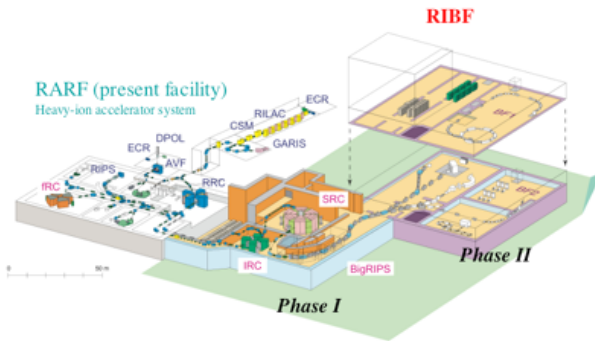


この講義のねらい

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

原子核物理学の曙と発展

土岐 博 (大阪大学核物理研究センター 567-0047 茨木市美穂ヶ丘 10-1)

く黄金期であった。それまでに蓄積されてきた多くの実験データは理論的な解釈を得ることができた。有馬朗人・堀江久による磁気モーメントの系統的理解(1953年)、宮沢弘成による原子核における中間子流の効果(1951年)、森永による原子核の回転バンドの同定による変形核の研究(1962年)、²⁾ など日本人研究者による原子核物理学研究は一気に花開いた。1955年、東大に全国共同利用の原子核研究所(核研)が創設され、全国の研究者は核研に集まって日夜強い動機のもとに実験に取り組み、理論的な議論を行った。そんな中で、ボーアとモッテルソンによる原子核を木の葉にできる露のような液滴だという液滴モデルと、メイヤーとヤンセンによる核子が個性を持って原子核内を動き回っているという単一粒子モデルという一見相容れない概念をどのように考えるべきかの論争が起こった。原子の構造のようにはっきりと中心がない原子核では中心の回りを核子が運動しているのはなかなか考えにくい。原子核は液滴のようになっていると考えるほうがわかりやすい。ある現象はシェルモデルでよく説明できる一方、多くの実験データは液滴の振動のように見えた。原子核の巨大共鳴も発見された。原子核の回転バンドも液滴モデルの方が記述しやすい。この論争に決着をつけたのはブラウンの統一モデルであった。このモデルでは単一粒子モデル的に核子は原子核の中を動き回るとするが、それらの核子同士は相互作用しあっており、その相互作用をきっちりと取り扱うことにより、見事に液滴モデルで導出されていた振動数や励起関数を説明することが可能であった。³⁾

?

?

?

一九五二年にボーア、レインウォータとモッテルソンは、この液滴モデルをもとに、個々の原子核の性質や励起状態にも対応する集団模型を作った。このモデルは、変形した原子核や、その回転運動、球形の原子核の表面の振動などをうまく説明した。このモデルによる面白い結論は、原子核は核子が超流動状態になっていることを示したことである。このように、成功したモデルであるが、その基本的考え方は、原子核は「強く相互作用をしている核子の集団である」ということであり、前述の殻模型での「核子は自由に飛び回っている」という描像とは大きく異なっている。それぞれのモデルは、原子核のある状態をうまく説明するが、すべての原子核について説明できるわけではない。また、どの原子核にはどちらのモデルが適しているのかは、それらのモデルからはわからない。原子核のモデルはまだ決定版があるとは言えない状態である。



原子核物理学

高エネルギー加速器研究機構助教授
理学博士

永江知文

高エネルギー加速器研究機構助教授
理学博士

永宮正治

共著

素粒子・原子核 物理入門

B.ホッフ/K.リーツ/C.シヨルツ/F.サッチャ
柴田利明 訳

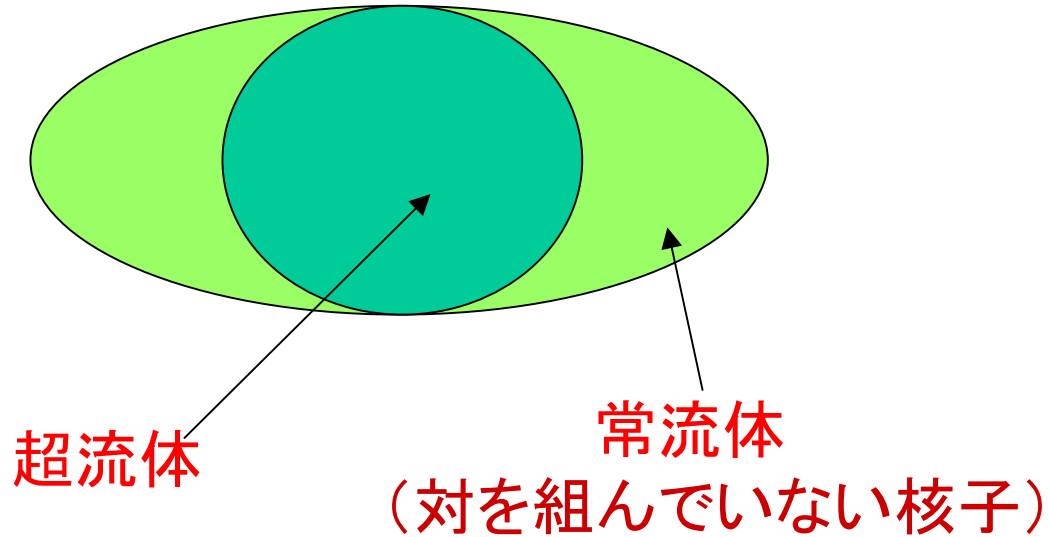
回転楕円体のように回転すると予想されるであろう。しかし明らかにそうではない。実験結果は剛体の回転からずれているので、原子核物質には超流動の成分がなければならないということが示唆されている。実際、原子核は通常の流体と超流動の流体の混合物によって満たされた卵の殻のように振舞う。

原子核物質の超流動の成分はおそらく核子対を形成する力によってつくられるものと思われる。角運動量が反対向きの核子が結合してスピンの対をなす。スピンの対をなす系は球対称であるから回転運動には寄与しない。この対形成は、超伝導において電子がCooper対を形成する[Co56b, Ba57]のと同様であると考えることができる。対をなした核子は、少なくとも回転に関しては原子核物質の超流動成分となる。このことは他方では、変形核において対をなさない核子もある、ということの意味している。変形が増すと、より多くの核子が対をつくらな
いままになるはずである。変形が増すと慣性モーメントが増加する図18.13の傾向はこの説明と一致する。

こうして得られた原子核の描像は、中心部分に超流動体部分があって、対を形成しない外側の核子が変形に寄与するというものである。 そうだとすると、液滴との類推から予想されるように、液滴の表面で表面振動が起こるのももっともだと考えられる。実際にこのような振動モードは 2^- (4重極振動)、 3^- (8重極振動)状態として観測されている。

???

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

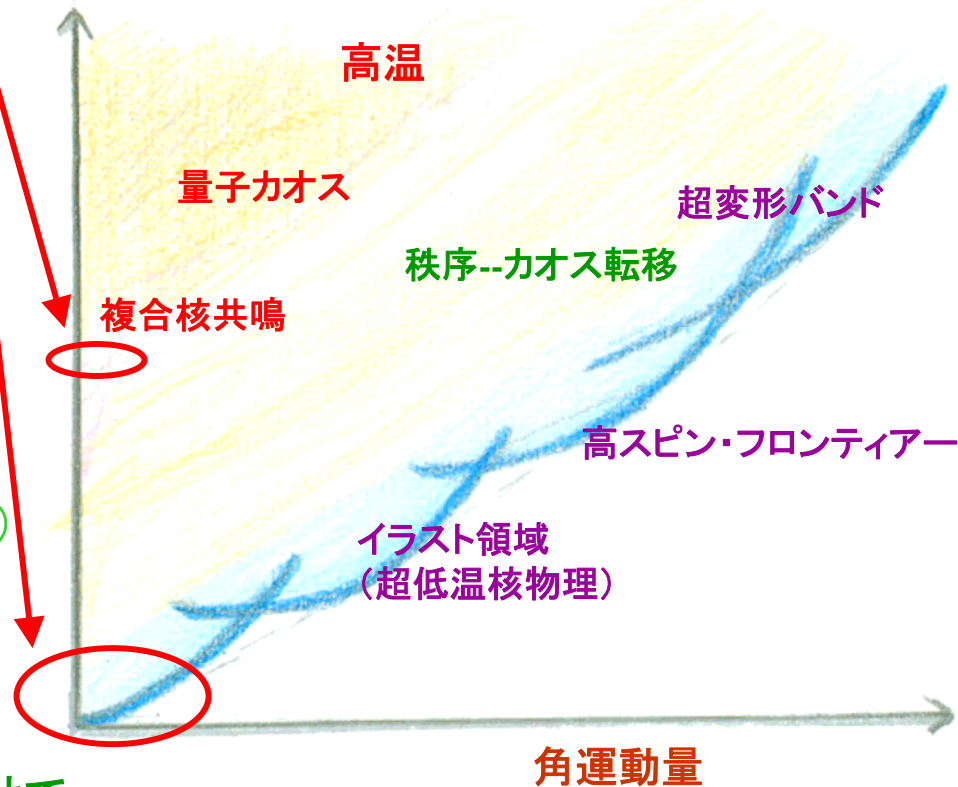
→ 一般化された平均場
(変形、対凝縮、回転系シェルモデル)

