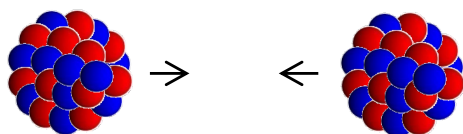


重い原子核の量子多体ダイナミクス



萩野浩一

京都大学大学院理学研究科



1. イントロダクション: 低エネルギー重イオン反応
2. クーロン障壁近傍の重イオン核融合反応と多体トンネル現象
3. 超重元素の物理
4. 核分裂の物理

原子核三者若手夏の学校2026、2026年8月2日～6日、プラザヴェルデ(静岡県沼津市)

講義ノート:



途中でもどんどん質問してください！

自己紹介

- 学部、修士、博士：東北大学理学部。博士(理学)1998年3月

重イオン核融合反応の研究←核反応に対する核構造の影響

オーストラリア国立大で実験データが高精度で取られていた時期で、その理論解析をしていた。オーストラリアに年に1~2回行っていました。



- ワシントン大 Institute for Nuclear Theory (シアトル)でポスドク(1998年~2000年)

Bertsch氏と一緒に核構造の研究をする(基底状態相関をRPAやGCMで研究)



- 京都大学基礎物理学研究所で助手(2000年~2004年)

陽子放出崩壊の研究→オークリッジの実験グループとの共同研究



- 東北大で助教授/准教授(2004年~2019年)

佐川弘幸氏らと一緒に中性子過剰核の研究をする



- 京都大学理学研究科(2019年~)

Bertsch氏と一緒に核分裂の研究をする

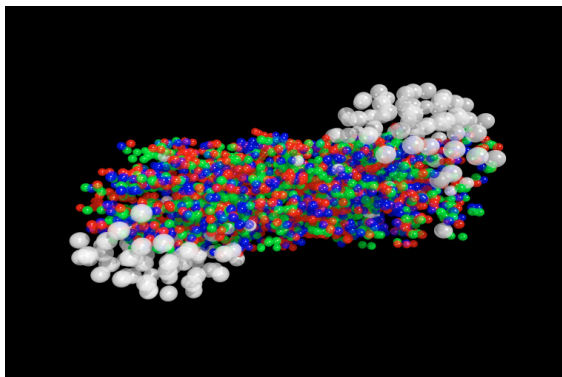


原子核反応(原子核衝突)

相対論的重イオン衝突

RHIC ($E/A=200$ GeV)

LHC ($E/A=5.5$ TeV)



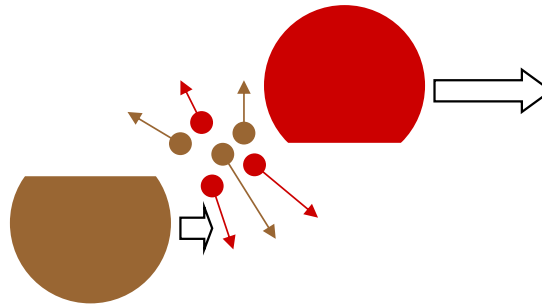
QGP の物理
QCD相図

藤本さんの講義(月曜日)
この時間の後の方でも少し

中間エネルギー

($E/A=\text{数 } 100$ MeV)

RIBF



Slide: A. Ozawa

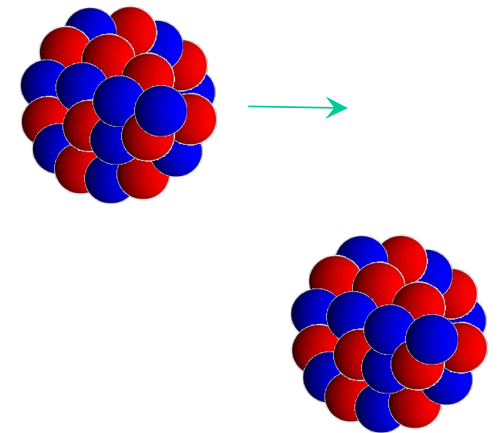
核破碎反応

ハロー核
中性子過剰核

北村さんの講義(火曜日)

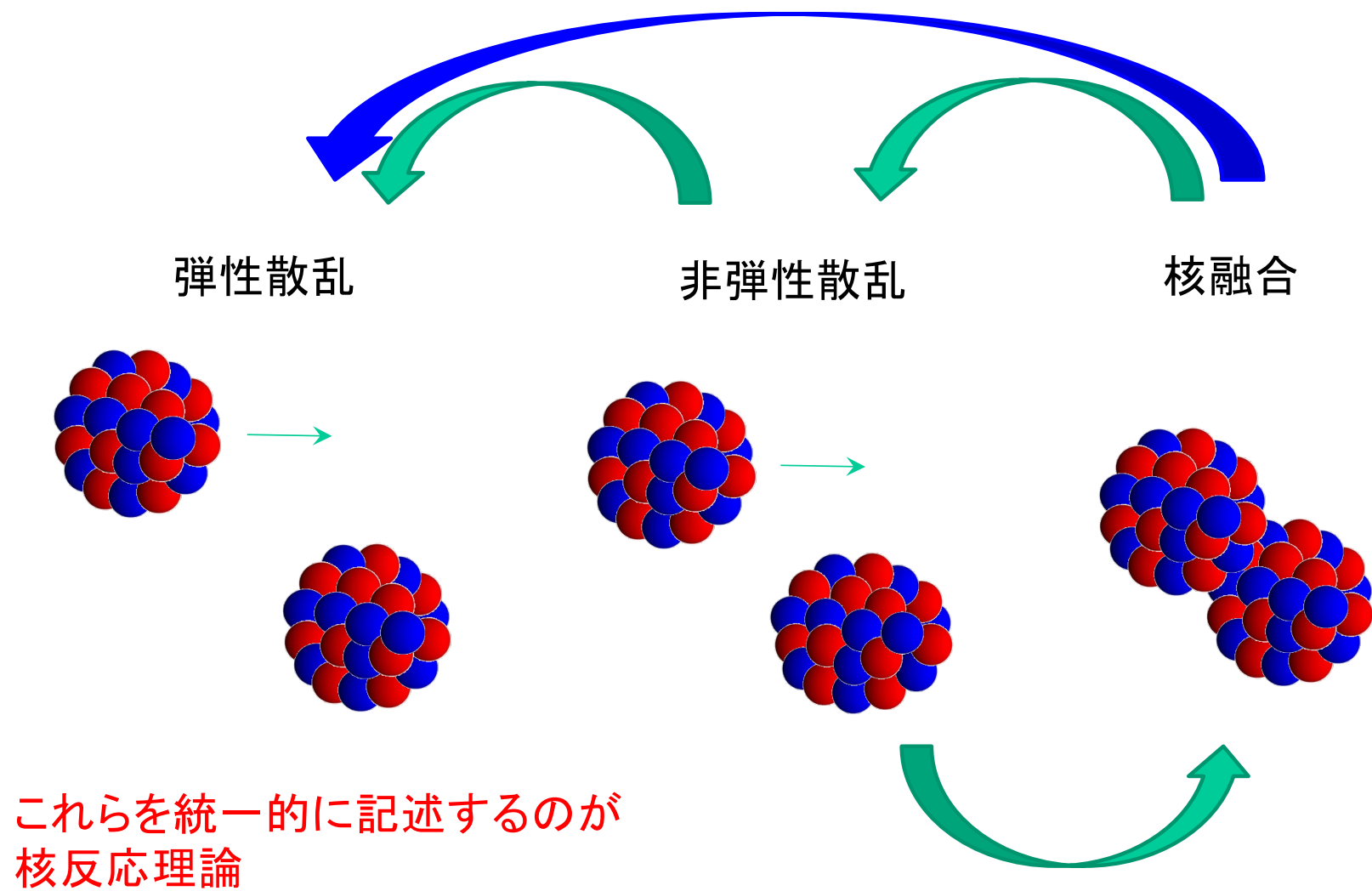
低エネルギー

($E/A=\text{数} \sim \text{数 } 10$ MeV)



ふわ~っと衝突

量子多体系のダイナミクス(原子核反応)



低エネルギー原子核反応論

□ 原子核物理:核子多体系としての原子核の振る舞い

← 核子間相互作用から理解する

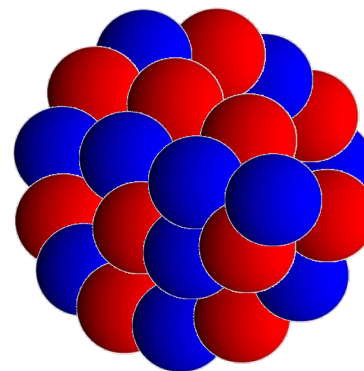
➤ 静的な振る舞い:原子核構造論

- ✓ 基底状態の性質 (質量、大きさ、形など)
- ✓ 励起状態の性質

➤ ダイナミックス:原子核反応論

原子核は複合粒子

- ✓ 豊富な反応様式
- ✓ 核構造と核反応の織り成す様々なインタープレイ

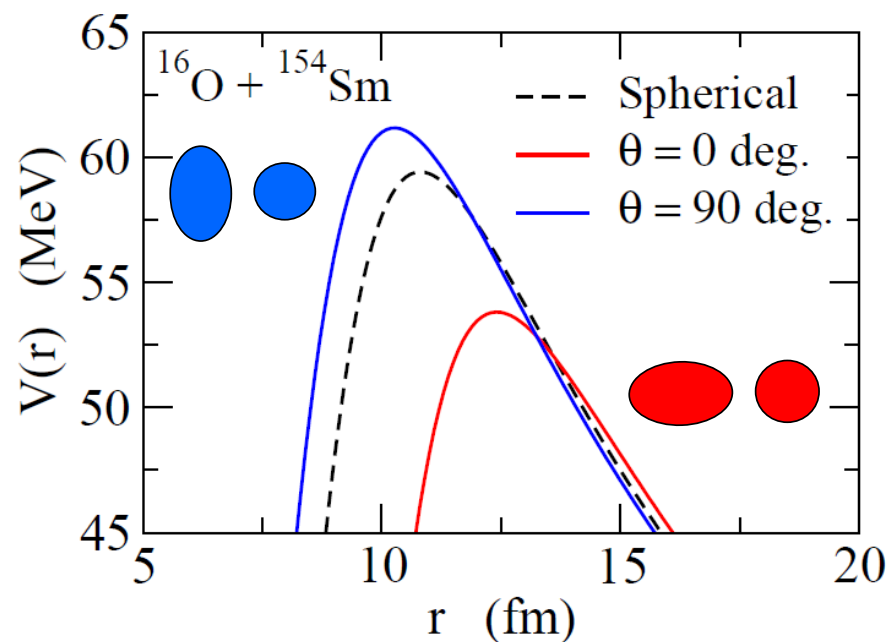
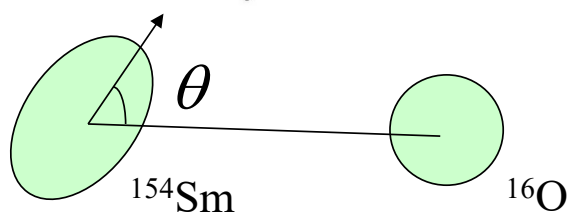
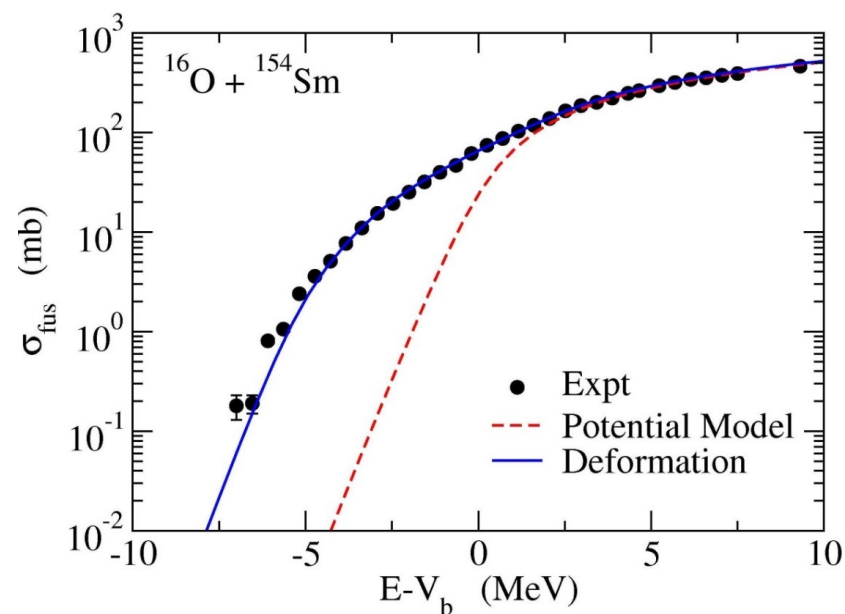


- ✓ 弾性散乱
- ✓ 非弾性散乱
- ✓ 核子移行反応
- ✓ 核融合反応

- ✓ 基底状態の性質 (質量、大きさ、形など)
- ✓ 励起状態の性質

核構造と核反応のインタープレイのいい例の一つ

重イオン核融合反応断面積の増大: 原子核の変形が大きな効果をもたらす



^{154}Sm は変形→向きによってポテンシャルが変わる

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

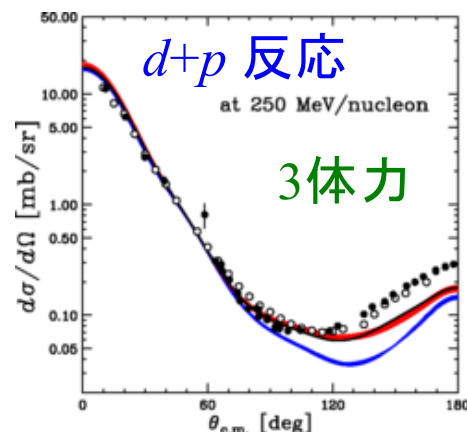
K.Hagino and N. Takigawa, PTP128 (2012) 1061

原子核反応の2つの側面

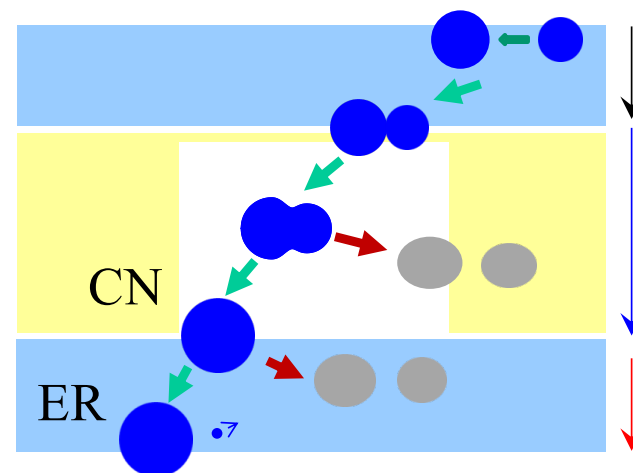
✓ ツールとしての原子核反応



緒方さんのHPより



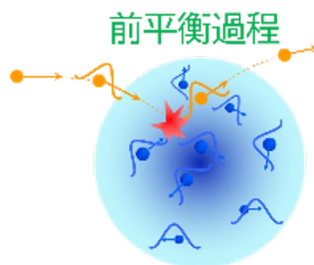
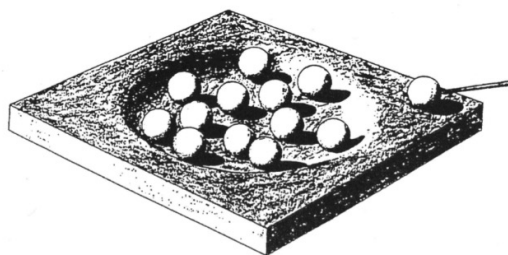
K. Sekiguchi et al.,
PRC89 (2014) 064007



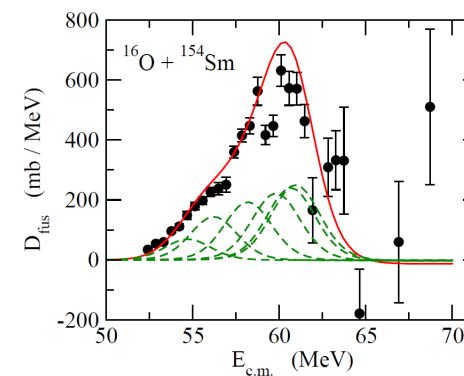
超重元素生成反応

障壁分布

✓ 反応ダイナミクス自体としての面白み(量子多体論)



緒方さん
のHPより

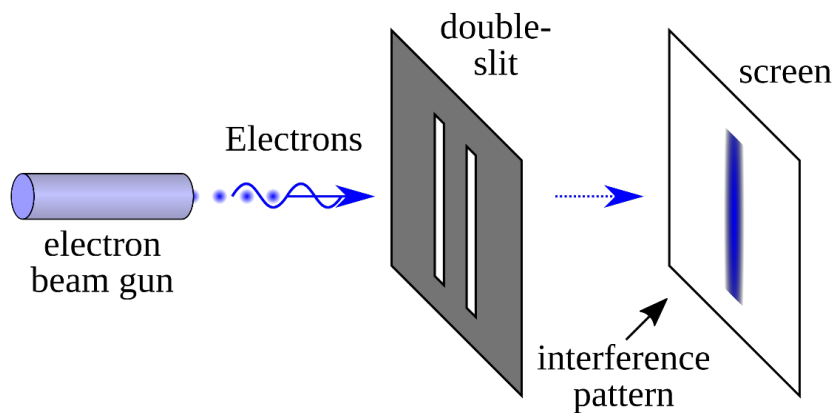


核反応は宝の山: 核反応に見られる量子性

重ね合わせの原理 $\psi = \alpha\psi_1 + \beta\psi_2$

$$\rightarrow |\psi|^2 = |\alpha\psi_1|^2 + |\beta\psi_2|^2 + \underbrace{(\alpha\psi_1)^*(\beta\psi_2) + (\alpha\psi_1)(\beta\psi_2)^*}_{\text{干渉}}$$

2つのプロセスが原理的に区別できないとき→ 振幅を足してから2乗する



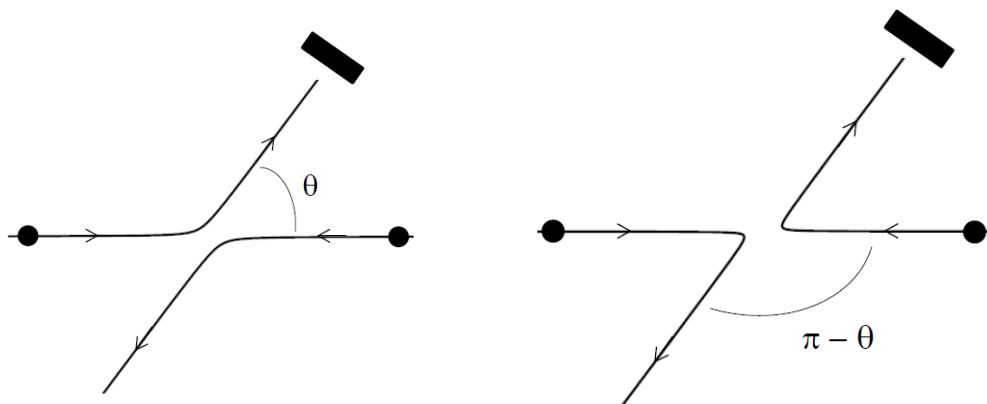
Wikipedia

核反応は宝の山: 核反応に見られる量子性

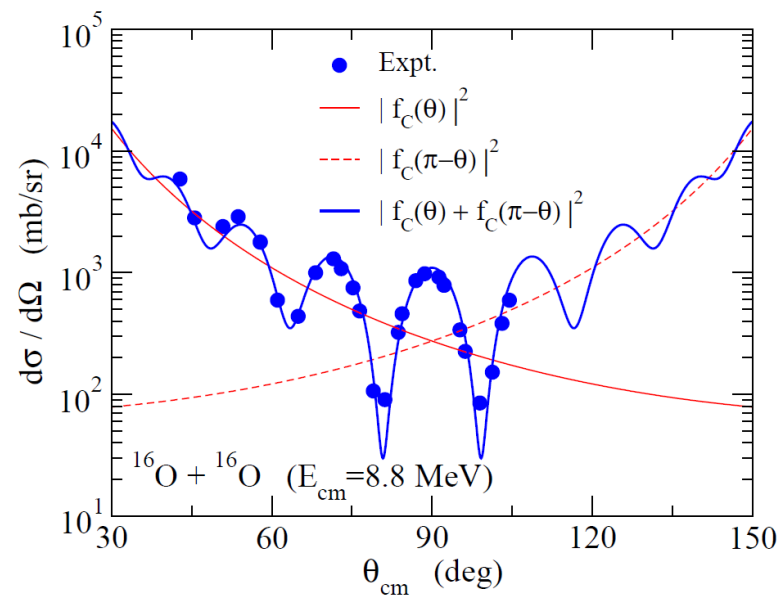
量子力学: 2つのプロセスが原理的に区別できないときには、振幅を足してから2乗する:

$$\psi = \alpha\psi_1 + \beta\psi_2 \quad \rightarrow \quad |\psi|^2 = |\alpha\psi_1|^2 + |\beta\psi_2|^2 + \underbrace{(\alpha\psi_1)^*(\beta\psi_2) + (\alpha\psi_1)(\beta\psi_2)^*}_{\text{干渉}}$$

