

前回のアンケートより

- Bethe-Weizacker の式は一つずつ項を補正していった?
それとも、最初から4つの項を入れた?

$$B(N, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{\text{sym}} \frac{(N - Z)^2}{A}$$

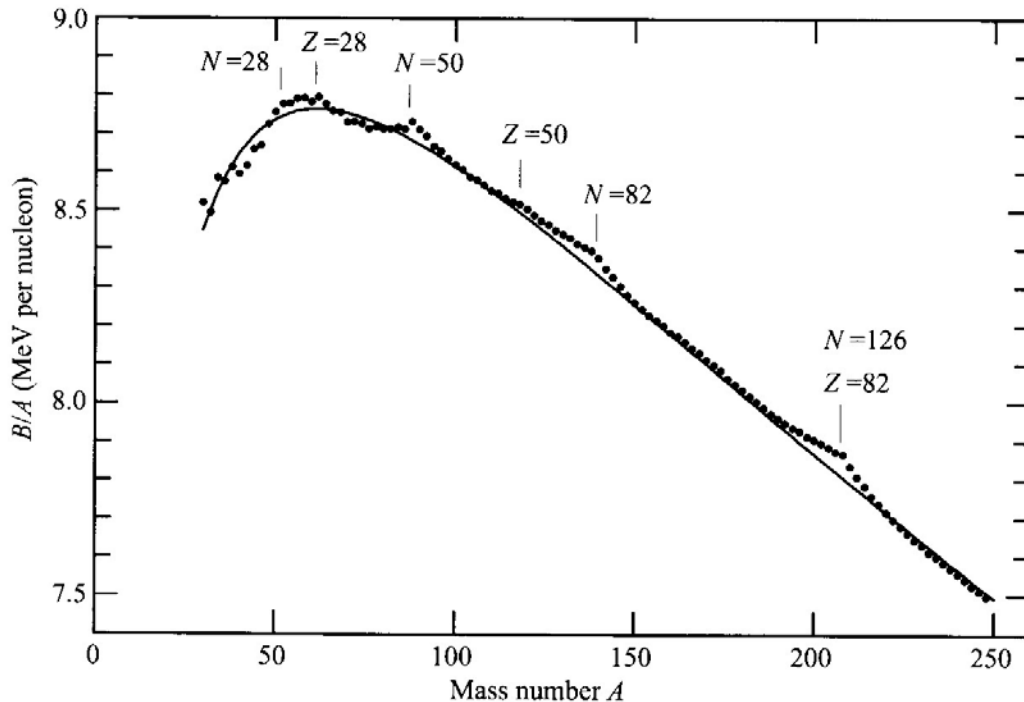
- ✓ 原論文を読まないとは分からないが、最初から4つの項を入れていたのではないかと思います。

➤ 質量公式にペアリングを入れていないのは寄与が小さいから？

$$B(N, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{\text{sym}} \frac{(N - Z)^2}{A}$$

✓ その通りです。

本当は取り入れる必要があるけど、寄与が小さいのでとりあえずは考えなかった(詳しくはペアリングの回に)。



$B/A \sim 8.5$ MeV に対して
1-2 MeV/A 程度の寄与。

$A \sim 100$ なら 0.01 MeV
程度。

*でも原子核の色々な性質
にはペアリングは重要

➤ 質量公式の対称エネルギーで分母に A が現れる理由は何？

$$B(N, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{\text{sym}} \frac{(N - Z)^2}{A}$$

✓ フェルミガス模型

$$N = 2V \int \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^3} \theta(k_{F_n} - k) = \frac{k_{F_n}^3}{3\pi^2} V$$

$$E_n = 2V \int \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^3} \frac{k^2 \hbar^2}{2m} \theta(k_{F_n} - k) = \frac{V}{5\pi^2} \cdot \frac{k_{F_n}^5 \hbar^2}{2m}$$

$$\longrightarrow E_n = \frac{3}{5} \frac{k_{F_n}^2 \hbar^2}{2m} N$$

* 2 はスピンの上下から。 * 陽子に対しても同様の式。

フェルミガス模型

$$N = \frac{k_{Fn}^3}{3\pi^2} V \qquad Z = \frac{k_{Fp}^3}{3\pi^2} V$$
$$E_n = \frac{3}{5} \cdot \frac{k_{Fn}^2 \hbar^2}{2m} N \qquad E_p = \frac{3}{5} \cdot \frac{k_{Fp}^2 \hbar^2}{2m} Z$$

ここで、

$$N = \frac{A}{2}(1 + \delta), \quad Z = \frac{A}{2}(1 - \delta)$$
$$= \frac{E_F}{3} \frac{(N - Z)^2}{A}$$

とすると、

$$E = E_n + E_p \sim \frac{3}{5} A E_F + \frac{A}{3} E_F \delta^2 + \dots$$

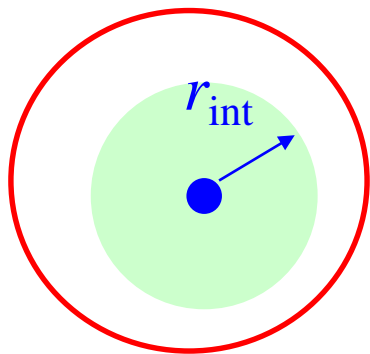
$$E_F = \frac{k_F^2 \hbar^2}{2m}, \quad k_F = \left(\frac{3\pi^2}{2} \frac{A}{V} \right)^{1/3}$$

➤ 対称エネルギーに2つの起源があるとのことだが、同じ関数形で表してもいいのか?

いい質問です!

1. 運動エネルギー:
$$E_{\text{sym}}^{(\text{kin})} = \frac{E_F}{3} \frac{(N - Z)^2}{A}$$

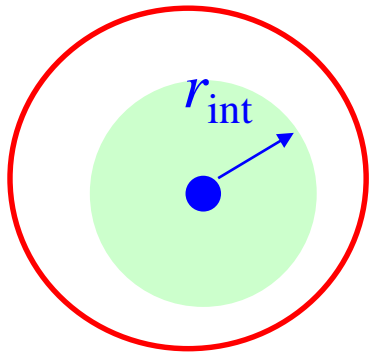
2. ポテンシャル・エネルギー:



相互作用領域にある中性子の数:
$$\frac{4\pi}{3} r_{\text{int}}^3 \frac{N}{V} \propto \frac{N}{A}$$

相互作用領域にある陽子の数:
$$\frac{4\pi}{3} r_{\text{int}}^3 \frac{Z}{V} \propto \frac{Z}{A}$$

2. ポテンシャル・エネルギー:



相互作用領域にある中性子の数: $\frac{4\pi}{3} r_{\text{int}}^3 \frac{N}{V} \propto \frac{N}{A}$

相互作用領域にある陽子の数: $\frac{4\pi}{3} r_{\text{int}}^3 \frac{Z}{V} \propto \frac{Z}{A}$

(相互作用領域に中にある)

中性子1個に対する相互作用エネルギー $\propto v_{nn} \frac{N}{A} + v_{np} \frac{Z}{A}$

陽子1個に対する相互作用エネルギー $\propto v_{pn} \frac{N}{A} + v_{pp} \frac{Z}{A}$

2. ポテンシャル・エネルギー:

中性子1個に対する相互作用エネルギー $\propto v_{nn} \frac{N}{A} + v_{np} \frac{Z}{A}$

陽子1個に対する相互作用エネルギー $\propto v_{pn} \frac{N}{A} + v_{pp} \frac{Z}{A}$

トータルでは

$$E^{(pot)} \propto N \left(v_{nn} \frac{N}{A} + v_{np} \frac{Z}{A} \right) + Z \left(v_{pn} \frac{N}{A} + v_{pp} \frac{Z}{A} \right)$$

経験則: $v_{nn} \sim v_{pp} \equiv v, v_{np} \sim 2v$

$$E^{(pot)} \propto \frac{3}{2} Av - \frac{v}{2} \frac{(N-Z)^2}{A}$$

➤ 対称エネルギーの2つの項の割合はどのくらい？

いい質問です！

原子核の束縛エネルギーのフィッティングより：

$$E_{\text{sym}} \sim 23 \frac{(N - Z)^2}{A} \quad (\text{MeV})$$

1. 運動エネルギー： $E_{\text{sym}}^{(kin)} = \frac{E_F}{3} \frac{(N - Z)^2}{A}$

2. ポテンシャル・エネルギー： $E_{\text{sym}}^{(pot)} \propto -\frac{v}{2} \frac{(N - Z)^2}{A}$

➤ 対称エネルギーの2つの項の割合はどのくらい?

原子核の束縛エネルギーのフィッティングより:

$$E_{\text{sym}} \sim 23 \frac{(N - Z)^2}{A} \quad (\text{MeV})$$

1. 運動エネルギー: $E_{\text{sym}}^{(\text{kin})} = \frac{E_F}{3} \frac{(N - Z)^2}{A}$

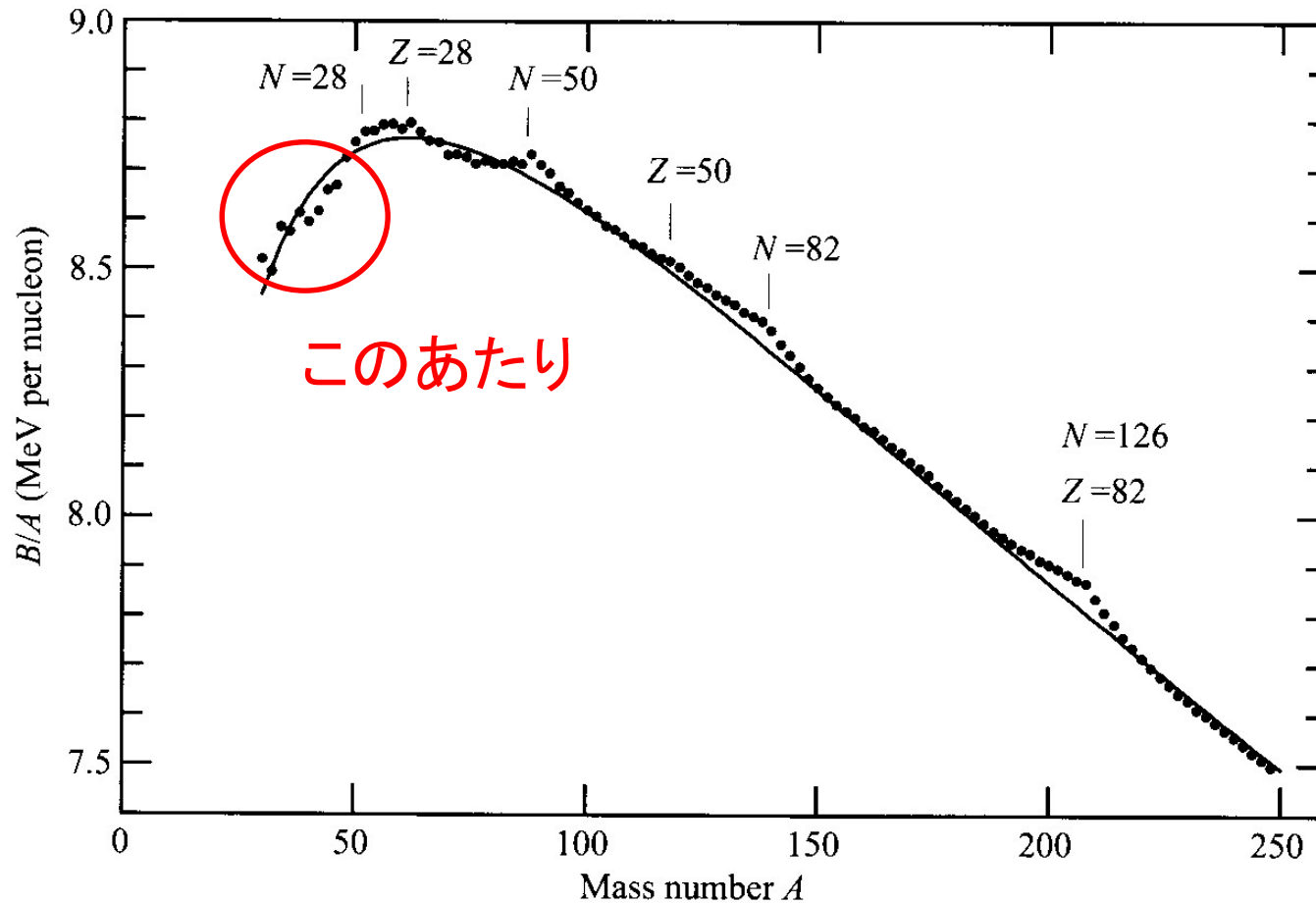
実験データ: $\rho = 0.17 \text{ fm}^{-3} \rightarrow k_F \sim 1.36 \text{ fm}^{-1} \rightarrow E_F \sim 37 \text{ MeV}$

$$E_F = \frac{k_F^2 \hbar^2}{2m}, \quad k_F = \left(\frac{3\pi^2}{2} \frac{A}{V} \right)^{1/3} = \left(\frac{3\pi^2}{2} \rho \right)^{1/3}$$

 $E_F/3 \sim 12.3 \text{ MeV}$ (実験データの半分くらい)

↑
残り半分はポテンシャル・エネルギーから

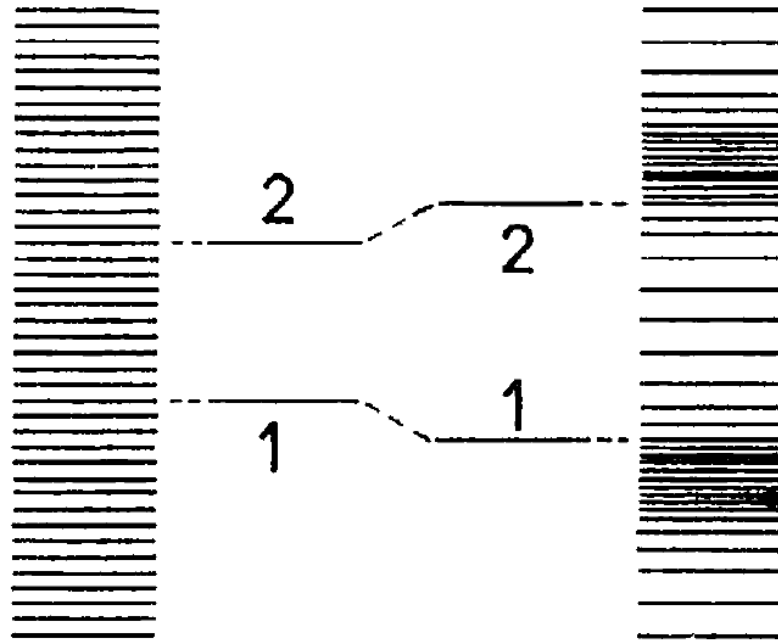
- fitting した式より束縛エネルギーが小さくなるものがあるのはなぜか？



いい質問です！

➤ fittingした式より束縛エネルギーが小さくなるものがあるのはなぜか？

詳しくは
魔法数の回
のときに



(a)

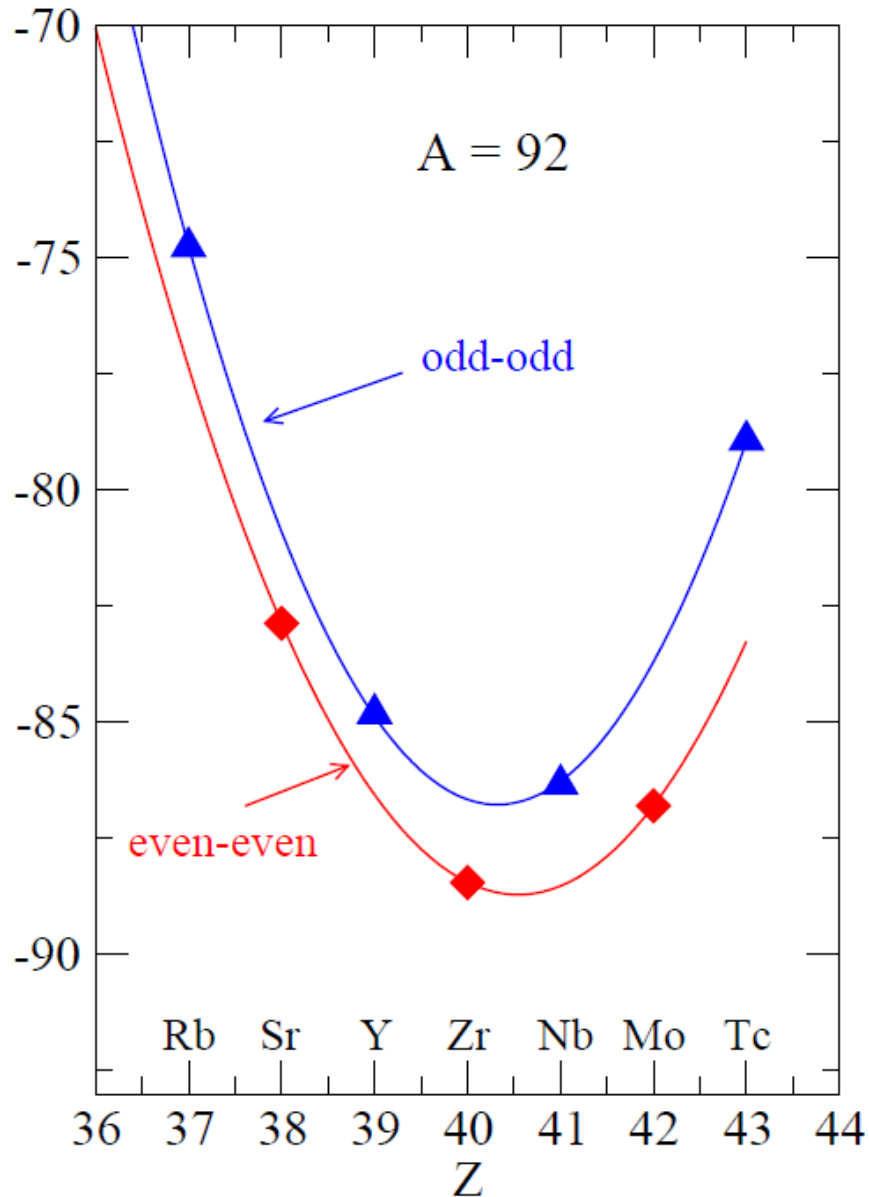
均一の場合

(b)

