

杉本先生と理研の原子核研究

石原 正泰

初めに

半世紀にわたる研究生活を通じて、つくづく幸せだったのは良き研究仲間、良き先輩、良き後輩に恵まれたことでした。なかんずく貴重だったのは 3 人の卓越した先生方との出会いでした。森永晴彦先生、坂井光夫先生、杉本健三先生の御三方です。大学院修士時代にお世話になった森永先生には超一流の研究者と身近に接する機会を与えられ、科学に対する誇りと意欲をかき立たれました。また核研助手時代の上司である坂井光夫先生からは国家を背負って立とうとする気概に生きる研究者の姿を見せていただきました。そして最後の杉本先生からは原子核研究の楽しみをしみじみと実感させていただきました。この世で最も恐ろしいと思っていた杉本先生から、ある時期より、親しく薰陶を受けるようになり私の研究生活は一層豊かなものになりました。

遠い高みにいて近づき難い存在に思われた杉本先生に一気に親近感を抱くに至ったのは、1974年後期から 1975 年にかけて行なわれた重イオン物理関連の一連の研究会の折でした。私の講演に対して暖かい励ましの言葉を頂き感激致しました。それを期に先生からは折あるごとに声をかけていただくようになり、やがてご一緒に実験をしたり、レビューの執筆のお手伝いをさせて頂くなど、楽しくも懐かしい体験をさせていただきました。この時期は理研における重イオン研究の伸長期にあたり、後にリングサイクロトロン計画、RIBF 計画と連なるホップ・ステップ・ジャンプの大飛躍の出発点にも擬せられる時代でした。第 1 節では杉本先生との交流に思いを馳せつつこの時代の理研における重イオン研究の発展の経緯を辿ってみたいと思います。

やがて、1980 年代に至り理研ではリングサイクロトロンの建設が進められます。そこで私が取り組んだ研究プロジェクトは他ならぬ RI ビームによる不安定核研究で、杉本・谷畠のベバラックでの実験成功に触発されたものでした。本格的な RI ビーム生成装置として世界に先駆けて建設された RIPS は存分に威力を發揮し、広範な核構造研究や天体核物理研究を網羅する RI ビーム核物理とも称すべき新しい研究分野が確立されるに至りました。第 2 節では、杉本先生に感謝の念を捧げつつ、リングサイクロトロンにおける RI ビーム核物理研究の開拓と発展の歴史を振り返ってみたいと思います。

実は私は杉本先生に不愉快な思いをさせたある会合に関与した体験があります。それは杉本先生の核研所長の辞任の引き金ともなった事件でひいてはニューマトロン計画の終焉にも繋がった重大事でした。私は杉本先生の辞任宣言の席に立ちあう機会も与えられましたがその際の先生の無念の表情が今でも忘れられません。1990 年代に至り私は核物理委員長を仰せつかりましたがその際心に刻んだのは「今度こそ原子核分野の将来計画を実現さ

せる」という強い思いでした。幸い今日 RIBF と J-PARC という 2 大計画が実現しております。杉本先生もこうした状況を少なからず喜んでおられたのではないかと思います。これらの計画の実現が図られた 90 年代中後期の原子核分野の発展の歴史については、別途、「JHP 計画成立への軌跡（1990-1997 年の経過報告）」にて触れさせていただきます。

第 1 節 深部非弾性散乱をめぐって ----- 160cm サイクロトロンと共に-----

杉本先生とお近づきになった 1974-75 年当時は、私にとって 3 年有余の欧州遍歴を経た後幾つかの研究課題を抱えて勇んで帰国し、理研を舞台にして新しい研究活動を展開しようとしていた矢先の時期でした。1970 年代初頭はタンデム加速器の普及やサイクロトロンやリニアックなどによる中重イオン加速の進展により世界的に大いに重イオン物理が勃興した時代でしたが、特に私が過ごした欧州の研究所では低エネルギー重イオン衝突により拓かれた新しい物理的可能性に湧き立っておりました。一方当時の日本においてはタンデム加速器建設（東大、京大など）の度重なる不調の所為か、相変わらず軽イオンによる伝統的な原子核研究が圧倒的に優勢で重イオン研究は理研の 160cm サイクロトロン施設や原研のバンデ施設では取り上げられていたものの、大学関連では阪大のバンデ施設に依る杉本先生率いるグループが唯一氣を吐いていたのが実状だったと思われます。

実際、私は帰国に際して必死の思いで理研研究員ポストに志願しました。それは欧州滞在以来抱いてきた重イオン研究への強い願望を満たし得る場所として、上坪宏道主任研究員が主宰する理研サイクロトロン施設を差し置いては考えられなかつたからでした。理研は今でこそ世界有数の加速器科学研究所に発展しましたが、当時はまだまだ世評が定まらず、理研で推進されていた重イオン研究に対する関心もごく一部の人々に限られていたようでした。しかし河野功氏達の努力によりいち早く実現していた ^{14}N 等の重イオン加速の水準は極めて高く先端的な重イオン研究に十分応え得るものでした。

とは云うものの、重イオン研究に将来の夢を託そうとする流れは日本の中央に於いても徐々に醸成されつつあったようです。私自身は全く関知しなかつたことですが既に 1973 年には平尾泰男（当時核研）先生によりニューマトロン計画に通ずる構想が提案されていたとのことです。実際、平尾先生を代表者とする「重点領域：重イオン研究」が 1974 年頃から実施され、関連分野の研究会なども頻繁に開かれるようになっていた様に記憶しております。私が杉本先生にお目見えしたのもその類の研究会の席であったかと思われます。

私は日本に帰国するに当たって複数の実験構想を抱いておりました。それらは一年程前まで滞在した Niels Bohr 研究所での研究生活で培ったもので、いずれも quasi-elastic scattering (QES ; 準弾性散乱) や deep inelastic scattering (DIS ; 深部非弾性散乱) とよばれる新種の重イオン反応過程に関わるものでした。

それ以前の核反応学の主役であった直接反応と複合核反応は、素散乱の多重度に関して

それぞれ一回と無限回に対応する両極端の反応過程でした。ところが 5-10 MeV/核子領域の中重イオン衝突において見出された QES や DIS は多数の核子の移行を伴うもので、散乱多重性に関しては中間的な反応過程と考えられておりました。このうち QES は Massive transfer reaction、Incomplete fusion reaction あるいは Break-up fusion とも呼ばれた反応過程で、入射核の一部が切り取られ標的核側に移行する比較的反応時間の短い過程と考えられました。一方 DIS は衝突の間入射核と標的核が長時間に亘り分子（ダンベル）状に連なりながら回転し、その間、相互の間で多数の核子を交換しつつ運動エネルギーと角運動量を消費・再分配してゆく過程と考えられておりました。

とりわけ DIS が関心を集めたのは、反応の過程で現出する 2 原子核系の熱化学変化の時間展開の様相が原子核研究に新しい地平をもたらすものと考えられたからでした。Wilczynski Diagram¹⁾ はこうした反応の特長をいち早く捉えて簡明に図解したものでした（図 1. 参照）、その明晰性ゆえに DIS 研究のシンボルとして広く人口に膾炙しました。

当時の重イオン反応研究におけるもう一つの主役は重イオン衝突によりもたらされる極めて大きな軌道角運動量で、それが反応の結末に及ぼす影響に关心が集まっておりました。実際、Ar 程度の重イオンを重い原子核に照射した際この反応系の最大軌道角運動量は 100 \hbar 程度にも達します。森永先生によるインビーム γ 線分光の開闢²⁾以来、重イオン反応は高スピン状態を生成する基本的道具立てとして重用されてきました。従来よりも遙かに大きな角運動量が果たして核融合反応の残留核に移植され得るかは、極限的高スピン状態研究の帰趨にも関わる重大問題でした。

当時こうした設問に応えるべく実施されたのが、融合反応の複合核から放出される γ 線の多重度を観測する実験でした³⁾。この実験は私自身も深く関与して Niels Bohr 研究所で成功裏に行なわれたものです。これにより核反応の過程で中間的に生成される高エネルギー複合核に持ち込まれた軌道角運動量の分布を観測する手法が確立しました。

私が Niels Bohr 研究所に滞在した時期は同研究所が未だ全盛を誇っていた時代で、世界の各地から新進気鋭の若手研究者が多数集まっておりました。私はそのうち特に二人のポーランド人研究者と親交を深めました。その一人は他ならぬ J. Wilczynski で、彼とは同じオフィスで席を連ねていた関係もあり世に出てほどなかった Wilczynski Diagram を日ごと眺めつつ DIS の仕組みについて繰り返し議論して楽しんだものでした。もう一人の友人は R. Broda です。彼こそは同研究所滞在期間中の一貫した共同実験者であり上記 γ 線多重度実験も主に二人が共同して生み出した成果でした。

私が宿題として日本に持ち帰った実験課題は上記の Wilczynski Diagram と γ 線多重度測定の双方に関わるもので、その意味で彼ら二人のポーランド研究者との交友の所産とも云えます。

課題は三つありましたが、その内の二つは Wilczynski diagram の正当性を検証しようとするもので、いま一つはそこで分かった反応特性を利用して新しいインビーム γ 線分光法を開発しようとした。Wilczynski Diagram からは、二つの特長的な現象が予測されています。一つは終状態における 2 体残留核と重心運動の間での軌道角運動量の分配則に関わるもので、他の一つは残留核スピン偏極の向きに関する規則性でした。

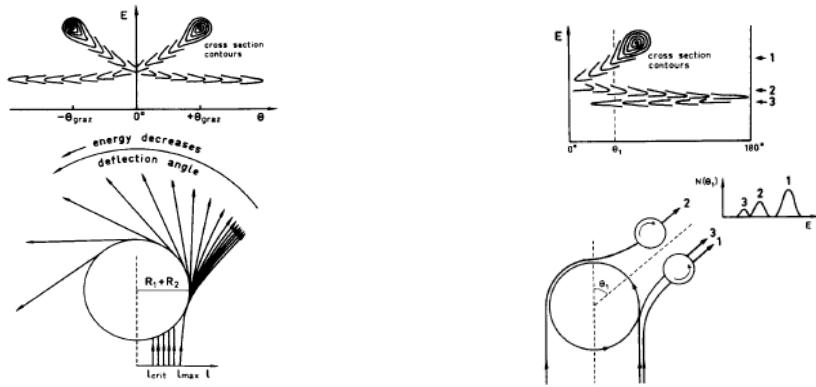


図 1. Deep Inelastic Scattering (深部非弾性散乱) に関する Wilczynski Diagram¹⁾

私が目指した第一の実験は γ 線多重度の測定により上記の角運動量分配則を検証しようとした。DISにおいては、入射チャンネルの段階では 2 体重心相対運動の自由度に集中していた運動エネルギーや軌道角運動量などの物理量が反応の進捗につれて徐々に入射核と標的核の内部自由度にも移行していくと想定されており、そうした熱交換過程を通じて諸々の物理量が重心運動を含めた都合三つの自由度の間に再分配されていく様相と仕組みに興味がもたれておりました。特に軌道角運動量に関しては、1) そもそも如何なる入射軌道角運動量が DIS に関与しているのか、また 2) 三つの自由度に対する分配の結果全系は平衡に到達しているのか、などが主要な関心事となっていました。

