

V. 原子核実験グループ

教授 古野興平, 三明康郎, 李 相茂
 助教授 青木保夫, 青木孝義, 田岸義宏
 講師 新井一郎, 江角晋一, 小松原哲郎, 笹 公和
 助手 宮崎 隆
 準研究員 奥村紀浩
 技官 加藤純雄
 講師 李 天信 (非常勤研究員) 大学院生 25 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 (古野興平, 小松原哲郎, 笹 公和)

(1) タンデム加速器による地球科学試料の水素分析

平成13年度は「共鳴原子核反応法による岩石・鉱物中の水素分析法の研究」という課題で採択された科学研究費による開発研究の2年目に当たり、マイクロビームの生成を目的とした新しいビームラインの建設が完了した。図1に示すとおり、当初の設計に従って加速器センターの第1測定室側振り分け電磁石の下流0°コース第1スリットとして口径を0.4mm、厚さ1mmのタンタル板を設置した(図1におけるFirst Slit)。ビーム調整の便宜上、第1スリットの直前にはアルミナ蛍光板を用いたビームモニターを設置し、さらに第1スリットを通過したビーム電流を測定するために1.5mのコンクリート隔壁を越えて第1測定室内、第2スリット(図1における2nd Slit)の直前にファラデーカップを設置した。第2スリットはビームのエミッタンスに対する経験的な推定値から計算して直径4mmとしたが、その後のテスト実験からビームの発散角をもっと押さえる必要があることが分かり直径2mmに変更した。この第2スリットの下流にもファラデーカップを設置してある。このよう

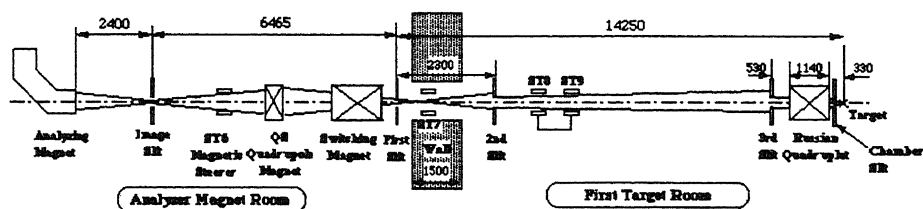


図1: 建設を終えたマイクロビーム収束系の概念図

にして横方向の大きさと発散角が制限されたビームはロシア型4連4重極電磁石(RQ)に入射する。RQは4個の4極子電磁石で構成されており、4個の4極子相互の磁極中心が50ミクロン以下になるように再組み立て・位置調整を行った。さらにビームがRQの中心に入射しなければ収束されたビーム(像)に歪が現れ、ビーム径も大きくなる。ビームがRQの軸芯へ入射したことを確認することは必ずしも容易ではないが、現在、RQの上流に直径9mmの第3スリット(図1における3rd Slit)、RQの下流で試料照射真空槽の入り口に直径4mmのスリット(図1におけるChamber Slit)をこれらの中心がRQの軸心と一致するように設置し、4mmのバツフルを通過したビーム電流が最大になるように、第2スリットの下流に設置したステアリング電磁石の電流を調整するという方法をとっている。収束されたビームの横方向の大きさは、現在、アルミナや石英板の発光によって推定しているが、これまでに直径70ミクロンのビームが得られた。この発光によるビームサイズの測

定は、アルミナや石英板内での光の散乱や2次発光があり得るので、正確な測定とは言い難い。したがって今後、ナイフエッジまたは細いワイヤをビームを横切って移動させ、そこからの核反応や X 線発生を観測し、より正確な収束ビーム径の測定を行う。なお、RQ その他のビーム収束系パラメータをコンピュータによって制御する技術開発が完了し、高速かつ高分解能制御が可能になった。

上記のマイクロビーム生成装置の開発に加えて、新しい測定方法の研究も続けられた。我々は地球科学研究において必要かつ重要とされる岩石や鉱物中の水素分析法の開発を目的としているが、現在、地球科学研究において重要視されているプレートテクトニクスに関連した問題として、地球深部から採取した鉱物に閉じ込められた流体包有物に含まれる水の定量分析がある。この際、流体包有物が試料表面から数ミクロン以下になるように鉱物試料の一面を研磨することは実際上困難である。地球科学研究において、一般に従来の表面分析より試料中のはるかに深い層まで分析可能であることが望ましい。この線に沿って以下の二つの開発が行われた。

