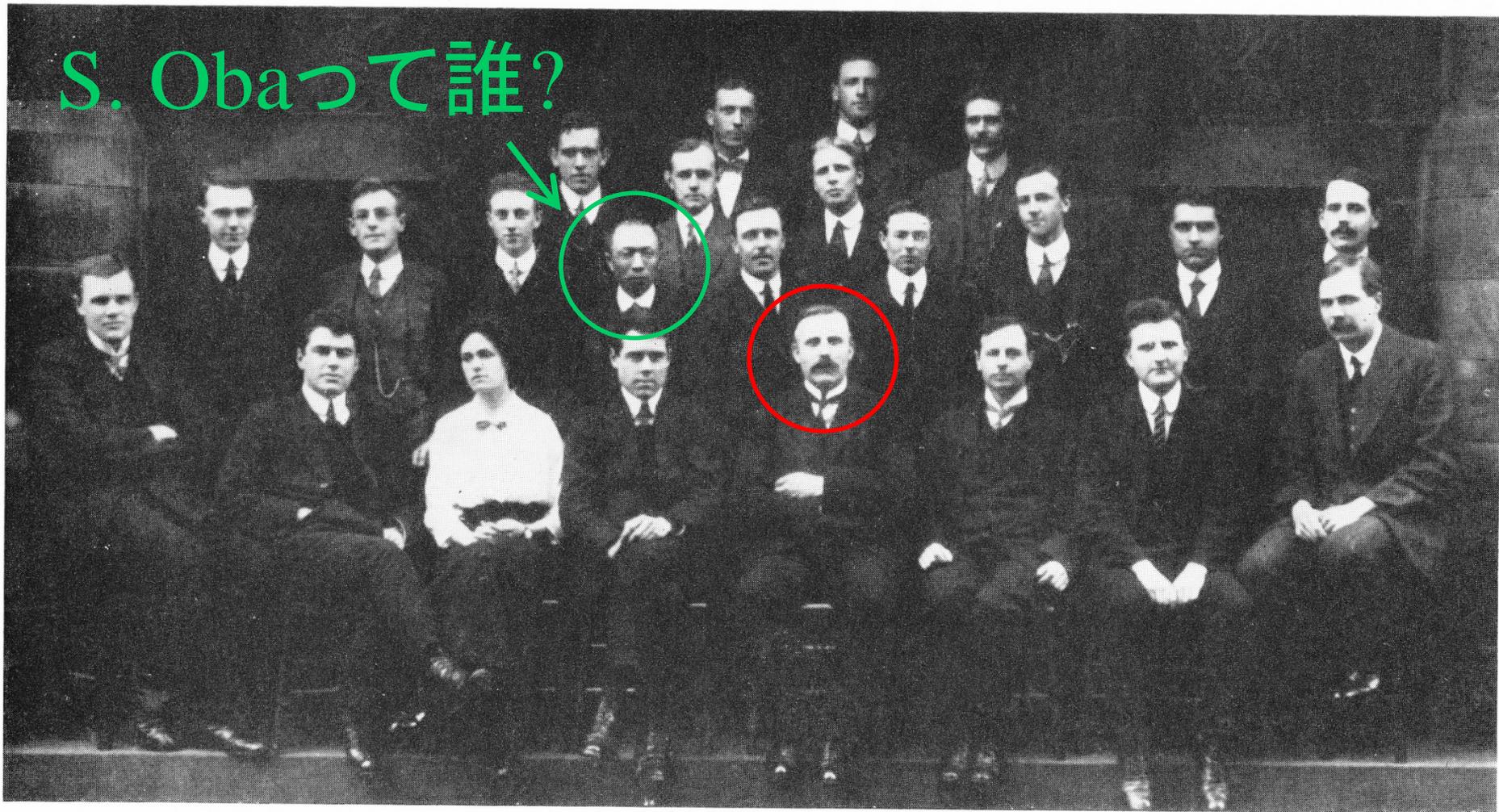


S. Obaって誰?

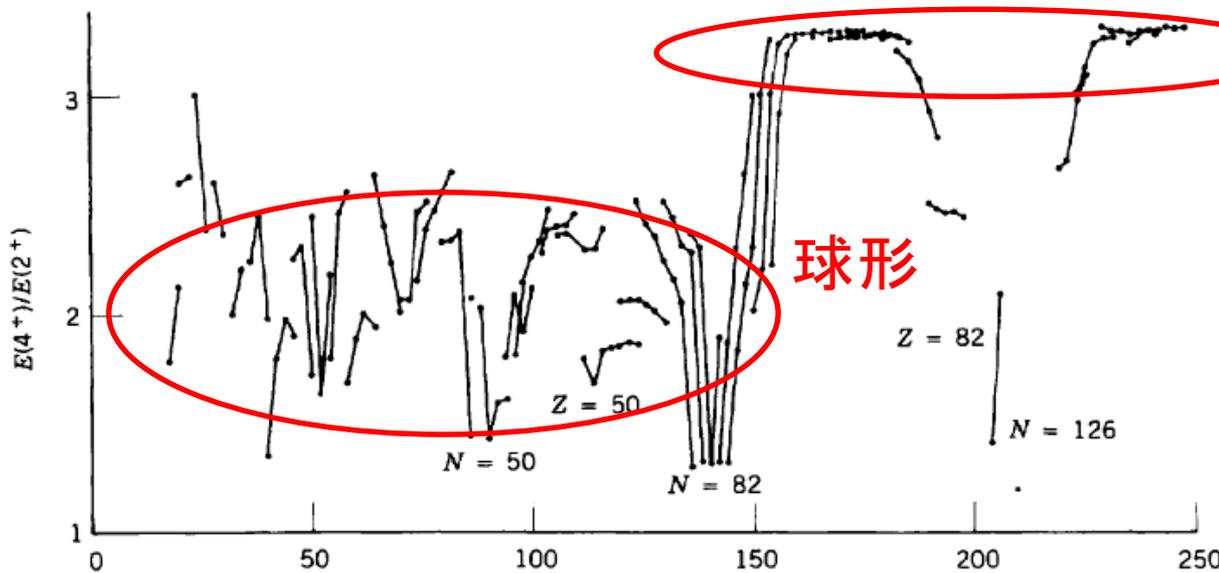


PHYSICS STAFF AND RESEARCH GROUP, MANCHESTER, 1913

T. S. Taylor A. S. Russell
H. Richards J. M. Nuttall B. Williams W. Kay
A. B. Wood E. Green R. H. Wilson **S. Oba** E. Marsden H. Gerrard J. Chadwick F. W. Whaley H. G. J. Moseley
H. Robinson D. C. H. Florance Miss M. White J. N. Pring **E. Rutherford** W. Makower, E. J. Evans, C. G. Darwin

先週のアンケートより

➤ $E(4^+)/E(2^+)$ のグラフで $A < 150$ の原子核はどう説明する？



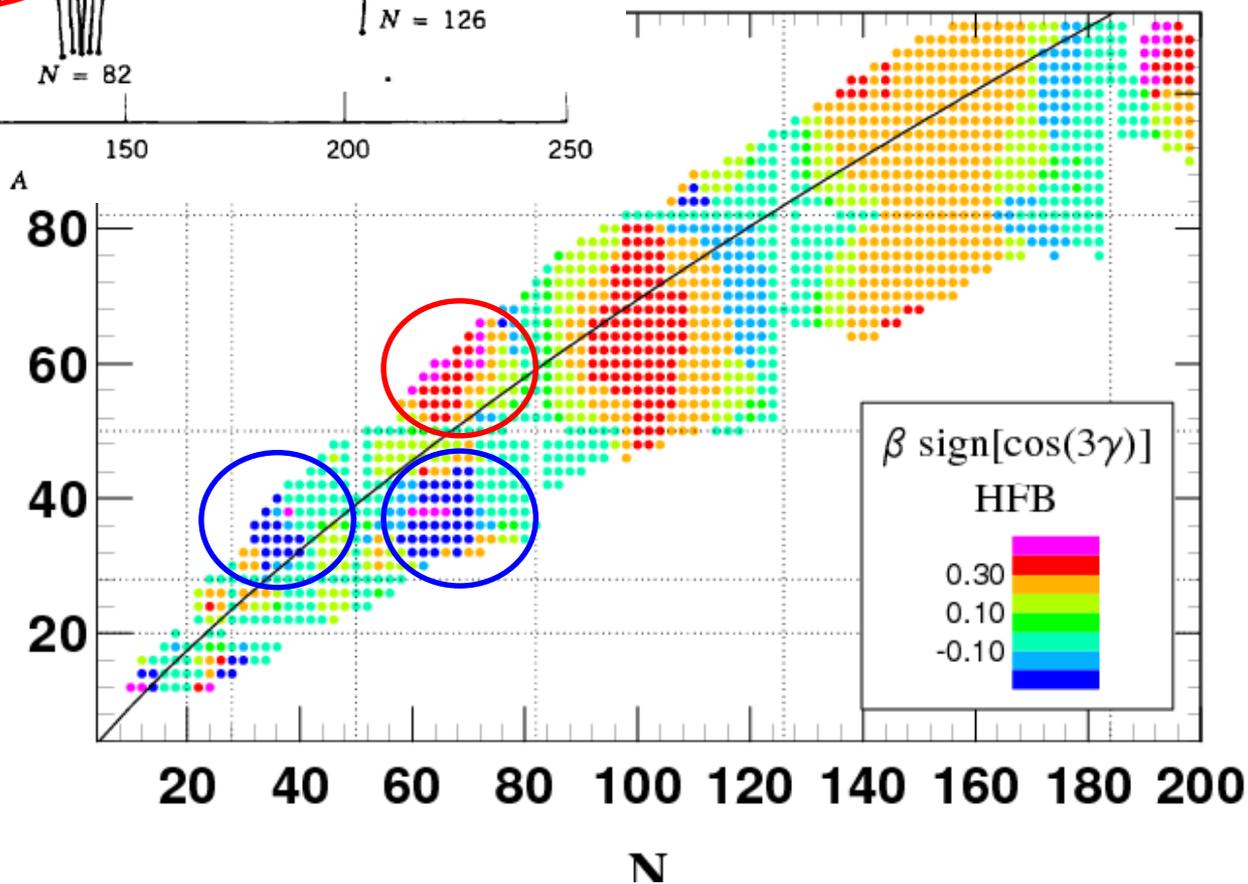
変形

この図とどう対応？



↑
✓ この図は安定核
の実験データ

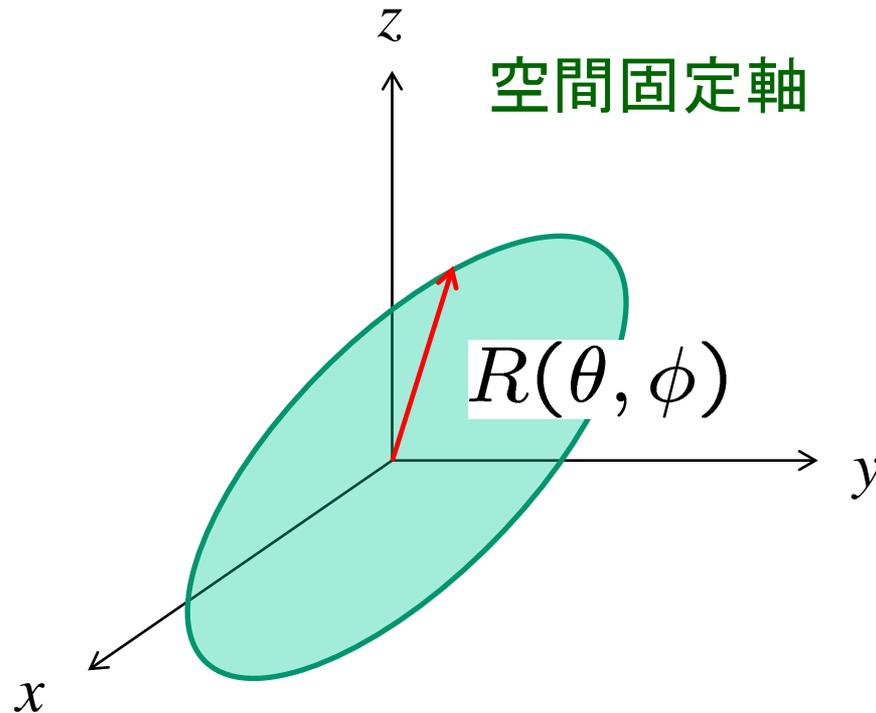
この図の実線に →
沿った核
(変形度は小さい)



➤ 変形パラメータ $\alpha_{22} \sim \alpha_{2-2}$ の5つを形(2) + 軸(3)に分けるところをもう一度

$\lambda = 2$ に話を限定 $R(\theta, \phi) = R_0 \left(1 + \sum_{\mu} \alpha_{2\mu} Y_{2\mu}^*(\theta, \phi) \right)$

