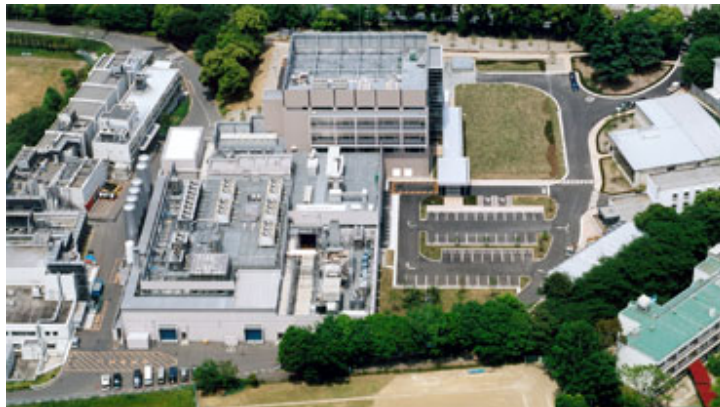
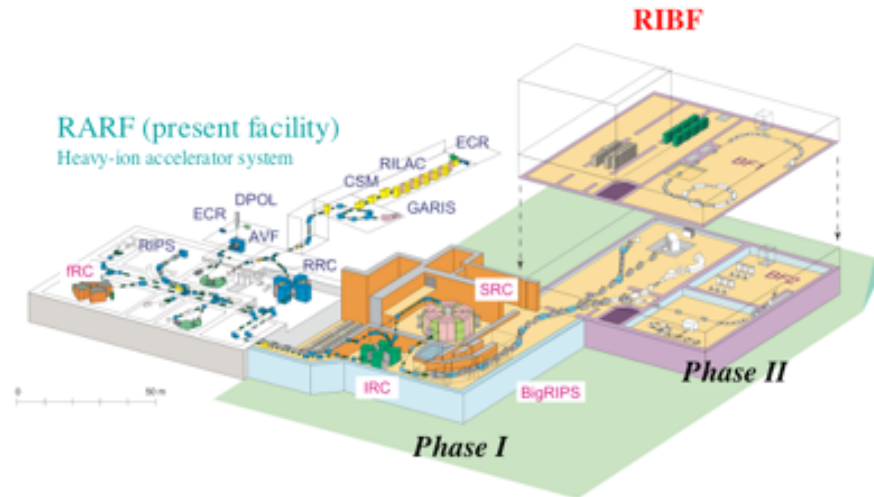


我々は今どこにいるか

2006年春 理研RI ビームファクトリー稼動

新しい原子核画像の構築をめざした挑戦が始まる



3分間で聞く核構造論の歴史

1936 Niels Bohr

最初に見た原子核は「量子カオス」の世界だった

→ 1960年代 Wigner, Dyson, ... ランダム行列理論

1950年代 パラダイムシフト

基底状態近傍では平均場が成立している

平均場の時間変化としての集団運動

→ 1960年代 集団運動の微視的理論

1970年代 高スピフロンティアー

超低温イラスト領域での秩序運動

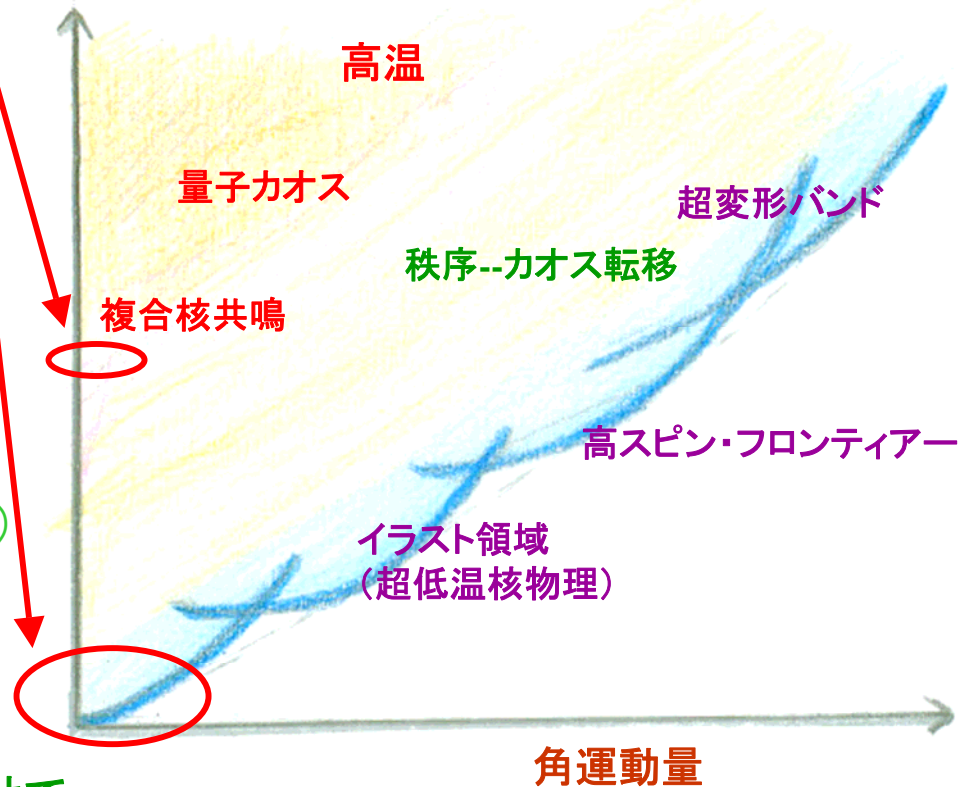
→ 一般化された平均場
(変形、対凝縮、回転系シェルモデル)

1986 超変形核の発見

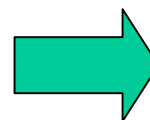
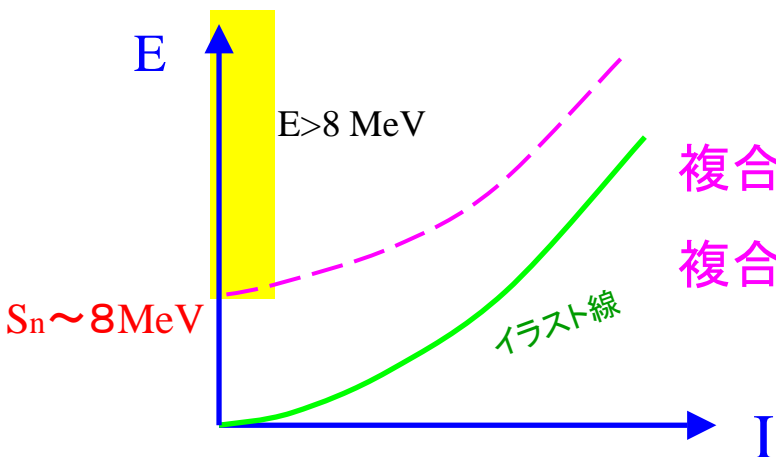
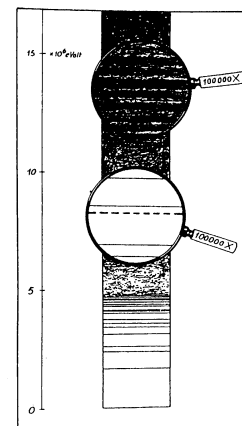
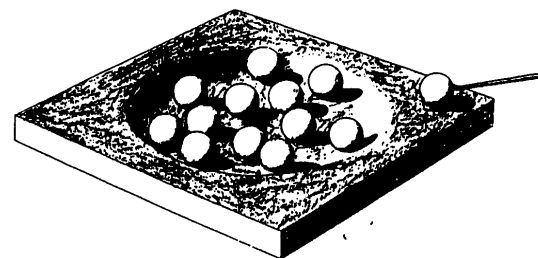
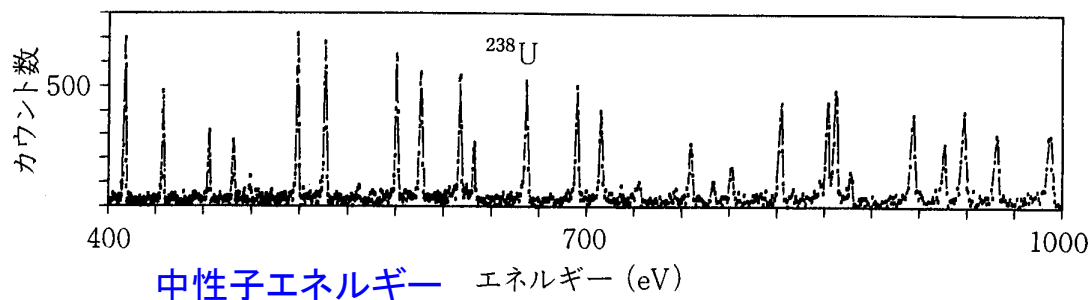
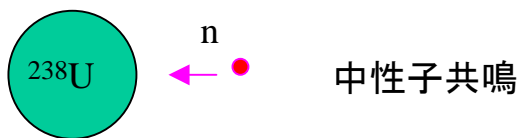
1990年代

秩序運動とカオス運動の統一的理解にむけて

励起エネルギー



複合核 不逆性の力学的基礎？ 量子カオス



ランダム行列理論

(新しい型の統計力学)

1930-1940年代: 複雑系としての原子核

1932 中性子の発見、核構造論の始まり

1936 Niels Bohr 複合核モデル

最初に見た原子核は「量子カオス」の世界だった

→ ランダム行列理論 (1960年代: Wigner, Metha, Dyson, Porter)

1950年代: 平均場モデルの成立、超低温での秩序運動

1949 Mayer-Jensen 球形シェルモデル

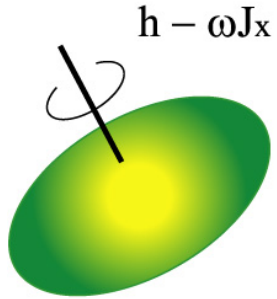
→ その理論的基礎付け (1955 Bruckner理論)

1953 Bohr-Mottelson 集団モデル (振動と回転は平均場の時間変化)

1955 Nilsson 変形シェルモデル

1957 超伝導のBCS理論 → 準粒子シェルモデル

変形核の回転運動



8	1605.85	
7	1432.97	7 1448.97
6	1263.92	6 1311.48
5	1117.60	5 1193.04
4	994.77	4 1094.05
3	895.82	$K\pi = 4-$
2	821.19	
1		
0		
8	928.26	
6	548.73	
4	264.081	$^{168}_{68}\text{Er}$
2	79.800	
0	0	
		$K\pi = 0+$
		$r = +1$

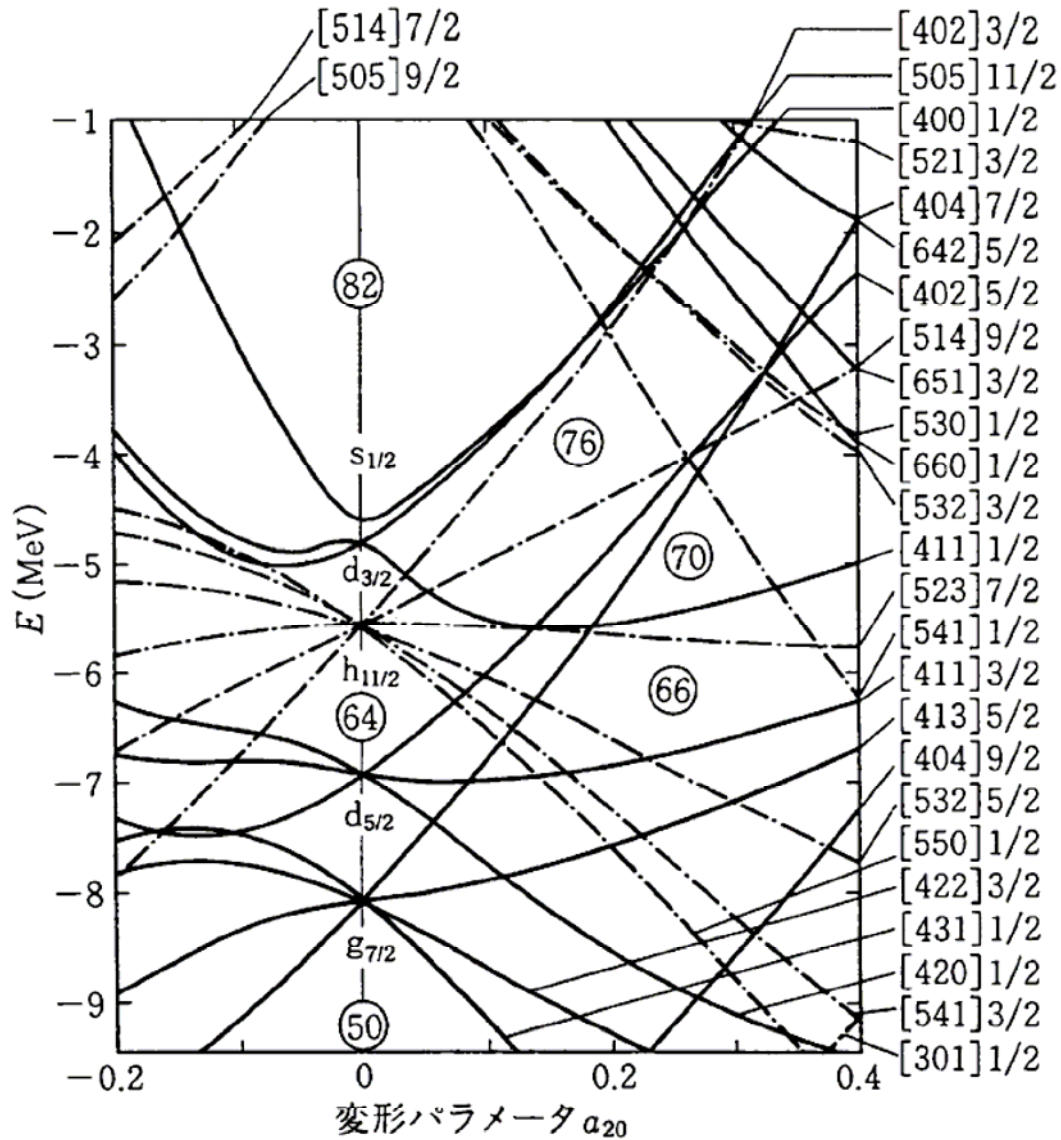
回転運動ハミルトニアン

$$H_{rot} = \frac{\hat{I}^2}{2J_{rot}}$$

回転スペクトル 回転バンド

$$E(I) = \frac{I(I+1)}{2J_{rot}}$$

変形シェルモデルの導入

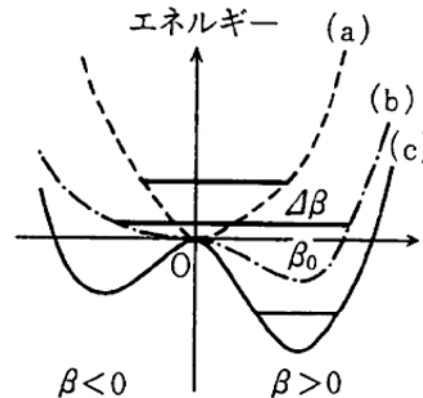


Quantum Phase Transition

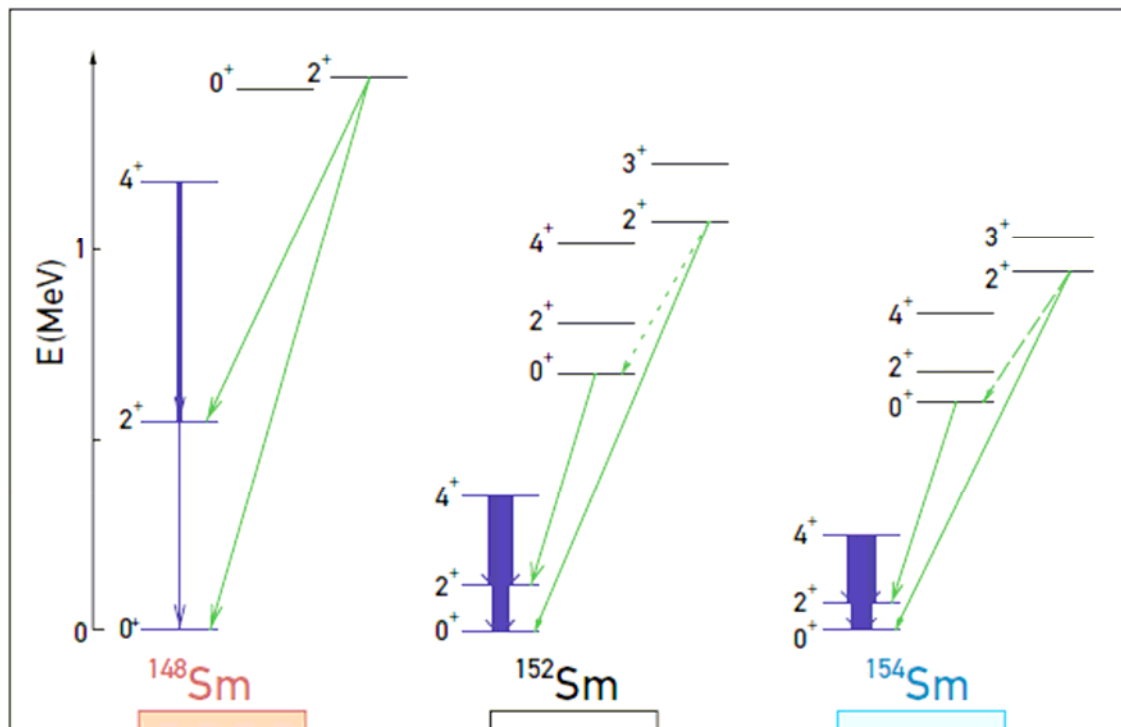
ゆるやかな量子相転移(真空の構造変化)

