

私の加速器遍歴(Ⅱ) 手造りの小型加速器から世界最強の重イオン加速器へ

中井 浩二

Wandering Accelerators throughout My Life (II)

Kozi NAKAI

Abstract

My wandering about accelerator started from a van de Graaff accelerator on the Nakanoshima campus of Osaka University. The accelerator was originally designed by Prof. K. Husimi before the World-War II, and completed by Prof. K. Sugimoto, under the severe financial difficulties after the war. It was almost totally handmade, and consequently we were very well trained through various experiences fighting with difficulties. After finishing thesis work, I moved to Berkeley and enjoyed heavy-ion experiments at the world best heavy-ion accelerator, HILAC. The heavy-ion accelerator revealed new facets of nuclei through studies of high-spin states and phenomena.

1. はじめに

1955年春、私は阪大理学部に進学した。教科書のページを追うような講義が多かった中で、印象に残ったのは浅田常三郎先生の「同位元素利用実験法」(大学院共通)と、伏見康治先生の「原子力」(阪大における最後の講義)であった。

伏見先生は、原子核物理学の紹介から始められた。冒頭に黒板に大きな字で **NUCLEARPHYSICS** とお書きになって、このはじめの二字を入れ替えた方が良いと言いながら、大きな字で **UNCLEARPHYSICS** とお書きになった。当時の原子核物理学は、まさに未開の世界であった。

伏見先生は「UNCLEAR」に挑戦する精神の大切さを説かれた。私はこれで原子核物理学を選んだ。菊池研にはこの精神が満ちているように感じていた。

学部の卒業実験は杉本健三先生の指導を受けた。ヴァンデグラフ加速器のRFイオン源のテストベンチを組み H^+/H_2^+ 比の向上を図るために H_2 ガス流量、ソレノイド磁場強度などを変えて調べる実験であった。この時から杉本先生に指導を受けることになり、今もなお、感謝と尊敬の念を持って恩師と仰いでいる。

学生の時の忘れられない思い出は、実験の最中にガラス製のRFイオン源を不注意で割ってしまったことである。先生がガラス工作室に頼んで新しく作ってもらうことができたが、それを取りつける時にボルトを締めるスパナが当たって再びヒビをいれてしまった。

杉本先生は怖い先生として有名であったのでおそろおそろ謝りに行ったところ、先生は大きな声で笑って何も叱られなかった。厳しい教育の中でも学生のミスを責めるような先生ではなかった。後年、私自身も学生の失敗を叱るということはしないように心がけた。

2. 私の加速器科学修業時代

卒業後は原研に就職したが4年後に、杉本研の助手として呼び返してもらい再び杉本先生の指導を受けることになった。阪大のヴァンデグラフ加速器が、私の加速器遍歴の第一歩となった。この加速器は前に述べたように杉本先生が苦勞して「片持ち」構造に改造し、やっと2.7 MVの高電圧を発生できるようになったばかりであった。この手造りの加速器は難物でそれだけに良い勉強になった。

高圧電極は、「片持ち」の支持構造体の末端についているので、ベルトの回転によって激しく振動し、高圧タンクの外にも響く大きな音を立てていた。初めて高圧タンクに入れて貰って驚いた。高圧電極に複雑な機器がぎっしり詰まっていた。これらの機器はあたかも振動による拷問試験をしているような状態にあった。

ヴァンデグラフ加速器の高圧タンクの中で、これらの機器に一寸でも不具合が生じると、その修理は大変であった。タンクからガスを抜き、タンクに入って修理した後、再び乾燥ガスを詰め、更にガスを乾燥する操作が必要になるので、少なくとも1週間のロスが生じる。

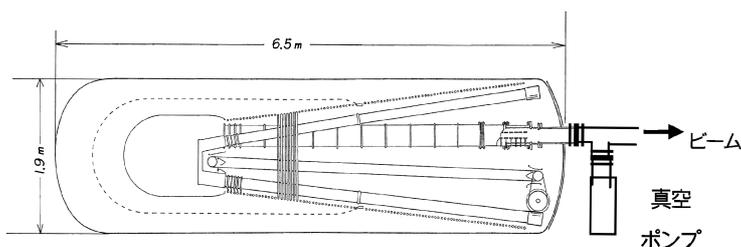


図1 ヴァンデグラフ加速器

ヴァンデグラフ加速器のもう一つの困難は真空系であった。RF イオン源から加速管までの空間を真空にひく真空ポンプは加速管の低電圧終端にしかつけられない。長い加速管を通すので排気速度は極めて限られたものになる。RF イオン源の交換やその他の作業のため真空を破ることは大変なことであった。新しく機器を取り付ける時は十分に真空の漏れが無いことを調べておかねばならない。吸着ガスの放出にも注意が必要であった。新しい機器を取り付ける時は、全て超音波洗浄機で十分に洗浄した。

杉本研の一員として最初に取り組んだ仕事はRF イオン源の改造であった。それまで30 MHzで励起していたがビームが変調されると良くないので周波数を100 MHzに上げた。それには、RL集中回路の発信器では無理なので平行線型の立体回路発信器を作る必要があった。ヴァンデグラフ加速器の狭い高圧電極の中に組み込むことが必要であったが、そこに組み込む回路の配線は振動によって簡単に断線してしまうので柔構造にしておくことが大切であった。100 MHz RF イオン源は完成したが、高圧電極に設置し調整する作業に数ヶ月を要した。高圧電極内の機器の調整は、まるで人工衛星積載機器のようであった。

私たちはヴァンデグラフ加速器で苦勞したが、その代わりに限界に挑戦する実験技術を学ぶことができた。工作技術・真空技術・回路技術それに放射線技術などは全て自力で学んだ。

杉本先生の細部に亘る注意は、非常に教育的であった。機器の設計図を書くときも細かいところまでよく見て注意して頂いた。何度も製図をやり直させられた。時には「どちらでもいいではないですか」と言いたくなったが、それを言うとは「どうでも良いと言う前に、何でもよいから理由を考えてこい」と厳しく叱られた。杉本先生との共同作業は緊張の連続であった。

1950年代の中頃という日本は未だ貧乏であった。貧乏で困難な環境の中で加速器の建設・保守するという作業は、優れた実験物理の研究者を育ててくれた。

3. ひとのやらないことをやろう： Q($^{19}\text{F}^*(5/2^+)$)の実験¹⁾

1950年、60年代、わが国では原子核物理と加速器科学は未分化であった。原子核研究者は加速器の運転・補修・改良を自力で行っていた。杉本先生は、ヴァンデグラフ加速器の建設、改良、維持に多くの時間を費やしながらも、原子核励起状態の磁気能率の測定に業績を挙げられた。阪大旧菊池研の主流グループは若槻先生の下に、第2号サイクロトロン建設を始められていた。

