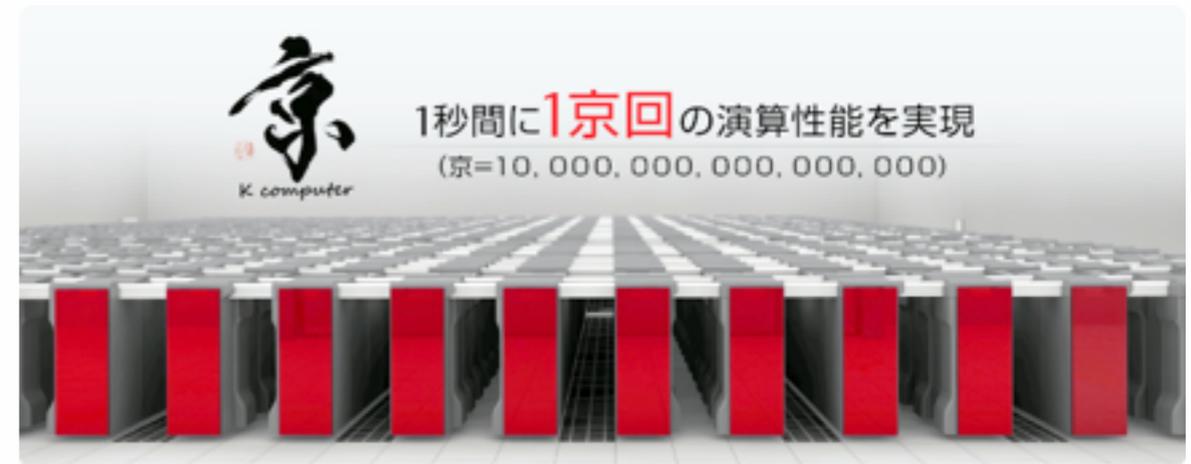
新しい元素を合成したり



様々な離合集散による現象の多様性を明らかにする

研究領域の大幅な拡大

理化学研究所
超伝導サイクロトロン

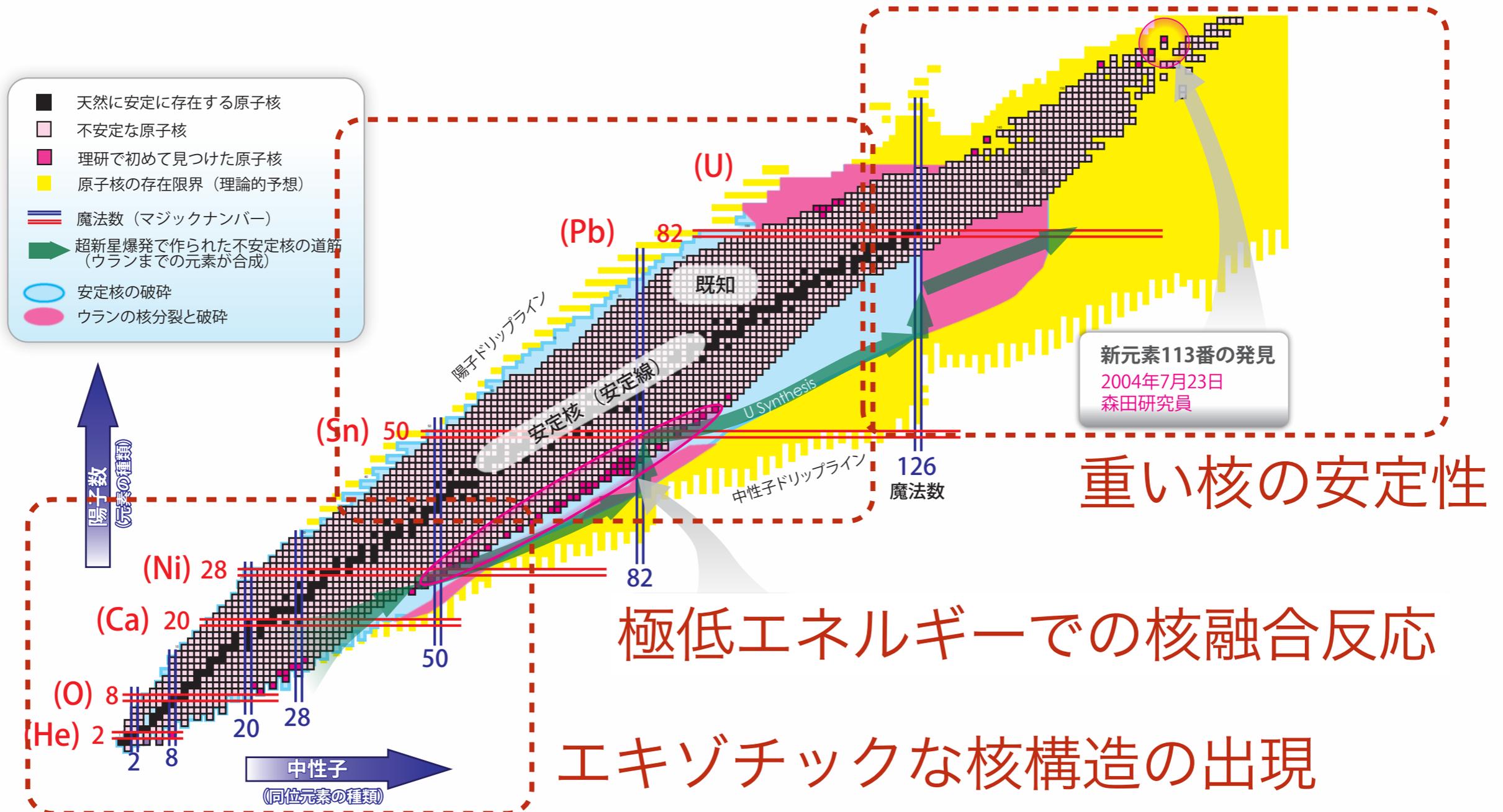


基礎物理学研究所
SR16000



研究領域の大幅な拡大

星の中でどの様に元素が合成されるのか？
元素の'起源'や存在領域を明らかにする



研究領域

- クラスタ・コア形成がどのような機構で起こるのか？
- 集団運動的な観点からのクラスタ励起モード

エキゾチックなクラスタ構造の探索

Phys. Rev. C 89, 011305(R) (2014)
Phys. Rev. Lett 109, 242503 (2013)
Phys. Rev. C 86, 031303(R) (2012)