* この時点で5個の独立なパラメーター: $\alpha_{22} \sim \alpha_{2-2}$



➡ 軸をうまく取りなおすことによってより表現が簡単になる

四重極変形の代表的な形はキウイ・フルーツ型



横からみた形



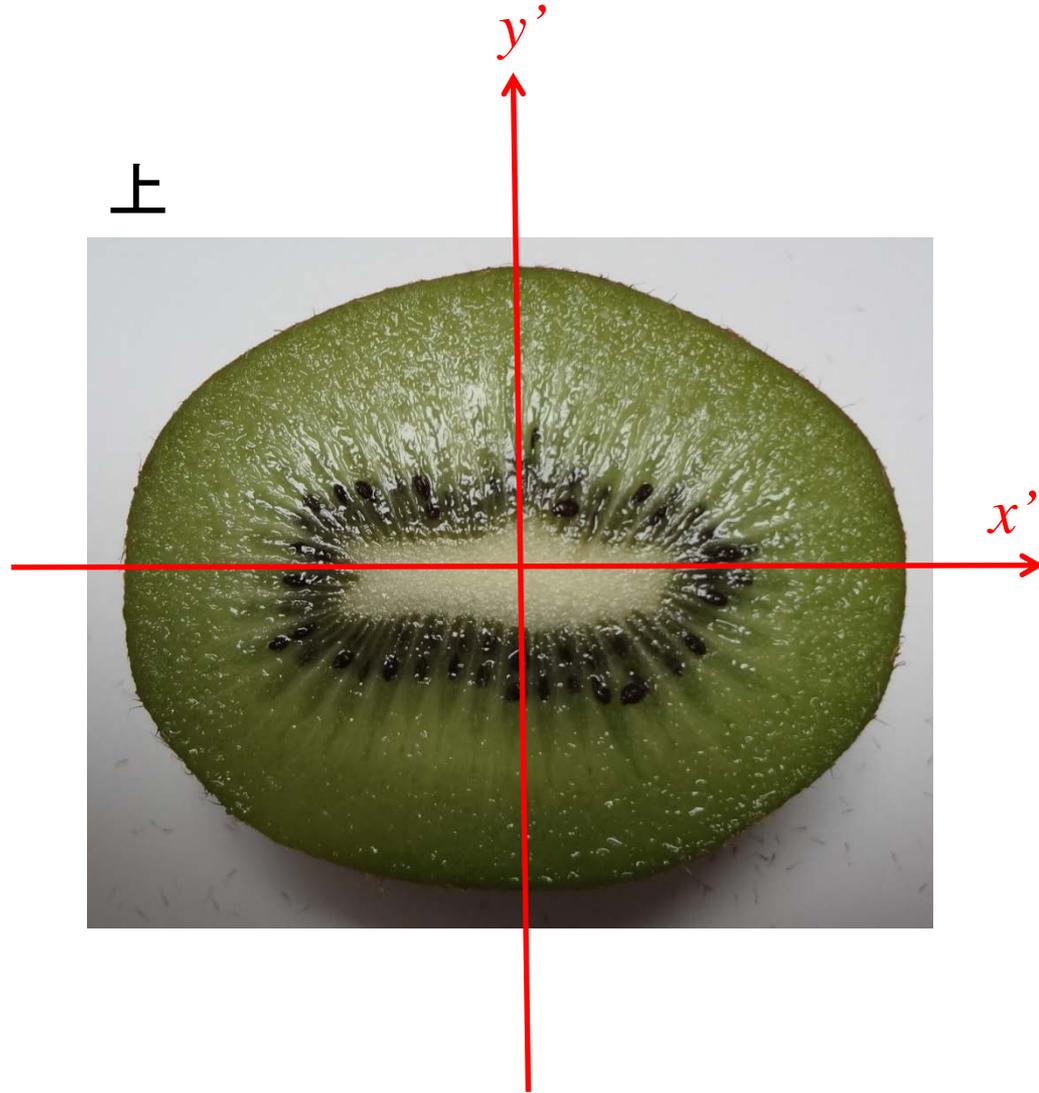
上からみた形



横

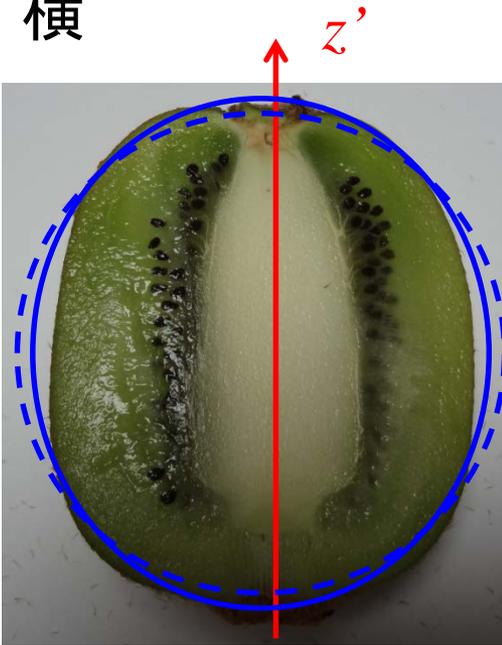


上

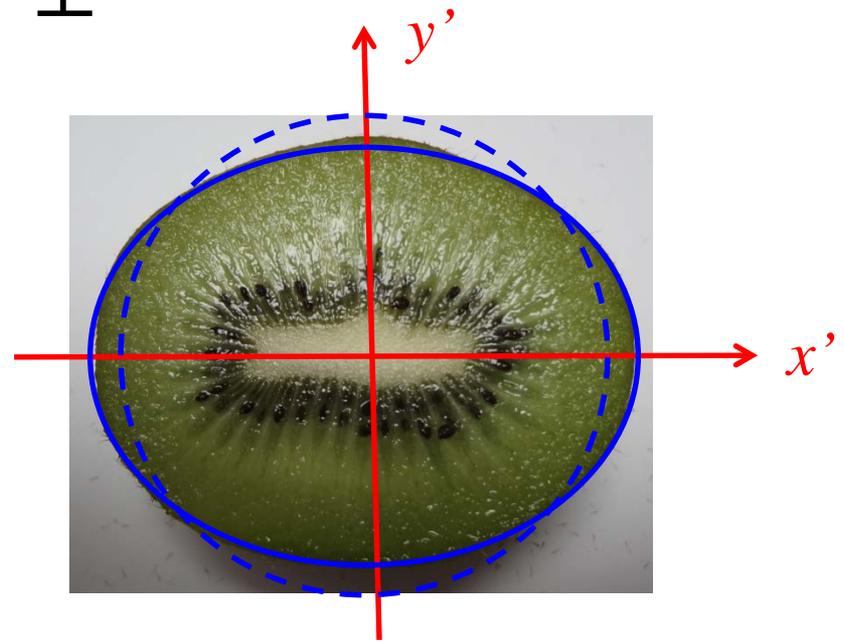


上のように座標軸を取ると簡単になりそう

横



上



この形は2つのパラメーター(のみ)で記述できる

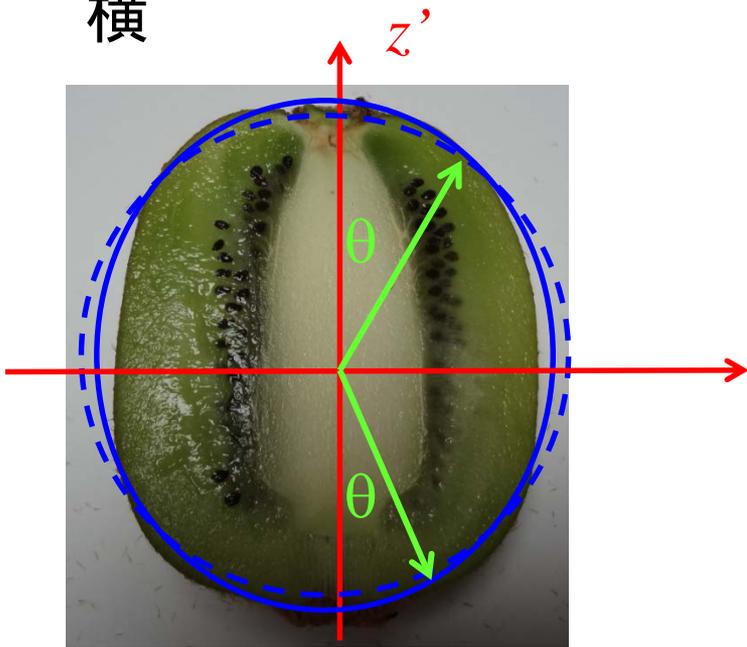
✓「横」から見た時にどのくらい円からずれているか

✓「上」から見た時にどのくらい円からずれているか

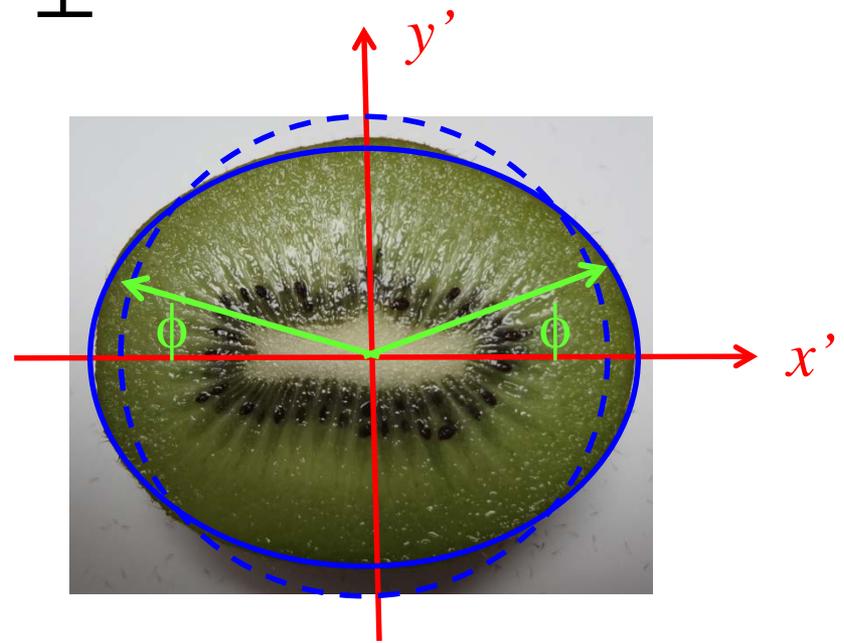
数学的には

$$R(\theta, \phi) = R_0 [1 + a_{20}Y_{20}(\theta) + a_{22}(Y_{22}(\theta, \phi) + Y_{2-2}(\theta, \phi))]$$

横



上



数学的には

$$R(\theta, \phi) = R_0 [1 + a_{20}Y_{20}(\theta) + a_{22}(Y_{22}(\theta, \phi) + Y_{2-2}(\theta, \phi))]$$

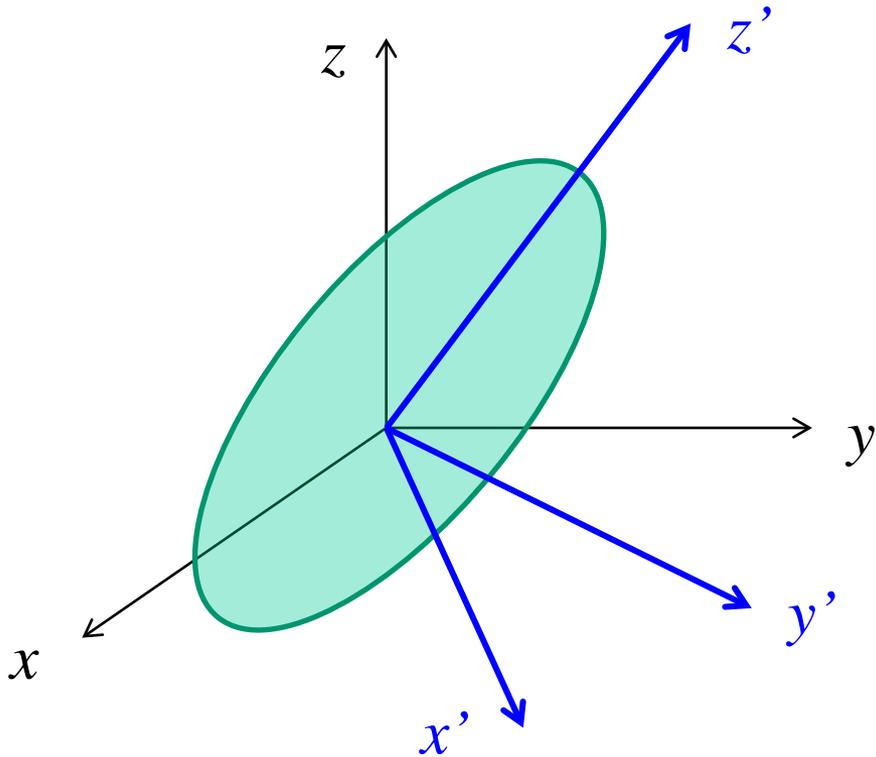
このようにとると、

$$R(\theta, \phi) = R(\pi - \theta, \phi)$$

$$R(\theta, \phi) = R(\theta, \pi - \phi)$$

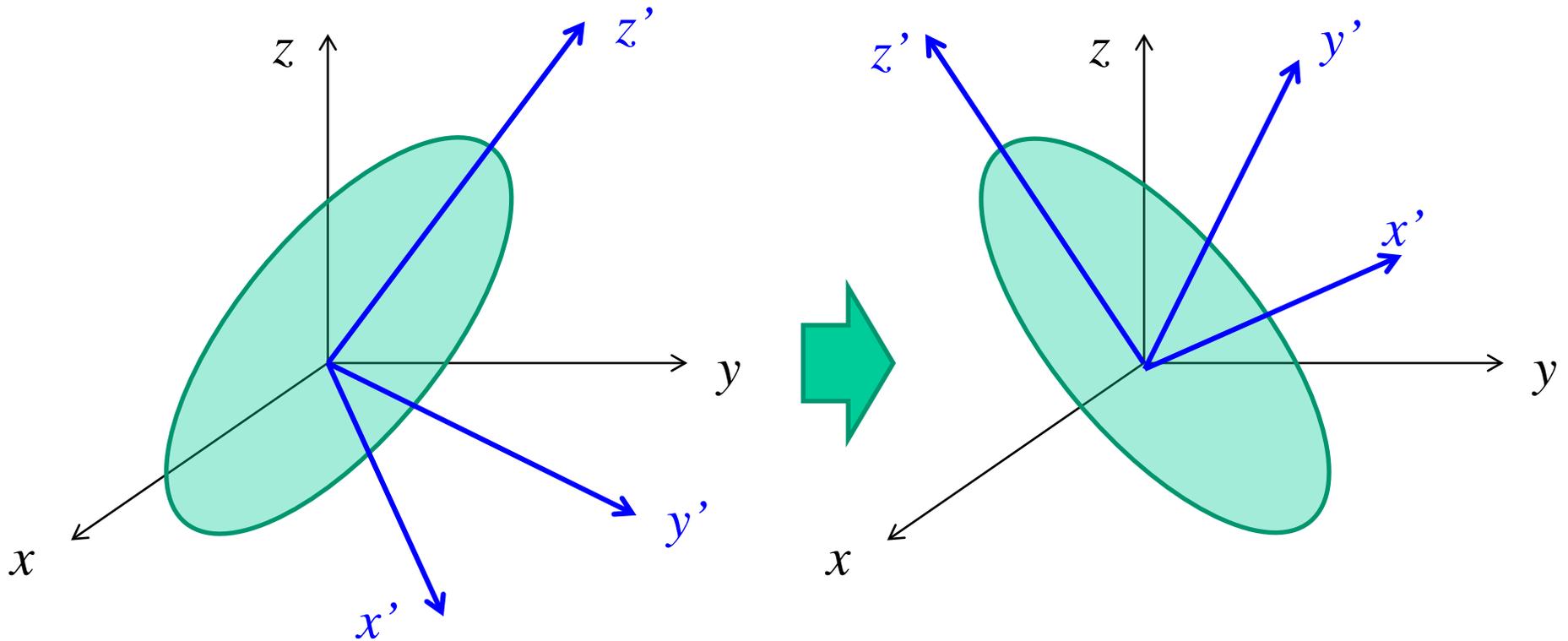
$$R(\theta, \phi) = R_0 \left(1 + \sum_{\mu} \alpha_{2\mu} Y_{2\mu}^*(\theta, \phi) \right)$$

5個の独立なパラメーター: $\alpha_{22} \sim \alpha_{2-2}$



→ 原子核の形状を表すパラメーター2つ: a_{20}, a_{22}
+ 取りなおした軸の方向を表す角度3つ(オイラー角)

原子核が回転すると軸も一緒に回転(物体固定系)
物体固定系から見ると、半径の式 $R(\theta, \phi)$ はいつも同じ



→ 原子核の形状を表すパラメーター2つ: a_{20} , a_{22}
+ 取りなおした軸の方向を表す角度3つ(オイラー角)

➤ 実際の原子核で γ 変形は実現しているのか?

$$R(\theta, \phi) = R_0 [1 + a_{20}Y_{20}(\theta) + a_{22}(Y_{22}(\theta, \phi) + Y_{2-2}(\theta, \phi))]$$

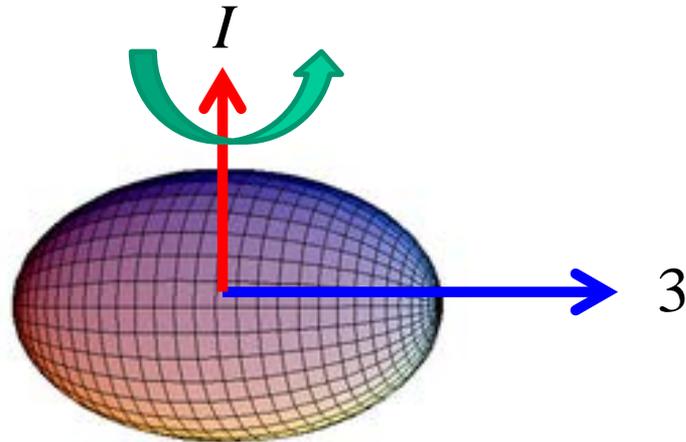
$$a_{20} \equiv \beta \cos \gamma, \quad a_{22} \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}\beta \sin \gamma$$

とよく書く(γ は軸対称性からのずれを表す)。

- ✓ 多分いくつかの原子核で実現していると思われるが、基底状態において明確な実験的証拠はまだない。
($\gamma = 0$ の周りに揺らいでいるのか、 $\gamma \neq 0$ なのか区別が難しい。)