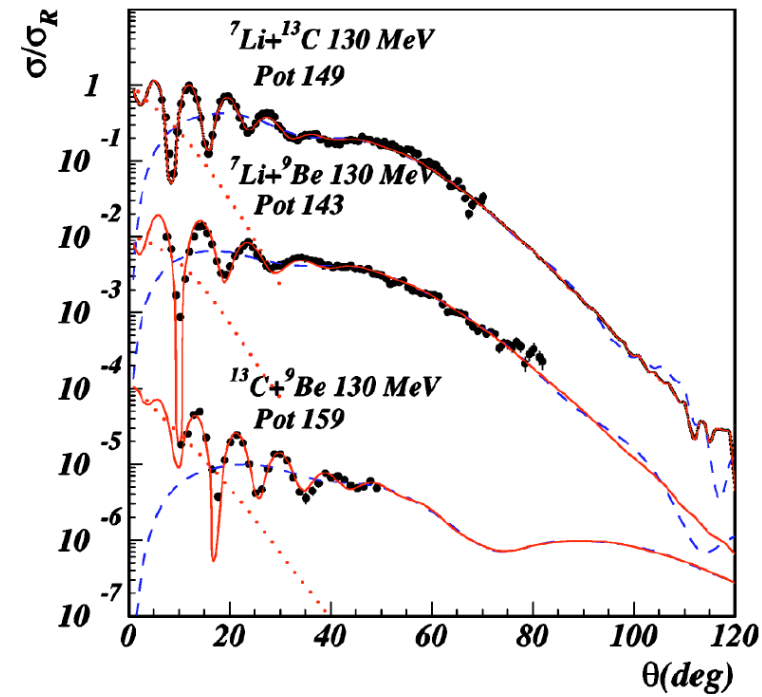
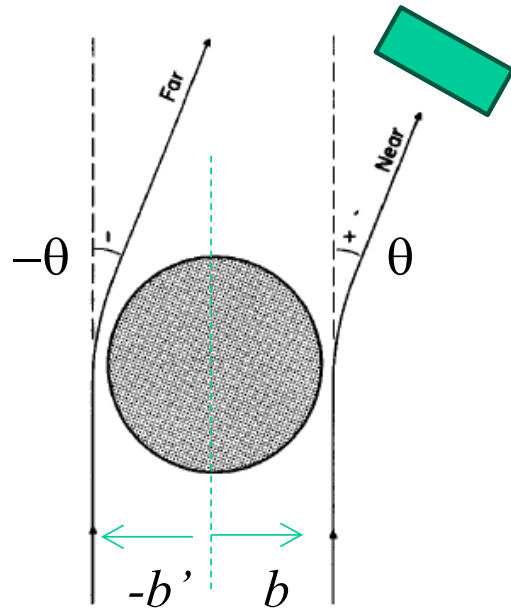
例) モット散乱: 同種粒子の散乱



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta) + f(\pi - \theta)|^2$$



他にも: near side - far side 干渉など



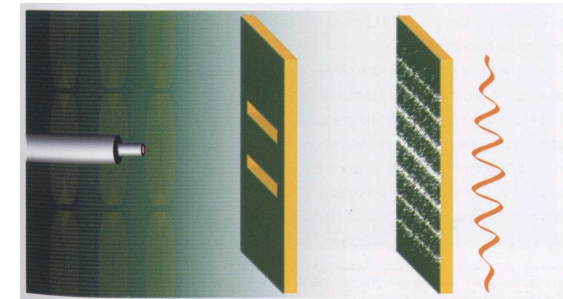
R.C. Fuller, PRC12 ('75) 1561

N. Rowley and C. Marty, NPA266 ('76) 494

M.S. Hussein and K.W. McVoy, PPNP12 ('84)103

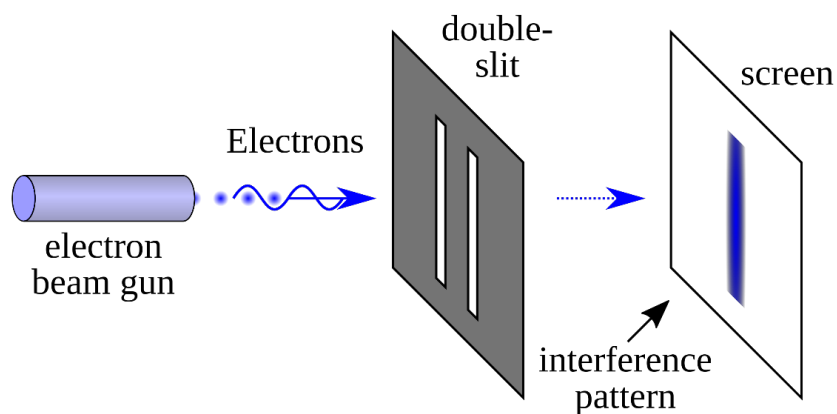
F. Carstoiu et al., PRC70 ('04) 054610

2重スリット問題との類似性

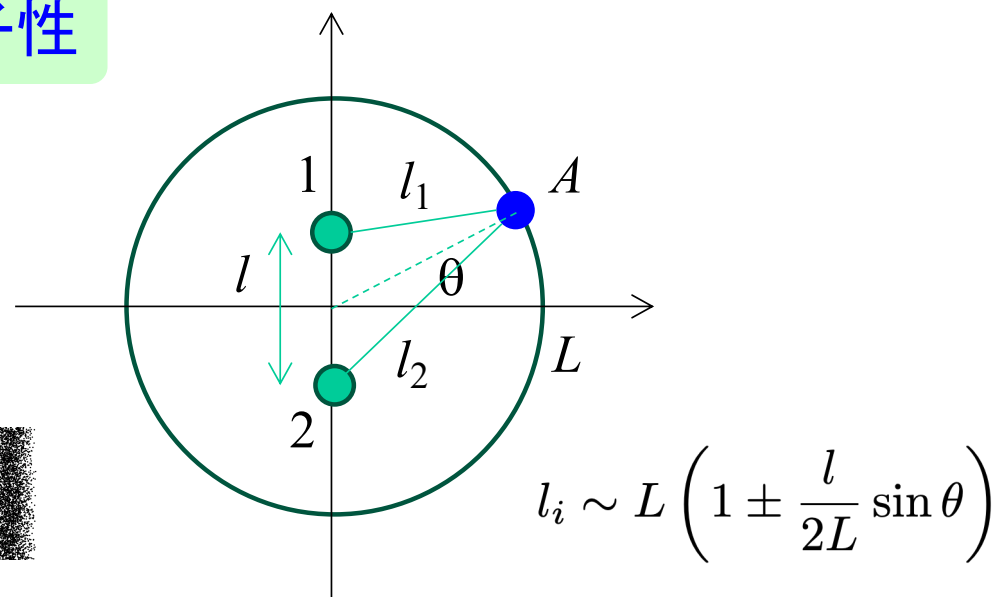
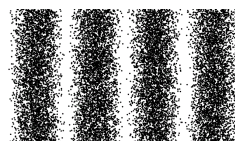


核反応は宝の山: 核反応に見られる量子性

二重スリット問題



Wikipedia



A 点における振幅:

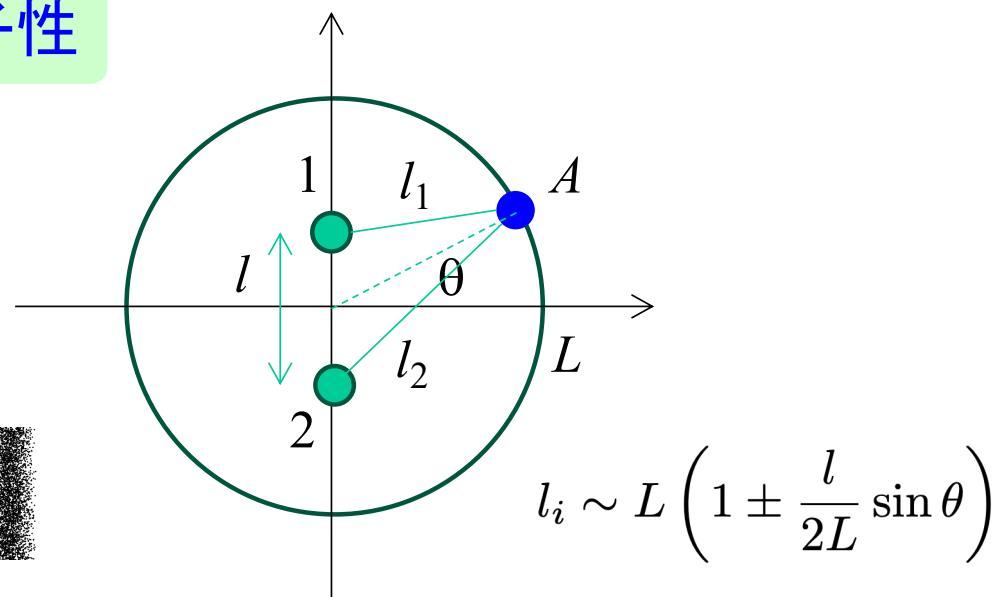
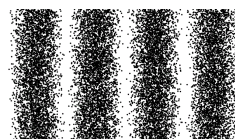
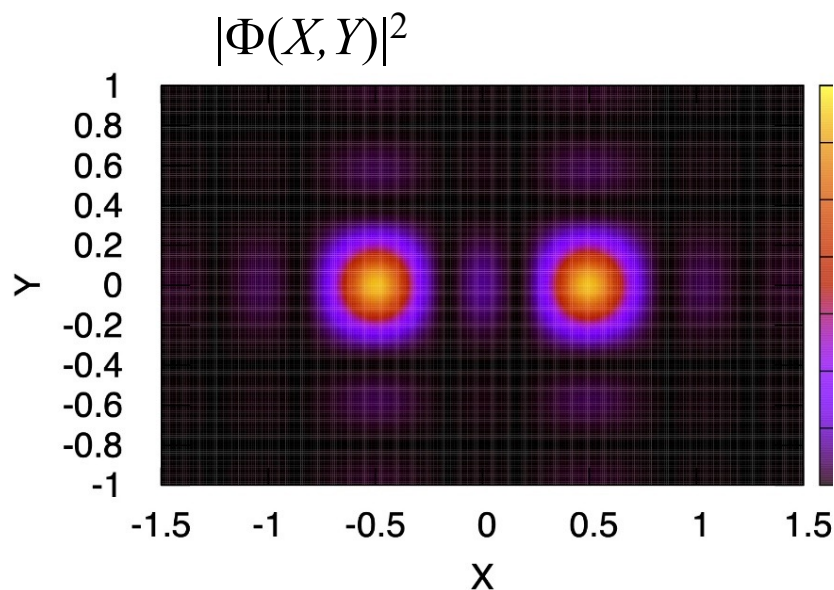
$$f(\theta) = f_1(\theta) + f_2(\theta) \rightarrow P = |f_1(\theta) + f_2(\theta)|^2$$

$$f_i(\theta) = A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} l_i - \omega t \right)$$

$f(\theta)$ のフーリエ変換:

$$\Phi(X, Y) \propto \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi e^{ik(\theta X + \varphi Y)} f(\theta, \varphi)$$

核反応は宝の山: 核反応に見られる量子性



A 点における振幅:

K. Hashimoto et al.,
PTEP2023, 043B04 (2023)

$$f(\theta) = f_1(\theta) + f_2(\theta) \rightarrow P = |f_1(\theta) + f_2(\theta)|^2$$

$f(\theta)$ のフーリエ変換:

初日の共通講義

$$f_i(\theta) = A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} l_i - \omega t \right)$$

$$\Phi(X, Y) \propto \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi e^{ik(\theta X + \varphi Y)} f(\theta, \varphi)$$

核反応のイメージング

K. Hagino and T. Yoda, PLB848, 138326 (2024).
K. Heo and K. Hagino, PRC111, 034612 (2025).

原子核反応への応用:

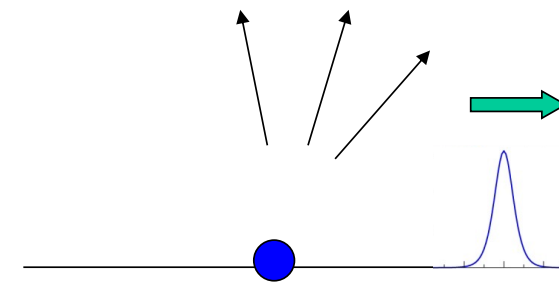
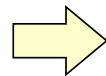
$$V_{\text{opt}}(r) = V(r) - iW(r) \longrightarrow f(\theta) \longrightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|^2$$

【簡単な復習】

光学ポテンシャル

反応過程

- ✓ 弾性散乱
- ✓ 非弾性散乱
- ✓ 核子移行反応
- ✓ 核融合反応



弾性フラックスの減少(吸収)

$$\rightarrow V_{\text{opt}}(r) = V(r) - iW(r)$$

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + V_{\text{opt}}(r) - E \right] \psi(\mathbf{r}) = 0$$

境界条件: $r \rightarrow \infty$ で

$$\psi(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} + f(\theta) \frac{e^{ikr}}{r}$$

$$\rightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|^2$$

核反応のイメージング

K. Hagino and T. Yoda, PLB848, 138326 (2024).

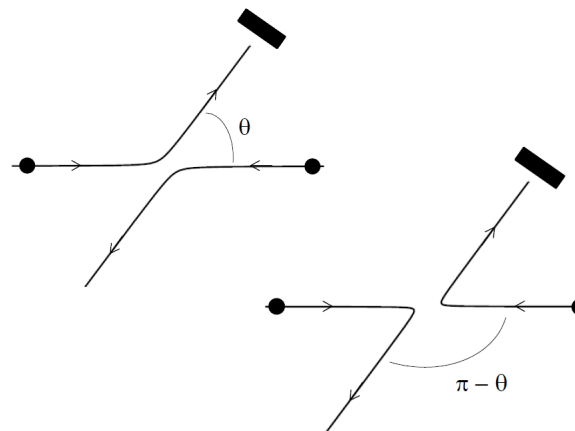
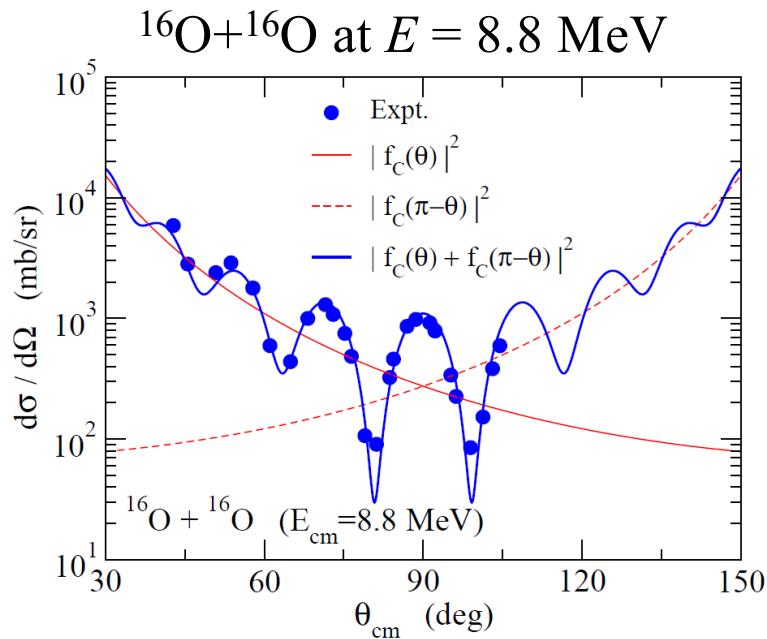
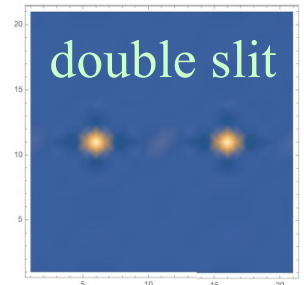
K. Heo and K.Hagino, PRC111, 034612 (2025).

原子核反応への応用:

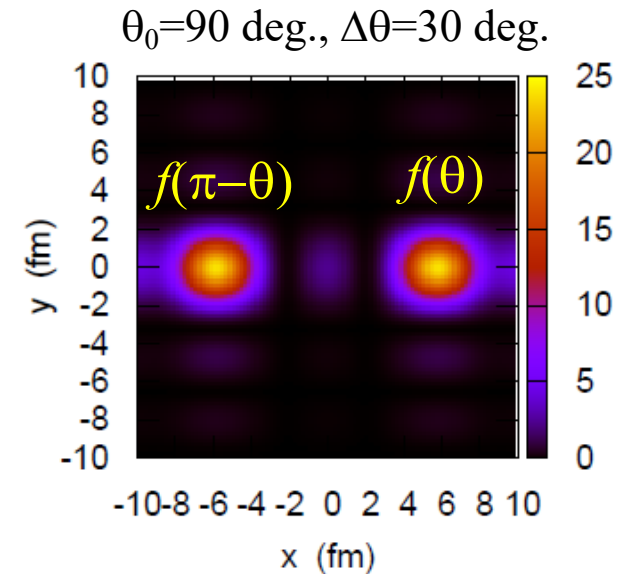
$$V_{\text{opt}}(r) = V(r) - iW(r) \longrightarrow f(\theta) \longrightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|^2$$

F.T. $\searrow$

$$\Phi(X, Y) \longrightarrow |\Phi(X, Y)|^2$$



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta) + f(\pi - \theta)|^2$$



核反応のイメージング

K. Hagino and T. Yoda, PLB848, 138326 (2024).

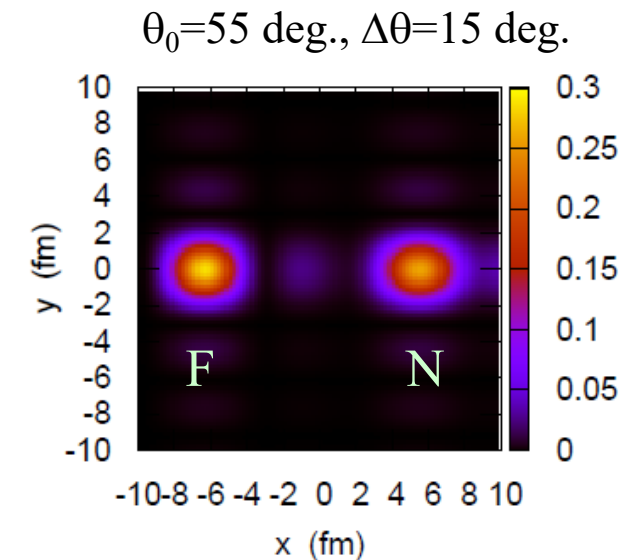
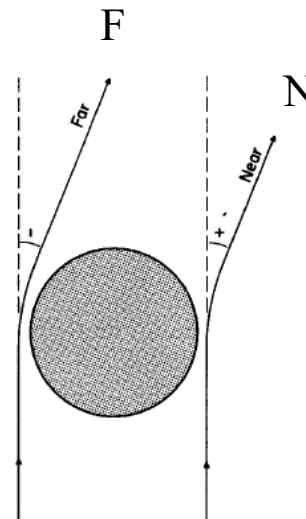
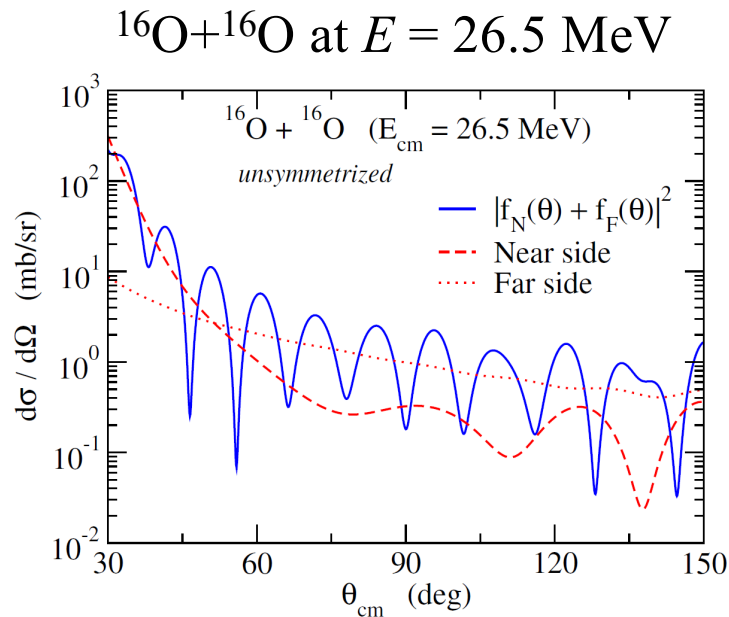
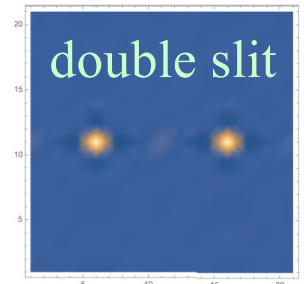
K. Heo and K.Hagino, PRC111, 034612 (2025).

