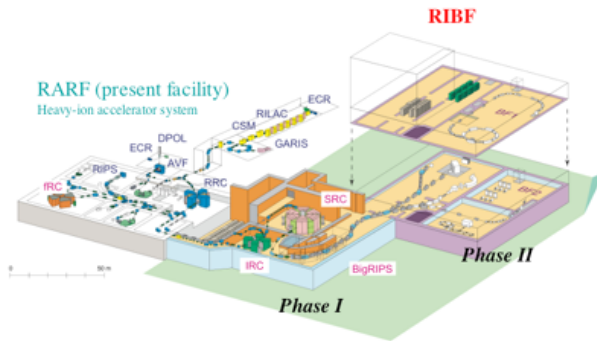


# この講義のねらい

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



これまでに築きあげられてきた概念を  
生き生きとした形で吸収することが肝要

先輩達は如何にしてこの学問を築いてきたか

形骸でなく、その本質を継承したい

少なくともこれだけは知って欲しい現代的な核構造の基本概念を精選する

# 「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  
高スピントンティアー
- 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

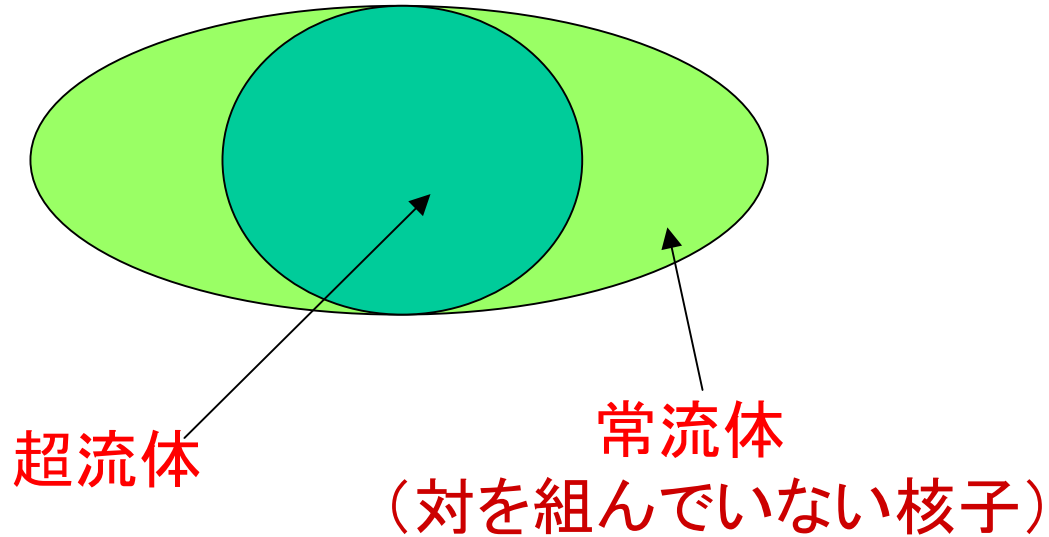
## Chapter 5 大振幅集団運動論

- 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

# 変形核



これは傑作!

本当は**Nuclear Superfluidity**は表面現象

このような誤解の生じる原因について考えてみよう

## 質問集 (その1)

---

**問1** この50年間の核構造理論において最も基本的で重要な進展とあなたが考えるものを3つ挙げてください。

**問2** 球形核の第1励起 $2^+$ 状態に対して液滴モデルの描像を適用することは妥当(妥当でない)ですか。その理由は何ですか。

**問3** アイソスカラー四重極巨大共鳴状態に対して液滴モデルの描像を適用することは妥当(妥当でない)ですか。その理由は何ですか。

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

---

- 
- 問5** Bohr-Mottelsonのノーベル賞に至った**最も重要なアイデア**は何だと思えますか。
- 問6** あなたは液滴モデルとシェルモデルの**統一モデル**が既に出来ていると考えますか。
- 問7** 「核構造は殻模型によって**原理的には**記述できる」という見方がありますが、これに対して、あなたはどうか考えますか。
- 問8** 変形した原子核はなぜ存在するのですか。**何が「変形」しているのですか。**
- 問9** なぜプロレート変形した原子核の方がオブレート変形した原子核より 沢山存在するのですか。
- 問10** 核構造にBCS理論が適用されていますが、無限系での超流動と**核構造での超流動**とは どこが共通で、どこが違っていませんか。
- 問11** 核構造論に**相転移**の概念を適用することは妥当(妥当でない)ですか。その理由は何ですか。妥当と考える場合、無限系での相転移と何が共通で何が違いますか。
- 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と応えられた場合、その実験的証拠は何ですか。
-

# 原子核



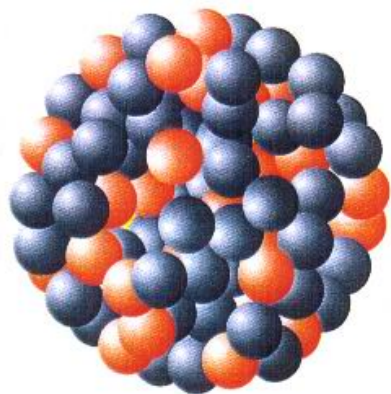
この描像は間違っている！

# 原子核

原子核は

- 1) 量子力学の世界  $\Rightarrow$  粒子性と波動性
- 2) フェルミ粒子の集団  $\Rightarrow$  パウリ原理
- 3) 有限個数の多体系  $\Rightarrow$  表面効果

$\Rightarrow$  メゾスコピック系



奇妙な性質

- a) 強い力で結合した高密度のシステムなのに  
..... 核子は独立に運動する
- b) 協同して..... 集団運動する
- c) お互いに衝突して..... カオス的に振る舞う

この描像は間違っている！

このようにお互いに矛盾する性質を

..... どのように考えたら

..... 統一的に理解できるだろうか？

# Key Concepts

秩序



カオス

粒子性



波動性

集団的



個別的

古典的



量子的



平均



ゆらぎ

巨視的



微視的

断熱的



透熱的

対称性の破れ



回復

弾性



塑性

お互いに対立するものは相補的である (N. Bohr)



# 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 高スピンフロンティアー

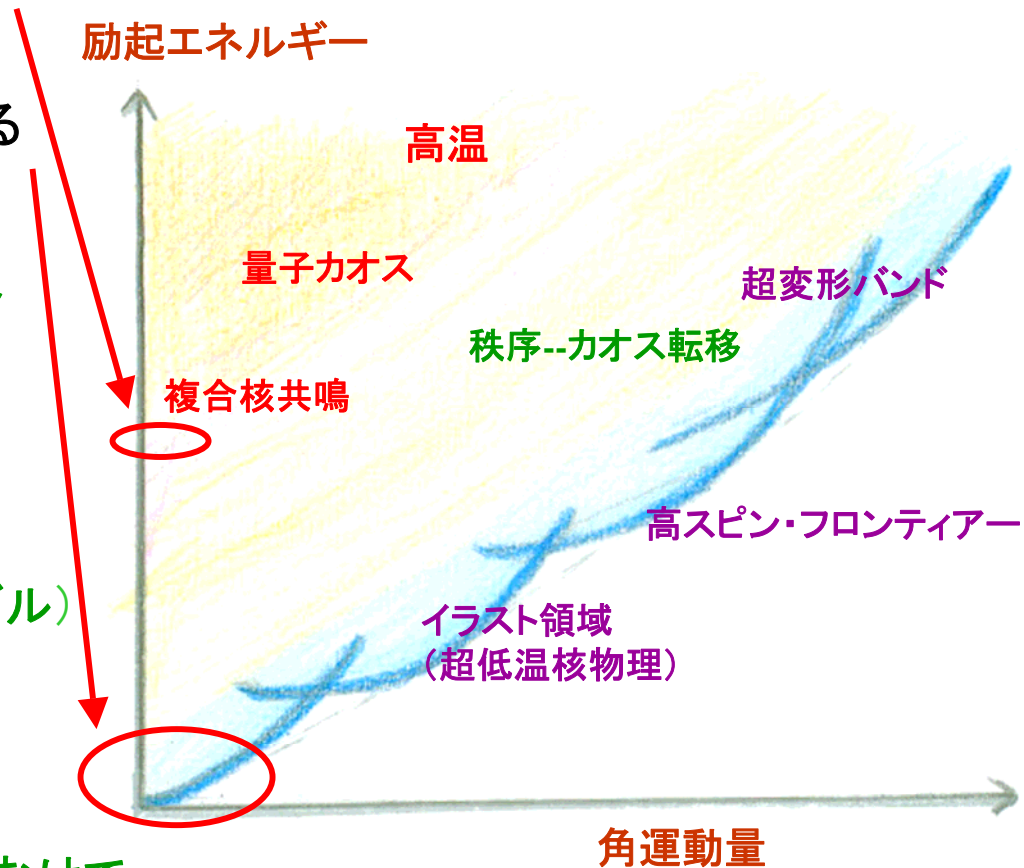
超低温イラスト領域での秩序運動

→ 一般化された平均場  
(変形、対凝縮、回転系シェルモデル)

