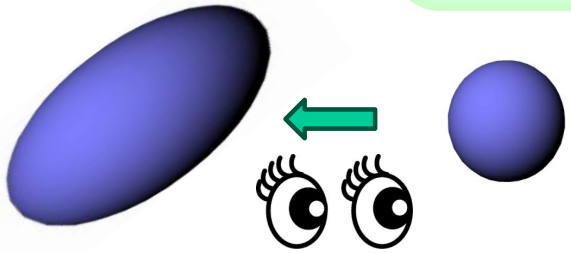
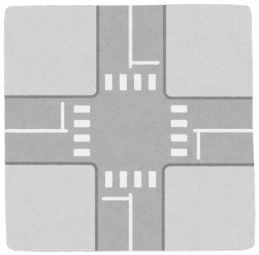
# 低エネルギー重イオン反応と相対論的重イオン衝突の交差点





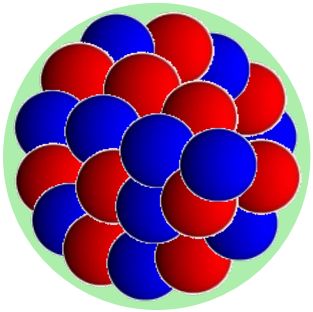
萩野浩一
京都大学理学研究科

1. はじめに：原子核のかたち
2. 低エネルギー原子核反応概観
3. 低エネルギー重イオン核融合反応における核変形の効果
4. 相対論的重イオン反応で核変形を視る
5. グラウバー理論による中間エネルギー領域での変形核の反応
6. まとめ

第3回「J-PARCと重イオン衝突実験の交差点」、J-PARC、2026.10.6-7

# はじめに：原子核のかたち

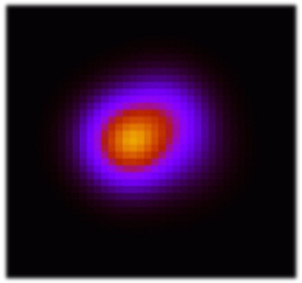
原子核の古典的なイメージ：



丸いボール

実際、原子核を古典的な液滴だと思うと
丸い形が一番エネルギー的に安定
←原子核物理学が始まった当初の考え

実際には：原子核は「量子液体」



$^{6}$He ($E^{*}$=10 MeV)

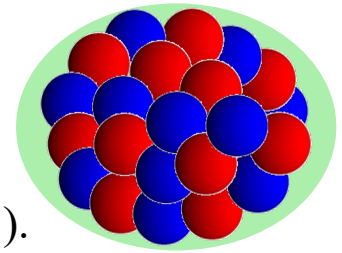
time-dependent AMD
R. Imai et al., PRC99, 064327 (2019)

- ✓ 核子は原子核の中でじっとしているわけではない （比較的自由に動きまわっている）
- ✓ ただし、完全に自由というわけではない
  （お互いに飛び出すことのないように引っ張りあいながら一定の形を保っている）

自己束縛系→比較的容易に形を変えることができる（変形核）

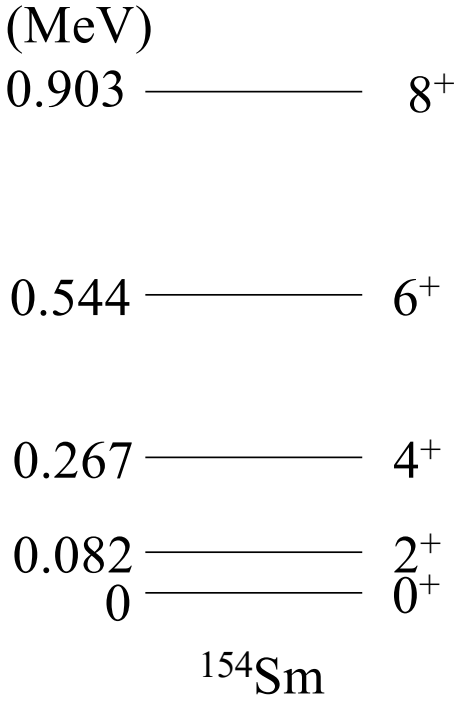
中心に原子核があって電子の位置が「固定されている」
がある原子とは大きく異なる

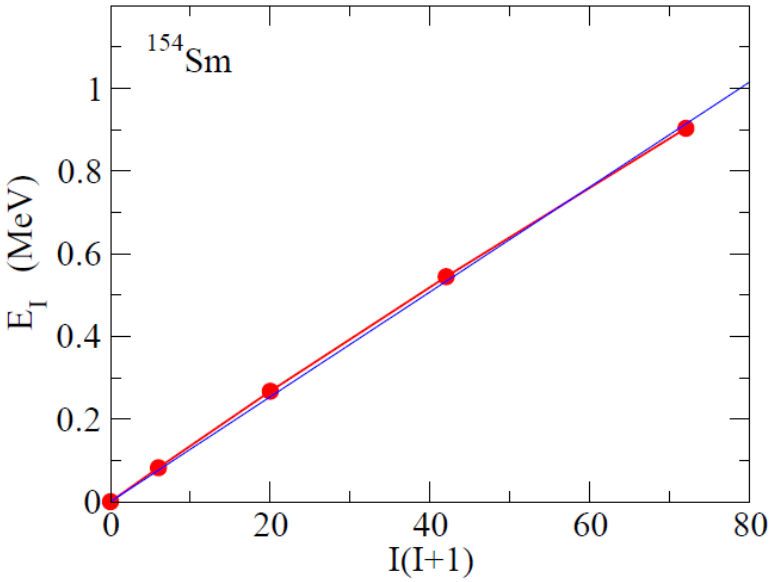
T. Naito et al., J. of Phys. B54, 165201 (2021).



# はじめに：原子核のかたち

$^{154}_{62}Sm_{92}$ の励起スペクトル




回転スペクトル

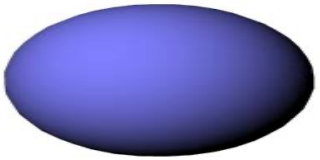
$$E_I \sim \frac{I(I+1)\hbar^2}{2\mathcal{J}}$$

cf. 剛体の回転エネルギー（古典力学）：

$$E = \frac{1}{2}\mathcal{J}\omega^2 = \frac{I^2}{2\mathcal{J}}$$

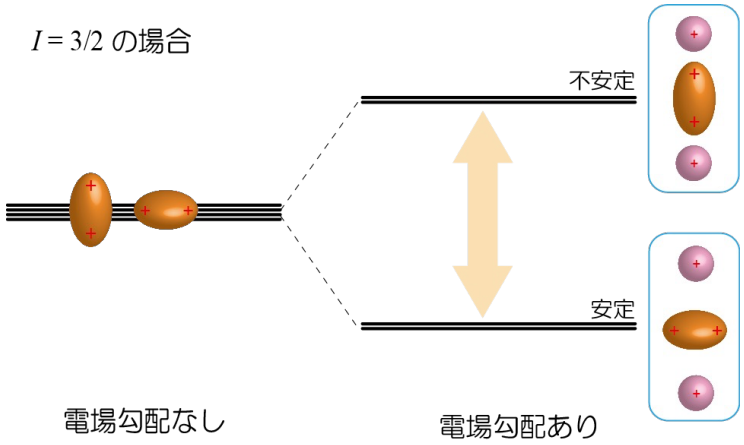
$$(I = \mathcal{J}\omega,\ \omega = \dot{\theta})$$

→$^{154}$Sm 原子核は変形している



# 原子核の変形をどのように測るのか?

## i) 原子核の四重極モーメントを測定する

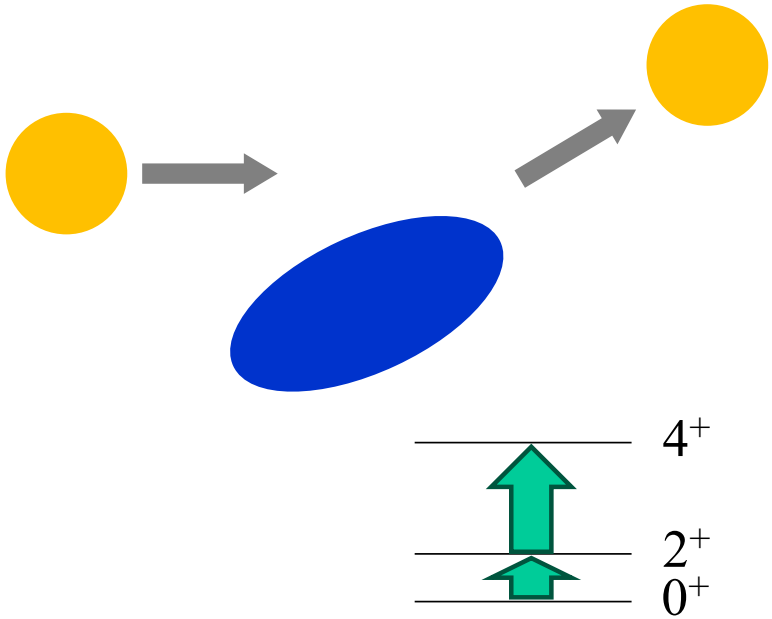



https://sm1018.skr.u-ryukyu.ac.jp/db50031_yogi/research/nqr

電場勾配をかけてエネルギーの分離を見る
(Nuclear Quadrupole Resonance: NQR)

*偶々核の基底状態には使えない ($I = 0$)

