

原子核における自発的対称性の破れ —超流動性と変形—

佐藤 弘一 (原子核理論研究室)

共同研究者:

日野原 伸生 (筑波大)

吉田 賢市 (京大)

中務 孝 (筑波大)

松尾 正之 (新潟大)

松柳 研一 (京大基研/理研)

古本 猛憲 (横浜国大)

菊地 右馬 (徳山高専)

千葉 陽平 (大阪市大 理/NITEP/阪大RCNP)

緒方 一介 (RCNP/大阪市大 理/NITEP)

櫻木 千典 (大阪市大 理/NITEP)

略歴

2011.3 学位取得 (京都大学)

2011.4 - 2016.3 理研 仁科センター 特別研究員
基礎科学特別研究員

2016.4 - 大阪市立大学

現在までの主な研究テーマ

共同研究者

・低温高密度クォーク物質の磁性の研究

巽敏隆(京大)

・原子核の大振幅集団運動の研究

日野原伸生, 吉田賢市, 中務孝, 松尾正之, 松柳研一,
古本猛憲, 菊地右馬, 緒方一介, 櫻木千典

・原子核のアイソスピン対称性に基づく密度汎関数
法の拡張

J. Dobaczewski(York), W. Satula(Warsaw), P. Bączyk (Warsaw),
M. Konieczka (Warsaw), T. Nakatsukasa (Tsukuba)

個人的興味: 生物系の集団現象

・原子核の大振幅集団運動の微視的研究 日野原伸生, 吉田賢市, 中務孝, 松尾正之, 松柳研一,
古本猛憲, 菊地右馬, 緒方一介, 櫻木千典

- ・大振幅の変形ゆらぎ、巨視的トンネル効果
- ・超流動状態でのゲージ対称性とその破れ

・原子核のアイソスピン対称性に基づく密度汎関数法の拡張 J. Dobaczewski(York), W. Satula(Warsaw), P. Bączyk (Warsaw), M.
Konieczka (Warsaw), T. Nakatsukasa (Tsukuba)

- ・陽子と中性子を同種粒子として扱う拡張 → アイソスピン空間での回転対称性
- ・アイソスピン対称性を破る核力+クーロン力

—————→ 陽子-中性子超流動

「変形」と「超流動性」：どちらも「自発的対称性の破れ」

陽子-中性子混合(p-n mixing)を入れた密度汎関数法による核構造の研究

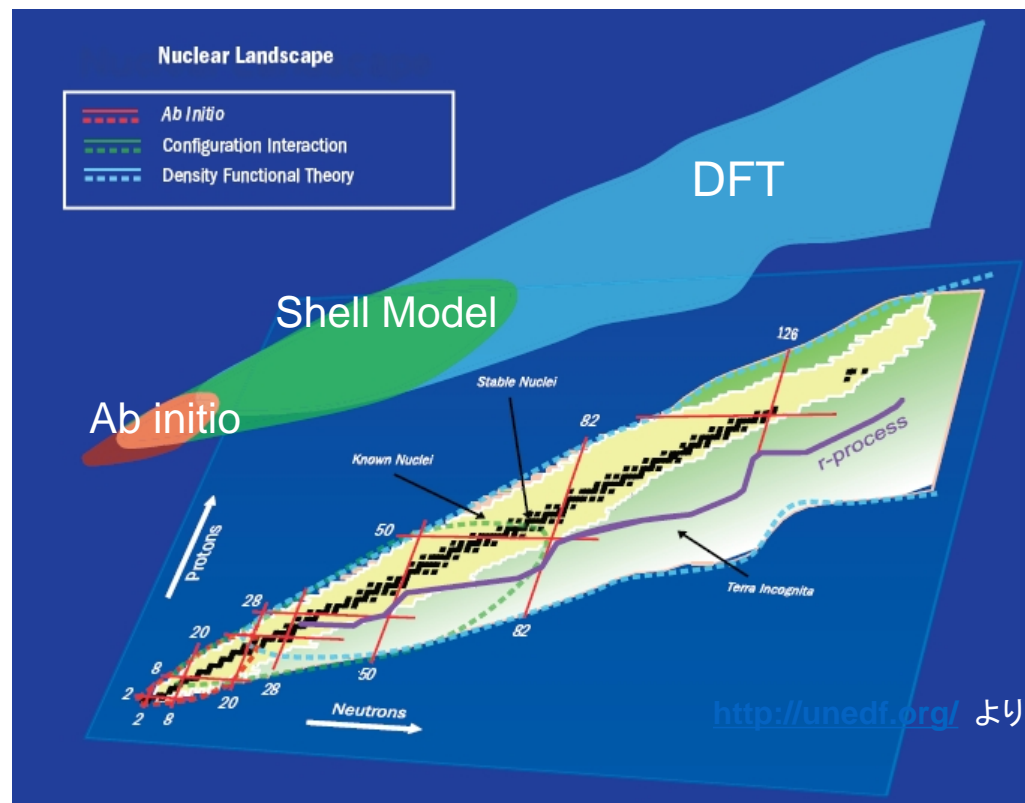
Dobaczewski(York), Satula, Baczyk, Konieczka(Warsaw大)、中務氏(筑波大)との共同研究

密度汎関数法(DFT):

密度依存型有効相互作用＋
Hartree-Fock-Bogoliubov法
(Bogoliubov –de Gennes)

全核種を対象に研究できる
唯一の方法

軽い核から重い核まで全ての原子核の性質を出来るだけ良く再現するような汎関数を探そう！
...と、というのが最近の主流



密度汎関数法 エネルギーは密度の汎関数として与えられる

陽子-中性子(p-n)混合

KS, Dobaczewski, Nakatsukasa, Satula, Phys. Rev. C 88, 061301(R) (2013).

従来のエネルギー密度汎関数

$$E[\rho_n, \rho_p]$$

アイソスピン対称性を尊重していない！

密度行列のアイソスピンに関する対角成分しかない

密度行列

$$\rho_{\tau\tau'}(\alpha, \beta) = \langle \Psi | c_{\beta, \tau'}^+ c_{\alpha, \tau} | \Psi \rangle$$

$\tau, \tau' = p, n$

isoscalar	isovector
$\rho_0 = \rho_n + \rho_p$	$\rho_1 = \rho_{np} + \rho_{pn}$
Standard HF	$\rho_2 = -i\rho_{np} + i\rho_{pn}$
	$\rho_3 = \rho_n - \rho_p$

$$(\rho_n = \rho_{nn}, \rho_p = \rho_{pp})$$



アイソスピン対称性は核物理で大変重要！

アイソスピン対称性を尊重した形に汎関数を拡張しよう！

我々の密度汎関数(核力部分)

$$E[\rho_0, \vec{\rho}]$$

isovectorの3成分とも使って、アイソスピン空間での回転対称性を持つように拡張

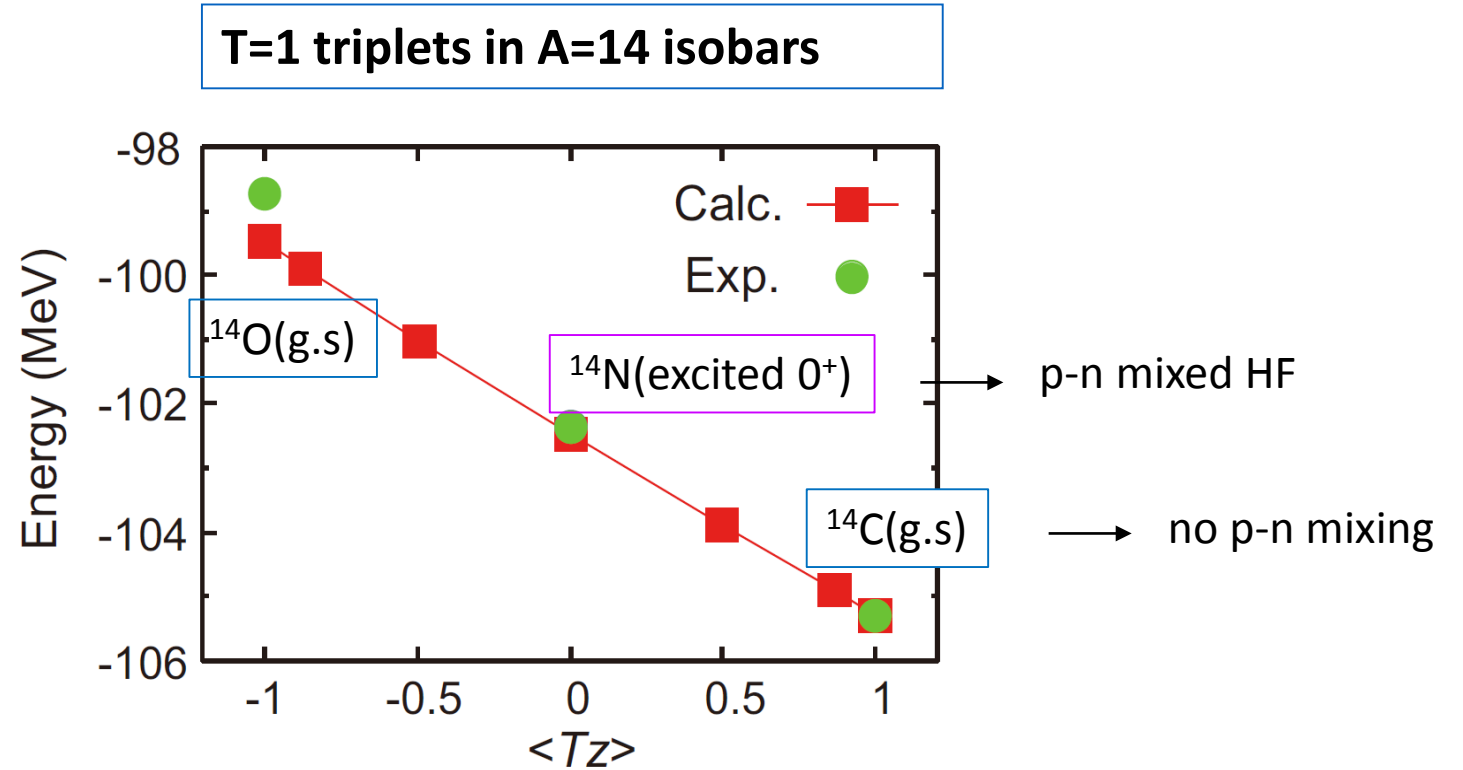
陽子-中性子(p-n)混合:
1粒子状態を陽子と中性子の重ね合わせとする

$$\begin{aligned} \phi_1(\mathbf{r}) &= \phi_1(\mathbf{r}, n) + \phi_1(\mathbf{r}, p), \\ \phi_2(\mathbf{r}) &= \phi_2(\mathbf{r}, n) + \phi_2(\mathbf{r}, p), \\ &\vdots \end{aligned}$$

この拡張はp-n対相関(陽子と中性子のCooper対)を考える上で必要

陽子と中性子を混ぜて何が嬉しいか？

→アイソスピン多重項の
自然な記述ができるようになった



- $T_z=0, T=1$ states in odd-odd ^{14}N : Time-reversal symmetry conserved
- ^{14}N : p-n mixed , $^{14}\text{C}, \text{O}$: p-n unmixed HF
- Pairingなし・isospin projectionなしの計算

(The origin of calc. BE is shifted by 3.2 MeV to correct the deficiency of SkM* functional in the left panel for A=14)

We have developed a code for pnHF by extending an HF(B) solver

HFODD(1997-)

<http://www.fuw.edu.pl/~dobaczew/hfodd/hfodd.html>

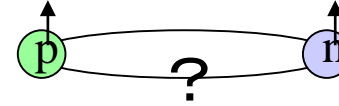
- J. Dobaczewski, J. Dudek, Comp. Phys. Comm 102 (1997) 166.
- J. Dobaczewski, J. Dudek, Comp. Phys. Comm. 102 (1997) 183.
- J. Dobaczewski, J. Dudek, Comp. Phys. Comm. 131 (2000) 164.
- J. Dobaczewski, P. Olbratowski, Comp. Phys. Comm. 158 (2004) 158.
- J. Dobaczewski, P. Olbratowski, Comp. Phys. Comm. 167 (2005) 214.
- J. Dobaczewski, et al., Comp. Phys. Comm. 180 (2009) 2391.
- J. Dobaczewski, et al., Comp. Phys. Comm. 183 (2012) 166.
- N. Schunk et al, Comp. Phys. Comm. 216 (2017) 145.