杉本先生は、「ひとのやれないことをやる」ことができれば理想的だが、貧乏な日本では望めないことである。それなら「ひとのやらないことをやろう」、間違っても「ひとのやるようなことをやる」猿まねはやめようと言っておられた。「ひとのやらないことをやろう」という考えは、その後ずっと杉本グループの精神となった。

特に、物理のテーマの選択において「ひとのやらないことをやろう」という精神は重要であった。

杉本先生は、ビームによって励起された核から放出される γ 線の角度分布が磁場によって回転する擾乱効果を解析する方法(TIPAC法)で ^{19}F 、 ^{152}Sm 核の励起状態の磁気能率を決定された²⁾。 ^{152}Sm 核の場合は、核に働く内部磁場を知る必要があり、永宮研の金森順次郎先生の協力を得て物性計算が行われた。「核物性」という分野の誕生であった。

杉本先生は、また γ 線角度分布の時間変化を測り核スピン回転を観測する方法(TDPAC法)の世界初演を行われた。この頃、中性子の飛行時間(TOF)を測るためにナノ秒のパルス計測技術が始まっていた。杉本グループは、ナノ秒パルス技術を用いて核スピン回転の時間微分スペクトルを計測する方法を開発した。私はヴァンデグラフ型加速器からのビームをパルス化する装置を製作した。平行平板に高圧の高周波を加えてビーム軌道を上下に振り、スリットを通してパルスビームを得るという初歩的な原理であったが、

当時は容易でなかった。時間スペクトル測定用の時間波高変換回路は、溝渕先輩の担当であったが遅延ケーブルなどは自作であった。

実験の準備が整った頃、阪大の実験室は第2室戸台風による水害の洗礼を受けた。実験室は地階にあるので、実験装置は全て水没した。その翌日から泥落としに半年あまりを費やし、実験の再開までに1年かかった。

悲劇的な破壊からの復興に意欲を燃やして取り組んだのは ^{19}F 第二励起状態 ($5/2^+$, $E = 197 \text{ keV}$, $\tau = 123 \text{ ns}$) の電気四重極能率の測定であった。磁気能率は、既に見事な測定が報告されていた。磁気能率 μ と違って電気四重極能率 Q の測定は分子の結晶場 $q = (dE/dz)$ との相互作用を利用して測るので厄介である。はじめにテフロン (C_2F_4)_n を標的にして $^{19}\text{F}(p, p')$ $^{19}\text{F}^*$ 反応による γ 線の時間スペクトルをビームに対し 0° と 90° 方向で測定しその微妙な差から電気四重極相互作用の基本角周波数 $\omega_0 = (3/5 \times 4)(eqQ/h)\pi$ が求まった。

電気四重極能率 Q を求めるには q を知ることが必要であった。早速、永宮先生、金森先生にご相談に上がったが、テフロンの (C-F) 共有結合について q を計算することは不可能であると教わった。そして、 q を計算するには二原子分子の固体結晶を使って実験するようという助言をいただいた。

F が共有結合をする二原子分子というと F_2 , ClF で、 F_2 が最も望ましいが分子結晶の標的を作ることが難しいので ClF を標的として用いることにした。ところが、当時 ClF などという物質は市販薬品にないどころか日本の何処にも存在しないことを知った。

杉本先生が、(株)ダイキン工業に作って貰うよう頼みに行こうと言われるので二人でお願いに上がった。ダイキンの研究部の化学主任は、 ClF_3 はロケット燃料として作ったが ClF は用途がないのでやったことはない、面白いからやりましょうと即答して下さった。

1月も経たない頃、 ClF ができましたと連絡があった。直ちに受け取りに行くと小型のポンベに入ったガスを下さった。次はこのガス約 100 mg を小型容器に移し、ここからターゲットの位置に設け液体窒素で冷却した Cu 板に吹き付けて ClF の分子結晶ターゲットとした。しかし、この小さなガスハンドリングシステムが正常に動作するまで、時間がかかった。原因は配管内に吸着した水による ClF の加水分解であった。 ClF が加水分解すると HF と HCl になる。 HCl は冷却された Cu 板に吸着するが HF は沸点が低いのでガスとして飛散してしまう。結果として、ビーム照射し

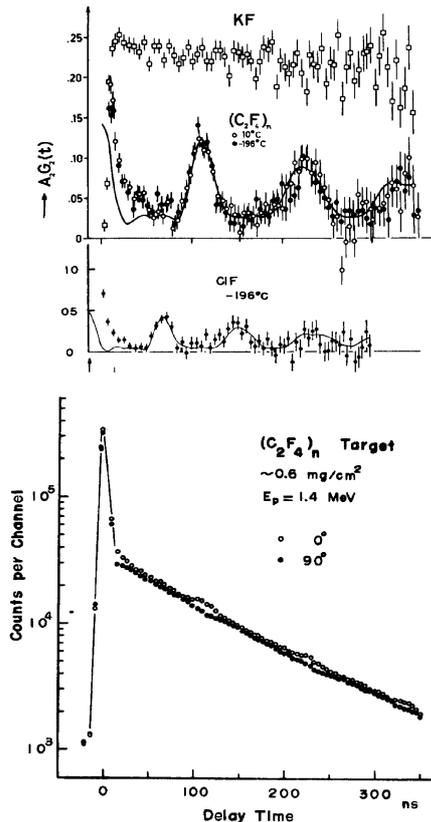


図2 イオン結晶 KF, 高分子テフロン (C_2F_4)_n および共有結合分子 ClF を標的とした時の角相関係数¹⁾

たときの γ 線スペクトルに Cl は見られたが、肝心の F の γ 線は見られなかった。

ターゲットに用いる ClF の量が 100 mg という微量なので、加水分解で失われる可能性が大きいことは想像でき、ベーキングを行って配管の各部に吸着する水を追い出すことを試みたが ClF の加水分解は変わらなかった。そこで杉本先生の発案で、 ClF を入れる前に多量の F_2 ガスを流した。各部に吸着する水を HF にして追い出すためであった。この結果 ClF の分子結晶をターゲットとした実験に成功し (Cl-F) 共有結合による電気四重極相互作用の角周波数 ω_0 (Cl-F) が決まった (図2)。

