

放射線ビームと不安定核物理 -杉本先生とその後の核物理の発展-

池田清美 堀内昶 土岐博

1. はじめに

今回の企画「NUCLEI, THE PLAYING FIELDS OF PHYSICS 30年史」に呼応して、杉本先生を思い出すべく、池田さんが大阪に出張される機会を利用して、池田・堀内・土岐の3人で雑談会を行った。そこでの話し合いと、以前に池田が自らの還暦を記して書いた書き物（文献1）と、谷畑さんが池田の還暦の会の際に書いた文章（文献2）と、さらにそれに付け足す形で、その後の原子核理論の発展について文章にしてみた。この企画の際にこの文章を書く機会をくださったことに感謝する。

2. 不安定核の構造研究のはじまり

1975年頃から始まった重イオンビームを中心とするニューマトロン計画が1982年には諸問題に直面し頓挫した。そのような中で、その準備研究として杉本核研所長を中心とする日米のLBL-INSの共同実験計画「不安定原子核ビーム実験手法の創設とその手法による実験」が推進されていた。その大きな成果として1985年には、軽い中性子過剰極限領域核 Li_{11} に代表される不安定核の異常核反応断面積（異常核半径）の結果が論文発表された。高エネルギーの重イオンを適当なターゲットに衝突させて作られる不安定核2次ビームは不安定核そのものの構造についての情報が得られることになる。

ニューマトロン計画を発展させる形で1985年に山崎核研所長のもとに大ハドロン計画推進作業部会がつくられた。大ハドロン計画の4つのアリーナの一つであったEXOTICアリーナと称する不安定核物理について、その理論面の発展を考える機会を作ってくれたのは、クラスターに関する国際会議の準備研究（田中一代表）と重イオン反応物理学の研究（石原正泰代表）の合同研究会であった。この実験理論の合同研究会は1987年はじめに開催された。池田にとってはこの研究会は不安定核ビームの物理を学ぶ非常に良い機会であった。その研究会の中での谷畑さんの講演では、不安定核をビームとする実験がどの程度可能にな

ったかの解説を行った後、Ca39がベータ崩壊する様子を音で聞かせてくれた。「ジ・ジ・ジ・ジ・・・」という響きの録音に強烈な印象をうけた。そして、池田は、その年の12月はじめに開催された”大型ハドロン計画における核物理の魅力”シンポジウムで初めてソフトダイポール共鳴の可能性を提案した。谷畑さんによると小林さんを中心とするソフトダイポールの実験データを1989年に出版した頃からLi11のハロー構造を発見した論文への注目度が爆発的に増加したということである。「ただデータを見せるだけではだめで、その中からインスピレーションを掴んでこうだというものを見せると、如何に世の中全体が反応するかということがわかります。」と記述されている。(文献2)

その時の池田の印象が1995年に書かれた池田による文章に次のように記されている(文献1)。「このときから、新たな人工実験手段の開拓による不安定核ビームによって新たに開拓される核物理への興味は大きく膨らんでいった。既に、1960年代後半から‘安定線から遠く離れた不安定原子核’についての興味は、ヨーロッパを中心に高まり、国際会議も組織されていた。しかし、それは主として基底状態の質量やスピン、又それからの崩壊現象についての実験研究に限定されているように考えていた。前章で述べたように、70年代後半から2次ピームK中間子を用いた反応実験で得られた実験情報を通じて、ハイパー核物理の新たな発展がもたらされた。その研究展開の実践経験を有して来ていた(1981年から)ので、重イオン衝突から得られた2次ビームとしての不安定核ビームによる実験が現実になったとの認識は、不安定核の核物理の開拓という新たな発展が訪れて来たとの理解に通じたのである。

更に、重要な事柄は、この原子核物理の領域が世界に先駆けて我が国で開拓的に研究できるという現実的可能性があるということである。しかも、これまでになかった実験分野においてである。米国のパークレイの加速器を用いての新たな実験手法を現実にしたのは日本の実験グループであり、そして、その影響は直接我が国の実験将来計画に既に大きく反映されているからである。その一つは、理化学研究所のサイクロトン建設(責任者、上坪)とその利用計画においてであり、他方は、核研の大型ハドロン計画のEアーリーナ建設計画においてである。理研AVFリングサイクロトンの建設計画は1981年に始まった。

