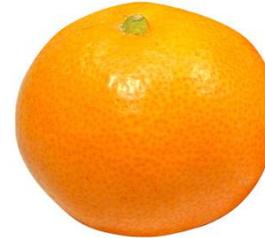
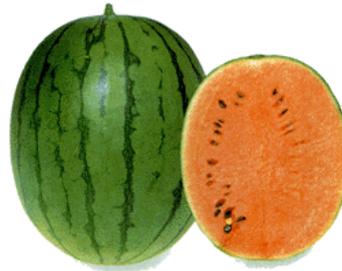
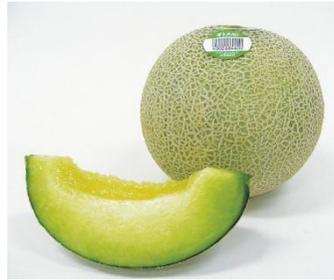


原子核の形：形の量子論

萩野浩一

京都大学大学院理学研究科



1. 自己紹介
2. 素粒子理論(フォーマル理論)分野について
3. 原子核について
4. 原子核の変形
5. 原子核の変形をどのように測るのか?

自己紹介

- 生まれは仙台、育ちは神奈川県平塚市→札幌市→茨城県神栖市→千葉県銚子市。高校は市立銚子高校。高校の時は数学が得意だったが、現象に興味があり物理へ。
- 学部、修士、博士：東北大学理学部
3年生のとき、漠然と素粒子理論がやりたいと思っていた。4年で素核理論研究室に配属。
→院試の前に原子核理論の先生から
「君は素粒子は向いてないから原子核に来たまえ」
と言われ原子核理論を第一志望として院試を受けた(その先生が指導教員になった)。

この先生には、修論のテーマ決めるときも「核子の構造に興味があります」と言ったら

「核子の構造は素粒子の人が昔散々研究し尽くしたので、もうやることないよ。」
と言われた(今から思うと核子のスピン構造などまだまだ分かっていないことも多い)。
「それより、重い原子核のことをやってみないかい」と言われ、その道に。

今から考えたら洗脳ですね。

博士(理学)を取ったのは1998年3月。

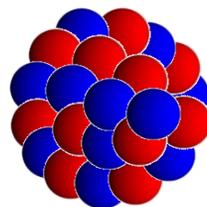
自己紹介

- 生まれは仙台、育ちは神奈川県平塚市→札幌市→茨城県神栖市→千葉県銚子市。高校は市立銚子高校。高校の時は数学が得意だったが、現象に興味があり物理へ。
- 学部、修士、博士：東北大学理学部
- ワシントン大(シアトル)でポスドク(1998年～2000年)
- 京都大学基礎物理学研究所で助手(2000年～2004年)
- 東北大で助教授/准教授(2004年～2019年)
- 京都大学理学研究科(2019年～)



□ 専門:原子核理論(核子多体論)

中性子過剰核の構造、核分裂、
低エネルギー重イオン反応 など



昨年度は超重元素の話をしたので、今年度は原子核の構造(変形)の話をしたいと思います。

その前に。。。。

素粒子理論(フォーマル理論)について

数学基礎論との関係でしばしば引き合いに出されるが、どのような分野なのか?
(近隣分野から見た印象)

素粒子理論(フォーマル理論)について

数学基礎論との関係でしばしば引き合いに出されるが、どのような分野なのか?

基本法則 (theory of everything)

重力と量子力学の統一

素粒子理論

理論

hep-th

超弦理論、弦理論、場の理論、
量子重力、AdS/CFT, 可解模型,

現象論

hep-ph

標準模型、ニュートリノ、宇宙、
大統一理論、.....

数値計算

hep-lat

格子QCD

arXiv

hep-th

hep-ph

hep-lat

hep-ex

nucl-th

nucl-ex

素粒子理論(フォーマル理論)について

人口的には「理論」の中
の 20-30%くらいか

基本法則の探求

理論

超弦理論、弦理論、場の理論、
量子重力、AdS/CFT, 可解模型, ...

現象論

標準模型、ニュートリノ、宇宙、
大統一理論、.....

数値計算

格子QCD

「理論」と言ってもスペクトルは広い。理論の中でも特に「フォーマル」色が強い分野がある。
「フォーマル」な理論の研究と素粒子「現象論」の研究は非常に異なっている。

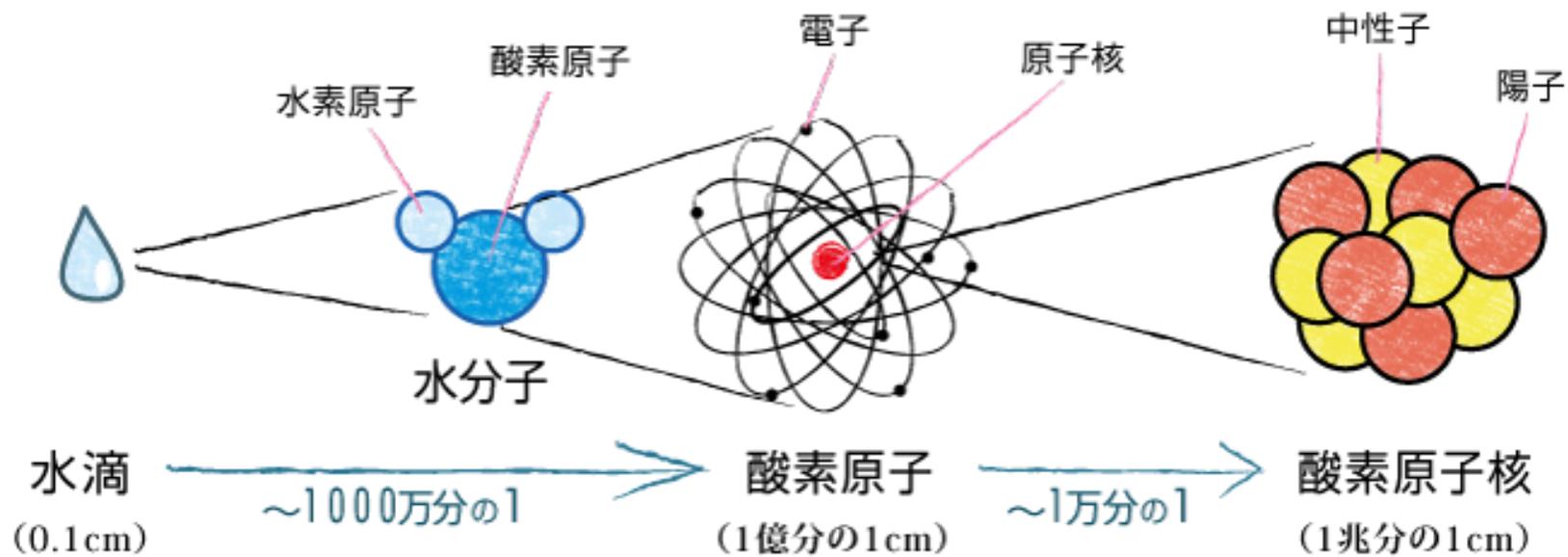
- 理論自体の整合性、あるいは理論の数理構造の追求が研究対象となることがしばしば。
- 必ずしも素粒子の基本法則を目指しているわけではない。
- 実験・観測と比較検証したりすることができないように見える。

◆ 京大の同僚(素粒子理論の教授)のコメント:

50代くらいまでの世代は、少なくともお互いの思想は理解し合っていた。極まれに両方に通じてる人もいる。若い世代は乖離が激しく、お互いを理解することは難しいようだ。

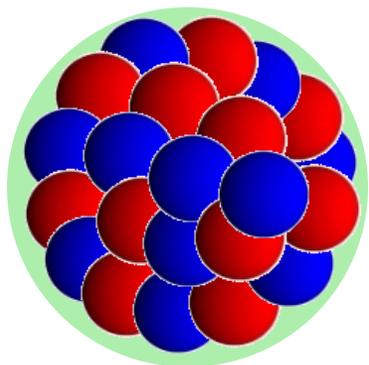
やはり数学基礎論と似たような状況かもしれません。

原子核について



<https://www.nishina.riken.jp/research/nucleus.html>

原子核の古典的なイメージ:



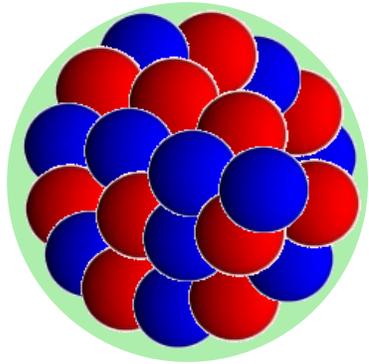
丸いボール

実際に、原子核を古典的な液滴だと思つく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

原子核について

原子核の古典的なイメージ:



丸いボール

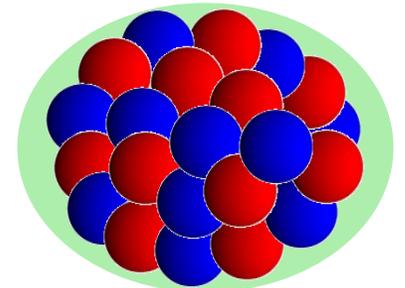
実際、原子核を古典的な液滴だと思つと丸い形が一番エネルギー的に安定
←原子核物理学が始まった当初の考え

実際には: 「量子液体」

- ✓ 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)

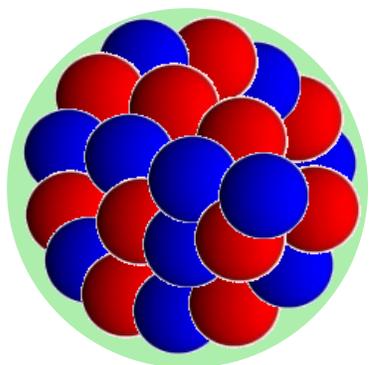
自己束縛系 → 比較的容易に形を変えることができる

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



原子核について

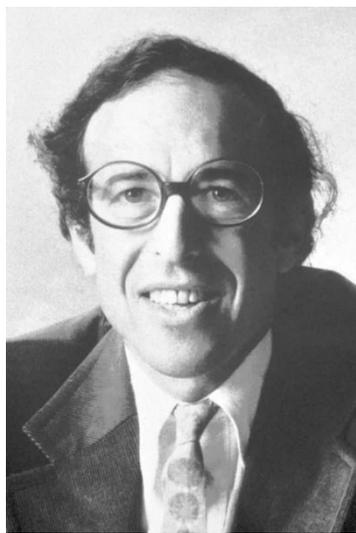
原子核の古典的なイメージ:



丸いボール

実際、原子核を古典的な液滴だと思つく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

1975年ノーベル物理学賞

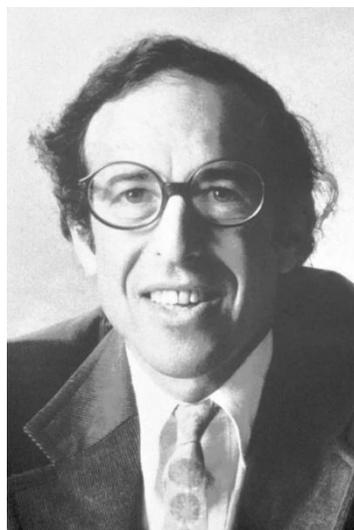


J. レインウォーター、
A. ボーア (N. ボーアの息子)、B. モッテルソン

変形した原子核の研究 (1950年代)