共鳴原子核反応において試料中深い層まで水素分析を行うためには ^{15}N あるいは ^{19}F イオンのエネルギーを高くしなければならない。このとき入射イオンのエネルギーストラグリングによる深さ方向分解能の低下の他に、もう一つ重要な問題として、水素以外の原子核との間で生ずる核反応ガンマ線が巨大なバックグラウンドになることがある。核反応ガンマ線バックグラウンドの抑制には、核反応で生ずるガンマ線の多重度 M が水素による共鳴核反応と水素以外の核反応とで大きく異なることを利用する。水素との共鳴核反応では $^1\text{H}(^{15}\text{N}, \alpha, \gamma)^{12}\text{C}$ 反応でも $^1\text{H}(^{19}\text{F}, \alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ でも $M = 1$ が支配的で、1核反応当たり1本のガンマ線しか放射されないと見て良い。これに対して水素以外の原子核との核反応はいわゆる複合核反応であり、 $M \gg 1$ で1個の核反応で数多くのガンマ線を放射し、一般にこれらは同時に放射される。そこで複数個のガンマ線検出器を用いて同時計数を行い、2重以上の同時計数を水素以外の原子核との核反応であるとして個々の検出器出力から除外（逆同時計数）すれば、バックグラウンドが抑制される。ただし2重以上の同時計数効率が100%ではないので、除去されるバックグラウンドの割合は同時計数効率に依存する。

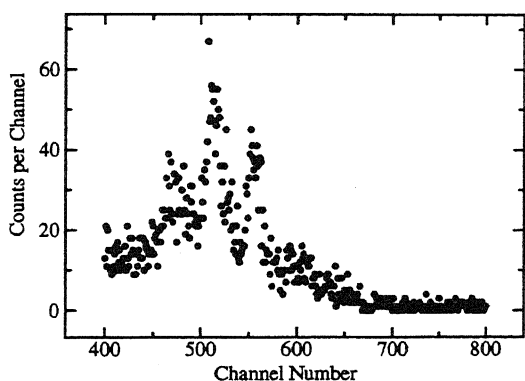


図 2: $E(^{19}\text{F})=20$ MeV で観測したガンマ線スペクトル

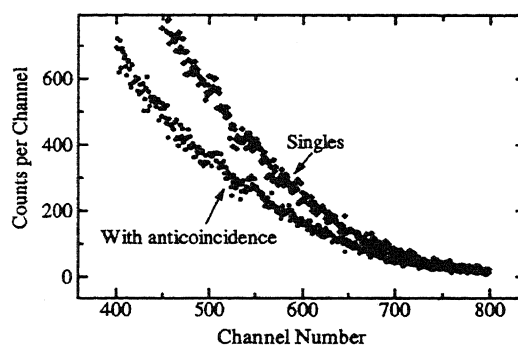


図 3: $E(^{19}\text{F})=33$ MeV で観測したガンマ線スペクトル

図 2, 及び 3 に示すガンマ線スペクトルは、現在建設中のマイクロビーム水素分析装置におけるガンマ線検出器の配置で上記の逆同時計数の効果を試験した結果である。直径 3 インチ、長さ 3 インチの NaI 検出器 4 個を使用し、同時計数の分解時間 50 ns で測定した。表面付近を測定した $E(^{19}\text{F})=20$ MeV では 6.13 MeV ガンマ線のピークが明瞭であるが、 $E(^{19}\text{F})=33$ MeV になると、それはバックグラウンドに埋もれている。上に記した逆同時計数をとることによってバックグラウンドが 35% 抑制された。この試験では NaI 検出器を用いたが、最終的に設置される BGO 検出器ならば、その高い検出効率のためにバックグラウンドは 50% 程度まで抑制される。

(2) 偏極陽子を用いた過渡的磁場の発生機構

磁化された強磁性体中をイオンが通過する際、このイオンの原子核は過渡的磁場と呼ばれる非常に強い磁場を受ける。本研究では、非常に高速度領域に相当する7 MeV の偏極陽子についてこの過渡的磁場の測定を試みた。これまでの実験では、スピンの歳差角度は放射線崩壊の際に放出される γ 線や β 線の異方性から決定していたが、本研究では、原子核散乱のspin依存性（偏極分解能）を用いており、これまでにない手法である。

