

V. 原子核実験グループ

教授 古野興平、八木浩輔
助教授 青木保夫、青木孝義、石原豊之、田岸義宏、三明康郎、李 相茂
講師 新井一郎、栗田和好、竹内雄三
助手 小松原哲郎、溝田武志、向 淳子
技官 加藤純雄
大学院生 (35名)

【1】重イオン核分光学および加速ビームの境界領域への応用

(1) クリスタルボール型ガンマ線検出器 (向 淳子、小松原哲郎、古野興平)

高スピン状態の核分光学に於いて、一つの反応で同時に生成される幾つかの原子核の中から目的の原子核だけを選び出すことを目的として、多重荷電粒子検出器をクリスタルボールに取り付けた。陽子や α 粒子の個数を測定して残留核の種類を識別するために検出器に要求される性能は、多数に分割された独立の検出器で全立体角 4π を囲み、さらに粒子識別が充分行なわれる必要がある。我々が製作した検出器は 16 分割で、厚さ $200\ \mu\text{m}$ のシリコン検出器を用いて全立体角の 74 % を囲み、粒子識別はシリコン検出器内での陽子と α 粒子のエネルギー損失の差を利用する。

この多重荷電粒子検出器の性能を ^{54}Fe に ^{28}Si を照射する時の核反応 $^{54}\text{Fe}(^{28}\text{Si}, xp\ y\alpha\ zn)$ に対して試験した。ここで x 、 y 、 z はそれぞれ陽子、 α 粒子、中性子の個数である。ゲルマニウム検出器からの γ 線スペクトルを、多重荷電粒子検出器によって 3 個の陽子放出 ($3p$)、4 個の陽子放出 ($4p$)、2 個の陽子と 1 個の α 粒子放出 ($2p1\alpha$) の条件で観測すると、それぞれ ^{79}Rb 、 ^{78}Kr 、 ^{76}Kr からの γ 線が非常に良く分離して観測された。各スペクトルの強度は核反応の統計理論による生成断面積に比例しており、この多重荷電粒子検出器は生成核種の識別に極めて有効である事が確かめられた。

(2) ^{128}La の低励起状態 (早川岳人¹⁾、向 淳子、小松原哲郎、古野興平)

昨年度に引き続き、先に我々が ^{124}Cs と ^{126}Cs において確認した指標逆転現象を、 $A \sim 130$ 領域の広い範囲で系統的に確認するために、 ^{128}La のイラストバンドのスピンの、特にバンドヘッドのスピンの決める実験を続けた。昨年度は ^{103}Rh に ^{28}Si ビームを照射し、照射後の γ 線を測定したが、このターゲットとビームの組合せでは ^{128}Ce の他に ^{128}La の高スピンアイソマーからの β 崩壊が同時に観測される。

今年度、 γ 線の崩壊曲線を詳細に分析した結果、 ^{128}La には二つの β 崩壊する状態があり、一つは半減期 $T_{1/2} = 5.2 \pm 0.3$ 分で、もう一つは $T_{1/2} < 100$ 秒であることが結論された。前者は ^{128}Ba の高スピン状態へ強く崩壊する以前から知られていた高スピンアイソマーであり、後者は我々の実験で見出されたアイソマーである。この新しいアイソマーへは ^{128}Ce の基底状態から β 崩壊し、さらにここから ^{128}Ba の $2+$ 励起状態へ強く β 崩壊することから、そのスピンは $1 \sim 2h$ 程度であると考えられる。ただしこれらの二つの状態の内どちらが高い励起エネルギーを持つかはこれまでの実験だけでは決定できないが、近隣の奇数質量核の基底状態並びに高スピンアイソマーの系統的振舞から、我々は高スピンアイソマーの方が高い励起エネルギーにあると推測する。

さらに ^{128}Ce を生成しない反応として $^{115}\text{In}(^{16}\text{O}, 3n)^{128}\text{La}$ を用い、二つの β 崩壊する状態間

¹大学院物理学研究科、博士課程 4 年

の γ 遷移を特定する実験を行なったが、この遷移は観測できなかった。その原因として、大きなスピンの差のために γ 遷移の多重極度が著しく高く、 β 崩壊にくらべて小さな分岐比になり、しかも内部転換係数も大きくなって γ 線の観測が困難になったものと考えられる。

(3) 質量数 $A \sim 130$ 領域の原子核構造 (呂 駿²⁾、小松原哲郎、向 淳子、古野興平)

質量数 $A \sim 130$ 領域の偶偶核によって、低励起ガンマバンドの性質、非軸対称変形の自由度の寄与、2準粒子励起バンド、高スピン状態に於ける集団的な M1 遷移で結ばれたバンドなど、多くの核分光学的に興味ある問題が研究できる。我々は加速器センターに於いて完成したクリスタルボールを用いて系統的な実験を開始した。その一例として図-1 に ^{134}Ce の新しい励起準位を示す。

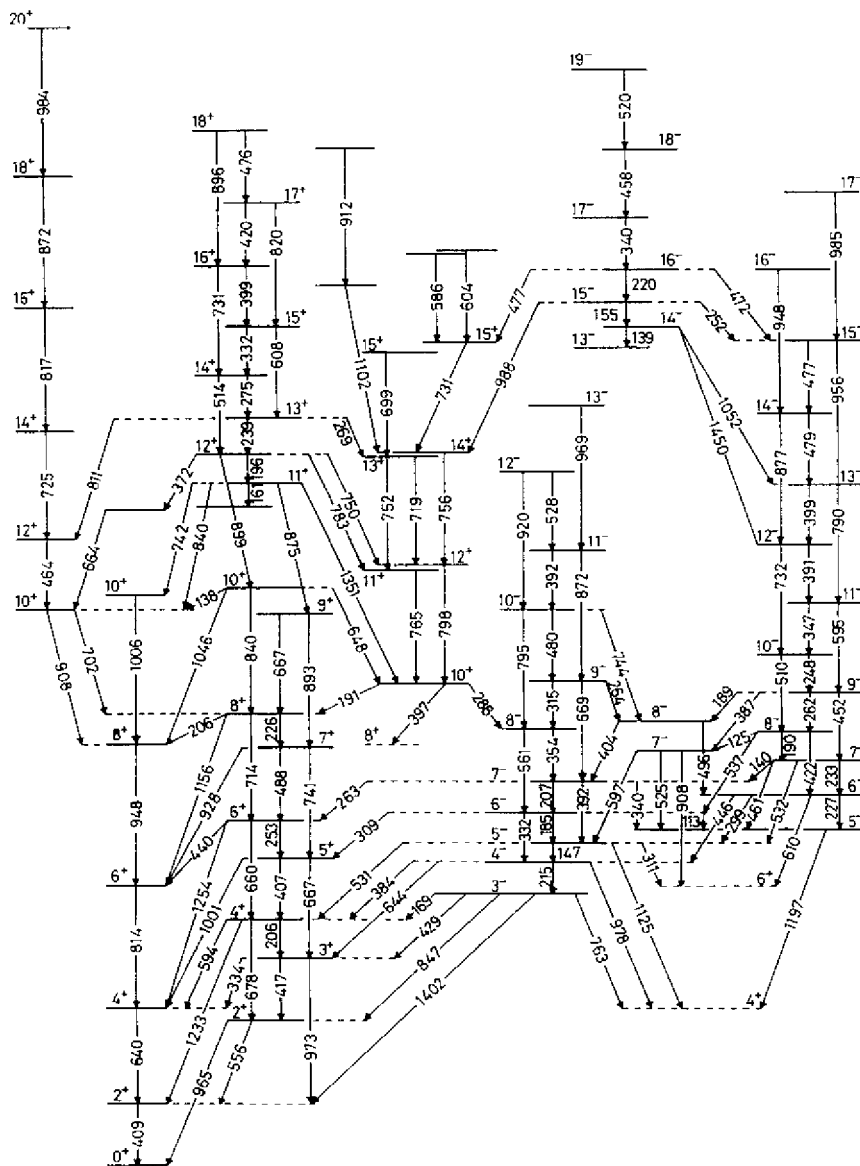


図-1 加速器センターのクリスタルボールを用いて得られた ^{134}Ce の励起準位構造

²大学院物理学研究科、博士課程5年

ここで X と Y でラベルしたバンドが M1 バンドである。この様な M1 バンドの中にオブレート変形した核が集団的回転をしているとして解釈できるものがあるか否かが最新の核構造論の興味であり、今後さらに実験を行なう。

(4) 韓国との国際共同研究

(古野興平、小松原哲郎、向 淳子、呂 駿、J.C. Kim³⁾、C.S. Lee⁴⁾、C.B. Moon⁵⁾)

我々のクリスタルボールを用いて二つの共同研究を行なった。一つは ^{154}Ho の高スピン状態、もう一つは ^{114}Te の高スピン核構造に関するものである。

希土類の奇奇核には系統的に陽子が $\pi h_{11/2}$ 軌道に、中性子が $\nu i_{13/2}$ 軌道に配位し、これらの核子が回転軸方向にそのスピンを整理させた、所謂 decoupled band が観測されている。さらに中性子数が 88 より多いと原子核はプロレート変形で励起準位は集団運動的性質を示し、86 を境にして僅かなオブレート変形に移行すると共に単一粒子的励起が強くなると考えられるが、これまで十分な実験データが無かった。この境界を明確にするために $^{141}\text{Pr}(^{16}\text{O}, 3n)^{154}\text{Ho}$ 反応により ^{154}Ho の励起状態を励起し、 $\gamma-\gamma$ 同時計数および角度相関実験を行なった。実験はまだ完全に終わっていないが、 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 並びに $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{9/2}$ の配位を持つと思われる回転的スペクトルと、不規則な準位間隔で単一粒子励起と考えられる準位が見出された。

第 2 の ^{114}Te であるが、この領域は陽子に対しては閉殻に近いので、低い励起状態は球形核に特徴的なスペクトルを示す。ところが ^{112}Te の高励起・高スピン状態には非常に明確な回転的スペクトルが現れる事が最近の実験で確認された。これは $h_{11/2}$ の様な所謂 high- j intruder orbital によるものと考えられ、我々が実験的に調べた ^{114}Te に於いてもそれと同様な intruder orbital に基づく回転バンドが見出された。

(5) 加速器による超高感度放射性同位元素の分析(長島泰夫⁶⁾、石原豊之、古野興平)

分析システム全体の内、加速器を出た後のイオン分析装置として静電偏向器 (Energy selector) と磁気分析器 (momentum selector) から構成される新しいビームコースが加速器センターの第 2 測定室に建設され、その性能試験を行なった。すなわち、パイロットビームとなる 2 分子を含む負イオン $^{13}\text{C}_2\text{O}^-$ と、分析対象の元素 ^{26}Mg を含み、同じ運動量をもつ $^{26}\text{MgO}^-$ 負イオンとをタンデム加速器に入射する。これらの分子負イオンはタンデム加速器の高電圧ターミナルで荷電変換する時に分解され、 ^{13}C と ^{26}Mg イオンとなるが、これらのイオンの電荷の比が 1:2 であれば加速器から出てきた時に運動量が等しくなって両者ともビーム分析電磁石を通過する事が出来る。そこで ^{13}C ビームの強度を大きくしておけば、加速器の制御にパイロットビームとして使うことができる。分析対象の ^{26}Mg も同じ運動量でビーム分析電磁石を通過するが、エネルギーの比が 1:2 になっているので、静電偏向器を通過する際に分離される。実際にはもう少し詳細な技術的理由から第 2 荷電変換を行ない、静電偏向器と磁場分析器に導入して、最終的に Mg イオンのみが粒子検出器に収束される。静電および磁場分析器の部分のイオン通過率は、設計通り 100% であることが確かめられた。さらに現在、専用のイオン源の建設が順調に進んでいる。