原子核反応への応用:

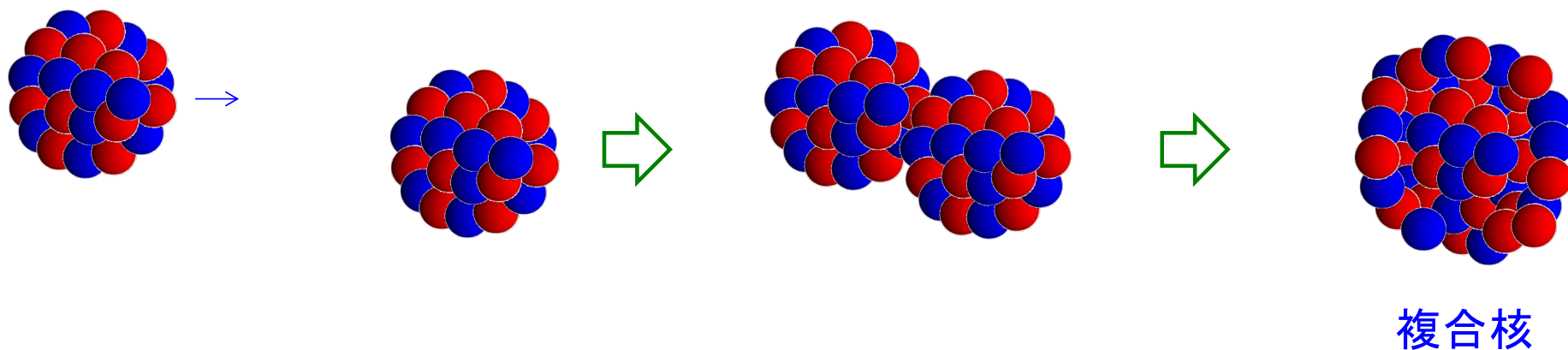
$$V_{\text{opt}}(r) = V(r) - iW(r) \longrightarrow f(\theta) \longrightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|^2$$

F.T. $\searrow$

$$\Phi(X, Y) \longrightarrow |\Phi(X, Y)|^2$$



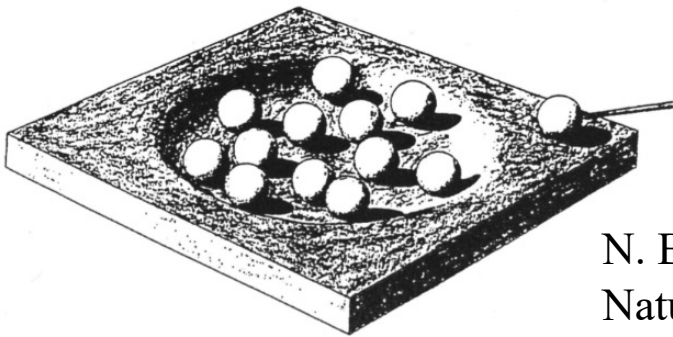
1. イントロダクション: 低エネルギー重イオン反応
2. **クーロン障壁近傍の重イオン核融合反応と多体トンネル現象**
3. 超重元素の物理
4. 核分裂の物理



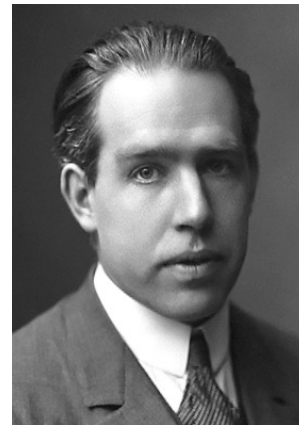
核融合反応： 複合核生成反応

Niels Bohr (1936)

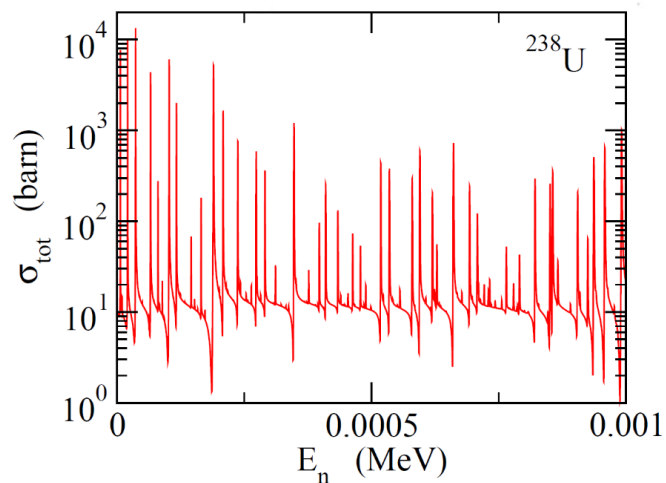
原子核による中性子の吸収 → 複合核



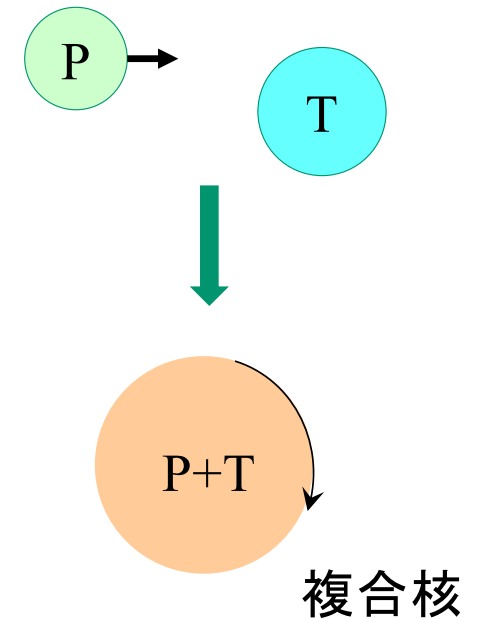
N. Bohr,
Nature 137 ('36) 351



Wikipedia

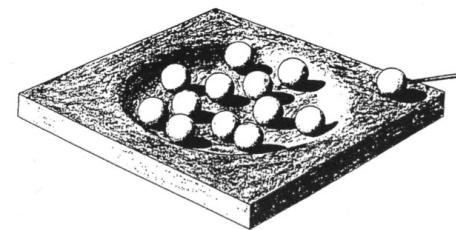
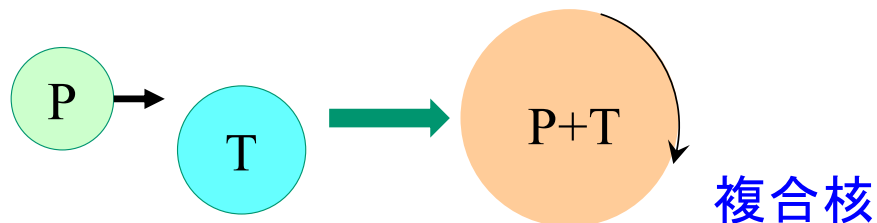


cf. フェルミの実験 (1935)
MeV スケールの原子核に
eV スケールの幅の多数の共鳴状態

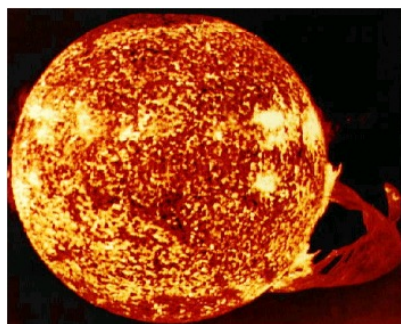


重イオン反応で複合核をつくる
= 重イオン核融合反応

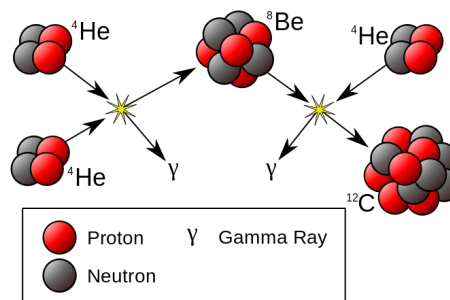
核融合反応：複合核生成反応



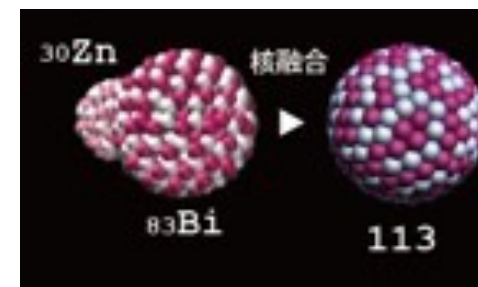
cf. N. Bohr '36



恒星のエネルギー源
(Bethe '39)



星の中での元素合成

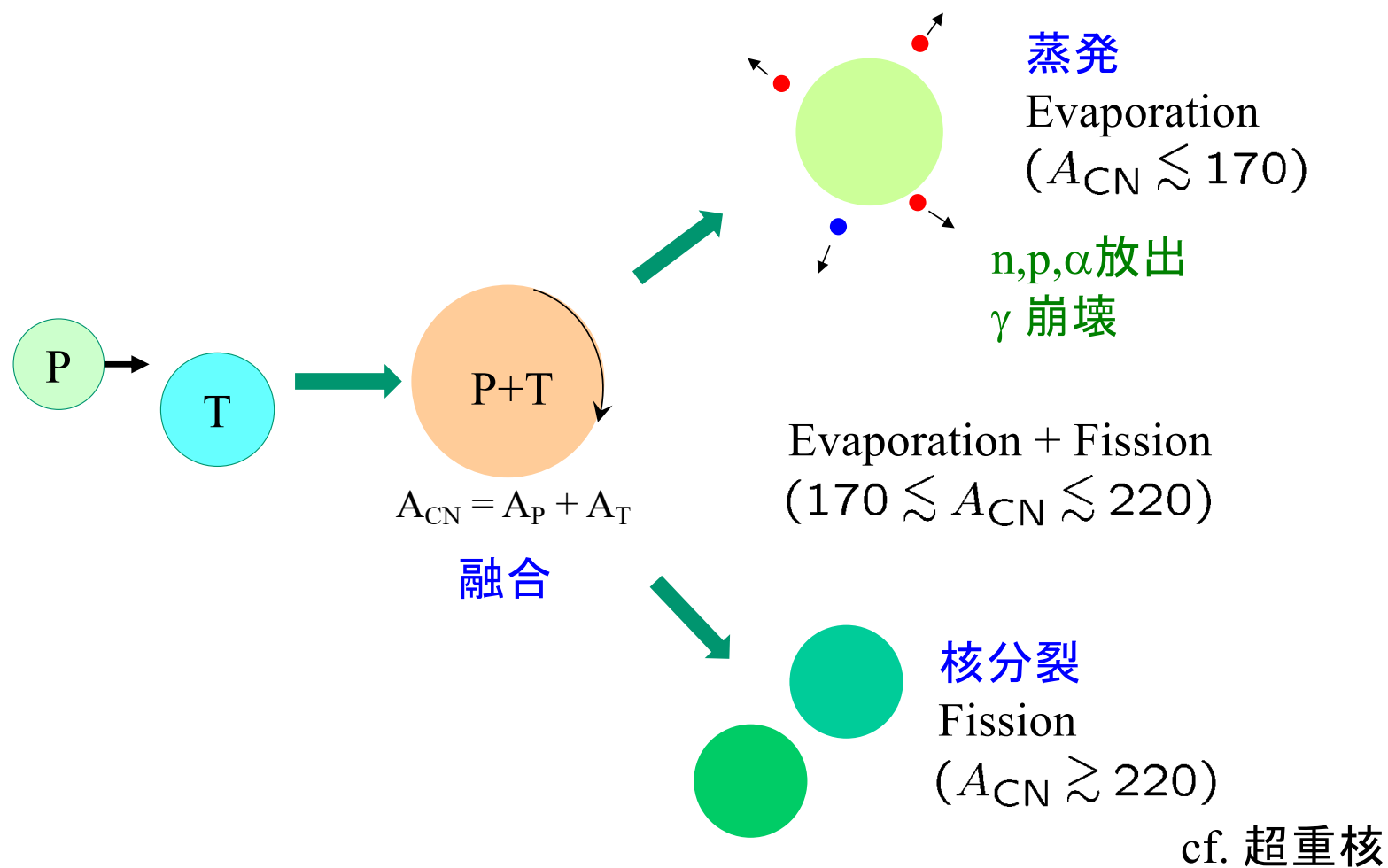


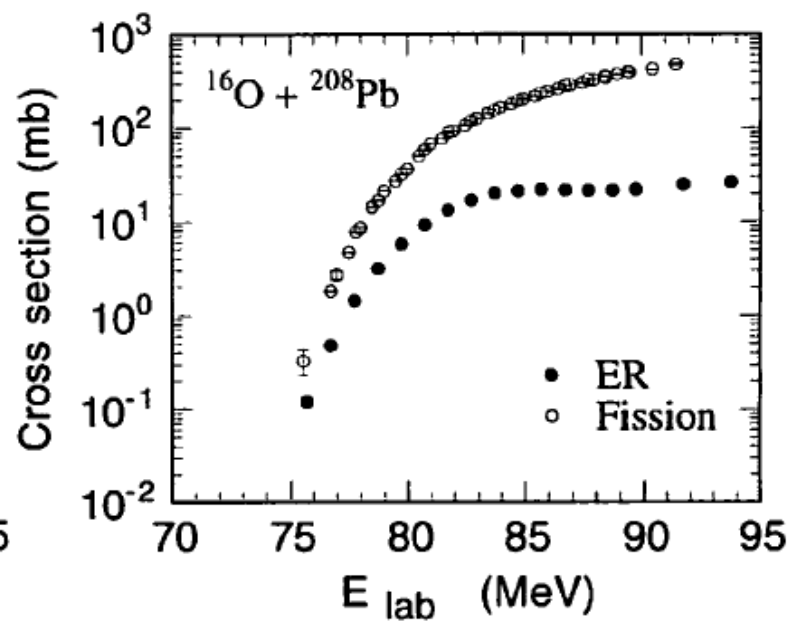
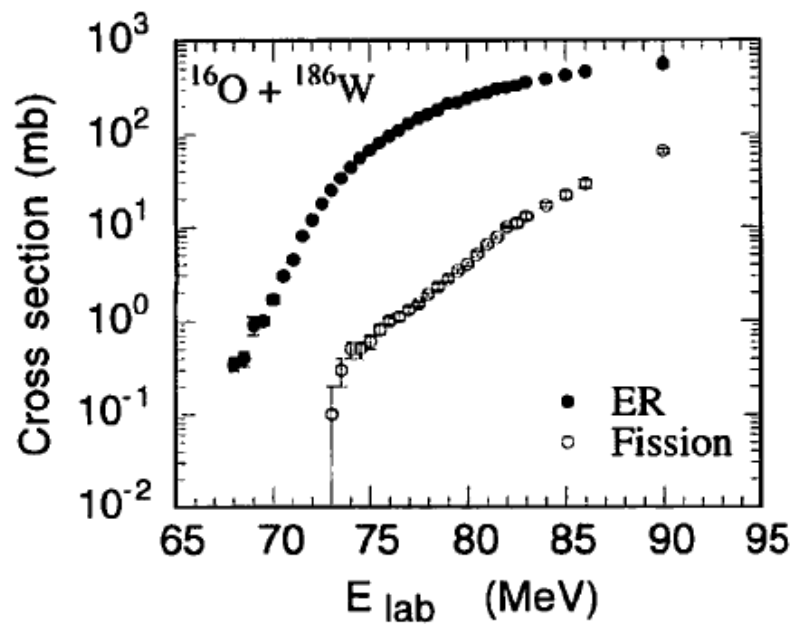
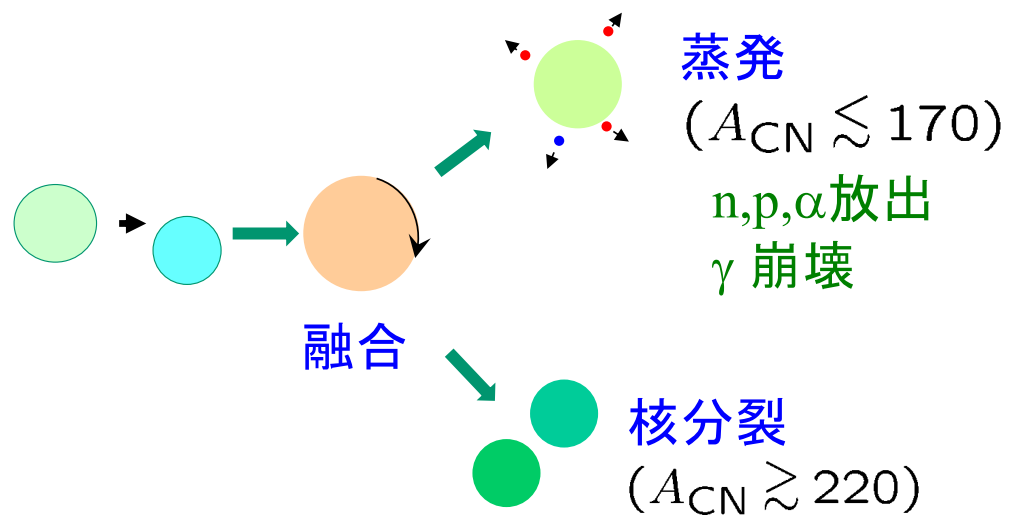
超重元素の合成
(←次の講義で)

