

非線型現象はわれわれの周りや宇宙に満ち満ちているが、物質科学としての物理では、その周辺で始まったといえる。素粒子から物性まで、自然現象の素材は出揃ってきた。それらが繰り広げる自然現象のドラマを解明するとき、非線型物理は、基本的役割を演ずるに違いない。軌道や場の不安定性や chaos の物理的研究は、その重要な一翼を担うものと思われる。現在では、基礎さえはつきりしない、混沌とした分野であるが、そのような分野に活力を与え、掘りどころを与えてきたのは、基研の物性の特色ではなからうか。

座長： 御質問をどうぞ。

益川： chaos かどうかは可積分かどうかできまるといわれたが、可積分でなければ chaos なのか。

森： 非可積分は十分条件にはならない。天体物理での例として、土星の輪は三体問題になって非可積分であるが、chaos ではない。

佐藤： マクロかミクロかによらない論理構造になっているのか。

森： そうだと思う。

3.

東大・核研 丸 森 寿 夫

## 原子核物理における新局面

### §1 物質科学としての核物理学

今世紀の物質科学の発展について、まず第一にあげられるものは、物質の基本構成要素の追求という立場からの“物質の構造”の研究であろう。物質が不可分割な原子からなるという19世紀の物質観は、今世紀になって原子が原子核と電子からなり、原子核もまた陽子と中性子とからなることが明らかにされて、根底からくつがえされた。さらに、ここ20～30年間の素粒子物理学の発展は、これら素粒子さえも、もはや物理の窮極の構成要素ではないことを、ますます明確にしつつある。こうして、現代物理学は、物質は汲みつくしえない深さの階層構造をもつものであって、分子・原子・原子核・素粒子などのような原子論的な諸概念は、いずれも研究の進展に応じて次第にあげだされてきた物質構造上の諸階層を表わすものである、という認識をもたらした。これらの原子論的諸概念は質的に異なった物質の存在様式を特徴づけるものと規定することができよう。

丸森寿夫

今世紀はまた“物質の性質”を理解する上で偉大な発展があった。いわゆる物性物理学や統計物理学がこの方面の研究にとって決定的な役割を演じたことはいうまでもない。よく知られているように、物性物理学の中心課題は、巨視系としての物質の様々な存在形態や性質を微視的な電子-原子核多体系に基づいて解明することである。この場合、原子核は荷電  $Ze$ 、質量数  $A$  の粒子と規定され、この微視的多体系の構成要素間の基本相互作用は電磁相互作用である。今世紀の物性物理学の目ざましい発展は、たとえ多体系の構成要素の運動方程式とその間の相互作用がよく確立されたものであったとしても、多体系の全体としての“巨視的”な性質の解明は、つねに、予期されない種々の“新概念や新法則”の発見をもたらすものである、ということを理解する上で極めて教訓的であった。物質の存在様式を特徴づけるそれぞれの階層には、“固有の法則”が存在するという認識である。

今世紀の物質科学のもう一つの特徴は、“物質の進化”についての重要な認識があったことである。不変な元素と不可分割な原子を基礎とする19世紀の物質観に反して、現代の原子核実験室では、たえず新しい元素が生みだされ、原子核が破壊されている。こうした原子核物理学の発展を中心にして、星のエネルギー源、元素の起源、宇宙の進化などを解明する天体核物理学が急速に発展しつつある。このように現代物理学は、物質の存在様式としての異なった階層が、互いに密接に依存して共存するだけでなく、互いに移り変りながら全体として進化の歴史を形成している、という認識をもたらした。

こうして、広い物質科学という観点に立ってみると、“物質”を更に深く理解するためには、物質の新しい基本構成子(階層)を研究する素粒子物理学と同様に、物質の階層構造の高度に錯綜した相互依存・相互転換の動力学的機構についての研究が基本的であることがわかる。すでに物性物理学や統計物理学は、原子・分子からなる微視的な多体系と、巨視的系としての物質の存在形態・諸性質との間の相互依存・相互転換について、豊富な新概念・新法則を発見しており、さらに止まることを知らずに前進しつつある。