原子核について

1975年ノーベル物理学賞



J. レインウォーター、A. ボーア、
B. モッテルソン

変形した原子核の研究(1950年代)

レインウォーター (1950):

$^{175}_{71}\text{Lu}$ などでみられる大きな四重極モーメントは原子核全体が変形していることを意味する

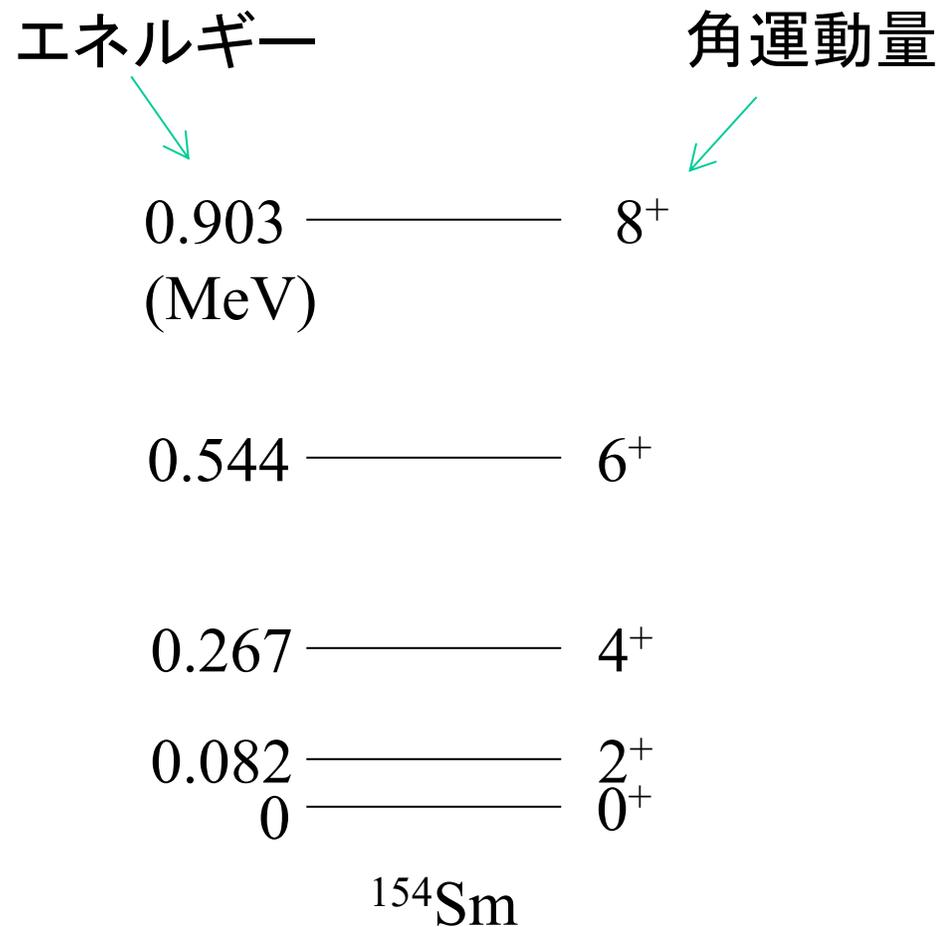
どれだけ球形に近いのかを測る量

ボーア、モッテルソン (1952):

原子核が変形すると回転運動がみられるはず

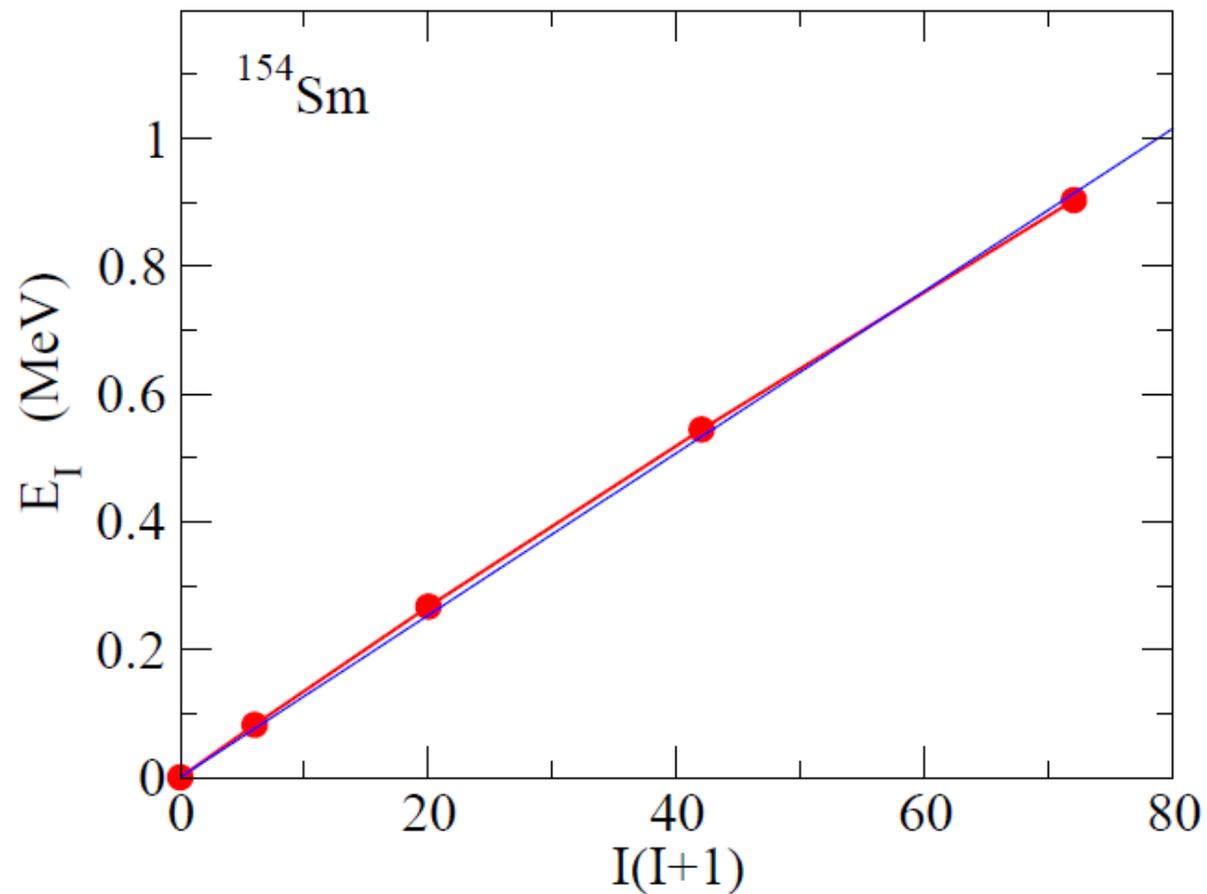
原子核の変形

$^{154}_{62}\text{Sm}_{92}$ の励起スペクトル



回転スペクトル

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

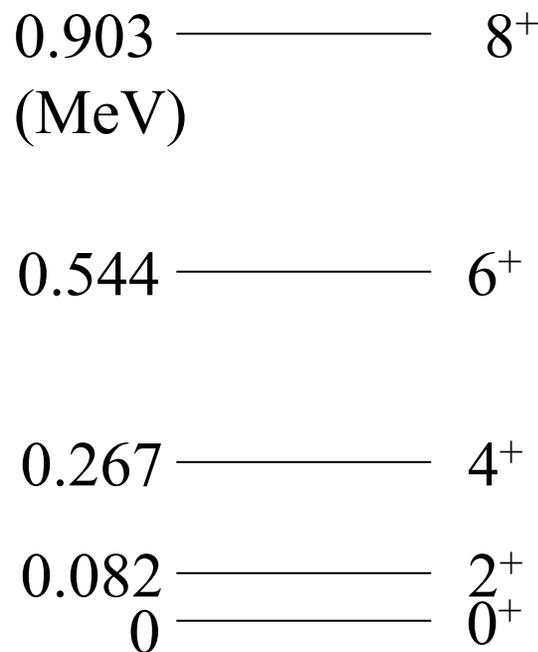


原子核の変形

$^{154}_{62}\text{Sm}_{92}$ の励起スペクトル

エネルギー

角運動量



^{154}Sm

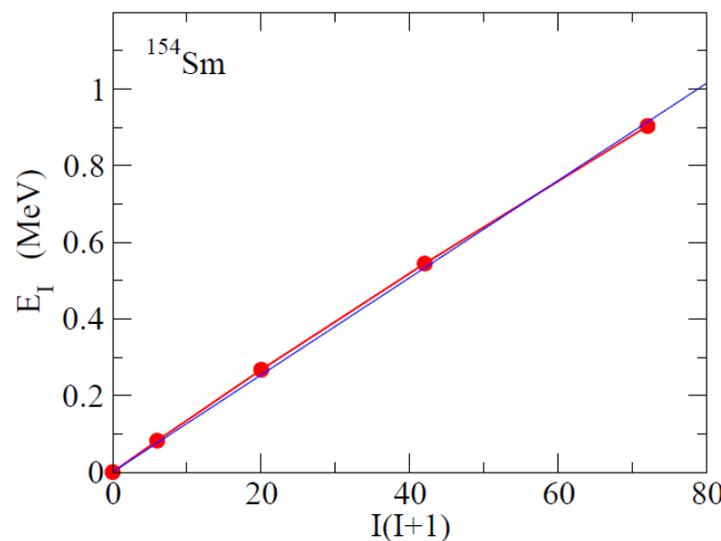
回転スペクトル

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

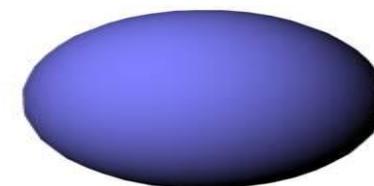
cf. 剛体の回転エネルギー(古典力学):