質量 手法

軽 微視的

中重核領域での量子トンネル核融合反応

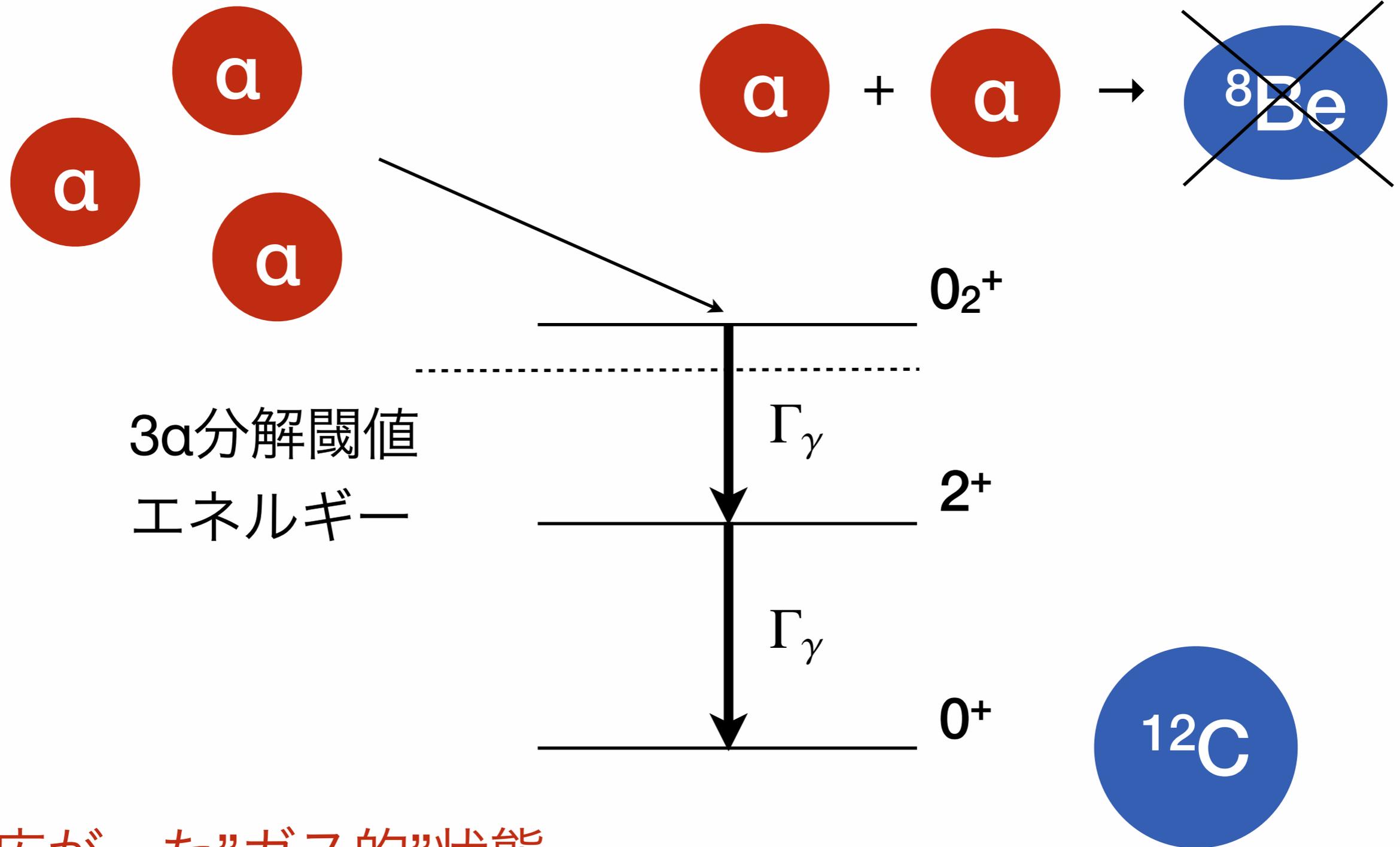
Phys. Rev. C 88, 0116602(R) (2013)

核分裂・超重元素合成の反応機構

Phys. Rev. C 86, 024610 (2012)

重 現象論

軽い原子核におけるエキゾチックな核構造

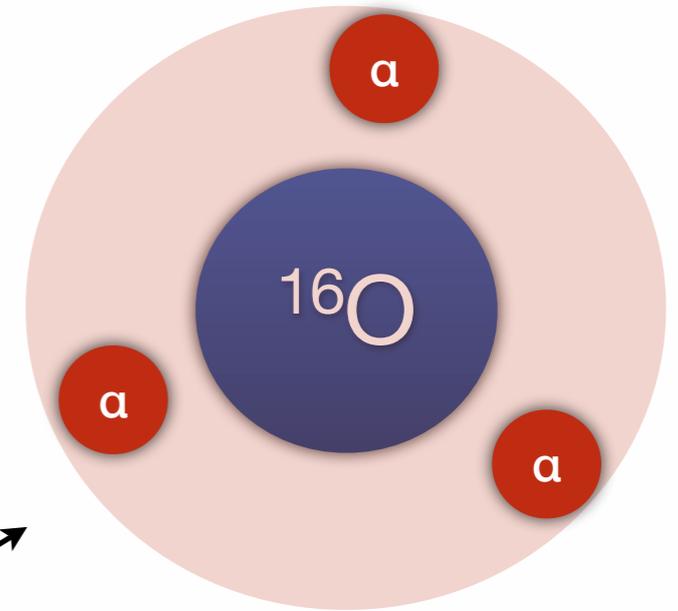
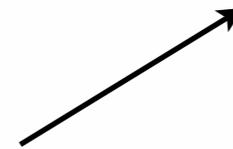
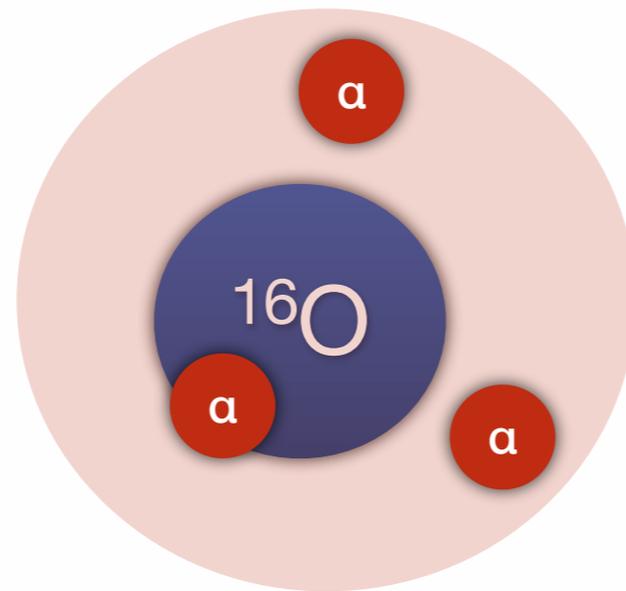
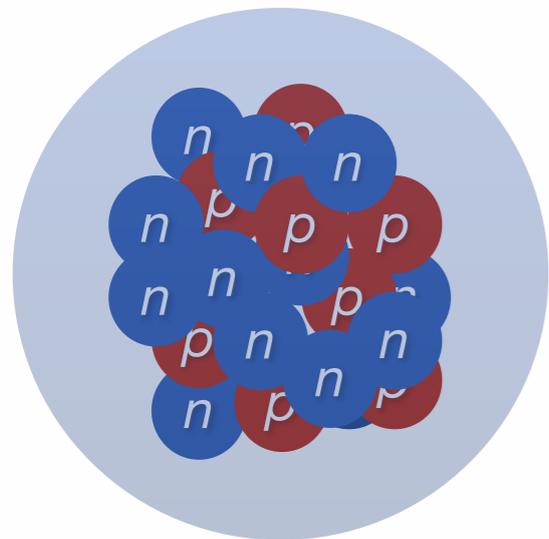