筑波大学加速器センターにおいて、7MeV に加速された偏極陽子ビームを磁化した厚さ $50 \mu\text{m}$ の鉄箔に照射した。この7MeV の陽子は鉄中を通過する際に減速し、通過後は5MeV になる。この通過の前後でスピンの向きを測定する為に、ターゲットの前後に ^{12}C ポラリメータを配置した。炭素ターゲットで弾性散乱された陽子を角度 50 度に配置された左右の2つの検出器で観測し、その非対称度から偏極陽子ビームの偏極軸の角度を測定した。入射した陽子ビームの偏極軸をビーム軸の方向に選び、さらに鉄箔中には左右方向に磁場を与え、上下方向に回転するスピンの回転角度を精度良く測定した。

磁場の印加方法として、二通りの方法を用い、二つの独立な実験を行った。第一の手法は電磁石によって外部磁場で鉄の磁化方向を変化させる方法で、もうひとつの方法では短冊状の鉄箔を強い磁場であらかじめ磁化し永久磁石として使用した。

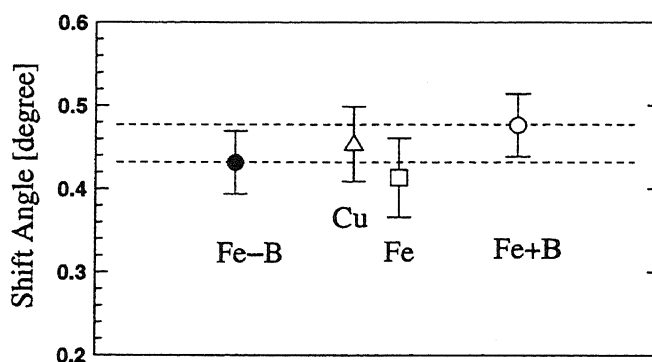


図 4: 過渡的磁場による偏極陽子のspin歳差角度

電磁石を用いた実験では外部磁場が強すぎ、もれ磁場（約35 Gauss）の影響が無視できなくなる欠点があった。そこで、鉄箔とほぼ同一条件になる様に厚さ $50 \mu\text{m}$ の銅箔を用いて比較実験を行い、このもれ磁場を補正した。実験の結果、鉄箔の場合、磁場の右向きと左向きの差は 2.5 ± 0.9 [mrad] であった。一方、銅箔では 1.6 ± 0.8 [mrad] でありもれ磁場の影響がかなりある事が判った。この差から、陽子に相互作用した過渡的磁場の大きさは $B=1.2 \pm 3.2$ [テスラ] となった。（ただし、鉄箔の磁化を1.2テスラとしてこれを差し引いた）

鉄箔を磁化して永久磁石とした実験では、鉄の外の漏れ出す磁場は非常に小さい。ビームが通過する位置で測定すると2 Gaussであった。図4に実験の結果測定された偏極陽子スピンの回転角度を示す。左右方向に磁場をかけてspin軸の傾きを測定すると、その角度の差は 0.8 ± 0.9 [mrad] であった。これを過渡的磁場に換算すると $B=0.9 \pm 2.4$ [テスラ]（ただし、鉄箔の磁化を1.2テスラとしてこれを差し引いた）となった。二つの実験結果はどちらも、誤差の範囲でゼロとみなす事ができ一致した。

この実験結果から、5~7MeV の陽子ビームに対する過渡的磁場は誤差の範囲で観測できなかったといえる。このイオンビームの速度は、ボーア速度 $v_0 = c/137$ を単位として $v/v_0 = 15.4$ であり、非常に高速領域である。イオンはほぼ完全に電離しており、磁場を作る電子が存在しない為、過渡的磁

場が生成されなかったと解釈できる。

(3) 陽子-陽子弾性散乱による物質中の水素分析法の開発

鉱物試料などに含まれる水素の分析は、焼結法や2次イオン質量分析 (Secondary Ion Mass Spectroscopy)、赤外吸光分析 (FTIR)、3MeV程度の ^4He による弾性散乱分析法 (Elastic Recoil Detection Analysis) などがある。今回、我々は、17MeVの陽子ビームを用いて陽子-陽子弾性散乱同時測定法 (ERCS) のテスト実験を行った。この反応は核反応閾値以上であるが、陽子-陽子散乱を選択的に測定し非常にS/N比の良いスペクトルが得られる事が判明した。