1987年には、本体が完成し稼動への段階に入り、2年後の1989年には稼動が予定されていた。しかし、ガニール(フランス)等の欧州で行なわれきた実験を上回つての実験結果が出せるかどうかは悩みの種であった。1985年のパークレイの日本グループの不安定核ビームを用いての実験の成功は、大きな光明を日本の核物理実験社会にもたらした。理研では早速、不安定核ビーム収束装置(RIPS)の作成(責任者、石原)に入ったのである。また、核研の大型ハドロン計画では、Eアリーナにおいて破砕片ビーム方式と異なる、短寿命だが比較的寿命の長い放射核の収集蒸発のイオン源からの再加速方式が検討(責任者、野村)されることとなった(責任者、野村)。後者は、特に、天体での様々に生じる核反応を理解する上で必要不可欠な反応素過程の地上実験でもある。

このような状況が生まれてきたのに、燃えないわけにはいかない。実験と理論の協力による新しい領域(安定核を含む短寿命核全領域)の原子核分光学の世界的(国際的)な研究拠点の創設の可能性を如何にしたら現実に転化できるであろうか。こんなことは、我が国の核物理研究で歴史上なかったことである。原子核の基本模型である殻模型及び集団運動模型が欧米で生まれた後に、我が国の原子核物理は本格的に研究が始められたのである。そうではなく、理論も実験も含めて本邦初でなく世界初或は人類初であることの研究の歴史を作る現実的可能性の遂行である。しかも、1950年代から35年余りの日本の蓄積と経験がすべて生きてくる研究領域であることが特徴である故の重要性である。別の言い方をすれば、1950年代からこれ迄の我々のここ35年余の核物理の研究の歴史の真価を發揮して、研究対象領域の広がった核子多体系研究の次の歴史を“我が国で”創り出す絶好の機会であるとの考えである。我々のこれまでの研究の真価が問われているのであろう。この様な思いが、1987年の始めの実験理論合同(科研費)の会から胸中を往き来する様になった。」

土岐にとっては、1974年の夏頃、杉本先生が村岡先生と私が議論している部屋に突然に飛び込んできて、Heckmanさんの多くのアイソトープが一举に生成されて、測定されているデータをうれしそうに見せてくださったことを鮮明に思い出す。(図1) この文章を書いている、杉本先生がまさしくその時に言っておられた、これからは重イオン反応で不安定核の研究をすることが面白いと言われていたのが思い出される。その後、ニューマトロン計画を立案し、不安定核研