濃淡がある場合

準位密度に濃淡があれば、下から数えて濃淡の終わりまで準位がつまると(図の1の場合)、均一の場合に比べてエネルギーが小さい

➤ odd-odd に比べて even-even の方がなぜ安定になるのか？



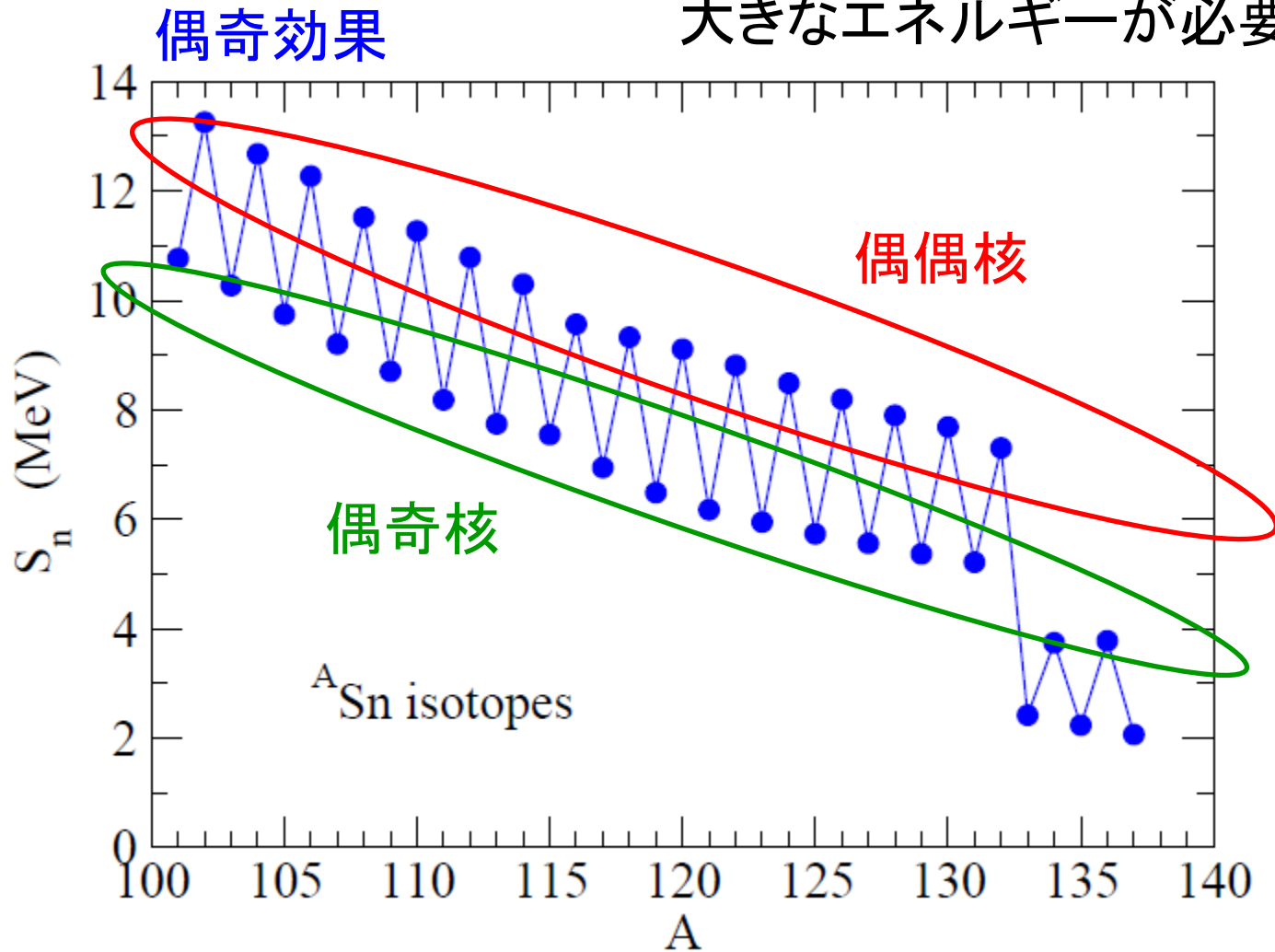
➤ 対相関(ペアリング)のため
ペアリングの回で詳しく説明します。

同種粒子 (nn 又は pp) はペア
を組んで安定化する。

(pn) もペアを組めるが、軽くない
安定核だと $N > Z$ なので p と n
は同じ軌道に入らず、ペアを組ま
ない。

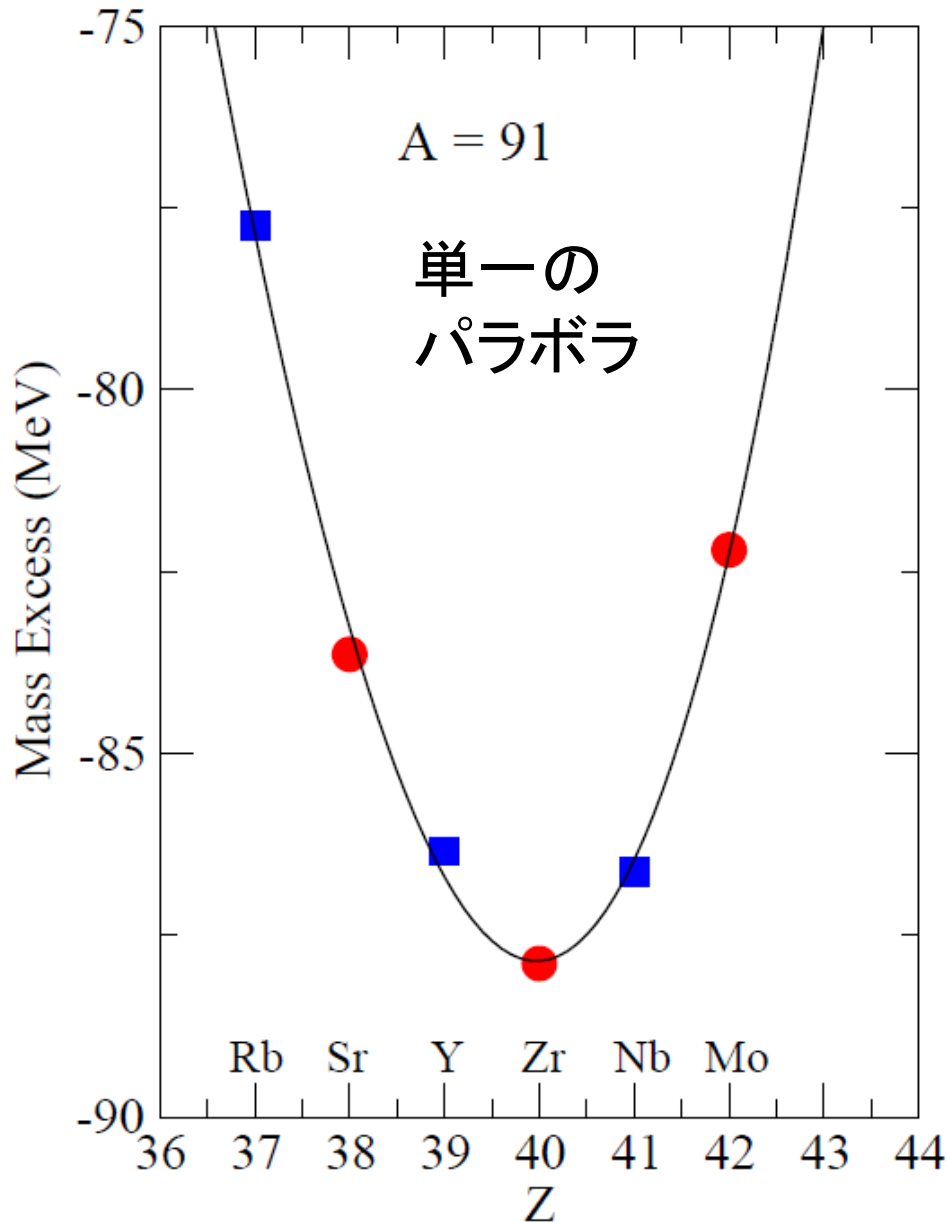
* 実は原子力の問題でも重要
← ^{235}U は燃えて ^{238}U は燃えない

偶数個の中性子から1つ中性子
を取る方が奇数個から取るより
大きなエネルギーが必要: 対相関



1n separation energy: $S_n (A,Z) = B(A,Z) - B(A-1,Z)$

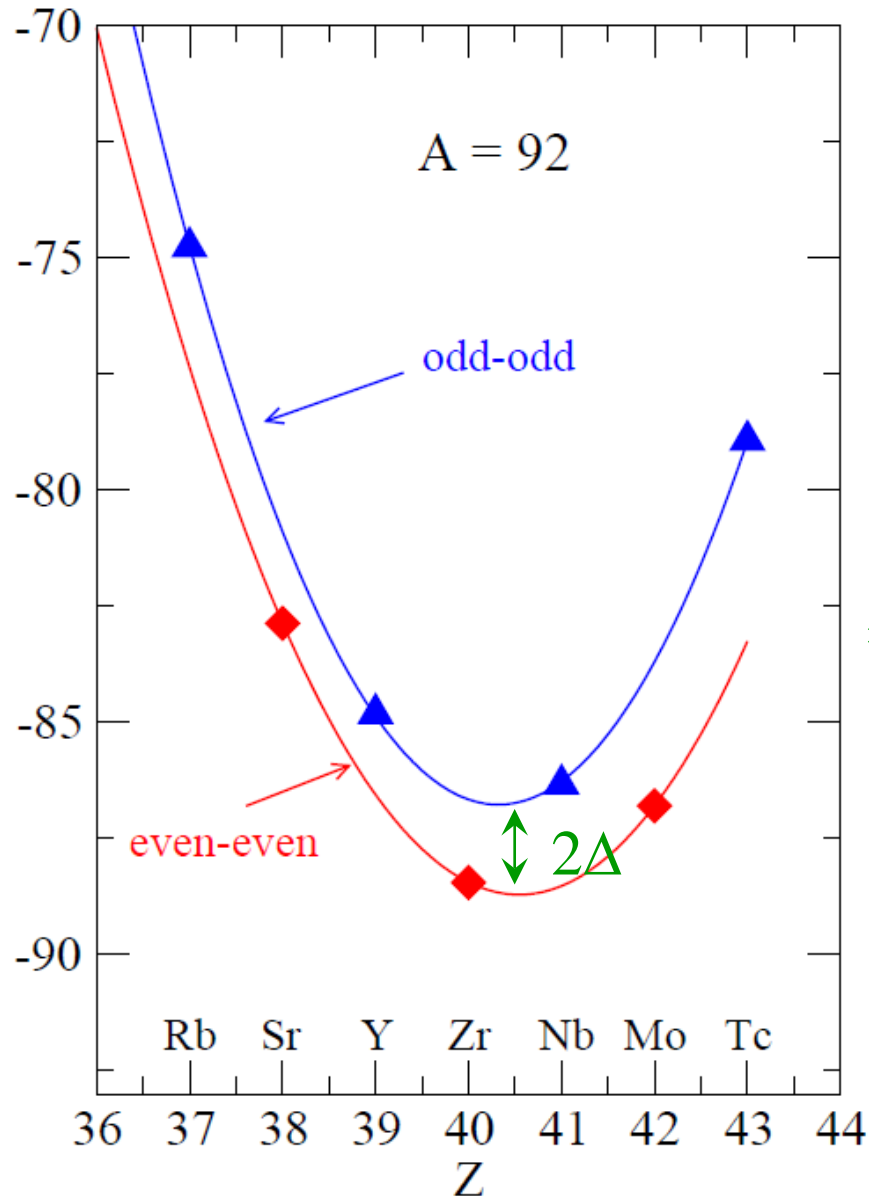
➤ odd-even と even-odd では差がないのはなぜですか？



even-odd: 陽子1つがあぶれる
odd-even: 中性子1つがあぶれる

$\Delta_p \sim \Delta_n$ であれば、差があまりでない。

➤ even-even と odd-odd のエネルギー差はどのくらいある？

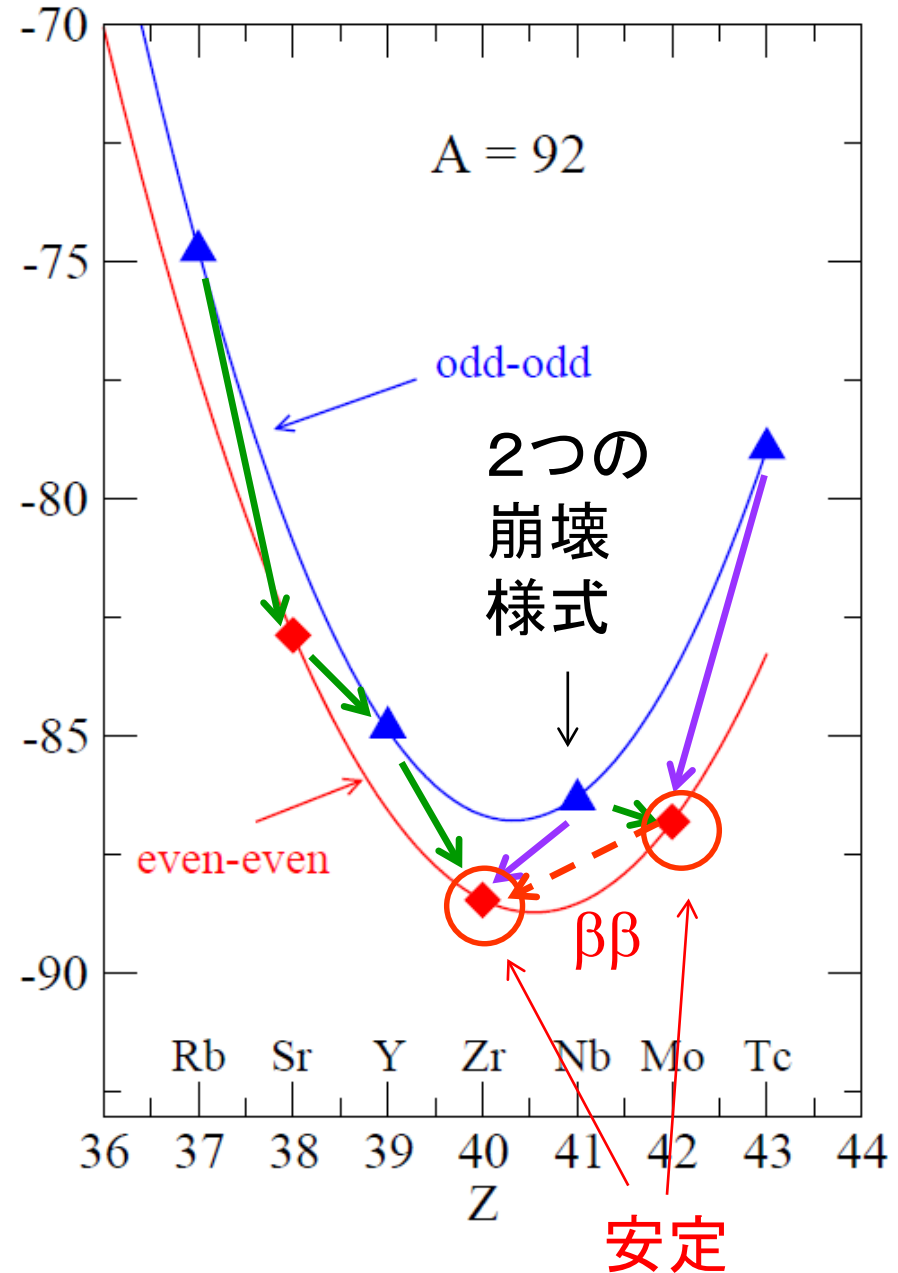
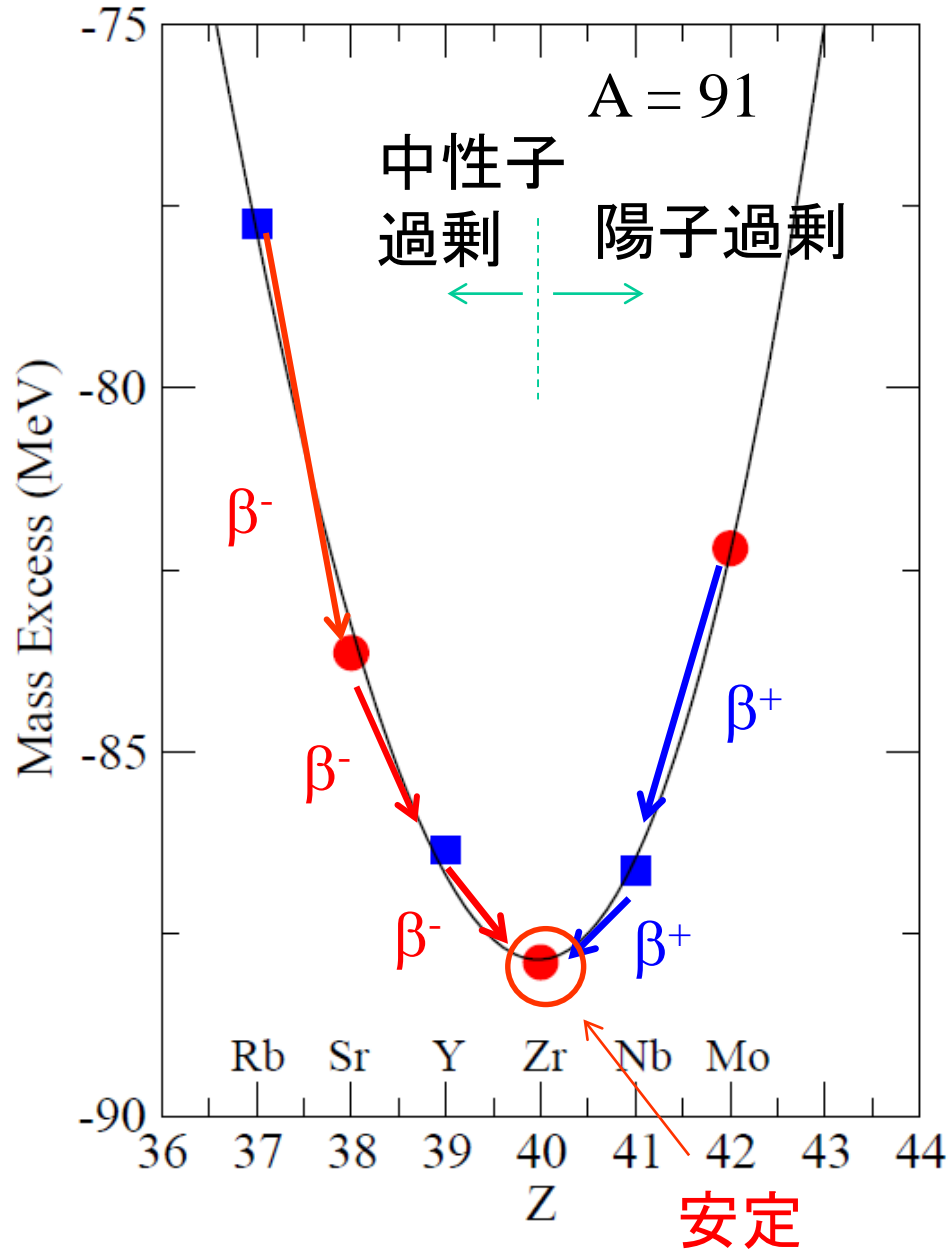