➤ $K=0$ って突然出てきた気がしますが、 K って何ですか？

$K=0$ のとき

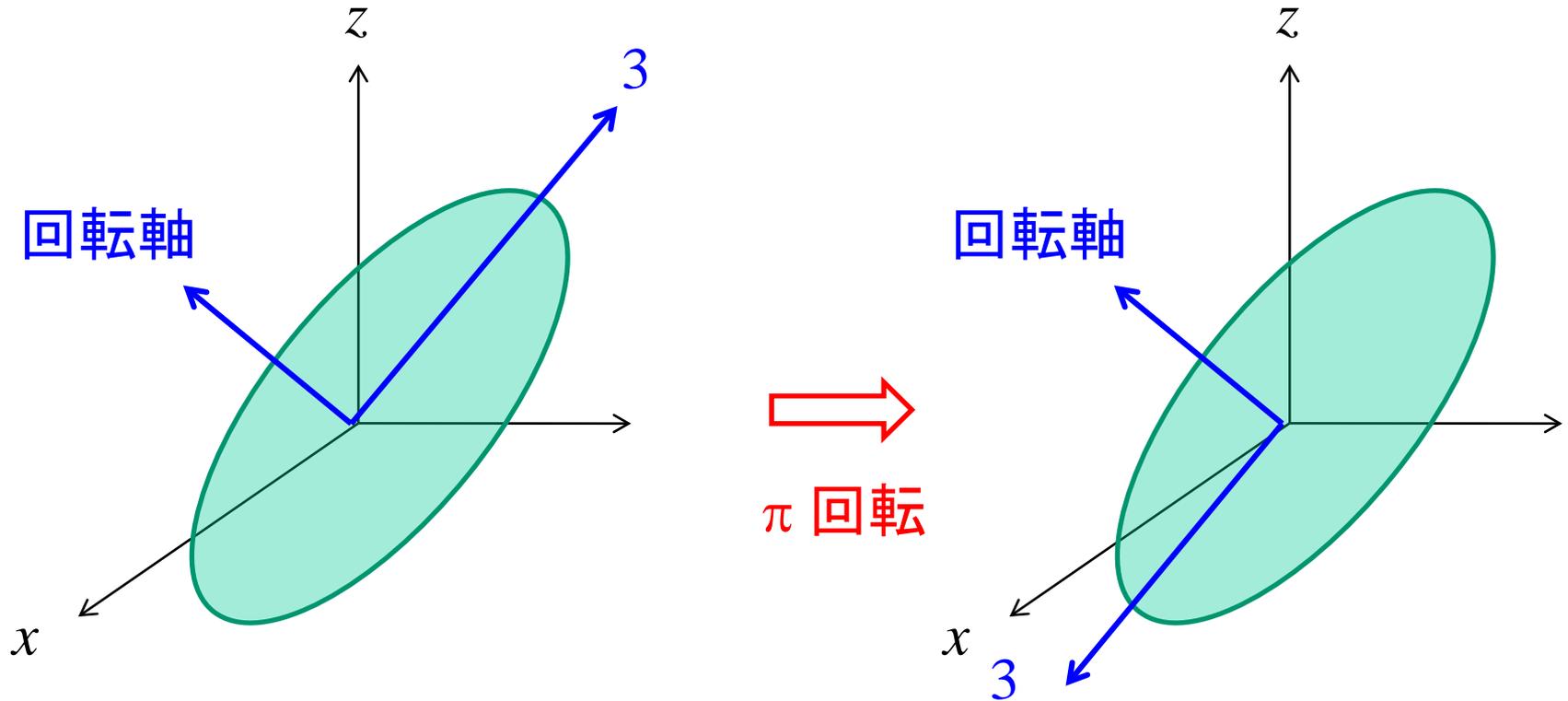


✓ ごめん、ごめん。

K は回転の角運動量 I の3軸への射影です。

→ $K=0$ だと、3軸に垂直な方向に角運動量ベクトルが向いている。

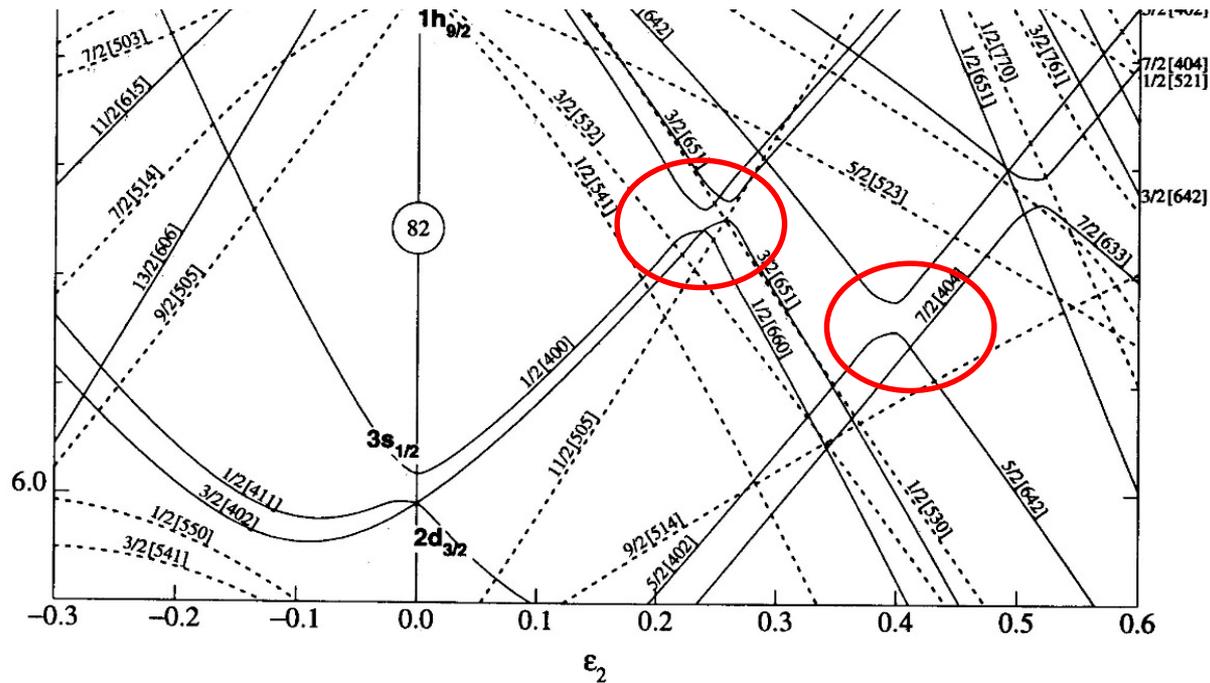
- 1軸まわり π 回転がパリティ変換と同じということがよくわからなかった



✓ 少なくとも3軸の回転はパリティ変換と同じ

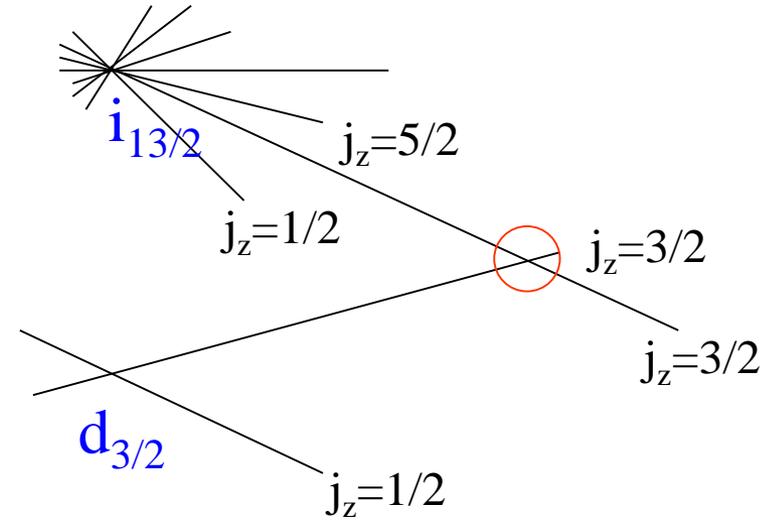
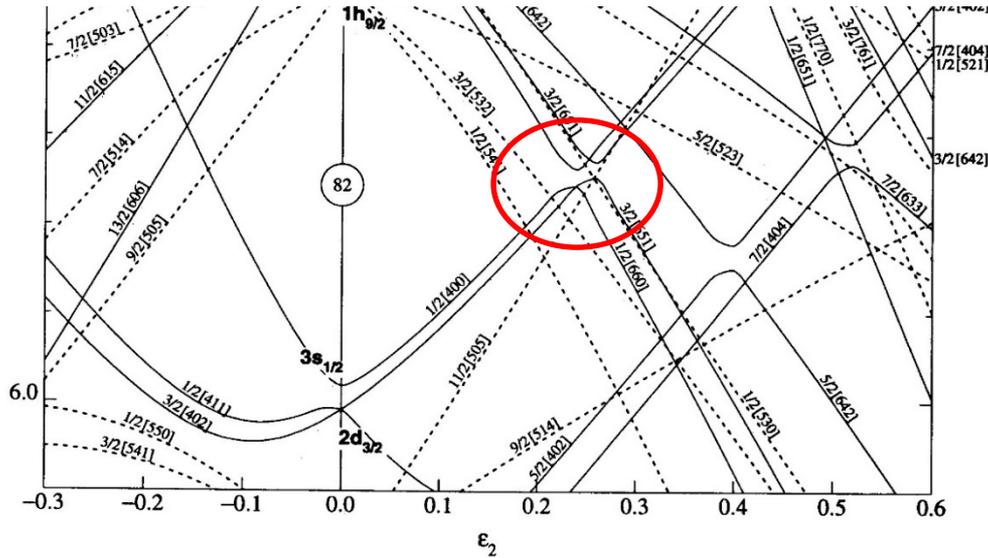
数式の上では D 関数の回転を考える必要がある

➤ ニルソン図で準位のエネルギーが上がって下がる場所があるけどこれは何？



✓ とてもいい質問です！（よく気が付きました）

➤ ニルソン図で準位のエネルギーが上がって下がる場所があるけどこれは何？



同じ量子数を持つ準位は交わらない
(量子数が違うと交わってもよい)

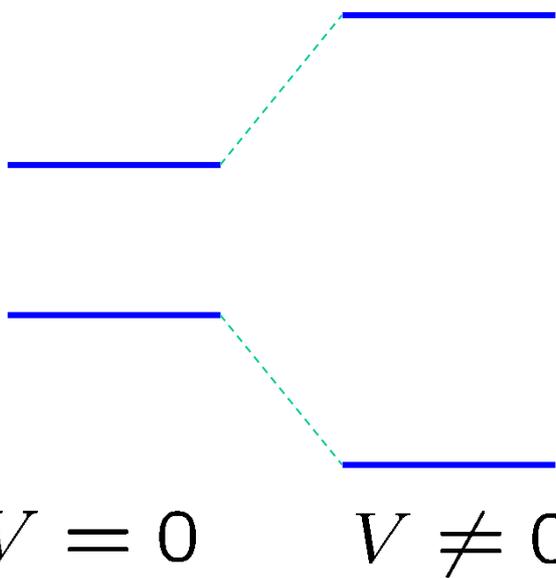
「ノイマン-ウィグナーの定理」

準位交差の問題：同じ量子数を持つ2つの状態は交差しない

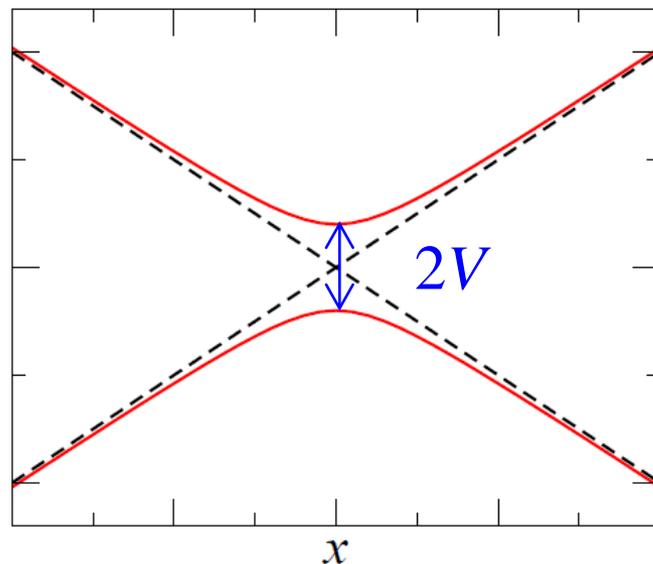
「ノイマン-ウィグナーの定理」

$$\begin{pmatrix} -\epsilon x & V \\ V & \epsilon x \end{pmatrix}$$

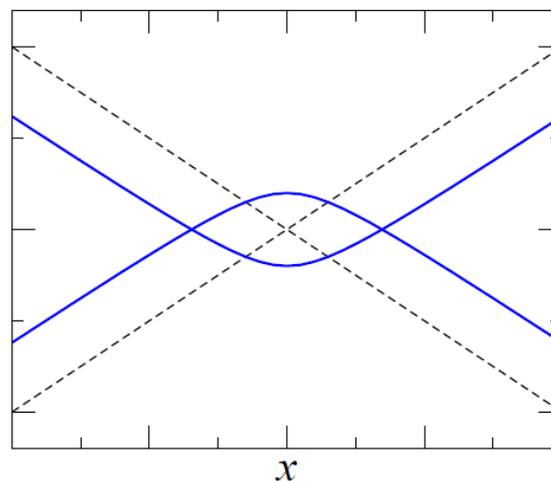
対角化 $\rightarrow \lambda_{\pm}(x) = \pm \sqrt{\epsilon^2 x^2 + V^2}$



Vの符号によらず必ず反発



「疑似交差」、「準位反発」



このようになることはない

➤ 原子核が7,000～10,000種類あると予想されているが、
限界の陽子数、質量数が計算されているのか？

その通りです。

→核図表で様々な原子核に対して(モデルに基づいて)
寿命を計算する。

→寿命がある値(例えばピコ秒)以上の原子核を数える。

- 陽子が多い原子核で β^+ 崩壊はなぜ起きない? α 崩壊に比べて早いはずだけど。

α 崩壊(陽子が多い原子核)



✓ ごめんなさい、誤解を与えてしまったかも。

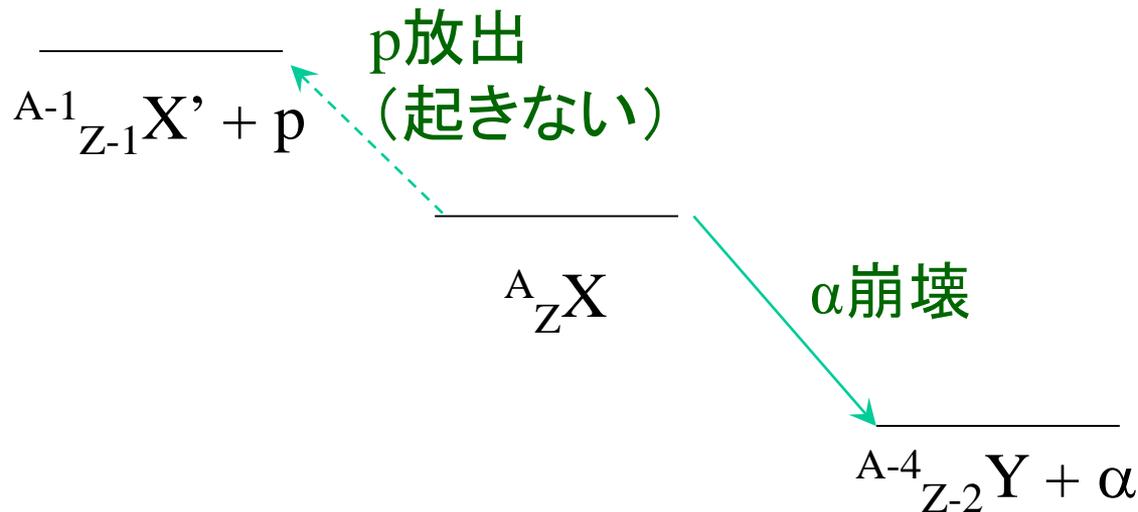
β 安定線近傍の重い核(陽子が多い核) \rightarrow α 崩壊が主

β 安定線を外れると、 β 崩壊も起きます。

➤ 陽子が多い原子核で、なぜ陽子だけ出さずに α 粒子として出てくるのか?

✓ α 粒子は特別安定な原子核

→ 陽子は束縛していても、 α 粒子が束縛していないことも多い。

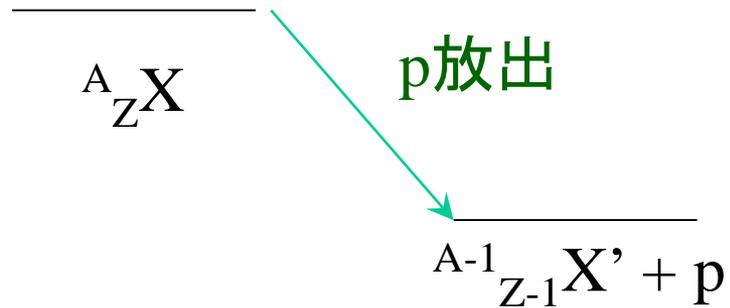


➤ β 崩壊でなぜ電子だけ出すのか?

ニュートリノも出ているけど、たぶん質問の意図は違うと思う (もう一度聞いて下さい)。

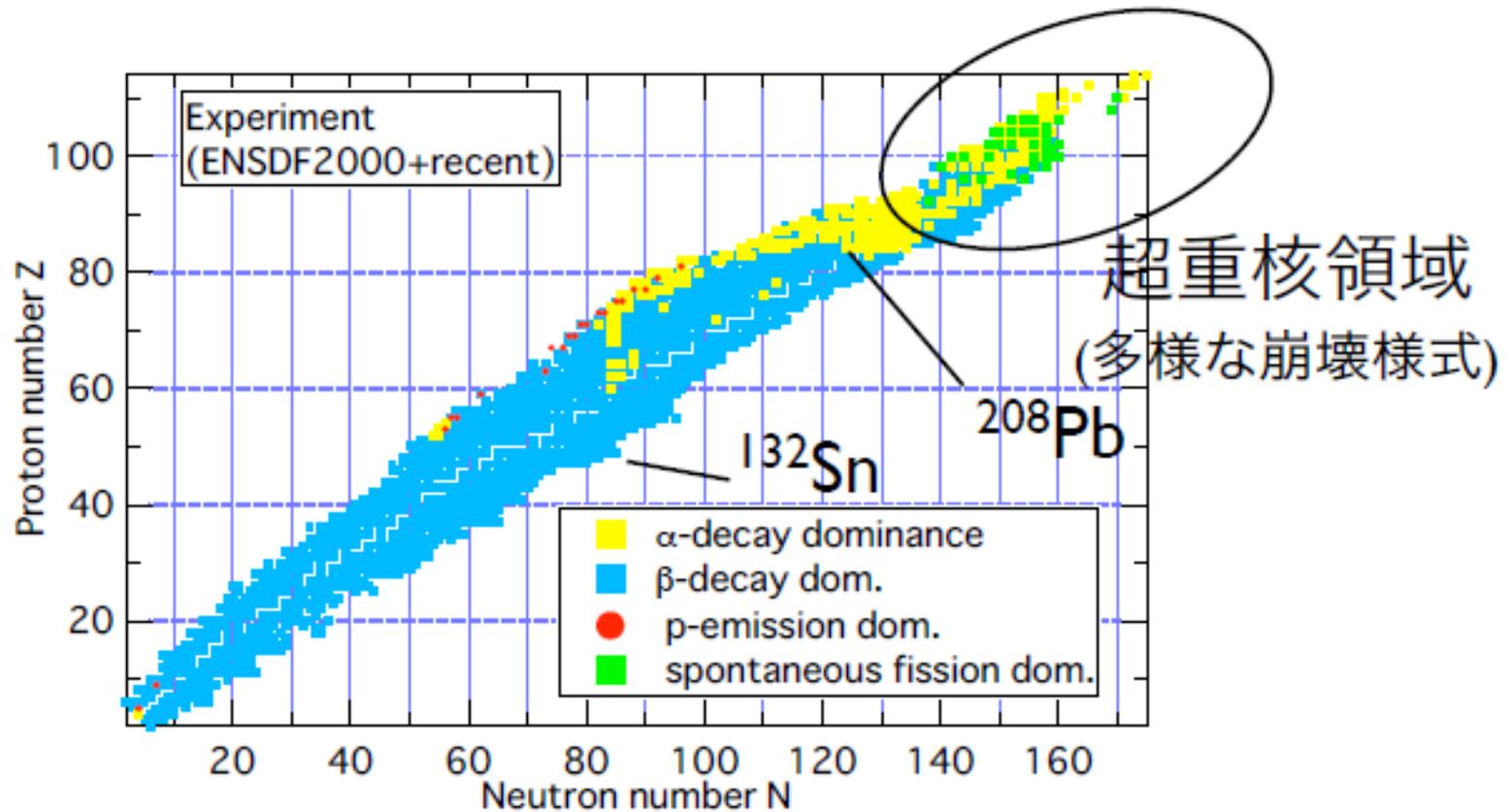
➤ 陽子放出する核って励起しているということですか？

✓ 「励起」というのはちょっと違うかも



今日の授業を聞くともっとわかると思います。

➤ 超重核領域で主な崩壊が記載されていないのは何故？



✓ これは実験データを示している

→ 観測されている超重核のみが記載

* 超重核領域では主に核分裂か α 崩壊 ← どちらも強い相互作用で起きる

- 寿命の議論で golden rule を考えるときの「外場」って何?
- 自発的に崩壊するのに「外場」って何?

$$H = H_0 + \underbrace{V(t)}_{\text{外場}}$$

時間に依存する摂動論 → $P_{n \rightarrow k} \sim \frac{2\pi}{\hbar} t |\langle \phi_k | \hat{F} | \phi_n \rangle|^2 \rho(\epsilon_k)$

✓ 「外場」という名前がミスリーディングでしたね

$$H = \underbrace{H_0}_{\text{原子核}} + \underbrace{V(t)}_{\text{相互作用}}$$

原子核

- 原子核と電磁場の相互作用
- 原子核と弱い場の相互作用

通常、 $V(t)$ を考慮せずに原子核の状態を決める
→ 崩壊を扱うときに $V(t)$ を考慮する

強い相互作用の場合は、

$$H = H_0 + V$$



寿命が無限大
になるように
ハミルトニアンを
変える

$$H - H_0$$

* 今日の授業で「共鳴状態」の説明を聞くともうちょっと意味がわかると思います。

➤ 相互作用の違いに依存するような物理量は崩壊率の他に何かあるか？

✓ 反応の断面積。。。(あとは思いつきませんでした)

➤ QCDの running coupling constant のように漸近的自由性のために強い相互作用の強さが変わると弱崩壊などの方が早くなったりするのか？

✓ 原理的にはそうですね。

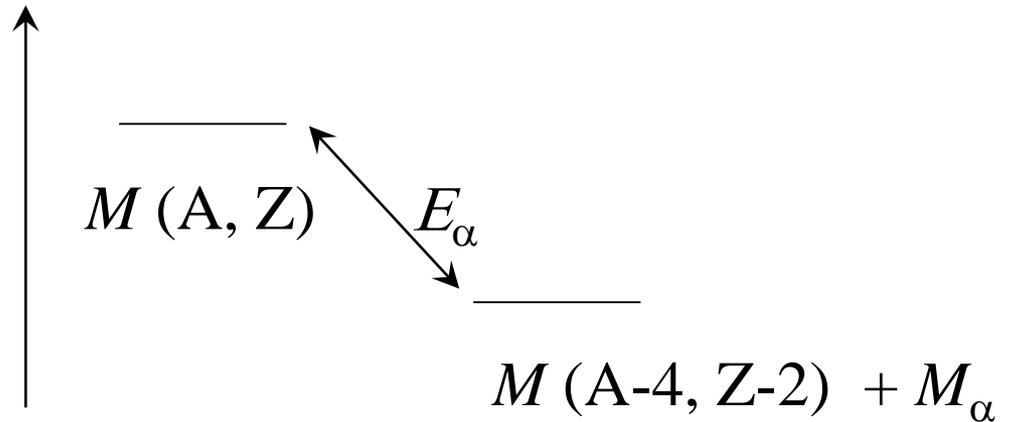
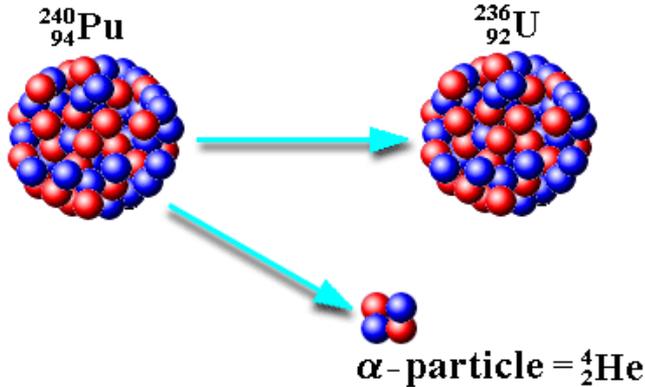
だけど、漸近的自由性は非常に高いエネルギースケールで起こるから、その前に、原子核を核子の集合とみなせなくなる(クォークの自由度を考える必要がある)。