有限系の特徴

温度ゼロ



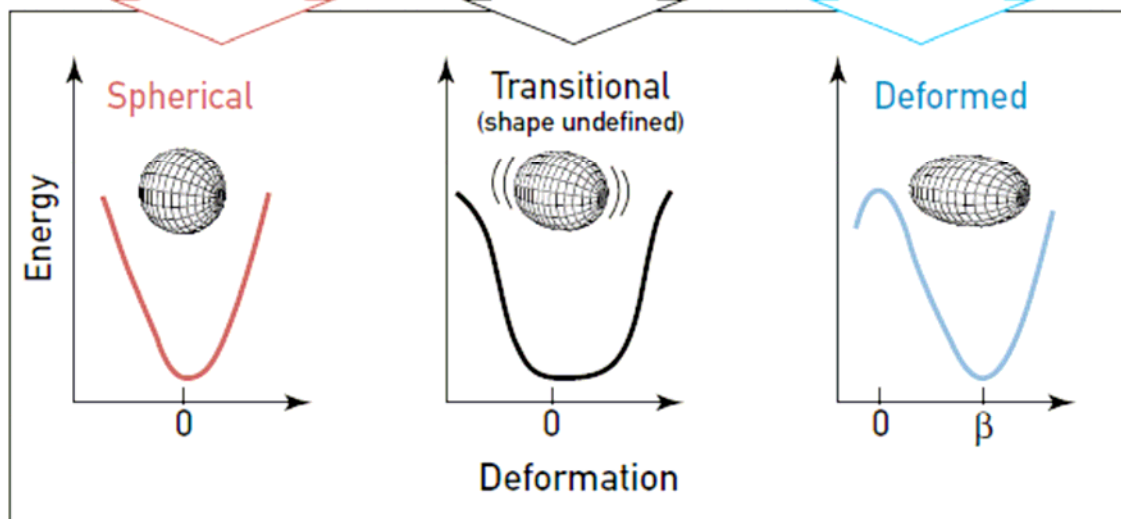
	<u>2428</u> 4 ⁺	<u>2400</u> 8 ⁺	<u>2438</u> 8 ⁺	<u>2304</u> 10 ⁺	<u>2286</u> 12 ⁺	<u>2613</u> 14 ⁺
		<u>1849</u> 6 ⁺	<u>1945</u> 6 ⁺	<u>1748</u> 8 ⁺	<u>1725</u> 10 ⁺	<u>2049</u> 12 ⁺
	<u>1678</u> 2 ⁺	<u>1458</u> 4 ⁺	<u>1262</u> 4 ⁺	<u>1224</u> 6 ⁺	<u>1216</u> 8 ⁺	<u>1520</u> 10 ⁺
		<u>804</u> 2 ⁺	<u>614</u> 2 ⁺	<u>747</u> 4 ⁺	<u>770</u> 6 ⁺	<u>1040</u> 8 ⁺
				<u>334</u> 2 ⁺	<u>404</u> 4 ⁺	<u>638</u> 6 ⁺
				<u>138</u> 2 ⁺	<u>317</u> 4 ⁺	<u>99</u> 2 ⁺
	<u>0</u> 0 ⁺	<u>0</u> 0 ⁺	<u>0</u> 0 ⁺	<u>0</u> 0 ⁺	<u>0</u> 0 ⁺	<u>0</u> 0 ⁺
	¹⁴⁸ Dy ₈₂	¹⁵⁰ Dy ₈₄	¹⁵² Dy ₈₆	¹⁵⁴ Dy ₈₈	¹⁵⁶ Dy ₉₀	¹⁵⁸ Dy ₉₂
$\frac{E(4^+)}{E(2^+)}$	1.45	1.81	2.06	2.24	2.93	3.20



Vibrator

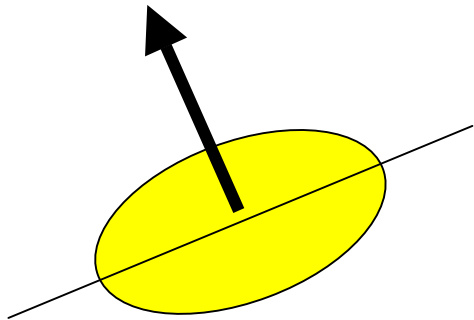
Soft

Rotor



回転運動の一般的概念

対称性の自発的破れを回復する集団モード



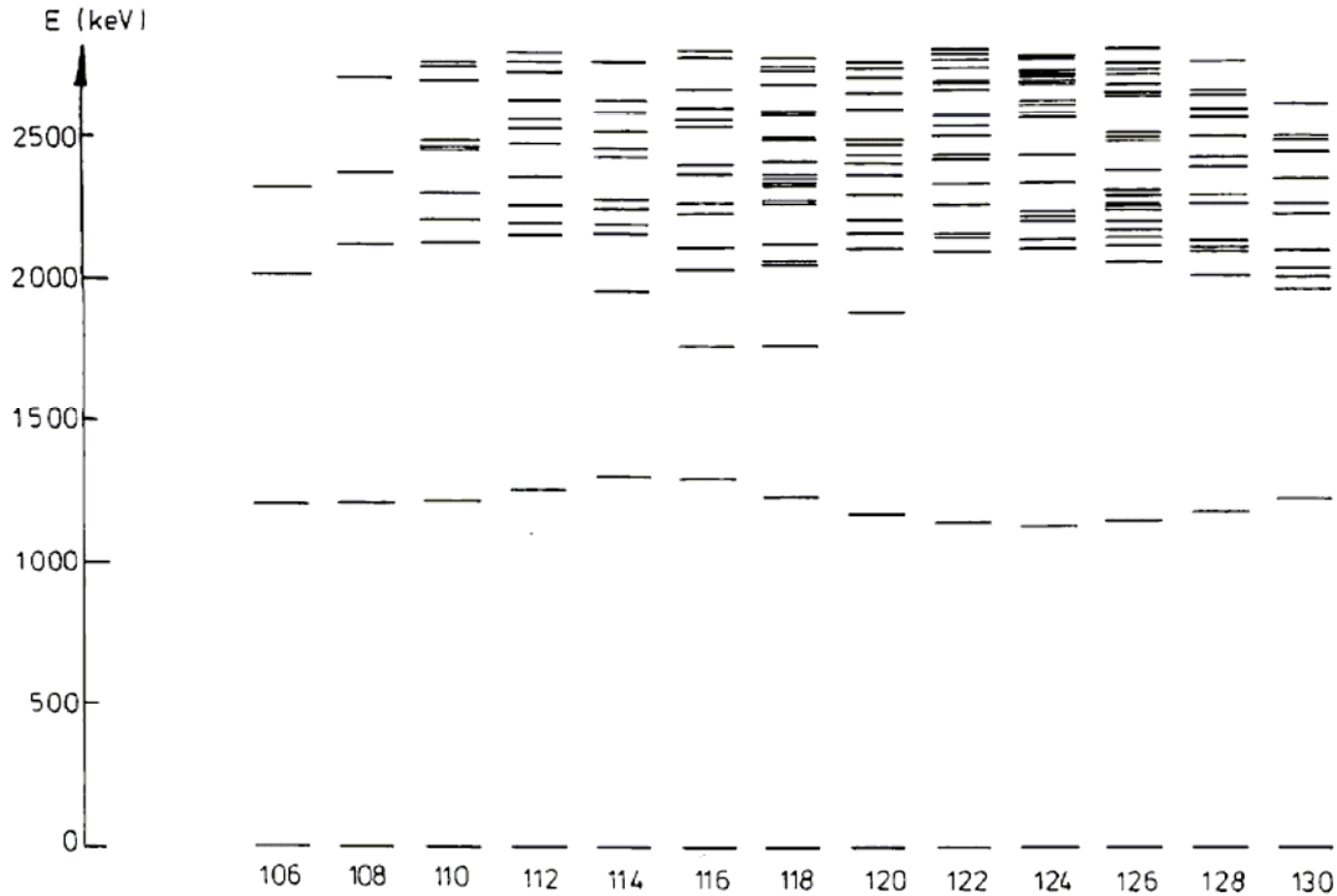
平均場が回転不変性を破る
(変形の発生)



平均場の方向を指定する角度が集団変数になる

3次元座標空間はもちろん、スピン・アイソスピン空間、
粒子数空間(ゲージ空間)など異なった次元にも一般化できる

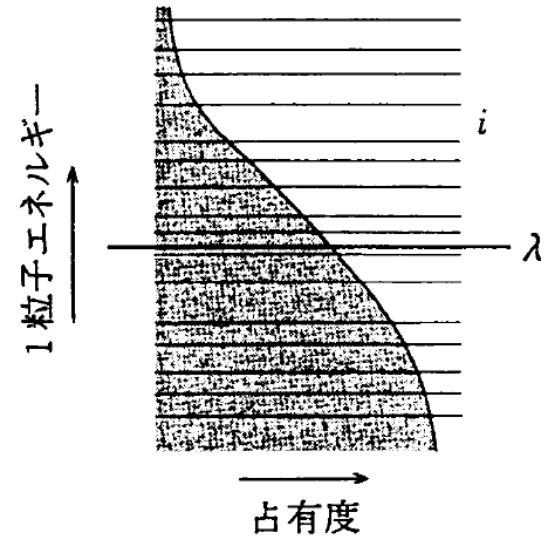
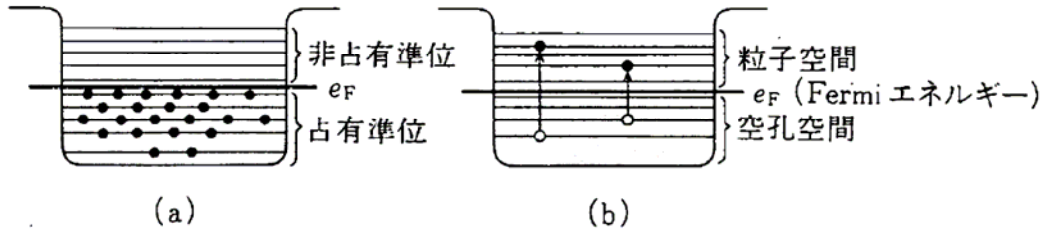
エネルギーギャップの存在



Sn アイソトープ

J.L. Wood et al., Phys. Rep. 215 (1992) 101

真空とその励起(1粒子モード)



粒子と空孔

Bogoliubov準粒子

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

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

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

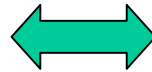
$$a_i |\phi_{\text{BCS}}\rangle = a_{\bar{i}} |\phi_{\text{BCS}}\rangle = 0$$

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

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

励起モードとしての「素粒子」
(質量の起源)

粒子の質量



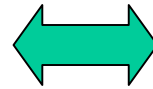
励起エネルギー

Dirac粒子



準粒子

$$\sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$$



$$\sqrt{(e - \lambda)^2 + \Delta^2}$$

$$\begin{pmatrix} pc & \mp mc^2 \\ \mp mc^2 & -pc \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{\pm}(p) \\ v_{\pm}(p) \end{pmatrix} = E_p \begin{pmatrix} u_{\pm}(p) \\ v_{\pm}(p) \end{pmatrix} \iff \begin{pmatrix} e_i - \lambda & \Delta \\ \Delta & -e_i + \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} = E_i \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix}$$

1960年代: 核構造の多体問題

集団運動の微視的理論の始まり

非調和性、非線形効果の発見

→ 準粒子RPA, ボソン展開法、生成座標法, 対演算子法

1970年代: 重イオン核物理の始まり

高スピンイラスト分光学

→ 時間依存平均場理論(TDHF)

