

反応実験屋のための核構造学

- ♥ 多様で複雑な核構造現象を**統一的に理解する**ために有用な視点と概念的枠組みについてできるだけ易しく解説する。
- ♥ 原子核という**極めて不思議な量子多体系**の性質を深く理解するという目標に向かって、最も基本的な少数の現代的概念(キーワード)の意味を**最新の実験事実に基づいて**具体的に理解することを目指す。
- ♥ シェルモデル、平均場モデル、集団運動モデル、クラスターモデル、液滴モデル、複合核モデルなどの**相互の関係と位置付け**について議論する。

原子核の描像に関する素朴な質問

問い 原子核はどんな形(かたち)をしていますか

問い 原子核は柔らかい? 硬い? どんなモノに似ていますか
気体、液体、粉体、弾性体、剛体、ソフトマター

これは実は根源的な問いかけ

♥ 量子物質の形(かたち)とは ?

♥ 量子物質にも弾性, 粘性, 塑性といった
古典力学的性質があるか? 理論的に定義できるか?

これらの力学的性質は作用の時間スケールに依存することに注意
例えば, 粘着剤, 氷河, 高速で突入する物体に対する液体の応答
原子核もこのように変幻自在な性質をもっているかもしれない

古典物理的概念や感覚しか持たない人間が, どのようにしたら
広がりをもった量子物質
(量子性が本質的な役割をはたしている有限多体系)
の構造と振る舞いに対する物理的描像を描けるようになるか

剛性(rigidity)とは

一見矛盾するようだが、
独立粒子運動(平均場)がこの性質をもたらす

弾性(elasticity)とは

短い時間スケールでの応答 (巨大共鳴)
配位をたもったまま1粒子波動関数が変形する

塑性(plasticity)とは

長い時間スケールでの応答(大振幅集団運動)
配位が不可逆的に変化する

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

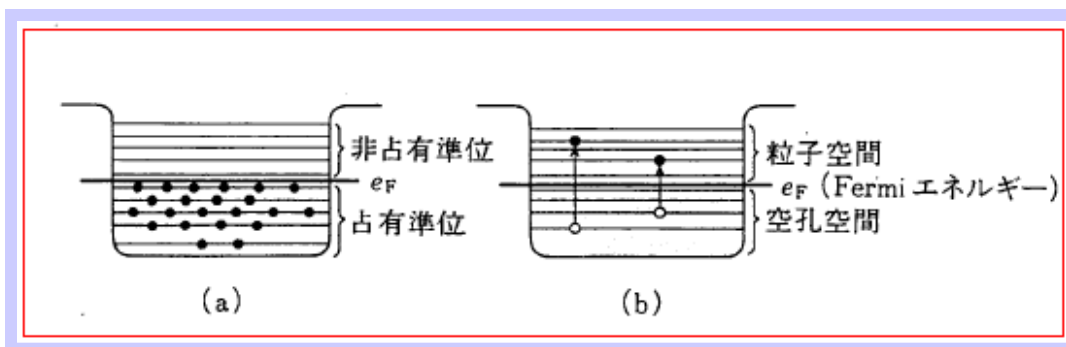
D.H. Hill and J.A. Wheeler
Phys. Rev. 89 (1953) 1102

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！

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 $N = {}_n C_r \simeq 2^{100} \simeq 10^{30}$