広がった"ガスの"状態

^{28}Si の励起状態に現れるガスの状態の探索

Phys. Rev. C 86, 031303(R) (2012)

^{28}Si



表面に
広がったガス

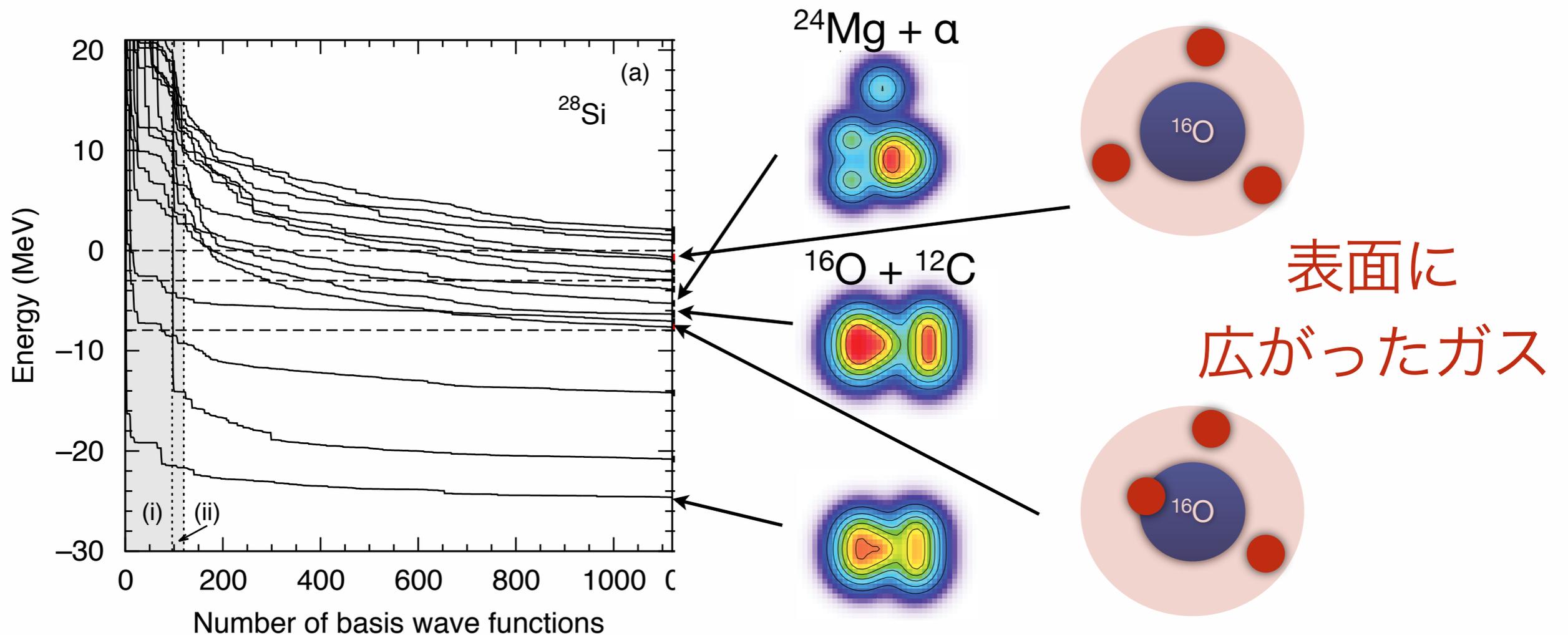
^{28}Si の励起状態に現れるガスの状態の探索

Phys. Rev. C 86, 031303(R) (2012)

$$|\Psi\rangle = c_1 \left| \begin{array}{c} \text{16O} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\rangle + c_2 \left| \begin{array}{c} \text{16O} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\rangle + \dots$$

1120個
28体系

$$\frac{\langle \Psi | \hat{H} | \Psi \rangle}{\langle \Psi | \Psi \rangle} = E$$



当時最新のSR1600において1024CPUを限界まで用いた

計算でのボトルネック

- Total wave function ($^{16}\text{O} + 3\alpha$)

$$\phi_\alpha(\vec{R}) \propto \prod_{i=1}^4 \exp[-\nu(\vec{r}_i - \vec{R})^2]$$

$$\Psi_{\text{Total}} = \sum_i c_i P^+ P_{MK}^J \Psi^{(i)}$$

$$\langle \Psi_{\text{Total}} | H | \Psi_{\text{Total}} \rangle$$

$i \sim 1200$ 個程度

→ およそ 1200×1200 次元の

一般固有値問題

$$\Psi_{^{16}\text{O}+3\alpha}^{(i)} = [\mathcal{A}\Phi_{^{16}\text{O}}(\vec{R}_0)\phi_\alpha(\vec{R}_1)\phi_\alpha(\vec{R}_2)\phi_\alpha(\vec{R}_3)]_i$$