次に ω_0 (Cl-F) から ^{19}F 核の電気四重極能率 Q を求めるために ClF 共有結合による電場勾配 q を計算した。 ClF 結合のイオン結合性と共有結合性の比率を実験データの経験則で求め、これにいくつかの補正を加えて q を求めた。実験で決めた ω_0 (Cl-F) の5%の精度は、これらの計算による誤差に蝕まれ、最終的に得た Q の値は $|Q| = 0.11 \pm 0.02 \text{ b}$ という大きな誤差20%がついた。

この結果を核構造理論の有馬朗人先生に報せたところ

る3日後に返事がきて、理論計算と良く合っているということであった。がっかりした。あの長い実験の苦勞は何であったのか、もう二度とQの測定はしたくないと思った。

4. ひとのやらないことをやろう： $\mu(^{17}\text{F}(5/2^+))$ の実験³⁾

$^{19}\text{F}^*(5/2^+)$ の電気四重極能率測定の測定の実験は溝渕先輩の学位論文となった。学位を取るには、何年もかけてこんなに苦勞するのかと思った。次は私の番であった。

杉本先生は、何年間かずっと心の中に蓄え、熟成させてこられた新NMR法開発のアイデアを話して下さった。それには二つの要素があった。即ち、

- (1) 鏡映核の磁気能率を測り、核磁気能率に現れる中間子効果を調べることで、
- (2) 核反応により偏極した核を作り、その偏極をパリティの破れによる β 線の非対称放出の観測し磁場中でRF遷移を観測する新NMR法を開発すること、であった。

この頃鏡映核の磁気能率が測られていたのは ^3H と ^3He の対だけであった。磁気能率の和をとると陽子と中性子の磁気能率の和に極めて近く、差をとると大きく違っている。それは中間子効果の符号が鏡映核では逆になっているからであると教科書に書かれていた。これをもっと詳細に調べたいということが第一の動機であった。鏡映核の一方の磁気能率は測られていたがその相手はみな半減期が短いのでNMRによる精密測定ができなかった為である。

色々な可能性を検討した後、 $^{17}\text{F}(5/2^+, T_{1/2}=66\text{ sec})$ を選んだ。これは、 ^{17}O の対で、二重閉殻構造の ^{16}O 核の外に陽子が1個ついた核なので構造が判り易い。

新NMR法の実験の原理を図3に示す。 ^{17}F は、ヴァンデグラフ加速器で加速した2.3 MeVの重陽子ビームを石英薄膜の標的にあてて $^{16}\text{O}(d, n)^{17}\text{F}$ 反応によって造る。このとき ^{17}F 核は反跳エネルギーを得て標的の薄膜から放出される。そのうちコリメーターで限られた方向にでる ^{17}F 核を CaF_2 膜のストッパーに捕まえる。この ^{17}F 核が偏極していて、それが β 崩壊する迄保持できたとすると、パリティ保存則の破れに因って上下に放出されるベータ線の強度が違ってくる。そこで、全体を磁場の中に置き高周波をかけて上下の β 線の強度比を観測すると核磁気共鳴の条件を満たす周波数の時に強度比が消える。

実験に成功したからこのように簡単に原理を説明で

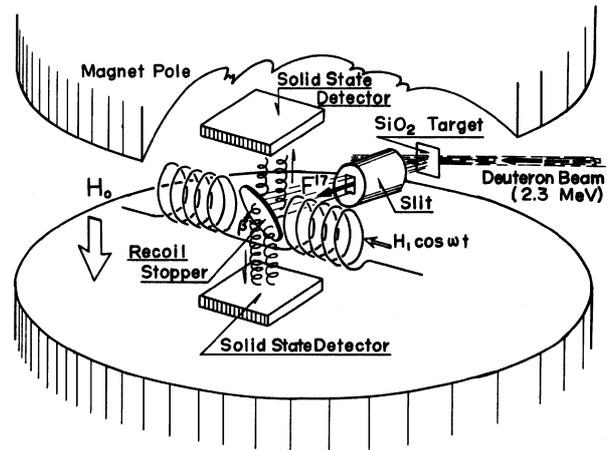


図3 新NMR実験のセットアップ

きるが、実際は山あり谷ありで困難な要素が多く、実験がうまく行くとはい誰も信じてくれないし、自分たちも信じ難い挑戦であった。

まず、核反応で偏極核が作れると信じる理由はなかった。次に偏極を1分近く保持できるという根拠はなかった。やってみるより仕方がないと思っていた。いわばギャンブルであった。あの強固な信念の持ち主である杉本先生さえ、君の学位がかかっている研究方針がこれで良いかと何度も念をおして下さった。私は助手にしてもらっていて身分を保障されているからいくら時間がかかっても良いと思っていた。今日の環境では考えられないことであるが、それが大きな仕事に取り組む基盤であった。

- (1) 核偏極が得られるか？
- (2) 偏極を長時間保持できるか？
- (3) NMRを観測できるか？

という3つの疑問に対し、(3)は心配していなかった。(1)は核理論屋に相談しても答は得られずやるしか他に法はなかった。しかし、(2)に関しては努力する道がいくつも考えられた。

核反応で作られた偏極核のスピンは、その核が β 崩壊する迄にその方向を乱す数々の相互作用が核外から働く。まず、標的から放出されストッパーに跳ぶ迄の間核はいろいろな荷電状態にあって核外電子による超微細相互作用を受けてスピンの向きは乱されるはずである。しかし幸いなことに外部からかけるNMR用の磁場がスピンの偏極軸と一致するためパッションバック効果に因ってスピンの方向は維持できる。

次に、ストッパーに入った核スピンは電気四重極相互作用を受ける。この効果を小さくするためストッパーは等軸対称を持つ CaF_2 を用いた。結晶の格子点

にうまく捕まれば電気四重極相互作用は働かない。格子点に捕まる確率は前節で述べた実験のうち KF イオン結晶についてのデータから 60% 以上あることが想像できた。CaF₂ 中の ¹⁹F がと反跳核 ¹⁷F の質量が近いので交換衝突で格子点に着床し易いと考えた。こうして最初の偏極の半分は保持できた。次に初期の擾乱を通り抜けた核スピンは、周囲の常磁性不純物とスピン・スピン相互作用をする可能性があるので、CaF₂ は高純度のものを選び、特に色のついていない部分を選んで使った。カラーセンターとの相互作用も困らであった。核スピン偏極の保持にこうした注意を払った結果、遂に核スピンの緩和時間を 30 秒にすることができた。NMR 実験には十分な長さである。物性研究者を含む多くの人が驚いた。常磁性緩和の時間は秒以下であろうと言われていたが、それも克服できた。これは ¹⁷F 核の磁気能率が CaF₂ 中の ¹⁹F 核のそれと異なっているためスピン拡散と呼ばれる過程がなかったためであった。幸運であった。