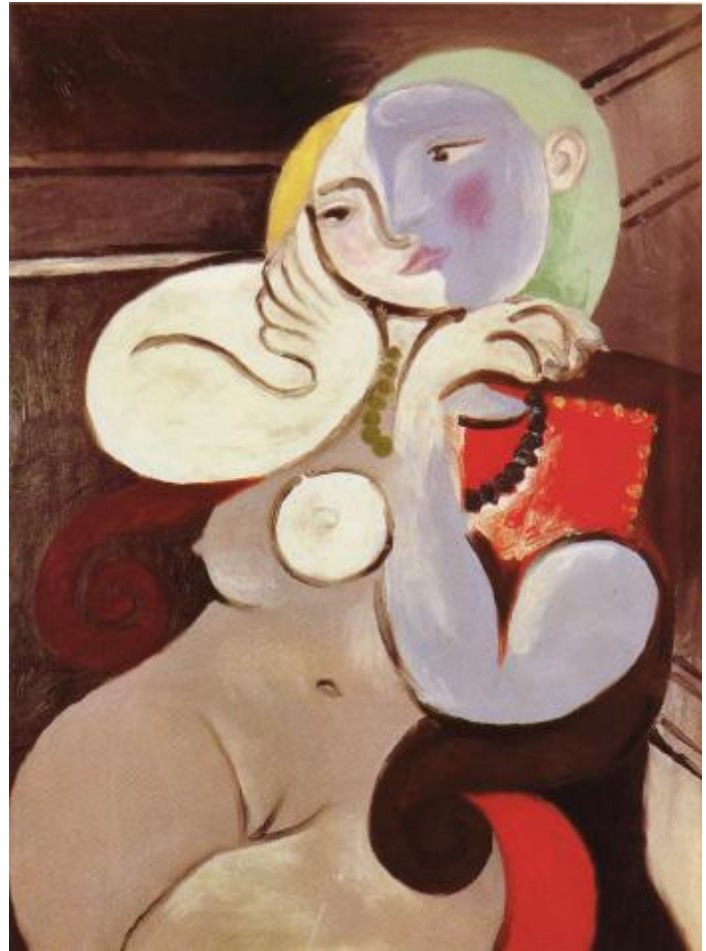
オープニング クイズ

あなたがイメージしている原子核の描像は
例えば ?

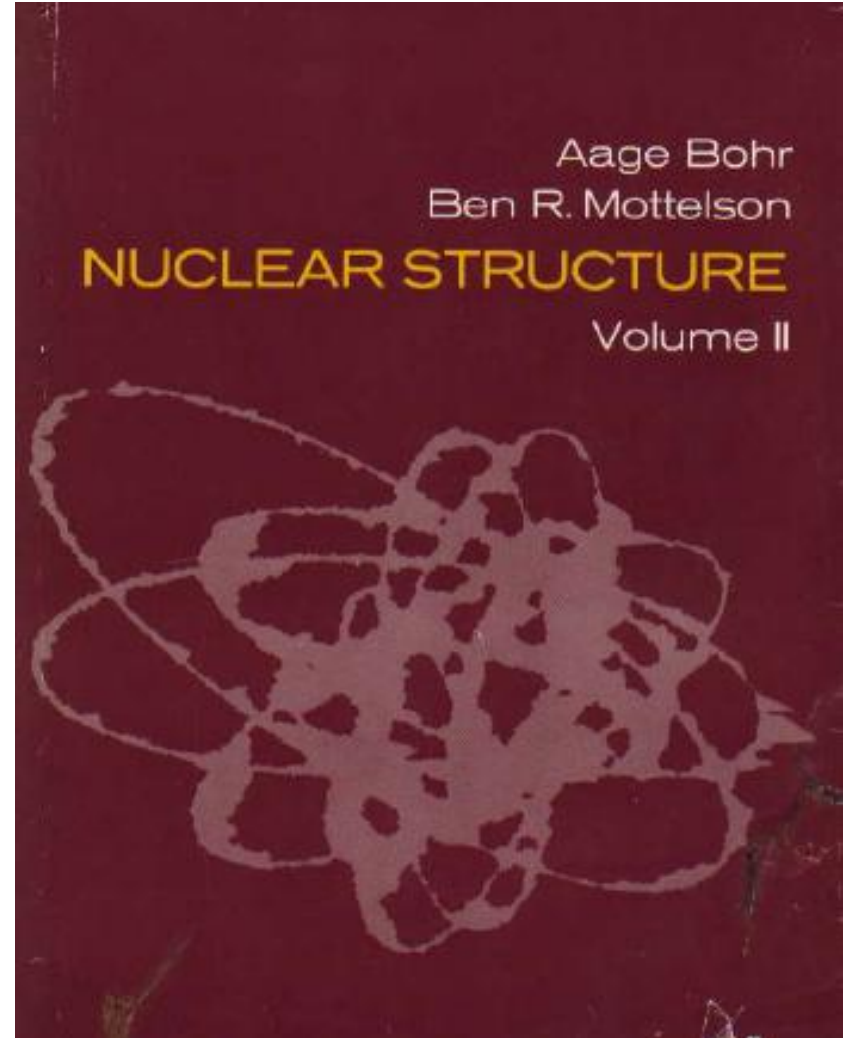
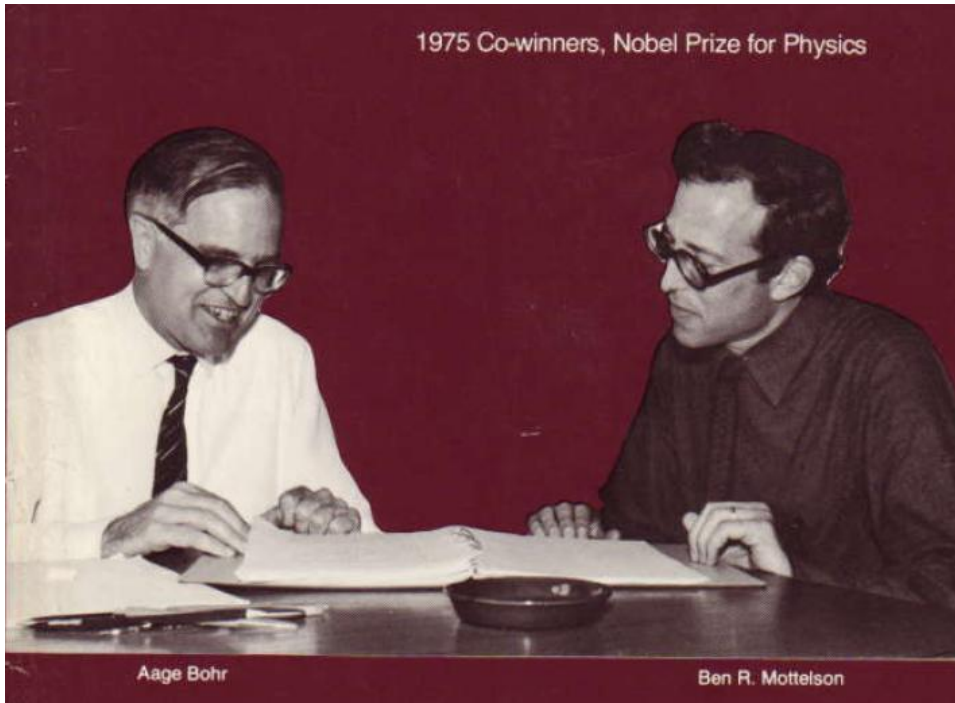