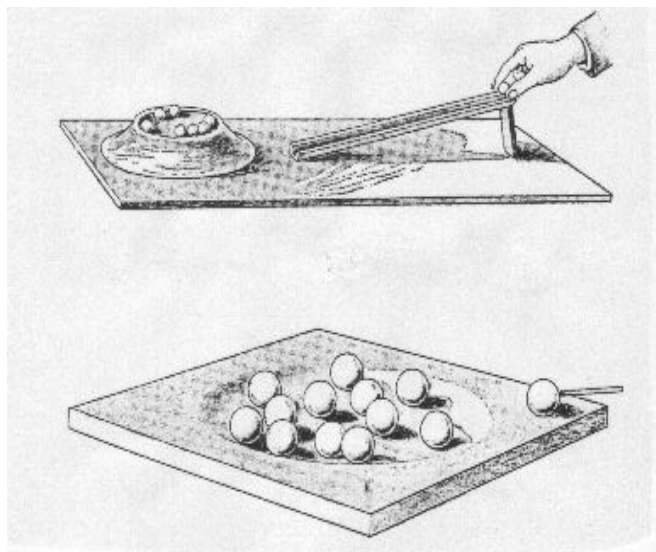
1986 超変形核の発見

1990年代

秩序運動とカオス運動の統一的理解にむけて

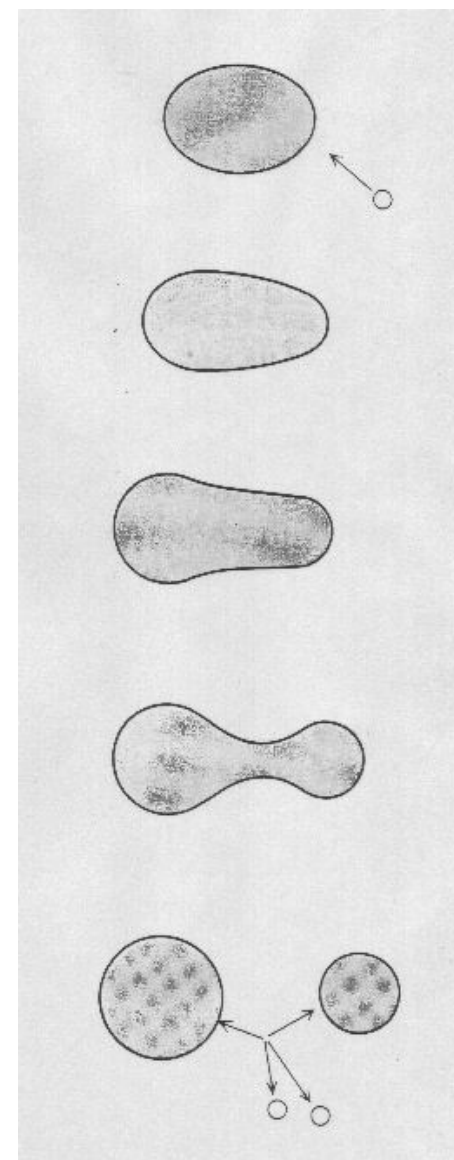


# Niels Bohrの複合核モデルと液滴モデル(1936-1939)

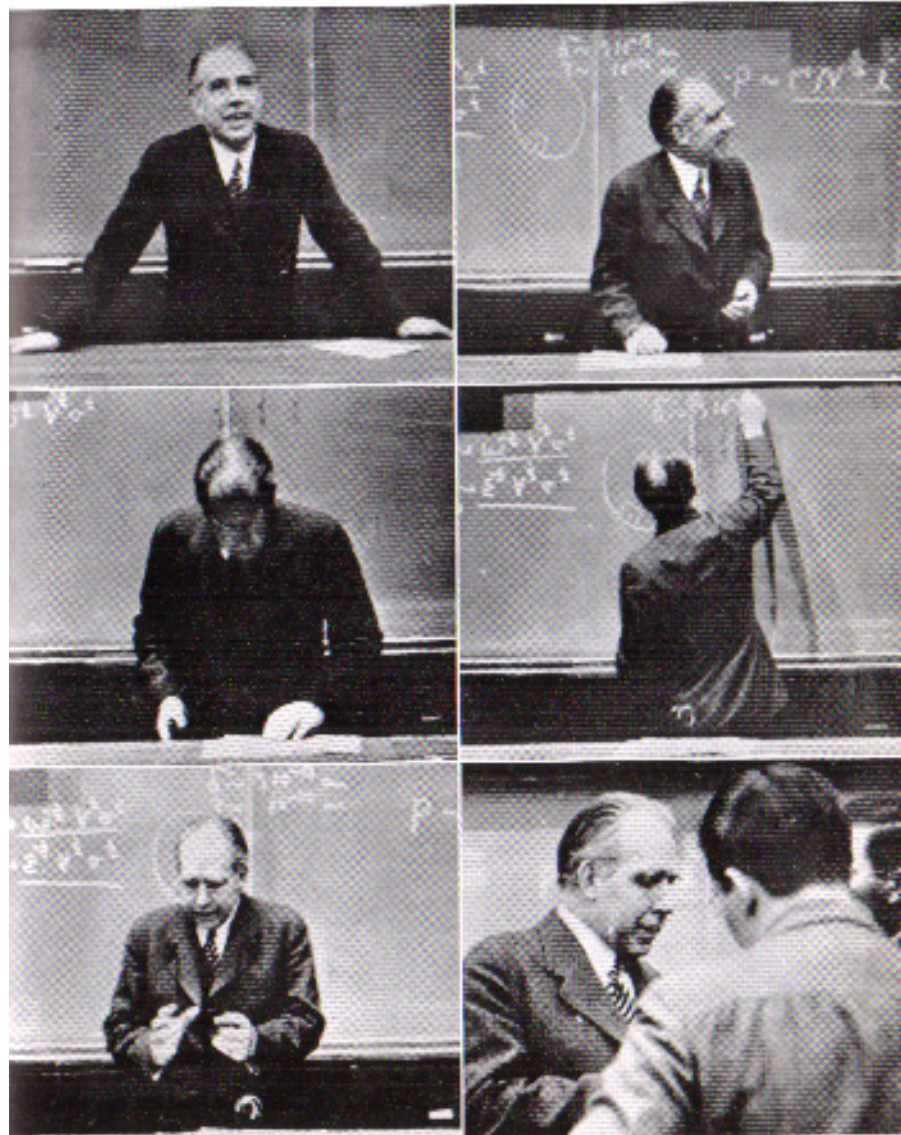


1937春、日本訪問  
講演で使用した模型

クイズ

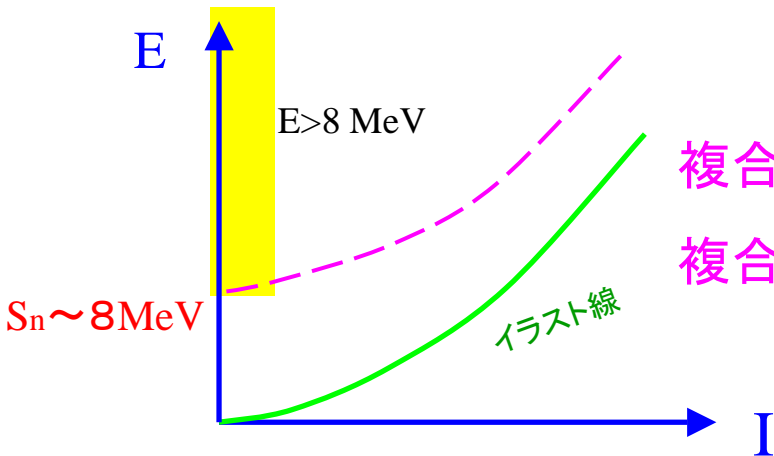
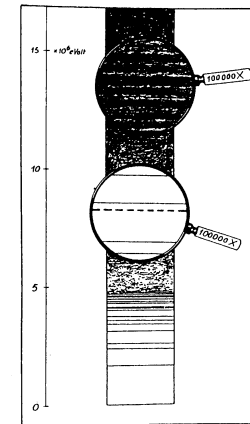
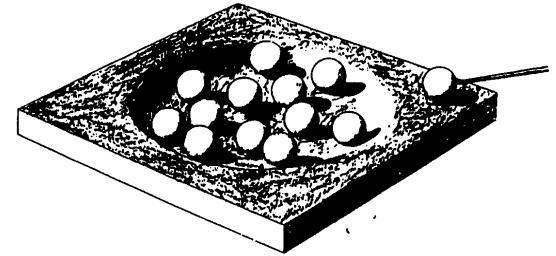
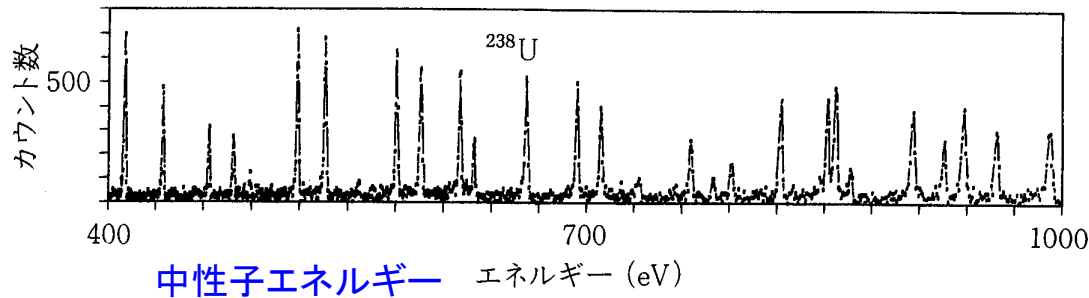
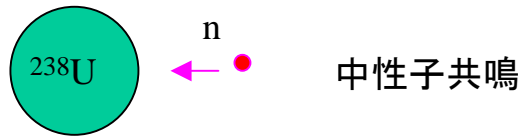