常温で 30 秒という緩和時間 (T₁) を得たことは未だ誰にも破られていない記録である。

この後、共鳴実験を行い ¹⁷F の磁気能率を決定した。NMR 法で決めた値は $\mu = 4.7224 \pm 0.0012 \text{ nm}$ であった。

この値を決めた日の夜は、嬉しくて仕方がなかった。この値は、私たち杉本グループの 4 人以外は世界中の誰も知らないと思うとわくわくした。しかし、同時にこれだけの精度の値をチェックするために、こんな難しい実験をする人が現れないとすると、どうなるだろうという心配もした。

後になって、パリティ非保存を実験的に発見した C. S. Wu 先生が来日された時、自分たちが発見した

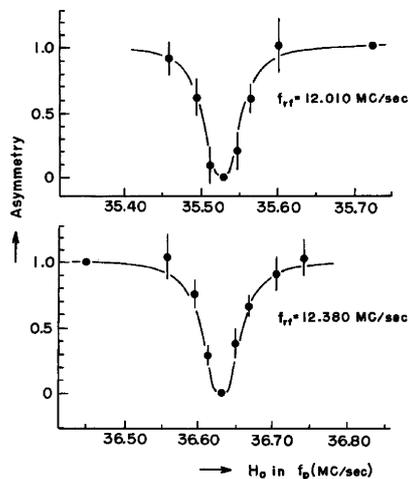


図 4 ¹⁷F の NMR

パリティ非保存を使って実験に成功したことを喜んで下さった。そして、Wu 先生は、有名な ⁶⁰Co の極低温偏極法で実験されたが、最初に T. D. Lee 教授が Wu 先生に提案された実験は、まさに核反応による偏極を使った実験であったという話を聞かせていただいた。

5. 豊中キャンパスへの移転

阪大理学部は、水害⁴⁾を一つの機会として将来性のない中ノ島キャンパスから豊中への移転する計画を立てていた。杉本グループは、その間にもヴァンデグラフ

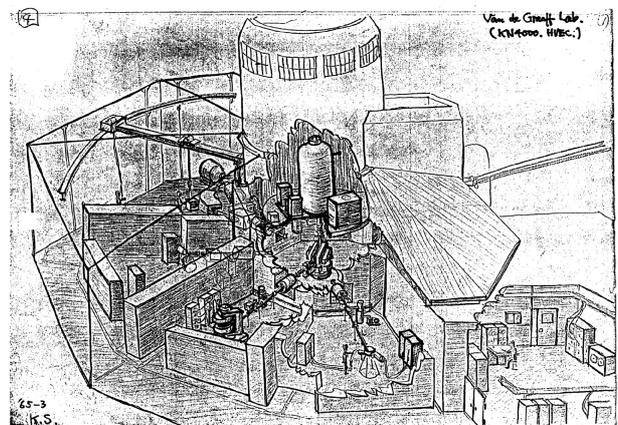


図 5 豊中ヴァンデグラフ実験室の鳥瞰図(杉本による)

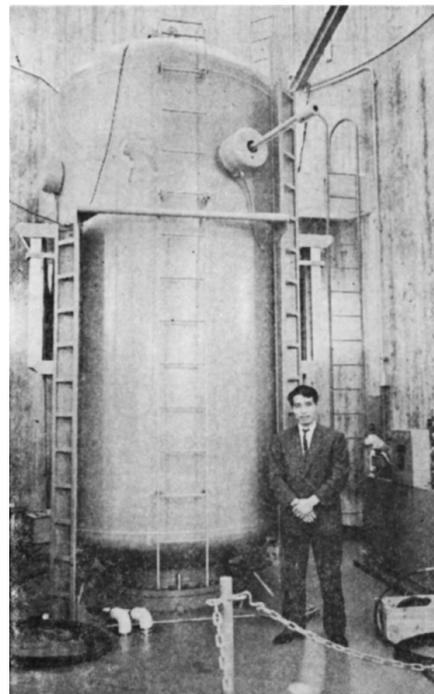


図 6 4 MV ヴァンデグラフ加速器と杉本先生

フ加速器実験室を復興し、前の2節で述べた二つの実験を行って成功した。水害は凡そ1年間のブランクを作ったが、復興のための予算で、古い回路などを更新し、新しい機器を整えることもできた。「水太り予算」だと人は呼んだ。私の学位論文は「水太り予算」のおかげでまとまったと言われても仕方ないと思った。

それに加えて、キャンパス移転が認められ多額の予算がつき、ヴァンデグラフ加速器も更新し、新しく米国のHIVEC社から輸入することになった。4MVの加速器であった。新しく建設する実験室も杉本先生を中心に自分たちで設計し建設した。研究室の移転、新実験室の建設、新しいヴァンデグラフの建設と忙しい日々が続いたが、学ぶことが多かった。日通の人たちから重量物の運搬方法をいろいろ学び他の人のできぬ経験をした。HIVEC社から来たエンジニアからはアメリカ風の仕事の進め方を学んだ。

新ヴァンデグラフ加速器は、縦型で極めて静かな機械であった。上からの垂直ビームは分析電磁石で90°偏向して水平にするが、分析電磁石を回転台にのせて4箇所の実験室にビームを出せるように設計した。

実験室を完成をさせると、私たちは待ち構えていたように、新NMRを活かして次々と面白い実験を始めた。

まず始めは ^{12}B のNMRであった。 ^{12}B は半減期が短く10 msecであること、 β 線のエネルギーが大きいこと等の理由で、先に述べた ^{17}F の場合よりも実験が易しい。最初にアイソバーの対である ^{12}B - ^{12}N の磁気能率を測った⁵⁾。

次に ^{12}B をいろいろな物質に埋め込んでNMRを観測した。図7はいろいろな金属中のNMRスペクトルである。共鳴線の中心が違っているのはナイトシフト、デイシフト(常磁性シフト)のため、また幅の違いは各金属の核磁気能率の違いに因るなどと物性の知識を学んだ。

^{12}B は、伝導電子による常磁性緩和時間に比べて寿命が短いので、反跳ストッパーに金属を用いられる。そこでいろいろな金属をストッパーに使ってみたところ、面心立方格子の金属(Pt, Au, Cu, Al, 等)では共鳴線が観測できるのに体心立方格子の金属(W, Ta, Mo, 等)では共鳴が観測できなかった。何故か?という謎にとりつかれ、永宮研の金森先生に教えを乞うたところ、即答が帰ってきた。LiからFまでの原子は金属に入ると格子間隙に収まるということであった。そうすると面心立方格子の場合格子間隙の位置は等方対象の位置になるが、体心立方格子の場合は対象

