

中間子をめぐって

— 核物理グループの歩み —

山 崎 敏 光 (物理)

原子核を構成する陽子・中性子の間にはたらく強い力(核力)を担うものとして湯川博士が中間子(その後パイ中間子と呼ばれるようになった)の存在を予言されたのは、あまりにも有名な話である。戦後まもなく完成したバークレーの184インチ・シンクロサイクロトロンでパイ中間子が人工発生したのは1947年で、その後、毎秒 10^6 ケのパイ中間子、 10^4 ケのミュオン(パイ中間子の崩壊生成物)がとりだされるようになった。現在は、この100倍以上の強度を生み出すファシリティ — メソン・ファクトリー — が誕生しつつある。今や中間子は、素粒子理論の愛玩物でなく、原子核・物性・原子分子・化学・生物・医学などの新しい展開をうながす魅力ある道具となっている。われわれ、物理学教室の核物理グループは、いつの間にか、中間子に大いにかかわりあうことになってしまった。今日は、このグループの8年間の歩みを裏面からたどってみたいと思う。核物理の研究は、大型科学に属し、かなり大きな研究投資を必要とする。これまでも、文部省、日本学術振興会、仁科財団、東レ科学振興会、三菱財団などからの援助で、又、多数の研究機関の設備をつかって、研究が行われてきたので、インフォーマルな観点から現状を報告する責任を感じていたところである。あわせて、いかにわれわれの活動が、理学部内外の高い学問水準に支えられ、はげまされてきたか、にも触れてみたいと思った。

中性子は電荷をもたないのに、大きな負の磁気モーメントをもつ、というおどろくべき事実がある。これは、中性子が負電荷をもつパイ中間子と陽子に解離しているものとして(あるいは、三つのクォークの集合として)理解されている。現実存在する陽子・中性子は中間子の雲でドレス・アップしているのである。しかし、原子核の構造・性質には、パイ中間子の役割を explicit に考える必要がない、というのが常識であった。しかし、すでに1951年、若き日の宮沢弘成先生(当時、大学院1年生)は、核子の軌道運動に伴う磁気モーメントのg因子(g_1 と呼ぶ)が核内でのパイ中間子の発生・消滅のために

異常を示すということを理論的に予言していたが、最近にいたるまで、世の中から注目されていなかった。その証拠に、これまで書かれないかなる原子核の教科書にも、陽子は $g_1=1$ をもち、中性子は $g_1=0$ をもつ、と、疑うべからざる第一原理かのごとくに書かれているのである。ついでながらつけ足すと、1954年、若き日の有馬朗人さん(当時、大学院1年生)も、核のコア・ポラリゼーション効果の神髄をはじめ明らかにした有馬・堀江理論によって、核磁気モーメントの一方の本質に迫っていた。軌道磁気モーメントの中間子効果の予言を誰も問題にしていなかった裏には、この効果だけをとりだして実験的に立証することが不可能と考えられていたからであろう。恐らく、当の宮沢先生もそれが実証される日が来ようとは、思っておられなかったにちがいない。

この夢をかなえることになったのは、1960年代の原子核の研究方法の発展である。その第一は、森永晴彦教授(当時、理学部教授、現在、ミュンヘン工科大学教授)のイン・ビーム・ガンマ線分光学の方法で、これにより、原子核の高い角運動量状態を選択的に生成させることが可能となった。第二には、核研の坂井光夫教授らの核反応核整列の研究、第三は、阪大の杉本健三教授らの開発した励起核の核モーメント測定法である。1966年、サイクロトロンからの微視的パルス・ビームをつかうと、これまで全く知られていなかった短寿命のアイソマー状態がぞくぞくと見つかるようになった。そのうちの一つに、 ^{210}Po の 11^- 状態というのがある。この状態は陽子の二粒子状態で、その角運動量はほとんど軌道角運動量だけから成っていると云ってよい。又、寿命24 nsecというのは、核モーメントの測定に最適であった。

私は、1967年9月に理学部に転任して新しいグループをつくることになったが、このときどうしても続けてみたかったのは、この 11^- アイソマーの磁気モーメントの決定であった。当時、日本でつかえる加速器は、理化学研究所に新しく完成したサイク