1986 超変形核の発見

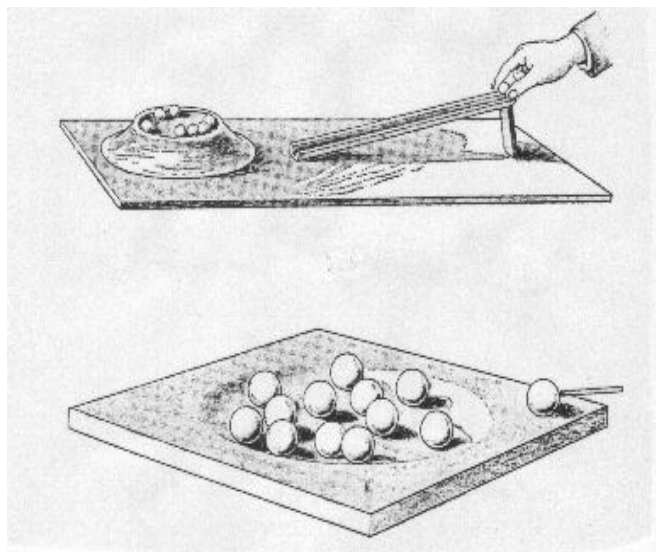
1990年代

秩序運動とカオス運動の統一的理解にむけて

励起エネルギー

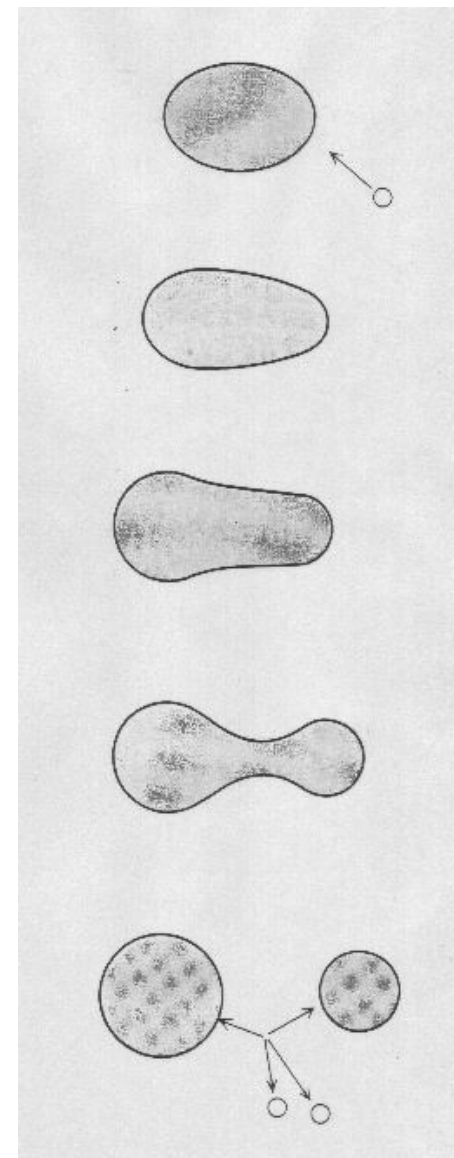


Niels Bohrの複合核モデルと液滴モデル(1936-1939)

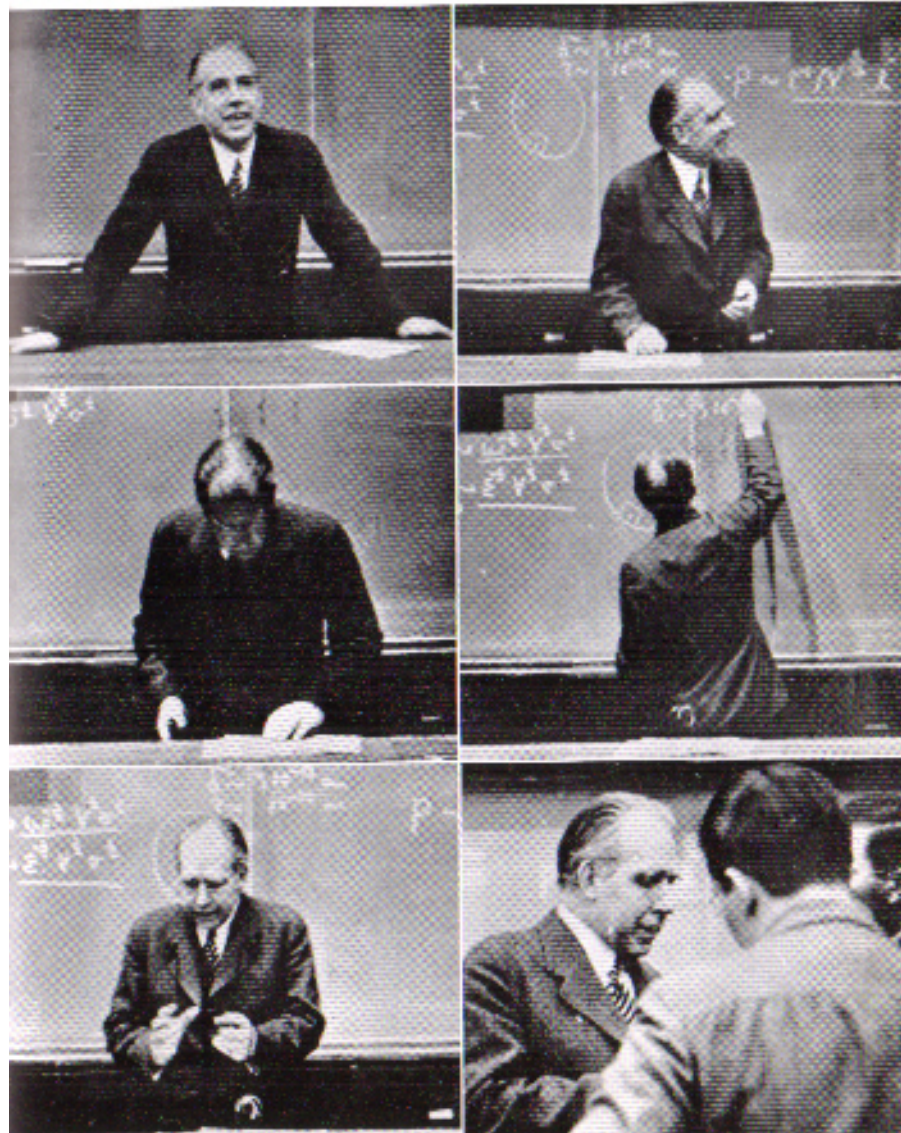


1937春、日本訪問
講演で使用した模型

クイズ

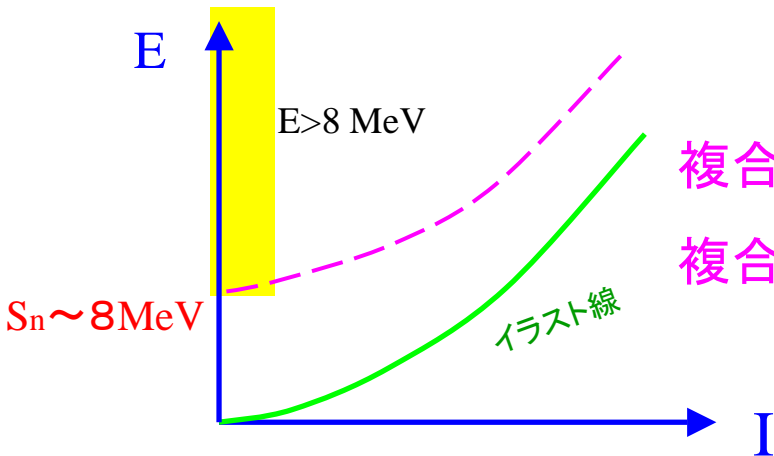
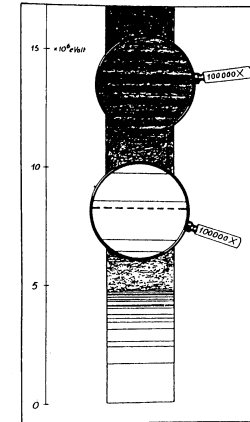
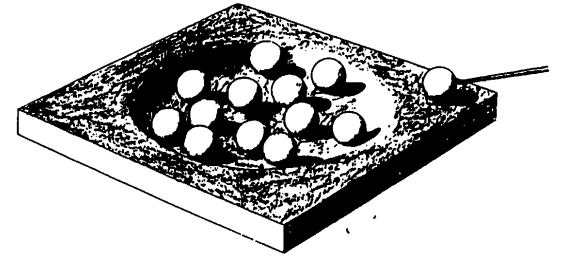
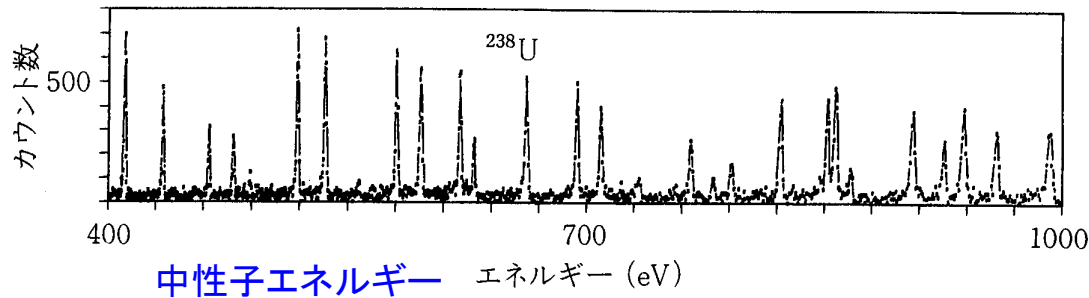
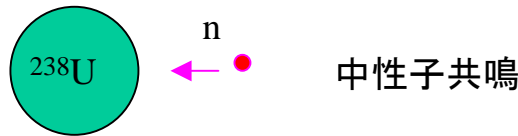