“物質の性質や進化”の認識をさらに深めるためには、従来の物性物理学に加えて、原子核(核物質)の存在形態・諸性質を、ハドロンからなる素粒子多体系として解明することが不可欠である。これは、原子核物理学本来の目的にほかならない。原子核と素粒子という二つの物質の存在様式間の相互依存・相互転換の動力学的機構の解明が、その主要課題なのである。その意味では、核物理学は未だ初期の発展段階にあり、今後従来の物性物理学の発展と同様に、核物質の存在形態・諸性質についての新概念・新法則を次々と発見し、止まることなく前進するはずである。この観点からみると、今日の原子核物理学は、その発展段階において画期的な新局面を迎えているといえよう。以下この辺の事柄を明らかにしたい。

## §2 基底状態付近での原子核の運動様式

### —— 原子核の構造 ——

素粒子多体系としての原子核を結びつけている力は“強い相互作用”のカテゴリーに属するもので、電子-原子核多体系の電磁相互作用とは基本的に異なっている。よく知られているように、この“強い相互作用”の特徴的性質は、任意の2個のハドロンの間に働く相互作用には、多かれ少なかれ、総てのハドロンが関与しているという点である。たとえば、種々のハドロンより大きいエネルギーを持った2個の核子

の衝突では、“強く相互作用”している種々のハドロンをかなりの確率でつくりだすことができる。その意味では、“強い相互作用”を行う素粒子多体系としての原子核は高度に錯綜した構造と性質をもつものであることが予想される。

幸に、原子核研究の初期の段階、すなわち自然界に存在する（基底状態付近の）原子核の構造の研究の現段階では、このような“強い相互作用”の特性に基づく複雑さは、基本的には発現しない。実際には、核内での核子の平均運動エネルギーは $\sim 25 \text{ MeV}$ であることが知られており、これは核子それ自身の静止質量 ( $Mc^2 \sim 1 \text{ GeV}$ ) だけでなく最も軽いハドロンである $\pi$ -中間子の静止質量 ( $m_\pi c^2 \sim 140 \text{ MeV}$ ) より小さい。したがって、基底状態付近での核構造や低エネルギーでの核反応機構の研究では、原子核を“自由な核子”と似た性質をもった有限個数  $A$  の核子からなるものとして記述することが良い近似になる。この場合には、核子と“強く相互作用”している他のハドロンの関与は、核子間に作用する“核力”という形で近似的な形で考慮されることになる。

この核力を伴った有限核子多体系としての、第1近似下での原子核構造の研究が、1932年の中性子の発見と共に始まった原子核物理学の中心課題であった。そして50年近くたった今日、核物理学は、自然界に存在する原子核の基底状態付近での構造や運動様式についての数多くの新概念や新法則を明らかにしてきた。

現在では実験的にも理論的にも、核内での核子の平均自由行程が、核内核子間の平均距離にくらべて大きく、多くの状況下では、原子核の大きさよりも大きいことが知られている。このように長い平均自由行程は、核内での核力の主要な部分が、核子の中で自由に“独立粒子運動”を行うような1体平均ポテンシャルとして寄与するものであることを意味する。この独立粒子運動は、“原子核の殻模型”の名の下に、実験的にも理論的にも確固とした基礎をもつ原子核の運動モードの一つである。

勿論、核力は電磁的な力と違って強い状態依存性と特異性をもっているから、核内核力のすべてが1体平均ポテンシャルで置きかえられるものではなく、1体ポテンシャルになりきれない核子間の有効相互作用が存在し、核内核子間に種々の重要な相関を生じさせるはずである。これらの中で典型的なものとしては、（中・重核に生ずる）角運動量  $J=0$  に組んだ核子対の凝縮に導く“対相関” (pairing correlation) や、（軽い核に生ずる） $\alpha$ -クラスター構造に導く“ $\alpha$ -相関”をあげることができる。

過去4半世紀の核構造論の発展の歴史をふりかえてみると、その中心テーマは、互いに相補的な概念——すなわち、“独立粒子運動”を基礎に置く諸概念と、原子核全体としての集団的な振舞である“集団運動”に基づく諸概念——を、如何にして正しく位置づけるかという努力の継続であったということができよう。この基本的な二つの運動モードの絡み合いとして原子核系の諸特性を説明する研究は、A. Bohr—B. Mottelson による“集団模型”(1952)が出发点であった。原子核の殻模型では、核内核子が独立粒子運動を行っている平均ポテンシャルは、球対称で、その壁は固く変形することができないものとして仮定されている。もしこの平均ポテンシャルが変形可能であるとすれば、このポテンシャルの壁は、粒子の作用にともなって、動きだすはずである。この運動こそが、原子核研究の初期に“液滴模型”の名で表現された集団運動の内容である。以上が A. Bohr—B. Mottelson の集団模型の背後にある基本的な考えであった。