私の実験提案は、こうした問題に応えるために、入射核と標的核の内部自由度に取り込まれた軌道角運動量の総和を γ 線多重度の測定により決定しようとした。後述のように、DIS における反応進行時間は、散乱粒子（入射核様粒子）の出射角度を測定する事により推定できます。そこで γ 線多重度を散乱粒子と同時計測することにより角運動量分配の時間的推移を追跡することも可能となります。一方平衡状態に達した系での軌道角運動量の分配則は Sticking limit として知られており、全軌道運動量が “入射核”、“標的核”、重心相対運動の三つの自由度に対して各々の慣性モーメントに比例して分配されると予言されます。果たしてこうした極限的な分配則が実現しているかを問うのも実験の端的な狙いの一つでした。

Wilczynski Diagram 検証のための 2 番目の実験提案はスピン偏極測定に関わるものでしたので、その後に杉本先生とご一緒に実験することになる宿命を帶びておりました。Wilczynski Diagram によれば、DIS 反応過程の進展につれ 2 体重心相対運動に帰属する運動エネルギーは単調に減衰して行く一方で、ダンベル状での回転を経た散乱粒子の出射角度は徐々に前方に移行しさらに最前方を通り過ぎてのちは後方へ転向すると考えられております。従って実験室系の有限角度で測定したスペクトラムには Near-side 散乱に由来する高エネルギー成分と Far-side 散乱に由来する低エネルギー成分が並存することが想定されます。一方“入射核”と“標的核”はダンベル状回転の途上で相互の間の摩擦力によりトルクを与えあうため双方とも自転を始めることになります。その際生じるスピン方向は、“入射核”、“標的核”的何れの残留核に対しても同一であり、偏極軸を($\mathbf{P} \parallel \mathbf{k}_i \times \mathbf{k}_f$)と定義した場合、Far-side 散乱成分に関しては正偏極、Near-side 散乱成分は負偏極になることが予想されます。従って Wilczynski 仮説を検証するためには、いずれかの残留核のスピン偏極を散乱粒子の運動エネルギーの関数として測定すればよいことになります。

第 3 の実験提案は第 1 の実験で得られた角運動量移行の知見を活かしつつ新しい方式のインビーム γ 線分光法を開拓しようとしたものでした。インビーム γ 線分光は森永先生以来融合反応を用いるのが常でしたが、同じく大きな角運動量が関与する DIS の出現に伴い終状態 2 体反応の特性を生かした分光法の在り方に関心を抱きました。DIS は融合反応に比べより表面で起こる反応と考えられるため、関与する入射チャンネル軌道角運動量の分布は最大値近辺の比較的狭い幅の領域に限られるものと予測されます。これはイラスト状態に沿った E2 ガンマ線カスケードの発生頻度を増大させる効果がありますので、高スピン状態研究にとって有益な特質といえます。また終状態が 2 体である DSI の場合、粒子識別した散乱核との同時計測により残留核種同定や励起エネルギーを特定したスペクトルが得られ、多様なチャンネルに対する励起関数が一気に観測できるという便宜も期待できます。とりわけ DIS では生成核の分布に広がりがあるため中性子過剰核へのアクセスも可能になるのが魅力でした。

さてこれらの実験をやるには仲間が必要です。理研のサイクロ研に研究員として入所した私はわが身一つからの出発でしたので最初に手掛けたことは実験チーム作りでした。まず声を掛けたのは当時東大の大学院学生でありながら博士論文実験のために理研のサイクロ研に常駐していた福田共和氏(現大阪電通大教授)でした。同氏はもともと野村亨氏の指導のもとで研究に励んでおりましたが、私が入所した時期には野村さんが Saclay に長期出向して居たため、その間私と一緒に実験をして貰うことに致しました。それ以来福田さんは我々のグループの牽引役として大活躍して下さるのですが、自分の博士論文のテーマは「重イオン反応の全反応断面積の測定」に定めておりましたので私の用意した研究テーマを担当する研究者は別途用意する必要に迫られました。そこで上坪さんにお願いしてポスドク

研究員枠を一つ用意して頂き、東工大で博士号をとつて間もない沼尾登志男氏(現 TRIUMF 上級研究員)をお誘いして例の γ 線多重度の実験を担当して頂くことにしました。次いでサイクロトロン研の先輩であり核研時代からの研究仲間であった稻村卓氏に声をかけ“大質量移行反応”インビーム γ 線分光法の開発をご一緒に手掛けて頂くことにしました。しかしながらまだスピン偏極実験を担当する者が欠けておりました。そこで福田さんに相談し彼同様に理研に移つて研究する事を希望している学生さんの心当たりを尋ねたところ、「居ます。居ます。それらしき人が」ということでしたので「早速誘つて欲しい」旨をお願いしておいたところ数カ月して実現し、当時は田中姓であった旭耕一郎氏(現東工大教授)が我々のグループに参加することになりました。

これでいよいよ実験が始まるわけですが、まずは、先行して行なわれた γ 線多重度の実験が成果を挙げます。観測は入射エネルギー120 MeV の $^{14}\text{N}+^{93}\text{Nb}$ の反応系に対して行なわれ、図2. に示した様な結果が得られました⁴⁾。図2. (中央) には QES と DIS に関与する軌道角運動量が示されております。それらの分布からは、融合反応に寄与する最大軌道角運動量である $I_{\text{crit.}}$ に対応する衝突係数よりも外側の核表面領域で、両反応過程が競合している様が明確に描き出されております。また同図(右)からは QES や DIS に於ける典型的な角運動量移行の様式が明らかにされ、DIS の極限状態に対応する Sticking limit が実現している証左も得られました。

これらの結果は早速 1976 年 2 月に Argonne で開催された国際会議「Macroscopic Features of Heavy-ion Collisions」で上坪さんによって発表されました。会議では大評判を得たと云うことで大喜びだった上坪さんは帰国後程なくして開かれた年度末のパーティの席で未だ新人に過ぎない私を壇上に引き出し「石原さんは今年の年男だ」といって讃えてくれたのを思い出します。

DIS や QES における角運動量移行の問題を世に先駆けて取り上げたこの研究⁴⁾は忽ち世界から注目を集めることになります。実際数ヶ月後には Orsay の IPN の核化学部門の統帥であった M. Lefort 氏からの招待を受け、彼らが誇る本格的重イオン加速器 ALICE を用いて DIS の優勢な反応系での γ 線多重度実験を実施すべく渡仏することになりました⁵⁾。

実はこの Lefort さんこそフランスの重イオン物理研究所 GANIL の創設者です。当時、同計画は既に認可され建設の準備が進められている段階にありました。後々我々 RIB グループは理研リングサイクロトロンの建設期にあたる 1986-1987 年に既に稼働中の GANIL をしばしば訪れ、入射核破碎反応におけるスピン整列発生の有無を確認するための実験を重ねました⁶⁾。この際に GANIL から与えて頂いた様々な好意は 70 年代に上記の共同実験で培った友情と信頼に負うところが大きかったと思います。

好評を博したこの実験も論文出版に関しては辛い目に合いました。上記の Argonne の会

議での発表の後おもむろに論文作成に着手しましたが、遅筆の上に Orsay への出向などが重なって Phys. Rev. Lett. へ投稿したのは既に半年以上も空費した後でした。その上でレフリーから英語が拙いという理由で散々に苛められます。そうこうするうちに 1 年弱が経過したある日最新の Phys. Rev. Lett. 誌を開いて驚きました。なんと LBL の 2 つの研究グループによる同趣旨の論文^{7), 8)}が立てつづけに掲載されているではありませんか！ 恐ろしいことに、そこに示されている複数の図面は私の投稿論文のものと瓜二つでした。結局私は自分達の論文を取り下げることにし、以後つとめて Phys. Rev. Lett. 誌には投稿しないことを心に誓いました。

ANGULAR MOMENTUM TRANSFER OF THE QUASI-ELASTIC AND DEEPLY
INELASTIC PROCESSES IN THE $^{14}\text{N} + ^{93}\text{Nb}$ REACTION AT $E=120$ MeV

M. Ishihara, T. Numao, T. Fukuda, K. Tanaka, T. Inamura

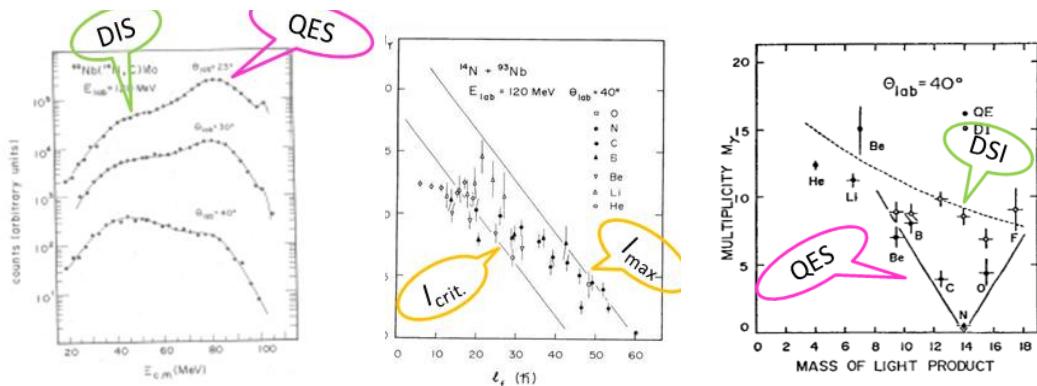


図 2. 「QES と DIS における軌道角運動度移行」についての幻の論文⁴⁾

- (上) 幻の論文の表題と著者名 (左) エネルギー・スペクトラム (QES と DIS の競合)
(中央) 関与する入射軌道角運動量の認定 (右) 軌道角運動量の生成核への移行

第 3 のテーマであった大質量移行反応によるインビーム γ 線分光法の開発実験⁹⁾も程々に注目を集めました。特に Texas A&M 大学やオランダの KVI などには大掛かりな信奉者のグループが発生し、久しく Massive-transfer/Incomplete fusion インビーム分光法と呼ばれて持てはやされました。90 年代に至り R. Broda はこの方法に更に磨きをかけ、専ら中性子過剰核の高スピン状態の研究に供して好評を博しました¹⁰⁾。