- Skyrme or Gogny energy density functional
- Hartree-Fock or Hartree-Fock-Bogoliubov
- No spatial & time-reversal symmetry restriction
- Harmonic-oscillator basis
- Multi-function (constrained HFB, cranking, angular mom. projection, isospin projection, finite temperature....)
- Option for cold atoms

➡ A first step toward **nuclear DFT for proton-neutron pairing** and its application

Pairing between protons and neutrons (isoscalar $T=0$ and isovector $T=1$)

Goodman, Adv. Nucl. Phys.11, (1979) 293.
Perlinska et al, PRC 69 , 014316(2004)

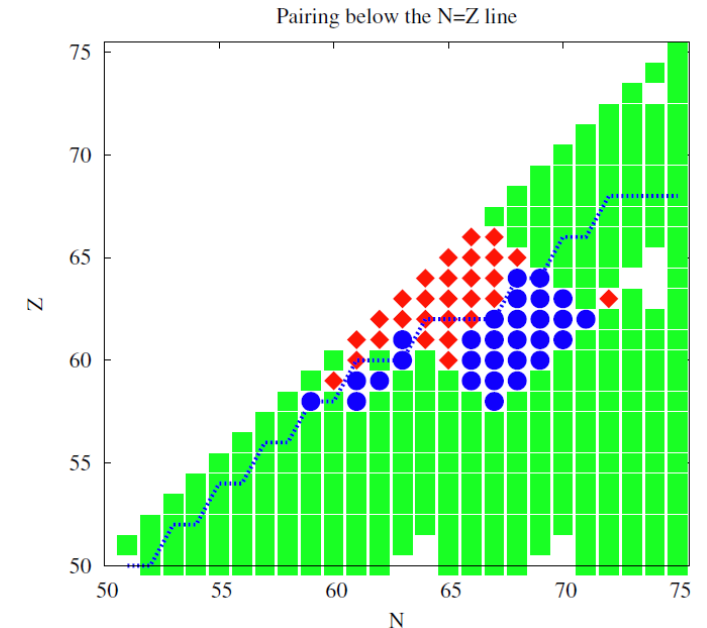


- ・陽子-中性子のクーパー対
- ・アイソベクター($T=1, S=0$)については、まああるだろう
- ・アイソスカラー($T=0, S=1$)については、未解決。アイソスカラー対凝縮の明確な実験的証拠はない
- ・ $N=Z$ 核(フェルミ面がそろろう)で重要となりうる
- ・高スピン状態では凝縮もあり得る？

原子核の変形の効果を入れてない計算

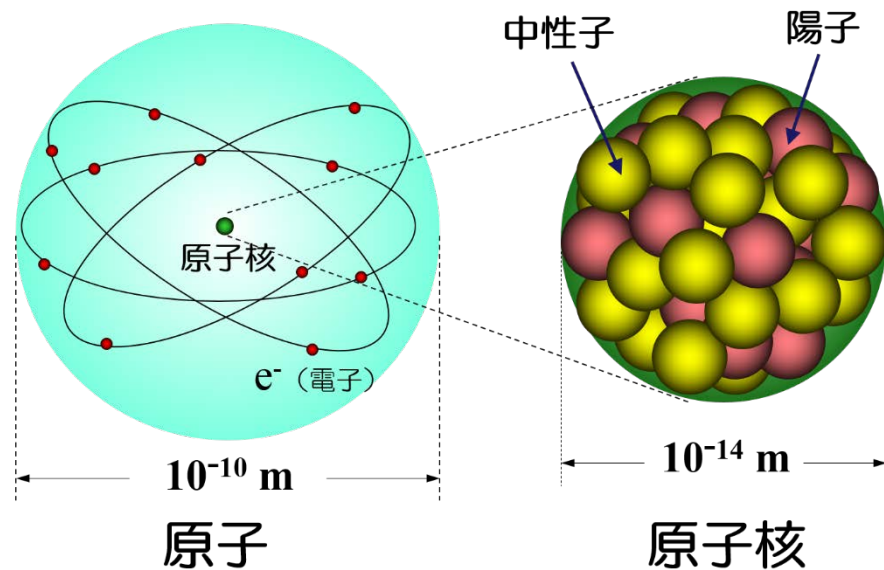
- : spin-singlet
- ◆ : spin-triplet
- : mixture

Gezerlis, Bertsch, Luo, PRL106(2011)



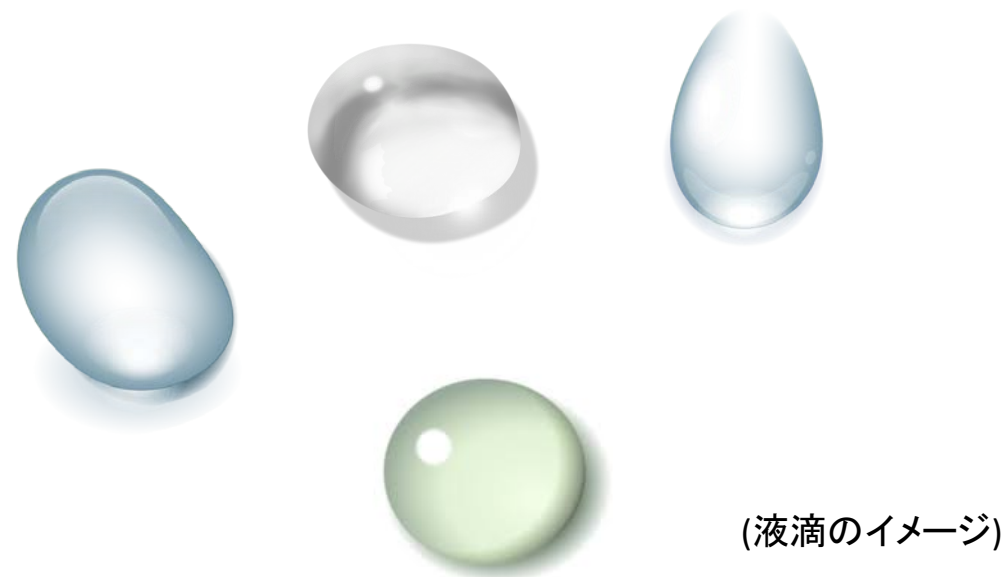
そもそも、原子核の超流動って？

原子核は陽子と中性子から出来ている



「教科書などによくあるイメージ」

原子核って実は... “液滴”みたいなもの



比較的小さなエネルギーで変形する
陽子数・中性子数によって基底状態で変形することも

Odd-even staggering in mass and separation energies

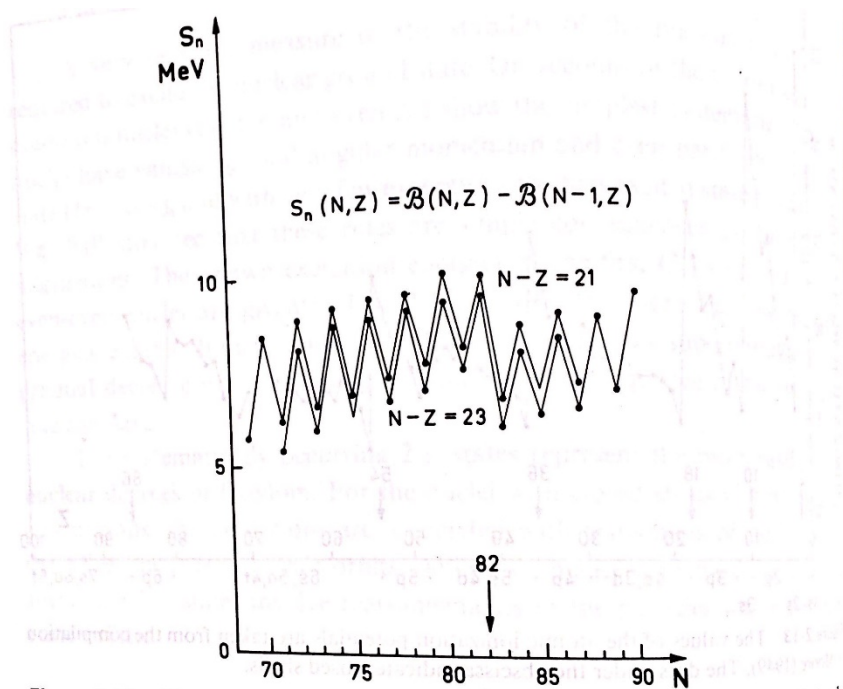
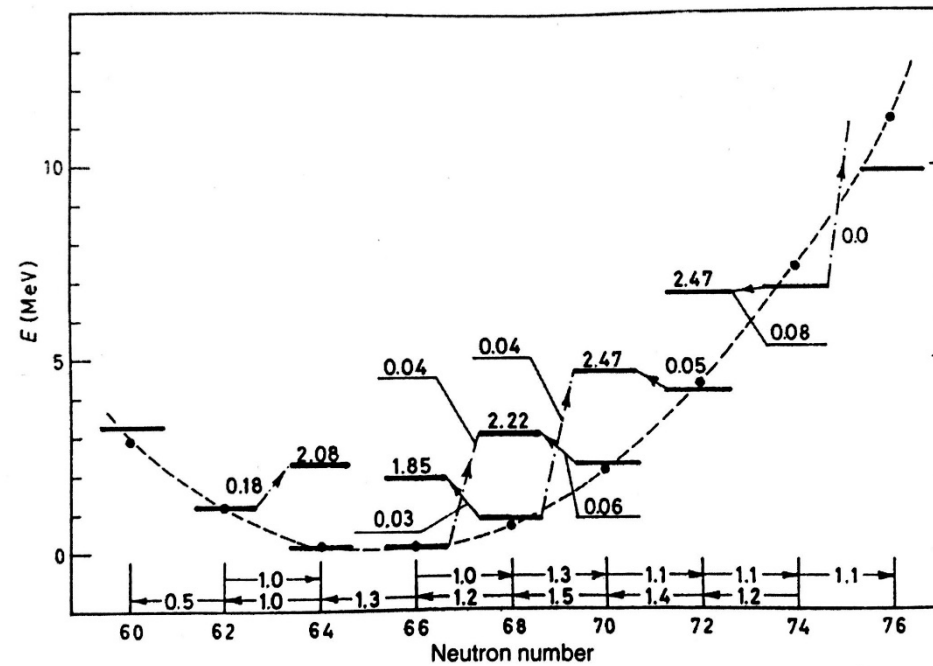


Figure 2-14 The neutron separation energies, S_n , are taken from the compilation by J. H. E. Mattauch, W. Thiele, and A. H. Wapstra, *Nuclear Phys.* 67, 1 (1965).

Bohr-Mottelson's textbook

Pair rotation & pair vibration



Brink & Broglia,
"Nuclear
Superfluidity"

Experimental energies of the 0^+ states of the even Sn isotopes excited in two-particle transfer reactions (t, p) and (p, t).