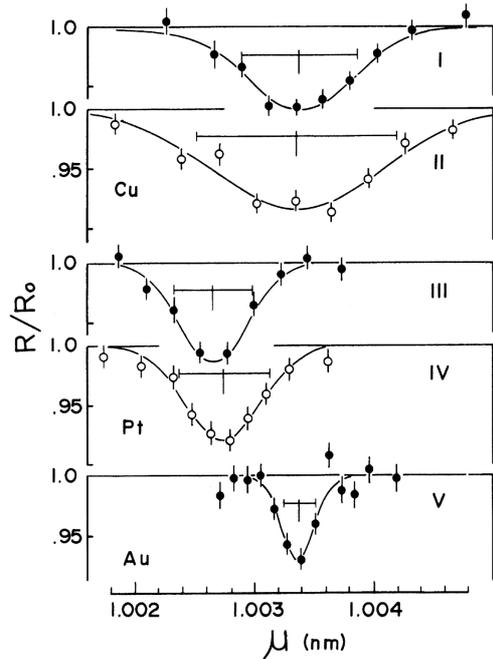


図7 いろいろな金属に打ち込まれた ^{12}B のNMRスペクトル

性が悪くて電気四重極相互作用が働くということであった。この問題は南園さん達が詳しく調べ実験的に証明した⁶⁾。NMRが物性物理学の基礎を築いたように、私たちの新しいNMRが「核物性物理学」という新分野を生み出すベースになるだろうと楽しみに思った。

しかし、私自身は山崎敏光さんの紹介でパークレイのLBLに行けることになって杉本研から離れた。1967年の夏であった。正に後ろ髪を引かれる思いで日本を発ったが、その行き先には天国のように恵まれた研究環境が待っていた。そこで、大阪で鍛えられ、蓄えられた力を開花させることができた。

6. 重イオン実験の天国, LBL-HILAC

当時、重イオン加速器として世界各地でタンデム加速器が建設され、重イオンビームを用いた実験が始まったところであった。サイクロトロンによる重イオン加速も始まっていた。日本は、世界の流れに遅れをとっていた。

そんな中で、パークレイに留学しHILACの実験グループに参加できたとは幸せなことであった。グループリーダーのR. M. Diamondには公私共に大変世話になった。

HILACは重イオンを加速する線形加速器でHeからArまでの原子核を1核子当たり10 MeVまで加速

できた。タンデム加速器では及ばぬ領域をカバーする強力な重イオン加速器である。米国では Yale 大学にもう一基あったが殆ど活躍していないし、当時、米国外には存在しなかったので、重イオン実験の独壇場であった。「ひとのやれないことをやる」ことができる研究環境であった。その中でも「ひとのやらないことをやる」という精神は貫いた。

重イオンビームを用いる実験は原子核研究にいろいろな可能性を開いたが、とりわけ、その特徴を活かす実験の一つはクーロン励起の実験である。HILAC のグループは、まずクーロン多重励起によりウランウム核やトリウム核の回転準位を 10^+ や 12^+ 状態まで励起してみせた⁷⁾。

6.1 クーロン励起の実験

重イオンビームによる強いクーロン相互作用は励起における高次の効果を調べる可能性を広げた。その一つがいわゆる Reorientation 効果である。励起した状態における m 量子状態間の遷移、つまりスピンの向きの変化である。この項の大きさを調べることで励起された状態の電気四重極能率を決められる。Reorientation 実験と呼ばれるこの方法は各地に建設されたタンデム加速器で炭素や酸素ビームによる精密実験を流行させた。例えば He ($Z=2$) ビームと O ($Z=8$) ビームによる励起断面積の違いを後方の角度で測って比較すればよい。そうすると Ar ($Z=18$) ビームを使える HILAC は遥かに優位な立場に立つ。

阪大中ノ島における難しい実験を終えた時、二度と電気四重極能率の測定なんかするものかと思ったのに、心が動いた。阪大で杉本先生、村岡光男先生(核理論)から教わってきたことの復習を始めた。しかし、実験は単純で面白くない。ビームのおかげで効果の大きさが2倍になるくらいのことだ。これは各地でやっている実験のまねごとではないかと思った。ひと真似はやめようという杉本精神が働いた。ところが、あるときふとアイデアが浮かんだ。HILAC では、Ne ビームを使っている。このビームを鉛 ($Z=82$) に照射して Ne 核のクーロン励起を調べると、鉛の強大なクーロン場によって励起 Ne 核の Reorientation 効果は大きいはずである。入射核と標的核の立場を入れ替える実験である⁸⁾。

このアイデアは、周辺の人に大変褒められた。ちょうど HILAC のグループに来ていた大御所の G. Goldring に話すと、“Wonderful, great, why don't you think about” と言ってくれた。ところが、私は why don't you... という表現をしらなかったで、そんなこと自分で考えろと言われたような気がした。当時、

スタンフォード大学にいた G. Sprouse が早速招待してくれてセミナーで話した。彼とはその後生涯の親友になったが、お前の話は素晴らしいが、‘Prolate’ という発音が、‘plolate’ あるいは ‘phlolate’ に聞こえて、聞き取り難かったと言われてがっかりした。初めて英語を話す米国生活の思い出となった。

実験は容易に思えた。Ne ビームを標的の鉛に照射し、散乱する Ne 粒子を前方と後方で検出し、これと同時に係数するガンマ線の取量を比較すれば良い。実際には光速の 10% で飛行する Ne 核からのガンマ線はドップラシフトをしているから注意が必要であった。その他は、二つの散乱角度に対応するガンマ線取量の比を測るので、心配になる系統誤差は相殺されるというまい測定であった。

解析も、J. de Boer-A. Winther の計算コードがあって、容易であった。パークレイには常に世界最高の計算機が稼働していた。当時は、IBM から CDC に替わったところであったが、パンチカード入力であった。毎日カードの重い箱をもって Bldg. 70 の居室から Bldg. 50 A の最下の階にある計算センターに通った。エレベーターはあるが、Bldg. 50 に沿って4階分歩いて下る小道を降りた。サンフランシスコ湾の美しい景色を楽しんだ。

$^{20}\text{Ne}(2^+)$ の電気四重極能率の測定と解析が終わった時、大阪の杉本先生に報告の手紙を出した。たいへんお褒めのご返事いただいた。うれしかった。