究の流れを作って行った活動を振り返ると、いかに一つのデータが世の中を動かすのかが良く認識出来る。

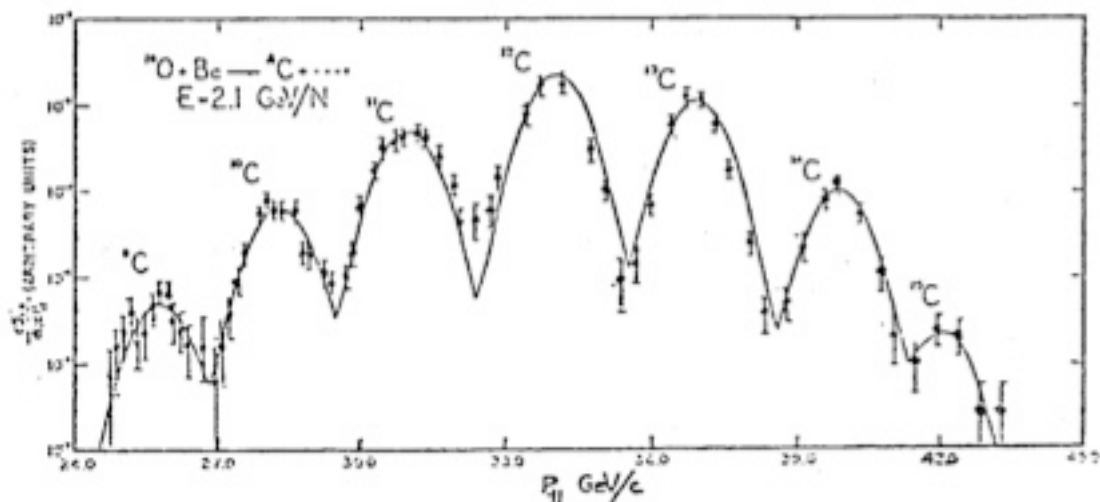


図1 : Heckmanさんによる重イオン反応の際に得られるカーボンアイソトープの生成スペクトル

3. 不安定核の理論研究

不安定核物理はその後の原子核物理の理論研究を飛躍的に発展させた。堀内によると不安定核、特に中性子過剰核の物理の研究が始まってから、クラスター物理の研究が再び盛んになった。論文の数が多くなったし、過去の論文の引用数も海外研究者による引用も含めて多くなった。その理由の一つは、中性子過剰核の物理は中性子の閾値近傍の準位を扱うが、それはクラスターの閾値近傍の準位を扱うクラスター物理と良く似た部分があるからである。中性子閾値付近の中性子ハローによる大きな半径の波動関数は、例えばC12における3 α 閾値近傍のホイール状態の大きな半径の波動関数の知識を持っているクラスター物理の観点からは親近感があった。

不安定核の物理は杉本先生に始まる日本の不安定核実験が主導して発展したものである。日本の不安定核の核理論研究はこの実験研究と密接な交流を持つことが出来たことがその発展を生み出す重要な要因であった。不安定核においてのクラスター研究の進展もその重要な要因はこの身近な実験研究との交流であった。1981年の瀬谷・河野・永田の論文はBe同位体とB同位体での2 α クラスタ

一構造の消長を分子軌道法で研究したもので、その研究結果はその後の研究で支持された。この研究は、身近な日本の実験研究との交流と並んで、中性子過剰核に対するクラスター研究の展開の基礎として重要であった。

例えば、中性子過剰核においては、CORE核の周りのVALENCE状態にある1中性子や2中性子という2体問題や3体問題を、VALENCE中性子とCORE内部核子との反対称化を組み入れて解く必要がある。これは、まさに2体や3体のクラスター物理計算の問題に他ならないので、クラスター研究者による研究が多く行われた。実はむしろ、安定核での核構造の記述から不安定核での核構造の記述に拡張されたことによってクラスター構造理論は新しい理論展開を行って来たと言える。その代表的なものは北大グループによる複素座標スケーリング法の発展であり、また京都グループによるAMDの発展であり、更にまた、新潟大学の鈴木さん達のCOSM (Cluster Orbital Shell Model) の発展であり、COSMはOCM (直交条件模型) と組み合わせて多くの著者に用いられた。

北大グループの複素座標スケーリング法の場合、始めはNe20で $O_{16} + \alpha$ のクラスター構造の共鳴状態を研究することから出発し、それが中性子過剰核での諸問題の記述に用いられる中で大きく発展し、その発展した理論は、安定核のC12のHoyle状態およびその他の 3α 構造の共鳴状態の研究に威力を発揮することとなった。京都グループによるAMDの場合も、核構造の最初の原著論文はNe20の研究で、クラスターの仮定をしない理論で $O_{16} + \alpha$ のクラスター構造が得られることを確かめ、クラスター構造と平均場構造の構造変化を議論したのであるが、その次は、軽い中性子過剰核の諸問題の研究に向かい、広い核図表の中での研究で理論は大きく発展した。AMDもまた、その発展した理論は、安定核のC12のHoyle状態およびその他の 3α 構造の状態の研究に、クラスターの仮定をしない理論として、威力を発揮することとなった。新潟大グループによるCOSMの場合も同様で、研究対象は安定核と不安定核の区別は無いのだが、多種多様な中性子過剰核の研究の中での研究実績によって、その理論は大きな有効性を示していった。中性子過剰核での共鳴状態を研究する場合には、多くの著者は、COREの周りのVALENCE中性子をCOSMで記述して、その上で共鳴状態の境界条件を複素回転法によって記述している。VALENCE中性子とCORE内部核子との反対称化はクラスター模型の標準的手法のOCMを用いるのである。