何かもうちょっとわかりやすいものないの？

そもそも超伝導って？

超伝導(ちょうでんどう、英: superconductivity)とは、特定の金属や化合物などの物質を非常に低い温度へ冷却したときに、電気抵抗が急激にゼロになる現象。

(Wikipediaより)

原子核って超伝導・超流動体？電気抵抗0なの？永久流が存在するの？

➡ 電子系などと違って、原子核は直接測って永久流を確かめることは出来ない

cf. 中性子星 (巨大な"原子核")

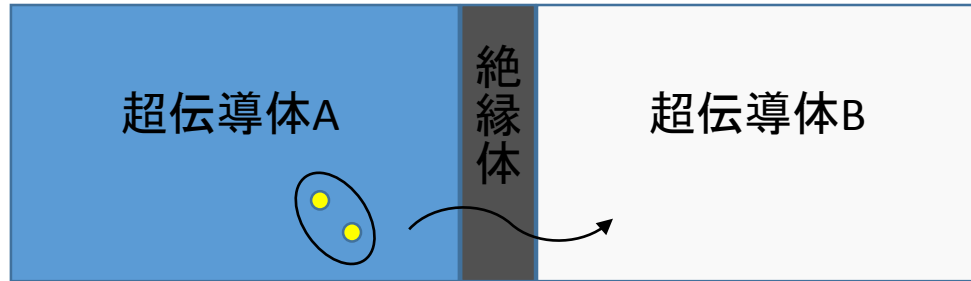
一つの方法:

超流動性を考慮した理論計算 }
超流動性を考慮しない理論計算を比較 } どっちが観測量を良く再現する？

例えば、pairingを入れないと慣性モーメントをoverestimateする

超伝導・超流動ならでは
の現象ってないのだろう
か？ 😞

Josephson 効果



- ・絶縁体がポテンシャルバリアになっている。
- ・量子力学的にクーパー対はトンネルする

Josephson 接合

常伝導体で絶縁体を挟んだ場合：常伝導体間に電位差がないとトンネル電流は流れない

超伝導体で絶縁体を挟んだ場合：超伝導体間の電位差が0でもトンネル電流が流れる！

(トンネルはA→B方向にも、B→A方向にも起こることに注意)

この時、トンネル電流は、

$$j \propto \sin(\phi_2 - \phi_1)$$

Nuclear Josephson effect:

ただし、Josephson currentと一つの超流体中の超伝導currentと区別は明確ではない

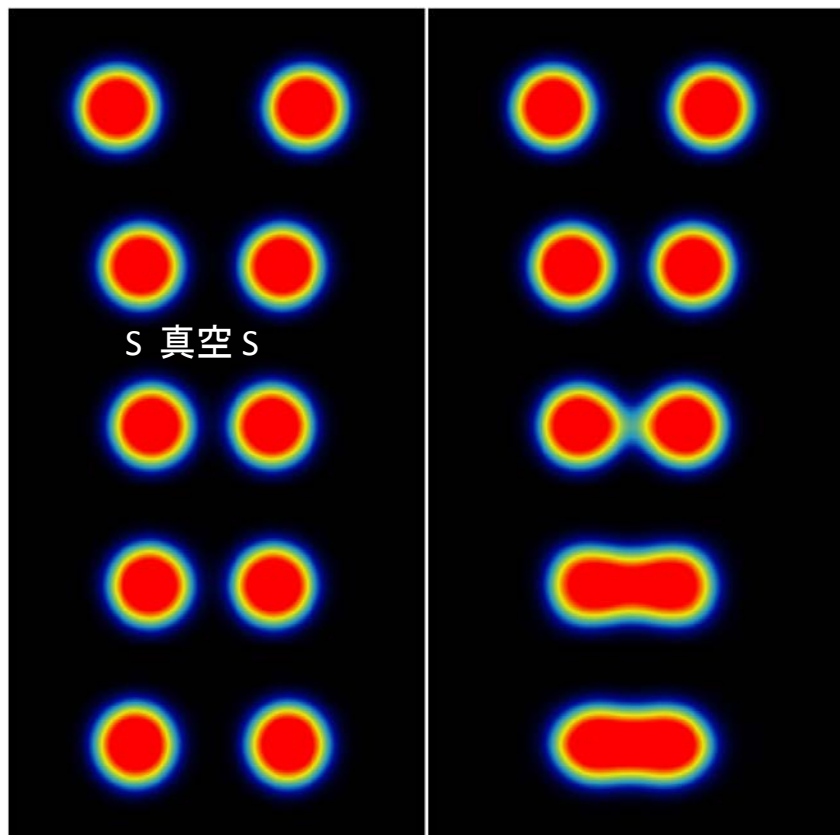
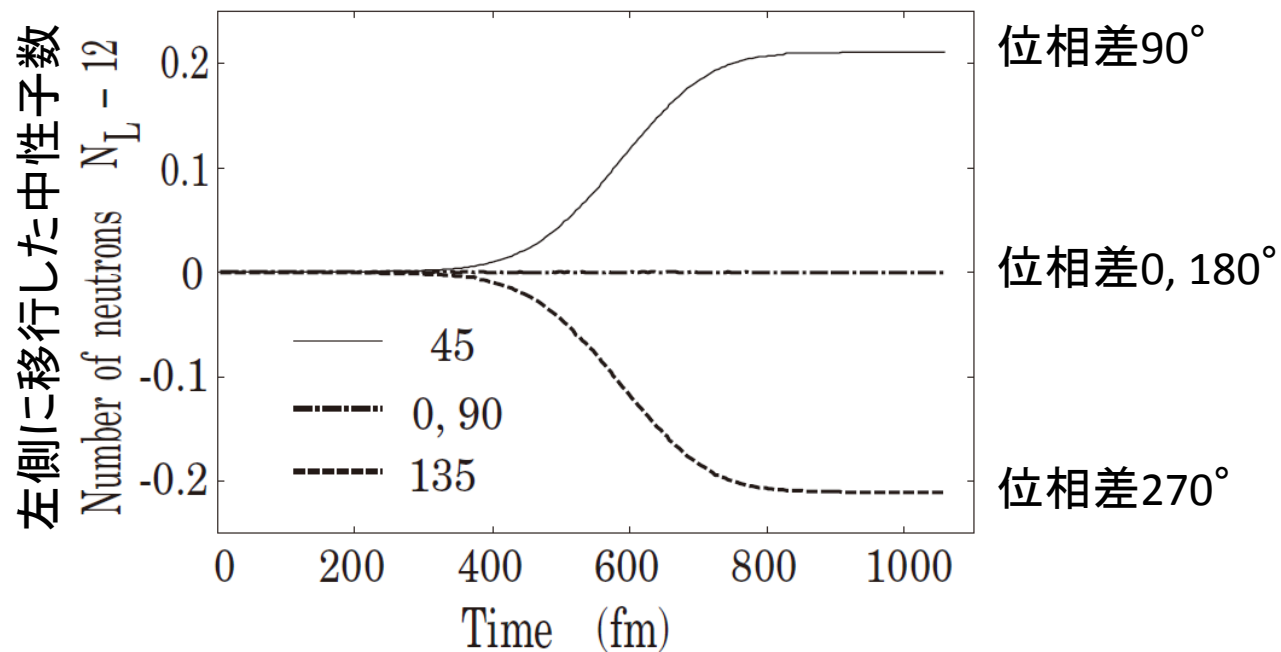


FIG. 2. Densities in the y - z plane in the collisions $^{20}\text{O} + ^{20}\text{O}$ for the center-of-mass energies $E_{\text{c.m.}} = 9.21$ MeV (left) and $E_{\text{c.m.}} = 9.61$ MeV (right). The densities are shown with respect to the time at times $ct = 180, 360, 540, 720,$ and 900 fm from top to bottom, respectively. c is light speed.



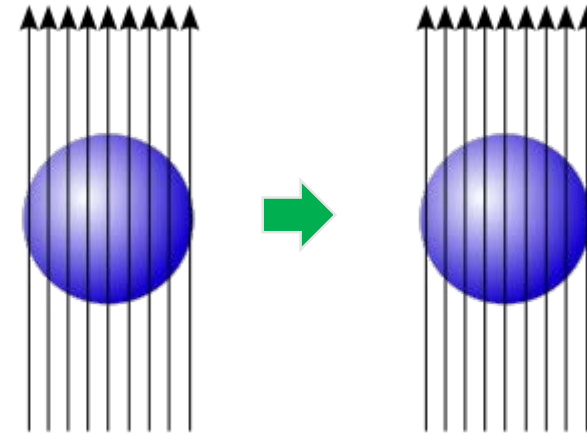
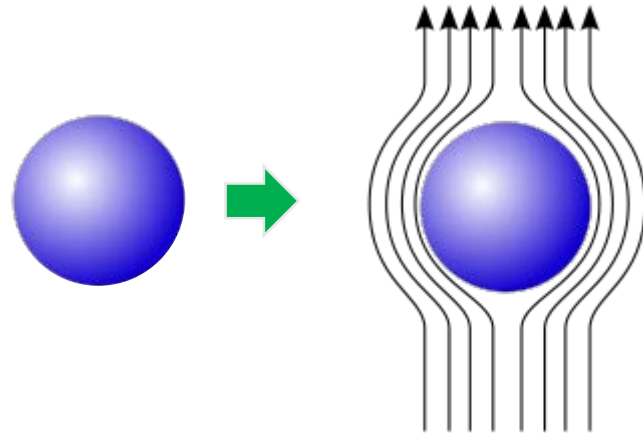
時間

「ゼロ抵抗⇒超伝導体」ではない！

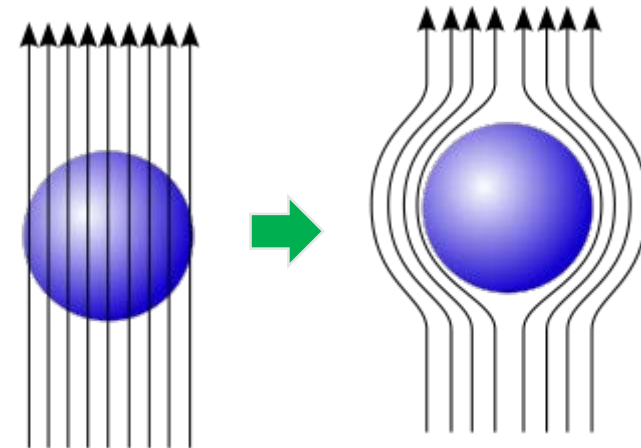
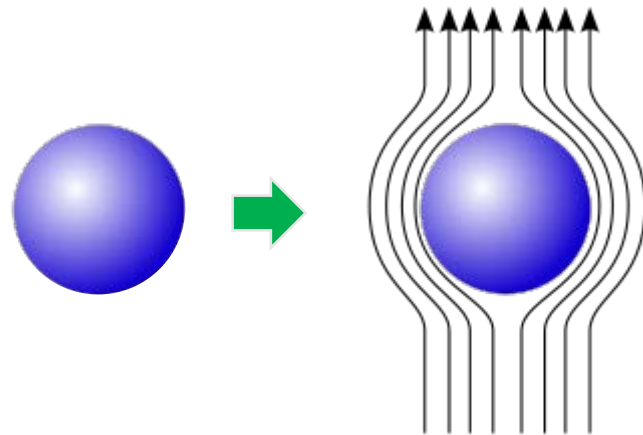
冷やしてから磁場をかける

磁場をかけてから冷やす

完全導体(抵抗0):



超伝導体:



超伝導の本質は、ゼロ抵抗よりもむしろ「マイスナー効果」

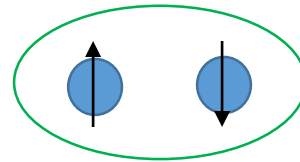
Nuclear Meissner effect?