$$\Delta \sim 12/\text{Sqrt}[A] \text{ (MeV)}$$

A = 90 だと、 $\Delta \sim 1.26 \text{ MeV}$ 程度

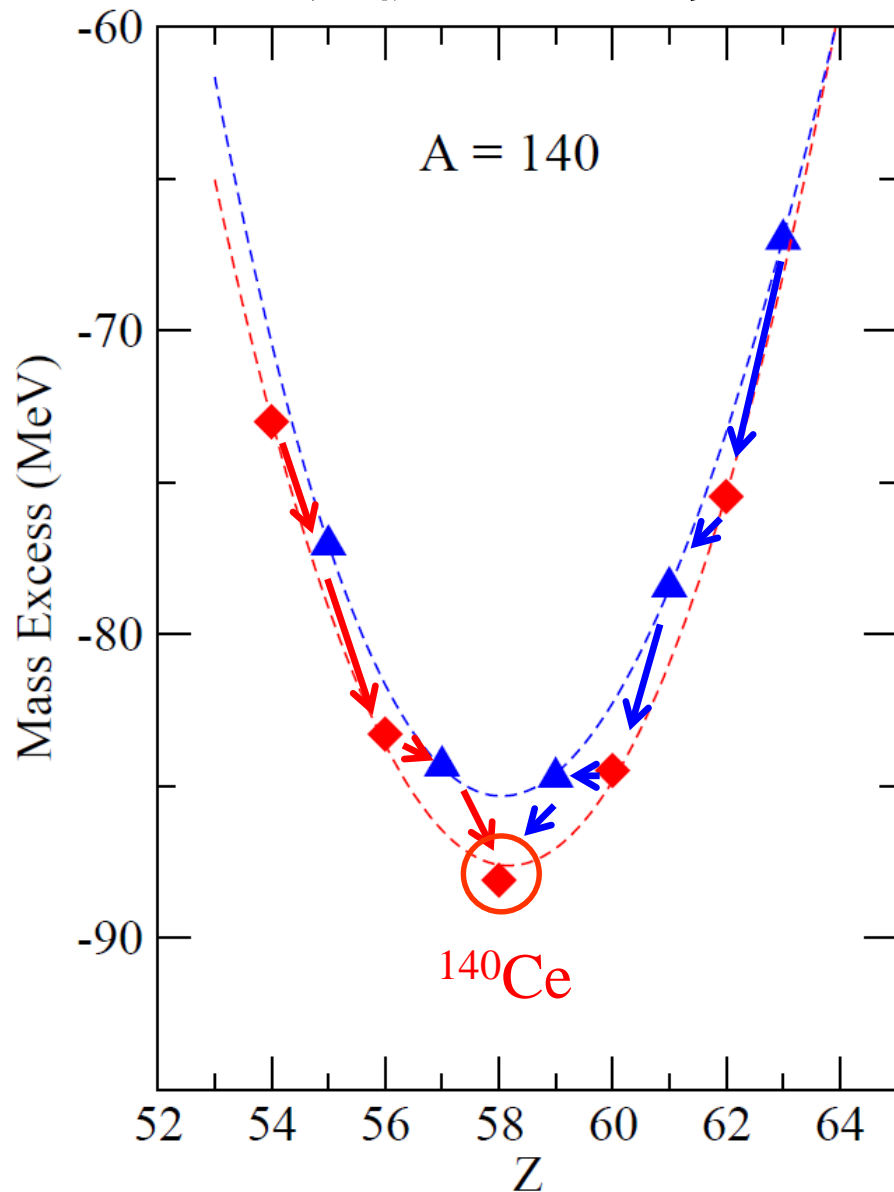
* ペアリングの回に詳しく説明します。

➤ 差がありすぎると、 β 安定核が3つ以上できることがある？

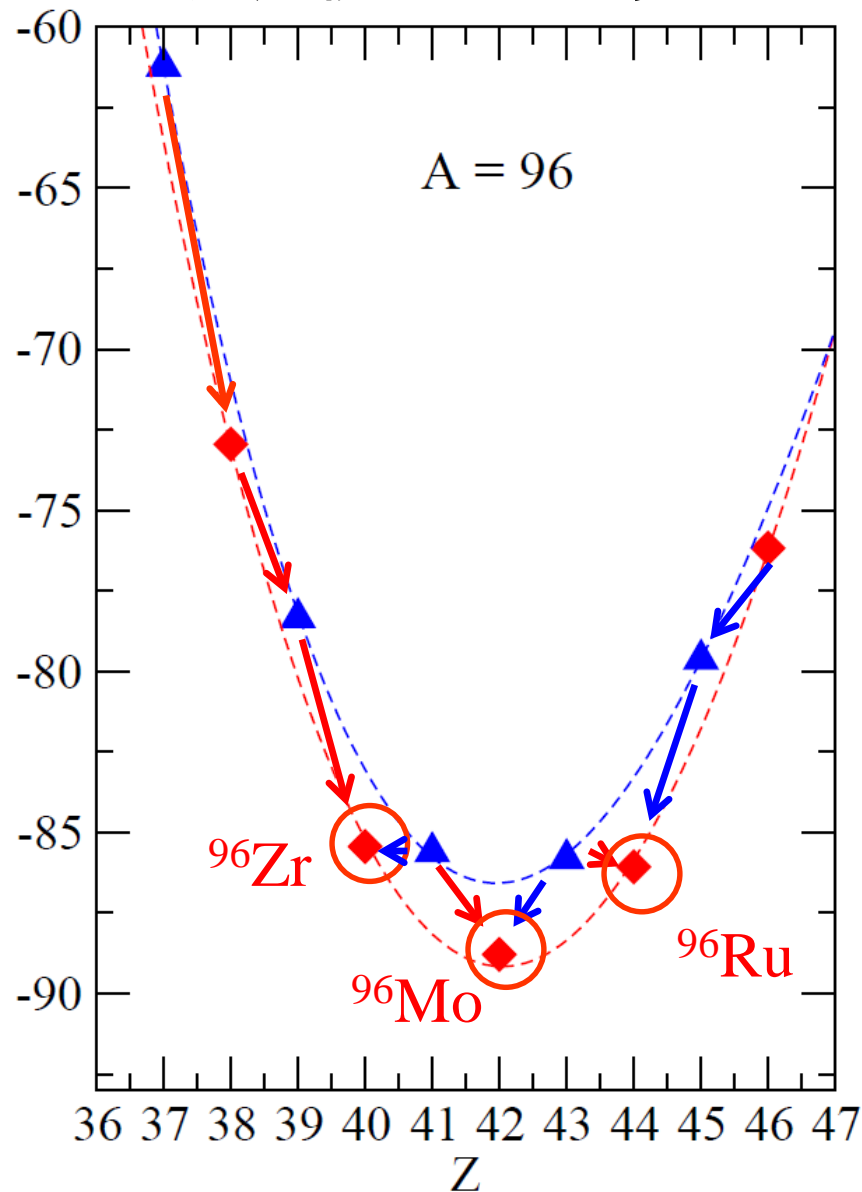


いい質問です！ → いろんな場合があります。

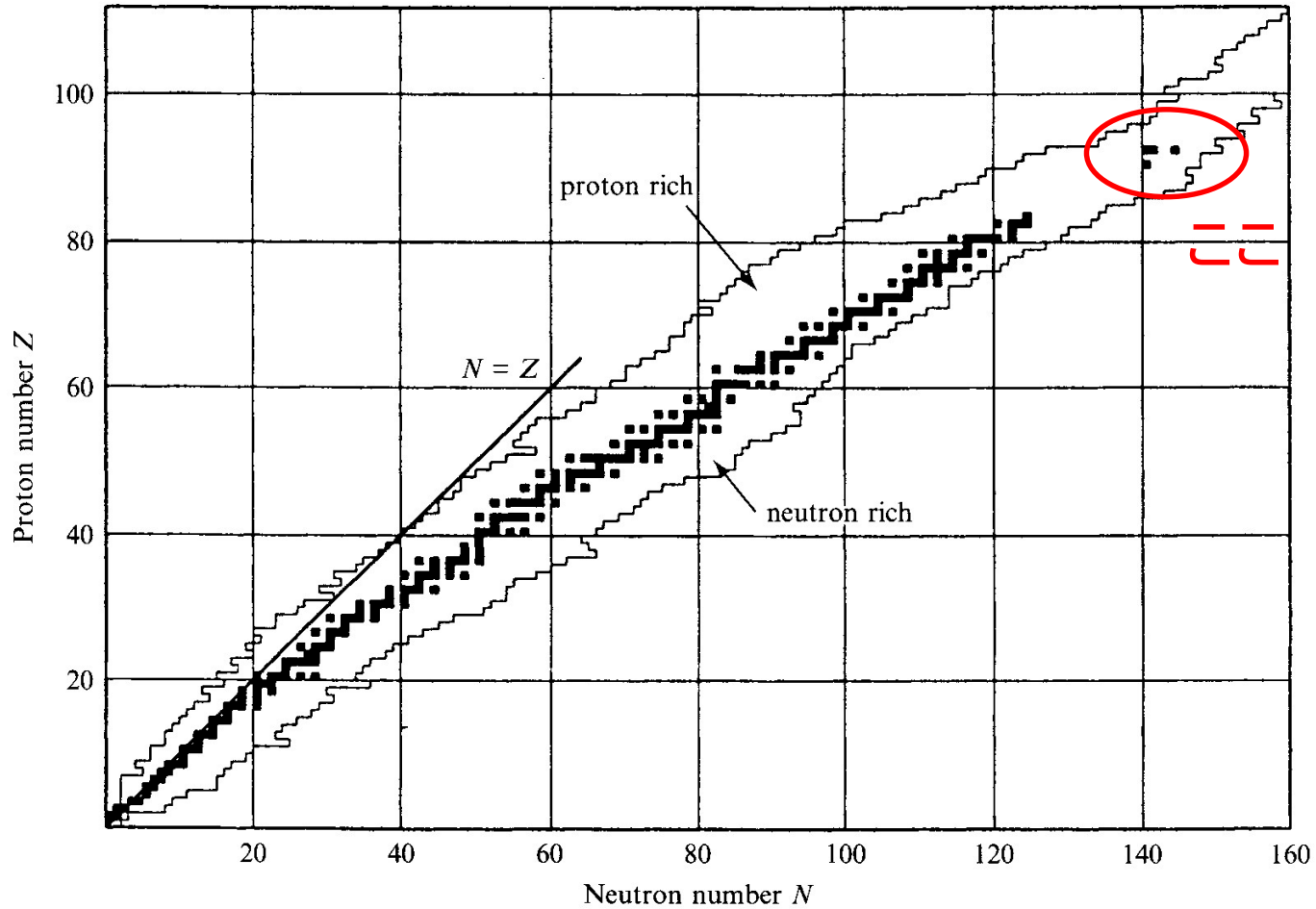
安定核が1つの場合



安定核が3つの場合



➤ 核図表でUのあたりが飛び地のようになっているのはなぜ？

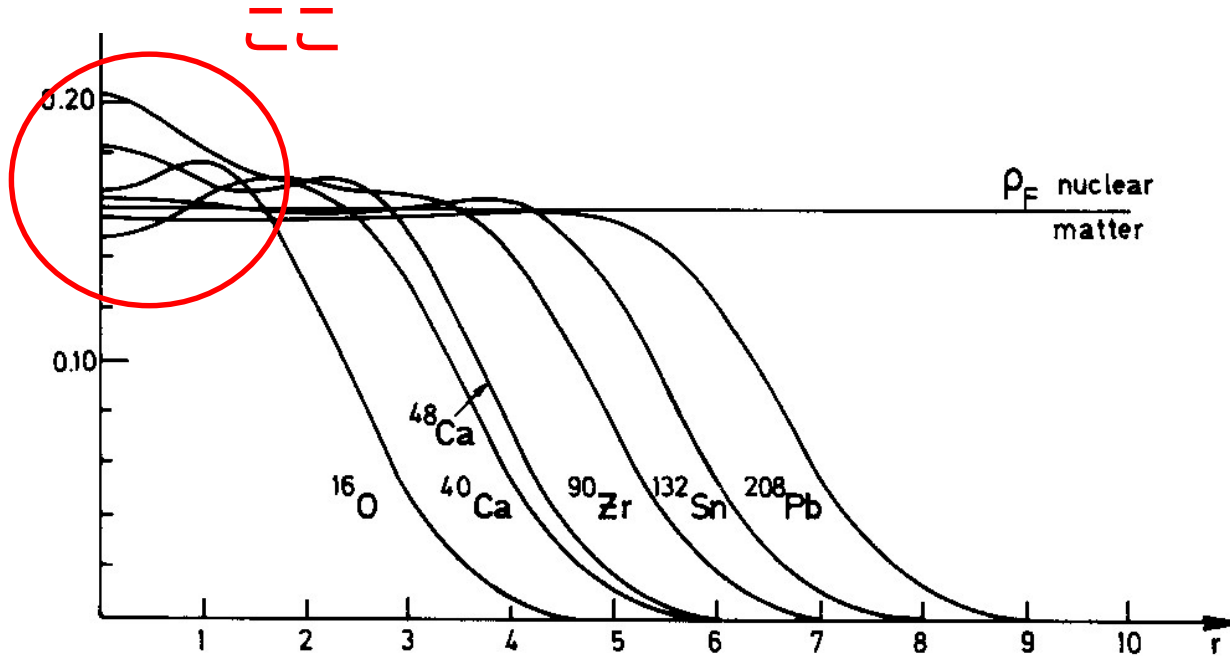


いいところに気が付きましたね！

Pbより重い元素は α 崩壊の寿命が短い → U や Th は寿命が長い

逆に、天体中でU や Th をどう作るか？という謎 (r-プロセス元素合成)

➤ 原子核の密度分布で $r \sim 0$ のあたりで上がったたり下がったりしているのはなぜ?



いいところに気が付きましたね！

→ 量子力学IIを知っていると理解できます

$$\rho(r) = \sum_k |\psi_k(r)|^2 \quad k = 1s_{1/2}, 1p_{3/2}, 1p_{1/2}, \dots$$

➤ 原子核の密度分布で $r \sim 0$ のあたりで上がったたり下がったりしているのはなぜ?

$$\rho(\mathbf{r}) = \sum_k |\psi_k(\mathbf{r})|^2 \quad k = 1s_{1/2}, 1p_{3/2}, 1p_{1/2}, \dots$$