核融合・核分裂: 強い相互作用をする量子多体系の大振幅集団運動

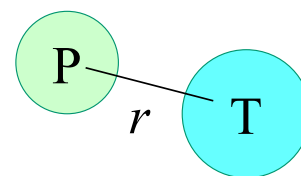
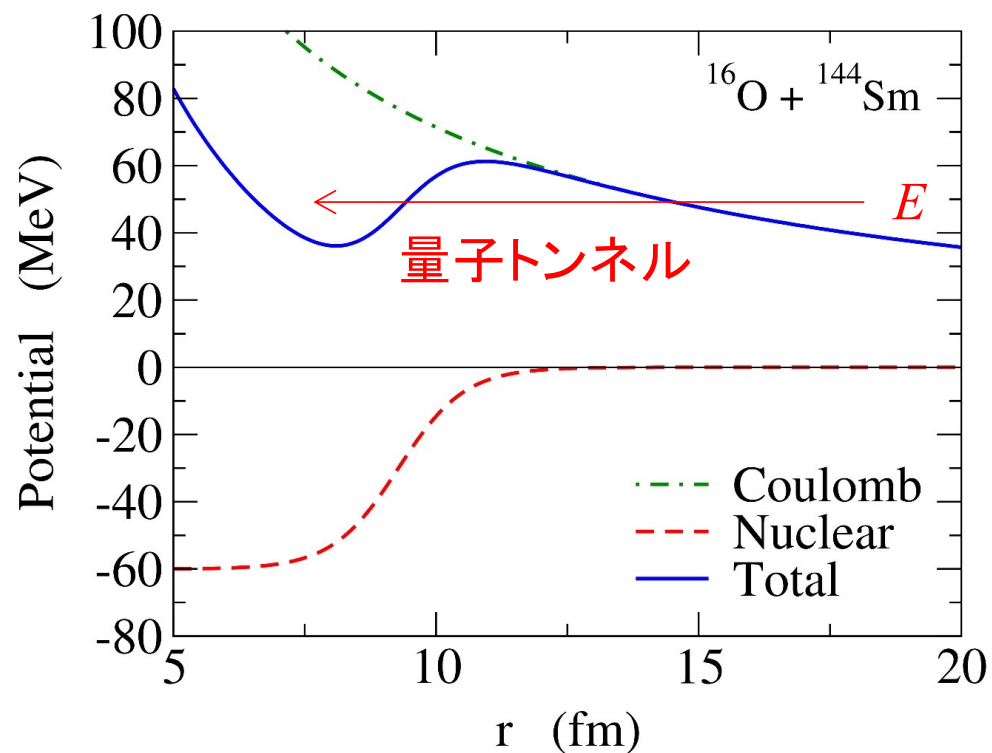
← 微視的理解: **核物理における究極の未解決問題**の一つ

核融合反応：複合核生成反応





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)

クーロン障壁の高さ→系のエネルギー・スケールを定める

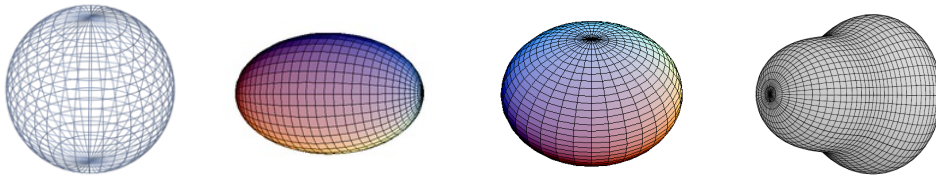
クーロン障壁近傍のエネルギーにおける核融合反応→多粒子系のトンネル現象

核融合反応と量子トンネル効果

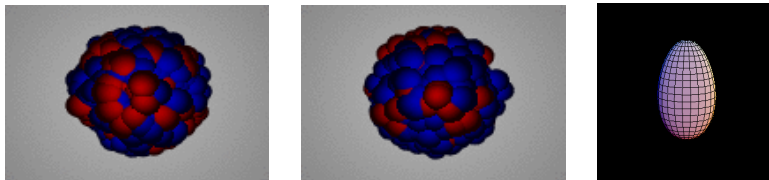
トンネル効果による核融合反応

多自由度

- 原子核の様々な形状



- 様々な表面振動



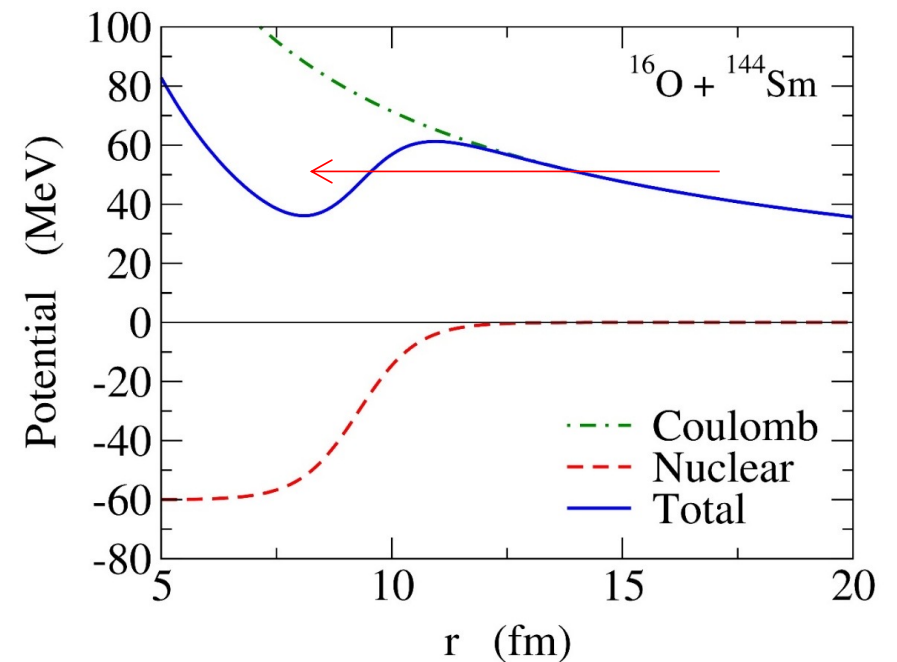
様々なモード、様々な励起エネルギー

- 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

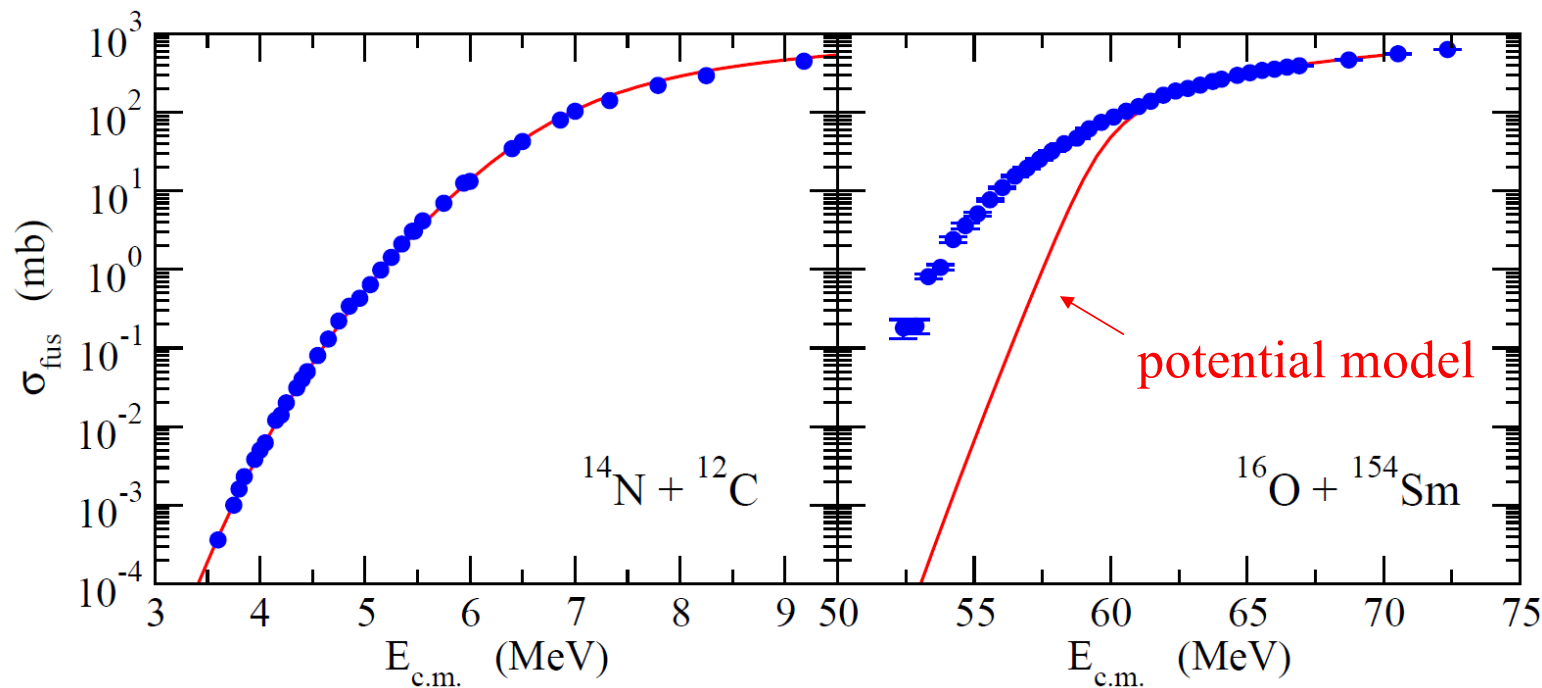
障壁以下のエネルギーにおける重イオン核融合反応



核融合反応断面積の大きな増大

ポテンシャル模型: $V(r)$ + 吸収

$$\sigma_{\text{fus}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_l (2l+1)(1 - |S_l|^2)$$



ポテンシャル模型:

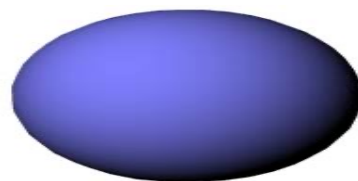
$E > V_b$ では大体データを再現

$E < V_b$ では核融合断面積を過小に評価

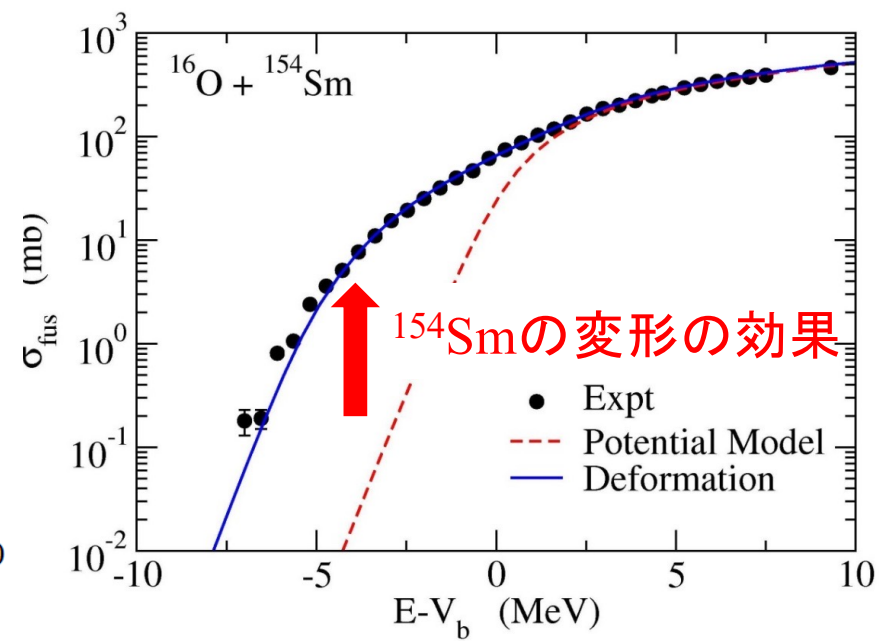
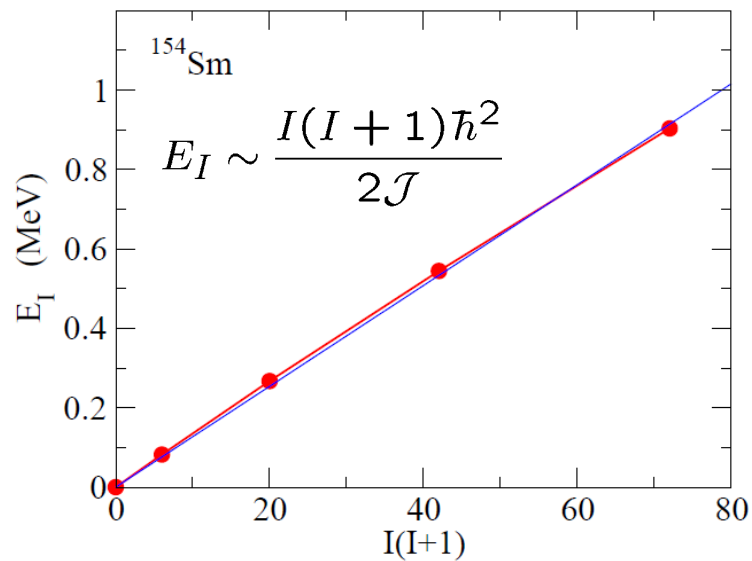
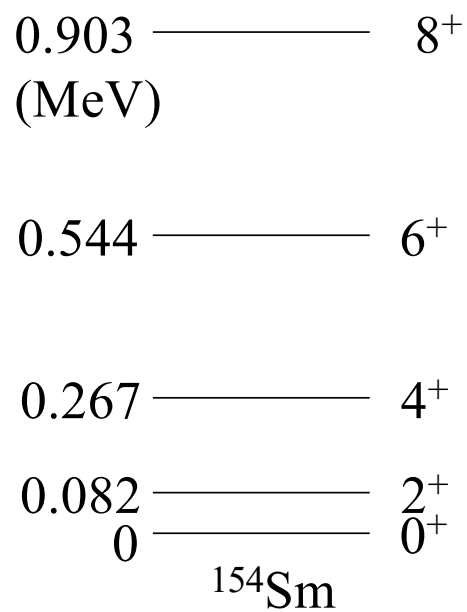
cf. 初期の実験:

R.G. Stokstad et al., PRL41('78) 465

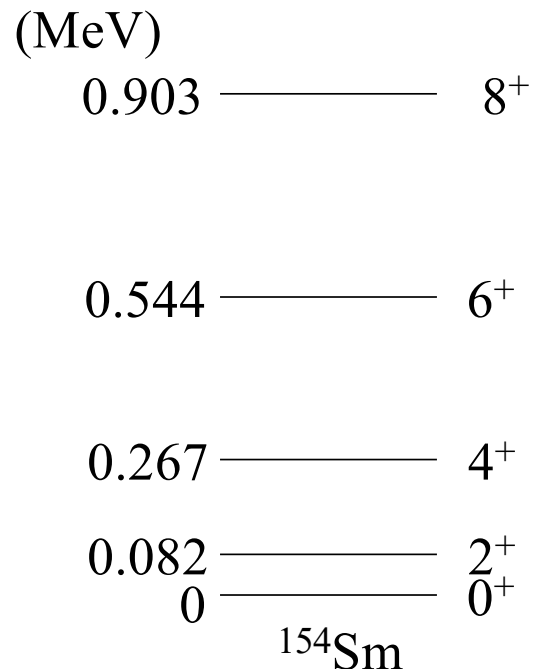
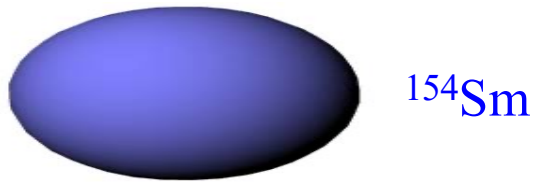
^{154}Sm : 典型的な変形核



^{154}Sm



核融合反応と原子核の変形



回転スペクトル

小さい回転エネルギー

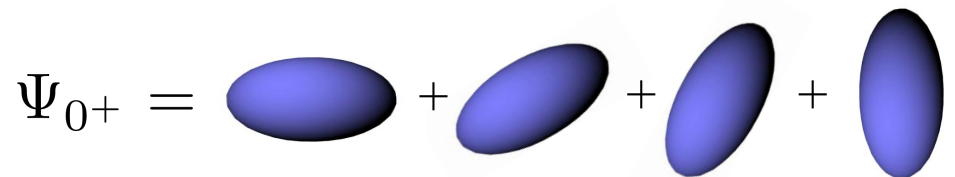
$$E_I = \frac{I(I+1)\hbar^2}{2\mathcal{J}}$$

→ 大きい慣性能率 $\mathcal{J}$

→ 回転: ゆっくりとした自由度

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

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



→ 実験室では球対称

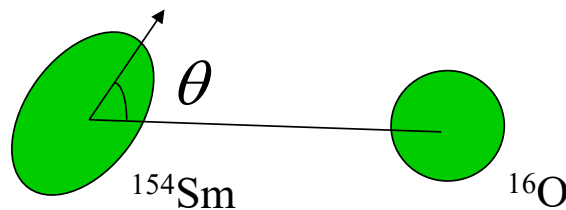
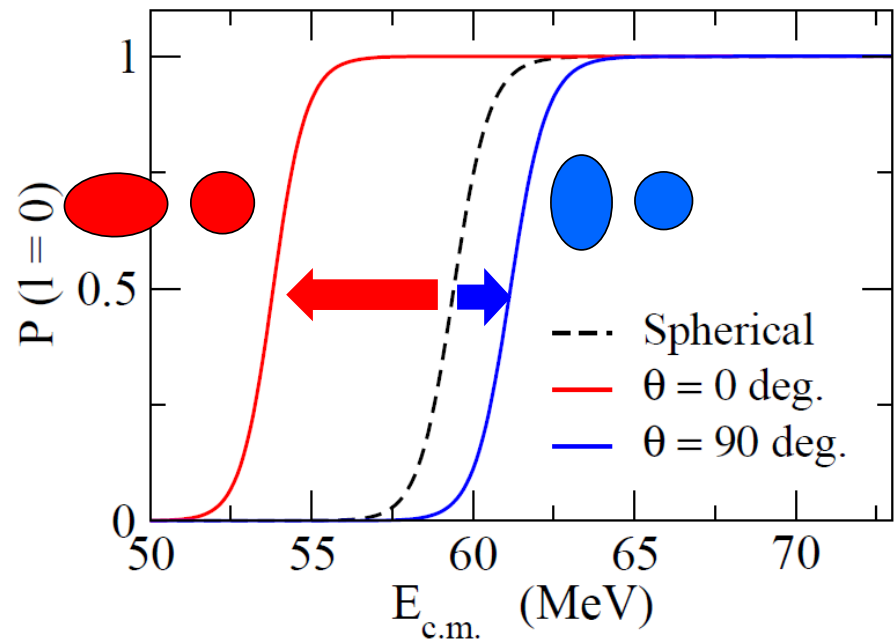
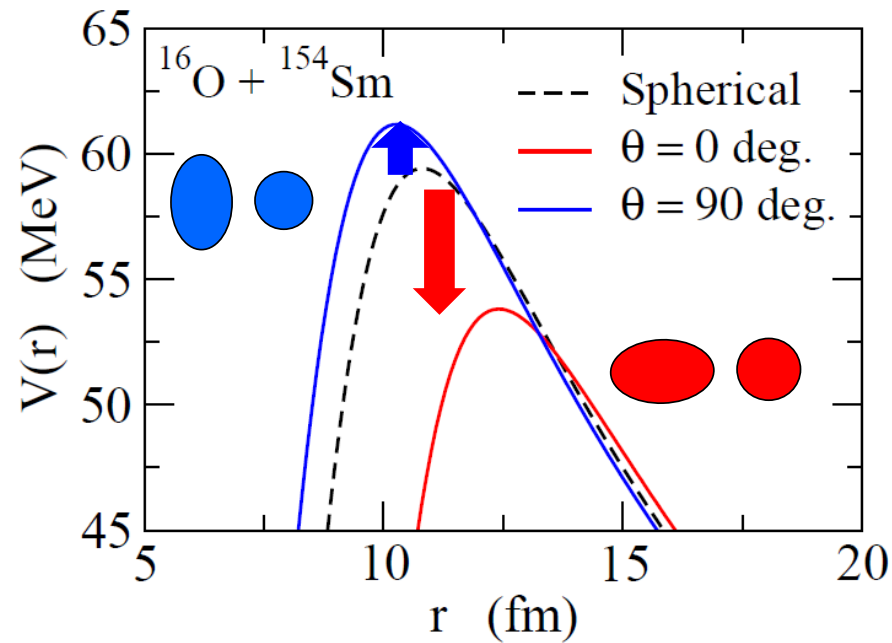
角度を固定して核融合反応断面積を計算