超伝導状態で磁場0

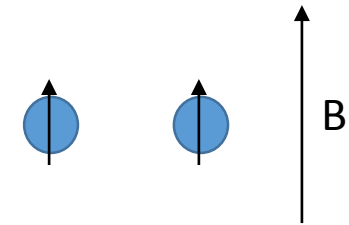


臨界磁場以上の磁場をかけると超伝導性が失われる

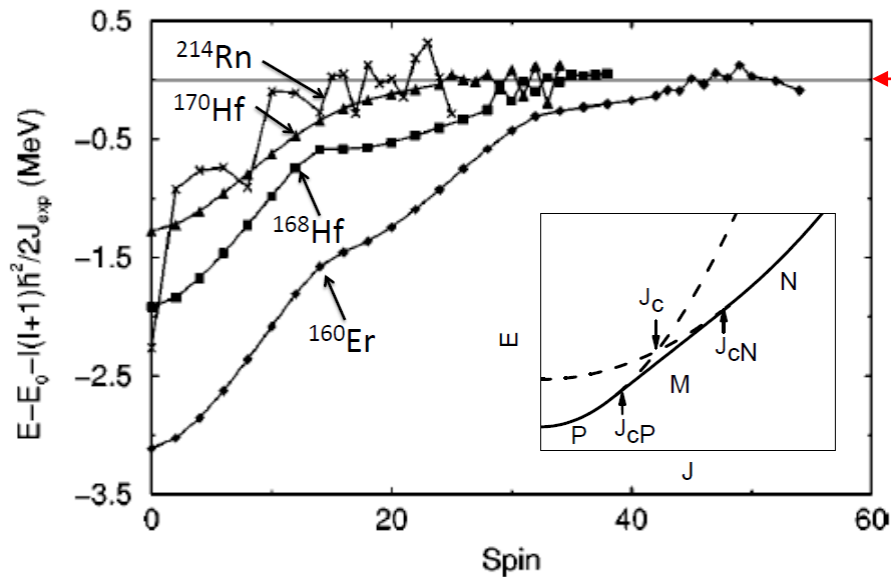
磁場⇒高スピン(角運動量)に対応



普通の超伝導体:
spin up とdownの対



pairこわれる



“常流動回転体”の値

Frauendorf,
Fifty Years of Nuclear BCS,
pp. 536-552 (2013)

原子核は2成分系



p-n pairはspin tripletに組める
p-n対凝縮はあるの?

⇒未解決問題

原子核の変形と集団運動

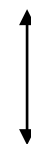
原子核の大振幅集団運動の微視的理論

微視的:核子(あるいはそれ以下)の自由度から出発する

集団運動?

大振幅?

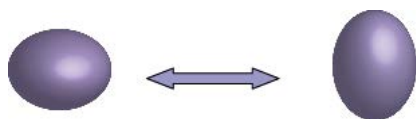
微視的?



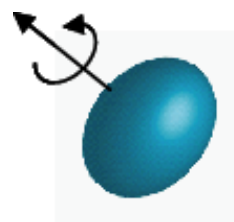
巨視的・現象論的

集団運動(集団モード): 原子核を作る多くの粒子が関与する運動(モード)

例:



振動



回転

一粒子運動:一つの粒子だけが関与する運動

回転運動



原子核は変形している

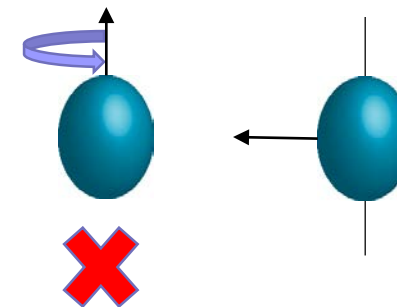


球形核: 回転させても量子力学的には区別がつかない。回転できない。



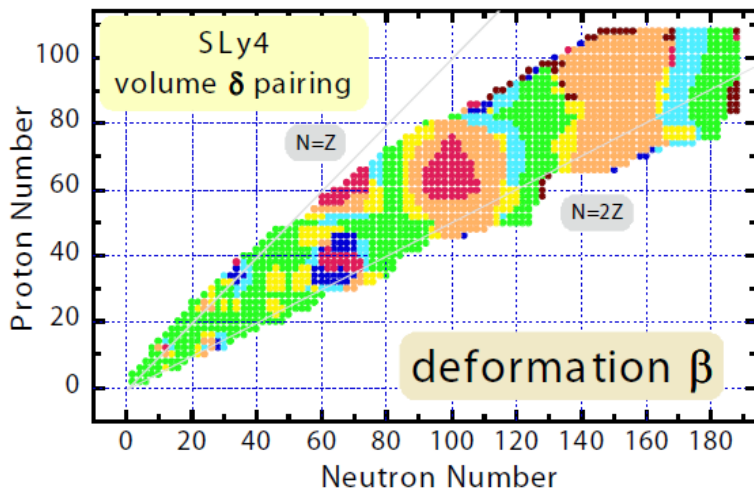
変形核: 回転できる。但し、軸対称性がある場合、対称軸まわりは不可

対称軸



Stoitsov, PRC68 (2003) 054312

変形度の理論計算



oblate(パンケーキ、みかん型)



spherical (球形)



prolate(葉巻、レモン型)

How can we see nuclear shapes ?

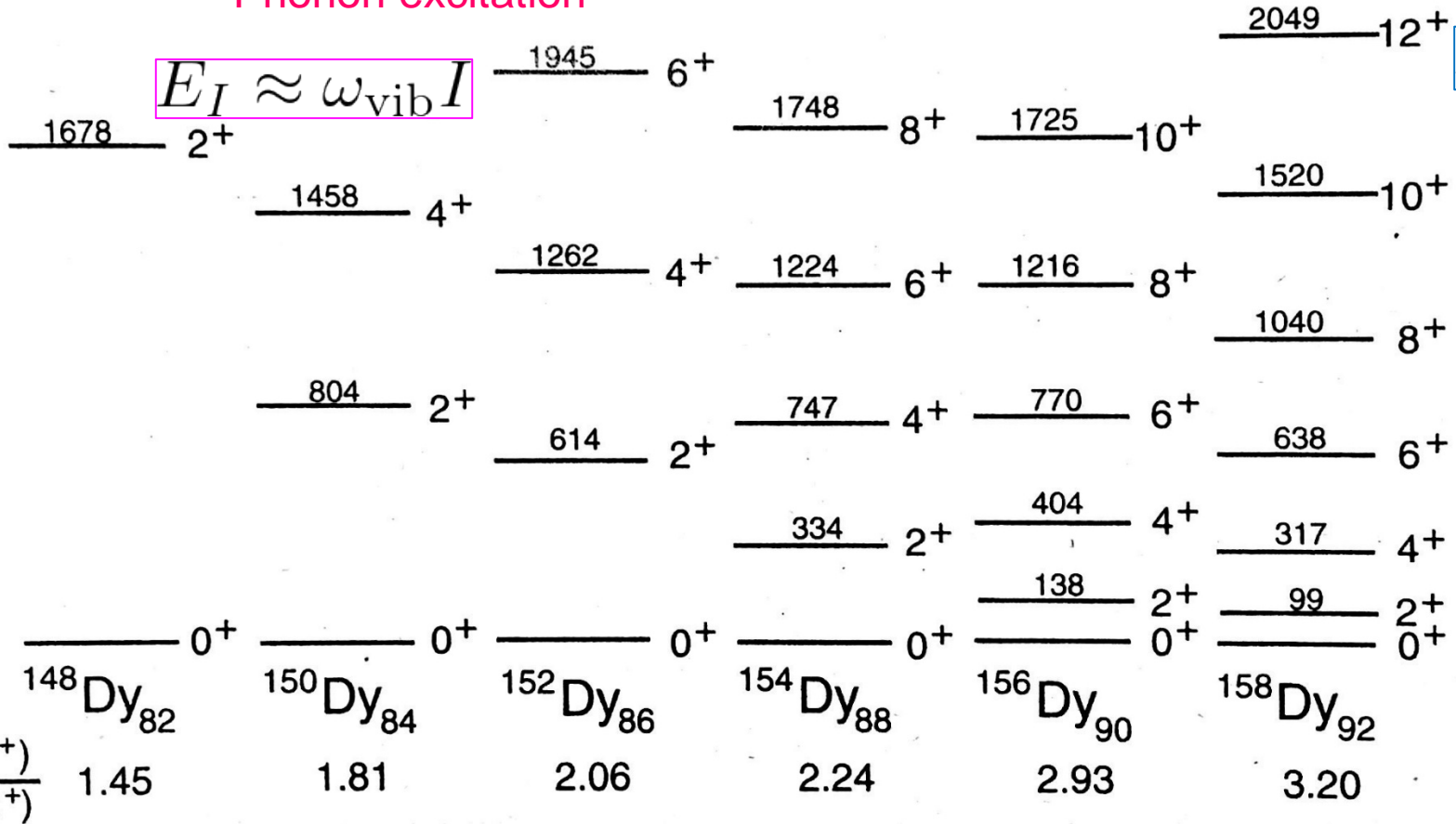
Shape transition

Phonon excitation

Rotational mode

$$E_I \approx \omega_{\text{vib}} I$$

$$E_I \approx I(I + 1)/2\mathcal{J}$$




$$R_{4/2} = \frac{E(4^+)}{E(2^+)} \quad 1.45 \quad 1.81 \quad 2.06 \quad 2.24 \quad 2.93 \quad 3.20$$



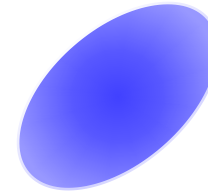
ここでは、 N =偶数、 Z =偶数の偶偶核を考える。
全ての偶偶核の基底状態の角運動量は0であることが知られている。

「多くの原子核は変形している」 

但し、

「全ての原子核は”丸い”」 

「多くの原子核は物体固定系では変形している」



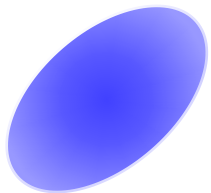
“自発的に対称性が破れた状態”

色々な大きさの角運動量が混ざった状態

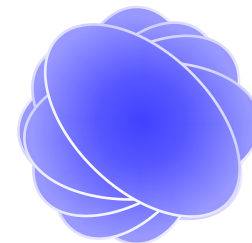
但し、

「全ての偶偶核は実験室系では”丸い”」

角運動量射影された状態



原子核は有限系



Lab系では、基底状態は色々な向きを向いた配位の重ね合わせ

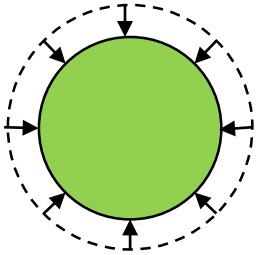
原子核の変形

$$\text{半径 } R(\theta, \varphi) = R_0 \left[1 + \sum_{\lambda, \mu} \alpha_{\lambda\mu}^* Y_{\lambda\mu}(\theta, \varphi) \right]$$

実数性より

$$\alpha_{\lambda\mu}^* = (-1)^\mu \alpha_{\lambda-\mu}$$

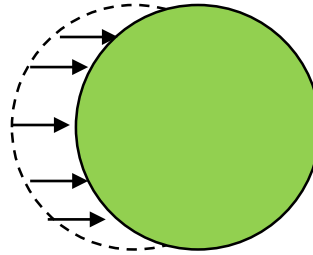
低エネルギー状態で最も重要なのは四重極変形



$\lambda = 0$

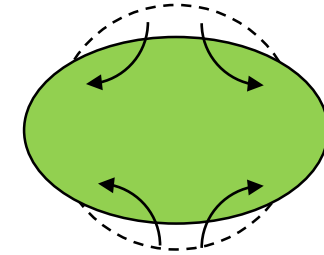
球形のまま、膨張・収縮
励起エネルギー高い

→ 密度の飽和性



$\lambda = 1$

重心の平行移動



$\lambda = 2$

楕円体型の変形

四重極変形は2つの実数パラメータで表される

$$\alpha_{2\mu} (\mu = 0, \pm 1, \pm 2)$$

5個の複素数

10個の実数

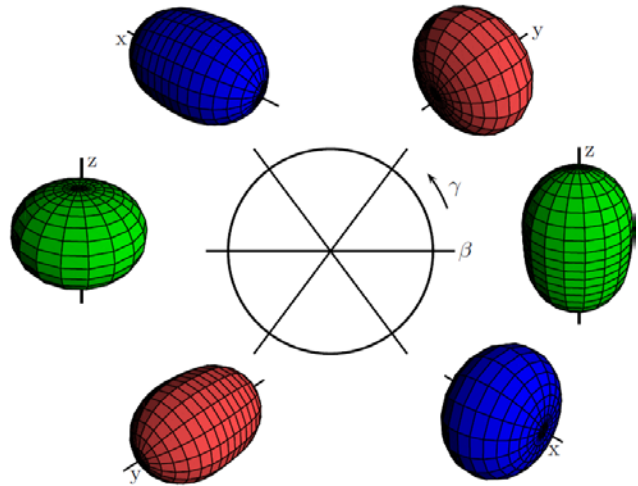
$$\xrightarrow{\hspace{2cm}} \alpha_{2\mu}^* = (-1)^\mu \alpha_{2-\mu}$$