³⁾ 韓国、ソウル大学教授

⁴⁾ 韓国、中央大学助教授

⁵⁾ 韓国、湖西大学助教授

⁶⁾ 筑波医療技術短期大学 教授

【2】 クラスターと重イオン核反応 (李 相茂、溝田武志)

(1) Binary Fragment Distributions and Pre-Scission Charged Light Particles for $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ at 10.6 MeV/u — 理研に於ける共同研究 —
 (二見康之¹⁾, 中川孝秀²⁾, 松瀬文浩³⁾, 李 相茂)

重イオン入射による核分裂反応のトピックスの一つは、蒸発過程と分裂過程のタイムスケールを論じるダイナミックスの問題である。殊に、重い核(複合核質量 $A \sim 200$)では、中性子蒸発を測定することにより、統計モデルと比較して、核分裂よりも以前に多くの中性子(分裂前中性子)が出ることを系統的に測り、核分裂のタイムスケールは非常に遅いことが指摘された。これに対し、中重核($A \sim 100$)ではその分裂前放出粒子と核分裂片の同時測定を世界的に行なった例はない。そのような研究は、分裂前放出粒子として荷電軽粒子を測定することにより可能である。実験は理研のリングサイクロトロンで行ない、円筒型の大型散乱槽 ASCHRA を用いた。 ^{84}Kr を入射エネルギー 10.6 MeV/u で加速し、 ^{27}Al ターゲットにぶつけた。核分裂片は、 10° に設置したチャンネルプレートディテクターと Si 検出器による T.O.F. カウンターで測定した。軽粒子(陽子, α 粒子)は、 $10^\circ \sim 160^\circ$ までカバーする 120 本の Phoswich Detector で構成された 3π 多重カウンターシステムにより同時測定された。それぞれの Phoswich Detector のシグナルは Pulse Shape Discrimination により、 γ 線, 中性子, 陽子, α 粒子等が十分区別できた。軽荷電粒子の放出されたのが核分裂前か、或いは分裂後かの区別は、その放出源の性質と運動学的特徴を捉え、核分裂片と軽荷電粒子の相関による 3-Source Fitting により行なえる。Fig.1 に、その典型例を示す。結果は、予期に反して、約 80% の軽粒子が核分裂前に放出されることが分かった (Fig. 2)。

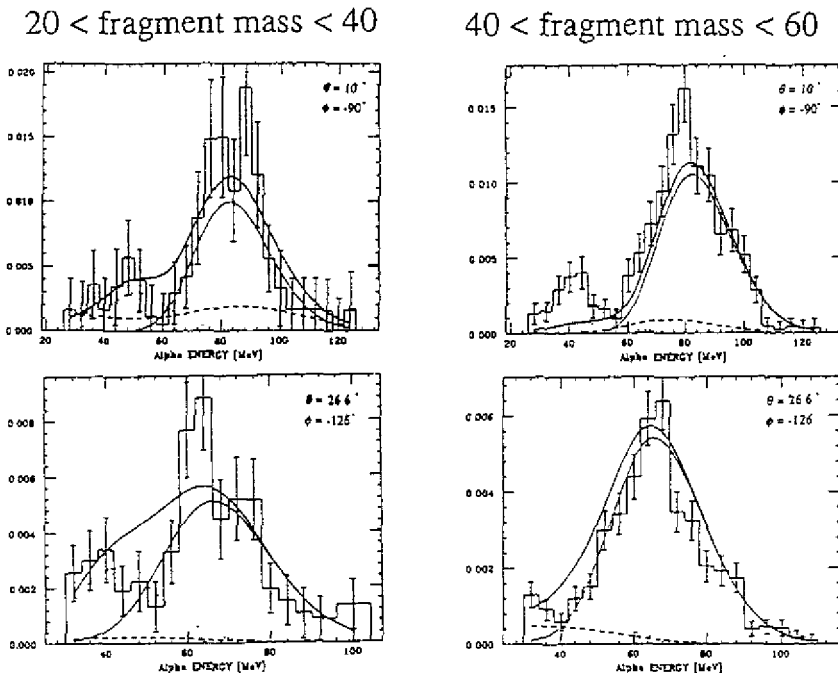


Fig.1 Kr+Al 10.6MeV/u 反応によって核分裂片と同時計測した α 粒子のスペクトル (ヒストグラム)。3-Source Fitting 計算による曲線 (太い実線) も記す。細い実線, 破線は各々分裂前放出, 分裂後放出の成分を表わす。

¹⁾ 大学院物理学研究科 博士課程 5 年
²⁾ 理化学研究所 研究員
³⁾ 信州大学 助教授

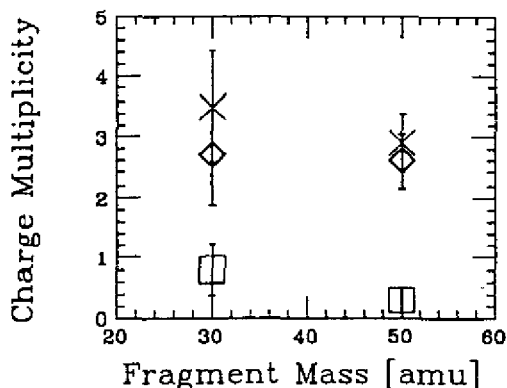


Fig.2 軽荷電粒子の Charge Multiplicity。Kr+Al 10.6MeV/u 反応によって核分裂片と同時計測した陽子、 α 粒子の多重度 (Multiplicity) より得た。全 Charge Multiplicity (x) と分裂前放出 (◇), 分裂後放出 (□) の成分を示した。

通常よく使われる GEMINI CODE (Conditional Saddle Point 上の Phase Space Model) による解析では、核分裂のタイムスケールを $\tau = 2 \times 10^{-20}$ s とすれば、80 % の軽荷電粒子放出が核分裂前に起こることは説明が付く。しかし、核分裂片の生成断面積は約 10 % しか出ないため、この時 Kr + Al は複合核を形成せず、ほぼ Di - Nucleus を作り、核は Saddle Point を越えていない解釈論になる。

我々の拡張ハウザー・フェッシュバツハ (Scission Point を基軸とした Phase Space Model) による解析では、核分裂片の励起エネルギーが全体で約 60 MeV では分裂できるが、それ以上の場合には先に軽粒子蒸発が起こるとすると、現象は矛盾なく説明できることが分かった。

二つのアプローチは、現象に対する別な見方であり、相互の関連性は未だ深く追求されていない。これは、今後の課題である。

(2) Heavy Ion and Cluster Impact D+D Fusion (溝田武志, 李 相茂)

重水素化物質にエネルギーを持った粒子を照射すると、物質中で D(d,p)T 核融合反応が起き、陽子が放出される。この際、照射粒子が原子、分子、クラスター、超微粒子、微粒子・・・と、そのサイズが大きくなることで、換言すれば構成原子数が多くなることで、照射粒子の集団効果として核融合反応からの陽子放出数の増え方に非線形性の存在が提案されていた。それに対し、1989 年 Beuhler ら¹⁾により、数 100 keV の重水クラスターの重水素化チタンへの照射実験で、D(d,p)T 反応率に対して理論計算よりも 10^{10} 倍のエンハンスメントが観られたという報告がなされた。これをきっかけとし、その真偽の程をめぐって多くの実験、理論解析が行なわれてきた。現時点で最も新しい実験結果として、水のクラスター (H₂O)_n H⁺ (n = 4 - 10) を重水の氷に照射する実験により、D(d,p)T 反応からの陽子放出数に対して、水の分子の場合よりも 2 倍のエンハンスメントが報告された²⁾。そして、現在も幾つかのグループにより様々なクラスタービームを用いて研究がなされており、未だにエンハンスメントの有無、そしてその形成メカニズムも含めて、完全に結論付けるには至っていない。

我々は、クラスター衝撃核融合実験に於ける D(d,p)T 反応率の非線形性を議論する上で、その比較対称となる重イオン衝撃核融合の実験研究を行なった。殊にクラスタービームの阻止能が不確定な場合でもクラスター衝撃核融合の反応率のエンハンスメントを定量的に観測する方法を確立することも念頭に置きつつ、あるエネルギー範囲にわたり各種の重イオンビームを用いた衝撃核融合実験を系統的に行なった。

実験は東京工業大学とフランスのストラスブール研究所の Van de Graaff 加速器を用いて行なった。1~4 MeV の重イオンを重水素化チタン TiD_x ($x=2$) ターゲットに照射し、 $D(d,p)T$ 反応からの放出陽子の測定を行なった。Fig.1 に典型的な放出陽子のエネルギースペクトルを示す。 $D(^{12}C,p)^{13}C$ と $D(d,p)T$ からの2本のピークが見られる。着目している $D(d,p)T$ の陽子のエネルギースペクトルを解析するため、単純な2段階カスケードモデルで計算した。即ち、重イオンが TiD_x に入射し、エネルギーを失って止まるまで、ターゲット中の重水素を弾性散乱する。散乱された重水素はターゲット中の他の重水素と核融合し、陽子を放出するといったモデルである。このモデル計算の結果、1~4 MeV の入射エネルギーを持つ炭素、窒素、酸素、ネオン、アルゴン、キセノン照射で、 $110^\circ \sim 173^\circ$ の測定角度範囲にわたり、実験結果の放出陽子のエネルギースペクトルの形状、入射エネルギー依存性、角分布をよく再現した。この結果から、重イオン衝撃による核融合反応に対しては、放出陽子のエネルギースペクトル形状の入射エネルギー依存性や測定角度依存性を観ることで、ターゲット中の重水素の量、ビームの照射量、更に入射イオンのターゲット中でのエネルギーの失い方(阻止能に依存)にはほとんど依存しないで、陽子放出に至るメカニズムを考察することができた。

そして、クラスター衝撃核融合反応率のエンハンスメントの有無を定量的に調べる方法として、数 MeV/原子のエネルギーで C_6 や C_{60} 等のクラスタービームによる実験を行ない、今回の単体の炭素ビームによる結果との比較することが挙げられる。炭素クラスターをビームとして採用するのは、現在、数 MeV/原子のエネルギーを大きなクラスターサイズで実現できる可能性のある唯一の元素であることと、一回衝突である $D(^{12}C,p)^{13}C$ と、二回衝突の二次反応である $D(d,p)T$ からの二つの陽子のピークがそのエネルギースペクトルに現れるためである。この2種類の起源を持つ陽子の生成比を、重イオンビーム衝撃の場合と比較することで、クラスター衝撃核融合反応率のエンハンスメントの有無を調べる一助となるであろう。そして今回行なった2段階カスケードモデルの計算も理論的アプローチとして役立つものである。

Ref. (1) R.J. Beuhler et al., Phys. Rev. Lett. 63(1989)1292
 (2) Y.K. Bae et al. Phys. Rev. A48(1993)4461