$$\psi_k(\mathbf{r}) = \frac{u_{nl}(r)}{r} \mathcal{Y}_{jlm}(\hat{\mathbf{r}})$$

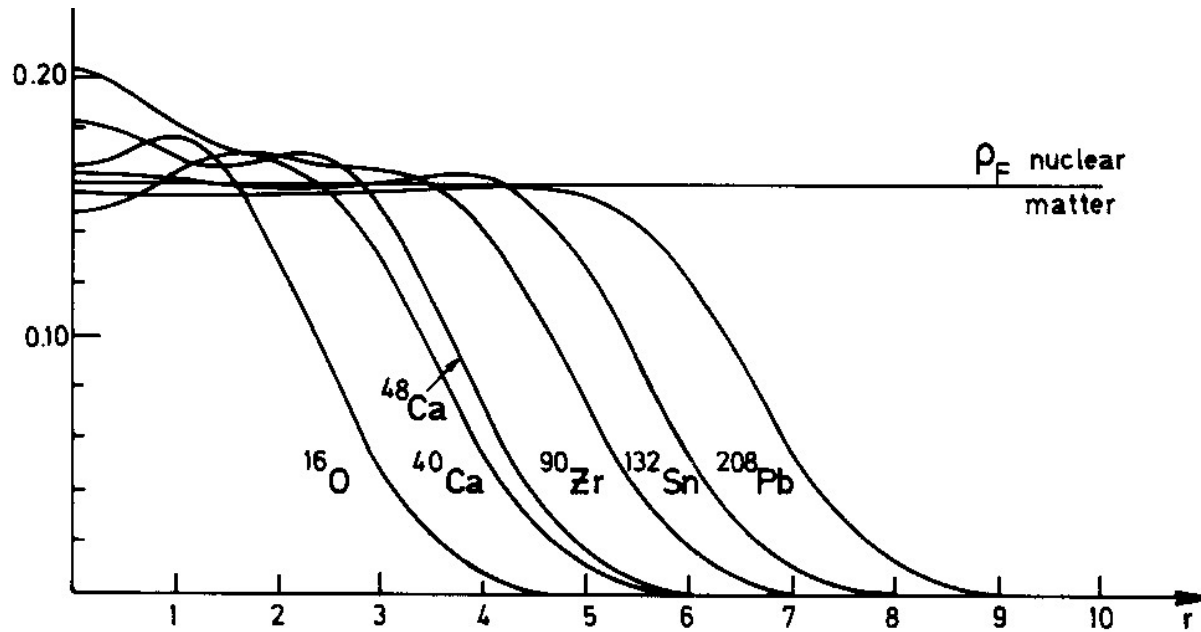
としたとき、

$$u_{nl}(r) \sim r^{l+1}$$

すなわち、 $r=0$ で値を持つのは $l=0$ のみ。

→ どのくらい $l=0$ の軌道があるかで、密度分布の $r=0$ での値が上下する。

➤ Fermi 分布の表式がどのように導出できるか分からなかった

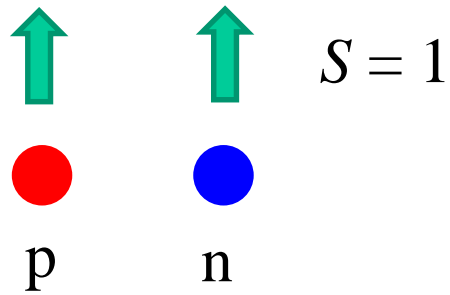


$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp[(r - R_0)/a]}$$

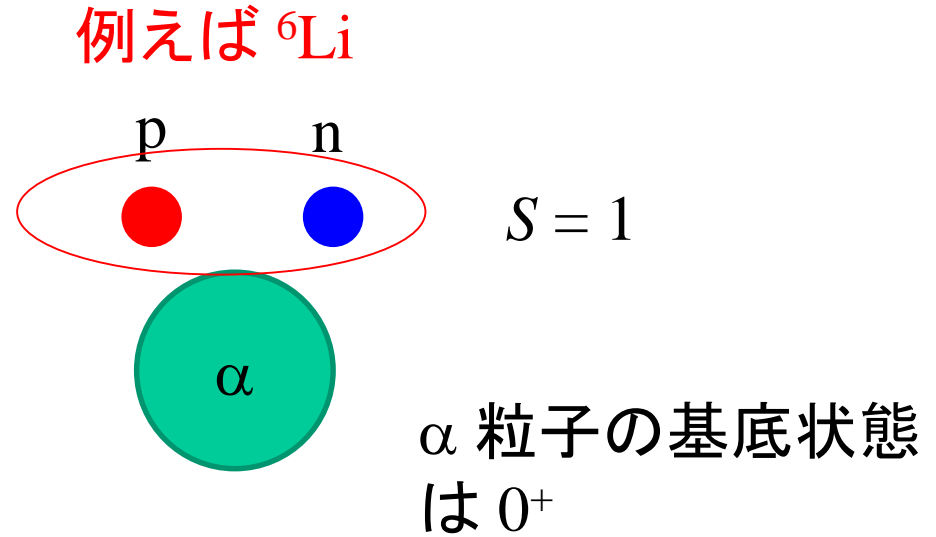
✓ この関数は導出というよりは、フィッティングの関数

- pn の2体系はテンソル力で $S=1$ となるが、奇奇核でもそのようなことは起こるのか？

いい質問です！



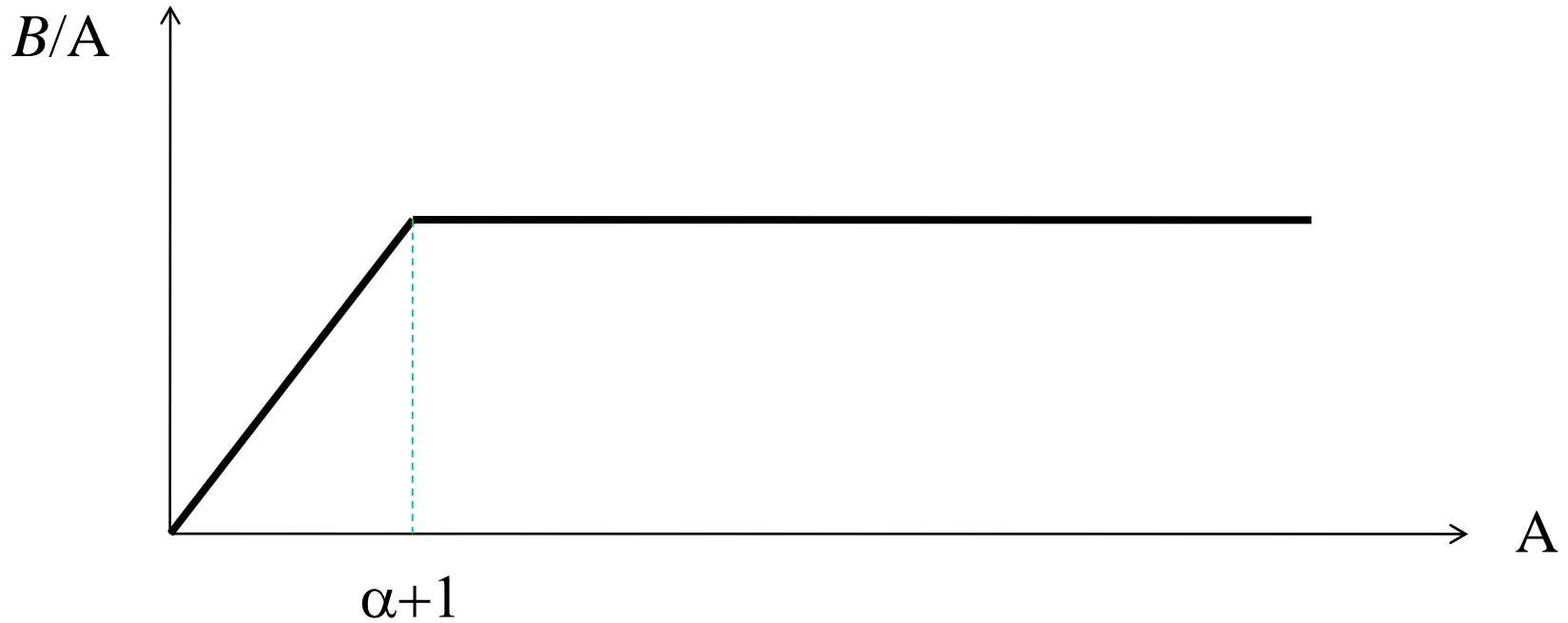
重陽子



α 粒子の基底状態は 0^+

$I=1$

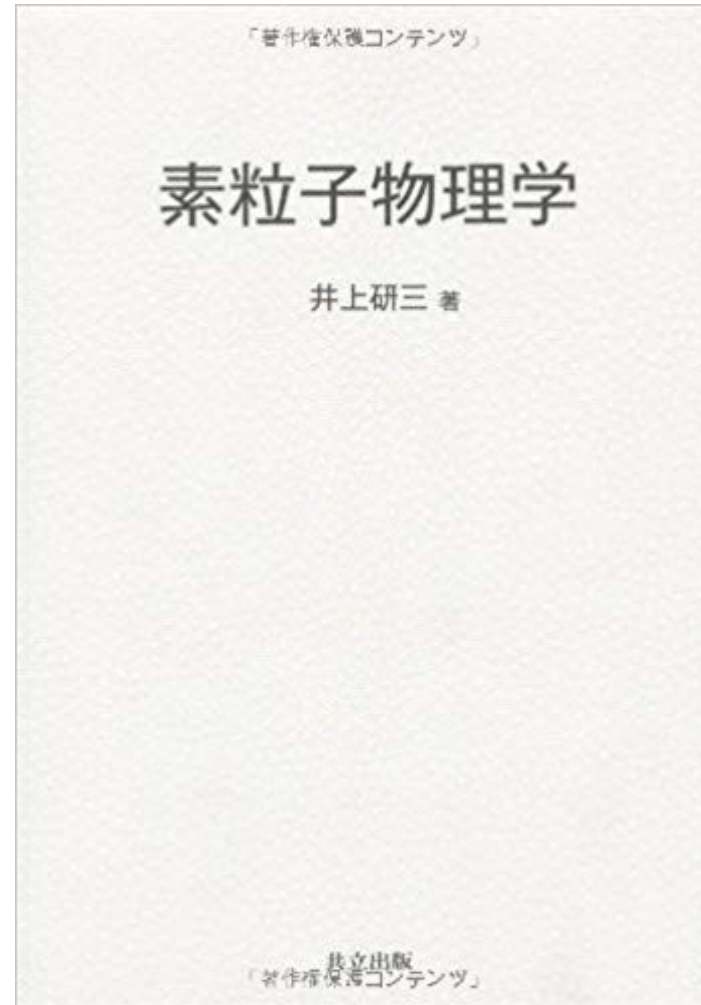
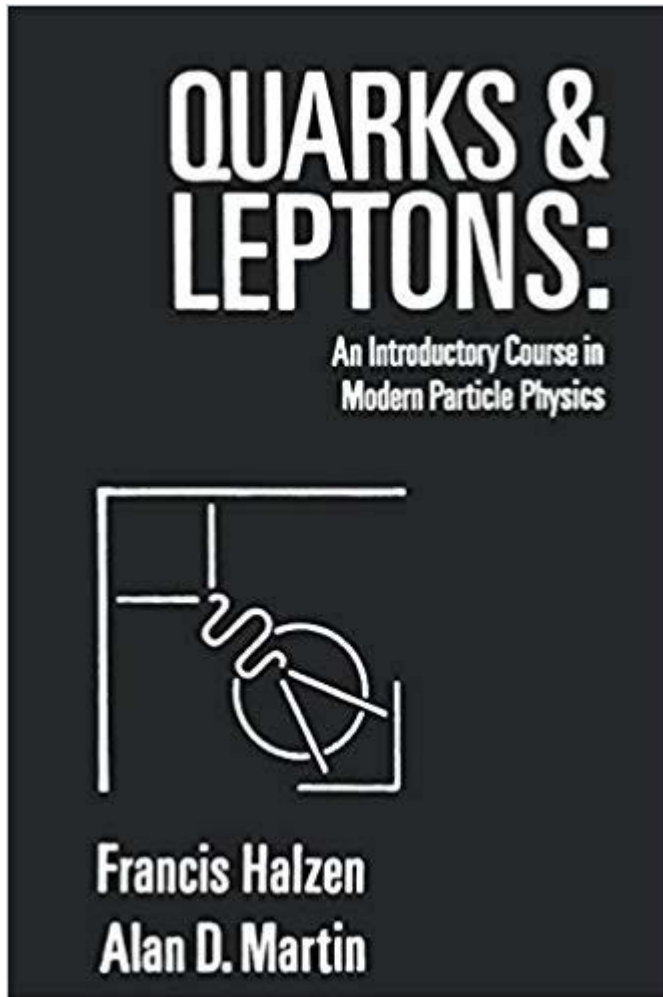
➤ なぜ $\alpha + 1$ なのか?



✓ 1つの核子に注目したときに、ほかの α 個と相互作用。

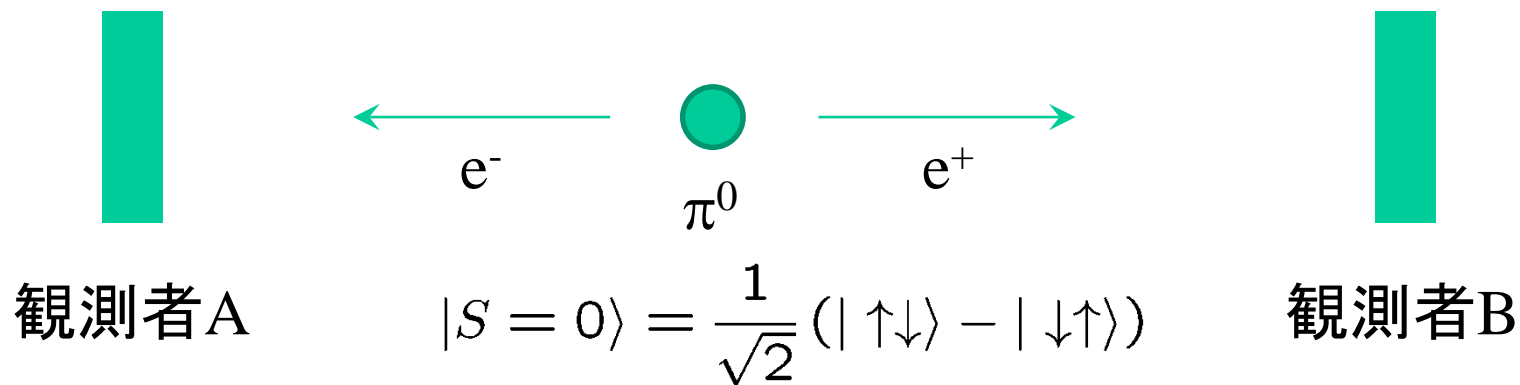
→ $A = \alpha + 1$ のとき、その中の1つの核子は他の核子全て (α 個) と相互作用できる。

➤ ハドロン物理の興味深い本を紹介して欲しい

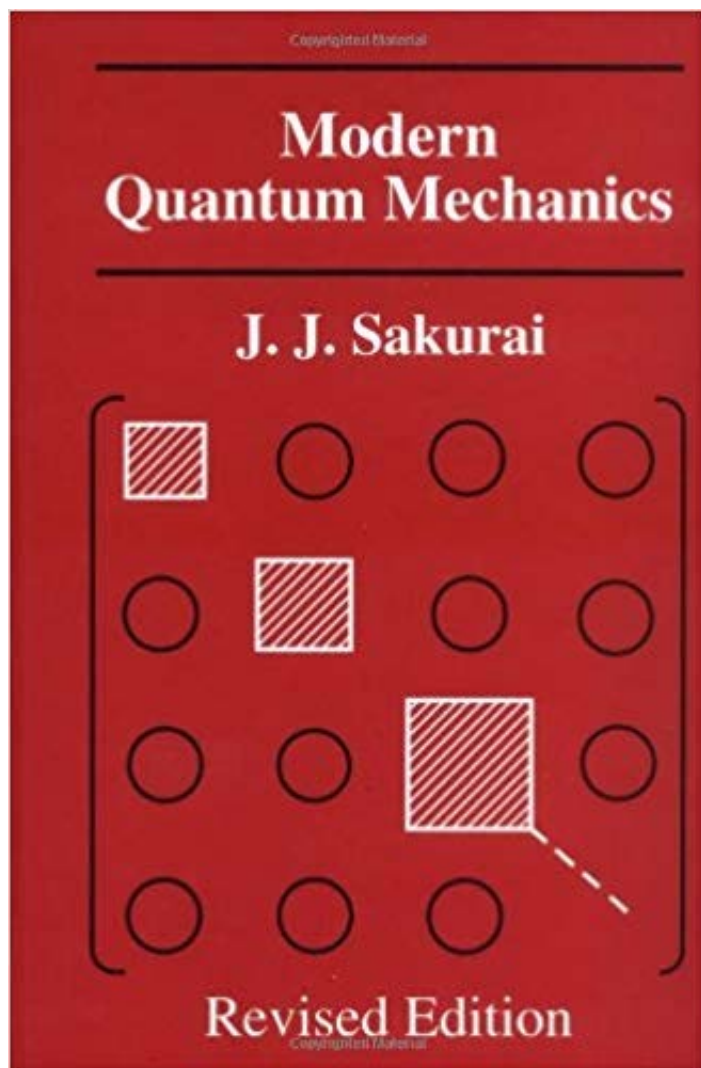


「素粒子物理学」というタイトルだが、
中身は主にハドロン物理学。

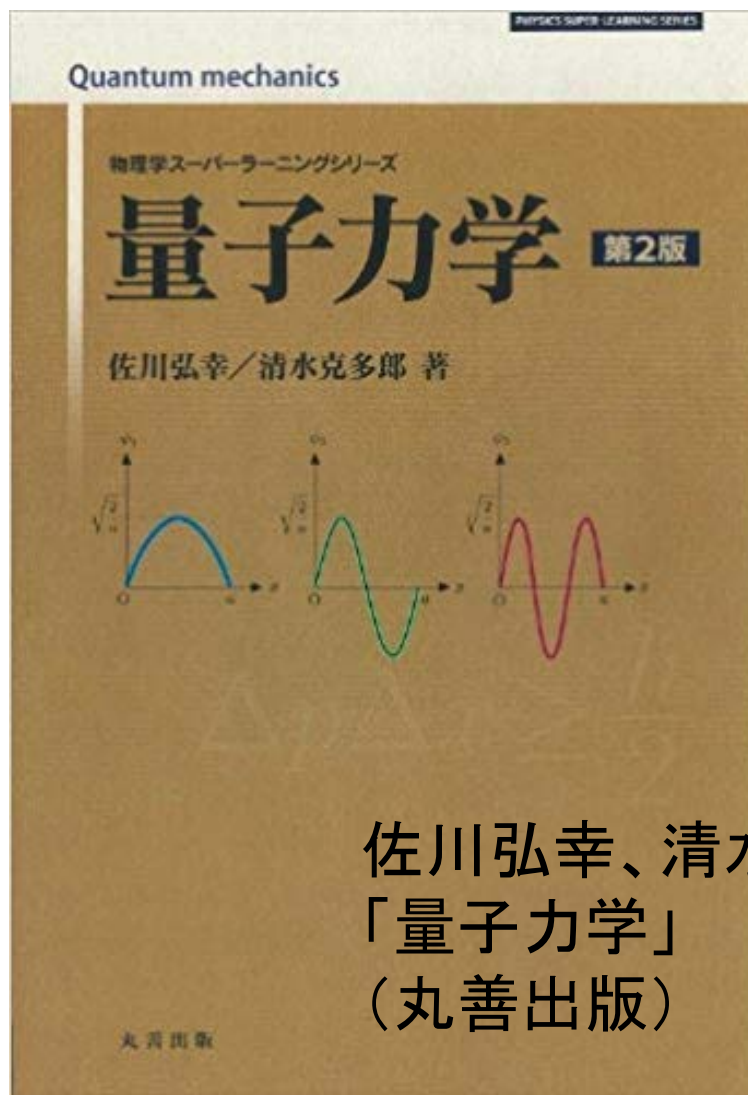
➤ EPRパラドックスについて分かりやすい本を紹介して欲しい



➤ EPRパラドックスについて分かりやすい本を紹介して欲しい



第3.9章



佐川弘幸、清水克多郎著
「量子力学」
(丸善出版)

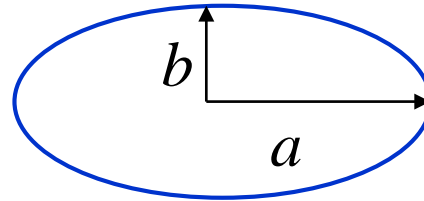
第9章

原子核の表面振動

$$B(N, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{\text{sym}} \frac{(N - Z)^2}{A} \quad (\text{球形の原子核})$$

原子核を**体積一定のまま**変形してみるとどうなるか(原子核は体積を変えるのが大変なので)?

