

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、小松原哲郎、竹内雄三

準 研 呂 駿

技 官 加藤純雄

大学院生 43 名

【1】重イオン核分光学(古野興平、小松原哲郎、呂 駿)

多数のガンマ線検出器で構成するクリスタルボールは、今では原子核分光学の標準的な装置であり原子核構造の研究にとって必須の装置であるが、日本には10台以上の検出器を備えたクリスタルボールが設置されていない。そこで筑波大学の6台の検出器と日本原子力研究所(原研)の5台の検出器を一緒にして合計11台のシステムを作り、原研のタンデム・超伝導ライナック加速器系から得られる重イオンビームを使って原子核構造の研究を進める Japan Ball 共同実験が計画され、平成7年9月より原研に於いて実施された。

(1) 過渡的磁場を用いた高スピン状態の磁気モーメントの測定(橋本奈美¹、古野興平)

原子核の磁気モーメントは、原子核のある状態における陽子・中性子の配位を決定するのに有効であり、短寿命状態の磁気モーメントは摂動角分布または角相関の手法により実験的に求める事が出来る。高スピン状態ではその寿命が $\sim 10^{-12}$ 秒のオーダーで極めて短いから、実験的に有為な角度分布の摂動による変化を得るためには非常に高い磁場 B が必要になる。そのために現在、高速重イオンが磁化された強磁性体の中を通過する際に受ける過渡的磁場(transient magnetic field, 以下 TMF と略記) が利用されている。TMF に対してある範囲で使える経験式があり[1]、それによればイオンの原子番号 Z とイオン速度 v が大きい時に B_{TMF} も大きくなる。

原研では筑波大学より Z が大きいイオンで高いエネルギーが得られるので、それを利用したクーロン励起による ^{181}Ta の基底バンドの g -factor の測定を行なった。 ^{181}Ta の構造は軸対称四重極変形をした芯に $[404]7/2$ ニルソン軌道にある一個の陽子が結合したものと考えられ、低い励起状態は基底状態の上に奇数質量核特有の回転バンドを形成する。そして基底状態(スピン・パリティ $=7/2^+$) および $9/2^+$ 状態の g -factor は既に測定されており[2,3]、励起準位の寿命も Inamura *et al.* によりクーロン励起・ドップラーシフト減衰法で測定されている[4]。我々は寿命がそれぞれ 4.3、2.8、1.6 ピコ秒であり、実験データが報告されていない $15/2^+$ 、 $17/2^+$ 、 $19/2^+$ 状態について g -factor の測定を行なった。

実験は原研のタンデム・超伝導ブースター加速器から得られた 385 MeV の ^{90}Zr ビームを用いて行なった。ターゲットには ^{181}Ta 、鉄、銅からなる3層ターゲットを使い、ターゲットを挟んで永久磁石を配置して 0.17 T の磁場を作り、鉄のフォイルを磁化した。

外部磁場の up/down 非対称度と外部磁場について平均した角度分布の傾斜から核スピンのラーモア歳差に伴うガンマ線の角度分布のシフトを求め、さらに ^{181}Ta の鉄の中での減速を考慮した TMF の評価を行なって g -factor を求めた。結果に対する詳しい議論は文献[5]でなされているが、実験値は変形核の回転モデルによる理論値と良く一致することが確かめられた。

¹理工学研究科2年

(2) 内部転換電子-ガンマ線の同時計数実験 (斎藤武彦²、古野興平)

原子核の形が葉巻型であるかパンケーキ型であるかは、四重極モーメントの符号を見ればよい。しかし短寿命状態の四重極モーメントの測定は一般に磁気モーメントよりも難しく、特に高スピン状態の様な超短寿命領域では直接測定に対する適当な方法がまだ見つからない。したがって現在、四重極変形の条件の下で E2 と M1 が混合する遷移においてその混合比 δ の符号が $\text{sign}(\delta) = \text{sign}[Q_0/(g_K - g_R)]$ となる事に注意して、M1 遷移に関係する $(g_K - g_R)$ の符号が既知であるとき、混合比の符号から間接的に四重極モーメントの符号が推定されている。

混合比はガンマ線の角度分布や $\gamma-\gamma$ 角相関から求められるが、大きさや符号が予め判らない場合には一回の実験で検出器の角度その他の実験条件を最適化して感度・精度を上げる事が難しい。これに対してクリスタルボールを用いれば $\gamma-\gamma$ 角度相関と内部転換電子-ガンマ線の角度相関の同時測定が可能となり、内部転換係数や混合比を精度良く求める事が出来る。そこで我々はクリスタルボールと共に用いる電子検出器を開発した [6]。それは四重極電磁石と三重収束ダイポール電磁石および焦点面に置いた冷却シリコン検出器で構成される。この電子検出器を用いて ^{193}Tl の $11/2^- \rightarrow 9/2^-$ 遷移の混合比について新たな実験を行なった。

奇数質量数の Tl 核では oblate と prolate 変形が共存するとされている。 ^{193}Tl において $9/2^-$ [505] バンドはバンドヘッドの $9/2^-$ 状態の四重極モーメント Q の実験値から $Q < 0$ で oblate 変形と考えられる [7]。これに対してバンド内の E2/M1 遷移の混合比の実験値は過去に $\delta = +0.8$ という値が報告されているが [8]、 $9/2^-$ [505] の陽子状態に対する g_K の計算値は 0.76、また $g_R = Z/A$ とすると $g_R \sim 0.4$ であるから $(g_K - g_R) > 0$ 、したがって $Q > 0$ すなわち prolate でなければならず、明らかに矛盾する。

我々が内部転換電子-ガンマ線角度相関と $\gamma-\gamma$ 角度相関の同時測定から得た $11/2^- \rightarrow 9/2^-$ 遷移の新しい混合比の値は $\delta = -0.59 \pm 0.14$ であり、バンドヘッドの四重極モーメントの符号とも矛盾しない。この結果は $9/2^-$ [505] バンドの変形が oblate である事を強く支持する。

(3) 質量数 132 バリウム原子核における M1 バンド (呂 駿)

数年前に Pb の中性子欠損核において強い M1 カスケード遷移で結ばれる $\Delta I = 1$ バンドが数多く見出され、Tilted Axis Cranking による分析がなされている。この話題の少し前に、同じ特徴を持つ $\Delta I = 1$ バンドが $A \sim 130$ 領域核でも系統的に同定されていた [9]。このバンドの特徴は $B(M1)/B(E2)$ が $10(\mu_N/eb)^2$ 以上であること、混合比の符号が負であること、および慣性モーメント (dynamic moment of inertia) が Prolate 変形のバンドより小さいことである。

図-1 は加速器センターのタンデム加速器とクリスタルボールを用いて得られた ^{132}Ba の励起準位図の一部で、中央上部の枠内には基底状態附近の準位構造を示してある。これらの多彩な励起準位の中で特に 7、8、9 として番号付けされた一連の励起状態は強い M1 遷移で結ばれ、かつ dynamic moment of inertia が $\sim 10\hbar/\text{MeV}$ であることが分かった。特にバンド 7 の励起エネルギーその他の性質は近隣の M1 バンドと非常に良く似ている。さらに、バンド 7、8、9 に対するクランキング模型を用いた内部準粒子配位の推定から、これらのバンドはオブレート変形を持つ事が示唆される。したがってこれらのバンドは現在話題になっているオブレート変形の集団的回転に対応する励起であると期待されるが、今後準位の寿命測定を行なう必要が在る。

(4) 指標逆転現象 (小松原哲郎)

これまでの我々の研究から、質量数 130 領域の奇奇核アイソトープにおける指標逆転現象が見出された [10]。そして ^{124}Cs 、 ^{126}Cs 、 ^{124}La 、 ^{128}La 、等の研究によって、陽子数や中性子数に対する核構造の系統的な変化が明らかになり、指標逆転が起こる条件として粒子配位構造が重

²物理学研究科 2 年

Figure 1 is an energy level diagram for the nucleus ^{132}Ba . The vertical axis represents energy in keV, with levels ranging from 0 to over 1000 keV. The horizontal axis represents different spin-parity states, labeled with numbers and superscripts (e.g., 0^+ , 2^+ , 4^+ , 6^+ , 8^+ , 10^+ , 12^+ , 14^+ , 16^+ , 18^+ , 20^+). Transitions between levels are indicated by arrows, with the energy of the transition labeled next to the arrow. A dashed box highlights a specific region of the diagram, and a label ^{132}Ba is at the bottom right.

実験は原研に於いて Japan Ball 共同実験の一環として行なわれた。この実験結果によれば、Xu 等の実験と異なり問題にしている回転スペクトルは陽子も中性子も $h_{11/2}$ 軌道に配位され、パリティは正であることが判明した。したがって粒子配位や指標依存性については上に述べた Cs や La に対する系統性に合っている。しかし ^{122}Cs の回転バンドはスピン 9^+ から始まり、 ^{124}Cs や ^{126}Cs より大きな角運動量を持つ。またバンドの指標分離は ^{124}Cs や ^{126}Cs では低スピンの大きく分離していたが、 ^{122}Cs ではむしろ初めに縮退していたものが角運動量の増加と共に分離が大きくなる。指標逆転に加えてこのような指標依存性の相違の核構造論的解釈は今後に残された問題である。

- [1] H.R. Andrews *et al.*, Nucl. Phys. **A383**(1982)509.
- [2] C.M. Lederer and V.S. Shirley, *Table of Isotopes*, 7th edition, (1978).
- [3] Z.Z. Aksel'rod *et al.*, Izv. Akad. Nauk. SSSR, **47**(1983)31.
- [4] T. Inamura *et al.*, Nucl. Phys. **A270**(1976)255.
- [5] Nami Hashimoto, Master Thesis, University of Tsukuba, 1996.
- [6] Takehiko Saitoh, Master Thesis, University of Tsukuba, 1996.
- [7] J.A. Bounds *et al.*, Phys. Rev. Lett. **55**(1985)2269.
- [8] V.S. Shirley, Nuclear Data Sheets **61**(1990)519.
- [9] D.B. Fossan *et al.*, Nucl. Phys. **A520**(1990)241c.
- [10] T. Komatsubara *et al.*, Nucl. Phys. **A557**(1993)419c.
- [11] N. Xu *et al.*, Phys. Rev. **C41**(1990)2681.