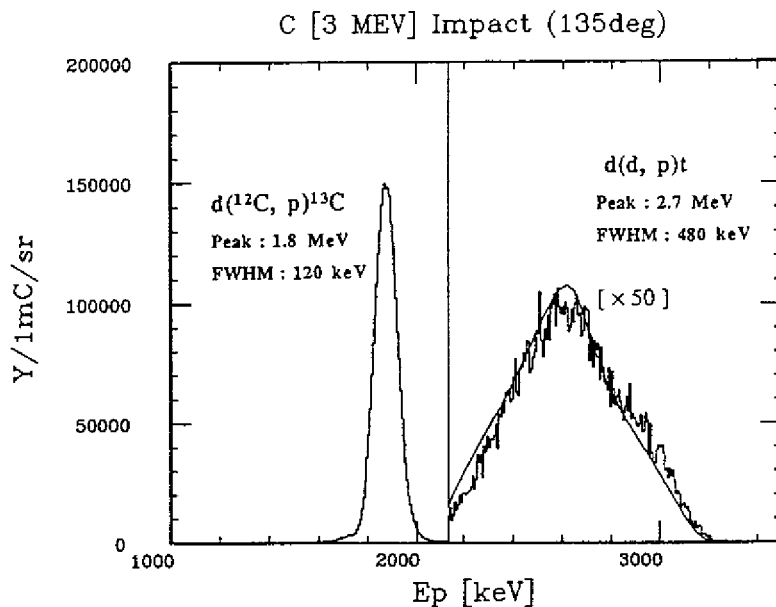


Fig.1 3 MeVの炭素ビームを TiD_x ターゲットに照射し 135° で測定した際の、放出陽子のエネルギースペクトル(ヒストグラム)。実線は、2段階カスケードモデル計算の結果を示す。

(3) C-foil と C₆₀-foil からの PDMS による 2 次イオン放出機構

(本城 義夫⁴⁾, 栗田 哲郎⁵⁾, 溝田 武志, 李 相茂)

この研究の目的は、Plasma Desorption Mass Spectrometry (PDMS) に於て、化学成分は等しくともその構造が違うターゲットを用いたときに、質量スペクトルの差がどのようなものであるかを見ようとするものである。

²⁵²Cf 線源 (~20 μCi) からの核分裂片を用いて C と C₆₀ の薄膜に重イオンを照射し、飛行時間測定法により二次イオン質量スペクトルを得た。Fig.1 (a) は C-foil ターゲットからの二次イオンの質量スペクトルであり、(b) は C₆₀-foil ターゲットのものである。

これらに、顕著な二つの質量領域が現れた。一つは $[M]^+ \leq 500$ u の領域で、これは両者とも良く似たスペクトルを示している。これは hot なプラズマ領域で、いったん原子と電子がバラバラになり、多重散乱を通じて再構成されたものと考えられる。これで最大 C₃₄H_m⁺ まで作られることは注目し値する。次に $[M]^+ \geq 500$ u の領域であるが、C-foil ではピークが見えないが、C₆₀-foil では C₆₀⁺ と C₇₀⁺ に大きなピーク、更に C_{n=60±2m} にピークが出ている。これは、n~96 まで見られる。これは hot なプラズマ領域の周辺部から C₆₀ や C₇₀ が剥がれ、C₂ 崩壊したり、C₂ のガスと再構成を行い重いクラスターが生成されたようである。

このメカニズムをより詳しく考察するため、タンデムによる重イオンビームを使って二次イオン収量率と阻止能依存性を調べている。

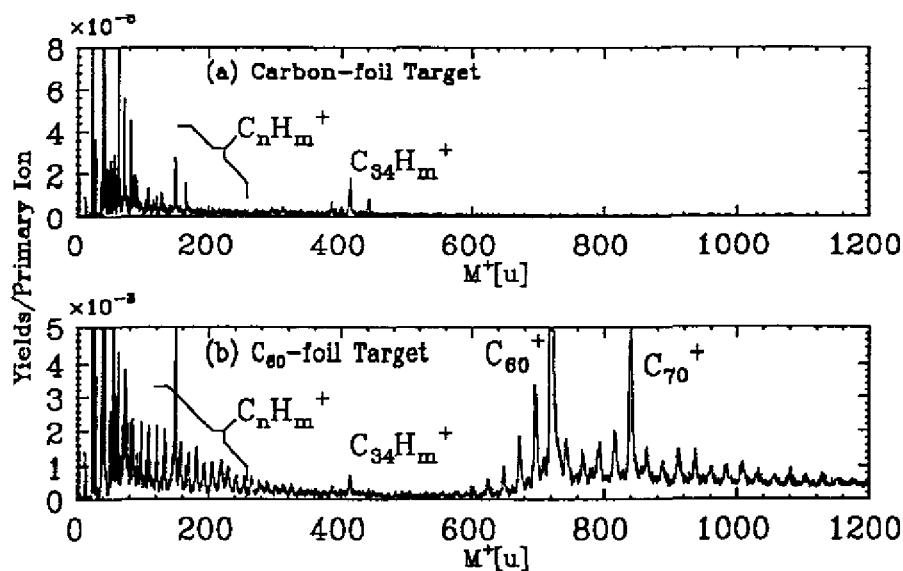


Fig.1 (a) C - foil Target と、(b) C₆₀ - foil Target からの二次イオン質量スペクトル。

⁴⁾ 大学院物理学研究科 博士課程 5 年

⁵⁾ 大学院物理工学研究科 修士課程 1 年

(4) コルトロンイオン源による C_{60} 加速

(富田成夫⁶⁾, 三浦 崇⁷⁾, 溝田武志, 李 相茂)

我々は、クラスターイオンの原子・分子との反応に、重イオン核反応で培ってきた知識を生かし、マイクロクラスター反応と重イオン核反応との類似点及び相違点について研究することを目的としている。

C_{60}^+ や C_{70}^+ 等のフラーレンイオンは、コルトロンイオン源(熱陰極放電型イオン源)のプラズマ生成室内に予め C_{60}/C_{70} 粉末を入れておくことにより生成される(Fig.1)。イオン源から引き出された1~10 keVのイオンは、ウィーンフィルターで質量選別された後、ガスセルに入射する。ここで気体原子との散乱を起こし、散乱後のイオンのエネルギーを、静電型エネルギー分析器及びマイクロチャンネルプレート検出器を用いて測定する。

Fig.2は、ガスセルにターゲットガスを導入していないときの、 C_{60}^+/C_{70}^+ 親イオンからの解離を測定したものである。フラーレンイオンの解離の特徴とされている、炭素2原子ずつの放出が見えている。

今後、定量的な測定を行うために分解能の向上及び残留ガスによる影響の評価等を行い、気体原子との散乱実験に移行してゆく予定である。

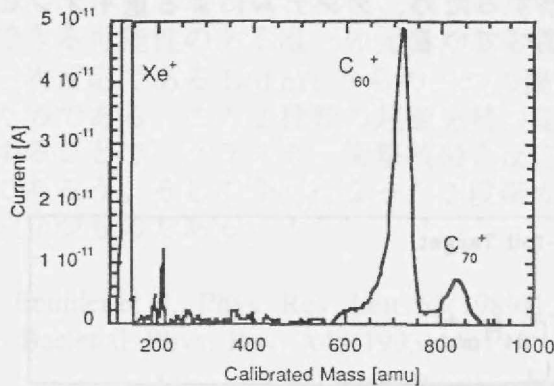


Fig.1 コルトロンイオン源からの質量分布

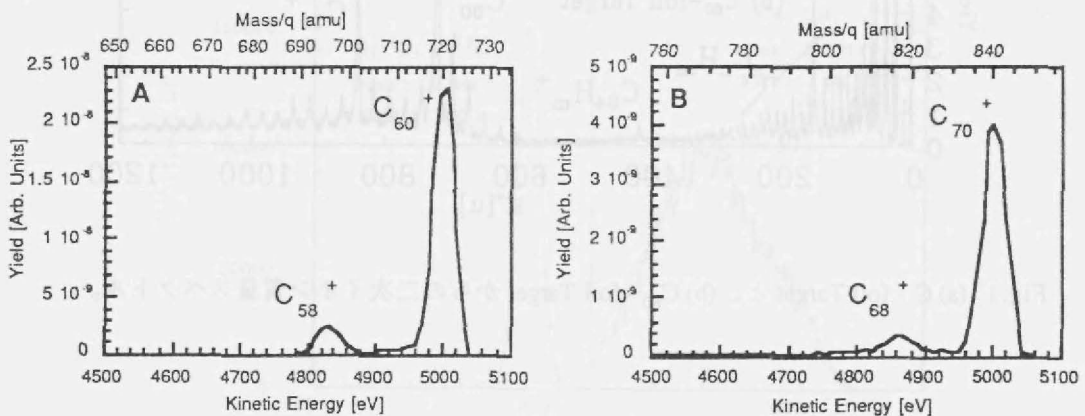


Fig.2 (A) C_{60}^+ と (B) C_{70}^+ からの単分子解離及び残留ガスとの散乱による解離。

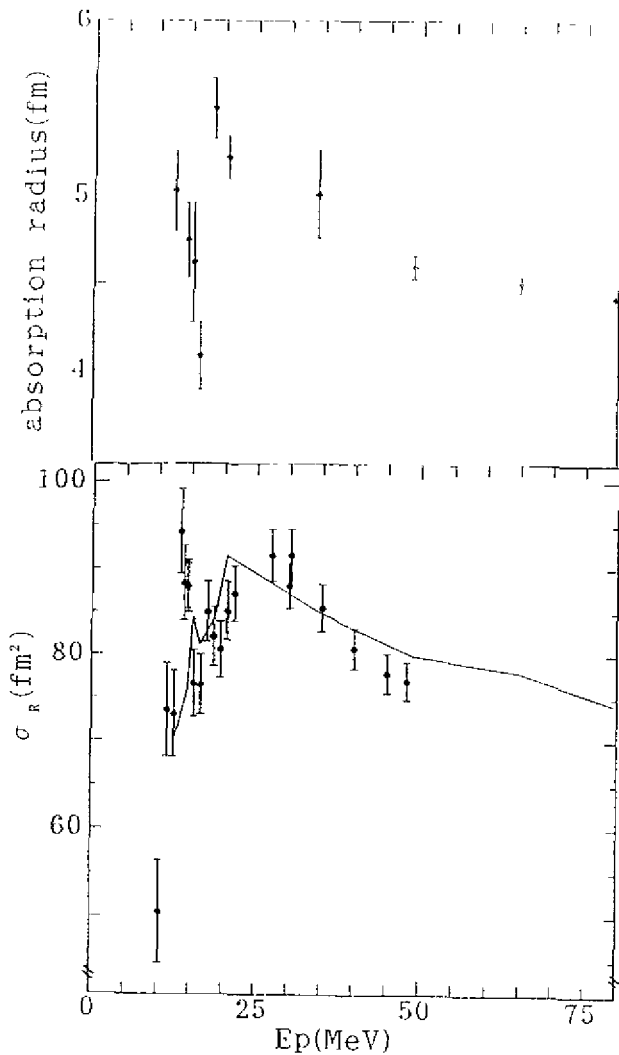
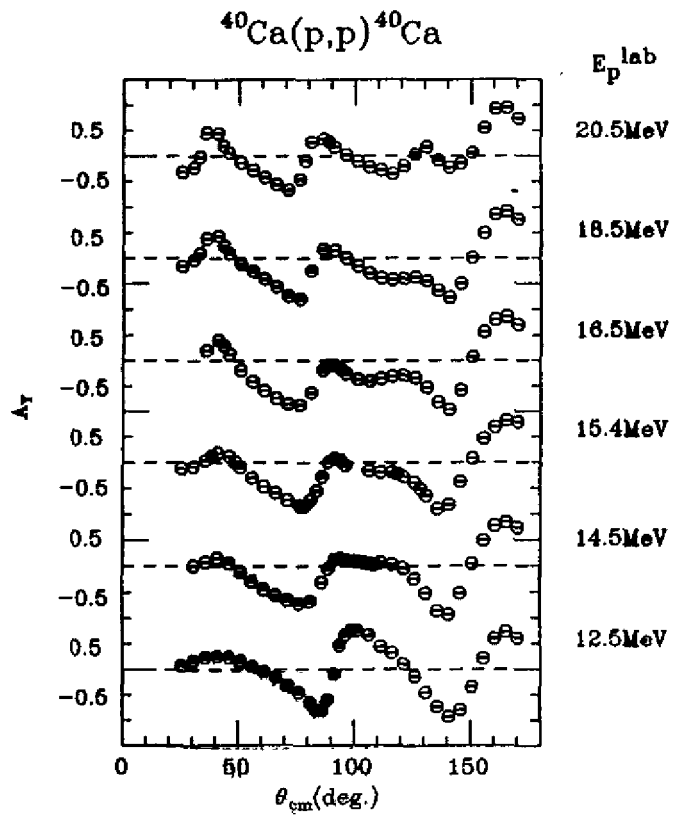
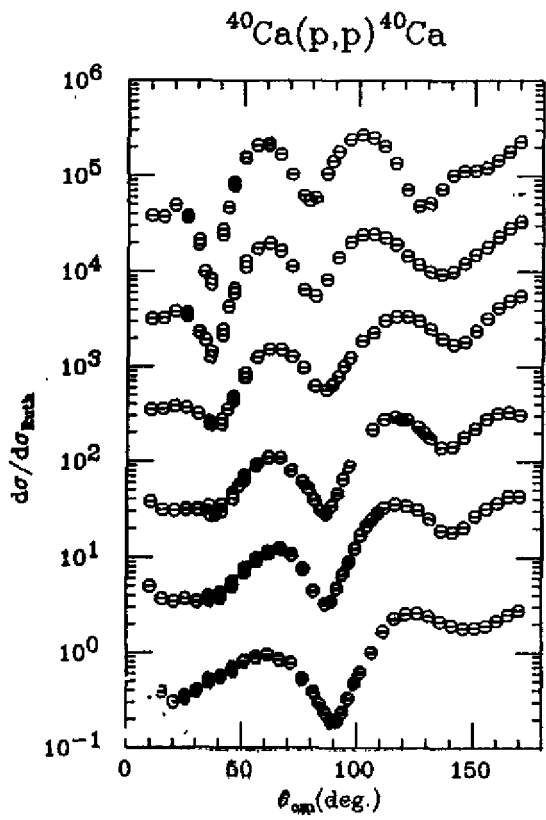
⁶⁾ 大学院物理学研究科 博士課程 4年