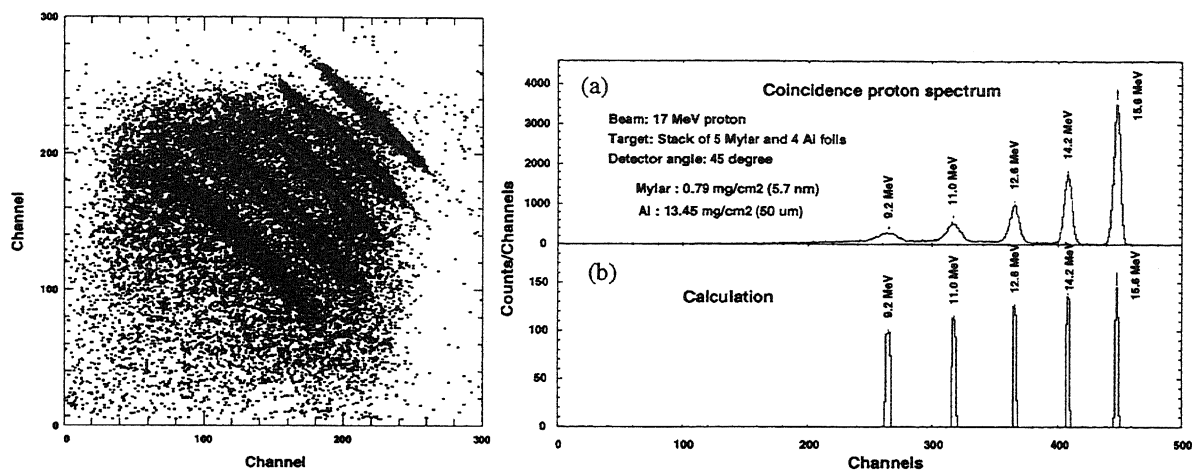


図 5: 過渡的磁場による偏極陽子のスピン歳差角度

図 5 (左) は $50\ \mu\text{m}$ のアルミニウム 4 枚と $5.7\ \mu\text{m}$ のマイラーフィルム 5 枚を交互に重ねた試料に陽子を照射して得られたスペクトルである。17MeV の陽子と試料中の陽子は弾性散乱して 45 度にはじき飛ばされると、どちらも入射ビームの半分のエネルギーの 8.5MeV をもつ。散乱後の陽子はより大きな阻止能によりエネルギーを失う為、図の様にアルミニウムの通過枚数に対応して 5 本の斜めの線が得られた。

二次元スペクトルを対角線方向に射影して図 5 (右) のスペクトルを得た。横軸は二つの陽子のエネルギーの総和に相当する。この図の下には、アルミニウムの阻止能を考慮した計算結果を示す。計算値と実測値のピークの位置は良く一致している。このスペクトルから、厚さ方向の分解能はおよそ $10\ \mu\text{m}$ と見積もる事ができる。本テスト実験により鉱物などのサンプルの非破壊水素分析は数 ppm 程度まで測定可能であると予想される。

【2】 クラスターグループ (李相茂、新井一郎、宮崎隆、李天信)

(1) スパッタリングによる低融点金属からのクラスター放出

6keV 中性 Xe 原子入射によるスパッタリングの 2 次放出物イオンに関して、高融点遷移金属元素群に対する測定を行なったところ、収量のクラスターサイズ依存性が多い元素について冪関数型依存性を示すことが分かった。これについて、我々はボンドパーコレーションモデルと断熱均一温度領域形成モデルを組み合わせた新モデルを提案し、測定された収量のクラスターサイズ依存性を再現するとともに、サイズ依存性の決定パラメータ (空ボンドの割合 p) と融点との間に存在する強い相関がうまく説明できることを示した [1][2][3]。一方、Zn においては指数関数型のサイズ依存性があることが分かった。さらに、そのようなサイズ依存性は爆発的に生成されたモノマー蒸気の凝縮によって生じ得る [2] ことを示した。