# 液滴模型について講義中のニールス・ボーア

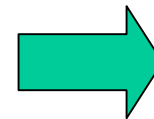


「ニールス・ボーア」 S.ローゼンタール編，豊田利幸訳（岩波書店 1970）より

# 複合核 不逆性の力学的基礎？ 量子カオス



複合核反応 (複合核状態を経由する核反応)



ランダム行列理論

(新しい型の統計力学)

# 「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)

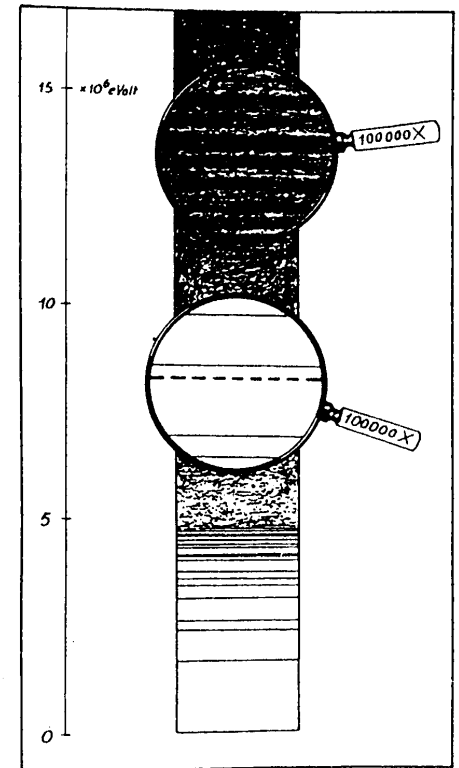
$$\rho_{tot}(E) \propto \exp(2\sqrt{aE})$$

- ボルツマン原理(ミクロカノニカル)

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

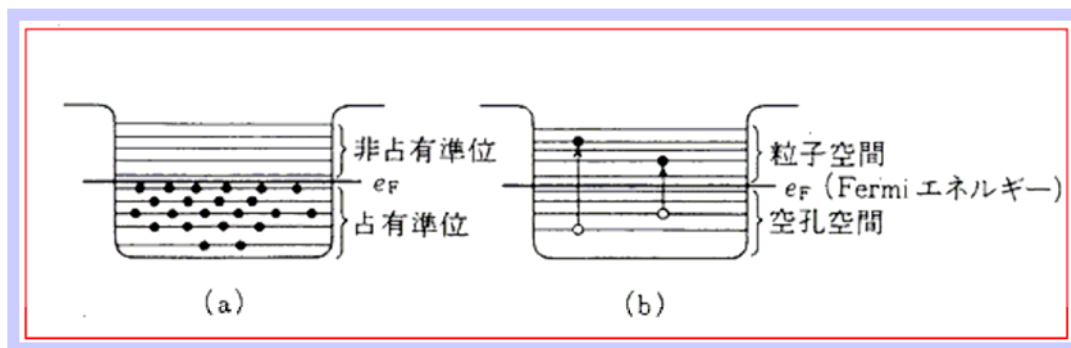
$$\frac{1}{T} = \frac{\partial}{\partial E} S(E) = \frac{\partial}{\partial E} \log \rho(E)$$

- 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

D.H. Hill and J.A. Wheeler  
Phys. Rev. 89 (1953) 1102

## Nucleus as Quantum Fluid

We have encountered in this discussion some of the properties of an unusual idealized quantum fluid. It is considered to be completely transparent internally with respect to motion of the constituent particles, and to receive disturbances solely by way of surface deformations. Its near incompressibility comes about, not by particle to particle push, as in an ordinary liquid, but by more subtle means. It is capable of collective oscillations, but it is the wall which organizes these disturbances, not nucleon interactions. Oscillations experience a damping, but the mechanism of the damping is unlike that encountered in ordinary liquids. The liquid can evaporate a particle, but in a way quite different from evaporation from ordinary liquids. The wave function of the particle to come out is spread over the whole nucleus and has energy pumped into it by Doppler effect; it is not concentrated near a part of the surface before emission. The rotational properties of the quantum fluid are quite different from those of ordinary fluids. Altogether one is dealing with a most interesting new form of matter.

原子核は未知の量子流体！

## 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



原子核というのは実に不思議な物質である

状況に応じて、その姿は千変万化する  
(形態と動態の変化)

ミクロの世界での集団現象

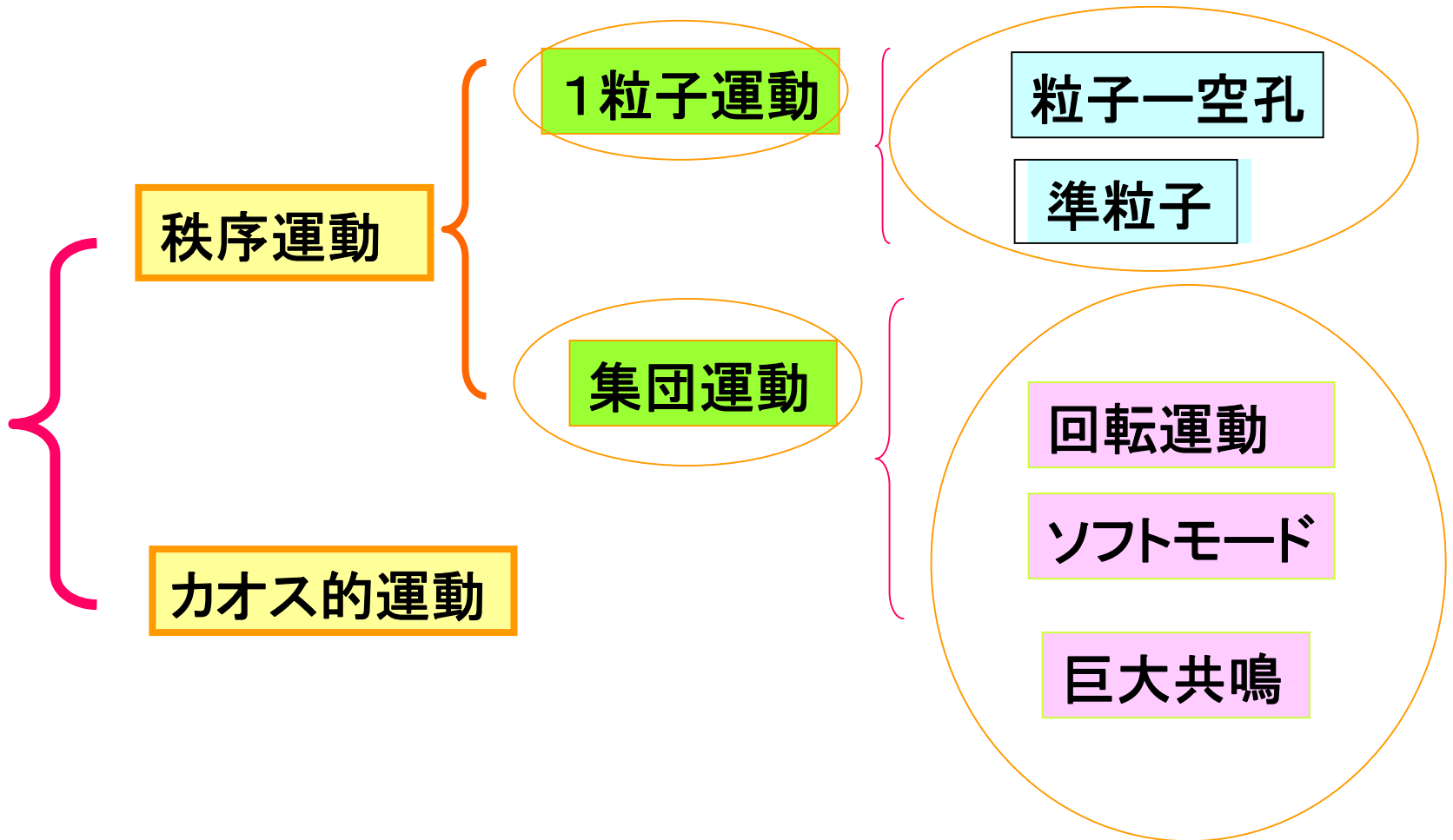
原子核は複雑で  
微視的には理解不可能



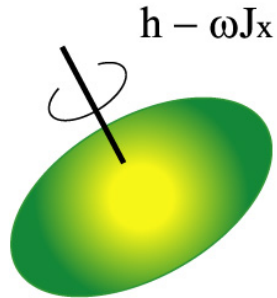
球形殻模型で  
原理的には理解可能

核構造における秩序とカオスの  
統一的理解にむけて

# 核構造の大統一理論にむけて



# 変形核の回転運動



8	1605.85	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	$K\pi = 2+$	
1	798.00		
0	0		
$^{168}_{68}\text{Er}$			
6	548.73		
4	264.081		
2	79.800		
0	0		
$K\pi = 0+$ $r = +1$			

## 回転運動ハミルトニアン

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

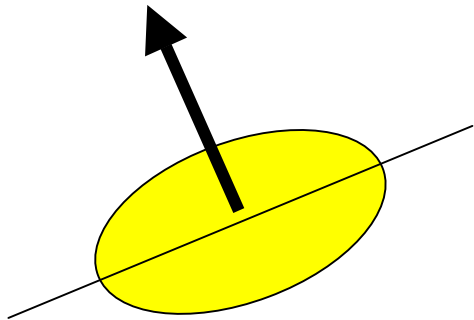
## 回転スペクトル 回転バンド

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

**問5 Bohr-Mottelsonのノーベル賞に至った最も重要なアイディアは何だと思えますか。**

## 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

To K. Matsuyama  
with greetings

Aage Bohr Ben Mottelson

# NOBEL LECTURES 1975

by

**Aage Bohr and Ben R. Mottelson**

The Niels Bohr Institute and Nordita, Copenhagen

Aage Bohr:

Rotational Motion in Nuclei

Ben R. Mottelson:

Elementary Modes of Excitation in the Nucleus

Reprinted from *Fysisk Tidsskrift* 74, 1976, no. 2 and no. 3.