【2】 クラスタと重イオン核反応 (李 相茂)

(1) 高温中重核・核分裂時間の角運動量依存性

(李相茂、中川孝秀¹⁾、中川恵子¹⁾、阿部恭久²⁾、和田隆宏³⁾)

理研リングサイクロトロンによる $^{88}\text{Ni}(580\text{MeV})+^{56}\text{Fe}$ 系の実験を行い、遅延時間が温度と角運動量に定量的に依存することと、その物理的起源を世界で初めて明らかにした。

核分裂片はT-O-Fにより、荷電軽粒子は3 π phoswich counterで同時計測をした。軽粒子スペクトルは分裂前の複合核からのものと、分裂後の核分裂片からの寄与分で3-source-fitで図1)のごとく運動学的解析により分離された。

得られた実験値よりGEMINI CODEの統計モデル解析により図2)の黒丸のように分裂時間が角運動量の増加とともに減少することが見いだされた。一体散逸の摩擦力を導入したランジュバン方程式による理論的計算は実験値をよく再現し、分裂時間の角運動量依存性はポテンシャル障壁の角運動量による勾配の違いが本質的であることを明らかにした。

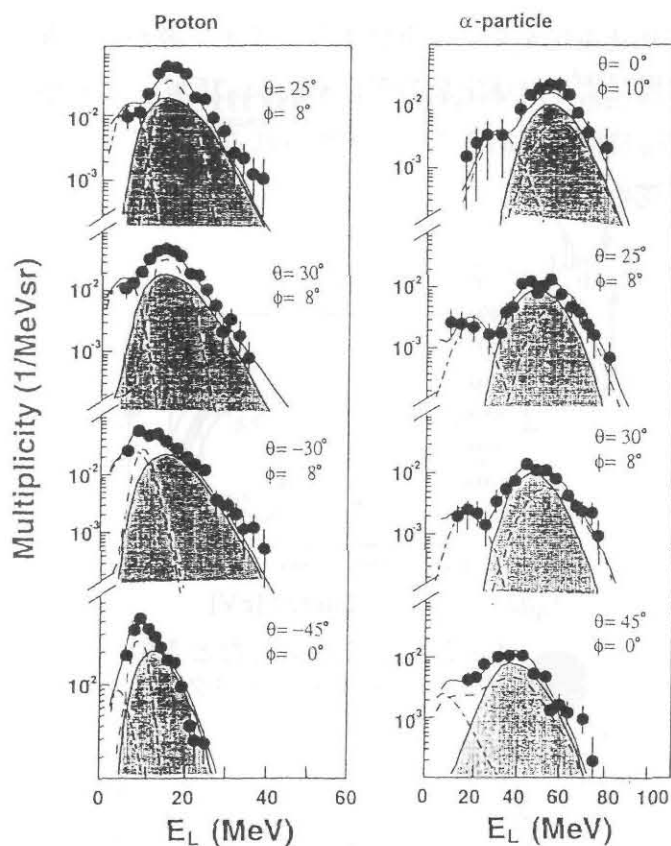


図1)軽粒子と核分裂片の同時計測スペクトル。点線と実線は3source fitで斜線領域は核分裂前軽粒子放出部分

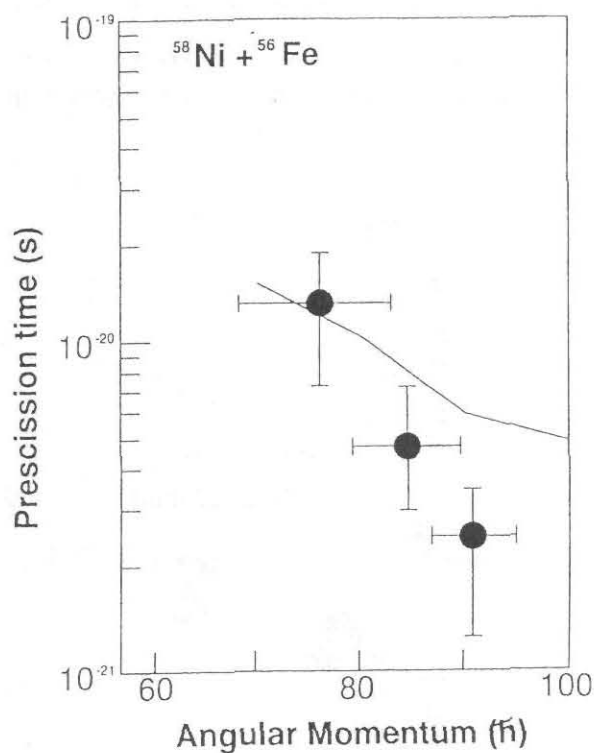


図2)黒丸は実験値より導出された核分裂の角運動量依存性。実線は理論計算値

1)理研、2)京大基研、3)甲南大理

(2) プラズマ中の C_{60} クラスター単分子崩壊

(富田成夫、三浦崇、内田一也、李 相茂)

近年 C_{60} について多くの実験及び理論的研究がなされている。そして、 C_{60} の崩壊のチャンネルとして中性の C_2 分子を連続的に放出する反応がよく知られている。我々の研究の目的は C_{60} のアーク放電プラズマ中での崩壊機構をイオン源から得られるビームの質量分布、およびその崩壊定数を調べることによって解明することにある。

フラーレンイオンの生成は通常の熱陰極電子衝撃型イオン源に約30mgの C_{70} 混合粉末を入れた可動容器を挿入することによって行った。この結果 C_{60} から C_{34} までの C_2 毎の質量分布を得た(Fig.1)。さらに、エネルギー分析器を用いて各フラーレンイオンの飛行中の崩壊過程についての測定を行った。Fig.2は C_{70}^+ を入射したときのエネルギースペクトルである。図から明らかなようにビームエネルギーの68/70に相当する小さいピークが存在する。これは飛行中に C_2 放出した C_{68}^+ であると考えられる。同様な結果は C_{70}^+ のみならず、 $C_{44}^+ \sim C_{70}^+$ までの各フラーレンイオンでも得ることが出来た。この面積比から求めた各フラーレンイオンの崩壊定数をFig.3に示す。次に加速電圧を変える事により、イオン源から引き出されてから測定領域に入るまでの飛行時間による崩壊定数の変化をFig.4に示す。これから、フラーレンイオンの飛行中に何らかの冷却機構があることが予想される。現在はこの冷却機構についての研究を更に進めている。

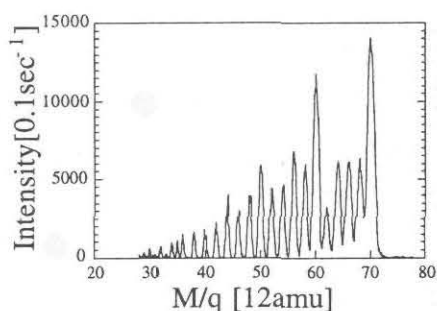


Fig.1: イオン源から得られる質量分布

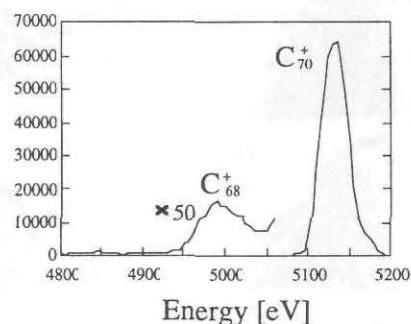


Fig.2: C_{70}^+ を入射したときのエネルギースペクトル

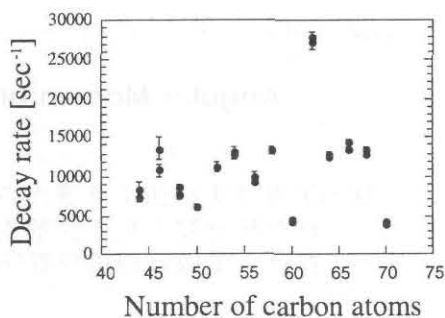


Fig.3: 各フラーレンイオンの崩壊定数

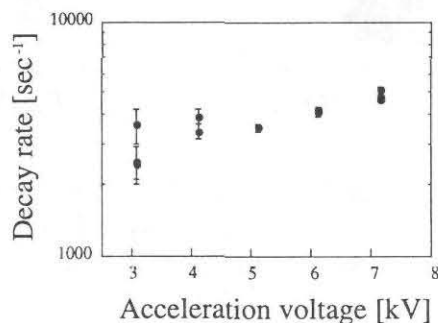


Fig.4: 飛行時間による崩壊定数の変化

(3) マイクロ・クラスター分裂の研究装置

(富田成夫、溝田武志¹⁾、李相茂)

この研究の目的は、強い相互作用で結びついている原子核と弱い電磁気力で結合しているマイクロ・クラスターの分裂を比較することにより、有限量子多体系の分裂現象を統一的に研究しようとするものである。特に原子核の最大核子数($A < 250$)をはるかに越えたクラスターサイズ $N < 3000$ の系に対し、多価電荷原子ビーム交差法という新しい方法を用いて、クラスター価数 $q = +20$ までを作り、大クラスター分裂の実験を行う。

また分裂寿命を測ることにより、クラスターの shape isomer 量子トンネル現象、Na が $N = 1400$ を境にして量子液相から固相への相転移が起きるが、このような相転移を伴うメタルクラスター分裂を世界で初めて観測することを狙う。図1)は科研費重点領域(平成8～10年度)による装置の概略図である。

