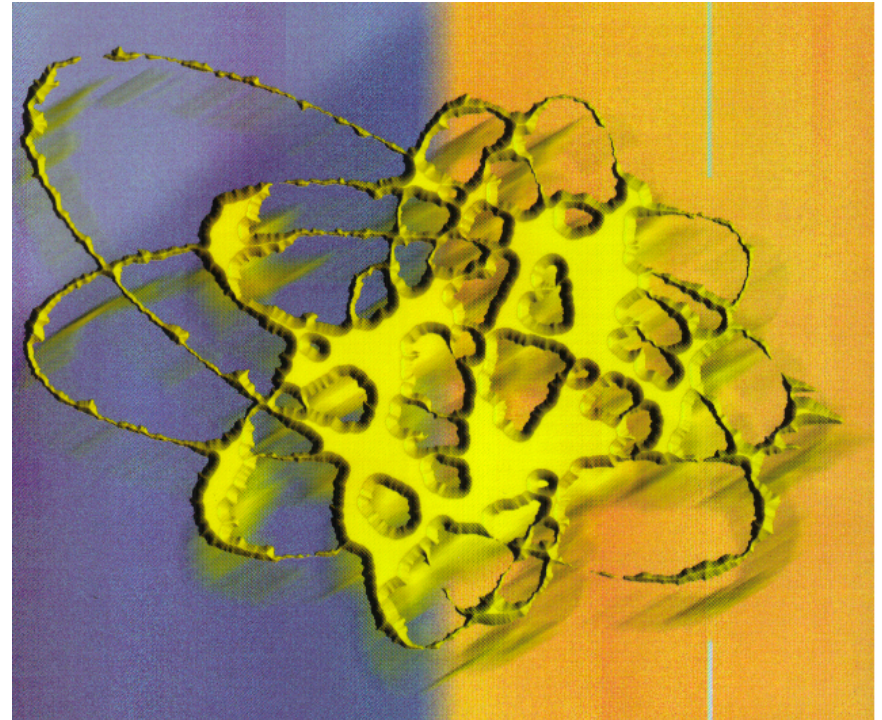


## 第1回講義へのQ & A

- Q ‘本当の’原子核はどう描けばよいのか
- Q 破られた対称性を回復することと集団モード発生の関係は？
- Q Intrinsic stateは実験で観測される状態の重ね合わせか？
- Q 一つの原子核の基底状態に対応するintrinsic stateは一つしかないのか？
- Q 平均場近似、Hartree-Fock, BCS等の理論の関係、役割、具体的な適用例
- Q 平均場近似が原子核で成り立つのは何故か？

いずれもこの講義の主旨に関わる本質をついた質問です。  
講義全体を通じて少しずつお答えしていきたいと思えます。

## 原子核に対する 一つの芸術的イメージ



Bohr-Mottelsonの教科書の表紙に描かれている絵

Aage Bohr and Ben R. Mottelson,  
Nuclear Structure, Vol. 1 and 2,  
World Scientific 1998版のカバー

# 「現代の核構造論」ミニマム

## Chapter 1 現代的な核構造論への招待

- 1a 間違いだらけの原子核像
- 1b 核構造論の歴史

## Chapter 2 平均場近似とは何か

- 2a 真空とその励起モード
- 2b 対称性の自発的破れとその回復

## Chapter 3 高速回転する原子核

- 3a 超低温核物理学  
高スピフロンティアー
- 3b 回転座標系での準粒子シェルモデル
- 3c 減衰する回転運動

## Chapter 4 超変形状態の発見

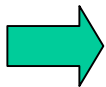
- 4a 変形シェル構造とは何か
- 4b 生成、構造、崩壊
- 4c Wobbling と Precession

## Chapter 5 大振幅集団運動論

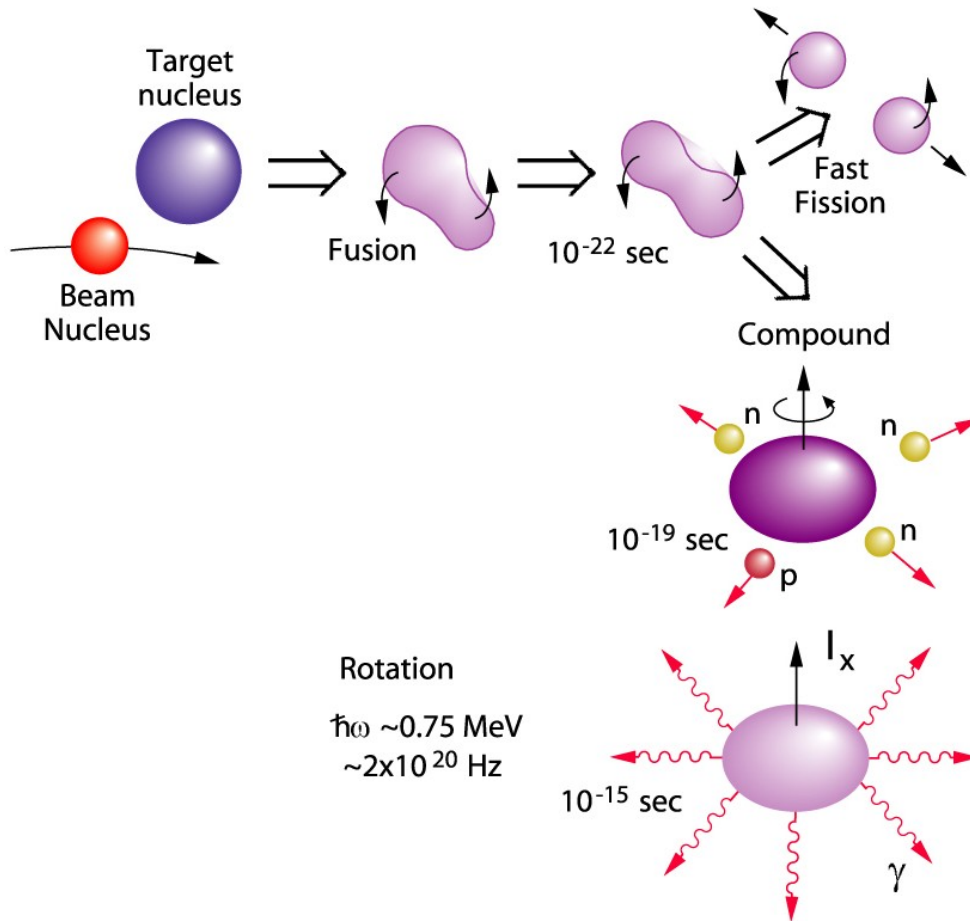
- 5a オブレート・プロレート変形共存現象
- 5b パリティ二重項とカイラル二重項

## Chapter 6 不安定核の集団励起モード

- 6a 新しい理論的課題
- 6b 期待される新しい集団現象



# 重イオン融合反応による生成



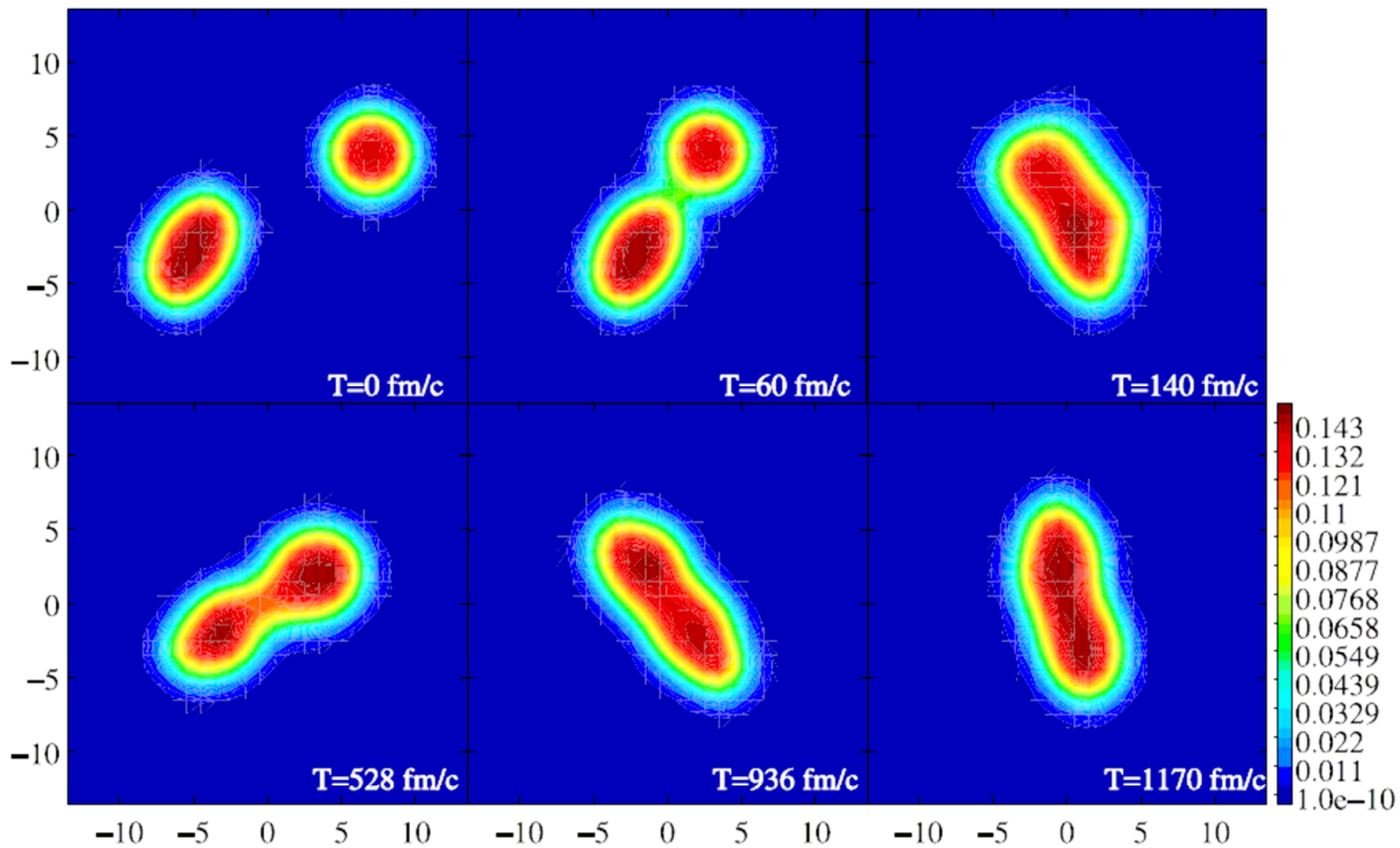
高温・高速回転



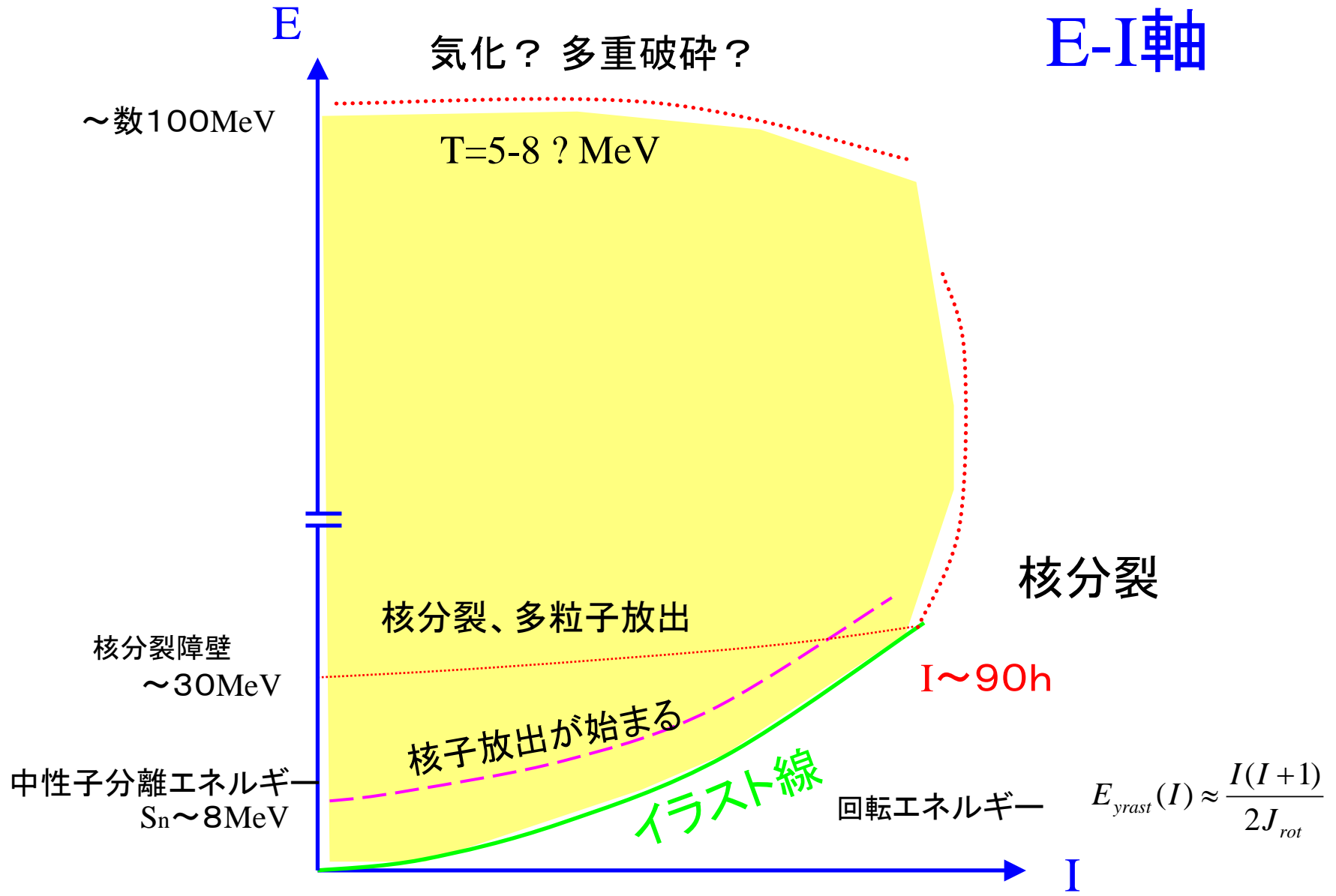
低温・高速回転



絶対零度・高速回転



# E-I軸



核化? 多重破碎?

~数100MeV

T=5-8? MeV

核分裂

核分裂、多粒子放出

核分裂障壁  
~30MeV

I ~ 90h

核子放出が始まる

イラスト線

中性子分離エネルギー  
Sn ~ 8MeV

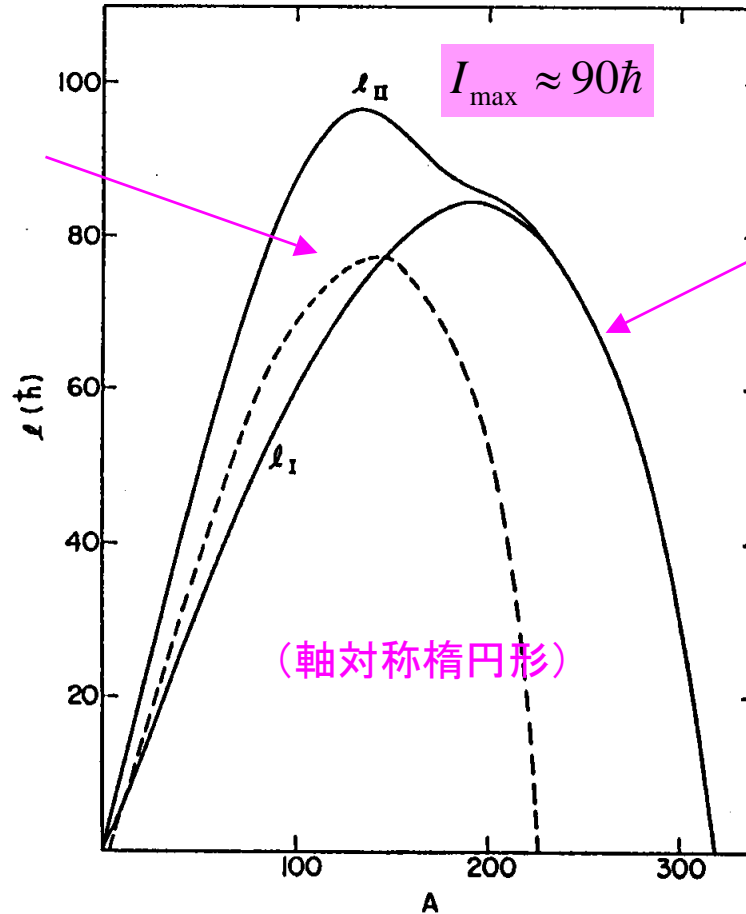
回転エネルギー  $E_{yrast}(I) \approx \frac{I(I+1)}{2J_{rot}}$

# 最大角運動量

Cohen, Prasil, Swiatecki Ann.Phys.82(1974)557

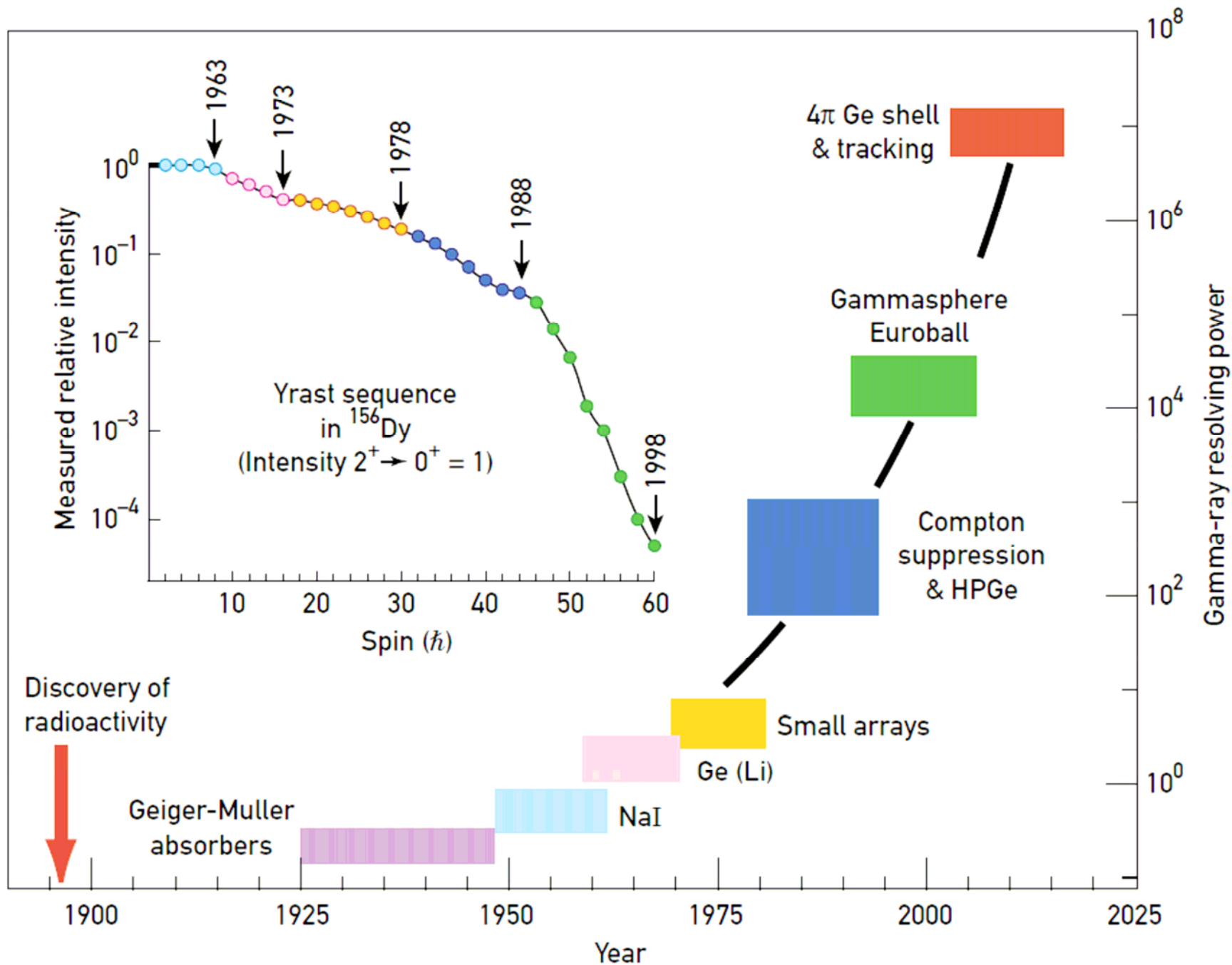
ヤコビ不安定性  
(3軸非対称)