したがって、この模型では原子核系のハミルトニアンは

$$H = H_{\text{coll.}} + H_{\text{part.}} + H_{\text{coupl.}}$$

で与えられる。 $H_{\text{coll.}}$ は集団運動としての液滴の表面振動を、また $H_{\text{part.}}$ は、球対称平均ポテンシャルと残留有効相互作用からなる殻模型のハミルトニアンを表わす。 $H_{\text{coupl.}}$ は、二つの運動モード間の相互作用を意味し、これを通じて粒子の作用が平均ポテンシャルに伝達し、また平均ポテンシャルの変形の効果が粒子運動に移行する。この相互作用が強くなると平均ポテンシャルは、大きく変形した平衡形状をもつものとなる。そして、この変形によって“破られた対称性”を回復するものとして、新たに集団運動としての回転運動が発生することになる。

この現象論的な集団模型が、低エネルギー励起スペクトルを説明するのに素晴らしい成功を収めるにつれて、原子核構造論における新しい課題が発生した。粒子多体問題としての微視的な立場から、粒子自由度によって集団運動を記述し、このモードの微視的構造を明らかにする課題である。1950年代の末から1960年代の初頭にかけては、原子核多体問題の急激な発展があった時期であった。この時期、超伝導理論でのBCS-Bogoliubovの“準粒子”の方法が、核内核子間の対相関を取扱うのに極めて有効であることが明らかにされた。また表面振動運動の量子(フォノン)がコヒーレントな相関をもった2準粒子励起からなることが、準粒子乱雑位相近似(RPA近似)の下で明らかにされた。こうした集団運動モードに対する理解の進展によって、表面振動以外の、スピン・荷電スピン・核子数といったような量子力学固有の物理量と結びついた、種々の集団運動モードが存在することも認識された。そして核現象の背後にある“素励起モード”という概念が有効な役割を果たすことがわかってきた。

回転運動の多体問題では、分子と違って、剛体構造を持たない量子力学系の回転運動の一般理論を建設するという方向が生み出された。この研究によって、“変形”によって生ずる内部構造の“対称性の破れ”が、回転運動を規定する上で基本的な役割を演ずることが明らかにされた。こうして原子核には、通常の3次元空間の中での回転だけでなく、スピン空間・荷電スピン空間・ゲージ空間を含む異った次元の空間での“変形”と結びつく、様々な回転運動が存在することも知られるようになった。

### §3 高い核運動量を持った回転状態

#### —— 極限条件下での原子核 ——

1970年代の原子核研究の主要なトピックスは、重イオン加速器と測定装置の急速な発展によってもたらされたといっても過言ではない。重イオン・ビームによって高い角運動量をもった複合核をつくり、そのカスケード $\gamma$ 線を調べる研究は、森永らによって始められたが、やがてイン・ビーム分光学(inbeam spectroscopy)という新分野を開いた。イン・ビーム分光学によって、これ迄よりも高い励起状態の研究が可能となり、“素励起モード”に基づく種々のバンド構造がその姿を現わした。

変形領域核にみられる回転バンドの構造は、それ迄は、角運動量にして $I = 10(\hbar)$ 程度迄観測されていた。理論的には、原子核は束縛状態として約 $I \sim 100$ 位迄の角運動量をもちうるが、重イオン・ビームの利用によってこのすべての角運動量の領域を観測する可能性が開けたことになる。第1図は励起エネル

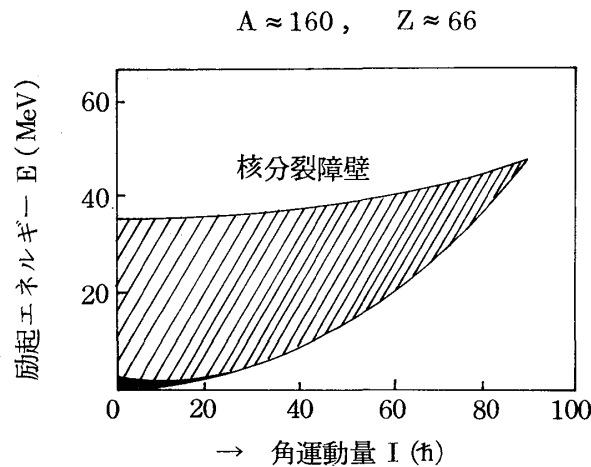


図 1. E-I ダイアグラム。黒ぬりの領域が従来の低エネルギー励起状態を表わす。斜線部分が新研究分野に対応する。(A. Bohr & B. R. Mottelson, Proceedings of the International Conference on Nuclear Structure, Tokyo (1977), 157. に基づく。)