- 角運動量射影での **3次元回転についての数値積分**が
ボトルネック → 分点数 $24 \times 32 \times 24 \sim 18,500$ 点

$$\hat{P}_{KM}^J = \frac{2J+1}{8\pi^2} \int d\Omega D_{MK}^J \hat{R}(\Omega)$$

D_{MK}^J : Wigner d function

$$\hat{R} = e^{-i\alpha\hat{J}_z} e^{-i\beta\hat{J}_y} e^{-i\gamma\hat{J}_x}$$

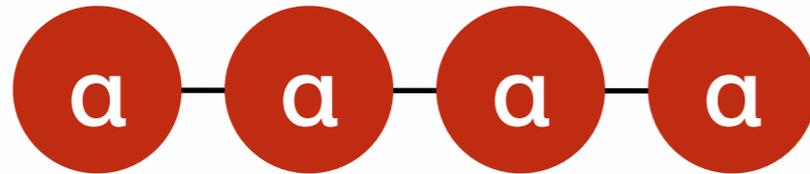
各行列要素は独立 → 各要素に対して **並列化**

軽い原子核におけるエキゾチックな核構造

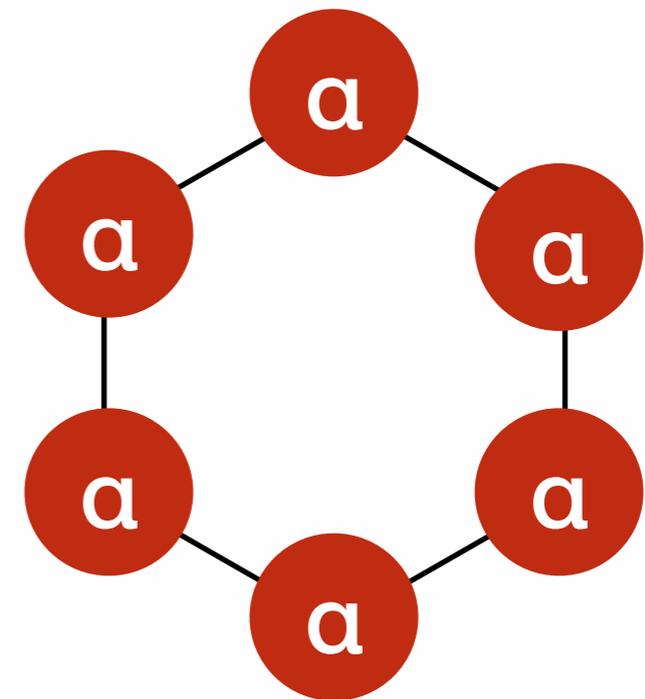
• リニアチェーン構造

• トーラス構造

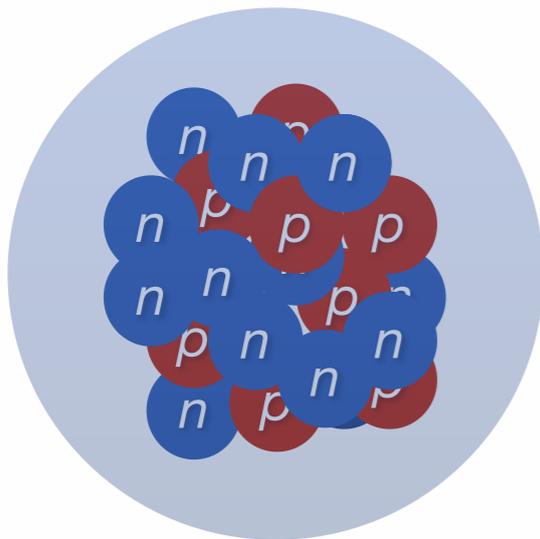
^{16}O



^{24}Mg



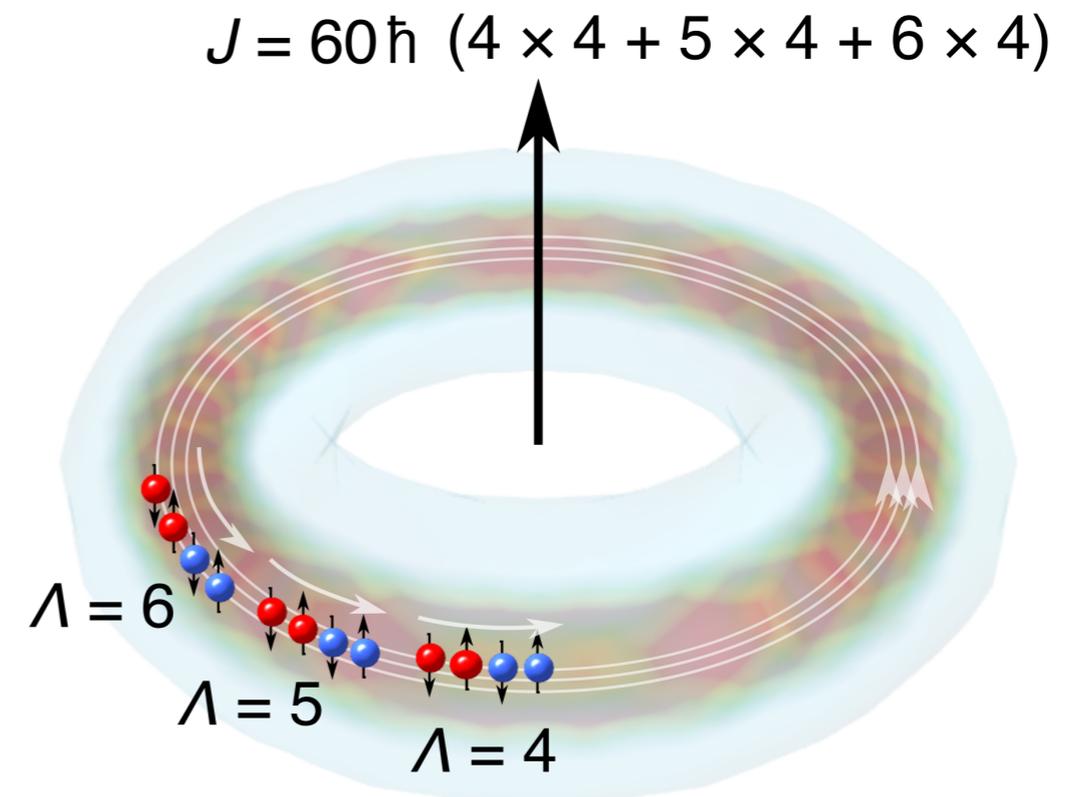
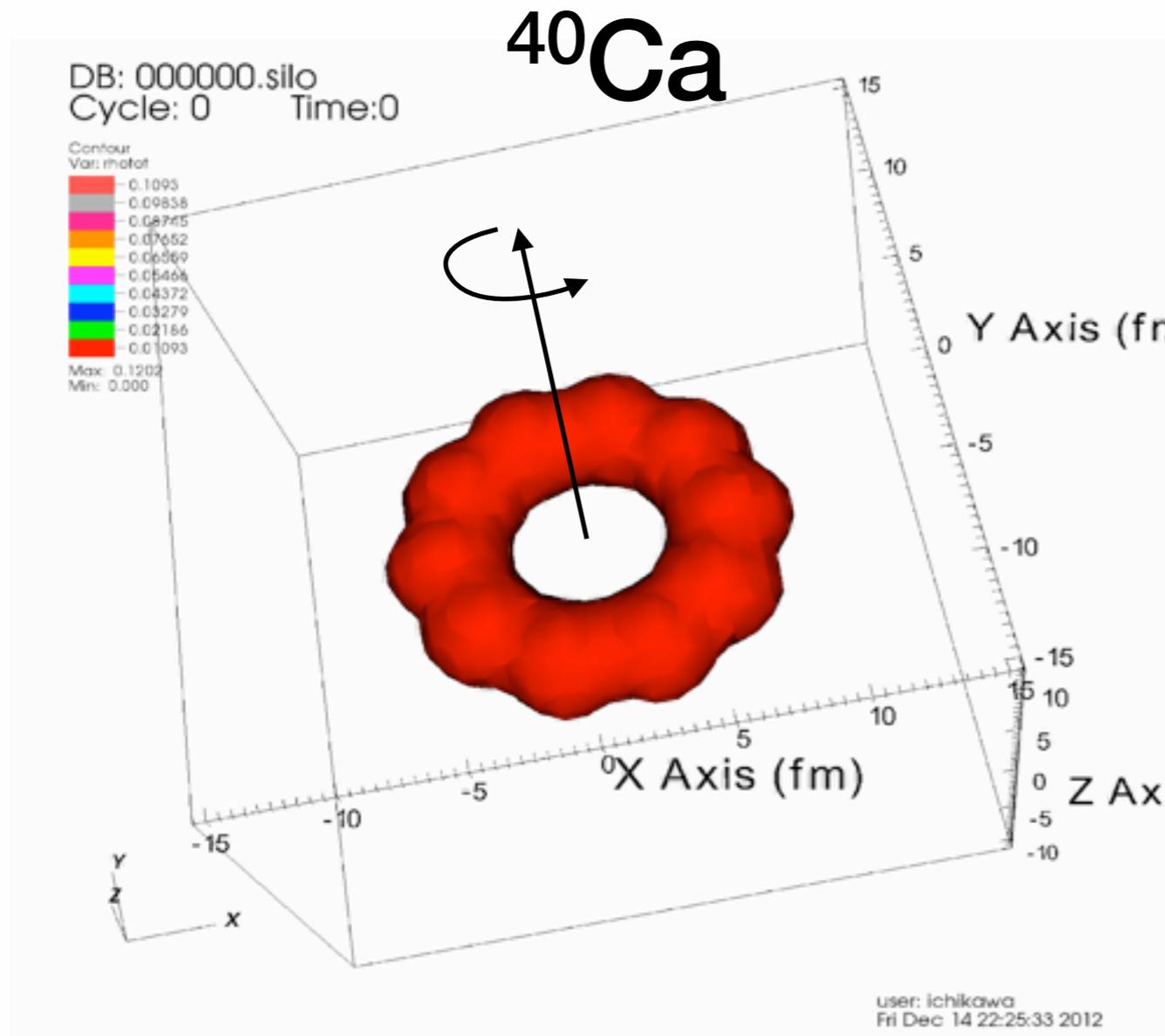
$6\alpha?$



よりエキゾチックな構造が励起状態に？

^{40}Ca におけるトーラス状態

Phys. Rev. Lett 109, 242503 (2013)