液滴模型について講義中のニールス・ボーア

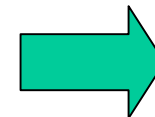


「ニールス・ボーア」 S.ローゼンタール編，豊田利幸訳（岩波書店 1970）より

複合核 不可逆性の力学的基礎？ 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)

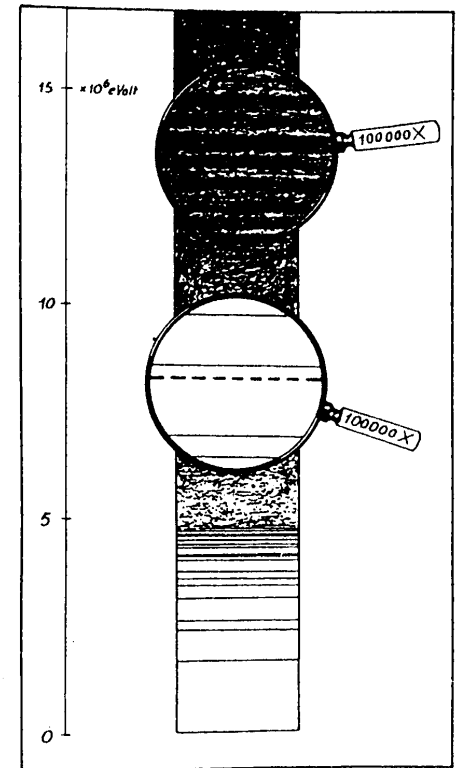
$$\rho_{tot}(E) \propto \exp(2\sqrt{aE})$$

- ボルツマン原理(ミクロカノニカル)

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

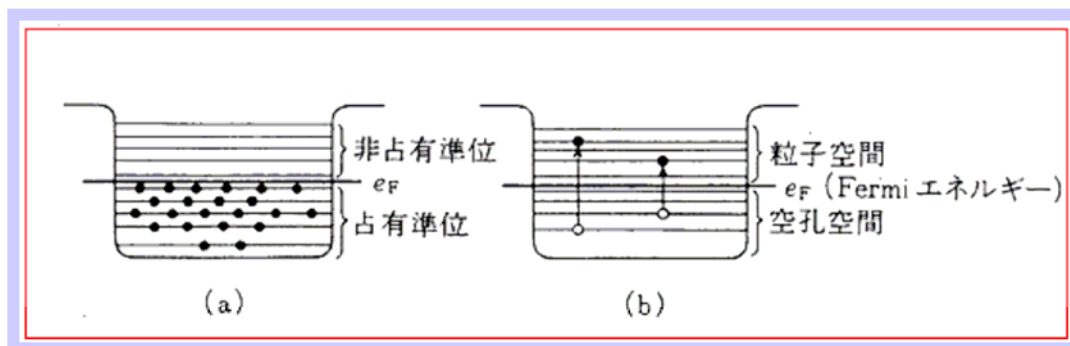
$$\frac{1}{T} = \frac{\partial}{\partial E} S(E) = \frac{\partial}{\partial E} \log \rho(E)$$

- 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

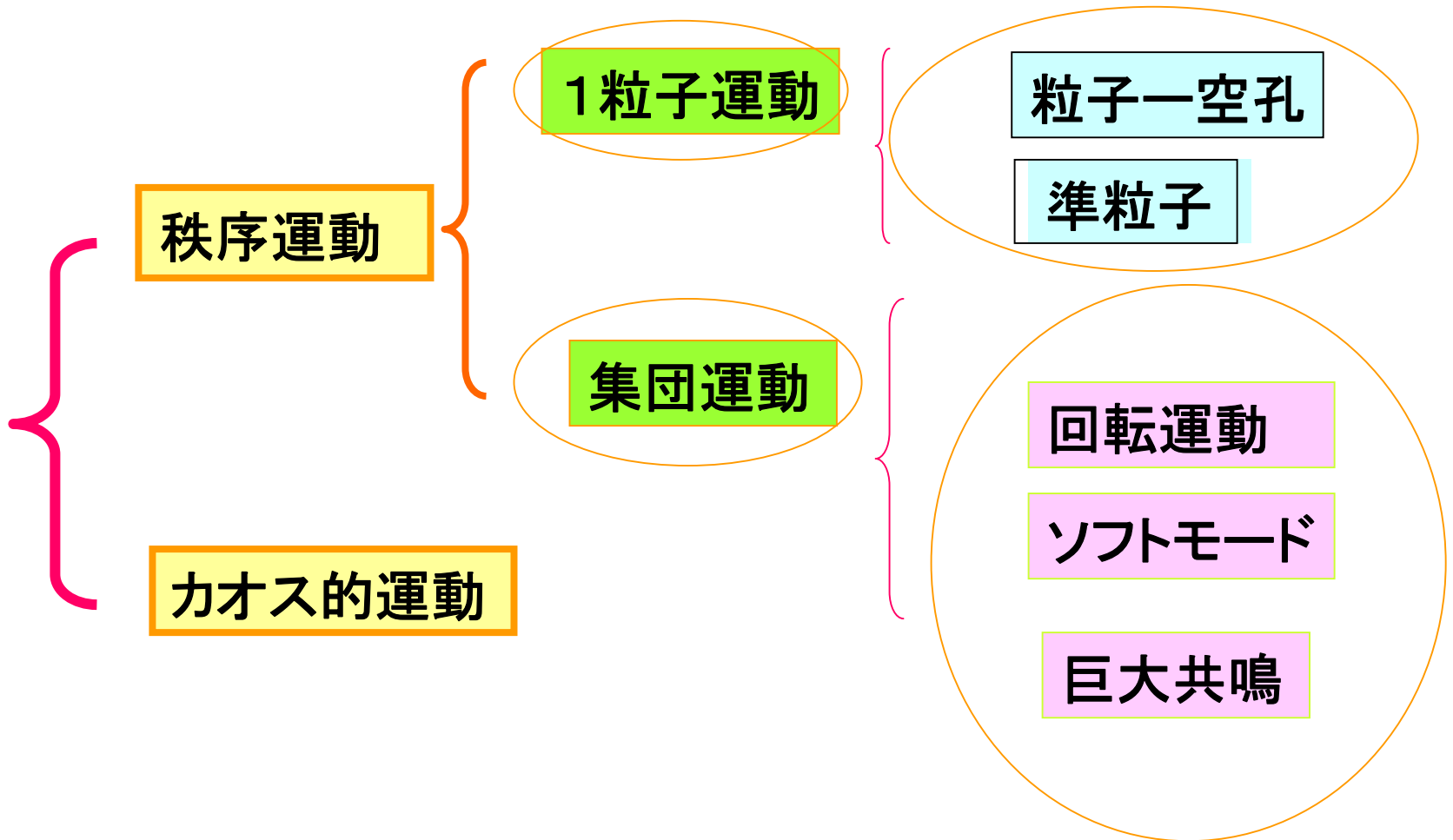
原子核は複雑で
微視的には理解不可能



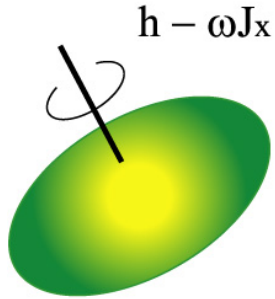
球形殻模型で
原理的には理解可能

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	$K\pi = 4-$
7	1432.97	
6	1263.92	
5	1117.60	
4	994.77	
3	895.82	
2	821.19	
		$K\pi = 2+$
8	928.26	
6	548.73	
4	264.081	
2	79.800	
0	0	
		$K\pi = 0+$ $r = +1$