でも、この描像は何かおかしい。

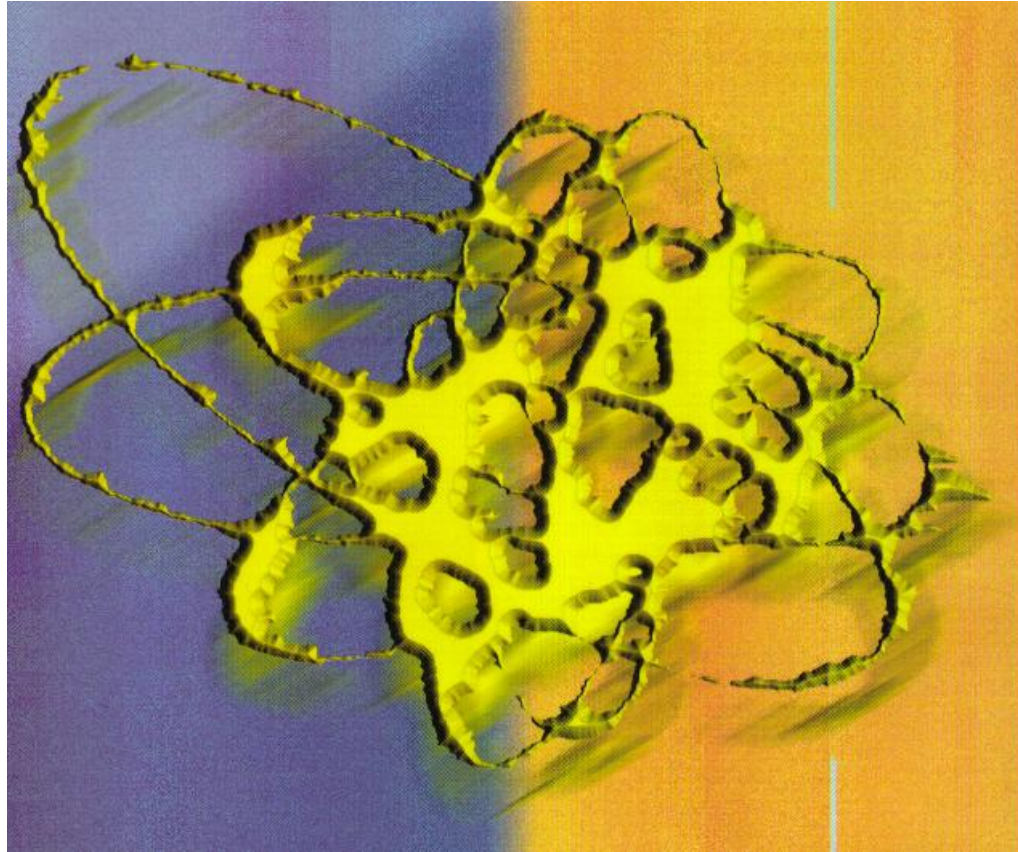
どこが可笑しいのでしょうか ???