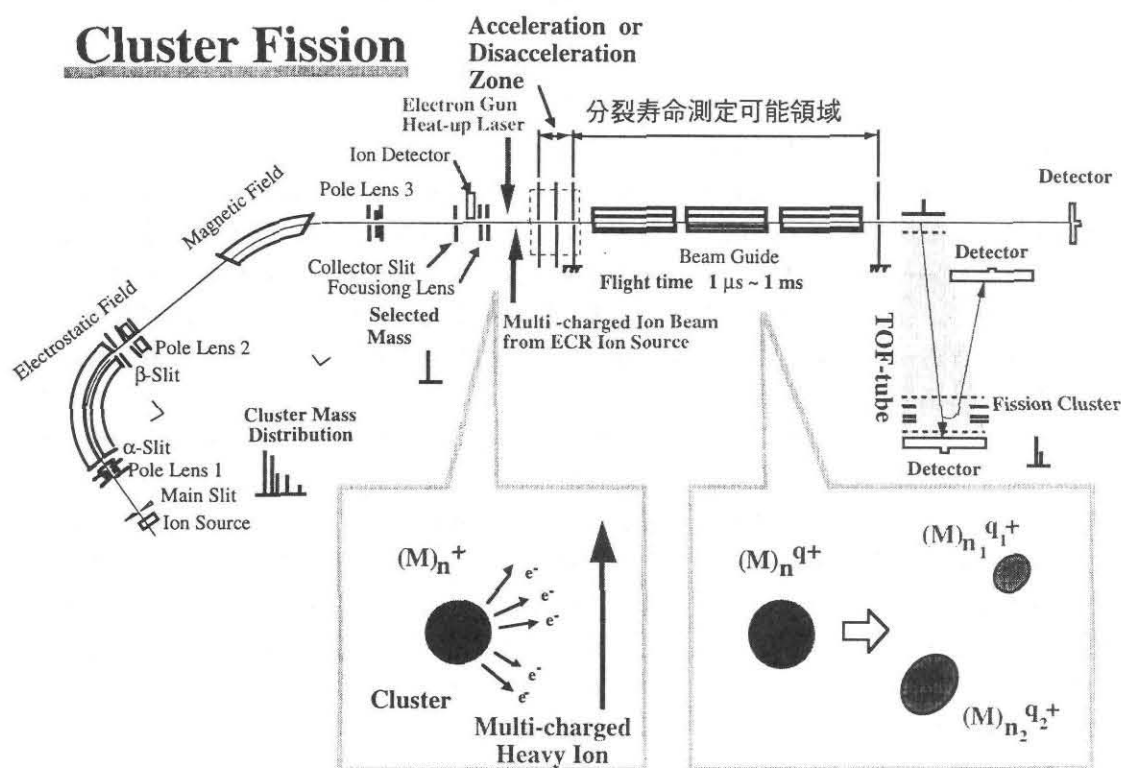


図1) マイクロ・クラスター分裂の研究装置

1) 電子技術研究所 (新技術事業団、科学技術特別研究員)

【3】 スピン偏極核反応実験（青木保夫、田岸義宏）

昨年度は1) 光学モデルポテンシャルから導かれる、原子核内の様子を細かく調べること、2) (d, p) 反応の実験と解析、3) 全反応断面積測定系の開発、4) 甲南大学グループを中心としたLi原子核のクーロンポテンシャルによる分解過程の実験、5) 重陽子入射による連続スペクトラム領域におけるテンソル偏極分解能の測定、6) 低エネルギー領域での重陽子融合反応のベクトル偏極分解能の測定、7) 東京工業大学グループと協力して ^{19}F (d, p) 反応を用いた ^{18}F 励起準位のスピン・パリティの決定、8) 長崎総合科学大学との共同研究による ^{90}Zr (p, p) 反応を用いたパリティ非保存の実験等を行った。ここでは、ほぼ一段落した1)、5)、6) について報告する。

(1) 偏極陽子弾性散乱から見た ^{40}Ca 核内での陽子の流れの密度と吸収分布

我々は、光学ポテンシャルを”モデルに依らない”解析手法で導く事を昨年度に報告し、論文にまとめた。この手法で導かれたポテンシャルと波動関数を用い、原子核の近傍と内部で入射陽子がどのように振舞っているかを調べた。まず実験値を再現する様に光学ポテンシャルを我々の手法で決定する。20.5 MeV以下の実験データは筑波大学で測定し、30.2から79.5 MeVのデータは大阪大学核物理研究センターで京都大学のグループが測定したものを利用して戴いた。標準的な量子力学の知識から流れの密度 i を計算できる。

$$i = \frac{\hbar}{\mu} \Im \Psi^* \nabla \Psi$$

波動関数の規格化には自由度があるので、絶対値は当面意味が無い。図1に20.5 MeVと65 MeVのz方向（平均的な入射陽子の進行方向）に偏極した陽子の流れの密度を示す。先ず20.5 MeVの陽子のxz面内での軌道を見よう。特徴的な事は、原子核の遠くを通過する陽子はクーロン軌道を描くが、近くを通過する陽子は、原子核に近付くと核力（引力）のために内側に曲げられ、z軸上に焦点を結ぶ。その後、反対側から原子核に入ってきた波と焦点付近でぶつかり、外向き跳ね返される。内向きの波と焦点で跳ね返された波が原子核の表面付近で渦を巻いている。この渦の中心は波動関数の振幅が非常に小さくなっている。スピン依存力が存在しないと、軌道はいつもxz面内に留まるが、我々はスピン軌道相互作用を考えるので原子核内に入り込んだ陽子の軌道は、進行方向に垂直な力を受けて、時計回りに回転し、y成分を持つようになる。スピンの向きと軌道角運動量が直交していて古典的にはスピン軌道力の期待値は0であるのに軌道に捻りが持ち込まれるのは面白い現象である。この回転方向は角運動量をそのz成分の昇降演算子で記述すると簡単に理解できる。特徴的な事は、この回転方向がスピン軌道力の符号に依存しないことである。すなわち、引力でも斥力でも回転方向は変らない！ 軌道の捻れ具合から最初にz方向を向いていたスピンにどの程度-z方向成分が混入してくるかを評価出来る。

今の場合最大に捻れている軌道で0.1程度である。65 MeVに陽子エネルギーが上がると、慣性が大きくなり、核力も実質的に弱くなるので、もはや核内には焦点を結ばない。しかし、エネルギーが高くなると軌道角運動量の大きな波の寄与が増えるのでこの図の内、最大に捻れている場合で、スピンのz成分は0.2程度混ざっている。

流れの密度の発散を計算すると波が原子核のどの部分で吸収されたかが分かる。20 MeVでは核内の波数が 1.4 fm^{-1} 程度だから、これが実質的な位置分解能を決めている。図2の吸収分布は全空間で積分すると符号を除いて、全反応断面積となるように規格化されている。エネルギーが低いと、焦点の位置で極端に吸収されていることが分かる。原子核反応の直接過程の理

論では、この強く吸収されている部分で多くの反応が起こっていると予言する。エネルギーが高くなり、焦点が原子核の外に移っていくと、吸収分布は急速に原子核全体にひろがっている。これは、全断面積が幾何学的な意味での保存則に対応しているからである。原子核の内部にできた‘高温領域’がどのように広がっていくか又は一般に緩和していくかが分かると原子核反応の機構のより詳しい議論が出来るわけだが、我々の用いたシュレーディンガー方程式は時間に依存していないので、この議論はできない。時間に依存した反応理論の構築が待たれる。

流れの密度と吸収の分布が計算出来ると、これから非弾性散乱 (non-elastic scattering) の平均自由行程 λ_i が評価できる。

$$\lambda_i = \frac{-\nabla \cdot \mathbf{i}}{|\mathbf{i}|}$$

この式をみればすぐに物理的な意味は理解できるであろう。直感的にこれと比較出来るのは以下の量 Λ であろう。

$$\Lambda = \frac{\{\text{原子核の体積}\}}{\{\text{全反応断面積}\}}$$

図3に $-\lambda_i$ の分布を示す。 λ_i は20.5 MeVの場合、渦が出来ていた領域ではうまく定義出来ないが焦点では大体1.7 fm、65 MeVの場合は原子核全体でほぼ一様なり5 fm程度である。

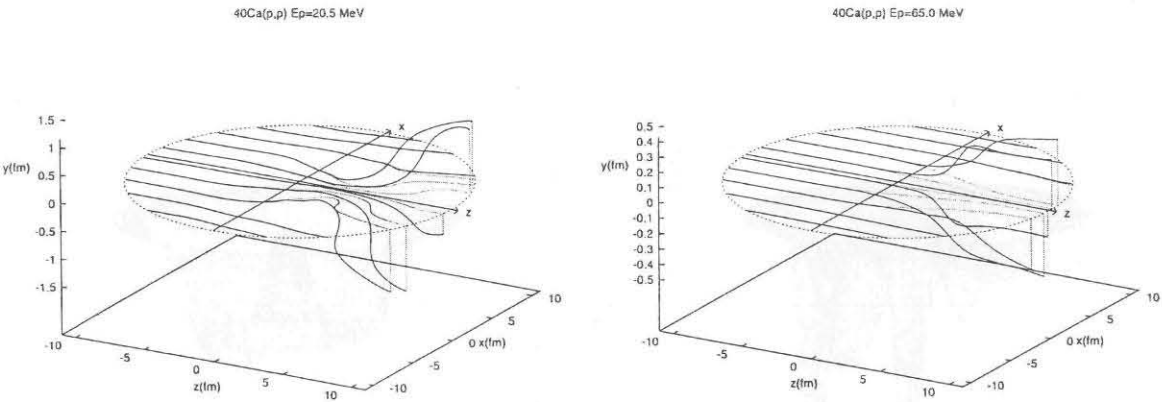


図1 入射エネルギーが20.5 MeVと65 MeVの時の $s_z = +1/2$ に偏極した陽子の原子核内と近傍での流れの密度。破線是对应する流れの密度のx z 面への射影。

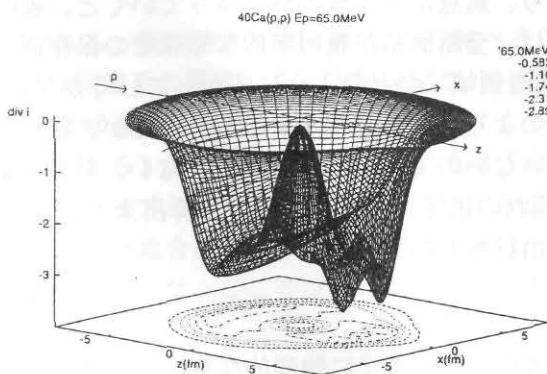
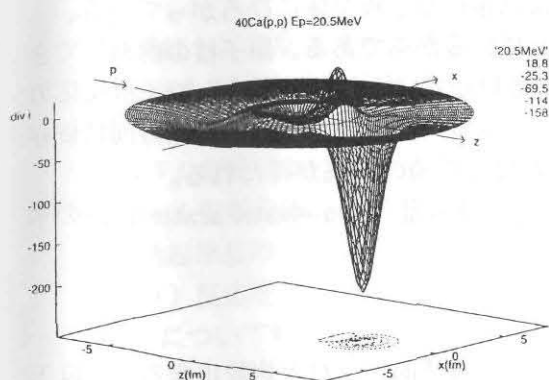