## ii) 原子核反応で励起の確率を測定する
## →それを変形の度合いと関係づける



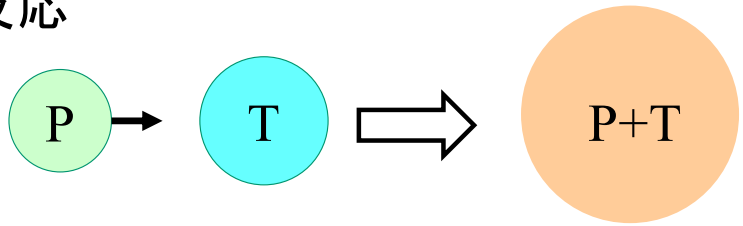

$^{154}$Sm

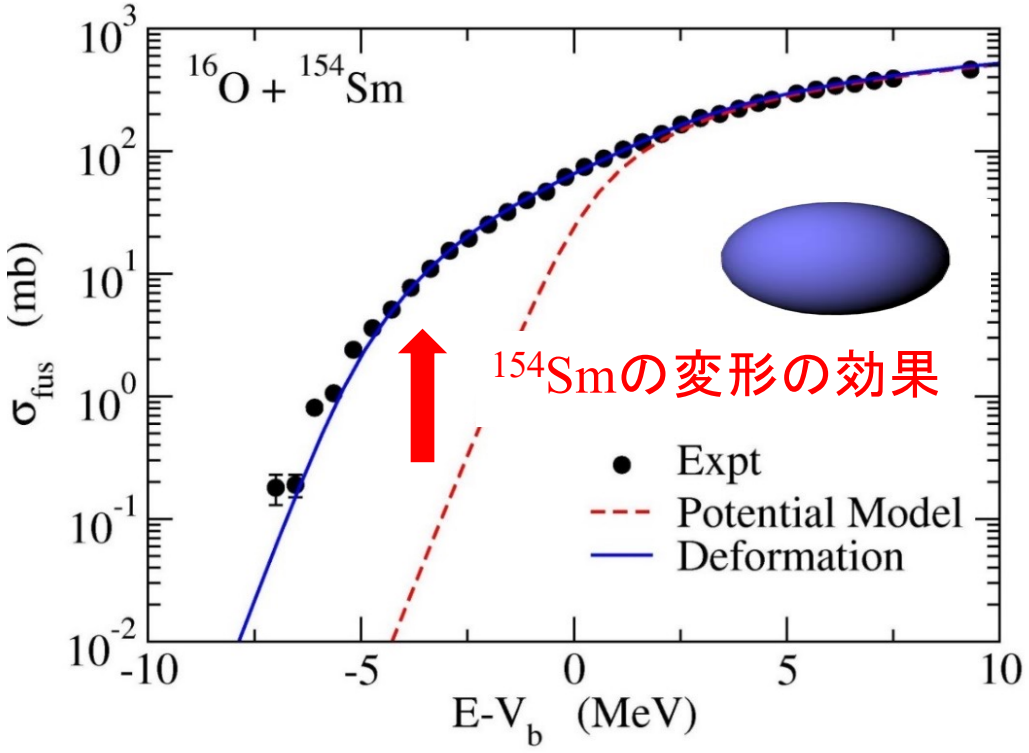
✓ 非弾性散乱
✓ 多重クーロン励起

# 核融合反応と原子核の変形

このトークでは原子核反応の中でも
重イオン核融合反応に特に注目する

核融合反応



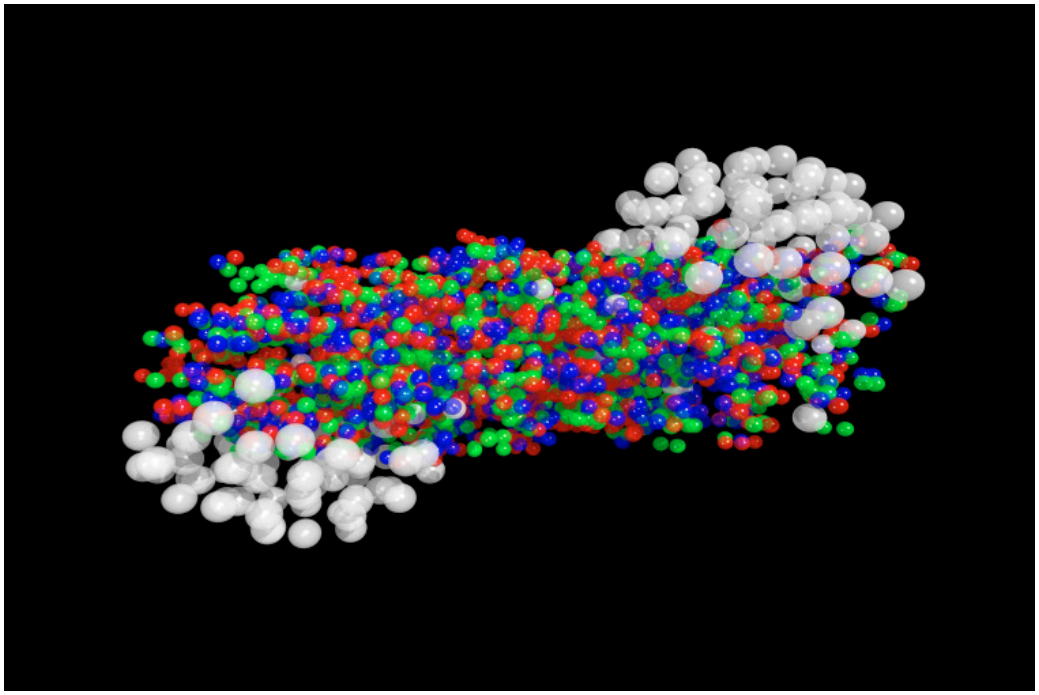




K. Hagino and N. Takigawa,
Prog. Theo. Phys.128 (‘12)1061.

## 相対論的重イオン衝突で視る原子核の形

その一方で、この数年、相対論的重イオン衝突で原子核の形を視るアプローチが大きな注目を浴び、多くの論文が出版されている。

相対論的重イオン衝突



http://www-alice.gsi.de/fsp201/qgp.html

cf. 野中さんのトーク

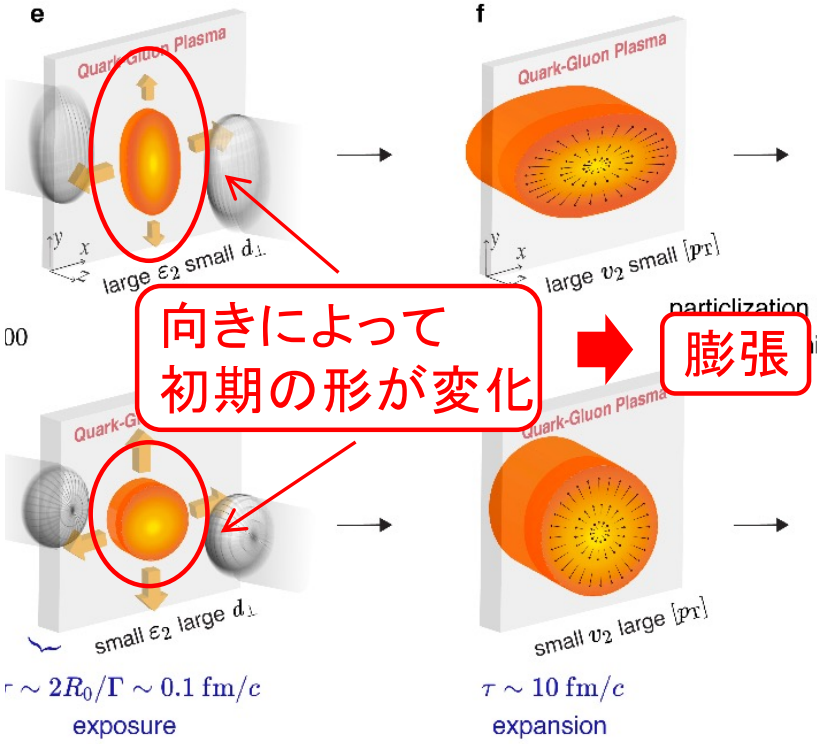
# 相対論的重イオン衝突で視る原子核の形

cf. 野中さんのトーク

**the initial shape of QGP**

**expansion**

**detection**

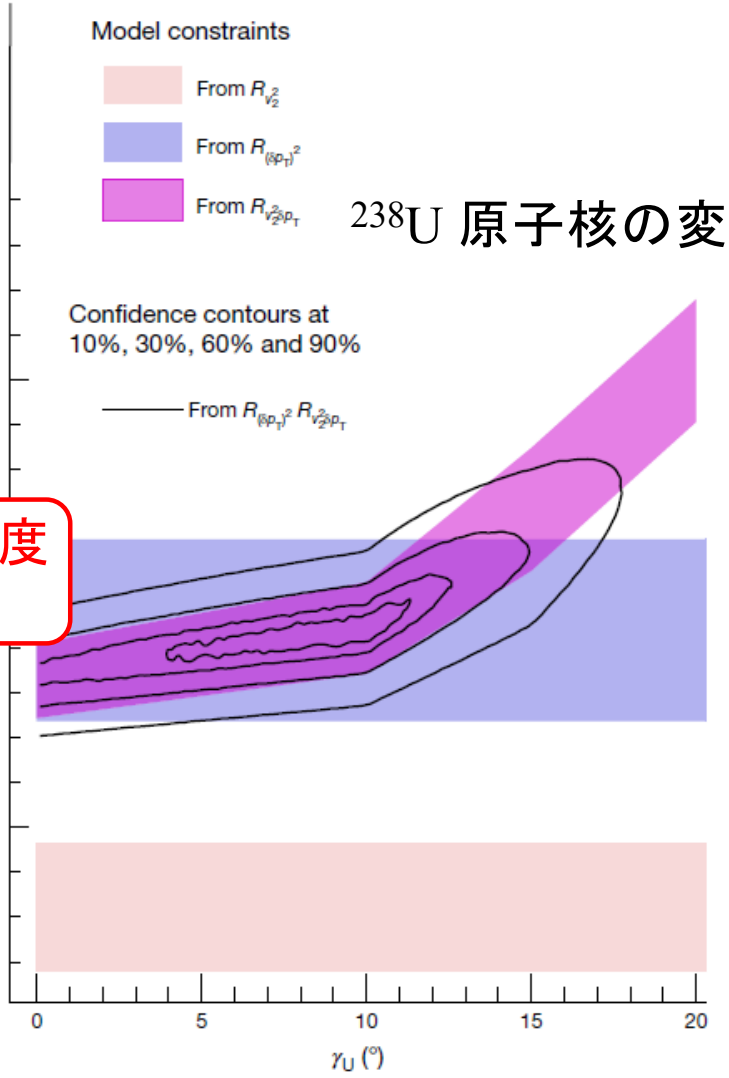



向きによって初期の形が変化

膨張

粒子数分布（角度分布）に違い

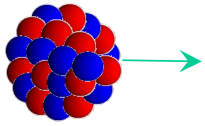
$$\frac{1}{N}\frac{dN}{d\phi}$$




$^{238}$U 原子核の変形

STAR collaboration, Nature 635, 67 (2024)

# 低エネルギーと高エネルギーの交差点

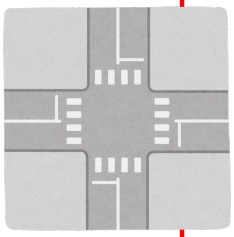


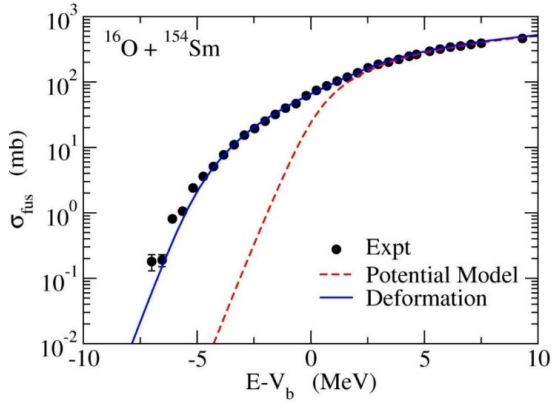
速い核反応で遅い自由度のスナップショットを撮る　$\tau_r \ll \tau_s$





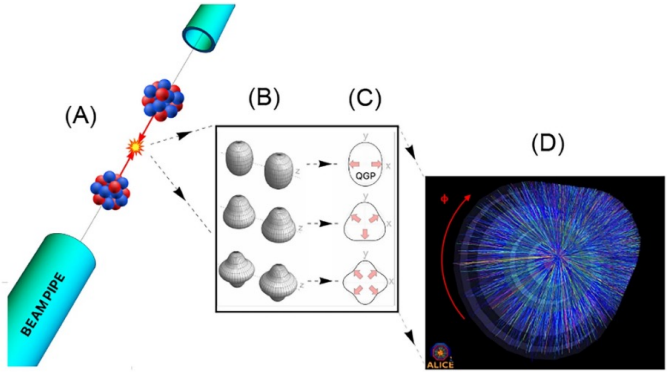
https://www.sony.jp/ichigan/products/ILCE-7M3/feature_3.html







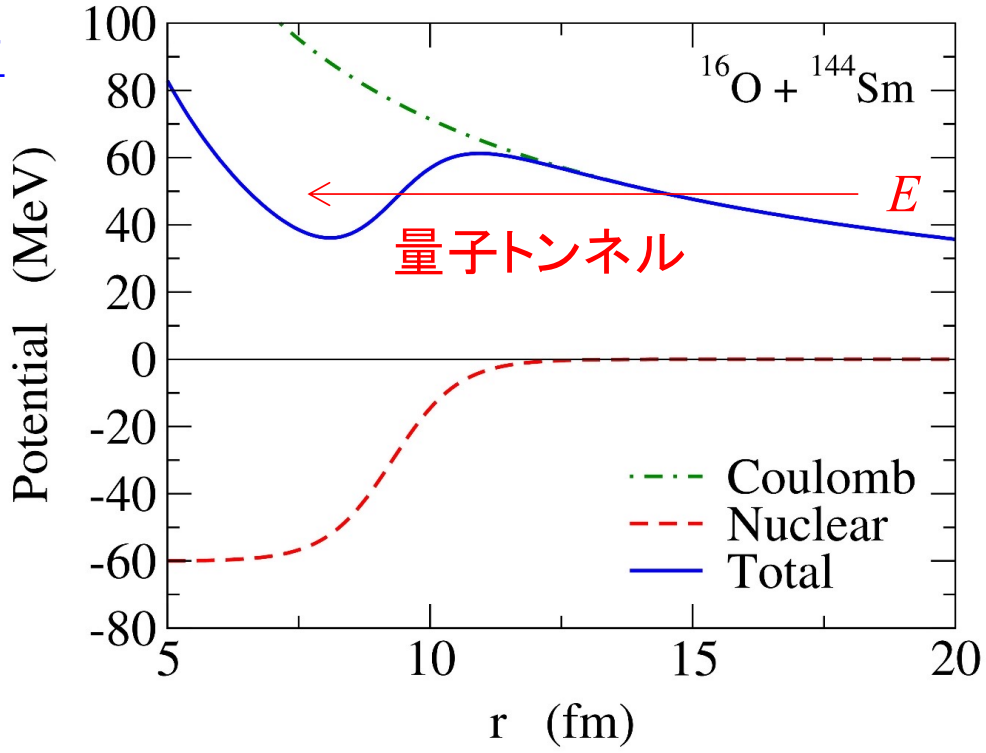


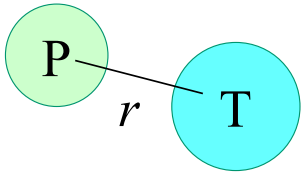



そのような意味で低エネルギー重イオン核融合反応と相対論的重イオン衝突は類似　⇒　ここではそういう観点から議論を進めたい

# 低エネルギー重イオン核融合反応

クーロン障壁




2つの力:

1. クーロン力:長距離斥力
2. 核力:短距離引力

ポテンシャル障壁
（クーロン障壁）

障壁を超えることによって
核融合反応が起こる

クーロン障壁の高さ→系のエネルギー・スケールを定める

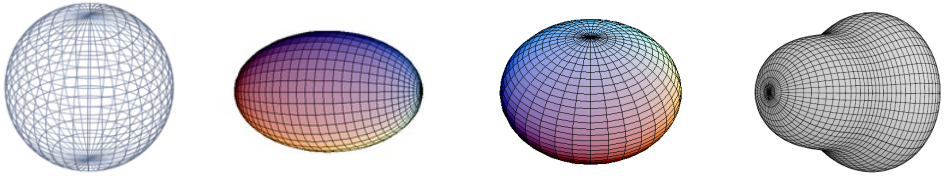
クーロン障壁近傍のエネルギーにおける核融合反応→多粒子系のトンネル現象

## 核融合反応と量子トンネル効果

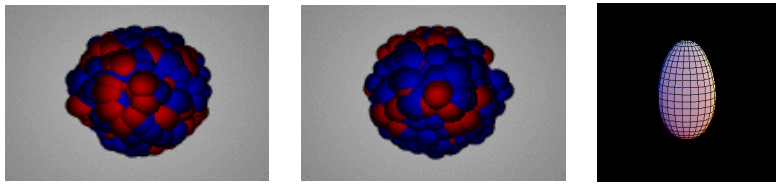
### トンネル効果による核融合反応

多自由度

- 原子核の様々な形状



- 様々な表面振動

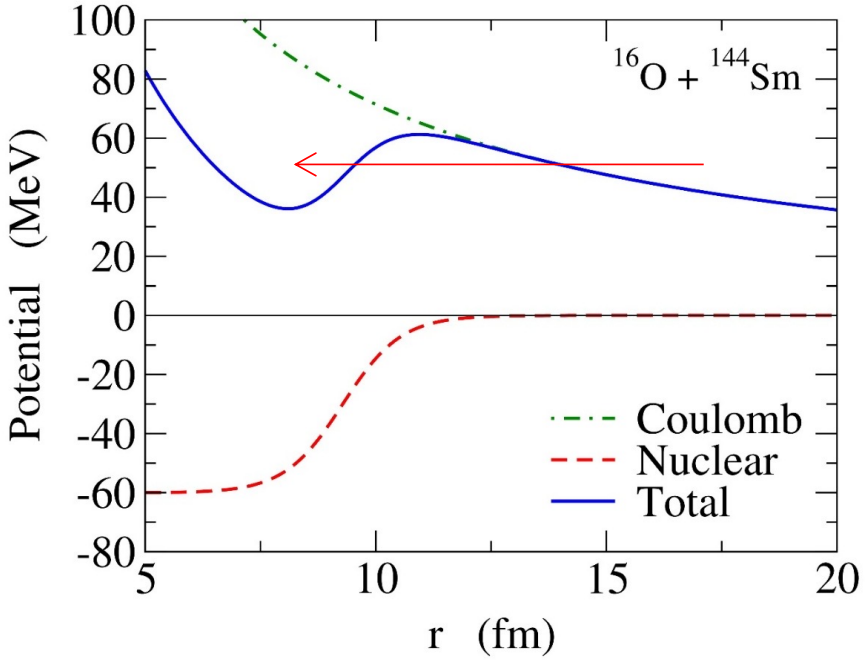


様々なモード、様々な励起エネルギー

- 様々なタイプの核子移行反応

トンネル確率：エネルギーに対して指数関数的に変わる
→ 核構造の効果が増幅される

障壁以下のエネルギーにおける
重イオン核融合反応

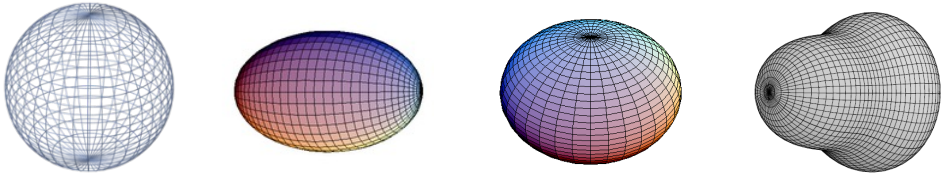


## 核融合反応と量子トンネル効果

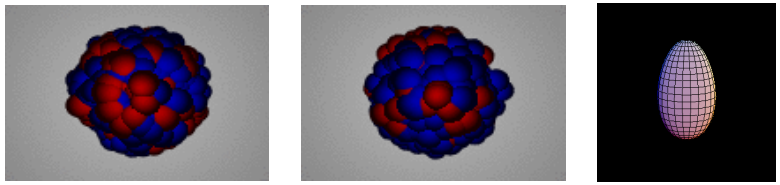
### トンネル効果による核融合反応

多自由度

- 原子核の様々な形状

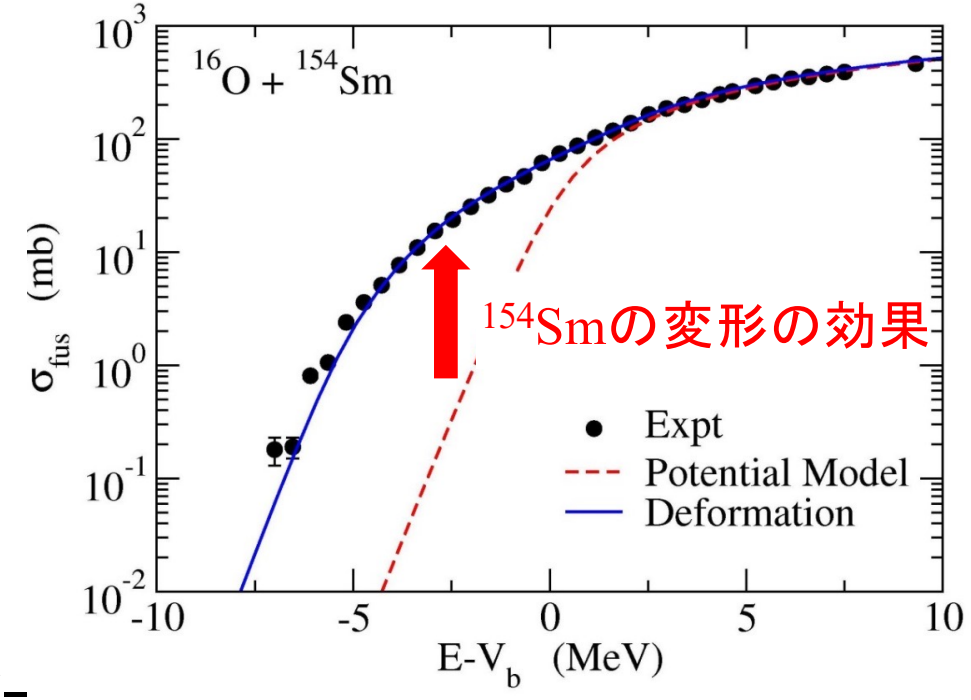


- 様々な表面振動



様々なモード、様々な励起エネルギー

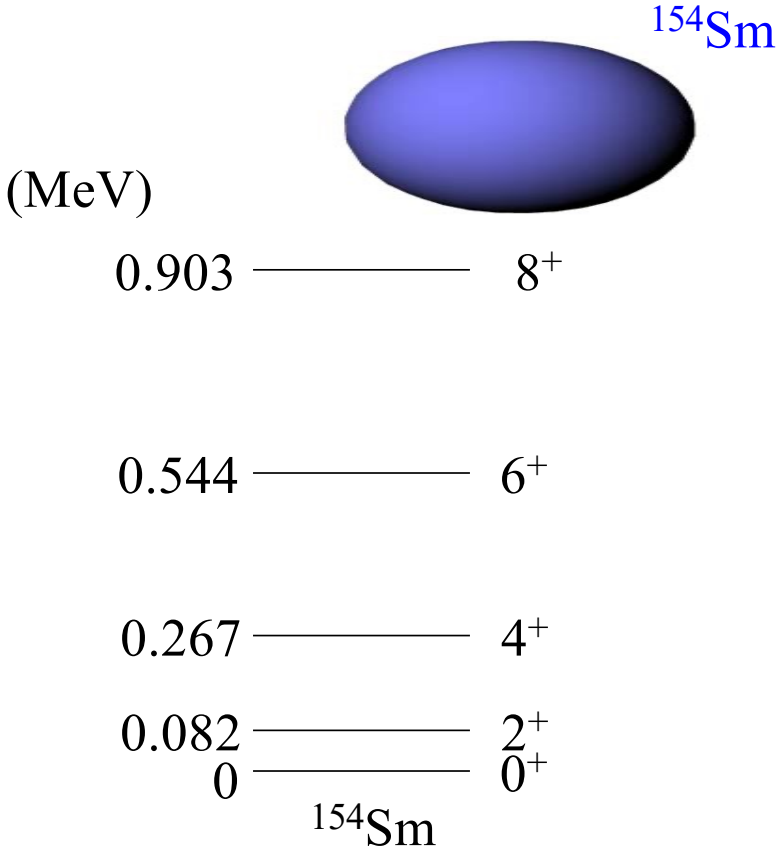
- 様々なタイプの核子移行反応




トンネル確率：エネルギーに対して指数関数的に変わる
→ 核構造の効果が増幅される

# 核融合反応と原子核の変形

何が起こっているのか？




回転スペクトル

小さい回転エネルギー

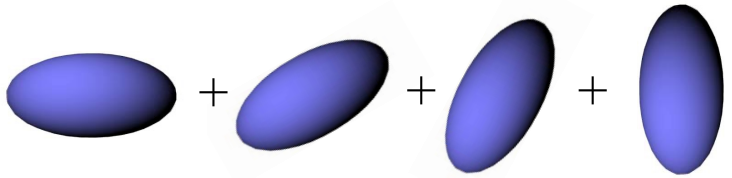
$$E_I = \frac{I(I+1)\hbar^2}{2\mathcal{J}}$$

