

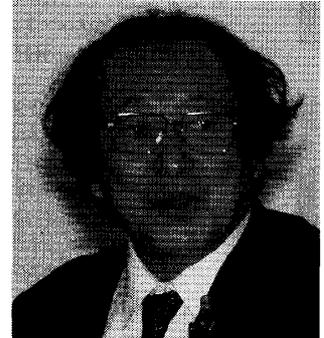
Title	核物理研究の"はじめから終わりまで"の繰り返し(1.原子核物理学の展開,学問の系譜-アインシュタインから湯川・朝永へ-)
Author(s)	池田, 清美
Citation	物性研究 (2006), 86(3): 266-279
Issue Date	2006-06-20
URL	http://hdl.handle.net/2433/110522
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

核物理研究の“はじめから終わりまで”の繰り返し^{*1}

池田 清美

私が話をする時代背景を簡単に述べます。1952年の日本物理学会誌7巻に小林稔先生が、湯川記念館は建物を示すのであって、今後共同利用研として全国の研究者に開放される所だと書かれています。私が大学に入ったのは丁度この記念館ができた年であります。1945年広島に原子爆弾が投下されましたが、少し離れた近くにおりました。われわれの時代は、 mc^2 ということをも $\frac{1}{2}mv^2$ よりも早く知ったのであります。これが原子核への関心の始まりです。

1949年は時代の境でありました。その年は私にとって三つ重要なことがありました。湯川先生のノーベル賞と原子核の殻構造の発見、及び、わが国の大学の学制改革です。戦後の日本にとって非常に大事なことでした。戦前からの大学(旧制大学)には、新しく博士課程が設置され研究者養成が制度として、できるようになったのです。そして新制大学の設置です。要するに、どんな階層の子弟であっても大学というものを自由に受けられ、大学院にも行ける改革です。それが1949年であります。



“はじめから 終わりまで”の繰り返し
池田 清美

[はじめか]: 研究課題と設定. その展開の鍵となることを見出し
研究の流れをつくる.

[終わりまで]: 研究の流れの行きの先を見定め. 一歩踏み出す
道)切る

「関心した5つの共同研究および長期研究計画の研究経験が」

1. GTR と IAS (荷電核集団運動モデル) (1961-1968)
Gerson-Teller Giant Resonance, Isobaric analogue state.
2. 原子核のクラスター構造 (α粒子核と核的構造)
1966-1968-1972-1977-1980 } 結
核の } 晶
核の } 文
3. ハイパー核の構造 (1980-1985-1991)
4. 不安定核の構造 (1989-1991-1994-)
5. π中間子と原子核構造 (2001-)

[Slide 1]

1952年大学に入った年には、湯川先生によって既に、この場所がわれわれに用意されていました。先生は、自分は恵まれた境遇で研究ができた。そうではなくても、志を持ち能力を身につけた若い人なら誰でも研究が出来る様にと考えておられたわけです。なんとなれば、ここに世界の必要な蔵書があり、場所があり、人が集まれるわけですから。若い我々が、何を教えられたかということ、君達は勇気をもって冒険しろ、自由に物理に挑めとの暗黙の激励を受けたわけです。基本的には、そういう時代でありました。

何を選択するかは、最終的には自分で決めていくのですが、若い頃には思ってもいない形で非常に多くの方々に揉まれて自立した研究者にさせて頂いた感じがします。その一番中心になった仕事は原子核のクラスター構造の研究であります。

その前段階といえますか、東京へ出て日大で行った理論と実験と結びつけた仕事を、スライド1の最初に挙げています。この1の実験にまで視野が広がった研究経験が、2のクラスター構造の研究に挑戦し飛躍するに必要不可欠でした。

私たちの時代にとってもう一つ重要だったことは、共同利用研として基礎物理学研究所ができたばかりでなく、その数年後の1955年に、全国共同利用の原子核研究所が東京に作られたことです。

^{*1} 1950年代から始まった45年余の研究生活で、関わってきた原子核物理の研究課題は、5つあります。今回の研究会において「これ等5つの研究(GT巨大共鳴、クラスター構造、ハイパー核、不安定核、π中間子と核)“発想の背景”について話していただきたい」の依頼を受けました。短時間で全部を話すのは難しいので、主として、最初の二つ(GT巨大共鳴状態とクラスター構造の研究)について話しました。そして、中心主題を、2番目の課題の“原子核のクラスター構造研究のはじめから道り切るまでの経験”に置きました。後の3つは、その前までの研究課題の研究経験に学んで得た認識に立脚して、新たに開けていく原子核研究領域を開拓するために意識的に選択した研究課題です。その領域での開拓的研究に挑戦して、若い人たちと共にその研究領域をきりひらいて行くことを考えて設定した研究課題です。その内ハイパー核の研究をはじめた背景を簡潔に付け加えます。

日本では、それまで、一流の核物理の実験研究が普通に出来ない時代でした。核研設置によって、世界に伍する実験研究を行う根城ができ、実験と理論との関係・結びつきを強める時代が来たと思ったのです。そこからスタートして、世界に伍した実験ができる時代を、わが国の実験研究者がつくろうとし、それに理論研究者が協力したのです。続いて1957年にできた物性研究所も同様でしょう。

「時代背景」	
1945	終戦とヒロシマ・ナガサキ原爆
1946	日本物理学会設立(日本数物学会併設) 会費数(253)
1949	湯川博士のノーベル賞受賞(核理論の中間存在性) 原子核の殻構造の発見と殻模型 学制改革: 旧制大学の廃止と新制大学設置
1953	湯川記念館(1952)の創設期間の研究 基礎物理学研究所 設立 国際理論物理学会議(1953.7.25, 札幌市) 素粒子・原子核・物性
1955	創設期間 原子核研究所 設置
1957	“ 物性研究所 設置
⋮	
1967	原子核構造国際会議(札幌7.7-13: 札幌)
国際誌発表	
1946	Progress of Theoretical Physics
1955	Prog. Theor. Phys. Supplement. No. 1, 2, 3 Meson Theory 3部作の2236

[Slide 2]

原子核研究が理論と実験揃って動き出し、国際的に狼煙を上げたのが、1967年の「原子核構造と反応」の東京国際会議です。この時代に、原子核理論の中心で活躍されていた人達は多少年配の堀江さん、高木さん、吉田(思郎)さん、田中さんの他に5年程度先輩の有馬さん、丸森さん、藤田さん、河合さんはじめ多くの方々がおられます。こういった人達に、揉まれながら研究者として成長していくのですが、当時は、研究経験の差の大きさを強く感じていました。

5年前の先輩とは何だったのかということ、湯川先生のノーベル賞受賞の時代に、旧制高校か大学におられた方々です。この方々から、本格的に日本の核物理が本格的に始まったと思っていました。これらの先輩が日本の牽引者になるのだという強い自負をもって研究に向かわれていると、1967年の国際会議の準備と本会議の準備活動の状況を見て実感していました。

因みに、その14年前1953年に日本で始めて国際理論物理学会が開かれました。素粒子・原子核と物性分野と全分野にわたっていました。原子核もあったのです。外国からは原子核理論関係の著名な人達が少なからず来られるのですが、しかし、その人達と議論

する若い人が非常に少ないのです。それで、その前年1952年に基礎物理学研究所で原子核研究者の若手養成の学校が開かれた非常に役立ったと、参加された先輩から聞かされました。そういう背景をご理解のうえ、先へ進みたいと思います。

[Slide 3]に書きました様に、1949年にMayer-Jensenの原子核の殻構造の発見があり、1950年代前半に殻模型の爆発的な発展期を迎えました。わかった基本的なことは、 ^{16}O より軽い核ではj-j結合殻模型はあまり良くなくL-S結合殻模型が優位であり、重い核ではj-j結合殻模型が良いこと言う理解です。