Rev. Mod. Phys. 48 (1976) 365, 375

## General Theory of Rotation

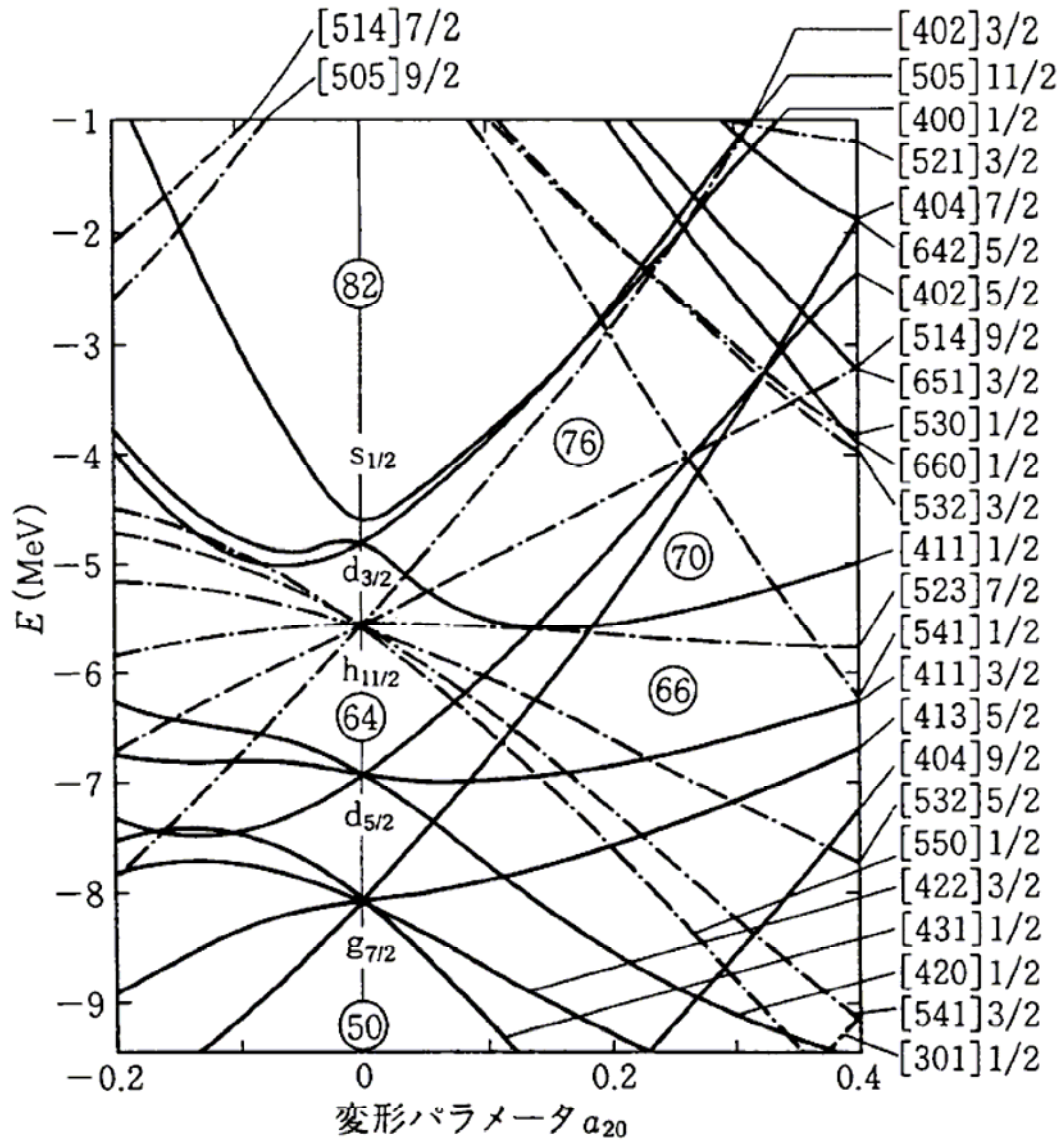
The increasing precision and richness of the spectroscopic data kept posing problems that called for a framework, in which one could clearly distinguish between the general relations characteristic of the rotational coupling scheme and the features that depend more specifically on the internal structure and the dynamics of the rotational motion.<sup>9)</sup> For ourselves, an added incentive was provided by the challenge of presenting the theory of rotation as part of a broad view of nuclear structure. The viewpoints that I shall try to summarize gradually emerged in this prolonged labour [70], [71], [35].

In a general theory of rotation, symmetry plays a central role. Indeed, the very occurrence of collective rotational degrees of freedom may be said to originate in a breaking of rotational invariance, which introduces a "deformation" that makes it possible to specify an orientation of the system. Rotation represents the collective mode associated with such a spontaneous symmetry breaking (Goldstone boson).

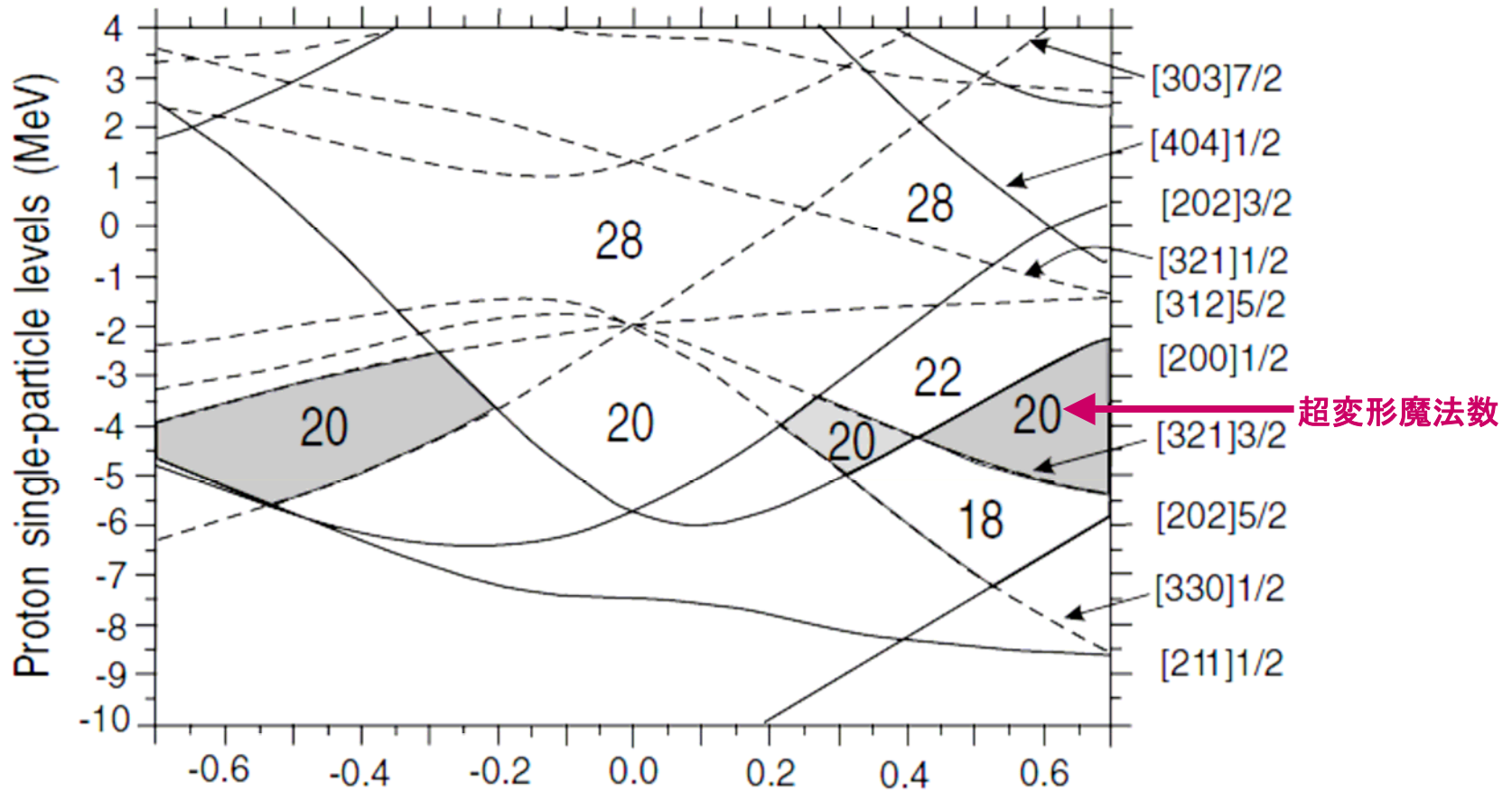
The recognition of the deformation and its degree of symmetry breaking as the central element in defining rotational degrees of freedom opens new perspectives for generalized rotational spectra associated with deformations in many different dimensions including spin, isospin, and gauge spaces, in addition to the geometrical space of our classical world. The

# 変形シェルモデルの導入：当時の批判と反論は教訓的

対称性を破っているが.....