最大角運動量



クーロン力と  
遠心力

質量数



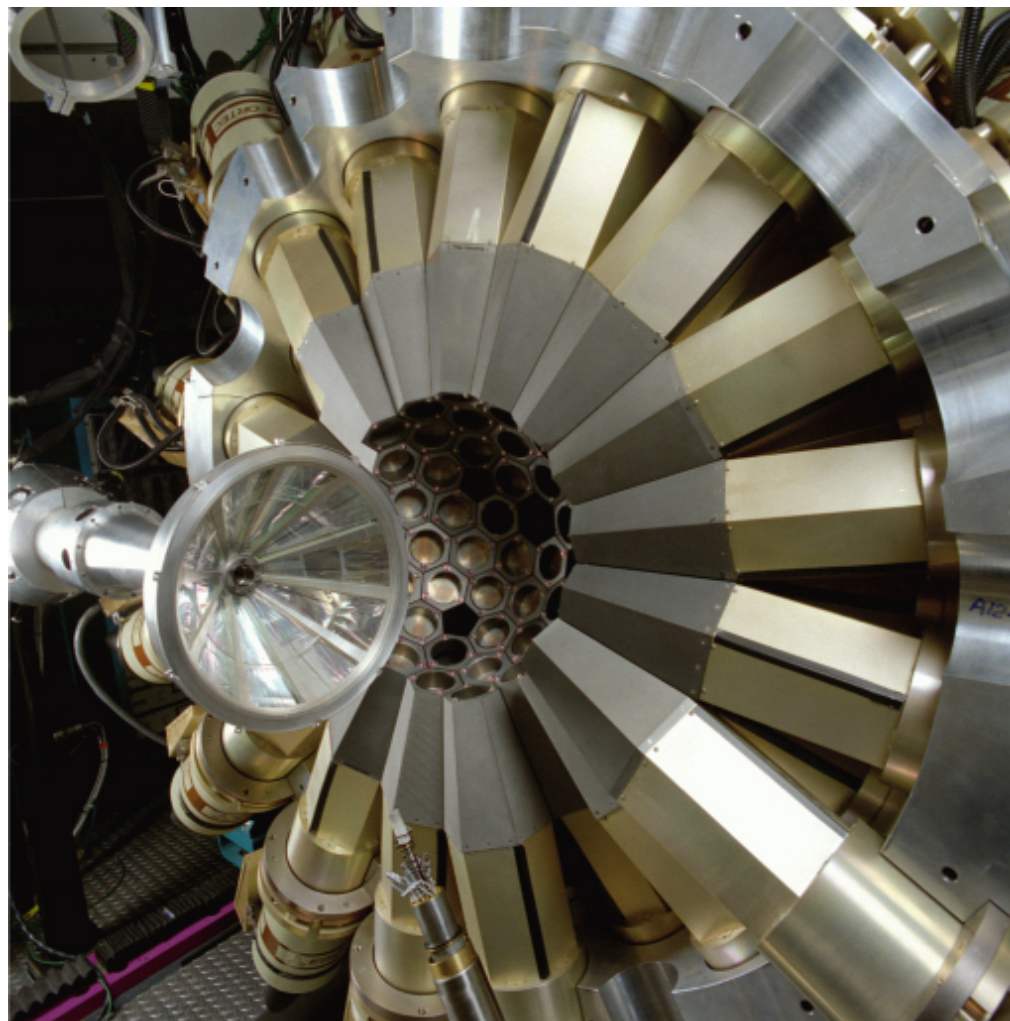
# 大規模ガンマ線検出器

数10個～数100個  
のガンマ線検出器

- 高効率
- 多重計測

Gammasphere

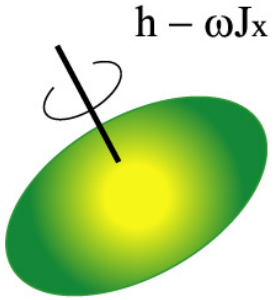
EuroBall



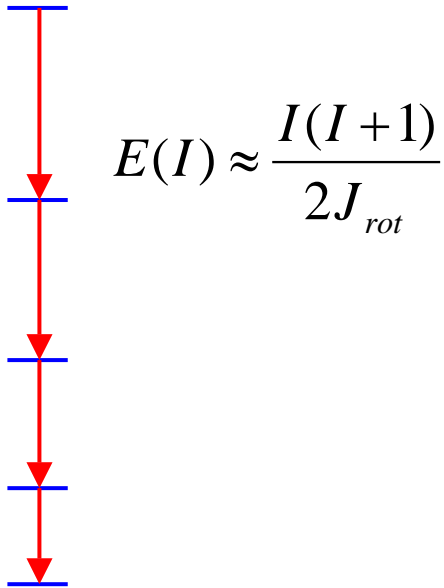
<http://www-gam.lbl.gov>



# 変形核の回転バンドスペクトル

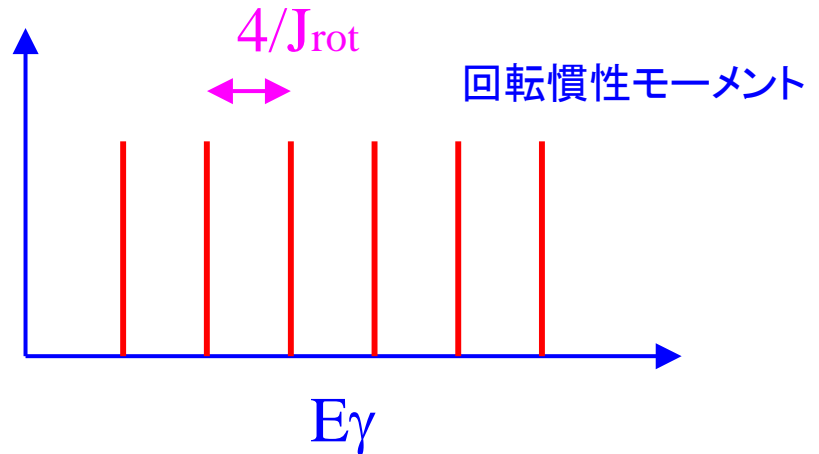


回転バンド



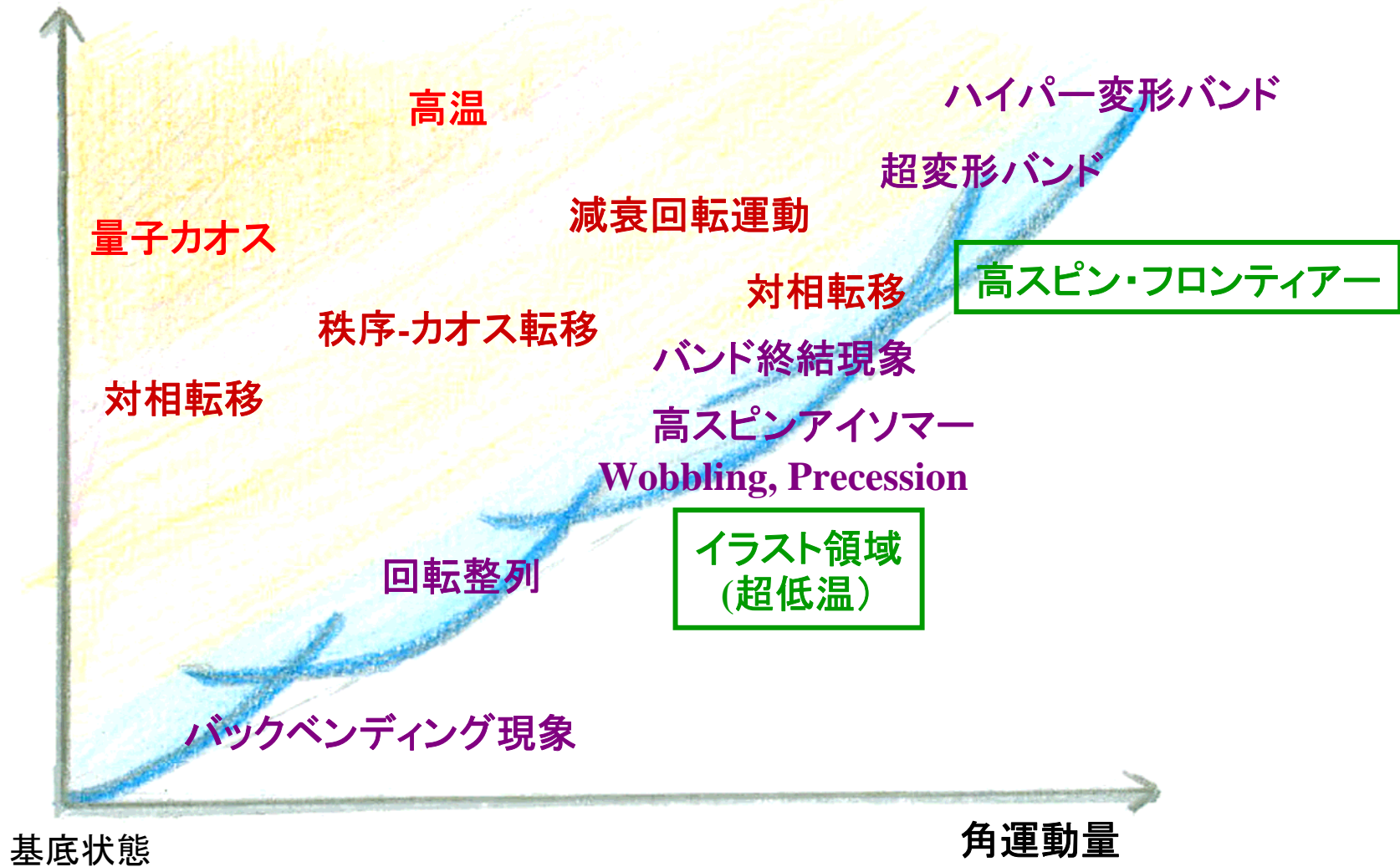
ガンマ線スペクトル

$$E_\gamma = E(I) - E(I-2) \approx \frac{2I}{J_{rot}}$$



# 核構造における秩序とカオス

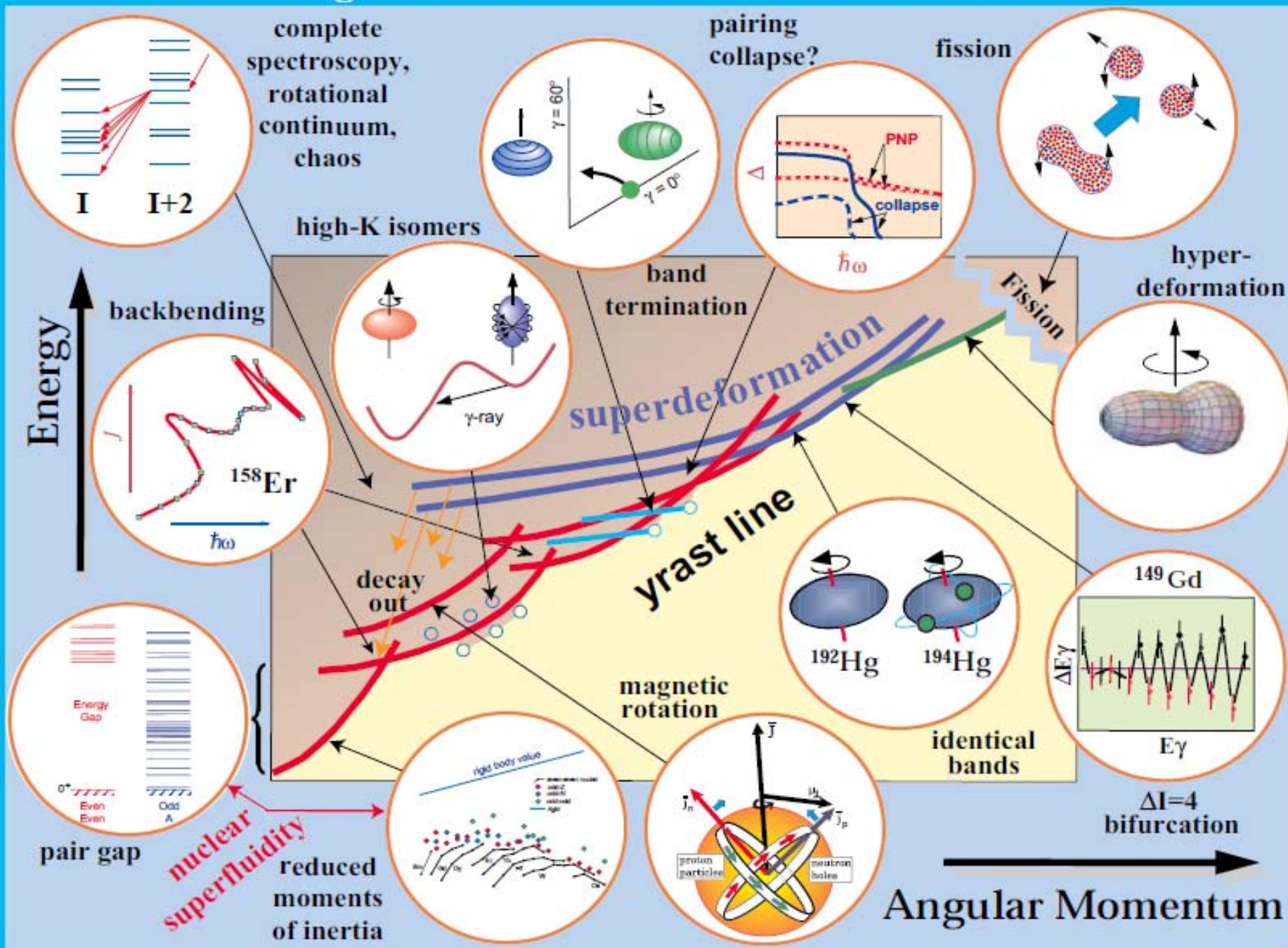
励起エネルギー



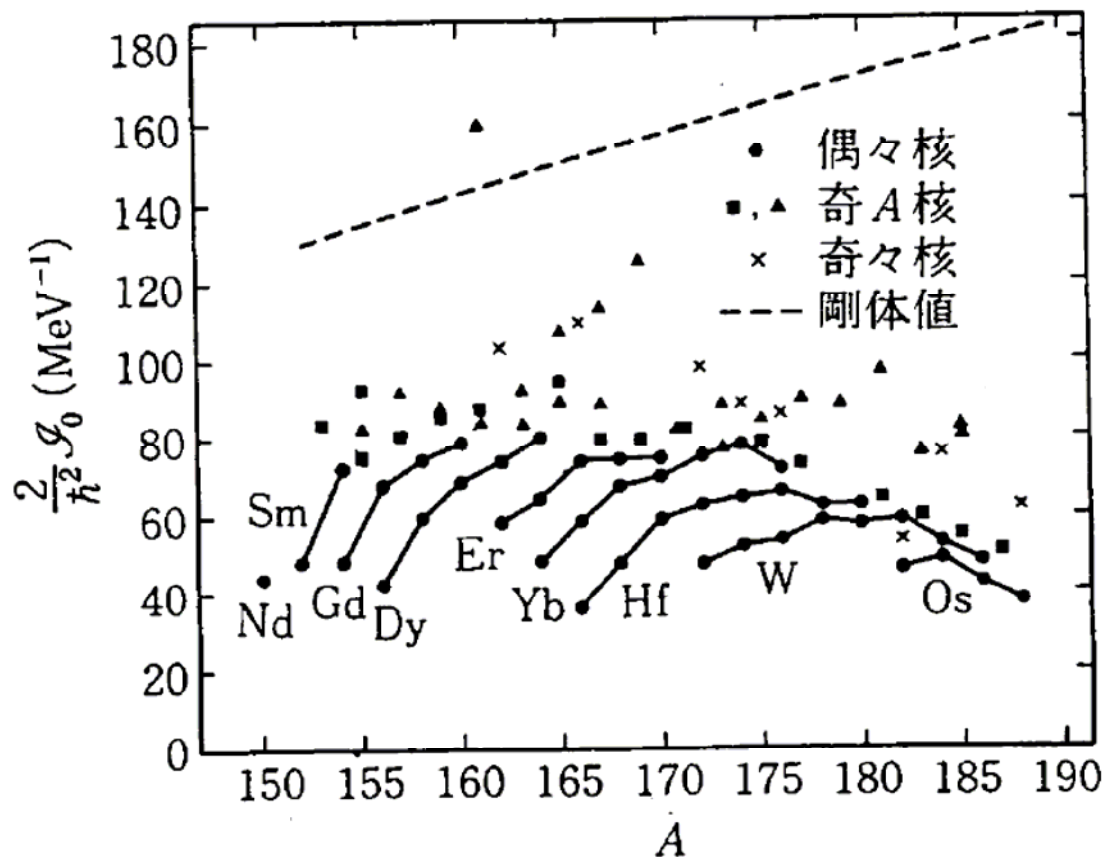
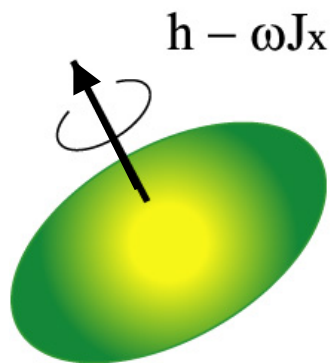
基底状態

角運動量

# The Angular Momentum World of the Nucleus



# 回転運動の慣性モーメント

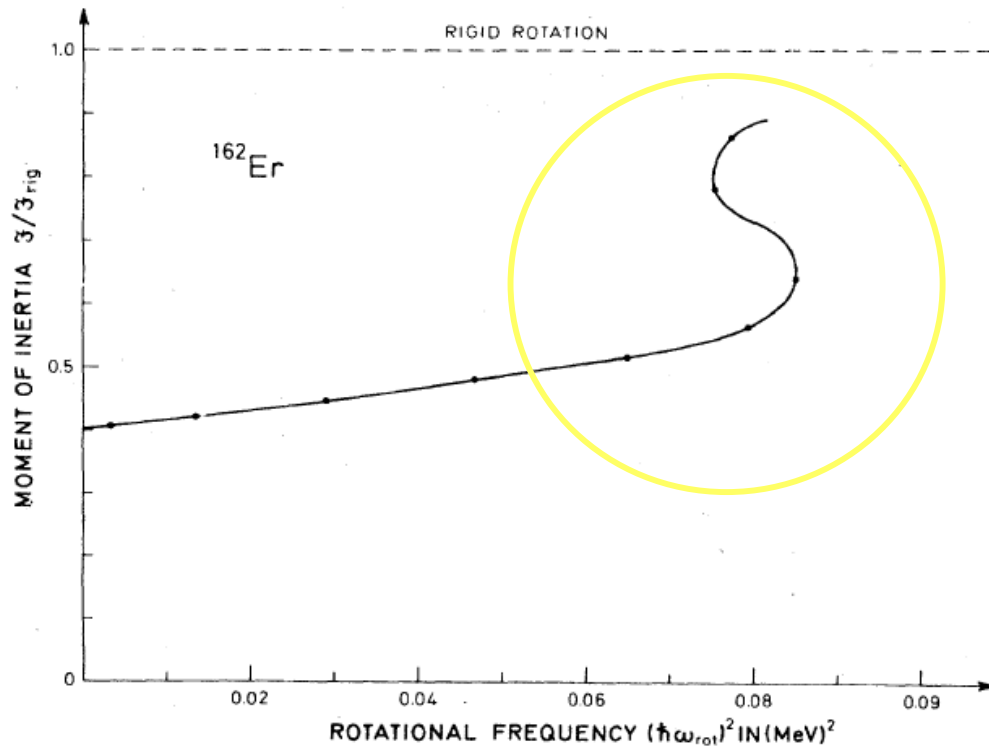


問4 基底状態回転バンドの慣性モーメントは剛体値の  $1/2 \sim 1/3$  ですがその主な理由は何ですか。

# 高速回転にともなう慣性モーメントの異常

(バックベンディング現象の発見)