5つの実数

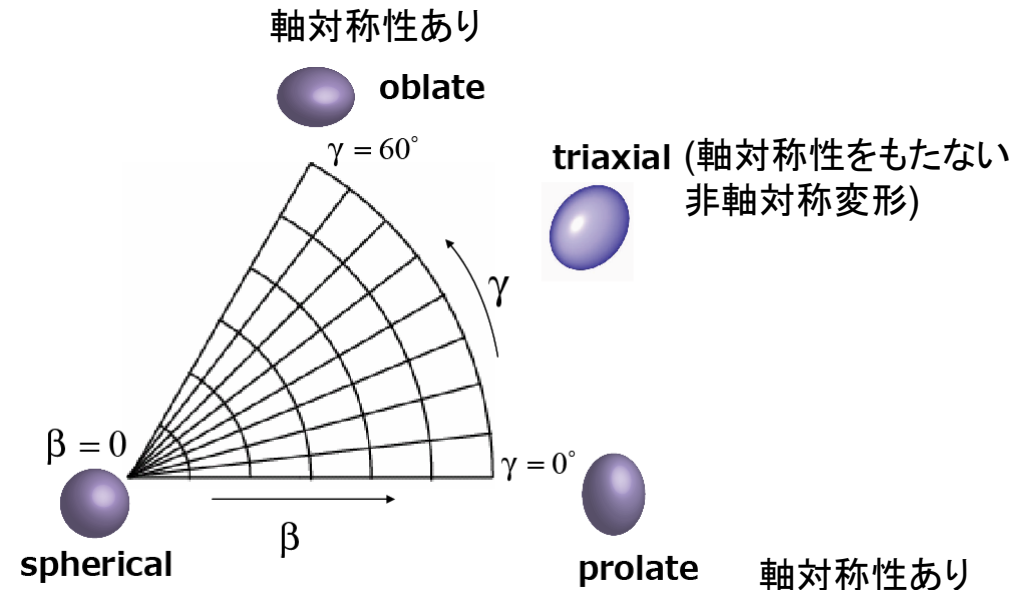
3つは回転の自由度(オイラー角)に対応、
変形の自由度は2つ

$$a_{20} := \beta \cos \gamma \quad (a_{21} = a_{2-1} = 0)$$

$$a_{22} = a_{2-2} := \frac{1}{\sqrt{2}} \beta \sin \gamma$$



Fortunato, Eur. Phys. J. A 26, s01, 1–30 (2005)



原子核の変形って、そもそも何が変形してるの？

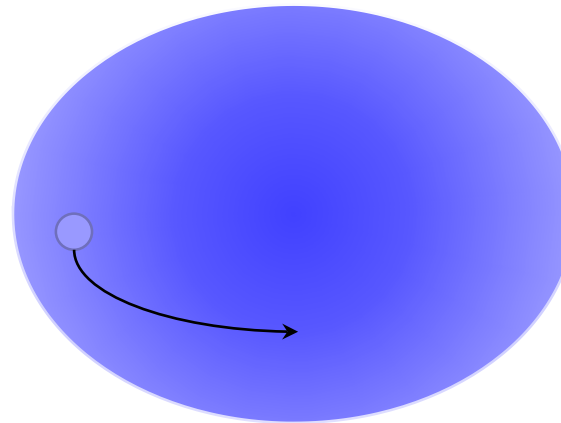
→ 核子が感じる平均場が変形している

核子同士は短距離の相互作用(核力)



原子核の形(平均場)は、
陽子数、中性子数、エネルギーなどによって変わる

核子がいくつか集まって
平均的なポテンシャルを作っている

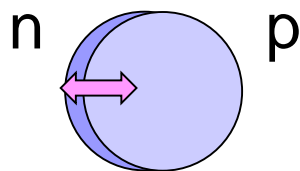


核子は平均場の中を運動している
平均場は核子によって作られている

Large-amplitude collective motion in atomic nuclei

小振幅ダイナミクス

平衡点からの揺らぎが小さい



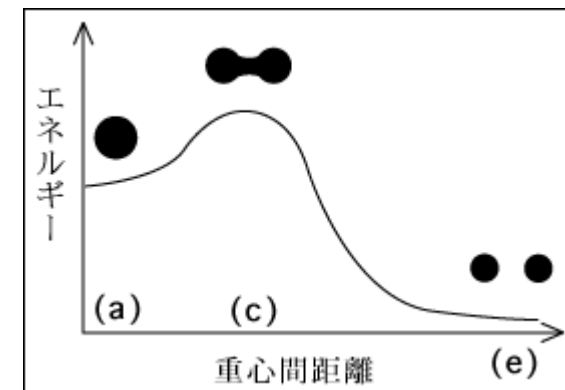
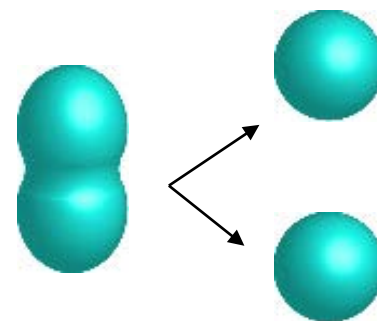
e. g. 巨大共鳴

RPA : 時間依存Hartree-Fock法の小振幅近似 ○
1粒子-1空孔の配位の重ね合わせ

RPAやRPAに超流動の効果を入れた
準粒子RPA(QRPA)がうまくいく

大振幅ダイナミクス

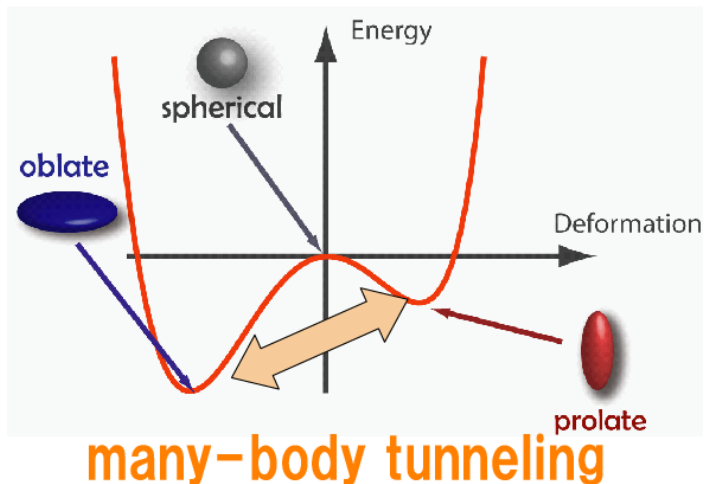
e. g. 核分裂・核融合



自発核分裂では、核分裂障壁のトンネルによって核分裂が起こる

大振幅集団モードは定常状態においても重要

e.g. 変形共存現象

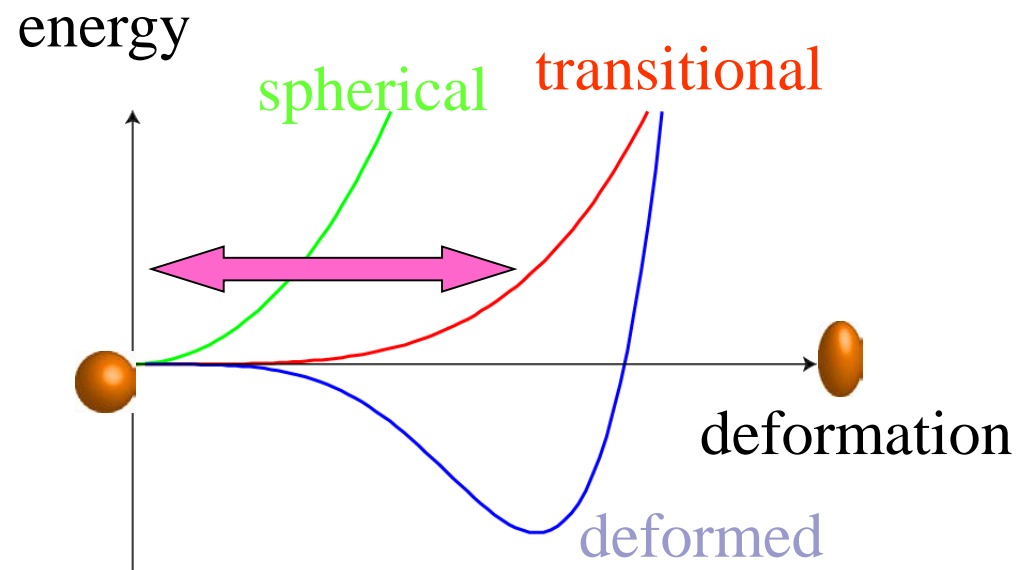


同一の原子核で異なる形を持った状態がエネルギー的に近くに存在する。

ポテンシャル障壁が低ければ、(巨視的な)トンネル効果が重要となる

e. g. 遷移領域

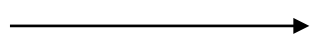
Small-amplitude approx. ×



平衡点からの揺らぎが大きく、小振幅近似が使えない

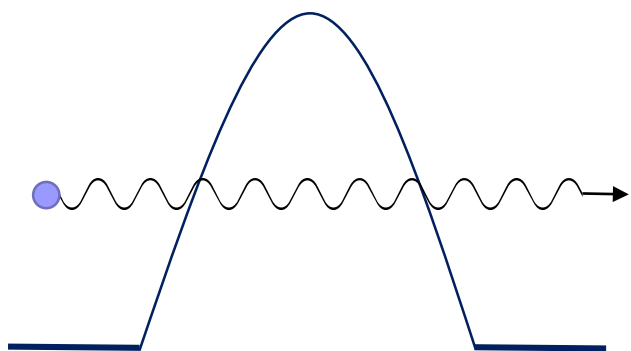
この様に巨視的トンネル効果が重要となる大振幅集団運動を記述できる微視的理論を作りたい！