さて前置きが長くなりましたが、いよいよ本題です。冒頭に述べた研究会は重イオン研究の将来展望について語りあう為の企画であったかと思われますが、そこで私は上に述べた一連の実験構想を紹介致しました。それを聞かれていた杉本先生は講演が終わるや否や私を呼び止め、先生に特有な相好を崩した微笑みの表情で「なかなかおもろい実験を考えるやないか！」と云った感じの言葉をかけてくださいました。常々怖いと思っていた先

生から突如お褒めの言葉をいただき天にも昇る気持がしたことを覚えております。それから数ヶ月経ったある日、大阪におられる杉本先生から理研に電話がありました。「例の deep inelastic の実験な一、わしらの方法で偏極を測ったらどうや！？」という趣旨のものでした。当時私はスピン偏極を測る手立てとして γ 線円偏光法を優先的に考え、その方式にうんざりがある方々に教えを請うていた段階でした。 β 線による杉本方式に優先して別法を考えてみた理由は明快です。 γ 線ならば散乱粒子と同時計測できるため運動エネルギーや散乱角度に対するスピン偏極の依存性が一挙に観測できるのに対し、遅い過程による β 線を用いる場合にはそうした同時測定の好適が得られないからでした。しかし如何せん円偏光法の分解力はあまりに小さくどうしたものかと悩んでいたところ、そこに杉本先生から電話をいただき渡りに船と β 方式を使わせて貰うことに致しました。(注：円偏光法により実験は後ほど家城和夫氏（当時京大院生、現立教大教授）と行なった¹¹⁾。)

さていよいよ実験です。 β 線スピン偏極測定装置の製作などの実験準備は時折り高橋憲明先生（元阪大教授）の助言を受けつつも旭さんがほぼ独力で仕上げました。これらを理研 160cm サイクロトンのビームラインに設置し、実験の始まりです。90 MeV の ^{14}N を ^{100}Mo 標的に照射し、反応で生成されて 20° 方向に放出される ^{12}B を白金の foil に打ち込んだ後、崩壊に伴い放出される β 線の角度異方性を測定し、そこから ^{12}B 基底状態のスピン偏極の向きと大きさを決定するものでした（図 3. の左図参照）。ここで要請されていたのは、スピン偏極度を出射 ^{12}B の運動エネルギーの関数として測定することでした。そのため foil に至る途中に Al degrader を挿入し、その厚みを調整することにより静止 ^{12}B の初期運動エネルギーを規定する事に致しました。

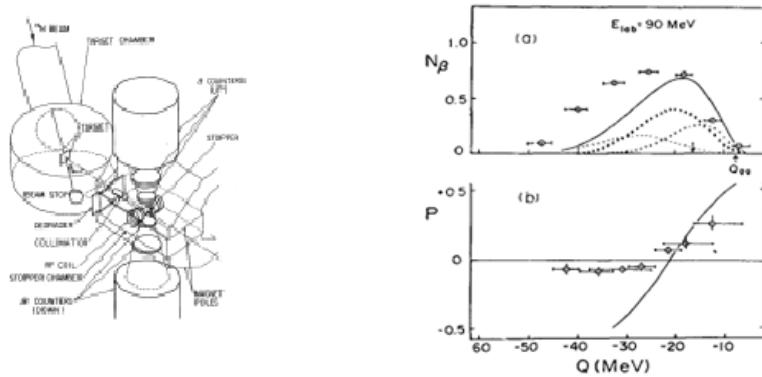


図 3. 「 $^{14}\text{N} + ^{100}\text{Mo}$ 反応からの ^{12}B のスピン偏極」に関する杉本先生との共同実験¹²⁾
(左図) β 線スピン偏極測定装置 (右図) ^{12}B のスピン偏極(P) vs. $E(^{12}\text{B})$

何しろ杉本方式偏極測定法の高分解力の威力は抜群で、美しいデータが立ちどころに得られました。しかし驚いたことに、観測された実験結果は Wilczynski Diagram からの予想

とは全く異なるものでした。Wilczynski 流に考えると、反応残留核のスピン偏極は、出射核の運動エネルギーが高い成分と低い成分に対して、それぞれ負と正になることが予想されております。ところが実際に観測されたものはそれとは正反対で、正一負というものでした（図 3. の右図参照）。初めは実験の間違いかと思い測定を繰り返しましたが、大勢は変わりません。そこであらためて理屈を考えてみることにしました。その手がかりになつたのは既に薄々感じとっていた可能性で、我々が眺めているスペクトラムは実は DIS ではなく QES の成分ではないかという観点でした。これら二つの反応過程は大質量移行という点では似ているものの、前者は時間を掛けてゆっくり進行する 2 体結合型の反応であるのに対し、後者は入射核の一部が引きちぎられて傍観者的な標的核に乗り移る反応と考えられ、むしろ後に注目を集める高エネルギー入射核破碎反応に類似性が高いものでした。

DIS と QES との違いは、入射核側の残留核が運動量と角運動量を獲得する仕組みに顕著に表れます。即ち DIS の場合は、入射核残留片への運動量のやり取りは標的核から受ける摩擦力に由来します。その方向は後ろ向きと特定されるためトルクの向きおよびスピン偏極の符号はその限りでは一義的であり、実験室系で観測される偏極の符号は散乱が near side か far side かにのみ支配されることになります。

一方 QES の場合、標的核はスペクテイターとして留まりますので入射核側への運動量の印加に積極的に関わるわけではありません。それでは入射核残留片は何処から運動量やトルクを獲得するのかといえば、それは一種のリコイル効果に帰することができます。反応前の段階では、入射核は残留片となるべき部分と残余の剥ぎ落されるべき部分（剥離片）から構成されていたと見立てられますが、その段階ではそれぞれがもつ運動量や角運動量は相互に打ち消し合っております。そこで、反応により一方が切り落とされると他方の運動量や角運動量が顕在化するに至ります。云いかえれば当初剥離片が持っていた運動量、角運動量のリコイルが入射核残留片には付与される形になります。ところで QES は基本的に near side collision によると考えられます。従ってスピン偏極の方向はこのリコイル効果によって一意的に決定されることになります。

このリコイル効果の特色は、入射核残留片が獲得する運動量とスピン偏極の間に強い相関が存在する点にあります。より簡明な高エネルギーの入射核破碎反応の例で説明しますと、正方向の偏極は剥離片が入射核中で後方方向の運動量を持っていた場合に生じます（図 4. の左図参照）。その場合残留片は前方方向にリコイルを受けることになり反応後の速度は反応以前より加速されることになります。一方、負のスピン偏極は剥離片が前方方向に運動量を持っていた場合に対応しますので残留片は減速されることになります。

入射核破碎反応と QES とでは、入射核からの剥離部分が前者では自由空間に飛び去るのに対し後者では標的核に吸収される点が異なります。しかしリコイル効果に関しては同様であり、入射核残留片が獲得する運動量とスピン偏極との関係も同等とみなせます。即ち

運動エネルギーの高い成分のスピン偏極は正、低い成分は負になると結論されます。また、偏極の符号の転換点は剥離部分が入射核で静止していた場合に対応します。

Brink¹³⁾ 理論を援用すれば QES における運動エネルギーとスピン偏極の相関に関してより定量的な予測を得ることが出来ますが、それは実験結果と非常によく合致するものでした¹⁴⁾。かくしてめでたく実験結果を説明出来た私は勇んでその成果を学会で報告いたしました。多分 1977 年の春の学会での特別講演だったと思いますが非常に好評だったことを覚えております。

いよいよ論文発表を迎えるわけですが、どうやら論文発表は私にとって鬼門のようです。上記の講演があつてほどなくして杉本先生が突然理研に私を訪ねて来られ、「杉本をトップオーサーにしてこの論文を書きたい」とのご宣託を告げられました。私の流儀によれば、この論文のトップオーサーは当然旭さんであるべきでしたので、杉本先生の申し出はまさに晴天のへきれきでした。私は大いに異議を唱え交渉は一時間を超えて続きましたが、先生は粘りに粘られます。ほどなく核研所長に就任が予想されていた大御所と 30 代半ばの研究者では所詮貫禄が違います。結局、「論文¹²⁾は私が取る代わりに数カ月後に開催される INPC1977 では旭か石原が招待講演¹⁵⁾をすべし」と云う杉本先生の提案を受け入れ手打ちを致しました。杉本先生はあらゆる意味で魅力的でかつ仁徳も高い先生でしたが、あの時に限って何故にあのような強引な振る舞いをされたのかは未だに得心がいっておりません。

ただしこの実験によりもたらされた私に対する国際的評価は相当なもので、国際会議終了後複数の欧米研究所 (ANL, LBL など) から共同実験の誘いを受けることになりました。結局、招待者の中で最も親近感を覚えていた今は亡き永谷邦夫さんの招きに応える形で、1978 年に下田正氏（現阪大教授）と共に Texas A&M 大学に渡り、当地の 88 インチ・サイクロトロンを用いて、様々な重イオン反応チャンネルに対して、スピン偏極の観測を行ないました^{16,17)}。福田、旭以後、私は主に京大小林研の学生さん達と研究を共にしましたが、下田さんはその皮切りでした。

理研と Texas A&M 大学との研究協力はその後も長期に亘って継続し、高田栄一氏（現放医研）を筆頭に多数の日本人研究者の応援を得ながら、新規の課題も取り込みつつ広範な研究活動が展開されました。後年理研は様々な外国研究機関と協定を締結して国際的な研究協力を推進しますが、Texas A&M 大学との実践がそれらの発端となるものでした。

一方、杉本先生とはその後も長きにわたり深く親しくお付き合いをさせていただきました。例えば、1980 年代の初頭、先生は tilted foil を用いた偏極生成法の開発に強い意欲を示され理研のリニアックを用いた R&D 実験を提案されました。河本進氏と私でその実験のお手伝いをさせていただきました。また、その頃には D.A. Bromley の編纂による Treatise on Heavy Ion Science という大著のレビュー誌が刊行されつつありました。当時杉本先生

は核研究所長として多忙な日々を送っておられましたが、Bromley からの執筆依頼には勇んで応じ *Polarization Phenomena in Heavy-Ion Reactions* なる論文¹⁸⁾ を仕上げました。光栄にも私は、高橋（憲）さん共々、執筆のお手伝いをさせていただきました。田無の核研究所長室にしばしば呼び出されたのを懐かしく思い出します。

