IV. 原子核実験グループ

古野興平、小松原哲郎、向　淳子、石原豊之、李　相茂、溝田武志、豊川秀訓、青木保夫、
田岸義宏、竹内雄三、八木浩輔、三明康郎、新井一郎、栗田和好、富沢和之、加藤純雄

【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

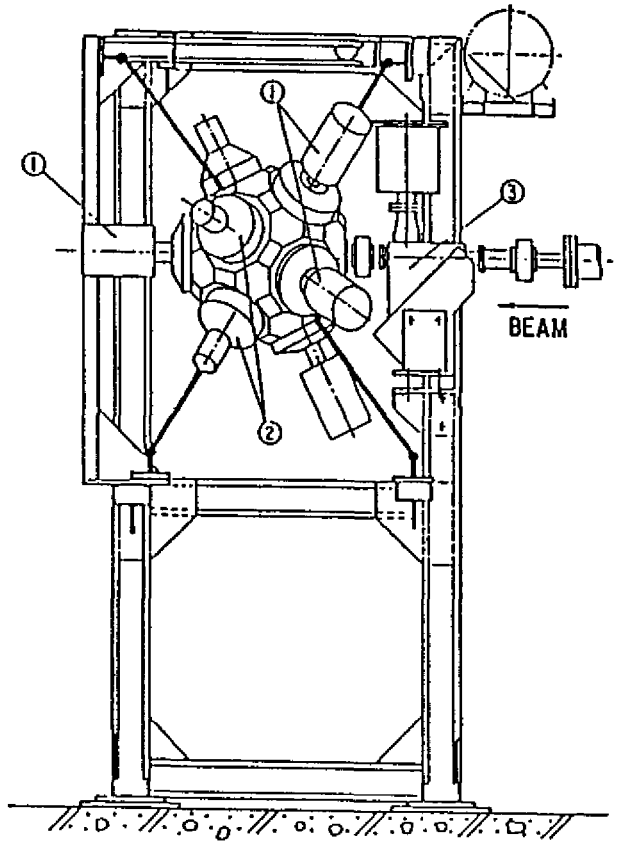
(1) クリスタルボール型ガンマ線検出器の建設（向　淳子、小松原哲郎、古野興平）

イン・ビームガンマ線分光学による原子核構造の研究は、1980年の中頃から、重イオン核反応と、通称クリスタルボールと呼ばれる多重検出器システムを用いることによって急速に進み、一連のガンマ線放射で結ばれた大きな角運動量を持つ励起状態群（バンド）が広い質量数にわたって幾つも観測されるようになった。

多重検出器システムは、2～3個の検出器を使った古い型の実験に比べて同時計数に対する感度が遙かに高くなるために、今まで観測できなかった強度の弱い遷移まではっきりと観測される。また、夥しい数の一連のガンマ線放射系列の中から、同時計数によって特定の放射系列のみを選択して観測する事が出来る。言換えれば多くのバンドの中から特定のバンドを取りだし、一つ一つのバンド毎に、各状態の励起エネルギー、スピン、パリティ、バンド内にある二つの状態間の電磁遷移確率を定めることができる。したがって実験データーが質・量共に向上し、その結果、超変形状態の発見、Band termination、対相関の減少、非軸対称変形など、原子核構造理論の新たな展開をもたらした。

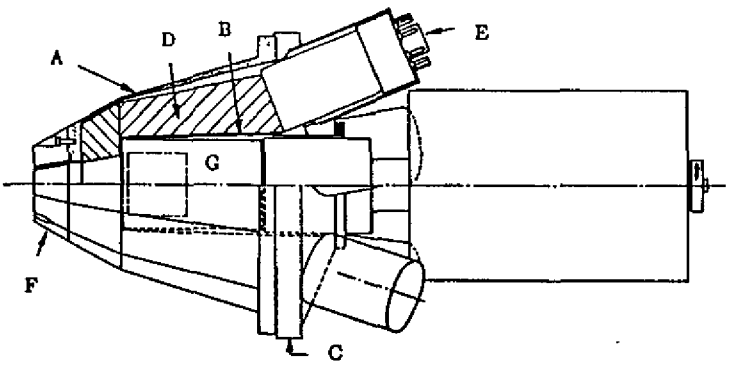
原子核構造の実験では、原子核を壊さずに、目的とする現象を観測するのに適当な励起エネルギーを与えなければならないが、加速器センターのタンデム加速器と重イオン後段加速器は、まさにこのために相応しい加速器である。そこで我々は、それを用いて上に述べたような原子核構造の研究を行なうために、小型のクリスタルボール型検出器を設計・製作した。

図−1に加速器センターの重イオン後段加速器コースに設置したクリスタルボールの側面外観図を示す。主要検出器として6台の高分解能・ゲルマニウム・ガンマ線検出器を正12面体を基礎にしたフレームに取り付けた。フレームの中心にターゲットを置き、それに加速器からのイオンビームを照射して高励起・高スピン状態を生成する。そこから発生するガンマ線を測定するが、それぞれのゲルマニウム検出器は図−2に示すようにBGO（ビスマス・ゲルマネイト）結晶のシンチレーション検出器で



図−1　加速器センターに設置されたクリスタルボール型ガンマ線検出器。丸で囲んだ数字は1がコンプトン抑制型ガンマ線検出器、2は大型中性子検出器、3はスピン・パリティの決定に用いる内部転換電子スペクトロメーターである。

囲んである。このBGO検出器とゲルマニウム検出器とをいわゆる逆同時計数(anti-coincidence)モードで動作させると、ゲルマニウム検出器内でのコンプトン散乱を除く事が出来る。その結果、ゲルマニウム検出器のスペクトルにおいて、コンプトン散乱が原因で生ずるバックグラウンドが著しく抑制され、相対的に光電吸収ピークが強調されるので、弱い遷移のガンマ線が観測されやすくなる。ガンマ線検出器としての立体角は6×10^{-3}であり、この立体角と6台という検出器の数は、単位時間当りの2重同時計数が古典的実験条件、すなわち二つのガンマ線検出器をターゲットに出来る限り近づけた場合と同程度になるという条件のもとに、簡単な確率の計算から決めた。現在、ガンマ線検出器のみで実験を行なっているが、これに加えて以下の様な検出器の準備を進めている。



図−2　コンプトン抑制型ガンマ線検出器。アルミニウムの正10角錐(A)、内筒(B)、ベースフランジ(C)で囲まれたケースに5組のBGO結晶(D)を入れ、光電子増倍管(E)を取り付けてある。(G)はゲルマニウム検出器、(F)はコリメーターである。

1) 荷電粒子フィルター：重イオン核反応で生成される原子核は一種類ではなく、幾つかの異なるものが生成される。目的の原子核を生成する断面積が他に比べて圧倒的に大きい時は良いが、そうでない場合には目的の原子核だけを選び出す工夫が必要である。高スピン状態を生成する反応機構はいわゆる複合核反応で、幾つかの中性子、陽子、またはアルファ粒子の放出を伴う。これらの粒子が一回の核反応当り何個放出されたかを知ることができれば残留核が分かる。このための5個の大型中性子検出器とシリコン検出器による陽子・アルファ粒子検出器の製作を現在進めている。

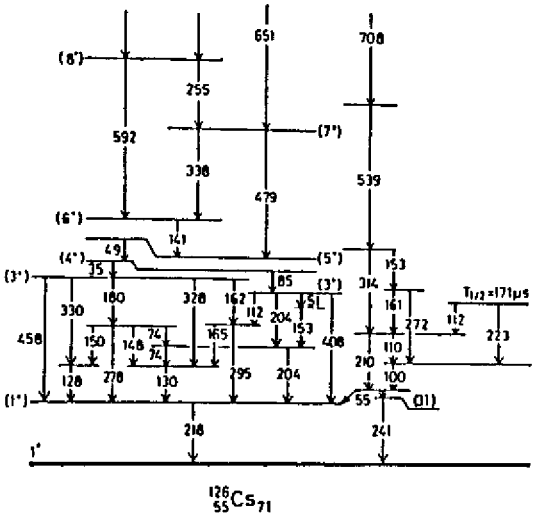
2) 内部転換電子検出器：我々のクリスタルボールのもう一つの特徴は、内部転換電子とガンマ線の同時計数を取入れた事である。これは重い原子核の分光学において遷移の多重極度を決めるのに極めて有力な武器となる場合がある。しかし内部転換の確率がガンマ線放射にくらべて小さいのと、イン・ビームの実験ではいろいろな電子のバックグラウンドがあり、内部転換電子の正確な測定が難しいために、これまであまり利用されていない。多重検出器システムに於ける内部転換電子の測定技術の開発を目的として、現在、図−1に示した電磁石とシリコン検出器によるスペクトロメーターをテストしている。

(2) 奇奇核 ^{126}Cs の原子核構造 (小松原哲郎、向　淳子、古野興平)

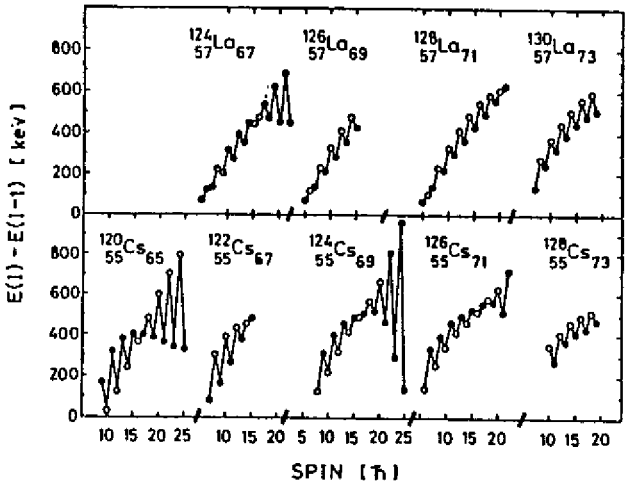
奇奇核は奇数個の陽子と奇数個の中性子からできた原子核である。その構造は偶偶核や偶奇核に比べて複雑といわれ、実験的にも理論的にも多少敬遠される傾向にあった。その理由は、最後の奇数番目の陽子と中性子一個ずつが結合する際、非常に多数の準位が形

成されるからである。しかしクリスタルボール型ガンマ線検出器を用いると、その高い感度と選択性によって奇奇核のような複雑な核構造が研究できるようになった。原子核の中で陽子−中性子間相互作用は、核の変形その他に重要な役割を演じているが、奇奇核の研究はこの相互作用を調べる上で非常に重要である。また、我々の研究の中からイラストバンドにおける指標逆転という奇妙な現象が発見された。

実験はデンマークのニールス・ボーア研究所において、NORDBALL 検出器による国際共同研究で高スピンバンドを観測し、後に筑波大学加速器センターに於いて低い励起状態を詳細に調べてバンドヘッドのスピンを決定した。その結果得られた ^{126}Cs の励起準位の一部を図−3 に示す。^{126}Cs の励起状態は 65 MeV の ^{14}N ビームにより、^{116}Cd(^{14}N,4n)^{126}Cs 反応で生成した。励起準位のスピンおよびパリティは加速器センターに於けるガンマ線の角度分布と直線偏光の測定に基づく。図−3 で 592 keV と 479 keV の E2 遷移から始る回転バンドがイラストバンドである。このバンドの内部粒子配位は、バンド交差現象が近隣の偶偶核や奇偶核よりも高い角運動量で起こり、それがパウリ原理に基づくブロッキング効果によるものとして矛盾が無いことから、$\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 配位であると推論される。また、このバンドが正のパリティを持つことが実験的に確かめられたが、これも上の配位と矛盾しない。



図−3



図−4

安定な軸対称変形を持つ原子核の高スピンバンドの性質を良く説明するクランキング模型によれば、陽子も中性子も $h_{11/2}$ 軌道に配位した状態は偶数スピンよりも奇数スピンの状態の方がエネルギーが下がる。図−3 に示したように基底状態からガンマ遷移を積み上げてバンドのスピンを決めてみると、実験結果はクランキング模型の予言とは逆になり、偶数スピンの状態の方が低い励起エネルギーを持つ。これを指標逆転と呼んでいるが、質量数 $A \sim 130$ 領域では ^{124}Cs と共に我々が初めて観測したものである。