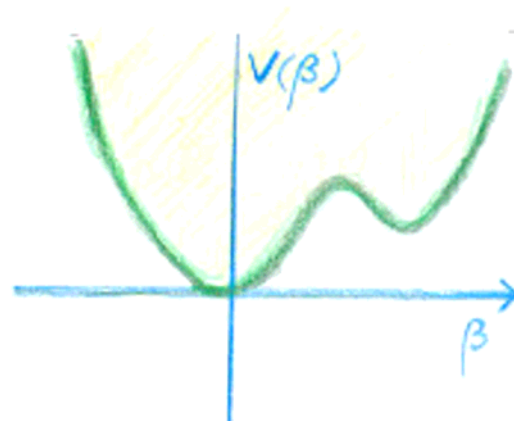


# $^{40}\text{Ca}$ 近傍の1粒子エネルギーの変形依存性

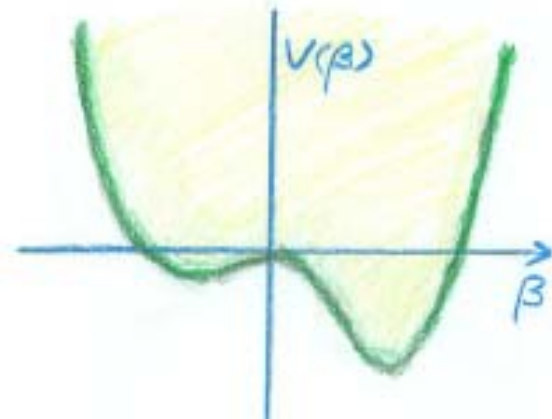
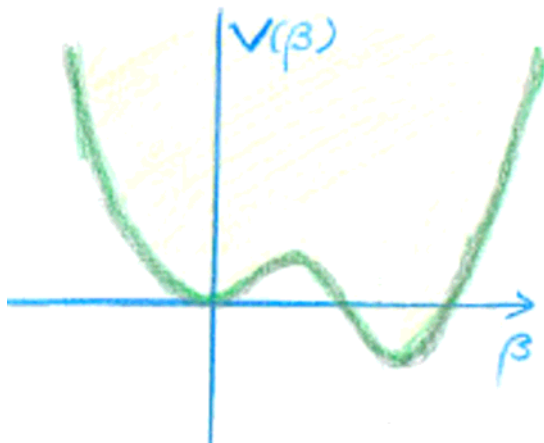


# N=20魔法数の消滅？について

球形魔法数を相対化する視点の導入



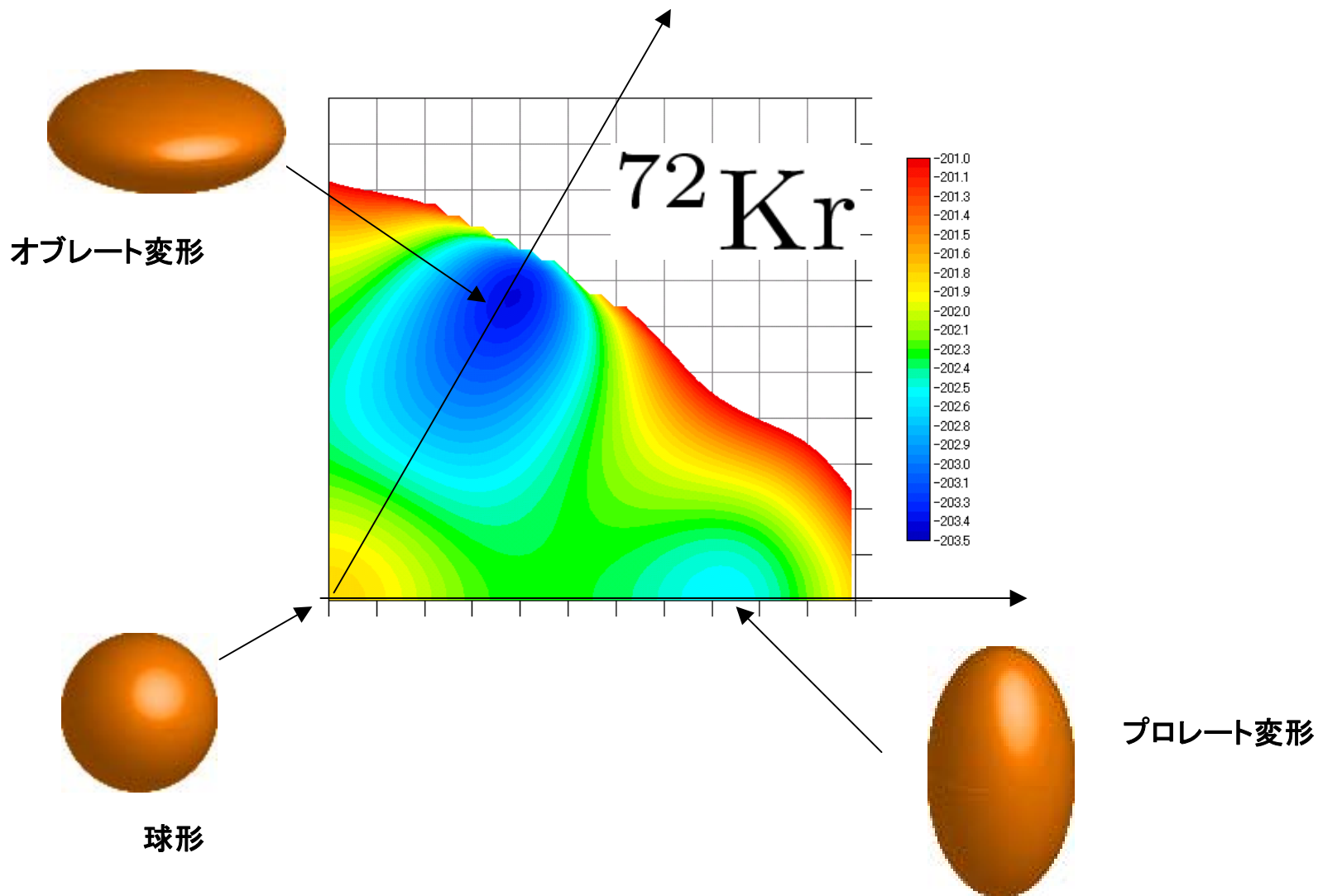
二つの状況を区別すること





# 複数の真空(平均場)の間の巨視的トンネル現象

## オブレート・プロレート変形共存現象

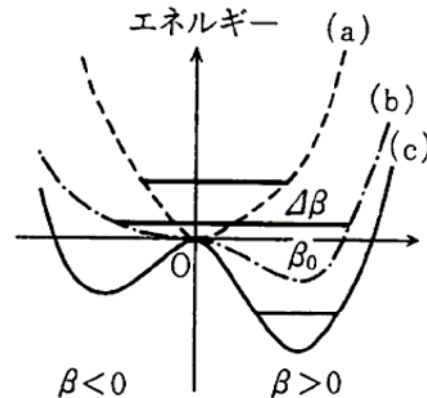


# Quantum Phase Transition

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

1957 BCS理論

(対称性の自発的破れ)