この偏極実験には今日まで連なる後日談があります。それは上記のスピン偏極生成メカニズムが理研リングサイクロトロン施設および RIBF 施設でのスピン偏極 RI ビーム生成に活用されるに至ったからです。リングサイクロトロンや RIBF¹⁹⁾で加速される重イオンのエネルギーは 50MeV/u から 300MeV/u にわたる領域ですが、この領域で圧倒的に優勢な反応過程はいわゆる入射核破碎反応です。この反応は RI ビーム生成に用いられるべき反応過程である一方で、前記のリコイル効果によるスピン偏極生成メカニズムが機能する筈の反応でもあります。従ってリングサイクロトロンの建設段階から入射核破碎反応を用いた偏極 RI ビームの生成が強く意識されました。ただし一つの懸念がありました。それは *near side collision* と *far side collision* の競合の問題です。いやしくも有為なスピン偏極を得るためにには *near side* と *far side* の寄与が相殺しないことが肝要で、そのため零度ではない有限角度方向に出射した入射核破碎片を集め必要があります。しかしビーム・エネルギーが 100MeV/u 領域になった場合いわゆる *grazing angle* が著しく前方に移るため、たとえ有限の出射角度を選ぶにしてもそこで *near side* と *far side* の競合関係が微妙になります。

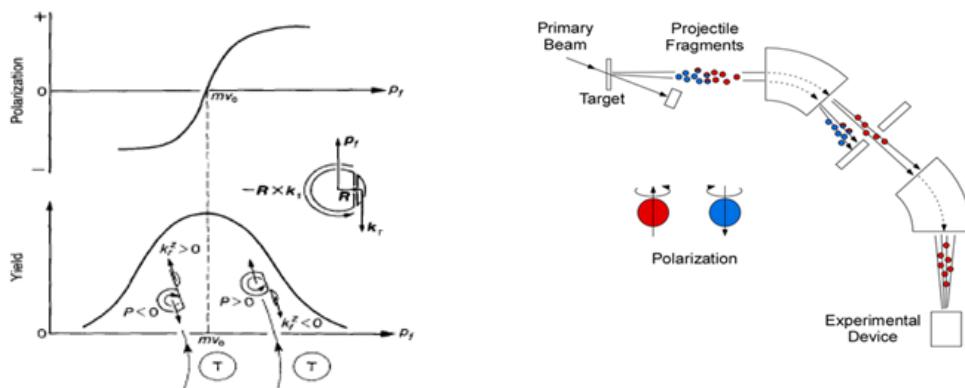


図 4. (左図) リコイル効果によるスピン偏極発生メカニズム¹⁹⁾
(右図) RIPS によるスピン偏極 RI ビームの生成

一方 tilted angle に出射したビームを後続の RIPS に打ち込むためには Beam Swinger が必要となります。無駄骨に終わるかもしれないこの装置の建設費が 5000 万円と見積もられた段階では、一旦建設を諦めました。しかし其処に施設建設を実質的に統括していた矢野安重氏がおもむろに登場し、「心配しないで作りましょう」との掛け声のもと忽ち同装置は製作されてしまいました。スピン偏極 RI ビーム生成装置の誕生¹⁹⁾ でした(図 4. 参照)。

リングサイクロトロンにおけるこのプロジェクトは旭さんを陣頭にして、阪大の南園研の方々の協力も得て成功裏に展開されました。入射核破砕片偏極 RI ビーム生成法の長所は元素や寿命の如何を問わず如何なる不安定核種に対してもスピン偏極したビームが供給出来る点にあります。この長所を生かして今日まで様々な不安定核の核モーメントの測定に供されてきました。これまでの実績としては、新たに g -factor が決定された核種が 14、Q-モーメントを決定した核種が 10 に達しております。

RIBF 時代に至り、この方法は更に進化を遂げます。それは、上野秀樹氏(理研主任研究員)や市川雄一氏達により試みられた改善で、入射核破砕片反応を 2 段階に用いることによりスピン偏極ビームの Figure of merit を高めようとするものです。実は入射核破砕反応で得られる残留核のスピン偏極度は剥離された核子数の多寡に応じて大きく異なります。こうした事実は Texas A&M 大での下田さん達との実験からも知られていた¹⁷⁾ことですが、剥離核子数が 1 個の場合には実践的な偏極度が 20-30% 程度まで達するのに対し 2 核子剥離の場合にはそれが 5% 程度まで減少し、さらに剥離核子数を増やしてゆくと遂には 1% を割るレベルに至ってしまいます。

ところでスピン偏極ビームの Figure of merit は偏極度の 2 乗とビーム強度の積で与えられますので、偏極度の大きさがことさら重要となります。そこで核種 A のスピン偏極ビームを生成したい場合先ずは 1 段階目の破砕反応で核種 (A+1) のビームを生成し、それを更に 2 次ターゲットに照射して 1 核子剥離の破砕反応を起こし核種 A のビームを得ることにします。勿論 2 段階反応のためビーム強度は減りますが、1 核子剥離による偏極度の利得は大きくその 2 乗から得られる利得は 1000 倍超にも達します。結局この 2 段階法により、Figure of merit で 10 倍程度の向上が図られることになります。

もちろん 2 段階法においてもビーム収量を出来るだけ高める工夫が肝心です。そのため威力を発揮したのはほかならぬ RIBF 附置の RI ビーム生成装置 BigRIPS⁶⁾でした。この In flight fragment 分析装置は先代の RIPS にくらべ遙かに贅沢に作られており、中間焦点面を 4 段も有している上に各セクションでのビーム集束方式を任意に変えられるようになっております。上記の実験の場合、RI 生成標的での第一段目の破砕反応で得られた 1 次 RI ビーム (A+1) で第 1 焦点面の上に置かれた 2 次標的を照射し、そこで得られた 2 次 RI ビーム (A) を第 2 焦点面に導きます。その際気になるのは収量の保持と偏極度の確保を両立できるかと云う観点です。収量を高めるためには RI 生成用標的を出来るだけ厚くすることが求められますが、これにより一次 RI ビームの運動量分布に大きな広がりが生じます。一方、スピン偏極/整列は 2 次破砕反応時に 2 次 RI ビームに新たに付加 (除去) された運動量の関数になっている為、それに対する情報は保持されなければなりません。そこで考えられたのは Dispersion matching (分散整合) 法の適用でした。即ち RI ビーム生成用標的から第 2 焦点面に至るビーム光学系は第 1 焦点面を挟んで分散整合を満たす光学系を採用

します。これにより第2焦点面上で得られる位置分散は、1次RIビームの持つ運動量の広がりに対しては打ち消されるために、2次反応で生じた付加（除去）運動量のみの関数として与えられることになります。

こうした2段階法のメリットは既にスピン整列ビームに関しては実証され、Nature誌²⁰⁾に発表されております。この方法の導入により、スピン偏極/整列ビームの適用範囲を安定線からより一層と離れた領域まで拡張する事が可能になります。杉本先生と共同で始めたスピン偏極研究は今後益々発展していくものと考えられます。

Reference:

- 1) J.Wilczynski, Phys. Lett. 47B, 484 (1973)
- 2) H.Morinaga, P.C.Gugelot, Nucl. Phys. 46, 21(1963)
- 3) M.Ishihara, R.Broda, G.Hagemann, B.Herskind, in Proc. of the Int. School of Physics 'Enrico Fermi' Course LX II on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Reactions with Heavy Ions, Varenna, Aug. 1974, p. 542 (North-Holland Publishing Co.);
G.Hagemann, R.Broda, B.Herskind, M.Ishihara, Nucl. Phys. A242, 166 (1975)
- 4) M.Ishihara, T.Numao, T.Fukuda, K.Tanaka, T.Inamura, in Proceedings of Symp. on Macroscopic Features of Heavy-Ion Collisions, Argonne, 1976, ANL-PHY-76-2, p.617
- 5) C.Gerschel, M.Ishihara, J.Peter, B.Tamain et al., Nucl. Phys., A317, 473 (1979)
- 6) K.Asahi, M.Ishihara, T.Kubo, A.C.Muellar, R.Anne et al., Nucl. Phys. A488, 83c (1988)
- 7) P.Glassel, R.Simon, R.Diamond, L.Moretto, F.Stephens, Phys. Rev. Lett., 38, 331(1977)
- 8) K.Van Bibber, S.Steadman, F.Videbeak, G.Young, Phys. Rev. Lett., 38, 334 (1977)
- 9) T.Inamura, M.Ishihara, T.Fukuda, T.Shimoda, H.Hiruta, Phys. Lett., 68B, 51(1977)
- 10) R.Broda et al., Phys. Rev. Lett. 74, 868 (1995)
- 11) K.Ieki, M.Ishihara, H.Utsunomiya et al., Phys. Lett., 150B, 83 (1985)
- 12) K.Sugimoto, N.Takahashi, A.Mizobuchi, Y.Nojiri, T.Minamisono,
M.Ishihara, K.Tanaka, H.Kamitsubo, Phys. Rev. Lett., 39, 323 (1977)
- 13) D.M.Brink, Phys.Lett., 40B, 37 (1972)
- 14) M.Ishihara, K.Tanaka, T.Kamuri, K.Matsuoka, M.Sano, Phys.Lett., 73B, 281 (1978)
- 15) K.Tanaka, M.Ishihara, K.Sugomoto, et al., J. Phys. Soc.Japan 44(1978) Supple.825
- 16) M.Ishihara, T.Shimoda, K.Nagatani, T.Udagawa et al., Phys. Rev. Lett., 43, 111(1979)
- 17) M.Ishihara, Nucl. Phys., A400, 153 (1983)
- 18) K.Sugimoto, M.Ishihara, N.Takahashi, in Treatise on Heavy Ion Science, Vol. 3, p.397
Edited by D. A. Bromley, (1985), Plenum Press, New York and London
- 19) K.Asahi, M.Ishihara, T.Kubo, N.Takahashi et al., Phys. Lett., 251B, 488(1990)
- 20) Y. Ichikawa, H.Ueno, K. Asahi, M.Ishihara et al., Nature Physics, 8, 918 (2012)

第2節 RIPS と RI ビーム物理の伸長 ----- リングサイクロトロンと共に

1 節で述べた一連の研究は 1975 年から 1977 年前期にかけての約 3 年間に理研の 160cm サイクロトロンを用いて行なったものでしたが、この時期に同施設で行なわれた研究の成果を集大成する機会として、理研国際シンポジューム「重イオン反応と前平衡過程」が 1977 年 9 月に箱根花月園ホテルで開催されました。この会議はその直後に東京の京王ホテルで開催された国際会議 INPC1977 のサティライトとして実施されたものでしたが、中々の盛況で、森永先生や Argonne の J. P. Schiffer 氏をはじめとする重イオン物理分野の世界の第一線の研究者が多数参加されました。特に当時の重イオン研究の中心が DIS などに関する反応学であった関係で、専らその分野をテリトリーとしていた核化学分野の重鎮達 (L.G. Moretto, R. Vandenbosh, F. Hanappe など) がこぞって参加されたのも印象的でした。

余談になりますが、後年 BNL に理研発の RHIC スピン物理プロジェクトを入植させる際に大変お世話になった DOE の担当官 D. Kovar 氏の知己を得たのも、当時 Argonne の研究員であった同氏がこの会に参加したのがきっかけでした。