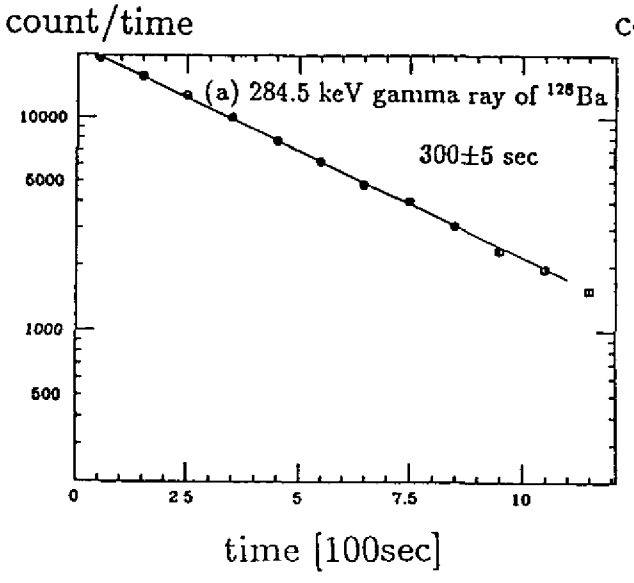
他の核にも類似の現象が有るか否かを見るために、図−4 に Cs と La のアイソトープのイラストバンドを比較して示した。縦軸には $\Delta I = 1$ の遷移エネルギーをスピン I の

関数としてプロットしてあり、白丸が偶数スピン状態のエネルギーと奇数スピン状態のエネルギーとの差を表す。指標逆転は陽子数 55 の Cs アイソトープで系統的に起きていると考えられる。また La アイソトープでも起きているように見える。ただしスピンが実験的に決められたのは ^{124}Cs と ^{126}Cs だけであり、他の核では近隣の核におけるバンド交差などから推定したものに過ぎず、1 ～ 2$\hbar$ の曖昧さが残っていることに注意しなければならない。

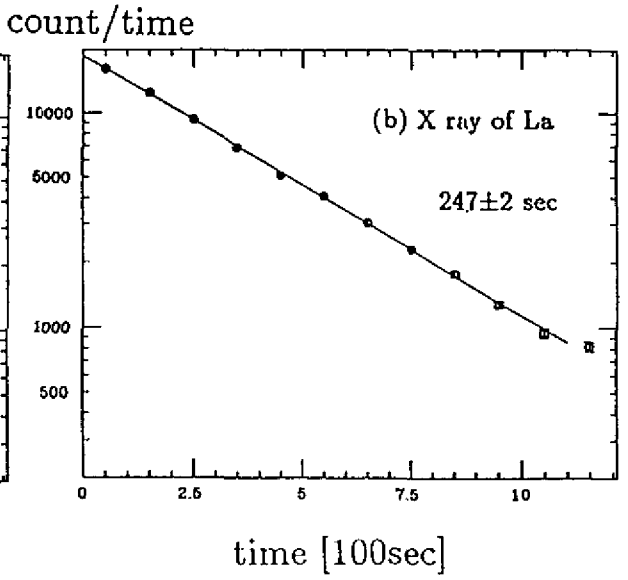
指標逆転現象は質量数 $A \sim 160$ 領域の奇奇核にも報告されている。質量数 $A \sim 160$ 領域では、陽子が変形殻模型で $h_{11/2}$、$\Omega \sim 7/2$ 軌道に、中性子が $i_{13/2}$、$\Omega \sim 1/2$ 軌道を占める奇奇核で指標逆転が観測される。一方、^{124}Cs と ^{126}Cs では陽子は $h_{11/2}$、$\Omega \sim 1/2$ 軌道に、中性子は $h_{11/2}$、$\Omega \sim 5/2$ 軌道を占める。ここで量子数 Ω に注目すると、質量数 $A \sim 130$ 領域の奇奇核と質量数 $A \sim 160$ 領域の奇奇核とで中性子と陽子の Ω の値が入れ替わっていることがわかる。指標逆転の機構はまだ明らかではないが、陽子と中性子のうちどちらか一方が量子数 Ω の大きな値を持ち、他方が小さな Ω を持つという点は両方の領域で共通しているように見える。

（3）^{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)

先に我々は ^{124} Cs と ^{126}Cs において、イラストバンドの指標逆転現象を確認したが、$A \sim 130$ 領域で実験的にはっきりと指標逆転が観測されたのは二例しかなく、もっと系統的なデーターが必要である。本研究はその線に沿って、^{128}La のイラストバンドのスピン、特にバンドヘッドのスピンを実験的に決める事を目的として行なっている。



図−5



図−6

われわれが実験を始めた時には ^{128}La の低励起状態のデーターは全く無いと言っても良いほどであった。そこでまず初めに ^{128}Ce の β 崩壊によって ^{128}La の低い励起状態

[1]大学院物理学研究科、博士課程 3 年

を調べる実験を行なった。^{128}Ce は実験室系エネルギー 105 MeV の ^{28}Si ビームを用い、^{103}Rh(^{28}Si,1p2n)^{128}Ce 反応で生成した。ターゲットは真空中に 1.24 mg/cm^2 の Rh(天然存在比 100%) 薄膜を置き、そのすぐ後に鉛を貼り付けた磁気テープが走行させた。ターゲッドとテープおよびその走行機構はテープトランスポートシステムとして全体を一個の真空槽に納めてある。ビーム照射中に生成された ^{128}Ce は反跳エネルギーによってターゲットから飛出して、テープ上の鉛に捕獲される。一定時間の照射後テープが駆動され、^{128}Ce を含んだ放射能は 0.7 秒で検出器の置いてある位置に移動する。テープトランスポートシステムの検出器位置には薄いマイラー膜を貼り、検出器には Be 薄窓の Ge 検出器を用いて γ 線と X 線のエネルギーを測定すると共に、テープが検出器位置に停止してから Ge 検出器に信号が発生するまでの時間を Multistop TDC で測定した。Multistop TDC の時間分解能は 1 秒である。照射と測定を 2 分−2 分、6 分−6 分、20 分−20 分 の三つの時間領域に分けて実験を行なった。

実験結果の一部を図−5 と図−6 に示す。図−5 は娘核 ^{128}Ba の $2^+ \rightarrow 0^+$ 遷移の 284.5 keV ガンマ線の崩壊曲線である。これから求めた半減期は 300±5 秒であり、これは以前に Zolnowski 等[2]) が報告した値と良く一致する。一方図−6 の La の X 線の半減期は 247±2 秒で明らかな差がある。Zolnowski 等の実験では ^{128}Ce は生成されず親核は ^{128}La までであり、さらに彼等の観測したガンマ線の中に ^{128}Ba の 4^+ や 6^+ 状態から放射されるものが多数あることから、^{128}La のスピンは ～5ħ 程度と結論している。これに対して我々の実験では ^{128}La と ^{128}Ce が生成されている。^{128}Ce は偶偶核で、その基底状態のスピン・パリティは間違い無く 0^+ であるから、ここからは ^{128}La の 0^+ や 1^+ 状態へ β 崩壊が起こる。図−7 の X 線の半減期から、Zolnowski 等が報告したのは ^{128}La のアイソマーからの崩壊の半減期であることが、ほぼ確実となった。さらに確かな励起準位構造を知るために、ガンマーガンマ同時計数実験を行ない、現在その解析を進めている。

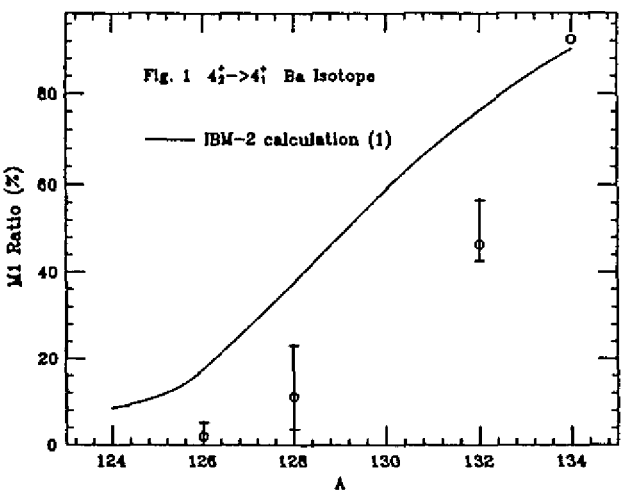
（4）$A \sim 130$ 領域核のガンマバンド(呂　駿[3])、向　淳子、小松原哲郎、古野興平)

質量数 $A \sim 130$ 領域の原子核は古くから γ−不安定核として知られている。四重極変形をした原子核の平均場は β と γ という二つのパラメーターで表される。β を動径方向の座標、γ を方位角座標、これらに直交する軸を z 軸にとった座標系内で、平均場のポテンシャル・エネルギーは曲面を描く。基底状態の原子核はこのエネルギー曲面の極小値附近にあり、その核表面の形は極小値の β と γ で決る。β は球形から軸対称回転楕円体への変形の度合いを与え、γ は軸対称からのずれを与える。γ の値は 0 から 60° までの範囲にあり、$\gamma = 0°$ がラグビーボール型の軸対称変形を、$\gamma = 60°$ はアンパン型の軸対称変形を与える。その中間が非軸対称である。γ−不安定というのはポテンシャルエネルギーが変数 γ の変化に対して僅かしか変らず、安定な平衡変形が期待できないことは勿論、動的な変形すなわち振動にしても、ポテンシャルが浅くゼロ点エネルギーが大きいから振動の非調和性が強くなる。このように軸対称からのずれに関する運動モードに対して、γ 変形または γ 振動という呼びかたをする。これまでのことは巨視的模型での描像であるが、

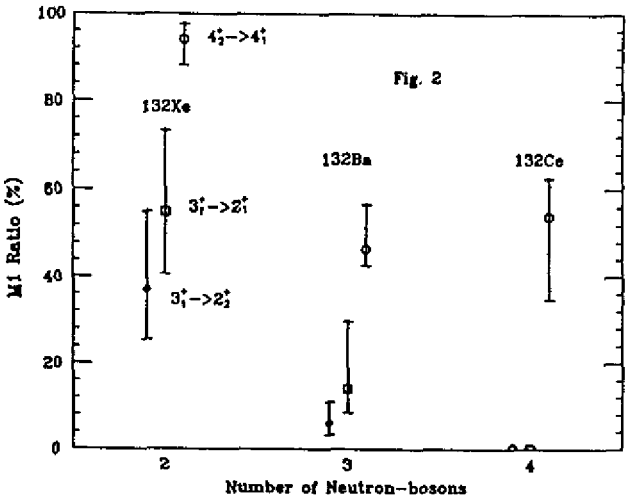
[2]D.R.Zolonowski *et al* Phys. Rev. C16 (1977) 408
[3]大学院物理学研究科、博士課程 4 年

殻模型を基礎とした相互作用ボソン模型 (IBM) では $\gamma = 0°$ が SU(3)、$\gamma = 60°$ が U(5)、γ 不安定は O(6) 対称性を持った系として表現される。

Hf や W のように安定な軸対称変形を持つ偶偶核ではポテンシャルエネルギーに $\gamma = 0°$ 附近のところでやや深い極小値があり、近似的に調和振動をしながら核全体として回転すると考えられる一連の励起状態がある。これを γ バンドと呼ぶ。そして γ バンドから基底回転バンドへの電磁遷移は E2 で M1 は禁止される。