$^{168}_{68}\text{Er}$

回転運動ハミルトニアン

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

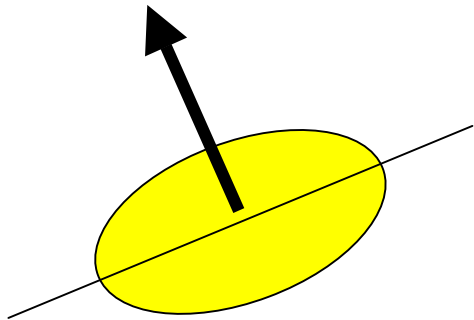
回転スペクトル 回転バンド

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

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

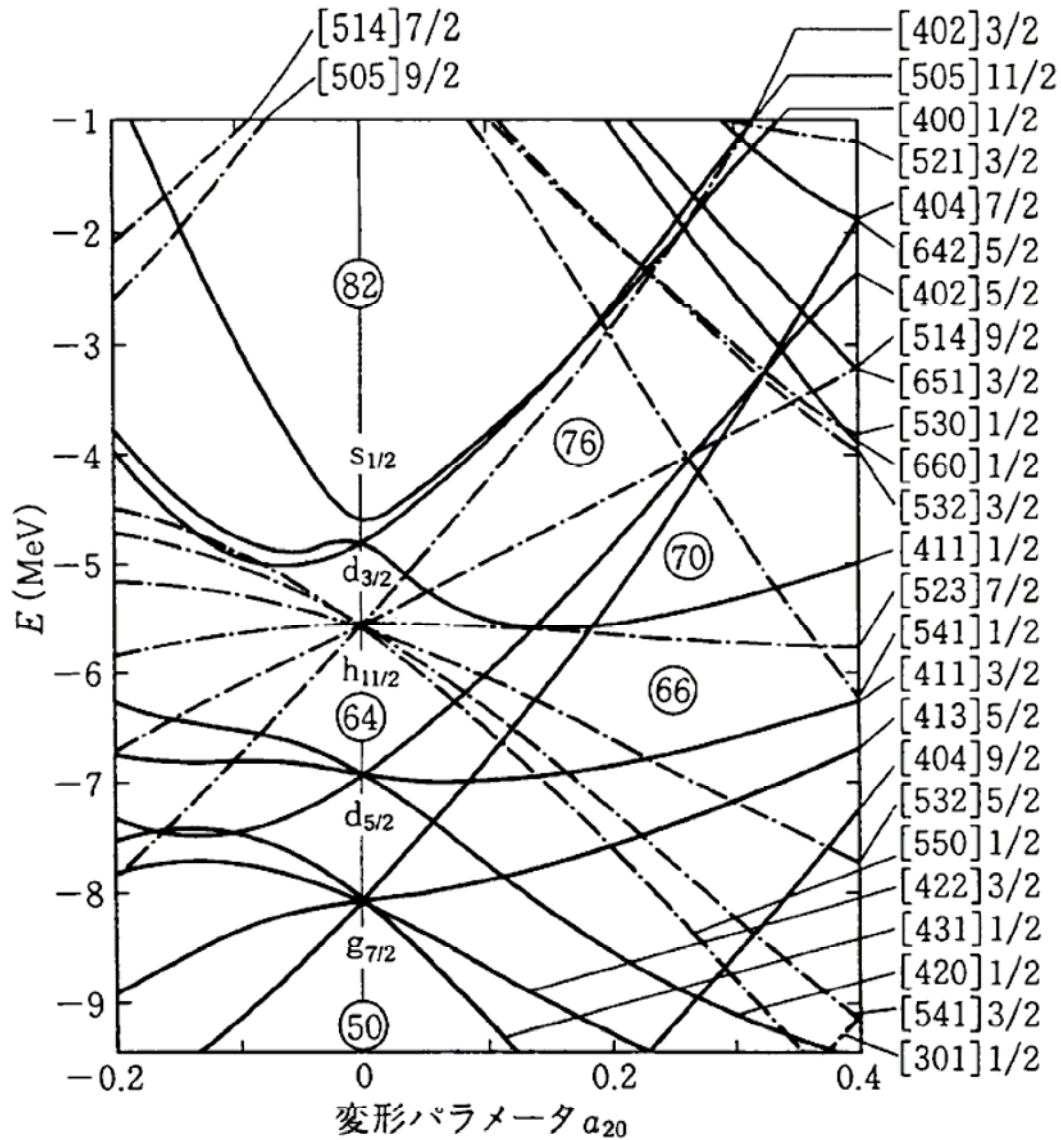
The increasing precision and richness of the spectroscopic data kept posing problems that called for a framework, in which one could clearly distinguish between the general relations characteristic of the rotational coupling scheme and the features that depend more specifically on the internal structure and the dynamics of the rotational motion.⁹⁾ 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).

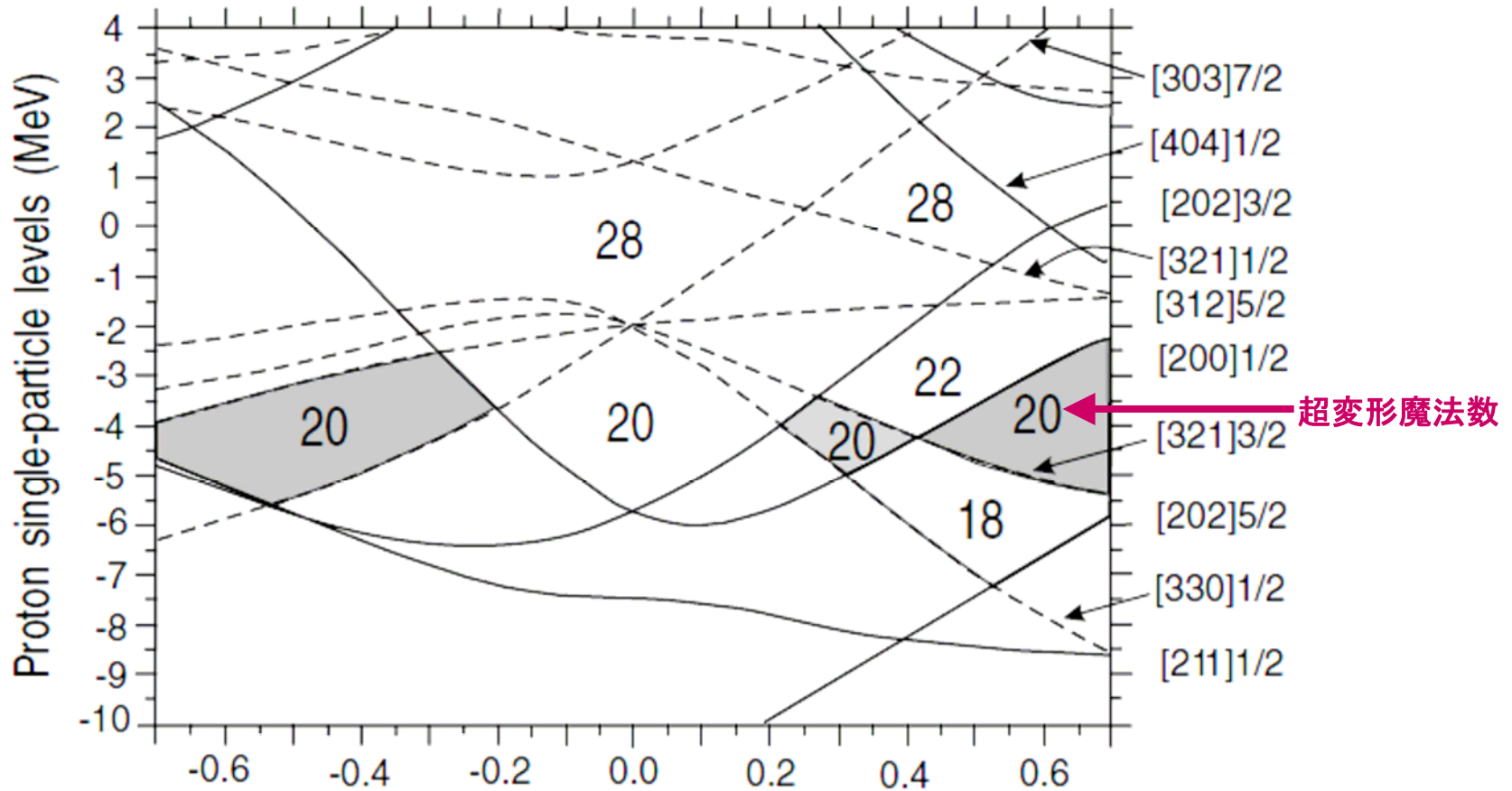
The recognition of the deformation and its degree of symmetry breaking as the central element in defining rotational degrees of freedom opens new perspectives for generalized rotational spectra associated with deformations in many different dimensions including spin, isospin, and gauge spaces, in addition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