大振幅集団運動理論の試み

1971- Backbending現象の発見

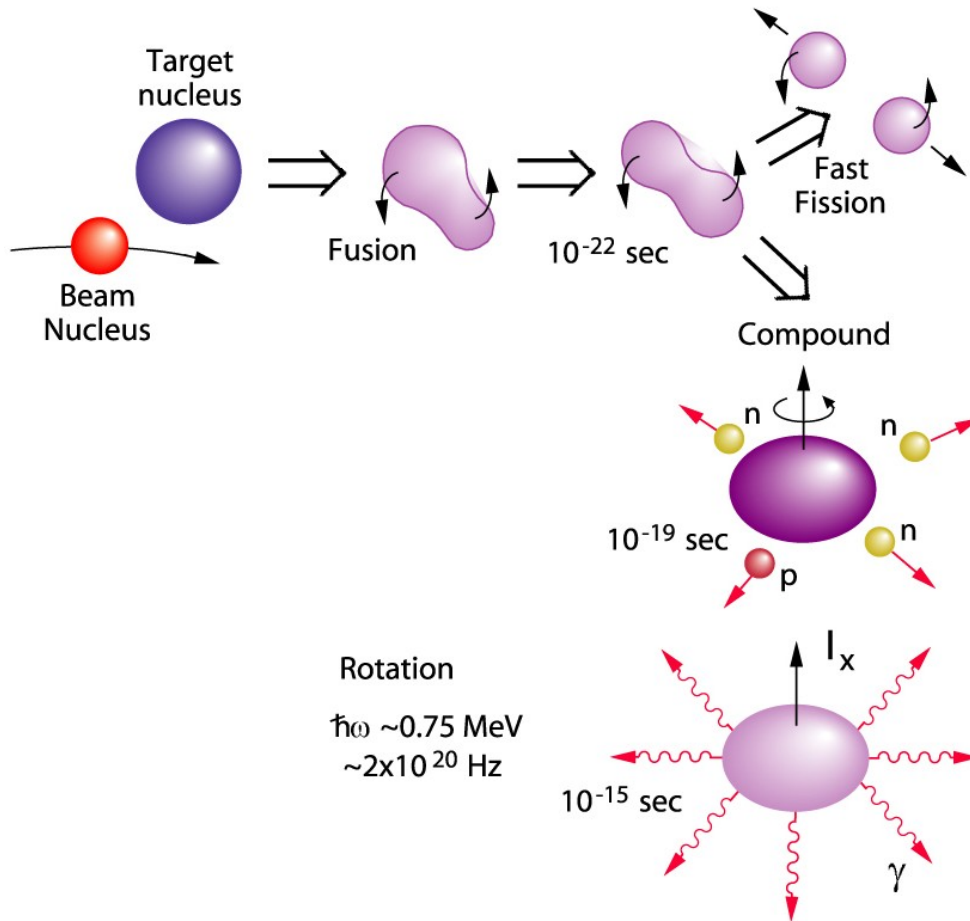
→ 回転座標系での準粒子シェルモデルの成立

1980年代: 高スピントンティアの発展

1986 超変形核の発見

多様な変形共存現象の発見

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

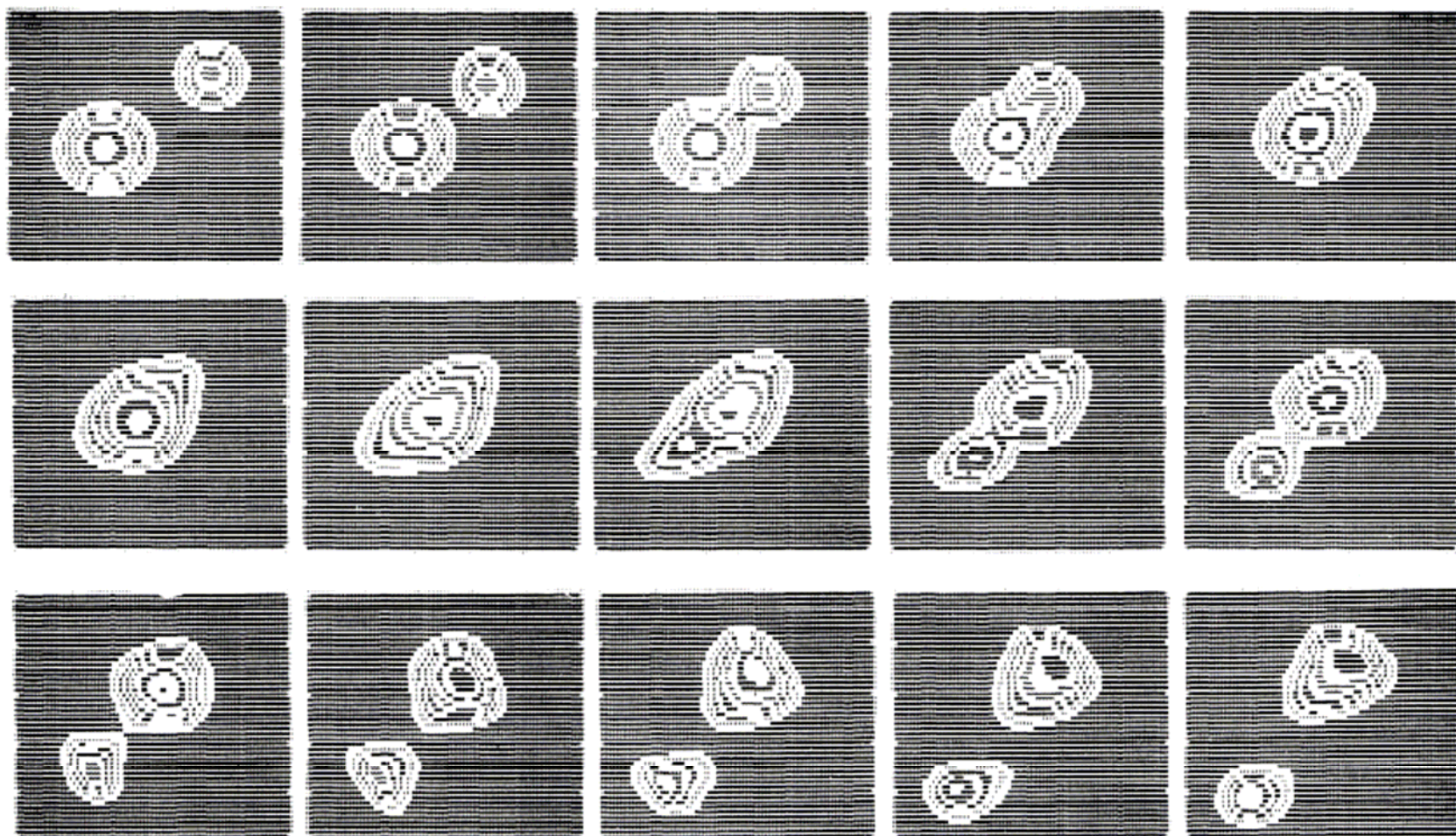


FIG. 38. Contour plots at sequential times of the density in the cm integrated over the normal to the reaction plane collision at a laboratory energy of 315 MeV. The initial angular momentum $l = 20\hbar$ corresponds to a nearly head-on

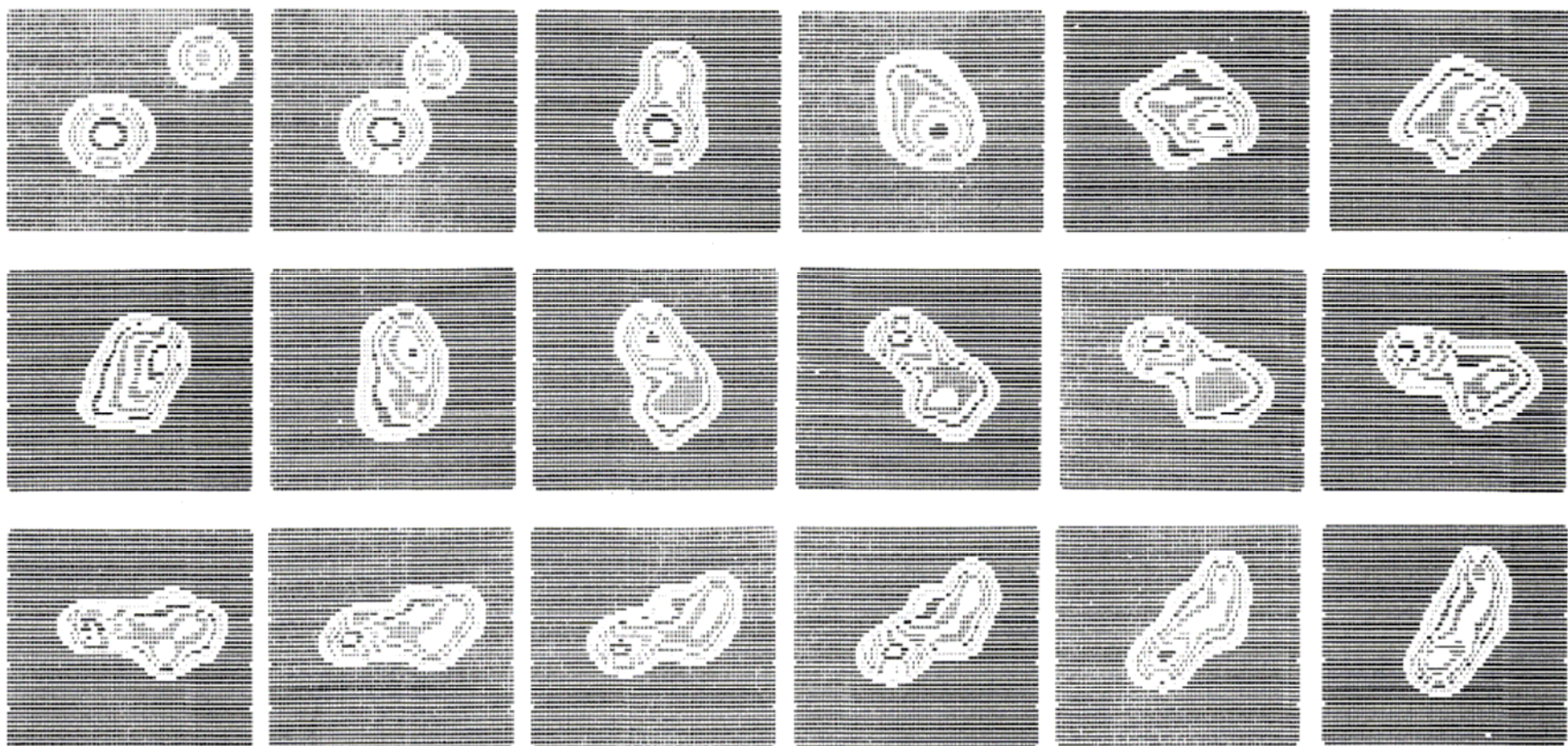


FIG. 39. Contour plots for the same reaction as in Fig. 38 with an initial angular momentum of $l = 60\hbar$.

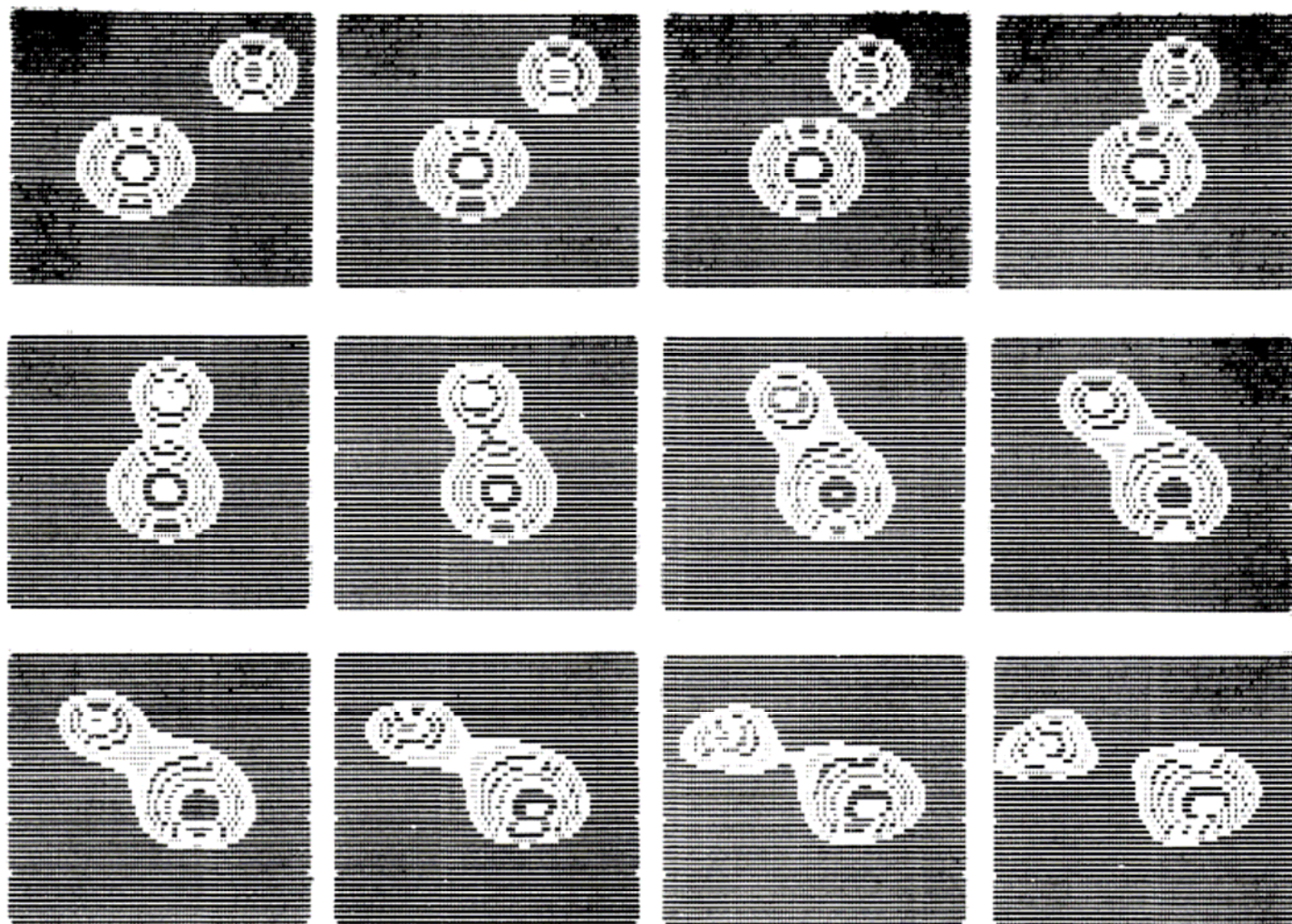
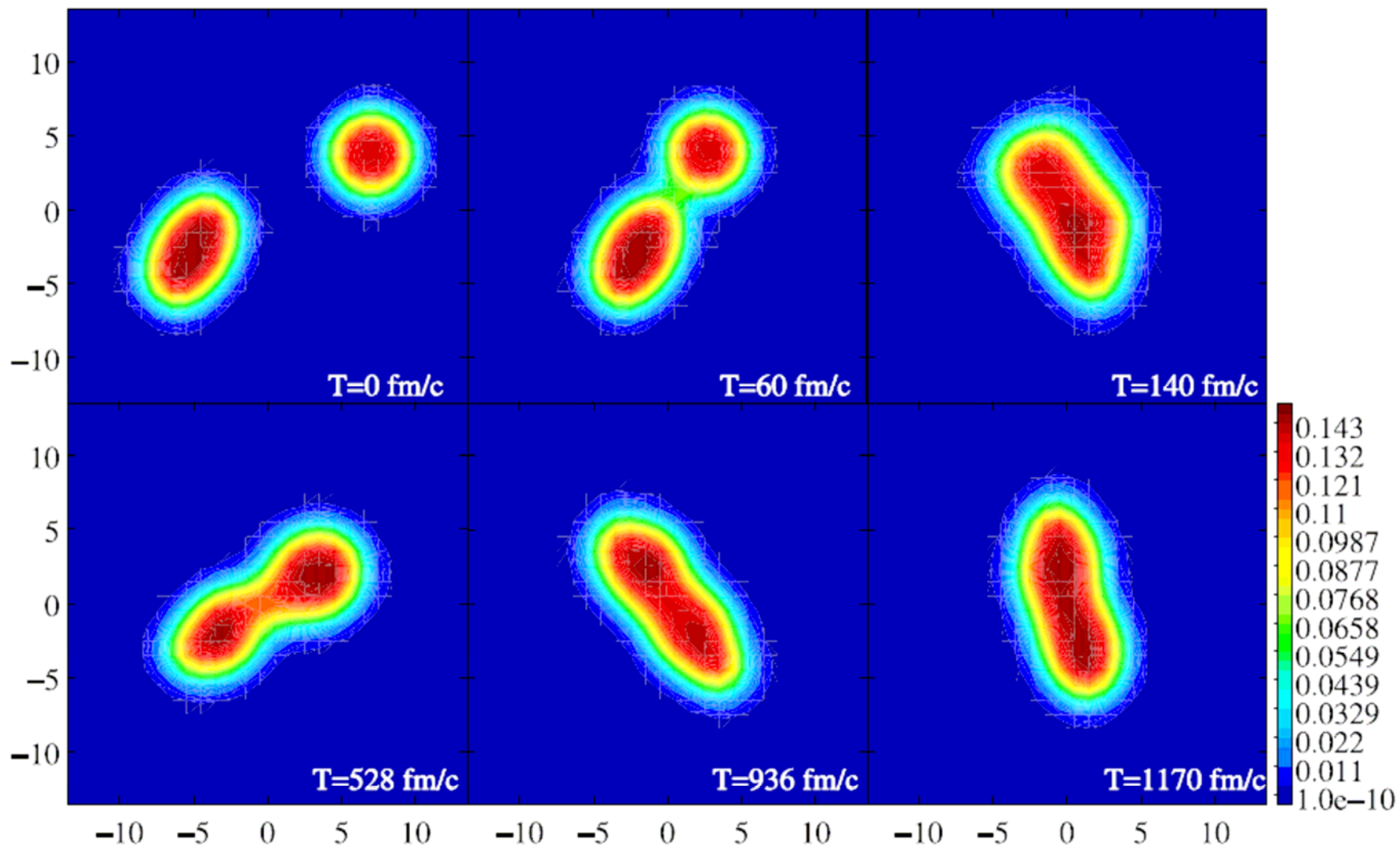


FIG. 40. Contour plots for the same reaction as in Fig. 38 with an initial angular momentum of $l = 80\hbar$.