慣性モーメント

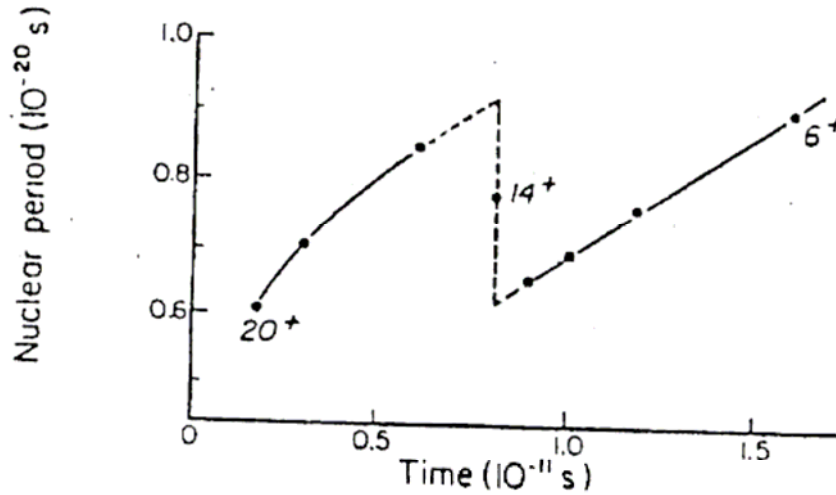


回転運動の角速度

# 高速回転による内部構造の変化

## バックベンディング現象とパルサーグリッチとのアナロジー

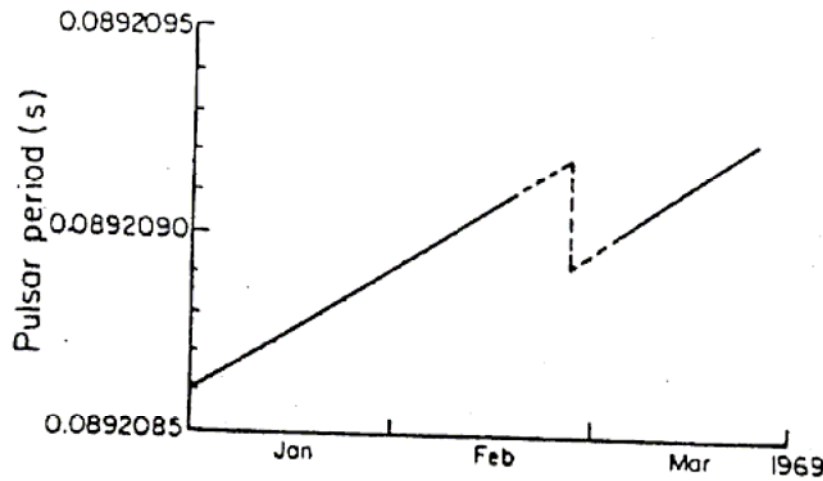
回転周期



原子核

時間

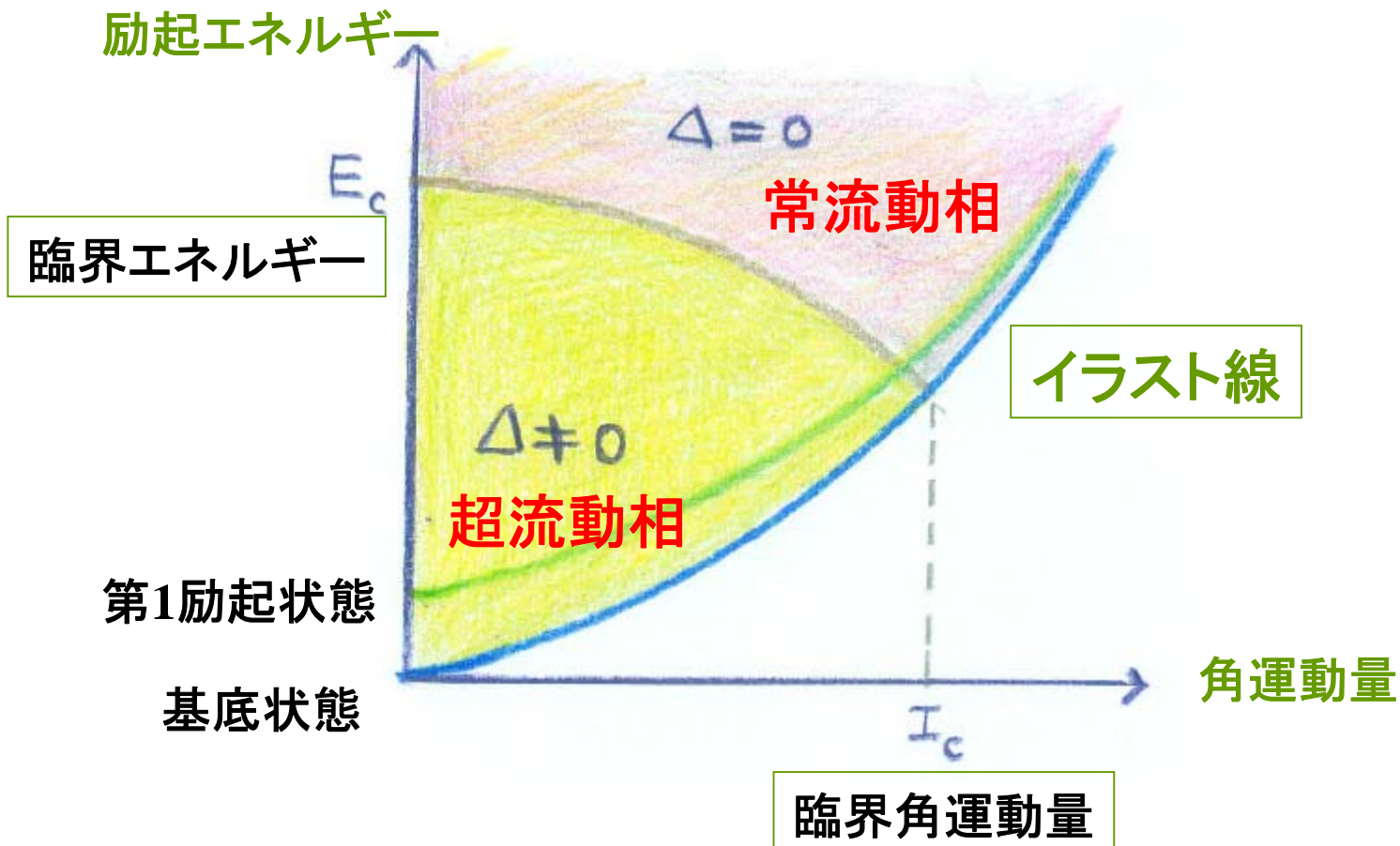
回転周期



中性子星

時間

# ペアリングに関する相図

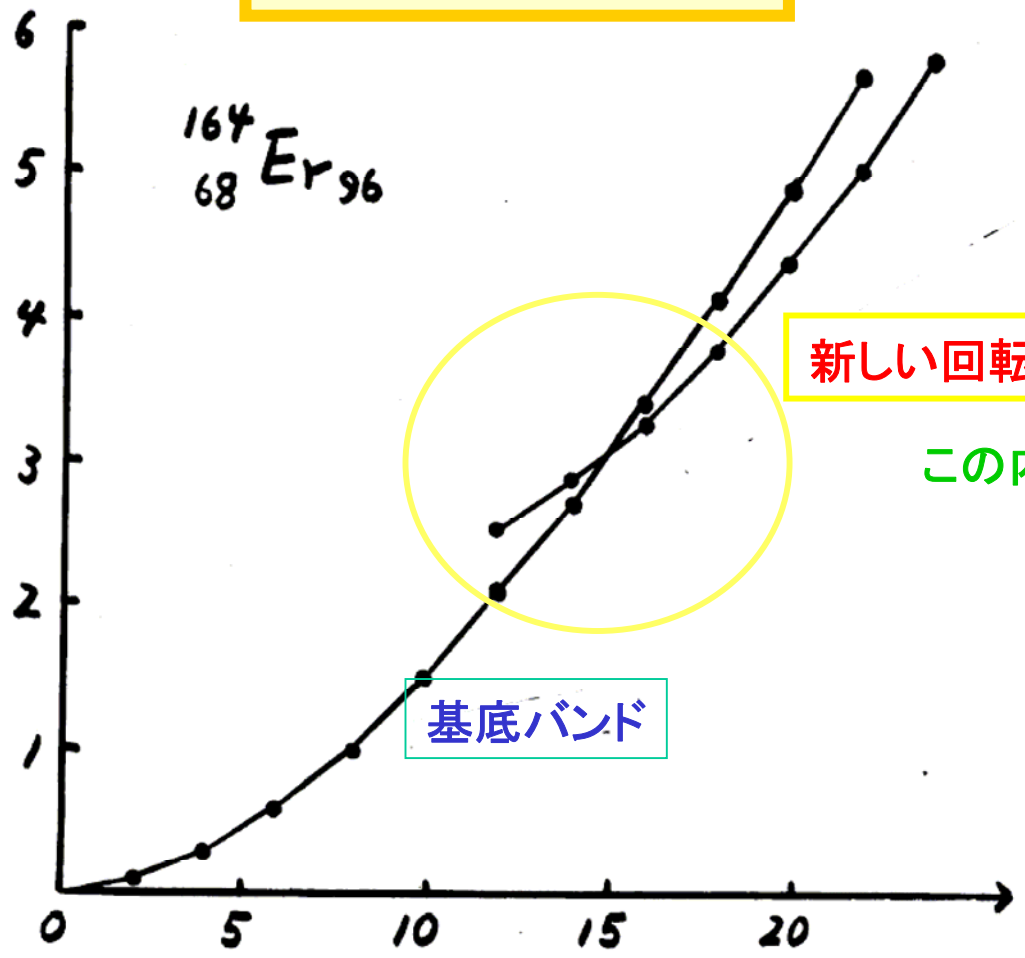


70年代以降の研究によって、イラスト線近傍もペアリング相転移領域も、この予想よりはるかに豊富な構造をもっていることが明らかになった

# バンド交差現象

励起エネルギー

${}^{164}_{68}\text{Er}_{96}$



新しい回転バンド

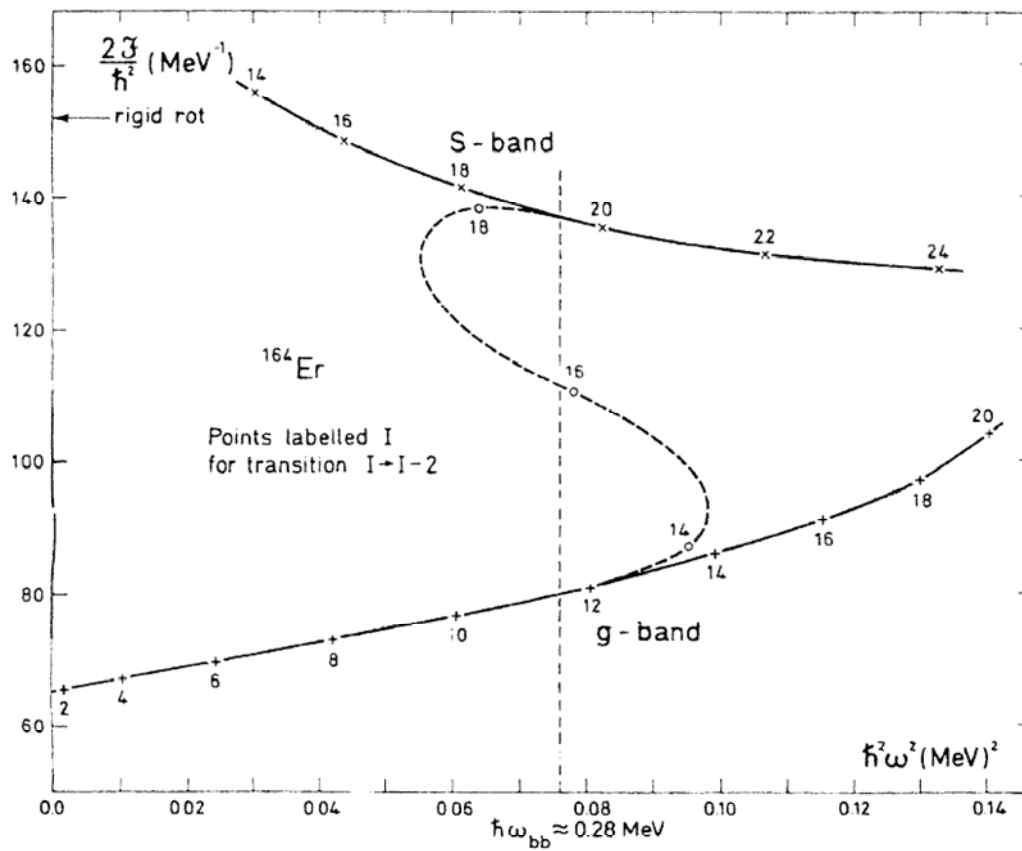
この内部構造は?

基底バンド

角運動量

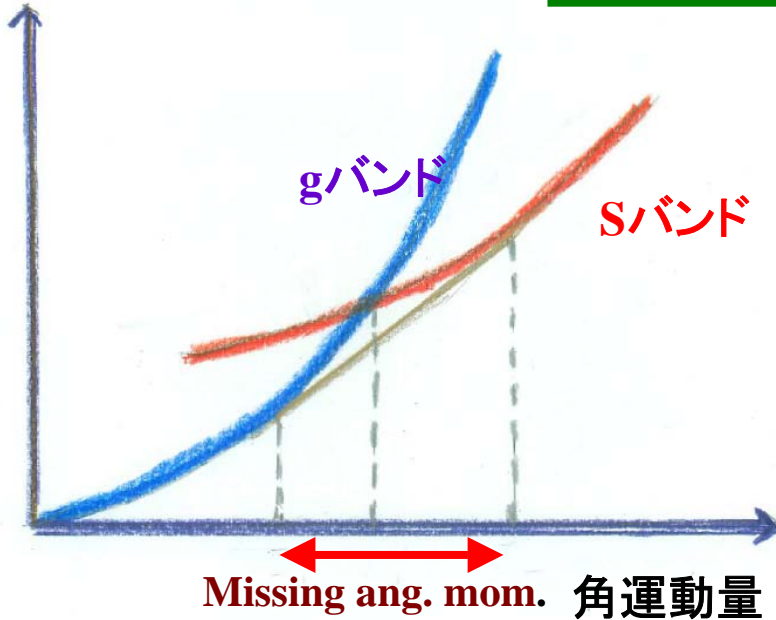


# gバンドとsバンドの慣性モーメント

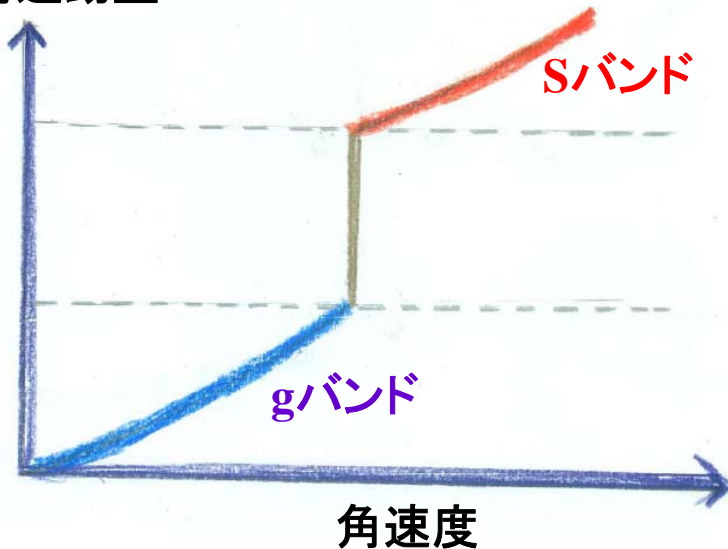


# バンド交差現象

励起エネルギー



角運動量



## 角速度

$$\begin{aligned} \hbar\omega_{\text{rot}}(I) &\simeq \frac{\partial E_{\text{rot}}}{\partial I} \\ &= \frac{1}{2}\{E_{\text{rot}}(I+1) - E_{\text{rot}}(I-1)\} \\ &= \frac{1}{2}E_{\gamma} \end{aligned}$$

## 運動学のおよび動力学の慣性モーメント

$$\begin{aligned} \mathcal{J}^{(1)} &= \frac{I}{\omega_{\text{rot}}} = \left(\frac{1}{I} \frac{dE}{dI}\right)^{-1} = -\frac{1}{\omega} \frac{dE'}{d\omega} \simeq \frac{2I}{E_{\gamma}} \\ \mathcal{J}^{(2)} &= \frac{dI}{d\omega_{\text{rot}}} = \left(\frac{d^2E}{dI^2}\right)^{-1} = -\frac{d^2E'}{d\omega^2} \simeq \frac{4}{\Delta E_{\gamma}} \end{aligned}$$

## 整列角運動量

$$i(\omega) = I(\omega) - I_g(\omega)$$

# 一様に回転する座標系への変換

$$|\phi(\theta, I)\rangle = e^{-i\theta J_x} |\phi_{\text{intr}}(I)\rangle$$

時間に依存する変分原理

$$\delta \langle \phi(\theta, I) | i \frac{\partial}{\partial t} - H | \phi(\theta, I) \rangle = 0$$

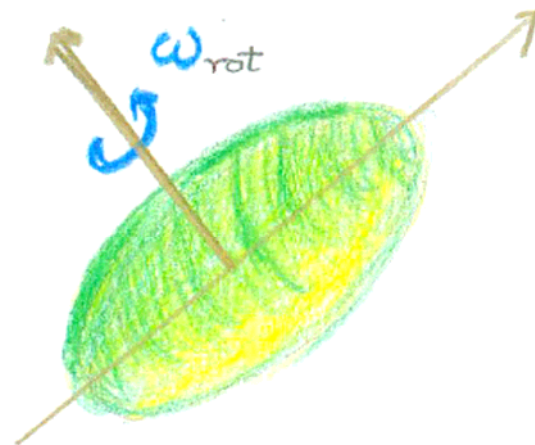


$$\delta \langle \phi_{\text{intr}}(I) | H - \omega_{\text{rot}} J_x | \phi_{\text{intr}}(I) \rangle = 0$$

回転座標系ハミルトニアン

$$H' = H - \omega_{\text{rot}} J_x$$

$$|\phi_{\text{intr}}(I)\rangle = e^{iG(I)} |\phi_0\rangle$$



正準運動方程式

$$\dot{\theta} = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial I} = \omega_{\text{rot}}$$

$$\dot{I} = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \theta} = 0$$

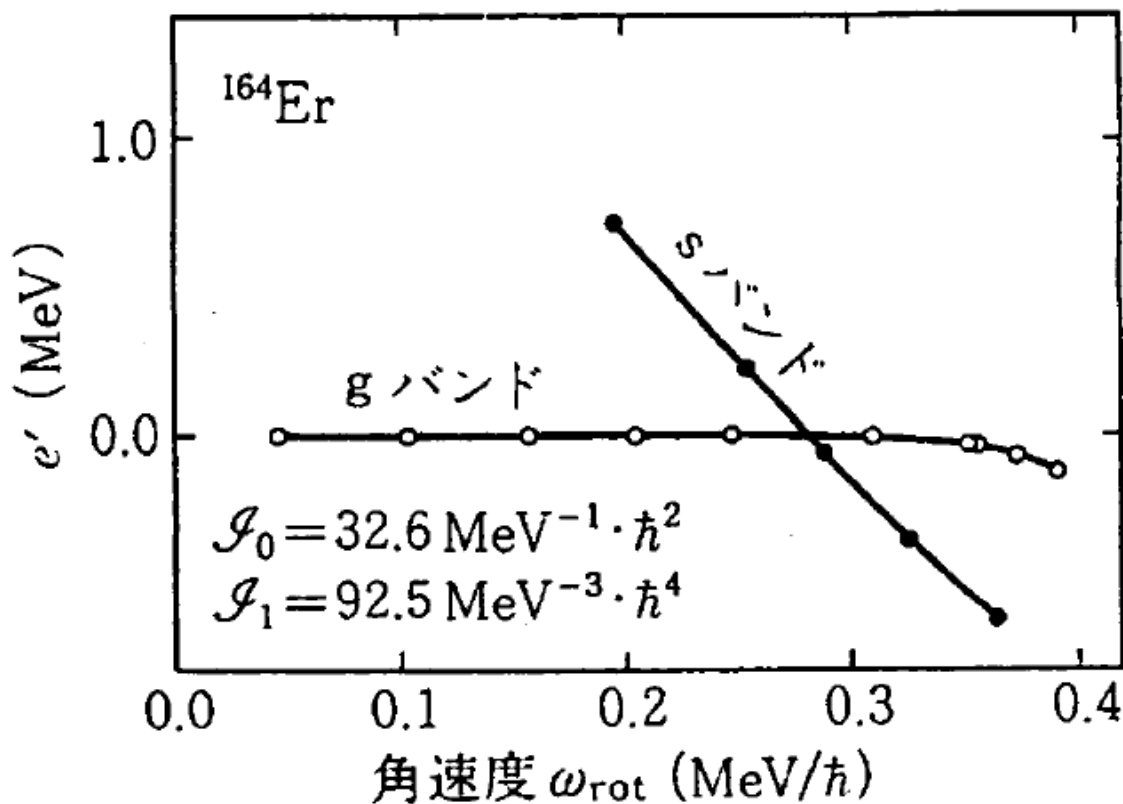
$$\mathcal{H}(I) \equiv \langle \phi(\theta, I) | H | \phi(\theta, I) \rangle = \langle \phi_{\text{intr}}(I) | H | \phi_{\text{intr}}(I) \rangle$$