→ 大きい慣性能率 $J$

→ 回転：ゆっくりとした自由度

$$E_{\rm rot} \sim E_{2^+} = 82\ {\rm keV}$$

$$E_{\rm tunnel} \sim \hbar\Omega_{\rm barrier} \sim 3.5\ {\rm MeV}$$

$\Psi_{0^+} =$ 

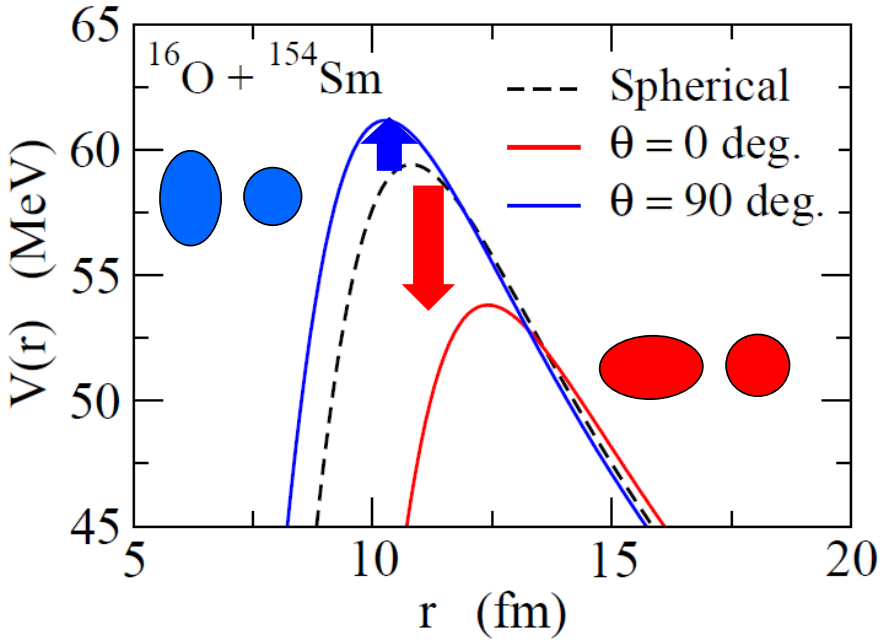
→ 実験室では球対称

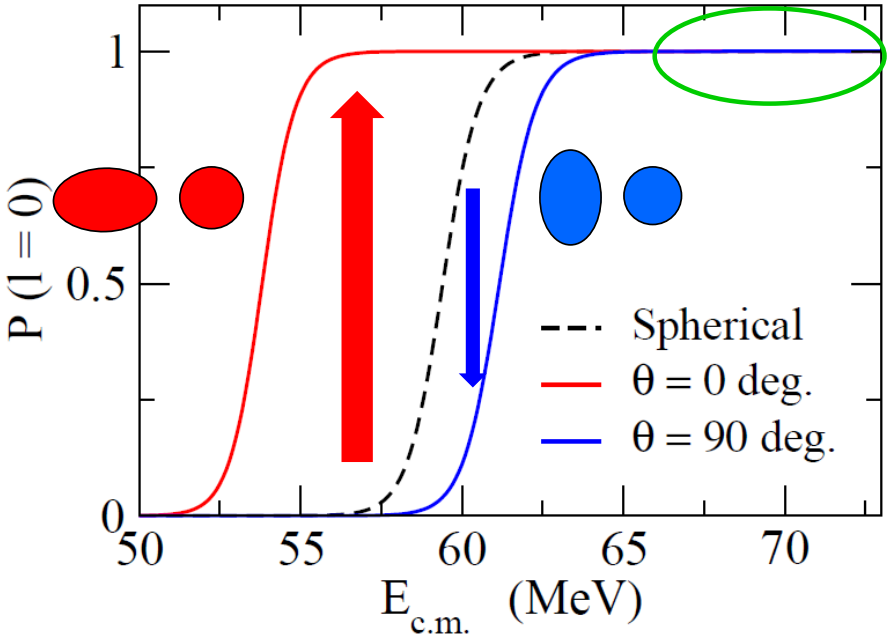
角度を固定して核融合反応断面積を計算
→その後で角度平均をとる

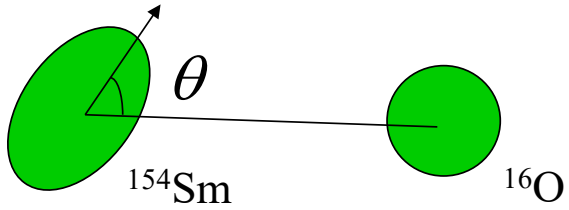
「回転のスナップショットをとる」

# 核融合反応と原子核の変形

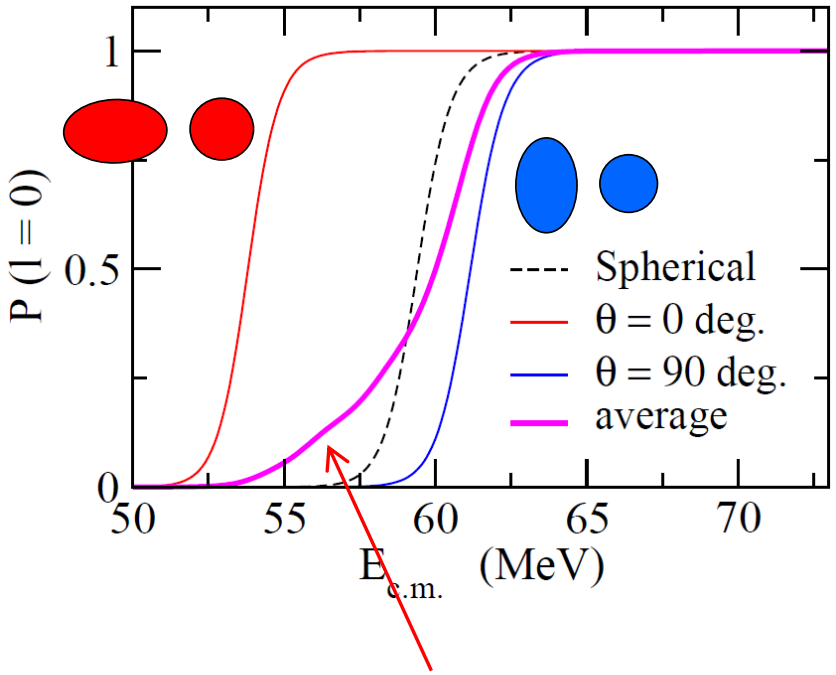
2つの原子核の間にはポテンシャル障壁 → 低エネルギー核融合反応：量子トンネル効果



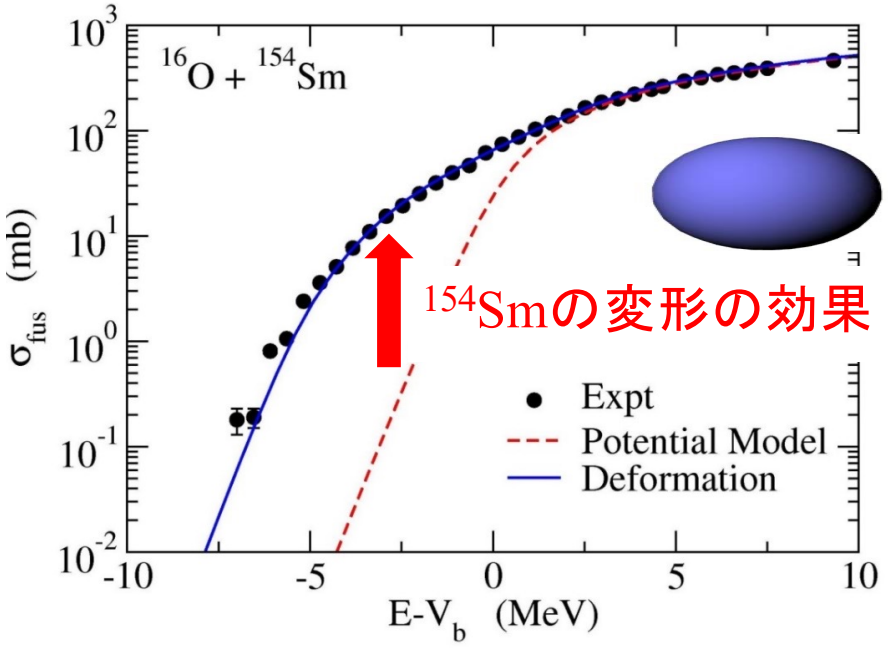



# 核融合反応と原子核の変形




角度平均後

$$\sigma_{\rm fus}(E) = \int_0^1 d(\cos\theta)\sigma_{\rm fus}(E;\theta)$$



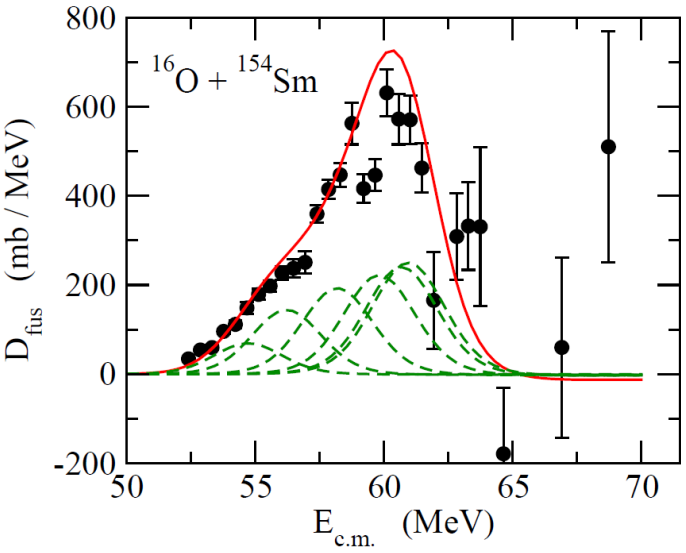

K. Hagino and N. Takigawa,
Prog. Theo. Phys.128 (‘12)1061.

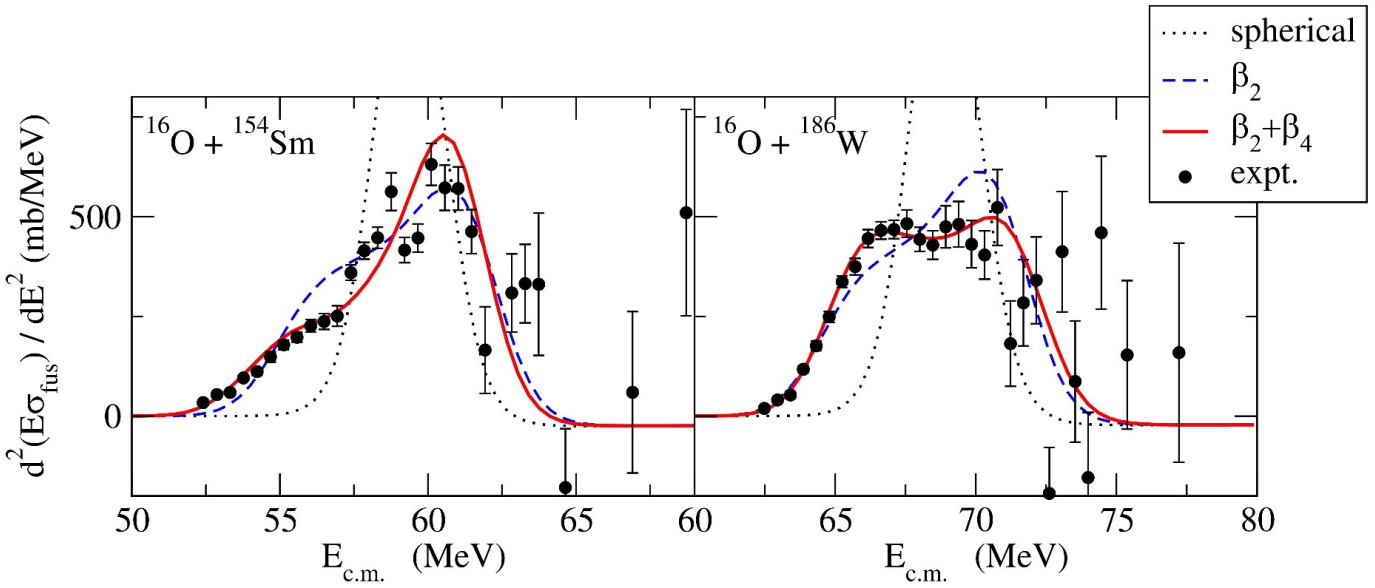
核構造と核反応の強いインタープレイ

# 障壁分布

$$D_{\mathrm{fus}}(E) = \frac{d^2(E\sigma_{\mathrm{fus}})}{dE^2}$$

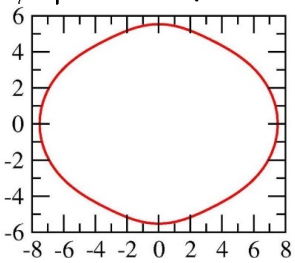
N. Rowley, G.R. Satchler, and P.H. Stelson, PLB254 (‘91) 25



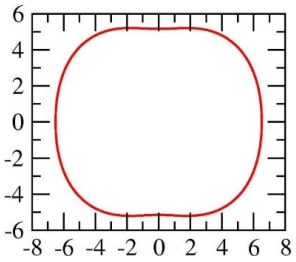



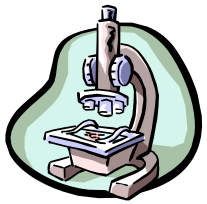

$$R(\theta) = R_0(1 + \beta_2 Y_{20}(\theta) + \beta_4 Y_{40}(\theta) + \cdots)$$