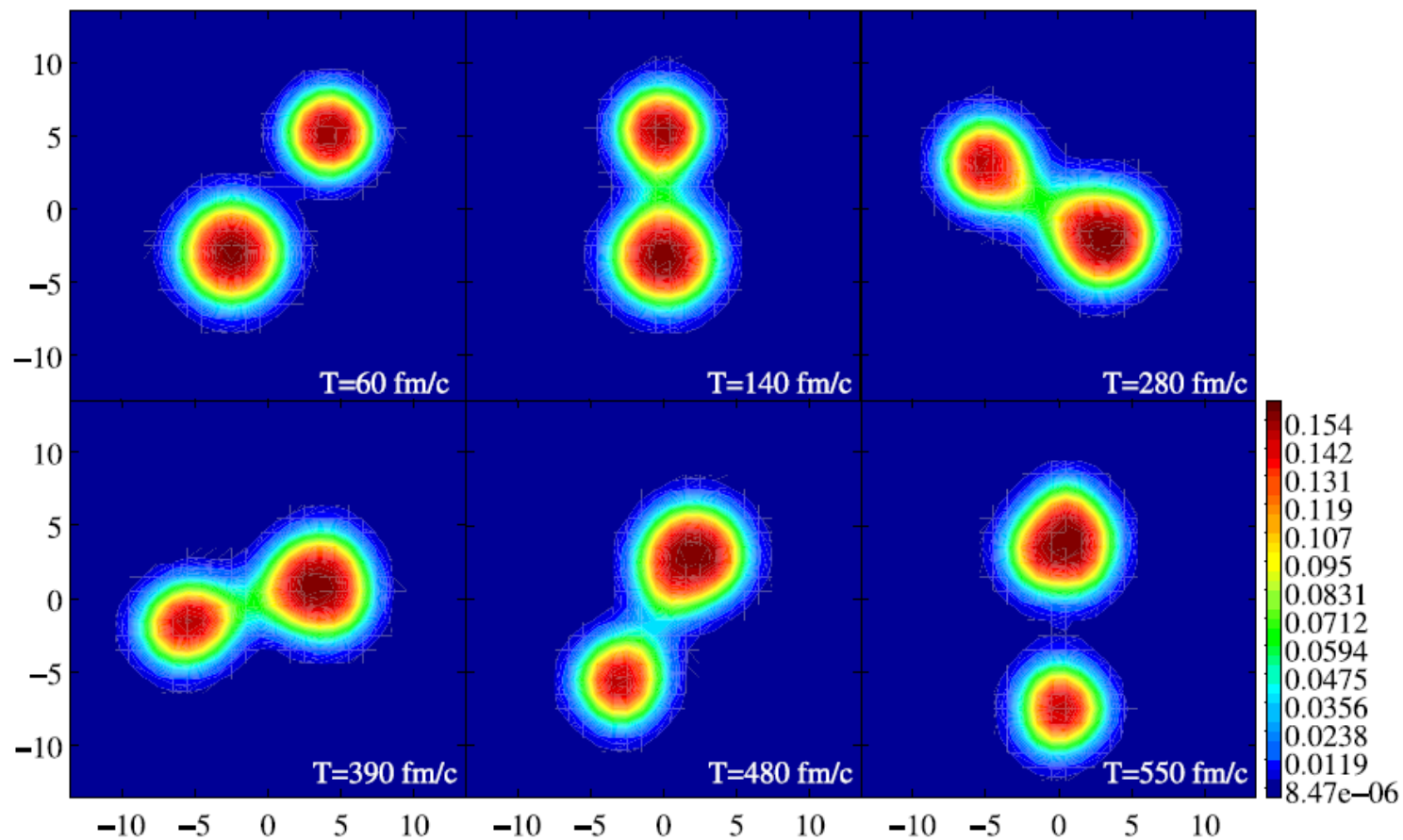
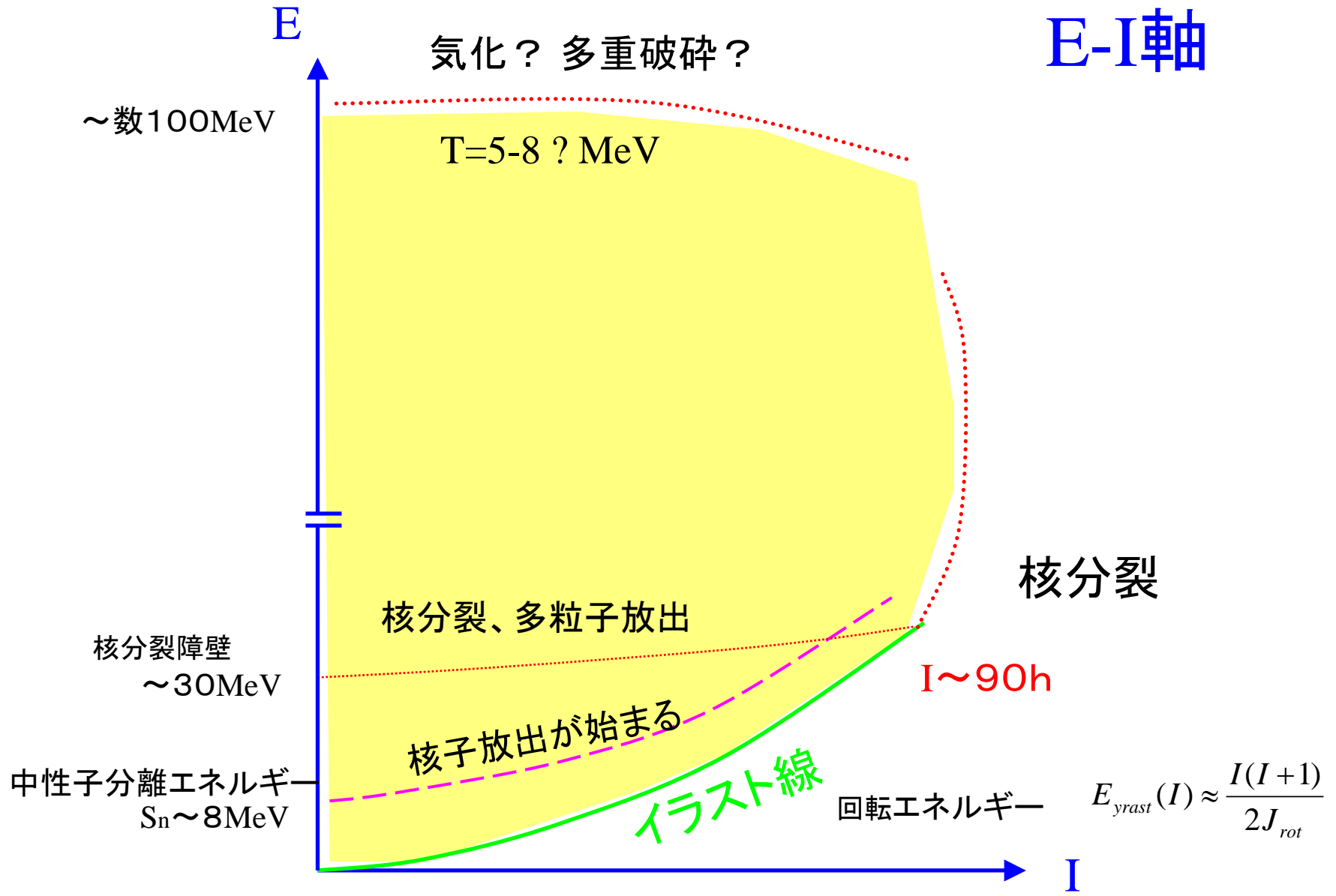


FIG. 4: (Color online) TDHF time-evolution for the $^{16}\text{O} + ^{28}\text{O}$ collision at an impact parameter of $b = 7.6$ fm, just above the fusion region, using the SLy5 interaction. The initial energy is $E_{cm} = 43$ MeV.

E-I軸



気化? 多重破碎?

T=5-8? MeV

~数100MeV

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

$$E_{yrast}(I) \approx \frac{I(I+1)}{2J_{rot}}$$

「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)

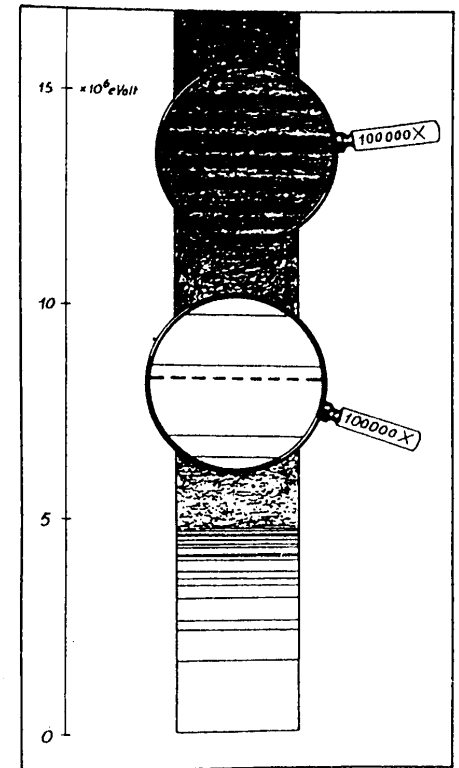
$$\rho_{tot}(E) \propto \exp(2\sqrt{aE})$$

- ボルツマン原理(ミクロカノニカル)

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

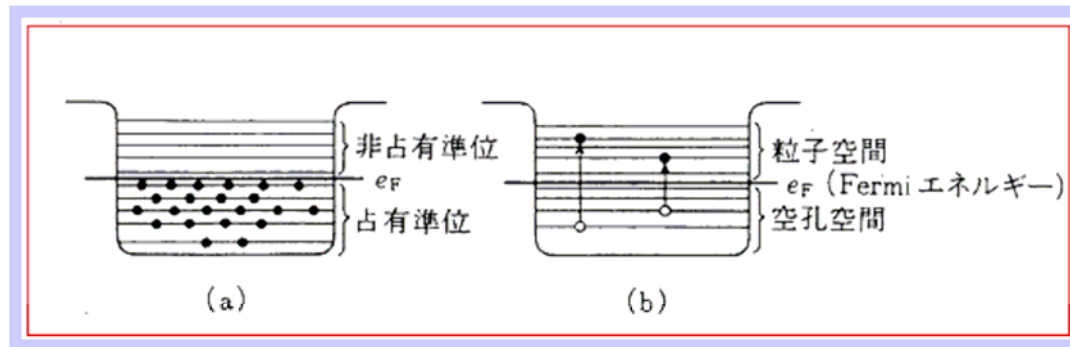
$$\frac{1}{T} = \frac{\partial}{\partial E} S(E) = \frac{\partial}{\partial E} \log \rho(E)$$

- 高い準位密度
- 核内の統計平衡



N. Bohr

ミクロな量子状態の数



$$N = {}_n C_r = \frac{n!}{r!(n-r)!}$$

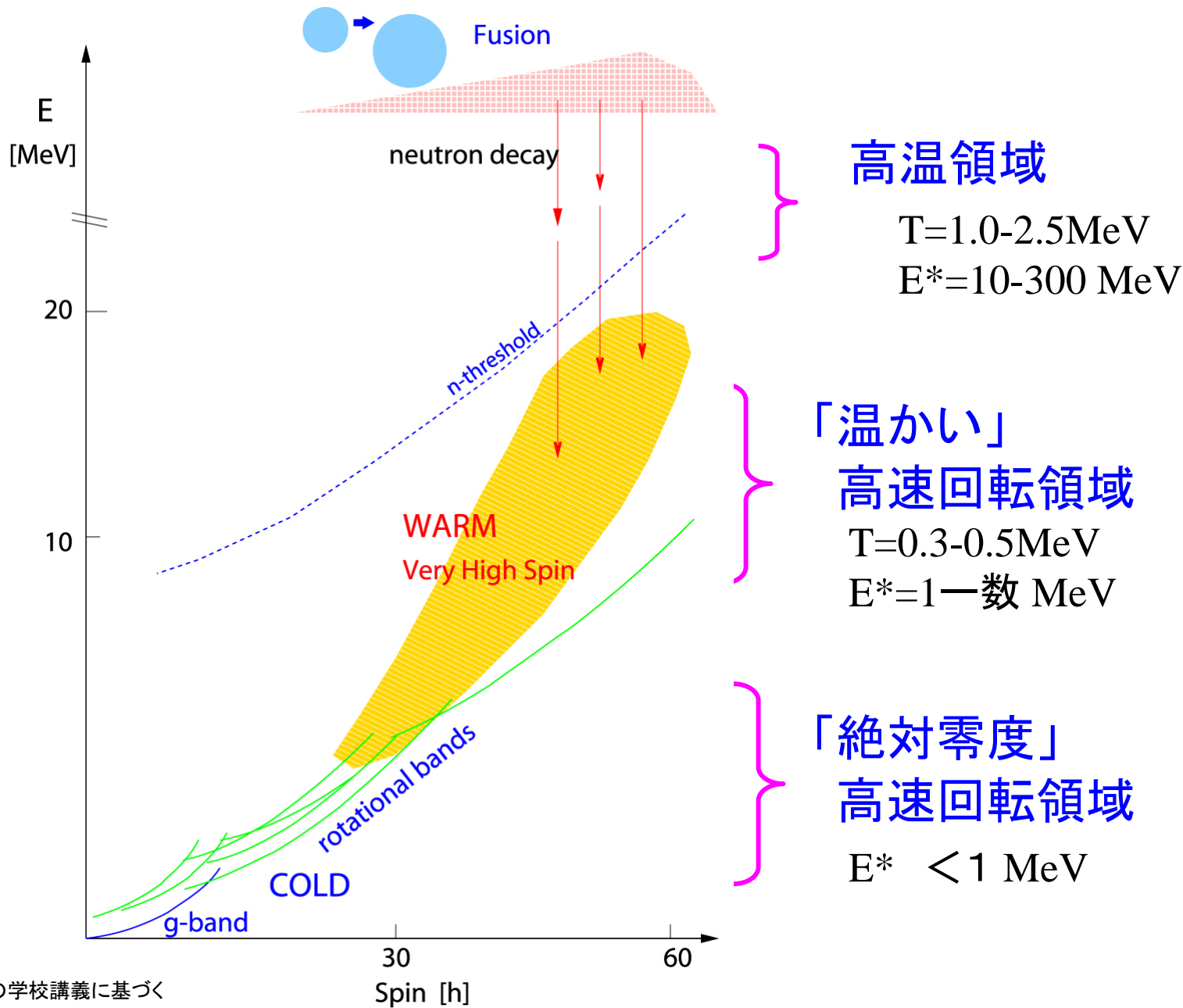
粒子空間と空孔空間が対称で $n = 2r$ の場合、Stirling の公式 $n! \simeq \sqrt{2\pi n} e^{-n} n^n$ を用いて計算すると

$${}_n C_r = \frac{(2r)!}{(r!)^2} \simeq \frac{\sqrt{4\pi r} e^{-2r} (2r)^{2r}}{(\sqrt{2\pi r} e^{-r} r^r)^2} \simeq 2^{2r}$$