⁷⁾ 大学院物理学研究科 博士課程 1年

【3】 スピン偏極核反応実験（青木保夫、田岸義宏）

（1） ‘モデルに依存しない’ 光学ポテンシャル探索

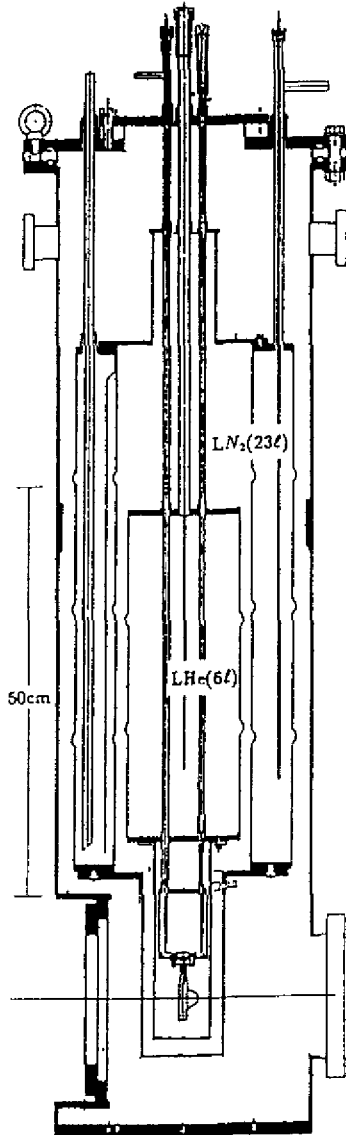
核子や重陽子、 α 粒子の原子核による弾性散乱の記述に光学ポテンシャルが用いられる。このポテンシャルの関数形は Woods-Saxon 型と呼ばれるものが広く使用されてきた。一方、電子散乱による原子核の電荷分布を記述する手法としてフーリエ・ベッセル展開の手法が開発され、陽子等の弾性散乱の解析に利用されるに到っている。関数形に束縛されないという意味ではフーリエ・ベッセルの手法もまだ束縛がきついに思われる。例えばフーリエ・ベッセル展開の基底は 0 次球ベッセル関数であるので大きな r に対して振幅は大体 $1/r$ でゆっくり減衰しているし、原点で必ず振幅が最大になっている。展開の基底にも自由度を持たせないと江戸の仇を長崎で打たれかねない。例えばこれまでの解析では項数を少し増やすと中心付近の誤差が異常に大きく成長しているように思われた。そこでパラメータを含んだ関数で外では指数関数的に減衰するものとして対称化 Woods-Saxon 型を非直交基底として採用した。対称化した理由は原点での微係数を 0 とするためである。この非直交基底を直交化しポテンシャルの展開基底とした。直交化は代数的手法を開発した。この手法の長所の一つは直交基底の非直交基底のパラメータによる微分もほぼ同じ手法で計算できるところにある。ポテンシャルをこの直交基底で展開するわけであるが展開係数の探索には共役勾配法を用いた。この方法では χ^2 の値とそのパラメータによる微分を利用して、 χ^2 の極小値を探す。この時副産物として χ^2 のパラメータによる二階微分（誤差行列）をも出力する。この行列を対角化し固有値と固有ベクトルを計算すると、パラメータの相関やパラメータの誤差を合理的に評価することが出来る。ガウスの誤差論では線形化しパラメータの独立性を使用していたが、この非線形の最小化ではパラメータの直交性を使用しているという意味で、精密化が為されている。ここでパラメータには二つの意味があった。一つは展開係数であり、他方は元々の基底に含まれている物である。今までの議論は展開係数に付いてであったが、この後に基底のパラメータを自動探索する。これにより、過去には固定されていた基底そのものも最適化する。先に述べた直交化の手法で直交基底が含むパラメータによる微分の実行可能性がここで使用される。この結果最適基底による最小化が実現されるわけである。ここまでは、一般的な概念であり各種の問題に適用できる。ここでは陽子弾性散乱の解析にこの概念を適用した。単純な問題に適用するのは面白くないので (p, n) 反応の閾値付近のエネルギー依存性を対象とした。加速器センターのタンデム型静電加速器での制限を考慮し⁴⁰Ca を標的とし、偏極陽子の弾性散乱を陽子エネルギー 12.5–20.5 MeV の範囲で測定した。約 100 度付近の微分断面積のピークのエネルギー依存性は常識的な振舞いをせずに、エネルギーと共にピークが後方に動いて行くように見える。偏極分析能もこのあたりの角度でピークが大きく崩れていく。図 1 参照。先ず全測定点に対して、光学ポテンシャルの線形なエネルギー依存性を仮定し自動探索を行った。その後個別エネルギーのデータをこのポテンシャルを出発値としてポテンシャルの自動探索を行い、かなり良く実験値を再現するポテンシャルを見いだした。この解析で面白いのは、今までに報告されている、全反応断面積との比較である。完全ではないが約 16 MeV の谷を再現している。さらに解析のポテンシャルの内容を調べるために、入射陽子が吸収される位置の期待値で吸収半径を定義して、この吸収半径のエネルギー依存性を調べ、ほぼ Breit-Wigner の一単位公式と同じ様な振舞いをする事が分かった。図 2 参照。これは、(p, n) の閾値よりも低いエネルギーでは、仮想的にしかチャンネルが開かないのに閾値の上では現実にチャンネルが開くことによる、グリーン関数の符号の変化で説明できると考えている。



↑
 図1. $^{40}\text{Ca}(p,p)^{40}\text{Ca}$ 弾性散乱の微分断面積と偏極分析能。微分断面積はエネルギー毎に10倍ずつずらしてある。