1961 Nambu-Jona-Lasinio

1958 Bohr-Mottelson-Pines



素粒子論は変わった

核構造論も変わった

## 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

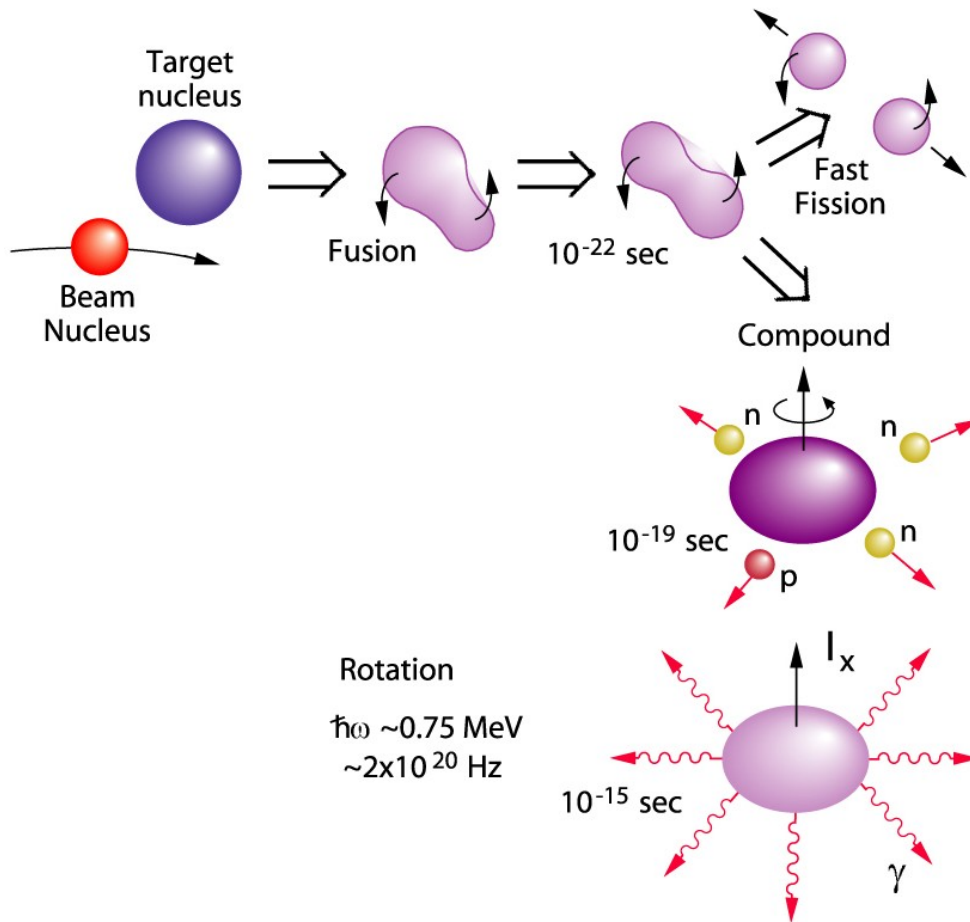
→ 回転座標系での準粒子シェルモデルの成立

## 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

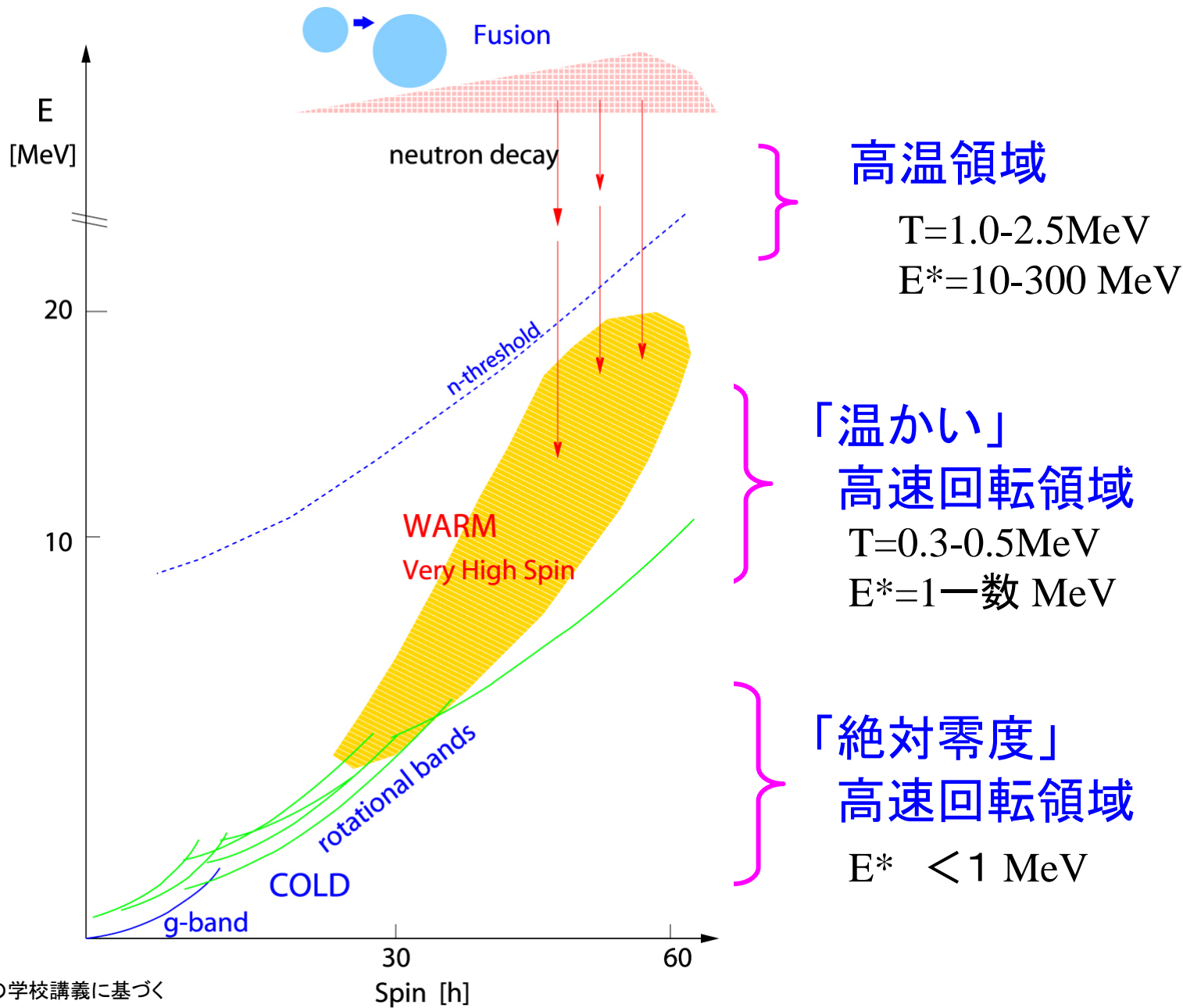


低温・高速回転



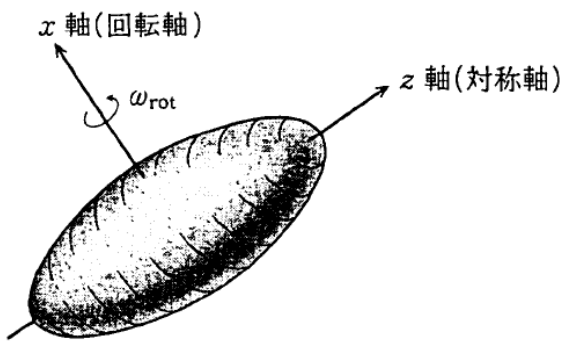
絶対零度・高速回転

# 高励起原子核からのガンマ線



# 回転座標系での準粒子シェルモデル

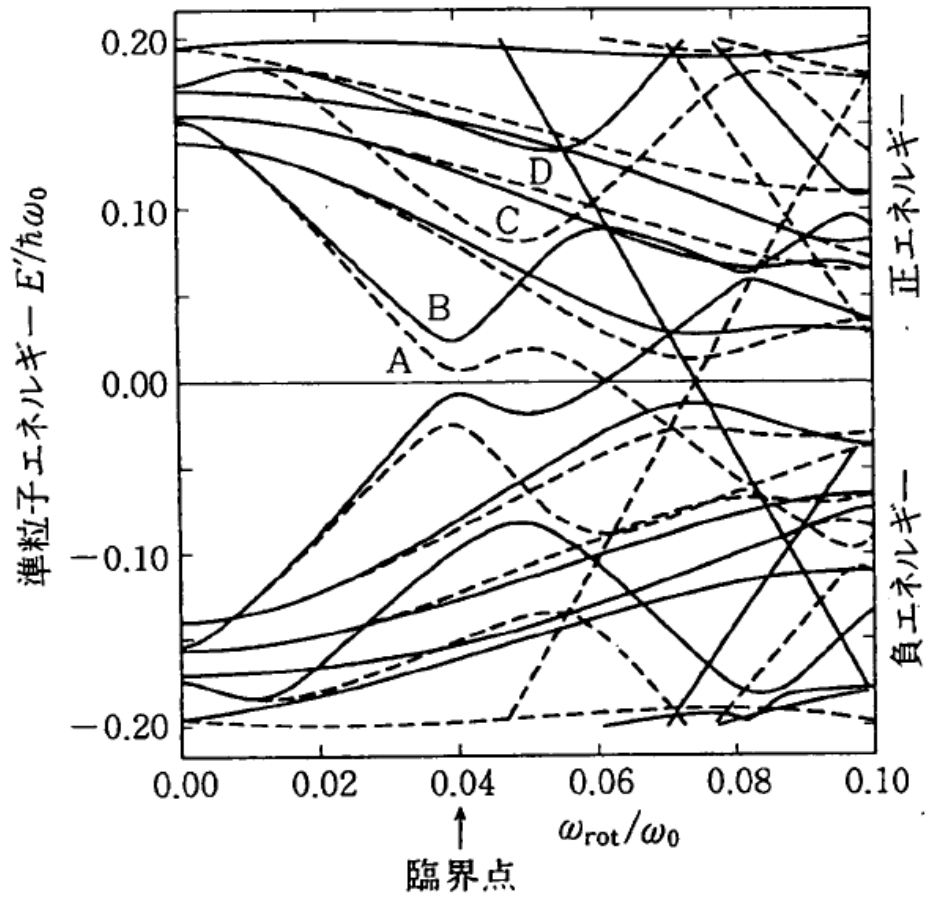
$$\begin{aligned}
 H &= \sum_i (e_i - \lambda) c_i^\dagger c_i - \Delta \sum_i (c_i^\dagger c_i^\dagger + c_i c_i) - \omega_{\text{rot}} \sum_{i,j} \langle i | J_x | j \rangle c_i^\dagger c_j \\
 &= \sum_\mu E_\mu a_\mu^\dagger a_\mu + \sum_{\bar{\mu}} E_{\bar{\mu}} a_{\bar{\mu}}^\dagger a_{\bar{\mu}}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