例えば、 $r = 50$ に対して $N = {}_n C_r \simeq 2^{100} \simeq 10^{30}$

「原理的には記述できる」と言っても「物理的には」無意味

高励起原子核からのガンマ線



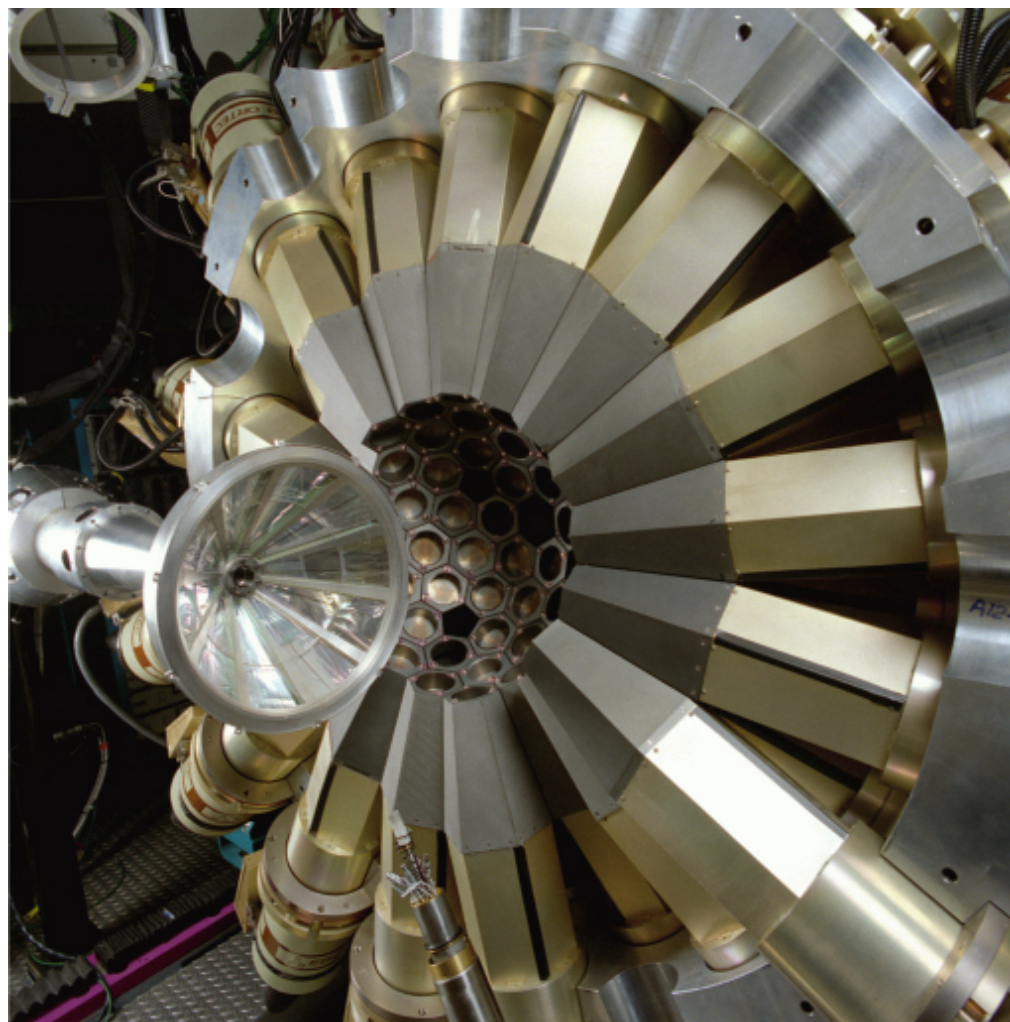
大規模ガンマ線検出器

数10個～数100個
のガンマ線検出器

- 高効率
- 多重計測

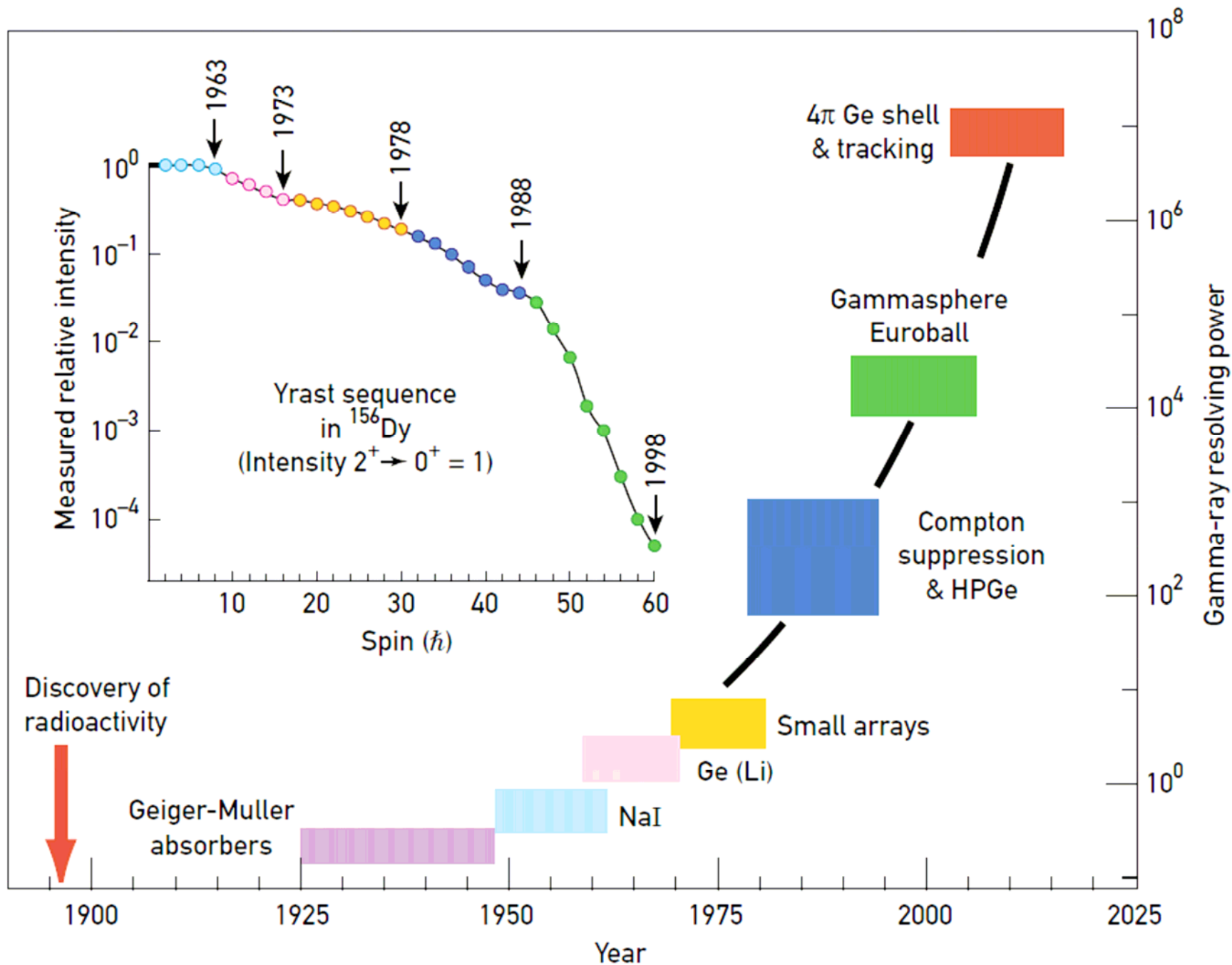
Gammasphere

EuroBall

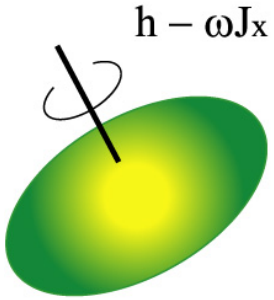


<http://www-gam.lbl.gov>

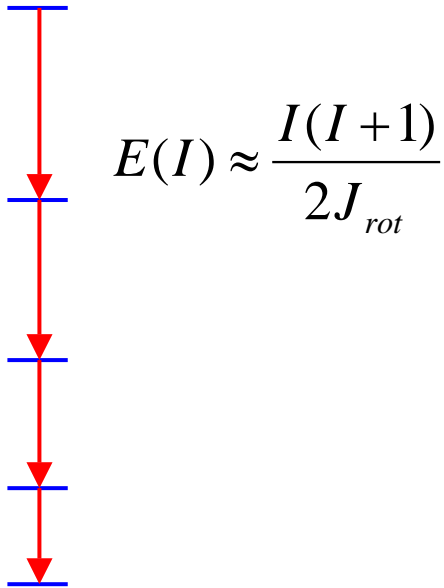




変形核の回転バンドスペクトル

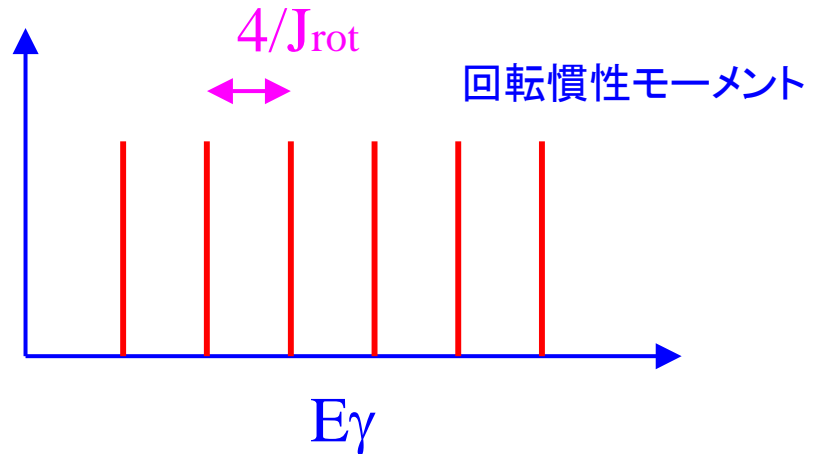


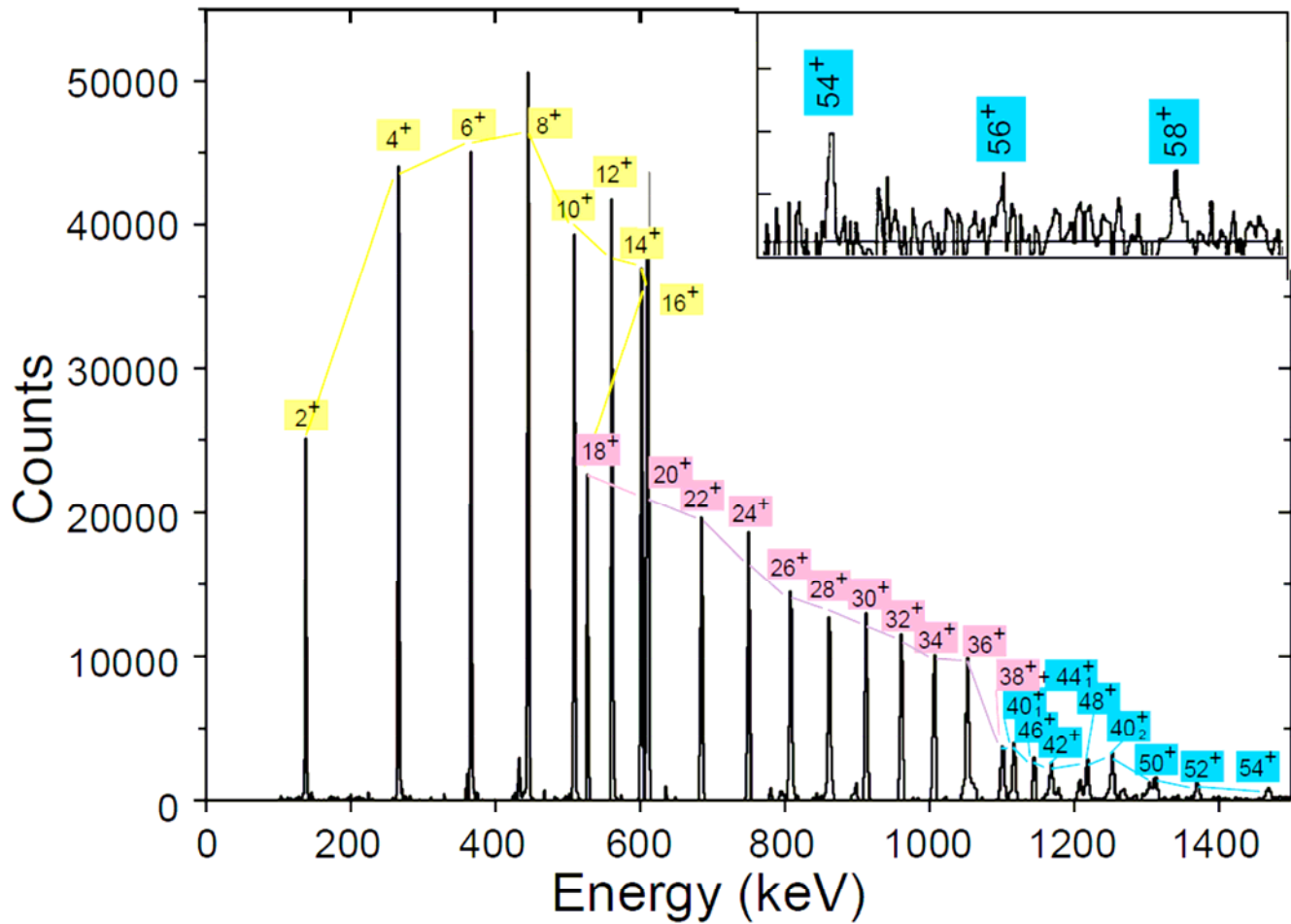
回転バンド



ガンマ線スペクトル

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



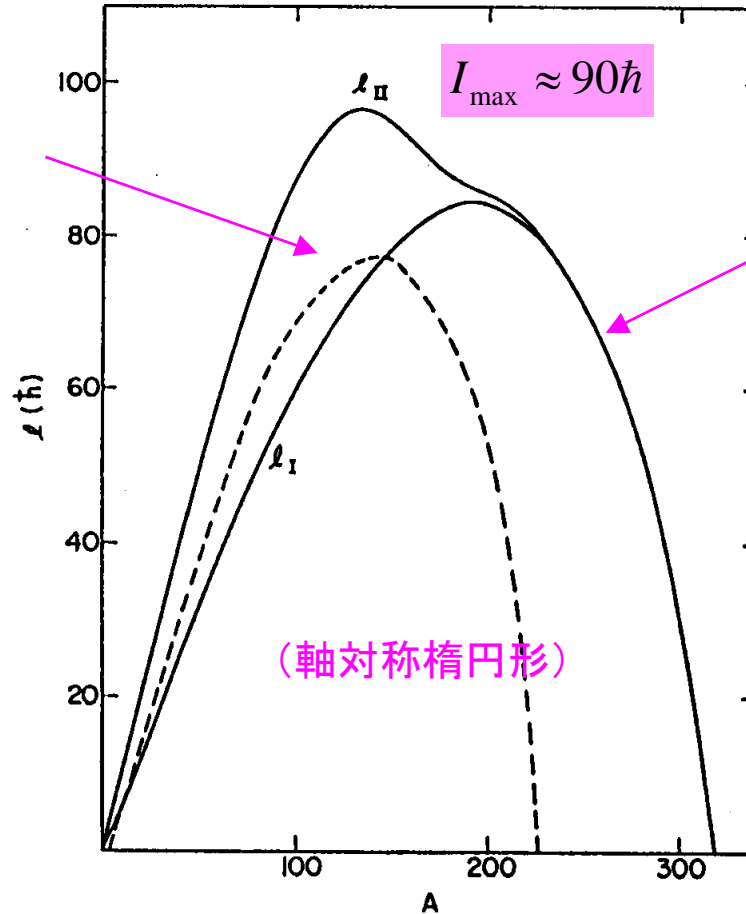


最大角運動量