回転座標系でのエネルギー

$$E' = E - \omega_{\text{rot}} I$$

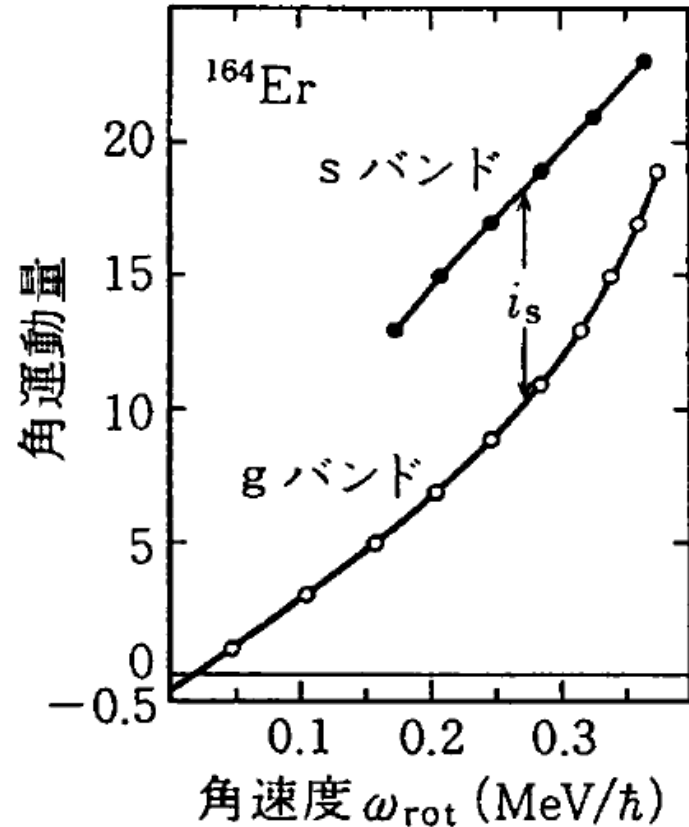
回転座標系での励起エネルギー

$$e'(\omega) = E'(\omega) - E_g(\omega)$$

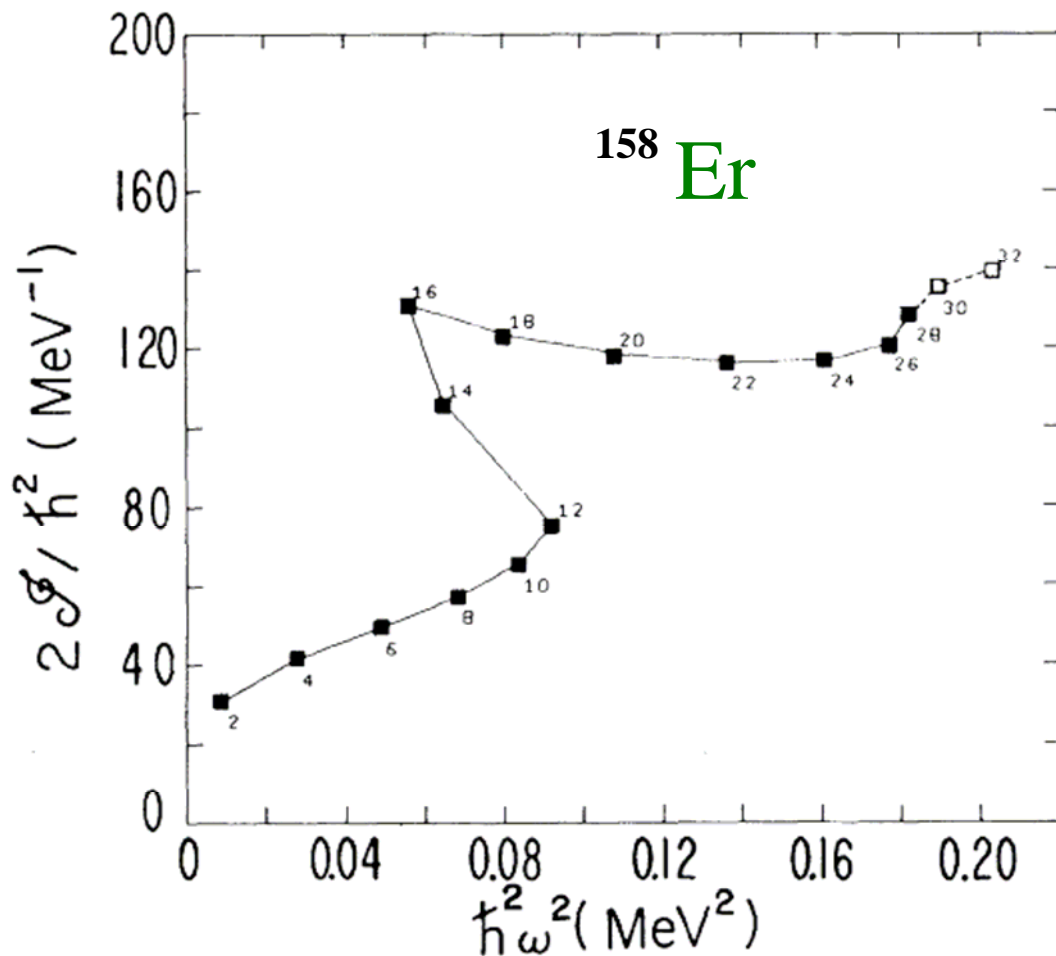


**整列角運動量**  
(aligned angular momentum)

$$i(\omega) = I(\omega) - I_g(\omega)$$



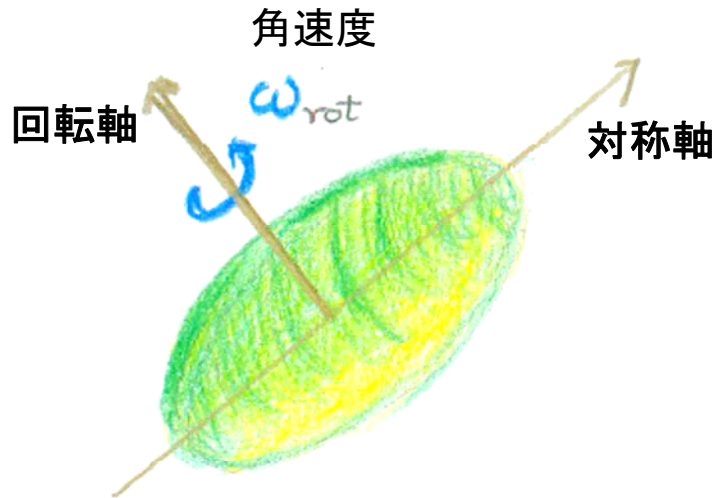
# 高スピンの慣性モーメントの異常



角速度

# 高スピン状態の作り方

## 1. 集団的回転運動



角運動量(スピン)の向きは  
平均場の**対称軸と垂直方向**

## 2. 個別核子のスピン整列

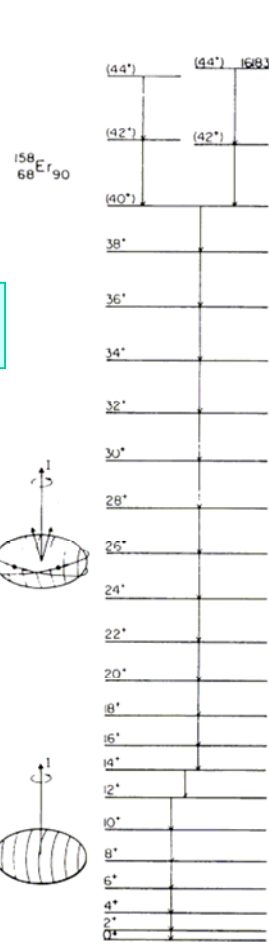


角運動量(スピン)の向きは  
平均場の**対称軸方向**

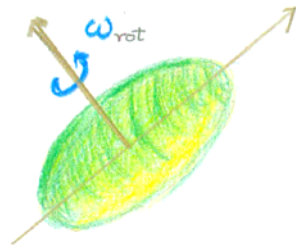
これらの組み合わせで極めて豊富な構造が作られる

# 対照的な高スピン・スペクトル

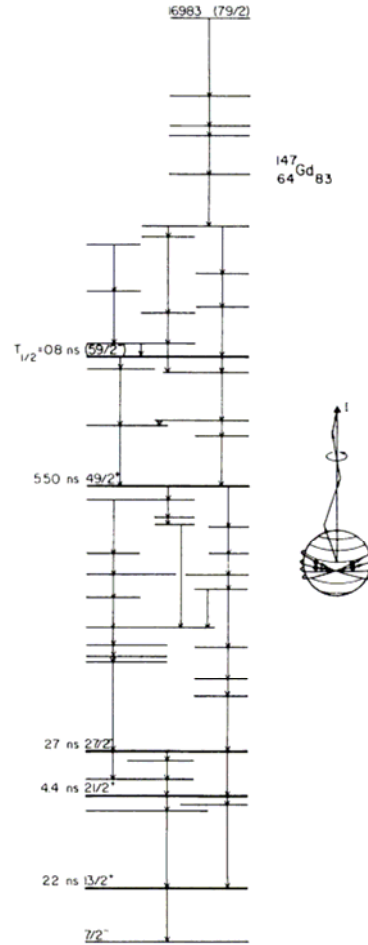
集団回転スペクトル



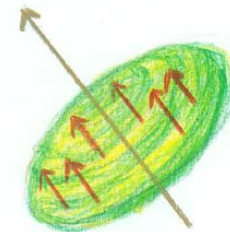
プロレート変形



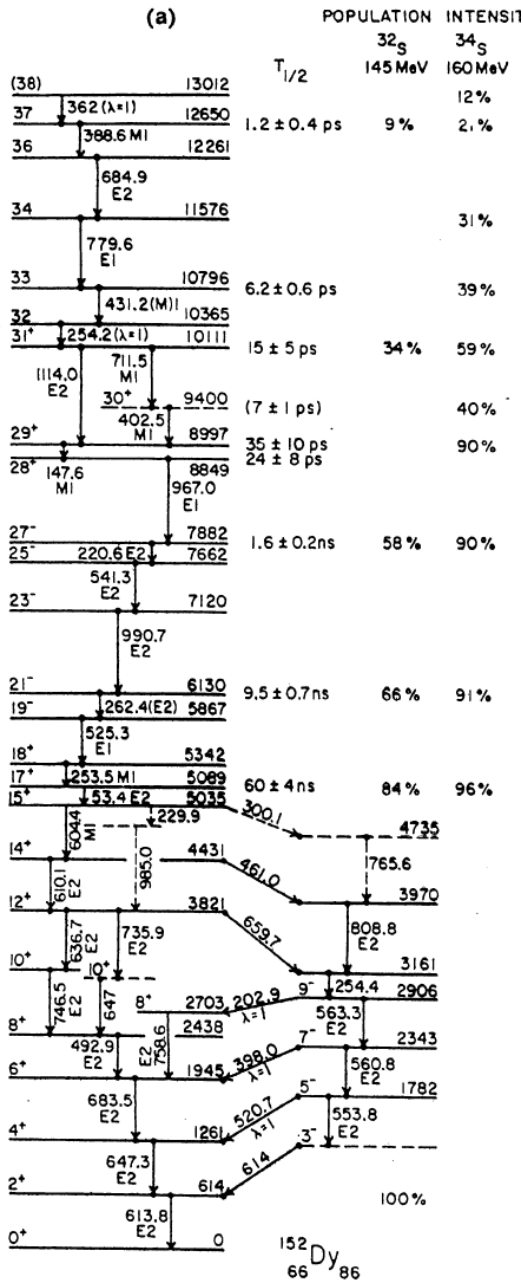
高スピン・アイソマー



オブレート変形

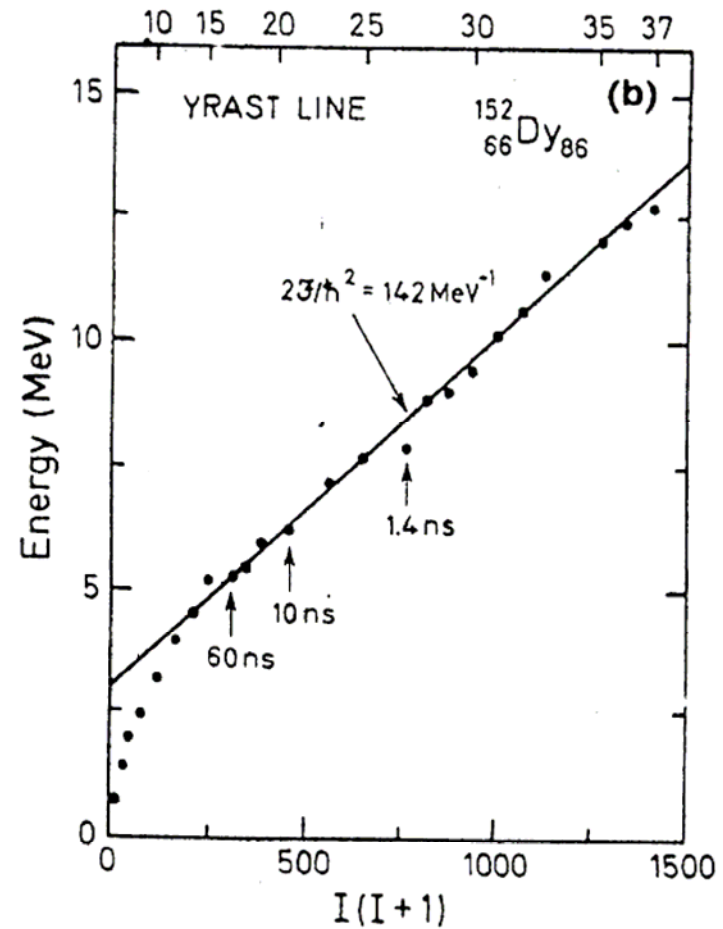




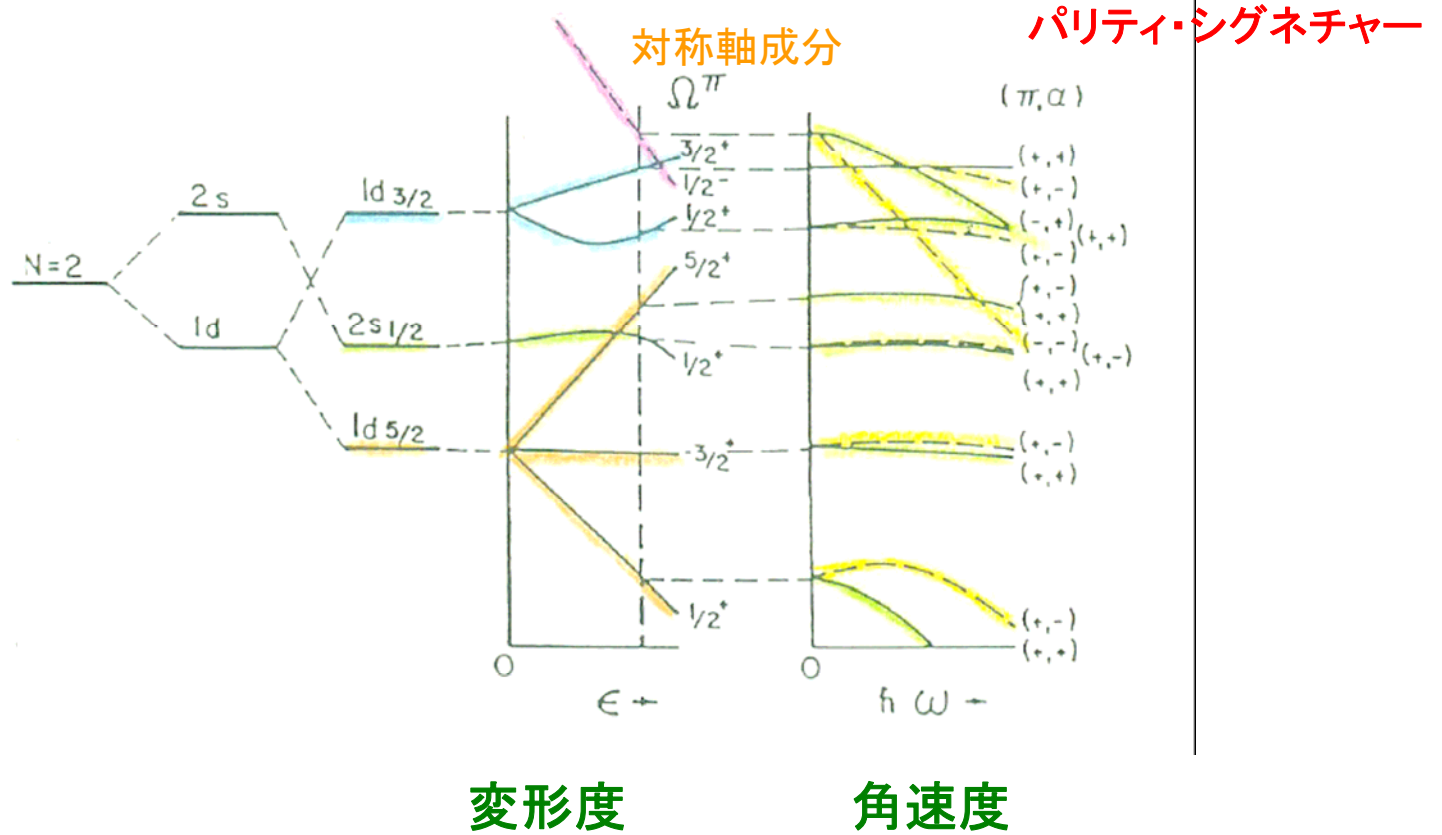


# 高スピンアイソマー

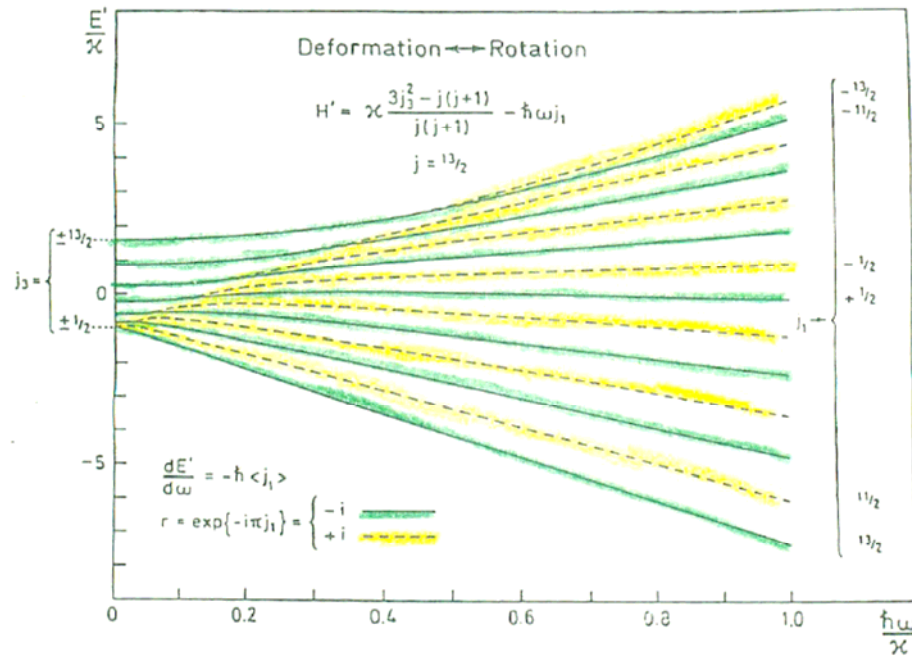
## オブレート結合様式



# 一粒子準位に対する変形と回転の効果



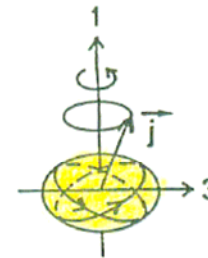
# i13/2準位エネルギーに対する変形と回転の効果



角速度

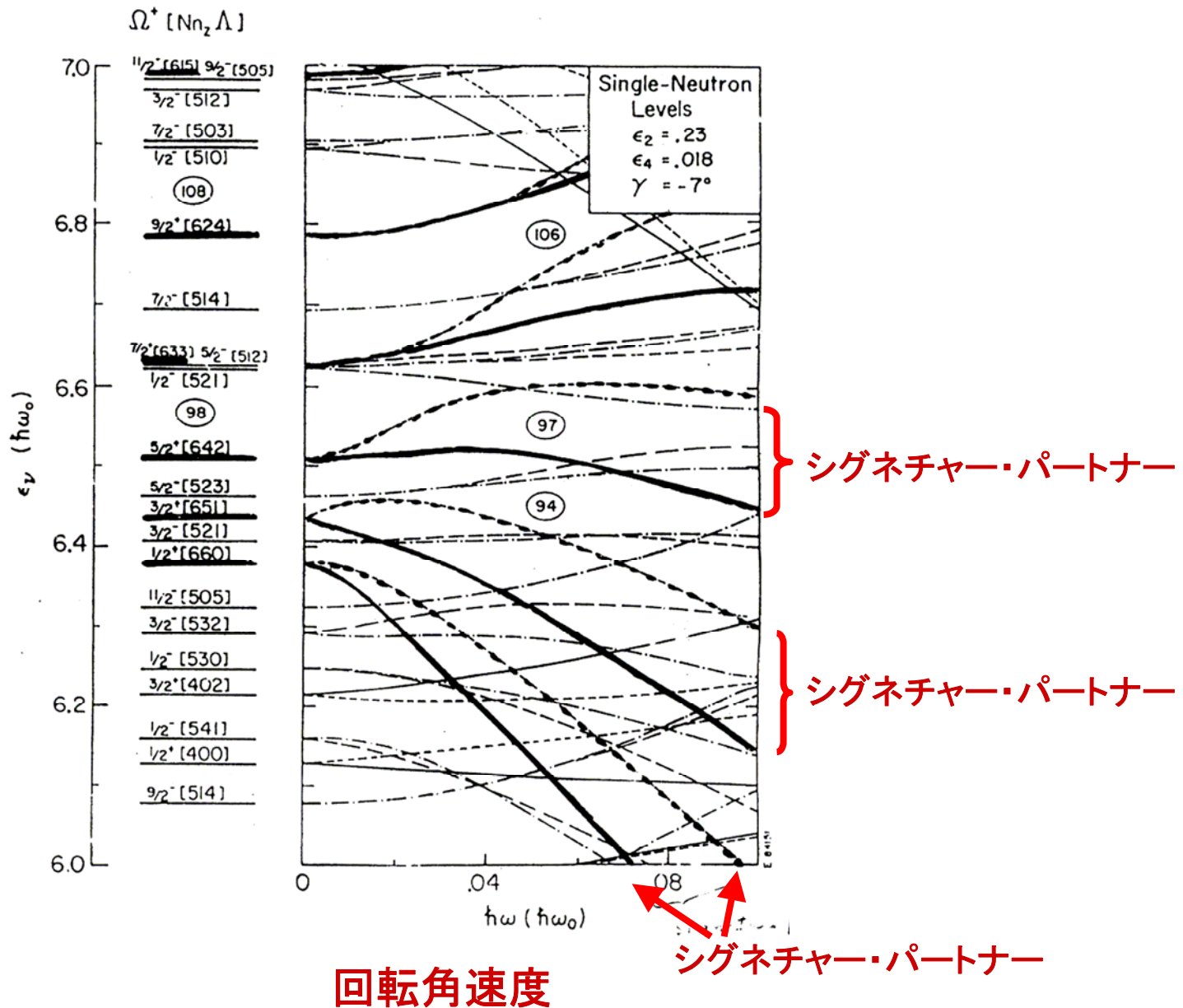


平均場への強結合



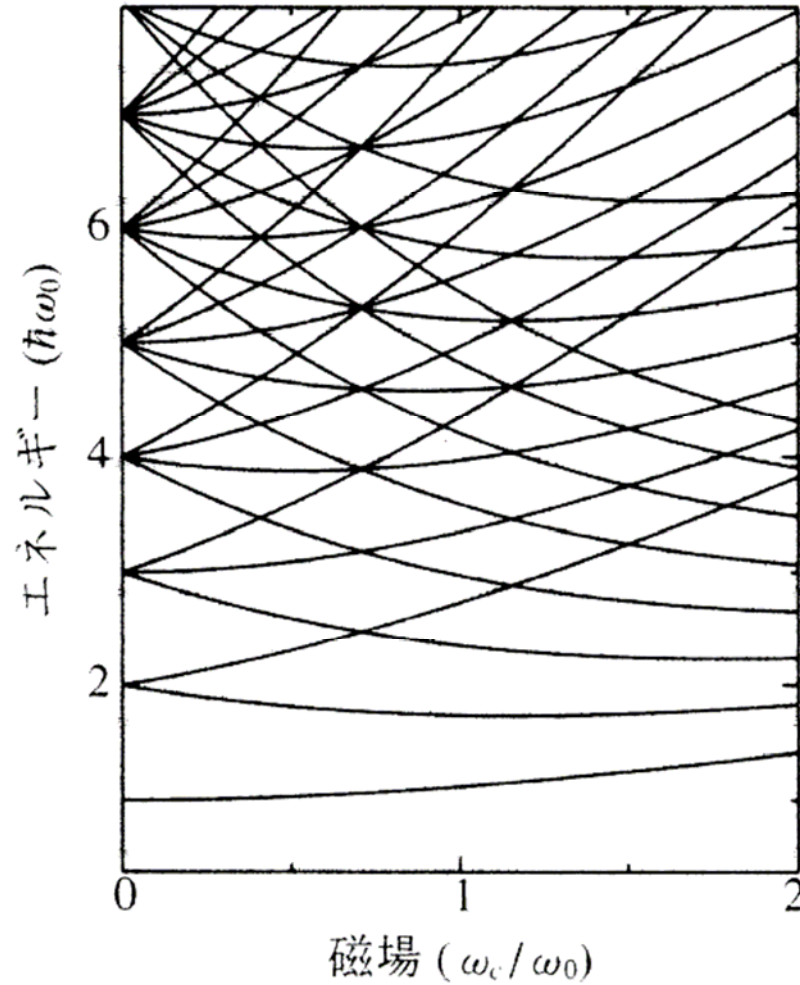
コリオリ力による回転整列

# 角速度の増大にともなう、一粒子エネルギーの変化

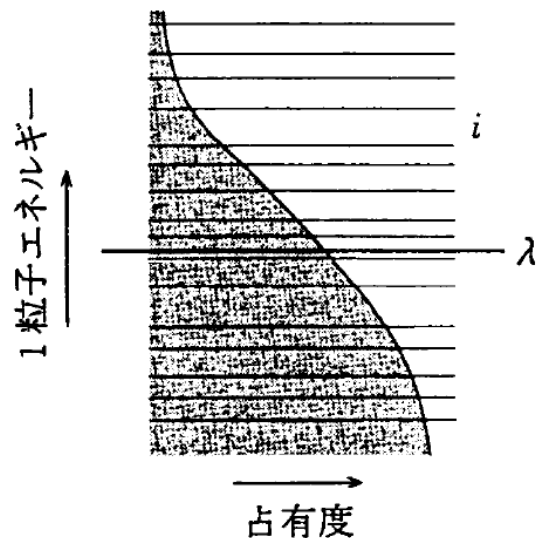
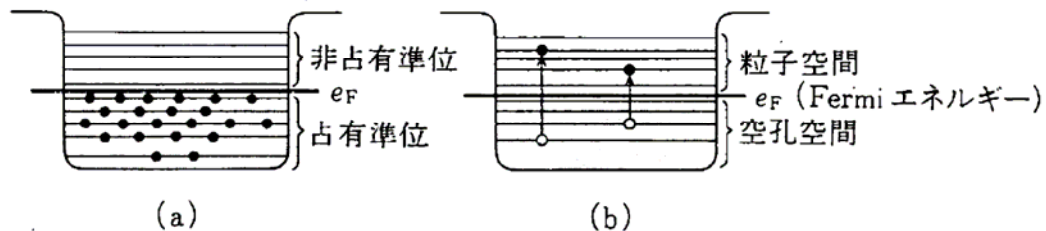


# 磁場中の量子ドット

電子のエネルギー準位スペクトル



# 真空とその励起(1粒子モード)



## 粒子と空孔

## Bogoliubov準粒子

$$|\phi_{\text{HF}}\rangle = \prod_i n_i (c_i^\dagger c_i^\dagger) |0\rangle$$

$$|\phi_{\text{BCS}}\rangle = \prod_i (u_i + v_i c_i^\dagger c_i^\dagger) |0\rangle$$

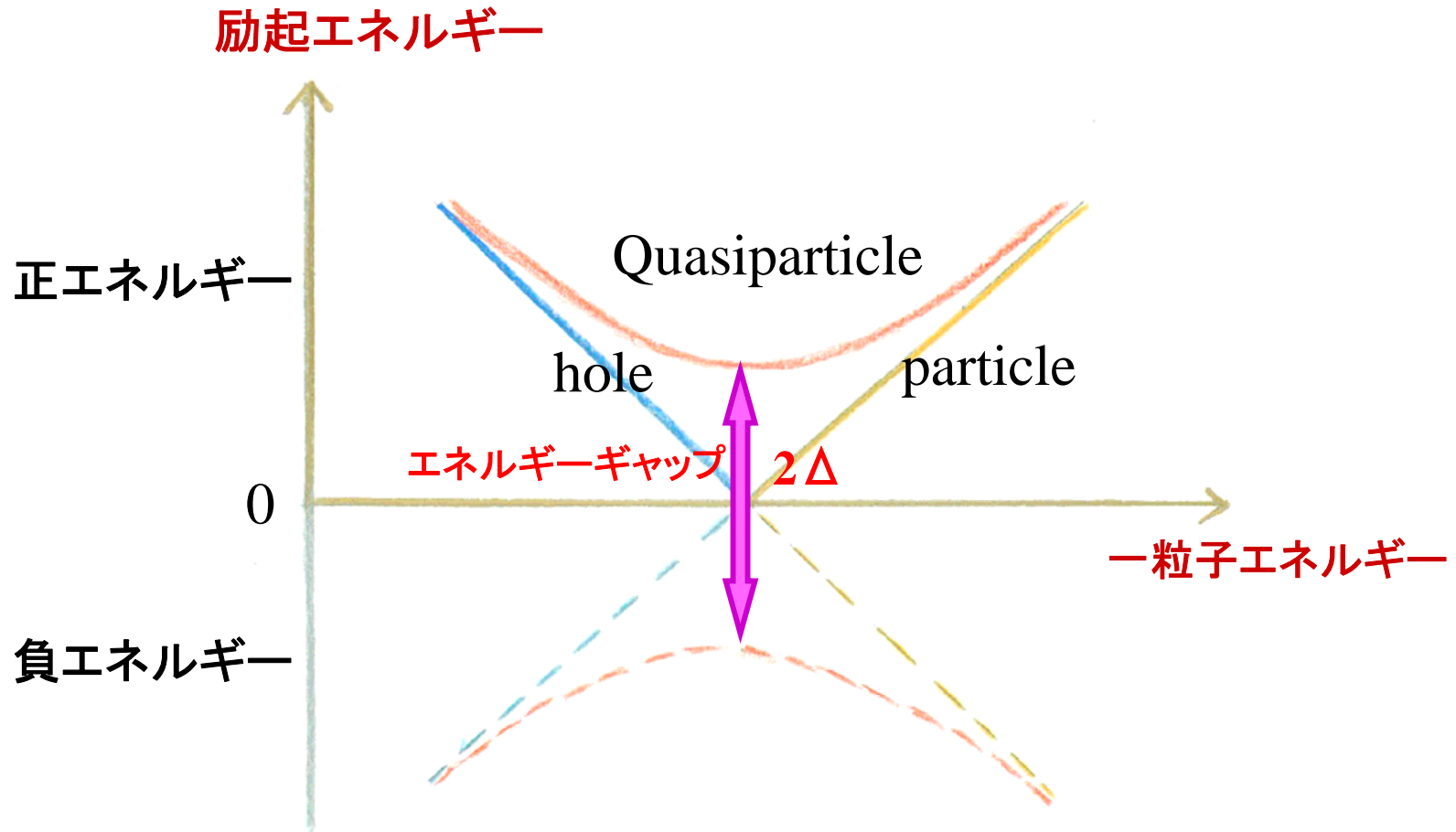
$$a_i |\phi_{\text{HF}}\rangle = b_{\bar{i}} |\phi_{\text{HF}}\rangle = 0$$

$$a_i |\phi_{\text{BCS}}\rangle = a_{\bar{i}} |\phi_{\text{BCS}}\rangle = 0$$

$$\begin{cases} c_i^\dagger = (1 - n_i) a_i^\dagger + n_i b_{\bar{i}} \\ c_{\bar{i}} = (1 - n_i) a_{\bar{i}} - n_i b_i^\dagger \end{cases}$$