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

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



→ ^{154}Sm 原子核は変形している



原子核の変形

なぜ原子核は変形するのか？

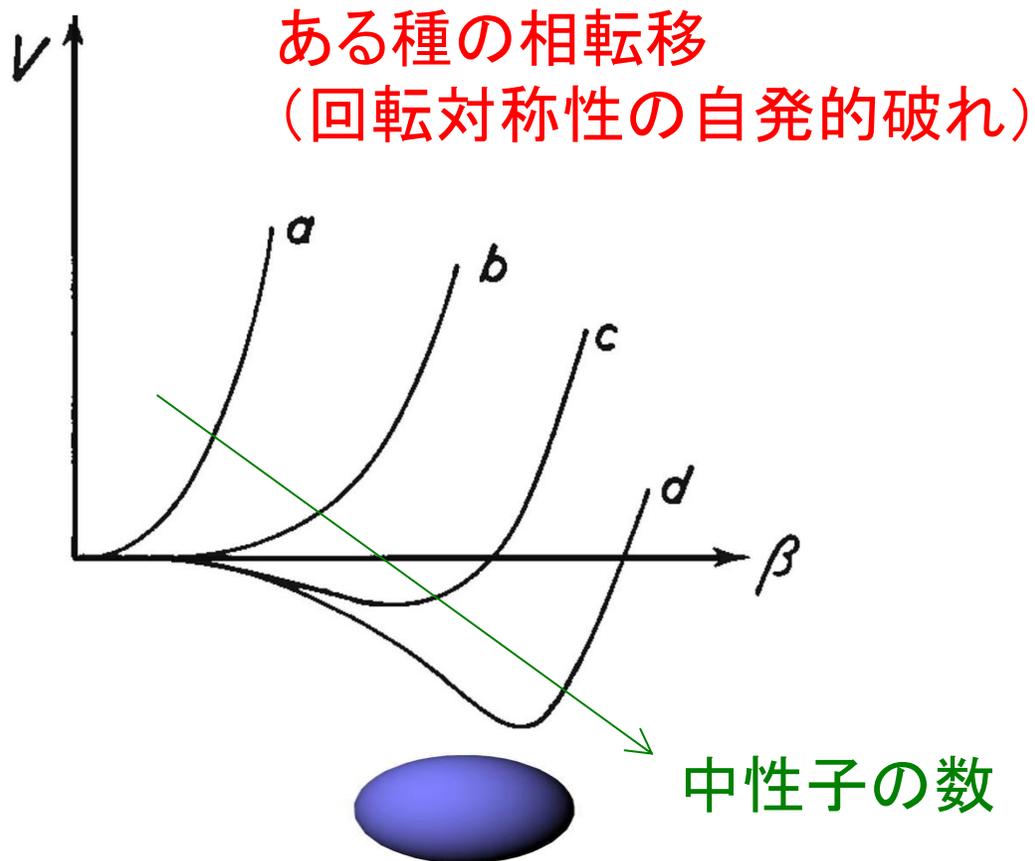
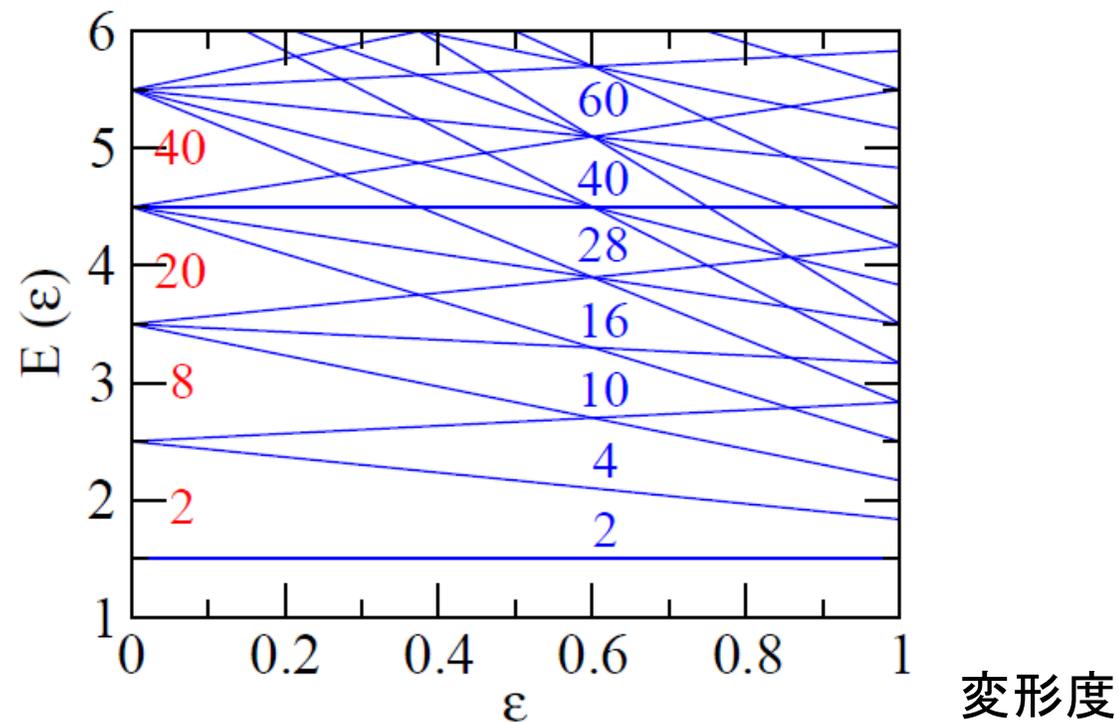


figure:
B.R. Mottelson, Nobel Lecture

原子核の場合： 核子に対する軌道

$$H = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega_z^2 z^2 + \frac{1}{2}m\omega_{\perp}^2(x^2 + y^2)$$

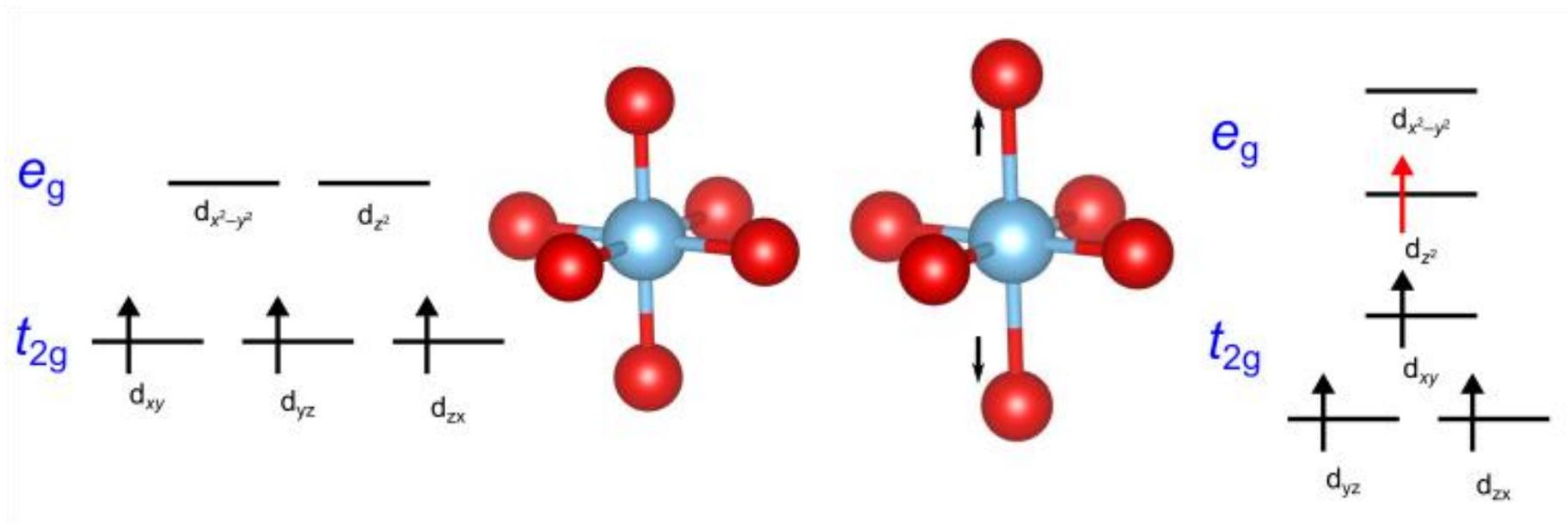
$$\omega_{\perp} = \omega_0(1 + \frac{\epsilon}{3}), \quad \omega_z = \omega_0(1 - \frac{2}{3}\epsilon)$$