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

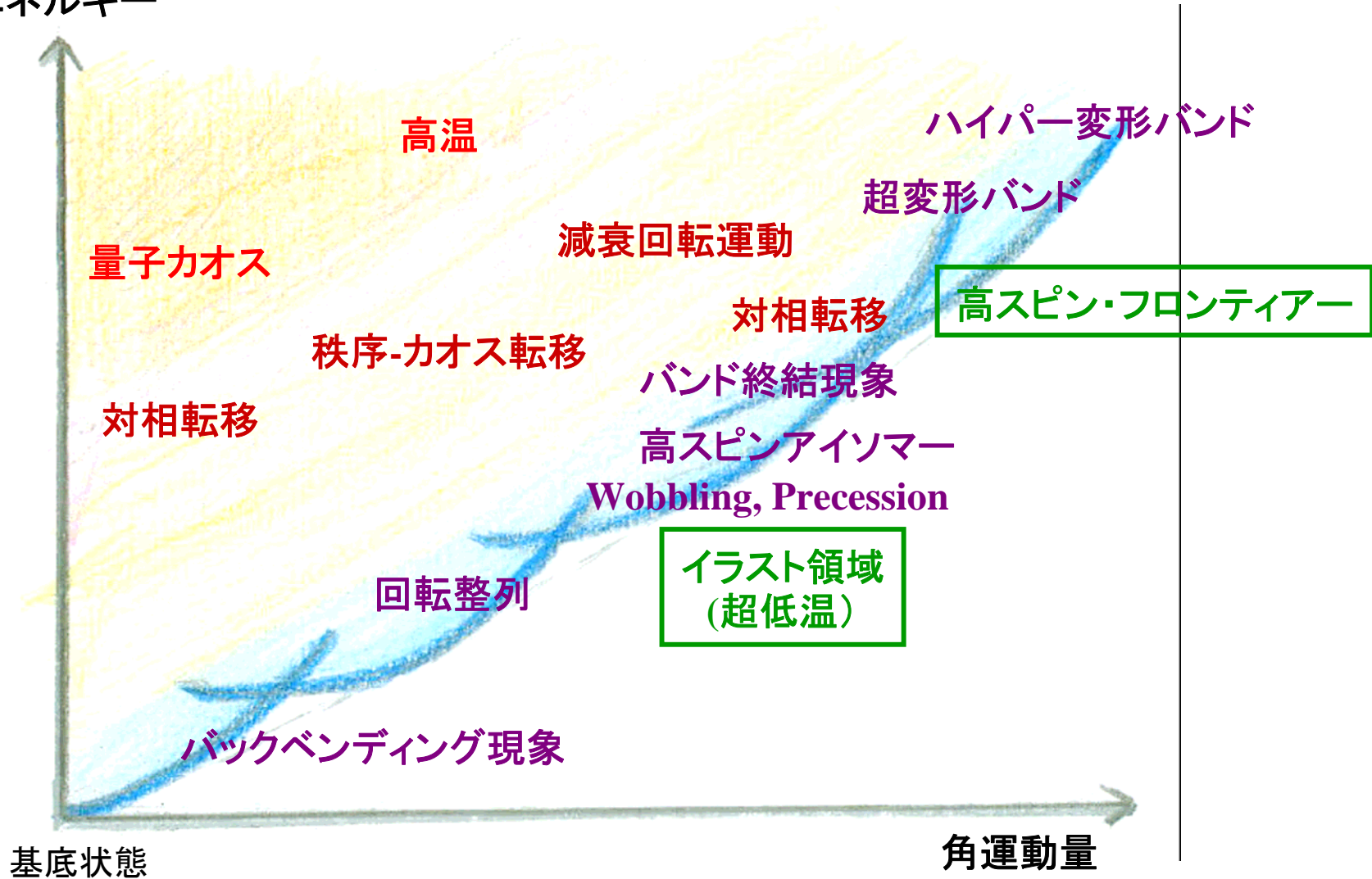


クーロン力と
遠心力

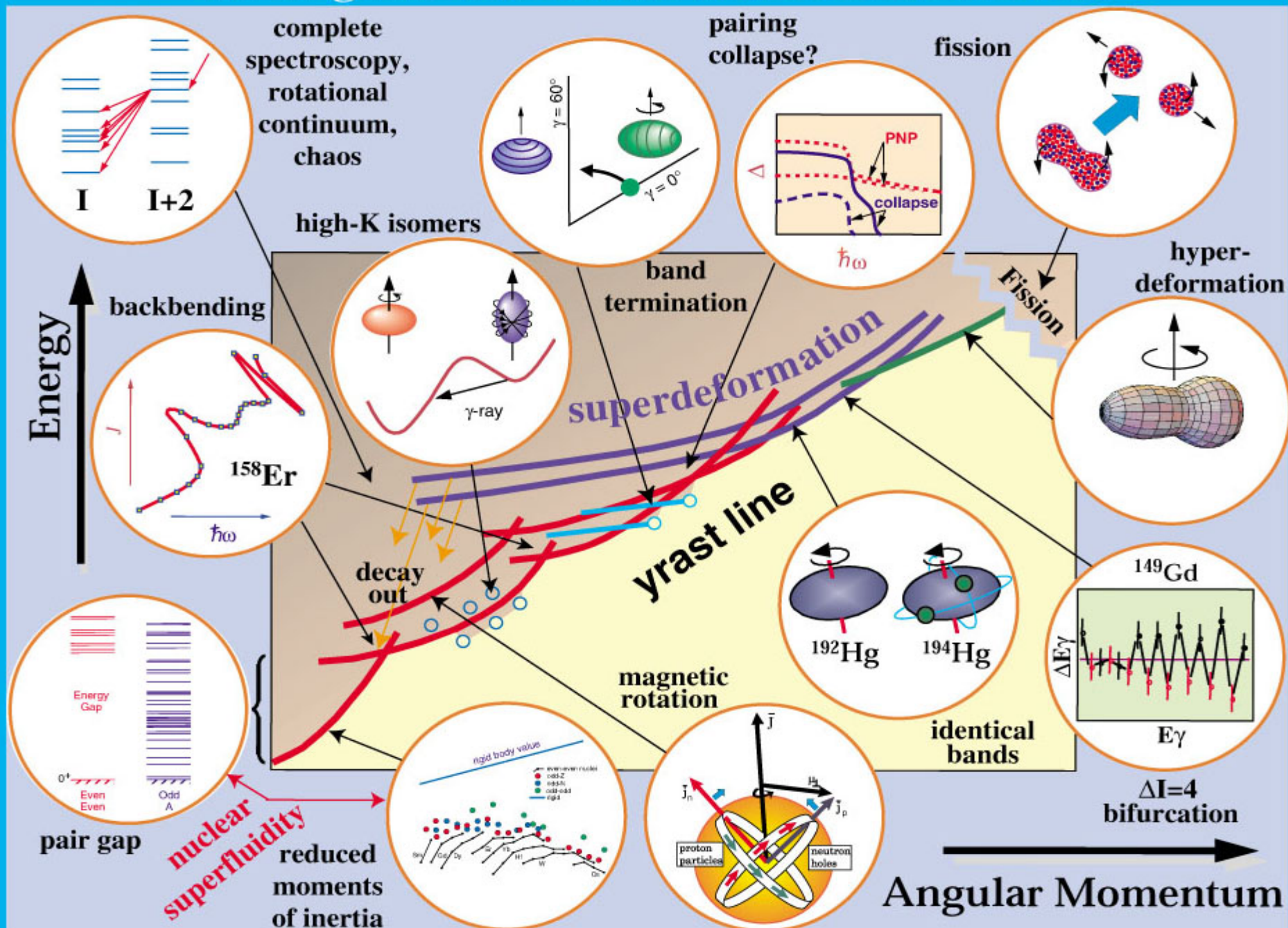
質量数

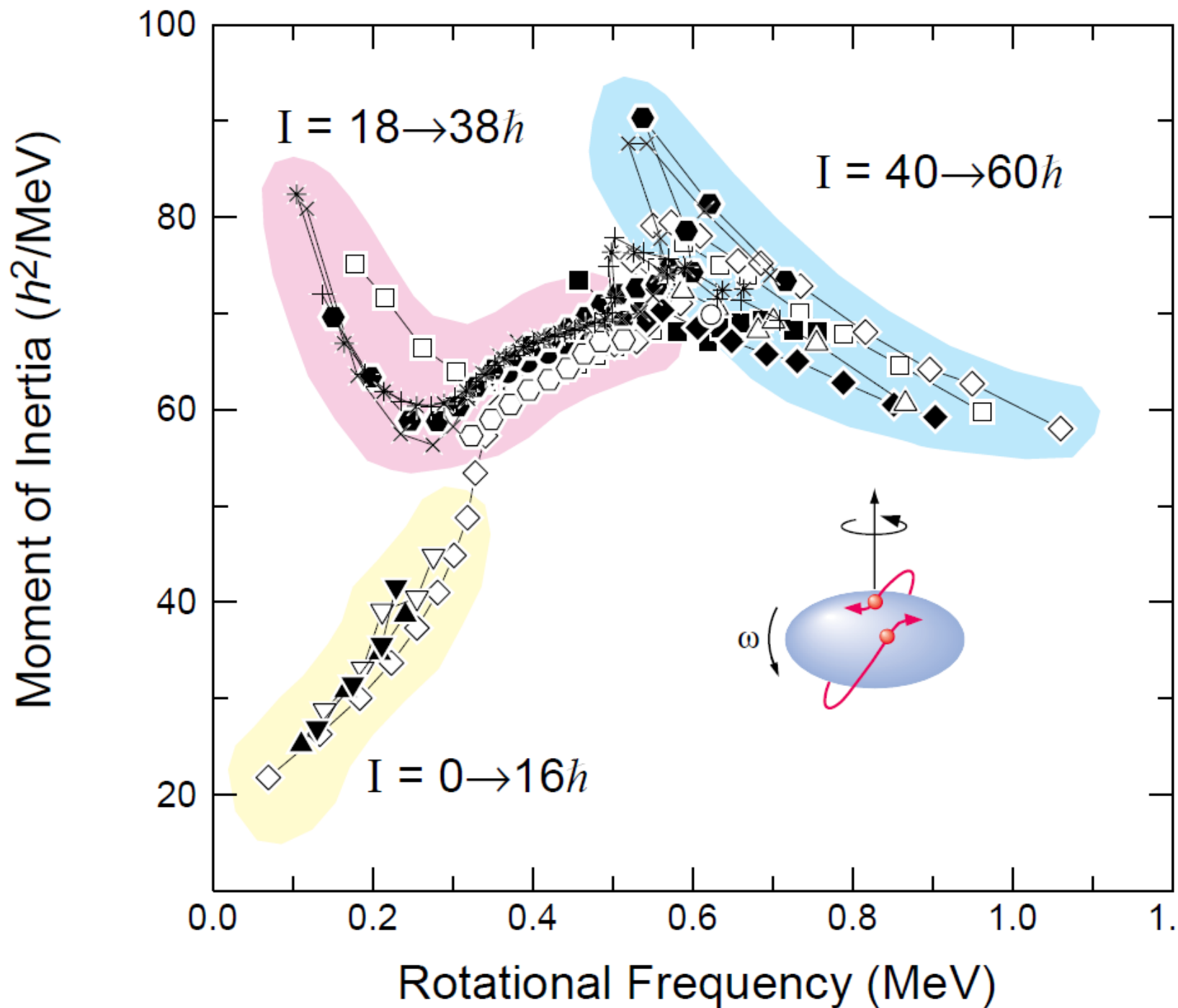
核構造における秩序とカオス

励起エネルギー



The Angular Momentum World of the Nucleus



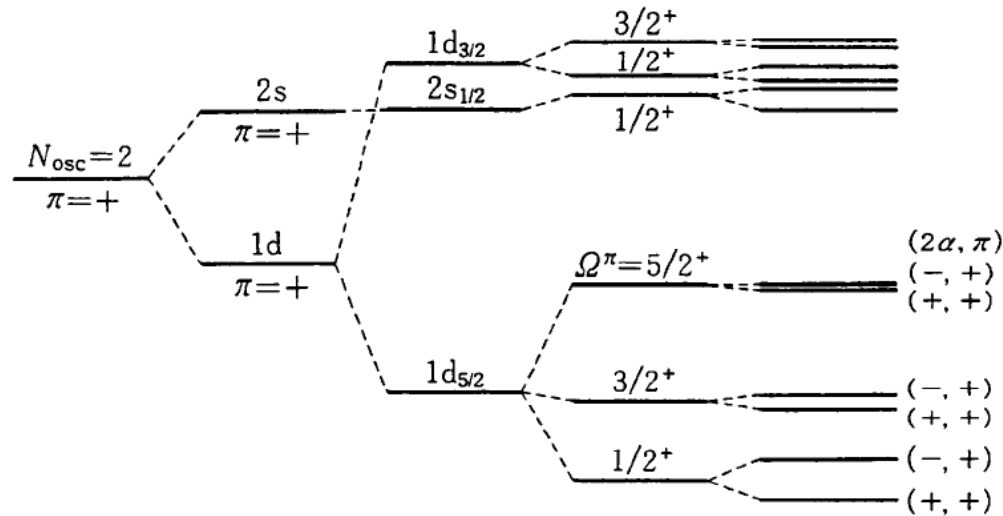


一粒子運動の一般化

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

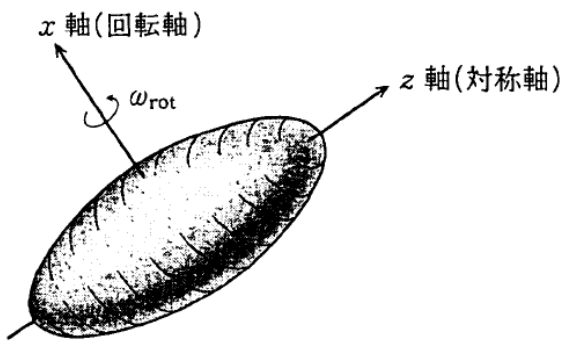
高速回転 \longrightarrow 時間反転対称性の破れ \longrightarrow 回転系準粒子モード



	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}, π)	(n, l, π)	(n, l, j, π)	(Ω, π)	(α, π)
縮退度	$(N_{osc}+1)(N_{osc}+2)$	$2(2l+1)$	$2j+1$	2	1