160cm サイクロトロンを用いて行なわれた当時の実験やその後進展した関連研究の成果の大要は、1982 年に MSU で開催された第 1 回 Nucleus-Nucleus Collision 国際会議における私の招待講演にも収録されております¹⁾。

箱根シンポジュームの成功が理研加速器グループにもたらしたインパクトは極めて大きかったようで、同グループの永年に亘る主宰者であった上坪宏道氏は、今でも事あるごとに、「箱根の会の成功こそがその後の理研（加速器科学）の発展の礎になった」と感慨深げに語られます。実際この頃より、上坪さんはリングサイクロトロン建設計画の準備研究を加速させてゆきます。やがて理研に於いては、リングサイクロトロンの建設が 1980 年に開始され 1986 年には最初のビーム加速に成功致しました。更に RIBF が 1995 年に着工し 2006 年にビーム加速に成功して今日に至っております。この発展の経過は、1966 年に完成した 160cm サイクロトロンから出発し、リングサイクロトロン、RIBF へと積み重ねた、ホップ・ステップ・ジャンプの大跳躍でした。

この流れのうち、ステップからジャンプに繋がる飛躍をもたらしたのは、他ならぬ RI ビーム物理への挑戦でした。原子核実験の発展史を振り返った場合、壮大な発展の契機となる実験が稀に出現します。その一つは森永先生によるインビーム γ 線分光の実験²⁾であり、いま一つは、杉本・谷畑等に依る RI ビーム実験³⁾です。リングサイクロトロンから RIBF に至る大発展の道程は、まさに杉本先生達によって開かれた RI ビームの大地に森永先生により開かれた核構造研究の伝統が重畠される形で実現したものでした。

RI ビームによる原子核研究の発展史を私なりに整理しますと、黎明期、第 1 世代 RI ビーム時代、第 2 世代 RI ビーム時代に分けられます。黎明期は谷畑・杉本実験³⁾に端を発し

ます。ハロー核の発見で耳目を轟かせる一方、RI ビームの概念が提起されました。この黎明期に活躍したもう一つのグループは GANIL のグループで、Achromatic focus 型の多電荷イオン分析装置 LISE を転用して新同位元素の探査などの実験⁴⁾を展開致しました。しかし当時の RI ビーム発生装置はあくまでも当座の目的に間に合わせたもので、研究対象は全反応断面積や新同位元素の生成など微小なビーム強度に耐え得るものに限られました。

今日 RI ビームを用いた原子核研究は、安定線から遠く離れた中性子や陽子の過剰核を対象に、極限状態下の核構造現象や宇宙における元素の生成に関わる核物理的諸現象に関して、多角的、体系的な研究を展開する包括的な研究分野に成長しております。1990 年代初期から始まった第 1 世代 RI ビーム時代の最大の意義は、まさに、RI ビーム物理の領域を包括的な学問体系に昇華させた点に在りました。この時代を生み出す原動力となったのは RIPS (Riken Projectile-fragment Separator) に代表される本格的 RI ビーム発生装置の出現でした。理研リングサイクロトロン施設に設置された RIPS⁵⁾は第 1 世代 RI ビーム施設の世界の先駆けとして 1989 年に稼働を始めましたが、その威力は絶大で、得られたビーム強度は黎明期に用いられたビームに比べ 3 枠も 4 枠も強いものでした（図 1. 参照）。こうしたビーム強度の増進は、断面積が数 mb から 100mb 領域にまたがる様々な直接反応過程を、RI ビームによる 2 次反応として利用し観測する事を可能にするものでした。これらの直接反応群を活用するための新しい分光手法の開拓により、RI ビームによる原子核研究の領域が一気に拡大されました。

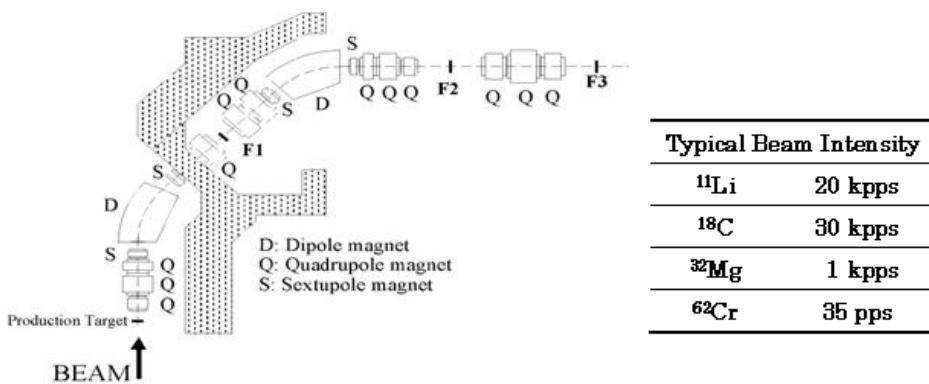


図 1. RI ビーム発生装置 RIPS⁵⁾の装置図（左）と RI ビーム強度（右）

次いで起こった第 2 世代は、RI ビームに特化した加速器施設、RI ビーム・ファクトリー、により特長づけられます。これは、加速器から実験室の配置に至るまで RI ビームの生成と利用に特化された施設で、最大限に多様な核種の RI ビームを最大限の強度で供給することを目的にして建設されるものです。理研の RIBF 施設はその典型で、第 2 世代を先駆けて 2006 年に完成し今日では世界各地からのユーザーの利用に供されております。特にウラン

ビームは前代見聞の威力を發揮しつつあり、付帯 RI ビーム生成装置である BigRIPS⁶⁾から得られるビーム強度は、先代の RIPS にくらべて更に 4 桁も 5 桁も強大になっております。

かくして RI ビーム利用研究の発展は、黎明期から、第 1 世代期、第 2 世代期を通じ、一貫して日本人の研究者が先導的役割を担ったことになります。黎明期のヒーローは谷畠さんであり、第 1 世代期、第 2 世代期のヒーローは、それぞれ、私自身と矢野さんと云うことになります。誇らしいことだと思います。

しかし、第 1 世代期の発展の経過を振り返ったとき、決して当初から明快な展望や道筋が描けていたわけではなく、逡巡や試行を繰り返した後に幸運にも辿りついた地平であつたことが思い出されます。以下ではその経過を振り返ってみたいと思います。

そもそもリングサイクロトロンの建設が開始された当時、この加速器計画に対する世間の目は必ずしも温かいものではなかったようです。実際、何処からともなく、「理研は大型の加速器を作った経験のない素人集団だ。まともに働く加速器が出来るか怪しい」という根拠のない中傷があったと聞いております。この種の風説は今日の目で見れば途方もない暴論に思えるかもしれません、当時の人々が理研をみる目には時折そうした偏見がみられました。

折も折、この頃はニューマトロン計画の議論が絶頂期を迎えておりました。また世界的な趨勢として原子核を QCD の立場から理解しようとする風潮が怒濤のように巻き起こり、クオークやハドロン自由度を主軸に据えた”PANIC”物理が巨大な奔流となって原子核研究の風景を一変させつつありました。実際日本に於いても中核的研究者の大部分がこうした新分野に移行し、旧来からの原子核分野の領域に留まる研究者は希薄になりつつありました。私自身に対しても「いつまでも理研に義理立てしなくとも」と転進の誘いをして下さる先輩が折々みられたほどでした。

当時世界における重イオン加速器施設の趨勢は、ベバラックやニューマトロンのように GeV 領域に及ぶ高エネルギー加速器が指向される一方で、核子当たり数 10MeV から 100MeV クラスのセクター型サイクロトロンの建設も一つの流行になっていました。この範疇で最初に建設されたものは、1982 年に完成をみた MSU の超伝導サイクロトロン (K=500MeV) と GANIL の複合サイクロトロン施設 (K=400MeV) で、理研のリングサイクロトロンはミラノ大や、南アの計画などと並んで、これらの後塵を拝す形で建設が進められました。

この範疇の重イオン加速器の最大の眼目は、高温度・高密度原子核の“物性”研究にあり、音速を超えた領域での圧縮の問題や気体相—液体相間の相転移が主要課題として喧伝されておりました。こうした研究には膨大な検出器系の開発が必要となり、それを支える大きな研究者コミュニティの存在が求められました。こうした分野で大きな遅れをとった

いた日本で、今更それに取り組むことには、強い空しさを感じておりました。

一方、理研リングサイクロトロン (K=540 MeV) はエネルギーとビーム強度で先行施設を凌ぐことが期待されておりました。これらの特長を生かしつつ新機軸の研究計画を編み出して勝負することこそが肝要だと深く心に銘じました。

リングサイクロトロンの建設は、上坪さんの統率のもと、矢野安重氏が率いる加速器グループの活躍に依り、着々と進捗します。建設計画は 1 期と 2 期に分かれておりましたが、1 期工事の完了年次である 1986 年の末には既に重イオン加速に成功しました。一方、付属実験施設の検討がぼちぼち始められたのは 1983 年の末頃からで、1 期工事終了時に一部の基幹実験装置を完成させておきたいと云う要請に急き立てられたものでした。

翌 1984 年に至って私は放射線研究室主任研究員に就任致しました。それを契機にして、原子核関連実験プロジェクトの全計画を統括的に取りまとめる任を仰せつかることになります。当時、核物理委員会の委員長であった八木浩介筑波大教授より宮島龍興理研理事長あてに「リングサイクロトロン施設を理研外部の研究者にも開放して欲しい」旨の要望書が出されていた関係もあり、私は広く全国の研究者に呼びかけてプロジェクトの提案を督促し、ワークショップなどを繰り返して検討を重ねた後、次の 4 つの大型プロジェクトを設定する事に致しました：

- 1) GARIS-IGISOL (代表者 ; 野村亨 (核研))
- 2) SMART (代表者 ; 大沼甫 (東工大))
- 3) ASHURA (代表者 ; 李相茂 (筑波大))
- 4) RIB (代表者 ; 石原正泰 (理研))

この内、1) および 2) のプロジェクトは、それぞれ、全国から数十名に及ぶ研究者が結集して組みあげられたもので、後々卓越した成果を挙げるに至る素晴らしい研究計画でした。実際、1) の GARIS-IGISOL 計画は超重元素探査を主目的にするプロジェクトでしたが、森田浩介氏などによる永年の努力は、超重元素 113 の発見⁷⁾ と云う偉業に結実しました。また荷電散乱粒子分光を目指した 2) の SMART 計画も、酒井英行グループによる偏極重水素ビームの導入とそれを用いたテンソル力や 3 体力の研究⁸⁾ で盛名を馳せることになりました。例外は 3) の ASHURA でした。高温高密原子核の研究を目指した計画でしたが、所詮、先行する外国グループとの大きなギャップが埋められず、程なく撤退することになりました。