Bohr-Mottelson



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

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

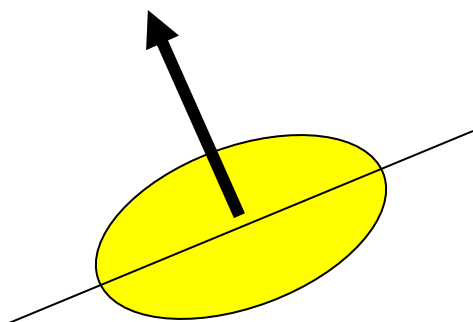
弾性 ↔ 塑性



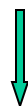
お互いに対立するものは相補的である (N. Bohr)

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

M1の大学院生との対話

問い Intrinsic state とは何ですか？

答え Intrinsic 座標系で定義された状態です

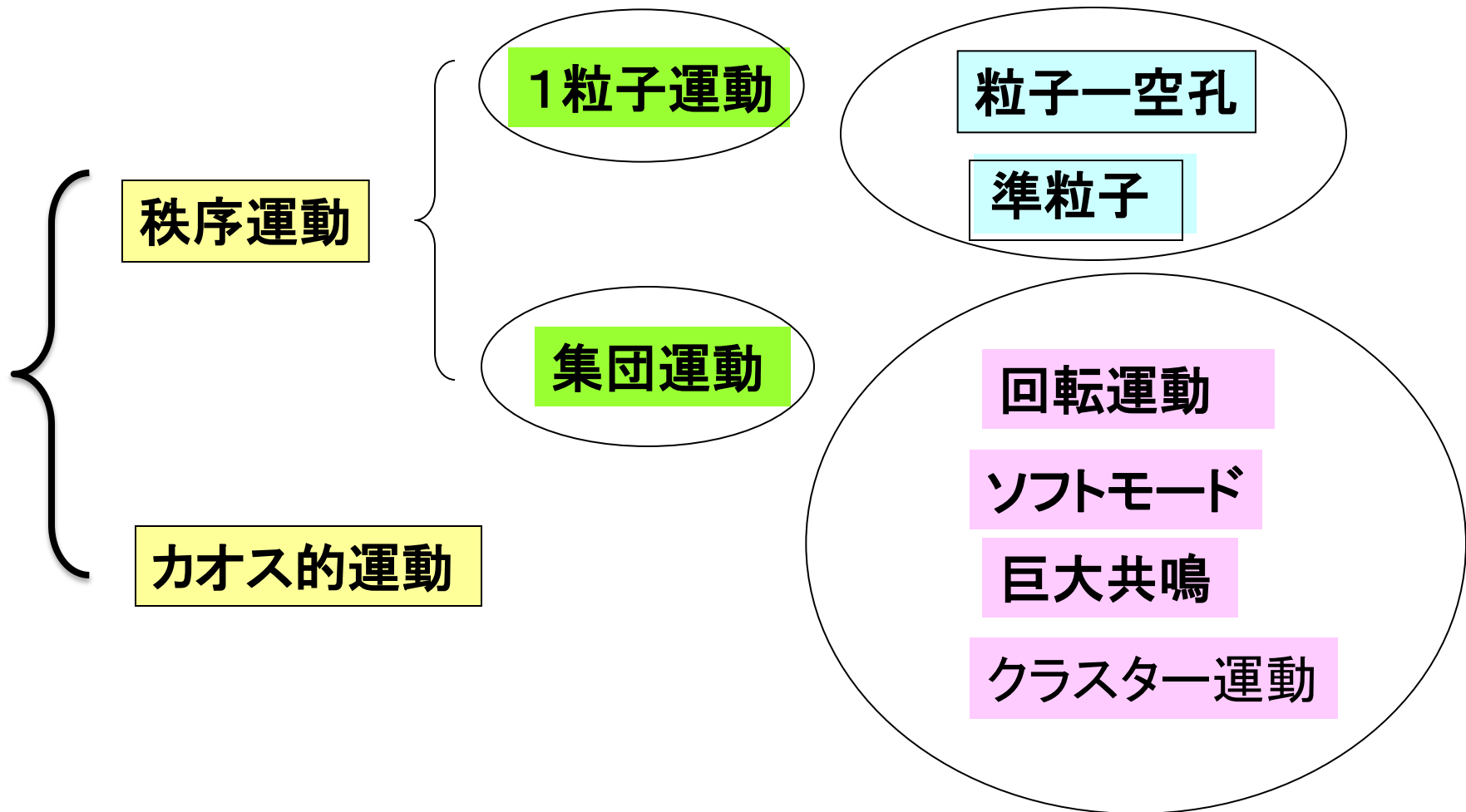
問い Intrinsic 座標系とは何ですか？

答え それは対称性を破った真空中に付随する座標系です