原子核は量子力学が支配する多体系



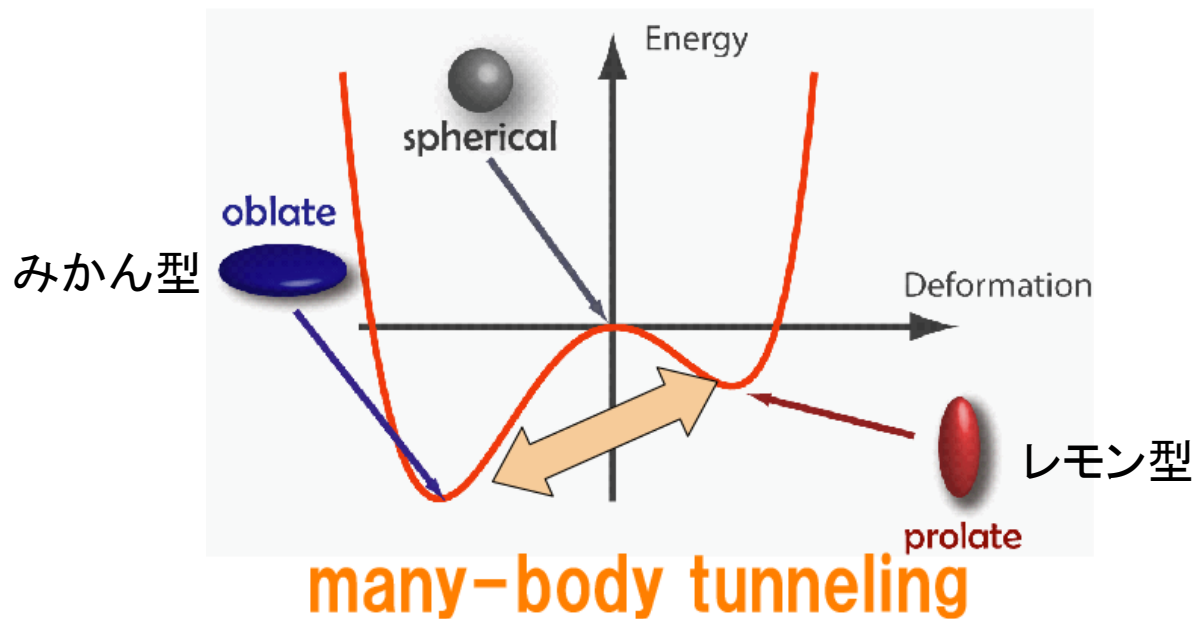
多体系の巨視的トンネル効果

教科書に出てくるトンネル効果



1粒子が外場(例えば、電場や磁場)によるポテンシャル障壁を透過する

巨視的トンネル効果



ポテンシャルは核子たち自身によって作られている。

多数の粒子が関与する多体の現象を自己無撞着に記述する必要 → 難しい問題！

時間依存HF(TDHF)の例
(超流動性なし)

クーロン障壁
を越えられる
エネルギーで
ぶつけた計算

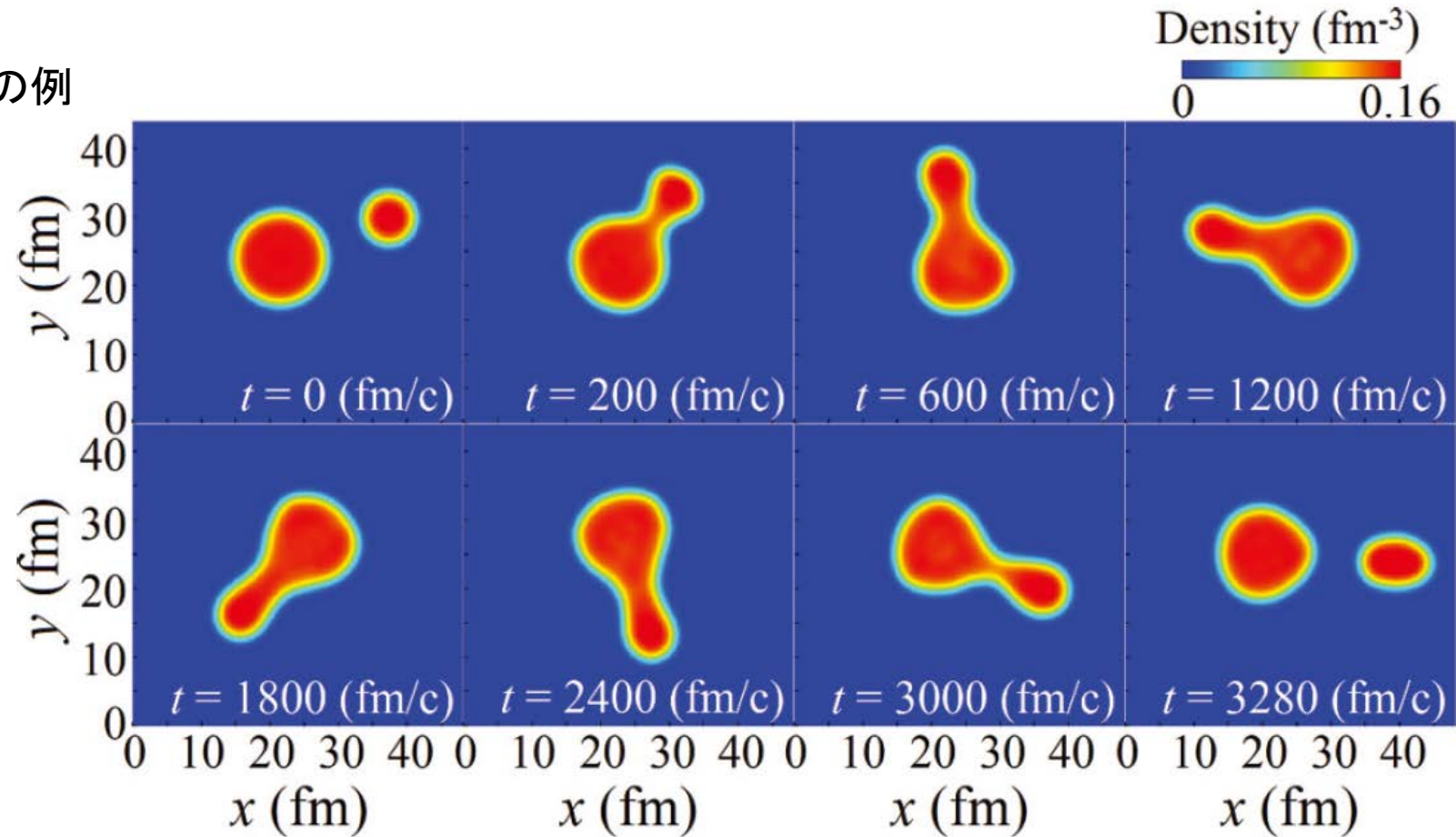
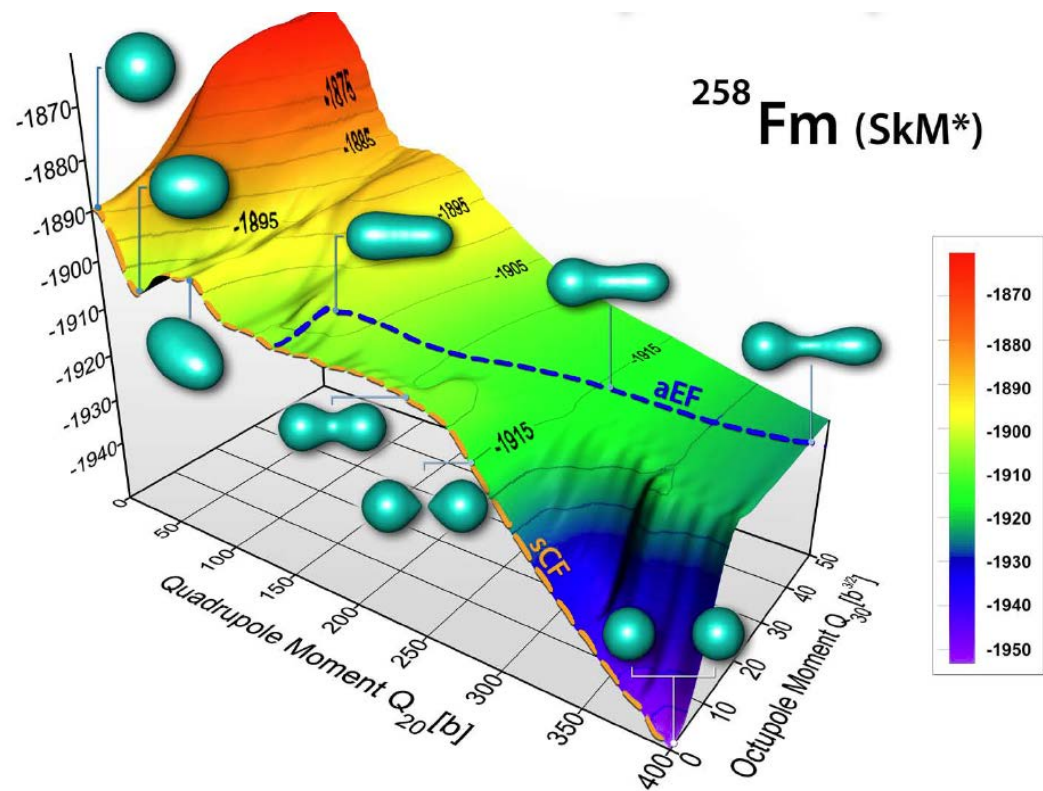


FIG. 11. (Color online) Snapshots of density distribution of the $^{40}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ reaction at $E_{\text{lab}} = 249$ MeV and $b = 4.56$ fm, just outside the fusion critical impact parameter.

問題点: 巨視的トンネル現象を記述できない

大振幅集団運動の微視的記述の課題



変形度を集団座標とした計算

- ・どうやって集団的自由度(collective path)を求めるか？
- ・集団(慣性)質量をどう求めるか？
- ・散逸の効果(fission, fusionなどの非平衡系の場合)をどう取り入れるか？
- ・どう量子化するか？

Adiabatic Self-consistent Collective Coordinate (ASCC) Method

Matsuo, Nakatsukasa, and Matsuyanagi, PTP 103(2000), 959.



SCC法の断熱近似 T. Marumori, T. Maskawa, F. Sakata and A. Kuriyama, PTP 64 (1980), 1294.

- 系そのものが選ぶ少数の集団的自由度を
大次元の位相空間から抽出できる

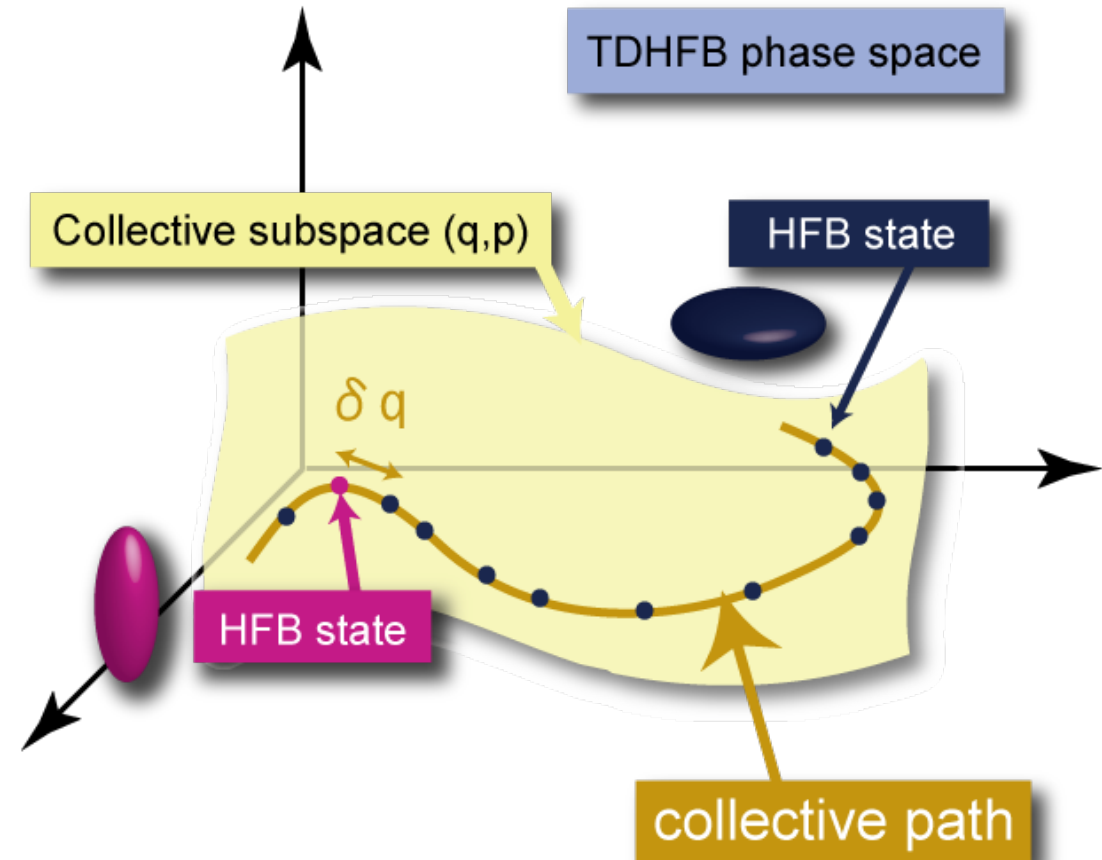
Time-dep. variational principle

$$\delta \langle \phi(\mathbf{q}, \mathbf{p}) | i \frac{\partial}{\partial t} - \hat{H} | \phi(\mathbf{q}, \mathbf{p}) \rangle = 0$$