➤ 変形すると崩壊率や崩壊様式はどう変わる？

✓ どのように変わるか一般的なルールはないけど、理論計算では変形も考慮して行うべき(いい質問です)。

α 崩壊について

実験的な観測量: $T_{1/2}$ と E_α



実験データ:

E_α がわずかに変化しただけでも $T_{1/2}$ が何桁も変わる。

例) ^{232}Th : $E_\alpha = 4 \text{ MeV}$, $T_{1/2} = 1.4 \times 10^{10} \text{ 年} = 4.4 \times 10^{17} \text{ 秒}$

^{218}Th : $E_\alpha = 10 \text{ MeV}$, $T_{1/2} = 0.11 \text{ } \mu\text{sec.} = 1.1 \times 10^{-7} \text{ 秒}$

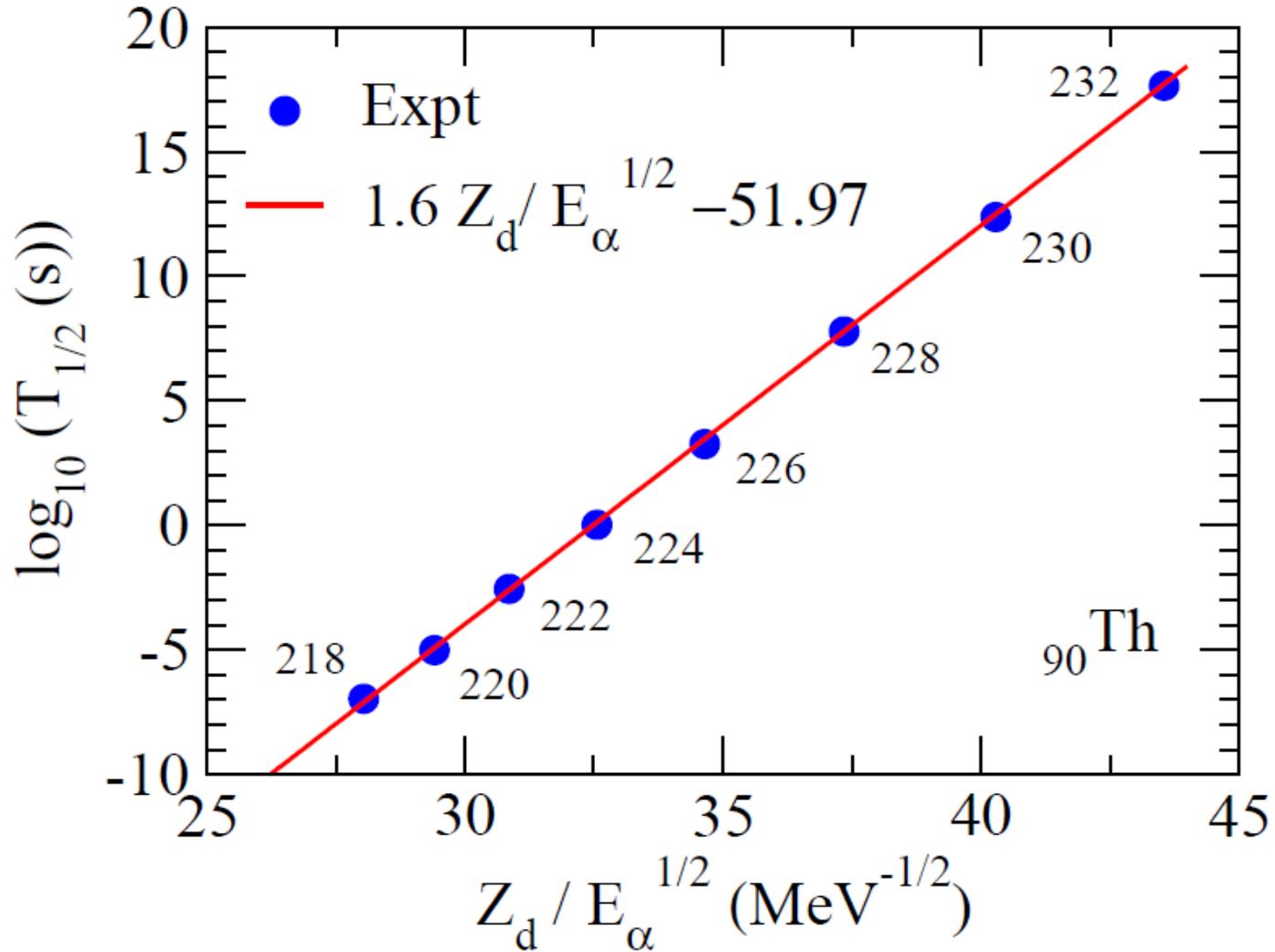
→ トンネル効果を示唆(ガモフ 1928年)

経験則: Geiger-Nuttall 則 (1911年)

$$\log_{10} T_{1/2} \sim a + b \frac{Z_D}{\sqrt{E_\alpha}} \quad (Z_D = Z-2)$$

α 崩壊: Geiger-Nuttal 則

Th アイソトープに対する実験データ

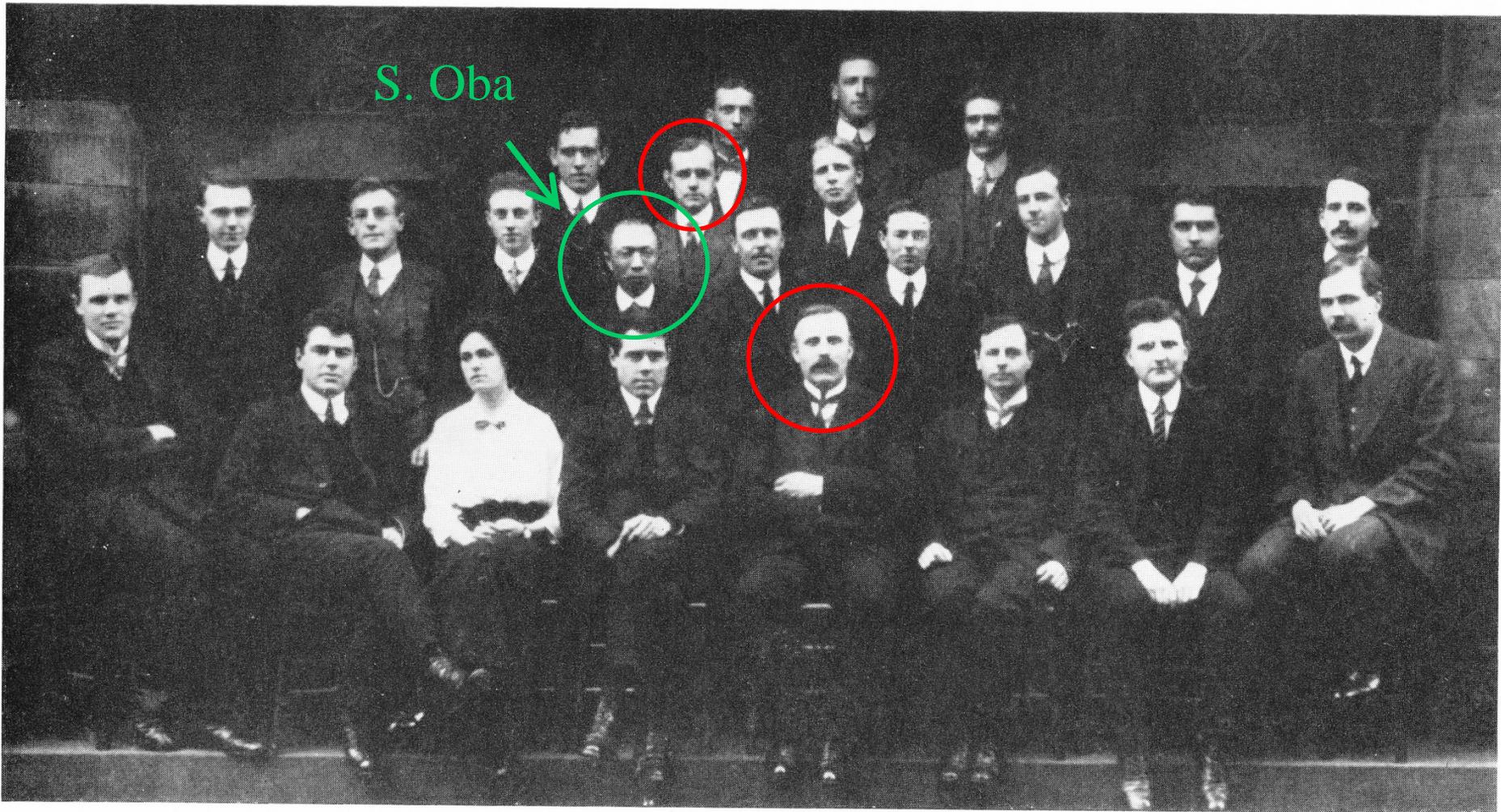


cf. B. Buck, A.C. Merchant, and S.M. Perez, PRL65('90)2975



STAFF AND RESEARCH STUDENTS OF MANCHESTER UNIVERSITY PHYSICS
DEPARTMENT, 1910

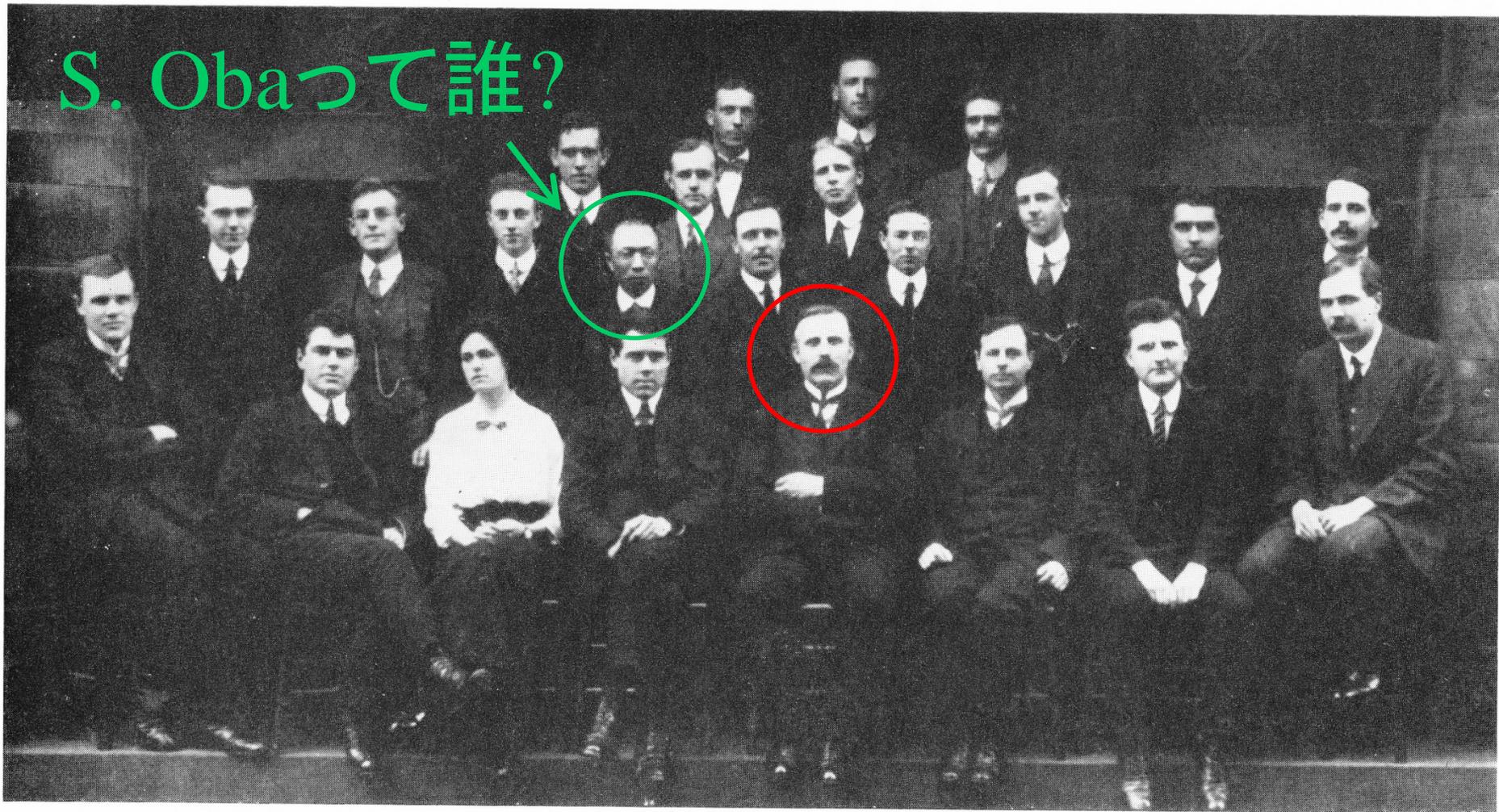
W. Eccles S. Kinoshita R. Rossi W. Kay G. N. Antonoff E. Marsder W. C. Lantsberry
F. W. Whaley H. C. Greenwood W. Wilson W. Borodowsky Miss M. White E. J. Evans H. Geiger T. Tuomikoski
S. Russ H. Stansfield H. Bateman Prof. Schuster Prof. Rutherford R. Beattie J. N. Pring W. Makower
R. E. Slade W. A. Harwood



PHYSICS STAFF AND RESEARCH GROUP, MANCHESTER, 1913

				T. S. Taylor	A. S. Russell				
			H. Richards	J. M. Nuttall	B. Williams	W. Kay			
A. B. Wood	E. Green	R. H. Wilson	S. Oba	E. Marsden	H. Gerrard	J. Chadwick	F. W. Whaley	H. G. J. Moseley	
H. Robinson	D. C. H. Florance	Miss M. White		J. N. Pring	E. Rutherford	W. Makower	E. J. Evans	C. G. Darwin	

S. Obaって誰?



PHYSICS STAFF AND RESEARCH GROUP, MANCHESTER, 1913

T. S. Taylor A. S. Russell
H. Richards J. M. Nuttall B. Williams W. Kay
A. B. Wood E. Green R. H. Wilson **S. Oba** E. Marsden H. Gerrard J. Chadwick F. W. Whaley H. G. J. Moseley
H. Robinson D. C. H. Florance Miss M. White J. N. Pring **E. Rutherford** W. Makower, E. J. Evans, C. G. Darwin



明治専門学校(九州工大の前身)校長
 →米沢高等工業学校(山大工学部の前身)校長

PHYSICS STAFF AND RESEARCH GROUP, MANCHESTER, 1913

- | | | | | | | | |
|-------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|------------|-------------|--------------|
| | | | T. S. Taylor | A. S. Russell | | | |
| | | H. Richards | J. M. Nuttall | B. Williams | W. Kay | | |
| A. B. Wood | E. Green | R. H. Wilson | S. Oba | E. Marsden | H. Gerrard | J. Chadwick | F. W. Whaley |
| H. Robinson | D. C. H. Florance | Miss M. White | J. N. Pring | E. Rutherford | W. Makower | E. J. Evans | C. G. Darwin |



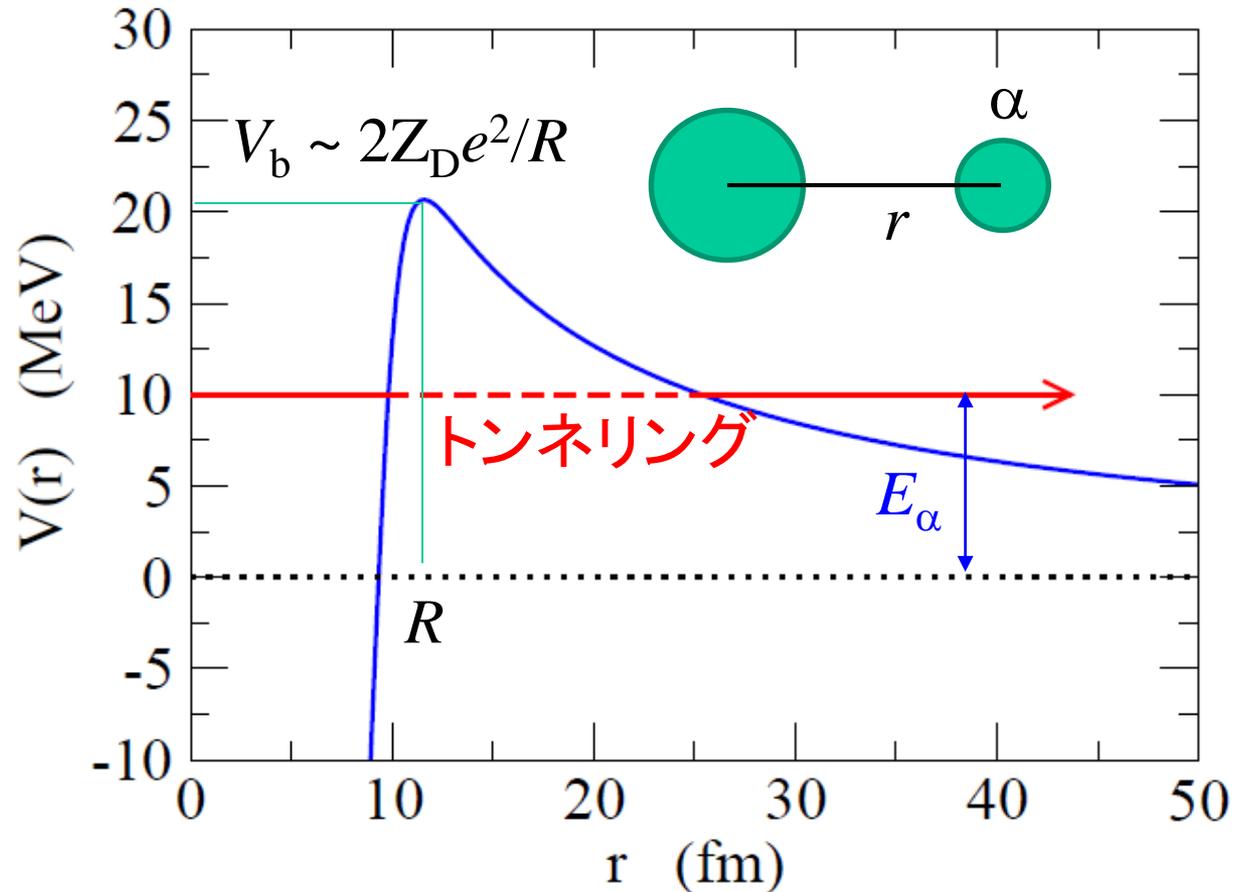
S. Kinoshita
(木下季吉)