粒子数によっては変形した方が閉殻構造になる

原子核の変形

電子系における似たような物理: ヤン・テラー効果



<https://solid-mater.com/entry/jt>

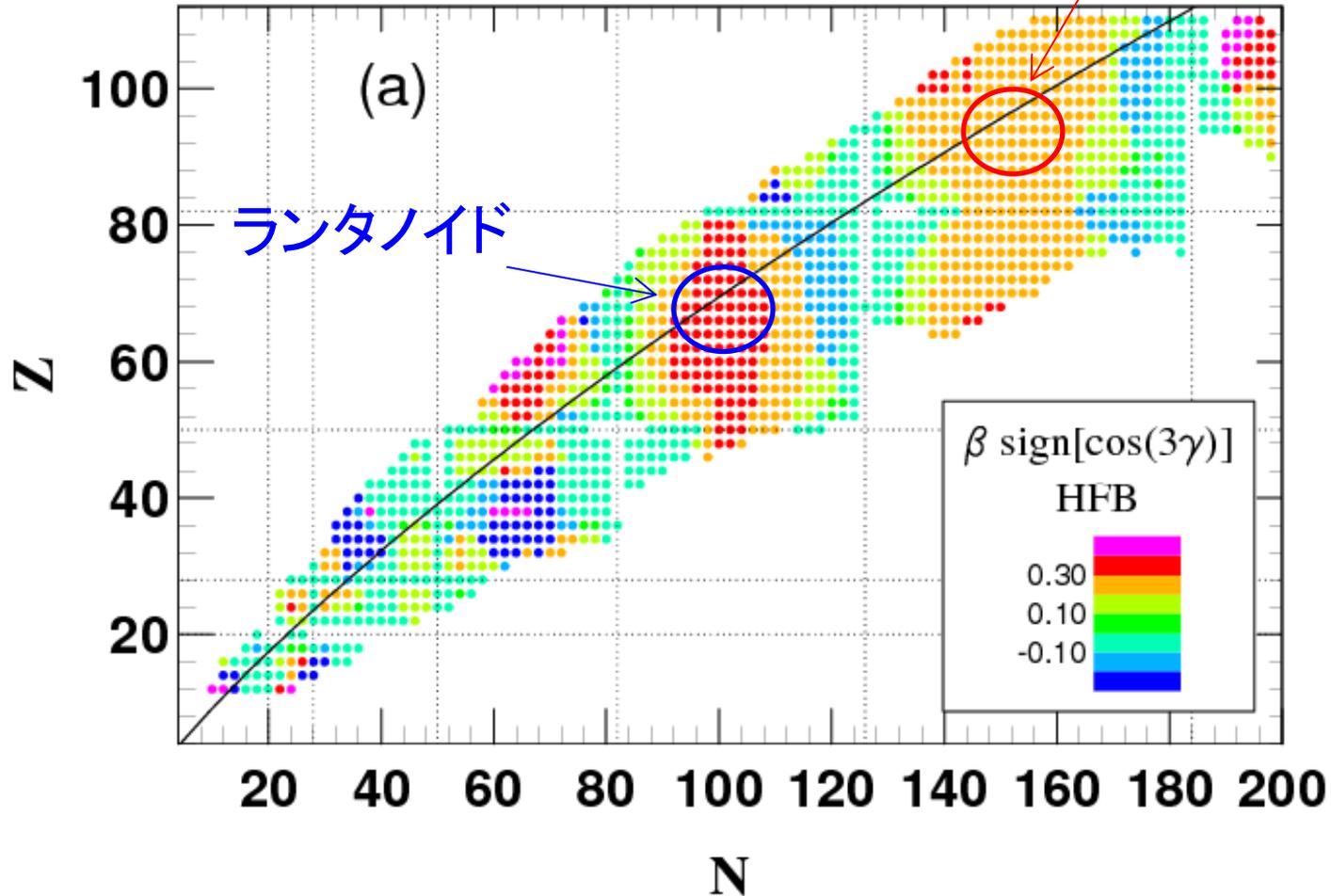
対称性が高く、軌道が部分縮退

→ 対称性を破ることにより軌道のエネルギーを下げ、そこに電子を入れる

原子核の変形

密度汎関数法による計算

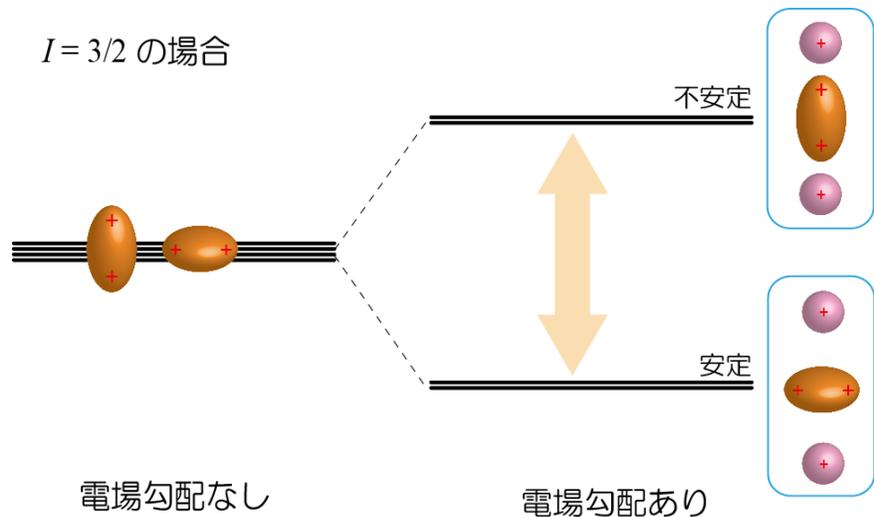
アクチノイド



β : 変形度
(球形からどのくらいずれているか)
 $\beta = 0$ だと球形

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

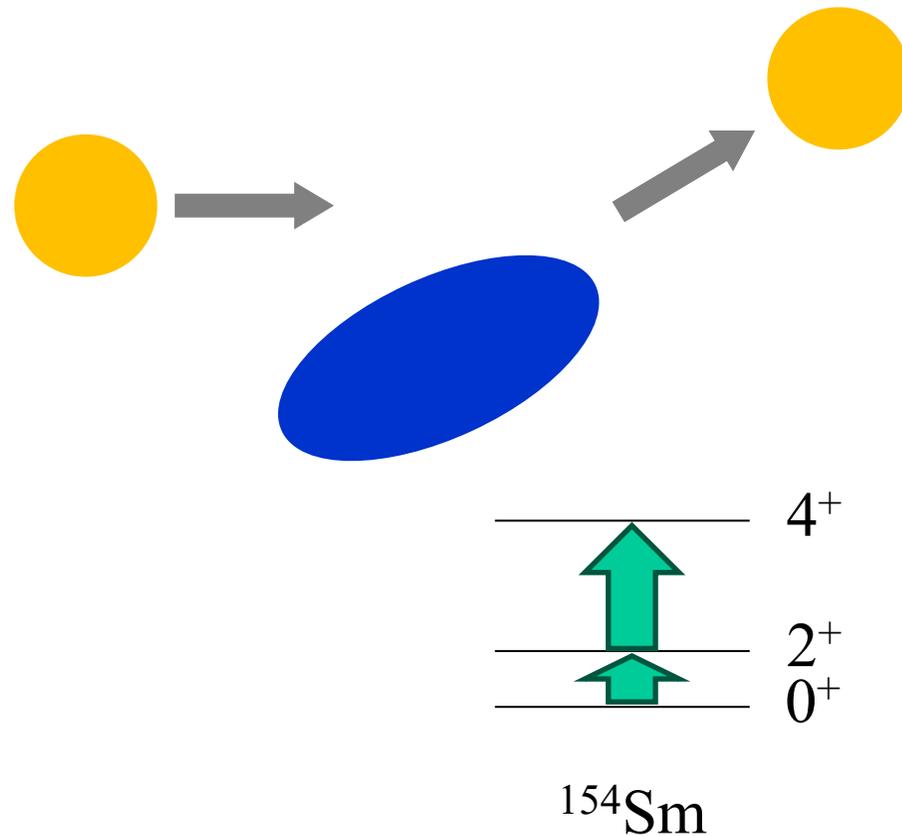


https://sm1018.skr.u-ryukyu.ac.jp/db50031_yogi/research/nqr

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 ($I = 0$)

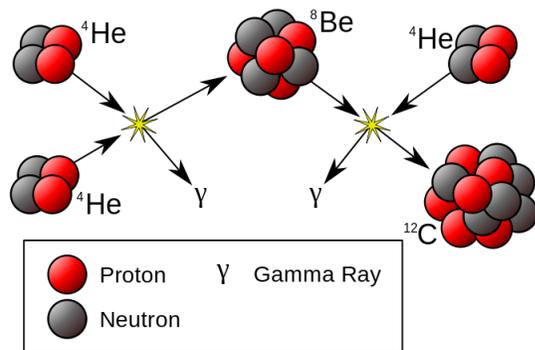
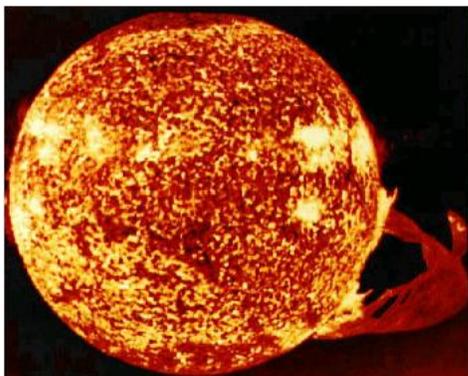
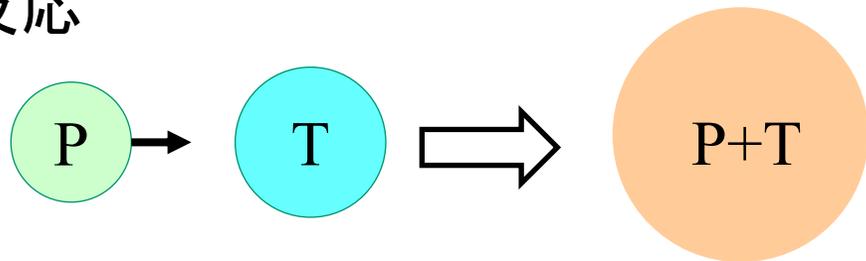
ii) 原子核反応で励起の確率を測定する → それを変形の度合いと関係づける



- ✓ 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

核融合反応

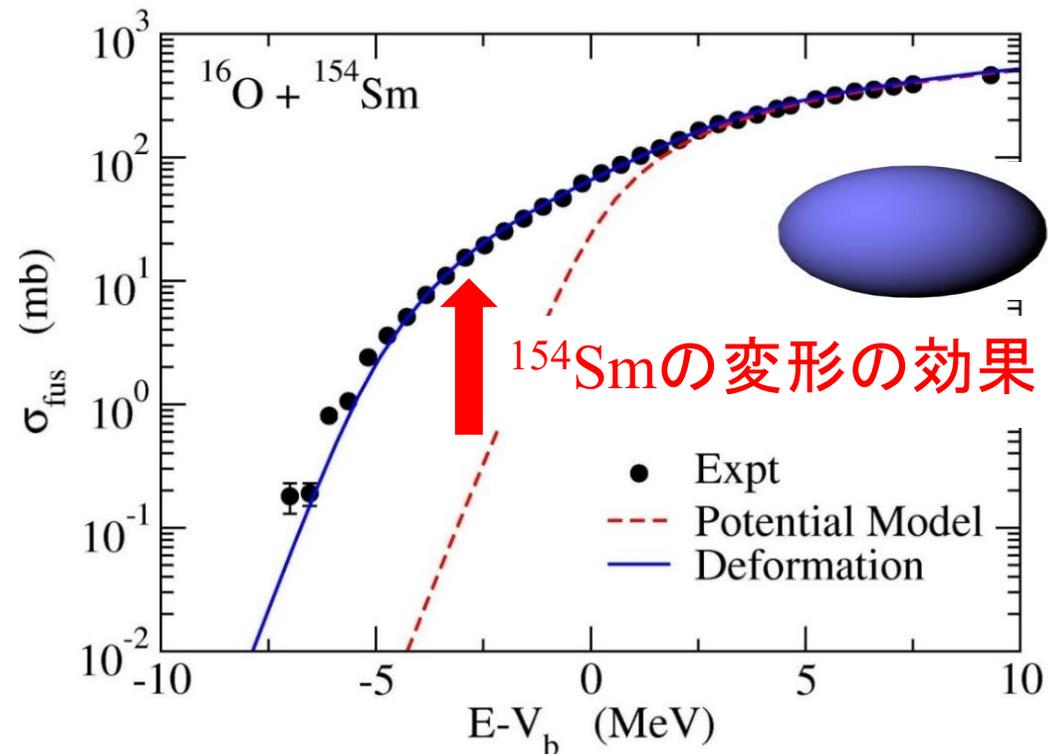


恒星のエネルギー源

宇宙における元素合成



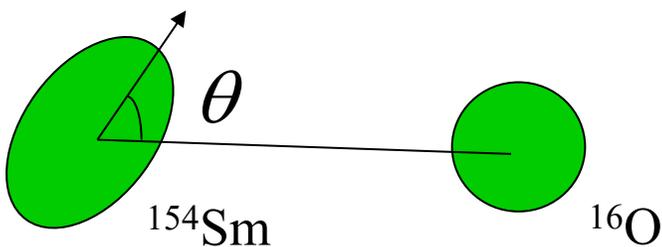
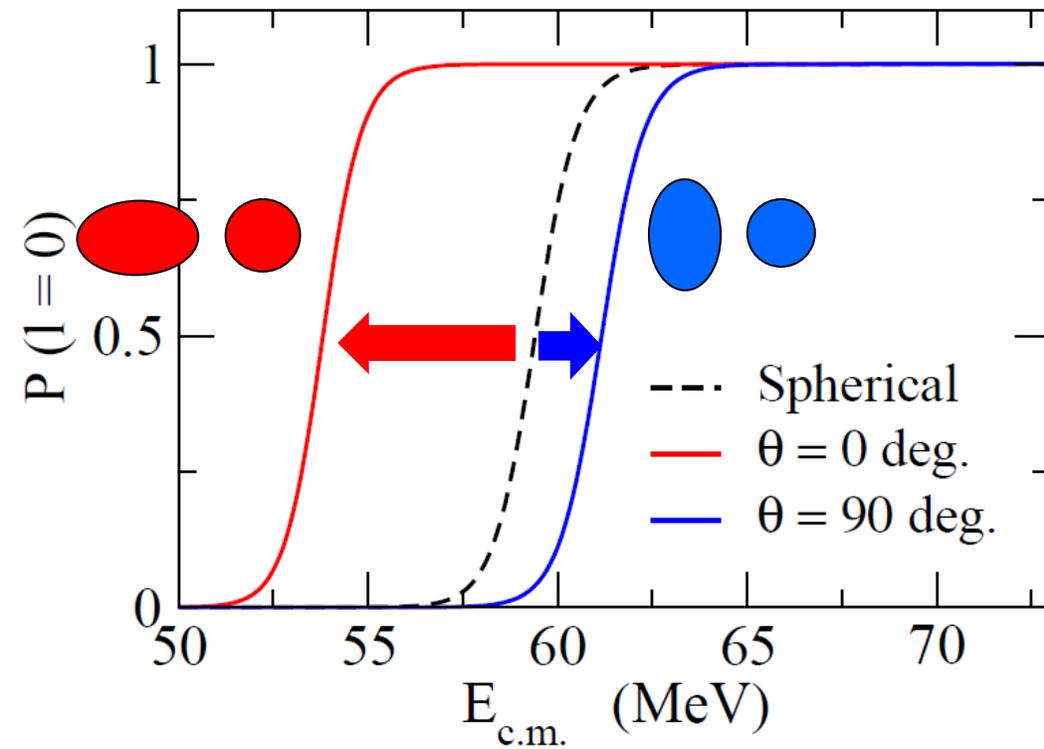
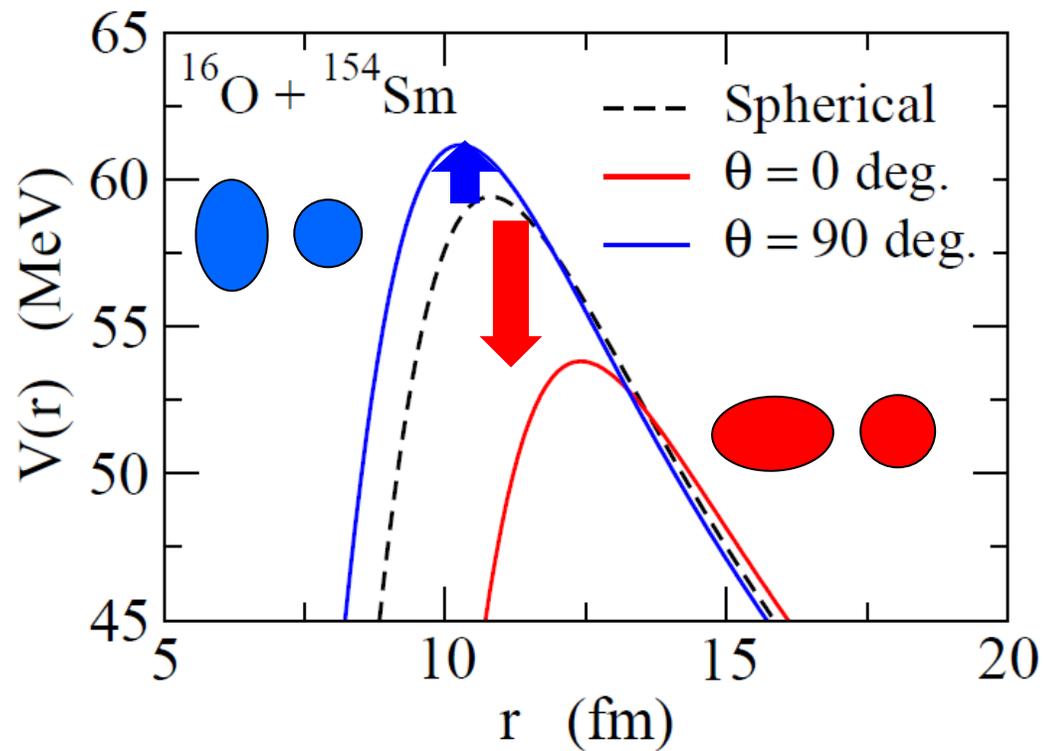
超重元素の合成