$$\begin{cases} c_i^\dagger = u_i a_i^\dagger + v_i a_{\bar{i}} \\ c_{\bar{i}} = u_i a_{\bar{i}} - v_i a_i^\dagger \end{cases}$$

# 準粒子エネルギー



# 回転する平均場での準粒子モード

$$a_\mu |\phi_{\text{intr}}(I)\rangle = a_{\bar{\mu}} |\phi_{\text{intr}}(I)\rangle = 0$$

一般化されたBogoliubov変換

$$\begin{aligned} a_\mu^\dagger &= \sum_{i>0} (U_{i\mu} d_i^\dagger + V_{i\mu} d_{\bar{i}}), \\ a_{\bar{\mu}}^\dagger &= \sum_{i>0} (\bar{U}_{i\mu} d_{\bar{i}}^\dagger + \bar{V}_{i\mu} d_i) \end{aligned}$$

シグネチャー基底

$$\begin{aligned} d_i^\dagger &= (c_i^\dagger + c_i)/\sqrt{2} \\ d_{\bar{i}}^\dagger &= (c_i^\dagger - c_i)/\sqrt{2} \\ e^{-i\pi J_x} \begin{pmatrix} d_i^\dagger \\ d_{\bar{i}}^\dagger \end{pmatrix} e^{i\pi J_x} &= \mp i \begin{pmatrix} d_i^\dagger \\ d_{\bar{i}}^\dagger \end{pmatrix} \end{aligned}$$

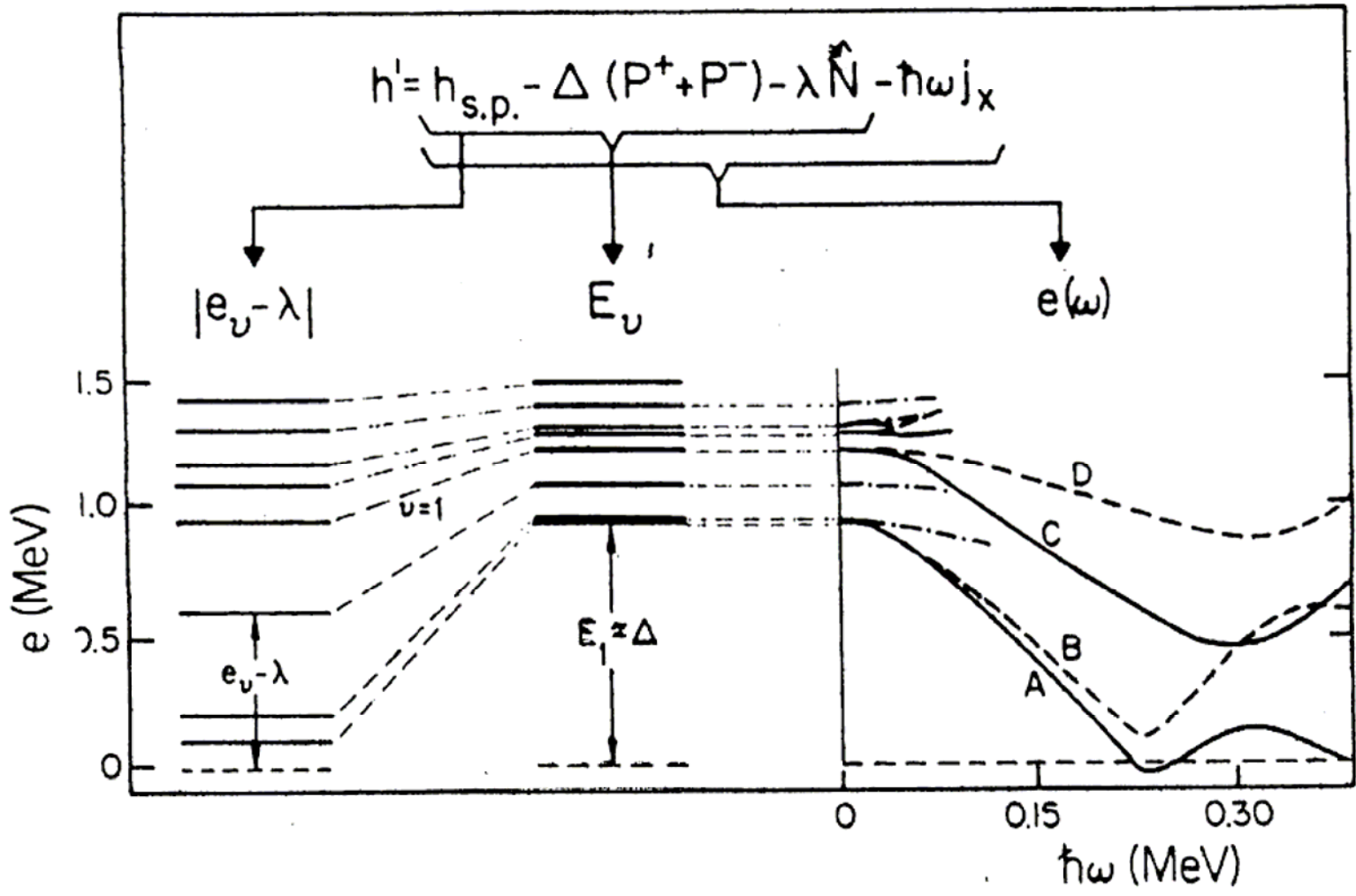
$$\begin{pmatrix} h - \omega_{\text{rot}} j_x & -\Delta \\ -\Delta & -(h - \omega_{\text{rot}} j_x) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix}$$

回転座標系での準粒子ハミルトニアン

$$\begin{aligned} H' &= \sum_i (e_i - \lambda) c_i^\dagger c_i - \Delta \sum_i (c_i^\dagger c_{\bar{i}}^\dagger + c_{\bar{i}} c_i) - \omega_{\text{rot}} \sum_{i,j} \langle i | J_x | j \rangle c_i^\dagger c_j \\ &= \sum_\mu E_\mu a_\mu^\dagger a_\mu + \sum_{\bar{\mu}} E_{\bar{\mu}} a_{\bar{\mu}}^\dagger a_{\bar{\mu}} \end{aligned}$$

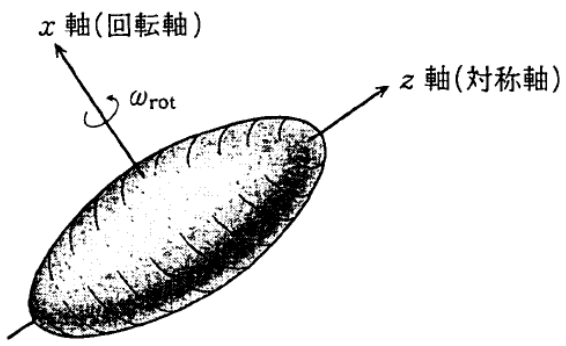


# 回転座標系での準粒子ハミルトニアン



# 回転座標系での準粒子シェルモデル

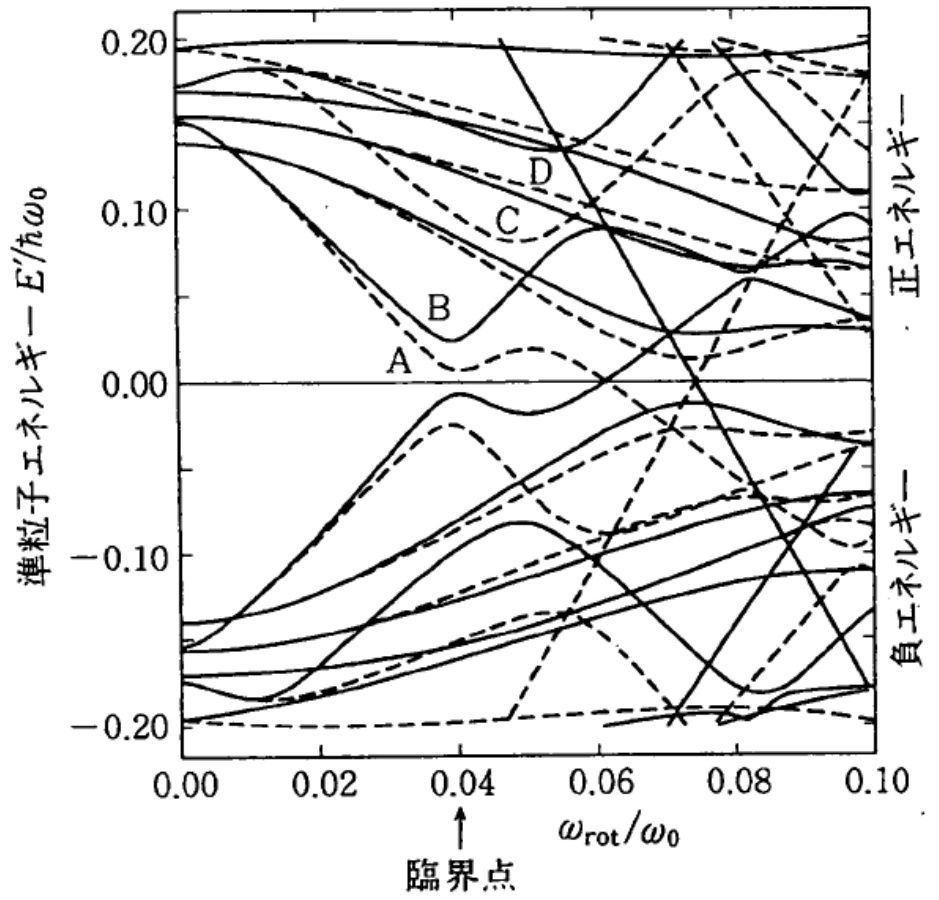
$$\begin{aligned}
 H &= \sum_i (e_i - \lambda) c_i^\dagger c_i - \Delta \sum_i (c_i^\dagger c_i^\dagger + c_i c_i) - \omega_{\text{rot}} \sum_{i,j} \langle i | J_x | j \rangle c_i^\dagger c_j \\
 &= \sum_\mu E_\mu a_\mu^\dagger a_\mu + \sum_{\bar{\mu}} E_{\bar{\mu}} a_{\bar{\mu}}^\dagger a_{\bar{\mu}}
 \end{aligned}$$