STAFF AND RESEARCH STUDENTS OF MANCHESTER UNIVERSITY PHYSICS
DEPARTMENT, 1910

W. Eccles S. Kinoshita R. Rossi W. Kay G. N. Antonoff E. Marsder W. C. Lantsberry
 F. W. Whaley H. C. Greenwood W. Wilson W. Borodowsky Miss M. White E. J. Evans H. Geiger T. Tuomikoski
 S. Russ H. Stansfield H. Bateman Prof. Schuster Prof. Rutherford R. Beattie J. N. Pring W. Makower
 R. E. Slade W. A. Harwood

ガモフによる α 崩壊の説明

$E_\alpha < V_b \rightarrow$ トンネル効果による崩壊



例) Thアイソトープに対して

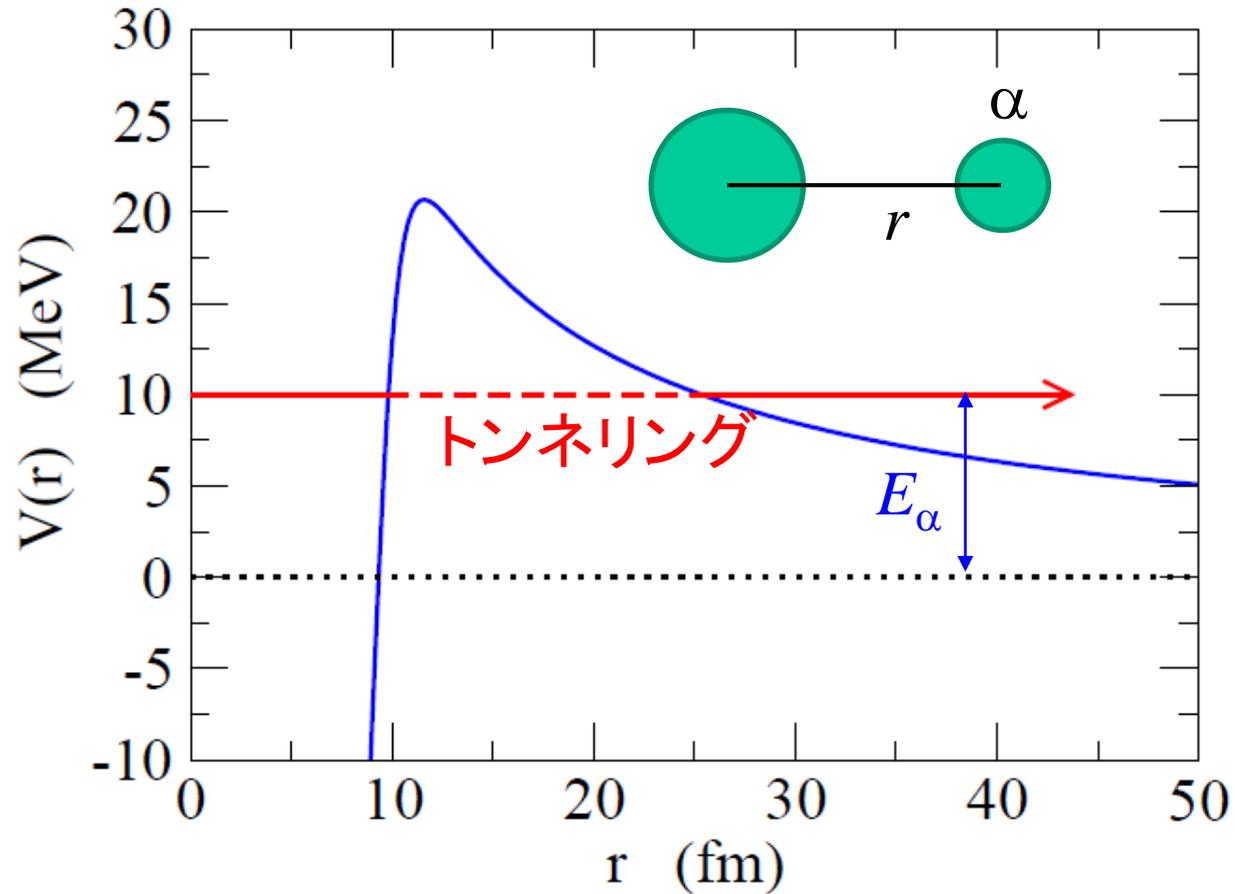
$$R \sim 1.2 \times (230^{1/3} + 4^{1/3}) = 9.26 \text{ fm}$$

$$V_b \sim 2 \times 88 e^2 / R \sim 2 \times 88 e^2 / 9.26 = 27.3 \text{ MeV}$$

$$\longleftrightarrow E_\alpha = 4 \sim 10 \text{ MeV}$$

ガモフによる α 崩壊の説明

$E_\alpha < V_b \rightarrow$ トンネル効果による崩壊



ガモフ:

$$\lambda = \omega \cdot P$$

ω : 単位時間当たりにポテンシャルの壁に当たる回数(試行周期)

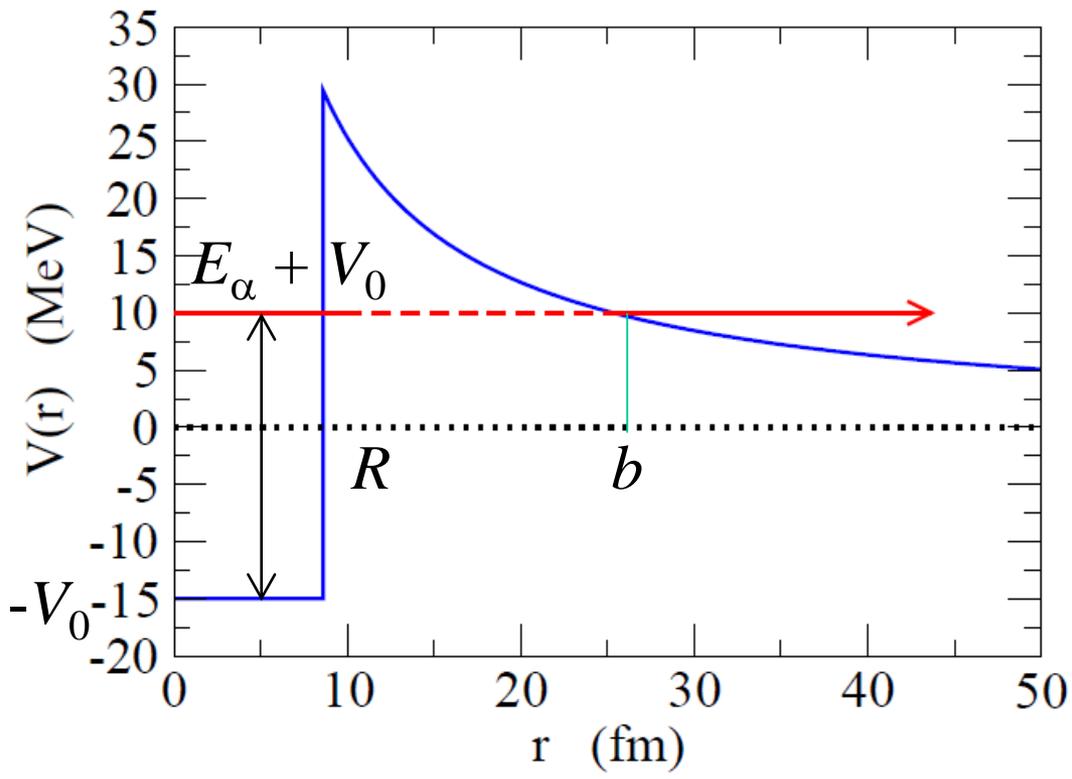
P : トンネル効果の確率

ガモフによる α 崩壊の説明

ガモフ: $\lambda = \omega \cdot P$

ω : 単位時間あたりにポテンシャルの壁に当たる回数 (試行周期)

P : トンネル効果の確率



$$V(r) = -V_0 \quad (r < R)$$
$$= \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad (r \geq R)$$

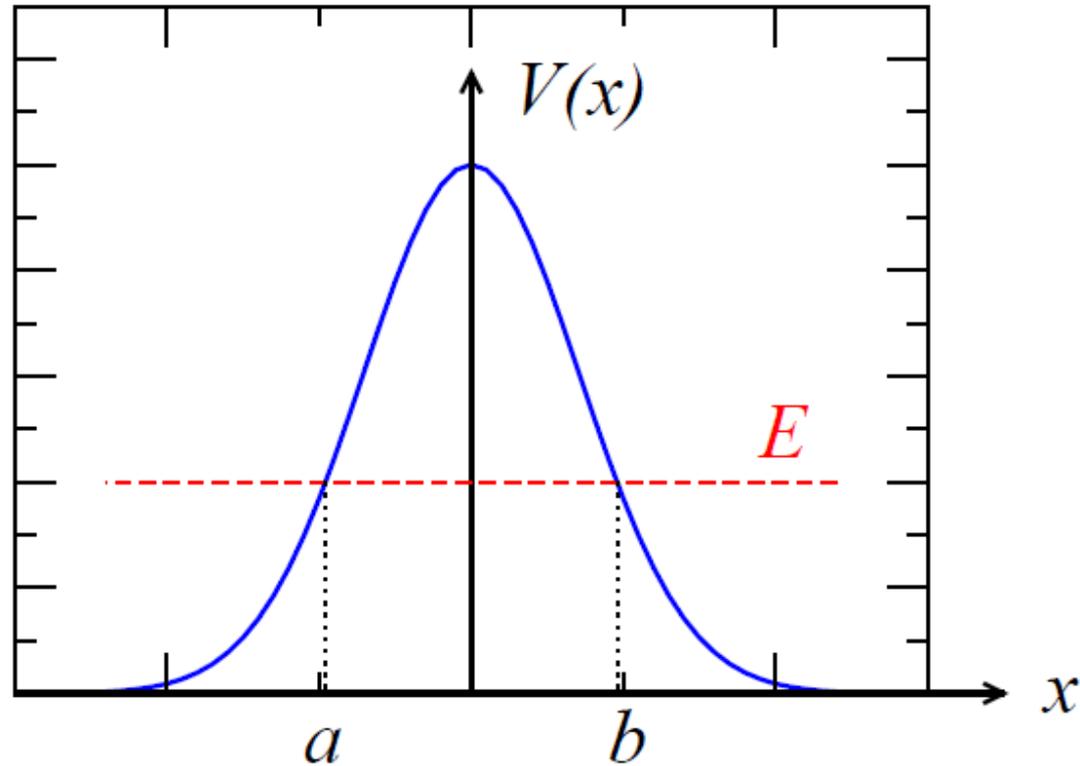
と単純化すると、

$$\omega = \frac{\tilde{v}}{2R}$$

$$\frac{1}{2} \mu \tilde{v}^2 = E_\alpha + V_0$$

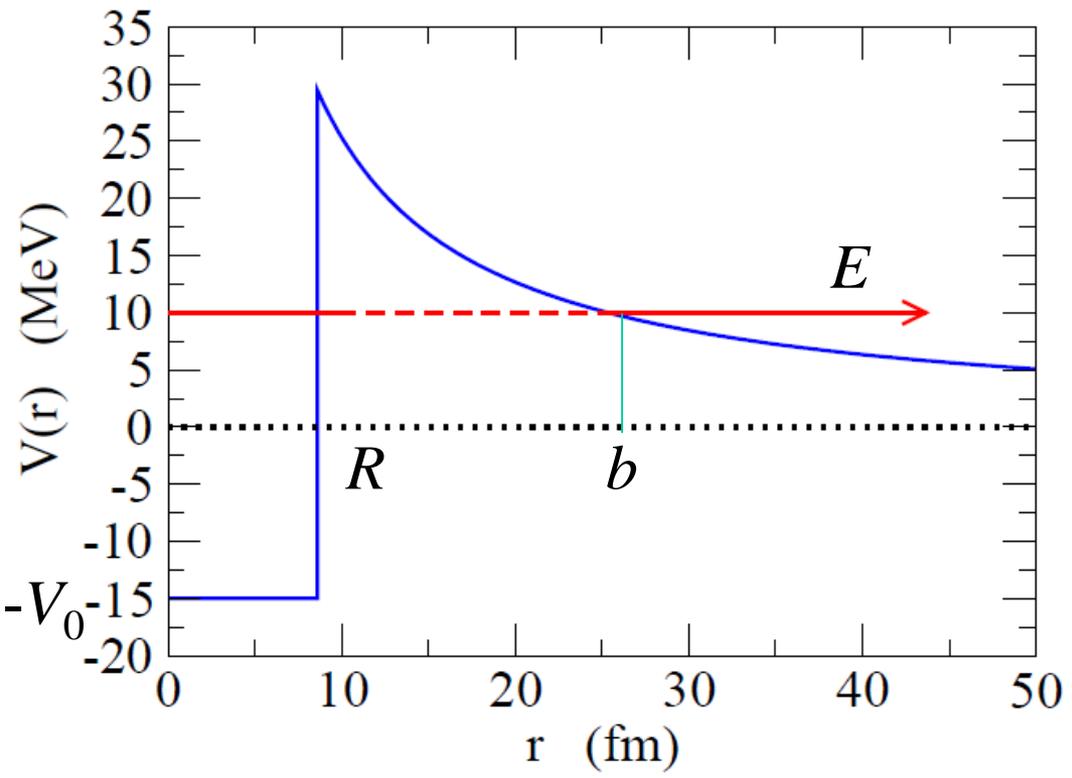
WKB 近似 (半古典近似)

WKB 近似をトンネル確率に適用すると:



$$P(E) = \exp \left[-2 \int_a^b dx \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (V(x) - E)} \right]$$

α 崩壊におけるトンネル確率



$$V(r) = -V_0 \quad (r < R)$$
$$= \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad (r \geq R)$$

と単純化すると、

$$E = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{b}$$

$$P = \exp \left[-2 \int_R^b dr \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2} \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} - E \right)} \right]$$
$$= \exp \left[-\sqrt{\frac{2\mu R}{\hbar^2} Z_1 Z_2 e^2} \left(\pi \sqrt{\frac{Z_1 Z_2 e^2}{RE}} - 4 \right) \right]$$

$$P = e^{-G} \quad G \sim \sqrt{\frac{2\mu R}{\hbar^2} Z_1 Z_2 e^2} \left(\pi \sqrt{\frac{Z_1 Z_2 e^2}{RE}} - 4 \right)$$

(note) $R \rightarrow 0$ では

$$G \sim \sqrt{\frac{2\mu R}{\hbar^2} Z_1 Z_2 e^2} \left(\pi \sqrt{\frac{Z_1 Z_2 e^2}{RE}} \right) = \pi Z_1 Z_2 e^2 \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2 E}} = 2\pi \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\hbar v} \equiv \eta(E)$$

$$P(E) \sim e^{-2\pi\eta(E)}$$

ゾンマーフェルト
パラメーター

$Z_1=2, Z_2=88, \mu = 4m_N$ とすると

$$E = 4 \text{ MeV} \text{ で } \eta = 27.85, P(E) = 1.00 \times 10^{-76}$$

$$E = 10 \text{ MeV} \text{ で } \eta = 17.62, P(E) = 8.60 \times 10^{-49}$$

(約28ケタの違い)

- アルファ崩壊は量子トンネル効果が原因で反応速度が遅くなる
とのことだが、量子トンネルだとなぜ反応速度が遅くなるのですか？
(先週の質問より)

$Z_1=2, Z_2=88, \mu = 4m_N$ とすると

$$E = 4 \text{ MeV} \text{ で } \eta = 27.85, P(E) = 1.00 \times 10^{-76}$$

$$E = 10 \text{ MeV} \text{ で } \eta = 17.62, P(E) = 8.60 \times 10^{-49}$$

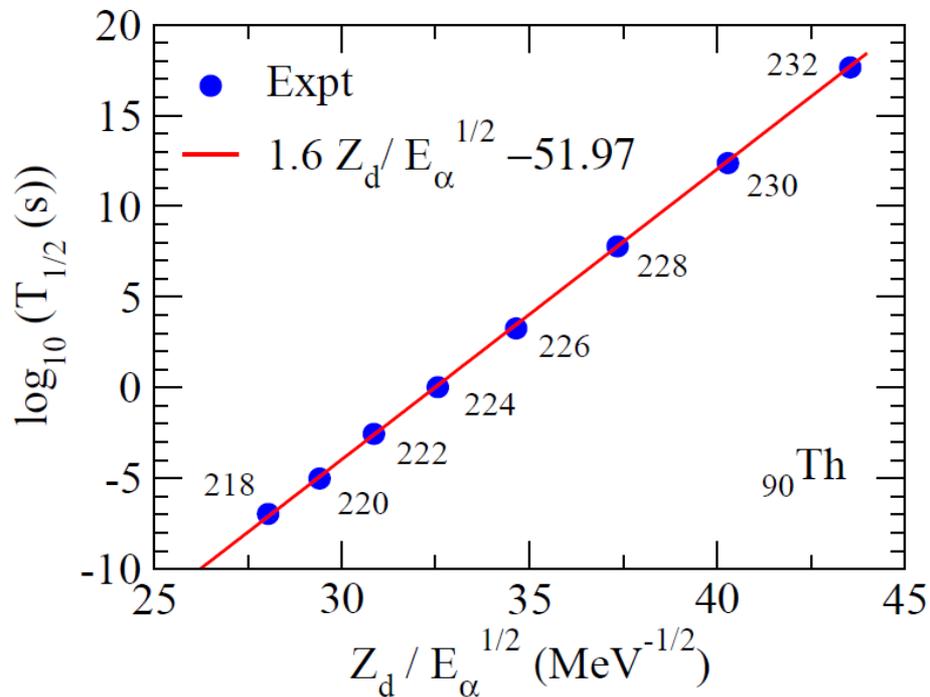
(約28ケタの違い)

確率が非常に小さい

$$P = e^{-G} \quad G \sim \pi Z_1 Z_2 e^2 \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2 E}}$$

➡ $\lambda = \lambda_0 e^{-\beta \frac{Z_1}{\sqrt{E}}} \quad (\beta \text{ は定数})$