引き続き、1952-3年にBohr-Mottelsonの統一模型です。Bohrが出した模型を、当時存在したあった原子核実験データ分析に適用して、実証的に正しい模型であることを示したのが、当時、米国でPhDを取って来た20才代半ばのMottelsonでした。そういう意味で、二人の仕事のノーベル賞です。外殻粒子以外の内の芯核を4重極に変形するdeformable bodyとし、それが外殻粒子と結合する模型です。その結合に弱結合と強結合があります。前者は閉殻核近傍の核で成立し、そこでは

4重極振動が生じます。後者は閉殻核から離れたところで成り立ち、安定な変形 (deformation) が生じ、回転と振動スペクトルが現われ模型です。集団運動と、それと結合を持つ粒子運動が理解できるので統一模型といったのです。1955年に、Nilsson模型が提出されます。安定変形平均場での独立粒子運動模型で、現象を良く説明する模型です。

"原子核理論分野"

1949 原子核の魔法数の発見 (マイア-イェンセン)

微視的現象論的模型による原子核構造研究の道と
拓き現象論的殻模型の爆発的發展期 (1950年) を
迎えた。

$j-j$ 結合殻模型

^{16}O より軽い核 $i-s$ 結合殻模型優位
中重核・重い核 $j-j$ 結合殻模型

1952.3 変形核と回転運動の発見 (ボア-エフソフ)

原子核の集団運動模型:
変形する芯核と外殻粒子運動との結合
による統一模型

弱結合: 閉殻核と併置領域核
強結合: 閉殻核からなる併置領域核

1955 変形殻模型 (Nilsson 模型)

[Slide 3]

ニ水に対応して図を。

◎ $j-j$ 結合殻模型による配位混合の理論 (1953-) (堀江・有馬)

$$\psi(j^m) = \phi(j^m) + \alpha \phi([i^m]_{j_2}(\lambda) j^m)$$

$\lambda=1$ magnetic moment (1952) $\lambda=2$ quadrupole moment (1959)

Prog. Theor. Phys. Suppl. 8 (1958)

戦前 群論と量子力学の発展の途程、原子核のスペクトル問題の発展と3次元対称性による統一模型の出現。

◎ 集団運動の微視的理論

戦前 朝永

1956年 野上(茂), 沢田(克), 高木(修)
以降 丸森.....

特に (i) 乱雑性近似 (RPA) の微小振動理論
(ii) Hartree-Fock 基底状態の安定性 (坂田・福田 1961)

等々 大々奇事

注) BCS理論の原子核系への適用による対相関の取扱いが重要。粒子→準粒子
1950年代末より。 Hartree-Fock → BHF へ。

[Slide 4]

[slide 4] は、この時代の上記の研究に対応し、わが国で目立った研究を挙げました。殻模型の仕事は非常に初期からです。有名なのは $j-j$ 結合殻模型による堀江・有馬の配位混合理論です。一粒子状態の磁気モーメントが自由一粒子のそれと同じとした際の基準が Schmidt の値ですが、実験値はそれから規則的にずれる。それを、芯核からの1粒子1孔励起させた状態を混合させると、その実験値のずれが改善される。同様なことを電磁4重極モーメントについても行う。これを一般に芯の偏極効果といっていますが、その効果の殻模型による研究です。

朝永先生が書かれた1950年の物理学会誌「4半世紀を顧みて」に、「群論と量子力学」はWignerから発して世界的に大流行した。その「群論ベスト」に最も強くかかったのが山内恭彦さんである。」とあります。山内先生定年退官の際、先生の論文を見させていただいたのですが、ほとんどが群論を適用した原子のスペクトル問題の丁寧な論文です。ここに、東京での殻模型のルーツを見る感がしました。戦後、理学部に学士入学されたと聞く堀江先生が受継がれ、有馬さんと一緒に共論文が現われたのが1953-4年です。

原子核の運動状態の微視的理論については、朝永先生の、2次元ですが回転運動の微視的記述があります。それが源流となって発展する様子を、丸森さんに教えられました。また、それがElliottによる3次元調和振動子のSU3模型によって拡張されて実際問題に適用されて状況を見る一方、微視的振動運動の種々の取り扱い、野上茂吉郎先生の時間依存のHartree-Fock法によるやり方や、高木修二さん達がなされた、位相差乱雑近似で(1粒子-1孔)状態を直接取り扱う方法が展開されているのを、身近に見たり聞いたりできたのです。そして、超伝導のBCS理論がでて、それが原子核の対相関の取り扱いとして適用されて行き、その効果を含んだ核構造の理解へと変わり、それがすぐに定着

して行く様子を追っていました。

1 GTR と IAS (荷電交換集団運動モード) の研究

① 日大理工物理原子核理論グループ 3人の共同研究 (1957年)

藤田 純一 (パナソニック核構造) 藤井三朗 (光核反応と構造) 1957-
 1961年か 池田 (集団運動と構造) が加わる。

② 研究の背景 (A) 弱い相互作用と原子核構造の研究の流儀 (中村誠太郎 - 森田政 - 山田勝美・藤田)

(B) 殻模型 } 核の励起状態の研究 (堀江有馬)
 集団運動模型 }
 核 Giant Resonance の研究 (高木 茂)

既存の研究の流儀 [何故 β崩壊は中重核以上では 10 倍以上遅いのか (村松道雄, 1951)]

E1 Giant Resonance	⇒	Gamow Teller Giant Resonance
π, σ の 割断振動	⇒	π, σ の スピン密度振動
$\frac{1}{\sqrt{2}}(\pi\pi' - \pi\pi'')$	⇒	$\pi\pi'$ and $\pi\pi''$
γ 線 電磁相互作用	⇒	β 線 弱い相互作用
$(\gamma\gamma')$ ($\alpha\alpha'$) 反応	⇒	$(\gamma\pi)$ 反応
理論 混合配位 ($\gamma\pi$ - β)	⇒	核の重核励起の集団運動モード
発見: 1950年代		1975年 - 1980年

[Slide 5]

[slide 5] その頃、湯川先生は東京で我々のためにもう一つ仕事をなさっていました。日本大学が、大学の格を上げるために、核融合基礎研究の研究所と旧制大学に準じた理工学部物理学科を作りたいので、その設置の委嘱が先生にあったのです。その意向を汲んで中村誠太郎先生が大いに尽力なさったのです。出来る物理学科の中心責任者の重責を名古屋の当時は非常に若かった原治先生が担っておられました。設置されたのは1957年です。それから3年後物理学科の原子核理論の副手の公募があったのです。当時、D2でしたが、思い切って応募しました。それで1961年はじめに日大に出てきたのです。確かに物理教室は特別でした、旧制大学と変わらない研究環境でした。演習も週数回でした。そこに書きました藤田さんと藤井さんと私とでの共同研究を行う絶好の機会を得たのです。

このとき何をしたかという、伝え聞く中間子討論会と同様な精神で共同研究を始めたのです。米国滞在から帰られた藤田さんから、また、京都の先輩藤井さんからも、折角、三人集まったのだから、日本で注目され外国で対等に相手にして貰える様な、良い仕事をしよう。良い仕事というのは、いままで誰もが知らなかった

ことを解明したり、誰もが出来なかったことを成し遂げる事であろう。力を合わせて良い仕事を一緒に作るため一所懸命やりましょうと申し合わせた。大歓迎でありました。それで、研究課題の設定を、皆で議論して決めることまで含む共同研究が始まったのです。