ロトロンだけであったが、さいわい熊谷寛夫教授と故松田一久博士のお取り計らいで、東大グループは多くの新しい実験をすることができるようになった。しかし、この実験のためには、エネルギー分解能のよいガンマ線検出器が絶対不可欠であった。1967年以来、旧館241号室で齊藤宏之君（当時、理学部技官）が大型ゲルマニウム検出器の製作に没頭し、その甲斐あって30ccくらいの検出器が誕生、こわれる危険を犯しつつも、本郷から理研に運んでセット・アップした。又、回路室の霜越文夫さんが、数に強くて分解能のよいパルス増巾器を作ったことも、大きな助けとなった。こうして1970年5月にまる2日間の実験ははじめた。このとき私は風邪で40度にもなる熱を出してしまっていたが、アスピリンとコニャックでこの危機をのりきった。数時間ごとに、統計精度は目に見えて上っていった。マシン・タイムの終りごろには、 $g_1=1.1$ であることが確定していた。われわれ一同、興奮すると同時に眼を疑った。というのは、当時のわれわれは不勉強で、20年前の宮沢理論の予言（まさに1.1）すら知らなかったからである。（ミグダルは別の効果から $g_1=0.85$ と云っていた。）云いかえれば、われわれは理論のバイアスなしに実験をやっていたのであった。この一連の実験の主力は、野村亨君（当時、理学部助手、現在、理研研究員）と永宮正治君（当時、阪大大学院生、現在、理学部助手）で、特に永宮君は、中間子効果の問題で堂々たる学位論文を書き、理研の欧文報告として印刷公表されたとき、世界中の注目を浴びた。

折から、1972年に大阪で開催された「核モーメントと核構造」国際会議において、ジェリー・ブラウン、宮沢弘成両大家につづいて私が実験の面からの報告を行うことができたのはさいわいであった。その後、有馬グループの理論的研究から中間子効果自体はもっと大きいものであることもわかってきたし、他の現象との関連も教育大の藤田純一教授によって明らかにされた。こうしてみると、この研究分野は、はじめから最後まで、日本の理論・実験核物理学者によって拓かれて来たわけなのである。

核アイソマーの磁気モーメントは、放射線を検出手段とするために、全くトレーサー・スケールを扱うので、通常のNMR法やメスbauer法のもっている限界をつきやぶる可能性がある。1972年、医科学研究所（港区白金台）に医用サイクロトロンを設置がきまったとき、理学部のわれわれは、そこに「核物性研究設備」なるものを置き、そのサイクロトロン

のビーム・タイムの一部を活用することになった。これは、はじめてのinterfacultyのプロジェクトであったので、種々の困難が横たわってはいたが、当時の久保理化学部長と佐々医科研所長のお骨折りでスタートすることができるようになった。このサイクロトロンは、26Mev陽子、15Mev重陽子、30Mevアルファ粒子、38Mev ^3He 粒子を加速できるので、われわれの目的には最適であった。われわれのかかげた目標は、アイソマーの核モーメントの研究、それによる境界領域の研究、などであるが、そのために力を注いだところは、いかなる波形のパルス状ビームをも自由自在に出すことのできる、二段がまえの高圧静電ビーム偏向装置、それと低雑音検出器系をサイクロトロンのR.F. から守るために、大きな実験室を高周波密閉すること、などであった。このサイクロトロン棟は、白金キャンパスの緑地環境を守るために、地下要塞の形をとったが、内部には数々の工夫をこらした仕掛けがある。施設部の鈴木さんは設計にあたり、われわれの難しい要求を全部とり入れて下さった。建築中、中井さんと私は、電気、水道管、遮蔽用鉄板、アース、などをこまごまチェックするために、白金台まで日参したものだ。1974年1月から物理実験が開始され、中井浩二さんの指揮のもと、KrやXeガス中に生成するSrやBaのアイソマーの超微細相互作用の研究、その他が成功を収めた。又、MnOなどの磁性酸化物を α 粒子で照射すると $^{16}\text{O}(\alpha, p)^{19}\text{F}$ 反応で88nsecの寿命をもつ ^{19}F のアイソマーが生成し、それが酸素のサイトを占めるので、いわば酸素NMRの代用をなすこともできるわけである。医科研サイクロトロンでは、今もこのような実験プロジェクトが走っている。

さて、1972年に、旧館地下の実験室の永嶺謙忠君（助手）手作りの $^3\text{He}-^4\text{He}$ 希釈冷却器中で、Biの放射性同位元素の偏極が実現された。これは、もっとも重い原子核の偏極ターゲットが世界ではじめて実現したことを意味し、いろいろな新しいタイプの実験に応用の道が開けた。永嶺君と私が提案したのは、偏極ターゲットを偏極ミュオンと組み合わせて、ミュオン原子X線のスペクトロスコピーを行うことであった。こうすると、ミュオン原子におけるミュオン-原子核超微細構造のF量子数を人工的に選択でき、超微細定数を精度よく決定できるのである。ミュオンは原子核の近傍に束縛されるので、この量は核磁気空間分布についての知見を与え、中間子効果の問題にメスを入れることもできる。この提案は