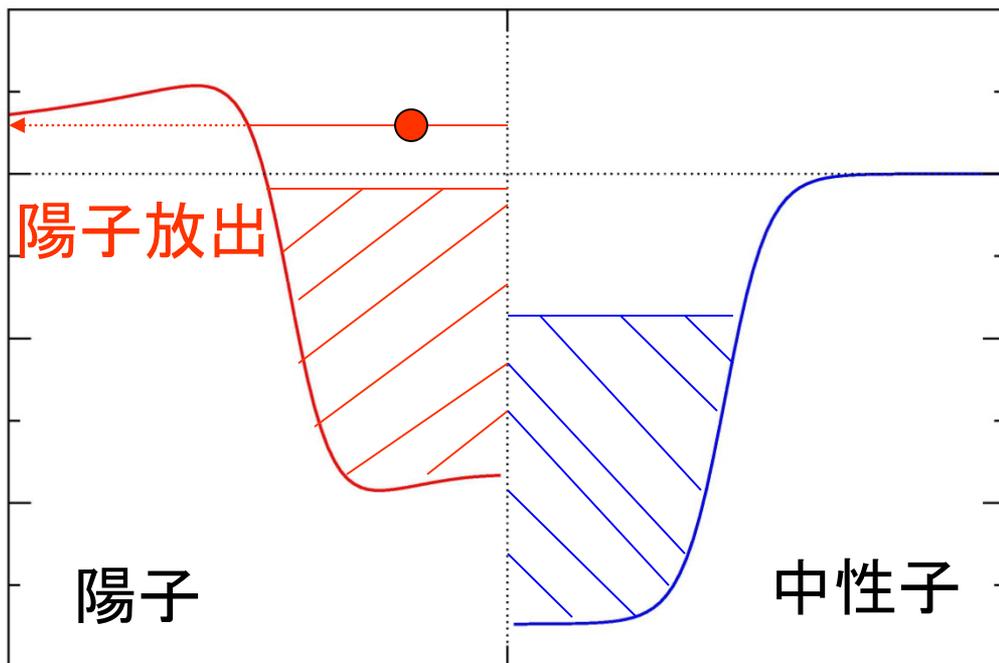
➡ $T_{1/2} = \frac{1}{\lambda} \ln 2 = C e^{\beta \frac{Z_1}{\sqrt{E}}} \quad \leftarrow \text{Geiger-Nuttall}$



$$\log_{10} T_{1/2} \sim a + b \frac{Z_D}{\sqrt{E_\alpha}}$$

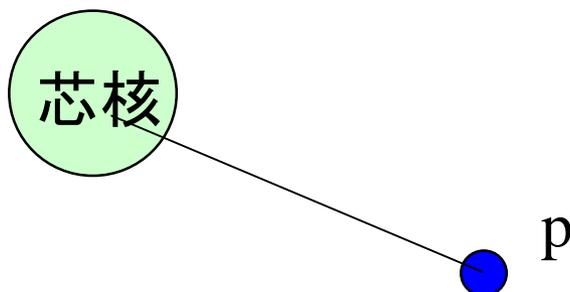
陽子放出崩壊

陽子ドリップ線を越えた原子核



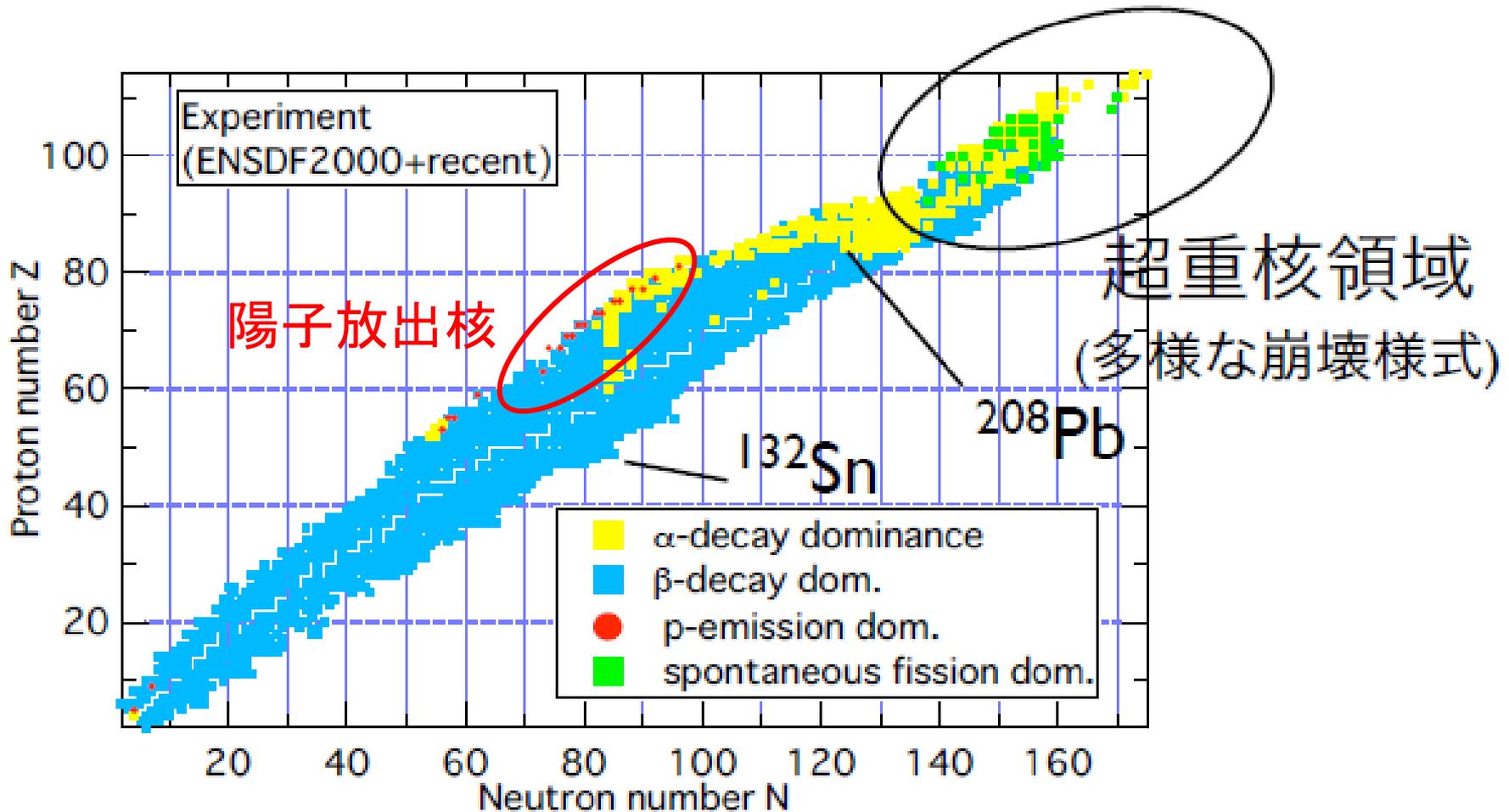
陽子: クーロン障壁にトラップ
(障壁をトンネルしなければならない)

非常に幅の狭い
(長寿命な) 共鳴状態



多くの(基底状態)陽子放出核が発見

実験の観測量: 陽子の放出エネルギー E_p と崩壊半減期 $T_{1/2}$



小浦寛之氏 (JAEA)
のスライドより

A ~ 150-160 領域における 典型的な値

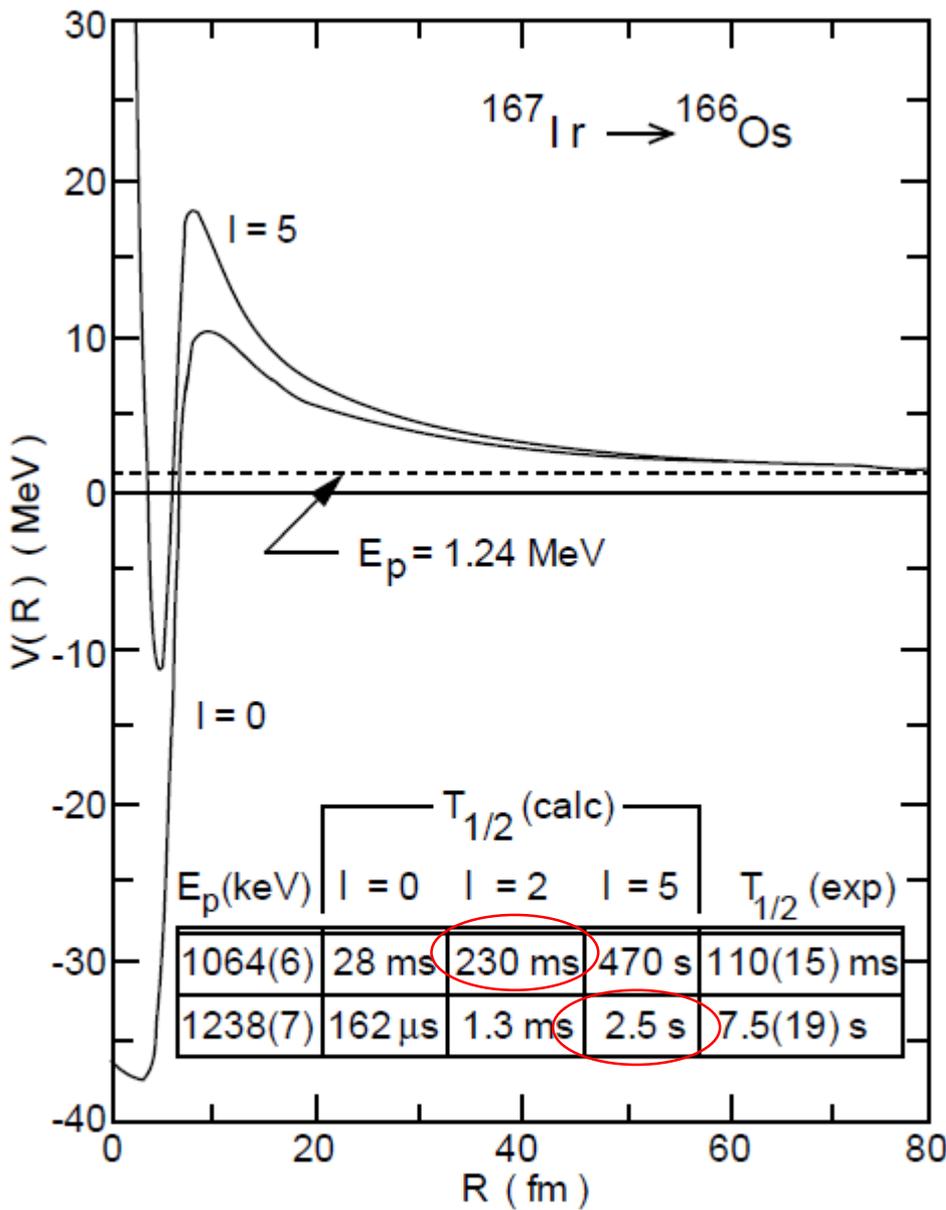
$$V_b \sim 10 \text{ MeV } (l=0)$$

$$E_p \sim 1 \text{ MeV}$$

$$R_{\text{turn}}: 80 \sim 100 \text{ fm}$$

$$\Gamma: 10^{-18} \sim 10^{-22} \text{ MeV}$$

$$T_{1/2}: 100 \mu\text{s} \sim 1 \text{ sec}$$



陽子放出崩壊の一つの特徴：
半減期が l に敏感

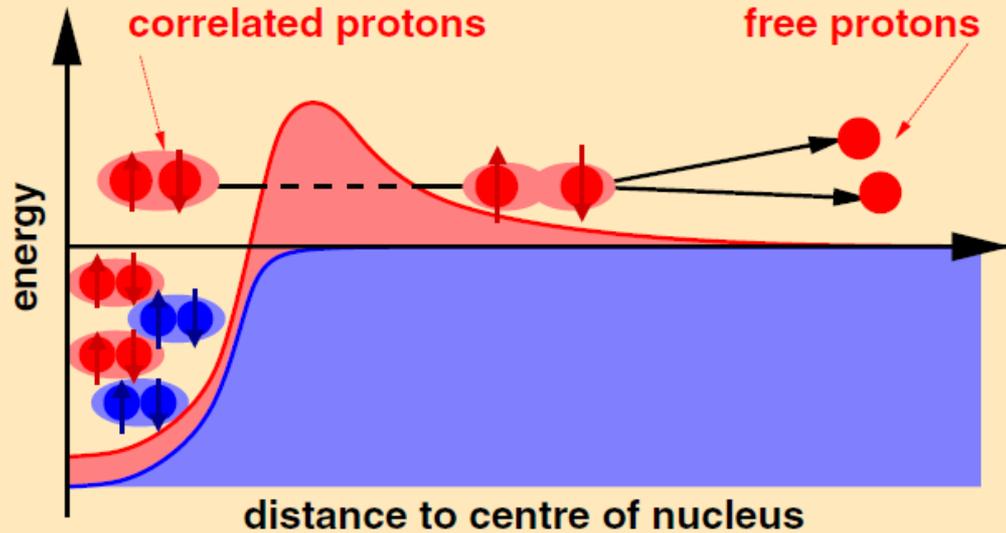


陽子崩壊を通じて陽子過剰核
の陽子一粒子状態の l を決定
できる

Figure 3 Proton-nucleus potential calculated for the proton emitter ^{167}Ir . The inset shows the proton-decay half-lives calculated using the WKB approximation for three values of the angular momentum ℓ , compared to the experimental values for the ground and isomeric transitions.

2陽子放出崩壊

最近では陽子が2つ出てくる崩壊も
観測されている



K. Miernik et al.,
PRL99 ('07) 192501

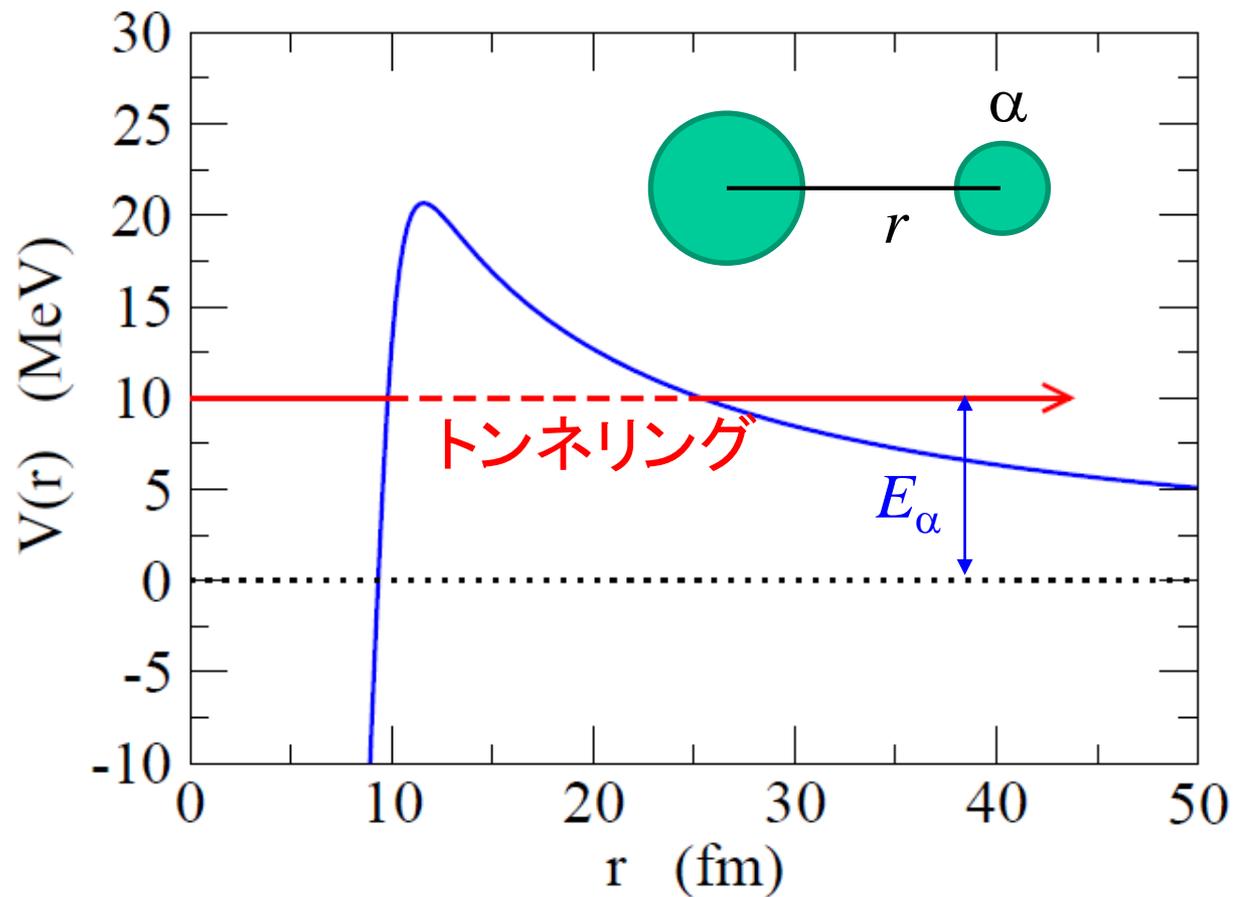


B. Blank and M. Ploszajczak,
Rep. Prog. Phys. 71('08)046301

核内での核子相関?