図−7



図−8

$A \sim 130$ の領域に於いて、Xe、Ba、Ce の偶偶核にも γ バンドと見なせる状態があるが、励起準位に Hf や W には無い不規則性があるので、準γバンドと言われてきた。最近我々は ^{124}Ba において、準γバンドの 4^+_γ 状態から基底回転バンドの 4^+_g 状態への遷移に、異常に強い M1 の混合があることを見出した。これは巨視的模型では説明できない。しかし最近発展した、中性子ボソンと陽子ボソンを区別する IBM−2 模型では、M1 の増強や M1 強度のボソン数依存性を予言する事が出来る。

そこで ^{126}Ba と ^{128}Ba について M1 の混合比を測定し、他の実験データーと合せてその系統性を調べた。図−7 にその結果を示す。γ変形を考慮した巨視的模型の計算はまだ無いが、相互作用ボソン模型 (IBM−2) の計算と比較すると、図−7 から明らかなように絶対値では理論値が実験値よりも大きいが、相対的には中性子数が減少するにつれて M1 の割合が減少する傾向が良く再現されている。また、IBM−2 模型によれば陽子ボソン数 N_π と中性子ボソン数 N_ν が等しく $N_\pi = N_\nu$ のとき、O(6) の極限で M1 強度は鏡映対称性による規則性があるが、図−8 に示したデーターはこの IBM−2 の規則性とほぼ一致する。

今後、もっと高いスピン状態まで γ バンドと基底回転バンドの間の電磁遷移確率が正確に求められれば、γ 不安定性の起源や陽子と中性子のインコヒーレントな集団運動などが次第に明らかになるであろう。

（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[4]、石原豊之、古野興平）

加速器を用いた放射性元素の微量分析（accelerator mass spectrometry, AMS）は、自然科学の広い分野に応用されている。分析の対象となるのは ^{10}Be、^{14}C、^{26}Al、^{36}Cl、^{41}Ca、^{53}Mn など、地球上に極めて微量に存在し、しかも数千年以上の長い半減期を持つ放射性元素である。加速器センターのタンデム加速器は、その加速エネルギーの高さから ^{26}Al より重い元素の分析が可能である。特に ^{36}Cl の分析は地下水の長期にわたる移動経路を調べたり、氷河の年代測定、大気の移動・循環などの地球科学への様々な応用が考えられる。

このような研究のためにアイソトープセパレーターを装備したAMS専用のイオン源と、静電偏向器（Energy selector）と磁気分析器（momentum selector）から構成される分析装置を開発している。我々のシステムの概要を図−9に示す。このシステムは、加速器の安定な動作を得るために、我々独自の方法として分子パイロットビーム法を開発しそのテストに基づいて設計した。現在、各部の建設が順調に進んでいる。

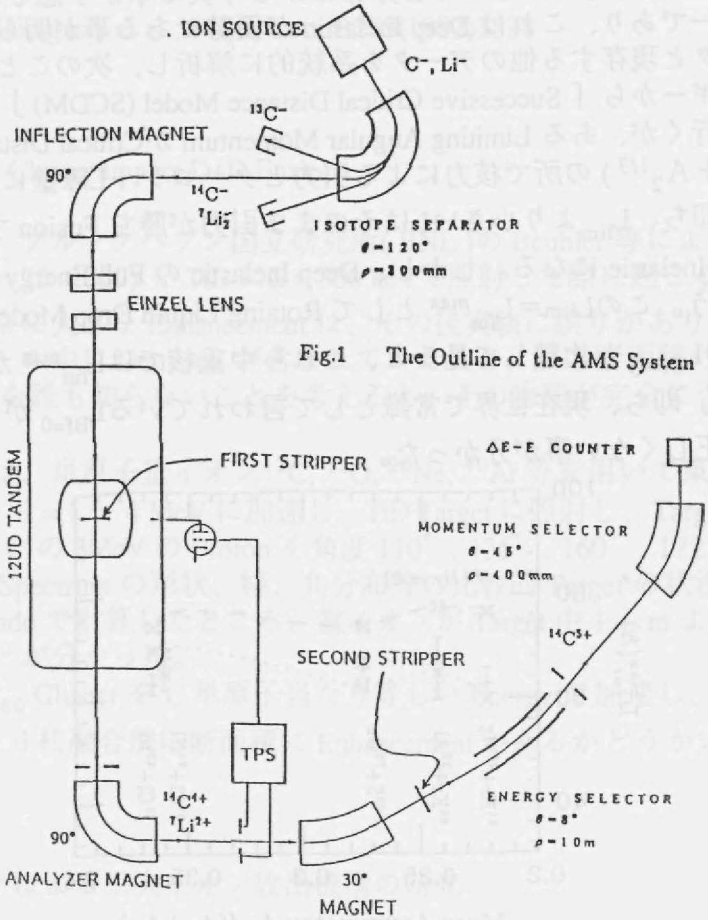


Fig.1 The Outline of the AMS System

図−9　加速器センターにおけるAMSシステム。図は ^{14}C の分析の例。

[4]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，豊川秀訓）

（１）中重核に於る Fusion-Fission と Deep Inelastic Reaction 競争のL-window 法則性

低エネルギー重イオン核反応機構は、Fusion, Deep Inelastic, Quasi-elastic 反応等が入射チャンネルのL-window に伴って次々に現れる事が定性的に分っている。中でも Fusion は実験、理論共に多くの研究がなされモデルの定量性もかなり確立している。また、Fusion した複合核が Evaporation と Fission とにどのように競争して崩壊するかも統計モデルにより良く説明がつく。

しかし、Fusion と Deep Inelastic のように核反応機構が違うものは、どのような L-window 法則性が働くか未だ解決していない。殊に、Strasbourg group の行った $^{32}S+^{88}Y, \cdots, ^{59}Co$ の実験では Target が軽くなる程 Deep Inelastic の成分が多く混り、不思議な現象として説明が付いていなかった[1]。我々は、原研タンデムを用いて、$^{35}Cl+^{62}Ni$と$^{37}Cl+^{64}Ni$で同じ複合核を同じ励起エネルギー状態で作り、Fission-like な崩壊物のZ-分布, 角分布, エネルギー分布を測定し、これらが充分にエネルギー・ダンプした生成物であることを確めた。なお，Fusion-Fission のZ (Mass) 分布は、Out-going Channel の Q-value Dependence が強い事が統計モデルから分っているので、この反応が Fusion-Fussion Dominant であれば２つのZ分布はかなり異る事が予想される。しかしながら、結果はほぼ同一であり、これは Deep Inelastic が優勢である事が明らかになった。

この実験データと現存する他のデータを系統的に解析し，次のことが明らかになった。Fusion は低エネルギーから「Successive Critical Distance Model (SCDM)」[2] に従ってエネルギーと共に増えて行くが、ある Limiting Angular Momentum がCritical Distance である $R \sim 1.0 \cdot (A_1^{1/3}+A_2^{1/3})$ の所で核力による引力とクーロン＋L障壁による斥力とのバランスで存在する。即ち、L_{lim}より小さいLはそのまま引力が勝ち Fusion するが、$L>L_{lim}$ では斥力が勝ち Deep Inelastic になる。しかし、Deep Inelastic の Full Energy Damping PartのLの上限は SCDM に従う。この$L_{lim}=L_{fus}^{max}$ として Rotaing Liquid Drop Model で計算された Fission Barrier＝0 の$L_{Bf=0}$ と比較して見ると、これら中重核ではL_{fus}^{max} がすべて小さく現われている (fig.1)。即ち、現在世界で常識として言われている$L_{Bf=0}$ が Fusion の Max を決めるという事は正しくない事が分かった。

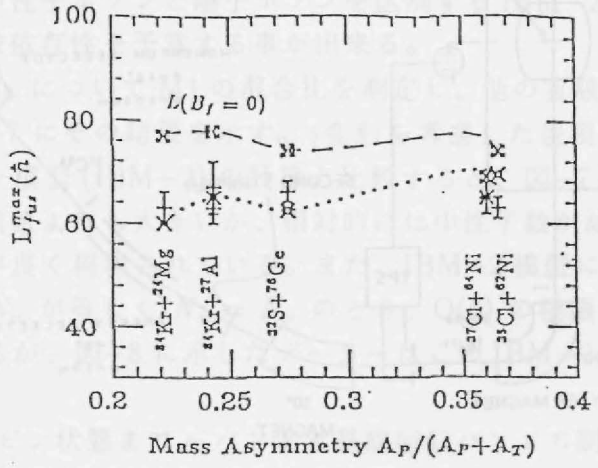


fig.1

これは、中国の留学生、蒲越虎の Doctor 論文となり、理研の重イオン反応国際シンポジウムで発表され、現在 Full Paper が Z.Phys. に投稿中である。

Ref.1) H. Oeshler et al., Phys. Lett. 87B(1979)193
2) T. Matsuse, S.M.Lee and A. Arima, Phys. Rev. C26(1982)2338

（2）中間エネルギー重イオン核反応 ---- 理研に於ける共同研究 ----

重イオン入射エネルギー 10 MeV/u - 100 MeV/u の中間エネルギーに於いて焦点となっている物理の一つは、複合核の存在領域、Hot Nucleus の Decay Mode、Intermediate Mass Fragment (I.M.F.) の起源、Multi-Fragmentation の現れるThreshold Energy 等である。

我々は、理研 Ring Cyclotron を用いて $^{84}Kr + ^{27}Al$ 系で完全核融合反応の上限値である E_L =10.5 MeV/u による反応を調べてきた。そして、適当な入射チャンネルのLを決めると、Evaporation、IMF、Fission-like Fragment 等が拡張ハウザー・フェッシュバッハ (E.H.F.M.) 法により実験値が良く再現される事を既に示した[1]。しかし、先の実験では、Evaporation と Fission の出方に時間の区別を付けず、Out-going Channel に対して、同等に Phase Space の競争を行なうと仮定したものであった。我々は、今回それらの仮定が正しいかどうかを実験的に検証すべく、Fission-Fragment と p，α，γ の Correlation を Phoswich Detector による 3π Counter で Light Particle を捉え、T-O-F で Fission-Fragment を測り調べた。結果は、予期に反して約 75 % の Light Particle は Hot Nucleus から先にMultiple Decay を行ない、その後 Fission が起こることが分かった。この様に、複合核の上限には、先ず Fission Decay の上限があり、その上に Light Particle Decay の上限があることが分かった。現在、その定量性を調べているところである。

Ref 1) K. Yuasa-Nakagawa et al., Phys. Lett. B283(1992)3538

（3）Heavy Ion and Cluster Impact D+D Fusion

1989年 9 月、ブルックヘブン国立研究所(BNL)の Beuhler 等によって報告された、$(D_2O)_n$ Cluster (n = 25 -1300) を TiD に E = 500 keV で照射した際に起こる d + d → p + t の反応断面積の異常に大きな Enhancement は、その後実験に誤りがあり訂正された。しかし、この実験ではビーム中に Deuteron が含まれていたこと、反応断面積の Enhancement の Threshold Energy を誰も知らないことを考えると、その物理が完全に否定されたとは言えない。

そこで我々は、単原子重イオン ^{12}C, ^{16}O, ^{20}Ne, ^{40}Ar 等を用いて東京工業大学 Van de Graaff 加速器で、E = 1 ～ 4 MeV に加速し、TiD Target に照射し、Target 中で起こる 2 次反応 d + d → p + t の 3MeV の Proton を角度 110°, 135°, 160°, 172.5° 等で測った。Proton の Energy Spectrum の形状、幅、角分布等の比較的 Target の状況に依らない物理量を、単純な Cascade で計算したところ、重イオンが Target 中 1 μm より深く進入すると、合わなくなることが分かった。

今後、C_6, C_{60} Cluster を C 単原子当たり等しい Energy で加速し、この反応の Mechanism、d + d 核融合反応断面積に Enhancement があるかどうか定量的に調べて行く。

（4）高速重イオンによる二次イオン放出機構の研究

重イオンビームのエネルギーが 1 MeV ～ 100 MeV のとき物質中でのビームのエネルギー損失は、主として電子的阻止能で決まる。この様な重イオンが絶縁体に入射したとき、絶縁体の表面では二次イオンが生成し、放出される。