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

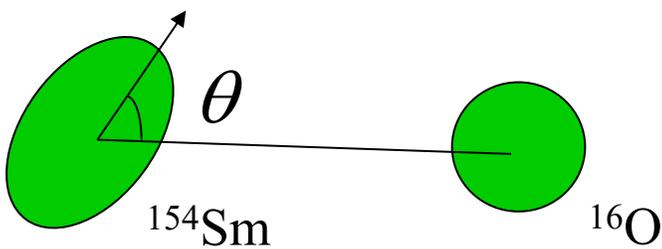
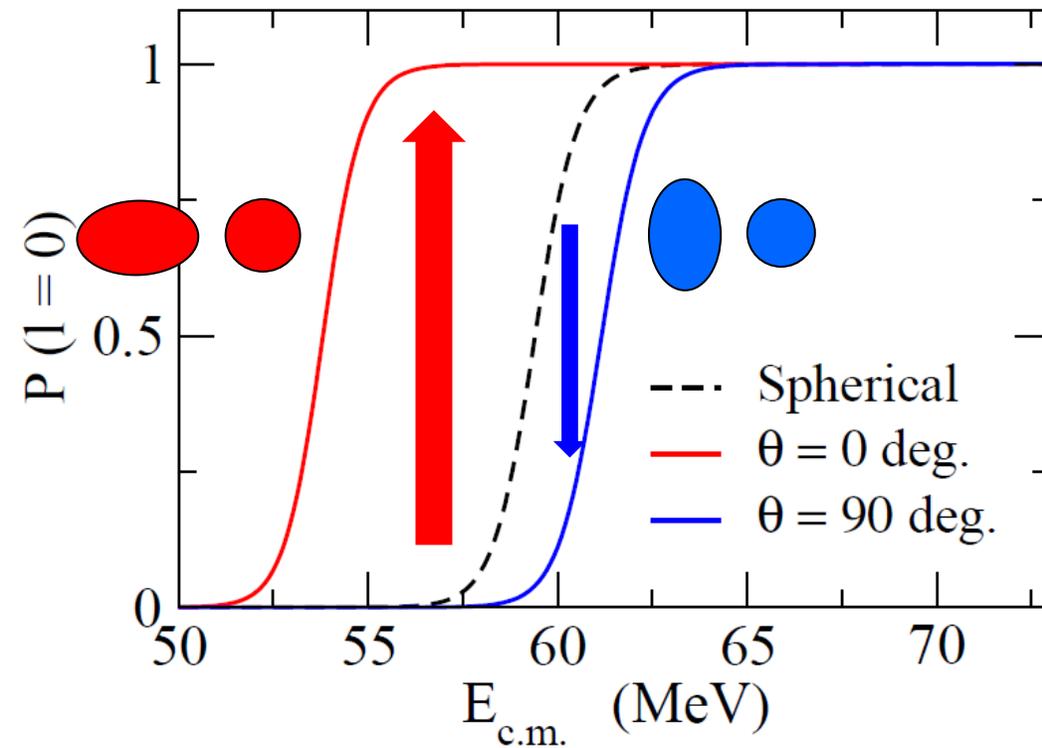
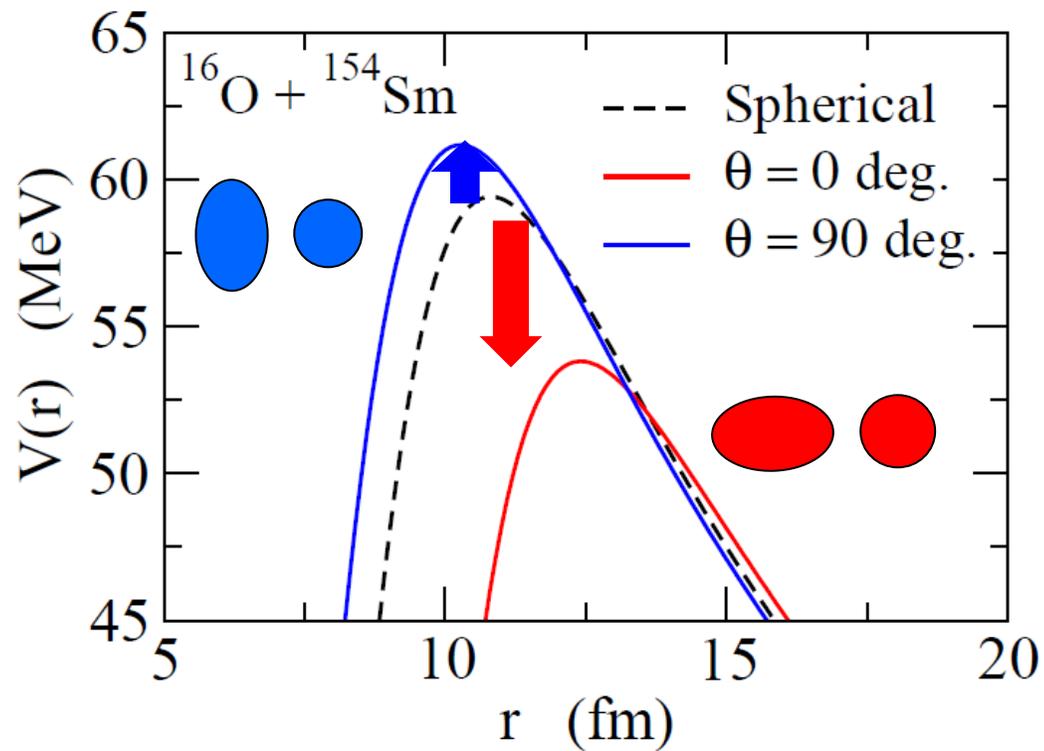
核融合反応と原子核の変形

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



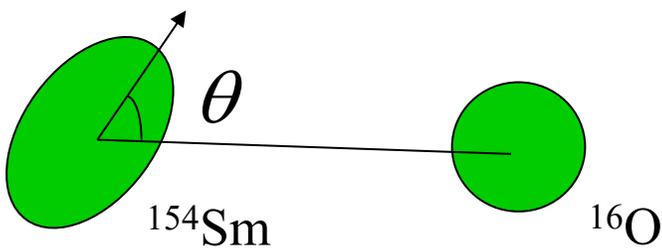
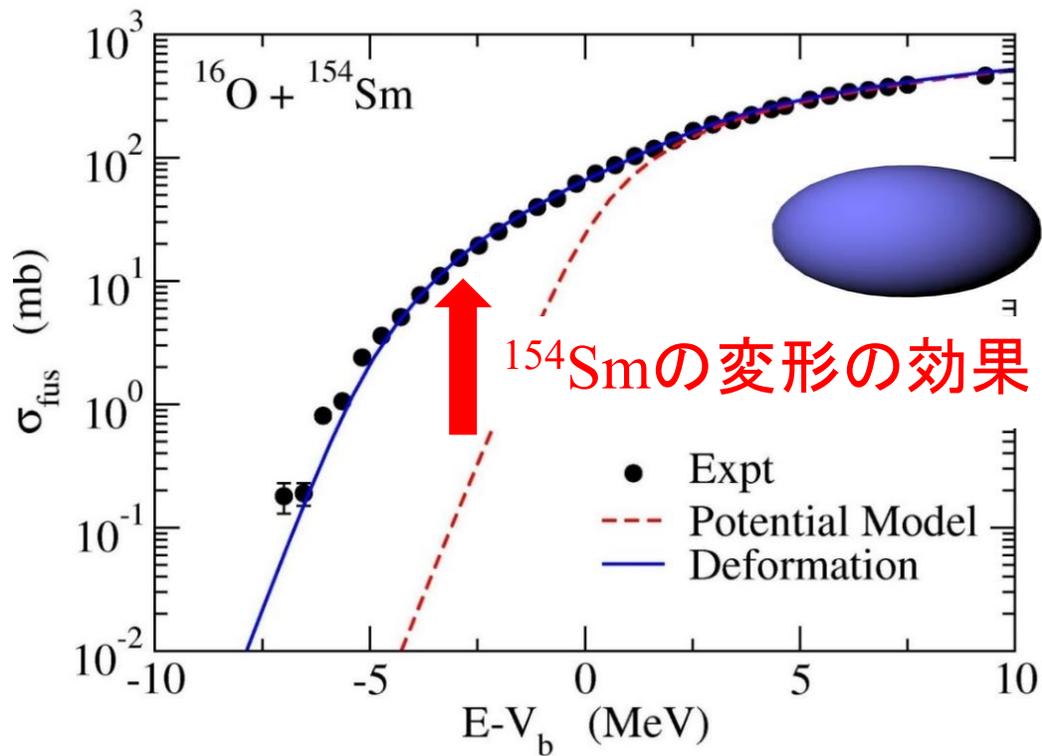
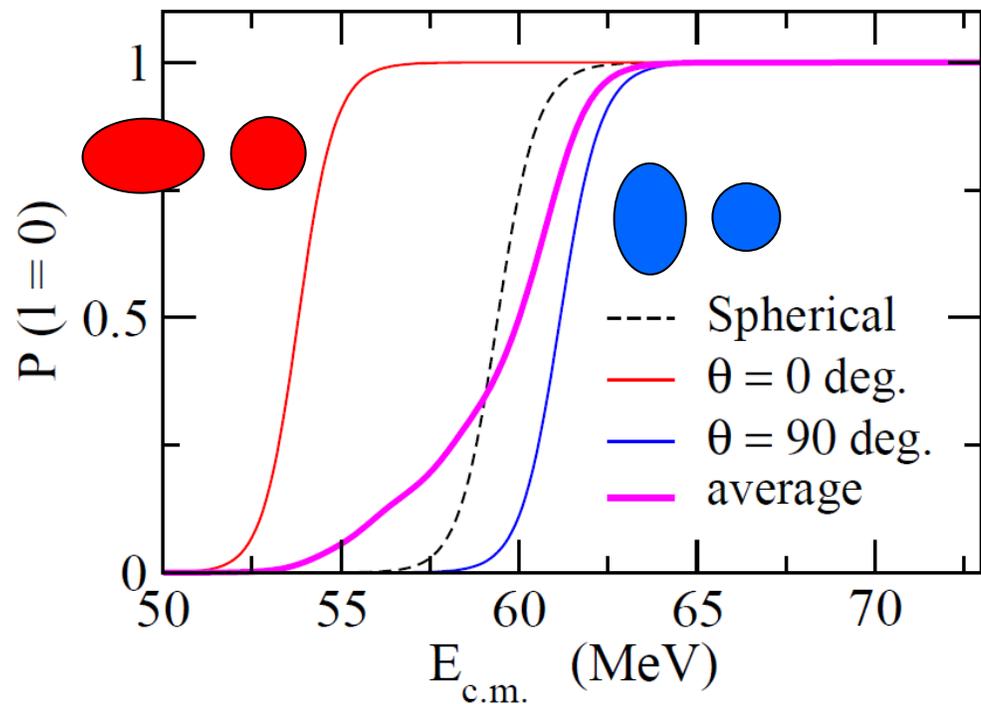
核融合反応と原子核の変形