回転座標系での準粒子シェルモデル

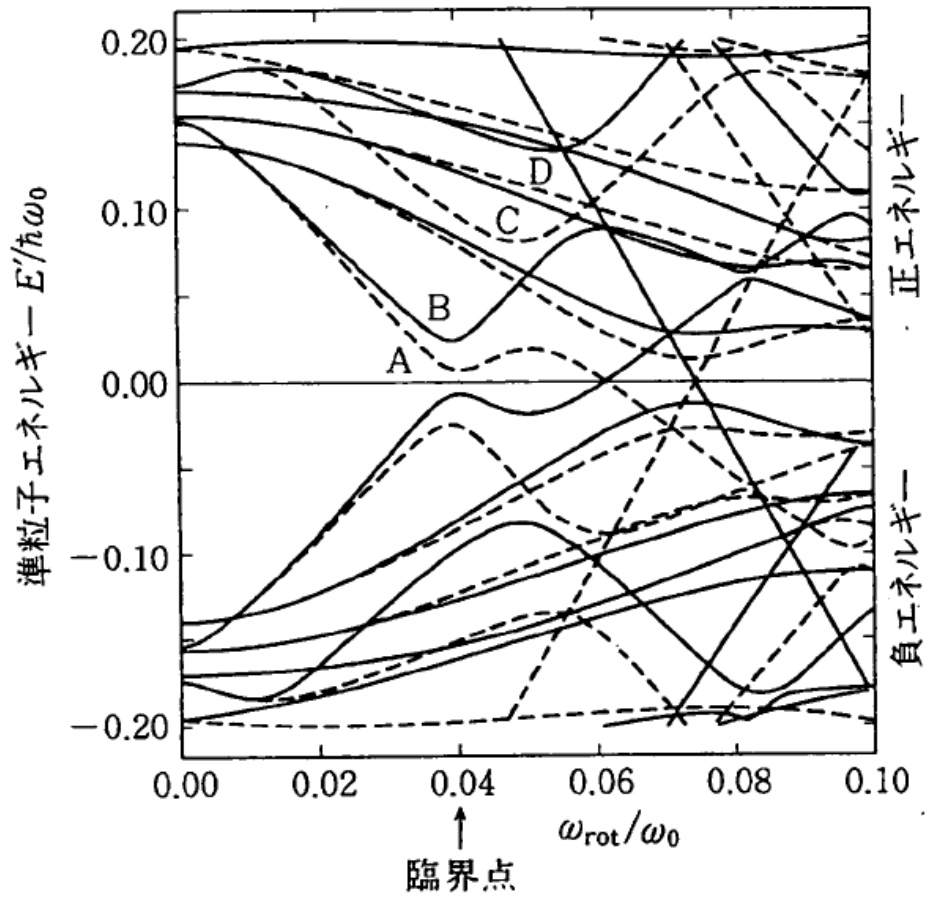
$$\begin{aligned}
 H &= \sum_i (e_i - \lambda) c_i^\dagger c_i - \Delta \sum_i (c_i^\dagger c_i^\dagger + c_i c_i) - \omega_{\text{rot}} \sum_{i,j} \langle i | J_x | j \rangle c_i^\dagger c_j \\
 &= \sum_\mu E_\mu a_\mu^\dagger a_\mu + \sum_{\bar{\mu}} E_{\bar{\mu}} a_{\bar{\mu}}^\dagger a_{\bar{\mu}}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



変形、対凝縮、回転による
対称性の破れ

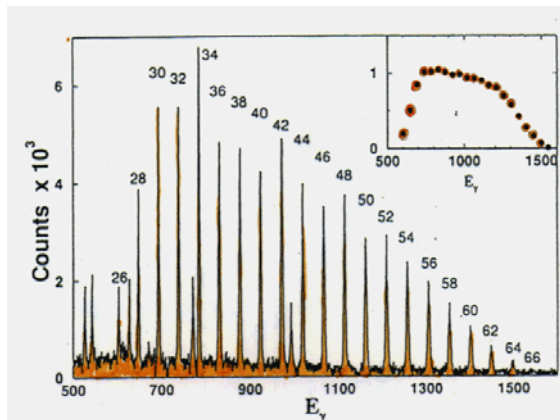


一般化された1粒子運動モード

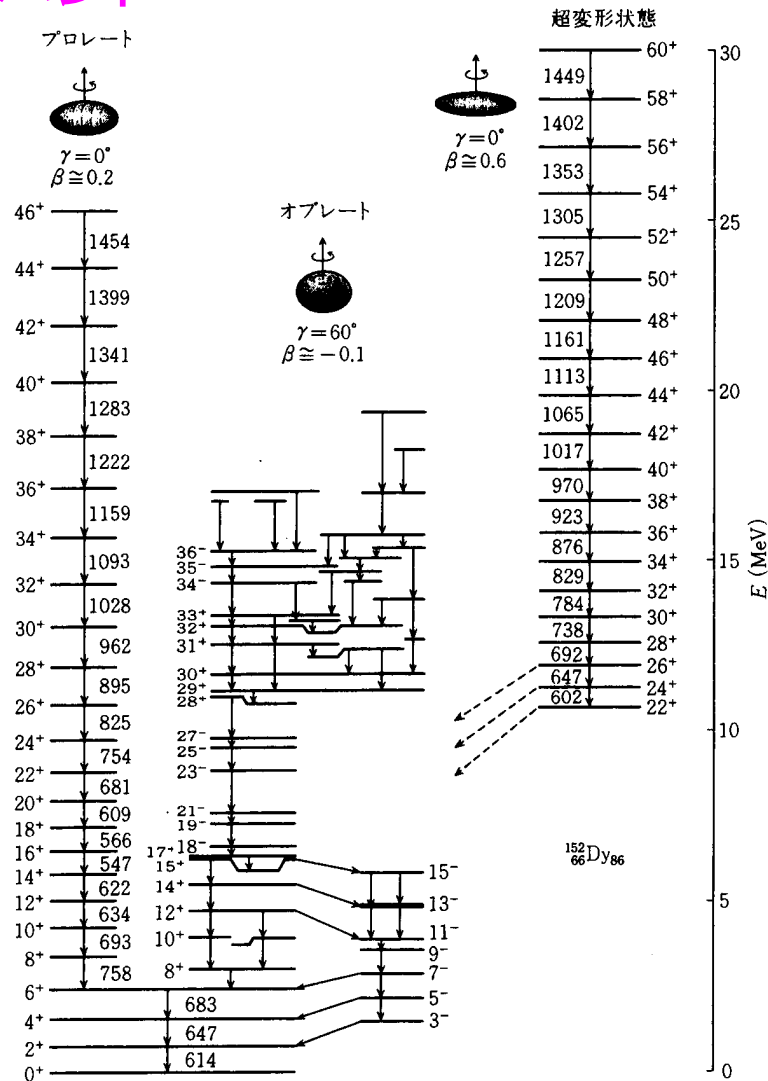
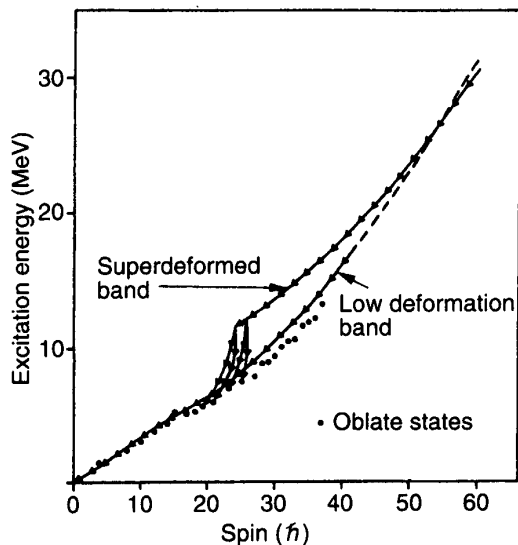


高速回転領域の核構造

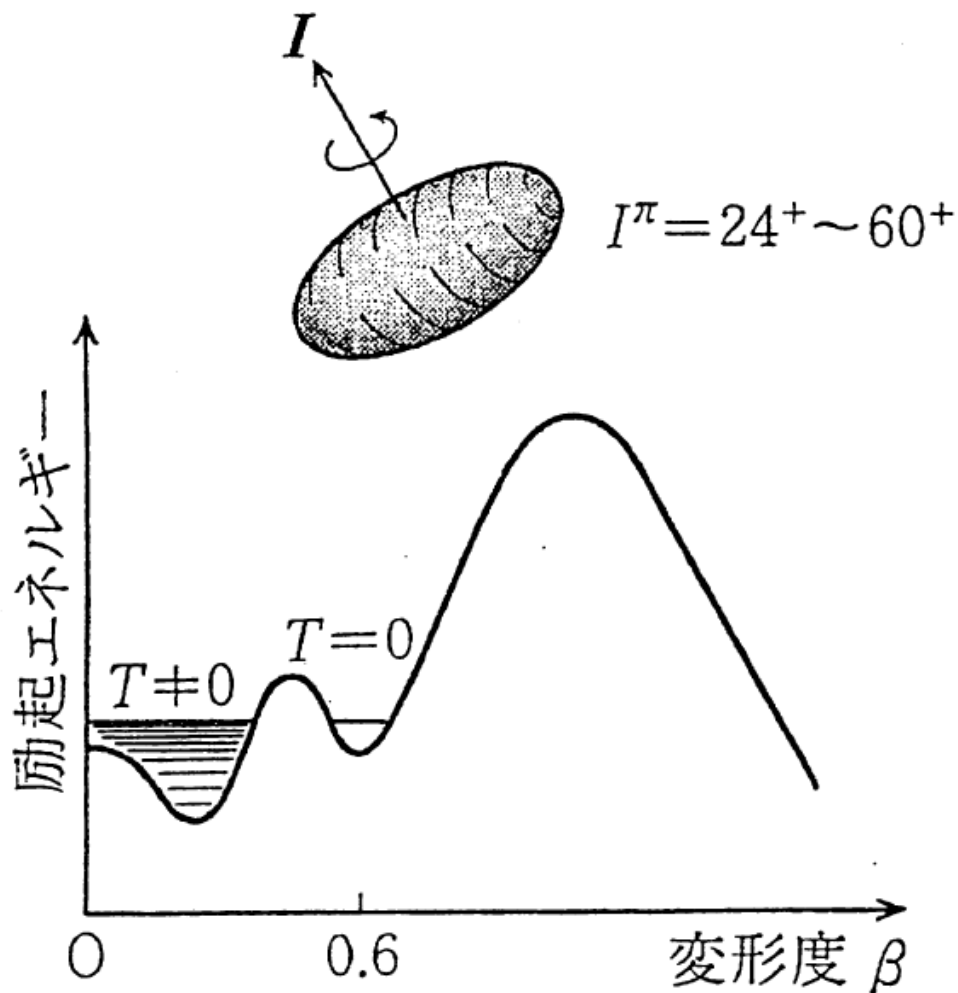
超変形回転バンド



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



高速回転する超変形状態

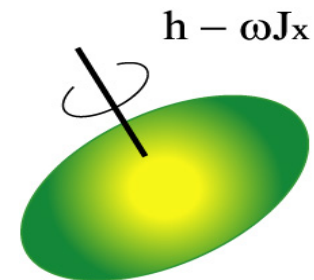
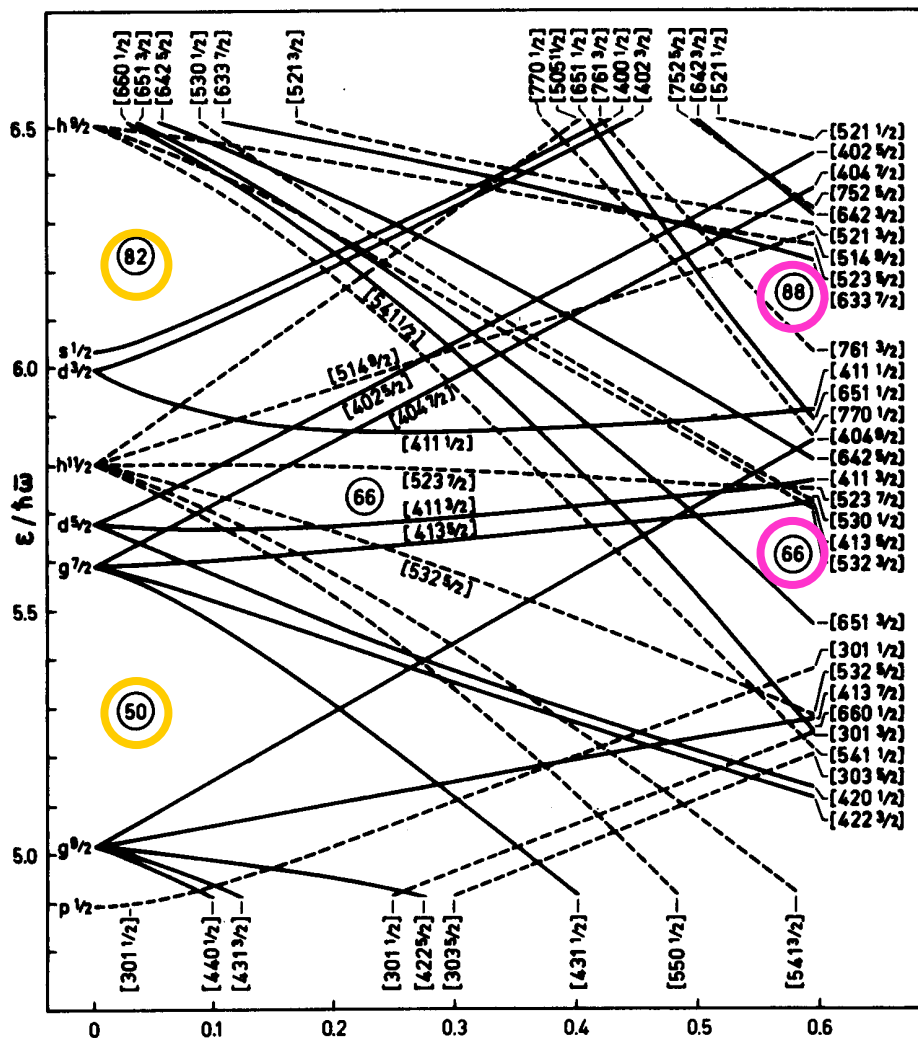


平均場の第2極小点
(二つの真空)