12個の核子が
同方向へ回る特異な状態

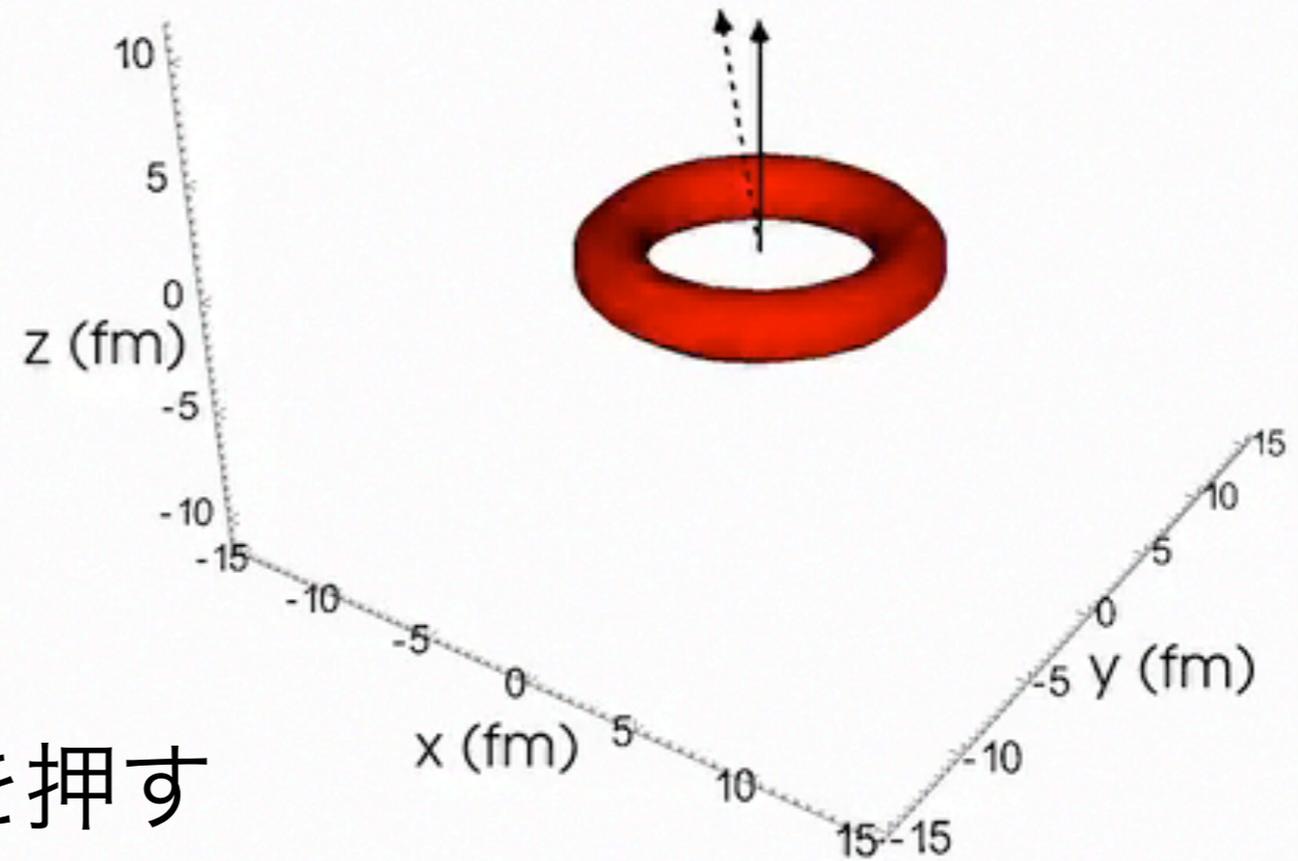
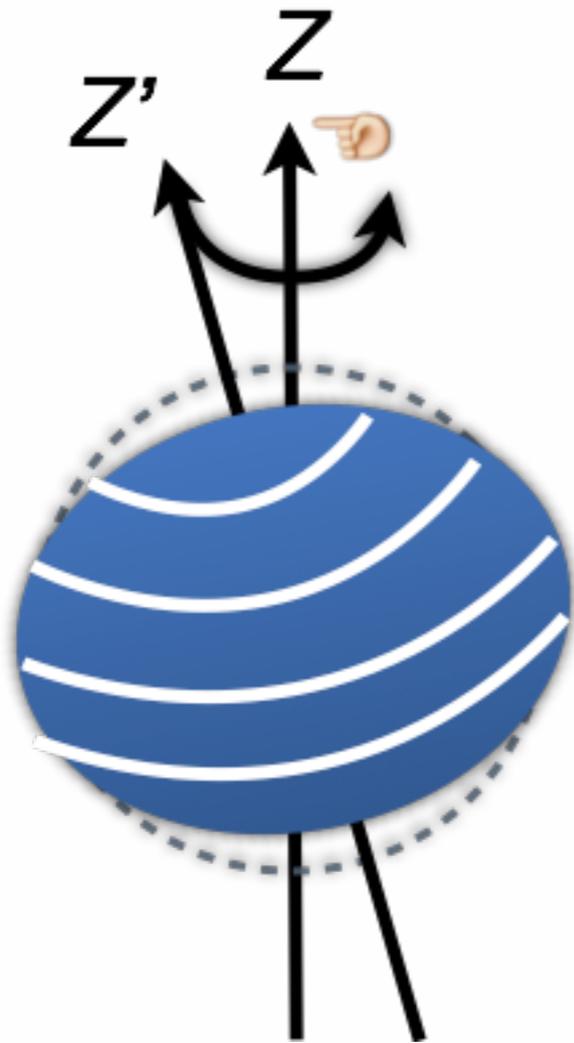
回転座標系でのHartree-Fock法