G T 巨大共鳴状態の研究 [slide 5]

3人の得意なところ(藤田さんは「弱い相互作用及び電磁相互作用と核構造」、藤井さんは「光核反応と核構造」、私は「集団運動と構造の微視的理論」)に関わる分野の研究されるべき課題を出し合い、問題点を検討し、宿題も出し調べ分析もしたのです。お互い研究の共通基盤を広げることをまずはじめたのです。弱い相互作用と核構造の研究の流れが、既に東京にありました。中村誠太郎先生に手ほどきを受けた森田さん、山田さん、藤田さんの「3田」さんが、その流れの中心です。(Prog. Theor. Phys. Suppl. No. 48(1971) 41-100. ; "Nuclear Structure Studied from Weak and Related Processes" 参照。)それで、藤田さんはじめ皆から、この分野の多くのことを、この時期に学びました。

6ヶ月近くの密な相互勉強と問題点の検討で相当広がった共通の研究基盤の上に、当面解決すべき課題が絞られてきました。その一つの課題が、古くから謎とされていた「 ^{40}Ca より重い $N > Z$ の中

重核における許容遷移確率（演算子 τ_{\mp} のフェルミ型遷移と同 $\tau_{\mp\sigma}$ のガモウ・テラー型遷移）が、軽い核での特別許容遷移に比べて、1桁以上も小さいのは何故なのか?」を解明することでした。[slide 5] に示したように「中重い核の許容ベータの遷移の遅延現象の謎を、藤井さんが研究してきた電気双極子型の Giant resonance state が引き起こす偏極効果との類似現象として、微視的模型を基礎にしての解明すること」に行き着いたのです。三人の研究経験が生きてきた研究課題の設定です。

1950年代前半から光反応での巨大共鳴は良く知られており、この巨大共鳴状態と基底状態の間の電気2重極遷移は、その和則を吸い尽くす程大きいことが実験からわかって来ていました。この現象を G.E. Brown 達が微視的模型で (1p-1h) 励起の集団振動運動状態と理解できること、その集団振動運動状態に E1 遷移は集中し和則を与えることを 1959 年に示していたのです。これは、陽子密度と中性子密度が反対方向に揺らぐ密度振動です。我々の場合は、荷電交換し、スピン反転が無い場合と有る場合の振動モードの集団運動状態です。

上記の様な差異があっても、しかし、類似なことが起るだろうと考えたのです。残留相互作用に $\tau\cdot\tau$ 型及び $\tau\sigma\cdot\tau\sigma$ 型がある以上は、引き起こされ得ると考えるのが自然であるからです。それで、もしベータ崩壊の許容遷移に対応する荷電交換のフェルミ型とガモウ・テラー型の遷移の和則を吸い尽くすような集団振動運動状態があるとすると、その集団運動状態と一粒子状態との結合で引き起こされる偏極効果によって、低い励起状態間のベータ遷移は強く抑制され、1桁以上も大きな寿命（軽い核の特別許容遷移の寿命は $\log ft \sim 3.0$ に対して中重核での許容遷移は、おおよそ $\log ft = 4.5 \sim 5.5$ ）となることを理論的に説明ができるのではないかと考えたのです。

Giant resonance state は γ 線吸収、 pp' 反応で励起できます。これに対して、我々が予想する β 崩壊に関わる集団振動運動は荷電交換を伴います。例えば、 β^+ 崩壊に対応する反応は pn 反応です。このような実験が系統的になされるころは、この時代、米国と英国と原子力研究所しかありません。我々が、研究を行っているその時期に、幸運にも二つの研究所から系統的な (pn) 実験の結果が纏められ論文が発表されたのです。

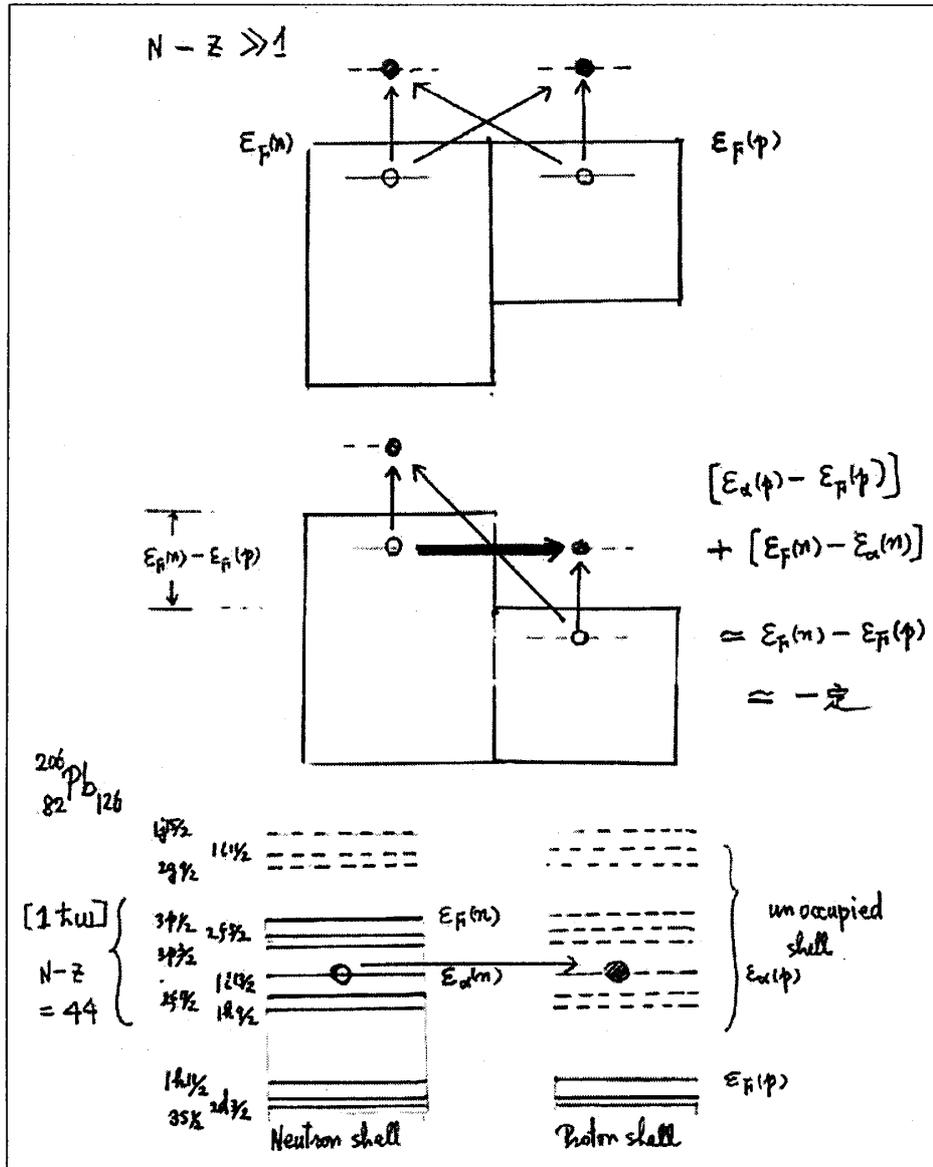
我々が最初に見いだした実験の論文は、英国の Harwell 研究所で行われた 143 MeV 陽子の (p, n) 反応で前方 0° 方向の中性子を測定しての残留核の励起関数の結果を纏めた Nuclear Physics 30 (1962) の論文です。藤井さんの論文紹介で、長い論文を紐解くと、やっと最後の段落に「重い核、Cu, Pb, U, で、残留核の励起エネルギーにして 10 ~ 20 MeV に広い幅の単一のピークを観測した。」の文章に遭遇したのです。それ以上の情報は全く無いのですが3人とも興奮し、存在する可能性ありとして、考えている集団振動状態を理論的に導出することになった集中したのです。その数日後、帰る途中にその回答を見つけたのです。