図2 入射エネルギーが20.5 MeVと65.0 MeVの時の陽子の原子核内と近傍での吸収分布。吸収は偏極の向きには依らない。縦軸の大きさに注意。この図を全空間に渡って積分すると全反応断面積(860と800 mb)を与える。

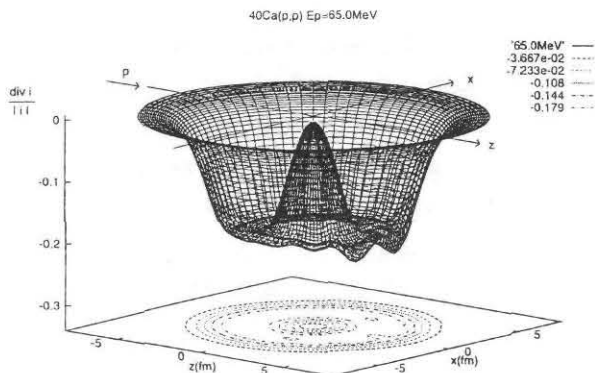
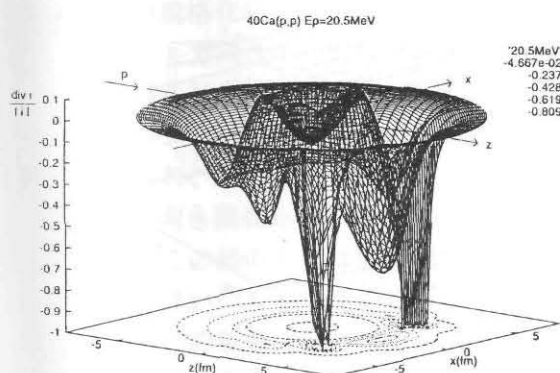


図3 入射エネルギーが20.5 MeVと65.0 MeVの時の $s_z = +1/2$ に偏極した陽子の原子核内と近傍での非弾性散乱平均自由行程の図。20.5 MeVの場合出口付近で渦をまいている場所があり、そこでは流れの密度が極端に薄いので、振るまいが大きい。

(2) 重陽子入射における連続スペクトラム領域での偏極分解能

一般に原子核の励起準位はその励起エネルギーが高くなれば、準位密度が増えて連続になる。残留核をそのような連続状態に励起すれば放出粒子のスペクトラムは連続である。また重陽子のように入射粒子が壊れやすいと核力およびクーロン力によって分解する。その場合にも放出陽子は連続スペクトルを示す。(d, p) 反応においては、一般にこの連続スペクトル領域への反応断面積は大きく、原子核反応の大部分を占めているが、この領域の研究は、あまりなされていない。今回この未開拓の領域での反応機構を調べるため偏極重陽子入射でのテンソル偏極分解能 T_{20} の測定を系統的に行った。

実験は、筑波大学加速器センターのタンデム加速器、ラムシフト型偏極イオン源を用いて行った。測定は、汎用大型散乱槽で行い、核反応からの放出荷電粒子は、Si半導体検出器のカウンターテレスコープにより粒子識別を行い、放出陽子エネルギーを1.5~23 MeVの領域で測定した。ターゲットとして広いA, Zの範囲を系統的に調べるため ^{62}Ni , ^{92}Mo , ^{108}Pd , ^{197}Au , ^{209}Bi の5つについてテンソル偏極分解能 T_{20} の測定を入射重陽子エネルギー18, 16, 14, 12, 9 MeVで測定した。測定角度として実験室系で60, 90, 120, 150度で行った。 ^{197}Au (d, pX)反応の実験結果の一例を下図に示す。

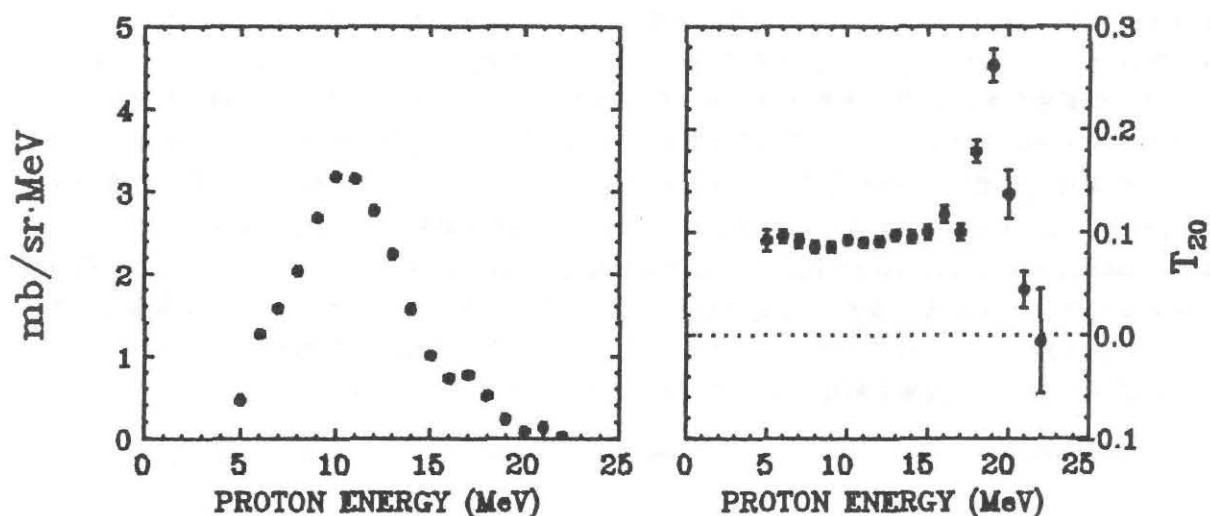


図 $E_d=18$ MeV, $\theta_{\text{lab}}=150^\circ$ における ^{197}Au (d, pX)反応の連続スペクトル領域における二重微分断面積(左図)およびテンソル偏極分解能 T_{20} (右図)。

特徴をまとめると、 ^{62}Ni , ^{92}Mo (d, pX)では複合核反応が支配的である。これは角度分布が等方的であることから結論できる。また ^{62}Ni , ^{92}Mo (d, pX)での T_{20} は0である。 ^{108}Pd , ^{197}Au , ^{209}Bi (d, pX)では直接過程(ブレイクアップ)が支配的である。これは、角度分布が前方で大きくなることとHauser-Feshbach計算から得た断面積よりもはるかに大きい(オーダーが違う)ことから結論できる。 ^{108}Pd , ^{197}Au , ^{209}Bi (d, pX)の T_{20} は有意な値を持っており、後方にいくほど大きい($\theta_{\text{lab}}=150^\circ$ で~0.1)。特筆すべきことは、 ^{197}Au , ^{209}Bi 標的に対し放出陽子のエネルギーによらず T_{20} の値が一定値を示している事である。ブレイクアップ過程からの陽子の T_{20} は放出陽子のエネルギーに関係なく一定の値を示し、後方にいくほど大きな正の値を持つと推察される。現在理論解析との比較を進めている。なをこれらの結果については、1996年春の日本物理学会において報告した。

(3) 低エネルギー領域における重陽子融合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 $d + d \rightarrow p + {}^3\text{H}$ 、および $d + d \rightarrow n + {}^3\text{He}$ 反応は少数核系の物理として大変興味ある反応である。またこれらの反応は、元素合成および核融合エネルギーとしても重要な核反応であり、その反応機構の詳細な解明が要求されている。特に核エネルギーの問題として $d + {}^3\text{He} \rightarrow p + {}^4\text{He}$ 反応は中性子の放出を伴わないクリーンな反応として期待されている。しかし重陽子と ${}^3\text{He}$ の混合プラズマ中では同時に重陽子融合反応が生じ中性子やトリチウムが発生する。この問題に対して重陽子を核偏極させる事によって重陽子融合反応を抑制できる可能性が指摘された。しかし現在までに標的核および入射核の双方が偏極した実験はなされていないが、偏極重陽子ビームによる $D(d, p)T$ 、および $D(d, n){}^3\text{He}$ 反応の実験データからこの問題に関しより詳細な議論ができる。すでに我々は、 $D(d, p)T$ 反応に関して入射重陽子エネルギー 30-90 keV に対して全ての偏極分解能を測定しその結果を発表した。また最近 $D(d, p)T$ 、および $D(d, n){}^3\text{He}$ 反応のテンソル偏極分解能の測定結果が報告された。今回我々は、初めて $D(d, p)T$ 、および $D(d, n){}^3\text{He}$ 反応のベクトル偏極分解能の測定を行いこれらの反応機構の解明に貴重な情報を提供した。実験は、筑波大学加速器センターイオン源室において、Lamb-Shift型偏極イオン源を用いて行った。偏極イオンビームの入射系の下流に今回新しく設計製作した散乱槽を接続して行った。内部には、荷電粒子検出器として6個の半導体検出器を散乱角60度から135度まで15度おきに設置し核反応から放出される陽子、トリチウム、 ${}^3\text{He}$ 粒子のエネルギーを測定する。ベクトル偏極分解能の測定を、入射エネルギー 30, 50, 70 keV について行った。その結果を下図に示す。その特徴は、(1) $D(d, p)T$ および $D(d, n){}^3\text{He}$ 反応のベクトル偏極分解能は共に入射エネルギー依存性が小さい。これは、微分断面積の角度分布が大きなエネルギー依存性を示しているのと対照的である。(2) $D(d, p)T$ 、および $D(d, n){}^3\text{He}$ 反応の間にベクトル偏極分解能の系統的な違いが見られない。一方、70 keV では、微分断面積の角度分布に $D(d, p)T$ と $D(d, n){}^3\text{He}$ 反応に大きな差が見られている。今回の実験結果は、東京理科大学の宇津氏によって4体Faddeev-Yakubovsky方程式による理論計算との比較が行われた。その結果によると微分断面積およびテンソル偏極分解能の角度分布は、かなり良く再現されるけれどベクトル偏極分解能に関しては、実験値の1/10程度の大きさしか出てこない。さらに詳細な理論解析が要求される。今後今回測定されなかった偏極分解能に関して系統的な測定を行う。