$\beta_2 = 0.33$ $\quad$ $\beta_4 = +0.05$



$\beta_2 = 0.29$ $\quad$ $\beta_4 = -0.03$

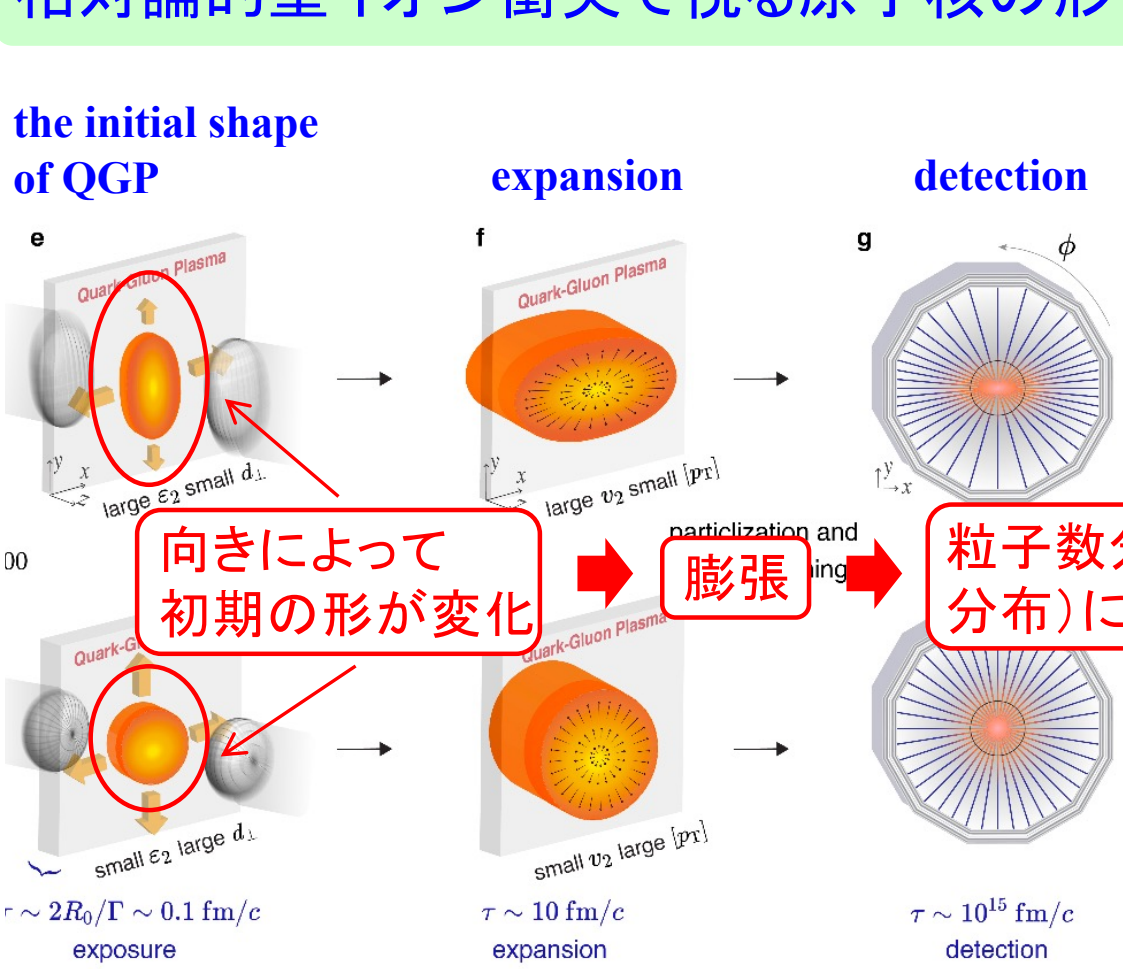


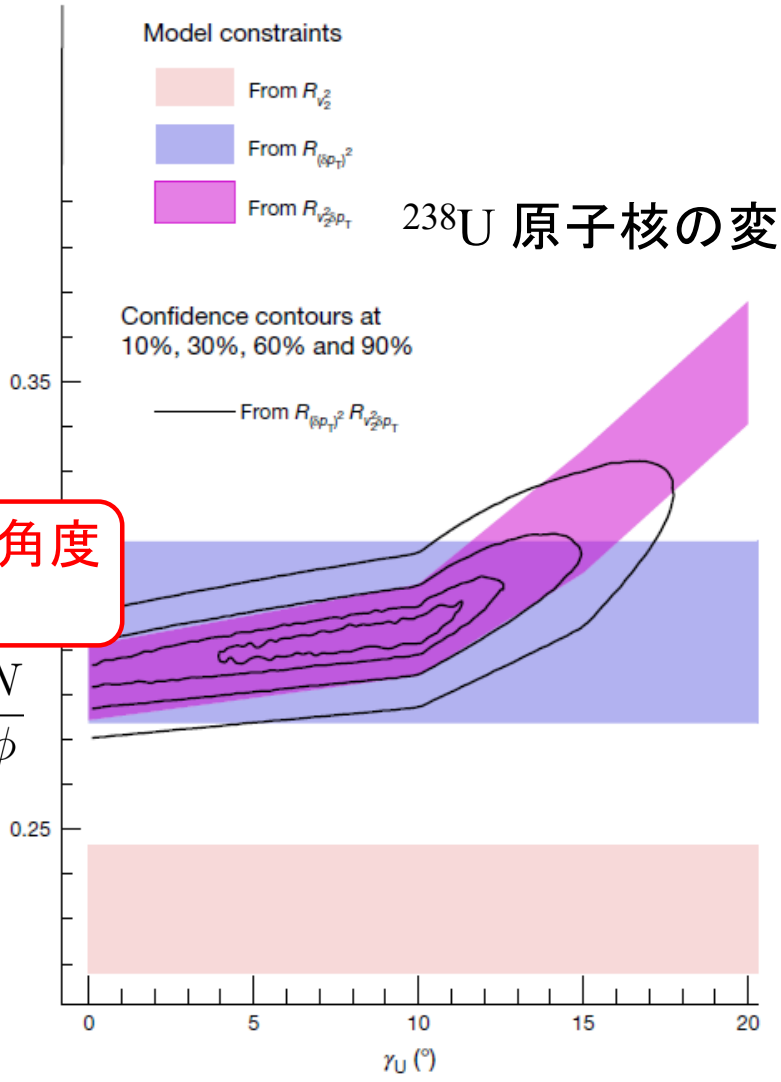


$\beta_4$の符号に敏感!

→ 核融合反応を使って原子核の形を視る

# 相対論的重イオン衝突で視る原子核の形

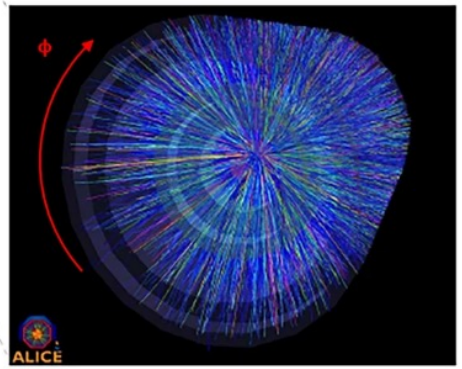



$^{238}$U 原子核の変形

STAR collaboration, Nature 635, 67 (2024)

# 相対論的重イオン衝突で視る原子核の形




フロー:
測定される粒子数分布

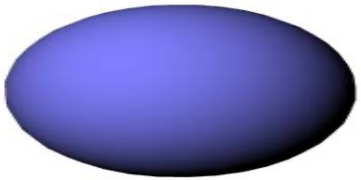
$$\frac{1}{N}\frac{dN}{d\phi} = \frac{1}{2\pi}\left[1 + 2\sum_n v_n \cos(n\phi)\right]$$

- ✓ ４重極変形（$\beta_2$） • STAR collaboration, Nature 635, 67 (2024)
- ✓ ８重極変形（$\beta_3$） • C. Zhang and J. Jia, PRL128, 022301 (2022)
- ✓ １６重極変形（$\beta_4$） • W. Ryssens et al., PRL130, 212302 (2023)
  • H.-j.Xu et al., PRL132, 262302 (2024)
- ✓ 中性子スキン • G. Giacalone et al., PRL131, 202302 (2023)
- ✓ 3軸非対称 ($\gamma$) 変形 • G. Aad et al., PRC107, 054910 (2023)
  • STAR collaboration, Nature 635, 67 (2024)
- ✓ $\alpha$ クラスター • Y. Wang et al., PRC109, L051904 (2024)
  • L.-M. Liu et al., PRC111, L021901 (2025)

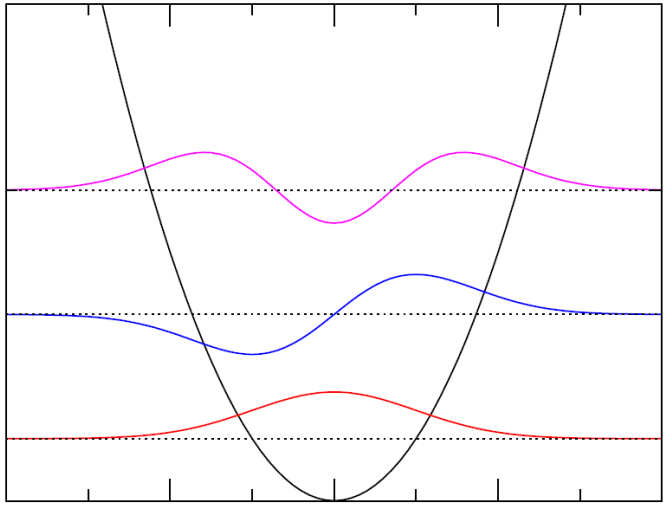
北沢正清、萩野浩一　原子核研究2026年9月号の記事

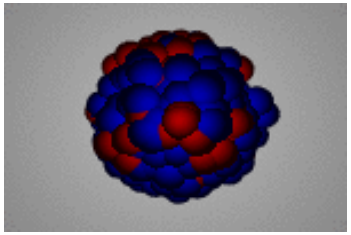
# 相対論的重イオン衝突で視る原子核の形

これまで、変形核の静的な変形のみが
注目されていた



→ 球形核の動的な変形（表面振動）も存在する





$\langle \beta \rangle = 0$

だとしても β=0 の周り
でゆらぐ（ゼロ点振動）

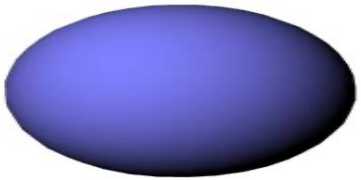
cf. 1次元調和振動子

$$\phi(x) = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} e^{-\alpha x^2/2}$$

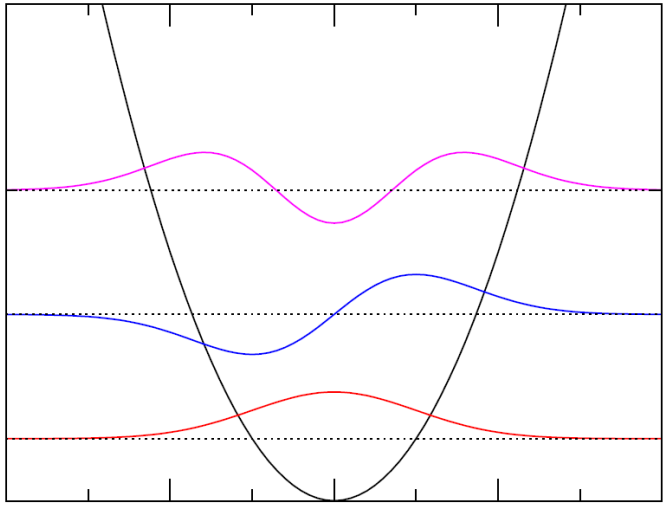
$$\rightarrow \langle x \rangle = 0, \quad \langle x^2 \rangle = 1/2\alpha$$