以上の 3 つのプロジェクトはいずれも外部研究者を中心にして構成されたものでしたので、別途に、理研研究者を主体とした研究計画の提案が待望されておりました。それに応える形で提案されたのが当時 RIB と称した RI ビーム研究計画で、当初は大方の研究者からの関心も得られぬままに、私と旭さんと久保敏幸氏の 3 人で細々とグループを立ち上げました。そのころ谷畠さん達のベバラックにおける全反応断面積測定の成功はすでに噂で伝えられておりましたが、中性子のハローの発見と並んで注目を集めたのは、入射核破碎反

応 (PF) を用いた RI ビーム生成法の斬新さでした。我々の RIB プロジェクトは、こうした PF 方式に依拠した RI ビーム生成装置を建設して、不安定核研究を発展させることを意図したものでした。しかし、当時の風潮として PF 式の RI ビームに寄せる期待は必ずしも高いものではなく、むしろ利用範囲は限定的で、大きな発展を見込めないのではないかという悲観的な見立てが優勢でした。

こうした悲観論の背景には、PF 方式により生成された RI ビームのエネルギー広がりが数 10 MeV にも達してしまうという事情がありました。一方、伝統的な原子核実験では終状態を分離する必要から、数 10 keV から悪くとも数 100 keV のエネルギー分解能が求められてきました。この隔たりはあまりに大きく、研究者の中には「PF-RI “ビーム” をビームと呼ぶのは不謹慎だ」と唱える人も現れたほどでした。実際、ほどなく世界中で繰り広げられた RI ビーム施設建設計画の検討の現場でも、ビーム・エミッタスやエネルギー分解能に優れた ISOL-Post Acceleration 方式を採用すべしとする考え方が主流を占めました。日本においても、1988 年には、大型ハドロン計画の一環として、ISOL 方式に立脚した E アレーナ計画⁹⁾ が提案され、全国の研究者からの圧倒的支持を背景にして建設準備が進められました。結果として、この計画は途中で挫折しますが、その一因は RIB (=RIPS) 計画の予想外の成功にも因っていたと思われます。

RIPS による研究の成功を支えた最大の要因は、同器の RI ビーム生成能力が時代を画して強力だった点にあります。当初 RIB と称された同器の設計作業は、リングサイクロトロン施設のビームライン系担当であった畠中吉治氏の協力を仰いで始められました。私が RIPS の設計方針について確信を抱いたのは、1984 年の末頃で、ある国際会議から戻ってきた畠中さんから一枚のポンチ絵を示されたことに発します。この絵には、然る人から立ち話的に聞いたという質量 A と原子番号 Z による分離法の原理を示すものとして、プリズム状の三角形 2 個 (D 電磁石) とその間にエネルギー減衰用に挿入された板状のものが描かれておりました。これが素晴らしいヒントを与えてくれました。しかし、それだけでは具体的に如何なる光学系を設定すべきかについての設計指針は掴みかねました。そこで挿入板を入れた際の集束条件を学ぶため、自ら一次の光学解析を手掛けることにしました。

もともと 2 個の D 電磁石を組み合わせるのは、第 1 D 電磁石により得られる分散型の中間焦点面と、第 1、第 2 電磁石間の分散整合により得られる Achromatic な最終焦点面の、両者を確保するためです。問題の核心は、その中間焦点面に減衰板を置いた際に、如何にしたら最終焦点面での Achromatic Focus が維持できるかと云う点に帰着します。

実際に解析をしてみたところ、答えは比較的簡単に得られました。然る関係式で規定される角度を持った楔形の減衰板を挿入すべしと云う結論でした。当時、私の知り得る限り、この関係式は何処にも知られておりませんでした (実際、最初に公表されたのは 1986 年の J. P. Dufour 等による論文¹⁰⁾)。そこで私は大発明をしたような高揚した気分になり、かく

なる上は壮大なる RI ビーム生成装置を建設すべしと決意を新たに致しました。

1985 年に至り、RIPS の設計作業は博士論文提出を済ました久保さんの手に委ねられます。久保さんは優れた完全主義者で、現実的な要請や制約に妥協しがちになる私の判断を押しのけて徹底的に最高性能を追求しました。結果論になりますが、RIPS の圧倒的な性能を生み出したのは久保さんのこうした精神性の賜物ともいえます。

もう一つ幸運がありました。当初、RIPS は実験系基幹装置の先行器として 1 期工事期間内に完成する事が期待されました。その場合、同器を収納すべき実験室として想定されたのは現在 CNS の CRIB が設置されている E7 室でした。問題はその部屋の狭さです。これでは高性能化のために求められる大型の電磁石系の収納は困難を極めることになります。しかし幸か不幸か予算執行の遅れが生じ、建設は 2 期工事期間にずれこむことになります。その結果 RIPS は、ビーム分配室と E6 実験室にまたがる広い空間に色々と配置されることになりました。装置の大型化に伴い建設費用も肥大しましたが、この際も矢野さんの才覚と支援により危機を切り抜け発注に辿りつきました。

RIPS は立体角と運動量に関して大きなアクセプタンスを持った電磁分析系 ($\Omega = 5 \text{ msr}$, $\Delta p/p = 6\%$ for full angular acceptance) です。そのための大口径の集束系の設計にあたっては、3 連 Q 電磁石の活用が有効であることを森信俊平氏 (九大名誉教授、当時 RCNP 助教授) から教えて貰いました。

RIPS の設計上、いま一つ重要だったのは、最大 B_ρ 値をリングサイクロトロンの 1.65 倍に相当する 5.76 Tm に設定したことでした。これにより ^{11}Li の様に A/Z の極端に大きい中性子過剰核のビーム生成に際しても、リングサイクロトロンから得られる最高エネルギーの一次ビームを用いることが許容されることになります。RI ビームの強度は一次ビーム・エネルギーの大凡 3.3 乗に比例して増加すると考えられますので、この効果は甚大です。RIPS において圧倒的な強度を持つ中性子過剰核のビームが得られた根拠の一つです。

PF 方式に依拠する RIPS プロジェクトが成功し得た理由の謎解きは容易です。

PF 方式による RI ビーム生成は、手順が簡便な上に核種の元素や寿命にかかわらず適用できるなど、ISOL 方式では決して得られない様々な長所を持ち合わせております。そのため、ビーム・エネルギーの広がりに由来する不都合を回避する処方箋さえ見出されれば、一気に利用が進展する宿命にありました。

実際、二つの処方箋が直ちに見出されます。一つは非束縛励起状態に適用すべき不变質量法であり、他の一つは束縛励起状態に適用すべき脱励起 γ 線測定法です。これらを活用する事により PF ビームによる 2 次反応で励起された終状態の特定が可能になり、直接反応を用いた多様な分光研究の途が拓けました。

不变質量法を用いた代表的な研究としては、

- 1) 高エネルギー・クーロン分解法による極低エネルギー放射捕獲反応の断面積決定
 - 2) クーロン分解法によるハロー核のソフト E1 巨大励起の観測
- が挙げられます。

1) は、天体中で頻繁に起こる核反応過程である放射捕獲反応の断面積を、実質的には逆反応であるクーロン分解反応の断面積を測定する事により間接的に決定するものです。天体中での放射捕獲反応はごく低エネルギーで起こるため断面積が極端に小さく、その測定は難渋を極めます。これに対してクーロン分解法は、高エネルギーの逆反応を用いることなどに依り測定効率を 4 衍以上も高める画期的な方法で、太陽ニュートリノの発生率に関係する $^7\text{Li} + \text{p} \rightarrow ^8\text{B} + \gamma$ 反応¹¹⁾ を含む多数の捕獲反応の断面積決定に適用されました。

2) のソフト E1 巨大励起は、クーロン分解に際して閾値すれすれの連続領域に強い E1 励起が見られるハロー核に特有な現象で、その観測を通じて、多数の新しいハロー核の発見がなされる一方、“di-neutron” クラスターの形成¹²⁾ などハローに起因する特異な現象が明らかにされました (図 2. 参照)。

私が主宰する研究プロジェクトは常々少人数から始める為、研究仲間の発掘が重要な課題となります。1) のタイプの実験の有為性については既に理論家の G.Baur や C.A. Bertulani により指摘されており¹³⁾、国際的な先陣争いが予想されておりました。負ける訳にはゆきません。そこで着目したのは当時立教大に移ってきた本林透氏でした。同氏は阪大時代に break-up 実験に馴染んでおり、その道に精通しておりました。ところが、その頃の同氏は上記の ASHURA グループに属しており、関連分野の重鎮であるカーン大学の J. Peter 氏のもとに逗留しておりました。そこでフランスで行なわれた国際会議の機会を捉えて同氏を訪ね、転進方を強く訴えました。本人もこの種の実験に興味を抱き始めていた様子で話は直ぐにまとまりました。更に好都合であったのは、本林さんがそれから暫くの間グルノーブルの原子核科学研究所に滞在する予定になっていた事でした。当時、理研はフランスの CNRS-IN2P3 と研究協力協定(1985 年以来)を立ち上げておりましたが、フランス側の主宰研究機関は他ならぬ同研究所でした。そこで当地の研究者を巻き込んだ共同研究チームが編成されます。先方が保有していた位置検出型 Si-SSD テレスコープ (EMRIC) を利用できたのは幸便でした。

RIPS の立ち上げキャンペーンの一つとして実施したこの実験は華々しい成功を博しました。1991 年に公表された $^{13}\text{N} + \text{p} \rightarrow ^{14}\text{O} + \gamma$ の実験成果¹⁴⁾ は、RI ビームによる天体核物理研究の端緒を切るものになりました。

2) の実験の主役を果たしたのは東大に開設した新しい実験チームでした。私が東大に移って真っ先に取り組んだのは英才でなる下浦享氏(現東大教授)を我々のグループに引き込むことで、当時京都大学助手であった同氏に懇請して私の研究室に移って貰いました。東

大グループの立ち上げ時に中核を担ったのは他ならぬ下浦さんでした。

同研究チームで最初に取り組んだのがハロー核のソフト E1 励起の観測でした。当時、RIB 不安定核研究の方向性についての世間の見立ては、未だ、茫漠としていた時代でした。しかし私としては RIPS の性能に照らして中性子超過剰核の物性こそ新時代の研究のハイライトであると確信し、そのシンボルとしてソフト E1 励起を取り上げました。中性子ドリップライン近傍の原子核をあえて「中性子超過剰核」と称して特別視したのは、それらの原子核で顕れる、中性子数・陽子数間の極端な非対称性や極めて弱い束縛性などの特異環境により生み出される世界こそ、新世代の不安定核研究が切り開くべき新しい地平だと意識していたからです¹⁵⁾。