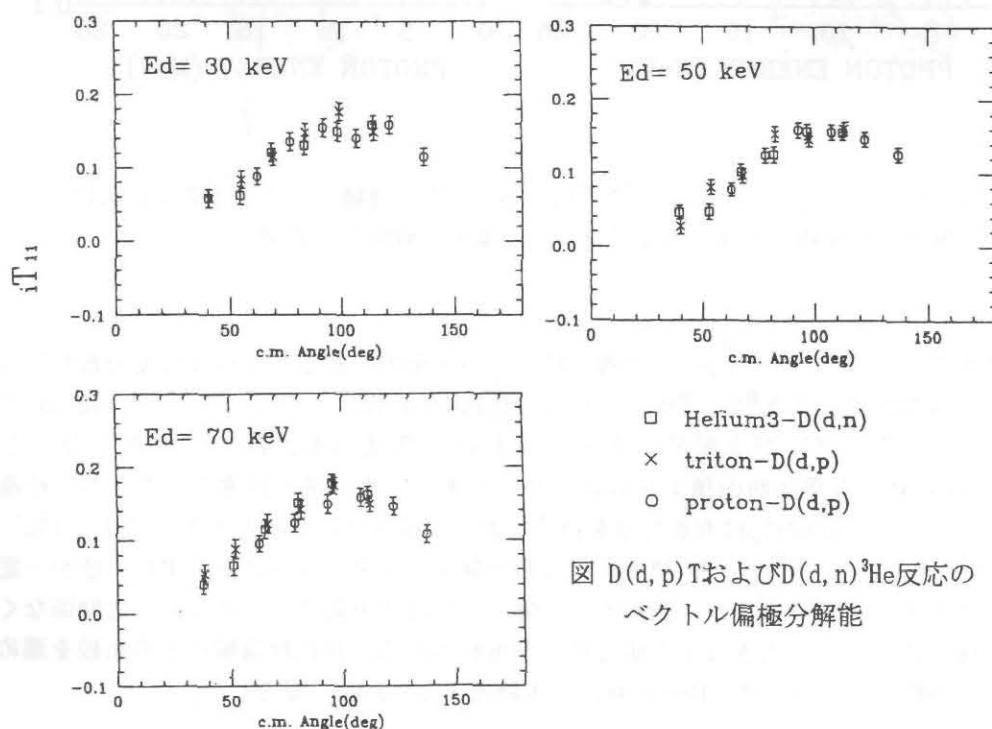


図 $D(d, p)T$ および $D(d, n){}^3\text{He}$ 反応のベクトル偏極分解能

【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、西村俊二）

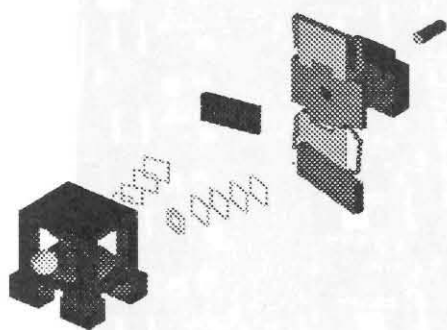
（1）高エネルギー重イオン衝突実験（八木浩輔、三明康郎、栗田和好、西村俊二、加藤純雄）

a) クォーク・グルオンプラズマ検証実験のための高時間分解能飛行時間測定器の製作

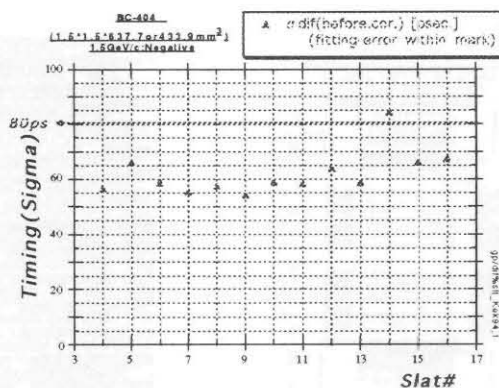
我々の宇宙を構成する素粒子（ハドロン）は、クォークとグルオンが閉じ込められた状態と考えられているが、非常に高温高密度になると、閉じ込めから開放されて、クォークとグルオンのプラズマ状態（QGP）に相転移すると予測されている。筑波大学計算物理学研究センター等でなされた最近の量子色力学の数値計算によると、QGP相転移の起こる臨界温度は150 MeV程度と考えられ、高温高密度状態を作り出すことのできる高エネルギー重イオン衝突を用いるとこの臨界を十分超えると考えられている。我々は米国ブルックヘブン国立研究所（BNL）や欧州の原子核研究機構（CERN）における高エネルギー重イオン衝突を利用したQGP相転移の研究を進めている。

QGP生成の証拠として様々な実験的方法が提案されているが、なかでも、1）平均横運動量の増加、2）巨大パイ中間子ガスの発生、3）ファイ中間子の質量変化の検出が重要である。これらの測定のためにはハドロンの識別・測定が必須である。平成6年度より科研費・特別推進研究（代表；三明康郎）の交付を受けてハドロンの識別測定に必要不可欠な飛行時間測定器（TOF）を建設を行い、CERN-SPS（WA98）実験（下左図）及RHIC（PHENIX）実験においてハドロン測定を行う。反応中心部において生成されるパイ中間子、K中間子、陽子などのハドロンの系統的測定を進めている。

平成6年度までに行われた開発研究に基づいて飛行時間測定器の設計を完了し、プロトタイプを製作した。高エネルギー物理学研究所のテストビームを用いて性能評価を行ったところ、図に示すように固有時間分解能80ピコ秒以下という設計通りの時間分解能を得ることが出来た（下右図）。この成果をふまえ飛行時間測定器の量産を開始した。全体の半数に相当する5パネル（光電子増倍管1000本分）について製作を行いCERNに搬入、設置した。



欧州共同原子核研究機構における実験。

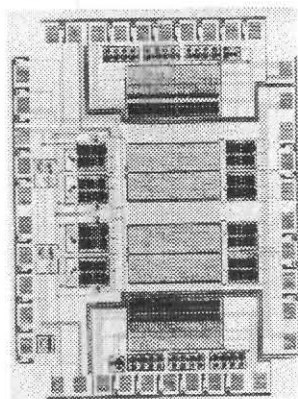


飛行時間測定器プロトタイプの時分解能

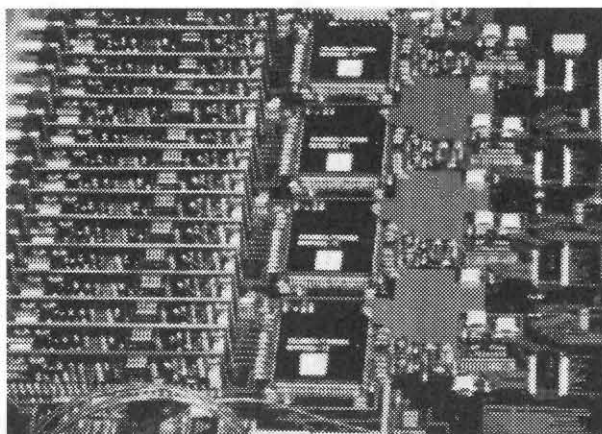
b) 高時間分解能飛行時間測定器用読み出し回路の製作

光電子増倍管から得られる時間情報を読み出す回路についてコロンビア大学ネヴィス研究所との共同開発を行ってきた。仕様や概念設計について十分な提案・検討を行い、衝突型加速器実験における高時間分解能飛行時間測定器の読み出しに最も適したパイプライン処理方式の回路を設計した。この読み出し回路のために新しい集積回路の開発を行った（左下写真参照）。この集積回路には4系統の時間・電圧変換器（TVC）と64セルからなる電圧記憶素子（AMU）を内蔵し、最大4マイクロ秒の間、測定した時間情報を保持する事が出来る設計となっている。精密時間測定において最大の障碍となるクロストークの解決のため、それぞれの系統に等価な2つの回路を集積回路の上に置き、光電子増倍管からの信号はその片方のみに接続し、他方はクロストークを測定する参照用として機能させ、両者の差分出力を用いるという特殊な構造を採用した。このことにより、実効上クロストークをキャンセルすることに成功し、高時間分解能飛行時間測定器に最適化された回路となっている。これらの工夫により、世界初の高時間分解能パイプラインTVC/AMU集積回路が完成し、100ナノ秒以上のダイナミック・レンジにおいて時間分解能25ピコ秒以下の性能を達成している。飛行時間測定器からの信号の大きさもあわせて記録するために、電荷・電圧変換器（QVC）と電圧記憶素子（AMU）の集積回路も同時に開発した。

この新開発の集積回路を用いて読み出し回路を設計した。各ボードに時間変換用、電荷変換用集積回路をそれぞれ4個搭載し、16チャンネルの光電子増倍管からの信号を処理する能力を持つ。パイプライン処理されたデータは各ボード上に配置したFPGAと呼ばれる演算素子を用いてデータ処理され、一定の形式に変換されたデータがボード上で作られる構造となっている。このデータはDSPと呼ばれる計算機ボードに転送され、データ圧縮され、テープに記録される。プロトタイプの性能評価のために、平成8年2月に高エネルギー物理学研究所においてテスト実験を行った。筑波大で作成した前述の飛行時間測定器と組み合わせてテストを行い、設計通りの固有時間分解能80ピコ秒が得られることを確認した。これらのプログラミング及び読み出し回路の製作のため筑波大学から栗田講師と大学院2名がネヴィス研に常駐して進めている。