超変形状態から
常変形状態への
巨視的トンネル現象

変形原子核の1粒子軌道

Nilsson模型



δ → 四重極変形度

軸比

1:1

球形

2:3

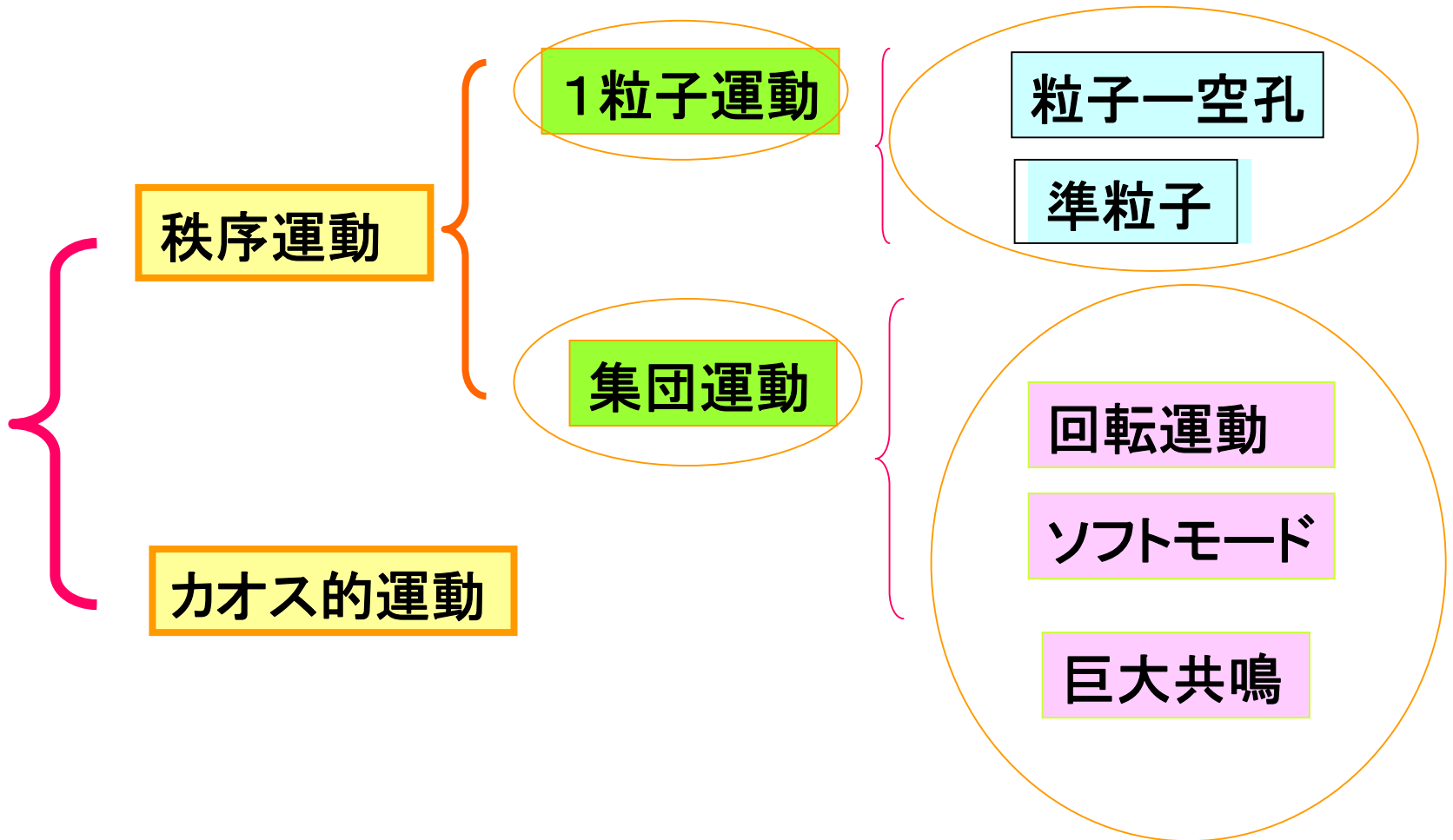
通常変形

1:2

超変形

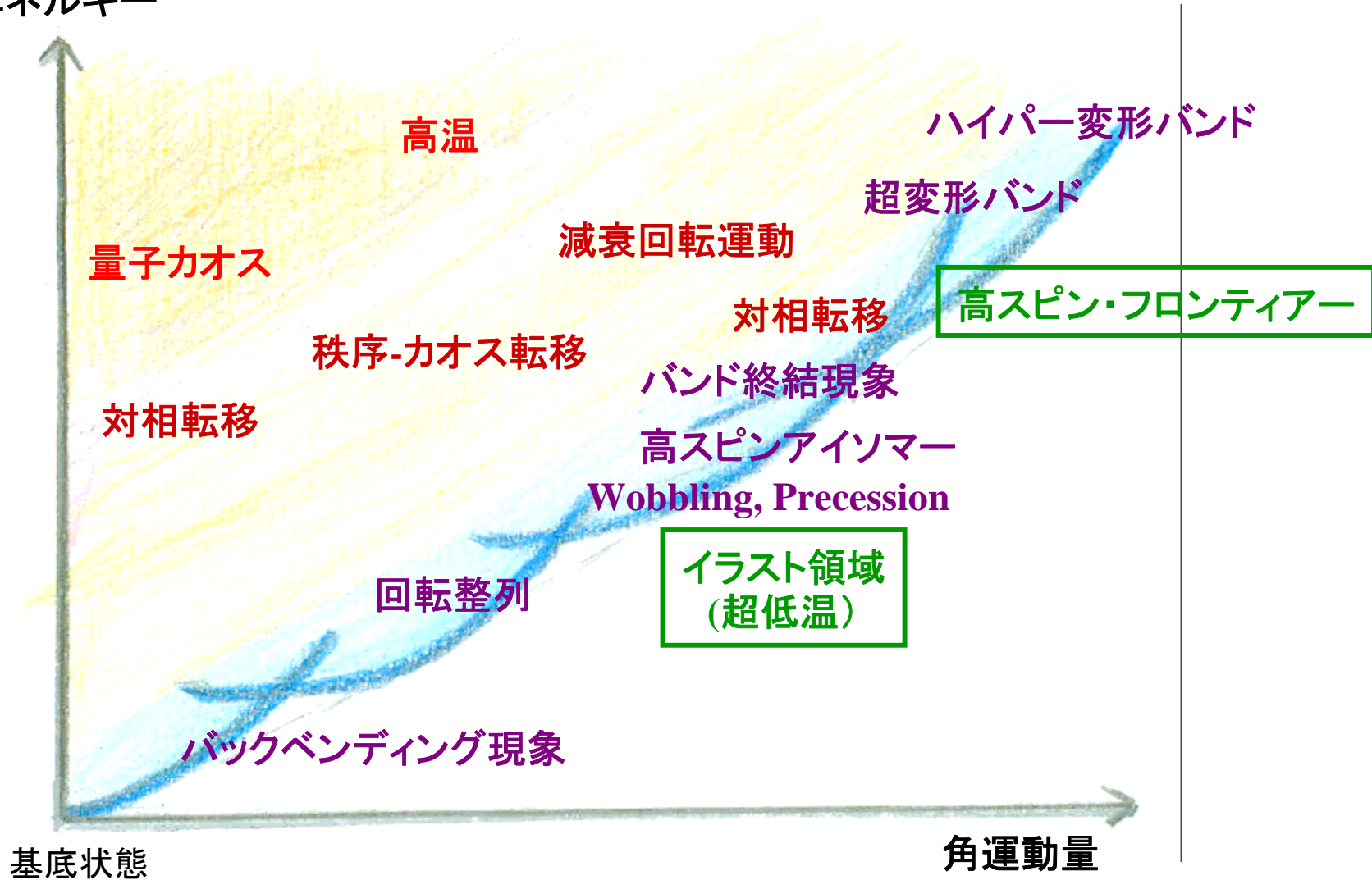
四重極変形度

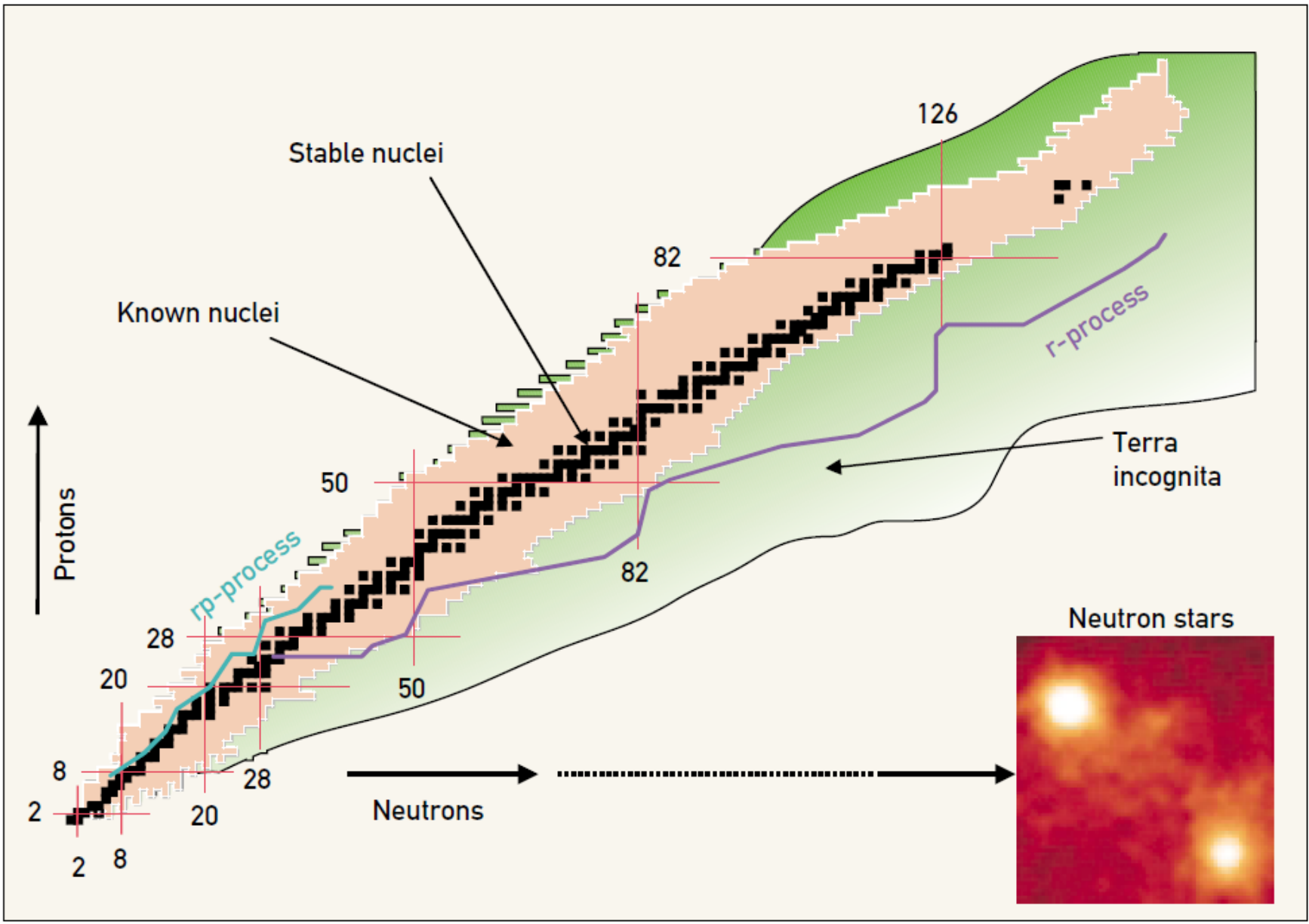
核構造の大統一理論にむけて



核構造における秩序とカオス

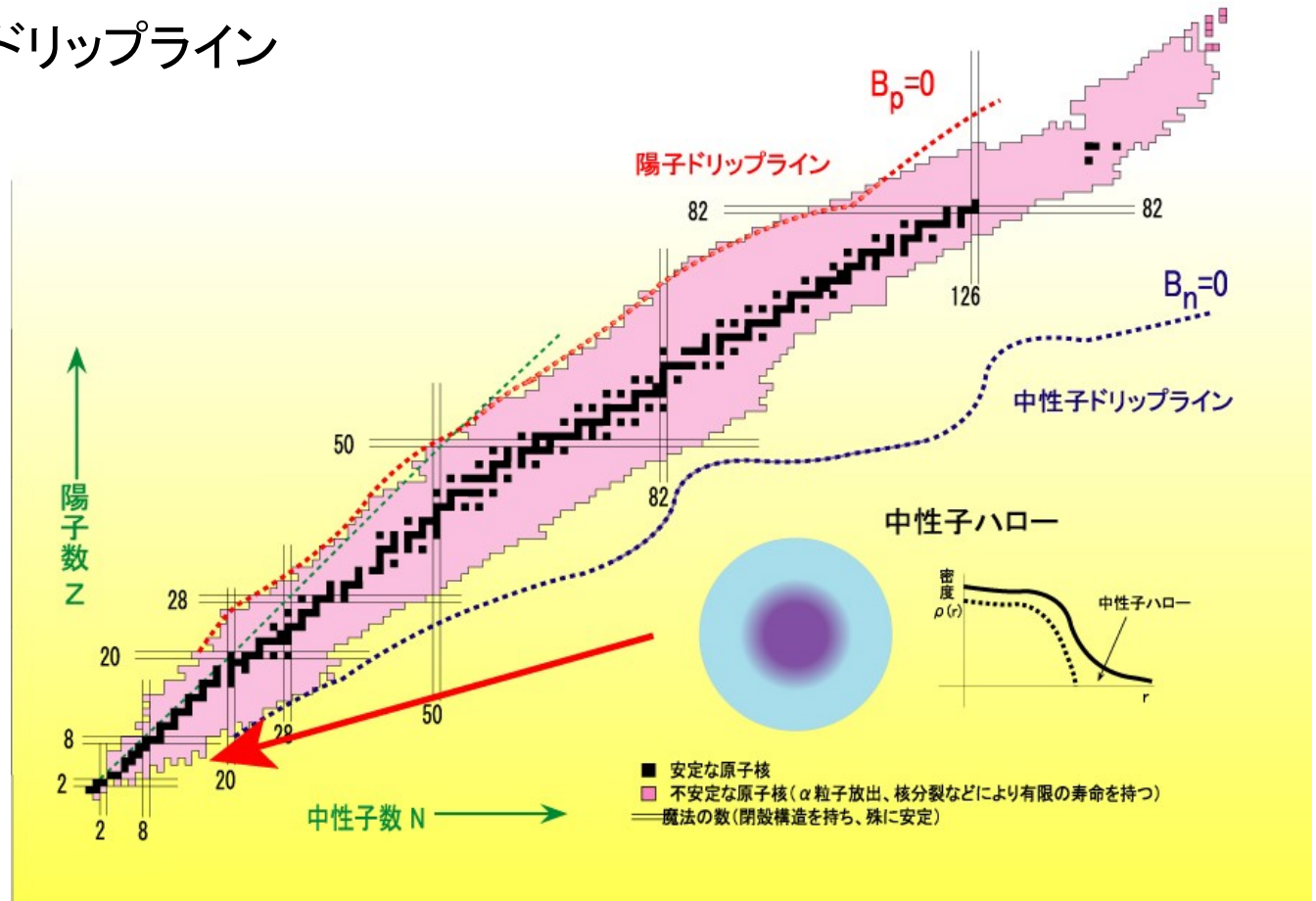
励起エネルギー





N,Z軸 一核図表

- 安定核種 と 不安定核
- 中性子、陽子ドリップライン
- 超重元素



1990年代：非イラスト核構造論の始まり

高温状態での集団運動

秩序運動からカオス運動への転移領域の探求

→ 温かい核の減衰回転や巨大共鳴

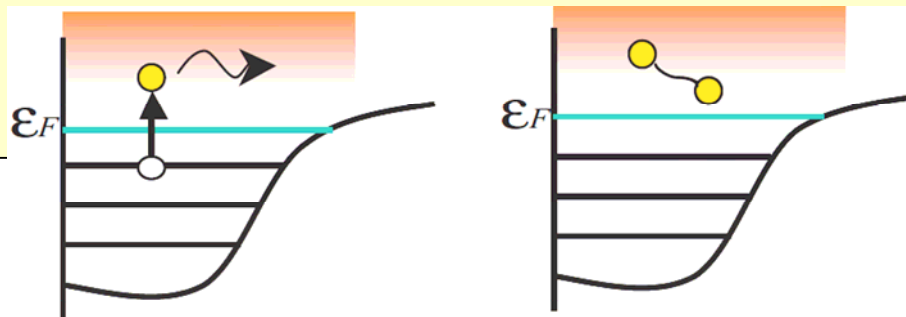
不安定核研究の始まり

→ 中性子ハロー、スキンの発見

2000年代：不安定核ビームを用いた核物理の時代

ドリップ線近傍における新現象

弱束縛系の多体問題



この50年間は核構造論にとってどういう時代であったか

あえて一言で言えば

微視的モデルが進展した時代

安定核どうしの衝突によって、
高い励起状態、高スピン状態など
極限状況の原子核をつくりだし、
量子多体論にもとづく核構造論がおおいに進展し、
原子核という不思議な物質に対する描像が
革新した時代



そして今、不安定核ビームをもちいた
新しい時代が始まろうとしている
この状況は、構造論と反応論を
統一する新しい課題を提起している