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

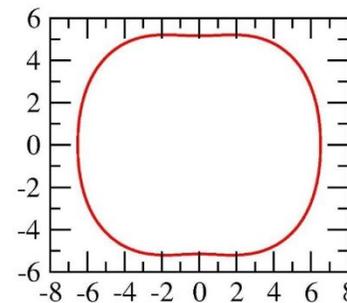
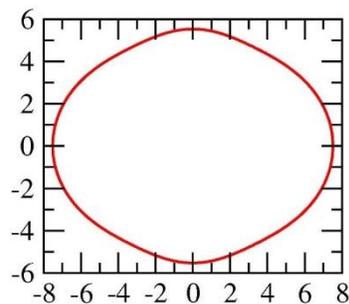
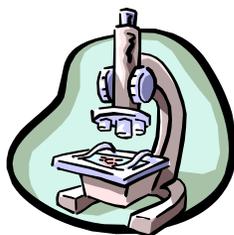
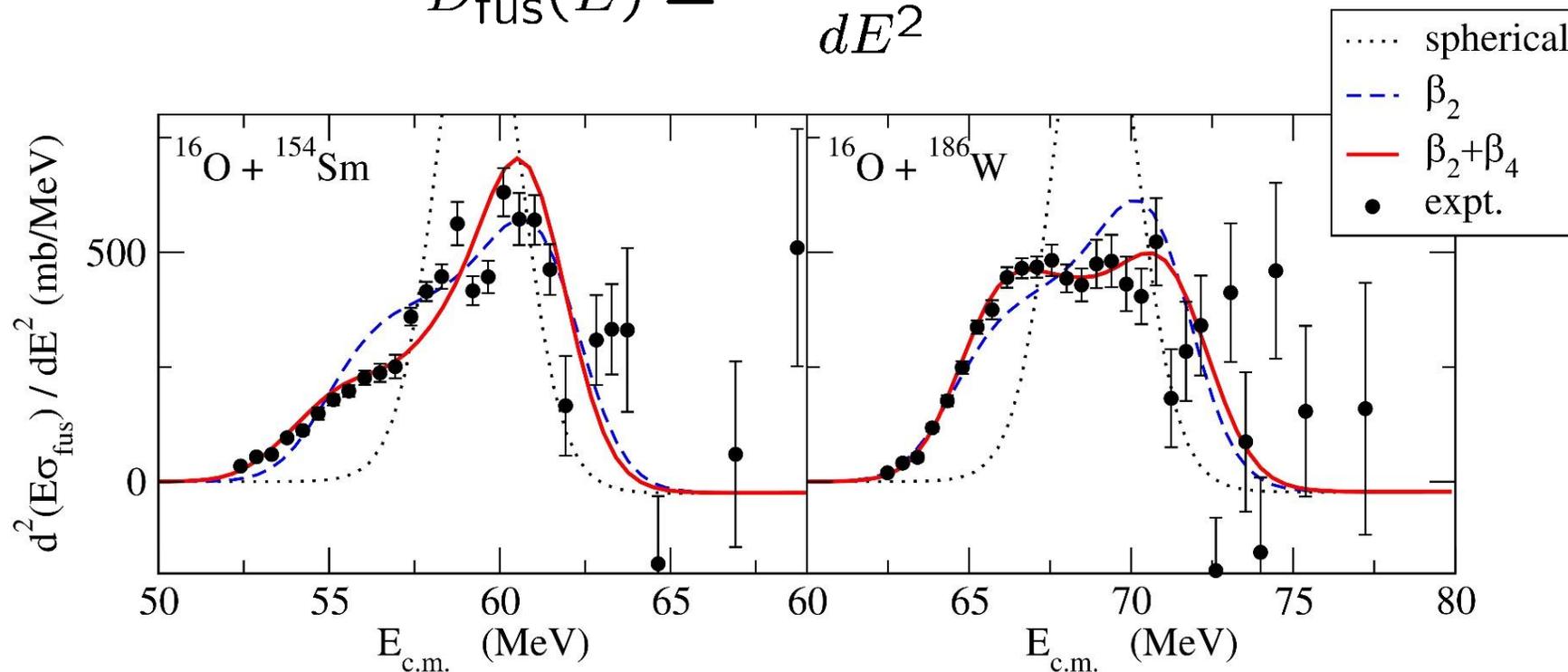
2つの原子核の間にはポテンシャル障壁 → 低エネルギー核融合反応: 量子トンネル効果



核融合反応と原子核の変形

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

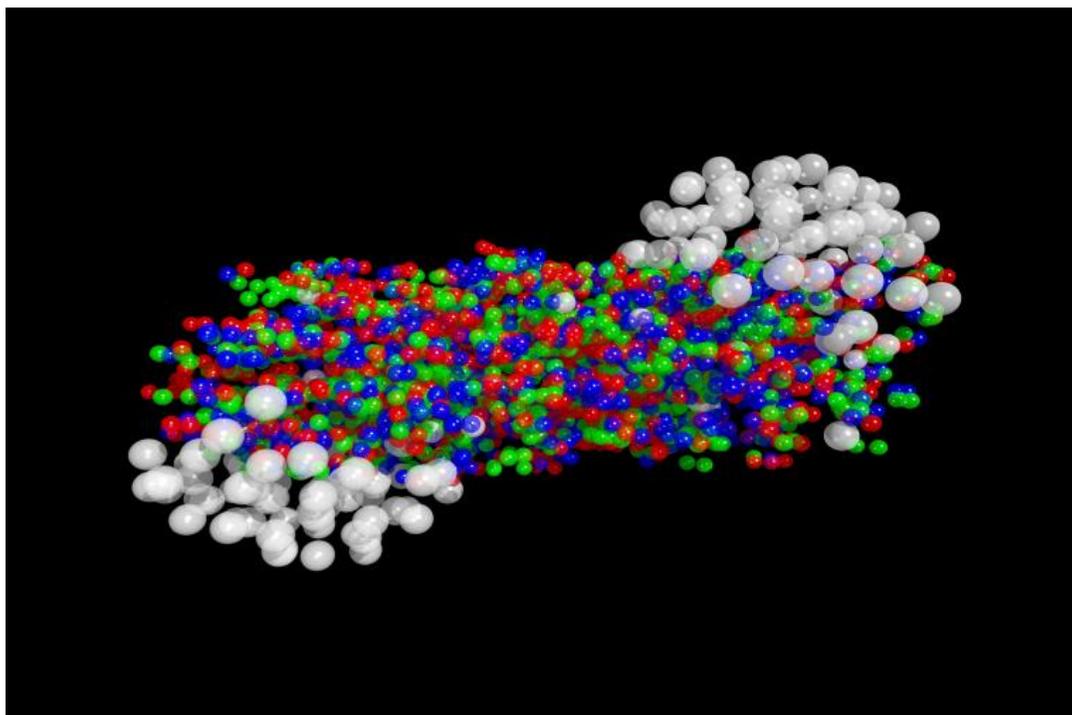
$$D_{\text{fus}}(E) = \frac{d^2(E\sigma_{\text{fus}})}{dE^2}$$