集積回路の写真



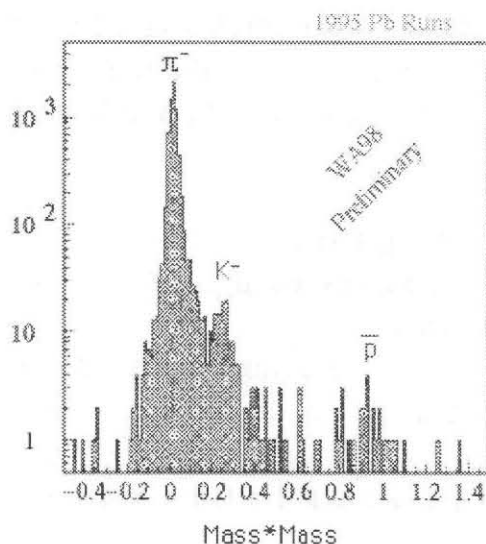
高時間分解能飛行時間用読み出し回路

c) 欧州共同原子核研究機構における実験

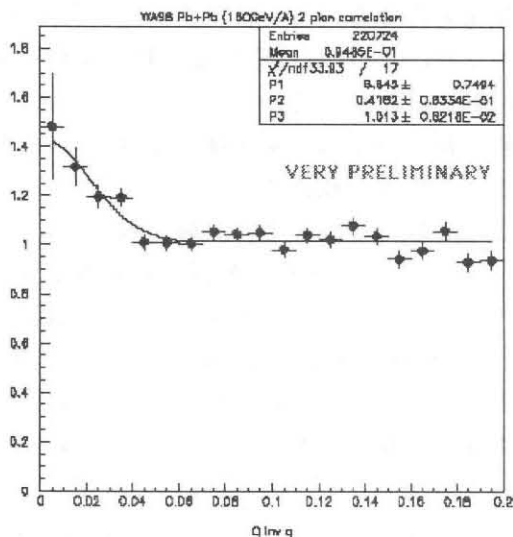
平成7年11月～12月に欧州共同原子核研究機構（CERN）における鉛ビームを用いた実験を行い、1粒子包括測定、HBT相関測定について十分な量、質のデータを収集することに成功した。飛跡検出器の位置分解能を包含した上で、飛行時間測定器全体の時間分解能として120ピコ秒を少なくとも達成していることが確認された。約17メートルの飛行距離に対して負電荷を持つ粒子の粒子識別に使用され、下左図に示すようにパイ中間子、K中間子、反陽子が識別され、十分な粒子識別能力を持つことが示された。様々なトリガー条件の下で1粒子包括測定がなされ、現在データ解析を鋭意進めている。本実験のために筑波大学から西村助手と大学院生2～3名が平成7年7月からCERNに常駐して研究を進めている。

ハドロン状態からQGP状態への相転移ではカラーの自由度が解放され、系の自由度が劇的に増加するという大きな特徴がある。高エネルギー重イオン衝突で生成されたQGPが再びハドロン相に戻る相転移においては、系の自由度即ちエントロピー密度が劇的に減少する。エントロピーが減少しないことから体積の巨大なハドロンガスの発生が予測される。これは、極めて特徴的な現象であろう。

巨大ハドロンガスの発生の有無を調べるために、パイ中間子間のHBT干渉のデータ解析も同時に進めている。パイ中間子を2個同時に測定すると発生源の大きさの逆数に相当する相対運動量に特有な相関が現れるというもので、この干渉分析から粒子発生の時空的大きさを研究する事が出来る。現在までに、平成7年度にCERNにて収集された全データの約10%程度の分析が完了した段階であるが、下右図に示すように、すでに明瞭な相関が現れつつあり、今後の解析に大いに期待している。



飛行時間測定により求めた質量分布。



2粒子相関。

(2) ハドロシー原子核反応(新井一郎, 八木浩輔)

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

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。CPの破れの研究は1964年の「 $K_L \rightarrow 2\pi$ 崩壊におけるCPの破れの発見」以来30年以上にわたって続けられてきたが、まだその起源を十分に理解していない。

CPの破れの起源についての1つの有力な考えは、カビボ-小林-益川(CKM)行列要素に複素数位相を取り入れた標準模型である。この考えの実験的検証はFNALやCERNにおいて進められているが、まだ決定的な結果を得ていない。一方、宇宙におけるバリオン非対称性の観測からは、CKM位相とは起源の異なるもの、つまり《標準模型を越えたCPの破れの機構》の存在が示唆されている。実際、観測されている宇宙におけるバリオン数/エントロピー比(n_B/s) $\sim (0.6-1.0) \times 10^{-10}$ に対して、CKM位相は $\sim 10^{-20}$ を与えるのみである。標準模型を越えたところにあるCPの破れの起源を実験的に探ることは宇宙におけるバリオン生成のシナリオを理解する上でも極めて重要になる。

我々は、1992年度より、カナダ・アメリカ・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探索』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進めてきた(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(図1を参照)を用いて行なう。 K^+ 中間子の崩壊平面にたいして垂直方向の μ^+ 中間子のスピン偏極(P_T)を精密に測定することにより、時間反転不変性の破れを探る。 P_T は時間反転変換にたいして符号を変える量なので、0でない P_T の観測はただちに時間反転不変性の破れの存在を意味する。

$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ 崩壊における P_T についての時間反転不変性の破れの探索は、2つの点で重要な意味を持っている。まず第1に、CKM位相からの寄与が $\sim 10^{-6}$ と大変小さいことである。つまり、 P_T における有意な時間反転不変性の破れの検出は標準模型を越える新たな物理の展開に直接結びついているということである。第2に、終状態に1つの荷電粒子しか存在しないため、 $K_L^0 \rightarrow \pi^- \mu^+ \nu$ 崩壊における P_T の測定などの他の反応と較べて、終状態相互作用の効果が 10^{-6} 程度と極めて小さいことである。

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、モンテカルロ計算によると 5×10^{-4} の感度の達成が期待されている。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^+ 中間子ポラリメータ、 π^0 検出器の読み取り、などを担当している。検出器系のビームによる調整がほぼ終了し、1996年4月より本番のデータ収集が開始される。

b) 核物質からのストレンジ・クォークの生成と偏極 -後方 Λ および K^0 粒子生成-

Λ 粒子は、ストレンジ・クォーク(以下s-クォークと呼ぶ)を含む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

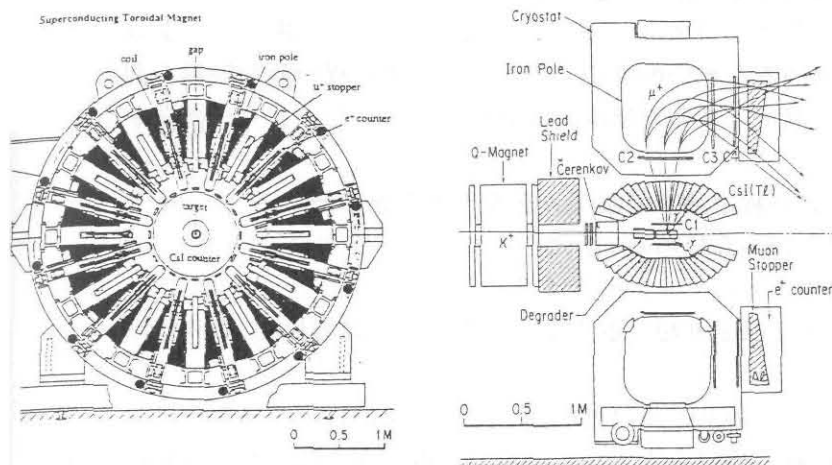


図1. $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ 崩壊における
時間反転不変性の破れの探索
実験セットアップ

の過程、すなわち(1)s-クォーク・反s-クォーク対の生成および(2)s-クォークと(u \bar{d}) \bar{u} -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と、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だろう。また、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。 K^0 粒子についても全く同様のことが言える。ただし、この場合は生成過程が反s-クォークとd-クォークとの再結合が主なものである、 Λ 粒子とは相補的なプローブになると考えられる。

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。

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($\pi^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow \Lambda / K^0 + X$ at 4 GeV/c, $\pi^- + {}^6\text{Li} \rightarrow \Lambda / K^0 + X$ at 4 GeV/c)を進めてきた。この実験結果を理解するため、クォーク描像(コヒーレント・チューブの生成による粒子生成と再結合時のトーマス歳差を仮定したクォーク-パートン模型)にもとづいて計算を行ったところ、不変微分断面積、偏極度および断面積の標的質量数依存性がともによく再現できた。その結果、s-クォークと(u \bar{d}) \bar{u} -ダイクォークとの再結合係数が反応に関与する核子クラスター数(i)に比例することがわかった。再結合係数のi-依存性は、反応に関与する核子クラスターにおいて、ストレンジ・クォークの海が変容していることを示唆している。

上述のクォーク描像は、反応によって作られる”熱い核物質”からの粒子生成を前提としている。もう一つの可能性として、原子核内部にもともと存在している”冷たい核物質”からの粒子生成を前提とするクォーク描像が考えられる。一つの候補として、少数核子相関模型がある。これは、核内に存在するi-核子の相関を独立したサブシステムと考え、そこからの粒子生成をクォーク-パートン模型で計算するものである。我々は、現在、この少数核子相関模型に基づいた後方 Λ 粒子生成および後方 K^0 粒子生成の計算をすすめている。後方 Λ 粒子生成については暫定的な結果を得ている。それによると、不変微分断面積およびその標的質量数依存性がよく再現できた。再結合係数のi-依存性についても同様の結果を得た。

c) π 中間子-原子核反応における η 中間子の生成

π 中間子による原子核の励起は、もっとも基本的な反応の一つであるにも関わらず、閾値～数GeVのエネルギー領域で実験的にも理論的にも系統的な研究が全く行われていない。

一方、素過程である π -核子反応における η 中間子生成については系統的なデータが揃っており、部分波解析による散乱振幅の現象論的模型が確立している。

我々は、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この反応の実験研究を進めるための準備の一環として、素過程の散乱振幅を利用した核内カスケード計算による既存実験データの現象論的な解析を開始した。とくに興味をもたれる点としては、

- (1)素過程の散乱振幅でどの程度まで実験データを再現できるか？
- (2)多核子反応の寄与はどのくらいあるのか？
- (3)素過程自体が核媒質中でどのくらい変容するか？
- (4) η 中間子に強く結合する核子共鳴（S11, D13）の変容はどうか？

などがある。

現在、部分波解析の結果から弾性散乱および η 中間子生成の素過程散乱振幅を計算して結果を核内カスケード計算に組み込み、検討をすすめている。今後、さらにこれら以外の π -核子反応についても、部分波解析の散乱振幅をとりいれて計算の精密化を計って行く予定である。

d) CsI(Tl)カロリメータの波形読み取りシステムの開発

高エネルギー実験においては、測定の数率が非常に高く、検出器からの信号に対して偶然事象による信号の混入（パイルアップ現象）が起こりやすい。このことは、CsI(Tl)カロリメータのような応答速度の遅い検出器の場合特に著しい。その結果、正規事象の正確なエネルギーや発生時間の測定が困難になる。このような状況を克服する1つの方法は、読み取り装置に特別な工夫を施すことである。最近、この解決策として波形記録器（TD）の利用が注目されている。TDでは、正規事象を含みその前後にまたがる時間窓内の信号を一定のサンプリング間隔で記録する。それらの波形データに対して波形解析を行うことによって、パイルアップ現象やノイズなどに起因する分解能の劣化を防ぎ、より精度の測定を可能にする。