この後の実験は、ただビーム粒子をかえるだけであった。まず、 ^{22}Ne の加速を頼んだ、それから ^{28}Si , ^{32}S , ^{40}Ar と、次々実験し、最後に ^{36}Ar のビームを加速してもらった。 ^{36}Ar の濃縮ガスは高価なので躊躇したが、話してみると“OK”という返事ですぐに手配してくれた。

パークレイ HILAC の腕力を世界に示す実験だと言うので加速器の運転保守担当者たちは喜んで協力してくれた。

電気四重極能率の実験結果を図 8 に示す⁹⁾。縦軸の Q_0 は固有電気四重極能率で原子核の変形に対応する。 Q_0 の符号は核変形の符号になる。電気四重極能率は絶対値も大切だが、その符号はもっと大切である。この実験をした 1970 年代には、原子核の変形を预言するハートレー・フォックの理論がいくつも試みられた。いずれも Ne や Mg の変形が正符号であるとしたが、s-d shell 核の重い領域 Si, S, Ar については多くの計算の予言はまちまちであった。私達の実験データが出てから計算の信頼度は上がった。

この頃、シアトルに滞在中の江尻宏泰さんがパーク

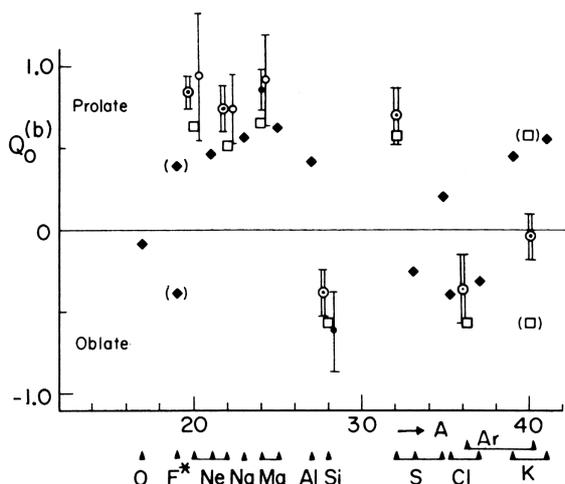


図8 S-d shell 核の固有電気四重極能率

レイを訪問して下さった。私達の実験の説明を熱心に聞いて下さった後、江尻さんは「中井さんは核分光実験のセンターのようなところにも consistent に核モーメントの決定をやるのですね」と感想を述べられた。私には、「折角だから核分光実験もやれば良いのに」と言われた気がした。

6.2 インビーム核分光実験

森永晴彦先生¹⁰⁾が、アムステルダム・サイクロトロンのビームによって核反応に伴うガンマ線を検出し変形核の回転スペクトルを観測することに成功して以来「インビームガンマ線核分光学」の手法が始まったばかりの頃で、HILACのDiamod-Stephensグループがその手法を強力に発展させたところであった。

私も、もちろん実験に参加し回転スペクトルからのずれがStretchingの効果であるとか、Coloris mixingによって説明できるとか、議論に参加していたが、自分の実験という気がしていなかった。ガンマ線核分光の実験を見ていると、どこのグループも偶-偶核の回転スペクトルばかりである。偶-偶核は、その対称性故に見通しの良い議論、精密な議論ができるが、情報は少ないと思っていた。奇-奇核の分光学の方が面白いと考えていた。この時、「ひとのやらないことに取り組みたい」という考えも働いた。

そうこうするうちにも、HILACにおける2年間の契約が終末まで後半年になって来た。ポスのR. Diamondはその先のことを考えて、NBIのA. BohrとB. Mottelsonに紹介してくれて、パークレイの後にはコペンハーゲンに行けることが決まった。そうすると、NBIに行くまでもう一仕事したいと思った。既に図8に示す電気四重極能率測定のほかには磁気能率の測定についてもいくつかの成果を挙げてきたので、

Bohr-Mottelsonからも期待して待っているという手紙をもらっていた。

6.3 Q_0 モーメントの符号：原子核変形の符号

そこで思いついたテーマが Q_0 モーメントの符号の決定であった。そして「なぜ原子核は変形するのか？そして、なぜ負の変形が少ないのか？」という疑問を掲げて Q_0 が負の原子核を探すことであった。かつて、阪大で3年間をかけて ^{19}F の Q モーメントを測った時、杉本先生がその符号を決める実験をやろうと言われたのに強く反対したことが頭に残っていた。そして、LBL-HILACという何でもやれそうな恵まれた環境で挑戦することを考えた。

電気四重極能率、 Q モーメントの符号の測定は容易でない。磁気能率のときは外場をかけたときの回転の方向で決められるが、電気四重極相互作用のときはスピンの向きが反対だと逆方向に回転するので原子核を偏極させる必要がある。これが厄介なので杉本先生の提案に反対した。

では、Reorientationの実験ではなぜ簡単に Q_0 の符号が決まったのかというと、それはクーロン励起の高次項で Q の一次の項を測るからである。つまり Q の一次の項を測る実験を考えれば良いと思って、そんな例はないかと探すと奇-偶核の励起状態に現れる回転バンドの $\Delta I=2$ 遷移に見られる(M1/E2)混合比の符号である。これは $(g_K - g_R)/Q_0$ に比例する。Kの大きい回転バンドでは $(g_K - g_R)$ を測らなくても分子の符号は正であることが言えるので、(M1/E2)混合比の符号を測れば Q_0 の符号が判る。

そのような例は無いかと探してみると、私が属するHILACグループでJ. Newtonが ^{209}Tl の励起状態に現れる $9/2^-$ バンドの $\Delta I=2$ 遷移の(M1/E2)混合比が負であるという報告をしていた¹¹⁾。直ちに、この状態は負の変形をしていると結論づけることができた¹²⁾。J. Newtonは頭を抱えていた。私が共著論文にしたいと申し出ると、この公明正大で誠実なイギリス紳士は、君が考えついたのだから君の名前だけで発表しなさいと言ってくれた。やはり、イギリス国民は大国民だなと感心した。

6.4 謎の回転バンド

次に同じような例を探すと、 ^{131}La に $11/2^-$ のアソマーが報告されていた¹³⁾。これだと思って早速そのアイソマーの上に現れるであろう回転バンドを探した。

アイソマーの上に立つ回転バンドのガンマ線を測ることは比較的易しいと考え、実験にとりかかった。先ず、 ^{129}La をつくるため $^{118}\text{Sn}(^{14}\text{N}, 3n)$ 反応によるガンマ線を測ったところ奇妙なことが見られた。 ^{129}La