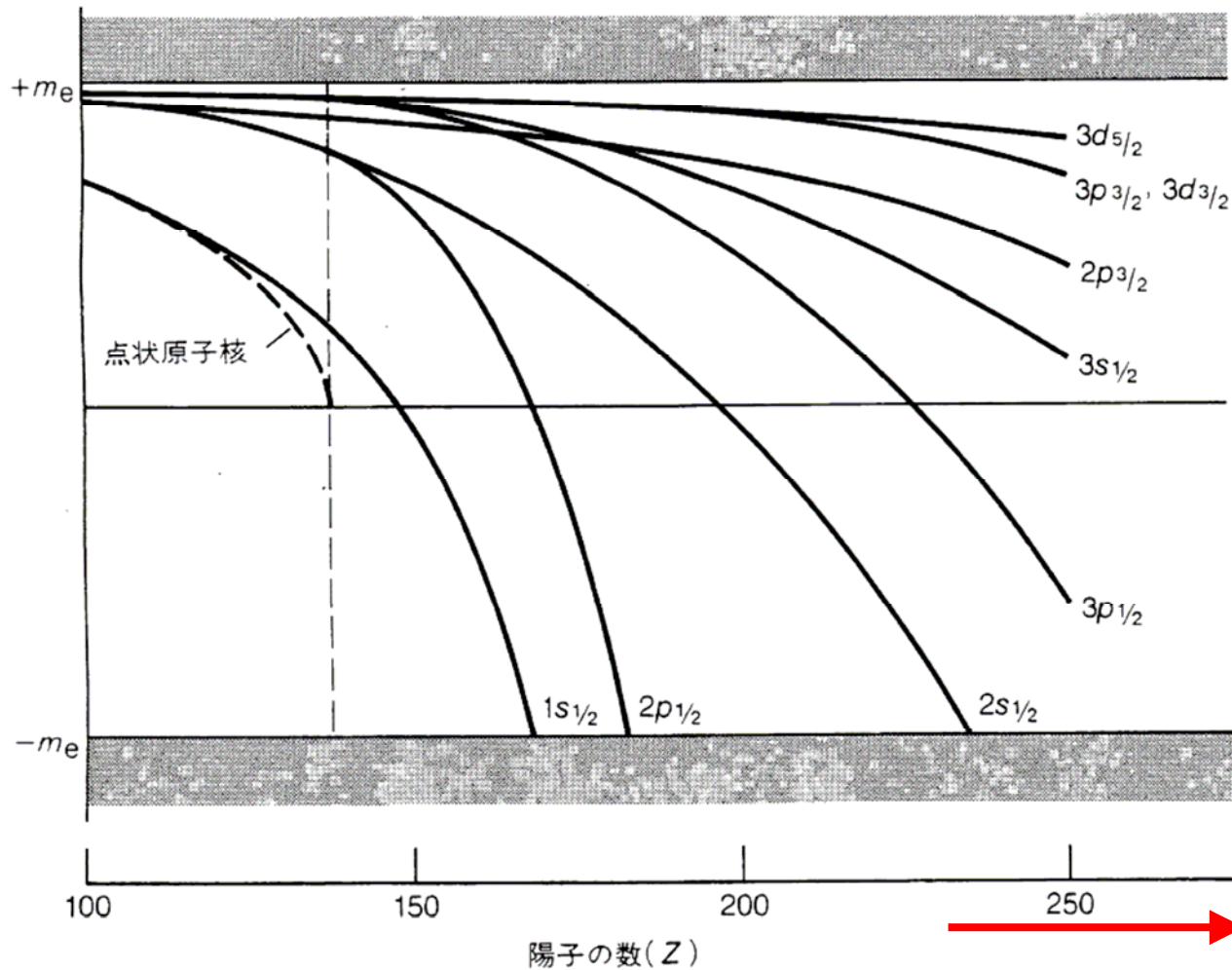
変形、対凝縮、回転による  
対称性の破れ



一般化された1粒子運動モード

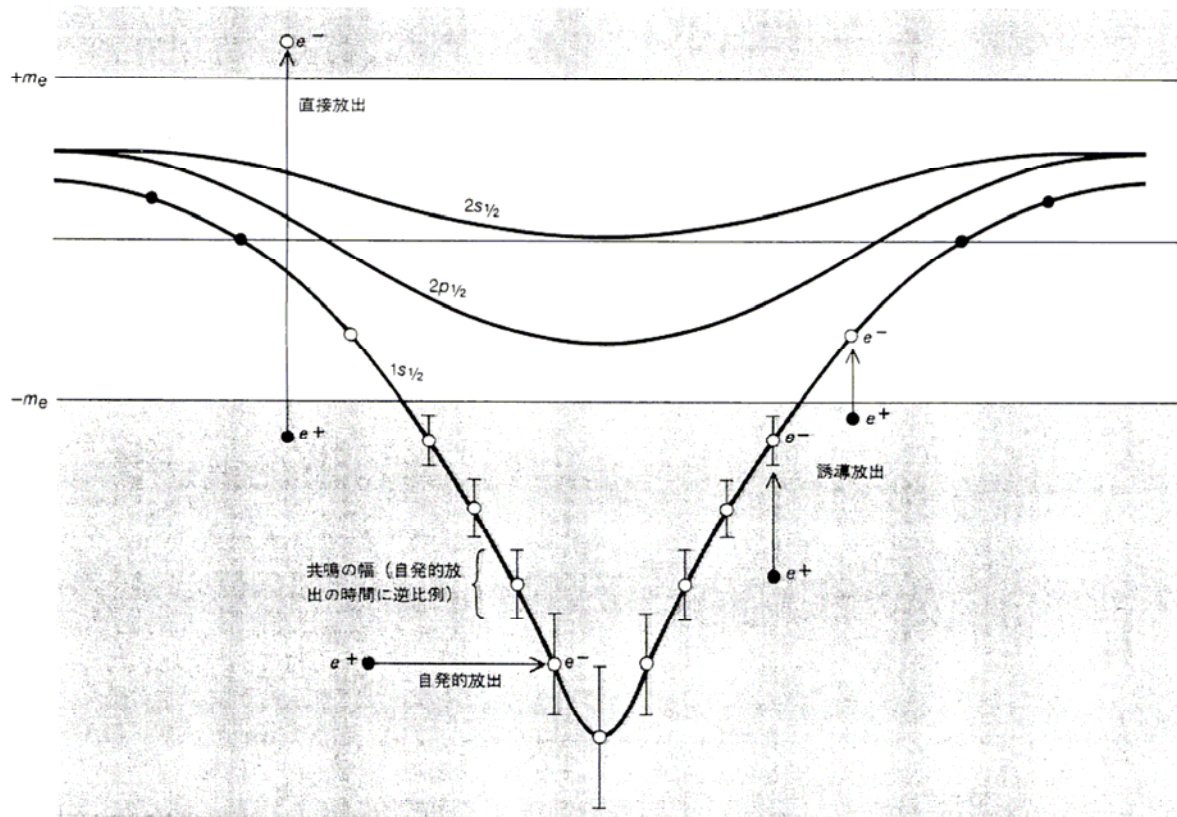
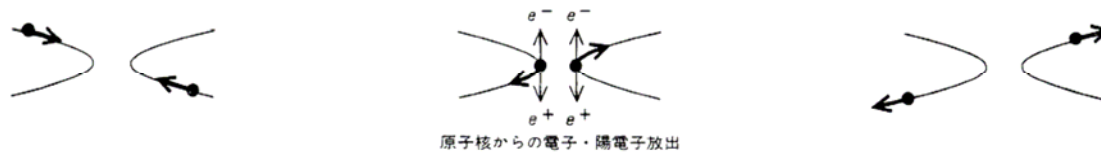


# 強い電場の中の電子のエネルギー準位



電場が強くなる

# 重イオン衝突における電子・陽電子の対創生

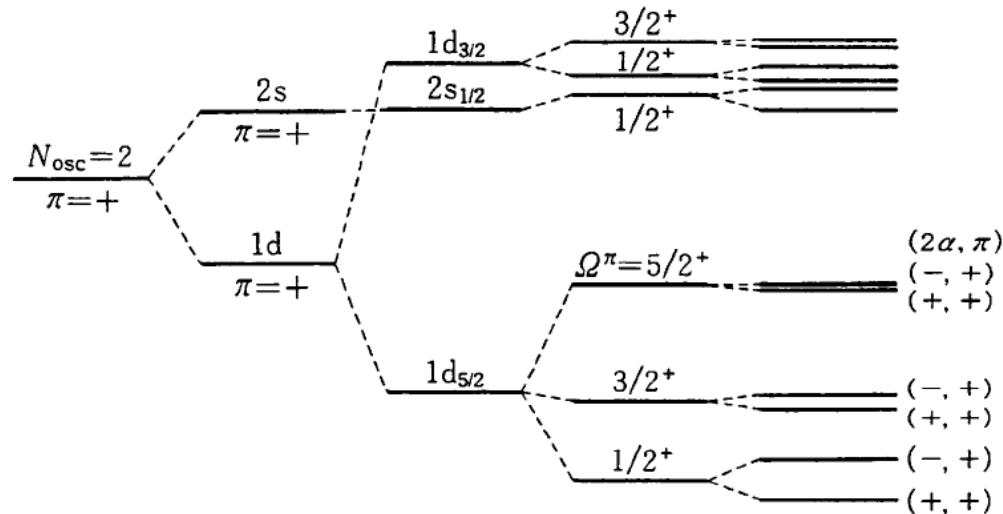


# 一粒子運動の一般化

3次元座標空間での変形  $\longrightarrow$  球対称性の破れ  $\longrightarrow$  変形殻モデル  
 軸対称性の破れ

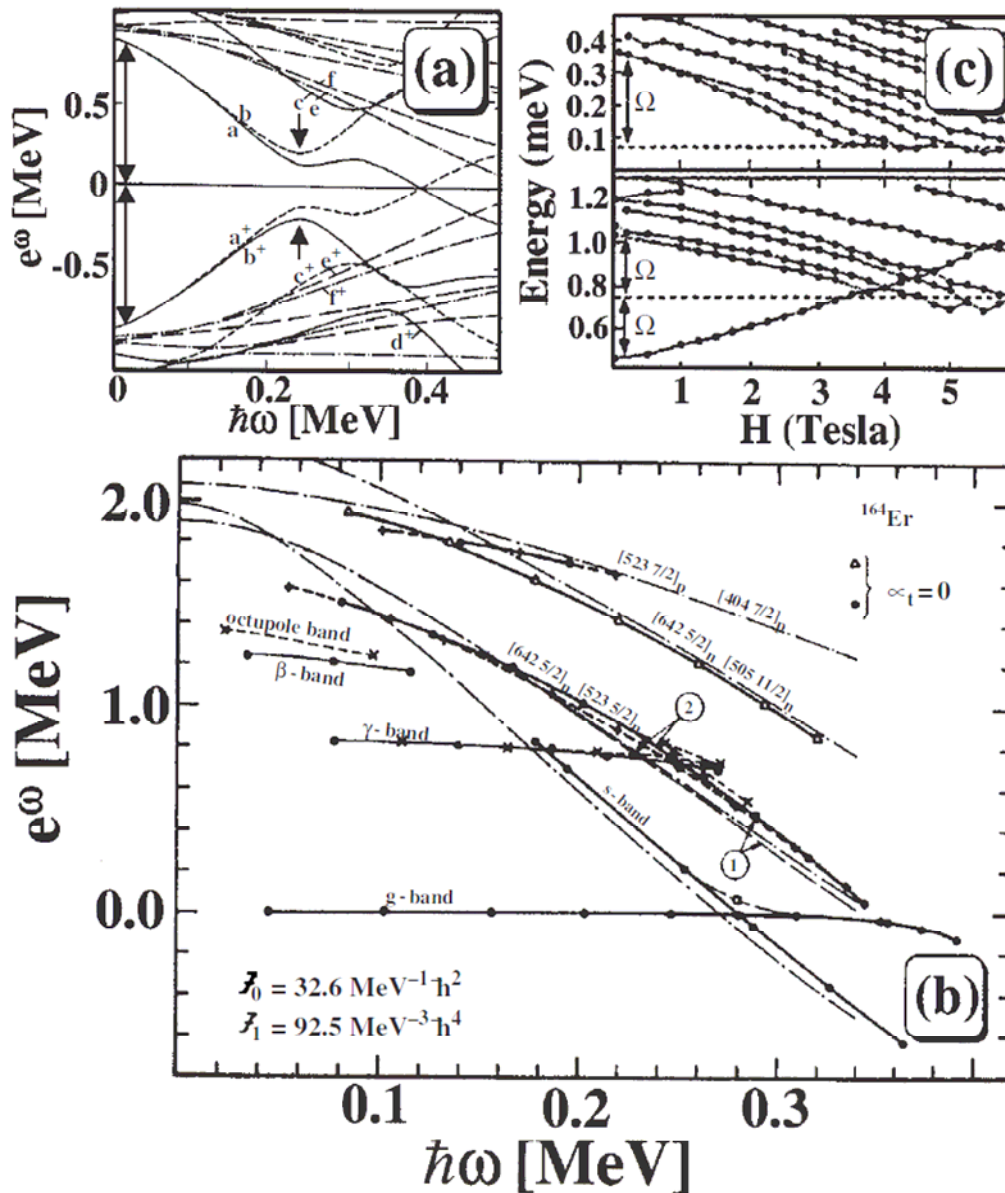
核子対の凝縮  $\longrightarrow$  粒子数(ゲージ)空間での対称性の破れ  $\longrightarrow$  準粒子

高速回転  $\longrightarrow$  時間反転対称性の破れ  $\longrightarrow$  回転系準粒子モード



	調和振動子 ポテンシャル	Woods-Saxon ポテンシャル	$j$ - $j$ 結合 殻モデル	軸対称 変形	回転座標系
量子数	$(N_{osc}, \pi)$	$(n, l, \pi)$	$(n, l, j, \pi)$	$(\Omega, \pi)$	$(\alpha, \pi)$
縮退度	$(N_{osc}+1)(N_{osc}+2)$	$2(2l+1)$	$2j+1$	2	1

# 磁場中の電子スペクトルとのアナロジー



## Gate-Voltage Studies of Discrete Electronic States in Aluminum Nanoparticles

D. C. Ralph,\* C. T. Black,<sup>†</sup> and M. Tinkham

*Department of Physics and Division of Engineering and Applied Science, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138*

(Received 13 January 1997)

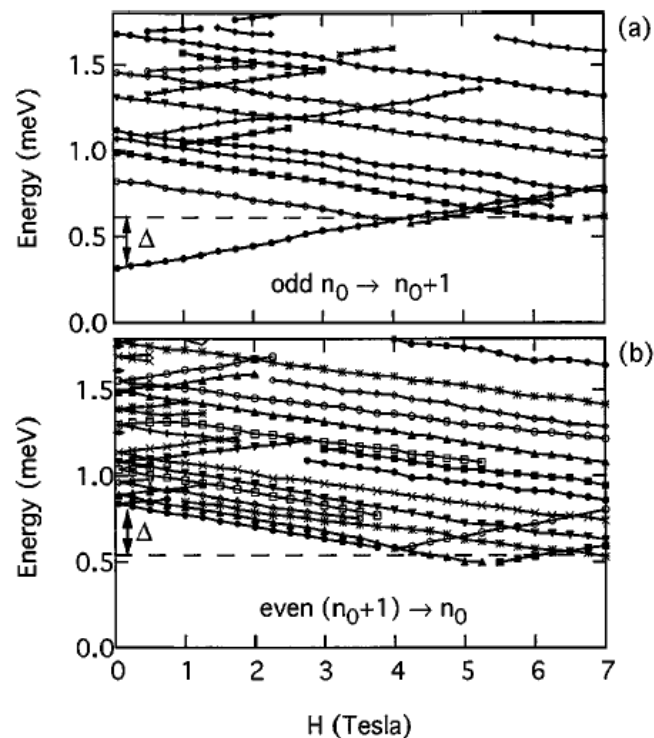
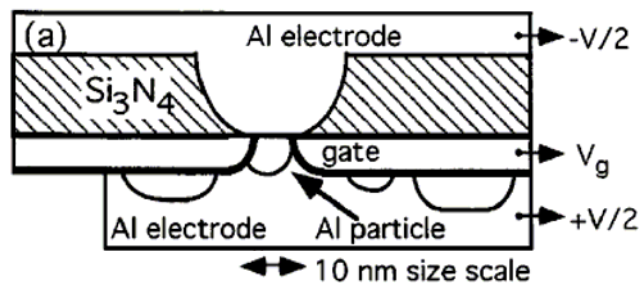
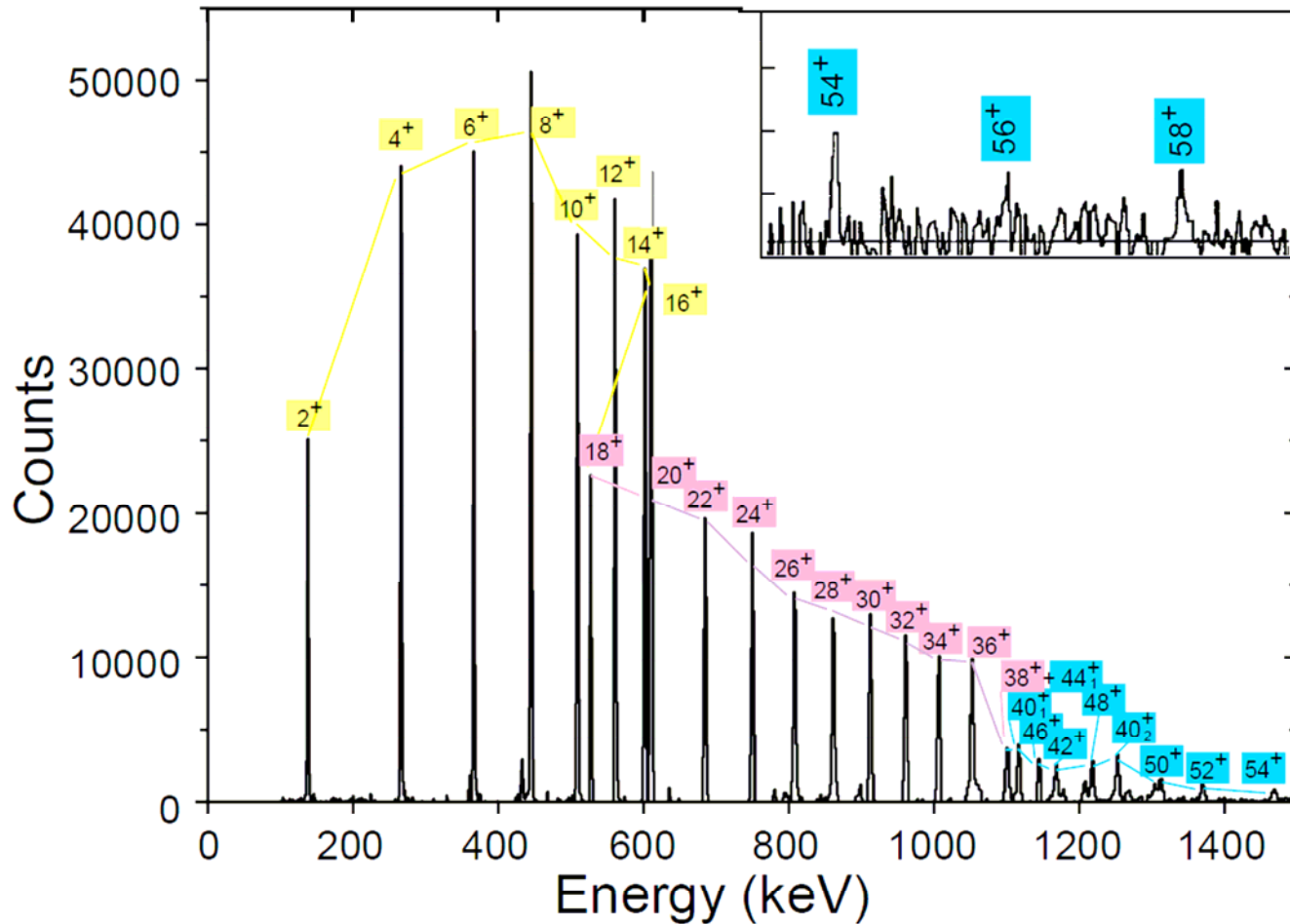
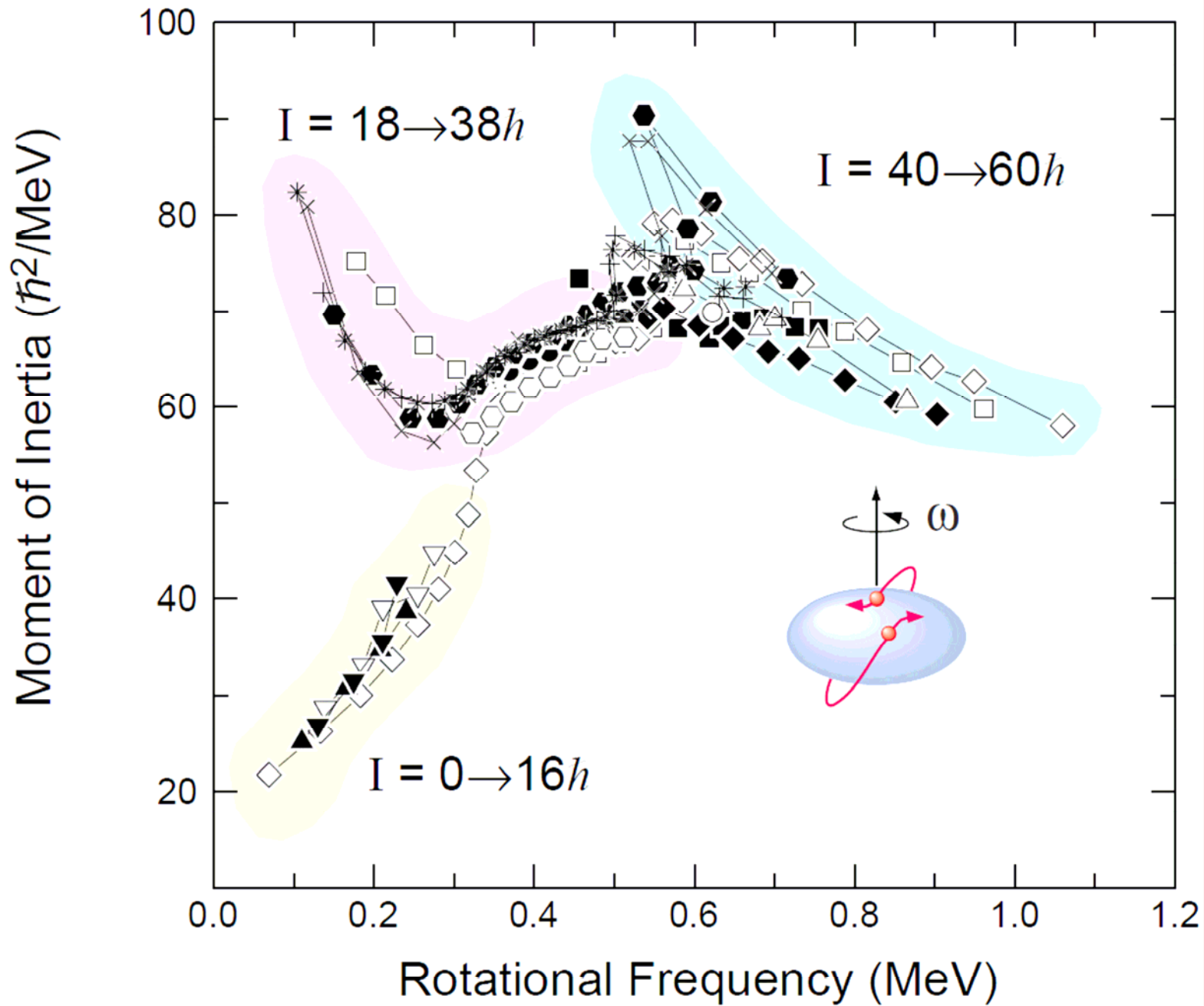