→ 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」

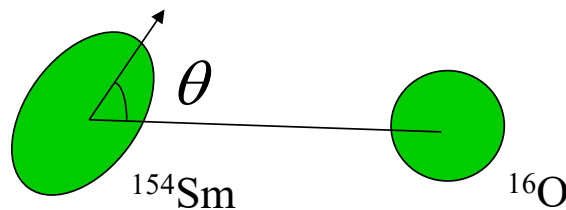
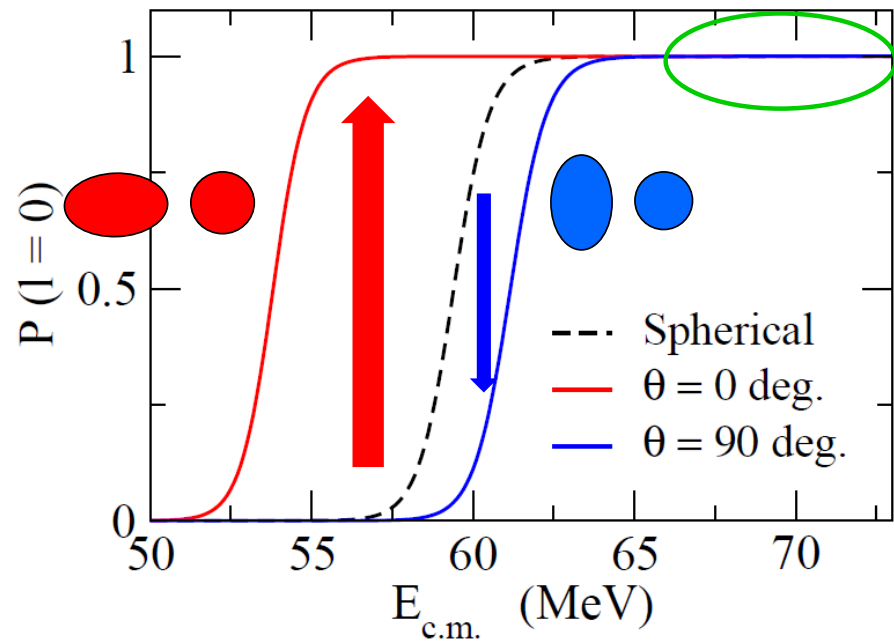
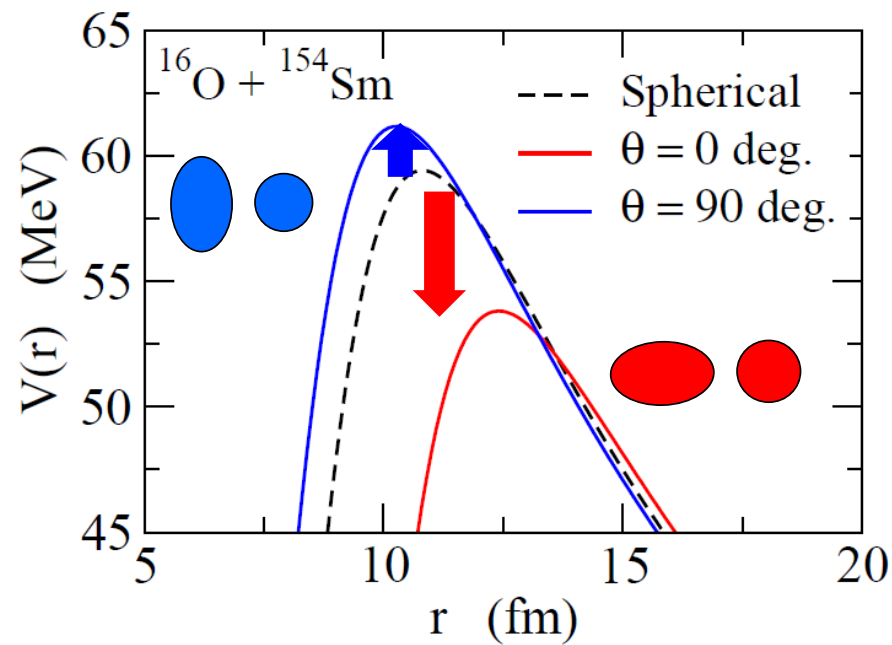
核融合反応と原子核の変形

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

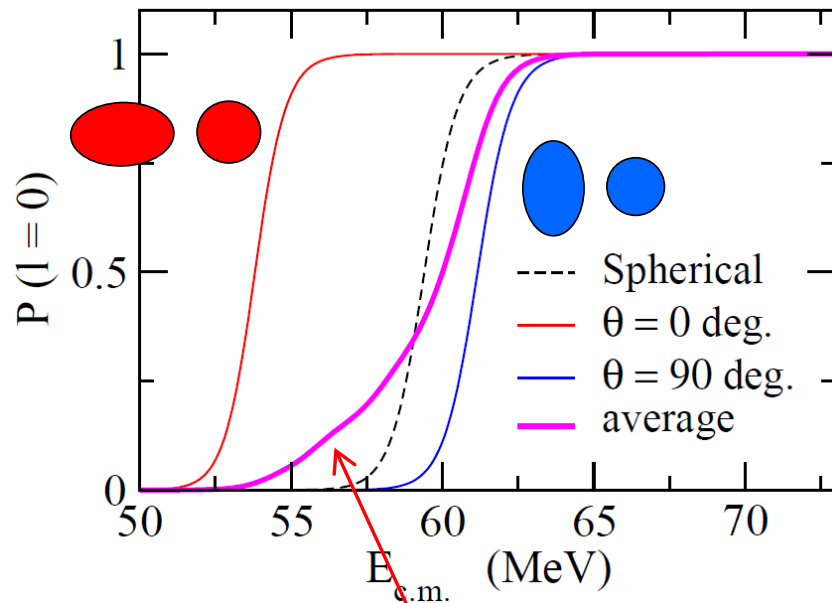


核融合反応と原子核の変形

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

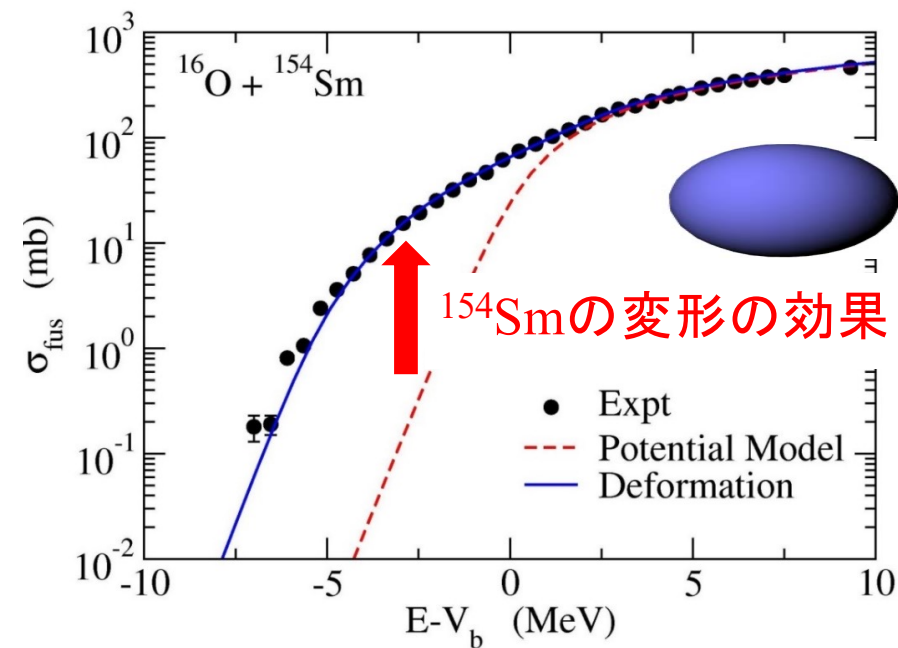


核融合反応と原子核の変形



角度平均後

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

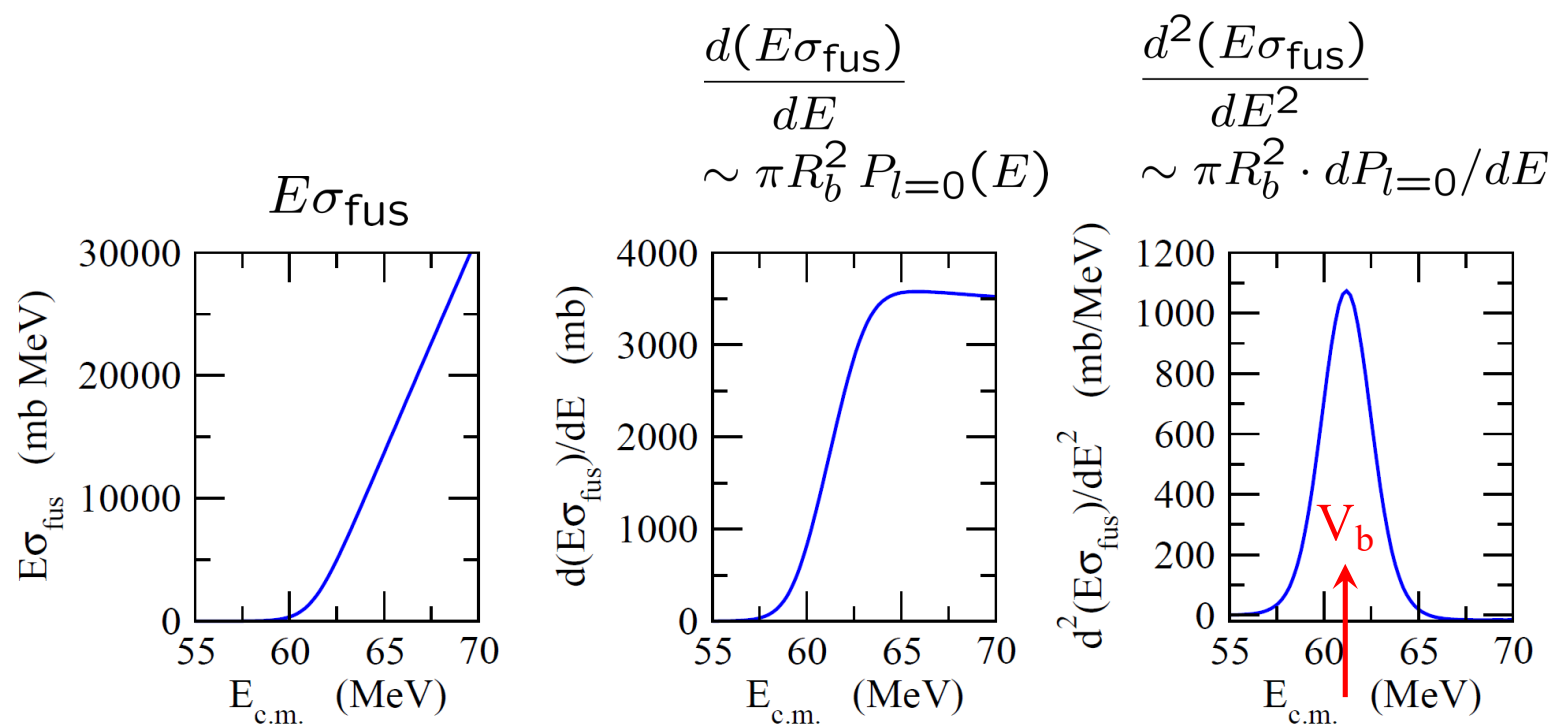


核融合反応：核構造との強いインタープレイ

障壁分布

$$D_{\text{fus}}(E) = \frac{d^2(E\sigma_{\text{fus}})}{dE^2} \propto \frac{dP_{l=0}}{dE}$$

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

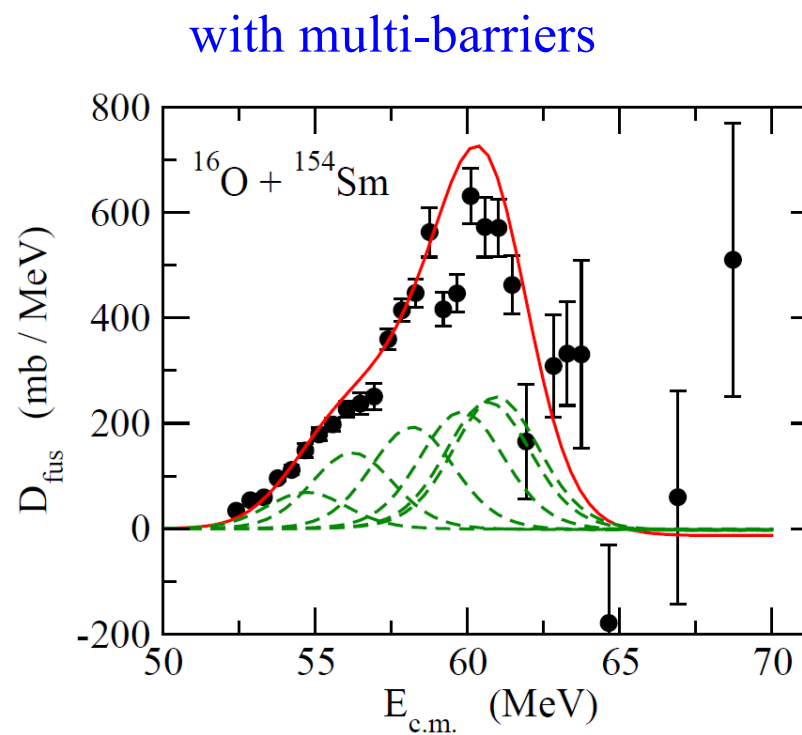
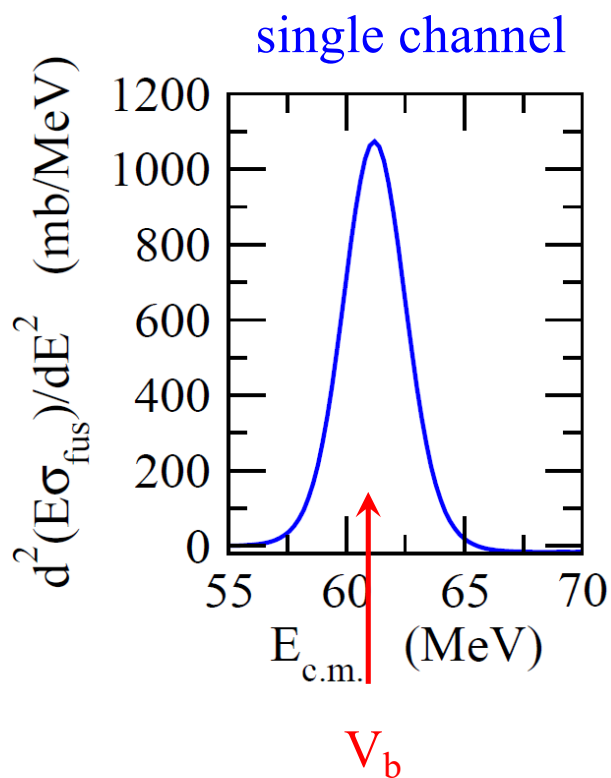


K.Hagino and N. Takigawa, PTP128 ('12) 1061

障壁分布

$$D_{\text{fus}}(E) = \frac{d^2(E\sigma_{\text{fus}})}{dE^2} \propto \frac{dP_{l=0}}{dE}$$

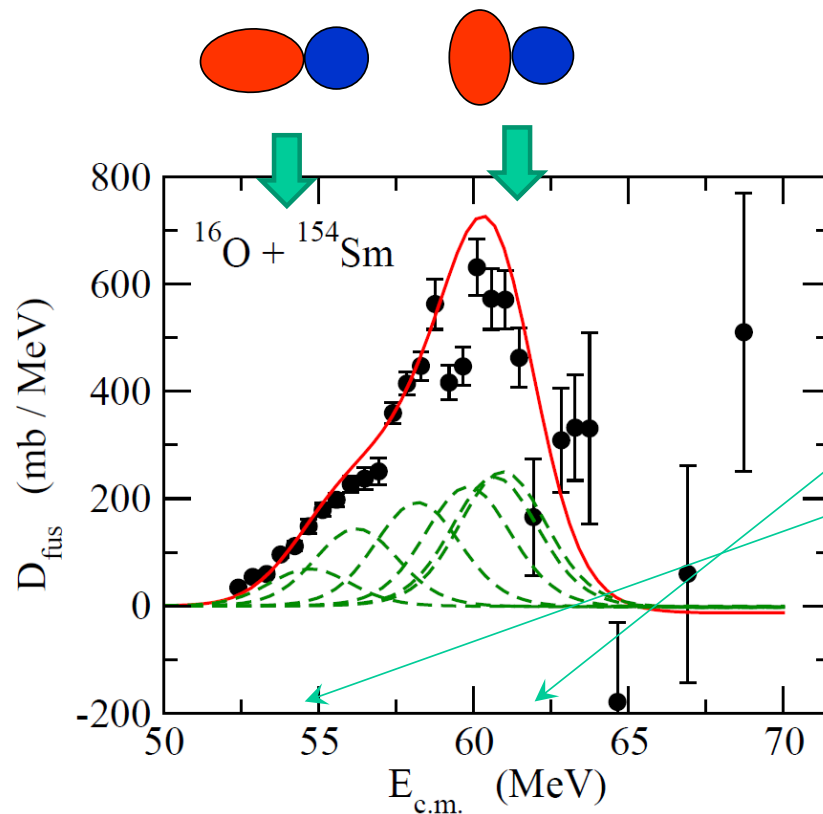
N. Rowley, G.R. Satchler, and P.H. Stelson, PLB254 ('91) 25



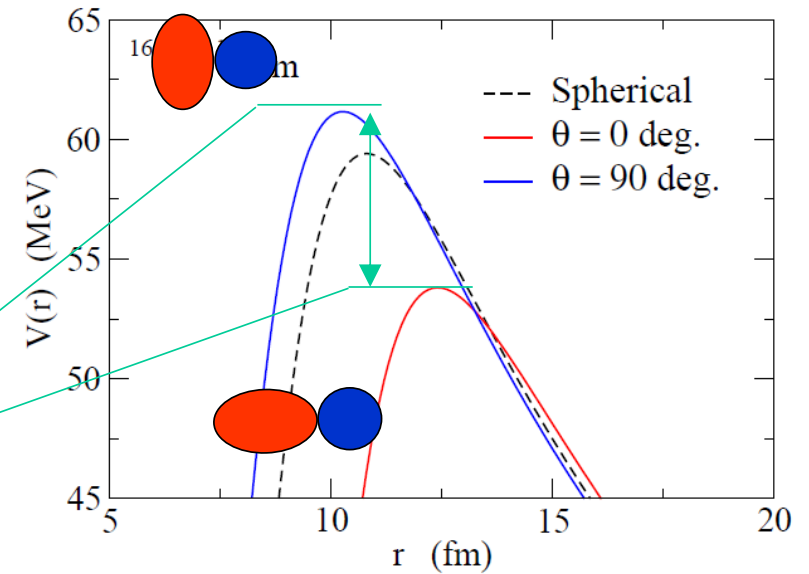
K.Hagino and N. Takigawa, PTP128 ('12) 1061

✓ 障壁分布 (Rowley, Satchler, Stelson, PLB254('91) 25)

$$D_{\text{fus}}(E) = \frac{d^2(E\sigma_{\text{fus}})}{dE^2} \sim \pi R_b^2 \frac{dP_{l=0}}{dE}$$