問い Intrinsic state と実験で観測する状態の関係は？

答え 実験室座標系では破られた対称性を回復した状態を観測します

核構造の大統一理論にむけて

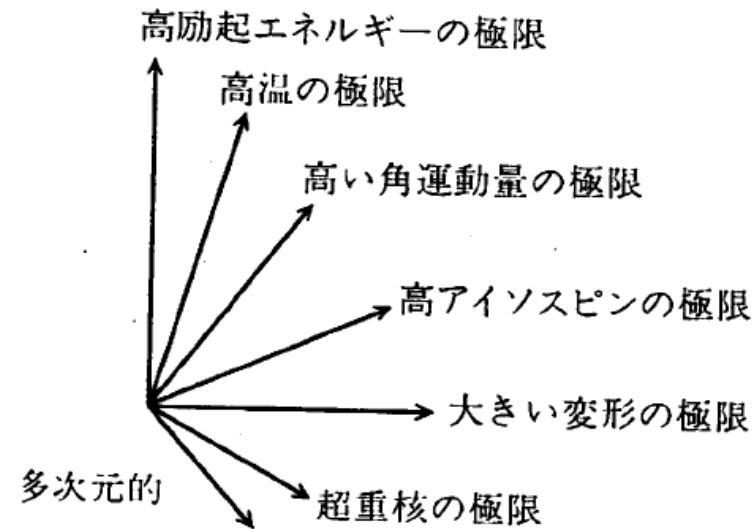


座標軸は多元的、複眼的思考が求められる

アイソスピン(陽子-中性子比)、
励起エネルギー、温度、角運動量、
変形自由度などに関する
多次元空間のなかでの

様々な極限状況にある
原子核の実験的探求に基づいて

原子核という不思議な量子物質を理解したい。
そのためのひとつの座標軸を提示する。



Key Concepts

- ♥ 真空とその励起モード
- ♥ 有限量子系における対称性の破れと回復
- ♥ 大振幅集団運動
- ♥ 秩序運動とカオス運動の統一的理解

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

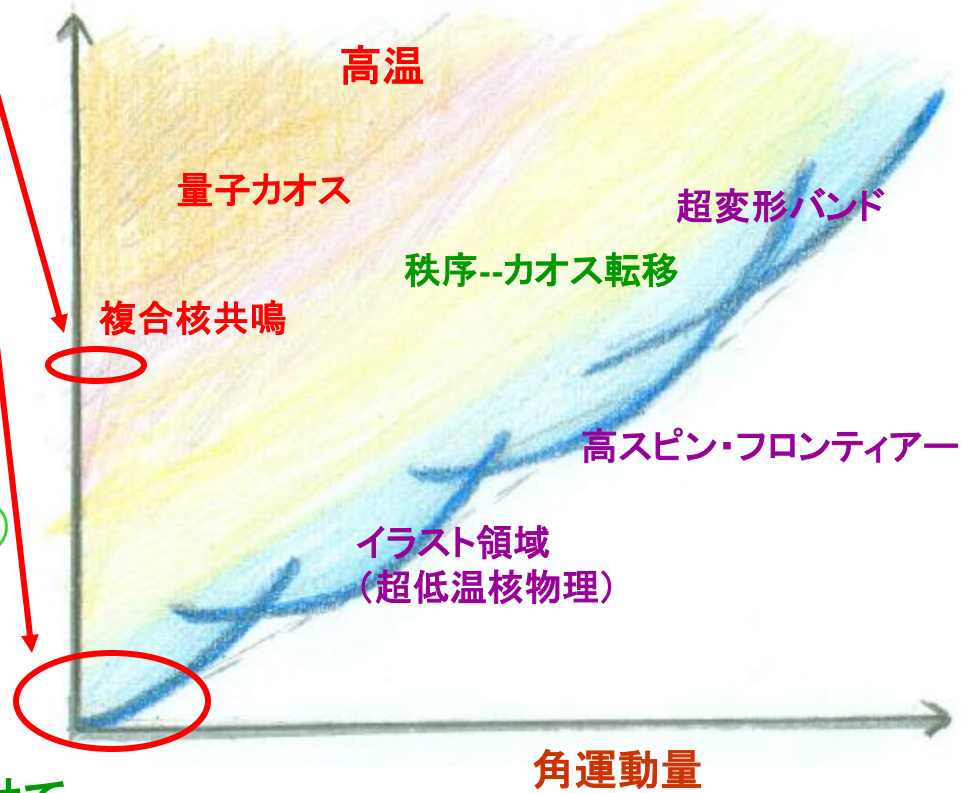
→ 一般化された平均場
(変形、対凝縮、回転系シェルモデル)