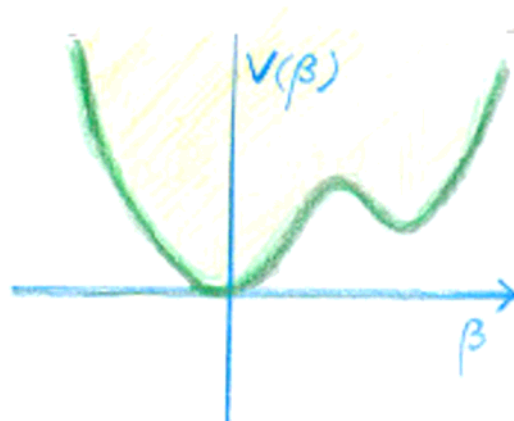


^{40}Ca 近傍の1粒子エネルギーの変形依存性

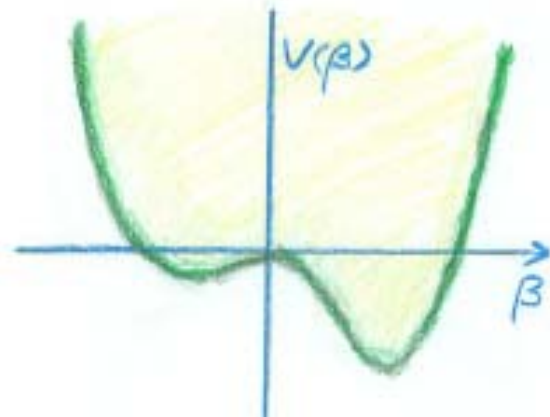
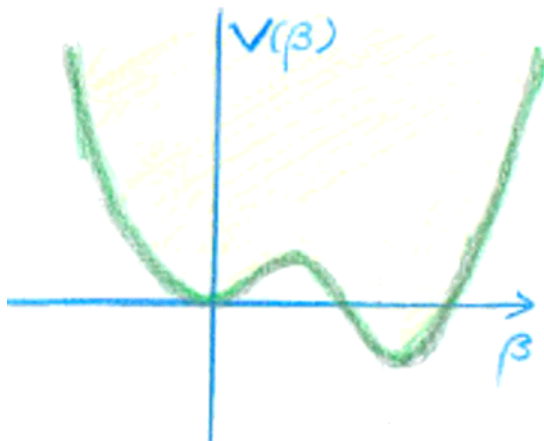


N=20魔法数の消滅？について

球形魔法数を相対化する視点の導入

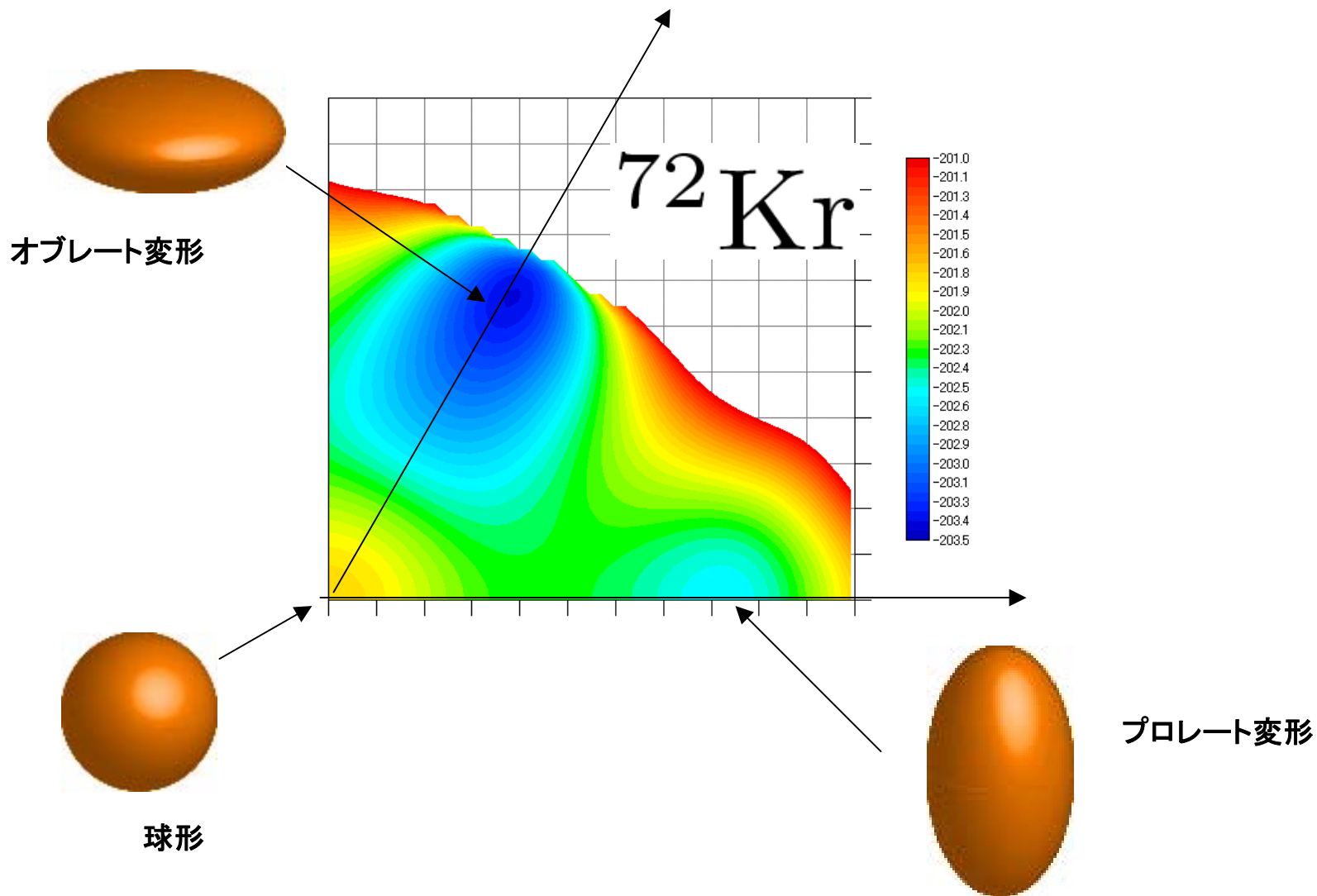


二つの状況を区別すること



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

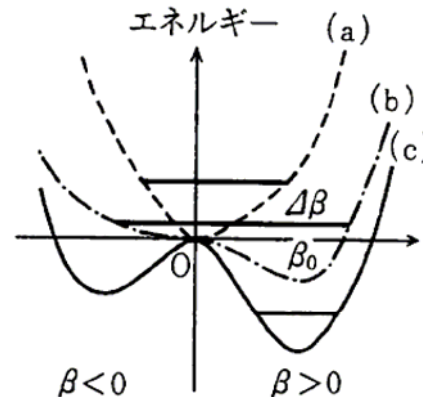


Quantum Phase Transition

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 ⁺	<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>1520</u> 10 ⁺
			<u>1262</u> 4 ⁺	<u>1224</u> 6 ⁺	<u>1216</u> 8 ⁺	
		<u>804</u> 2 ⁺		<u>747</u> 4 ⁺	<u>770</u> 6 ⁺	<u>1040</u> 8 ⁺
			<u>614</u> 2 ⁺			<u>638</u> 6 ⁺
				<u>334</u> 2 ⁺	<u>404</u> 4 ⁺	<u>317</u> 4 ⁺
					<u>138</u> 2 ⁺	<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