Data: J.R. Leigh et al., PRC52 (1995) 3151

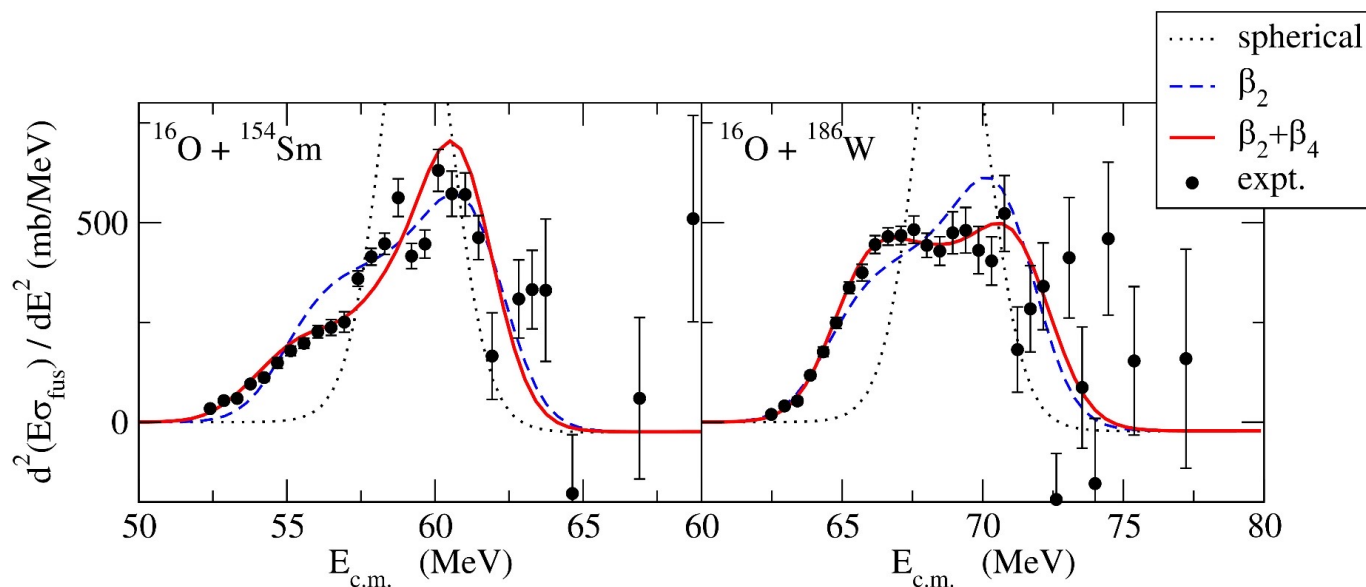
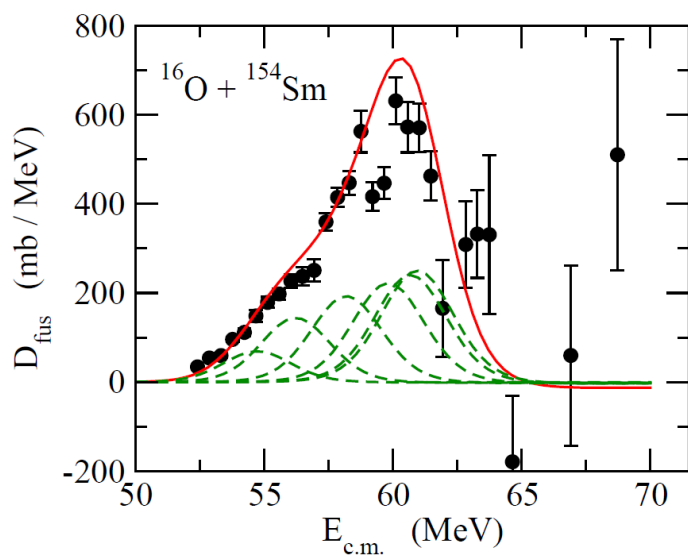


障壁分布を測ることで、 $\theta = \pi/2$ の障壁の高さがわかる→超重元素生成反応で重要
(次の時間に)

障壁分布

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

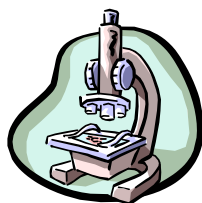
N. Rowley, G.R. Satchler, and
P.H. Stelson, PLB254 ('91) 25



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

$$\beta_2 = 0.33$$

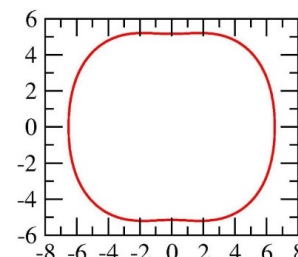
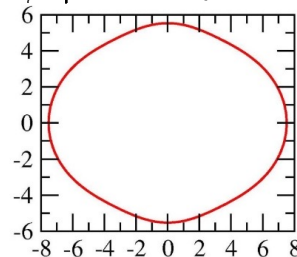
$$\beta_4 = +0.05$$



β_4 の符号に敏感!

$$\beta_2 = 0.29$$

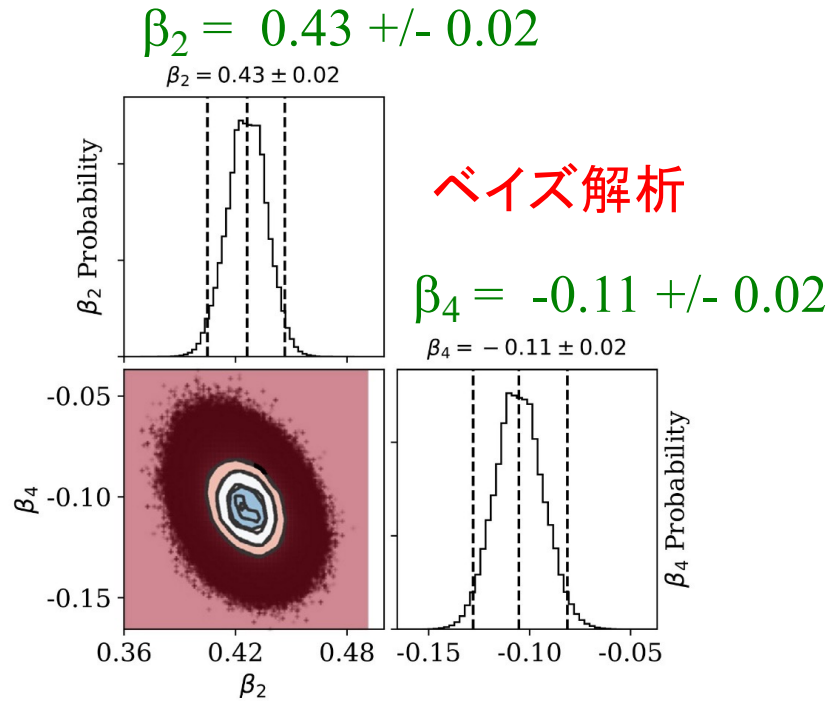
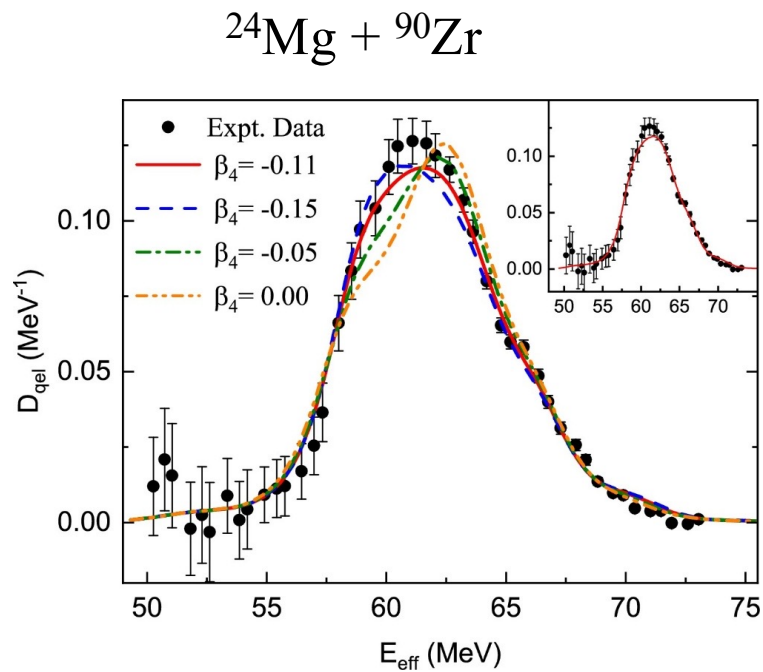
$$\beta_4 = -0.03$$



→ 核融合反応を使って原子核の形を視る

^{24}Mg の β_4 を障壁分布を使って決める

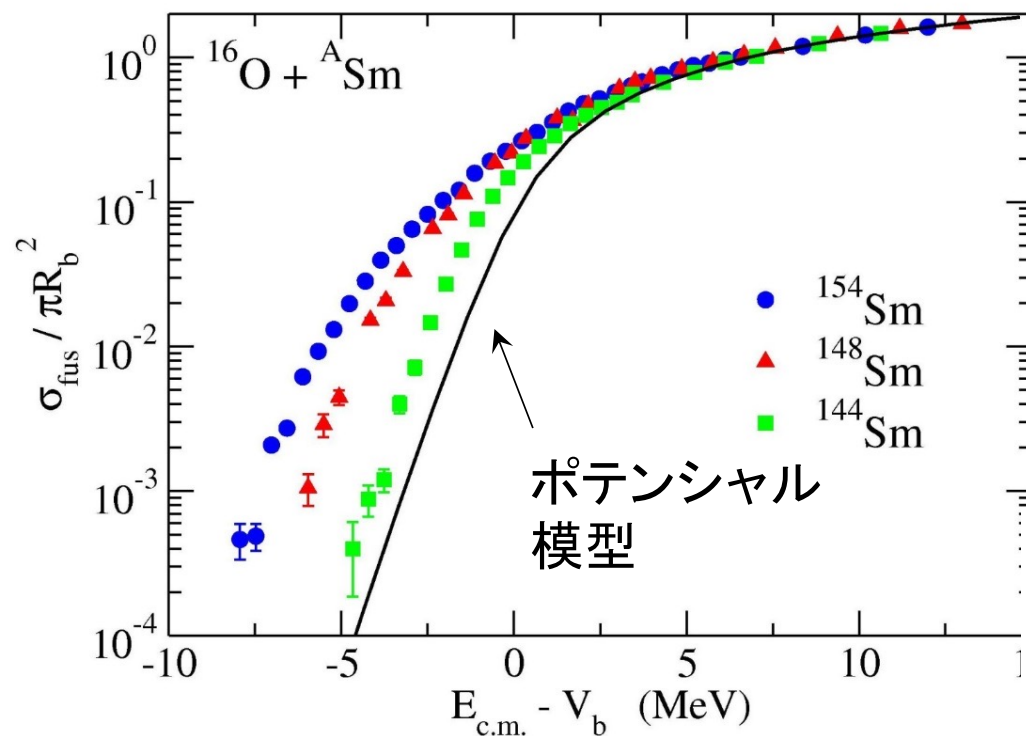
Y.K. Gupta, B.K. Nayak, U. Garg, K.H., et al., PLB806, 135473 (2020).



β_4 の高精度決定 → はじめて

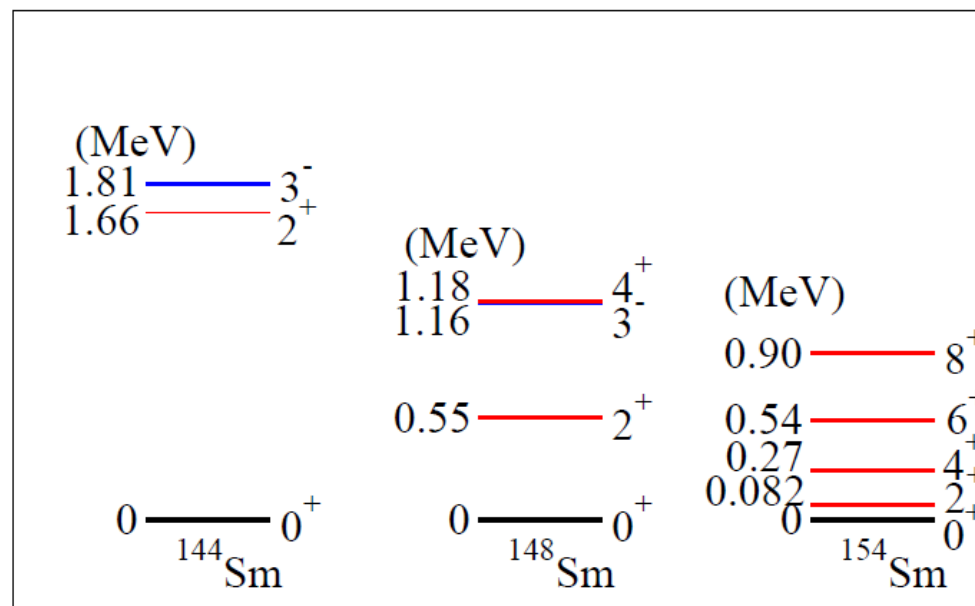
cf. (p,p'): $\beta_4 = -0.05 \pm 0.08$

R. De Swiniarski et al., PRL23, 317 (1969)

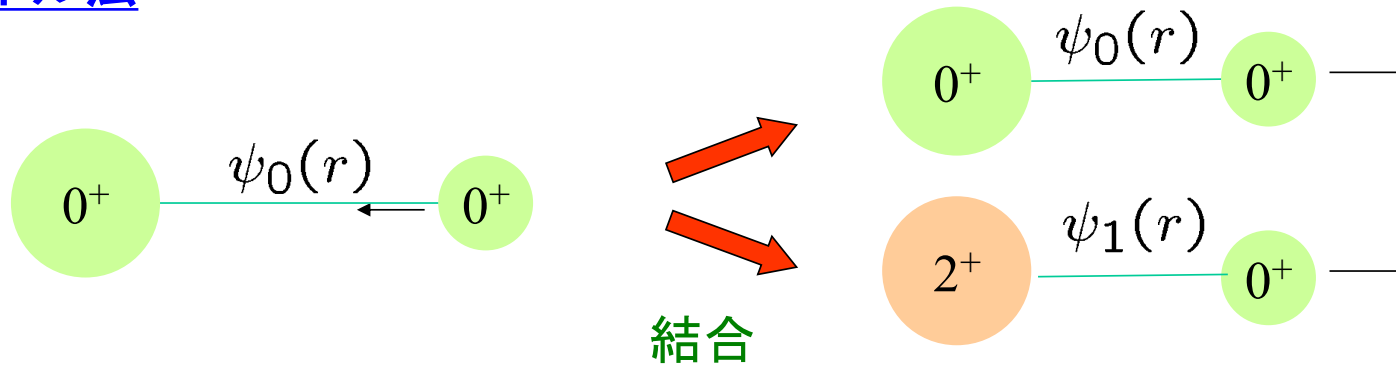


核構造の強い影響は
変形していない原子核でも

原子核のスペクトルと強い相関
→ 集団励起との結合がトンネル効果を
アシストする



結合チャンネル法



$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + \overleftrightarrow{V}(r) - \overleftrightarrow{E} \right] \overleftrightarrow{\psi}(r) = 0$$

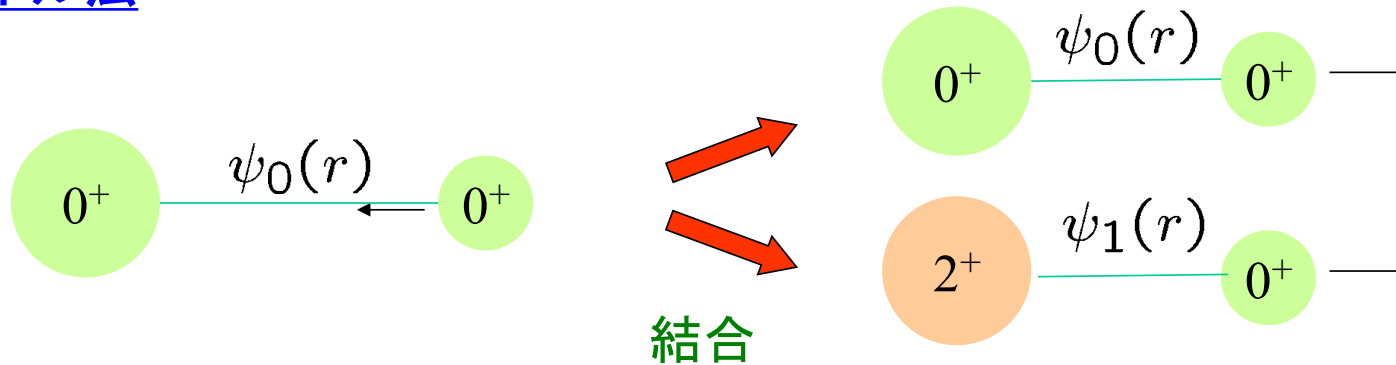
より顕に書くと:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + V_0(r) + \epsilon_k - E \right] \psi_k(r) + \sum_{k'} \langle \phi_k | V_{\text{coup}} | \phi_{k'} \rangle \psi_{k'}(r) = 0$$

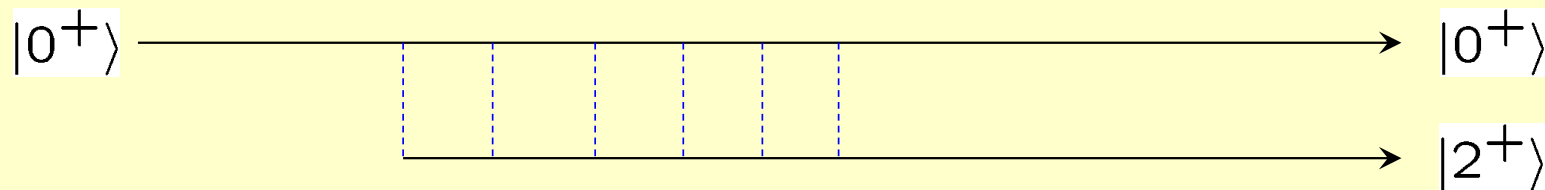
励起エネルギー

励起オペレーター

結合チャンネル法



$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 + V_0(r) + \epsilon_k - E \right] \psi_k(\mathbf{r}) + \sum_{k'} \langle \phi_k | V_{\text{coup}} | \phi_{k'} \rangle \psi_{k'}(\mathbf{r}) = 0$$



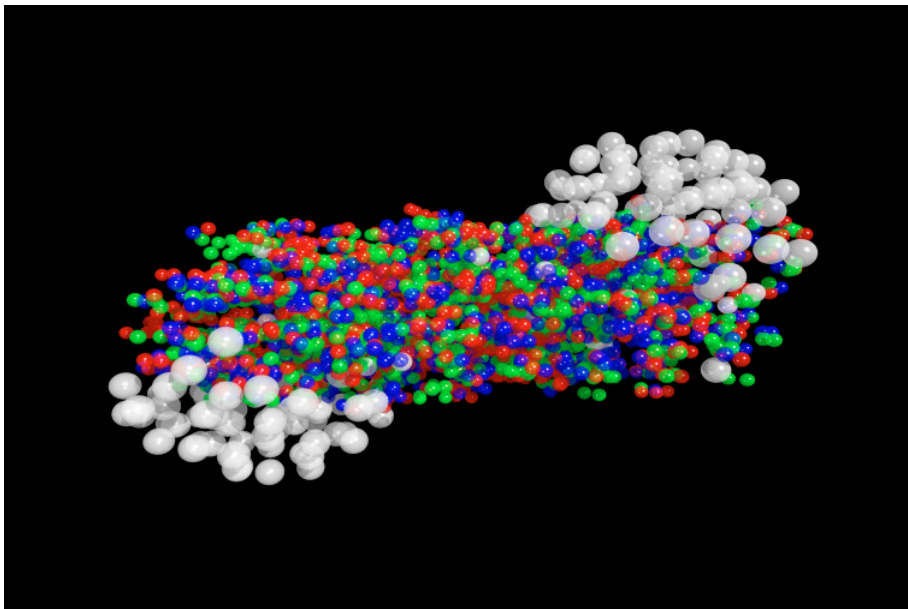
反応途中の励起・脱励起のダイナミクスをフル・オーダーで扱う

レビュー論文 : K. Hagino, K. Ogata, and A.M. Moro,
Prog. in Part. and Nucl. Phys. 125 (2022) 103951