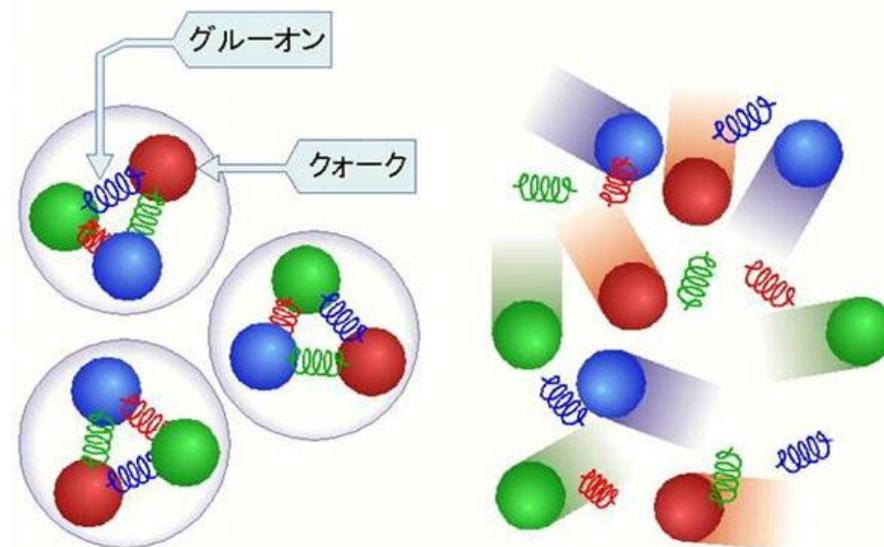
相対論的重イオン衝突で見る原子核の形

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>

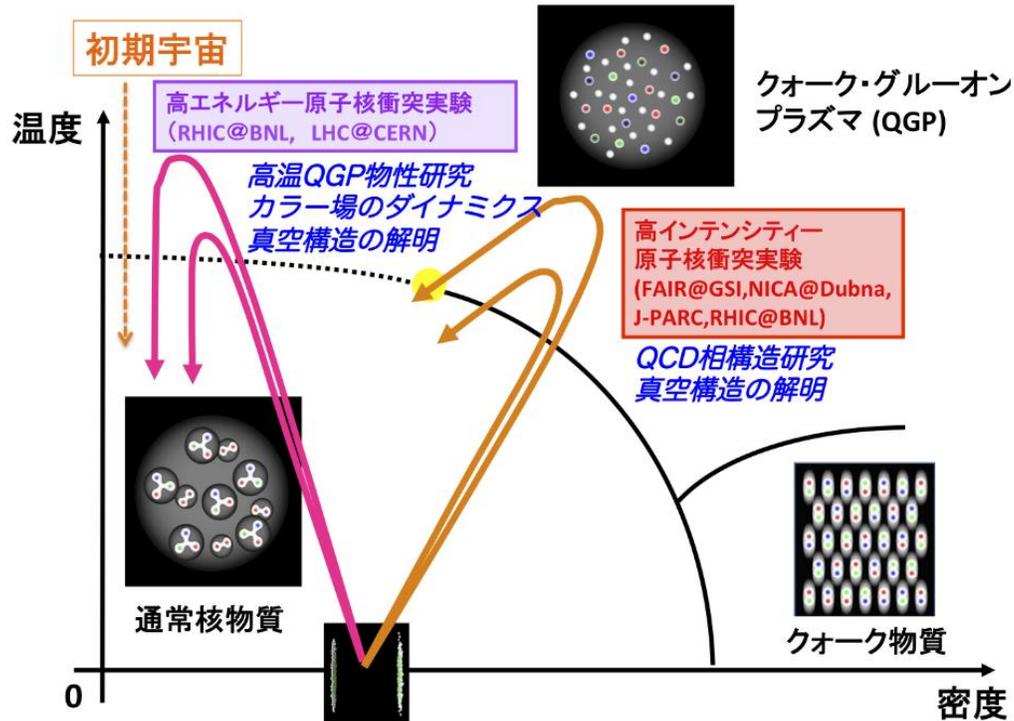
通常、核子の中にクォークやグルーオンが閉じ込められているが、超高エネルギーで原子核をぶつけることにより、それを解放する。

「クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)」

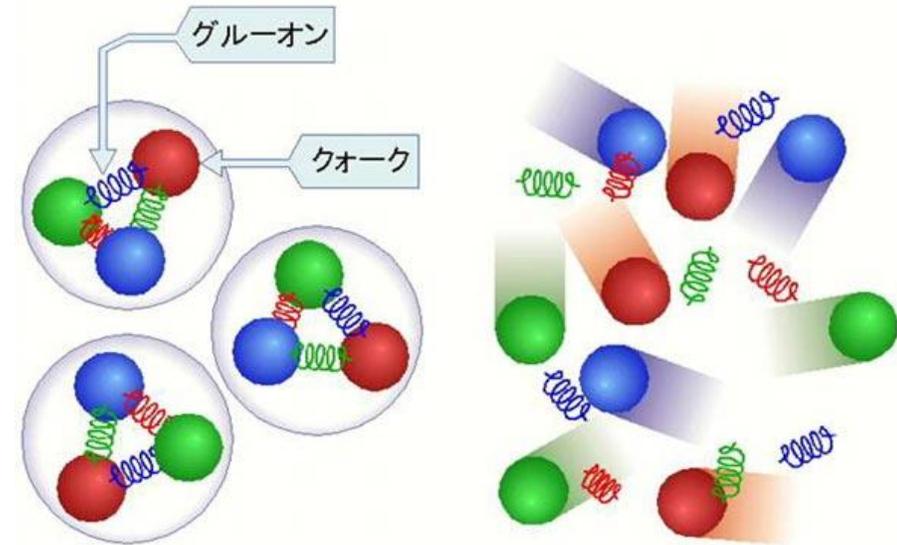
相対論的重イオン衝突で見る原子核の形

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



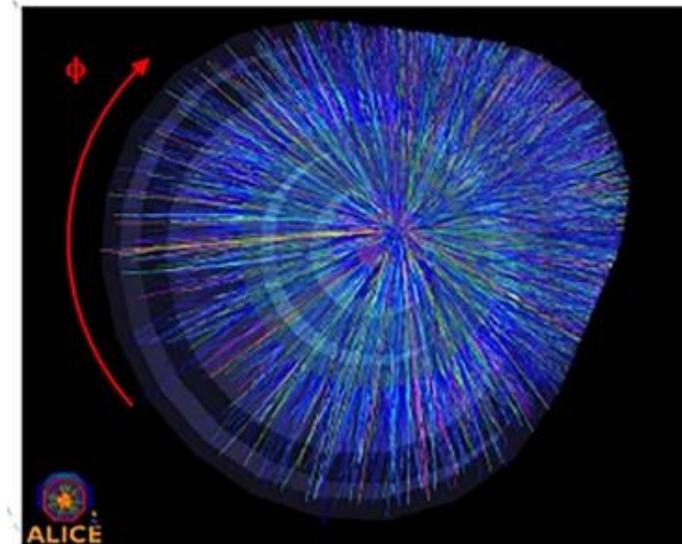
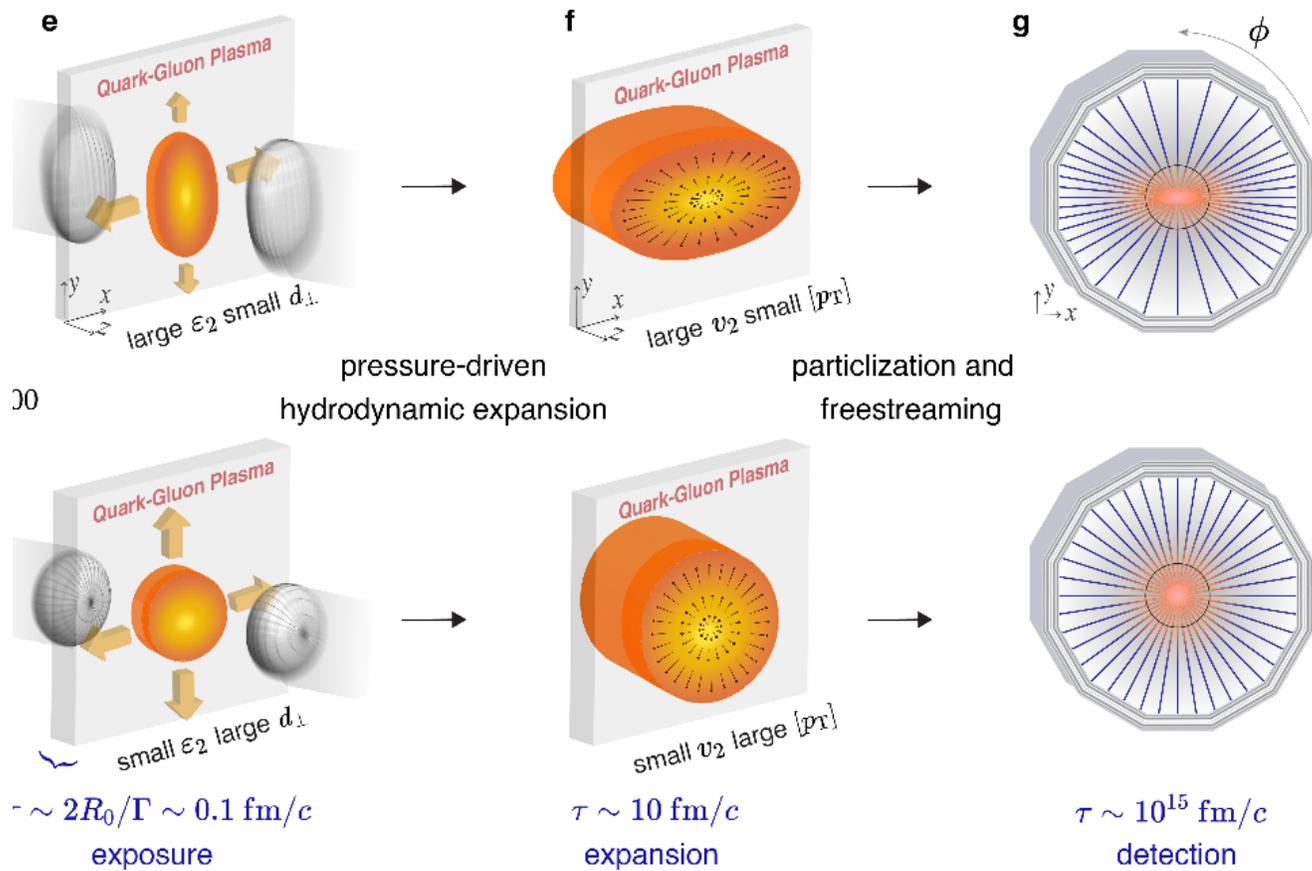
<http://kakudan.rcnp.osaka-u.ac.jp/jp/overview/world/QGP.html>