$$\delta \langle \hat{H} - \omega \hat{J}_z \rangle = 0$$

^{40}Ca トーラス状態の歳差運動

時間依存密度汎関数法

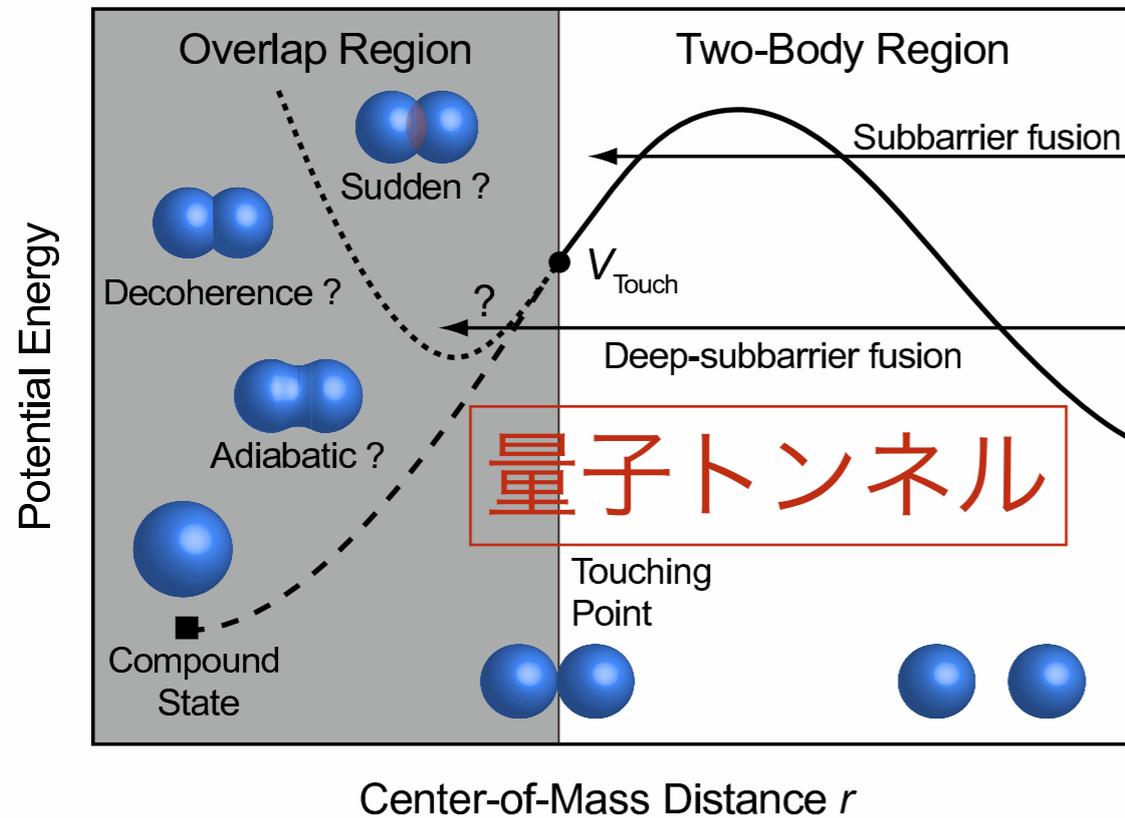
$$i\hbar\dot{\rho} = [\hat{h}, \rho]$$



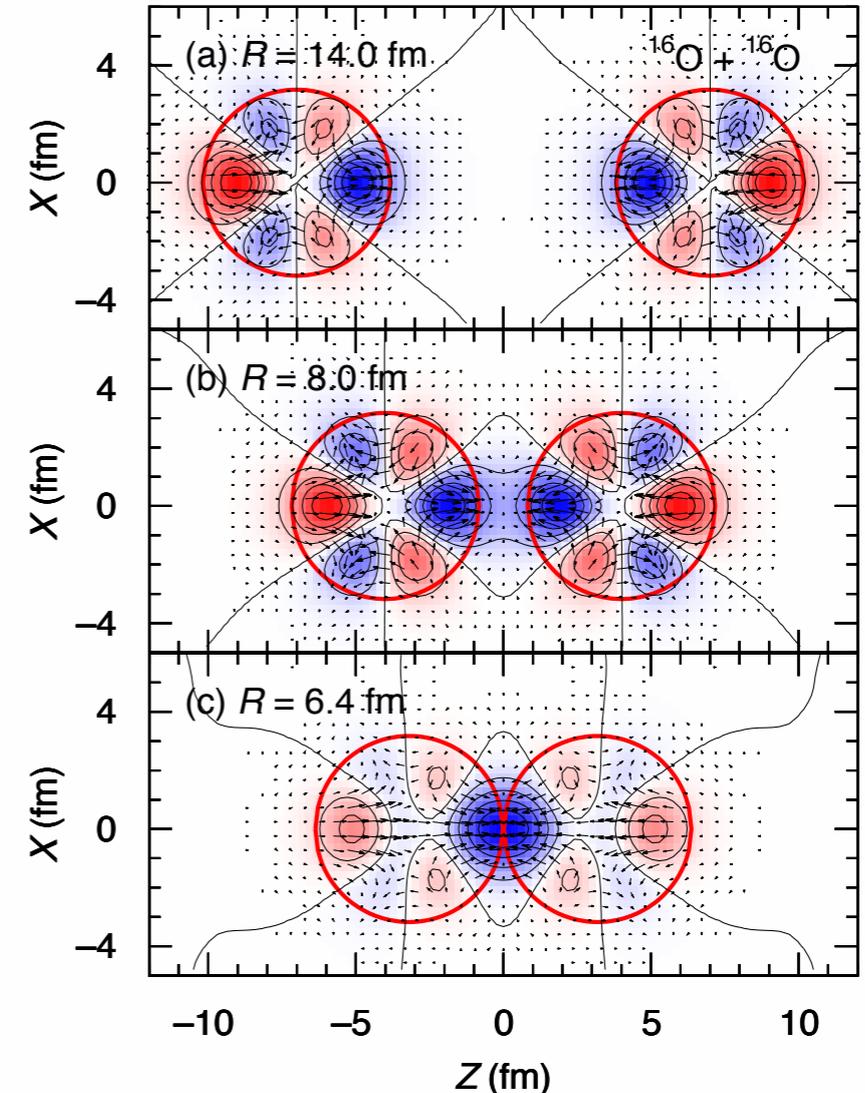
回っているコマの軸を押す
歳差運動集団励起モード

中重核の量子トンネル核融合反応

Phys. Rev. C 88, 0116602(R) (2013)



強いクーロン相互作用
により融合障壁が生じる

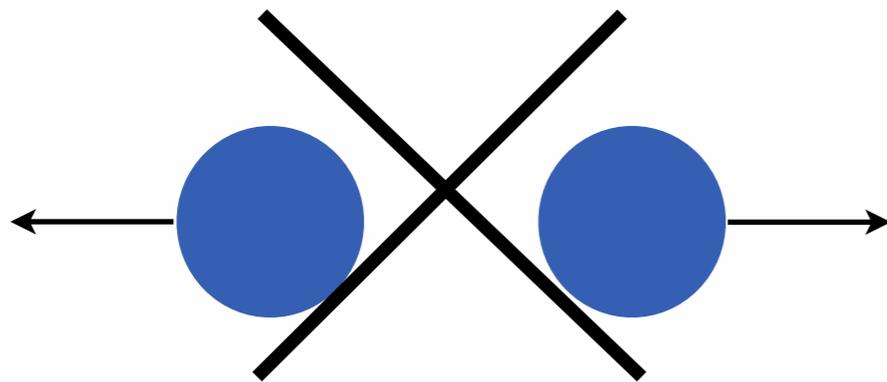
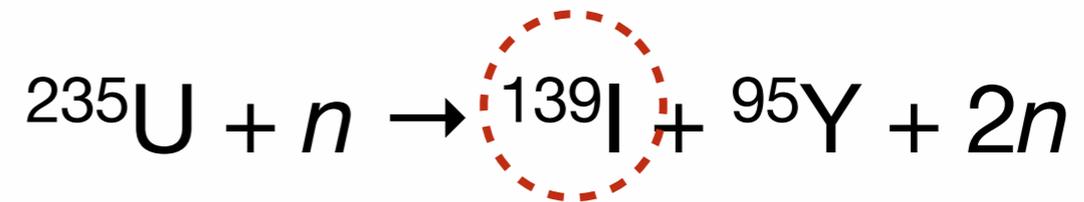