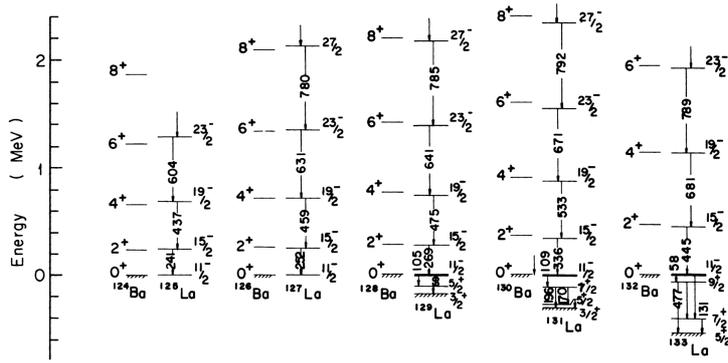


図9 奇-偶核 ^{129}La と偶-偶核 ^{128}Ba の回転バンド

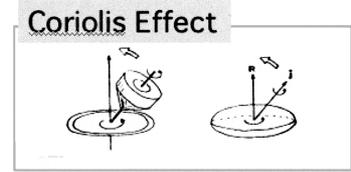


図10 回転する円盤の上のコマに働く力と、回転する核に結合する核スピンの働く力

の $11/2^-$ アイソマーの生成は確認できたが、予想した奇-偶核らしいスペクトルと全く異なって、隣の偶-偶核 ^{128}Ba とそっくりのスペクトルが観測された¹⁴⁾。

何か実験上の間違いではないかと考え、あらゆる可能性を調べたが理解できない。そこで、Sn 標的を ^{118}Sn の他に ^{116}Sn , ^{120}Sn , ^{124}Sn に変え、ビームの種類を ^{14}N の他に ^{11}B , ^{16}O に変えてその組み合わせにより ^{125}La から ^{137}La までのアイソトープ全てを作って調べたがいずれの場合も隣の Ba の場合とそっくりのスペクトルが得られた¹⁵⁾ (図9)。謎は深まるだけであった。LBL には visitors も含めて多くの核物理研究者がいたが、誰も答えられない謎であった。

そのうちに NBI へ移ることになり、謎を持ったままコペンハーゲンに移住した。最初に挨拶のため B. Mottelson に逢ったときこの謎のデータを見せて意見を求めた。それから数週間彼の机の前に図9が貼られていた。Mottelson は、山崎、江尻、中井と、次々日本から若い人たちが難問を抱えてやってくる。‘Japanese invasion’ だと言っていた。素直に嬉しく誇らしく思った。

謎が解けたのは、数ヶ月後であった。ミュンヘンを訪れていた仲間の F. Stephens が、P. Kienle と博物館で円盤をまわしてやるとその上のコマが立ち上がるというコリオリ効果の模型を見た時であった(図10)。

^{129}La の $11/2^-$ アイソマーは ^{128}Ba に $i_{11/2}$ 状態の陽子が結合した状態である。コアになる ^{128}Ba が回転する円盤でその上に陽子 ($j=11/2$) のコマが乗っていると考えると強いコリオリ効果のため、コアの ^{128}Ba の回転角運動量と陽子のスピンの結合がはずれた形になる。

La アイソトープの謎の回転バンドは、非常に簡単かつ明瞭に説明された¹⁶⁾。コリオリ力であった。これを発見するまでは、変形回転核のスペクトルに見られる回転スペクトルからの乱れは、コリオリ力による

状態の混合に起因すると説明されていた。私は必要充分とは言えない説明に不満で、好きになれなかった。しかし、この謎解きによって原子核におけるコリオリ効果を思い知らされた気がした。

7. 重イオン実験が暴いた未知の原子核の側面

上に述べた回転バンド (Coriolis-decoupled band) の例のように、重イオン加速器の出現は原子核を大きな角運動量の極限状態において調べられることを可能にし、原子核の未知の側面を暴いてきた。それには重イオン加速器の開発・普及に呼応して、物理の面で1963年にアムステルダムで行われた森永-Gougelotの実験¹⁰⁾によるインビーム核分光学の創始が大きな貢献を果たした。

この実験が行われた数年前に広島大学で開かれた日本物理学会でのことであったと記憶するが、学会の休憩時間中に森永先生が数人の先生方と話して居られるところに巡り会いお話を後ろの方で聞いていた覚えがある。森永先生は、50 MeV の α 粒子のビームを原子核に入射するとおよそ $20\hbar$ という大きな角運動量が持ち込まれる。その後 (α, xn) 反応で作られ複合核から蒸発過程で放出される中性子が持ち出す角運動量は数 \hbar 程度で小さい。そうすると持ち込まれた角運動量はどこに行くのであろうか? と話しておられた。

その答えは後にアムステルダムから届いた。森永先生の実験であった。サイクロトロンの中に入射した ^{160}Gd 標的からの γ 線を NaI (Tl) シンチレーターによって直接インビームで測り、反応で生成した ^{160}Dy の励起状態からの γ 線スペクトルを見ると見事な回転スペクトルであった。この実験によりインビーム核分光学が始まったが、 γ 線の検出に NaI 検出器が用いられた。当時は、ちょうど Ge 半導体検出器が普及し始めたところで、LBL には優れた技術が整っ

ていた。世界最強の重イオン加速器 HILAC を持ち高分解能 γ 線検出器を使える LBL では R. M. Diamond と F. S. Stephens は直ちにインビーム核分光実験を始め次々と変形回転核に関するデータを発表し世界をリードした。

私もこのグループに加わって、重イオン科学の面白さを楽しんだ。Diamond-Stephens グループには、J. Newton や G. Goldring, P. Kienle など多くの visitors が来ていたが2年間の長期滞在をしたのは J. Leigh (英), H. Maier (独), J. Quebert (仏) と私 (日) の4人で、みんなそれぞれに母国の誇りと特徴を持って研究実験に取り組んでいた。

重イオンビームによる反応は(1)強いクーロン相互作用、反応生成核に与えられる(2)大きな反跳エネルギーと(3)大きな角運動量、入射重イオンと標的核の組み合わせによる(4)研究核種の多様性などを活かすといろいろなことができる。私たちは、(1) Reorientation 効果を使った Q モーメントの測定⁹⁾、(2)生成核の反跳運動を利用した psec 領域の寿命¹⁷⁾や磁気能率¹⁸⁾の測定、(3)アイソマーの磁気能率の測定¹⁹⁾、(4)回転核スペクトルの系統的測定による解析などを行った。

磁気能率の測定実験では、私の阪大での経験が仲間より一歩進んでいたもので、皆が私から吸収しようとした。特に当時は短寿命状態の磁気能率を測るために、必要な核スピンの整列が容易でないとされていたので阪大での経験が貴重であった。