ギー (MeV) と角運動量  $I (\hbar)$  との, "E-I ダイアグラム" を示す。斜線の部分が新研究分野に対応する。この研究分野の中で現在最も活発に調べられているのが, "イラスト線" (yrast line) (— それぞれの与えられた角運動量  $I$  の中で最低の励起エネルギーをもつ状態のエネルギー準位を結ぶ線 —) 付近の領域である。この領域では, 高い励起エネルギーにもかかわらず, そのエネルギーはほとんどすべて, 回転エネルギーを生み出すことに使われるので, 原子核の内部構造それ自体は, 基底状態付近のそれと同様に "冷えた" ものと考えられる。したがって, このイラスト領域での回転スペクトルの研究は, 回転運動による核の内部構造の変化を検討する上で極めて重要な情報を提供するはずである。このような高速回転という極限条件下での "素励起モード" は, 大きなコリオリ力や遠心力によって, 基底状態付近のそれとは非常に異なったものであるに違いない。

核内における "対相関凝縮" に対するコリオリ力の効果は, 超伝導に対する磁場のそれと極めて似ている。近年, イラスト領域での回転スペクトルの分析から, "後方歪曲" (back bending) という現象が見いだされている。これは, 回転の角速度の関数として核の慣性能率をプロットする図をかくと, ある角速度の値で, 後方に歪曲が発生する現象である。この現象は, 大きな慣性能率をもった新しいバンドが, 基底状態バンドよりも低くなるような "バンド交差" として理解される。その意味で, "ギャップレス超伝導体" (gapless super-conductor) とよく似た物理内容をもっている。

回転の角速度を更に大きくしていくと, 遠心力の強い効果によって核の変形の形状に大きな変化が生ずることが予想される。原子核の回転は, 核内の核子の角運動量を回転軸の方向に揃えようとする "回転整列" (rotational alignment) の効果をもたらし, 回転整列を行った核子は回転軸のまわりに軸対称な密度分布をもつ。したがって, 角速度が増大し多くの粒子が回転整列を行なうにつれて, 粒子の密度分布と自己

丸森寿夫

無撞着に決定される平均ポテンシャルは、次第に回転軸に軸対象なものが近づく。この“対称性の回復”の結果、破られた対称性を回復する運動モードとしての集団回転運動は消滅し、このエネルギーがすべて粒子の回転整列に移行したような高い角運動量をもった長い寿命の異性体が発生することが予想される。この現象はイラスト・トラップ (yrast trap) とよばれ、ある特定の領域の質量数の原子核では  $I \approx 30 \sim 50$  位で生ずるといわれている。

以上の研究は未だ現象論の段階にあるが、いづれにせよ、ある極限条件下に原子核を置くことによって核物質の新しい側面を研究しようという方向が打ちだされたという意味で、注目に値する。

#### § 4 非線型効果と大振幅集団運動

##### —— 原子核の集団運動の特性 ——

イン・ビーム分光学によって振幅領域後のバンド構造についても極めて重要な情報がえられた。RPA 近似 (調和振動子近似) 下の表面振動の量子 (フォノン) に基づいて予想される “フォノン・バンド構造” にくらべて、非線型効果が著しく大きいことが見いだされたのである。そして、振動とも回転ともつかない集団運動を示す、広大な核種の領域が存在することが明らかになった。これらの核を “転移領域核” (transitional nuclei) と呼んでいる。今日では、その大きな非線型効果のため、これ迄球形核と呼ばれていた核種の少なからぬ部分も、転移領域核として分類するのが適切であると考えられている。これらのバンド構造の分析を通じて、原子核のような有限核子多体系における集団運動は、予想をはるかに超えて複雑であり、それだけに極めて豊富な内容をもっていることが、ますます明らかになった。

その特徴の一つは、大きなゼロ点振動にあるといえよう。原子核の変形を指定するパラメーターを  $\alpha$  とし、平均ポテンシャルがある値  $\alpha_0$  で極小値をもつとしよう。このときゼロ点振動の振幅  $\Delta\alpha$  が  $\Delta\alpha \gtrsim \alpha_0$  となり、“平衡変形” という概念が不明確になるのが転移領域核の特徴である。ここでは純粋な回転運動とも振動運動ともつかない集団運動が生ずることになる。そして極めて強い非線型効果を伴った “大振幅集団運動” を取扱わねばならない。