ソフト E1 励起の存在は、以前に小林俊雄氏（現東北大教授）達により行なわれた Bevalac での全反応断面積実験から示唆されておりました¹⁶⁾。この謎めいた現象の正体を暴きたいと云うのが我々の実験の狙いでした。この研究のため、私にとっては最初で最後となった大型科研費の申請を行ない、大面積の中性子検出用ホドスコープを製作する事にしました。下浦さんと同グループの最初の大学院学生であった中村隆司（現東工大教授）氏がそれに取り組みました。

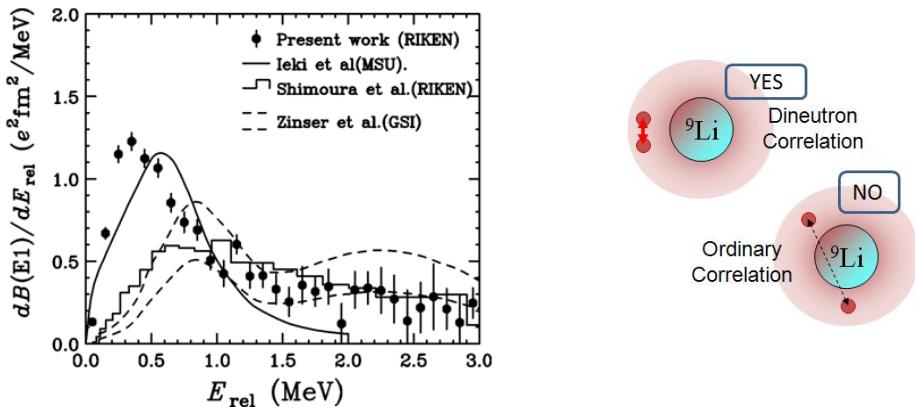


図 2. (左) ^{11}Li のクーロン分解で見られるソフト E1 効起¹²⁾
(右) ソフト E1 効起が通常より強いことから di-neutron 的相関が示唆される

この流れの研究は成功裏で進展し、やがて実験の主役は中村さんに移ります。まずは、1 中性子ハロー核 ^{11}Be でソフト E1 効起の仕組みを確立します¹⁷⁾。ついで、2 中性子ハロー核 ^{11}Li のハローに di-neutron 的相関を見出したのも大ヒットでした¹²⁾。更に最近には、変形ハロー核を多数見出すに至っています。これらの発見からは束縛エネルギーの減少自体が変形の亢進にも関与している可能性が示唆されます。変形は s 波や p 波の成分を持った固有状態を増殖される効果がありますので、束縛エネルギーの減少は、トンネル効果の増大と併せて二重の意味でハロー核の発現頻度の増加に寄与している可能性があります。

ここから話題は一転して、粒子束縛した励起状態を対象にした核構造研究に移ります。RI ビームによるインビーム γ 線分光の開闢物語です。

RI ビームによる初期の研究は専ら ^{11}Li 周辺の軽い弱束縛の原子核に集中し、そのため非束縛状態を対象にした上記のような研究が主流でした。しかし、一つの実験を転機にして、研究の重心が一気に重い原子核領域に移行し、束縛励起状態を対象とする γ 線分光が脚光を浴びることになります。

そのきっかけとなった実験は、クーロン励起における ^{32}Mg の 2^+ 状態への E2 励起強度を脱励起 γ 線の観測により決定^{15,18)}したものでした。古来より、 ^{32}Mg は魔法数 $N=20$ を持つにも関わらず変形が示唆されていた原子核で、中性子過剰領域で魔法数が破れる現象のシンボル的存在として意識されてきました。図 3. に示すように、この実験で決定された E2 γ 転移強度はこうした異常性を実証するものでした。これを機に、中性子超過剰性に由来する魔法数の変遷や新しい 4 重極変形領域の発生などに関する研究が爆発的に進展することになりました。まさに RI ビーム用いた In-beam γ -ray spectroscopy の開幕でした²⁰⁾。

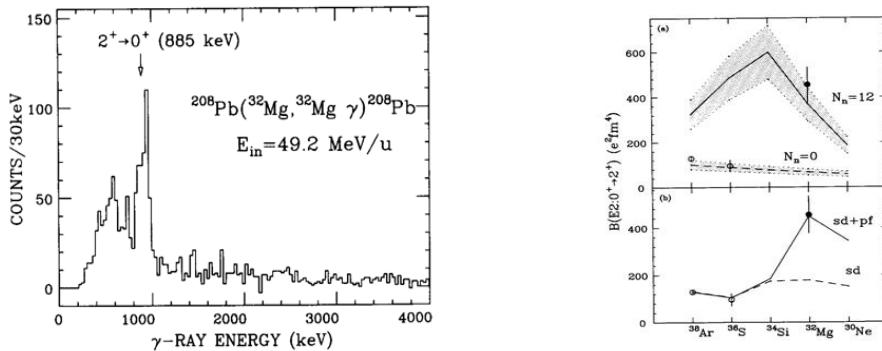


図 3. (左) 50 MeV/u での ^{32}Mg ($N=20$) のクーロン励起¹⁸⁾。 $2^+ \rightarrow 0^+$ γ 転移のみ見える
(右) ^{32}Mg の $B(E2; 0^+ \rightarrow 2^+)$ 値が格段に大きい事実から同核の変形が示唆される

上記のクーロン励起実験は核子当たり 50 MeV 領域の中高エネルギーの RI ビームを用いた点に特長がありますが、それについて一寸した因縁がありました。

インビーム γ 線分光を志す者にとってクーロン励起は常に魅力的な反応過程です。そのため我々も RIPS の建設段階から、同実験についての feasibility を検討しておりました。しかし答えは No と云うものでした。その理由は単純で『クーロン励起分光はクーロン障壁の 8 掛け以下のエネルギーで行なうべし。さもなくば、核力励起が優勢になり信頼できる γ 転移強度が得られない』と云う古来からの教えに囚われていたからでした。RIPS で得られる RI ビームの典型的エネルギーは 50MeV/u 程度ですのでこれをクーロン障壁に相当する 5MeV/u 程度以下まで減衰させた場合、エミッタنسやエネルギー広がりにこだわ

る限りビーム強度は数10倍も低下します。その上使えるターゲット厚も薄くなるため効率の低下は甚大です。

やがてこの呪縛から解放される機会が訪れます。高エネルギー・クーロン励起法を着想した瞬間でした。

その契機となったのは、前記の1)、2)のクーロン分解実験に関連して電磁励起と核力励起の競合関係を確認するために用意した一片のグラフでした(図4.参照)。クーロン分解実験は中高エネルギーで行なわれるものですが、そこで対象となるのは主としてE1励起です。E1に限っては、核力の効果が相対的に増進する箇の高エネルギー領域において、電磁励起が圧倒的に優勢になると目されております。しかし念の為に、その程度を定量的に知りたくなりました。そのついでE2励起についても調べてみて、驚きました。E2励起に対しては、核力の寄与が大幅に増大する箇です。ところが図4.に見られ様に、何とクーロン障壁よりはるかに高いエネルギー領域においてさえ、クーロン励起が圧倒的に優勢になるではありませんか！核構造研究にとってE2電磁転移強度は特別な意義を持っております。原子核の変形度を探る手がかりを与えてくれるからです。これで核構造研究の有力な手立てを手に入れたことになります^{15, 20)}。

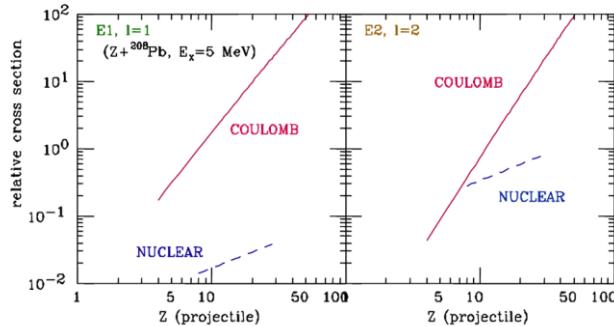


図4. 中高エネルギー(70 MeV/u)におけるクーロン励起と核力励起の相対強度¹⁸⁾
Pb標的の場合のE1励起(左図)およびE2励起(右図)の入射核のZ依存性

実は電磁励起が高エネルギー領域でも優勢になり得る理由は簡単なものです。それは逆運動学配置の標的にPbを用いたことに由来します。往年の低エネルギー・クーロン励起実験ではPbの様な重い元素のビームが使われることはありませんでした¹⁹⁾。そのために認識の落とし穴に陥りがちですがクーロン励起の強度はプローブ核のZの2乗に比例するためPb標的の利用は余りある効果をもたらします。コロンブスの卵のような体験でした。

いつの世も、核構造研究の最有力手段はインビーム γ 線分光です²⁰⁾。実際、この実験を契機にIn RI-Beam Gamma-ray Spectroscopyが世界的に展開されることになり、理研のみならずMSUやGANILに於いてもRIビーム実験の大勢を占めるに至ります。

PF式のRIビームによるインビーム γ 線分光の特色は、高エネルギーの直接反応を利用する点にあります。最初にクーロン励起が利用された理由の一つは断面積が非常に大きいことにありました。やがて様々な動機や工夫により利用される反応の種類は拡張し、陽子非弾性散乱²¹⁾、粒子剥離反応²²⁾、さらには粒子移行反応²³⁾などへと広がってゆきました。

これら直接反応に共通する有用性は、それぞれが特長的な選択則を持っている点にあります。例えば、単粒子剥離反応は単粒子状態の分析に威力を発揮します。一方、クーロン励起と陽子非弾性反応の組み合わせは原子核の集団運動的特性を鮮明にあぶり出してくれます。ひるがえって集団運動は殻構造の反映でもあるため、領域により殻構造が変容する姿を映し出す役割も果たします。近年、安定性から遠く離れた領域で魔法数が変容する現象が理論的²⁴⁾にも多大な関心を集めてまいりました。こうした研究の進捗がインビーム γ 線分光の発展と歩を一にしてきたのは当然の成り行きでした。

陽子非弾性散乱、 (p,p') 、を導入する際²¹⁾にも一寸したエピソードがありました。

我々のグループは少人数でいろいろな実験を手掛けていたために一つの課題に集中できないと云う弱みを抱えておりました。例の³²Mgの実験の後しばらくしてそろそろ新しいクーロン励起実験を始めようとして、びっくりしました。後発したMSUのグループが既に可能と思われる核種をほぼ総舐めにしておりました。しかし幸いにも¹²Beだけは残っていました。同核は¹¹Liと同様に魔法数N=8の原子核ですが中性子過剰のため閉殻性が壊れている可能性が高く、かねがね興味を抱いていた核種でした。

ところが、クーロン励起を適用出来ないことが判明します。Zがあまりに小さすぎて核力励起が優勢になってしまふと云う訳です。そこでいっそのこと、徹底的に核力が優勢である筈の (p,p') 反応の可能性を考えて見ることにしました。そこで、またもやコロンブスの卵的発見に出会います。 (p,p') には実に沢山の利点がありました。