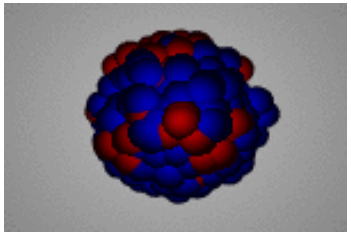
# 相対論的重イオン衝突で視る原子核の形

これまで、変形核の静的な変形のみが
注目されていた



→ 球形核の動的な変形（表面振動）も存在する





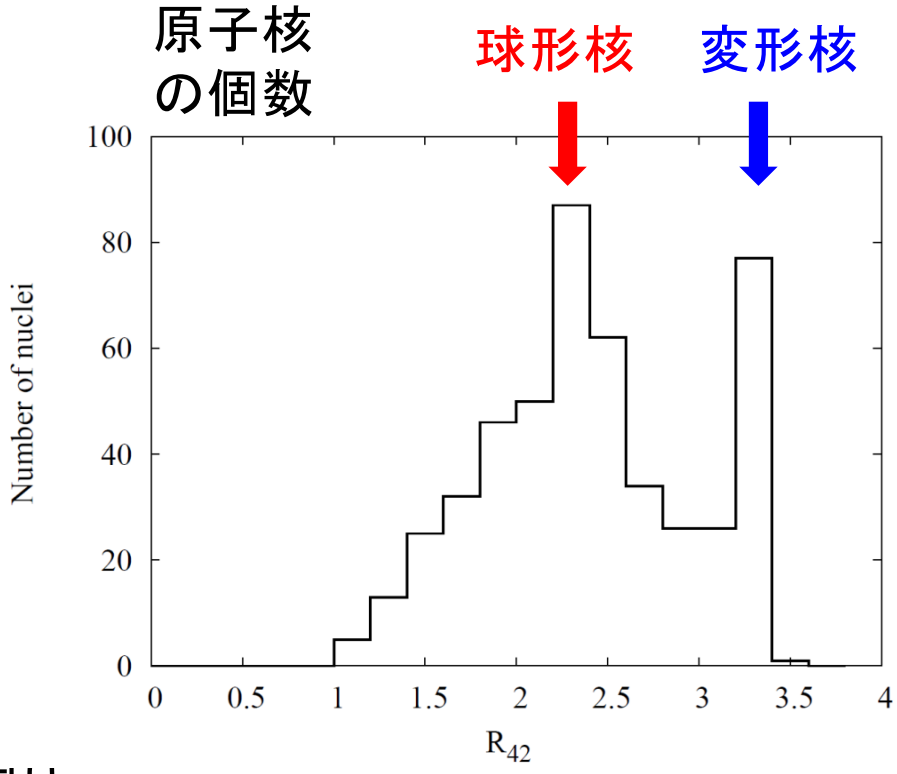
$\langle\beta\rangle = 0$

だとしても β=0 の周り
でゆらぐ（ゼロ点振動）

$R_{42} = E_4/E_2$

$= 20/6 = 3.33$（変形）

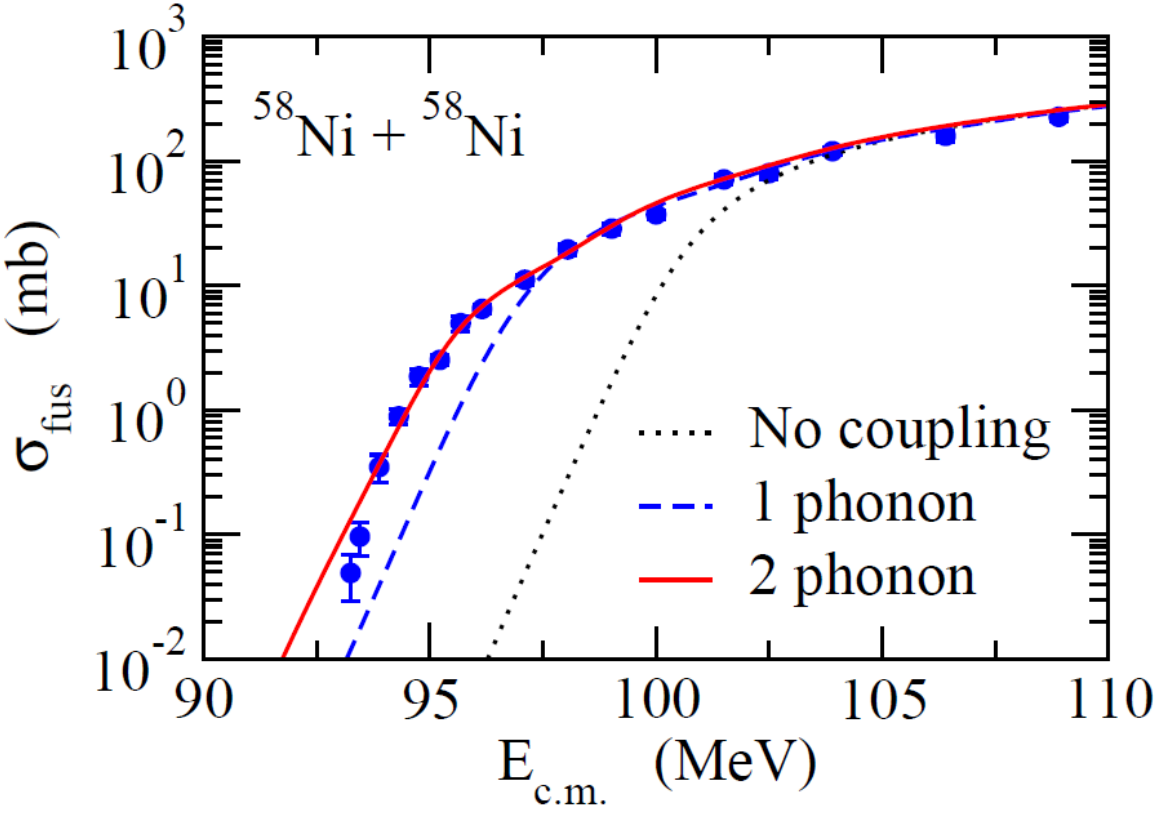
$= 2$（調和振動子）

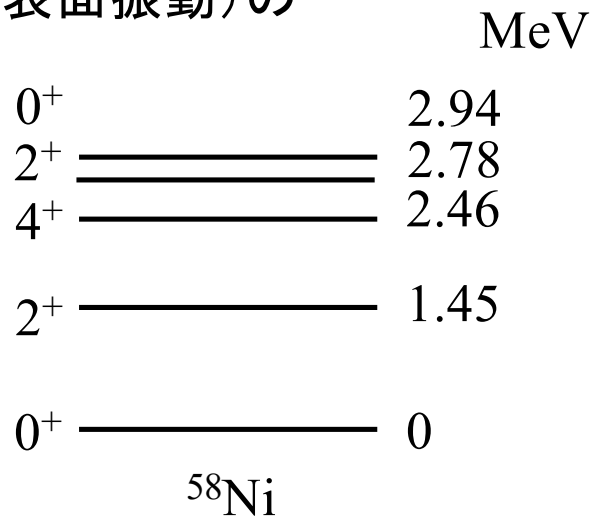



G.F. Bertsch, in “Fifty years of nuclear BCS”, p. 26

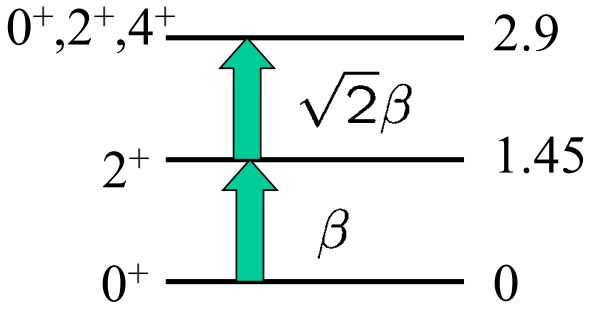
# 相対論的重イオン衝突で視る原子核の形

低エネルギー重イオン核融合反応では、球形核の動的変形（表面振動）の効果はよく知られている：




→ 調和振動子で近似



# 相対論的重イオン衝突で視る原子核の形

原子核のスナップショットを撮る
→ 反応の時間スケールが速い

$\longleftrightarrow \quad E_{\rm coll} >> E_{\rm int}$（断熱近似）

大抵の場合、
核融合反応にとって振動モードは遅くない

$$E_{\rm vib} \sim 2\ {\rm MeV}$$
$$E_{\rm tunnel} \sim \hbar\Omega_{\rm barrier} \sim 3.5\ {\rm MeV}$$

→ しかし、相対論的重イオン衝突にとっては
十分に遅い！

振動運動に対する断熱近似（核融合反応）:

H. Esbensen, Nucl. Phys. A352, 147 (1981)

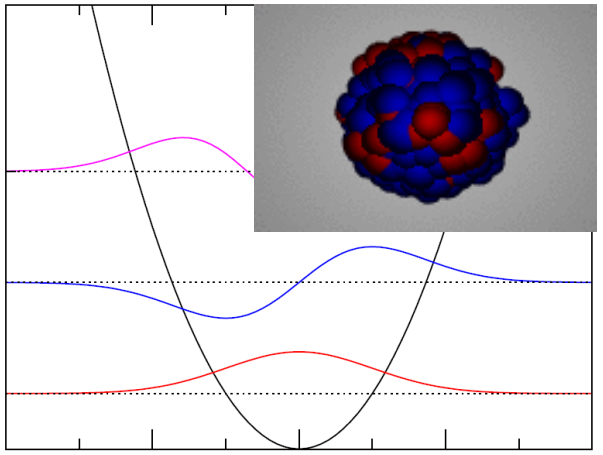
**FUSION AND ZERO-POINT MOTIONS**

H. ESBENSEN
*Nordita, Blegdamsvej 17, DK-2100 Copenhagen Ø, Denmark*

Received 14 July 1980

$$\sigma_{\rm fus}(E) \sim \int d\beta\, w(\beta)\sigma_0(E;\beta)$$

$$w(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\beta^2/2\sigma^2}$$



$$\sqrt{\langle\beta_\lambda^2\rangle} = \frac{4\pi}{3ZR^\lambda}\sqrt{\frac{B(E\lambda)\uparrow}{e^2}}$$

各 β で計算し、それをガウスの重みで平均

# 相対論的重イオン衝突で視る原子核の形

原子核のスナップショットを撮る
→ 反応の時間スケールが速い

$\longleftrightarrow$ $E_{\rm coll} >> E_{\rm int}$（断熱近似）

大抵の場合、
核融合反応にとって振動モードは遅くない

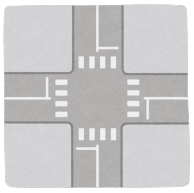
$$E_{\rm vib} \sim 2\ {\rm MeV}$$
$$E_{\rm tunnel} \sim \hbar\Omega_{\rm barrier} \sim 3.5\ {\rm MeV}$$

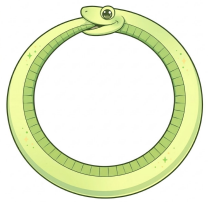
→ しかし、相対論的重イオン衝突にとっては
十分に遅い！

振動運動に対する断熱近似（核融合反応）:

H. Esbensen, Nucl. Phys. A352, 147 (1981)

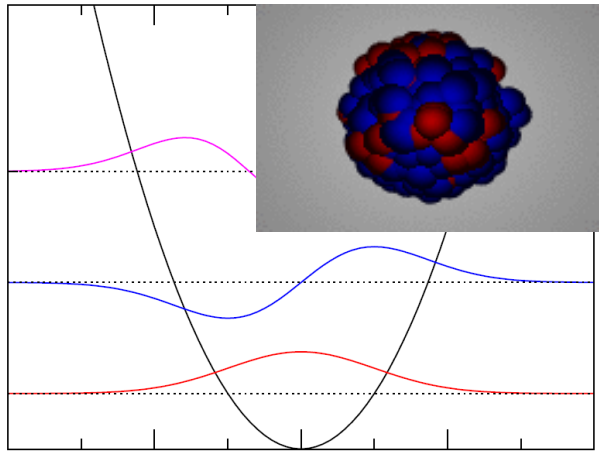
この考えを相対論的
重イオン衝突に応用する





$$\sigma_{\rm fus}(E) \sim \int d\beta\, w(\beta)\sigma_0(E;\beta)$$

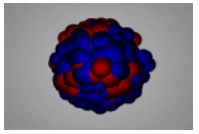
$$w(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\, e^{-\beta^2/2\sigma^2}$$

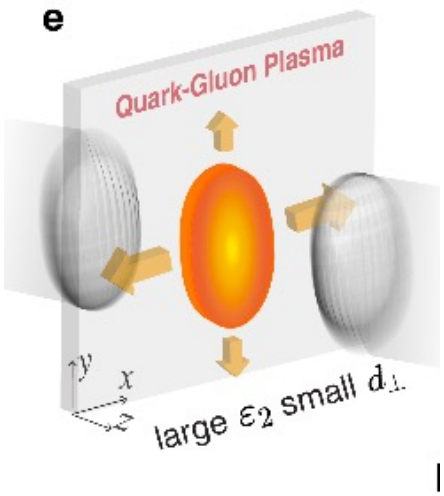


各 β で計算し、それをガウスの重みで平均

# 相対論的重イオン衝突で視る原子核の形

エクセントリシティ・パラメータ　$\epsilon_2 = -\dfrac{\langle (x-iy)^2 \rangle}{\langle x^2+y^2 \rangle}$





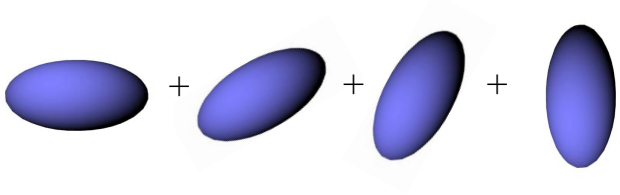

$$\langle |\epsilon_n|^2 \rangle \propto \int \left( \prod_{\lambda,\mu} d\alpha_{\lambda\mu}\, e^{-\alpha_{\lambda\mu}^2/2\sigma_\lambda^2} \right) |\epsilon_n(\{\alpha_{\lambda\mu}\})|^2$$

（表面振動）

$$\langle |\epsilon_n|^2 \rangle = \int \frac{d\Omega}{8\pi^2} |\epsilon_n(\Omega)|^2$$