第2の特徴は、核が固有の殻構造をもつことと、集団運動へ寄与する粒子自由度が有限であることに基づいている。このために集団運動モードと粒子運動との分離が巨視的系のようにきれいに生じない。集団運動モードにコヒーレントに寄与する粒子の状態の数を  $\Omega$  とすれば、粒子と集団運動との残留相互作用は  $\Omega^{-1/2}$  に比例する。巨視的系では、この相互作用による集団運動へのはねかえりは、相転移の領域を除けば、通常無視できるほど小さい。しかし原子核では、この効果は、偶-偶核と隣りの奇核のスペクトルから実験的に大きな効果としてつねに観測され、集団運動と粒子運動の二つの運動モードを規定する上で決定的な役割を演ずるものとなっている。

第3の特徴は、上記二つのそれとも関係しているが、原子核の集団運動それ自身が、平均場の対称性のようなグローバルな性質の基本的変化を伴うものである点である。この結果、粒子運動も集団運動の進展に応じて質的变化を生じ、またこの変化によって集団運動それ自身にも質的变化が発生することになる。

このように、高度に錯綜した集団運動モードと粒子運動モードの絡みあいの実験的な解析は、核研の坂井グループを中心に行なわれてきた。彼等は、この複雑な非線形効果の中に、ある種の “かくされた規則

性”が存在し、球形核から変形核への転移が連続的に行なわれていることを示唆する、転移領域核における“準バンド構造”の存在を明らかにした。

こうした状況を前提として、原子核の集団運動の研究は、集団運動モードと粒子運動モード間の絡み合いと相互転換の動力学的機構をあばきだす、大振幅集団運動の微視的理論の建設という新局面を迎えている。多体問題としての集団運動の理論の基本は、フェルミオンの状態空間から如何にして適切な集団運動部分を抽出するかにある。RPA近似下で求めた表面振動の量子(フォノン)は、コヒーレントな2準粒子からなる“複合粒子”に対応するものであるが、この構成粒子それ自身は平均ポテンシャルの構造に強く依存している。それゆえ複合粒子(フォノン)描像にしたがって非線形効果を分析してゆく際にはフォノンの内部構造それ自身が集団運動の進展にともなって自己無撞着に変化する可能性を、つねに考えておくことが必要である。いいかえれば、集団運動モードそれ自身を、粒子運動との動的絡み合いとの関連において、常に自己無撞着に最適化していくような理論の建設が不可欠である。この課題は、集団運動部分空間を、外からアприオリに与えるのではなく、この部分空間を決定する理論を、それ自身の内部に持っているような微視的理論の建設を意味する。この理論の建設は、単に転移領域核の解明に必要なだけでなく、前に述べた回転運動の微視的理解においても、また、“核分裂”における“多次元空間のなかの分裂パス(fission path)”の決定や、次に述べる重イオン反応の微視的機構の解明にとっても不可欠なものである。

## §5 “核物質物性物理学”——重イオン反応——

これまでの原子核の研究は、自然界に存在する種々の原子核の構造を、主として電磁場や、核子・電子等をプローブとして行なわれてきた。したがって原子核の基底状態付近の静的な構造に対する情報が、主として与えられるにすぎなかった。さきに述べた近年における重イオン加速器の発展によって、はじめて核物質の「巨視的」な性質を研究する条件が作りだされた。原子核間の種々の条件下での衝突を調べることによって、核物質の全体としての動力学的側面を研究する可能性が生じたからである。この研究は、核物質の「巨視的」な性質についての新たな側面をあばきだす“核物質物性学”とでもいうべき分野を誕生させたといえよう。

重イオン反応においては、これまでの核構造の研究とは異なり、個々の内部固有状態を一つ一つ測定することは不可能である。そこでは、核間距離・散乱角・反応核の質量や電荷のような集団変数が直接に測定される「巨視的」な物理量とみなされ、測定されない内部自由度については、平均操作がおこなわれる。この“核物質物性物理学”は丁度はじめたばかりで、全体としては現象論の「現象論」といったスペキュレーションの段階にあるが、すでにかかなりの実験データが集積して、物理としての現実的な重要な課題を提供している、いくつかの分野がある。