例) 回転楕円体



$$\begin{aligned} a &= R \cdot (1 + \epsilon) \\ b &= R \cdot (1 + \epsilon)^{-1/2} \\ ab^2 &= R^3 = \text{一定} \end{aligned}$$

変形したときのエネルギー変化:

- 体積項、対称項: 変化せず
- 表面項: 損をする(表面積が大きくなるため)
- クーロン項: 得をする(平均的な陽子間距離が大きくなるため)

$\left\{ \begin{array}{ll} \text{表面項} & \rightarrow \text{球形になる傾向} \\ \text{クーロン項} & \rightarrow \text{変形になる傾向} \end{array} \right\} \rightarrow \text{2つの力の競合}$

□ 表面項

$$E_S(\epsilon) = \underbrace{\sigma}_{\text{表面張力}} \underbrace{\int_S dS}_{\text{表面積分}} \sim E_S^{(0)} \left(1 + \frac{2}{5}\epsilon^2 - \frac{4}{105}\epsilon^3 + \dots \right)$$

損

表面張力 表面積分

$$4\pi R^2 \sigma \propto A^{2/3}$$

$$E_S^{(0)} = +a_S A^{2/3}$$

□ クーロン項

$$E_C(\epsilon) = \frac{1}{2} \int d\mathbf{r} d\mathbf{r}' \frac{e^2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \rho(\mathbf{r}) \rho(\mathbf{r}') \\ \sim E_C^{(0)} \left(1 - \frac{1}{5}\epsilon^2 - \frac{4}{105}\epsilon^3 + \dots \right)$$

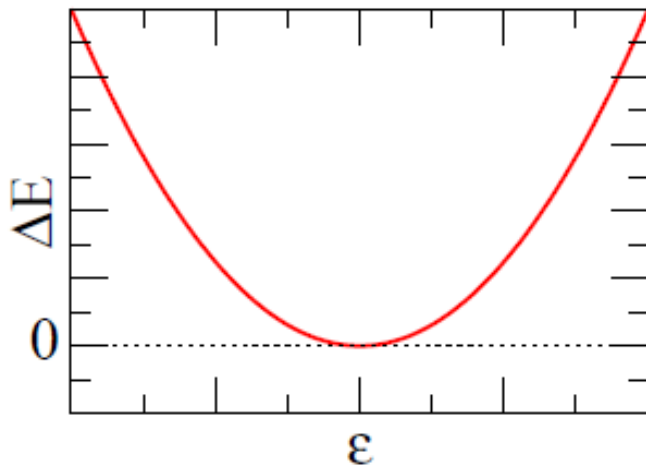
得

$$E_C^{(0)} = +a_C Z^2 / A^{1/3}$$

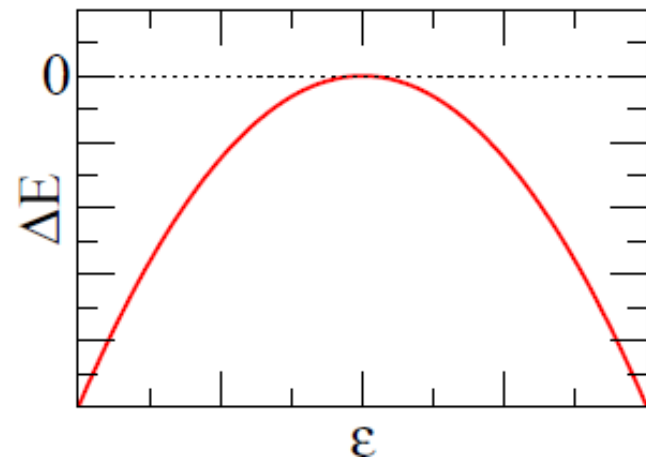
$$\begin{aligned}
 & \curvearrowright E_S + E_C - E_S^{(0)} - E_C^{(0)} \\
 & = \left(\frac{2}{5} E_S^{(0)} - \frac{1}{5} E_C^{(0)} \right) \epsilon^2 - \frac{4}{105} \left(E_S^{(0)} + E_C^{(0)} \right) \epsilon^3 + \dots
 \end{aligned}$$

■ まずは2次から

$$\frac{2}{5} E_S^{(0)} > \frac{1}{5} E_C^{(0)} \quad \text{だと}$$



$$\frac{2}{5} E_S^{(0)} < \frac{1}{5} E_C^{(0)} \quad \text{だと}$$



→ 核分裂に対して不安定

フィシリティ・パラメーター

$$\frac{2}{5} E_S^{(0)} - \frac{1}{5} E_C^{(0)} = \frac{2}{5} E_S^{(0)} \left(1 - \frac{E_C^{(0)}}{2E_S^{(0)}} \right) \equiv \frac{2}{5} E_S^{(0)} (1 - x)$$

$$\begin{aligned}
 & \curvearrowright E_S + E_C - E_S^{(0)} - E_C^{(0)} \\
 & = \left(\frac{2}{5} E_S^{(0)} - \frac{1}{5} E_C^{(0)} \right) \epsilon^2 - \frac{4}{105} \left(E_S^{(0)} + E_C^{(0)} \right) \epsilon^3 + \dots
 \end{aligned}$$

■ まずは2次から

$$\frac{2}{5} E_S^{(0)} - \frac{1}{5} E_C^{(0)} = \frac{2}{5} E_S^{(0)} \left(1 - \frac{E_C^{(0)}}{2E_S^{(0)}} \right)$$

フィシリティ(fissility)パラメーター: x

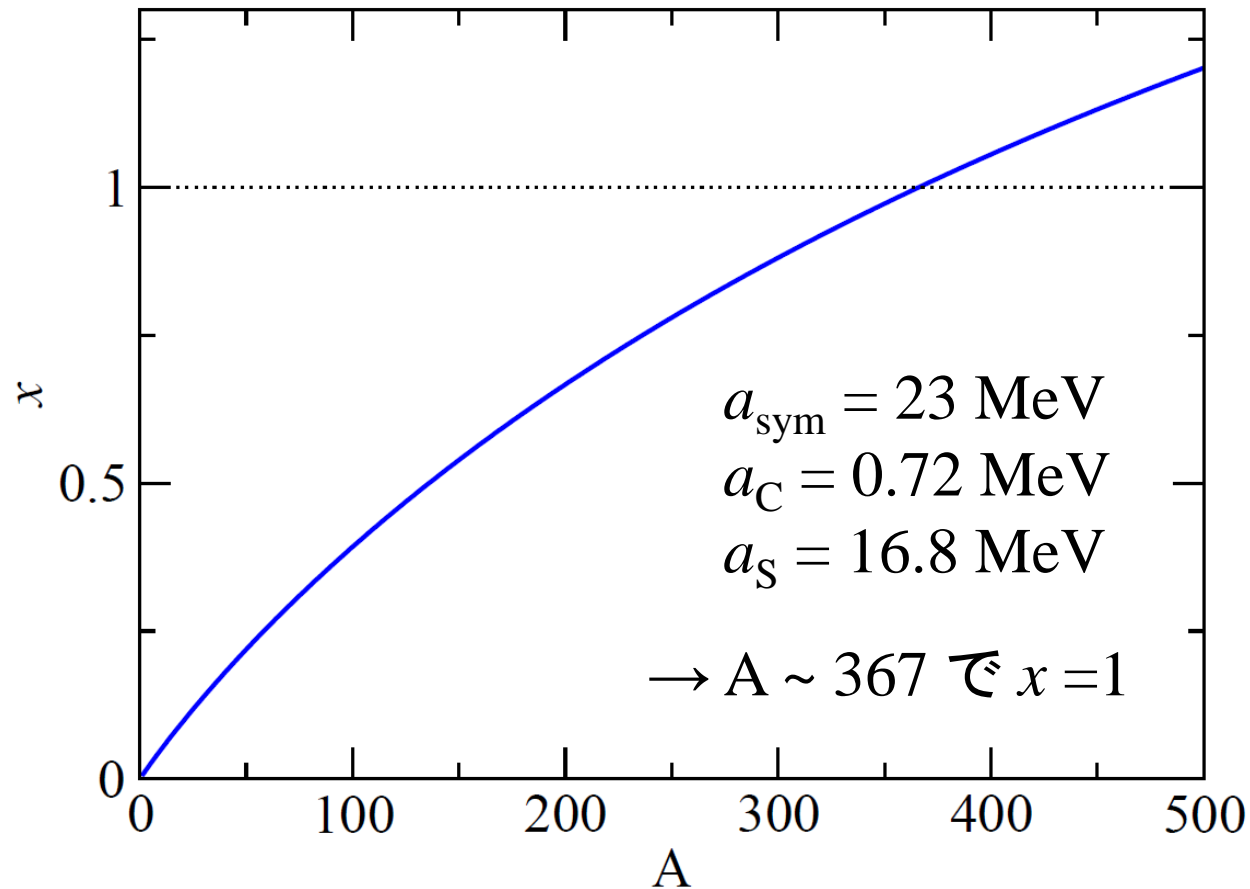
$$E_S^{(0)} = +a_S A^{2/3} \sim 20 A^{2/3} \quad (\text{MeV})$$

$$E_C^{(0)} = +a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} \sim 0.751 \frac{Z^2}{A^{1/3}} \quad (\text{MeV})$$

$$\longrightarrow x \equiv \frac{E_C^{(0)}}{2E_S^{(0)}} = \frac{a_C}{2a_S} \cdot \frac{Z^2}{A} \sim \frac{1}{53.3} \cdot \frac{Z^2}{A}$$

$$Z = \frac{4a_{\text{sym}}}{2a_{\text{C}}/A^{1/3} + 8a_{\text{sym}}/A} \quad \leftarrow \quad \left. \frac{\partial m}{\partial Z} \right|_{A=\text{const.}} = 0$$

$$x \equiv \frac{E_{\text{C}}^{(0)}}{2E_{\text{S}}^{(0)}} = \frac{a_{\text{C}}}{2a_{\text{S}}} \cdot \frac{Z^2}{A}$$



原子核の表面振動

$$E_{\text{surf}} = E_{\text{surf}}^{(0)} \left(1 + \frac{2}{5} \epsilon^2 + \dots \right)$$

$$E_C = E_C^{(0)} \left(1 - \frac{1}{5} \epsilon^2 + \dots \right)$$



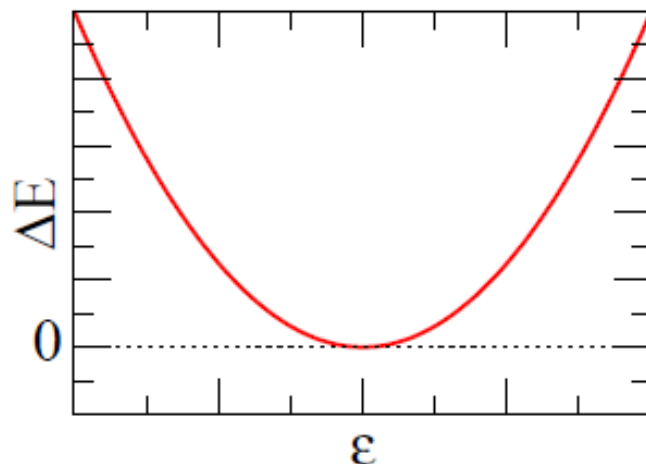
$$\Delta E = E_{\text{surf}}^{(0)} \cdot \frac{2}{5} (1 - x) \epsilon^2$$

* 原子核が安定に存在するためには
 $x < 1$ が必要

$$x \equiv \frac{E_C^{(0)}}{2E_{\text{surf}}^{(0)}}$$

(fissility パラメーター)

ϵ^2 に比例するようなポテンシャル



原子核の表面振動

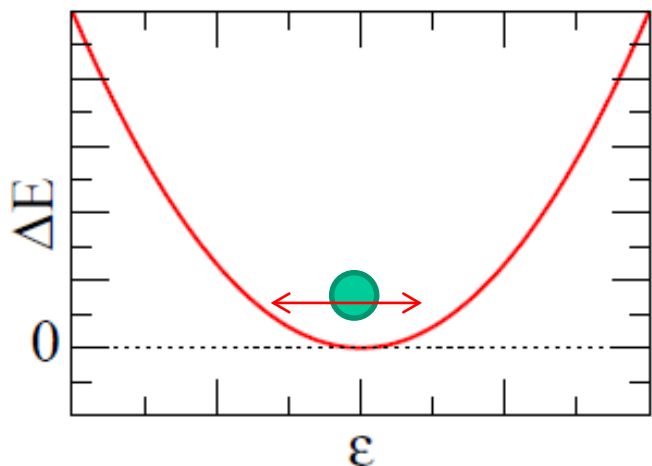
$$E_{\text{surf}} = E_{\text{surf}}^{(0)} \left(1 + \frac{2}{5} \epsilon^2 + \dots \right)$$

$$E_C = E_C^{(0)} \left(1 - \frac{1}{5} \epsilon^2 + \dots \right)$$



$$\Delta E = E_{\text{surf}}^{(0)} \cdot \frac{2}{5} (1 - x) \epsilon^2$$

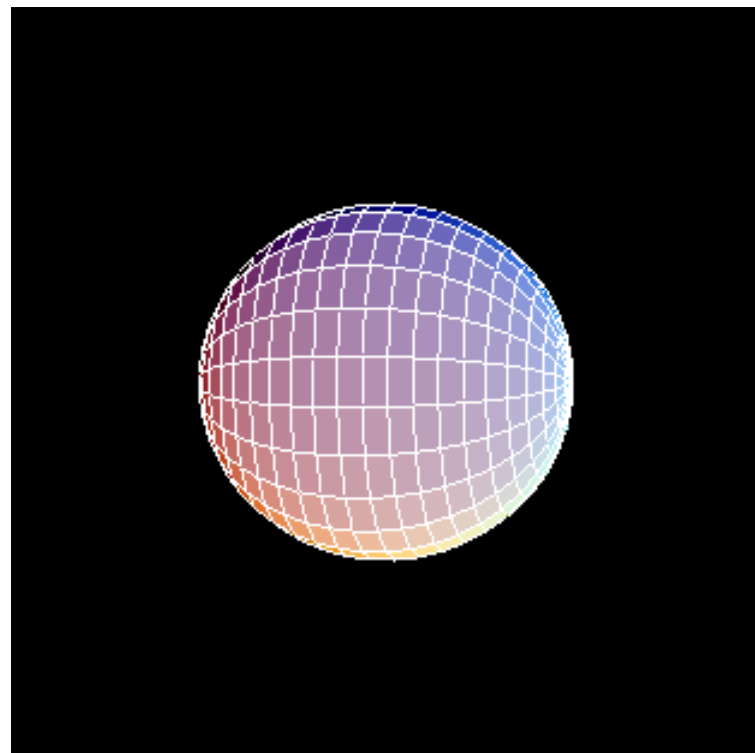
* 原子核が安定に存在するためには
 $x < 1$ が必要



極小点まわりの
ゆらぎ

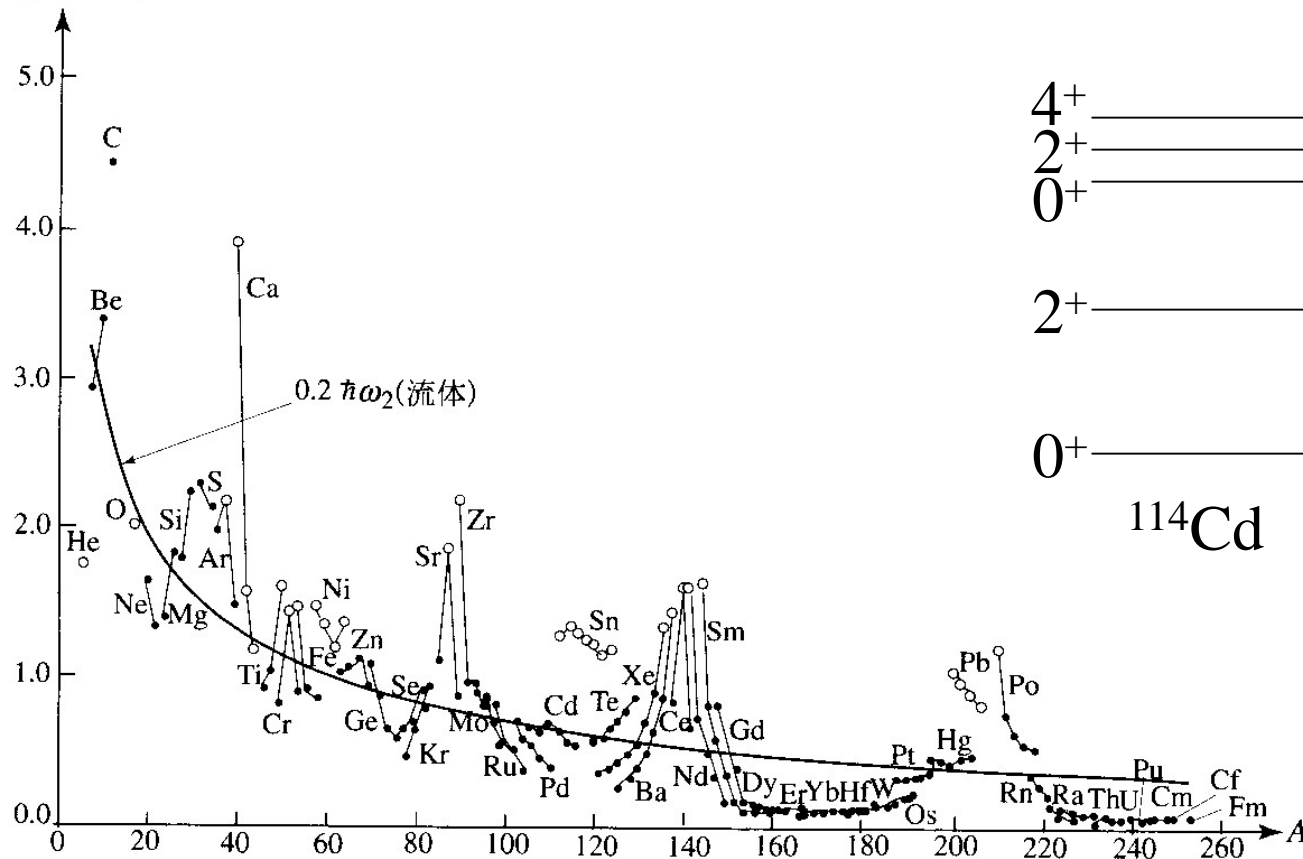
$$x \equiv \frac{E_C^{(0)}}{2E_{\text{surf}}^{(0)}}$$

(fissility パラメーター)



様々な原子核で調和振動子に近いスペクトル → 振動運動

E_{2^+} (MeV)



4 ⁺	—————	1.282 MeV
2 ⁺	—————	1.208 MeV
0 ⁺	—————	1.133 MeV
2 ⁺	—————	0.558 MeV
0 ⁺	—————	
114Cd		