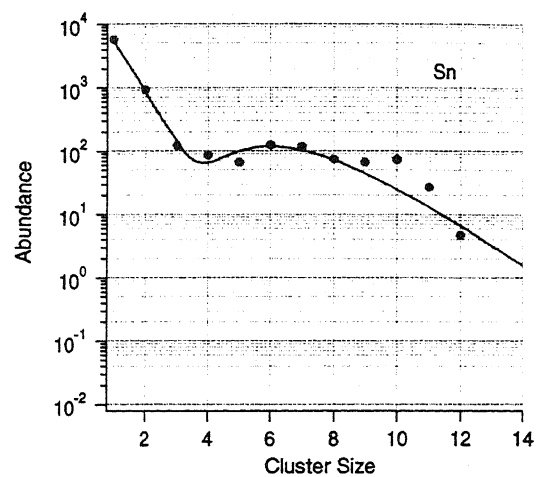
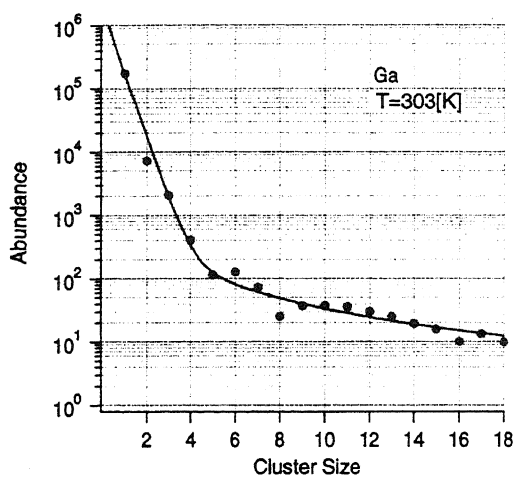


図 1: 6keV Xe 原子衝撃により生成された Ga クラスターのサイズ分布; 指数-冪併存型

図 2: 6keV Xe 原子衝撃により生成された Sn クラスターのサイズ分布; 指数-log-normal 併存型

今回、我々は低融点元素 (In, Ga, Sn, Bi) について同様の実験を行い、2つの新しいタイプのクラスターサイズ依存性を見出した。一つは、図 1 に示すような指数関数型と冪関数型を組み合わせたもので、In と Ga において認められた。もう一つは、図 2 に示すような指数関数型と log-normal 関数型の山構造を加え合わせたもので、Sn と Bi において認められた。これらの特徴は以下の通りである。

1. 指数-冪併存型

指数-冪併存型では、衝突に伴った爆発的なモノマーガス放出とそのガス内での凝縮成長が指数関数型依存性を形成しているものと考えられる。2 次イオン放出物の 90% 以上が、この指数関数型依存性によるものであり、スパッタリングに伴う熱放出の大部分を担っているものと考えられる。冪依存性は $n^{-1.5}$ となっており、典型的な冪依存性物質である銅の場合の $n^{-2.7}$ などと比較して、サイズの大きなクラスターが出ていることが分かる。これは、まず始めに爆発的なモノマー放出に伴う熱放出が起こるので、サイズの大きなクラスター生成に寄与する残った固体部分の温度が相対的に低く抑えられる結果、決定パラメータである空ボンドの割合 p が低くなったためと考えられる。

2. 指数-log-normal 併存型

log-normal 関数型のサイズ依存性は、希ガス中での微粒子形成などの高密度ガス中の凝縮過程でよく観察されるが、スパッタリング現象のような極めて短時間かつ単発的と考えられる現象

ではこれまでに例を見ない。成因が同じものであると仮定するならば、高密度のコアを伴う爆発的なモノマーガス放出が生じていることを示唆するものである。

図3は、各元素のサイズ依存性を横軸を融点、縦軸を気化潜熱に相当する量（飽和蒸気圧の $\frac{1}{T}$ 項の展開係数）に取ってプロットした結果である。図から、高融点側の物質群のほとんどの物質が冪関数型依存性を示していることがわかる。融点と気化潜熱は概ね比例した分布をとっているが、比較的気化潜熱の値が小さい（気化しやすい）物質群には指数関数型依存性をとるものが多い。また、低融点側で比較的気化潜熱の値が大きい（気化しにくい）元素群では、指数関数型依存性とは別の依存性が併存する傾向が認められる。