二つの原子核が近づいた時に量子的振動が減衰する
乱雑位相近似(RPA)法を二体系まで初めて拡張した

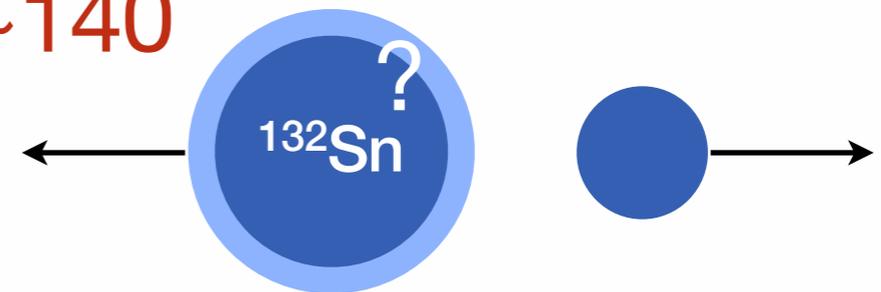
核分裂反応

超重元素の安定性 → 核分裂に対して安定である事

核分裂の主チャネル



A~140

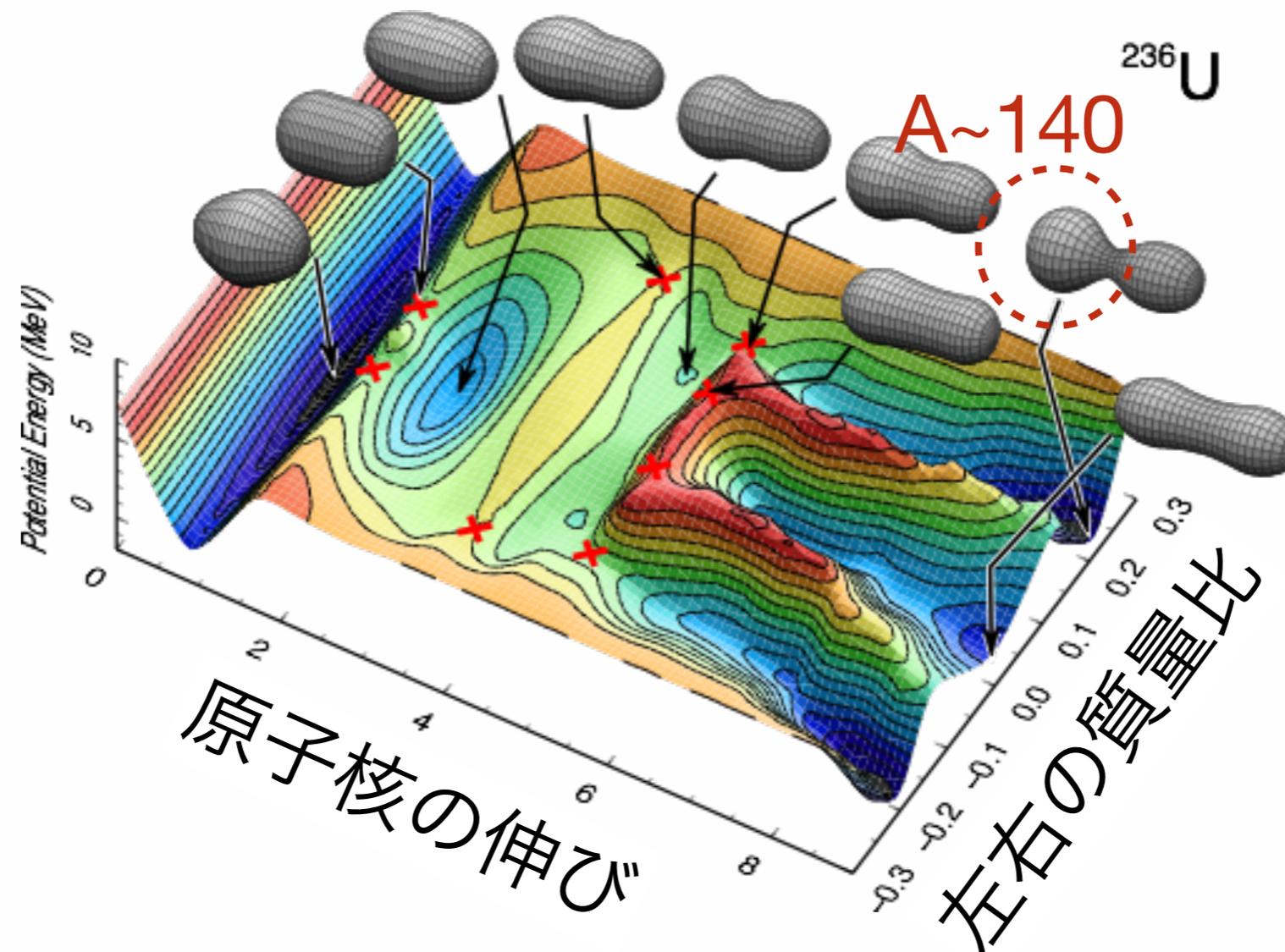


量子効果で質量対称には分裂しにくい！

ウランがどの様に分裂するのかエネルギー最適経路を計算

五次元核分裂ポテンシャルエネルギー一面

Phys. Rev. C 86, 024610 (2012)



現実的なポテンシャルエネルギー構造をはっきり示した

まとめ

- ^{28}Si で $^{16}\text{O} + 3\alpha$ のガスのな状態が存在するのかを限界まで波動関数を重ね合わせて探索した
- ^{40}Ca で12個の核子が時間反転対称性を破り一方向に回転する特異なトーラス形状を持つ安定な励起状態がある事を発見した
- トーラス状態で破れた密度対称性を回復する為に、回転軸に対して垂直軸周りの回転が生じて、集団運動的な歳差運動励起モードが存在する事を示した
- ^{236}U の核分裂に対する多次元ポテンシャルエネルギー一面の構造を示した