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

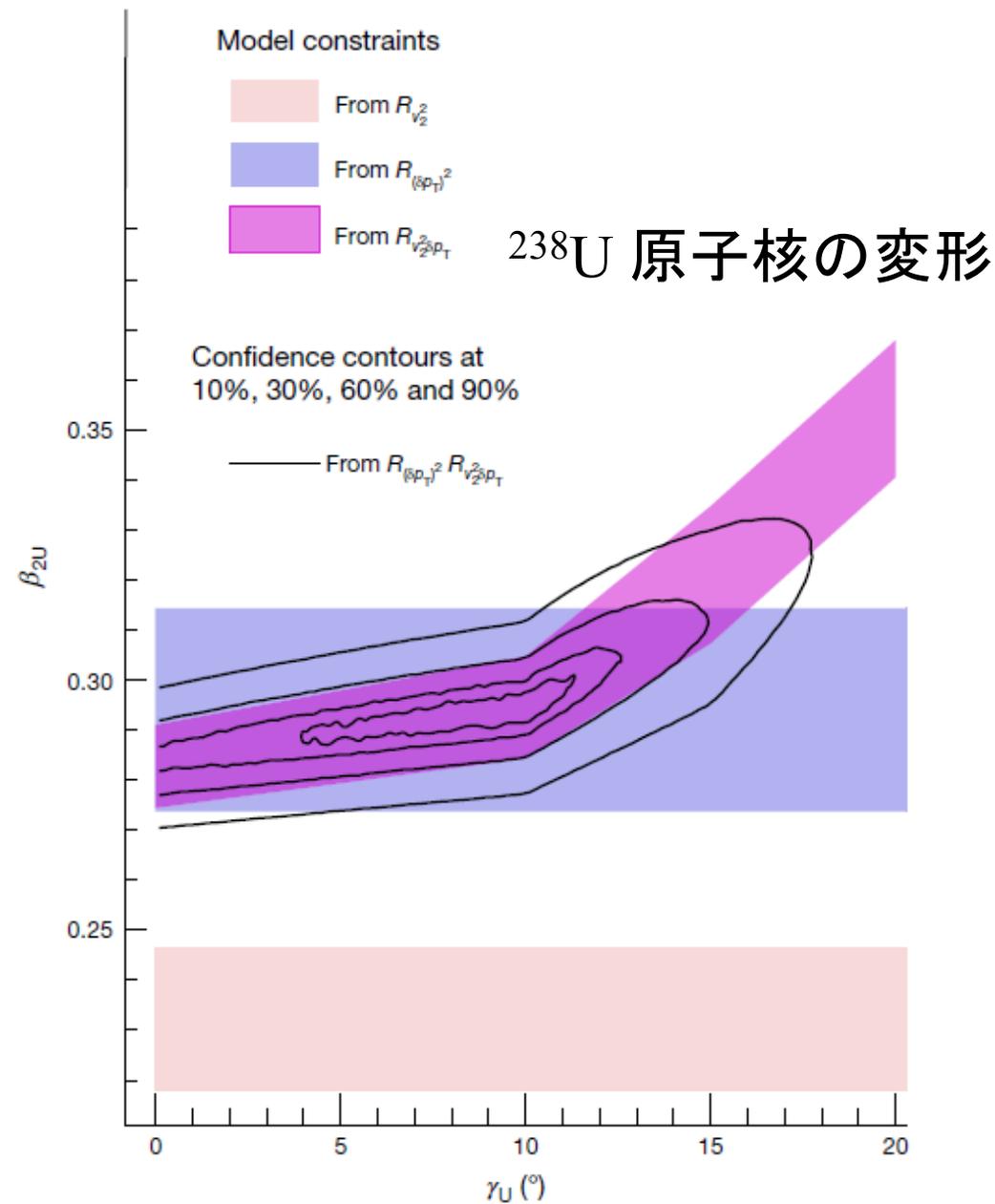
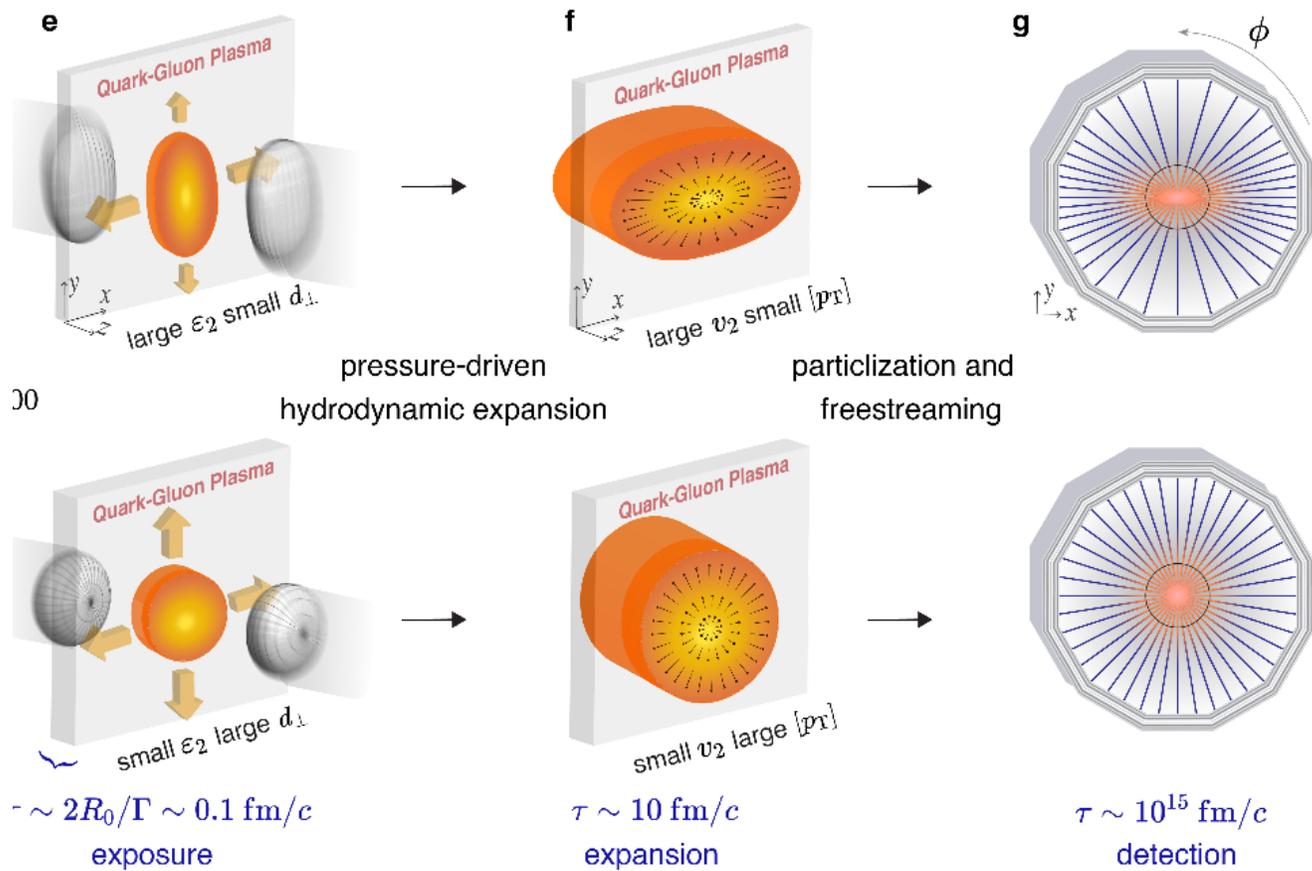
the initial shape of QGP



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

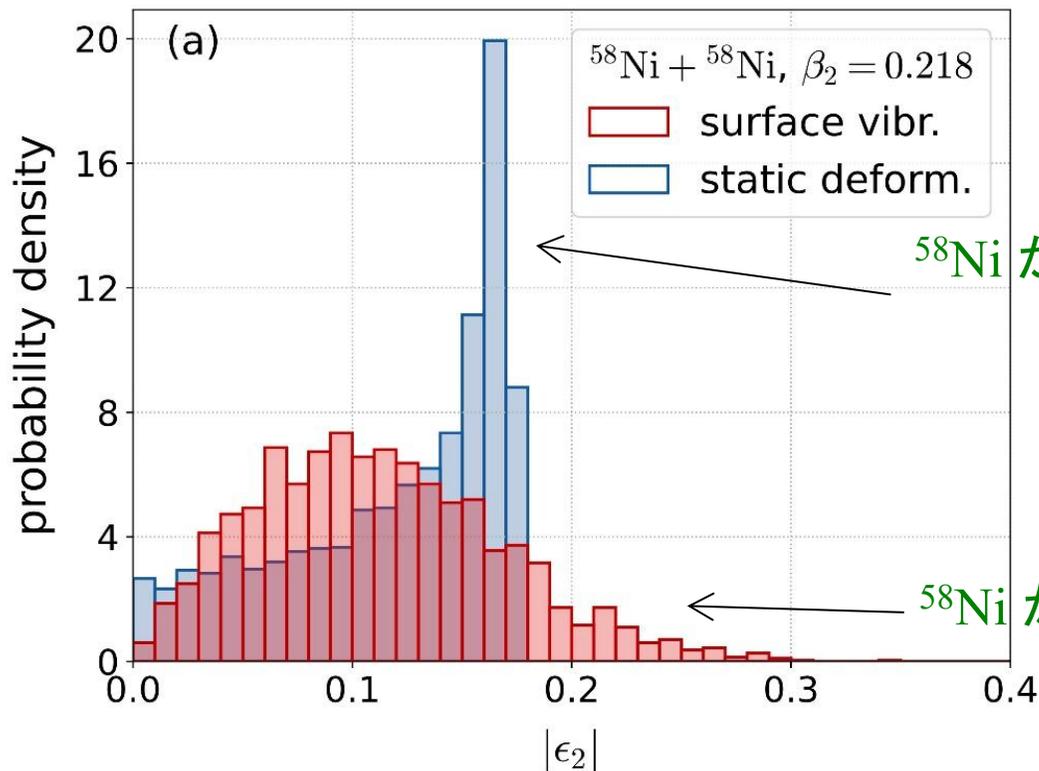
相対論的重イオン衝突で見る原子核の形

the initial shape of QGP

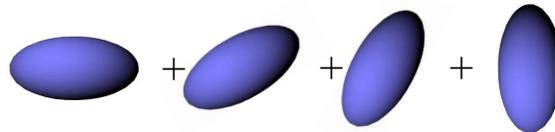


相対論的重イオン衝突で見る原子核の形

$^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$ 衝突



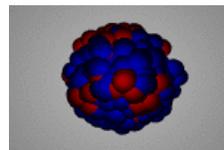
^{58}Ni が変形しているとき



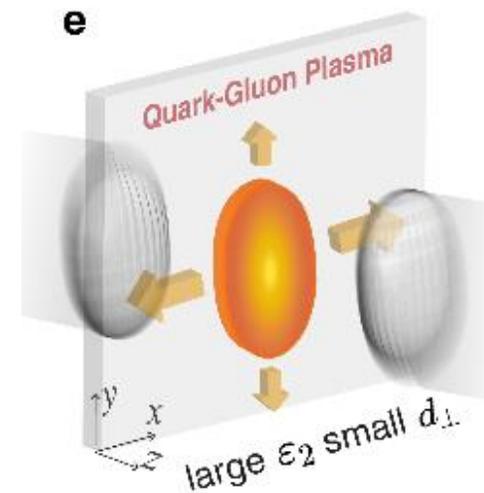
$$\langle |\epsilon_2| \rangle = 0.119$$

^{58}Ni が変形していないとき

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



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

まとめ

原子核: 量子液体 → 比較的容易に変形する

cf. ヤン・テラー効果

- ✓ 量子多体系としての重要な性質の一つ
- ✓ 様々な原子核反応に大きな影響

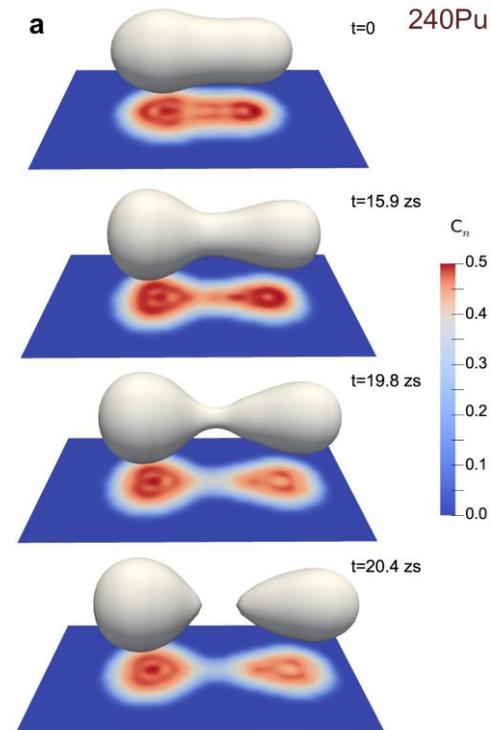
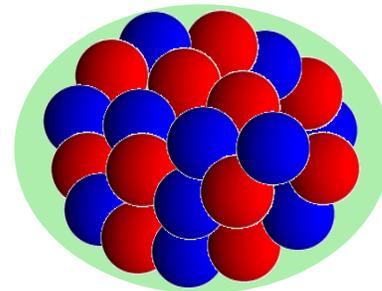
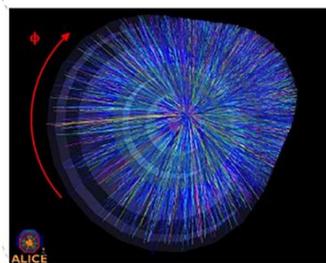
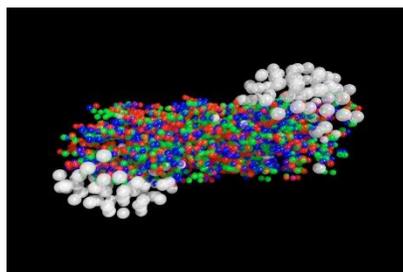
- 重イオン核融合反応 (多自由度量子トンネル現象)
- 天体核反応や元素合成
- 超重元素生成反応



- ✓ 核分裂とも大きく関係 (原子核の形状発展のダイナミクス)

□ 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



G. Scamps and C. Simenel, Nature 564 (2018) 382