“深非弾性散乱”(deep inelastic scattering)がその一つである。これは、入射チャンネルでの重イオン間の相対運動のエネルギーの相当部分が内部エネルギーに転化し、しかもかなり大きな数の核子の移行が起っている現象である。しかし、いわゆる“熱平衡”な複合核を経ての過程とは考えられず、終チャンネルに入射チャンネルのメモリーが残っているような反応である。このような“非平衡過程”において生ずる核

丸森寿夫

物質多体系は、固有内部運動と集団運動間の複雑な絡み合いについての重要な情報をもたらすはずである。すでに現象論的に摩擦力を導入する模型や、また微視的な立場からこの摩擦力を説明する試みなどが提供されている。いずれにせよ、この研究は、これ迄の統計物理学とは異なって、有限個の自由度をもった非線効果の極めて大きい系の非平衡現象としての新しい課題を提供している。

この深非弾性散乱は、重心系での1核子あたりの入射エネルギーが $\lesssim 10 \text{ MeV/A}$ であるような重イオン反応で観測されるが、実験的に知られている核子の核内での平均自由行程から推測すれば、このエネルギーはまだ“独立粒子運動”の概念が成立すると考えてよい。したがってこの“非平衡状態”の核物質の微視的理論は、前に述べた大振動集団運動の理論とも密接に結びついたものになるであろう。

重心系での1核子あたりのエネルギーが $\geq 20 \text{ MeV/A}$ であるような重イオン衝突での現象は、これ迄の核物理学で取扱ってきたものとは、非常に異なったものになることが予想される。このエネルギーでは原子核を構成する核子の相対運動の速度が核内のフェルミ運動のそれよりも大きくなるので、これまでの核現象で最も主要な役割を演じてきたパウリ原理の効果（——核内核子の“独立粒子運動”の主要な原因の一つ——）が2次的なものになる。したがって標的核と入射核の浸透が可能となり、密度の重畳が生ずることが予想される。それゆえ、ここでは“圧縮”された核物質についての新しい情報が入手されるはずであり、密度の変化と結びついた興味ある集団運動モードの発生をも予想される。このような核物質系に、流体力学と熱力学の諸概念をアприオリに適用してみた現象論的計算によれば、“衝撃波”の出現が期待される。勿論このような推測を受け入れるためには、実験データの十分な蓄積とをまたねばならずまた理論的立場からは、有限の大きさをもつ少数粒子多体系に対する流体力学や熱力学の諸概念の可否や適用限界についての明確な分析が大前提である。

密度の高い核物質が生ずれば、当然その中で核子間の相互作用の様子もかわったものになるはずである。理想的な、平衡状態にある無限の核物質を想定した計算によれば、核子密度がある値よりも高くなると、“ $\pi$ 中間子交換”によって生ずる核力のテンソル力部分が、直接に強い効果を果すようになり、その結果として新しい核物質の状態が、通常の状態よりも安定となる。この核物質の状態では中間子場の期待値がゼロにならないので“ $\pi$ 中間子凝縮”と呼ばれている。この計算の前提である平衡状態にあるような核物質は、高密度中性子星では可能であろう。しかしながら、実際の重イオン反応では、“非平衡状態の高密度核物質”を取扱わねばならない。

重心系での1核子あたりの入射エネルギーが $\sim 140 \text{ MeV/A}$ をこえると、 $\pi$ -中間子が“強い相互作用”によって作りだされる。またエネルギーが $\sim 300 \text{ MeV/A}$ になれば、核子のアイソバーが生ずる。このような高いエネルギー領域になると、はじめに述べたような、原子核を核子多体系とみなす従来の核理論の枠組は、その適用限界を失い、作り出されるハドロンを新しい自由度として正しく取り入れるように、理論を拡張する必要が生ずる。こうして核子多体系としてではなく、ハドロン多体系としての核物質の側面が、その姿を現わすことになる。

原子核における核子以外の自由度としての $\pi$ -中間子の効果は、基底状態付近でも、精密実験が可能である磁気能率などでは観測可能なものであることは以前から知られていた。近年、 $\pi$ -中間子等のハドロンをプローブとして採用することにより、核内に核子以外のハドロンをつくり、核子以外の自由度の効果