FIG. 3. Magnetic field dependence of the resolved electronic transitions for the device of Fig. 2 at (a)  $V_g \approx 110 \text{ mV}$  and (b)  $V_g \approx 180 \text{ mV}$ . The dashed lines show the average energy of the tunneling threshold at large  $H$ , corresponding to the ( $V_g$ -dependent) Coulomb barrier.  $\Delta \approx 0.3 \text{ meV}$ .

# もっと高スピンへ





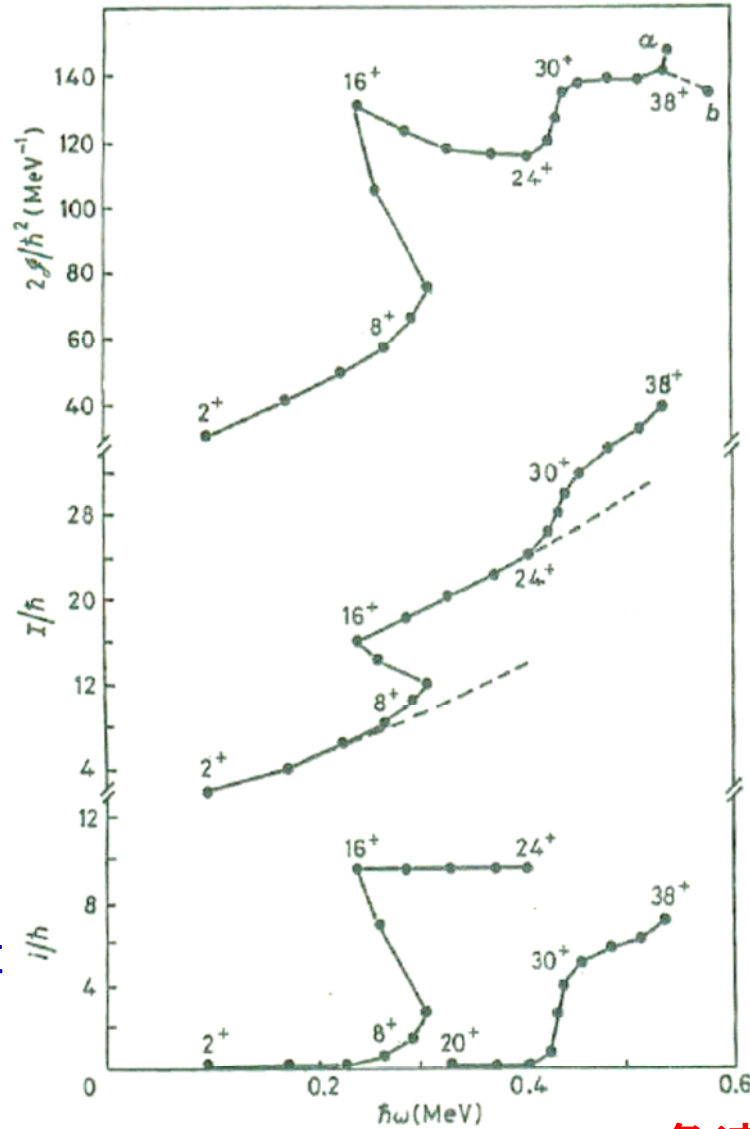


# Er158の高スピン状態

慣性モーメント

角運動量

整列角運動量

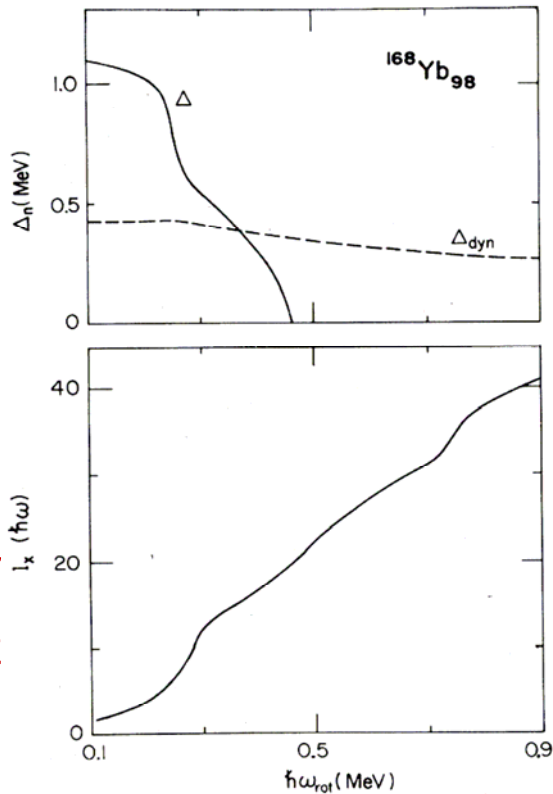


角速度

# 高スピン状態でのペ어링相転移

問12 高速回転による superfluid phase から normal phase への相転移は観測されていますか。 Yesと答えられた場合、その実験的証拠は何ですか。

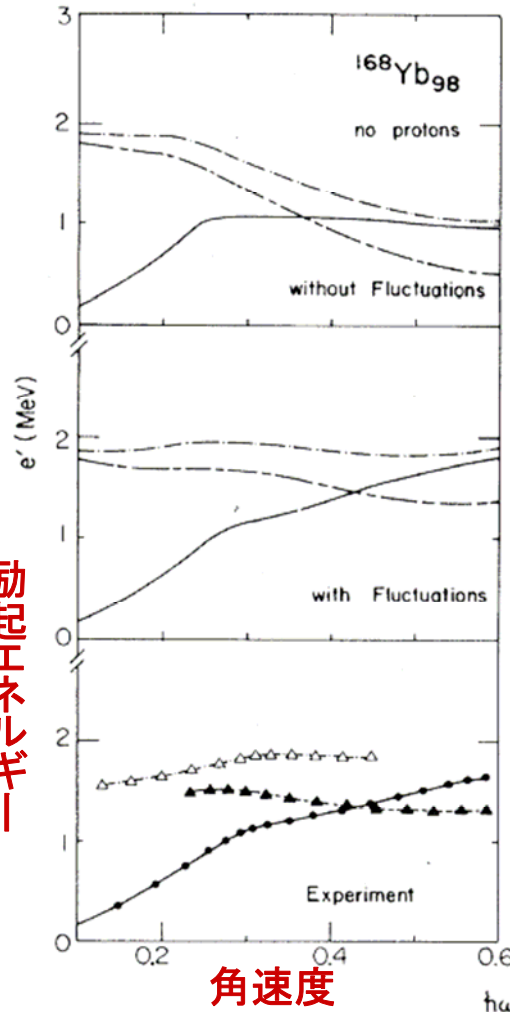
対ギャップ



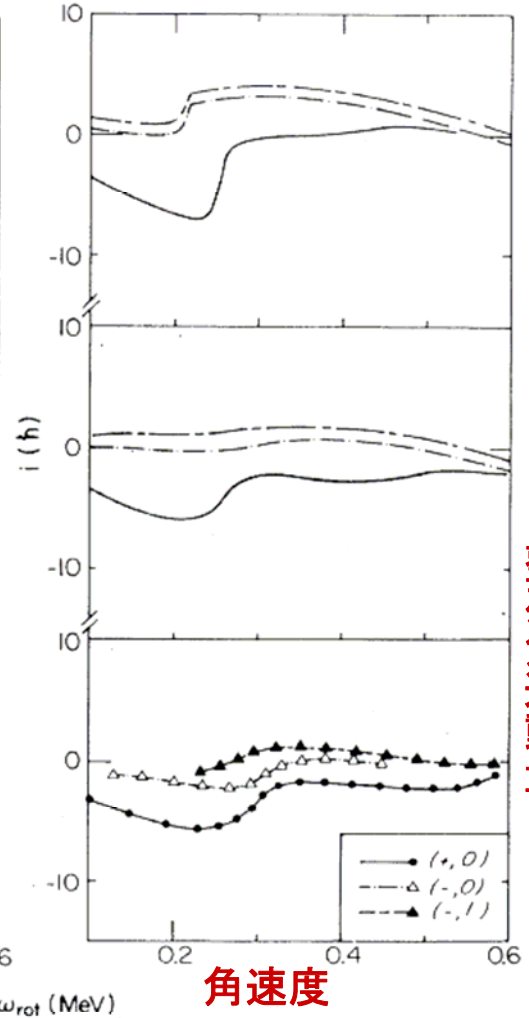
角運動量

角速度

励起エネルギー



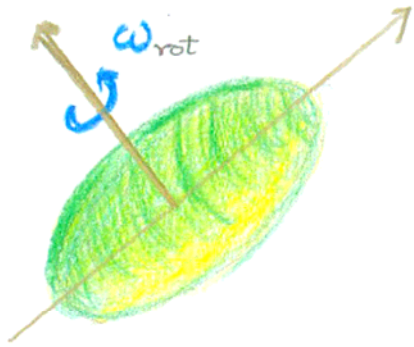
角速度



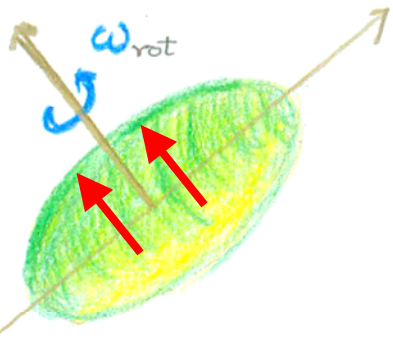
整列角運動量

角速度

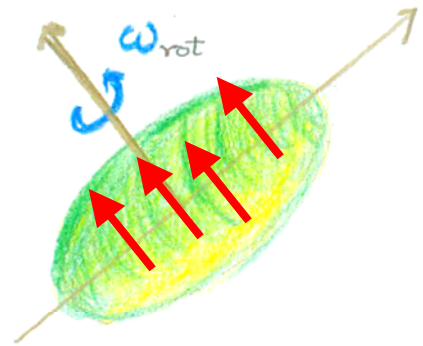
# イラスト線に沿っての内部構造の変化



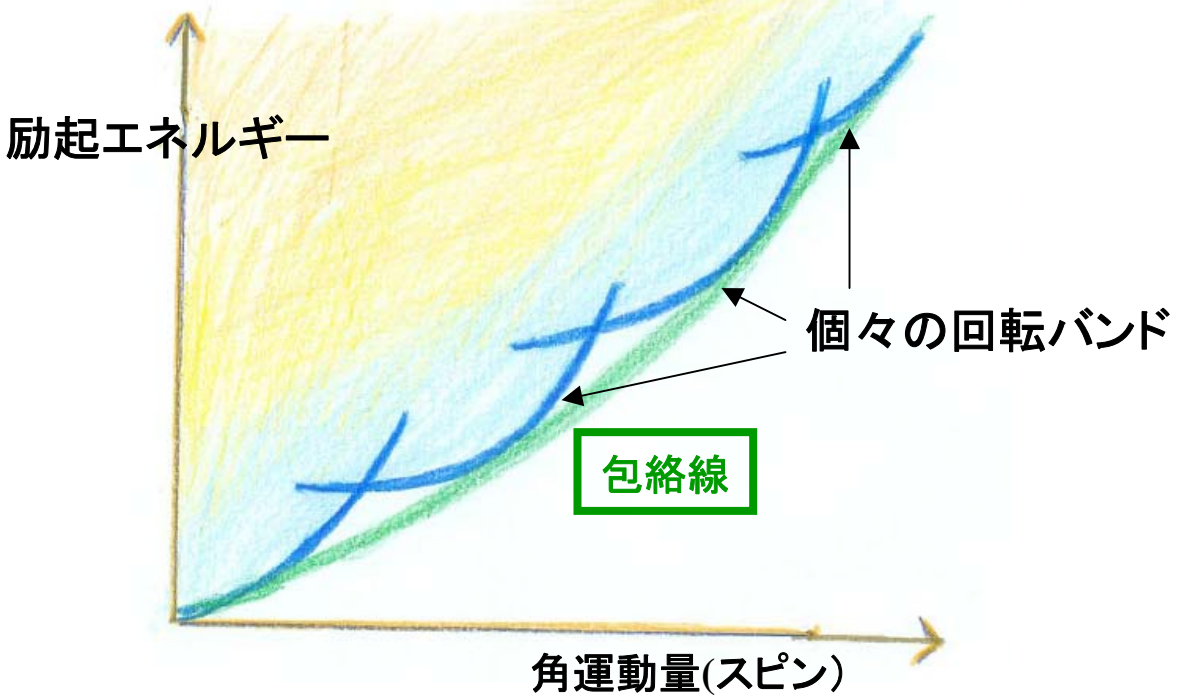
プロレート変形



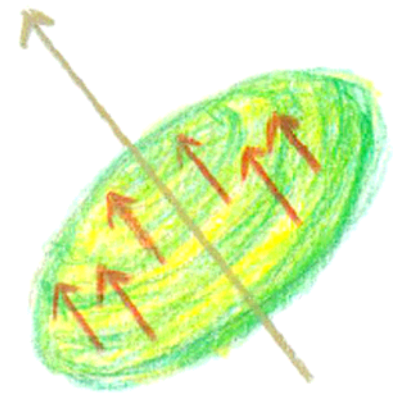
2準粒子のスピンの整列



4準粒子のスピンの整列



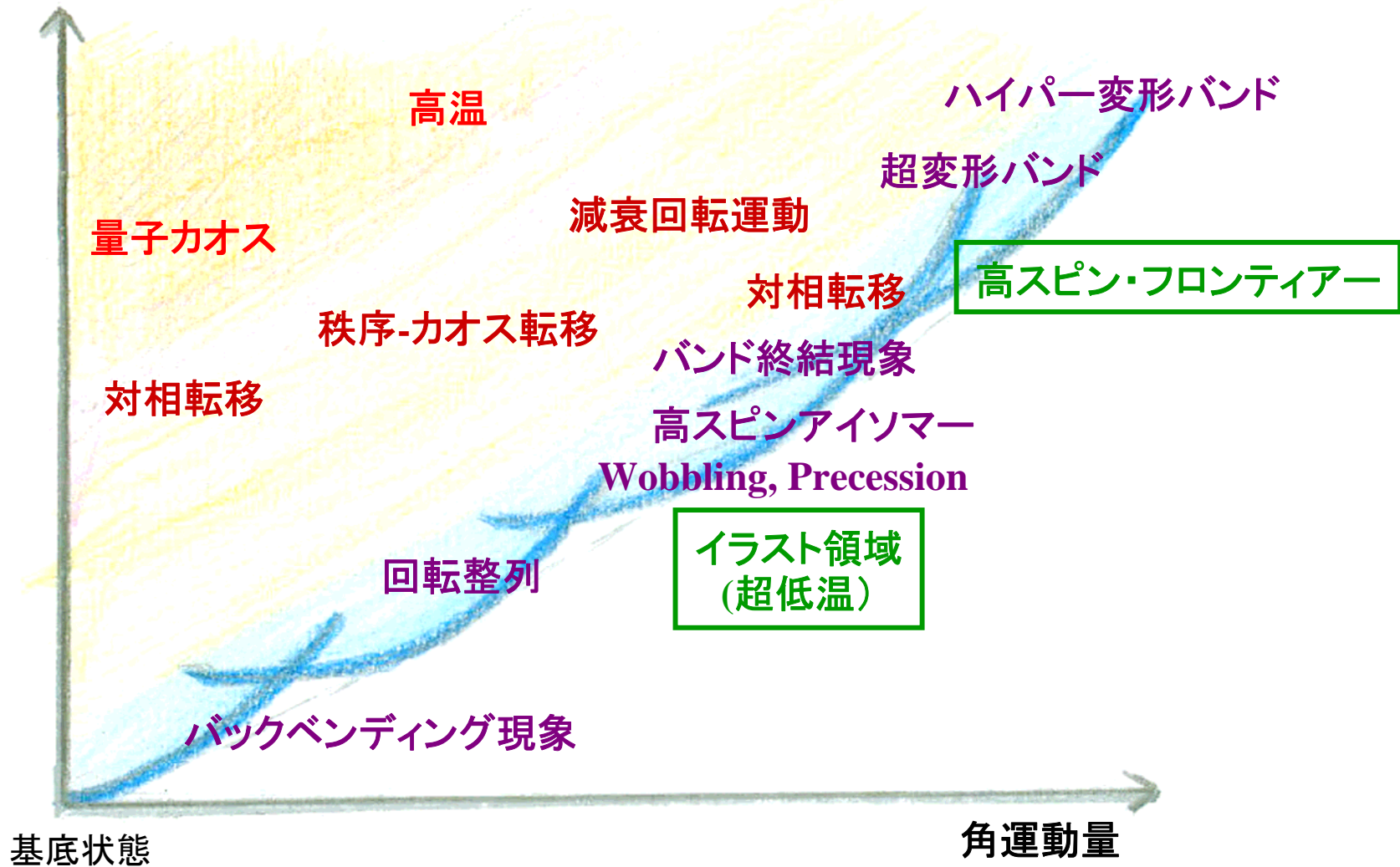
非軸対称変形の成長



多数の核子のスピンの整列  
オブレート変形

# 核構造における秩序とカオス

励起エネルギー



# 「温度」と励起エネルギー

$$E = aT^2$$

準位密度パラメータ

$$a \approx \frac{A}{8} - \frac{A}{10} \text{ MeV}^{-1}$$

E(MeV)	T(MeV)
3	0.4
50	1.7
200	3.4

A=170

- 準位密度(フェルミガス模型)