その鍵になった模式図を [Slide 6] に示しておきます。陽子と中性子の1粒子準位図は、通常上段のように両者のフェルミ表面を一致させていますが、それを、下段のように、最低エネルギーの準位を一致させた図です。この図に示した様に、荷電交換反応で出来る1中性子穴・1陽子粒子の (pn^{-1}) 対の振動状態は ($N - Z$) 個あり、全てエネルギー的に縮退していることになります。しかも、その振動状態間の相互作用行列要素は大きく斥力で符号が一定となります。これは、G. E. Brown と M. Bolsterli が示した、電気2重極 (E1) 巨大共鳴状態を記述する簡明な模型のと、全く同じ構造をしていることに気がついたのです。この模型で導ける集団運動振動状態は和則を殆ど全部吸い尽くします。

我々の場合に同じことが言えることを次に確かめたのです。両閉殻核の ^{208}Pb を想定すると、(pn^{-1}) 対の非振動状態の数は E1 の場合と殆ど同程度です。行列要素の大きさも同じ程度以上です。従って、これらの状態の重ね合わせで、ベータ崩壊の Fermi 演算子 $T_{-} (= \sum_i \tau_{i-})$ 及び Gamow-Teller (GT) 演算子 $Y_{-} (= \sum_i \tau_{i-} \sigma_i)$ の遷移確率の和則を吸い尽くす Fermi 型集団運動状態 $T_{-}|\phi_0\rangle$ 及び GT 型集団運動状態 $Y_{-}|\phi_0\rangle$ に近い解が導け、両者の励起エネルギーがほぼ同じエネルギーになることが導けたのです。

7月末に開かれた基研の研究会で話したところ、米国で同じことをしていると、向こうから帰ったばかりの有馬さんに教えられました。その根拠となった実験は、あまり高くないエネルギーの (p, n) 反応です。反応によって、核内1陽子のクーロンエネルギーに相当する励起エネルギーところに、幅の狭い共鳴状態が、中重核で系統的に現われるという実験結果です。それを知った理論屋の A.M. Lane と J.M. Soper の二人は、その共鳴状態が、もし、過剰中性子を陽子に変える演算子 $T_{-} = \sum_i \tau_{i-}$ を、標的核の基底状態に演算した $T_{-}|\phi_0\rangle$ に近い状態であれば、実験結果は理解できるとして、理論的な理由付けを行っていたのです。そして、その共鳴状態を Isobaric Analog State (IAS) と名づけてい

たのです。



[Slide 6]

我々が導いた Fermi 型集団運動状態の $T_{-}|\phi_0\rangle$ は、この Lane と Soper が示した IAS と全く同じものであり、結果的に、我々は彼らの後塵を拝することになってしまったのです。しかし、GT 型の集団運動性について、彼らは顧慮していませんでした。それで、GT 型集団運動状態 $Y_{-}|\phi_0\rangle$ の存在の可能性の予見は、我々の独自のものとして手元に残ったのです。そして、この模型で得られる GT 型集団運動状態と低いエネルギー領域の 1 粒子運動との結び合を練み込むと、一般に、許容ベータ崩壊の遷移確率は一桁程度抑制されることを導き出すことが出来て初期の目的は一応達成されました。しかし、当時は、一粒子状態の大きなスピン軌道分岐のために、その集団運動性については疑問視する人が多かったのです。しかし、我々は、ベータ崩壊の抑制効果の普遍的存在と及び新たな IAS の存在が実験的に確認されたことで、GT 巨大共鳴状態の存在を強く確信したのです。また、理論的にも、スピン軌道分岐による分散よりも、その集団性による相関エネルギーが大きいことから、その存在を理由付けていました。それで GT 巨大共鳴状態の予見と、その存在でベータ崩壊抑制効果との関係を指摘した論文を Physics Letter に投稿し 1963 年に出版されたのです。そして、ベータ崩壊の抑制効果を理解することを示し、1977 年東京国際会議の藤田さんの報告で共同研究を終えました。

巨大共鳴状態の発見は、12 年後の 1975 年です。そして、一般の $N > Z$ の核で普遍的に見出され

る様になったのは1980年以降です。この時代には(p, n)反応の入射エネルギーもその測定精度も上がり、工夫されて中性子の角分布も書く運動量移行が無い零度方向から精度よく測れるようになっていました。

そして、実験研究は、その精密な測定結果から再び新たな研究課題を用意することとなりました。このGT巨大共鳴状態に見出された遷移確率は和則の60%を下回る程度しかないことを見出したからであります。荷電スピン・スピン($\tau\sigma$)量に関わる相関現象の研究は、新たな段階に入ったのです。残りの和則が何処に移ったかを巡って、新しい理論的論争が生じました。“ Δ 粒子・核子孔との結合による分散か?”、“核内の(virtual π に起因する)テンソル力との結合によって生じる分散か?”の論争がおこりました。この回答は、この時代世界に引けを取らない力をつけた日本の実験研究によってなされたのです。阪大RCNPで行われたわが国の精密実験で、この和則の残りの大部分が、GT巨大共鳴状態より高いエネルギー領域に20MeV近く広く分散していることを1990年代半ばに見出したのです。

これで、この課題が終わったわけではありません。再び、理論に研究課題が投げ返されたと思っています。この様に核内で威力を持って働いている π 中間子場は、現在の原子核理論研究では、摂動項としてしか取り扱われていません。そうではなく、核内の π 中間子の働きを最初から頭わに取り扱う原子構造論が必要ではないかという課題です。それが表題の最後に挙げている“ π 中間子と核構造”の研究課題と関連しています。今回は指摘にとどめて、次に移ります。

原子核のクラスター構造の研究 [slide 7]

大学院M2の頃に「原子核で最も大きな謎は？」と丸森さんに問うたところ、跳ね返った答は「 ^{16}O の第一励起ゼロプラス(0^+)状態」でした。両閉殻核 ^{16}O の低励起状態は、殻模型では負パリティ状態であるはずなのに、何故、6.05MeVの第一励起状態が基底状態と同じゼロプラスなのか？この長い間の謎の解決へ向かう“新たな実験情報”が1960年の軽重イオン反応実験のはじまりと共に出てきました。軽重イオン反応はエネルギーと角運動量の大きい反応残留核の励起状態を生成し、 γ 線を放出して低い励起状態に落ちてきます。従って、基底状態から叩上げた励起状態とは異なる構造の励起状態が見えて当然です。それで ^{16}O の第一励起 0^+ 状態も、その上に $K^\pi = 0^+$ 回転帯が形成される構造状態であることが1960年代前半に分かったのです。閉殻核 ^{16}O の低い励起エネルギー領域に回転帯です。その内部構造はどのような変形構造かが当然問題になったのです。

最初に考えられたのは、変形平均場模型によるものです。楕円体変形させると長軸方向に沿う1粒子運動のエネルギーは下がり、短軸方向では上がります。それで4粒子4孔状態が形成されるという考えです。軽い核では、2陽子2中性子の4粒子の空間完全対称状態が相互作用エネルギーを特別に稼ぐからの4粒子励起であります。この励起した4粒子とそれによって生じた4孔は強く結合して全系が一つの安定な変形平均場を持つとする考えは、コペンハーゲンとその周辺の考えであります。変形平均場模型は重い核の低いエネルギー領域でよく成り立っている模型なので、この理解で十分であると考えられていました。