を目的意識的に研究することが、急速に発展して、核物理学の一つの大きな分野になりつつあることも注目されねばならない。

いずれにせよ、来るべき“核物質物性物理学”では、“非線形・非平衡”の有限多体系の統計物理学が不可欠である。これまでの物性物理学が統計物理学の発展と結びついて前進したように、“核物質物性物理学”もこの新しい統計物理学と密接に結びついて発展するに違いない。

## § 6 おわりに

以上簡単に、近年における原子核物理学の新しい発展段階について述べた。これ迄の物性物理学の発展は、巨視的物質の汲みつくしえない豊富な諸性質をあげきだし、今日の人類の生活水準をささえる諸新技術開発の基礎を提供してきたことは周知の事実である。しかしながら、今世紀はじめ、原子・分子の構造が明らかにされ、それを素材としての物性物理学がその前進を開始した時期、ミクロの世界の法則や概念が、これ程まで人間の生活に役立つことを予想しえたであろうか。来たるべき原子核物理学——“核物質物性物理学”——も将来核物質の予期されない豊富な諸性質をあげきだすはずである。そして、この基礎研究の成果に基づいた新技術の開発によって、はじめて、真の意味での“原子力の利用”が可能になるに違いない。

戦後、わが国の原子核研究は、一貫して実験面でも理論面でも、国際的な第1線に立ってその発展に積極的に寄与してきた。原子核研究に新局面を迎えた今日、わが国での原子核研究の国際的水準を今後も維持し、さらに発展させるため、この新局面に対処する“核物質研究”の物質的・人的両面での“大戦略”の立案とその早急な実施の必要が痛切に感じられる。

## 参 考 文 献

- S. Sakata, *Suppl. Prog. Theor. Phys.* **50** (1971)  
 A. Bohr. *Nobel Lecture*, *Rev. Mod. Phys.* **48** (1976), 365.  
 B. R. Mottelson, *Nobel Lecture*, *Rev. Mod. Phys.* **48** (1976), 375.  
 T. Marumori, T. Maskawa, K. Fujikawa, Y. Hirao and K. Sugimoto, *INS-NUMA-5* (1977).  
 松柳研一, “基礎物理学の展望 1978”, 京大基礎物理学研究所, 67.

座長： 今のお話には、コメント又は御質問をどうぞ。

物性と素粒子の研究が原子核研究に不可欠というのは甘えの構造のように思われるのですが…。

丸森： ではなくて、そこでの発展を見て行くということで、甘えの構造というよりは基本的な構造又は立場であって、そういう学問ということだ。

丸森寿夫

山口： 丸森さんは回転というカスピンのパラメータにして温度を  $0^\circ$  もしくは  $0^\circ$  の極く近傍の原子核の話しかなさなかったが reaction はどうお考えですか？ すなわち、もう少し dynamical な process については？

丸森： dynamical なことに関しては、いろいろなことが有る訳で、わざわざ時間を下さるような質問をして下さって有難い。heavy ion reaction の場合に 10 MeV 以下の反応を考えると、これまで予想していたのとは違った状況が出てきている。一つは、ぶつかると直ぐ thermal equilibrium になるだろうと考えていたが、実験はそうではなくて heavy ion 同志がぶつかると、熱平衡にならなくて、非常に早いスピードで kinetic energy がお互いに移ってしまう。それから mass transfer や charge の transfer がある。実際にはそうしながら relative motion という概念を保って散乱していく。それを deep inelastic とか strongly damped collision とか呼んでいる。そういう probability が非常に高くなっている。これはある意味で pre-equilibrium の状態であって、こういう問題を今後どうゆう風に考えていくか、又、collective と intrinsic mode との間のやりとりをどうゆう風にまじめに考えてゆくかが課題だ。それから heavy ion の場合には、当然、物理量は全部の step を考えられず、統計的操作が必要だ。こうなると、統計力学の課題と結びついてゆくことになる。データはたくさん出て来ている。理論も、そういう方向への追求が最近かなりなされてきている。残念ながら、未だ物性論の発展から新しいものは出ていない。ただそこでそれを follow して、第 0 近似として、そのやり方を apply している。そしてどれだけの deviation、違いがあるかを研究している段階であるが、本来の意味で、その問題を扱うのが今後の大きな課題であろう。