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

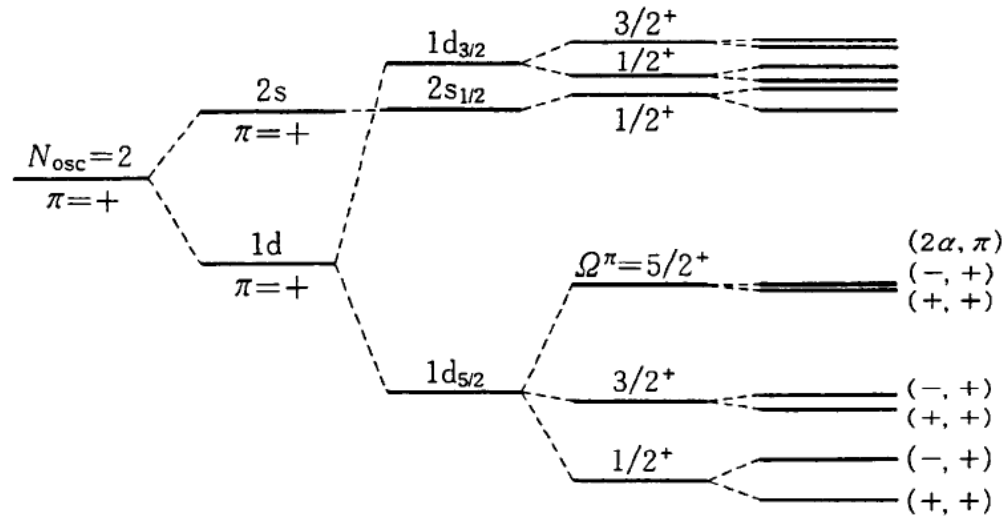


# 一粒子運動の一般化

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

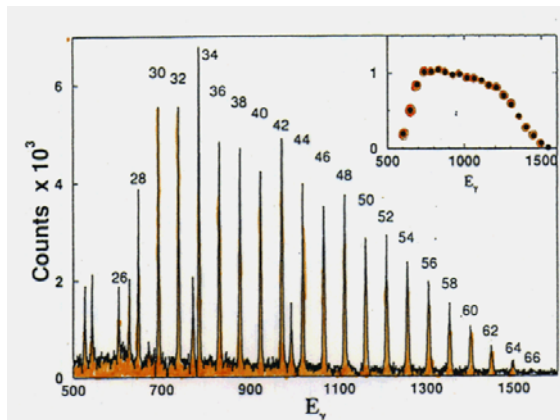


	調和振動子 ポテンシャル	Woods-Saxon ポテンシャル	$j$ - $j$ 結合 殻モデル	軸対称 変形	回転座標系
量子数	$(N_{osc}, \pi)$	$(n, l, \pi)$	$(n, l, j, \pi)$	$(\Omega, \pi)$	$(\alpha, \pi)$
縮退度	$(N_{osc}+1)(N_{osc}+2)$	$2(2l+1)$	$2j+1$	2	1

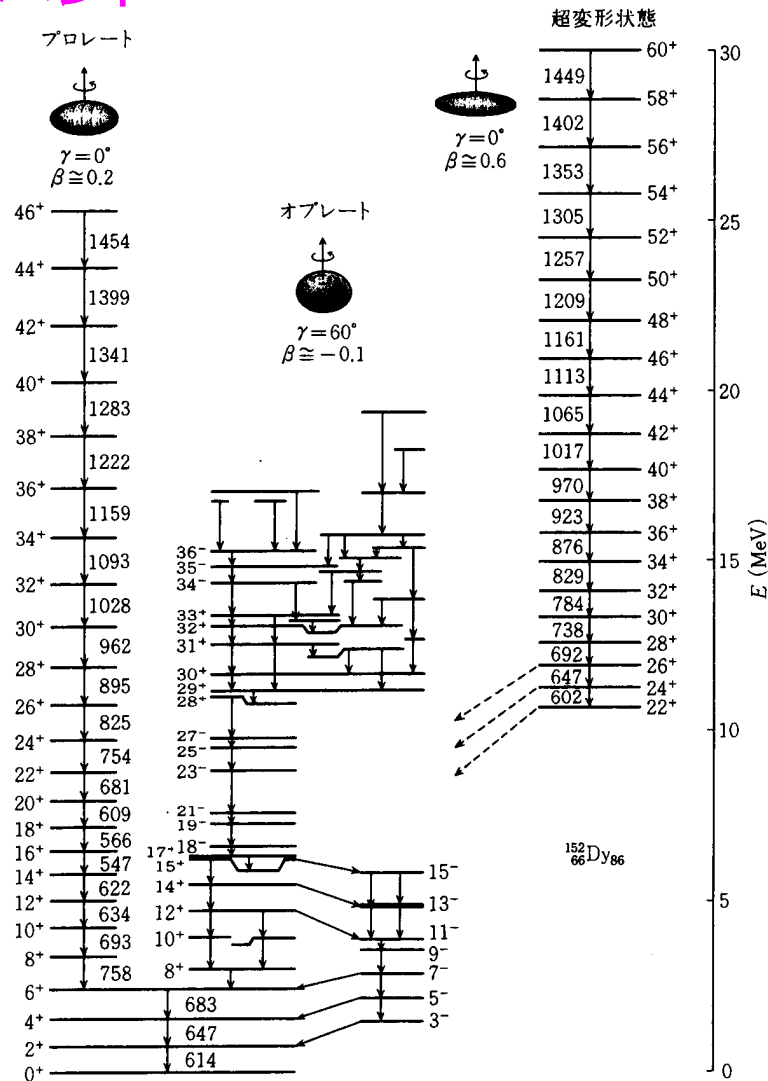
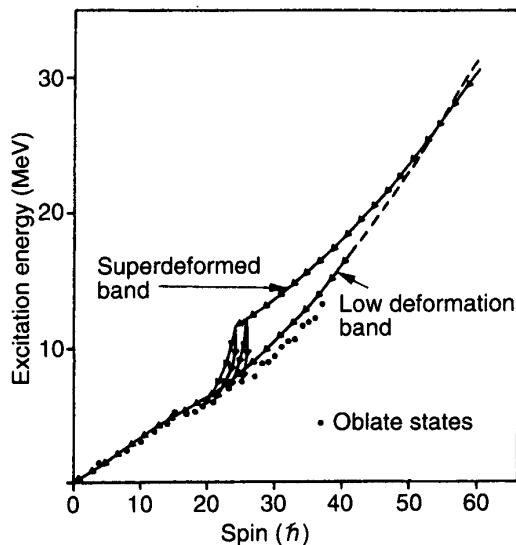