わが国での考えは[Slide 7]に示す様に、上記の変形平均場の考えとは異なっていました。一つは北大研究グループの考えです。田中一さんのお話に出てくるのですが、簡潔に述べると、「 π 中間子核力の強いテンソル力の働きで、核内の相関は“内部相関は強く外部相関は弱くなる”の特徴を持つ。その働きが典型的に現われているのがBe領域核で、 α クラスター構造が現実に実現している。」とする考えです。1960年から始められた研究で、5年間余の研究で実証の裏づけをして揺るがない考えとなっていました。

もう一つは、有馬さん達の「 α 的4体相関による外殻4粒子とn穴の弱結合模型」の考えです。上記の変形平均場の強結合模型と対照的な模型です。その当時、有馬さん達が行っていたsd殻の多核子殻模型の研究が4体系まで進みました。その結果、 ^{20}Ne の基底状態は特に安定で強く相関した4粒子が ^{16}O の周りを恰も α 的に結合して回転しているかの描象を与えることを示していました。それと同時に殻模型で記述できない状態が、 $^{16}\text{O}\sim^{20}\text{Ne}$ に系統的にあることを認識し、それらの状態は芯核励起4粒子-n孔(4p-nh)状態と見做すことができることに気がついたのです。即ち、4p-1hの相互作用エネルギーを ^{19}F で求めると非常に弱いものとなるので、それをを用いると4p-nh状態のエネルギーが導けること、そして、その“4p-4h”は ^{16}O の第一励起 0^+ 状態に他ならないほかならことを示したのです。そして、 ^{16}O の第一励起 0^+ 状態よりエネルギーの高い状態に対しての次のような“弱結合模型”を提唱したのです。即ち、外殻4粒子は ^{20}Ne の基底回転帯と同様な状態とし、芯殻 ^{16}O

から4粒子が抜けた ^{12}C の基底回転帯の回転運動状態として、二つの回転帯を“弱結合”させた状態が実現している模型であります。この“弱結合模型”は、実験の示すスペクトルと、それら状態間の γ 遷移を良く説明したのです。

2 原子核 α 的4体相関と分子的構造

1966-69 α 的4体相関 (丸森・有馬・田中・玉垣)

「軽い原子核構造の根本に於ける課題である」との認識

① $(4p-4h)$ モード 比して試みの重要性
 ^{16}O の第一励起 0^+ 状態 の指摘 丸森

② sd 多核子殻模型の研究に基づいて
 $(4p-nh)$ $n=0, 1, 2, 3, 4$ の状態
 $n=4$ $4p-4h$ 「弱結合模型」(1965) 有馬

③ α クラスター構造の実現している領域
 Be 領域の研究 田中
 α - α 相互作用の微擾的模型 RGM 玉垣
 の解析の成功

Be 領域から Ne 領域への研究の展開
 がが要不可欠、各々の視点からつめていく、

[Slide 7]

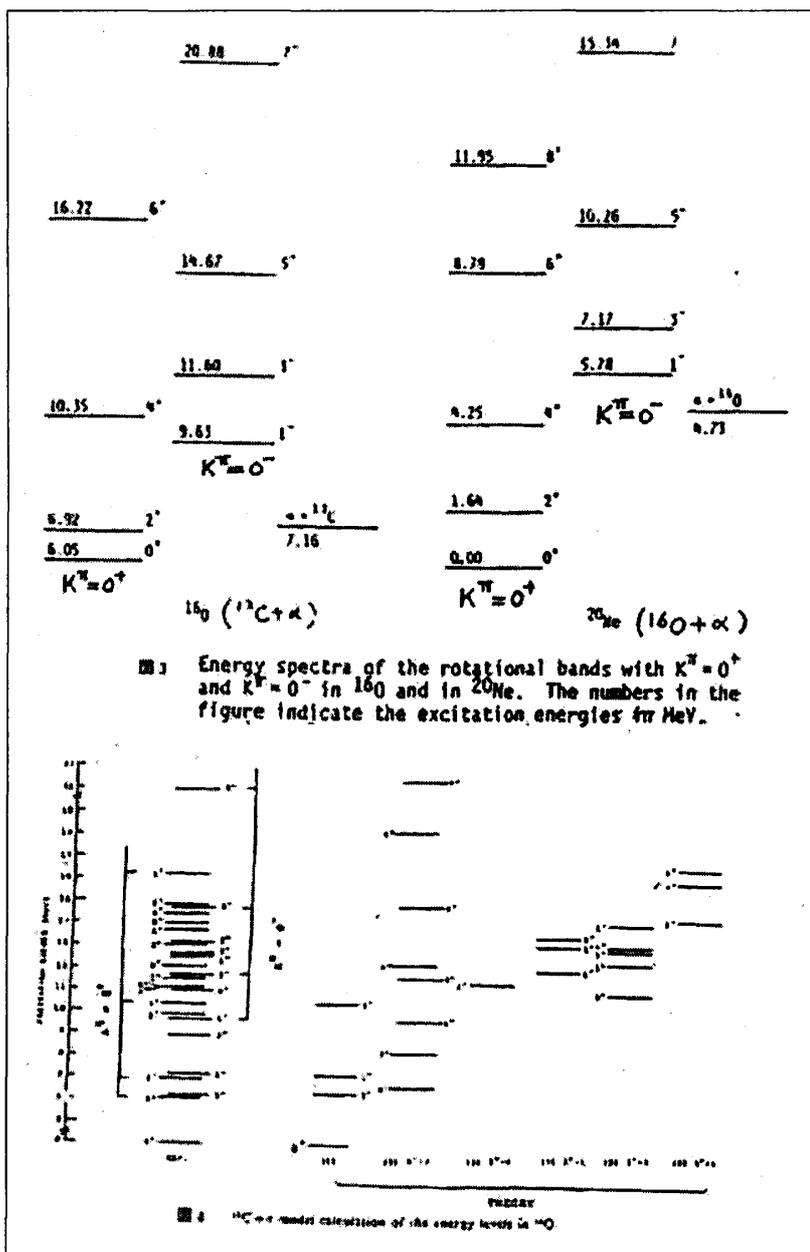
これら二つの研究の一方は、p核初頭の Be 領域核で、模型はクラスター模型であり、他方は、sd 初頭の Ne 領域核で、殻模型であります。しかし、この二つの研究に共通するところは、“核内での強い α 的4体相関と α 的に強く相関する4体とそれ以外の核子との間の弱い相関”であります。

それで、私も、具体的に、真剣に考えはじめたのです。“ α 的4体相関を軸にしてクラスター描象と殻模型描象の両者を包含する統一的な視点は何か?” この問題意識を研究室の若手にぶっつけて議論を重ねていました。新たな視点を獲得最初の鍵が、当時大学院生であった堀内さんが探し出した実験の論文にありました。1963年の第3回重イオン国際会議の R. H. Davis の報告論文です。それには「 ^{12}C と ^{16}O を標的核とする α 粒子の弾性散乱実験の位相差解析から導かれた ^{16}O と ^{20}Ne 系の負パリティ $K^\pi = 0^-$ 回転帯の共鳴状態 ($J^\pi = 1^-, 3^-, 5^-, 7^-$) ([Slide 8] 図3参照。)の共鳴エネルギーと α 崩壊幅が示されており、その崩壊幅から透過率を消去して得られた α 崩壊換算幅は Wigner limit に近い値である。」と記されていたのです。このことは、軽い核においては、核の表面での α クラスター滞在

確率がほぼ1に近いことを意味します。正に、発達した α クラスター状態(分子的状態)があるといっているに他ならないのです。それを確かめる検討を行い、“ ^{16}O 及び ^{20}Ne の α 崩壊閾値より上にある $K^\pi = 0^-$ 回転帯の内部構造は、 α - ^{12}C と α - ^{16}O の2分子的構造を持っている”堀内さんと二人で素直に認識できたのです。