図 3.2 偶々核の第 1 励起 2⁺ 状態の励起エネルギー

(復習) 1次元調和振動子

$$H = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega^2 x^2$$

$$a = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}} \left(x + \frac{ip}{m\omega} \right)$$
$$a^\dagger = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}} \left(x - \frac{ip}{m\omega} \right)$$

を用いてハミルトニアン
を書き直すと

$$H = \hbar\omega \left(a^\dagger a + \frac{1}{2} \right) \quad [a, a^\dagger] = 1$$

基底状態: $|0\rangle \quad E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega \quad \text{cf. } a|0\rangle = 0$

励起状態: $|n\rangle = \frac{1}{\sqrt{n!}} (a^\dagger)^n |0\rangle \quad E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega$

1次元調和振動子

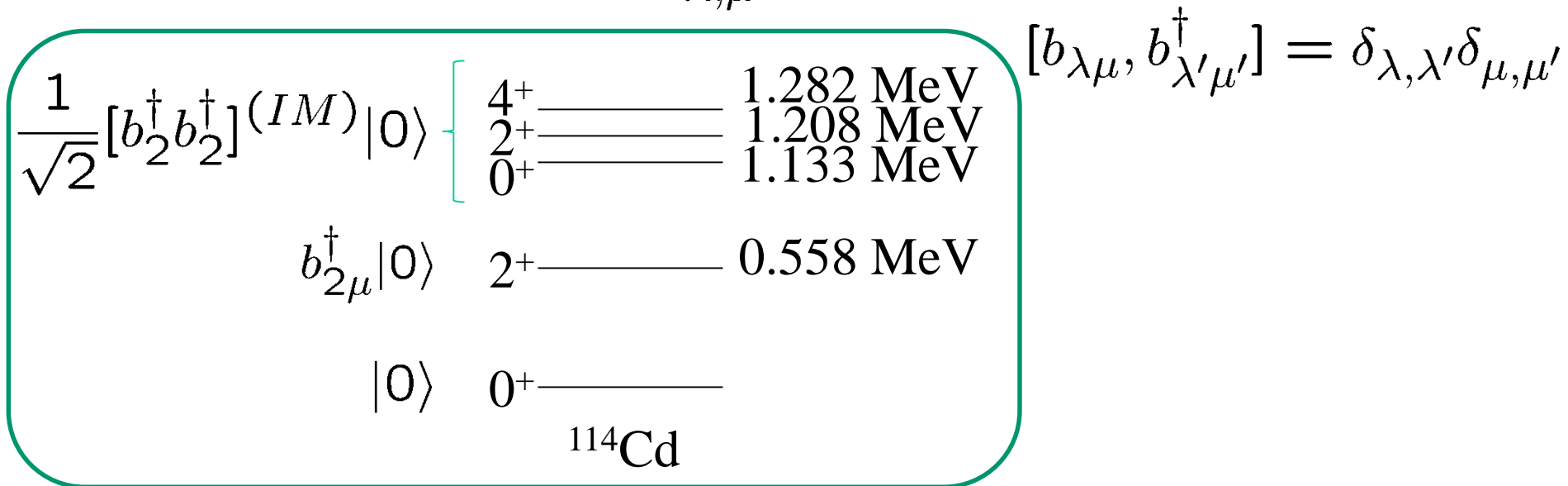
$$H = \hbar\omega \left(a^\dagger a + \frac{1}{2} \right)$$

$$|n\rangle = \frac{1}{\sqrt{n!}} (a^\dagger)^n |0\rangle \quad E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega$$

原子核の表面振動

$$H = \frac{1}{2} \sum_{\lambda, \mu} \left\{ B_\lambda |\dot{\alpha}_{\lambda\mu}|^2 + C_\lambda |\alpha_{\lambda\mu}|^2 \right\}$$

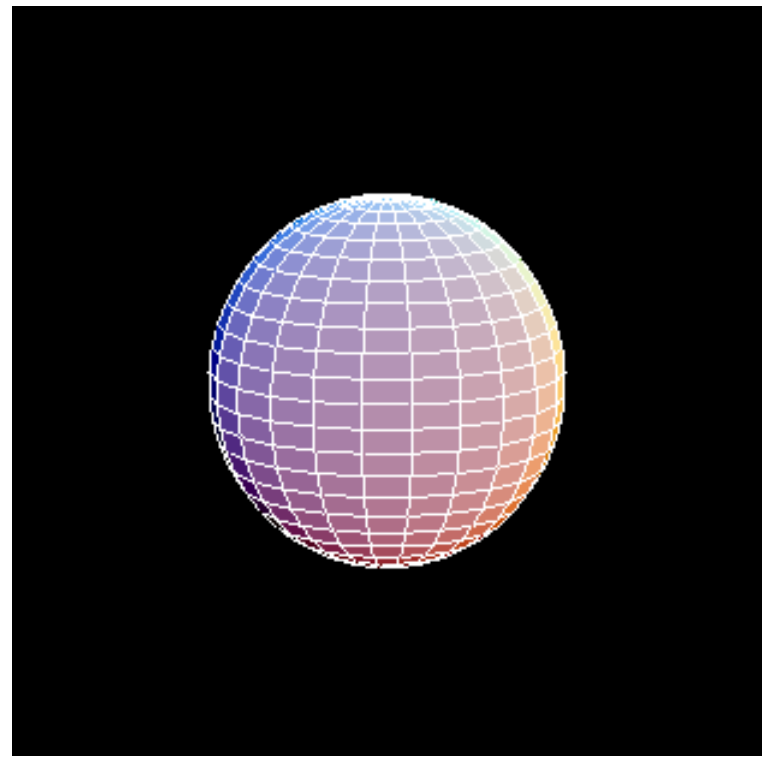
$$= \sum_{\lambda, \mu} \hbar\omega_\lambda \left(b_{\lambda\mu}^\dagger b_{\lambda\mu} + \frac{1}{2} \right)$$



2重フォノン状態

4 ⁺	—————	1.282 MeV
2 ⁺	—————	1.208 MeV
0 ⁺	—————	1.133 MeV
2 ⁺	—————	0.558 MeV
0 ⁺	—————	

¹¹⁴Cd



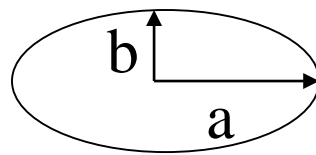
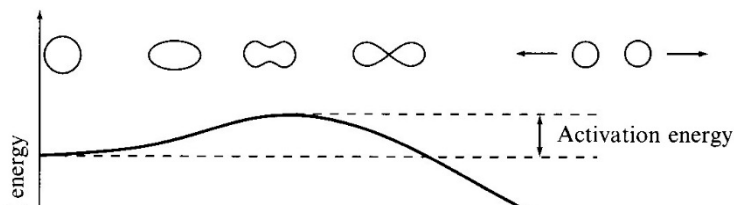
$$[b_2^\dagger b_2^\dagger](IM)$$

2つの角運動量 2 を合成して合成角運動量 I を組む。



ボゾンの交換関係を課すと I は偶数のみ許される

もっと一般には:



$$a = R \cdot (1 + \epsilon)$$

$$b = R \cdot (1 + \epsilon)^{-1/2}$$

一般的に,
$$R(\theta, \phi) = R_0 \left(1 + \sum_{\lambda, \mu} \alpha_{\lambda\mu} Y_{\lambda\mu}^*(\theta, \phi) \right)$$

(回転楕円体は $\lambda = 2, \mu = 0$ に相当)

回転楕円体の時と同じように表面エネルギー、クーロンエネルギーを計算すると:

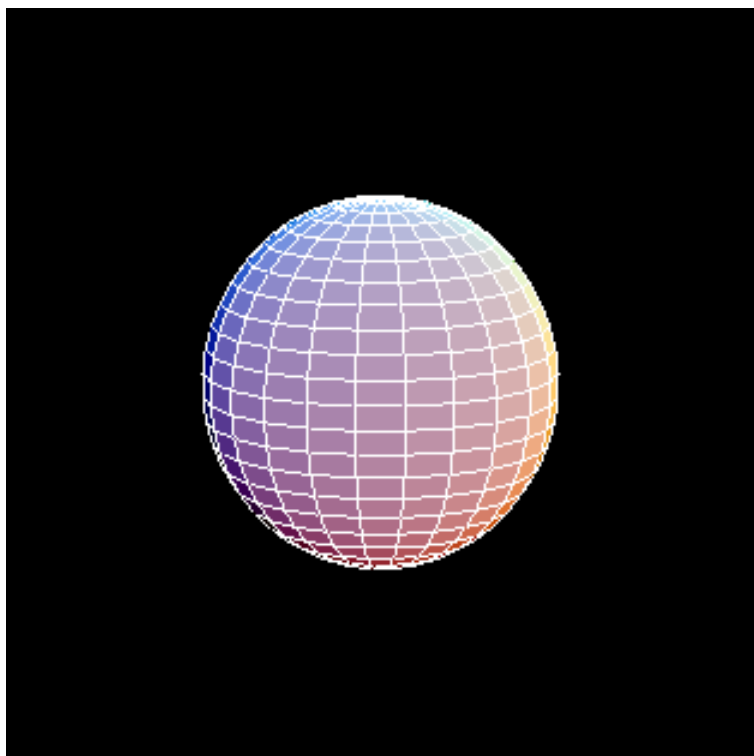
$$V \sim \frac{1}{2} \sum_{\lambda, \mu} C_{\lambda} |\alpha_{\lambda\mu}|^2$$



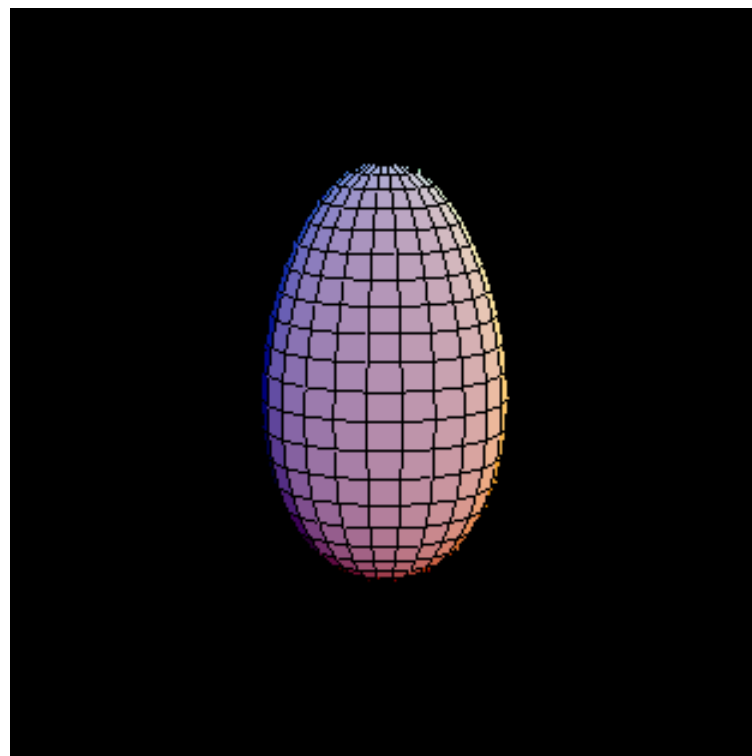
量子化: 調和振動子

$$R(\theta, \phi) = R_0 \left(1 + \sum_{\lambda, \mu} \alpha_{\lambda\mu} Y_{\lambda\mu}^*(\theta, \phi) \right)$$

$$V \sim \frac{1}{2} \sum_{\lambda, \mu} C_{\lambda} |\alpha_{\lambda\mu}|^2$$



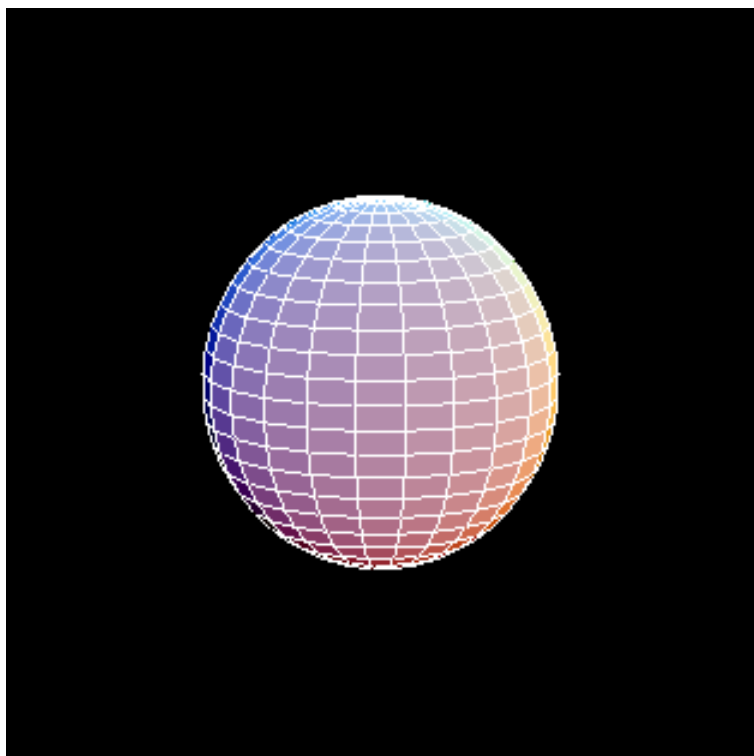
$\lambda=2$: 四重極型振動



$\lambda=3$: 八重極型振動

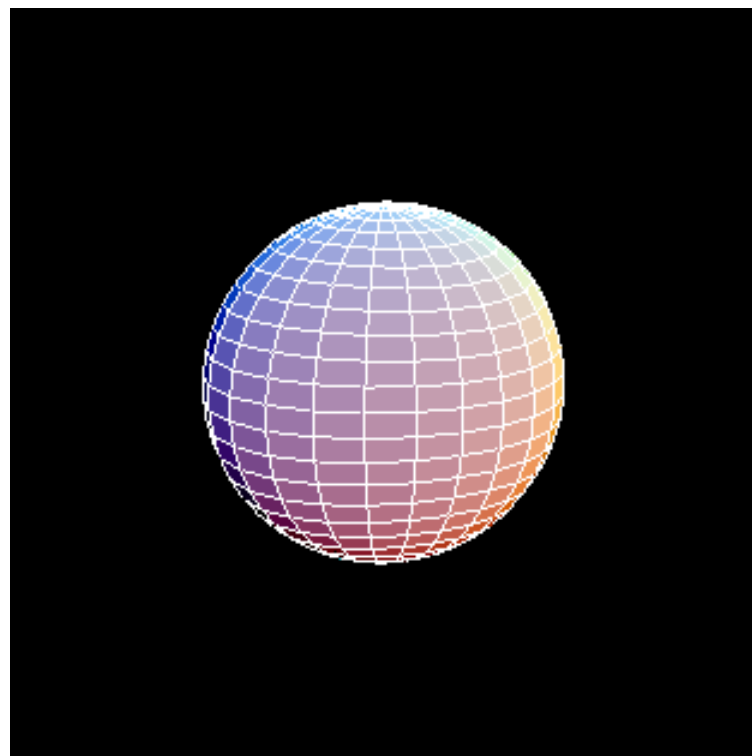
$$R(\theta, \phi) = R_0 \left(1 + \sum_{\lambda, \mu} \alpha_{\lambda\mu} Y_{\lambda\mu}^*(\theta, \phi) \right)$$

$$V \sim \frac{1}{2} \sum_{\lambda, \mu} C_{\lambda} |\alpha_{\lambda\mu}|^2$$



Y_{20} 型振動

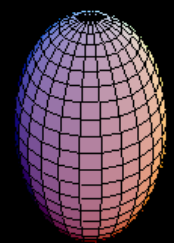
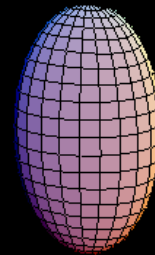
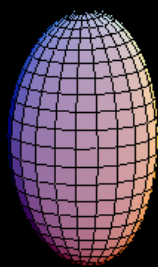
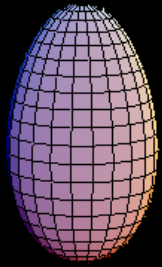
$$\lambda=2, \mu=0$$



Y_{22} 型振動

$$\lambda=2, \mu = +/- 2$$

$$R(\theta, \phi) = R_0 \left(1 + \sum_{\lambda, \mu} \alpha_{\lambda\mu} Y_{\lambda\mu}^*(\theta, \phi) \right) \quad V \sim \frac{1}{2} \sum_{\lambda, \mu} C_{\lambda} |\alpha_{\lambda\mu}|^2$$



Y_{30} 型振動

Y_{31} 型振動

Y_{32} 型振動

Y_{33} 型振動

$\lambda=3, \mu=0$

$\lambda=3, \mu = +/- 1$

$\lambda=3, \mu = +/- 2$

$\lambda=3, \mu = +/- 3$

どのくらいのエネルギーを与えれば原子核は振動しはじめるのか？

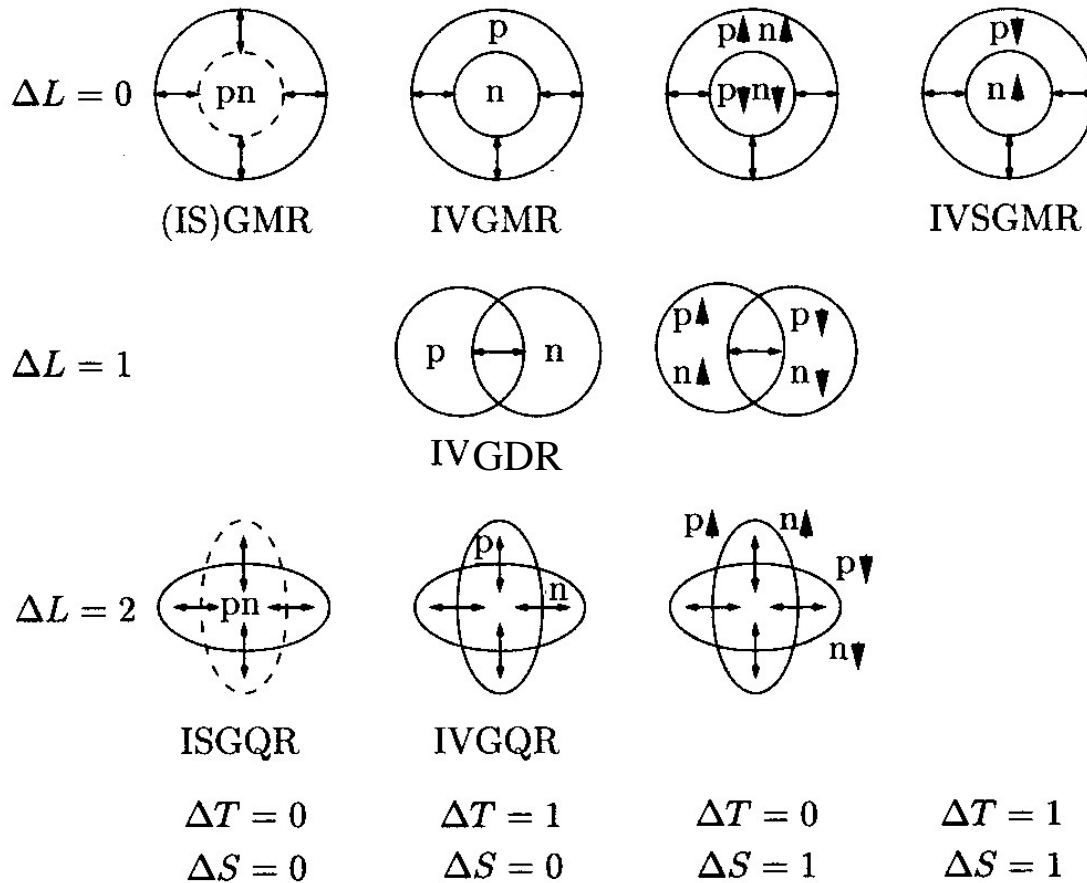
↔ 振動の励起エネルギー

ムービー: 在田謙一郎氏 (名古屋工大)