この実験のため Tandem Van de Graaff 加速器を用いて ^{12}C, 35 MeV から ^{127}I, 120 MeV までの重イオンビームを得、物質に照射した。生成した二次イオンを飛行時間質量分析法で調べた。これらビームの物質中での阻止能は4～80MeV/mg/cm^2 であった。被照射物質はアミノ酸の Valine で40 μ g/cm^2 の薄膜。

既存の報告では極めて限られた二次イオン種についてしか調べられていない。我々は総括的な知見を得るため、見いだされた全ての二次イオンを研究対象とした。二次イオンの収量率をビームの阻止能に対する関数として表すと、大きく二つの特徴があった(Fig.1)。ひとつには収量率Yは阻止能(dE/dX)の関数三種類

$$Y = c \cdot (dE/dx)^n \qquad n=1,\ 1.5,\ 2$$

で表され、しかもある阻止能$(dE/dx)_{crit}$を境に、異なる指数nを持った関数に移り変わること。もうひとつは$(dE/dx)_{crit}$が二次イオン種によらず、～10 MeV/mg/cm^{2}になることである。

二次イオン全てを丹念に調べた結果、$(dE/dx)_{crit}$の存在とその前後での収量率の変化を新たに発見したが、この現象の理由はいまだ明らかでない。測定できる物理量を増やす方向で実験を進めている。この結果は本城義夫の修士論文となり、１９９２年１０月の東工大に於る「日中原子核シンポジウム」で発表された。現在N．Ｉ．Mに投稿準備中である。

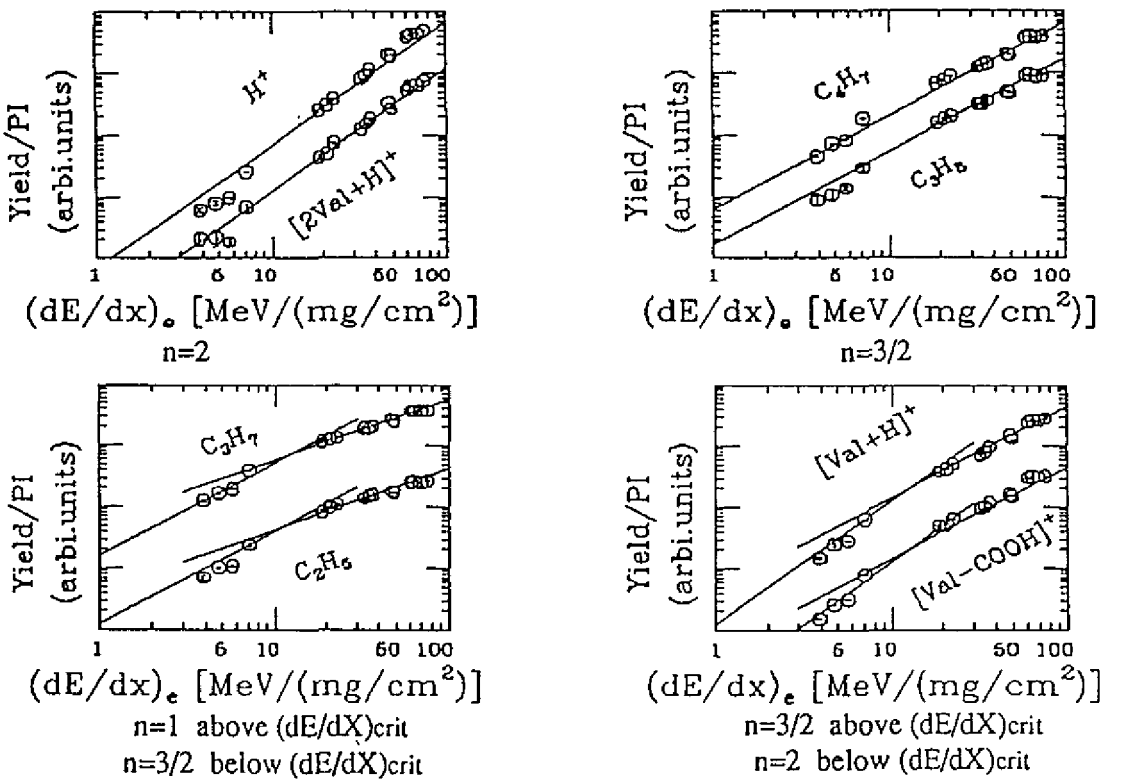


fig.1

（５）マイクロクラスター反応

近年、着目されているマイクロクラスターはその構造及び反応において原子核で培われた知識が適用される事が多い。我々は重イオン核反応で得られた経験をマイクロクラスター反応で生かし，重イオン核反応とマイクロクラスター反応との類似点及び相違点について研究する事を目的としている。

マイクロクラスターと原子，分子もしくはマイクロクラスター同士の散乱実験を行うためのマイクロクラスターイオン源として我々はColutronイオン源を用い、プラズマ生成室内に予めC_{60}粉末を入れておく事によって、エネルギー200 eV～10 keV，ビームカレント約100 pAのC_{60}イオンビームの生成に成功した。現在、このイオン源のC_{60}イオンビーム生成に対する最適パラメーターを調べると共に、ターゲットガスセル及び測定器となるエネルギー分析器，チャンネルプレート検出器の作成及びテストを行っている。

【３】　スピン偏極核反応実験（青木保夫、田岸義宏）

（１）　低エネルギー領域における^{2}H(ｄ、ｐ)^{3}H反応の偏極分解能の測定

低エネルギー領域における重陽子融合反応である^{2}H(ｄ、ｐ)^{3}H、D(ｄ、ｎ)^{3}Ｈｅ反応は、エネルギー源としての核融合反応として重要であり、また少数核子系の物理の対象として興味のある反応である。今回我々は、非常に効率のよい測定系を開発し入射重陽子エネルギーが、３０－９０ｋｅＶにおいて、全ての偏極分解能、iT_{11}、T_{20}、T_{21}、T_{22} の測定を系統的に行った。この実験は、筑波大学加速器センターのラムシフト型偏極イオン源の特徴即ち，

●核偏極にスピンフィルター法を用いているので核反応を経ないでビームの偏極度を精度良く知ることができる、

●ビームのスピン軸を回転する方法として、軸方向に回転可能なウィーンフィルターを用いているので、入射ビームのスピンの方向を任意にコントロールすることができる、

●高速スピン反転系を用いることによって系統的誤差の小さな計測が可能である、

●位置敏感型検出器を用いることによって同時に広い角度範囲にわたるデータを効率良く得ることができる、

等の特徴を良く生かした実験で精度の高いデータが得られた。今後これらのデータを基に少数核子系としてのＤ＋Ｄ融合反応の反応機構を明かにしていく。

（２）　^{12}C(ｄ、ｄ)^{12}Ｃおよび^{13}C(ｄ、ｐ)^{13}C(ｇｓ）反応偏極分解能の測定

現在筑波大学加速器センターでは、偏極重陽子ビームの偏極度のモニターとして^{3}Ｈｅ(ｄ、ｐ)^{4}Ｈｅ反応を用いている。しかしＥＳＰ９０磁気分析器及び二回散乱用ＱＤＱ磁気分析系のビームコースには、主ターゲットの下流にポーラリメータを設置するスペースは無い。主ターゲットより上流に設置するポラリメータのターゲットはエネルギーロスやストラグリングの小さな固体ターゲットでなければならない。今回^{12}C(ｄ、ｄ)^{12}Ｃおよび ^{13}C(ｄ、ｐ)^{13}Ｃ反応の偏極分解能A_yとA_{yy}の角度分布の測定をE_d＝１２－２２ＭｅＶの範囲で行い ^{13}C(ｄ、ｐ)^{13}Ｃ反応がこれらの偏極ポーラリメータとして有用である事が分かった。さらに他の偏極量のポーラリメータとしての有用性を検討するためこれらの偏極分解能の測定を行う。

（３）　重陽子弾性散乱の解析

ａ）実験データからＳ行列の位相を評価する

散乱問題に対する標準的な漸近形$\exp(ikz)+\exp(ikr)f(\theta)/r$ は一般に確率の保存を満足するわけではない。光学模型では虚部ポテンシャルが存在する領域では確率の保存が破れているが、虚部ポテンシャルが充分な精度で無視できる領域では当然確率の保存は満足されねばならない。このことは散乱振幅に対して何等かの制限を付けることになるはずである。そこで散乱波を$1/r$の級数に展開し、散乱振幅の絶対値（微分断面積の平方根）$A(\theta)$ と位相$P(\theta)$が満足すべき次の方程式を得た。

$$\frac{d^2P(\theta)}{d\theta^2}+\{\frac{1}{tan(\theta)}+\frac{2}{A(\theta)}\cdot\frac{dA(\theta)}{d\theta}\}\cdot\frac{dP(\theta)}{d\theta}+\eta\ =\ 2kR(\theta)$$

ここでθは散乱角、ηはクーロンパラメータ、Rは散乱振幅の主項と２次項の比の実部である。$R(\theta)$の変分に対して解の安定性を要求してこの方程式を解くと微分断面積の実験値から散乱振幅やＳ行列を評価出来る。図１参照。今回の計算結果（丸印）は原子核の内部で吸収が小さくなっている点で今までの光学モデルの予想（実線）と大きく異なっている。

ｂ）新しい光学模型のプログラム開発

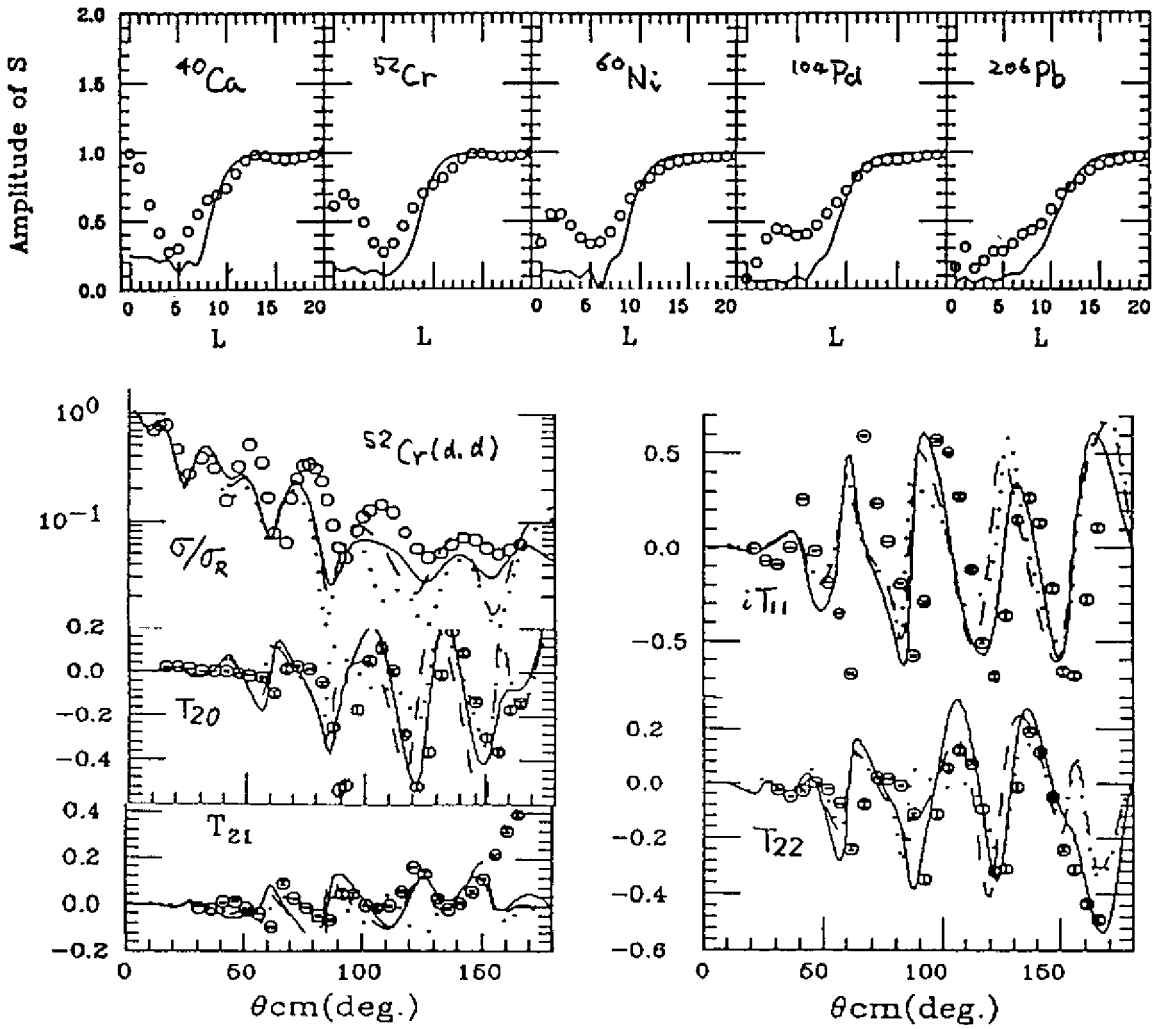
これまでの光学模型はポテンシャルの関数形を仮定し、この関数形のパラメータを調節し実験結果と比較していた。これでは制限がきつすぎて実験データの解析に予断が入りすぎていると思われた。そこで関数形の制限をかなり緩めた光学模型のプログラムを開発した。このプログラムは次の特徴を有する。