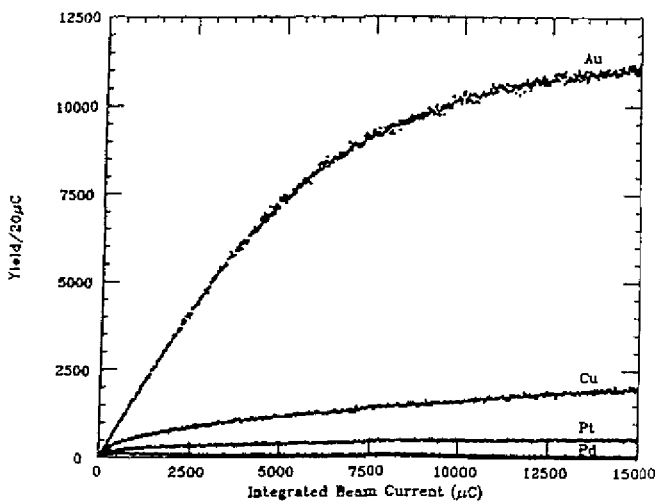
←
 図2. 全反応断面積と吸収半径のエネルギー依存性。

(2)液体ヘリウムを用いた陽子偏極ポラリメータの開発



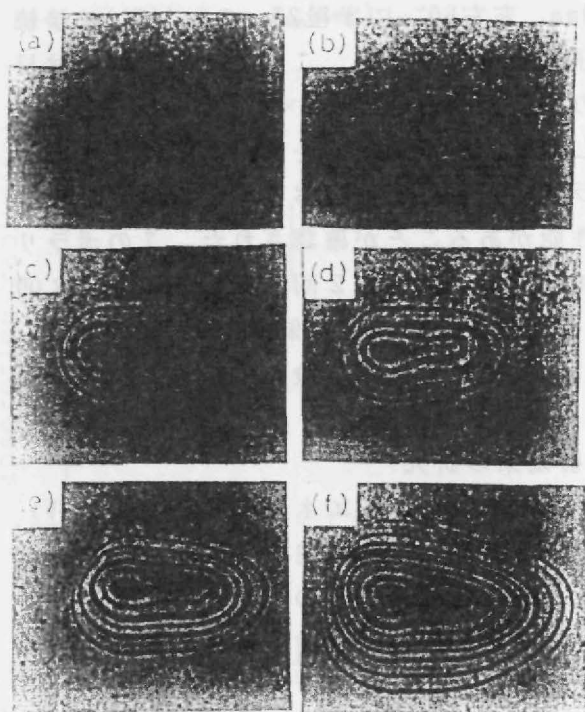
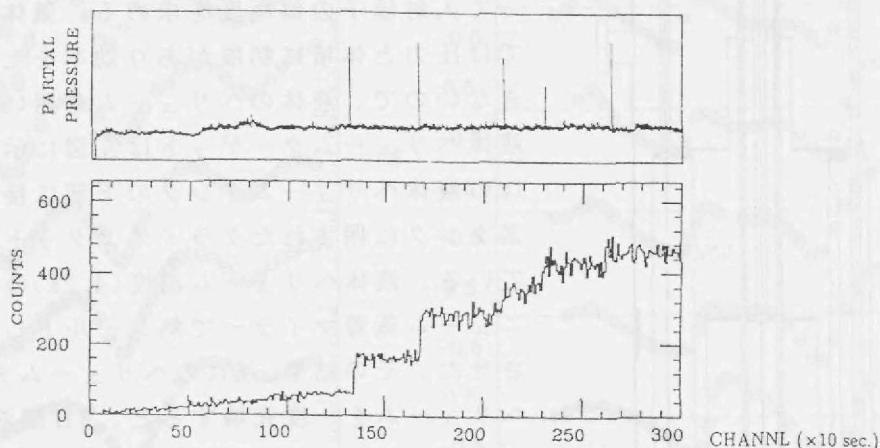
原子核反応から放出される反応陽子のスピン偏極測定のためのポラリメータを設計・製作した。このポラリメータでは陽子を ${}^4\text{He}$ ターゲットに入射させ、 ${}^4\text{He}$ からの弾性散乱の左右非対象を測定する事によって入射陽子の偏極度を求める。気体のヘリウムでは圧力と体積に制限があり効率を上げることができないので、液体のヘリウムを用いることにした。液体ヘリウムターゲットは左図に示すように、6ℓの液体ヘリウムタンクの下部に接続され液体窒素タンクに囲まれたクライオスタット内に設置されている。液体ヘリウム温度(4.2K)の部分はアルミニウム蒸着マイラーで熱シールドし輻射熱を減少させた。その結果、6ℓのヘリウムタンクに液体ヘリウムを一度充填すると、3日間液体ヘリウムをターゲット内に保持する事ができた。散乱陽子の検出器としては、ヘリウムターゲットの中心より距離130mm、左右 60° に半径25mmのCsI(Tl)に接続した光電子増倍管を用いる。これにより立体角は116msrとなり検出効率として 2.4×10^{-4} が期待される。今回開発した液体ヘリウムを用いた2回散乱用陽子偏極ポラリメータは、偏極移行反応実験での使用に十分な性能があることが確認された。このポラリメータを加速器センターの2回散乱ビームコースQDQ磁気分析器の焦点面に設置し偏極分解能の校正実験を行ない、偏極移行反応実験を開始する。

(3)重陽子融合反応をプローブとした重陽子照射効果の研究



種々の物質に低エネルギー(~ 100 keV)の重水素ビームを連続的に照射しながら重陽子融合反応、 ${}^2\text{H}(d, p){}^3\text{H}$ からの反応陽子を測定する事によって、物質に注入された重水素原子の振舞いを実時間 (Real Time) で観察する新しい方法を開発した。その結果の一例を左図に示す。図のカーブのそれぞれは、金、銅、白金、パラジウムに90 keV, $1\mu\text{A}$ の重陽子ビームを連続照射した時に検出される反応陽子の計数率の時間変化を示す。図から分かるように金属の種類によって反応陽子の計数率に著しい違いが

見られる。これはまさにそれぞれの金属による重陽子の拡散の違いを反映しているものと思われる。拡散測定に関する有用性を検討するためさらに定量的な測定を進める。一方同じ様な照射実験を単結晶Siで行なうと反応陽子の計数率は、金属に照射した場合とまったく異なり、不連続な増加を示す。計数率の増加に伴って間欠的な重水素ガスの放出が観測された。結果を下図に示す。



0 1 2 mm

興味ある事に照射面に左図に示すようなリング状の様子が形成される事が分かった。リングの形成と反応陽子の計数率の不連続な増加との間に相関が見られた。左図の(a), (b), (c), (d)はそれぞれ反応陽子の計数率が1, 2, 3, 4回と増加するまで重陽子を照射し照射後のそれぞれのSiの照射表面の写真を示す。(e), (d)はさらに照射量を増やした時の写真である。反応陽子の計数率が不連続に増加するたびに新しいリングが形成されていく事が分かった。このリング状の様子は、電子顕微鏡による観察から深さ約 $1\mu\text{m}$ の溝(クレーター)で重水素ガスの噴出に伴って形成されたものである事が分かった。その特徴として今までに(1)クレーターの形は、照射温度によって異なる。(2)各々のクレーターは、間欠的に形成される。(3)クレーターの大きさは、照射するビームの大きさに依存するが、形成に必要な照射線量(Dose量)はビーム径に

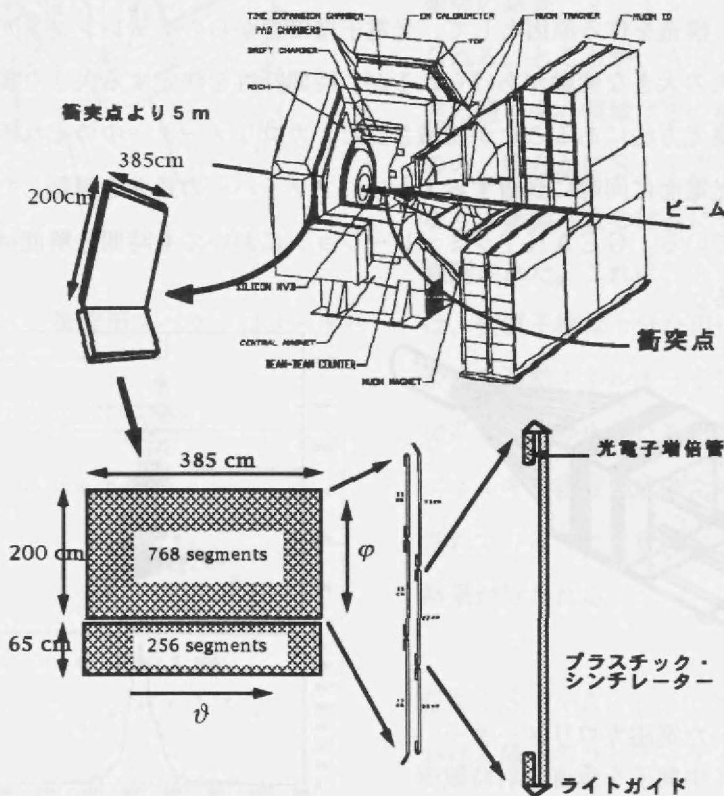
依存しない事などが分かった。今回観測されたこのような興味ある現象は、単結晶での重陽子照射の共通した現象であるのか、また照射温度によってガス噴出の様子が違うのは何故か、注入重陽子がどの段階からリング状に凝縮してくるのか、重陽子以外のビーム照射ではどうなるか等現象の解明にあたってさらに系統的な測定を進める。

【4】高エネルギー原子核実験（八木浩輔、三明康郎、新井一郎、栗田和好、富沢和之）

(1) 高エネルギー重イオン衝突実験（三明康郎、栗田和好、加藤純雄、八木浩輔）

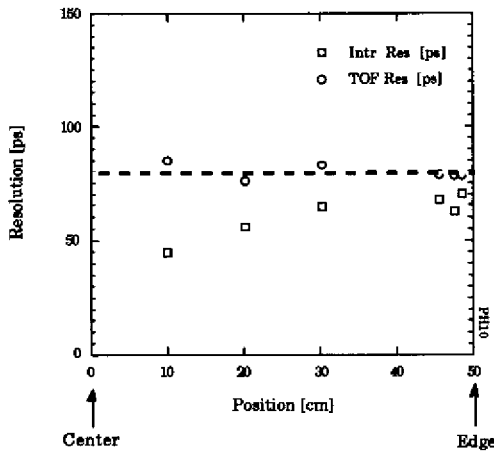
a) 高エネルギー重イオン加速器におけるクォーク・グルオンプラズマの検証実験

量子色力学の計算によれば、非常に高温高密度になると、クォークとグルオンは閉じ込めから開放されプラズマ状態 (QGP) に相転移すると予測される。QGPを地上の実験室において再現するためにブルックヘブン国立研究所では、衝突型高エネルギー重イオン加速器(Relativistic Heavy Ion Collider)の建設が進められている。フェニックス実験では、核子あたり100 GeVの金の原子核同志の衝突中心部でQGPを作り出し、その性質を調べることを目標としている。様々なQGPからの信号測定の中で、ハドロンの系統的測定は衝突の反応機構を理解する上で必要不可欠な情報を与えるのみならず、ストレンジネス生成量やファイ中間子のハドロン崩壊の分岐比等の測定は、QGP生成の実験的証拠として重要である。ハドロンの系統的測定のためには優れた粒子識別能力を備えた実験装置を建設することが必要不可欠で、飛行時間測定器 (TOF) が適している。高時間分解能を持つTOF装置の技術を持つ我々は飛行時間測定器を製作している。我々は高時間分解能飛行時間測定器をフェニックス実験のみならず、核子あたり160 GeVにおいて静止標的核を用いた実験を欧州原子核研究機構 (CERN) においても実施し、ハドロンの系統的測定のための基礎的研究を積み上げる予定であり、高性能な飛行時間測定器の建設を急いでいる。



図：フェニックス実験測定装置と高時間分解能飛行時間測定装置の構造概念図。

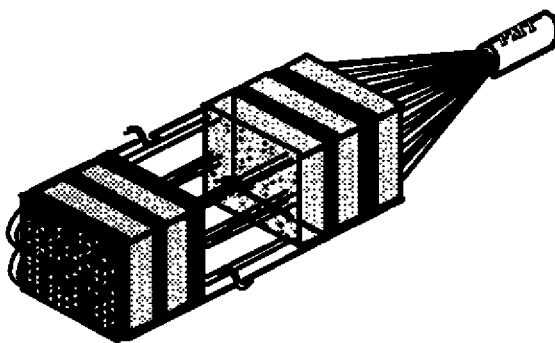
このため高時間分解能飛行時間測定装置の単体プロトタイプを製作し、性能評価を行った。下図に示すように位置によらず80ピコ秒の時間分解能が得られること、また光電子増倍管の入射窓ガラスにおけるチェレンコフ光の影響も時間差分布を見ることによって判定できることがわかった。



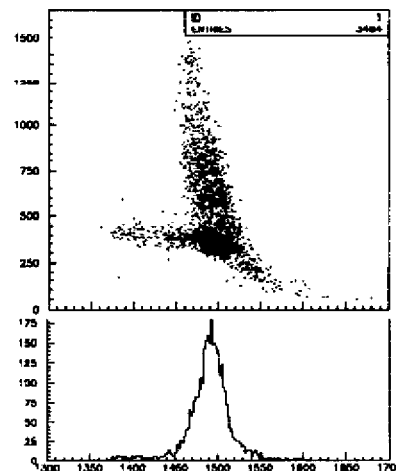
図；時間分解能位置依存性

からのシンチレーション光を波長変換ファイバーを用いて集め光電子増倍管に導いている。この電磁カロリメーターのハドロンに対する時間特性を、高エネルギー物理学研究所のテスト実験（T284）において評価を行った。すると下右図に示すように複雑な構造と、ブロードな時間特性を示すことがわかった。構造を作る原因として、光電子増倍管からのチェレンコフ光や、ハドロン反応によるエネルギー損失の大きな変動があげられるが、時間特性を決定する大きな要素として、読み出しファイバーによる集光方法にあることが認識された。カロリメーター中のそれぞれのシンチレータータイルからの光が光電面に同時に到着するように、ファイバーの長さを調整した電磁カロリメーターの製作をおこなっている。GEANTシミュレーションにおいても時間分解能は大幅に改善されることが期待されている。