# 高速回転領域の核構造

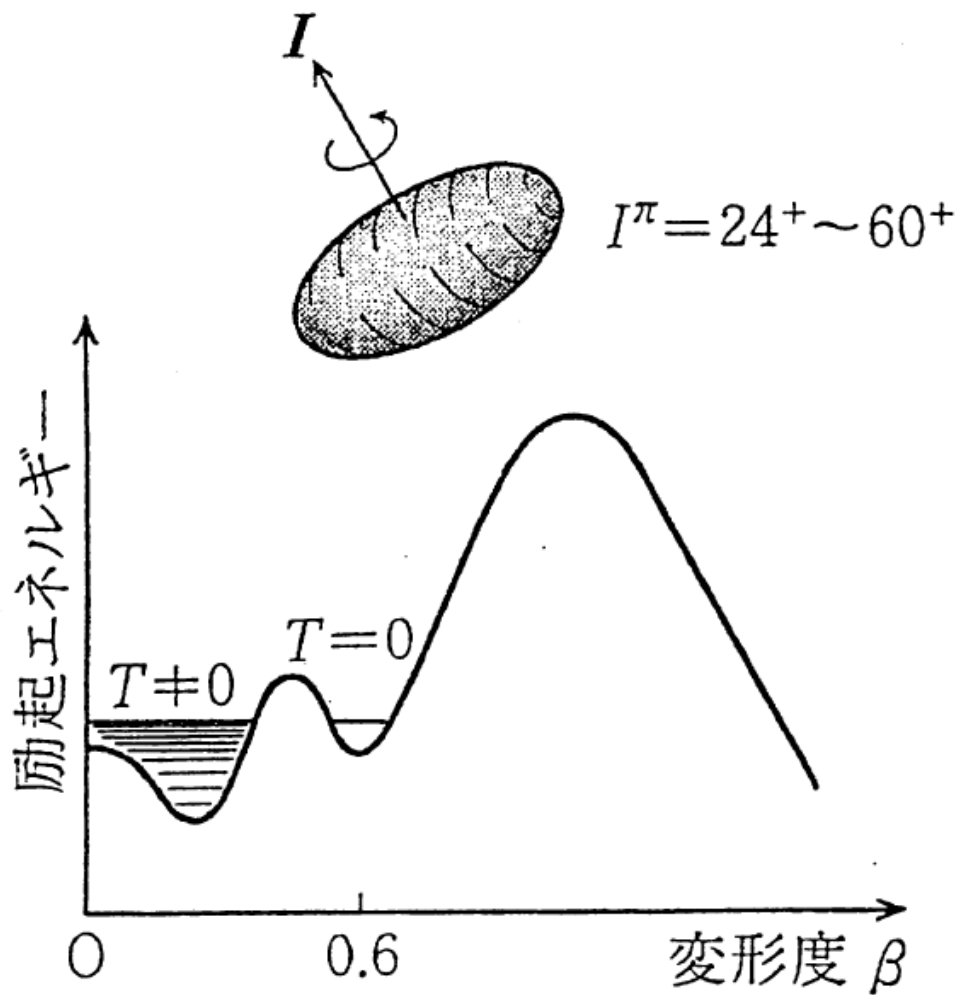
## 超変形回転バンド



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



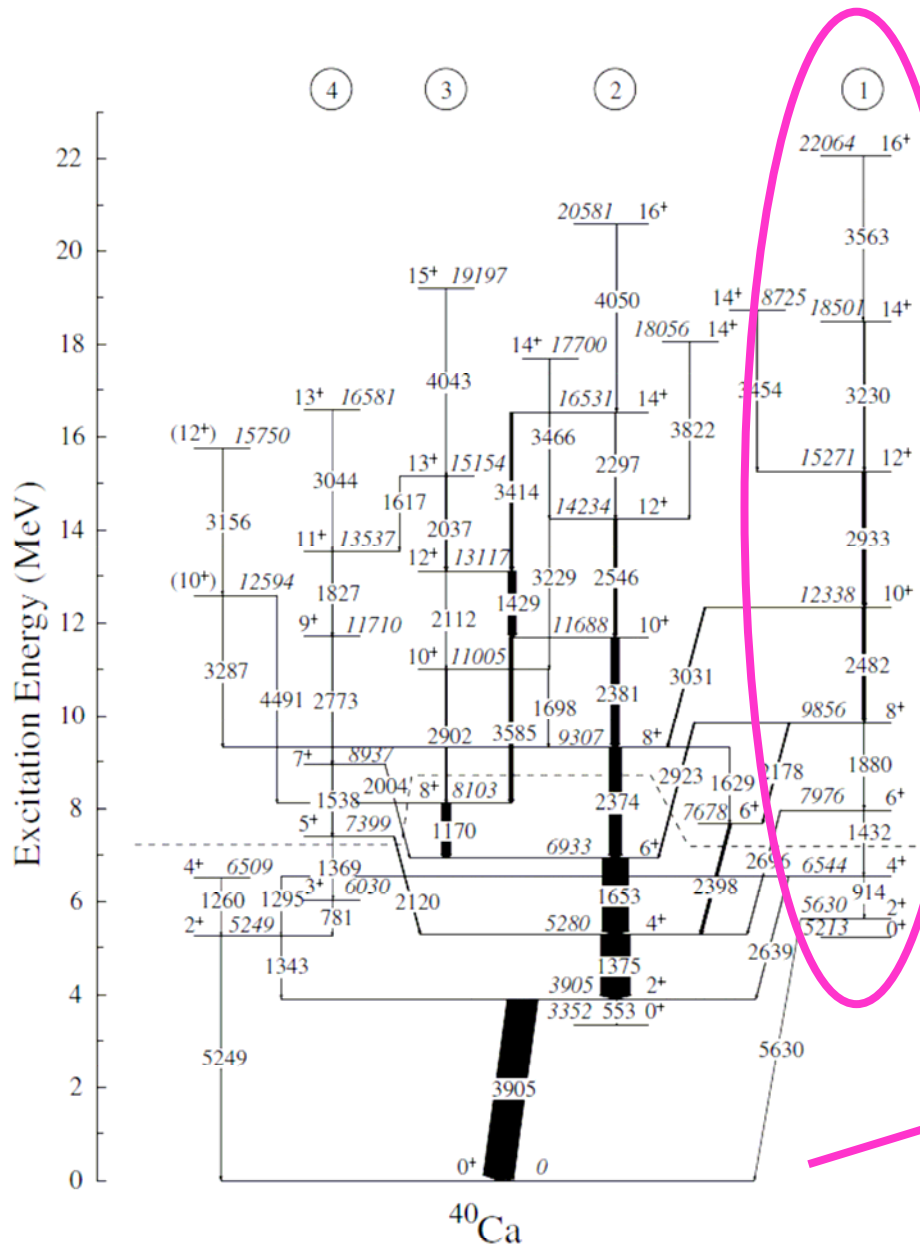
# 高速回転する超変形状態



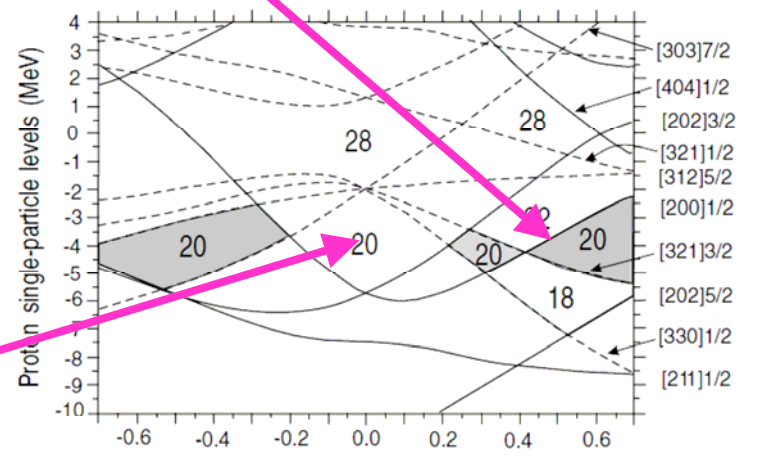
平均場の第2極小点  
(二つの真空)

超変形状態から  
常変形状態への  
巨視的トンネル現象

# Superdeformation in the Doubly Magic Nucleus $^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$



E. Ideguchi, et al.,  
 Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 222501



# 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 高スピンフロンティアー

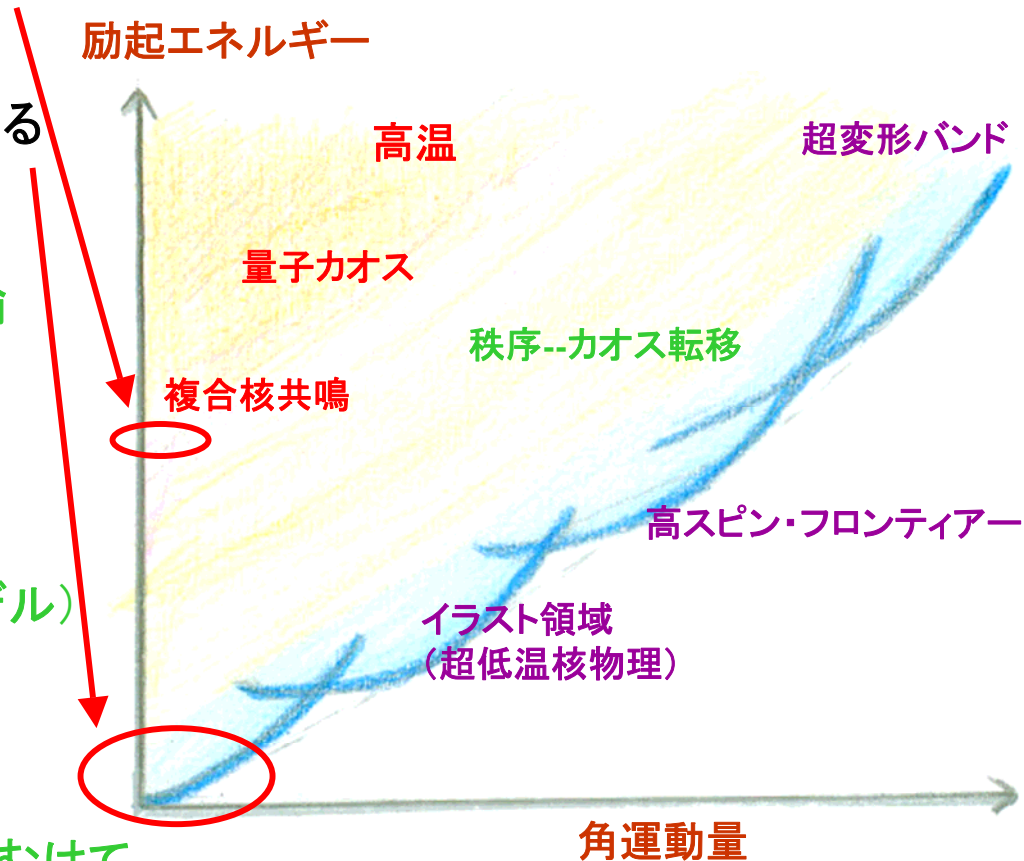
超低温イラスト領域での秩序運動

→ 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



## 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

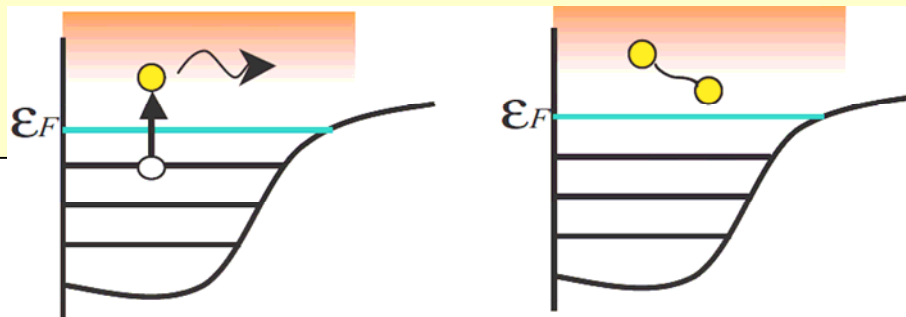
不安定核研究の始まり

→ 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

# 「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