1986 超変形核の発見

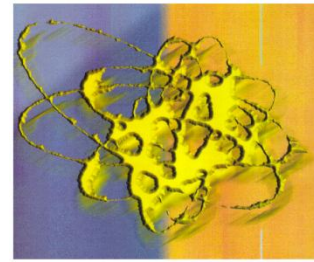
1990年代

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



いくつかのポイント



Bohr-Mottelsonの教科書の表紙に描かれている絵



「平均場と1粒子運動モード」は集団現象である。

平均場は強い相互作用している核子集団が生み出す秩序である
その基底状態は量子場の理論の真空に対応し、
量子多体系を記述するための出発点を与える



有限量子系で1粒子運動モードの描像を得るためには対称性を破った平均場を導入する必要がある。

より高次の対称性が破れるにつれて1粒子運動の概念が拡張される。
核構造論の歴史はより良い1粒子運動モードの発見の歴史でもあった。

球対称性の破れ---変形シェルモデル

粒子数(ゲージ対称性)の破れ---超伝導BCSモデルの準粒子

時間反転対称性の破れ---回転座標系シェルモデル

いくつかのポイント(続き)



「集団現象が1粒子描像を作る(創発する)」ことを端的に教えてくれたのが超伝導のBCS理論であった。

Bogoliubov準粒子はクーパーペアーの凝縮という集団現象のもとでの1粒子励起モードである



対称性を破った平均場の基底状態は縮退している。

- 破られた対称性が連続対称性の場合, この縮退を解き, 破られた対称性を回復する運動が(一般化された)回転運動

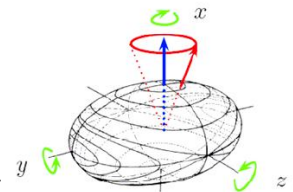
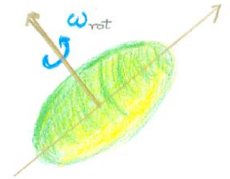
有限量子系ではこの運動が実際に起こり, 様々なタイプの回転スペクトルとして観測される

軸対称性の破れ---Wobbling回転バンド

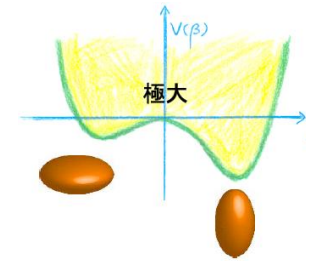
- 破られた対称性が離散対称性の場合には多重項が出現する

空間反転対称性の破れ---パリティー2重項

カイラル対称性の破れ---カイラル2重項



いくつかのポイント(続き)