この成果をふまえ、100本からなる性能安定性試験のためのプロトタイプを平成6年度中に製作した後に、最終的製作を開始する。低運動量のハドロン識別のために、電磁カロリメーターに数百ピコ秒程度の時間分解能の機能を付加させる試みも行っている。低運動量のハドロン識別のために、電磁カロリメーターに数百ピコ秒程度の時間分解能の機能を付加させる試みも行っている。我々がテストした電磁カロリメーターは、下左図で示すように、シンチレーティングタイルと鉛板のサンドイッチ構造をしており、それぞれのタイル

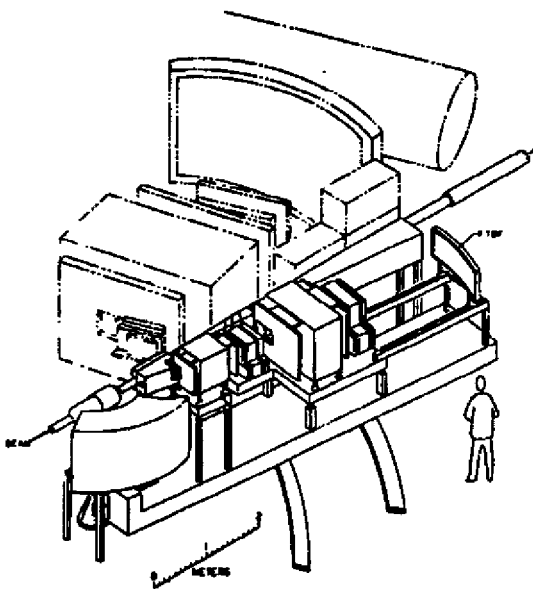


上図；テストに用いた電磁カロリメーターの構造。右図；パイ中間子を垂直入射時観測された時間特性。エネルギーと時間の散布図（上）と時間分布（下）。



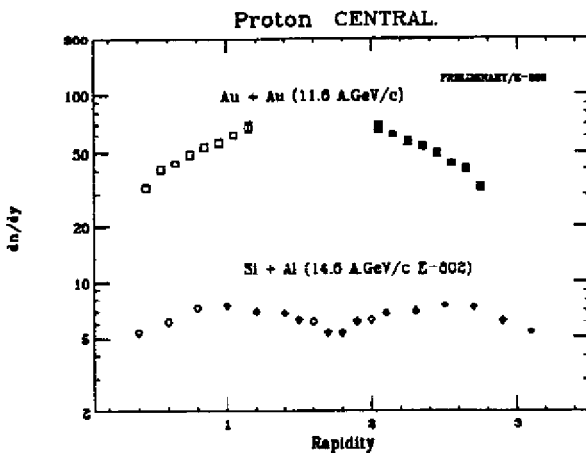
b) 核子あたり10 GeV領域での高エネルギー重イオン衝突実験

ブルックヘブン国立研究所では核子あたり12 GeV/cの金の原子核ビームの加速に世界ではじめて成功し、金の原子核同士の中心衝突実験を行なった。Au + Au衝突では生成粒子の多重度が高くなるために従来のSi + Au衝突用に建設されたスペクトロメーターでは十分に反応中心領域の観測を行うことが出来ない。このためAu + Au衝突観測のためのスペクトロメーターを新たに建設を行い、初めての測定を行った。筑波大で開発した回路を組み込んだ高時間分解能飛行時間測定装置は、時間分解能50ピコ秒以下の性能を示している。Au + Au衝突における粒子生成の研究のために十分なデータを収集し、解析を進めている。現在は筑波大における計算機資源が不十分であるためにブルックヘブン研究所にて解析作業を進めている。



上図：Au + Au衝突用スペクトロメーター

新スペクトロメーターによる測定と同時に、測定可能な後方において、旧スペクトロメーターを用いて、データを収集した。観測された陽子のラビディティ分布をSi + Al衝突と比較して示す。Si + Al衝突の場合は、ラビディティ (y) が1と2.5付近にピークが見られる。これらは標的核と入射核核子が衝突の結果、 $y \sim 1$ シフトをおこしたと考えられる。ところが、Au + Au衝突では、前述の通り中心領域はまだ測定されていないものの、明らかにSi + Al衝突の場合とは異なり、衝突系重心付近にピークを示す様子が観測された。これは、Au + Au中心衝突では、金原子核は十分な阻止能を持ち入射核子はその運動エネルギーを失ってAu + Au衝突系重心に停止したものと考えられる。高エネルギー密度達成のための必要条件が満たされていることを意味している。今後の解析結果が待たれる。



左図：Si + Al、Au + Au中心衝突における陽子のラビディティ分布。

(2) ハドロン-原子核反応 (新井一郎, 富沢和之, 八木浩輔)

a) 核物質からのストレンジ・クォークの生成と偏極の研究

-後方 Λ および K^0 粒子生成-

はじめに Λ 粒子は、ストレンジ・クォーク (以下s-クォークと呼ぶ) を含んだ最も軽いバリオンである。s-クォークは通常の原子核中には存在しない。このため、 Λ 粒子の生成は必ず次の2つの過程、すなわち、

(1) s-クォーク・反s-クォーク対の生成

(2) s-クォークと $(ud)_8$ -ダイクォークとの再結合

を伴う。 Λ 粒子のこのような性質をプローブとして利用することによって、原子核のクォーク構造および種々の反応におけるクォーク力学を探ることができると考えられる。更に、弱崩壊 $\Lambda \rightarrow \pi^- + p$ の非対称度から Λ 粒子の偏極度が測れるが、偏極度は反応機構を敏感に反映する。また、 K^0 粒子についても全く同様のことが言える。ただし、この場合、生成過程は反s-クォークとd-クォークとの再結合が主なものとなり、 Λ 粒子とは相補的なプローブと考えられる。

本研究では、特に、 π^- -原子核反応による後方 Λ および K^0 粒子生成を調べている。後方粒子生成というのは、入射粒子と原子核中の核子との準自由反応では運動学的に生成が禁止されるような後方角度領域への粒子の生成である。したがって、この反応においては、原子核内部の多核子効果が際立って顕われると考えられる。

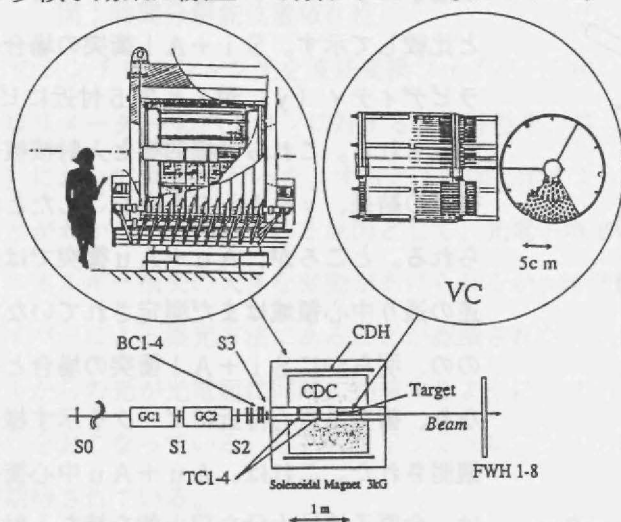


図1. 実験セットアップ

我々は、高エネルギー物理学研究所12GeV陽子シンクロトロンを用いて、一連の実験

(1) $\pi^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow \Lambda / K^0 + X$ at 4 GeV/c

(2) $\pi^- + {}^6\text{Li} \rightarrow \Lambda / K^0 + X$ at 4 GeV/c

を進めてきた。測定装置としては、同研究所の汎用大立体角多重粒子スペクトロメータFANCYを利用し、その内部に Λ および K^0 粒子崩壊バーテックス検出装置を新たに組み込んだ(図1)。また、実験(2)では前方放出粒子(K^0 中間子、 π 中間子など)を測るために前方大立体角スペクトロメータを増設した。生成される Λ 粒子は、 \sim 数cm飛行したのち、 π^- 中間子と陽子へ弱崩壊する。 Λ 粒子の識別は、

(1) 崩壊バーテックスの検出

(2) 崩壊生成物(π^- , p)系の有効質量

によって行った。また、 K^0 粒子は、 \sim 数cm飛行したのち、(π^+ , π^-)中間子対へ弱崩壊するが、 Λ 粒子と同様にして識別される。崩壊バーテックス検出の条件は決定的で、これによって Λ および K^0 粒子を明瞭に識別することができた(図2)。我々は、後方生成 Λ および K^0 粒子の微分断面積と Λ 粒子の偏極度を実験室系 $70^\circ \sim 140^\circ$ にわたって測定した。

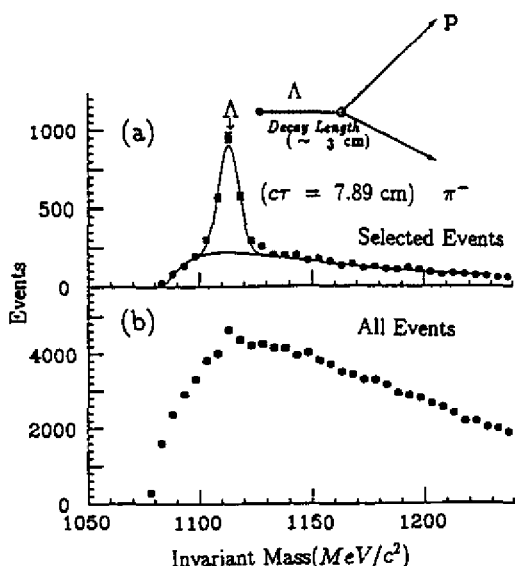


図2. (π^- , p)系の不変質量分布；
 パーテックス検出(a)有り(b)無し

後方 Λ 粒子生成 実験(1)において、我々は世界ではじめて後方 Λ 粒子生成のカウンター実験を行い、その方法を確立した。その結果、従来の泡箱実験の約10倍の統計を得る事ができた。この実験結果を理解するため、2つの理論的なモデル、

- (1)ハドロン描像：核内Fermi運動を考慮した素過程 $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$ の重ね合せ
- (2)クォーク描像：コヒーレント・チューブによる生成に再結合時のトーマス歳差を組み入れたクォーク-パートン模型

にもとづいて計算を行った。その結果、ハドロン描像では全く実験データを再現出来なかった。一方、クォーク描像によると微分断面積と偏極度がともによく再現できた。

実験(2)は ${}^6\text{Li}$ 標的を使ってこの反応の核種-依存性を調べるために行われた。微分断面積については、 ${}^{12}\text{C}$ の場合の約1/3の値を示している。一方、偏極度については ${}^{12}\text{C}$ の場合と同じ振幅を示している。(2)のクォーク描像にもとづいて計算を行った結果、微分断面積と偏極度ともによく再現できた(図3、図4)。ただし、計算では、s-クォークと $(ud)_a$ -ダイクォークとの再結合係数が反応に関与する核子数(i)に比例する $(0.04i)$ と仮定した。再結合係数のi-依存性は、反応に関与する多核子クラスターにおいて、核子のバグ・サイズの変化などによって、ストレンジ・クォークの海が変容することによるためと考えることもできよう。

後方 K^0 粒子生成 実験(1)の全データと実験(2)の約2/3のデータ解析を終了し、予備的結果を得ている。これらは、世界で初めて測定されたデータである。 Λ 粒子の場合と同様に、再結合係数のi-依存性(この場合、 $0.03i$)を仮定したクォーク描像による理論的なモデル計算によって、ある程度よく再現される。しかし、とくに実験室系 90° より後方で実験値が大きくなり、再現性が悪くなる。