- 任意の非直交関数系を基底としてポテンシャルを展開できる
- パラメータの自働探索の能率が非常に良い
- 自働探索の副産物としてパラメータの誤差行列が自動的に計算される
- 展開係数やポテンシャルの誤差が容易に評価出来る。

手元の陽子、重陽子、アルファ粒子等の弾性散乱データを解析してみたところ3．3．1とは完全に独立した仕事であるが、この計算結果も原子核内部での今迄よりも弱い吸収を示唆している。

c） ＣＤＣＣ解析

^{52}Ｃｒと^{206}Ｐｂを標的とした２２ＭｅＶ偏極重陽子弾性散乱の実験データを上記の観点を考慮し、また、入射重陽子が標的核付近でｐ－ｎ間の散乱状態に励起（分解）する効果を取り入れた解析（Continuum Discretized Coupled Channels）を行った。図２の実線参照。ＣＤＣＣ解析には１１ＭｅＶの陽子と中性子の光学ポテンシャルを入力として要求するが、１１ＭｅＶの偏極陽子の^{52}Ｃｒによる弾性散乱の実験データと３．３．２に述べた計算結果を用いる事により今までの計算（点線及び破線）では困難であった実験結果をかなり良く再現することが出来た。



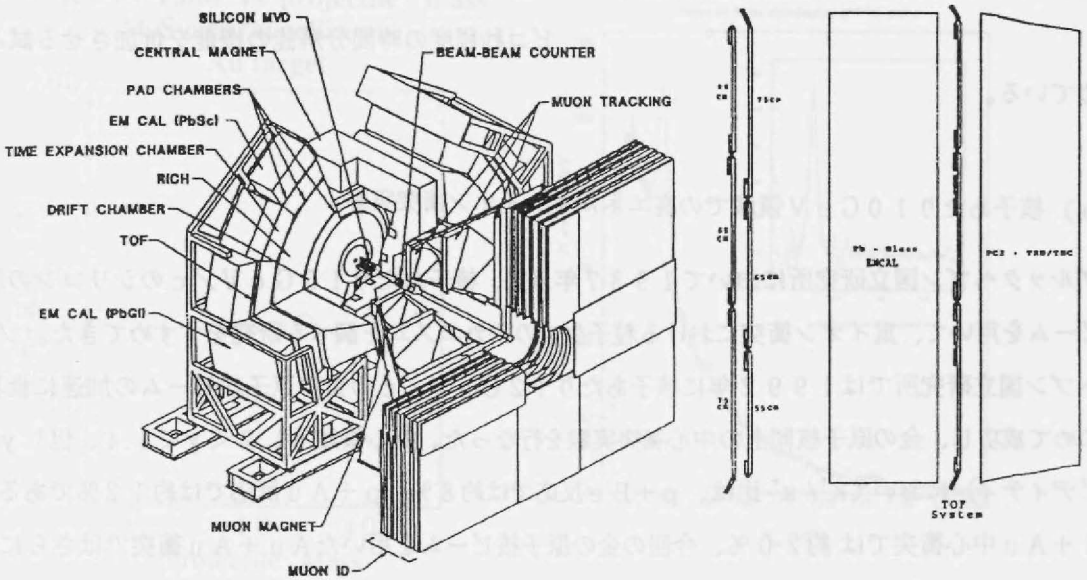
【４】高エネルギー原子核実験（八木浩輔、三明康郎、新井一郎、栗田和好、富沢和之）

（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）衝突型高エネルギー重イオン加速器(RHIC)におけるフェニックス実験

高温高密度状態ではクォークとグルオン系は閉じ込めから解放され、クォーク・グルオンプラズマ（ＱＧＰ）状態に相転移を起こすと考えられている。このＱＧＰを生成し、その性質を調べる研究を進めるために、衝突型高エネルギー重イオン加速器を用いた実験の準備を進めている。

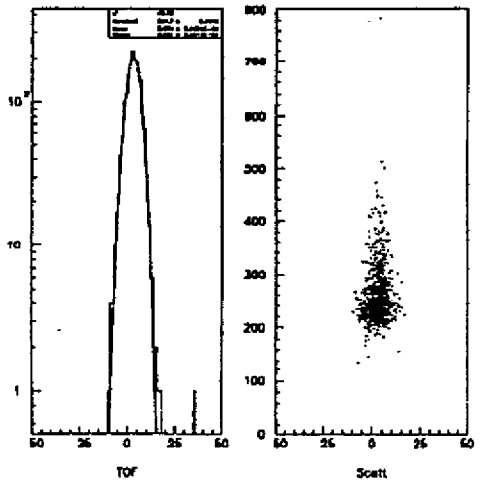
ブルックヘブン国立研究所では衝突型高エネルギー重イオン加速器(Relativistic Heavy Ion Collider)の建設が進められており、’９８～’９９年から核子あたり１００GeVの金の原子核同志の衝突実験が可能となる。その反応中心部の数百ｆｍ^{3}の領域において、３～６ＧｅＶ／ｆｍ^{3}ものエネルギー密度が達成されると予測されており、ＱＣＤが予測するクォーク・グルオンプラズマ（ＱＧＰ）相転移に必要なエネルギー密度を十分に越えていると考えられている。RHICにおける実験の中心目標は、ＱＧＰを作り出し、その性質を調べることである。RHICの衝突において予想される多くのＱＧＰ生成のシグナルを同時に測定する実験フェニックスの測定装置の設計を行った（下図参照）。衝突で生成されるレプトン対（ミュー粒子対、電子対）、光子、ハドロン（Ｋ中間子、パイ中間子、ファイ中間子、J/ψ中間子、反陽子等々）を分離検出し、ＱＧＰ生成を示すアノマリーを検出する。光子や仮想光子からのレプトン対は、衝突初期に達成された温度や密度に関する情報をもたらす。また、ρ, ω, φ の生成量や崩壊分岐比などの変化からも高温高密度状態、さらに、その持続時間等の情報を得ることができる。J/ψ中間子を用いて、ＱＧＰ相に於けるデバイ遮蔽の効果を調べる。



図：衝突型高エネルギー重イオン加速器におけるフェニックスの測定装置（左図）と
フェニックス実験の高分解能飛行時間測定装置（右図）。

$\pi^{\pm}, K^{\pm}, p^{\pm}$ 等のハドロン測定では、ＱＧＰによる横運動量の増大、ストレンジネス生成量増大の効果を観測する。星の大きさは二光子間の量子力学的干渉効果によって測定できるが、原子核反応においてもパイ中間子やＫ中間子を用いて、二粒子測定によってこれら粒子の発生した領域の大きさを観測することができる。この測定によりＱＧＰ相の寿命やそのエネルギー密度を調べることができ、ＱＧＰの性質の重要な情報が得られる。

フェニックスは、１０カ国、４３研究機関から成る国際的なプロジェクトであるが、八木は執行委員会委員、三明は測定器委員会委員をつとめている。フェニックス実験において粒子識別は重要な役割をもち、なかでも、パイ中間子、Ｋ中間子、陽子等のハドロンの観測には飛行時間測定による粒子識別は測定の要である。この高分解能飛行時間測定装置の建設を筑波グループは担当する。



上図：得られた８０ピコ秒の時間分解能。

フェニックス実験の高時間分解能飛行時間測定装置は、約１０００本のプラスティックシンチレーター棒と２０００本の高速光電子増倍管から構成される。ブルックヘブン国立研究所ＡＧＳでの実験で培われた高時間分解能の技術を応用して、1.2cm角の１ｍ長プラスティックシンチレーター棒の両側に高速光電子増倍管を取付け、時間分解能８０ピコ秒以下の飛行時間測定装置の開発が進められている（左図）。高時間分解能測定に必要な集積回路は、現在コロンビア大学との共同で開発を行っている。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進めている。

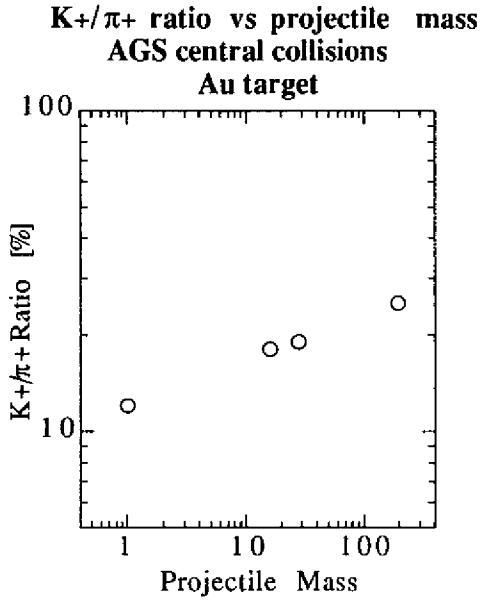
ｂ）核子あたり１０ＧｅＶ領域での高エネルギーイオン衝突実験

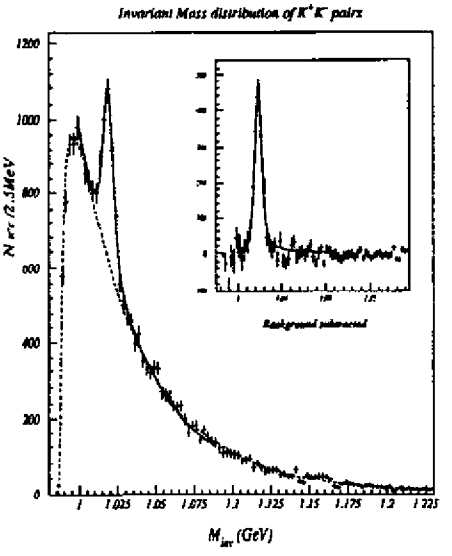
ブルックヘブン国立研究所において１９８７年以来、核子あたり１５ＧｅＶ／ｃのシリコンの原子核ビームを用いて、重イオン衝突における粒子生成のメカニズムを調べる研究をすすめてきた。ブルックヘブン国立研究所では１９９２年に核子あたり１２ＧｅＶ／ｃの金の原子核ビームの加速に世界ではじめて成功し、金の原子核同士の中心衝突実験を行なった。中心領域（$1.2 < y < 1.4$、但しｙは、ラピディティ）においてK^+/π^+比は、ｐ＋Ｂｅ反応では約８％、ｐ＋Ａｕ反応では約１２％であるが、Ｓｉ＋Ａｕ中心衝突では約２０％、今回の金の原子核ビームを用いたＡｕ＋Ａｕ衝突ではさらに上昇し、約２５％もの値が測定された（次頁の下左図参照）。重イオン衝突における著しいK^+/π^+比の増大は、QGP生成を示唆している可能性もあるが、ストレンジネス生成の増大が反応システムの増大と共に徐々に現われることから、反応中心領域における高密度効果の現われと考えられる。横運動量分