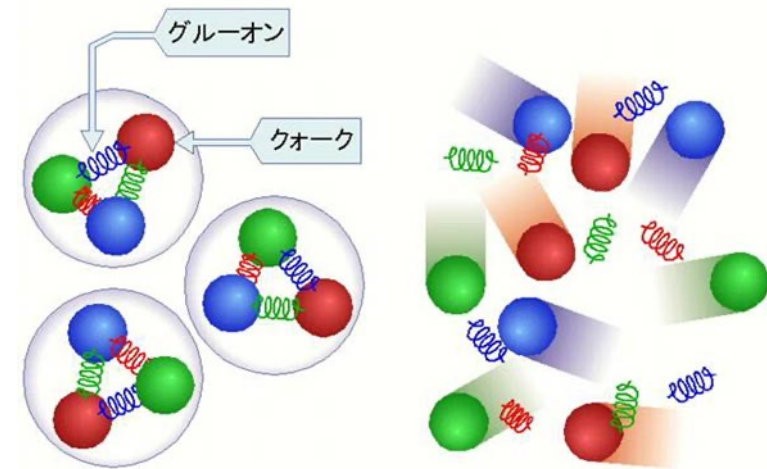
関連話題: 相対論的重イオン衝突で見る原子核の形

この数年、相対論的重イオン衝突で原子核の形を見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>



<http://kakudan.rcnp.osaka-u.ac.jp/jp/overview/world/QGP.html>

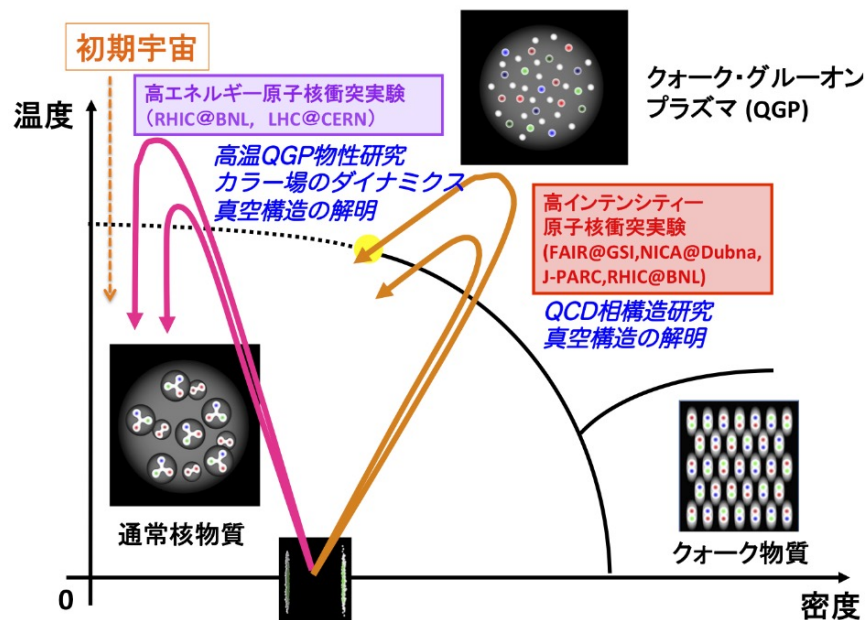
通常、核子の中にクォークやグルーオンが閉じ込められているが、超高エネルギーで原子核をぶつけることにより、それを解放する。

「クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)」

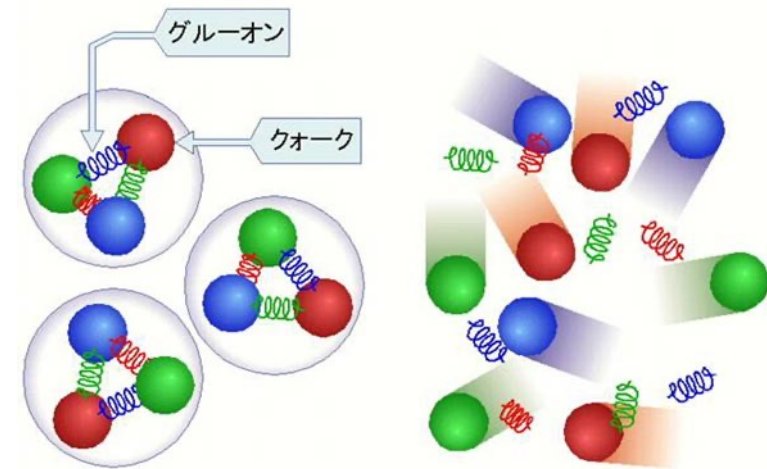
相対論的重イオン衝突で見る原子核の形

この数年、相対論的重イオン衝突で原子核の形を見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



これにより核物質の相図を解明する



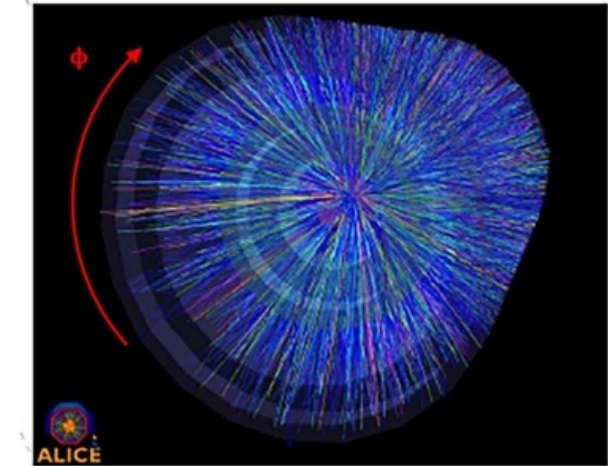
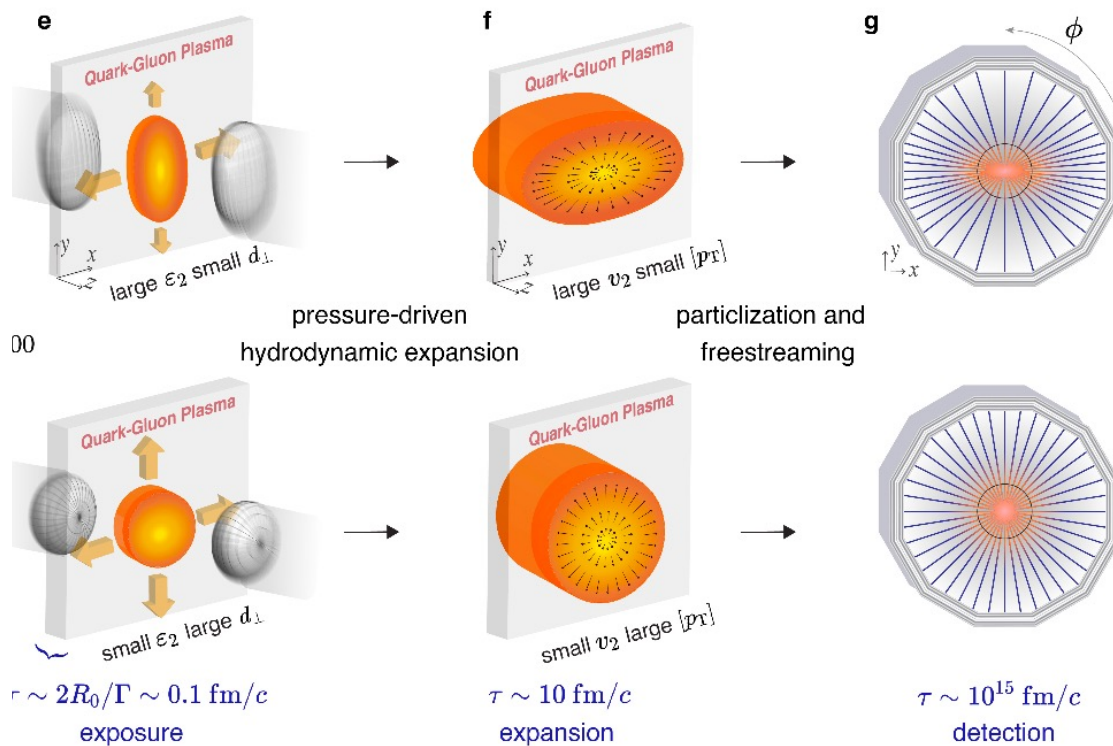
<http://kakudan.rcnp.osaka-u.ac.jp/jp/overview/world/QGP.html>

通常、核子の中にクォークやグルーオンが閉じ込められているが、超高エネルギーで原子核をぶつけることにより、それを解放する。

「クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)」

相対論的重イオン衝突で見る原子核の形

the initial shape
of QGP



原子核が変形すると、QGPの初期形状が変わり、それが最終的に測定される粒子の分布の変化に反映される
→ そこから原子核の変形を読み取る

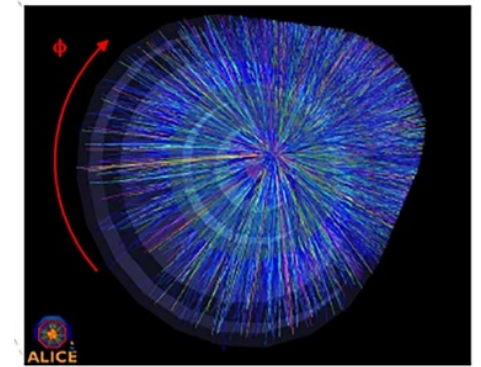
STAR collaboration, Nature 635, 67 (2024)

相対論的重イオン衝突で見る原子核の形

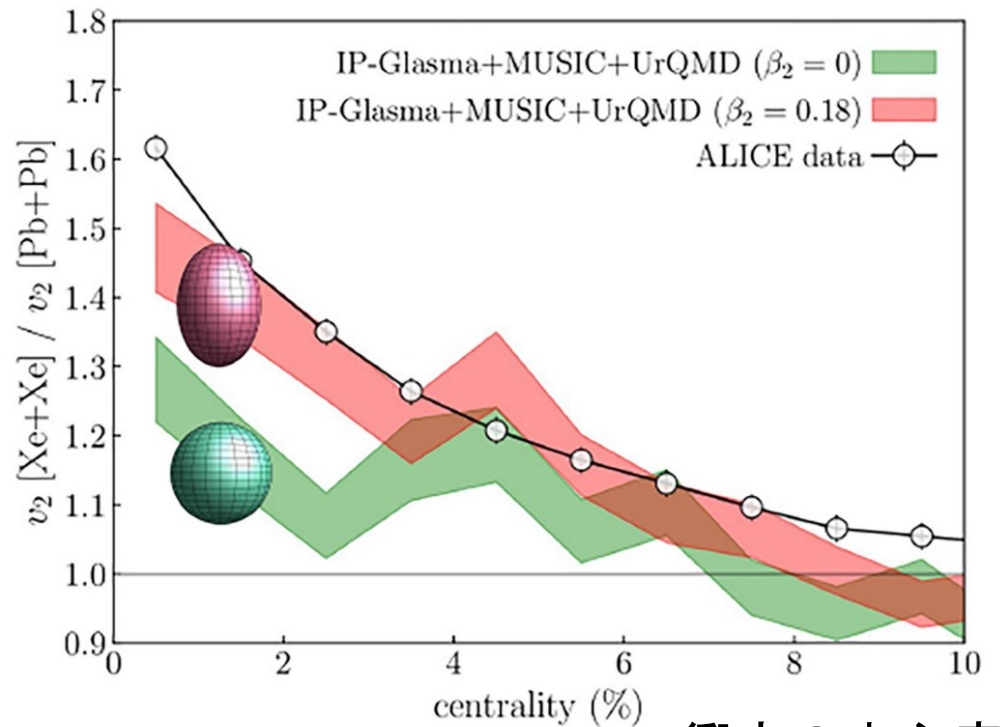
フロー:

測定される粒子数分布

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



楕円フロー (elliptic flow) v_2



衝突の中心度

$^{129}\text{Xe}+^{129}\text{Xe}$ と $^{208}\text{Pb}+^{208}\text{Pb}$ の比

→ ^{129}Xe 核は変形している

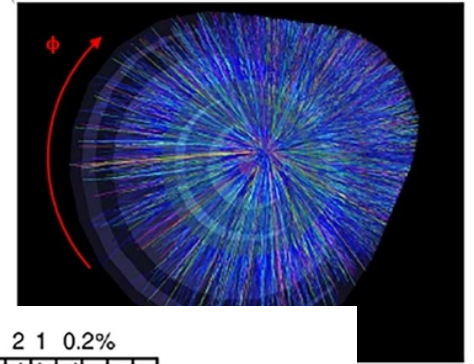
J. Jia et al., Nucl. Sci. Tech. 35, 220 (2024)

相対論的重イオン衝突で見る原子核の形

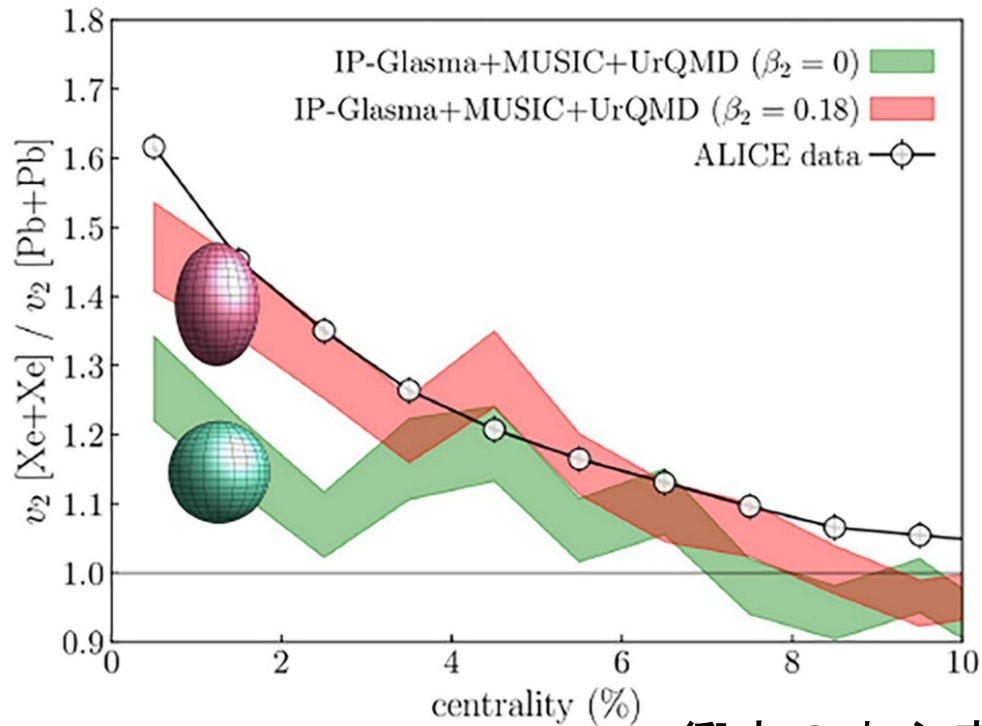
フロー:

測定される粒子数分布

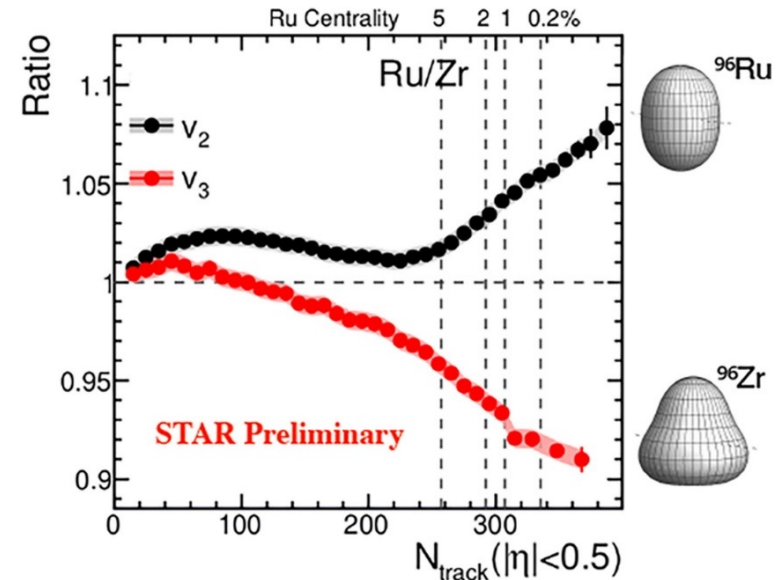
$$\frac{1}{N} \frac{dN}{d\phi} = \frac{1}{2\pi} \left[1 + 2 \sum_n v_n \cos(n\phi) \right]$$



楕円フロー (elliptic flow) v_2



衝突の中心度



$^{96}\text{Ru} + ^{96}\text{Ru}$ と $^{96}\text{Zr} + ^{96}\text{Zr}$ の比

→ ^{96}Zr の8重極変形

J. Jia et al., Nucl. Sci. Tech. 35, 220 (2024)

相対論的重イオン衝突で見る原子核の形

フロー:

測定される粒子数分布

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

他にも:

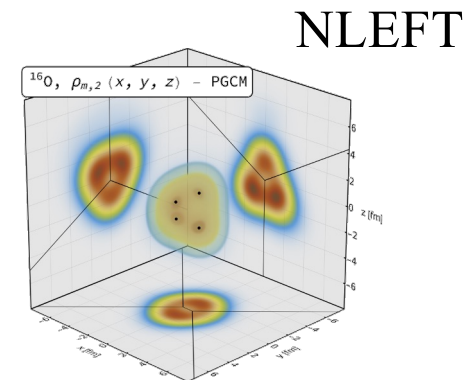
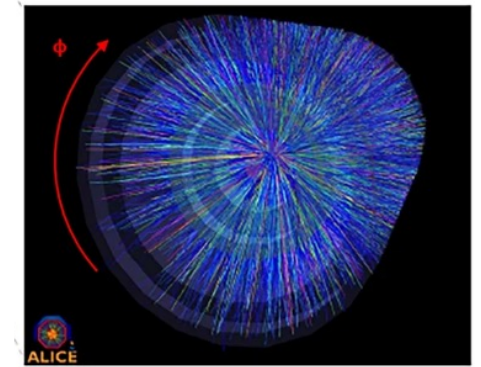
✓ 3軸非対称 (γ) 変形



- G. Aad et al., PRC107, 054910 (2023)
- STAR collaboration, Nature 635, 67 (2024)

✓ α クラスタ

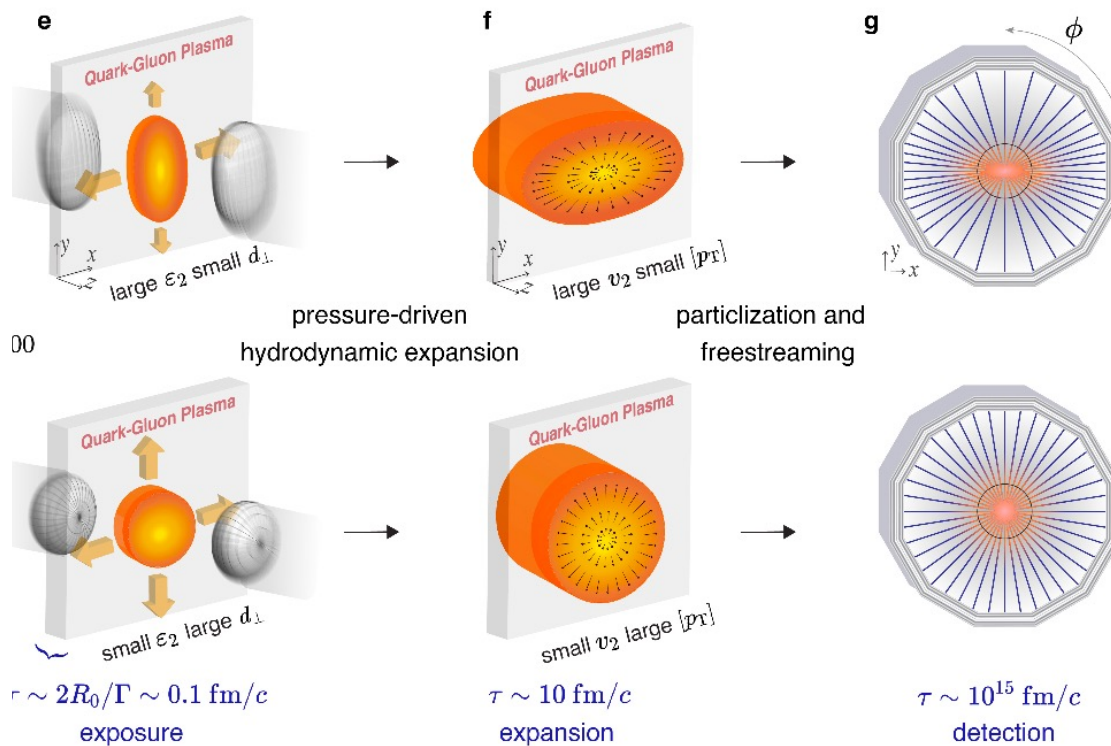
- $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$: ALICE, preliminary
- Y. Wang et al., PRC109, L051904 (2024)