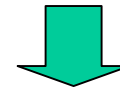
1957 BCS理論

(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

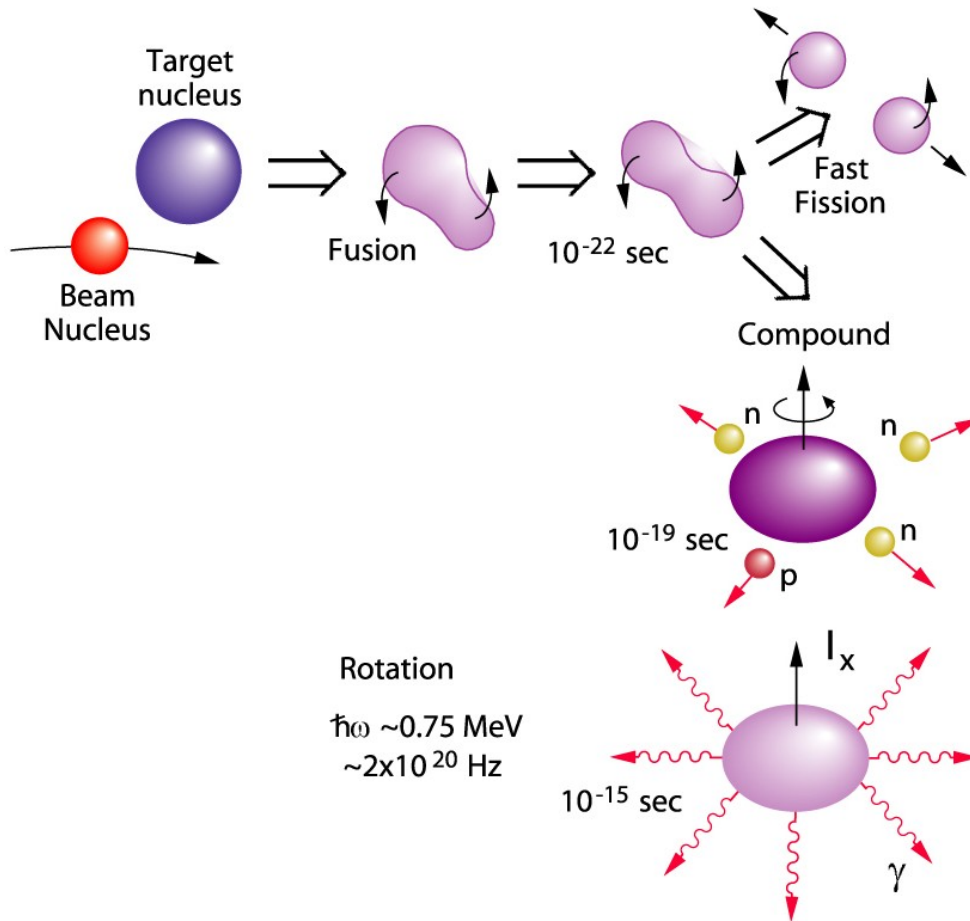
→ 回転座標系での準粒子シェルモデルの成立

1980年代: 高スピントロニクス発展

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

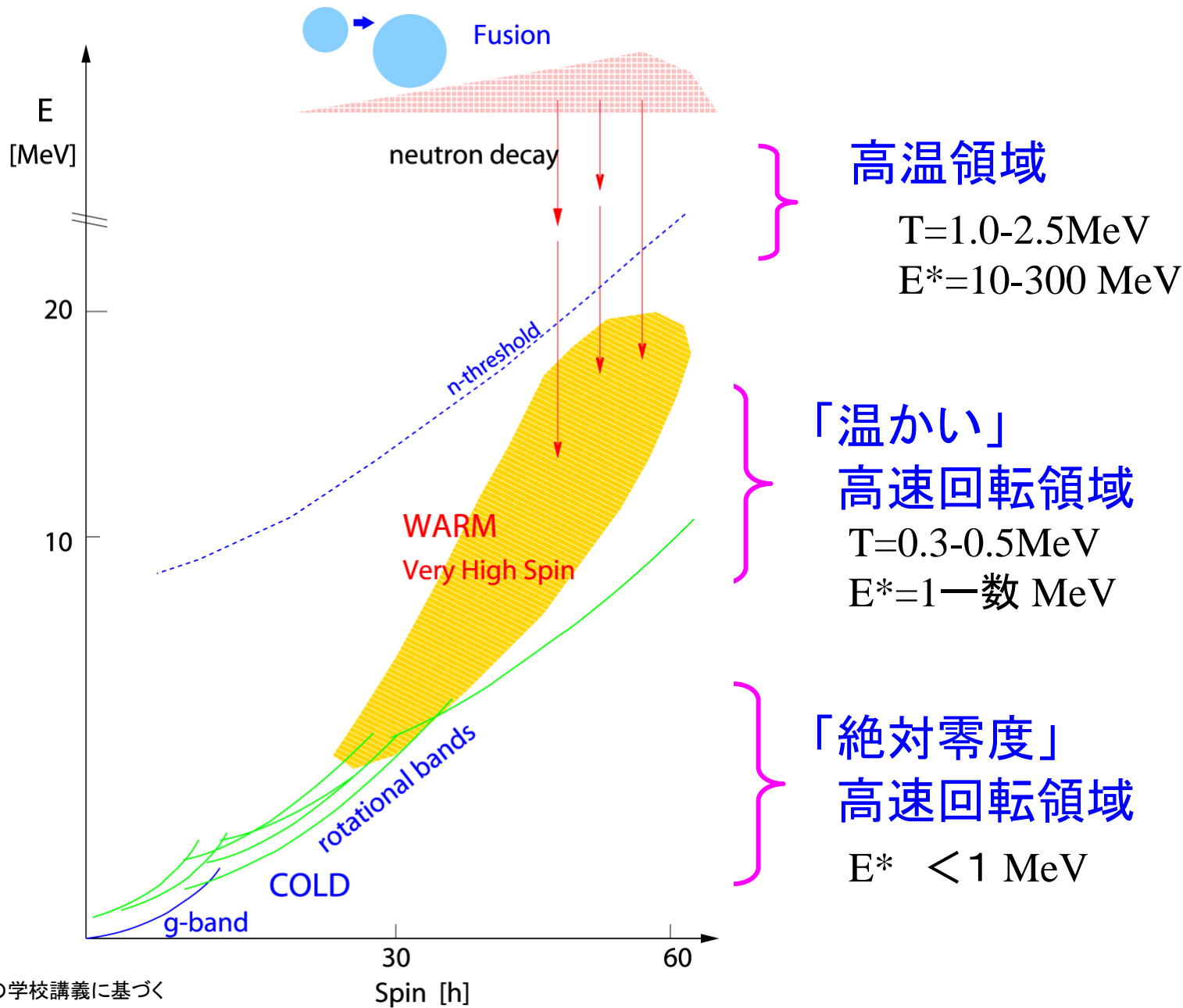


低温・高速回転



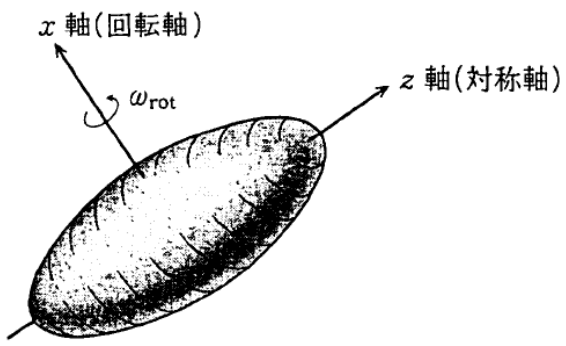
絶対零度・高速回転

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

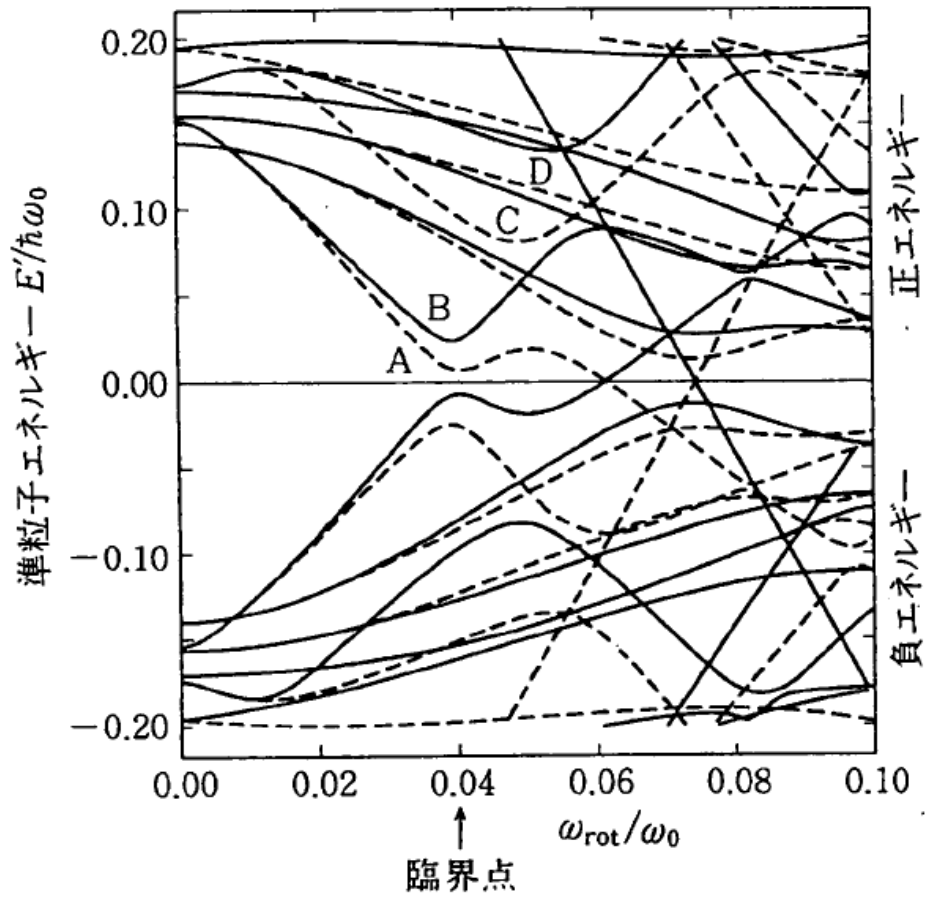
$$\begin{aligned}
 H &= \sum_i (e_i - \lambda) c_i^\dagger c_i - \Delta \sum_i (c_i^\dagger c_i^\dagger + c_i c_i) - \omega_{\text{rot}} \sum_{i,j} \langle i | J_x | j \rangle c_i^\dagger c_j \\
 &= \sum_\mu E_\mu a_\mu^\dagger a_\mu + \sum_{\bar{\mu}} E_{\bar{\mu}} a_{\bar{\mu}}^\dagger a_{\bar{\mu}}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