布から求めた”温度”パラメーターに関しても、同様の傾向がみられた。現在多くの理論家によって様々な仮定に基づいた模型計算がなされているが、K^+/π^+比の増大と各粒子の横運動量分布パラメーターを記述するためには、なんらかの高密度効果等の高エネルギー重イオン衝突の特徴を組み入れる必要があることが明らかになりつつある。我々の実験により初めて観測されたストレンジネス生成増大現象は、最近ヨーロッパのＣＥＲＮにおいても追試され、同様の測定結果が報告されている。

我々は、ストレンジネスを含む最も軽い粒子であるK中間子に重点を置いて測定を進めてきたが、ファイ中間子の測定にも成功した。高密度状態中ではファイ中間子の有効質量が変化するという理論的指摘（初田らによる）やストレンジネス生成増大等の興味から、重イオン衝突におけるファイ中間子の測定は反応機構の研究上重要な意味をもつ。下右図にＳｉ＋Ａｕ中心衝突において観測されたK^+K^-から組んだ不変質量分布を示す。この分布に見られるファイ中間子の質量及びその分布幅にアノマリーは認められなかった。ファイ中間子の収量はK中間子の場合と同程度の増大を示しているようである。フェニックス実験においても、K^+K^-崩壊モードおよびレプトン崩壊モードにおいて測定する。両モードにおける同時測定は、理論との比較をより正確に行うことができる。

Ａｕ＋Ａｕ衝突ではＳｉ＋Ａｕ中心衝突に比べて、検出器における粒子密度が大きく上昇し、従来のスペクトロメーターでは反応中心領域の十分な測定を行うことができなかった。そこで高粒子密度下においても粒子の検出測定が可能なスペクトロメーターを現在建設中である。このスペクトロメーターの主要な装置であるタイムプロジェクションチェンバーと高時間分解能飛行時間測定装置の建設を進めている。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。来年度に測定を開始する。





左図：金の標的核を用いたときのK^+とπ^+の収量比の入射核質量数依存性。
右図：Ｓｉ＋Ａｕ中心衝突において観測されたK^+K^-から組んだ不変質量分布。

（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

-後方Λ粒子生成反応の研究-

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$(ud)_0$-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。本研究では、特に、π^--原子核反応による後方Λ粒子生成を調べている。後方粒子生成は、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ことが期待できる。

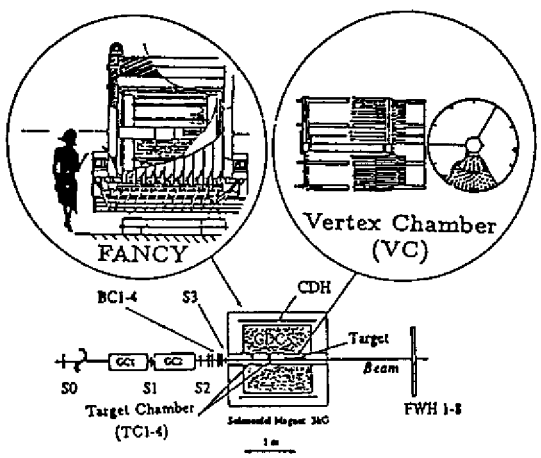


図１．実験セットアップ

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)$\pi^- + {}^{12}C \rightarrow \Lambda + X$ at 4 GeV/c

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

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

を進めてきた。測定装置は、文部省高エネルギー物理学研究所の大立体角多重粒子スペクトロメータFANCYの内部にΛ粒子検出のために特別に作られた崩壊バーテックス検出装置を組み込んだものを用いた（図１）。また、実験(3)では、K^0中間子をはかるために、前方大立体角スペクトロメータを増設した。実験において生成されるΛ粒子は、～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。崩壊バーテックスの検出という条件を課すことは決定的で、これによってΛ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粒子の微分断面積と偏極度を実験室系70°～140°に渡って測定した。更に、実験(3)では同時に生成されるk^0中間子との相関を測定した。

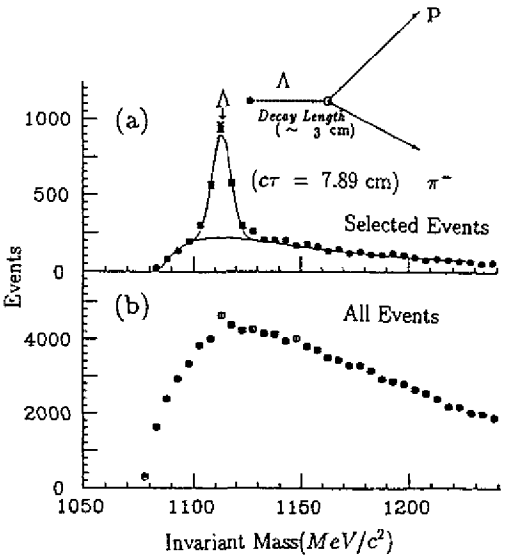


図２．(π^-, p)系の不変質量分布；バーテックス検出(a)有り(b)無し

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。特に、測定されたΛ粒子の偏極度は実験室系90° 付近で大きな正の値を示す分かった（図３）。このような包含反応での大きな偏極度の出現は、それ自体大きな驚きであり、どのような機構が働いているのか、興味深い。実験結果を理解するため、２つの理論的なモデル、

(1)核内のFermi運動を考慮した素過程π^-+p → Λ+K^0の重ね合せ（ハドロン描像）

(2)コヒーレント・チューブによる生成と再結合時のトーマス歳差を採りいれたクォークーパートン模型（クォーク描像）

に基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ともによく再現できた（図４、図３）。実験(2)は^{6}Li標的を使ってこの反応の核種-依存性を調べるためのものである。現在、全体の約1/3のデータを解析している。予備的結果では、偏極度については同じ振舞いを示しているが、微分断面積については、^{12}Cの場合の～1/8の値を示している。このような強い抑制効果は(2)の理論的なモデル計算でも全く再現できない。実験(3)については、現在、前方スペクトロメータ系の解析に着手したところである。

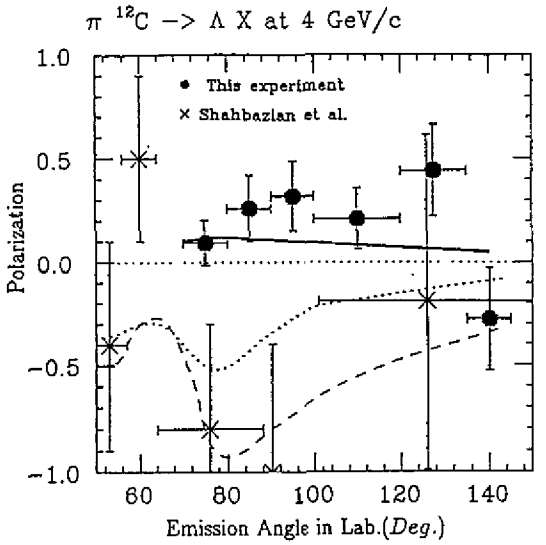


図３．偏極度：破線と実線はそれぞれ(1)および(2)のモデル計算．

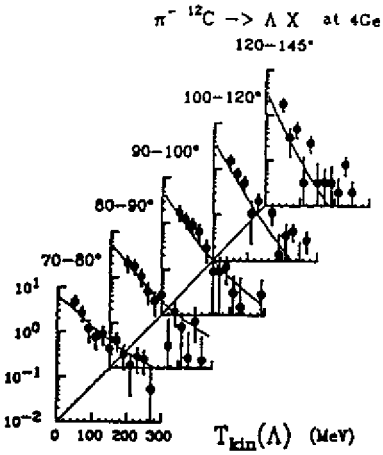


図４．不変微分断面積：実線は(2)のモデル計算．

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越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、本年度より、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)トロイダロ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。

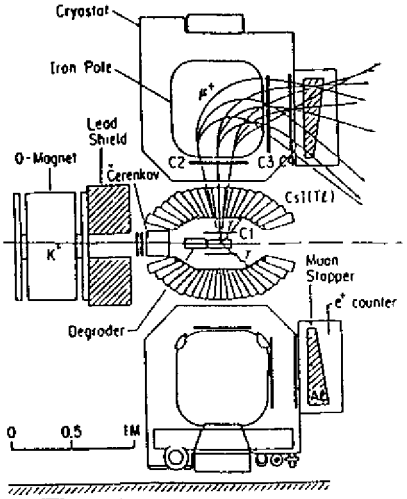


図５．実験セットアップ．

<論文>

1. Yagi,K. : Production and Polarization of Strange Quarks from Nuclear Matter, Proc. RIKEN Symp. on Physics of High Energy Ion Collisions, 184, (Wako, 1992)
2. Nagasaka,N., Arai,I. and Yagi,K. : Data Aquisition and Event Filtering by Using Transputers, Proc. 1991 IEEE Nuclear Science and Medical Imaging Conf., 841 (Santa Fe, 1992)
3. Yagi,K. : Study of Two-Nucleon Correlation in Nuclei and the Related Nuclear Collective Motion by Using Nuclear Reactions, Proc. INS-Tokyo FM-FF Cyclotron Memorial Symp., INS Report (Tokyo, 1993)
4. Arai,I., Kitayama,H., Nagasaka,Y., Tomizawa,K. and Yagi,K. : Polarizations and Cross Sections of Λ Hyperons Produced at Backward Angles on Nuclei by Pions, Proc. 10th Intern. Symp. on High Energy Spin Physics (Nagoya, 1992)
5. Yagi,K. : Can We Reach the Time Right after the Big Bang ?, Proc. Japan Phys. Soc. 1992-fall Meeting Symp., Nuclear Studies 37, No.7 (Tokyo, 1993)
6. Kishida,T., Yamamoto,S.S., Arai,I., Manabe,A. and Tsuboya,T. : Measurement of d-C and d-Al Toyal Cross Sections in the Incident Momentum Range 2.0-4.0 GeV/c, Phys. Rev. C45, 2926, (1992)
7. Abbott,T., Kurita,K. and Miake,Y. et al. : Global Transverse Energy Distributions in Relativistic Nuclear Collisions at 14.6 GeV/c, Phys. Rev. C45, 2933, (1992)
8. Abbott,T., Kurita,K. and Miake,Y. et al. : Measurement of Particle Production in Proton-Induced Reactions at 14.6 GeV/c, Phys. Rev. D45, 3906, (1992)
9. Abbott,T., Kurita,K. and Miake,Y. et al. : Bose-Einstein Correlations in Si+Al and Ai+Au Collisions at 14.6 GeV/cPhys. Rev. Lett. 69, 1030, (1992)
10. Abbott,T., Kurita,K. and Miake,Y. et al. : Centrality Dependence of K^+ and π^+ multiplicities from Si+A Collisions at 14.6 A GeV/c, Phys. Lett. B291, 341-346, (1992)
11. Sarabura,M. and Miake,Y. et al. : Results from CERN Experiment NA44, Nucl. Phys. A544, 125c-136c, (1992)
12. Zajc,W., Kurita,K. and Miake,Y. et al. : Recent Results from E802 and E859, Nucl. Phys. A544, 237c-254c, (1992)
13. Costales,J.B., Kurita,K. and Miake,Y. et al. : Target Rapidity Proton Distribution for Si+A Collisions at the AGS, Nucl. Phys. A544, 445c-448c, (1992)
14. Cole,B.A., Kurita,K. and Miake,Y. et al. : Particle Production at high pt in Si+A Collisions at 14.6 GeV/c, Nucl. Phys. A544, 533c-558c, (1992)
15. Miake,Y., Ueno,S., Kumagai,A.,Kato,S.,Kurita,K. and Yagi,K. : Time Resolutions of Bulk, Fiber, and Super Scintillator, Contributed paper to the Intern. Conf. of the Quark Matter '93
16. Tagishi,Y., Nakamoto,N., Katoh,K., Togawa,J., Hisamune,T., Yoshida,Y. and Aoki,Y. : Analyzing Powers for 2H(d,p)3H at Incident Energies of 30, 50, 70 and 90 keV, Phys. Rev. C46, 1155-1158, (1992)
17. Masuda,T., Tomizawa,M., Nagashima,Y., Nakamoto,N. and Tagishi,Y. : The Fluorescent Decay of CsI(Tl) Scintillator for Charged Particles of Different Ionization Density, Nucl. Instrum. and Meth. A322, 135-136, (1992)

18. Tagishi,Y., Tomizawa,A., Tomizawa,M. and Yagi,K : Analyzing Power Standard by Using the Reaction 7Li(p, α)4He over an Incident Energy Range from 9 to 22 MeV, Nucl. Instr. and Meth. A322, 304-306, (1992)

19. Yuasa-Nakagawa,K., Pu,Y.H., Jeong,S.C., Mizota,T., Lee,S.M., Nakagawa,T., Heusch,B., Ieki,K. and Matsuse,T. : Study of the Coincident Measurement of the Binary Products and Its Role in 84Kr+27Al at Elab=10.6 MeV/u, Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium (Tokyo, 1992)

20. Lee,S.M., Honjo,Y., Mizota,T., Tomita,S., Ohkushi,K., Toyokawa,H. and Shima,K. : Mechanism of the Secondary Ion Emission through Fast Heavy-Ion Impact on the Solid-Surface, ibid.