我々は、高エネルギー物理学研究所およびプリンストン大学との共同開発研究として、SCA-TD波形読み取りシステムの開発を行った。SCAとはランダムアクセスのアナログパイプラインメモリICで1チップあたり8チャンネル×128サンプルの記憶容量を持ち、最大100MHzのサンプリングが可能である。システムはFastBus規格に準拠しており、SCA-TD波形読み取り部とデジタルシグナルプロセッサ（DSP）波形データ処理部とから構成される。DSPにはモトローラ社のDSP56002（40MHz）を採用し、20MIPSの高速データ処理を実現している。今年度は、1モジュールあたり32チャンネル×128時間サンプル、8MHzのサンプリング速度を持つ試作機を開発し、試験を行った。

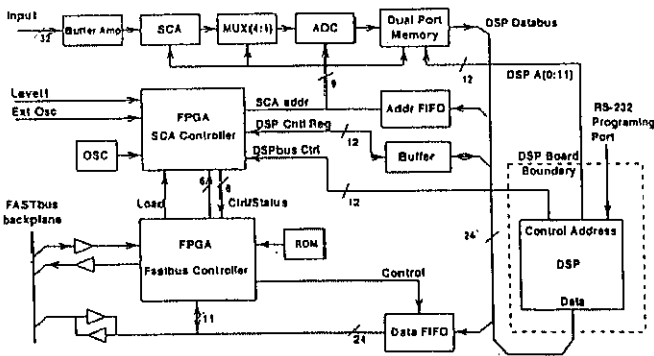


図2. SCA-TD波形読み取りシステム

<論文>

1. Ahle,L., Hayashi,S., Kumagai,A., Kuruta,K., Miake,Y., Yagi,K., and E866 Collaboration
Recent Results from E866, Nucl. Phys. A590 (1995) pp. 249-258
2. Shigaki,K., Hayashi,S., Kumagai,A., Kurita,K., Miake,Y., Yagi,K., and E866 Collaboration
Study of Hadron Production in Au + Au Collisions at 11 A GeV/c with the AGS-E866 Forward Spectrometer, Nucl. Phys. A590 (1995) pp.519-522
3. Yagi,K.,
PHENIX Experiment at BNL-RHIC: Re-Creating the Early Universe in the Laboratory,
Proc. Interna. RCNP Osaka Conf. on Color Confinement and Hardrons, March 1995,
275-281 (World Scientific, 1995, Singapore)
4. Beker,H., Miake,Y., Nishimura,S., and NA44 Collaboration
Mt Dependence of Boson Interferometry in Heavy Ion Collisions at the CERN SPS,
Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 3340-3343
5. Boggild,J., Nishimura,S., Miake,Y., and NA44 Collaboration
Directional Dependence of the Pion Source in High-Energy Heavy Ion Collisions,
Phys. Lett. B349 (1995) 386-392
6. Miake,Y.,
Time of Flight Techniques in High-Energy Heavy Ion Experiments
American Inst. Phys. 340 (1995) 78-89
7. Yang,X.H., Hayak,T.K., Chi,C.Y., Cole,B.A., Nagamiya,S., Zajc,W.A., and Miake,Y.,
Monte-Carlo Studies of the Performance of Scintillator Detectors for Time-of-Flight
Measurements, Nucl. Instr. and Methods A354 (1995) 270-279
8. Hirota,K., Aoki,Y.,
208Pb(d,d) and (d,p) reactions around Ed=20MeV and CDCC, CDCC(d,p) analysis, The
XIV RCNP Osaka International Symposium on Nuclear Reaction Dynamics of Nucleon-
Hadron Manybody System, (1995)
9. Aoki,Y., Hirota,K., Kishita,H., Koyama,K., Masaki,M., Miura,K., Mukouhara,Y., Naka-
gawa,S., Okumura,N. and Tagishi,Y.,
A new approach to 'model independent' optical potential and its application to proton
elastic scattering near (p,n) threshold energy region, Nucl. Phys. A599 (1996) pp.417
10. Tagishi,Y., Katabuchi,T., Kishita,H., Mizukoshi,K., Mukouhara,Y. and Yamada,N.,
Radiation effects of 20-100keV deuterium ions in silicon, Ion Beam Modification of
Materials, Proc. of the 9th Int. Conf. on Ion Beam Modification of Materials
11. Tagishi,Y.,
Real-time measurement of the implanted deuterium atoms by use of the reaction
D(d,p)T, Genshikaku-Kenkyu, 40, (1995), pp.47-53
12. Moon,C.B., Chae,J.H., Komatsubara,T., Lu,J., Hayakawa,T., Furuno,K.,
Rotational bands in 115Sb, Zeit. Phys. A352 (1995) pp.245
13. Moon,C.B., Kwon,J.U., Chae,J.H., Kim,J.C., Bhatti,S.H., Lee,C.S., Komatsubara,T.,
Mukai,J., Hayakawa,T., Kimura,H., Lu,J., Matsuda,M., Watanabe,T., Furuno,K.,
Level structure of 114Te, Phys. Rev. C51 (1995) pp.2222

14. Hayakawa,T., Lu,J., Mukai,J., Saitoh,T., Hashimoto,N., Komatsubara,T., Furuno,K.,
Signature dependence in the high spin states of ^{128}La , *Zeit. Phys. A352* (1995) pp.241
15. Hattori,T., Okamura,M., Oguri,Y., Sasa,K., Ito,T., Okada,M., Nakamura,T., Schubert,H., Morinaga,H., Dudu,D., Pascovici,G., Ivanof,E., Zoran,V., Yamaki,S., Shida,Y., Fujisawa,T., Seki,S., Furuno,K.,
Acceleration test of 3.2 MeV deuteron IH linac, *Nucl. Instr. and Meth. B99* (1995) pp.807
16. Moon,C.B., Chae,J.H., Kim,J.C., Lee,C.S., Furuno,K., Komatsubara,T., Hayakawa,T., Lu,J., Mukai,J., Matsuda, Mukai,J., and M., Watanabe,T.,
High spin states in ^{114}Te and ^{115}Te , *International Nuclear Physics Conference*, book of abstract, August 21-26, 1995, Beijing, China
17. Chae,S.J., Kim,J.C., Moon,C.B., Komatsubara,T., Mukai,J., Lu,J., Hayakawa,T., Matsuda,M., Watanabe,T., and Furuno,K.,
Level Structure of doubly odd ^{154}Ho , *International Nuclear Physics Conference*, book of abstract, August 21-26, 1995, Beijing, China
18. Komatsubara,T., Hayakawa,T., Mukai,J., Lu,J., and Furuno,K.,
Signature inversion and proton-neutron coupling in the rotational structure, 2nd RIKEN/INFN(Italy) Joint Symposium, May 17, 1995, Saitama, Japan
19. Nakagawa,T., Yuasa-Nakagawa,K., Furutaka,K., Matsuda,K., Yoshida,K., Futami,Y., T. Mizota,T., Honjo,Y., Tomita,N., Lee,S.M., Kasagi,J., Shen,W.Q.,
Study of Pre-Scission Evaporation for $^{84}\text{Kr}+^{27}\text{Al}$ at 10.6 MeV/u Using 3p-Phoswich Detector System, *Nucl. Phys. A583*(1995)149c-153c
20. Honjo,Y., Mizota,T., Tomohisa,Y., Kurita,T., Tomita,S., and Lee,S.M.,
Mass and Energy Distributions of Secondary Emitted Clusters from the Thin Amorphous Carbon- and C_{60} -foils through the Fast Heavy-Ion Bombardment, *Proceedings of Yamada Conference XLIII on "Structures and Dynamics of Clusters"* (Shimoda, Shizuoka, Japan, May10-13, 1995), Universal Academy Press, Tokyo, pp.515-521
21. Tomita,S., Miura,T., Mizota T., and Lee,S.M.,
Unimolecular Dissociation of C_{60} Cluster in Arc-discharge Plasma, *Proceedings of Yamada Conference XLIII on "Structures and Dynamics of Clusters"* (Shimoda, Shizuoka, Japan, May10-13, 1995), Universal Academy Press, Tokyo, pp.523-528
22. Yuasa-Nakagawa,K., Nakagawa,T., Furutaka,K., Matsuda,K., Futami,Y., Yoshida,K., Kasagi,J., Lee,S.M., Suomijavi,T., Shen,W.Q. and Matsuse,T.,
Entrance Channel Effect on the Pre-Scission Time of Binary Decay for the Medium Mass Nuclei (Mass ~ 110), *Phys. Lett. B351*(1995)77-81
23. Pu,Y.H., Lee,S.M., Jeong,S.C., Fujiwara,H., Mizota,T., Futami,Y., Nakagawa,T., Ikezoe,H. and Nagame,Y.,
The competition between fusion-fission and deeply inelastic reactions in the medium mass systems, *Z. Phys. A353* (1995)387-396
24. Yuasa-Nakagawa,K., Kasagi,J., Nakagawa,T., Yoshida,K., Futami,Y., Lee,S.M., Furutaka,K., MatsudaK. and Shen,W.Q.,
Binary decay fragment cross sections and pre-scission charge multiplicity in $^{84}\text{Kr}+^{27}\text{Al}$ at 10.6MeV/u, *Phys. Rev. C53* (1996) 997-1000