中野： 原始的なことをお尋ねしたい。shell model にしろ collective model にしろ、物性あるいは原子の場合のように、こういう model が良いというのは、相互作用の形から見れば、素人からすると、物理的かつ常識的に考えてうまくいっとなんという風な感じがするわけです。昔から shell model も collective model も非常に短い相互作用で electron のようにプラズマのようになっていけば理解しやすいのだが…。どちらの model も理解しにくいのであるが、それでもかなり繊細な議論をして成功をしているわけで、成功すれば、それなりに意味があると思って話を聞くという訳です。しかし、この頃はますます繊細な話、例えば BCS 理論なども使うというわけで、これは単に小手先としてやられるだけでなく、基礎がしっかりしてきているのかどうかをお聞きしたい。

丸森： 何故 strong interaction である核力のもとで、平均ポテンシャルが出て来るのかという考え方については、Bruckner, Bethe 以来、非常に多くの研究がなされてきている。ことに日本では、基研の一つの基本的な研究課題として「核力と核構造」という形で、この問題を追求したわけである。実際的にはこういう相互作用のもとで、どうして一体運動が可能なのかという問題は、大体解明した。基本的には、原子核では Pauli principle というのが非常に大きな役割を果している。それから原子核それ自身が force range に比して mean separation が大きいということがある。他のものに比べて、一体運動が最初の近似としてとりあげてよいということは、大体理解したと確信している。ただ excitation energy がだんだん大きくなってくると、heavy ion の場合、核子あたり 20

MeV 以上になると Pauli principle が効かなくなる，そういう場合にも果して原子核を一体描像としてとりあげてよいのかというのは，今後の課題であろう。

4.

広島大・理 吉川圭二

素粒子論は十数年前に比較すると，非常に多くの基本的なことが解明されたようで，より具体的で，統一的で，Well-defined な概念が用いられるような方向に進んできている。このことは一方において，我々の間であまりでたらめなことはできないと云う手カセ，足カセをはめられてきたことにもなるが，他方では素粒子論がより広い領域にわたる分野に関連して多くの解決すべき問題をかかえこんだという点で，ますます豊富な自由度をもってきたことになる。

また一方では，場の理論の内容が物性論との交流で飛躍的に伸びてくるにしたがって，物理的な概念のみならず，技術的な面においても素粒子論以外の分野と共通する要素が多くなり，私の素人考えでは，もはや統計力学，素粒子論，場合によっては宇宙論，原子核理論を別々のものとして教育する（或いは研究する）時代は過ぎ去ったように見える。

以下にまず私の話そうとする概略を図に書いて，その中の各段階 (a)，(b)，…… についてコメントをする。当然のことであるが，私が素粒子論の広大な領域にわたって適確な批判ができるわけもないし，またしようとも思っていないので，大概是仲間内で話題になっていること，たまたま私が関心をもっていること等の一部にすぎない。

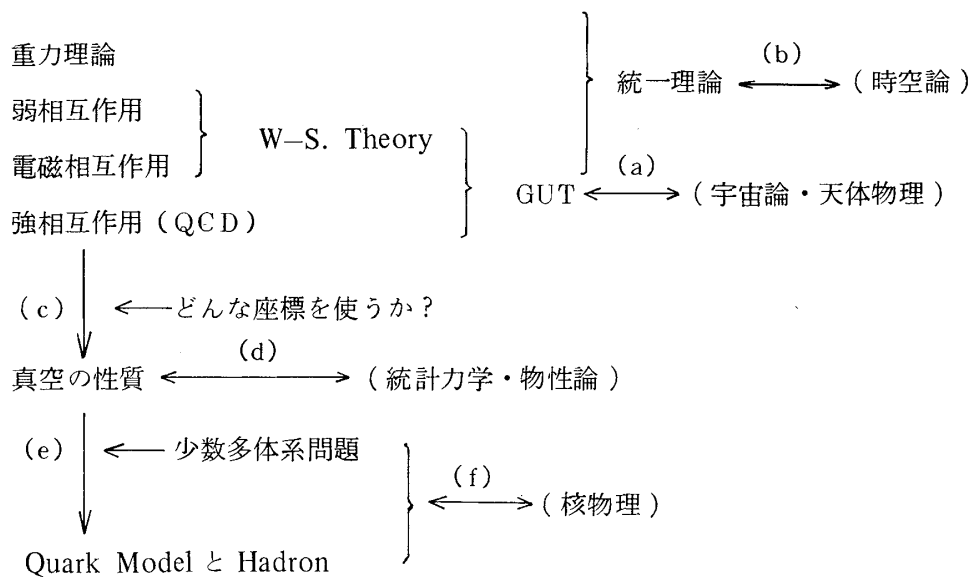


図 1