21. Pu,Y.H., Lee,S.M., Jeong,S.C., Fujiwara,H., Mizota,T., Futami,Y., Nakagawa,T., Nagame,Y. and Ikezoe,H. : Fusion-Fission and Deep-Inelastic Reactions in Cl+Ni Systems, ibid.

22. Lee,S.M., Pu,Y.H., Jeong,S.C., Fujiwara,H., Mizota,T., Futami,Y., Nakagawa,T., Nagame,Y. and Ikezoe,H. : The Competition between Fusion-Fission and Deep Inelastic Collision in Medium Mass Nuclei System, RIKEN Intern. Workshop on Heavy-Ion Reactions with Neuteron-Rich Beams (Wako, 1993)

23. Yuasa-Nakagawa,K., Pu,Y.H., Jeong,S.C., Mizota,T., Futami,Y., Lee,S.M., Nakagawa,T., Heusch,B., Ieki,K. and Matsuse,T. : Complex Fragment Distributions for 84Kr+27Al at Elab=10.6 MeV/u, Phys. Lett. B283, 185-188, (1992)

24. Futami,Y., Mizota,T., Pu,Y.H., Honjo,Y., Yuasa-Nakagawa,K., Toyokawa,H., Lee,S.M., Furutaka,K., Murakami,T., Kasagi,J., Yoshida,K. and Nakagawa,T. : Performance of a Phoswich Detector Composed of a Thin Plastic and a Thick BaF2 Schintillators, Nucl. Instr. Meth. A326, 512-516, (1993)

25. Beck,C., Djerround,B., Haas,F., Freeman,R.M., Hachem,A., Heusch,B., Morsad,A., Youlal,M., Abe,Y., Matsuse,T. and Lee,S.M. : Competition between the Fusion-Fission and Deep-Inelastic Orbiting Mechanisms in the 35Cl+12C Reaction, Z. Phys. A242, 309-323, (1992)

26. Shen,W.Q., Peter,J., Bizard,G., Brou,R., Cussol,D., Louvel,M., Patry,J.P., Regimbart,R., Steckmeyer,J.C., Sullivan,J.P., Tamain,B., Crema,E., Doubre,H., Hagel,K., Jin,G.M., Peghaire,A., Saint-Laurent,F., Cassagnou,Y., Legrain,R., Lebrun,C., Rosato,E., MacGrath,R., Jeong,S.C., Lee,S.M., Nagashima,Y., Nakagawa,T., Ogihara,M., Kasagi,J. and Motobahashi,T. : Components of Collective Flow and Azimuthal Distributions in 40Ar+27Al and 40Ar+58Ni Collisions below 85 MeV/u, Nucl. Phys. A551, 333-348, (1993)

27. Ieki,K., Iwasa,N., Ando,Y., Hata,K., Motobayashi,T., Murakami,H., Ogiwara,M., Jian-Zhi Ruan(Gen), Shibuya,S., Shirato,S., Fujiwara,H., Jeong,S.C., Lee,S.M., Mizota, T., Nagashima,Y., Ogihara,M., Okumura,S., Pu,Y.H. and Ishihara,M., : Dynamics of the Projectile-like Fragment Emission in the 40Ar + 209Bi Reaction at 26 MeV/u, J. Phys. G : Nucl. Part. Phys. 18, 401-411, (1992)

28. Nakagawa,T., Yuasa-Nakagawa,K., Jeong,S.C., Mizota,T., Pu,Y.H., Futami,Y., Heusch,B., Ieki,K., Matsuse,T., Lee,S.M., : Complex Fragment Emission from Hot Compound Nucleus, Conference Proceedings Vol. 38, "Perspective in Heavy Ion Physics" 1st Joint Italian-Japanese Meeting within the INFN-RIKEN Agreement (Catania, 29 September-3 October 1992)

29. Odahara,A.,Shimizu,T.,Ideguchi,E., Mukai,J., Tomura,H., Min,B.J., Suematsu,S., Heiguchi,K., Komatsubara,T., Furuno,K., Kuroyanagi,T. and Mitarai,S. : Isomer of 88Tc Contributed Papers in the 21st INS Intern. Symp. on Rapidly Rotating Nuclei 1992, (Tokyo, 1992), 41

30. Komatsubara,T., Furuno,K., Hayakawa,T., Cederwall,B., Nyberg,J., Sletten,G., Hagemann,G.B., Jensen,H., and Gjorup,N. : Anomalous Signature Dependence in the Nucleus 126Cs, ibid. 42

31. Hayakawa,T., Komatsubara,T., Furuno,K., Gjorup,N., Jensen,H., Nyberg,J., Sletten,G., Hagemann,G.B. and Cederwall,B. Gamma-ray Spectroscopy of the 35Cl+92Mo Reaction, ibid. 43

32. Mukai,J., Odahara,A., Nakatani,R., Tomura,H., Suematsu,S., Mitarai,S., Kuroyanagi,T., Jerrestam,D., Nyberg,J., Sletten,G., Atac,A., Arnell,S.E., Roth,H. and Skeppstedt,O. : Level Structure of an Odd-Odd Nucleus 82Y, ibid. 44

33. Juutinen,S., Tormanen,S., Ahonen,P., Cederwall,B., Johnson,A., Fant,B., Julin,R., Mitarai,S., Mukai,J., Nyberg,J. and Virtanen,A. : Shape Coexistence in 117In, Zeit. Phys. A344, 223-224, (1992)

34. Cederwall,B., Liden,F., Johnson,A., Hildingsson,L., Wyss,R., Fant,B., Juutinen,S., Ahonen,P., Mitarai,S., Mukai,J., Nyberg,J., Ragbarsson,I. and Semmes,P.B. : Signature Inversion in 120Cs : Evidence for a Residual pn interaction, Nucl. Phys. A542, 454-478, (1992)

35. Mukai,J., Odahara,A., Nakatani,R., Harauta,Y., Tomura,H., Min,B.J., Heiguchi,K., Suematsu,S., Mitarai,S. and Kuroyanagi,T. : The β Decay of the New Isotope 79Y, Zeit. Phys. A342, 393-396, (1992)

36. Kuroyanagi,T., Mitarai,S., Suematsu,S., Min,B.J., Tomura,H., Mukai,J., Maeda,T., Nakatani,R., Sletten,G., Nyberg,J. and Jerrestam,D. : The Siliconball: A 4π Si Detector Array for Reaction Channel Selection, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Research, A316, 289-296, (1992)

37. Morikawa,T., Inoue,H., Iwata,Y., Matsuoka,T., Yoshizawa,Y., Katoh,T., Mitarai,S., Mukai,J. and Jerrestam,D. : Coulomb Excitation of 154Sm Zeit. Phys. A343, 373-374, (1992)

38. Mitarai,S., Kuroyanagi,T., Odahara,A., Mukai,J., Tomura,H., Suematsu,S., Jerrestam,D., Nyberg,J., Sletten,G., Atac,A., Gjorup,N., Jongmann,J., Arnell,S.E., Roth,H.A. and Skeppstedt,O.A : Rotational Band in 82Zr, Zeit. Phys. A344, 405-409, (1993)

39. Kudo,H., Yoshida,E., Shima,K., Nagashima,Y. and Ishihara,T. : Shadowing Pattern Imaging with High-Energy Secondary Electrons Induced by Fast Ions, Jpn. J. Appl. Phys. 31, L1284, (1992)

40. Kudo,H., Shima,K. and Ishihara,T. : Secondary Electrons Induced by Fast Ions under Channeling Conditions. III. Unshadowed Electrons in Target Crystals, Phys. Rev. B47, 27, (1993)

41. Tanimoto,H., Mizubayashi,H., Masuda,R., Okuda,S. and Tagishi,Y. : Internal Friction Measurements of Mo after Low-Temperature Proton Irradiation, Phys. Stat. Sol. (a) 129, 343, (1992)

＜論文（UTTAC Annual Report)＞

1. Ishihara,T., Tajima,T., Ohshima,H., Ishii,S., Takahashi,T., Yamato,Y., Kimura,H., Kaikura,T., Komatsubara,T., Furuno,K. : Accelerator Operation, UTTAC Annual Report 1991, *UTTAC-59*, 1992, pp.1-6
2. Nagashima,Y., Nakajima,S., Takahashi,T., Kaikura,T., Tajima,Y., Ohshima,H., Hayakawa,T., Takahashi,K., Mukai,J., Furuno,K. : Preliminary Experiments on the Accelerator Mass Spectroscopy of 14C and 26Al, ibid., pp.7-9
3. Kimura,H., Komatsubara,T. : Data Taking System for Gamma-ray Spectroscopy, ibid., pp.10-11
4. Aoki,Y. : Neutron Bound States in Perey-Buck Type Non-Local Potential, ibid., pp.12-17
5. Nakamoto,N., Katoh,K., Togawa,J., Hisamune,T., Yoshida,T., Tagishi,Y. : Analyzing Power for D(d,p)3H at Incident Energies of 30,50,70, and 90 keV, ibid., pp.18-20
6. Katoh,K., Nakamoto,N., Masaki,M., Nakagawa,S., Aoki,Y., Tagishi,Y. : Analyzing Powers and Cross Sections for 6Li(d,d)6Li at 22MeV, ibid., pp.21-22
7. Masaki,M., Nakagawa,S., Katoh,K., Yamamoto,Y., Nakamoto,N., Tagishi,Y., Aoki,Y. : CDCC Analysis of 206Pb(d,p)207Pb Reaction at Ed=22MeV, ibid., pp.23-28
8. Toyokawa,H., Honjo,Y., Ohkushi,K., Tomita,S., Ohnuma,H., Niizeki,T., Yoshida,H.Y., Tajima,Y., Yoon,C.C., Yosoi,M., Orihara,H., Hosaka,M., Ohura,M., Tanaka,M.H., Ikeda,N., Kubono,S. : Study of the 13C(p,ds=0)12C Reaction at 35MeV, ibid., pp.29-30
9. Takeda,K., Nagai,Y., Shima,T., Ohsaki,T., Hirasawa,J., Shimizu,S., Seino,S., Furuya,S., Toriyama,T., Furuno,K., Tagishi,Y., Nagashima,Y., Komatsubara,T., Tomizawa,M. : Measurement of β-Decay Asymmetry Parameter from 35Ar Decay, ibid., pp.31-33
10. Heiguchi,K., Moriya,Y., Uesugi,K., Takahashi,K., Lu,J., Mukai,J., Komatsubara,T., Shizuma,T., Tomura,H., Mitarai,S., Furuno,K. : Search for N=Z=39 Nucleus 78Y, ibid., pp.34-36
11. Shizuma,T., Tomura,H., Odahara,A., Ideguchi,E., Kuroyanagi,T., Mitarai,S., Furuno,K., Komatsubara,T., Mukai,J., Heiguchi,K. : Identification of the New Isotope 86Mo, ibid., pp. 37-40
12. Zhang,Y.H., Gono,Y., Murakami,T., Ferragut,A., Furuno,K., Komatsubara,T., Hayakawa,T., Lu,J. : γ-Ray Excitation Functions in the 138Ba(10B,4n)144Pm and 141Pr(α,n)144Pm Reactions, ibid., pp.41-43
13. Hayakawa,T., Komatsubara,T., Furuno,K., Gjorup,N., Jensen,H., Nyberg,J., Sletten,G., Hagemann,G.B., Cederwall,B. : Gamma-Ray Spectroscopy of the 35Cl+92Mo Reaction, ibid., pp. 44-45
14. Komatsubara,T., Furuno,K., Hayakawa,T., Cederwall,B., Nyberg,J., Sletten,G., Hagemann,G.B., Jensen,H., Gjorup,N. : High-Spin States and Signature Inversion in the Nucleus 126Cs, ibid., pp. 46-48
15. Yuasa-Nakagawa,K., Nakagawa,T., Heusch,B., Pu,Y.H., Jeong,S.C., Mizota,T., Ieki,K., Matsuse,T., Lee,S.M. : Complex Fragment Distributions for 84Kr + 27Al at Elab = 10.6MeV/u, ibid., pp. 49-50