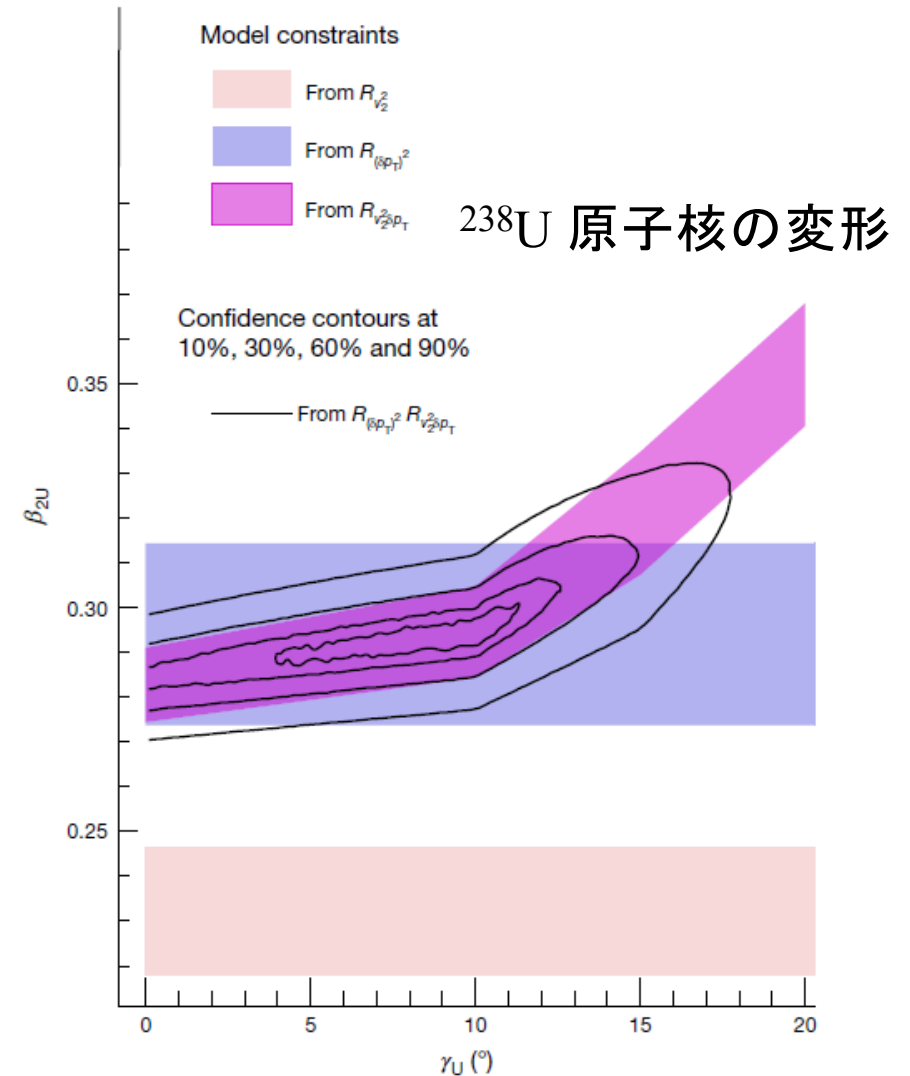
G. Giacalone et al.,
arXiv: 2402.05995

相対論的重イオン衝突で見る原子核の形

the initial shape of QGP

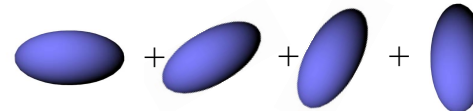
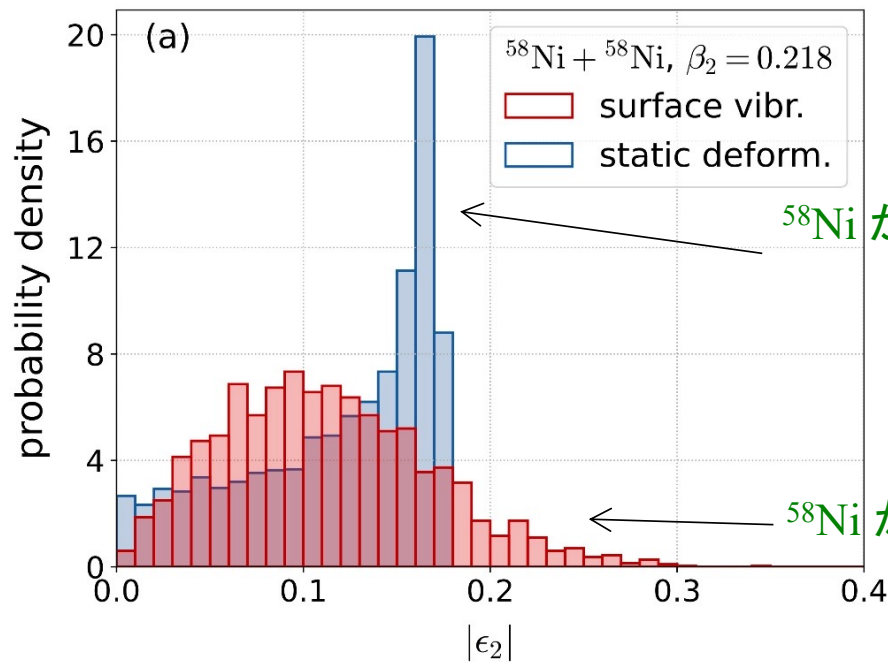


STAR collaboration, Nature 635, 67 (2024)



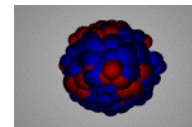
相対論的重イオン衝突で見る原子核の形

$^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 衝突

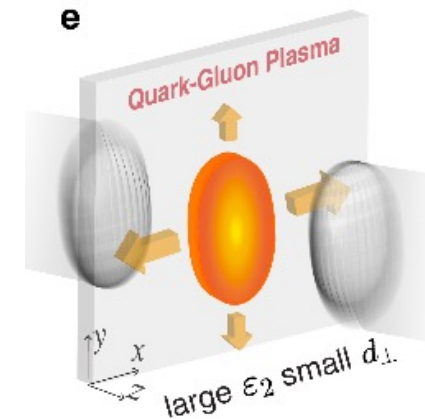


$$\langle |\epsilon_2| \rangle = 0.119$$

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



エクセントリシティ・パラメータ



$$\rho_z(x, y) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} dz \rho(\mathbf{r})$$

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

(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

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

まとめ



原子核反応

◆ 核構造のためのツールとしての原子核反応

◆ さまざまな量子現象を示す興味深い研究対象

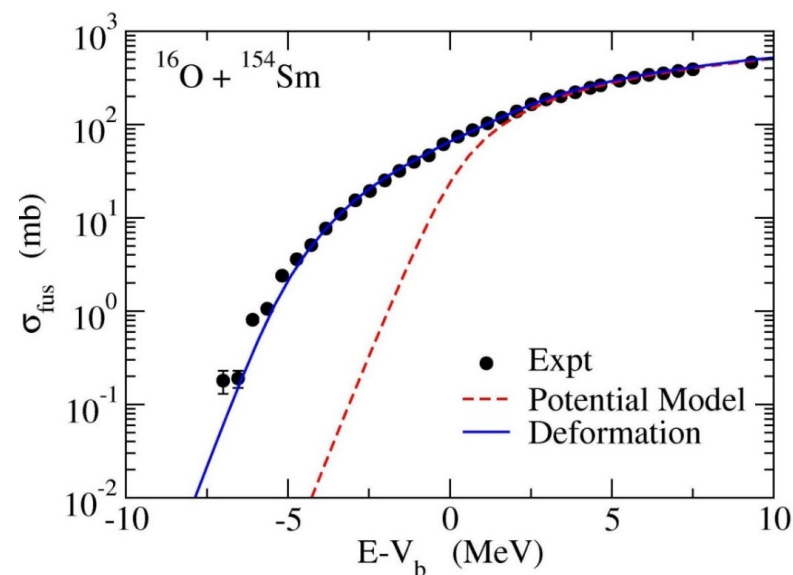
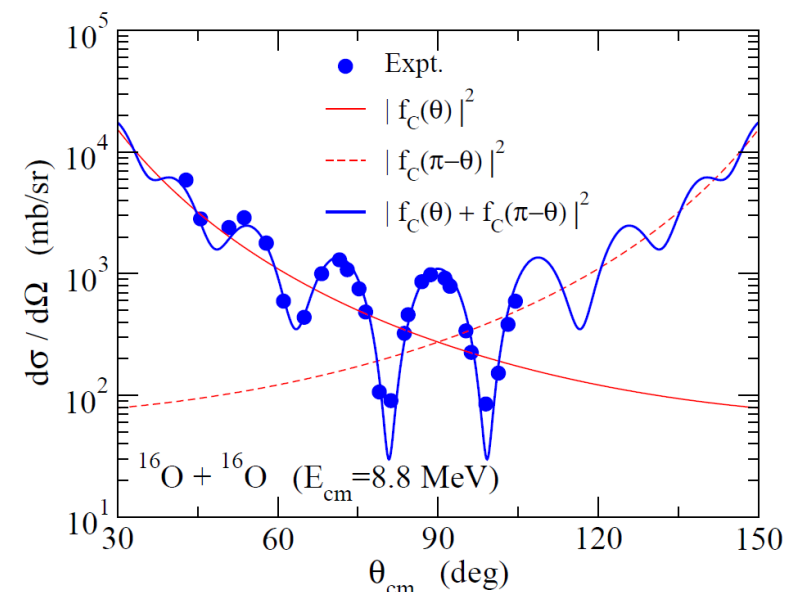
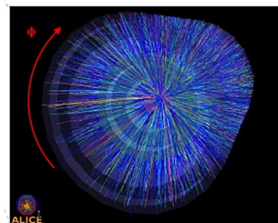
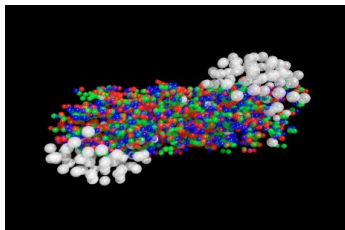
✓ 量子干渉現象(モット散乱など)

✓ 多体系の量子トンネル現象

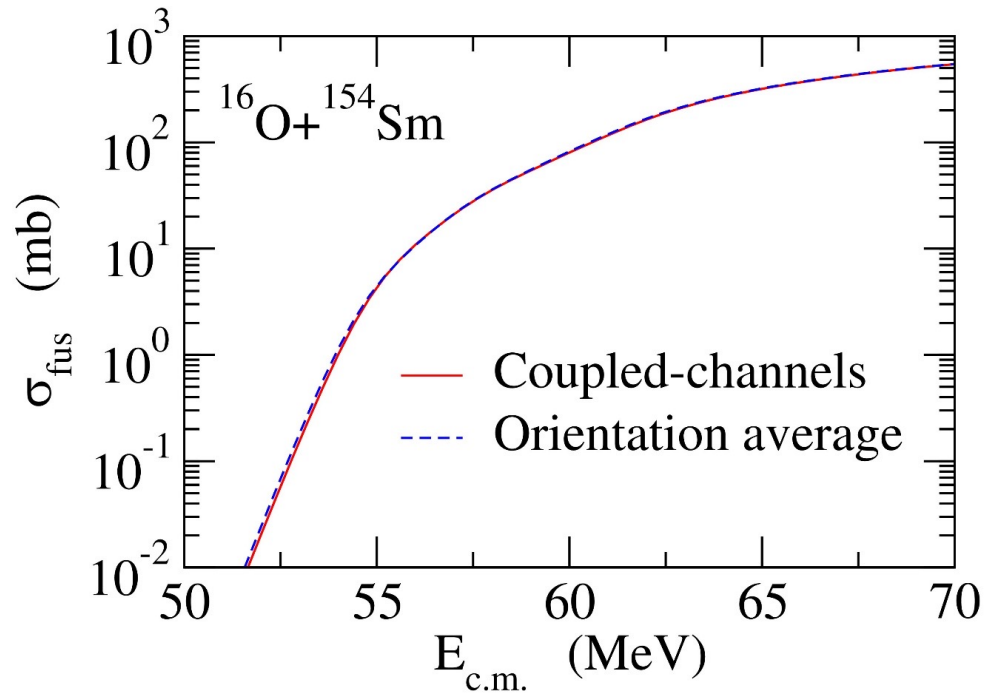
→ 核構造と核反応の強いインタープレイ
: 集団励起との結合による核融合反応
断面積の増幅現象

□ 最近の大きな流れの一つ:

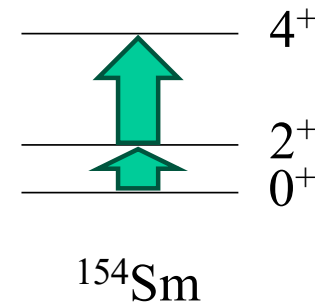
相対論的重イオン衝突で原子核の変形を探る



Equivalence between the Coupled-channels approach and the orientation average procedure

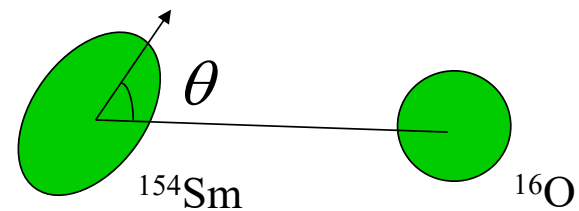


coupled channels



$$V_{II'}(r) = \langle I^+ | V(r, \theta) | I'^+ \rangle$$

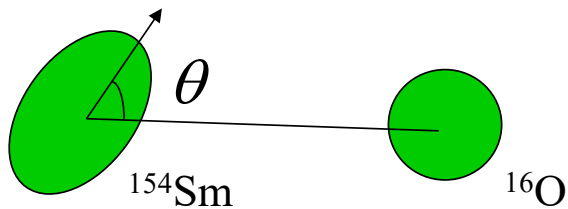
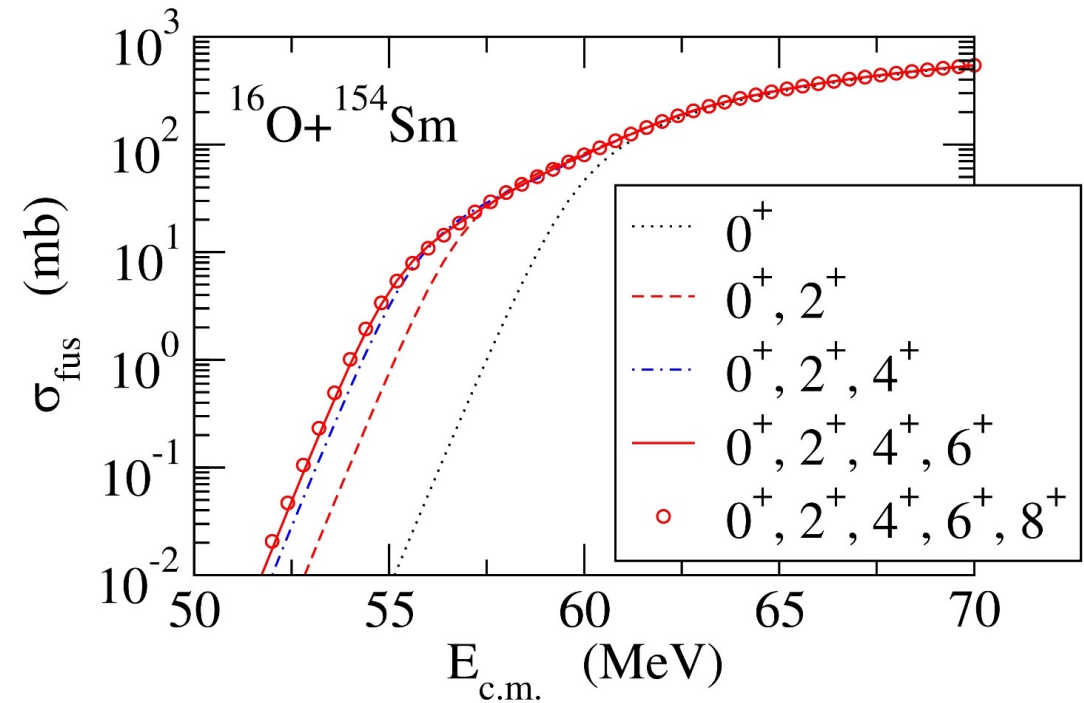
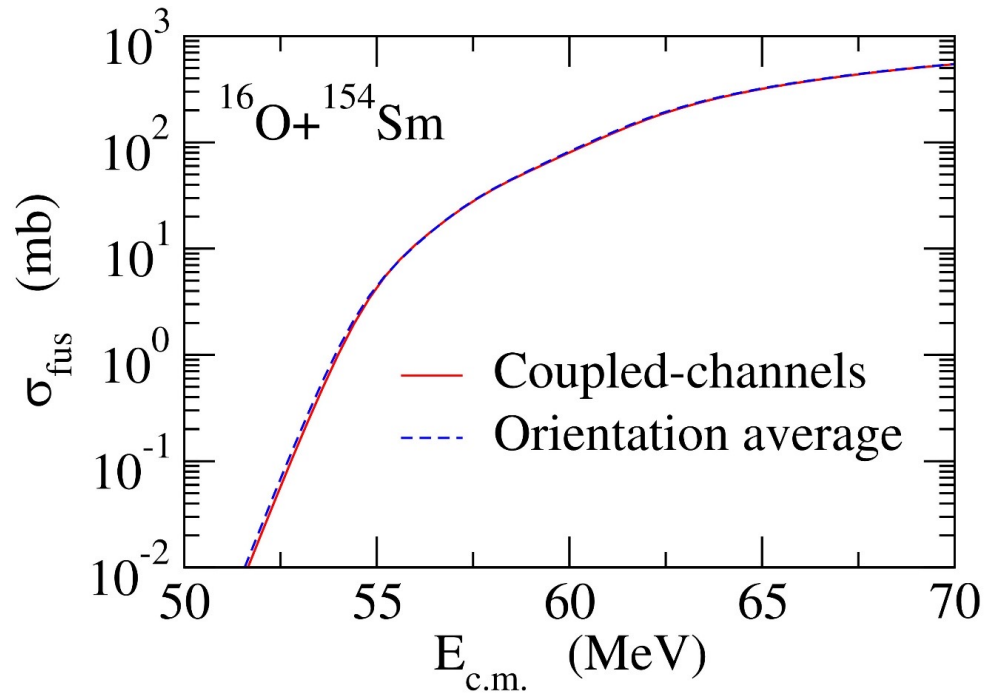
the orientation average formula



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

* a small deviation due to the finite E^* effect

Equivalence between the Coupled-channels approach and the orientation average procedure



Notice: the weight is given by the g.s. wave function
 → this does **NEVER** mean that a nucleus is not excited.

$$\text{cf. } |\theta\rangle = \sum_I \langle Y_{I0} | \theta \rangle |Y_{I0}\rangle$$

Convergence with respect to $I_{\max}$