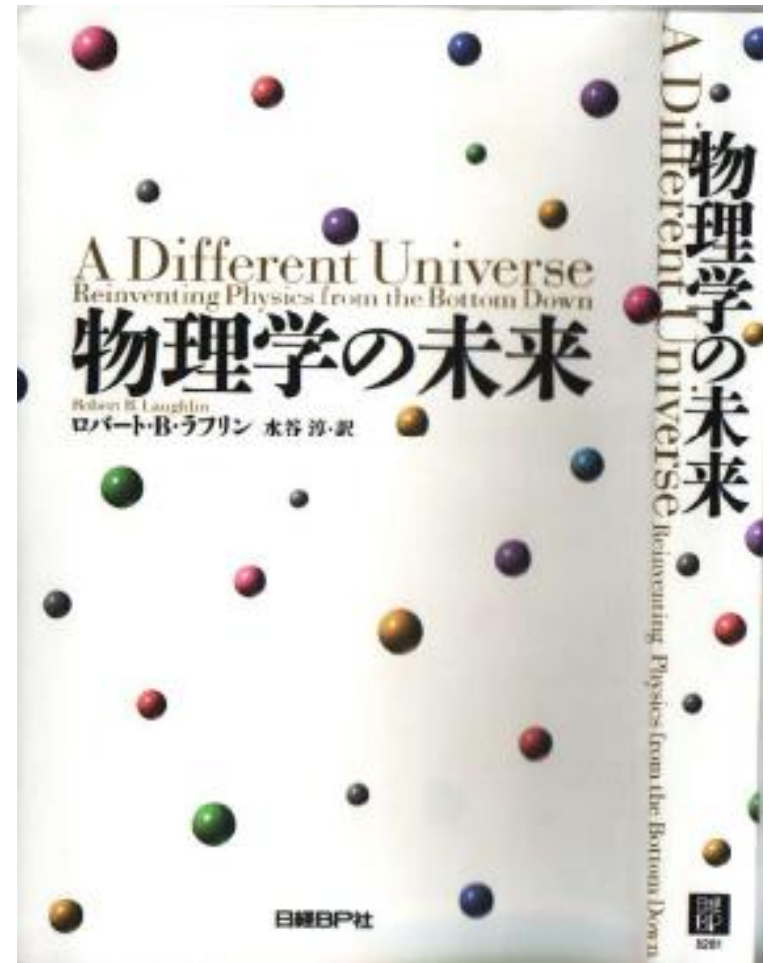
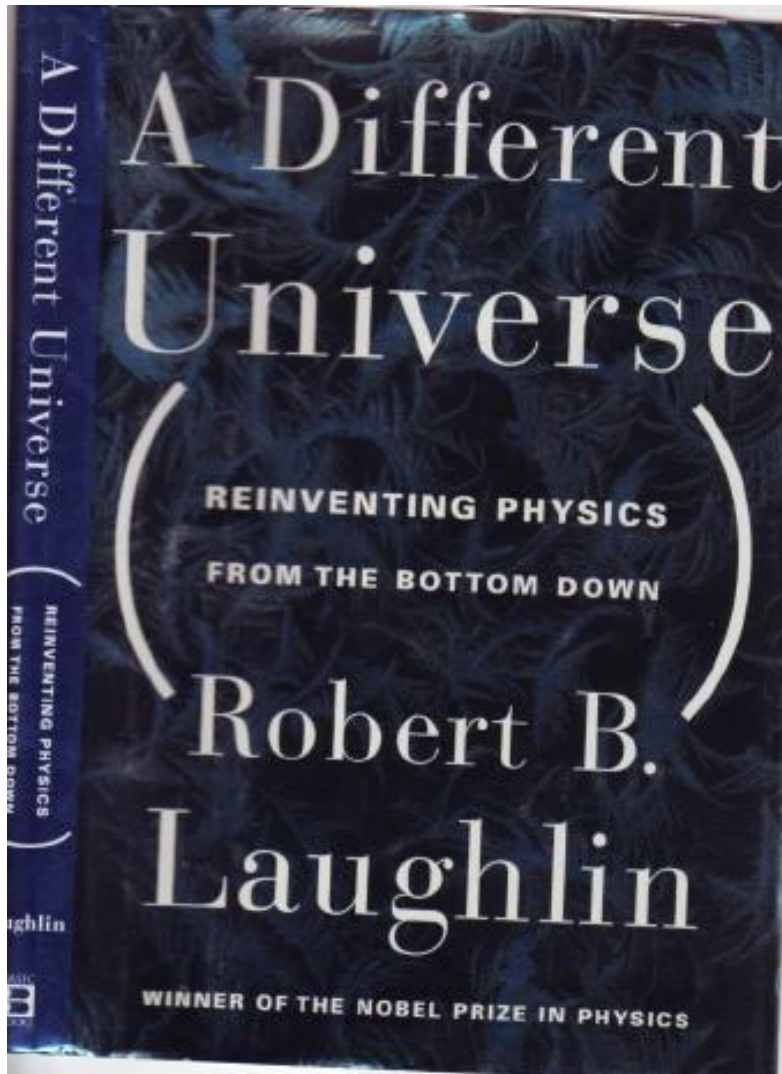


♡ 平均場は時間変化する。この運動が振動モードとして観測される

有限量子系の平均場の固有関数はそれぞれが多様な個性をもっているためきわめて多彩な振動自由度がある

♡ 現実の多くの核は平均場の量子相転移の近傍にあり、また、異なった平均場が共存/競合する変形共存現象が広範に知られている

このような大振幅振動も「(一般化された)時間に依存する平均場近似」に基づいて記述することが可能と思われる



(ラフリン: 驚くべき集団効果によって分数電荷が生じること(分数量子ホール効果)を明らかにし1998年ノーベル賞)

量子ホール効果に関して

The important issue implicit in the von Klitzing discovery is not the existence of physical law but rather what physical law is, where it comes from, and what its implications are. From the reductionist standpoint, physical law is the motivating impulse of the universe. It does not come from anywhere and implies everything. From the emergentist perspective, physical law is a rule of collective behavior, it is a consequence of more primitive rules of behavior underneath (although it need not have been), and it gives one predictive power over a limited range of circumstances. Outside this range, it becomes irrelevant, supplanted by other rules that are either its children or its parents in a hierarchy of descent. Neither of these viewpoints can gain ascendancy over the other by means of facts, for both are fact-based and both are true in the traditional scientific sense of the term. The issue is more subtle—a matter of institutional judgment. To paraphrase George Orwell, all facts are equal, but some are more equal than others.

超伝導のBCS理論に関して

Histories of large systems are simply different from those of small ones because they are descriptions of collective phenomena and not of pedantic detail. The effect being emulated in the theory of superconductivity is like this. It is the tendency of the electrons to lock arms and move as one gigantic body, just as crystallized atoms do. It is actually no different from what happens in crystallization, except in being more difficult to cover up by skipping to the “obvious” nonquantum description at key moments. When the number of electrons is extremely large, it becomes difficult to distinguish the true ground state of the superconductor from the low-lying excited states associated with collective motion of the entire assemblage. The nonuniqueness of Schrieffer’s description is thus a symptom of something extremely fundamental: the emergence of conventional meaning of the fluid body—the collective effect that transforms quantum mechanics into Newton’s laws. It is interesting that many physicists continue to be confused about this matter, thus demonstrating that youth is not a prerequisite for getting intellectually mugged by nature.