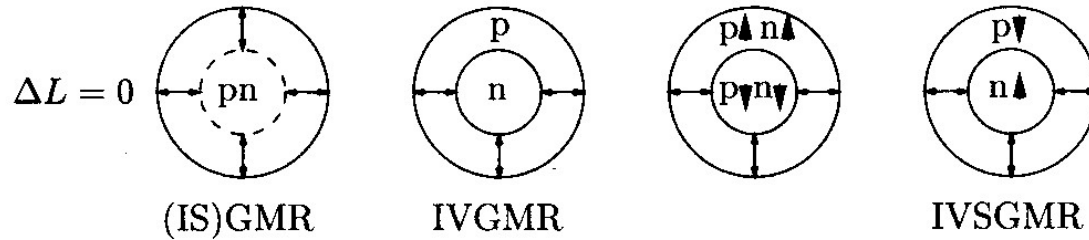
原子核:陽子と中性子の2種類の粒子

どのように動くかで2種類の振動

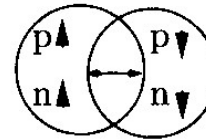
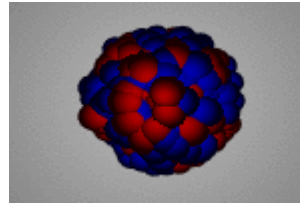
- 陽子と中性子が一緒に動く(アイソ・スカラー型)
- 陽子と中性子が反対方向に動く(アイソ・ベクトル型)



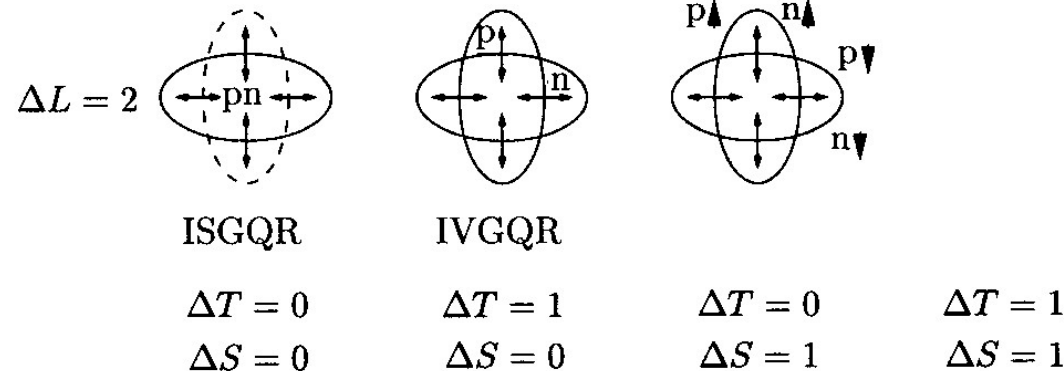
- 陽子と中性子が一緒に動く(アイソ・スカラー型)
- 陽子と中性子が反対方向に動く(アイソ・ベクトル型)



$\Delta L = 1$

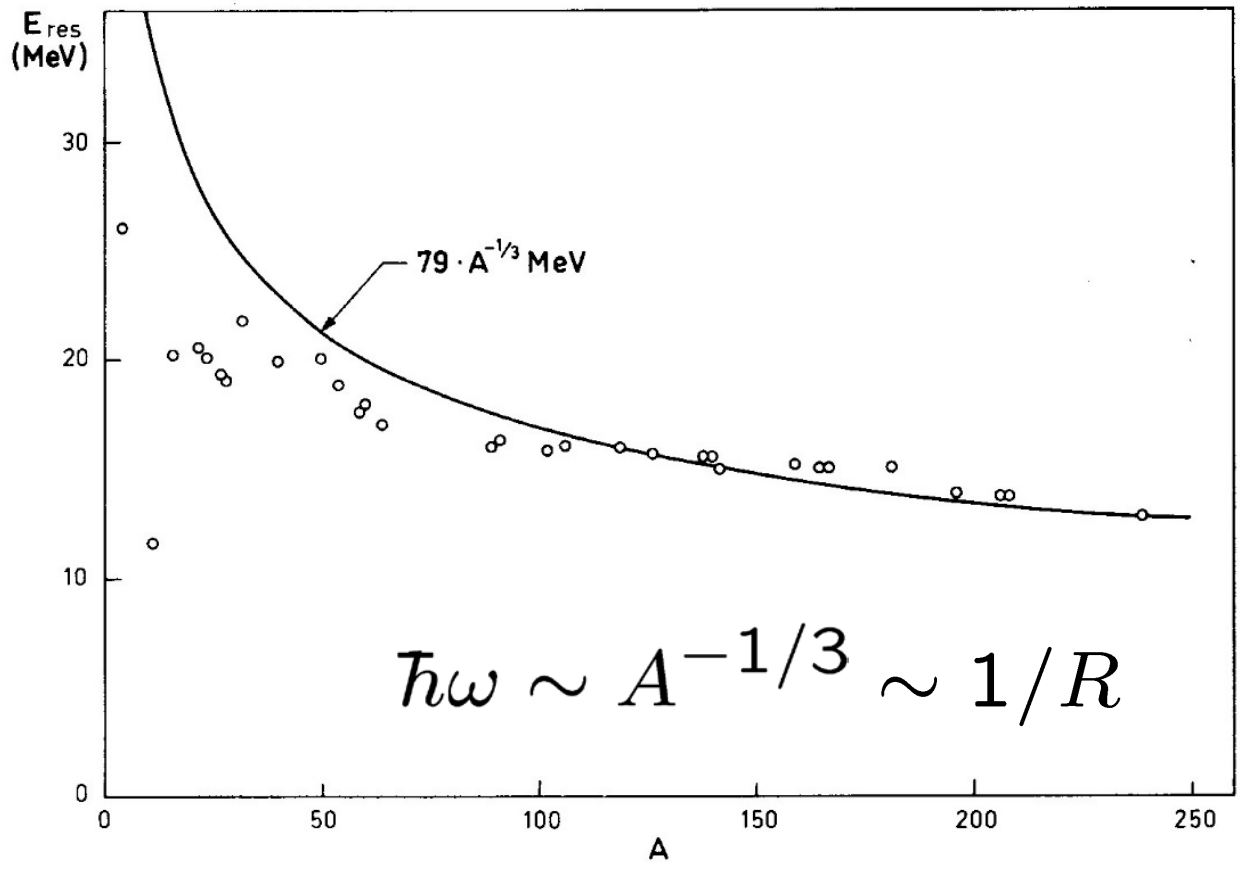


巨大双極子共鳴
(GDR)

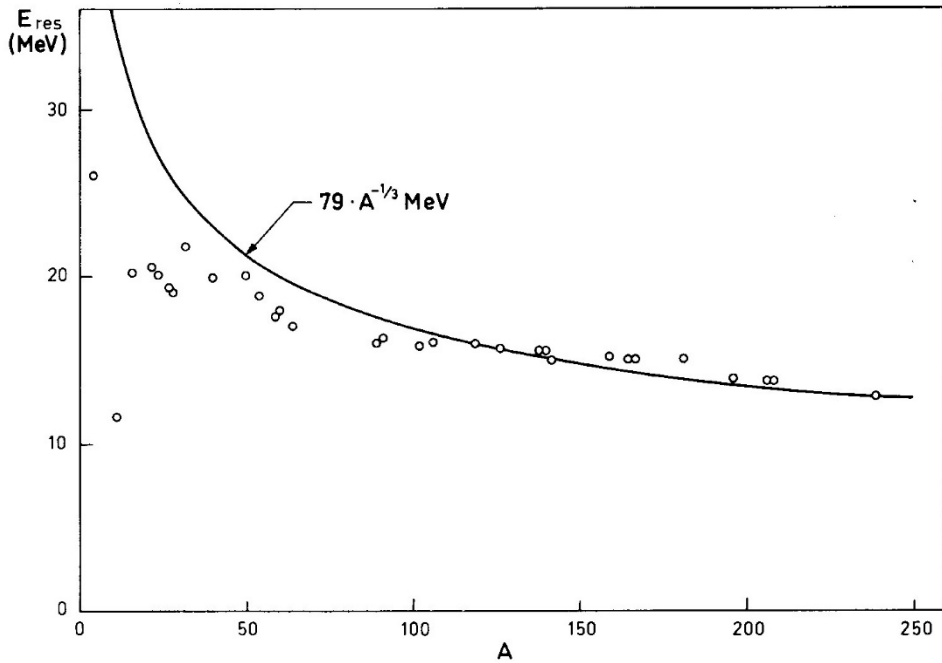


movies: H.-J. Wollersheim,

<https://web-docs.gsi.de/~wolle/TELEKOLLEG/KERN/index-s.html>



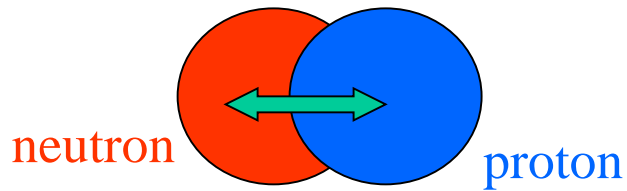
Bohr-Mottelson
“Nuclear Structure vol. II”



$$E_{GDR} \propto A^{-1/3}$$

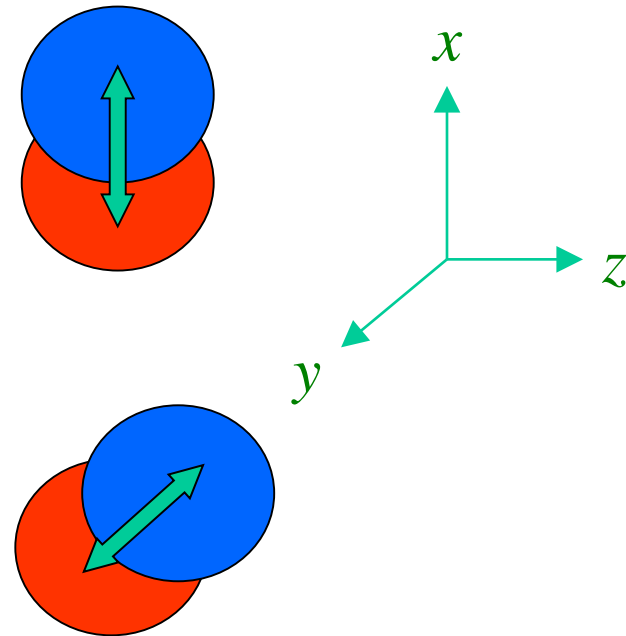
$$\propto 1/R$$

Bohr-Mottelson
 “Nuclear Structure vol. II”



アイソ・ベクトル型

3つのモード



変形の効果

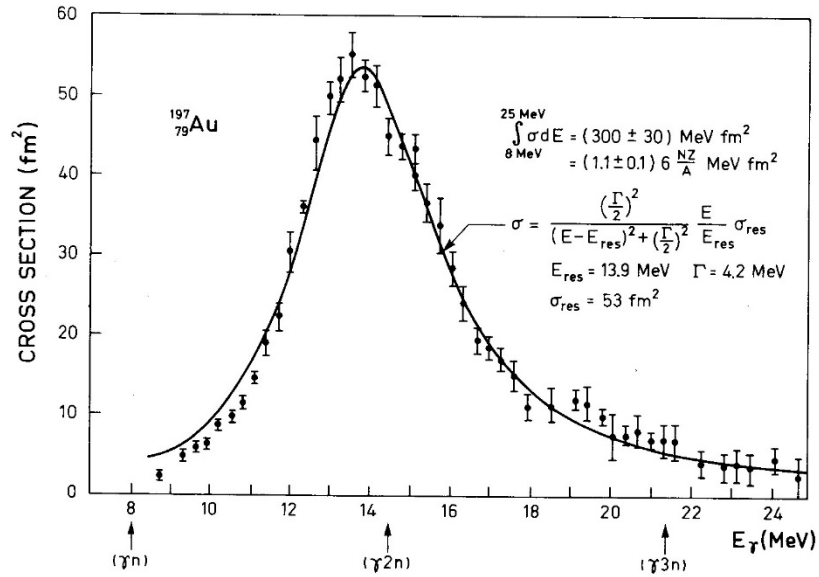
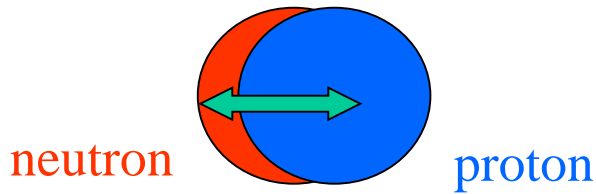
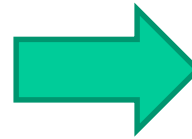
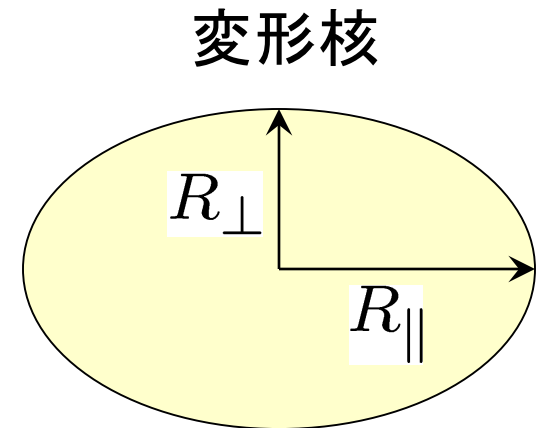
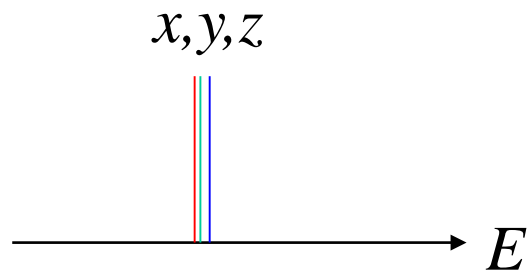


Figure 6-18 Total photoabsorption cross section for ^{197}Au . The experimental data are from S. C. Fultz, R. L. Bramblett, J. T. Caldwell, and N. A. Kerr, *Phys. Rev.* **127**, 1273 (1962). The solid curve is of Breit-Wigner shape with the indicated parameters.