次に、原子分子の Inversion doublet の類推で議論を前に進めました。それで、これら負パリティ回転帯と同じ2分子的構造を持つ Parity doublet の片方の正パリティ回転帯が、 ^{16}O では第一励起 0^+ 状態上の正パリティ回転帯であり、また、 ^{20}Ne では基底回転帯そのものであるとの理解をえたのです。その検討の段階で正パリティ回転帯状態2分子的構造の α クラスター構造状態が発達しているか衰退しているかに関わる量として、一つのエネルギー量に着目しました。それは正負パリティの回転帯のエネルギー差です。これは異種クラスターの2分子的構造が発達すれば小さくなり、衰退すれば大きくなる量です。何故なら、 α - ^{12}C の状態からパリティ反転した ^{12}C - α 状態に移るためには、二つの状態の間の結合が必要です。 α クラスター構造が発達していればこの結合は弱く、衰退していればこの結合は大きくなります。その結合は直接 Parity doublet の回転帯のエネルギー差に反映し、 α クラスター構造が発達(衰退)によってエネルギー差は小さく(大きく)なるのです。実際に、 ^{16}O の α - ^{12}C ではエネルギー差は 3.4MeV ですが、 ^{20}Ne の α - ^{16}O では 5.2MeV です。 α クラスター構造の発展の程度は、 ^{16}O (α - ^{12}C) の場合の方が ^{20}Ne (α - ^{16}O) に比して大きいこととなります。

α クラスター構造 (α - ^{12}C と α - ^{16}O) の盛衰に関わる重要なエネルギー量を、もう一つ採り上げました。それは α 崩壊の閾値エネルギー差です。何故なら、回転帯のエネルギーが α 崩壊閾値に近ければ α クラスター構造状態が発達するに有利であるからです。その場合には2体の相対運動の波動関数は外側に張り出し易く、内部領域での殻模型状態との結合が弱くなると推察できるからです。実際に実験値を用いると ^{16}O の α - ^{12}C の正パリティ回転帯の場合は、励起エネルギーが 6.05 MeV に対して、 α 崩壊閾値エネルギーは 7.16 MeV であります。その差は 1.11 MeV と小さい量です。一方 ^{20}Ne の α - ^{16}O の場合は基底回転帯ですから励起エネルギーはゼロで、その差は、 α 崩壊閾値エネルギーそのもので、4.73 MeV です。その近傍核の α 崩壊閾値エネルギーが 7 MeV 程度ですから、その約半分でありかなり大きな量になります。ここでも α クラスター構造の発展の程度は、 ^{16}O (α - ^{12}C) の場合の方が ^{20}Ne (α - ^{16}O) に比して大きいことになります。



[Slide 8]

「パリティ 2 重項」による二つの核 ^{16}O と ^{20}Ne での正負パリティ回転帯の考察は、これまで Be 領域しかなかった分子的構造の認識の対象が、Ne 領域にまでに拡張されたことを意味します。それは、また p 殻初頭核領域から sd 殻初頭核領域にまで分子的構造視点での研究する対象が広がったことを

意味します。その拡張で得られた最も重要なことは、“二つの分子的構造 α - ^{12}C と α - ^{16}O 構造の発現に、これ等の回転帯のエネルギーが α 崩壊閾値エネルギーに近いことが必要である”との認識を得たことです。 α - ^{12}C の正負パリティの $K^\pi = 0^+$ 回転帯及び α - ^{16}O の負パリティ $K^\pi = 0^-$ 回転帯に共通することとして「 α 崩壊閾値エネルギーの近傍に存在する」ことが満たされています。更に、 ^{12}C の準位の内、 3α クラスター状態と考えられる準位が 7.66MeV の 0_2^+ と 10.3MeV の α 幅の大きい 2_2^+ があるが、これ等の状態は α 崩壊閾値 7.27MeV より上にあります。 α クラスター構造にとって原点の ^8Be の 2α クラスター構造は、正に α 崩壊閾値の僅かに上にあります。

このように、良く発達した α クラスター構造状態（分子的構造状態）と考えられる状態は、全て α 崩壊閾値近傍にあります。それで、「原子核で、分子的構造状態が現われるなら、そのエネルギーが構成しているクラスターに分解する閾値近傍または高い励起エネルギーで、準束縛され得るところまでである。」と、その規則性をまとめたのです。これを「分子的構造に関する閾値則」（単に、「閾値則」といっています）。

この閾値則に従って α クラスターを基礎単位とした多様な分子的構造を系統的に画いたのが [Slide 9] の図 1 に示した模式図です。その下の数字は構成クラスターに分解する閾値エネルギーを示しています。

[Slide 9] の図 2 は、我々が新たに主張したい“殻模型的構造とクラスター構造の共存と構造変化”の視点を明確にするために描かれた概念図です。基底状態は殻模型的構造であっても、それ等と異質なクラスター構造状態が広範な励起エネルギー領域に多様に存在するのですが、僅かのエネルギー入力で、殻模型的構造からクラスター構造に変化する一方、逆に、そのエネルギーを失うとクラスター構造は融解し殻模型的構造へ移行する。また、エネルギーを与えると、これまでの励起の道筋以外に原子核が多様にクラスター化していくクラスター励起の道筋があるという原子核の分子的構造観の主張でありました。

閾値則に到達して、この様な分子的構造観を素朴な形態で持ったのは 1967 年末です。最初に話をする機会をつくって頂いたのは、当時、阪大核物理研究センター設置準備室の責任者の高木修二さんです。その話を阪大でした帰りに京大基礎物理研究所に寄りました。先輩の玉垣さんに上記の話を聞いて頂きたく時間を丸一日取って頂いたからであります。その年の夏に北大から基研に移られていたのです。北大での α クラスター構造や、複合粒子（核クラスターを含む）間の相互作用の研究等の研究計画について、玉垣さんから具体的な話を聞きました。そして、東京国際会議でも報告された重イオン反応での分子的様相に関わる研究を含めた研究会を基研研究計画で持つことも考えているとのことでした。

それで、ここ 2 年ほどで形成できた、原子核の分子的構造の私の考えについて、具体的に話しました。そして、私が考えている積極面について適切なコメントが跳ね返り、玉垣さんが黒板一杯に、私の考えや互いに話し合う研究情報を整理して、重イオン反応の実験的研究で持ち込まれてきている原子核の分子的構造相に関する国内外の研究状況の俯瞰図が出来上がったのである。

そして、玉垣さんが「君の考を入れ、軽重イオン間の散乱に現われている分子共鳴状態や巨視構造なども視野に入れての長期研究計画が、2 年続けた“ α 的 4 体相関”の研究計画の発展として考えられる」と結論的にコメントされた。来年度の研究計画に出す予定で、前年度までの“ α 的 4 体相関”の研究計画の世話人の意向を私から聞いておくとやんわりいわれた。賛意を受け、新たに私が世話人に加わりました。ここまでが、クラスター構造研究が、わが国で興った背景であるともいえます。

1968 年度から基礎物理学研究所の長期研究計画“ α 的 4 体相関と分子的構造”として始まった研究計画は、最初の 3 年は、主として、北大、東大、京大、九大の研究グループの連合として行われたのです。それを提起され繋げた、玉垣さんが全体的な責任を持ち、私が協力責任を持ったのです。この第 1 段階は、主張した「 α 的 4 体相関と分子的構造」の基本的観点の正当性を裏付ける研究段階でありました。“Alpha-Like Four-Body Correlations and Molecular Aspects in Nuclei”と題して、Prog. Theor. Phys. Suppl. No.52 (1972) に纏めがおこなわれました。この研究段階に参加した若手が次の第二、第三段階から実質的な責任を暫時分担していったのです。