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

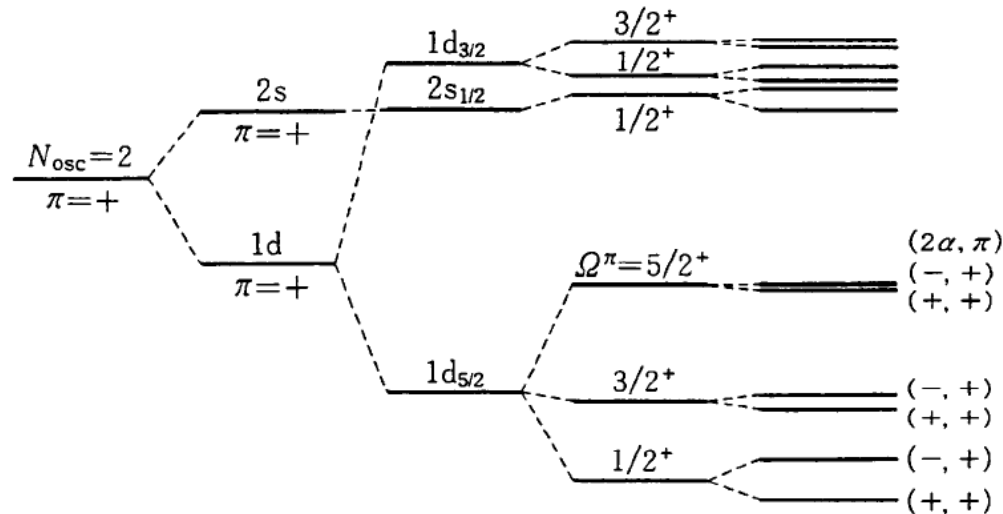


一粒子運動の一般化

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

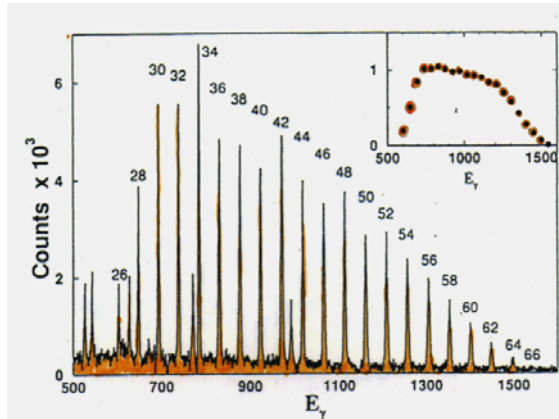
高速回転 \longrightarrow 時間反転対称性の破れ \longrightarrow 回転系準粒子モード



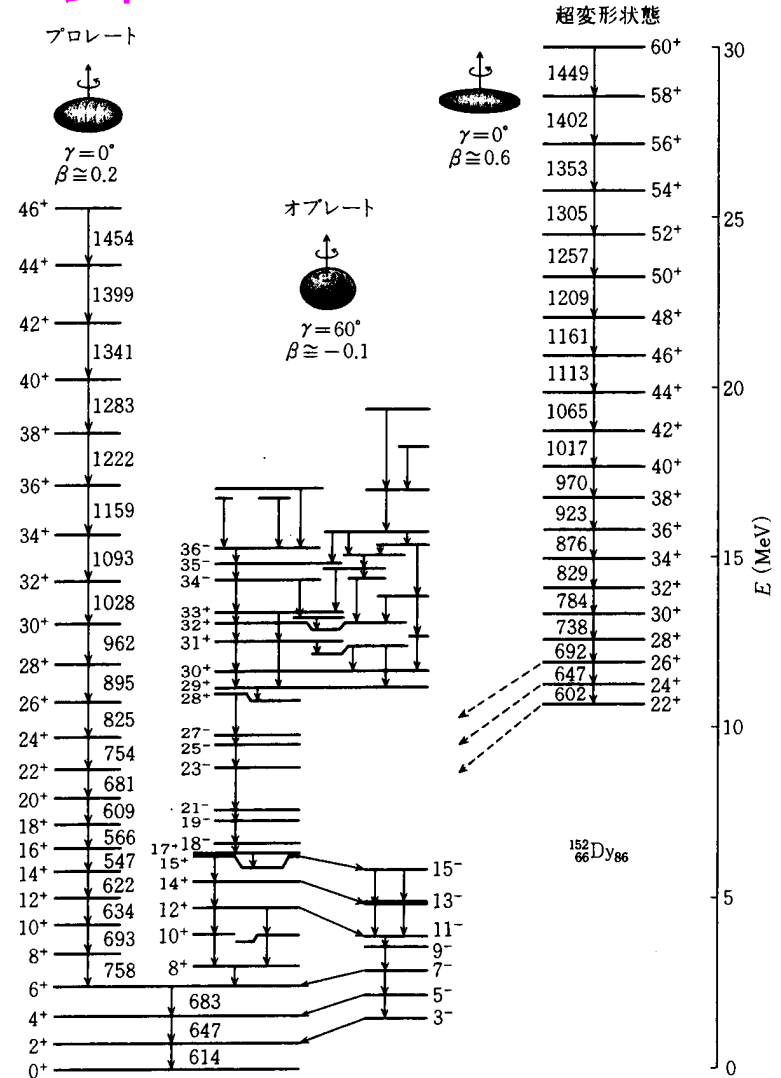
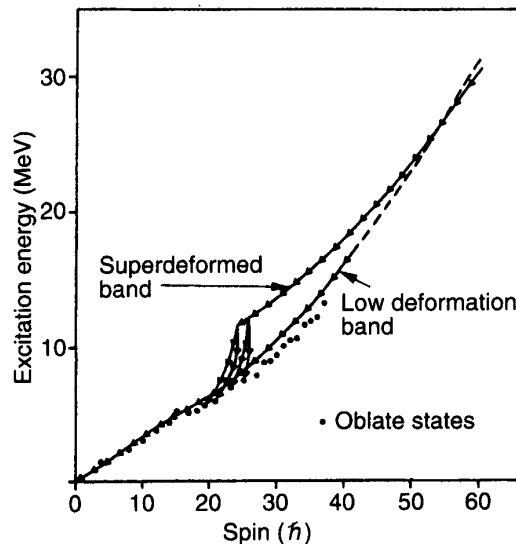
	調和振動子 ポテンシャル	Woods-Saxon ポテンシャル	j - j 結合 殻モデル	軸対称 変形	回転座標系
量子数	(N_{osc}, π)	(n, l, π)	(n, l, j, π)	(Ω, π)	(α, π)
縮退度	$(N_{osc}+1)(N_{osc}+2)$	$2(2l+1)$	$2j+1$	2	1