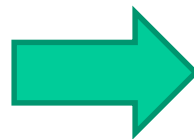
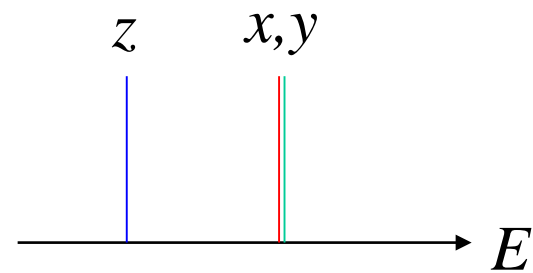


$$E_{\text{GDR}} \propto 1/R$$

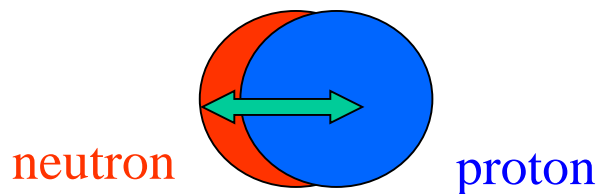




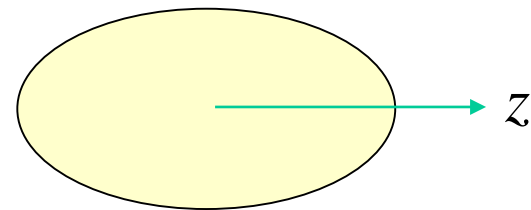
(プロレート変形)



球形核

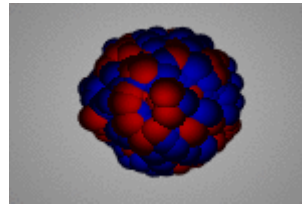


変形核

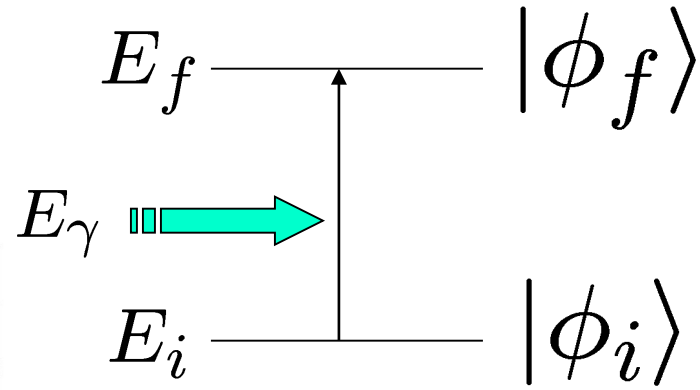
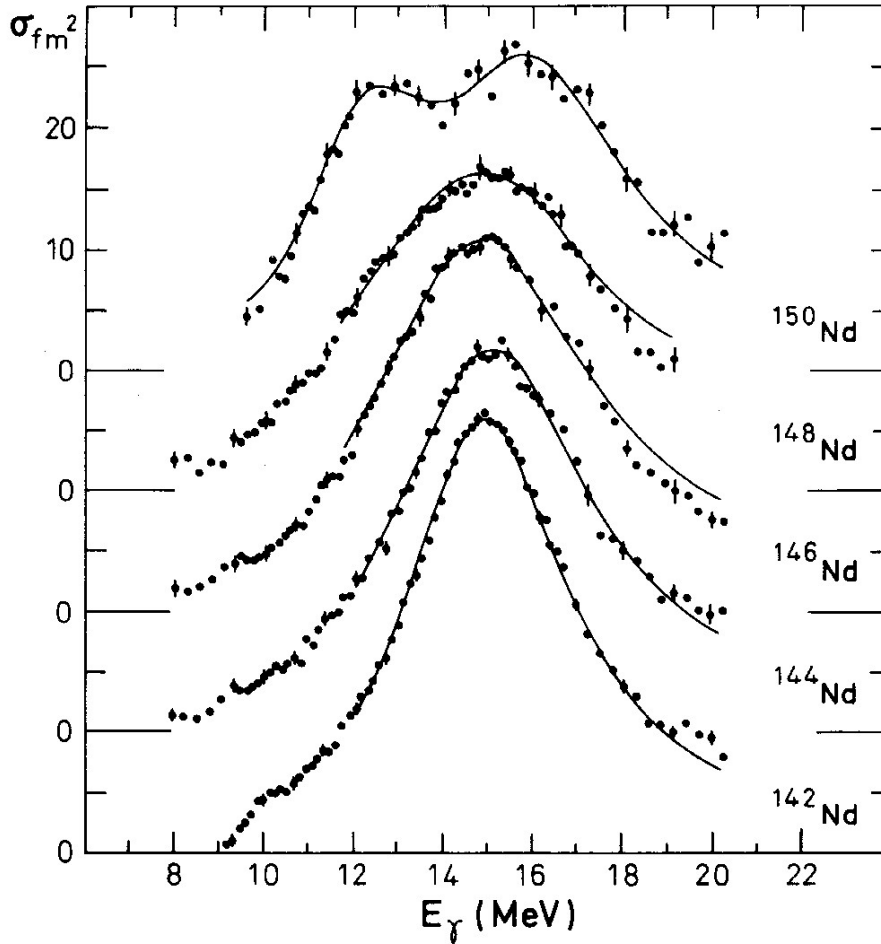


$$E_{\text{GDR}} \propto 1/R$$

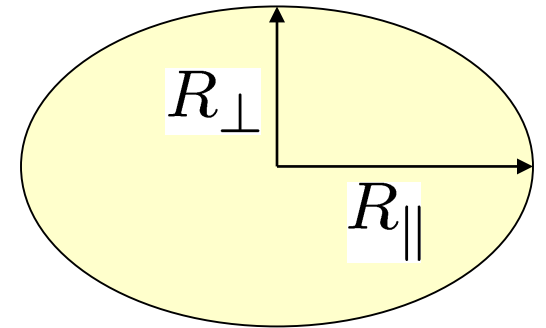
変形の効果



光吸収 断面積

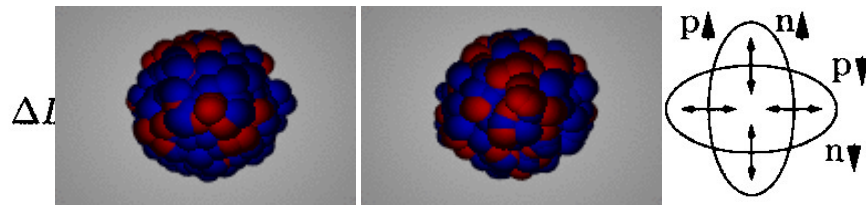
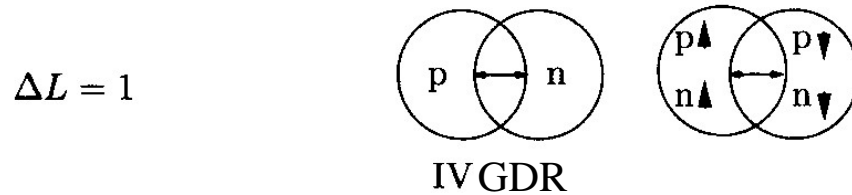
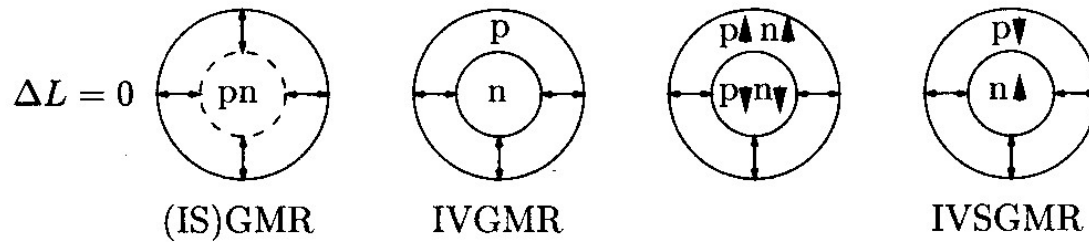


フォトンエネルギーと励起エネルギーが一致すると光子が原子核に吸収される



$$\hbar\omega \sim A^{-1/3} \sim 1/R$$

- 陽子と中性子が一緒に動く(アイソ・スカラー型)
- 陽子と中性子が反対方向に動く(アイソ・ベクトル型)



ISGQR

IVGQR

$\Delta T = 0$

$\Delta T = 1$

$\Delta T = 0$

$\Delta T = 1$

$\Delta S = 0$

$\Delta S = 0$

$\Delta S = 1$

$\Delta S = 1$

巨大四重極子振動

movies: H.-J. Wollersheim,

<https://web-docs.gsi.de/~wolle/TELEKOLLEG/KERN/index-s.html>

巨大四重極子振動の発見

@東北大学核理研(現:電子光物理学研究センター)

VOLUME 29, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

16 OCTOBER 1972

Giant Multipole Resonances in ^{90}Zr Observed by Inelastic Electron Scattering

S. Fukuda and Y. Torizuka

Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, Tomizawa, Sendai, Japan

(Received 24 August 1972)

Inelastic electron scattering from the giant dipole resonance region in ^{90}Zr was measured. In addition to the usual dipole resonance we have found new resonances at 14.0 MeV and around 28 MeV. The spins and parities and transition strengths of these states are discussed.

VOLUME 30, NUMBER 21

PHYSICAL REVIEW LETTERS

21 MAY 1973

Electroexcitation of Giant Resonances in ^{208}Pb

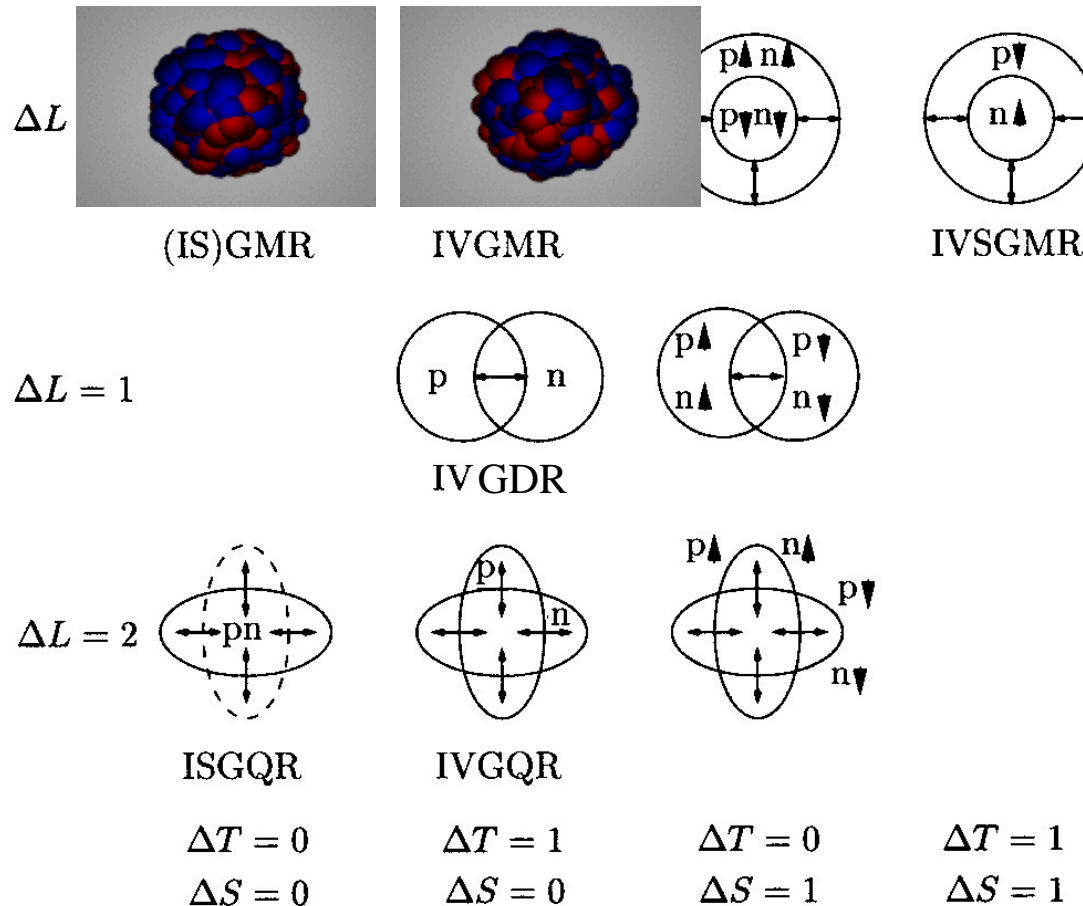
M. Nagao and Y. Torizuka

Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, Tomizawa, Sendai, Japan

(Received 27 February 1973)

The giant-resonance region in ^{208}Pb was observed by inelastic electron scattering. We present evidence for the existences of a 2^+ (or 0^+) state at ~ 22 MeV and a 3^- state at ~ 19 MeV with giant-resonance character. The resonance states between 8.6 and 11.6 MeV are confirmed to be 2^+ (or 0^+) and the sum of their strengths exhausts about 50% of the $E2$ sum rule or 100% of $E0$.

- 陽子と中性子が一緒に動く(アイソ・スカラー型)
- 陽子と中性子が反対方向に動く(アイソ・ベクトル型)



巨大単極子振動
(呼吸モード)

movies: H.-J. Wollersheim,

<https://web-docs.gsi.de/~wolle/TELEKOLLEG/KERN/index-s.html>

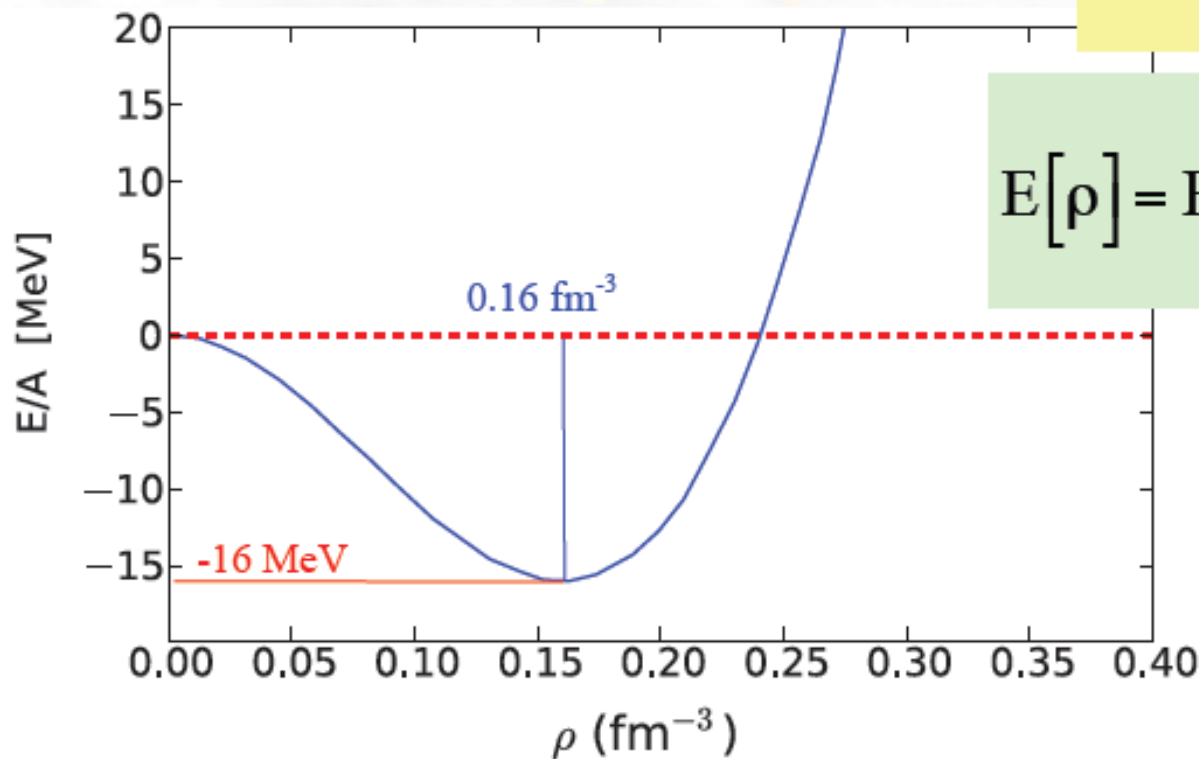
核物質の状態方程式

原子核がどのくらい固いのか

非圧縮度

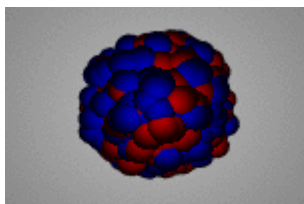
$$K_{\infty} = 9\rho^2 \left. \frac{d^2 [E(\rho) / \rho]}{d\rho^2} \right|_{\rho_0}$$

$$E[\rho] = E[\rho_0] + \frac{1}{18} K_{\infty} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^2$$



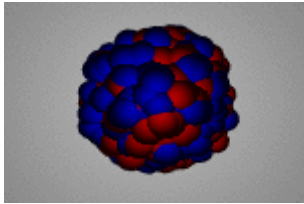
* 中性子星の
大きさとも関係

slide: Carlos Bertulani



$$E_{\text{ISGMR}} \sim \sqrt{\frac{\hbar^2 K}{m \langle r^2 \rangle}}$$

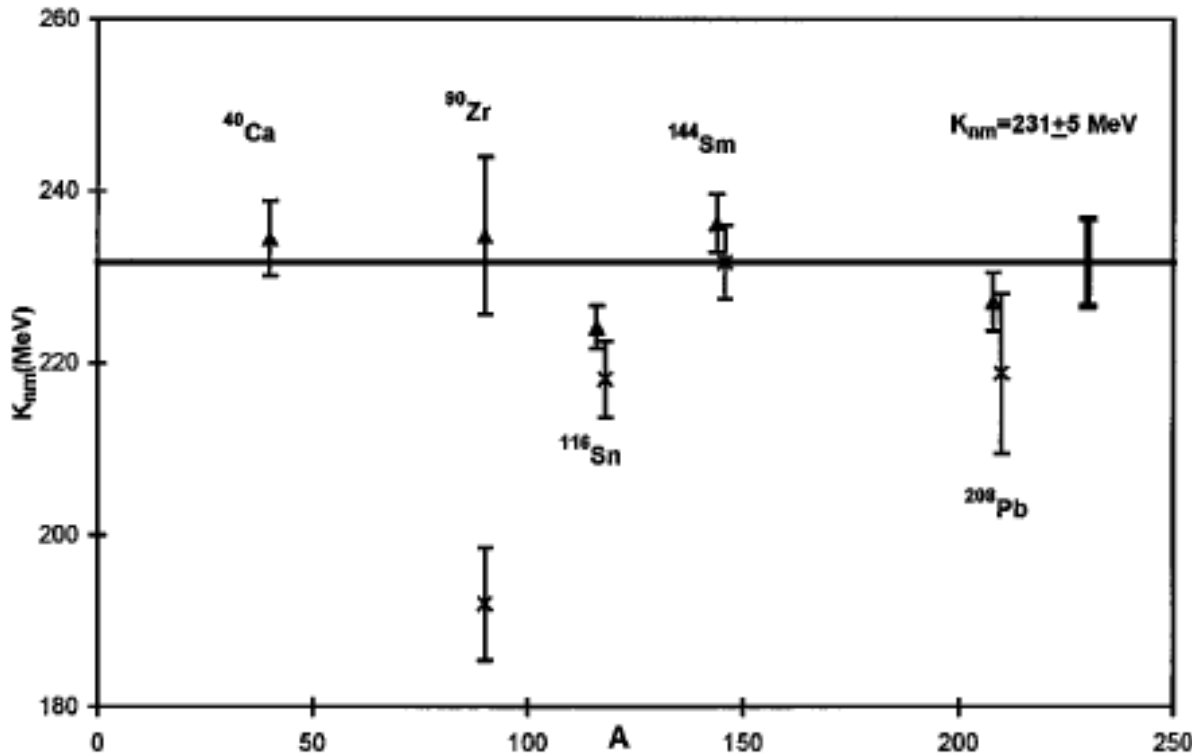
J.P. Blaizot,
Phys. Rep. 64 ('80) 171



アイソ・スカラー型巨大単極子モード (呼吸モード)

$$E_{\text{ISGMR}} \sim \sqrt{\frac{\hbar^2 K}{m \langle r^2 \rangle}}$$

J.P. Blaizot,
Phys. Rep. 64 ('80) 171



$K \sim 231 \pm 5 \text{ MeV}$

出席の代わりに授業アンケート

学籍番号、名前、所属研究室(所属大講座)

この授業に関して、**質問**や**疑問**を自由に何でも書いて下さい
(質問が特になければ**感想**でも可)

- 例)
- ・今日の授業で面白かったこと
 - ・自分にとって発見だったこと
 - ・今日の授業でわかりずらかったこと
(もう一度説明して欲しいこと)
 - ・今日の授業を聞いて疑問に思ったこと
 - ・**授業への要望等でもOK**

などなど