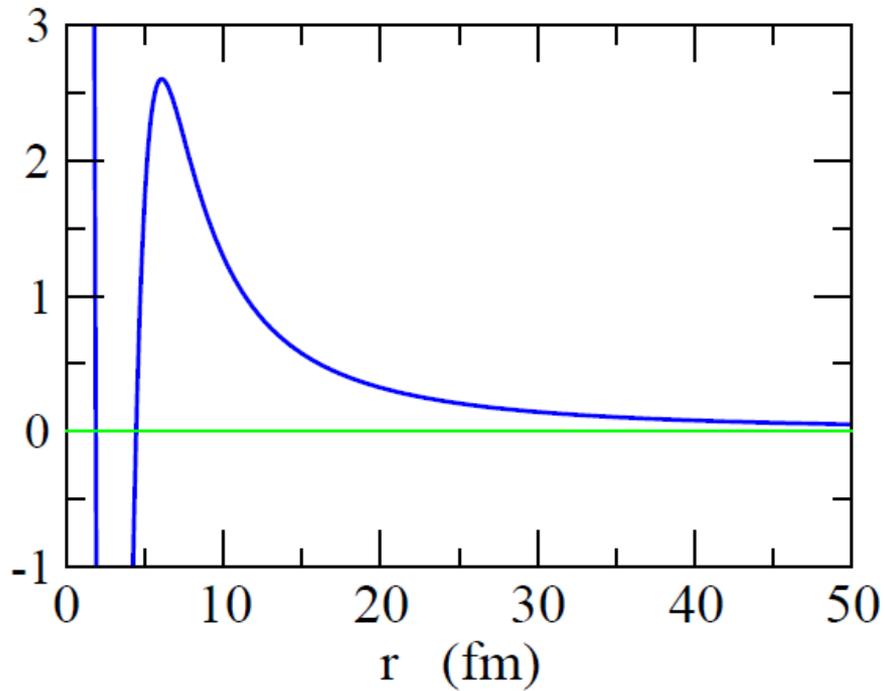
ガス・チェンバーの中
を走らせて CCD カメラ
で写真をとる

共鳴状態の量子力学



この状態は準束縛状態 = 共鳴状態

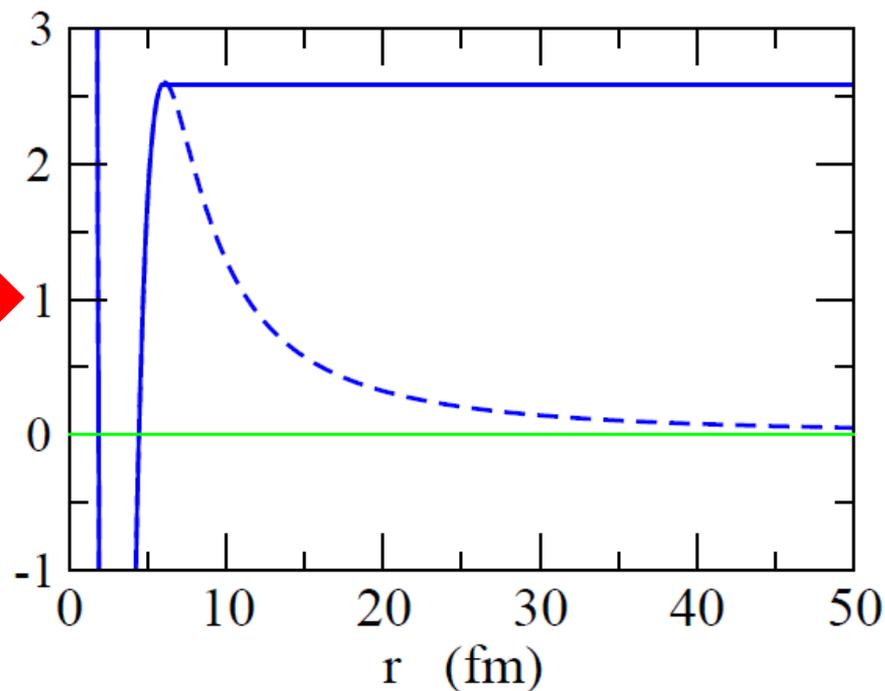
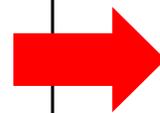
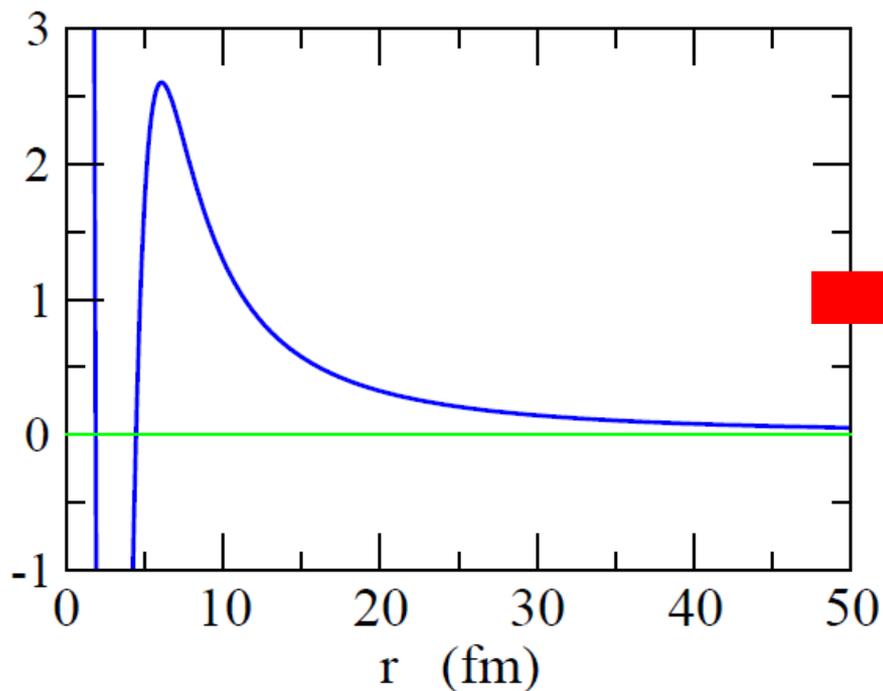
準束縛状態(共鳴状態)とは?



実際のポテンシャル

束縛状態は $E < 0$ の領域のみ

準束縛状態(共鳴状態)とは?



実際のポテンシャル

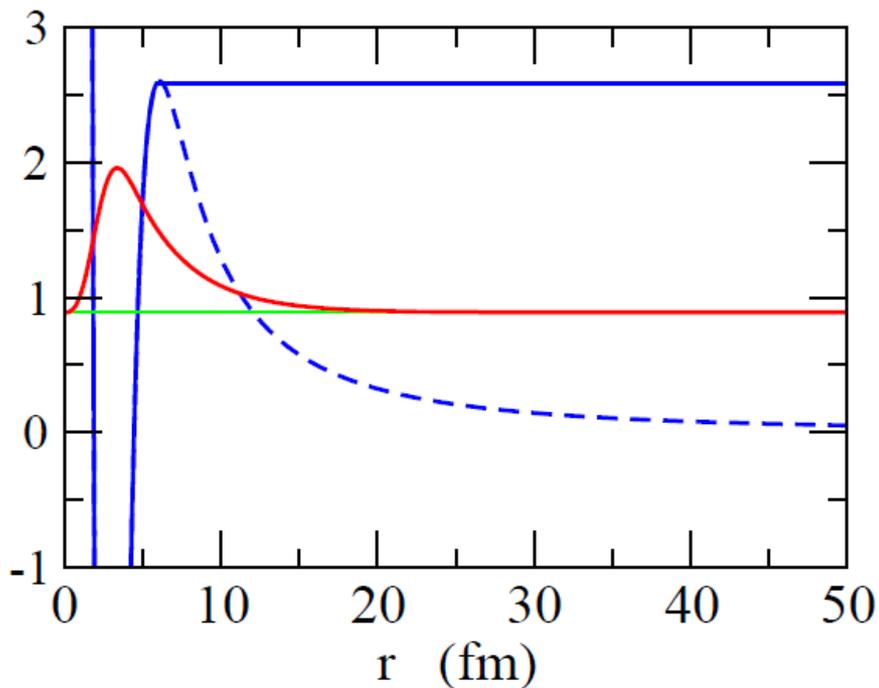
束縛状態は $E < 0$ の領域のみ

このようにポテンシャルを
変更すると

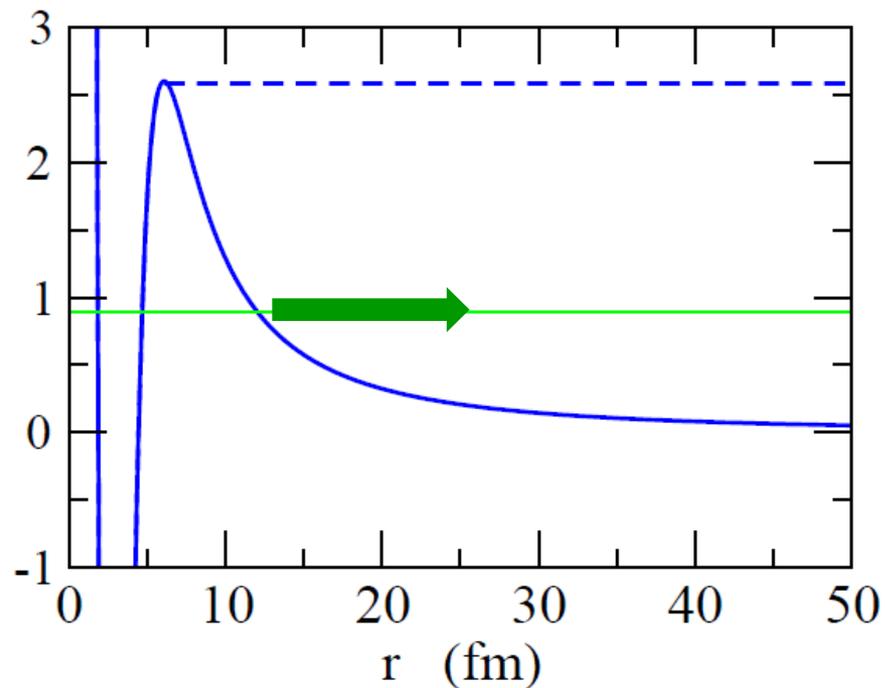
→ $E > 0$ でも束縛状態が
できる

= 準束縛(準安定)状態

準束縛状態(共鳴状態)とは?



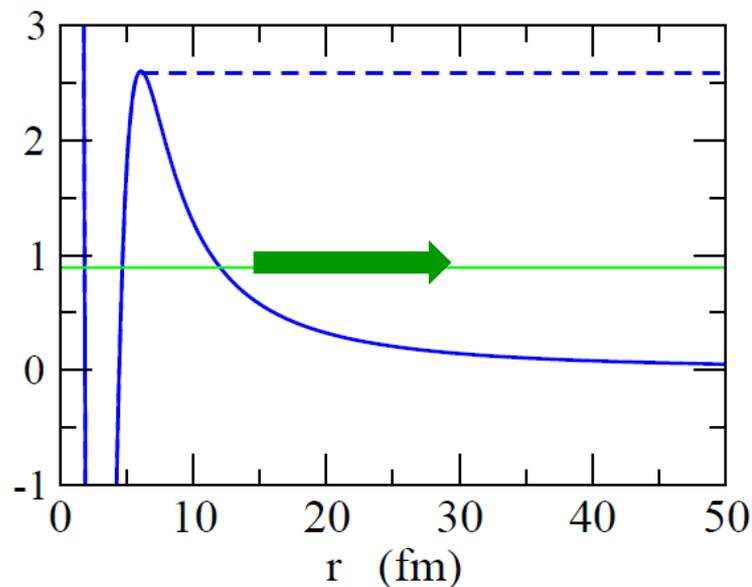
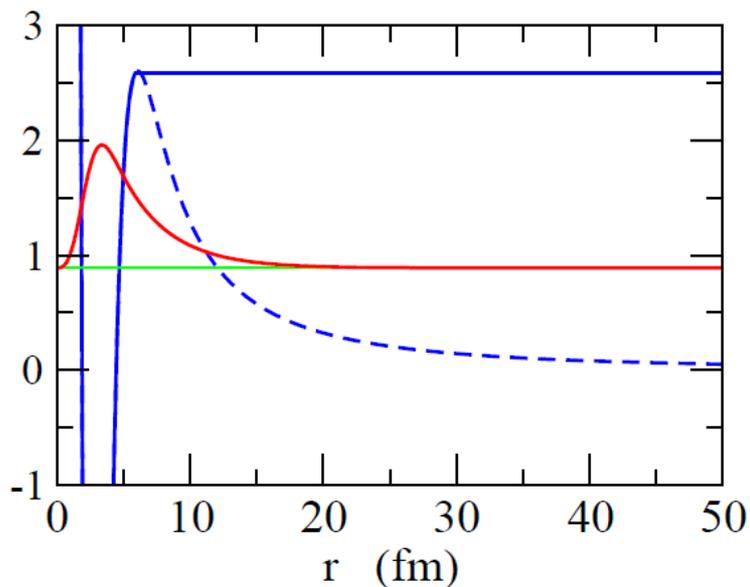
束縛状態 = 無限の寿命



実際には有限の寿命で
障壁をトンネルし崩壊

「準束縛(準安定)状態」

ガモフ状態



トンネル効果で波動関数が
 沁み出し、**外向きの波として崩壊**

$$\begin{aligned}
 u(r) &\sim r^{l+1} && (r \rightarrow 0) \\
 &\rightarrow \mathcal{N} e^{i(kr - l\pi/2)} && (r \rightarrow \infty)
 \end{aligned}$$

共鳴幅



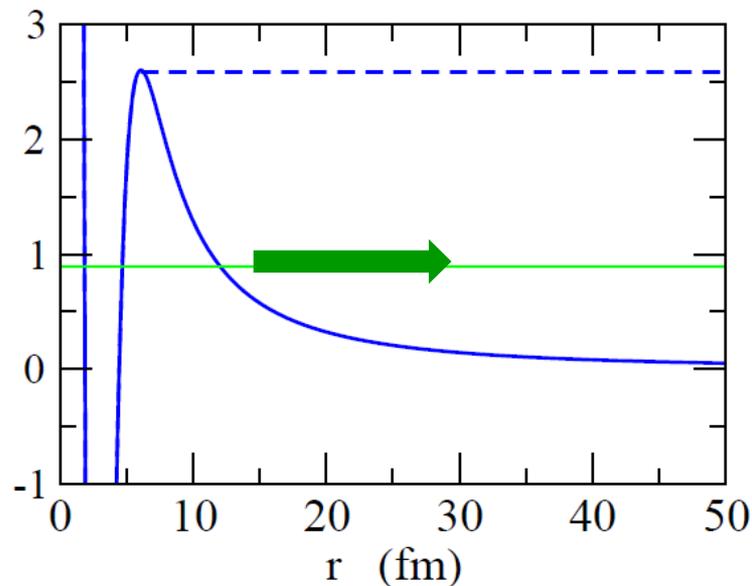
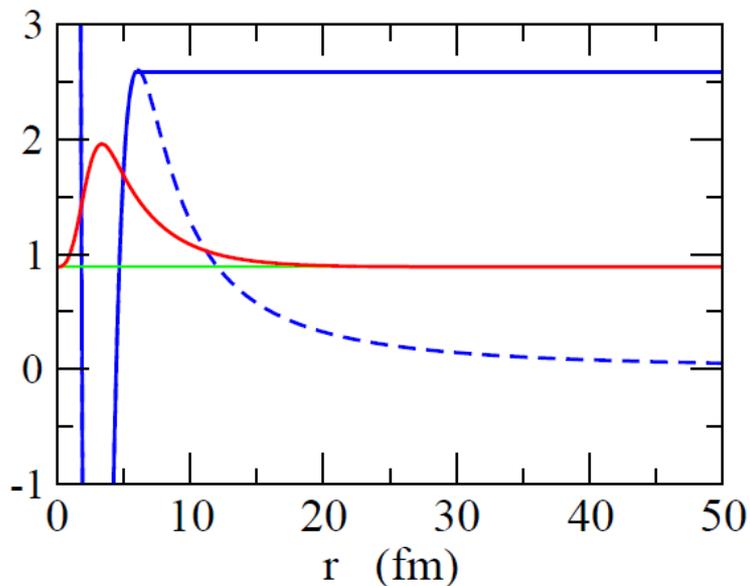
$$E \rightarrow E_R - i \frac{\Gamma}{2}$$



共鳴エネルギー

⇒ エネルギーを複素数にしなければならない:

ガモフ状態



$$E \rightarrow E_R - i\frac{\Gamma}{2}$$

生き残り確率:

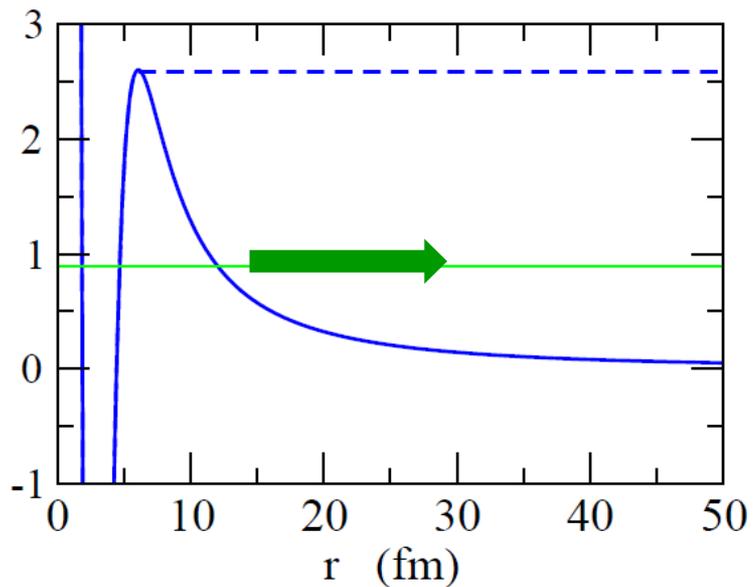
$$\begin{aligned} P(t) &= |\langle \psi(0) | \psi(t) \rangle|^2 \\ &= |\langle \psi(0) | e^{-iHt/\hbar} | \psi(0) \rangle|^2 \\ &= |\langle \psi(0) | e^{-i(E_R - i\Gamma/2)t/\hbar} | \psi(0) \rangle|^2 \\ &= e^{-\Gamma t/\hbar} \end{aligned}$$

トンネル効果で波動関数が
 沁み出し、**外向きの波として崩壊**

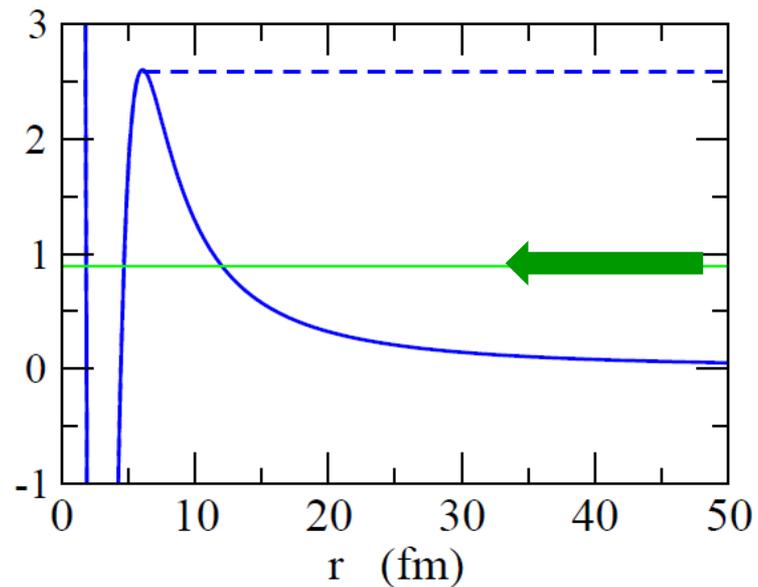
\hbar/Γ が準安定状態の寿命

共鳴状態と弾性散乱(共鳴散乱)

準安定状態の崩壊



このエネルギーで外から
粒子を衝突させると?