25. Lee, S.M., Nakagawa, T., Yuasa-Nakagawa, K., Wada, T. and Abe Y.,
Angular Momentum Dependence of Fission Delay Time,
The 2nd International Symposium on Heavy Ion Reaction Mechanisms and its
Applications (Lanzhou, Aug.29-Sep.1, 1996)
26. Mizota, T., Honjo, Y., Tomohisa, Y., Kurita, T., Tomita, S. and Lee, S.M.,
Mass and energy distributions of secondary desorbed clusters from the several kinds of
carbon foils (amorphous-C, C60 and C70) through the fast heavy-ion bombardment,
Proceedings of International Workshop on Cluster Science and Atomic Engineering
(IWCSAE'95) (September 11-14, 1995 Nan Daihe, China)
27. Mizota, T., Tomita, S., Miura, T. and Lee, S.M.,
Decay mechanisms of fullerene cluster in arc-discharge plasma,
Proceedings of International Workshop on Cluster Science and Atomic Engineering
(IWCSAE'95) (September 11-14, 1995 Nan Daihe, China)
28. Lee, S.M., The behaviour of fullerenes in gas and solid plasma,
NAIR Workshop '96 on Cluster Science
29. Kudo, H., Tanabe, A., Ishihara, T., Seki, S., Aoki, Y., Yamamoto, S., Goppelt-Langer, P.,
Takeshita, H. and Naramoto, H.,
Charged states of fast heavy ions in glancing collisions with aligned atoms in single
crystals, (Invited paper), Proc. 16th Int. Conf. on Atomic Collisions in Solids [Linz,
Austria, July, 1995]
30. Fukusho, T., Tanabe, A., Kudo, H., Ishihara, T. and Seki, S.,
Planar shadowing of fast ion beams in Si and Ge crystals bombarded with 5keV Ar⁺,
Jpn. J. Appl. Phys. January 1996
31. Kudo, H., Tanabe, A., Ishihara, T., Seki, S., Umizawa, K., Yamamoto, S., Aoki, Y., Goppelt-
Langer, P., Takeshita, H. and Naramoto, H.,
Advanced ion beam analysis of materials using ion-induced fast electron, (Invited Talk),
The 7th International Symposium on Atomic Energy Research (Takasaki, March, 1996)

〈 学位論文 (修士) 〉

1. 叶健治： α - α - γ 6,7Li X 反応実験と初期宇宙における元素合成
2. 会野澤和彦： Readout Electronics of High Resolution Time of Flight System for High
Energy Heavy Ion Experiments
3. 渡辺昭文： Developement of FastBus Data Acquisition System via VME Bus
4. 奥村紀浩：
5. 三浦和美： 40Ca nucleus observed by proton microscope
6. 齊藤武彦： Electron-gamma angular correlation with Ge detector array and shape
coexistence of odd Tl nucleus
7. 橋本奈美： Measurement of magnetic moments of nuclear high-spin states with
transient field
8. 水越和満： Analyzing power measurements in D(d,p)T and D(d,n)3He reactions at
very low energy region
9. 三浦崇： Beam Pulsing System for Cluster Beam

10. 栗原 香: Development of C60 Gas Target
11. 栗田哲郎: Development of Two Dimensional Position Sensitive Channel Plate Detector
12. 片刈竜也: Analyzing powers for deuteron induced reactions in the continuum

〈講演〉

1. Miake, Y., "Relativistic heavy-ion collisions, proving Quark-Gluon Plasma in the early Universe", Invited talk at the international symposium on "Origin of Matter and Evolution of Galaxies in the Universe", January 18-20, 1996, Atami Japan
2. 樋口理子、宮本祐子、会野澤和彦、加藤純雄、叶健治、熊谷荒太、倉田美月、栗田和好、佐藤進、西村俊二、三明康郎、八木浩輔、S. White、飛行時間測定によるハドロン識別機能を付加した電磁カロリメーターの開発、日本物理学会(中部大学)
3. 会野澤和彦、大熊靖夫、叶健治、倉田美月、栗田和好、佐藤進、中條達也、西村俊二、芳賀美紀子、樋口理子、三明康郎、宮本祐子、横田幸郎、八木浩輔、高エネルギー原子核衝突実験(CERN・WA98)のための高時間分解能チェレンコフ・ビームカウンター、日本物理学会(金沢大学)
4. 西村俊二、会野澤和彦、大熊靖夫、叶健治、倉田美月、栗田和好、佐藤進、中條達也、芳賀美紀子、樋口理子、三明康郎、宮本祐子、横田幸郎、八木浩輔、他WA98 Collaboration、160 GeV/A の鉛・鉛衝突における光子・ハドロン測定(CERN・WA98実験) 日本物理学会(金沢大学)
5. 三浦和美、青木保夫、広田克也、奥村紀浩、小山憲一、陽子顕微鏡で見た ^{40}Ca 、日本物理学会(中部大学)
6. 青木保夫、広田克也、奥村紀浩、三浦和美、陽子顕微鏡で見た $^{40}\text{Ca II}$ 、日本物理学会(金沢大学)
7. 広田克也、向原嘉英、奥村紀浩、中川智、木下英昭、正木満博、液体ヘリウムを用いた偏極陽子ポラリメーターの開発、
8. 片刈竜也、三浦和美、水越和満、山田直樹、田岸義宏、青木保夫、 $^{208}\text{Pb}(d,d)$ and (d,p) reactions around $E_d = 20$ MeV and CDCC, CDCC(d,p) analysis、日本物理学会(金沢大学)
9. 青木保夫、新しい "model independ" 解析手法と陽子弾性散乱への応用、研究会(法政大、九州大)
10. 古野興平、筑波－原研クリスタルボールの概要、「ガンマ線核分光とエキゾチックビーム」、理研シンポジウム
11. 古野興平、質量数 $A \sim 130$ 領域核の最近の実験データと新しい実験計画、筑波－原研クリスタルボールの概要、「中重核の構造」、理研シンポジウム
12. 呂駿、 $A = 190 \sim 200$ 領域核の高スピン状態の研究、「第3回原研タンデム・ブースターによる核分光国内共同実験」研究会、1995年、7月
13. 小松原哲郎、指標逆転現象の系統的研究、「第3回原研タンデム・ブースターによる核分光国内共同実験」研究会、1995年、7月

14. 橋本奈美、Transient Field を用いた高スピン状態の g-factor の測定、「第3回原研タンデム・ブースターによる核分光国内共同実験」研究会、1995年7月
15. 齋藤武彦、Odd Tl isotope における shape coexistence、「第3回原研タンデム・ブースターによる核分光国内共同実験」研究会、1995年、7月
16. 古野興平、原研クリスタルボールに於ける検出器本体の概要、「第3回原研タンデム・ブースターによる核分光国内共同実験」研究会、1995年、7月
17. 木村博美、データ収集系について、「第3回原研タンデム・ブースターによる核分光国内共同実験」研究会、1995年、7月
18. 小松原哲郎、呂駿、早川岳人、斉藤武彦、橋本奈美、高橋英美、内山浩志、古野興平、向淳子、大島真澄、木寺正憲、古高和禎、初川雄一、石井哲朗、松田誠、御手洗志郎、奇奇核 ^{122}Cs の核構造、日本物理学会（金沢大学）
19. 斉藤武彦、橋本奈美、内山浩志、高橋英美、向淳子、呂駿、小松原哲郎、石井哲朗、木寺正憲、初川雄一、古高和禎、早川岳人、松田誠、大島真澄、古野興平、内部転換電子の測定と ^{193}Tl の変形共存の研究、日本物理学会（金沢大学）
20. 田岸義宏、低エネルギー重陽子融合反応を利用した注入重陽子の探索、低エネルギービームによる原子核・クラスター衝突とその応用、東北大学
21. 田岸義宏、低エネルギー重陽子融合反応の偏極分解能、「スピン」と「核融合」、名古屋大学
22. 本城義夫、溝田武志、友久保彦、栗田哲郎、富田成夫、李相茂
重イオン衝撃による放出炭素クラスターの質量・エネルギー分布筑波大物理基研 1995年短期研究会 「原子核とクラスターの類似性と異質性」
23. 富田成夫、三浦崇、溝田武志、李相茂
コルトロンイオン源内における C_{60}^{+} の C_2 放出筑波大物理基研 1995年短期研究会 「原子核とクラスターの類似性と異質性」
24. 李相茂、核分裂から見たクラスター分裂
基研 1995年短期研究会 「原子核とクラスターの類似性と異質性」
25. 本城義夫、栗田哲郎、富田成夫、溝田武志、李相茂
重イオン衝撃による炭素標的からの炭素クラスター生成筑波大物理日本物理学会 秋の分科会（中部大学）
26. 富田成夫、三浦崇、溝田武志、李相茂
イオン源プラズマ中でのフラーレンイオンの崩壊日本物理学会 秋の分科会（大阪府立大学）
27. 佐々木玄、栗田哲郎、溝田武志、李相茂
低速クラスターのチャンネルプレート検出効率日本物理学会 秋の分科会（大阪府立大学）
28. S.M.Lee, The Behaviour of Fullerenes in Gas and Solid Plasma
日米セミナー 原子核及びメゾスコピック系に於けるクラスター現象の進歩、

29. 本城義夫
C60固体への重イオン衝突による炭素クラスターの生成反応
日本原子力研究所 第44回基礎科学セミナー第3回「ハドロン多体系のシミュレーション」
30. 李相茂、核分裂から見たクラスター分裂
京都大学原子力実験所核分裂研究のフロンティア ―基礎と応用―
31. 栗田哲郎、内田一也、窪田正臣、徳井英次、米谷公昭、佐々木玄、栗原香、三浦崇、富田成夫、本城義夫、溝田武志、李相茂、
2次元位置検出型チャンネルプレートディテクターの開発、
日本物理学会 第51回年会（金沢大学）
32. 三浦崇、富田成夫、溝田武志、李相茂、
コルトロンイオン源による炭素クラスタービームのパルス化
日本物理学会 第51回年会 金沢大学
33. 工藤博、田辺淳、石原豊之、青木康、山本春也、Geppelt-Langer,P., 竹下英文、
橋本洋、シャドーイングを利用した結晶中の高速イオンの荷電状態の解析、
TIARA研究会
34. 田辺淳、工藤博、坂本昭彦、黒岩貴志、石原豊之、関整爾、
高速イオンビームシャドーイング I. 固体結合電子分布の解析、日本物理学会
35. 工藤博、田辺淳、坂本昭彦、黒岩貴志、石原豊之、関整爾、青木康、山本春也、
Geppelt-Langer,P., 竹下英文、橋本洋、
高速イオンビームシャドーイング II. 固体結合電子分布の解析、日本物理学会
36. 石原豊之、大島弘行、石井聡、田島義一、高橋努、大和良広、皆倉輝志、木村博美、
小松原哲郎、島邦博、古野興平、筑波大タンデム加速器の現状、第8回
タンデム加速器とその周辺技術の研究会、（名古屋大学年代測定試料研究センター）