Li11のハロー構造は原子核におけるテンソル構造の発展にも大きな影響を与えた。原子核においてパイ中間子が重要な役割を果たしているであろうことは多くの研究者に取っては自明のことであろう。2000年の始めに池田と土岐は意気投合し、原子核構造の研究にパイ中間子をあらわに取り扱う必要性を共有した。最初は平均場近似でこの重要なパイ中間子の効果を導入出来るはずだと考えて研究してきたが、どうしてもパイ中間子の働きの一部しか取り扱うことができず、しばらくいきづまった。そんな中で思わぬ方向から解決法が発見された。それはLi11のハロー構造であった。つまりはハロー構造を作り出すためには $N=8$ のマジックギャップをなくし、シェルモデル的には上のシェルにある $1s_{1/2}$ と $p_{1/2}$ のレベルのエネルギー差をなくす必要があった。興味深いのはパイ中間子の交換力の中で表れるテンソル力は $p_{1/2}$ の状態を使うことにより大きな引力効果を生み出している。その $p_{1/2}$ に中性子が入るとブロッキング効果でこのテンソルの引力効果を減らすことになり、全体として引力効果を弱める。このメカニズムは必要とするマジックギャップをなくす働きを持つことが明らかになった。したがって、ハロー構造はその定量的な理解のためにはパイ中間子と言う基本に戻ることを促したことにもなった。この方法はその後、明さんを中心として発展し、テンソル最適化シェルモデル(TOSM)というかたちの定式化になっている。

不安定核の物理は天体核物理にも大きな影響を与えた。原子核物理でもこれまでは安定核近傍の核物理に限られてきた研究対象を存在する全原子核（強い相互作用に対しては安定だがベータ崩壊などの弱い相互作用で不安定になる原子核）に広げた。相対論的平均場理論や密度汎関数平均場理論などの理論の手法とともに、広い範囲の原子核が記述されるばかりではなく、中性子星や超新星爆発する星の状態方程式の導出にも大きな貢献をした。最近では C_{12} のホイール状態の研究がさらに進んでおり、アルファ凝縮の物理も展開されている。谷畑さんの文章では、池田は「天体物理で原子核生成の物理の研究を我々がやるのは原子核物理学者の自然への恩返しである。」と言ったことが記されている。（文献2）

4. 日本の原子核物理の今

杉本先生の思い出を語る中で、杉本先生の思い「これからは重イオン反応によ

る不安定核研究だ。」がニューマトロン計画の発案と推進、さらには、その準備研究として始めた日米の重イオン研究が今日の不安定核物理の原点となり、日本の原子核研究が世界の中心の位置にまで高められたと思うのは我々だけであろうか。1990年代前半に新潟で開いた2回の国際シンポジウムは当時の我々の意気込みや研究の発展状況を如実に反映していると思っている。(文献3、4) また、杉本先生には両方の会議にきていただきました。非常に喜んでおられた。



図2：新潟の国際会議(1994)での杉本先生と池田

文献

- 1。池田清美：シンポジウム「核物理の発信」 報告書 第2部 「科学の普遍性と欧米と日本」(1994) p. 1-154
- 2。谷畑勇夫：シンポジウム「核物理の発信」 報告書 第1部 (1994) p. 73-79
- 3。Proceedings of International Symposium on "Structure and Reactions of Unstable Nuclei" Niigata, Japan 17-19 June, 1991. (World Scientific)
- 4。Proceedings of International Symposium on "Physics of Unstable Nuclei" Niigata, Japan, October 31-November 3, 1994. (North-Holland) Nuclear Physics A588 (1995)