共鳴散乱

共鳴状態と弾性散乱(共鳴散乱)

自由粒子の運動:

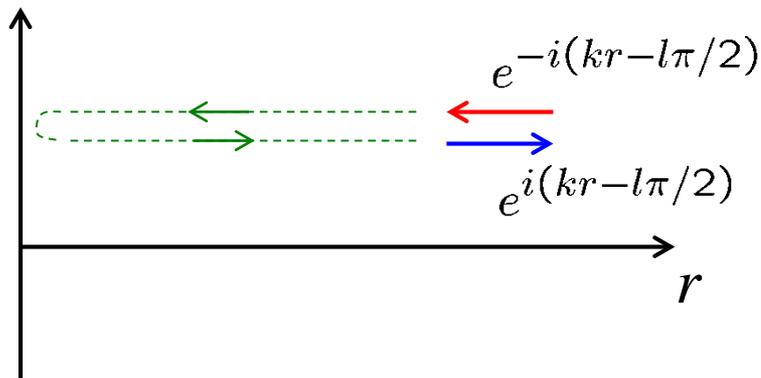
$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 - E\right)\psi(\mathbf{r}) = 0$$

✓ 解:

$$\psi(\mathbf{r}) \propto j_l(kr)Y_{lm}(\hat{\mathbf{r}})$$

✓ 遠方での振る舞い:

$$\begin{aligned} j_l(kr) &\rightarrow \frac{1}{kr} \sin\left(kr - \frac{l\pi}{2}\right) \\ &= \frac{-1}{2ikr} \left(e^{-i(kr-l\pi/2)} - e^{i(kr-l\pi/2)} \right) \end{aligned}$$



共鳴状態と弾性散乱(共鳴散乱)

自由粒子の運動:

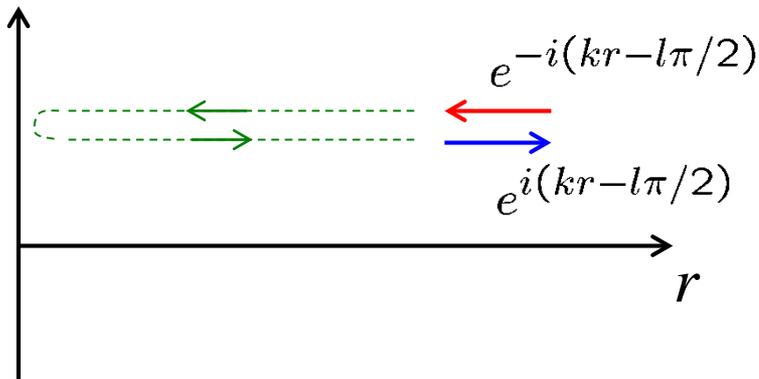
$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 - E\right)\psi(\mathbf{r}) = 0$$

✓解:

$$\psi(\mathbf{r}) \propto j_l(kr)Y_{lm}(\hat{\mathbf{r}})$$

✓遠方での振る舞い:

$$\begin{aligned} j_l(kr) &\rightarrow \frac{1}{kr} \sin\left(kr - \frac{l\pi}{2}\right) \\ &= \frac{-1}{2ikr} \left(e^{-i(kr-l\pi/2)} - e^{i(kr-l\pi/2)} \right) \end{aligned}$$



ポテンシャル中の運動:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(r) - E\right)\psi(\mathbf{r}) = 0$$

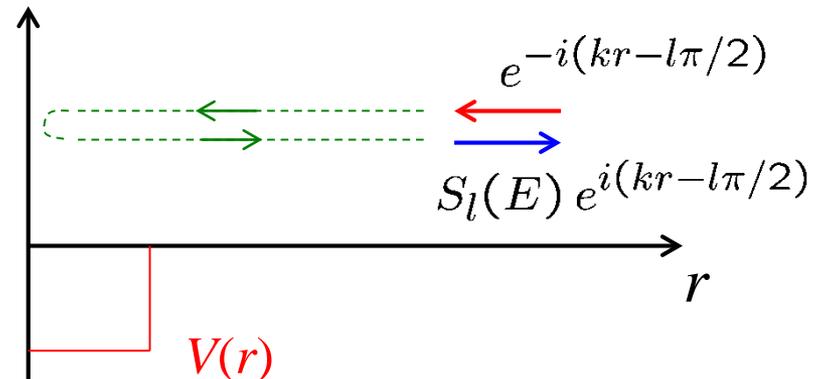
✓解:

$$\psi(\mathbf{r}) \propto R_l(r)Y_{lm}(\hat{\mathbf{r}})$$

✓遠方での振る舞い:

$$R_l(r) \rightarrow \frac{-1}{2ikr} \left(e^{-i(kr-l\pi/2)} - S_l(E) e^{i(kr-l\pi/2)} \right)$$

* 吸収がなければ $|S_l(E)| = 1$



共鳴状態と弾性散乱(共鳴散乱)

自由粒子の運動:

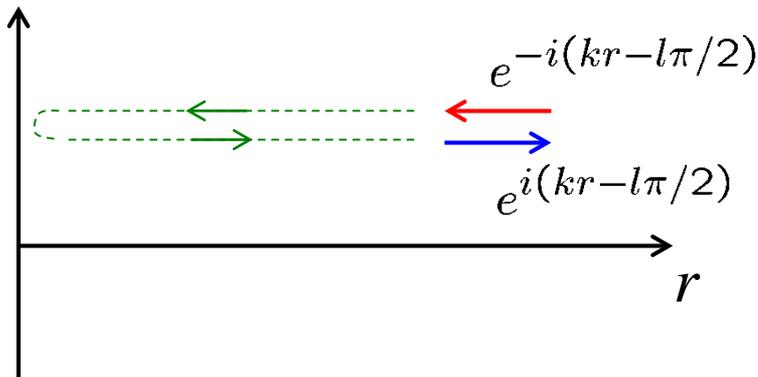
$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 - E\right)\psi(\mathbf{r}) = 0$$

✓解:

$$\psi(\mathbf{r}) \propto j_l(kr)Y_{lm}(\hat{\mathbf{r}})$$

✓遠方での振る舞い:

$$\begin{aligned} j_l(kr) &\rightarrow \frac{1}{kr} \sin\left(kr - \frac{l\pi}{2}\right) \\ &= \frac{-1}{2ikr} \left(e^{-i(kr-l\pi/2)} - e^{i(kr-l\pi/2)} \right) \end{aligned}$$



ポテンシャル中の運動:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(r) - E\right)\psi(\mathbf{r}) = 0$$

✓解:

$$\psi(\mathbf{r}) \propto R_l(r)Y_{lm}(\hat{\mathbf{r}})$$

✓遠方での振る舞い:

$$R_l(r) \rightarrow \frac{-1}{2ikr} \left(e^{-i(kr-l\pi/2)} - S_l(E) e^{i(kr-l\pi/2)} \right)$$

* 吸収がなければ $|S_l(E)| = 1$

位相のずれ (phase shift)

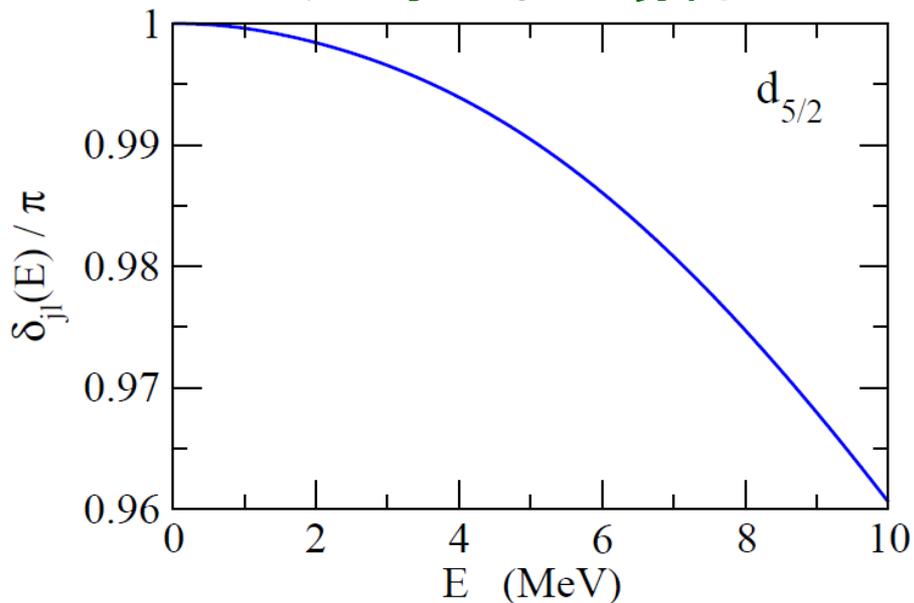
$$S_l(E) = e^{2i\delta_l(E)}$$



$$R_l(r) \rightarrow -\frac{e^{i\delta_l(E)}}{kr} \sin(kr - l\pi/2 + \delta_l(E))$$

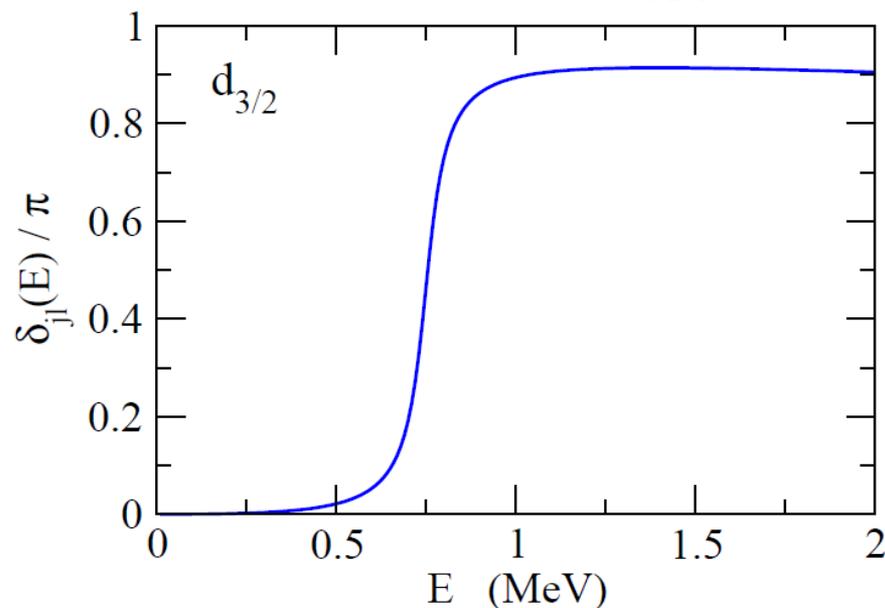
共鳴があると位相のずれはどう振る舞う?

共鳴がない場合



E に対してゆるやかな
振る舞い

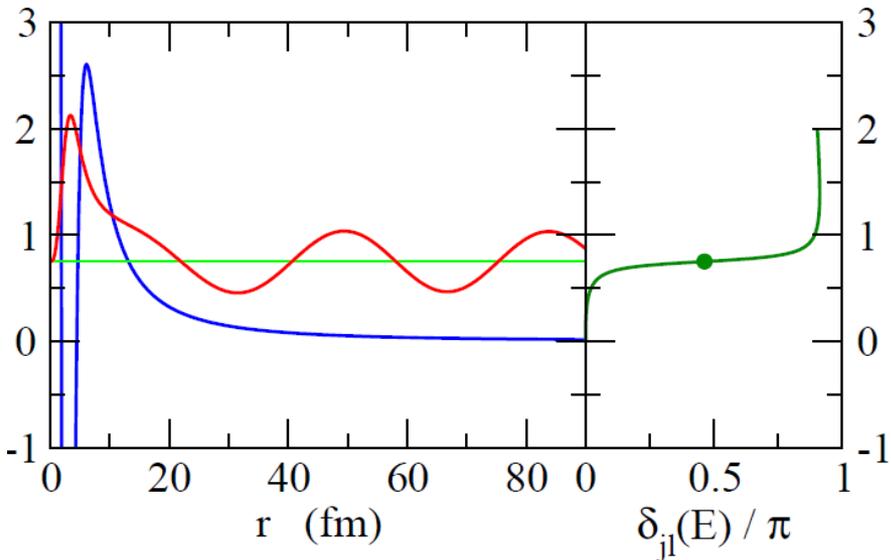
共鳴がある場合



共鳴エネルギーで急に
位相のずれが立ち上がる

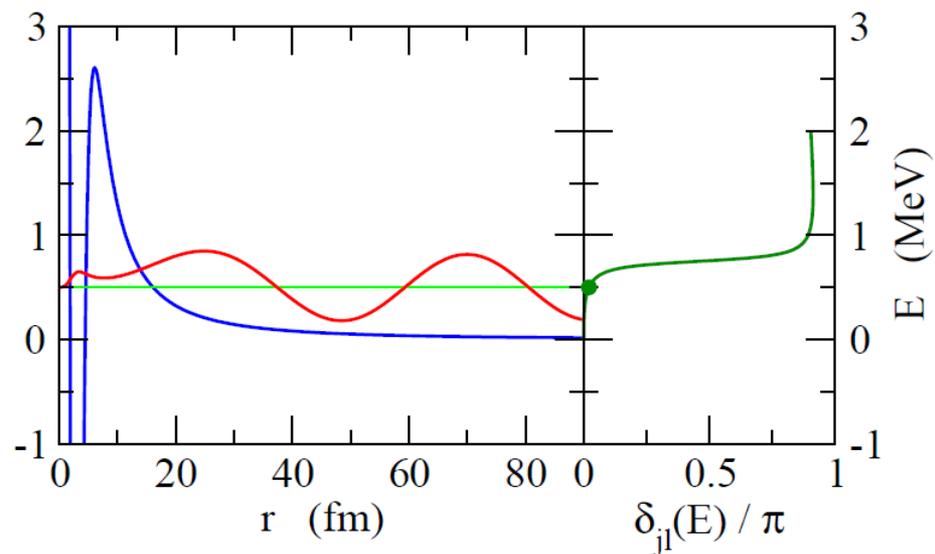
弾性散乱の全断面積: $\sigma_l = \frac{4\pi}{k^2} (2l + 1) \sin^2 \delta_l$ → 共鳴だと大

それでは波動関数は?



on-resonance:

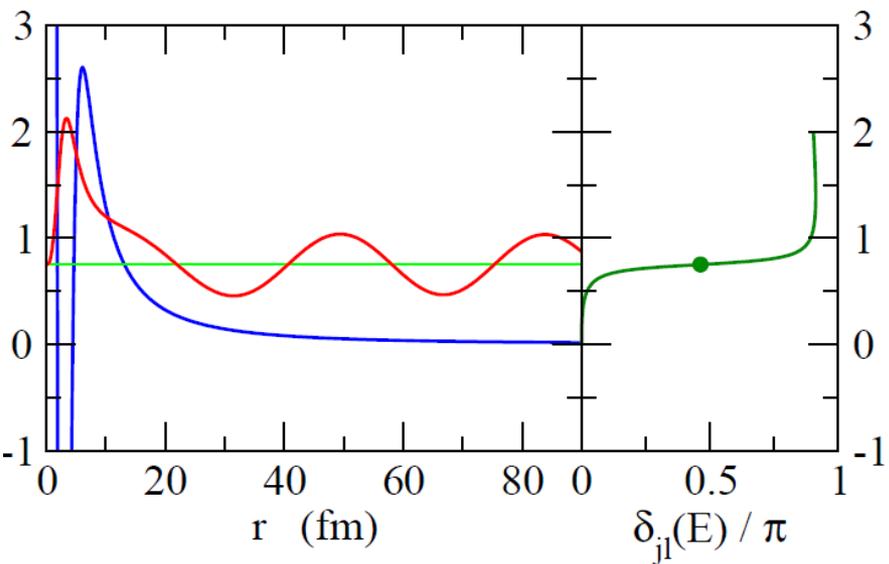
波動関数は障壁の内側で
大きな振幅



off-resonance:

障壁の内側では振幅が
小さい

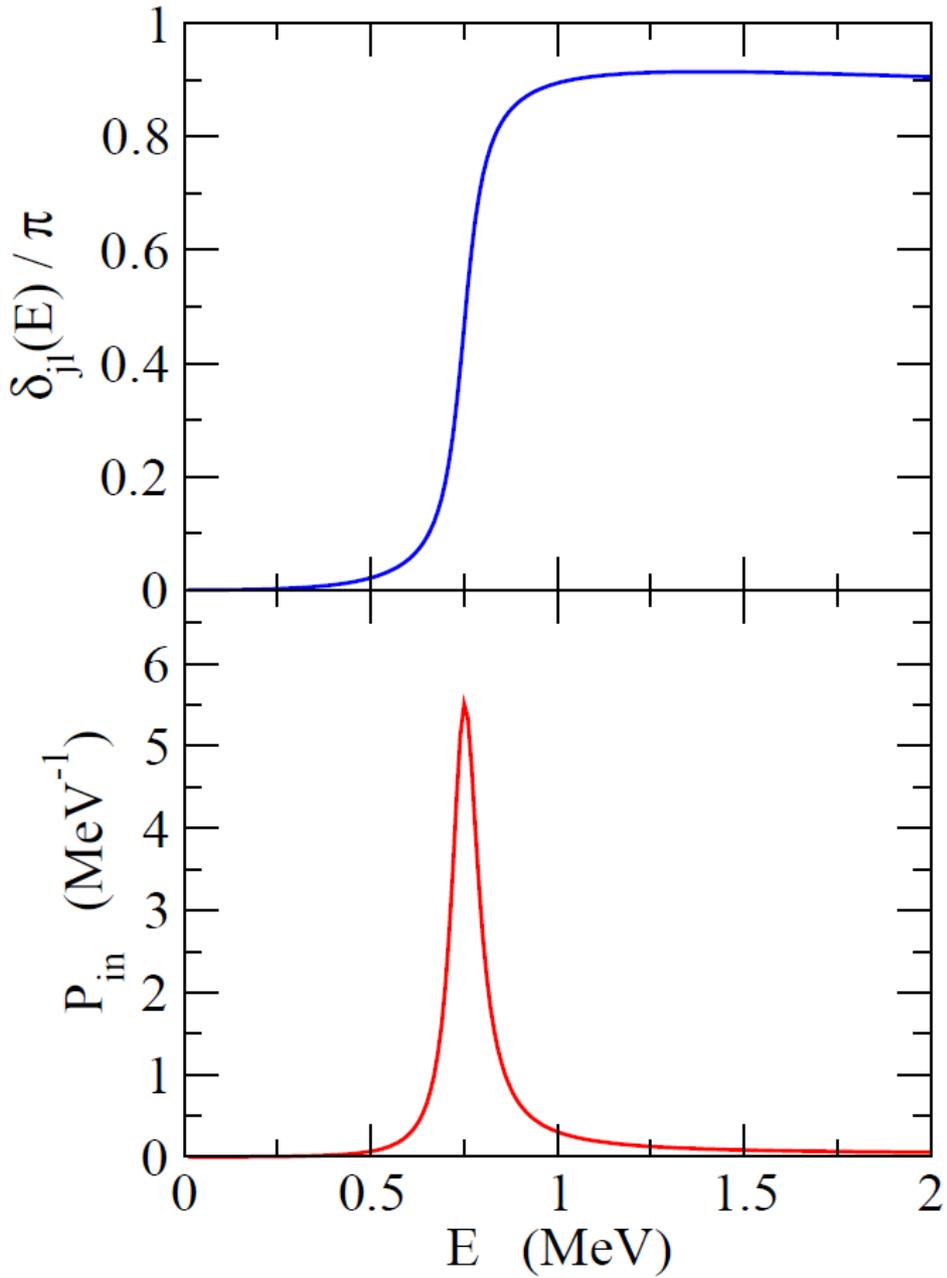
それでは波動関数は?



on-resonance:
波動関数は障壁の内側で
大きな振幅

障壁内部の存在確率

$$P_{in} \equiv \int_0^{r_b} r^2 dr |R_{jl}(r)|^2$$



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