断熱展開

(集団運動量pでの展開)

ASCC Basic Equations

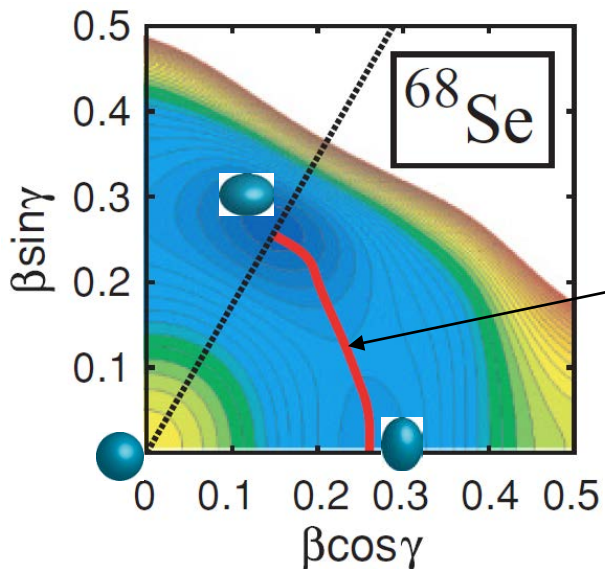


但し、実際の超流動原子核へ適用すると、**数値的不安定性のため
方程式が解けなくなるという問題**が発生(ad hocな解決)

Hinojara+, PTP(2007)

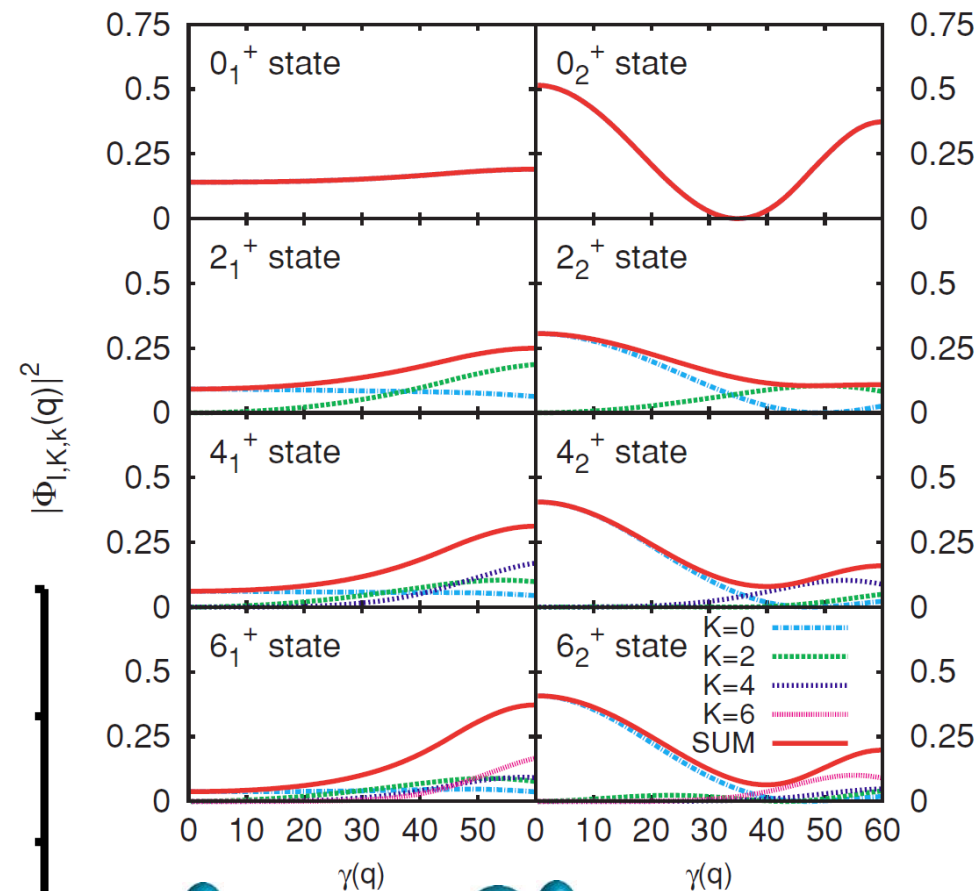
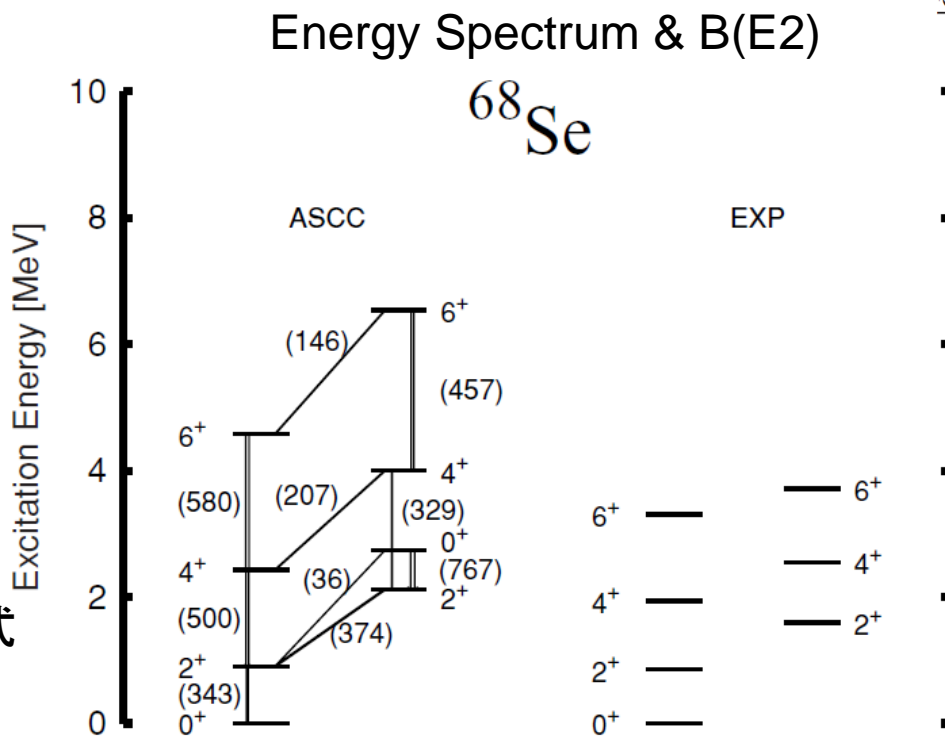
1D ASCC法の変形共存現象への適用例

Hinohara et al., PTP 119, 59 (2008); PRC 80, 014305 (2009)



集団ポテンシャルは2つの極小点をもつ

経路上でSchroedinger方程式を解く



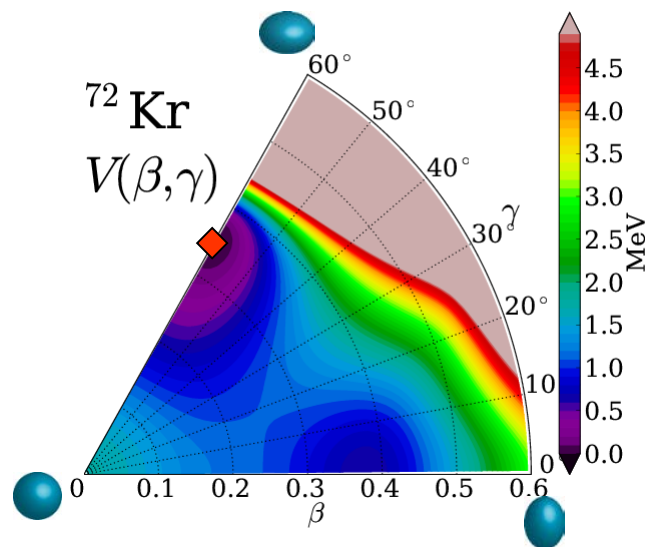
集団波動関数

1次元の自由度だけで、実験値をよく再現 (通常は2次元)

変形共存への応用

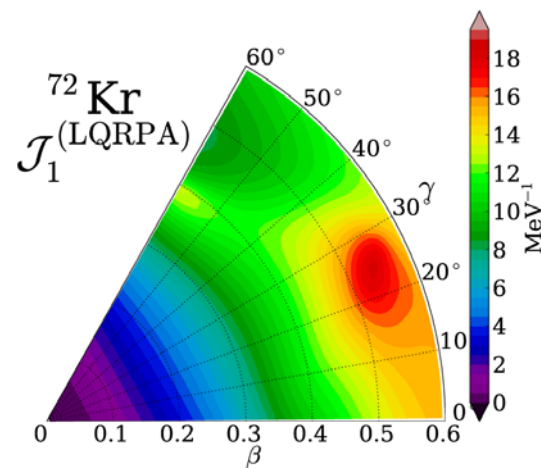
KS & Hinohara, Nucl. Phys. A **849**, 53 (2011)

Collective potential

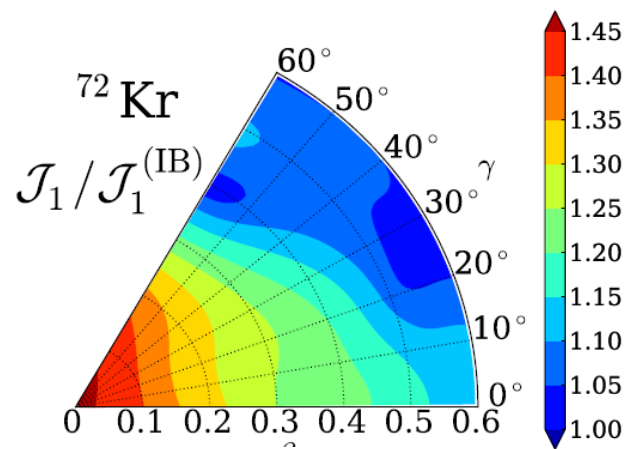
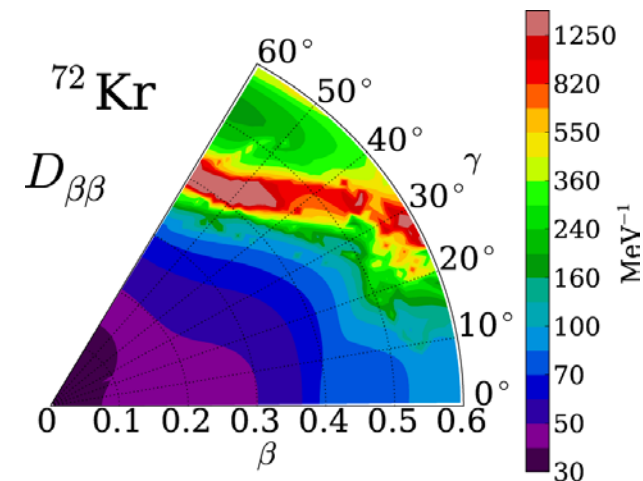


◆: absolute minimum

LQRPA moment of inertia



LQRPA vibrational mass:

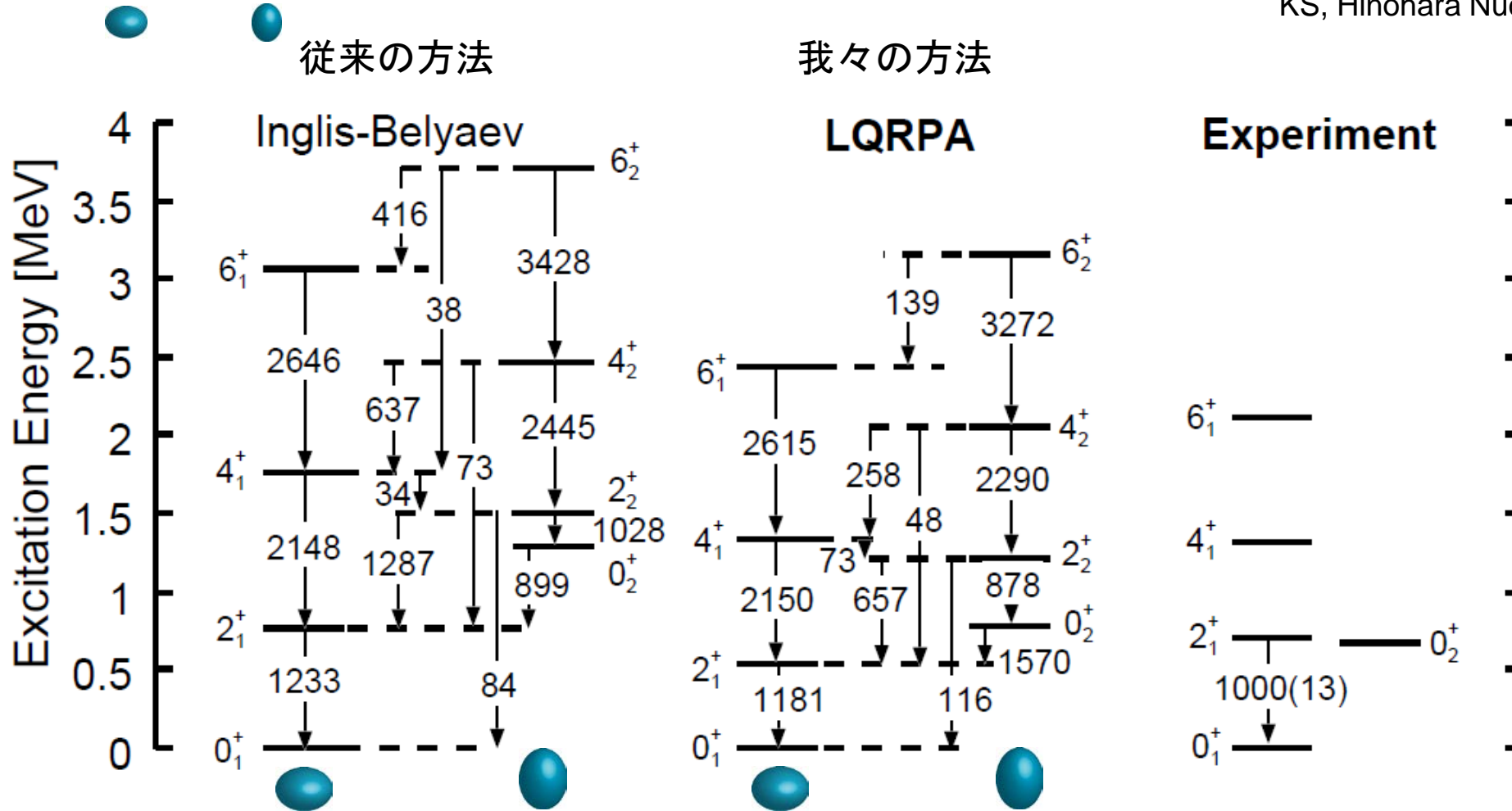


LQRPA mass/cranking mass

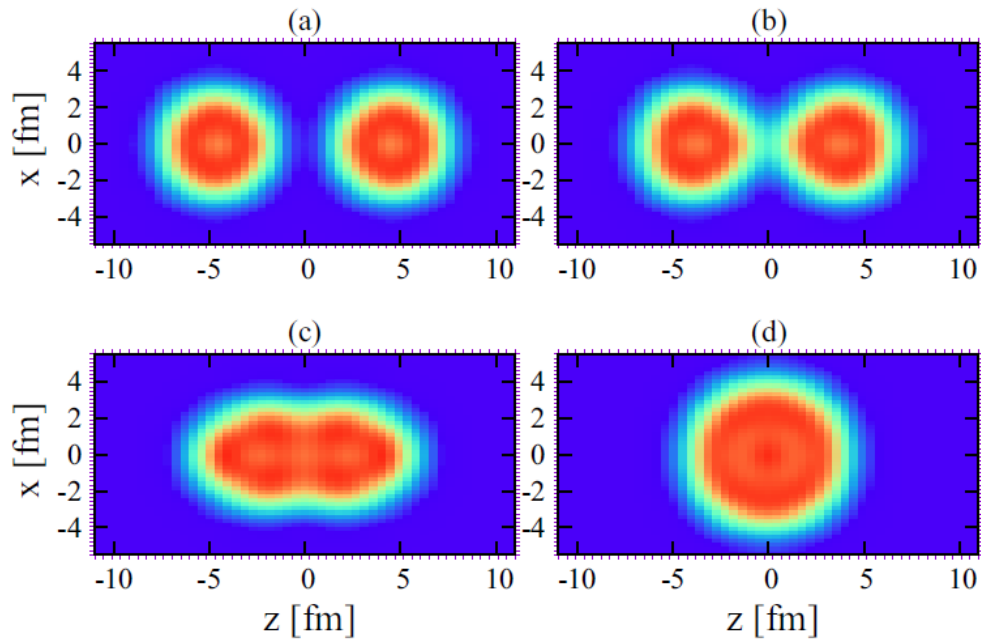
従来よく使われるcranking
質量との比

^{72}Kr のoblate-prolate変形共存現象における励起スペクトル

KS, Hinohara Nucl. Phys. A849 (2011) 53.



- 従来の方法では、励起エネルギーを高く見積もってしまう。(平均場のtime-odd(運動量依存)成分が入っておらず慣性質量を過小評価してしまう)
- 我々の方法はこの問題を克服した唯一の実用的理論

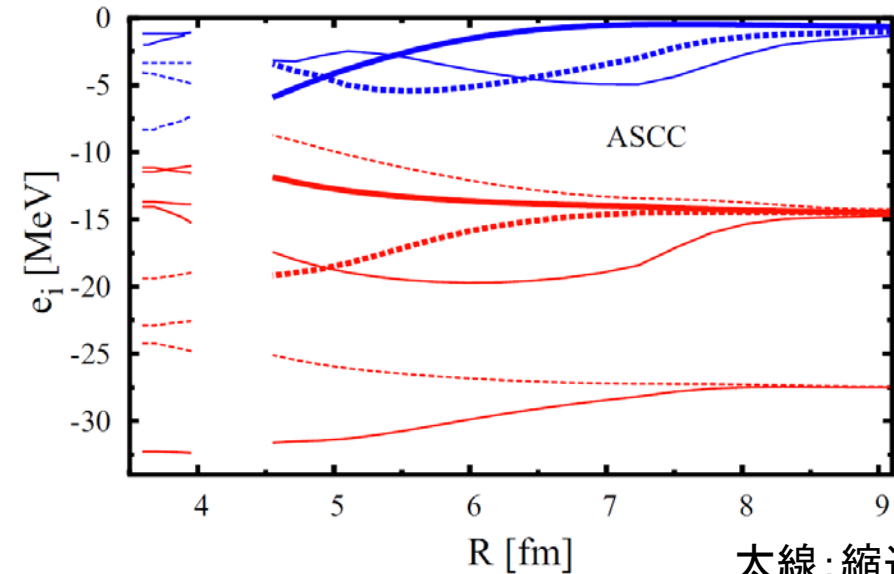
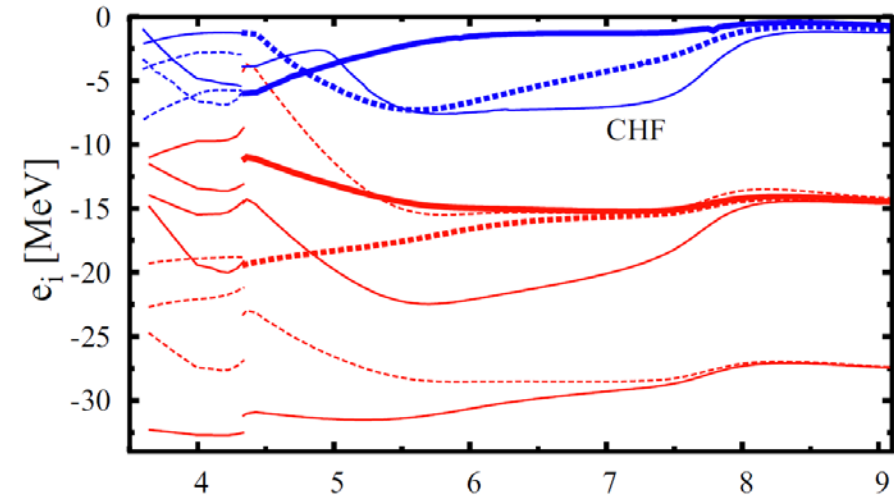


Wen & Nakatsukasa PRC 96 (2017)

Qモーメントに対する拘束付きHF(CHF)計算で得られた密度分布

^{16}O : 二重閉殻なので、超流動性は無視できる
 ^{32}S : 超流動性を無視できない

^{32}S の基底状態と超変形状態をつなぐ集団経路が得られない。(計算が破綻)



青: 非占有

赤: 占有

太線: 縮退している軌道

1970年代からの未解決問題を解決する新しい理論を提案した！

KS, Prog.Theor. Exp. Phys. 2018, 103D01

😊 超流動系と非超流動系をequal footingで扱える

😊 断熱展開(集団運動量展開)の2次の項を決定する一般的枠組み → ダイナミクスに効く

超流動のない簡単な2準位モデルでテスト → 従来の理論ではエネルギーが低い状態のみ厳密解を再現
新しい理論ではエネルギーに依らず厳密解を再現

今後の展望:

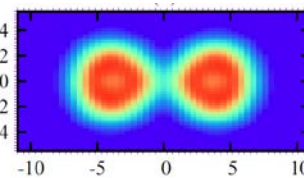
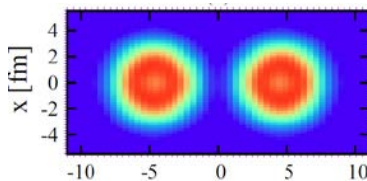
・超流動系に適用

超流動原子核の束縛状態 (e.g. 変形共存現象、変形相転移)

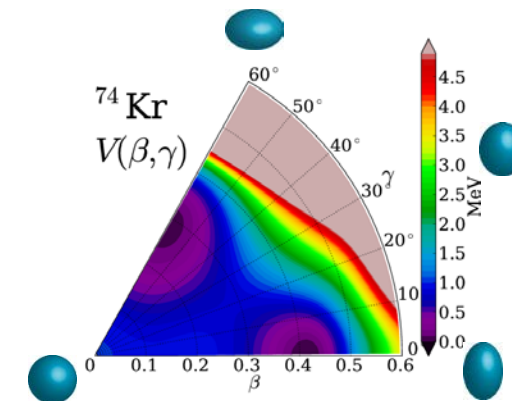


核分裂・核融合への適用

・核反応計算への適用



?



今後の展開に
乞うご期待！

・冷却原子系などへの応用の可能性

Discussion

- ・isoscalar p-n pairing : spin-triplet Cooper pairなので、高スピン(高磁場)ならfavor される可能性
- ・巨視的トンネル現象がsimulateできると面白い
- ・自発核分裂・核融合
→孤立系の熱平衡化がどう起こるか
- ・量子化の問題
2次元以上の集団座標を考えた場合、どう量子化するか