ヴァンクーヴァーのメソン・ファクトリーで受け入れられ、現在、実験の準備中である。

この問題を考えているうちに、われわれは偏極ミュオンに伴う現象に多大の興味をもつようになった。ミュオンは“重い電子”とも云うべきもので、スピン $\frac{1}{2}$ をもち、正、負の荷電に対応して二種類ある。重要なことは、パリティ非保存のおかげで、ミュオンは自然に偏極していること、偏極したミュオンが崩壊するとき発生する高エネルギー電子は、ミュオンのスピンに関して大きな空間非対称性をもつので、ミュオンのスピン回転が容易に観測できることである。われわれはこの方法を、NMRやESRになぞって、 μSR と名づけることにした。 μ^+ は“軽いプロトン”と考えるのが適当で、いわば $\mu^+\text{SR}$ は微量のプロトン・レゾナンスに対応する。トレーサー・スケールのプロトン・レゾナンスがいかに難しいかを考えると、 $\mu^+\text{SR}$ は何と巧妙なものであろうか。この二、三年の間に、半導体、磁性金属中におかれた μ^+ の感ずる磁場はどんどん決定され、今、話は、独得の異常温度依存性にまで及んでいる。又、 $\mu^+\text{SR}$ は、固体中の量子拡散、トラッピングの問題を研究する絶好のプロブであることが明らかとなった。さらに面白いことは、 μ^+ は物質中の電子と結合して、水素原子様のミュオニウムを生成することである。 μ^+ が裸でいるか、ミュオニウムになっているかは、スピン回転のラーモア周波数が100倍ちがうので、容易に検出される。 $\mu^+\text{SR}$ の方法により、水素を含む化学反応時間を微視的に決定できるようになった。今では、ヴァンクーヴァーのわれわれの仲間たちは「ミュオニウム化学」という新分野を開拓しつつある。

では μ^- はどうか？ μ^- は原子核に引きつけられてミュオン原子を形成し、やがてその基底状態(1s)にとどまる。このとき μ^- は原子核の周辺にいるから、原子から見れば、核の電荷が一つ少なくなったわけである。ここに、 $Z-1$ の核がトレーサー・スケールで出現したことになる。たとえば μ^- を酸化物に入れば、 μ^-O 核を形成し、そこでの内部磁場を感じてくれるから、通常困難とされているC、Oなどの偶数原子番号の元素のNMRに対応することを、簡単にやってくれる。その他、これにまつわる興味はつきなかったが、1972年当時、全く前人未踏の分野であった。その頃、山口淑夫さんが「日本物理学会誌」に“中間エネルギー領域の核物理は過疎地域”として、二回にわたって熱のこもった解説を書いておら

れたが、この μSR はその解説にも全く触れられていなかったほどだから、ウルトラ過疎地域であったことはまちがいない。

私は、1973年はじめ、バークレーの184インチ・シンクロサイクロトロンでこの実験を行うため、チェンバレン教授と交渉に入った。チェンバレン教授は、こちらの熱意にうたれたのか、東大グループの参加を快諾しようとしていた。しかし、このとき、米国AECは、この加速器の維持費半減を、他の数多くのシャット・ダウンと共に、決定してしまっていたのである。このようなときに、新しく外国からのプロジェクトを採択することには、大きな抵抗があったにちがいない。現存するプロジェクトと新規のものとをきびしく評価する五人委員会ができ、結論はお預けになった。われわれはもう駄目になったと思った。しかし、二ヶ月たつてわれわれの手にしたニュースは、東大グループにトップ・プライオリティを与えるという委員会の結論であった。

1973年6月、永宮君と大学院生の橋本治君、そして私が、第一陣としてバークレーに乗りこみ、カウンター、電磁石などの準備を開始した。この初期の段階での三菱財団の旅費援助はありがたかった。これ以後、日本学術振興会とNSFの支持を得ることができた(といっても、十分ではなく、つもる債務はいつも私を悩ました)。その9月には永嶺君、阪大の杉本健三教授も到着、短期決戦の準備は成った。(あとになって、中井さん、小林俊一さんも参加された。)10月1日、はじめてのビーム。これから二ヶ月ほどは、云いつくせぬほどの苦闘の連続であった。われわれの予測できなかった困難が次から次へと起ってきたのである。殆んど毎日のように、朝7時から午前1時まで釘づけになった。マシンのサンドウィッチで夕食をすまさねばならぬこともしばしばであった。私は、これだけの人間を無為なことに投じてしまった、という責任感で、切腹でもしなければならぬ気持になった。しかし、頑張れば光明があらわれるものである。幾多の努力の末、実験装置の性能はいつの間にか格段に良くなっていた。