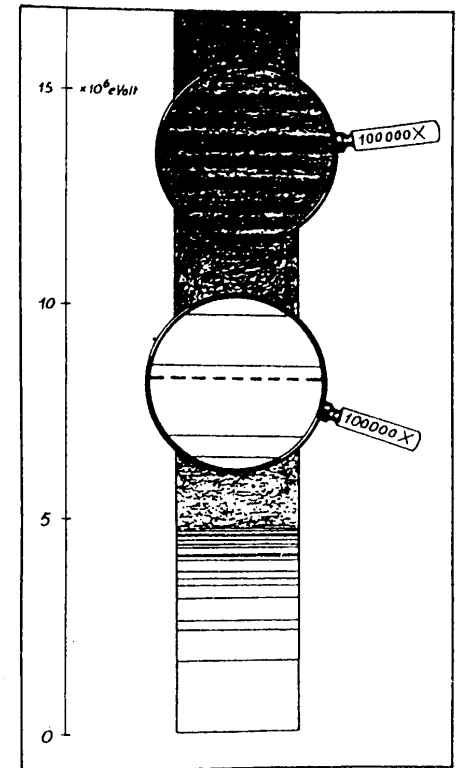
$$\rho_{tot}(E) \propto \exp(2\sqrt{aE})$$

- ボルツマン原理(ミクロカノニカル)

$$S(E) = k \log(\rho(E)dE)$$

$$\frac{1}{T} = \frac{\partial}{\partial E} S(E) = \frac{\partial}{\partial E} \log \rho(E)$$

- 高い準位密度
- 核内の統計平衡

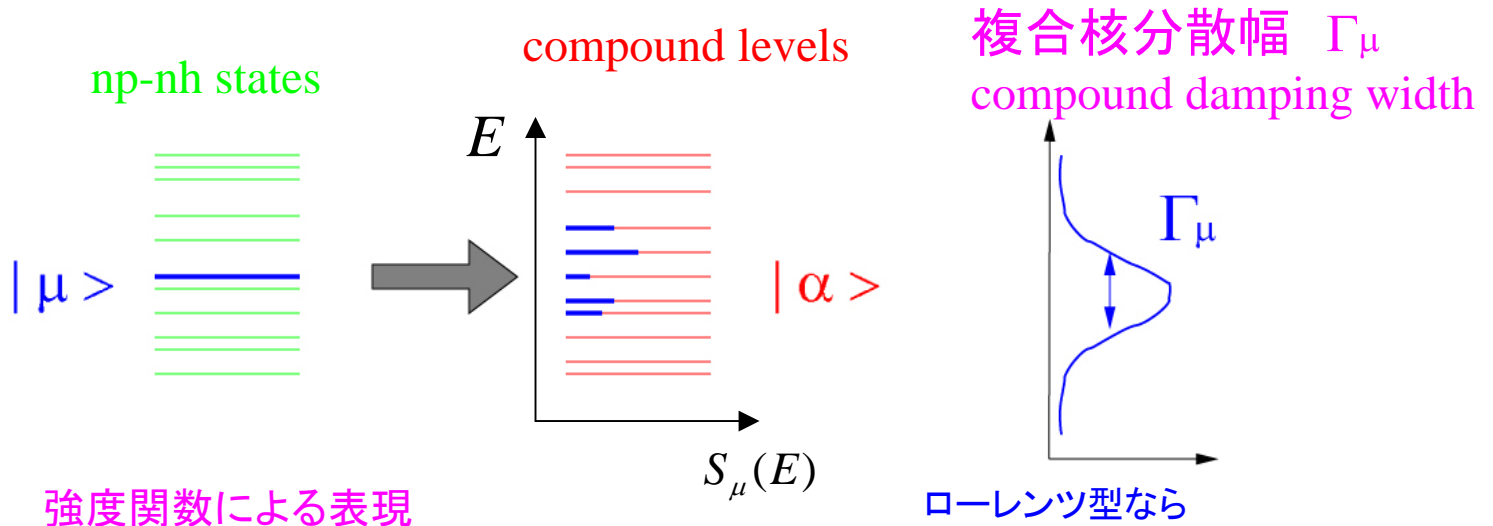


N. Bohr

# 複合核分散幅

複合核状態は、多数の殻模型配位 (nph配位) を含む

ある殻模型配位 (nph配位) の成分は、多数の複合核状態に分散する

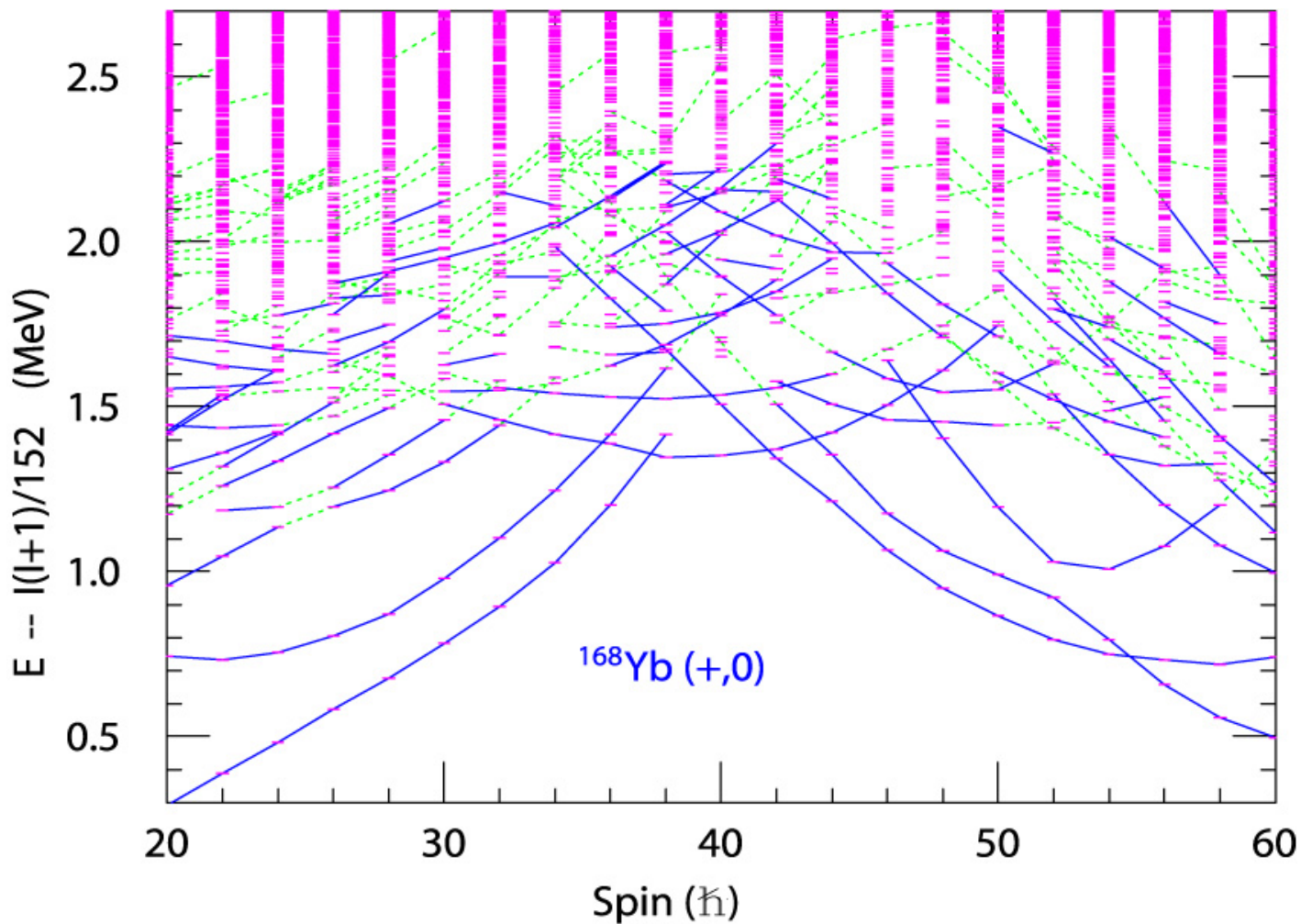


強度関数による表現

$$S_{\mu}(E) = \sum_{\alpha} \langle \mu | \alpha \rangle^2 \delta(E - E_{\alpha})$$

$$S_{\mu}(E) \approx \frac{2\pi\Gamma_{\mu}}{(E - E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma_{\mu}}{2}\right)^2}$$

# エネルギー準位と回転バンド構造

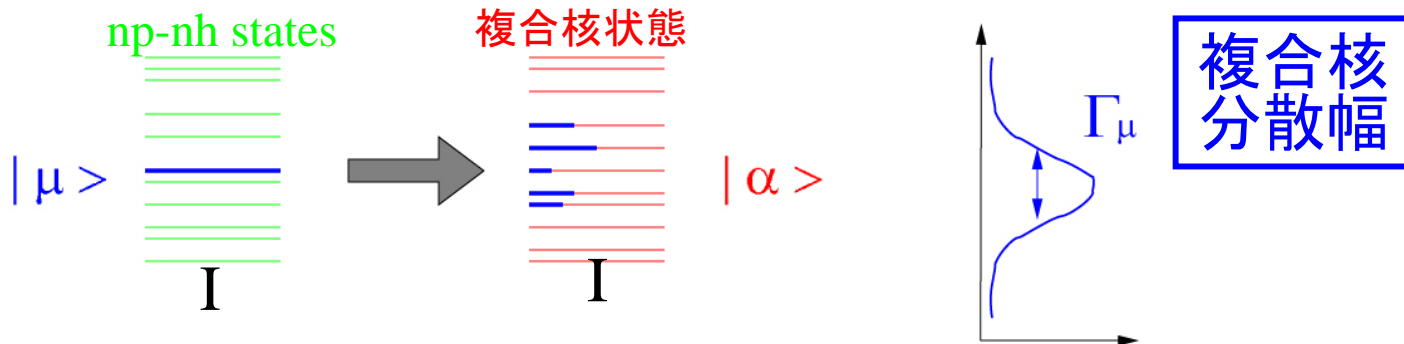




# ふたつの減衰幅

## 1. 複合核分散幅 $\Gamma_\mu$ (量子的Lyapunov指数)

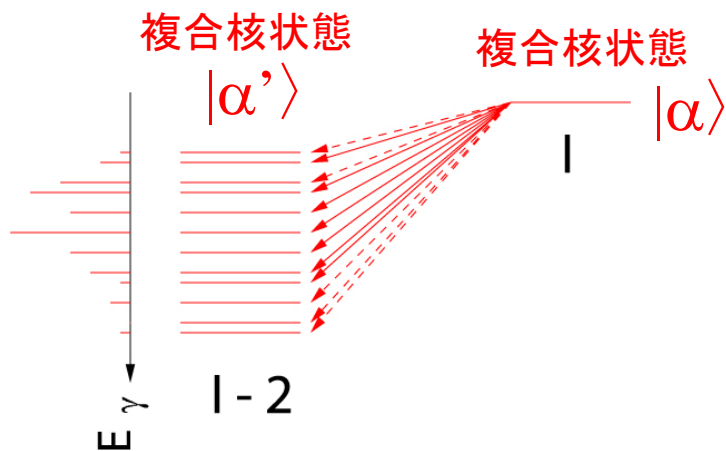
基底回転バンド(npnh殻模型配位)のエネルギー分散



直接は観測できない (特定のnpnh配位のみを実験的に生成できない)

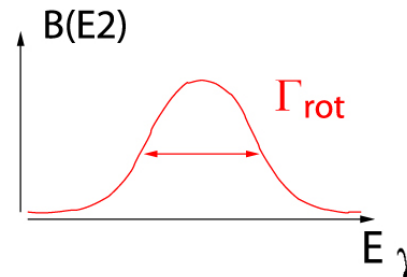
## 2. 回転減衰幅 $\Gamma_{rot}$

$\Delta I=2$  E2遷移のエネルギー分散

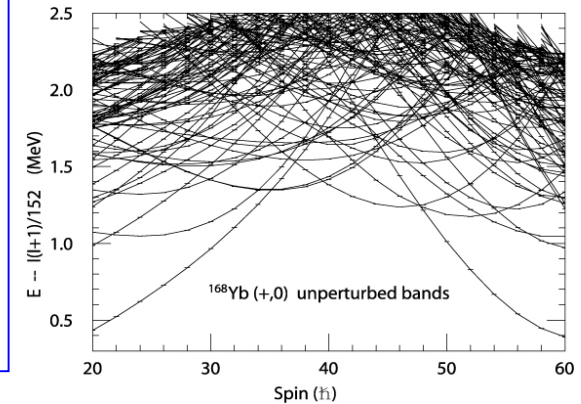
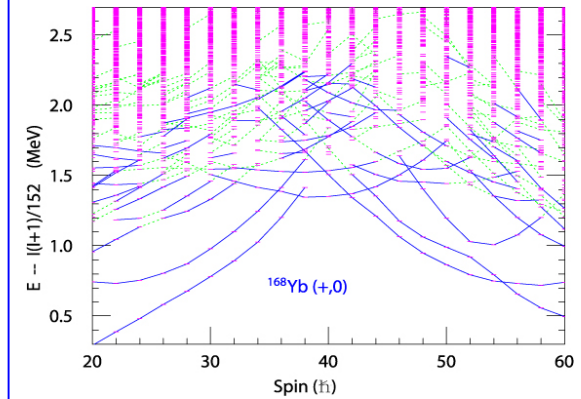
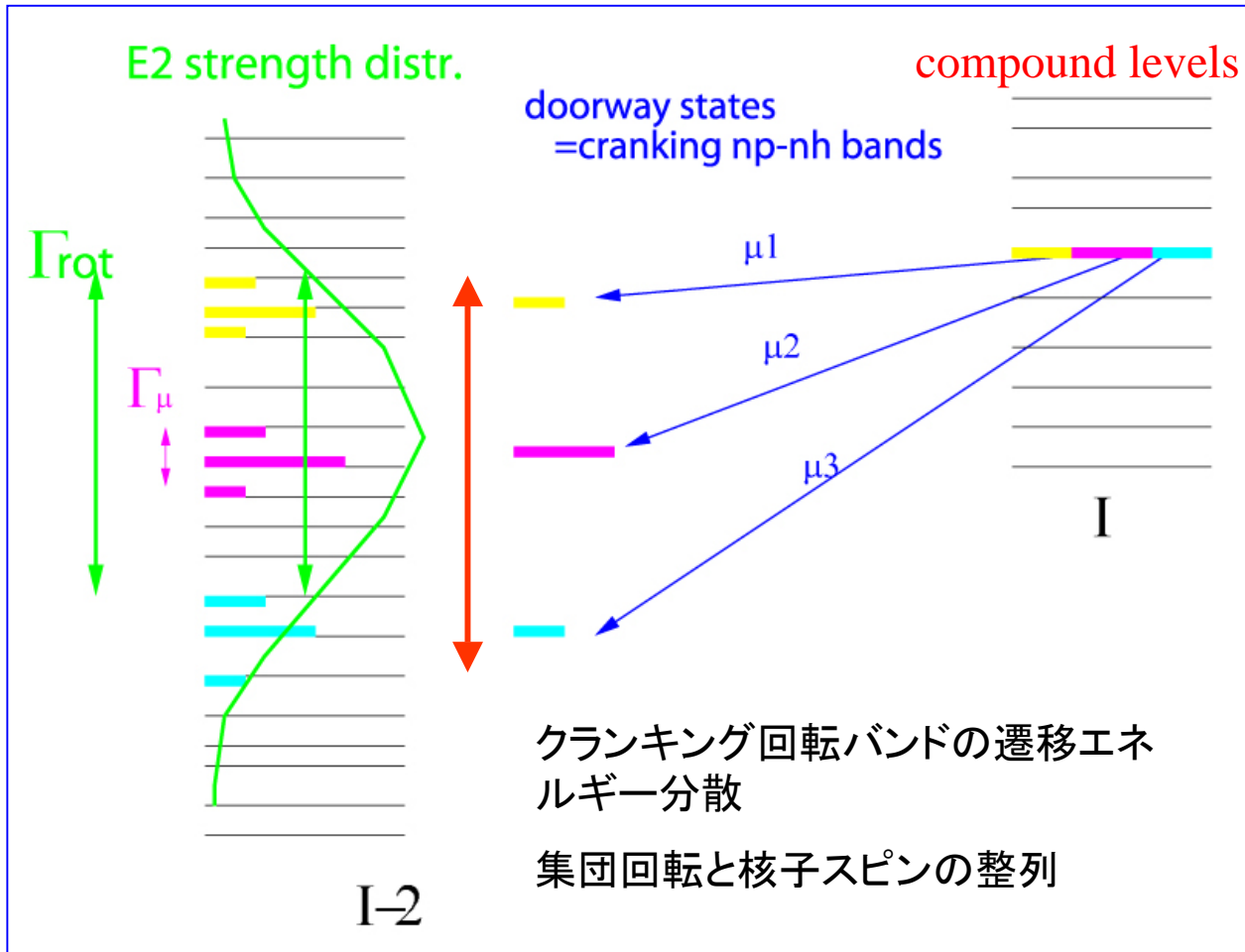


$\Delta I=2$ : E2 強度関数

回転運動の減衰幅

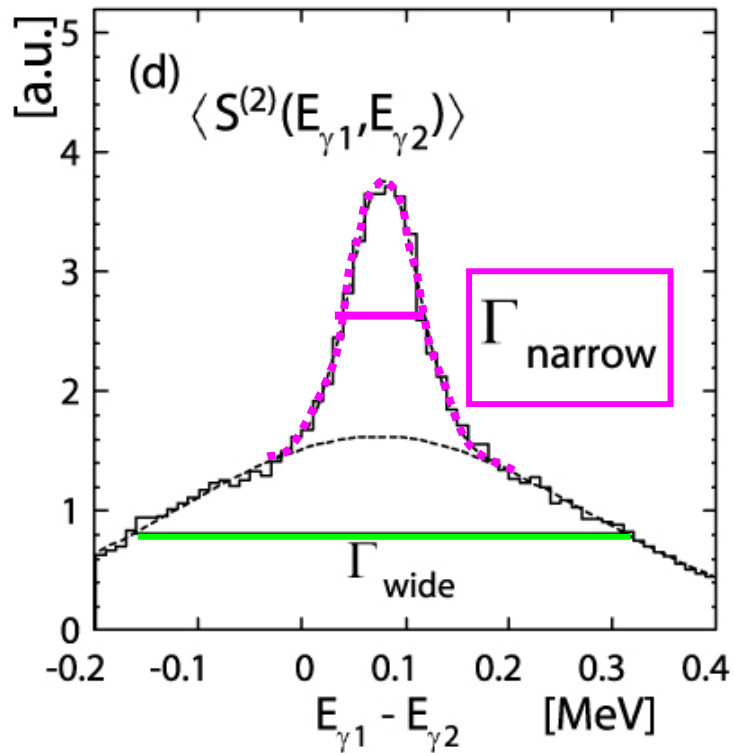


# 回転減衰の微視的メカニズム



# ガンマーガンマ相関

- 「狭い」成分  $\Gamma_{\text{narrow}} \sim 100\text{keV}$
- 「広い」成分  $\Gamma_{\text{wide}} \sim 500\text{keV}$



ガンマ線エネルギー差

$$E_{\gamma 1} - E_{\gamma 2}$$