磁気能率の研究にも重イオン反応における大きな角運動量効果が重要な役割を果たした。角運動量の大きい高スピンアイソマー状態が生成され易くそのような状態は2体、あるいは3体の結合による純粋な状態ができやすい、しかも大きな核整列が起るので γ 線の角度分布に大きな異方性が見られる。

山崎敏光さんはそこに注目し、LBL の 88" サイクロトロンでビームバーストを利用して、高スピンアイソマーの探索を行い興味深い状態を次々と見つけた²⁰⁾。その中のハイライトは ^{210}Po にある 11^- 状態である(図 11)。この状態は、二重閉殻核 ^{208}Pb のコアの周りに $h_{9/2}$ ($j=5-1/2$) と $i_{13/2}$ ($j=6+1/2$) の状態にいる二つの陽子が結合して 11^- 状態を形成しているが、二つのスピン $s=1/2$ がお互いに逆方向を向いていてその磁気能率は相殺するので、合成してできる状態の磁気能率は軌道角運動量で決まる。

なぜ興味深いかというと磁気能率には固有スピンの部と軌道運動による部があって、その固有スピン部の異常が特に大きいので、一般に軌道運動部の細かい情報は得難い。ところが、 ^{210}Po (11^-) 状態の磁気能率

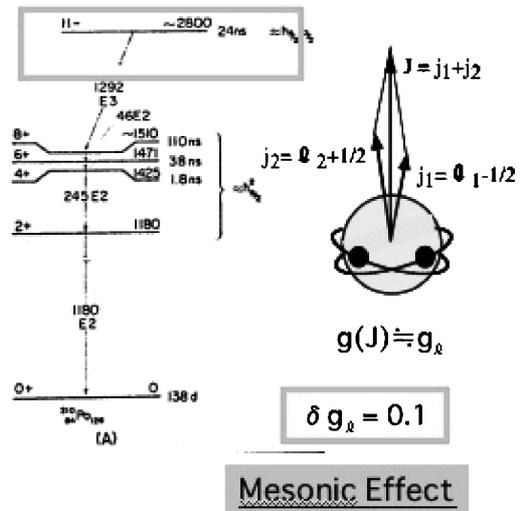


図11 $^{210}\text{Po}(11^-)$ アイソマー

測定は、細かい補正はあるが、陽子の軌道運動部分を測ることになる。

山崎さんはその磁気能率を測って陽子の軌道運動磁気能率に約 10% の異常があることを見つけた²¹⁾。この結果は磁気能率に現れる中間子効果の発見とされ、注目を集めた。

この磁気能率の研究では、角運動量の大きい状態を対象とすることによって、それまで理解が及ばなかった磁気能率の軌道運動部に異常が発見された。その他にも磁気能率におけるコア偏極効果など次々と明らかになってきた。

山崎さんが道を拓いた高いスピンのアイソマーと、その磁気能率の研究は、サイクロトロンなど加速器を持つ欧米の大学・研究所に広がった。先輩格の欧米研究者にも優れた研究に対しては、ひとのやることを真似してはばからない姿勢があるということを学んだ。「ひと真似はやめよう」と言って始めた日本の研究は先頭に立った。

阪大でも杉本先生が鏡映核の磁気能率データの解析を進め、磁気能率における中間子効果の存在を明らかにしていた。こうして、阪大杉本グループと東大山崎グループの磁気能率研究は、共に世界の核構造研究者に注目された。

1972年に杉本先生を中心に「核モーメントと核構造」国際会議²²⁾を大阪で開いた。大阪で小さい手造りの加速器で始め、やがて国際舞台上で活躍した日本の研究グループが辿り着いた頂点であった。

参考文献

- 1) K. Sugimoto, A. Mizobuchi and K. Nakai, Phys. Rev.,

- 134, B539 (1964).
- 2) J. Kanamori and K. Sugimoto, *J. Phys. Soc. Japan*, 13, 754 (1958).
- 3) K. Sugimoto, A. Mizobuchi, K. Nakai and K. Matuda, *J. Phys. Soc. Japan*, 21, 213 (1966).
- 4) 加速器 6 卷 2 号 158 頁 (本稿 第 I 部).
- 5) K. Sugimoto, K. Nakai, K. Matuda and T. Minamisono, *J. Phys. Soc. Japan*, 25, 1258 (1968).
- 6) T. Minamisono, *J. Phys. Soc. Japan*, 34, 324 (1973).
- 7) J. Newton, F. Stephens, R. Diamond and I. Perlman, *Phys. Rev. Lett.*, 13, 435 (1959).
- 8) K. Nakai, F. Stephens and R. Diamond, *Nucl. Phys.*, A150, 114 (1970).
- 9) K. Nakai, F. Stephens and R. Diamond, *Phys. Lett.*, 34B, 389 (1971).
- 10) H. Morinaga and P. Gugelot, *Nucl. Phys.*, 46, 210 (1963).
- 11) J. Newton et al., *Nucl. Phys.*, A148, 593 (1970).
- 12) K. Nakai, *Phys. Lett.*, 34B, 269 (1971).
- 13) K. Alexander et al., *Nucl. Phys.*, A133, 77 (1967).
- 14) J. Leigh, K. Nakai, K. Maier, F. Puhlhoﬀer, F. Stephens and R. Diamond, *Nucl. Phys.*, A213, 1 (1973).
- 15) K. Nakai, P. Kleinheinz, J. Leigh, K. Maier, F. Stephens, R. Diamond and G. Lovhoiden, *Phys. Lett.*, 44B, 443 (1973).
- 16) F. Stephens, R. Diamond, J. Reigh, T. Kammuri and K. Nakai, *Phys. Rev. Lett.*, 29, 438 (1972).
- 17) J. Quebert, K. Nakai, R. Diamond and F. Stephens, *Nucl. Phys.* A150, 68 (1970).
- 18) K. Nakai, D. Proetel, R. Diamond and F. Stephens, *Phys. Rev. Lett.*, 32, 1380 (1974).
- 19) K. Maier, K. Nakai, J. Leigh, R. Diamond and F. Stephens, *Nucl. Phys.*, A183, 289 (1972).
- 20) T. Yamazaki and E. Matthias, *Phys. Rev.*, 175, 1476 (1968).
- 21) T. Yamazaki, T. Nomura, S. Nagamiya and Katou, *Phys. Rev. Lett.*, 25, 547 (1970).
- 22) K. Sugimoto and H. Horie, "Nuclear Moment and Nuclear Structure". (Proc. Int. Conf. Osaka, 1972) *J. Phys. Soc. Japan, Suppl* 34 (1973).