（変形）

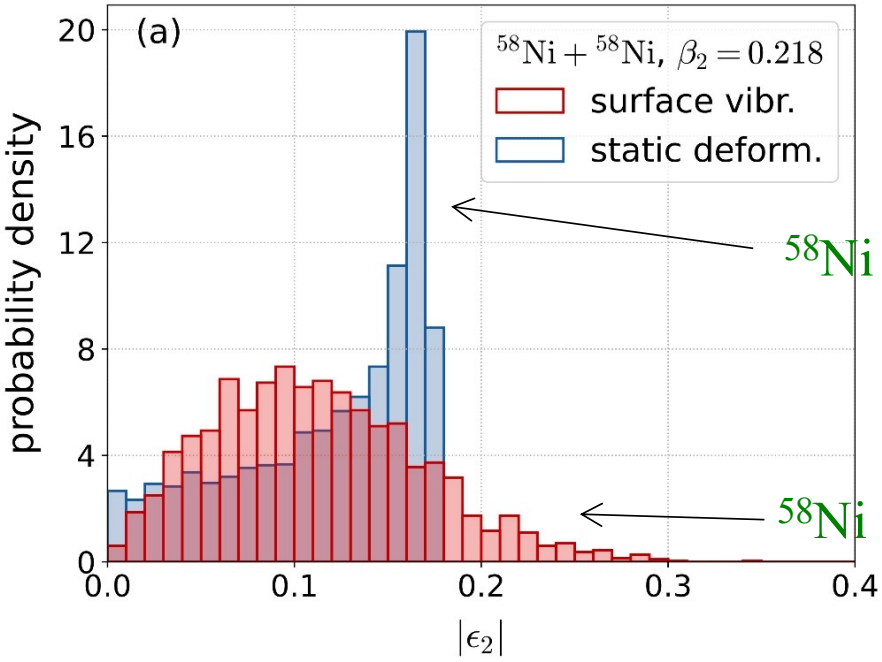
密度を $xy$-平面に射影したときに
どれだけ円からずれているのか



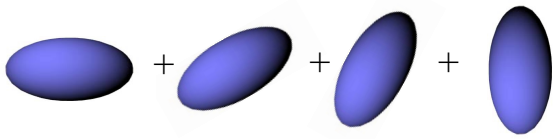
# 相対論的重イオン衝突で視る原子核の形

$$\epsilon_2 = -\frac{\langle (x-iy)^2 \rangle}{\langle x^2+y^2 \rangle}$$

$^{58}$Ni + $^{58}$Ni 衝突 ($\beta_2 \sim 0.218$)

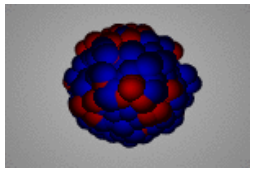



$^{58}$Ni が静的に変形しているとき



$\langle |\epsilon_2| \rangle = 0.119$

$^{58}$Ni が表面振動しているとき



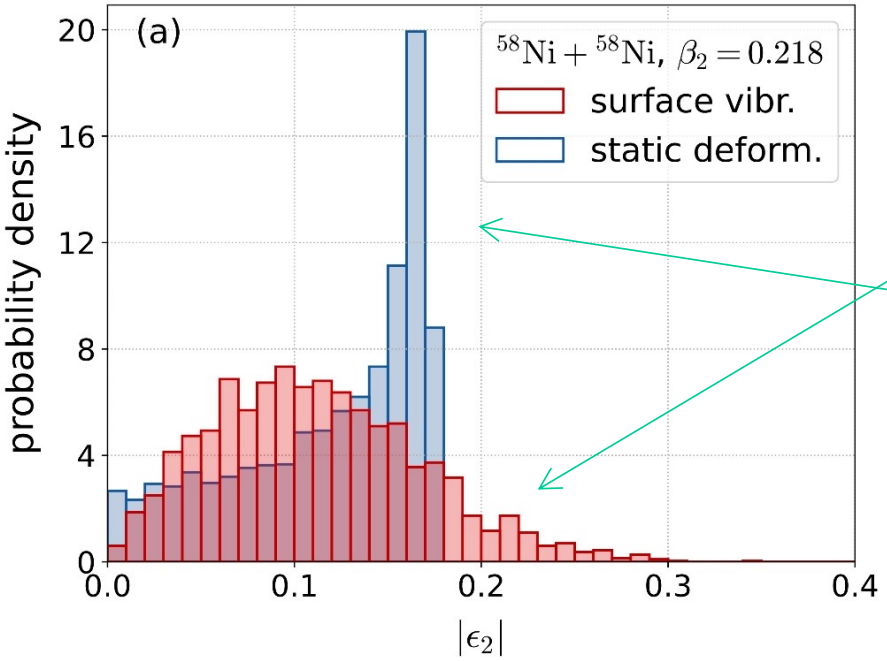
$\langle |\epsilon_2| \rangle = 0.112$

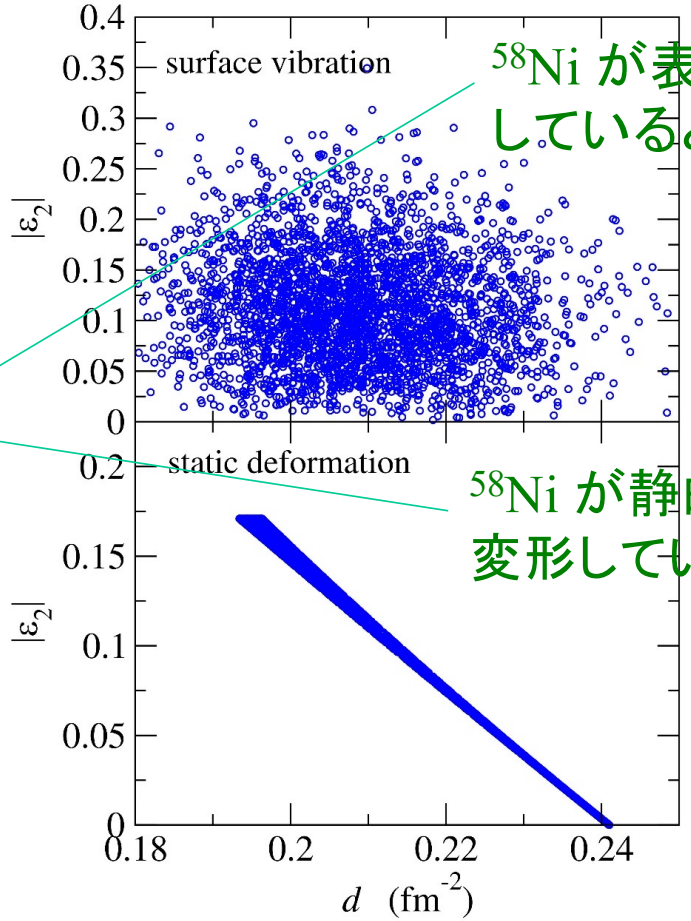
K. Hagino and M. Kitazawa, Phys. Rev. C112, L041901 (2025).

# 相対論的重イオン衝突で視る原子核の形

$$\epsilon_2 = -\frac{\langle (x-iy)^2 \rangle}{\langle x^2+y^2 \rangle}$$

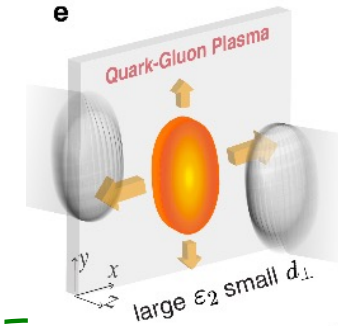
$^{58}$Ni + $^{58}$Ni 衝突 ($\beta_2 \sim 0.218$)




$^{58}$Ni が表面振動しているとき

$^{58}$Ni が静的に変形しているとき




the inverse area

$$d \equiv \frac{1}{\sqrt{\langle x^2 \rangle \langle y^2 \rangle}} \leftrightarrow \bar{p}_T$$

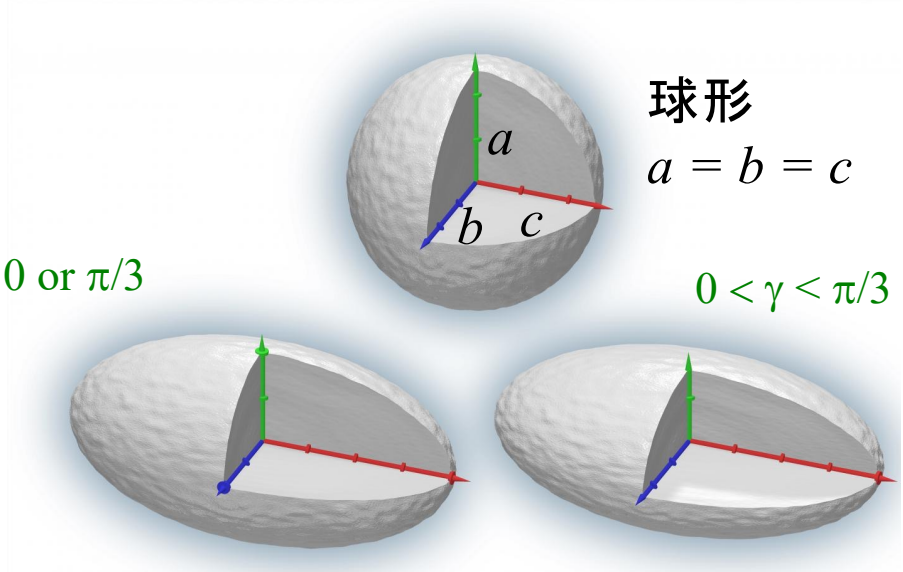
K. Hagino and M. Kitazawa, Phys. Rev. C112, L041901 (2025).

# 相対論的重イオン衝突で視る原子核の形

$$\epsilon_2 = -\frac{\langle (x-iy)^2 \rangle}{\langle x^2+y^2 \rangle}$$

$^{58}$Ni + $^{58}$Ni 衝突

軸対称性を破る変形



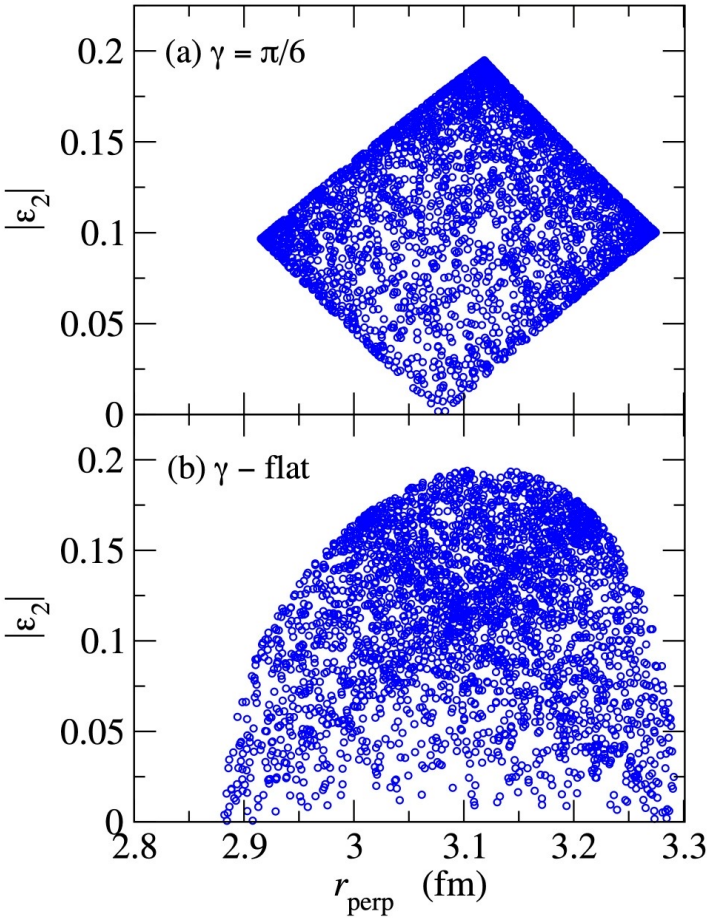

球形
$a = b = c$

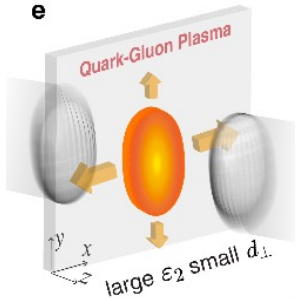
$\gamma = 0$ or $\pi/3$

$0 < \gamma < \pi/3$

軸対称変形
$a = b \neq c$

三軸非対称変形
$a \neq b \neq c$



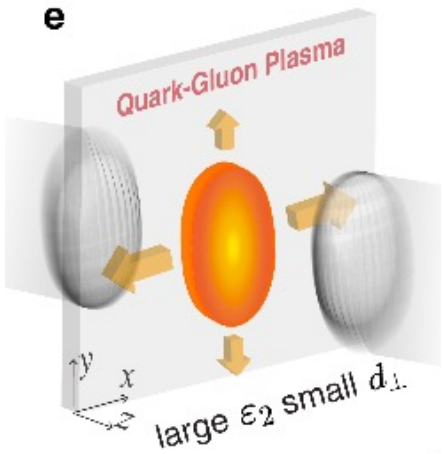

https://phys.org/news/
2016-10-lightest-superdeformed-triaxial-atomic-nucleus.html