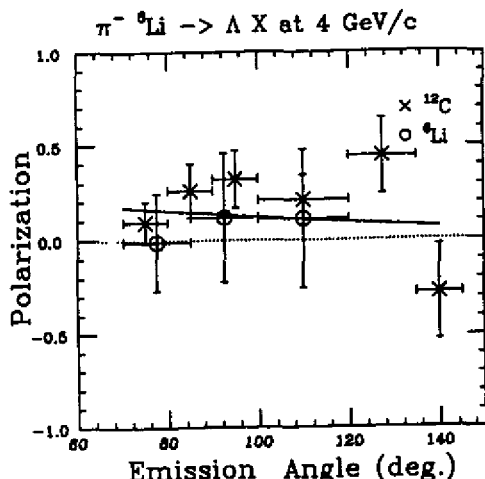


図3. 偏極度：実線は(2)のモデル計算

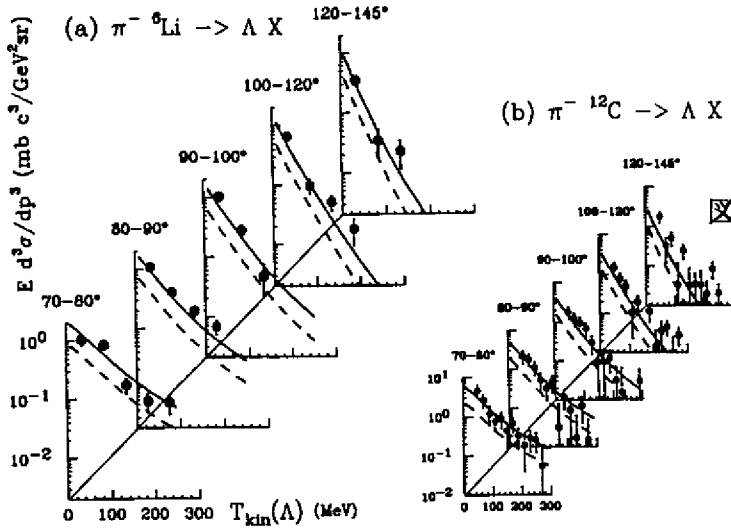


図4. 不変微分断面積：実線は(2)のモデル計算；破線は再結合係数一定 (0.04) の計算

b) $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu \nu$ 崩壊における時間反転不変性の破れの研究

時間反転不変性 (T-不変性) は最も基本的な対称性であり、その破れを探ることは標準モデルを超えるあらたな物理の領野を直接的に切り開くことを意味する。CPT定理の普遍性を仮定した場合、T-不変性はCP-不変性を意味し、CPの破れの機構を探ることとも密接に関係してくる。

我々は、昨年度より、カナダ・韓国・日本・ロシアの国際共同研究として、『 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu \nu$ 崩壊における時間反転不変性の破れの研究』を、文部省高エネルギー物理学研究所 (KEK) の12-GeV陽子シンクロトロンを用いて開始した (共同利用実験E246)。実験はKEKのK5ビームラインで超伝導トロイダル電磁スペクトロメータを用いて行なわれ、 K^+ 中間子の崩壊平面にたいして垂直方向の μ^+ 中間子の偏極 (P_T) を測定する。 P_T は時間反転にたいして符号が変わる量なので、もし0でない P_T が観測されればT-不変性が破れていることになる。

この実験はこれまでの実験に較べて、

- (1) トロイダル配置によるカウンターの効率の自動補正
- (2) 前方 π^0 放出事象と後方 π^0 放出事象の μ 崩壊非対象度の比 (2重比) の測定
- (3) 横方向 π^0 放出事象によるゼロ非対象度の測定

という点で系統誤差を小さくする工夫がなされており、 9×10^{-4} 以下の感度をめざしている。

我々筑波大グループでは、ビーム・チェレンコフ・カウンター、データ収集系、トリガー系、 μ^+ 中間子ポーラリメータなどを担当している。

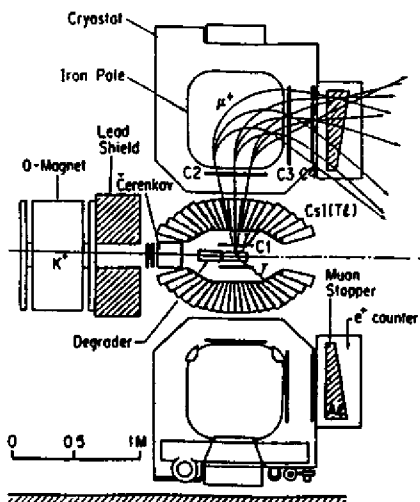


図5. 実験セットアップ

〈論文〉

1. Fletcher,K.A., Black,T.C., Karwowski,H.J., Ludwig,E.J. and Tagishi,Y. : A Deuteron Tenser Polarimeter for Energies below 90 keV, Nucl. Instr. Methods A329, 197 (1993)
2. Arai,I., Kato,N., Kitayama,H., Nagasaka,Y., Tomizawa,K. and Yagi,K. : Polarizations and Cross Sections of L Hyperons Produced at Backward Angles on Nuclei by Pions,Frontiers of High Energy Spin Physics, 691-696 (Universal Academy Press, Tokyo, 1993)
3. Yagi,K. : Study of Two Nuclear Correlation in Nuclei and the Related Nuclear Collective Motion by Using Nuclear Reactions, Nuclear Studies 38, no.2, 28-51 (1993)
4. Yagi,K. : PHENIX Experiment at BNL-RHIC, Proc. Second Japanese-Korea Joint Workshop on Strangeness in Nuclear Matter (Seoul, 1994)
5. Miake,Y. : Strangeness Production in Heavy-Ion Collisions, *ibid*
6. Miake,Y. : Goals of the PHENIX Experiment, Nuclear Studies 38, no.1, 33-42 (1993)
7. Miake,Y. and Yagi,K. : Search for the Quark-Gluon Plasma, Physical Science Magazine, Parity, Vol.8, no.5, 36-40 (1993)
8. Yagi,K. : Can We Reach the Time Right After the Big Bang, Physical Science Magazine, Parity, Vol.8, no.6, 31-37 (1993)
9. Akiba,Y., Kurita,K., Miake,Y., et al. : Bose-Einstein Correlation of Kaos in Si+Au Collisions at 14.6 A GeV/c, Phys. Rev. Lett. 70, 1057-1060 (1993)
10. Abbott,T., Kurita,K., Miake,Y., et al. : Azimuthal Asymmetries of Particles Emitted in Relativistic Heavy-Ion Collisions, Phys. Rev. Lett. 70, 1393-1396 (1993)
11. Abbott,T., Kurita,K., Miake,Y., et al. : Antiproton Production in p+A Collisions at 14.6 GeV/c, Phys. Rev. C47, R1351-R1355 (1993)
12. Becker,H., Miake,Y., et al. : Identified Pion Interferometry in Heavy-Ion Collisions at Cern, Phys. Lett. B302, 510-516 (1993)
13. Ahle,L., Kurita,K., Miake,Y., Yagi,K., et al. : Backward Emission of Protons in Au+Au Collisions at 11.7 A GeV/c, Nucl. Phys. A 566, 443-446 (1993)
14. Akiba,Y., Kurita,K., Miake,Y., et al. : Recent Results from E859 Using Si beams at 14.6 A GeV/c, Nucl. Phys. A566, 269-276 (1993)
15. Boeggild,H., Miake,Y., et al. : Single Particle Spectra from NA44, Nucl. Phys. A566, 515-518 (1993)
16. Komatsubara,T., Furuno,K., Hosoda,T., Mukai,J., Hayakawa,T., Morikawa,T., Iwata,Y., Kato,N., Espino,J., Gascon,J., Gjørup,N., Hagemann,G.B., Jensen,H.J., Jerrestam,D., Nyberg,J., Sletten,G., Cedewell,B. and Tjøm,P.O. : High-Spin States in Odd-Odd Nuclei, Nucl. Phys. A557, 419c-438c (1993)
17. Mukai,J., Odahara,A., Tomura,H., Suematsu,S., Mitarai,S., Kuroyanagi,T., Jerrestam,D., Nyberg,J., Sletten,G., Ataç,A., Arnell,S.E., Roth,H. and Skeppstedt,Ö. : High Spin States in the Odd-Odd Nucleus ^{82}Y , Nucl. Phys. A568, 202-220 (1994)
18. Ogawa,S., Kownacki,J., Carpenter,M.P., Gascon,J., Hagemann,G.B., Iwata,Y., Jensen,H.J., Komatsubara,T., Nyberg,J., Sletten,G., Tjøm,P.O., Walus,W. and Hamamoto,I. : Shapes, Electromagnetic Properties and Enhanced E1 Strength in ^{169}Lu ,

Nucl. Phys. A559, 100 (1993)

19. Juutinen,S., Törmänen,S., Ahonen,P., Cederwall,B., Fant,B., Johnson,A., Julin,R., Mitarai,S., Mukai,J., Nyberg,J., Piiparinen,M., Virtanen,A. and Wyss,R. : Competing Proton and Neutron Alignments in $^{117-120}\text{Xe}$, Nucl. Phys. A553, 531c (1993)
20. Mitarai,S., Kuroyanagi,T., Odahara,A., Mukai,J., Tomura,H., Suematsu,S., Morikawa,T., Jerrestam,D., Nyberg,J., Sletten,G., Ataç,A., Piiparinen,M., Arnell,S.E., Foltescu,D., Roth,H.A. and Skeppstedt,Ö. : Band Structures of Nuclei around N, Z=40 Selected by Charged Particle Detection, Nucl. Phys. A 557, 381c-390c (1993)
21. Komatsubara,T., Mukai,J., Hayakawa,T., Lu,J., Furuno,K., Nyberg,J., Jensen, H.J., Cederwall,B., Hagemann,G.B. and Sletten,G. : Rotational Structure of Odd-Odd Nuclei in A~130 Region : Abst. of Intern. Symp. on Frontiers of Nuclear Structure Physics, RIKEN Japan, 1994, pp.35
22. Lu,J., Komatsubara,T., Mukai,J., Hayakawa,T. and Furuno,K. : M1 Component of Quasi- γ Band Transitions in A~130 Nuclei, *ibid.* pp.36
23. Lee,S.M., Honjo,Y., Kurita,T., Tomita,S. and Mizota,T. : Comparison of Secondary Emitted Cluster Distributions from the thin Graphite- and C_{60} -foils Bombarded by ^{252}Cf Fission Fragments, *ibid.* pp.39
24. Mizota,T., Lee,S.M., Futami,Y., Honjo,Y., Tomita,S. and Matsuse,T. : Revisit of Heavy Ion and Cluster Impact d+d Fusion : *ibid.* pp.44
25. Bizard,G., Durand,D., Genoux-Lubain,A., Loubel,M., Bougault,R., Brou,R., Doubre,H., El-Masri,Y., Fujiwara,H., Hagel,K., Haifani,A., Hanappe,F., Jeong,S.C., Jin,G.M., Kato,S., Laville,J.L., LeBrun,C., Lecolley,J.F., Lee,S.M., Matsuse,T., Motobayashi,T., Party,J.P., Peghaire,A., Peter,J., Prot,N., Regimbart,R., Saint-Laurent,F., Steckmeyer, J.C. and Tamain,B. : Three Fragment Sequential Decay of Heavy Nuclei around 3 MeV/u Excitation Energy, Phys. Lett. B276, 413-417 (1992)
26. Tanimoto,H., Mizubayashi,H., Nagasawa,M., Okuda,S. and Tagishi,Y. : Internal Friction Measurement of 20 MeV Proton Irradiated Mo, Mat. Sci. Forum 119/121, 158 (1993)
27. Kudo,H., Yoshida,E. and Ishihara,T. : Surface Layer Analysis of Sputter-Etched Si Using Secondary Electrons Induced by Fast Ions, Jpn. J. Appl. Phys. 32, L650-L653, (1993)
28. Kudo,H., Shima,K., Ishihara,T., Takeshita,H., Aoki,Y., Yamamoto,S. and Naramoto,H. : High-Energy Shadowing Effect and Its Application to Atomic and Solid State Physics, Proc. 15th Int. Conf. on Atomic Collisions in Solids (Ontario, Canada, 1993)
29. Inoue,T., Kudo,H., Fukusho,T., Ishihara,T. and Ohsuna,T. : Characterization of Epitaxially Grown CeO_2 Layers on Si by Means of Shadowing Pattern Imaging with Fast Ion Beams, Jpn. J. Appl. Phys. 33, L139-L142, (1994)
30. Nagashima,Y., Yoshizawa,N., Shioya,H., Takahashi,T., Kaikura,T., Tajima,Y., Aoki,T. and Furuno,K. : The Construction of an Accelerator Mass Spectroscopy System with 12UD Pelletron Tandem Accelerator at the University of Tsukuba, Proc. 5th Japan-China Joint Symp. on Accelerators for Nucl. Sci. and their Applications (Osaka, 1993) pp.43
31. Nagashima, Y., Nakajima, S., Takahashi, T., Kaikura, T., Tajima, Hayakawa, T., Takahashi, K., Mukai, J., Shima, K., Aoki, T., and Furuno, K. Accelerator Mass