高速回転領域の核構造

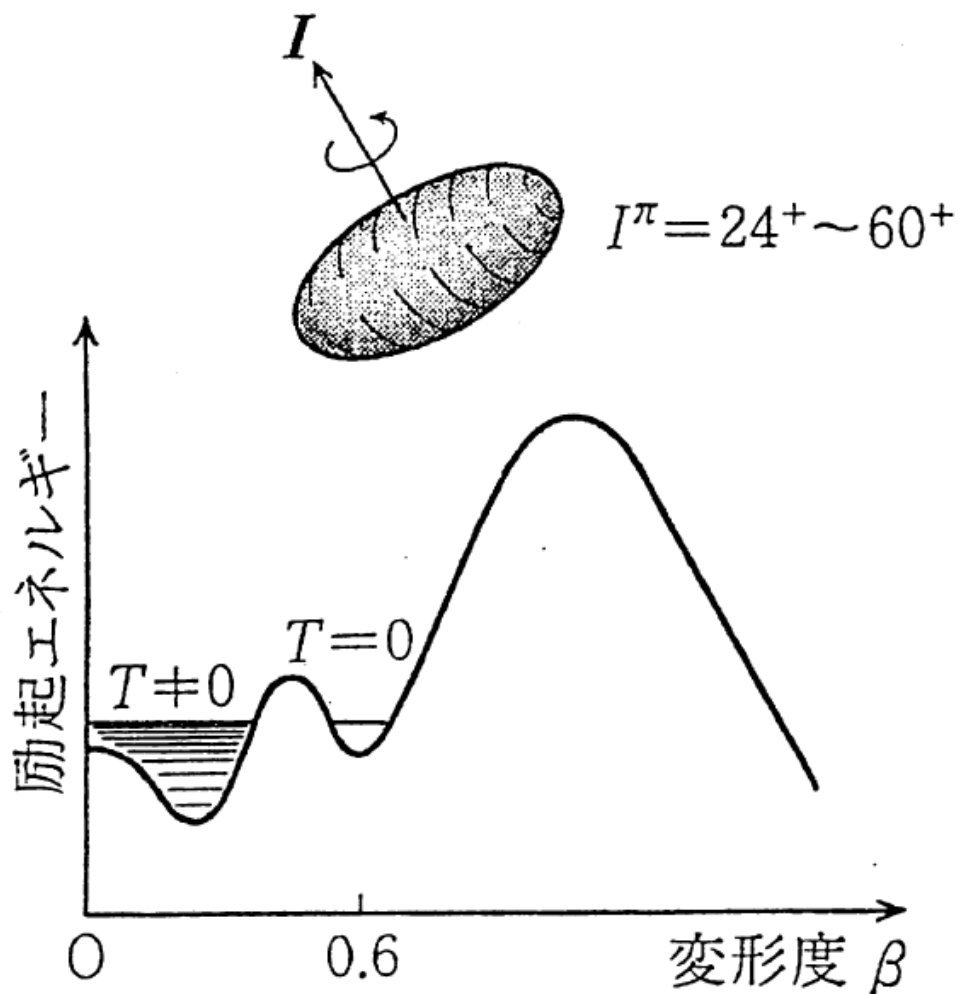
超変形回転バンド



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



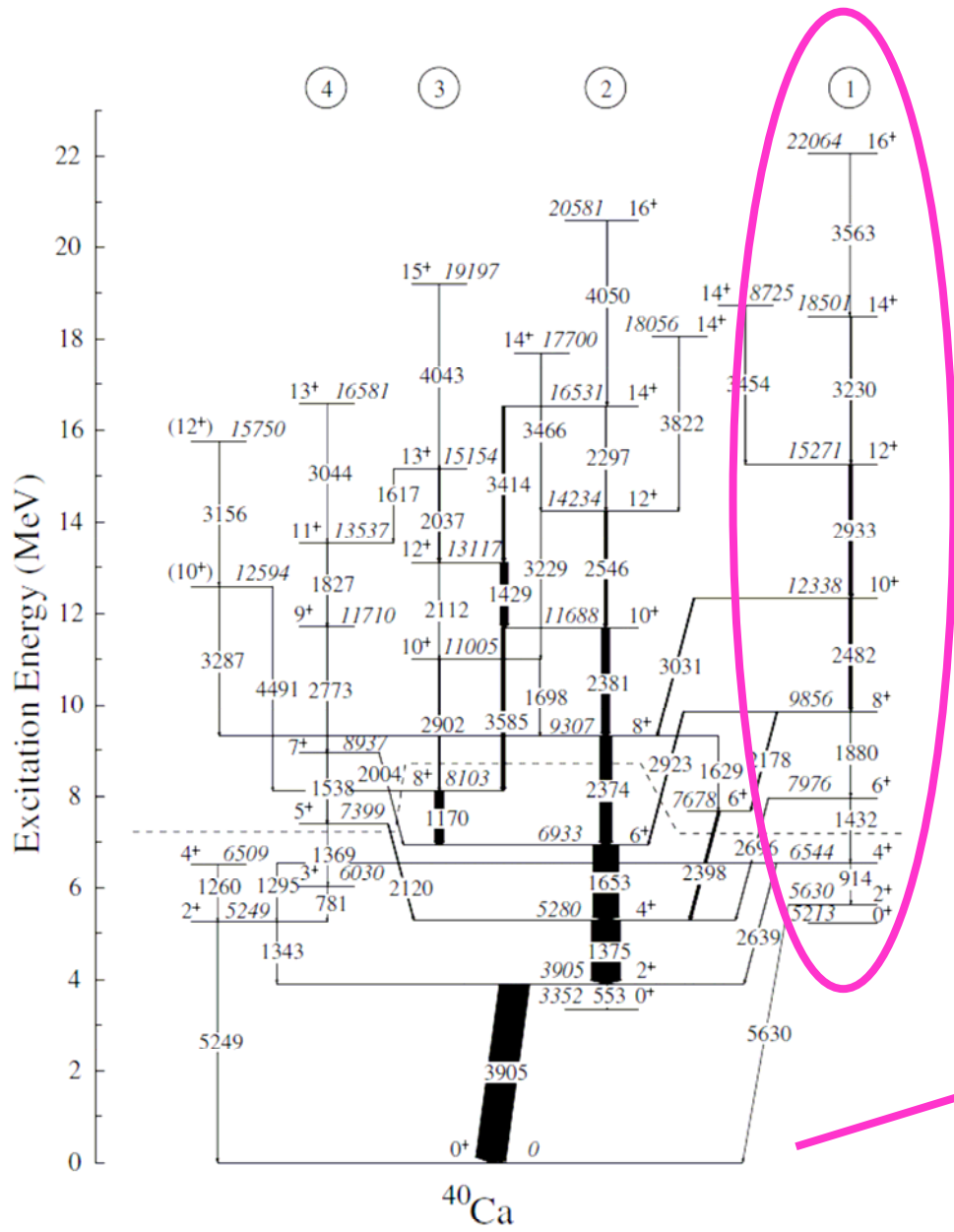
高速回転する超変形状態



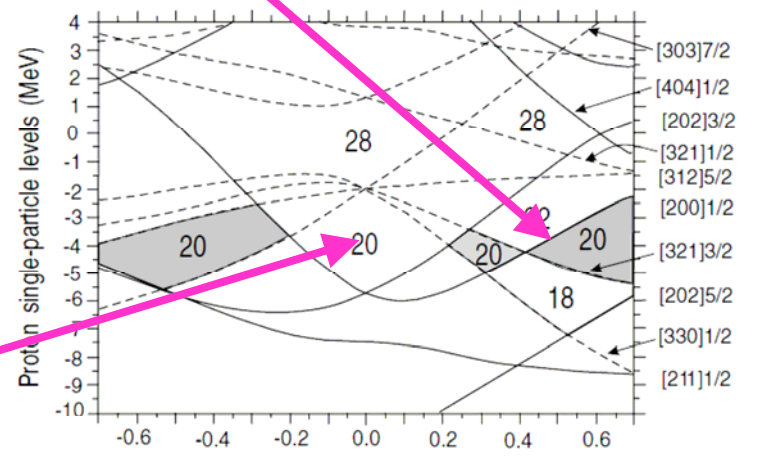
平均場の第2極小点
(二つの真空)

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 $^{40}\text{Ca}_{20}$



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

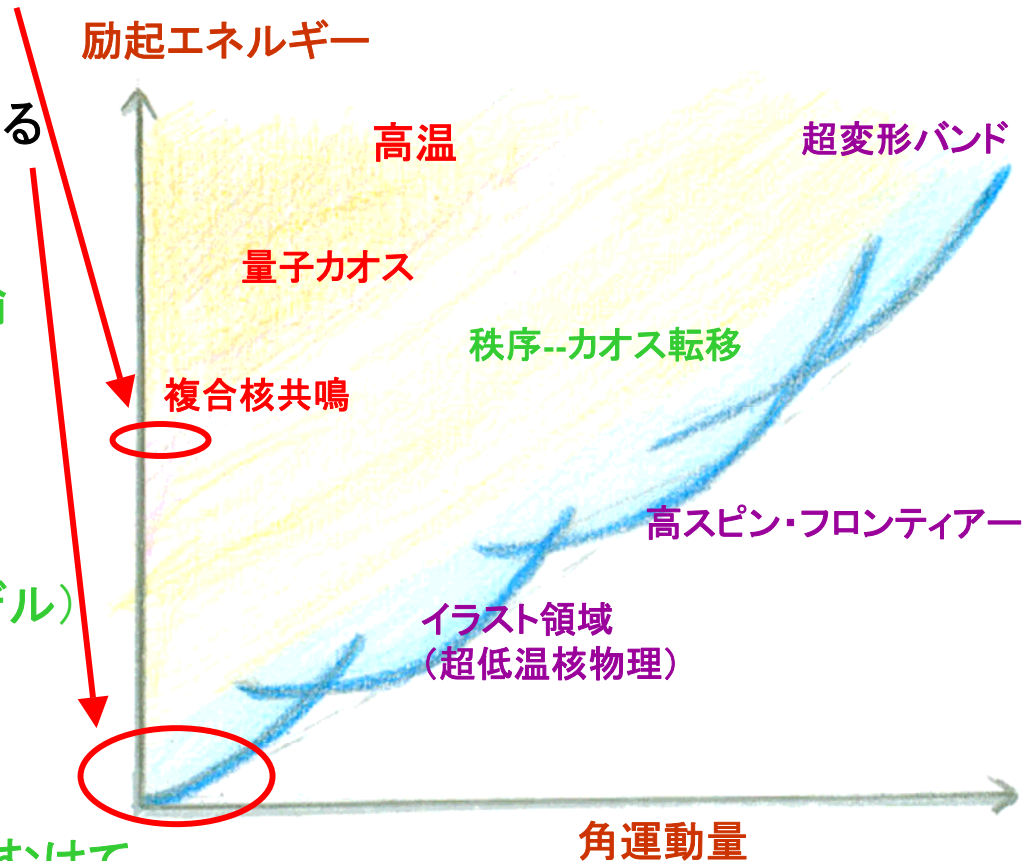
超低温イラスト領域での秩序運動

→ 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

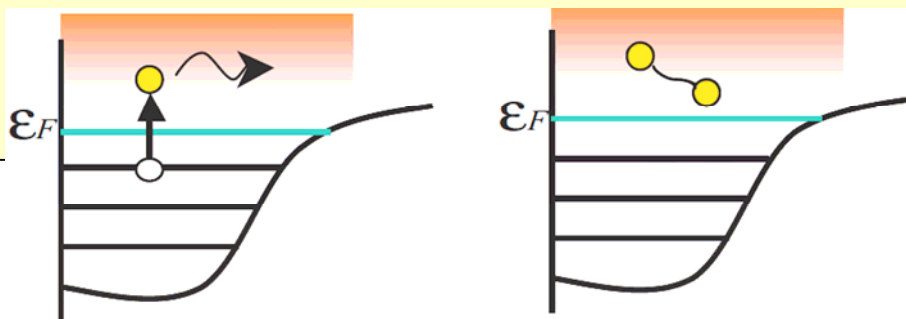
不安定核研究の始まり

→ 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