K. Hagino and M. Kitazawa,
Phys. Rev. C112, L041901 (2025).

# Dobaczewski らによる最近の批判

エクセントリシティ
・パラメータ
→1体密度で決まる量

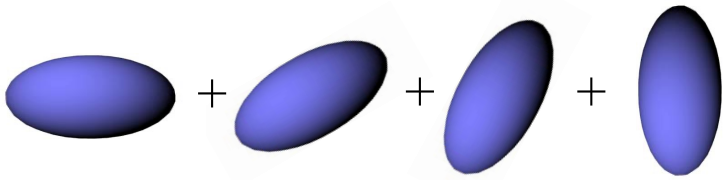
$\rho_1(\boldsymbol{r})$　　核子が $\boldsymbol{r}$ にいる確率




$$\epsilon_2 = -\frac{\langle (x-iy)^2 \rangle}{\langle x^2+y^2 \rangle}$$

Dobaczewski らによる批判の主要ポイント:

J. Dobaczewski, A. Gade, K. Godbey,
R.V.F. Janssens, and W. Nazarewicz,
Phys. Rev. Res. 7, 043159 (2025)

$\Psi_{0+} =$  $+ \cdots$

→ 実験室では球対称

→ 変形をプローブするためには
　1体密度では無理（2体密度が必要）

$\rho_2(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{r}')$　　核子1が $\boldsymbol{r}$ にいるときに
核子2が$\boldsymbol{r}'$にいる確率

## Dobaczewski らによる最近の批判

原子核は実験室では球対称　→ 変形をプローブするためには1体密度では無理
（2体密度が必要）

核構造の問題であれば、この主張は正しい。
しかし、核反応の問題として考える必要がある。

J-PARC-HI のエネルギー領域

➡ 中間エネルギーにおける反応を考える（微視的反応理論：グラウバー理論）

$$S(\boldsymbol{b}) = \left\langle \Psi_0^P \Psi_0^T \right| e^{i\chi(\boldsymbol{b})} \left| \Psi_0^P \Psi_0^T \right\rangle \qquad \chi(\boldsymbol{b}) = \sum_{i\in P}\sum_{j\in T} \chi_{NN}(\boldsymbol{b} + \hat{\boldsymbol{s}}_i^P - \hat{\boldsymbol{s}}_j^T)$$

変形核：　$|\Psi_0^P\rangle = \dfrac{1}{4\pi}\int d\Omega\, \hat{R}(\Omega)|\Phi\rangle = \dfrac{1}{4\pi}\int d\Omega\, |\Phi_\Omega\rangle$

大変形近似：　$\langle \Phi_\Omega | \Phi_{\Omega'} \rangle = \delta(\Omega - \Omega')$

➡ $$S(\boldsymbol{b}) = \frac{1}{4\pi}\int d\Omega \left\langle \Psi_\Omega \Psi_0^T \right| e^{i\chi(\boldsymbol{b})} \left| \Psi_\Omega \Psi_0^T \right\rangle$$

# 中間エネルギーにおけるグラウバー理論による変形核の反応

W. Horiuchi and K. Hagino, in preparation

$$S(\boldsymbol{b}) = \frac{1}{4\pi}\int d\Omega \left\langle \Psi_\Omega \Psi_0^T \right| e^{i\chi(\boldsymbol{b})} \left| \Psi_\Omega \Psi_0^T \right\rangle$$

光学極限近似 : $\left\langle e^{i\chi} \right\rangle \sim e^{i\langle\chi\rangle}$

Scheme 1: 角度平均は残してそれ以外を指数関数の肩に乗せる

$$S(\boldsymbol{b}) \sim \frac{1}{4\pi}\int d\Omega \exp\left[ i \left\langle \Psi_\Omega \Psi_0^T \right| \chi(\boldsymbol{b}) \left| \Psi_\Omega \Psi_0^T \right\rangle \right]$$

Scheme 2:角度平均も含めて全てを指数関数の肩に乗せる

$$S(\boldsymbol{b}) \sim \exp\left[ \frac{i}{4\pi}\int d\Omega \left\langle \Psi_\Omega \Psi_0^T \right| \chi(\boldsymbol{b}) \left| \Psi_\Omega \Psi_0^T \right\rangle \right]$$

# 中間エネルギーにおけるグラウバー理論による変形核の反応

$$e^{i\chi(\boldsymbol{b})} = \prod_{i\in P}\prod_{j\in T}[1-\Gamma(\boldsymbol{b}+\boldsymbol{s}_i-\boldsymbol{s}_j)]$$

W. Horiuchi and K. Hagino, in preparation

Scheme 1: $$S(\boldsymbol{b}) \sim \frac{1}{4\pi}\int d\Omega \exp\left[-\int d\boldsymbol{r}d\boldsymbol{r}_T\,\Gamma(\boldsymbol{b}+\boldsymbol{s}_P-\boldsymbol{s}_T)\rho_P(\boldsymbol{r}_P;\Omega)\rho(\boldsymbol{r}_T)\right]$$

角度を固定して反応の観測量を計算、その後角度平均

→ 角度依存性が強ければ、反応を通じて変形をプローブできる

- ✓ 相対論的重イオン衝突
- ✓ 低エネルギー重イオン核融合反応

Scheme 2: $$S(\boldsymbol{b}) \sim \exp\left[-\int d\boldsymbol{r}d\boldsymbol{r}_T\,\Gamma(\boldsymbol{b}+\boldsymbol{s}_P-\boldsymbol{s}_T)\bar{\rho}_P(\boldsymbol{r}_P)\rho(\boldsymbol{r}_T)\right];$$

$$\bar{\rho}_P(\boldsymbol{r}_P) \equiv \frac{1}{4\pi}\int d\Omega\,\rho(\boldsymbol{r}_P;\Omega)$$

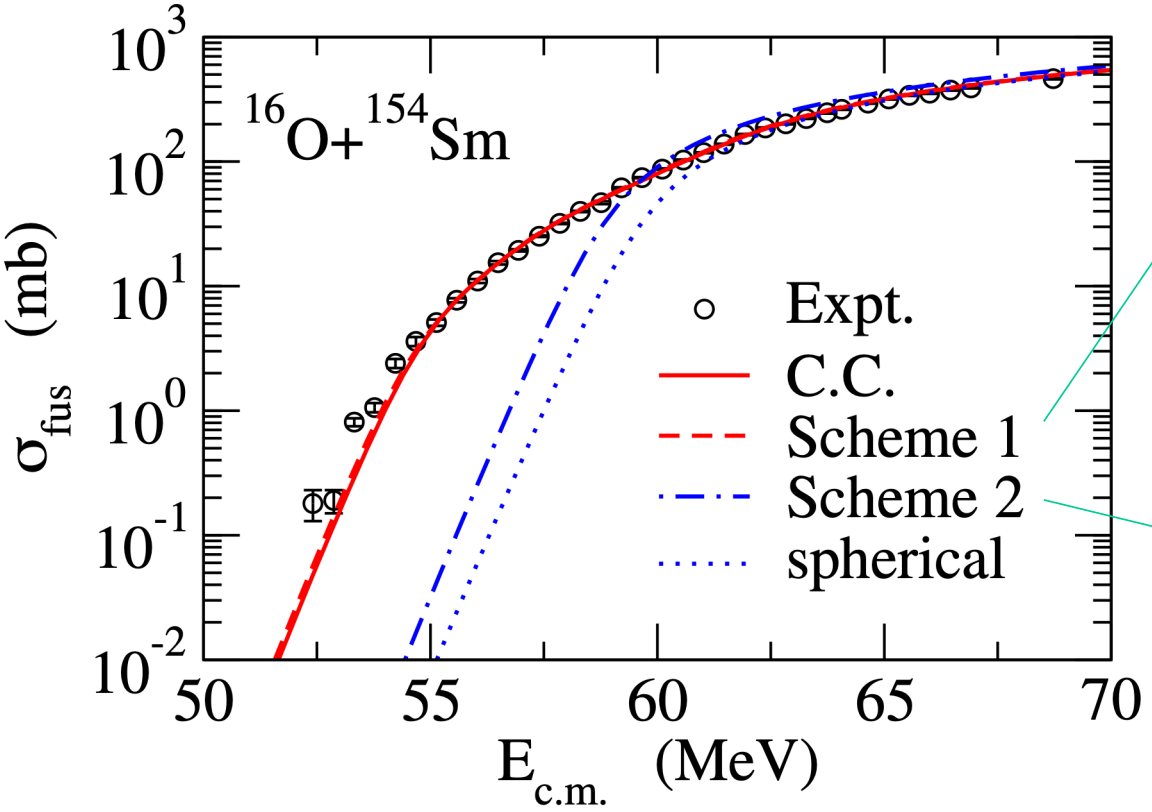
変形した密度を平均して球対称な密度にする

→ Dobaczewskiらはこちらの描像によっている

# 中間エネルギーにおけるグラウバー理論による変形核の反応

W. Horiuchi and K. Hagino, in preparation

## 低エネルギー重イオン核融合反応の場合



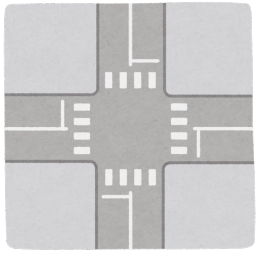

$$\sigma_{\rm fus}(E) = \int_0^1 d(\cos\theta_d)\sigma_{\rm fus}(E; V(r,\theta_d))$$

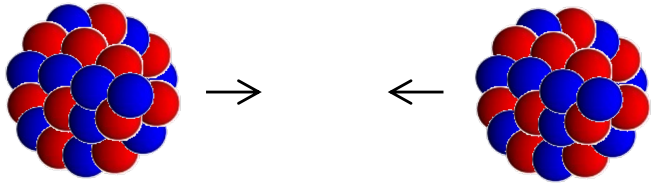
$\sigma_{\rm fus}$(CC) ~ $\sigma_{\rm fus}$(scheme 1)

$$\sigma_{\rm fus}(E) = \sigma_{\rm fus}(E; V_{\rm eff}(r))$$

$$V_{\rm eff}(r) = \int_0^1 d(\cos\theta_d)\, V(r,\theta_d)$$

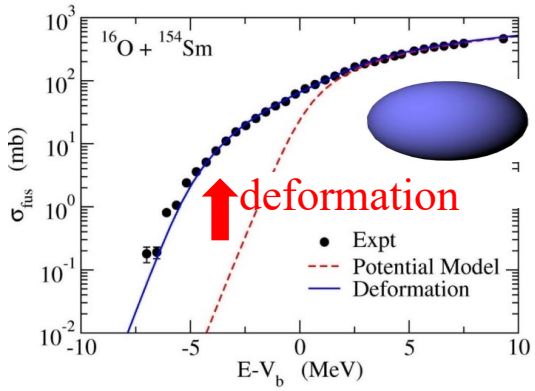
# まとめ





## 低エネルギー重イオン核融合反応

- ✓変形などの核構造が反応に大きく影響
- ✓他自由度系における量子トンネル現象→核構造の効果が増幅
- ✓変形により核融合反応断面積が大きく増幅



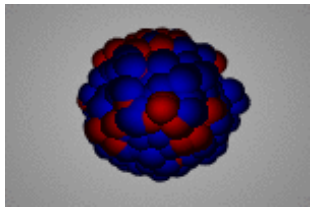

→ 回転運動に対する「スナップショット」

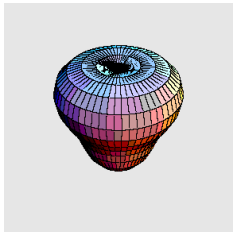
## 低エネルギー核反応と相対論的重イオン衝突の交差点

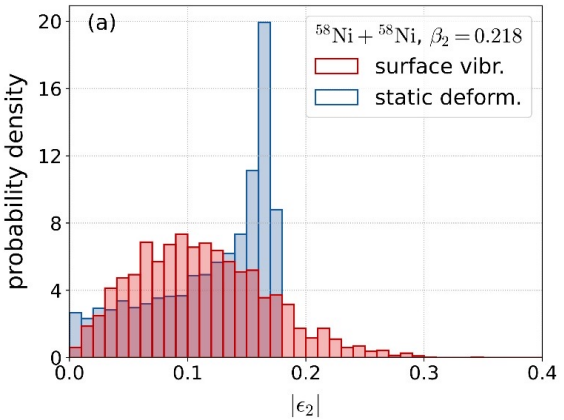
→ 核構造に対するスナップショット（ただし、文字通りの意味ではない）

これまで：変形を調べるツール

→ これから：球形核の振動励起も








中間エネルギーにおけるグラウバー理論が低エネルギーと高エネルギーをつなぐ橋渡し