反応実験屋のための核構造学

1. 量子多体系の集団現象

多様で複雑な核構造と核反応現象の統一的理解をめざして

2. 超低温での集団励起スペクトル

有限量子系における対称性の自発的破れと回復

3. 安定核および不安定核での対相関

真空とその励起モード, 密度汎関数理論

4. 高速回転する原子核と超変形状態

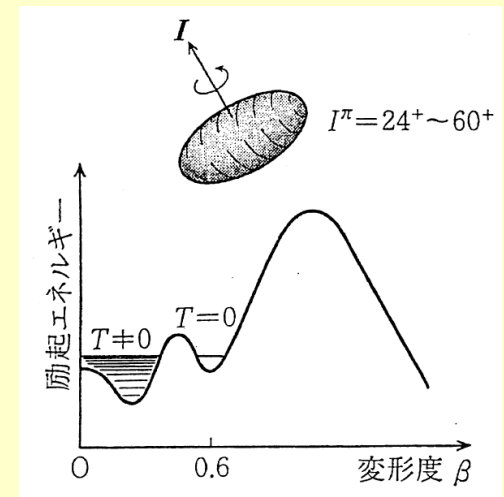
回転系シェルモデル, 超変形シェル構造

5. 大振幅集団運動の微視的理論

時間変化する平均場の理論, Bohr-Mottelsonモデルの微視的導出

6. 不安定核 (エキゾチック核) 研究の将来

束縛状態と連続状態の統一的記述にむけて





理研仁科センター
↓
中務原子核理論研究室

松柳研一

核構造物理学
有限量子系の集団現象

[研究の
概要](#)

[最近の
論文](#)

[講義録](#)

[論文リス
ト](#)

[写真](#)

[諸資料](#)

[リンク](#)

[English](#)

高速回転する原子核、超変形した原子核、中性子スキンをもった不安定核など、極限状況における新しい型の集団励起モードの探索とそれらに対する微視的モデルの展開に力を入れています。また、変形シェル構造の形成とその起源について半古典論の観点からアプローチしています。大振幅集団運動の微視的理論の構築、および、有限量子系における秩序運動とカオス運動を統一的に理解することが大きな目標です。

お知らせ

2008年3月、京都大学を定年退職し、今は理研と基研で研究しています。

351-0198 和光市広沢 2-1
理化学研究所 仁科加速器研究センター

606-8502 京都市左京区北白川追分町
京都大学 基礎物理学研究所

Open problems in the microscopic theory of large-amplitude collective motion

K Matsuyanagi^{1,2}, **M Matsuo**³, **T Nakatsukasa**¹, **N Hinohara**¹ and **K Sato**^{1,4}

¹ Theoretical Nuclear Physics Laboratory, RIKEN Nishina Center, Wako 351-0198, Japan

² Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

³ Department of Physics, Faculty of Science, Niigata University, Niigata 950-2181, Japan

⁴ Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

E-mail: matsuyanagi@riken.jp

Received 25 December 2009

Published 8 April 2010

Online at stacks.iop.org/JPhysG/37/064018

Abstract

Construction of the microscopic theory of large-amplitude collective motion, capable of describing a wide variety of quantum collective phenomena in nuclei, is a long-standing and fundamental subject in the study of nuclear many-body systems. The present status of the challenge toward this goal is discussed taking the shape coexistence/mixing phenomena as typical manifestations of the large-amplitude collective motion at zero temperature. Some open problems in rapidly rotating cold nuclei are also briefly discussed in this connection.

大振幅集団運動の微視的理論における未解決問題

松柳研一^{1,2} 松尾正之³ 中務孝¹ 日野原伸生¹ 佐藤弘一^{1,4}

¹ 理研仁科センター、² 京都大学基礎物理学研究所、³ 新潟大学理学部物理教室、
⁴ 京都大学大学院理学研究科物理学宇宙物理学専攻

概要

原子核にみられる極めて豊富な量子集団現象を記述することの出来る、大振幅集団運動の微視的理論を構築することは原子核多体問題の基礎的課題である。この目標への挑戦の歴史と現在までの到達点を整理し、これからの研究が待たれている未解決問題を提示する。絶対温度ゼロでの大振幅集団運動の典型として、変形共存/混合現象を主として議論する。高速回転する超低温の原子核における大振幅集団現象にも触れる。