ガンマ線収量の測定のみでガンマ転移強度が引き出せるためには、クーロン励起の場合と同様に、断面積と転移強度を直接関係づける反応理論が必要です。 (p,p') は、まさに、この条件を満たします。グローバルポテンシャルが知られているため個別に光学パラメーターを探索する為の補足実験の必要がなく、 γ 線積分強度の測定から変形パラメーターを直接引き出すことが可能となります。さらに逆運動学の (p,p') 実験では標的に陽子を用いる為、もう一つの大きなメリットが生じます。標的の厚さは重さで規定されますが、標的中の原子数は質量Aに反比例します。A=1の水素の場合これによる反応収量の利得は絶大です。

元祖森永先生²⁾の下で学生時代を送った私には、インビーム γ 線分光に対して特別の思い入れがあります。1963年に森永先生によって拓かれた高スピinn状態に関するインビーム γ 線分光の歴史においては、最初の数年こそ日本人の優位性が維持されましたが、やがて日本国内での研究は、重イオン加速器の欠落や当時出現したばかりのGe検出器の調達不全等により、国際競争から脱落して行きます。勿論、山崎敏光、江尻宏泰両氏のように、イン

ビーム法を発展的に転用して独自の研究領域を築いた方々もおられます。しかし、高速回転核が織りなす豊饒な核構造現象を王道的に追求した世界の滔々たる流れから、日本は久しく取り残される運命にありました。これは悔しいことでした。

途中、インビーム γ 線分光の新展開を求めて第1節でふれた Massive transfer in-beam spectroscopy 法の開拓にも取り組みましたが、手応えはいま一つでした。

それが今や、絶好のチャンス到来です。世界を圧倒する RI ビーム施設を手にして、高スピノン状態ならぬ高アイソスピノン状態に関する新機軸のインビーム γ 線分光を世界に先駆けて始めることが出来たからです。私は日本におけるインビーム γ 線分光の復興を期して一大キャンペーンを巻き起こすことを決意致しました。

先ずこのキャンペーンに最初に参画してくれたのは、またしても本林さんでした。ひろく人材を求めるましたが、当時は γ 線分光を手掛ける人はごくごく少数になっており、こうした分野から人を得ることは困難でした。本林さんは γ 線分光にはあまり縁がなかった方でしたが、卓越した実験技量を備えた研究者で、ほどなく NaI 検出アレイ DALI を製作して例の ^{32}Mg のクーロン励起実験を見事に仕上げました¹⁸⁾。後年、本林さんは、更に、DALI II や (p,p') 実験などに用いる液体水素標的も完成させて実験効率を格段と高めました。

一方、当時私が主宰していた CNS の活躍にも期待を馳せました。そこで、CNS の立ち上げ時の予算申請の目玉として Ge 検出器の整備を掲げました。RIPS におけるインビーム γ 線分光を CNS の研究の一つの柱に据えたかったからです。しかし先立つものは人材です。幸いにして CNS に新しいポストが開かれつつありました。そこで、再び下浦さんの登場です。当時立教大に移っていた同氏に懇請して CNS に移って貰い、このプロジェクトの推進をお願いしました。同氏は早々に新機軸の位置検出型 Ge 検出器 GRAPE を考案・製作する一方、反応学のうん蓄を傾けて粒子移行反応によるインビーム γ 線分光を開拓し单粒子状態の分光研究に途を開きました²³⁾。

さらに桜井博儀氏の参入が続きます。同氏は、当初新同位元素探査などで活躍しておりましたが、ほどなくこの分野にも手を伸ばし幾つかの新機軸を導入します。昨今隆盛を極めている少数粒子剥離反応によるインビーム分光法を世に先駆けて開拓し²²⁾、更に励起状態の寿命測定でも新境地²⁵⁾を開きました。

今日、この分野ではより若い世代の著しい台頭が見られます。RIBF におけるインビーム γ 線分光実験の Collaboration である SUNFLOWER (Spokes Person; 青井考) に結集する面々です。RIBF の威力をふんだんに活用した更なる大発展を期待したいと思います。

かくして RIPS においては、世界に先駆けて、インビーム γ 線分光、不変質量分光、および第1節でのべたスピノン偏極 RI ビーム分光が開始されました。これら 3 本柱により RIB 核物理実験の基本的枠組みが確立し²⁶⁾、それを土台にした多様な実験が展開されることに

なりました。これにより不安定核の核構造や天体核物理に関する広範な研究領域が一斉に開花するに至りました。第一世代 RI ビーム時代を豊饒にした一連の成果でした。

最後に、理研の RIB 物理研究が世界に先行して進展することが出来た、もう一つの理由に触れたいと思います。それは、理研リングサイクロトロンの利用に際して導入した運営戦略に関わるもので、同加速器利用の当初より、RIPS プロジェクトに関わる実験には総じて高い優先度が与えられておりました。最初こそは全ビームタイムの 20-30% に抑えられていたものの、忽ち 50% を超えた配分を確保するに至りました。

こうした RIB 物理に対する優先と集中の方針こそ、理研をして他の同業研究所から際立たせた要因になったと思われます。実際 RIPS の利用が本格的に開始された 1990 年の時点では、LISE を擁した GANIL でも RIB 関連実験のシェアは高々 5% 程度の水準にあり、MSU に至っては絶無に近い状態でした。理研に先行して作られていた MSU や GANIL の加速器施設では、もっぱら高温・高密度原子核の研究に膨大な勢力が傾注されていたからです。

やや遅れて 1991 年に PF 方式の RI ビーム生成ライン A1200²⁷⁾ の運用を始めた MSU の Brad Sherrill が数年経った後、MSU でもようやく RIB 実験のシェアが 20% のレベルに達したと私に告げてくれたのを覚えております。Minority の立場から脱却しつつあることを喜んでの発言でした。GANIL の状況も似たようなものでした。

しかし、PF 方式の RIB 施設の世界的普及は着実に進展しました。後続して GSI でも PF 方式による RI ビーム生成施設 FRS²⁸⁾ が完成します。また、GANIL も LISE を改良して LISE II を仕上げます。これで世界の主要重イオン研究所は PF 方式の RI ビームで揃い踏みする事になりました。今日では、これらのいづれの研究所に於いても RI ビームによる実験が大半を占めることになりました。第 2 世代への移行の期が熟したことを意味します。

第 2 世代施設に先鞭をつけて、理研の RIBF が 2006 年に完成し、付随する BigRIPS により強大な RI ビームが供給されつつあります。矢野さんの強いイニシアティブ²⁹⁾ とリーダーシップの下で建設された RIBF は、第 2 世代 RI ビーム施設に相応しく、核種の多様さとビーム強度の両面で従来の RI ビーム施設の性能を大きく凌駕し、世の研究者の垂涎の的になっております。特に重点目標として取り組んだウラン加速は成功裏に進化を続けており、核分裂による中性子過剰核ビーム生成に特段の威力を發揮しつつあります。

天国の杉本先生もこうした成功を喜んでみておられることと存じます。

RIPS が登場した際、RI ビーム強度は一気に 10^3 - 10^4 倍も増大致しました。これにより、RI ビーム実験の質の大転換が図られ、RI ビーム物理研究の体系が整備されるに至りました。今また、BigRIPS の登場により、ビーム強度は更に 10^4 から 10^5 も増大しました。新しい「量による質の転換」が促されております。大胆な発想に基づく新機軸により新時代の研究パラダイムが拓かれるることを期待致します。

Reference:

- 1) M.Ishihara, Nucl. Phys., A400,153 (1983)
- 2) H.Morinaga, P.C.Gugelot, Nucl. Phys. 46, 21(1963)
- 3) I.Tanihata, H.Hamagaki, Y.Shida, K.Sugimoto, et al., Phys.Rev.Lett, 55, 2676 (1985)
- 4) M.Langevin, C.Detraz, D.Guerreau, A.Mueller et al., Phys. Lett., 150B, 21 (1985)
- 5) T. Kubo, M.Ishihara, K. Asahi, I. Tanihata, T. Nakamura et al., NIM, B70, 309 (1992)
- 6) T. Kubo et al., Prog. Theo. Exp. Phys. 03003 (2012)
- 7) K. Morita、 K. Morimoto, D. Kaji, H. Haba, et al., JSPS, 73, 2593 (2004)
- 8) H. Sakai, Nucl. Phys., A737, 70 (2004)
- 9) 例えば、 T. Nomura et al., JHP-Supplement 2, Feb. 1989
- 10) J.P. Dufour et al., NIM, A248, 267 (1986)
- 11) T.Motobayashi, N.Iwasa, M.Ishihara, M.Gai, Th.Delbar et al. Phys.Rev.Lett. 73, 2680 (1994)
- 12) T.Nakamura, N.Aoi, D.Bazin, N.Fukuda, M.Ishihara et al., Phys. Rev. Lett. 96, 252502 (2006)
- 13) G. Baur, C. A. Bertulani, Nucl. Phys. A458, 188 (1986)
- 14) T.Motobayashi, C.Perrin, S.Kubono, M.Ishihara et al, Phys. Lett., 264B, 259(1991)
- 15) M. Ishihara, Nucl.Phys., A583, 747 (1995)
- 16) T. Kobayashi, I. Tanihata, K. Sugimoto et al.,Phys. Lett. 232B, 51 (1989)
- 17) T. Nakamura, S.Shimoura, M.Ishihara et al., Phys. Lett., 331B, 296 (1994)
- 18) T. Motobayashi, M.Ishihara et al., Phys. Lett., 346B, 9(1995)
- 19) 低エネルギー領域に於いては、逆運動学的に鉛を標的にしたクーロン励起実験が
中井浩二氏等により LBNL の HILAC を用いて行なわれている。
- 20) M. Ishihara, Nucl.Phys. A682, 143c (2001)
- 21) H. Iwasaki, M. Ishihara et al., Phys. Lett., 481B, 7(2000)
- 22) K.Yoneda, H. Sakurai et al., Phys. Lett., 499B, 233(2001)
- 23) S. Michimasa, S. Shimoura et al., Phys. Lett. B638, 146 (2006)
- 24) T. Otsuka et al.,Phys. Rev. Lett., 95, 232502 (2005)
- 25) N.Imai, H.J.Ong, N.Aoi, H.Sakurai, M.Ishihara et al., Phys. Rev. Lett. 92, 062501 (2004)
- 26) M. Ishihara, Nucl. Phys., A588, 49 (1995)
- 27) B.M. Sherrill et al., NIM B70, 298 (1992)
- 28) H. Geissel et al., NIM B70, 286 (1992)
- 29) Y. Yano and M. Ishihara, パリティ, Vol.02, No.06, p. 57 (1987)