この苦難は、克服してみると、逆にわれわれに大きな自信と経験を植えつけた。東京から来たアマチュア・チームに何ができるか、と冷ややかに見ている人もあったろう。予備段階のマシン・タイムを消化して、チェンバレン教授に問題点を報告したとき、この高エネルギー実験の大ベテラン(反陽子の発見でノーベル賞を受賞)から1時間以上に及ぶ鋭い質

問の砲火を受けたのであるが、彼は私の答に完全に満足し、以後、莫大な量のマシン・タイムを東京グループに与えることになった。チェンバレン教授は関係方面へ親切な手紙を書いてくれて、われわれは、はじめ年末で打切る予定だったこのプロジェクトを、大巾に延長することになったのである。思えばこの184インチ・サイクロトロンは建設後30年になろうとしていて、翌年にはシャット・ダウンされるといううわさでもちきりであった。私はAECの高官に手紙を書き、この歴史的なシンクロサイクロトロンは未だ健在であり、われわれはさらに一年間も実験したい、と申し出た。あとでパークレーの関係者たちは口をそろえて、私の手紙がなかったら、このサイクロトロンはその6月に終わっていただろう、と云っていた。それから一年余を経た1975年6月末日、その最後のマシン・タイムをも東大グループが享受することになったのは、幸せこの上もない。この日、永嶺君と西田君（院生）は、高温の球形ニッケル金属を愛称「サガネ電磁石」に入れて、 μ^+ の内部磁場の異常温度依存性を確認していた。

このパークレーでの μ SRプロジェクトは、次にヴァンクーヴァーで行う本格的 μ SRの基礎がためになったばかりか、他の領域における共同研究の開拓にも役立った。永宮君はチェンバレン・グループにとどまり、ベヴァラックでの高エネルギー重イオンの実験の中心になっている。

さて、最後にヴァンクーヴァーのTRIUMFについて一言のべよう。これは、世界三大メソン・ファクトリーの一つで、大量のパイ中間子、ミュオンを生み出す。1975年6月に、中間子がめでたく誕生した。東大グループは、東レ科学振興会の助成金をもとに、最新式 μ SRの装置を建設し、又、 μ SR専用ビームラインにも寄与し、準備は完了している。ここでは μ SR物性やミュオニウム化学のプロジェクトが走りだそうとしている。永嶺君を中心とする東大グループは、この他にも、負ミュオンの人工偏極法、ミュオン原子X線の円偏光測定など、全く新しいプロポーザルを出し、実験評価委員会でトップにランク

された。この海外協力研究は学振の事業として行われており、向う三年間継続される予定である。

中間子—この魅力ある人工粒子の効能は科学の広い領域に及ぼうとしている。今、われわれの願いは、近い将来にぜひ日本でこのような研究を実現させたいということである。さいわい、高エネルギー研究所の500MeVブースター・シンクロトロンが動きだしているの、これに中間子ビーム・チャンネルをつけたい。ブースター・シンクロトロンの強度は $1\mu\text{A}$ くらいとすると、一次粒子強度においてメソン・ファクトリーに対抗できるものではない。しかし、超伝導ソレノイド（長さ5～10m、内径15cmくらい）をつけると、ミュオン強度は通常のQ電磁石チャンネルよりも100倍よくなる、ということがわかってきたから、ガッカリするに及ばない。“ブースター+超伝導チャンネル”は“メソン・ファクトリー+通常チャンネル”と同等になる。ヴァンクーヴァーの協力研究が一区切りつく頃には、この日本のファシリティで実験がスタートしてくれれば、と願っている。

パークレーの184インチ・サイクロトロンを日本にもっていったら、という夢のような話もある。シンクロサイクロトロンは原理的に安定性の良い加速器である。われわれのパークレーでの経験によれば、オペレーターが起動させてから15分後に中間子ビームはいつも安定に実験室に流れてきた。又、故障は滅多におこらなかった。だから、理学部の規模でもつ加速器としては、もっともバラエティと新らしさに富んだものではないか、と云えるのである。

原子核物理学はますます面白くなると思う。核内でパイ中間子の凝縮が起っているか、という疑問は、今のところ全く答えられていないし、クォークその他の多体系としての振舞いは少しも明らかになっていない。それと同時に、原子核や中間子は、他の学問との結節点として大事であることは云うまでもない。だからわれわれは、近い将来の理学部での研究のあり方を真剣に議論しているのである。