Spectroscopy with ^{14}C and ^{26}Al at the University of Tsukuba Nucl. Instrum. Methods A328, (1993)

32. Tagishi, K. and Katabuchi, T. : Collective Diffusion of the Deuterium Atoms Implanted in a Silicon Single Crystal, Proceedings of the 12th Symposium on Ion Beam Technology Hosei University, 1993, 103

〈学位論文 (博士)〉

1. Masaki Mitsuhiro : CDCC Analysis of 22MeV Deuteron Elastic Scattering and (d,p) Reactions on ^{52}Cr and ^{206}Pb
2. Nagasaka Yasushi : Backward Production of Neutral Kaons in π -Nucleus Reactions at 4GeV/c
3. Lu Jun : Systematical Study of Quasi- γ Band in A~130 Nuclei

〈学位論文 (修士)〉

1. Mukouhara Yoshihide : Development of a Proton Polarimeter using a Liquid Helium Target
2. Kumagai Arata : On-Tube Discriminator System in Time-of-Flight Detectors for High Energy Heavy Ion Experiment
3. Ikeda Tokihiro : Design of the Muon Polarimeter for KEK-PS E246 Experiment
4. Tobinai Hirokuni : Ring-Image Cherenkov Counters and Neural Network System
5. Ohki Shinobu : Improvement of the Post-Accelerator Chopper for the Tandem Accelerator at the University of Tsukuba

〈講演〉

1. Yagi, K. : The Present Status of PHENIX-J Project, Proc. Workshop of RHIC-PHENIX Project (Lund, 1993)
2. 佐藤進、倉田美月、熊谷荒太、上野祥子、加藤純雄、栗田和好、三明康郎、八木浩輔 : RHIC PHENIX実験のための高時間分解能飛行時間測定器の設計、日本物理学会、高知大学、1993年10月
3. 倉田美月、佐藤進、熊谷荒太、上野祥子、加藤純雄、栗田和好、三明康郎、八木浩輔 : RHIC PHENIX実験のための高時間分解能飛行時間測定器の開発、日本物理学会、高知大学、1993年10月
4. 熊谷荒太、上野祥子、倉田美月、佐藤進、加藤純雄、栗田和好、三明康郎、八木浩輔 : BNL-AGS重イオン衝突実験のための On tube discriminator を用いた飛行時間測定器 (58 ps) の製作、日本物理学会、福岡工業大学、1994年3月
5. 上野祥子、加藤純雄、熊谷荒太、倉田美月、栗田和好、佐藤進、三明康郎、八木浩輔 : Particle Production from 11AGeV/c Au+Au Collisions (AGS-E866) I --- The E866 Forward Spectrometer、日本物理学会、福岡工業大学、1994年3月
6. 上野祥子、加藤純雄、熊谷荒太、倉田美月、栗田和好、佐藤進、三明康郎、八木浩輔 : Particle Production from 11AGeV/c Au+Au Collisions (AGS-E866) II --- Tracking System of the Forward Spectrometer、日本物理学会、福岡工業大学、1994年3月

94年3月

7. 上野祥子、加藤純雄、熊谷荒太、倉田美月、栗田和好、佐藤進、三明康郎、八木浩輔：Particle Production from 11AGeV/c Au+Au Collisions (AGS-E866) III --- PID system of the Forward Spectrometer、日本物理学会、福岡工業大学、1994年3月
8. 上野祥子、加藤純雄、熊谷荒太、倉田美月、栗田和好、佐藤進、三明康郎、八木浩輔：Pion Production from 11AGeV/c Au+Au Collisions (AGS-E866) --- Henry Higgins Spectrometer、日本物理学会、福岡工業大学、1994年3月
9. 八木浩輔：相対論的重イオン科学、KEK-筑波大シンポジウム、1993年5月
10. 八木浩輔：原子核反応の展開、核子系からクォーク・グルーオン系へ、原子核科学の最前線シンポジウム、大阪大学、1993年10月
11. 八木浩輔：ビッグバン直後に到達できるか、東工大理学部シンポジウム、1993年12月
12. Arai,I., Chiba,J., Kato,N., Kitayama,H., Kobayashi,T., Manabe,A., Nagae,T., Nagasaka,Y., Numura,I., Pantuev,V., Sekimoto,M., Tanaka,M., Tomizawa,K. and Yagi,K. : Strangeness Production from Nuclear Matter in Backward Particle Production, The Second Japanese-Korean Joint Workshop on "Strangeness in Nuclear Matter", 1993, Seoul, Korea.(Invited Talk)
13. 正木満博、中川智、加藤健一、中本徳仁、田岸義宏、青木保夫：22MeV重陽子弾性散乱と(d,p)反応の新しいタイプの光学ポテンシャルを用いたCDCC解析、日本物理学会、高知大学、1993年10月
14. 広田克也、正木満、中川智、向原嘉英、木下英昭、田岸義宏、青木保夫：(p,n)反応閾値付近での偏極陽子弾性散乱、日本物理学会、福岡工業大学、1994年3月
15. 青木保夫、田岸義宏、正木満、木下英昭、広田克也：陽子弾性散乱への(p,n) thresholdの影響、東大、原子核研究所研究会「弾性散乱・非弾性散乱移行反応の統一的理解に向けて」、1993年
16. 広田克也、青木保夫、田岸義宏、正木満、木下英昭： ^{16}O 、 ^{28}Si のデータと解析、東大、原子核研究所研究会「弾性散乱・非弾性散乱移行反応の統一的理解に向けて」、1993年
17. 田岸義宏、片淵竜也、木下英明、向原嘉英：重陽子核融合反応を利用した金属中重水素原子拡散の新しい測定法、第6回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会、九州大学、1993年7月
18. 田岸義宏：Si中での注入重水素原子の拡散、筑波大学開学20周年記念研究会「クラスター・高分子の高速加速と物理」、1993年10月
19. 田岸義宏：Si結晶中での重水素原子の干渉性拡散、第12回法政大学イオンビーム工学シンポジウム
20. 田岸義宏：重水素のSi結晶中での集団運動的拡散、第49回日本物理学会年会、1994年3月
21. 古高和禎、矢島亨、明星慶洋、松田清秀、笠木治郎太、村上健、二見康之、中川恵子、溝田武志、本城義夫、冨田成夫、豊川秀訓、李相茂、中川孝秀、村上哲也、沢田真也、中井陽一、吉田健一郎、A. Galonsky、G. Bizard：入射エネルギー

ギー 30, 37 MeV/u での $^{40}\text{Ar} + ^{116}\text{Sn}$ 反応において放出される中性子の測定、日本物理学会、高知大学、1993年10月

22. 二見康之、富田成夫、本城義夫、溝田武志、松田清秀、古高和禎、蒲越虎、中川恵子、笠木治郎太、中川孝秀、李相茂、W.Q. Shen： $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$, ^{56}Fe ($E_{\text{I}} = 10.5 \text{ MeV/u}$) 反応における核分裂片と軽粒子の相関、日本物理学会、高知大学、1993年10月
23. 李相茂：クラスター高速加速による物理の展望、筑波大学開学20周年記念研究会「クラスター・高分子の高速加速と物理」、1993年10月
24. 溝田武志：Heavy Ion and Cluster Impact D+D Fusion、筑波大学開学20周年記念研究会「クラスター・高分子の高速加速と物理」、1993年10月
25. 溝田武志：高速重イオン・クラスター衝撃による d+d 核融合反応、「短寿命核ビームの科学'93」、東京大学原子核研究所、1993年12月
26. 李相茂：原子核分裂とマイクロ・クラスター分裂、日本物理学会、福岡工業大学、低温、物性基礎論合同シンポジウム、「多自由度系における量子トンネル効果」1994年3月
27. 溝田武志：Heavy Ion and Cluster Impact D+D Fusion in TiD、日本物理学会、福岡工業大学、原子核実験、放射線物理、原子・分子合同シンポジウム「クラスターイオンビームの物理 ニューフロンティアを求めて」、1994年3月
28. 富田成夫、溝田武志、本城義夫、李相茂：Colutron イオン源による C_{60} イオンの生成、日本物理学会、福岡工業大学、1994年3月
29. 石原豊之、他（加速器グループ）：筑波大タンデム加速器の現状、第6回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、九州大学、1993年7月
30. 大和良広、古野興平：筑波大タンデムの新旧加速管の比較、第6回タンデム加速器およびその周辺技術の研究会、九州大学、1993年7月
31. 大橋国雄、玉野井逸朗、松本信二、村越善次、石原豊之、大島弘行、島邦博：PIXE 法による 2～3 の元素の分析、第11回 PIXE シンポジウム、筑波大、1993年10月
32. 大島弘行、石井聡、石原豊之、島邦博、小川勇二郎、西村はるみ、川田多加子：泥土の軽元素の分析、第11回 PIXE シンポジウム、筑波大、1993年10月
33. 呂駿、早川岳人、小松原哲郎、向淳子、古野興平：M1/E2 mixed transitions from quasi- γ band in A~130 nuclei、日本物理学会、高知大学、1993年10月
34. 早川岳人、呂駿、渡辺敏彰、芳沢憲明、松田誠、向淳子、小松原哲郎、古野興平： ^{128}La のスピン決定、日本物理学会、高知大学、1993年10月
35. 向淳子、渡辺敏彰、松田誠、早川岳人、小松原哲郎、古野興平：筑波ボール周辺装置の開発、日本物理学会、福岡工業大学、1994年3月

36. 呂駿、向淳子、小松原哲郎、早川岳人、松田誠、渡辺敏彰、芳沢憲明、古野興平： γ -ray spectroscopy of ^{128}Ce 、日本物理学会、日本物理学会、福岡工業大学、1994年3月
37. 松田誠、呂駿、早川岳人、渡辺敏彰、向淳子、小松原哲郎、古野興平： ^{134}Ce の high spin state、日本物理学会、福岡工業大学、1994年3月