16. Pu,Y.H., Lee,S.M. : Fusion-Fission and Deep-Inelastic Reactions in Cl+Ni Systems, ibid., pp. 51-52
17. Furuno,K., Komatsubara,T., Mukai,J. : A Compact Ge Detector Array for Nuclear Structure Study, ibid., pp. 53-56
18. Honjo,Y., Mizota,T., Tomita,S., Ohkushi,K., Toyokawa,H., Nagashima,Y., Shima,K., Lee,S.M. : Plasma Desorption Mass Spectroscopy using Tandem van de Graaff Accelerator, ibid., pp. 78-80
19. Kudo,H., Shima,K., Ishihara,T. : Bees Analysis of Interstitial Electrons in Single Crystals, ibid., pp. 81-94
20. Kudo,H., Yoshida,E., Shima,K., Ishihara,T. : Bees Studies of Amorphized Semiconductor Surfaces, ibid., pp.95-96
21. Kudo,H., Yoshida,E., Suzuki,K., Ohtu,K., Shima,K., Nagashima,Y., Ishihara,T. : Angle-Resolved Imaging of Crystal Lattices with Ion-Induced Secondary Electrons Induced by Fast Ions, ibid., pp. 97-102
22. Tanimoto,H., Mizubayashi,H., Masuda,R., Okuda,S., Tagishi,Y. : Internal Friction Measurement of 20 MeV Proton Irradiated Mo, ibid., pp. 103-108

＜学位論文（博士）＞

1. Hiroki Kitayama : Backward Hadron Production in Hadron-Nucleus Reactions at 4 GeV/c
2. Pu Yue-Hu : A Study of Fission-like Phenomena in Medium Mass Nuclear Systems

＜学位論文（修士）＞

1. Yoichi Igarashi : Parallel Data Aquisition System by Use of Transputers
2. Muneto Ise : Development of Cryogenic Particle Detector
3. Yuji Yamashita : Development of Readout System of Cylindrical MWPC for Kaonic Hydrogen Atom Experiment
4. Norihito Nakamoto : 2H(d,p)3H Analyzing Powers at very Low Energies
5. Ken-ichi Katoh : Elastic Scattering of 22 MeV Deuterons by 6Li
6. Satoshi Nakagawa : Deuteron Elastic Scattering at Forward Angles by Middle to Heavy Nuclei
7. Shigeo Tomita : Development of Micro-Cluster Ion Source
8. Katsuo Takahashi : Development of a Conversion-Electron Spectrometer

＜講演＞

1. Yagi.K., The Present Status of PHENIX-J Project, BNL RHIC-PHENIX Work Shop, BNL, N.Y., August 1992
2. 八木浩輔、原子核内の２核子相関とそれに起因する集団運動を原子核反応で探る、INS FM/FF サイクロトロン記念講演会、東京大学原子核研究所、１９９２年１０月

3. 八木浩輔、われわれはビッグバン直後に到達できるか、日本物理学会、原子核理論－原子核実験合同シンポジウム、新潟大学、新潟県新潟市、　１９９２年１０月

4. 栗田和好、上野祥子、熊谷荒太、三明康朗、八木浩輔、BNL-AGS E866 TOF construction I、日本物理学会、新潟大学、新潟県新潟市、１９９２年１０月

5. 上野祥子、熊谷荒太、栗田和好、三明康朗、八木浩輔、BNL-AGS E866 TOF construction II、日本物理学会、新潟大学、新潟県新潟市、１９９２年１０月

6. 上野祥子、熊谷荒太、栗田和好、三明康朗、八木浩輔、高エネルギー重イオン衝突実験用Time Projection Chamber の開発 II、日本物理学会、新潟大学、新潟県新潟市、１９９２年１０月

7. 栗田和好、三明康朗、Centrality Dependence of Particle Production in Si-Nucleus Collisions at 14.5 A GeV/c (E802)、日本物理学会、新潟大学、新潟県新潟市、１９９２年１０月

8. 栗田和好、三明康朗、Study of Particle Production using Si Beam at BNL-AGS (E859) II、日本物理学会、新潟大学、新潟県新潟市、１９９２年１０月

9. 三明康朗、200 A GeV/c 硫黄-原子核衝突における粒子生成の研究、日本物理学会、新潟大学、新潟県新潟市、１９９２年１０月

10. 上野祥子、熊谷荒太、栗田和好、三明康朗、八木浩輔、BNL-AGS での最初の金ビームを用いた高エネルギー重イオン衝突実験（E866実験）、日本物理学会、新潟大学、新潟県新潟市、１９９２年１０月

11. 三明康朗、PHENIXの目指すもの、日本物理学会、原子核理論、原子核実験合同シンポジウム、新潟大学、新潟県新潟市、１９９２年１０月

12. 栗田和好、三明康朗、Study of Particle Production using Si Beam at BNL-AGS (E859) III、日本物理学会、東北大学、宮城県仙台市、１９９３年３月

13. 栗田和好、三明康朗、Centrality Dependence of Particle Production in Si-Nucleus Collisions at 14.5 A GeV/c II、日本物理学会、東北大学、宮城県仙台市、１９９３年３月

14. 三明康朗、200 A GeV/c 硫黄-原子核衝突における粒子生成の研究（NA44実験）、日本物理学会、東北大学、宮城県仙台市、１９９３年３月

15. 上野祥子、熊谷荒太、栗田和好、三明康朗、八木浩輔、高エネルギー重イオン衝突実験用Time Projection Chamber の開発 III、日本物理学会、東北大学、宮城県仙台市、１９９３年３月

16. 三明康朗、上野祥子、熊谷荒太、池田時浩、富沢和之、栗田和好、八木浩輔、鉛シンチレーター電磁カロリメーターの時間特性、日本物理学会、東北大学、宮城県仙台市、１９９３年３月

17. 李相茂、蒲越虎、鄭淳讚、藤原英明、溝田武志、二見康之、中川孝秀、池添博、永目諭一郎、Fission-Like Phenomena in Medium Mass Nuclear Systems、基研研究会 "有限温度原子核の動力学"　京都大学基礎物理研究所、１９９２年１２月

18. 中川恵子、中川孝秀、B.Heusch、蒲越虎、鄭淳讚、溝田武志、家城和夫、松瀬丈浩、李相茂、84Kr+27Al (EL=10.6 MeV/u) に於ける複合粒子放出、日本物理学会　秋の分科会　新潟大学五十嵐キャンパス、１９９２年１０月

19. 蒲越虎、李相茂、鄭淳讃、藤原英明、溝田武志、二見康之、中川孝秀、池添博、永目諭一郎、Fission-Like Phenomena in Medium Mass Nuclear Systems、日本物理学会　第48回年会　東北大学川内キャンパス、１９９３年３月

20. 本城義夫、冨田成夫、大串和典、豊川秀訓、溝田武志、島邦博、李相茂、100MeV領域重イオンによる Plasma Desorption Mass Spectroscopy、日本物理学会第48回年会　東北大学川内キャンパス、１９９３年３月

21. 古野興平、高橋克夫、小松原哲郎、向淳子、呂駿、$e^--\gamma$ 同時計測用電子検出器、日本物理学会　第48回年会　東北大学川内キャンパス、１９９３年３月

22. 向淳子、小松原哲郎、古野興平、呂駿、早川岳人、筑波大クリスタルボール、日本物理学会　第48回年会　東北大学川内キャンパス、１９９３年３月

23. 小松原哲郎、向淳子、木村博美、皆倉輝志、古野興平、筑波大クリスタルボールのデータ収集系の開発、日本物理学会　第48回年会　東北大学川内キャンパス、１９９３年３月

24. 向淳子、筑波大クリスタルボールによるガンマ線分光、筑波大学開学２０周年記念研究会「原子核構造の精密研究」１９９３年３月

25. 小松原哲郎、A=130領域の奇々核における指標逆転現象、筑波大学開学２０周年記念研究会「原子核構造の精密研究」１９９３年３月

26. 古野興平、EUROBALL計画における原子核構造の研究、筑波大学開学２０周年記念研究会「原子核構造の精密研究」１９９３年３月

27. 呂駿、A=130 領域ガンマバンドの M1/E2 混合比の精密測定、筑波大学開学２０周年記念研究会「原子核構造の精密研究」１９９３年３月

28. 正木満博、青木保夫、重陽子弾性散乱のＳ行列の実験的評価、日本物理学会、新潟大学、新潟県新潟市、１９９２年１０月

29. 青木保夫、正木満博、中川智、加藤健一、中本徳仁、田岸義宏、Wood-Saxon型関数を出発点とした直交関数系と重陽子光学ポテンシャルへの応用、日本物理学会、新潟大学、新潟県新潟市、１９９２年１０月

30. 加藤健一、正木満博、中本徳仁、中川智、向原嘉英、青木保夫、田岸義宏、6Liに対する22MeV重陽子の光学ポテンシャル、日本物理学会　第48回年会　東北大学川内キャンパス、１９９３年３月

31. 正木満博、青木保夫、弾性散乱Ｓ行列の新しい評価方法、日本物理学会　第48回年会　東北大学川内キャンパス、１９９３年３月

32. 青木保夫、正木満博、中川智、田岸義宏、加藤健一、中本徳仁、Wood-Saxon型関数を出発点とした直交関数系と重陽子光学ポテンシャルへの応用 II、日本物理学会　第48回年会　東北大学川内キャンパス、１９９３年３月

33. 田島義一、石原豊之、大島弘行、木村博美、石井聡、高橋努、皆倉輝志、大和良広、小松原哲郎、古野興平、筑波大タンデム加速器の現状、第５回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会

34. 松本信二、古瀬雅子、曽我文宣、村越善次、石原豊之、島邦博、小型加速器のライフサイエンスにおける利用、第５回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会

35. 栂義孝、八木隆志、石井聡、石原豊之、古野興平、静電加速器用非磁性加速管の試作、第５回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会

36. 工藤博、島邦博、吉田映二、石原豊之、長島泰夫、固体イオン励起２次電子分光、第５回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会

37. 大島弘行、田島義一、木村博美、石井聡、高橋努、皆倉輝志、大和良広、石原豊之、小松原哲郎、古野興平、筑波大タンデムのオーバーホール、第５回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会

38. 工藤博、島邦博、石原豊之、竹下英文、山本春也、青木康、樽本洋、桑原登、高速重イオンの固体内荷電の決定、日本物理学会、東京大学、教養学部、１９９２年９月