第二段階の主な研究は二つあります。一つは 2 体、3 体等の微視的半微視的モデルの取り扱い及び計算法の構築と分子的構造の典型例を持つ核への適用であります他の一つは、主として半微視的モデルと現象論的モデルによる分子的共鳴状態の解析法の開発整備と、その模型的研究による分子共鳴状態の特徴の分析です。

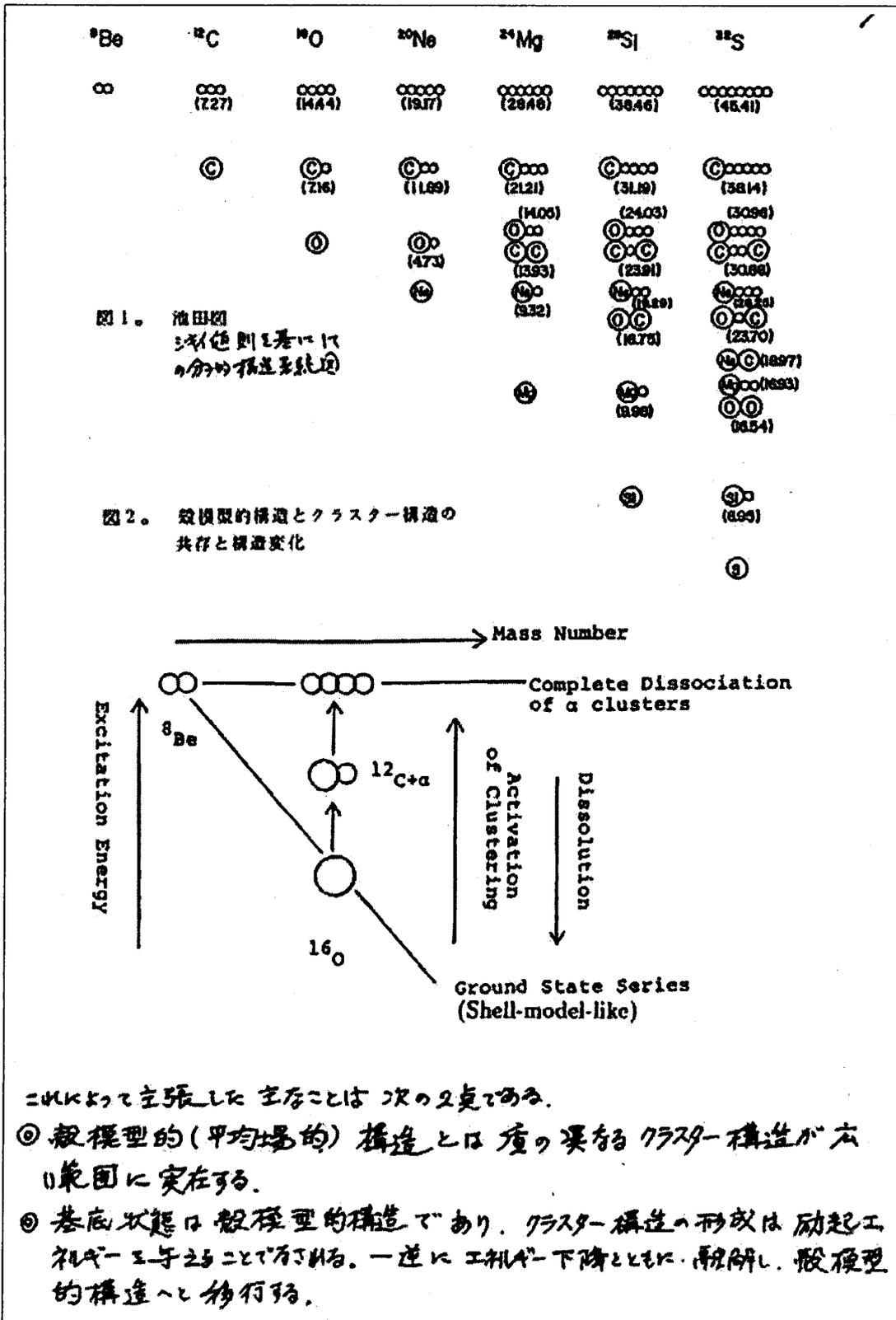


図1. 池田図
シイ他則と基に
の分の構造多様性

図2. 殻模型的構造とクラスター構造の
共存と構造変化

これによって主張した主なことは次の2点である。

- ◎ 殻模型的 (平均場的) 構造とは 産の異なる クラスター構造が 広い範囲に実在する。
- ◎ 基底状態は 殻模型的構造であり、クラスター構造への形成は 励起エネルギーによって起こる。逆にエネルギーが下がりると、融解し、殻模型的構造へと移行する。

[Slide 9]

第三段階は主として、sd 殻初頭核までの軽い核全域と励起エネルギー 20MeV を越える領域の励起状態を対象にして、殻模型状態とクラスター状態の共存やその結合の様相を分析し包括的な理解を得る段階でありました。これを可能としたのは第二段階の微視的、半微視的、現象論的模型の開

発・整備・計算法の方法論の構築があったからです。また、殻模型状態との共存、結合等の分析が可能であったのは、微視的半微視的クラスター模型が重要な殻模型状態をその中に含んでいるからです。

遣り甲斐があるが、苦難の旅でもありました。第二段階の微視的模型の開発については“Microscopic Methods for the Interactions between Complex Nuclei”と題して Prog. Theor. Phys. Suppl. No.58 (1977) に総合報告が行われました。そして、“Comprehensive Study of Structure of Structure of Light Nuclei” Prog. Theor. Phys. Suppl. No.68 (1980) の纏めでもって研究計画が一段落したのです。

この12年間の一連の研究によって得た大事なことは、「原子核の構造、特に、軽い核の構造を記述するに、クラスター模型は殻模型と並んで基本模型の一つであることが示された」ことにあります。しかも、その“はじめから終わりまでを”をわが国が主導性を持ってやり遂げたことであります。この種の研究経験は、わが国の核物理研究の質的向上に寄与し、国際的にも様々な分野に強い影響を与えたと理解しております。

この研究計画スタートは1966年の基礎物理学研究所の“ α 的4体相関”の研究計画です。これを出発点にして、遣りきるまで14年間の年月がかかりました。基礎の土台から全部を、大学を越えた研究者が協力して作るには、これだけの期間の徹底した共同研究が必要でありました。また、それを許容する基礎物理学研究所がないと出来なかったことです。湯川先生には、特に、精神的な面で、いろいろ援護していただいたと思っています。よく富士山を例えに引いて、「高嶺は非常に大事である」といわれると同時に、「その高嶺は広い裾野を持っているのだ」と2つのことを対にして研究部員会で強調されていました。そのたびに、粘って仕上げる元気が沸いたものです。

ハイパー核の研究 [slide 10]

最後に、坂東弘治さん達とはじめたハイパー核の研究の1970年代からの発展を年代的に見た一つの図を出しておきます。上には、原子核の構造模型が確立し活用された時期がかかれています。下にはハイパー核研究の発展の様子の概要を“key words”を並べて示しました。

何故はじめたのか？これまで乾板実験でしか得られなかった実験情報がカウンター実験で得られ始めたからです。特に、二次ビームの発熱反応の(K^- , π) 反応実験が1970年代中頃からヨーロッパのCERNで始められ、原子核にむはストレンジネス $S = -1$ を移すことが出来て、ハイパー核の分光学的情報が飛躍的に軽い核を中心に増えてきたからです。ハイパー核の一生(生成・構造・崩壊)の三過程を研究して、核子ハイペロン間またハイペロン-ハイペロン相互作用の研究を合わせ行う新たな研究段階が訪れたからです。また、軽いハイパー核ですから、その構造分析には殻模型とクラスター模型での研究が不可欠であるからです。殻模型によるハイパー核研究は、既に10年前1970年から始められています。それで1年前からハイパー核の研究を始められていた坂東弘治さんに協力して、前記のクラスター研究が一段落したので1981年から計画的な共同研究を始めたのです。

それが、基礎物理学研究所での1981-82と1984年度の研究計画“ハイパー核のクラスター構造”です。もう一つの特徴は地方大学にいる研究者によって行われたことです。その当時の地方の国立大学で大事なことは、大学院修士課程の整備充実と後期3年博士課程の設置でありました。新たに起る分野の研究は、これら大学院の研究教育にとって非常に新鮮さをもたらすからです。我々が定めた軸方向は、 Λ ハイパー核のハイパー分光学的研究、多重ストレンジネス核の研究、及び、異なるフレイバー核の研究です。そして、当面の重点として第一軸のハイパー分光学的研究を4年間の精力的に徹底的に微視的な($\alpha + x + \Lambda$; $x = n, d, t, \alpha$ 等) 三体クラスター型による軽いハイパー核の構造解析を行ったのです。それを含めてのその間の研究成果を“Structure of Hypernuclei”と題して Prog. Theor. Phys. Suppl. No. 81(1985) に纏めました。

この総合報告をまとめた直後に、米国BNLで第2回ハイパー核の国際会議(1985年)がひらかれました。坂東さんは主報告者の一人となり「クラスター模型でハイパー核は何処までわかったか」の題で話しました。その話は、特に、実験屋さんが注目するところとなりました。我々のクラスター模型に基づく軽いハイパー核の解析は実験をよく再現し、また丁寧に解析しているので新たな理論的予見を含んでいるからです。勿論、クラスター模型の枠組に固執する必要はありませんが、独自のものを持っている強みを活かすことも重要であります。このような我々の研究活動は日本の実験屋さん達にも刺激を与え、KEKの中高エネルギーの実験が出来るPSでの実験の潜在能力を活性化するも役立ったわけです。

1980年代から1990初頭にいたる坂東弘治さんを中心とする活動が礎になって(“Developments

国廣 : そのときの核力というのは、どのように構成されたものかというのが。

池田 : このときに構成されたときの、結局、 V^π はこのなかの binding energy の 70% 以上を構成しているのが核力、pion です。

国廣 : pion ですか。

池田 : pion です。 π 中間子は、セントラルであります。おもにテンソル力です。それをどうやってわれわれが取り扱ってきたかという、セントラル力に、全部繰り込んできたわけです。非常に大きいものを原子核構造は繰り込んで、ある程度の相対的成功を収めてきたので、それが結局やっと思直される時代になってきたというのが現状であります。

田中 : いま、南部先生がおっしゃった質問に、最後に私の話でちょっと触れたいと思うのですが、核力というのは、いま池田君もおっしゃいましたように、tensor force が強い main part であるという特徴を持っているわけですが、nucleon と α との相互作用を考えますと、ちょうど tensor part がキャンセルされて弱い部分しか残りません。したがって、 α 粒子のなか、4 体系のなかでは相互作用が非常に強く、correlation が強くなりますけれども、その α 粒子と他の nucleon との相互作用は、非常に weak になります。このことは、核力の特徴のなかからくる部分ですから、したがって、原子核全体の方々に顔を出すのではないかという考え方が、核力に基づいたクラスター的な考え方の基礎ではないかと私は思っております。

国廣 : 矢崎先生の話にあるかもしれませんが、もちろん、one boson exchange potential ということで、1960 年代は構成されているというのもありますし、one boson exchange potential だから、coupling constant が非常に強いので、本当に one boson exchange でいいのかという話もあります。もう 1 つは、対称性から絞って行って、核力を、one pion exchange potential tail は入れて、それはそのまま、それからレンジ以降はシンメトリーで核力を分類した後、パラメーターを phase shift から決めていくということをしたのだそうです。それが QCD、あるいはカイラル対称性への深い意識というのがあって、1980 年代、1990 年代以降は、また別の展開があったということです。

まだあると思いますけれども、続きがありますので、どうもありがとうございました。

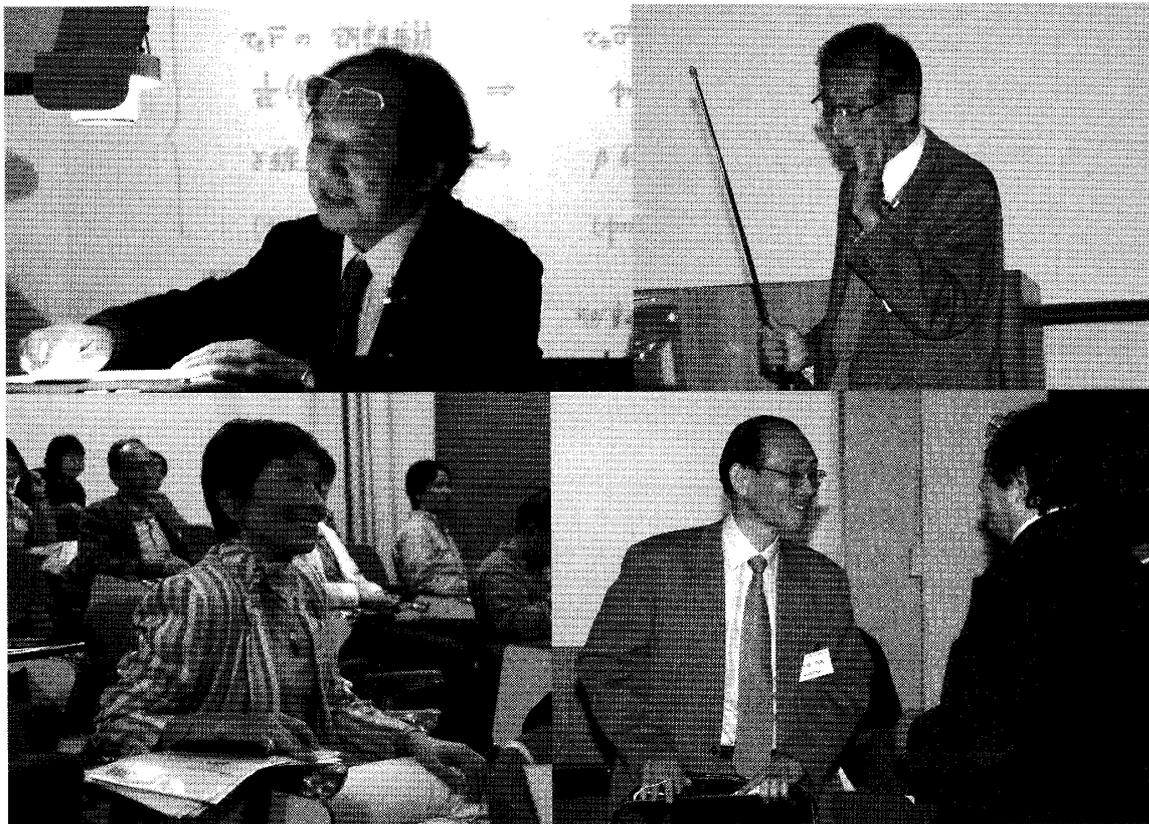


photo 01

池田, 矢崎, 坂東, 大久保