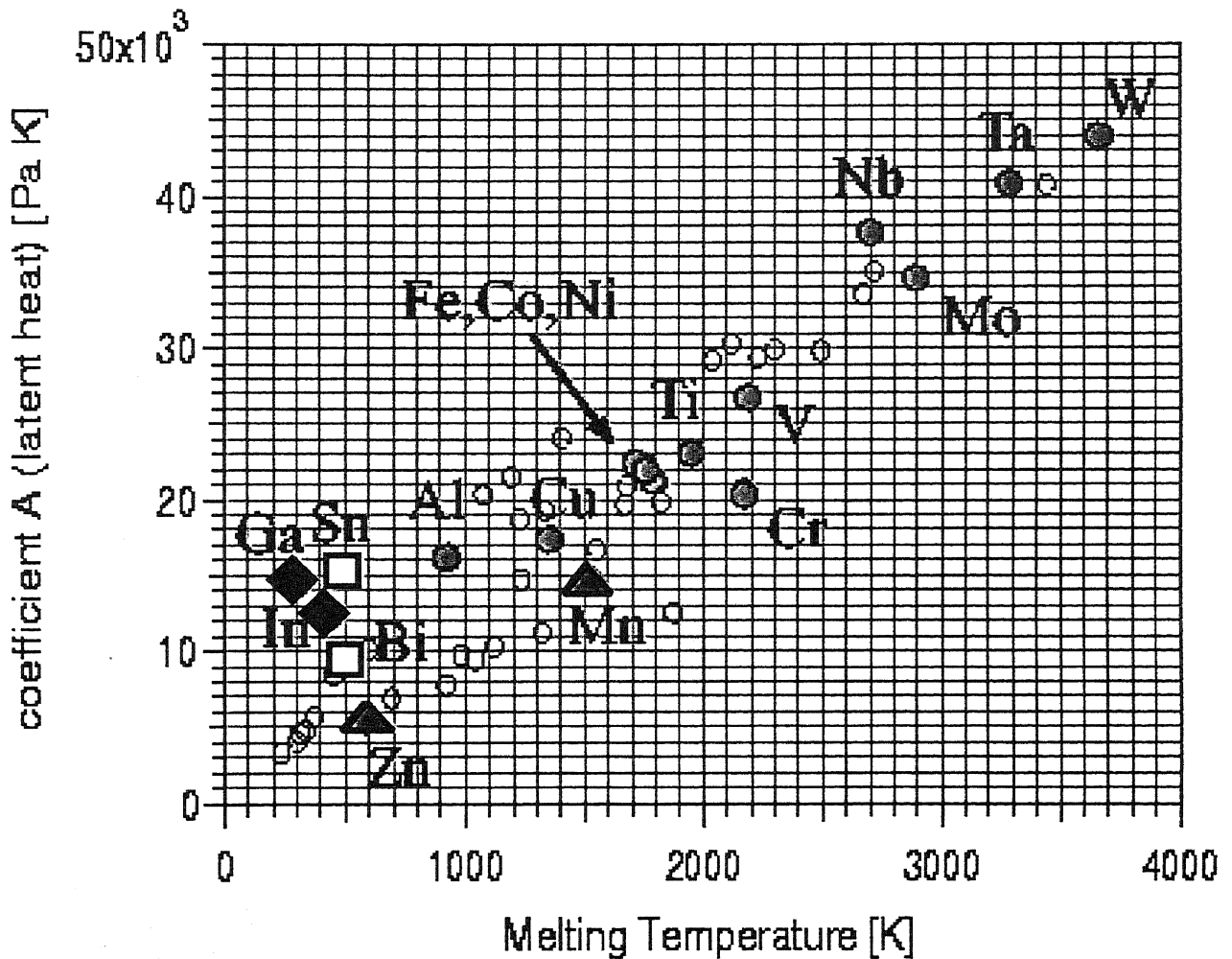


図3: 各元素の融点-気化潜熱相関プロット;冪関数型元素 (○)、指数関数型元素 (△)、指数-冪併存型 (◇)、指数-log-normal 併存型 (□)

(2) 金および銅クラスターの分子動力学シミュレーション

クラスターやクラスター組成物質の応用を考える場合、有限原子系の構造的・熱力学的性質を知ることは大変重要である。分子動力学シミュレーションを使って、我々は金ならびに銅クラスターの固体-固体転移と融合を研究した。

Au₅₅ についての分子動力学シミュレーションでは、融点より低い特定の温度で、正 6 面体から正 8 面体、正 12 面体へと向かう異なる対称性配位間の固体-固体構造転移が見られた。後者のような変形は小さいクラスターに関するこれまでのシミュレーションでは見つからなかったものである。しかし、Krakow 等の HRTEM (高分解能透過型電子顕微鏡) を使った研究から、100nm 以下のサイズの金の担持クラスターにおいても、秩序相からのずれが現れることが分かっている [4]。固体-固体転移は、微視的に見ると、原子の集成的歪みと一部原子の移動である。いずれの場合にも、系の凝集エネルギーは転移の際に何ら有意な障壁を感じることなく、滑らかに推移する。

多重双生粒子 (MTP) は金属ナノ粒子の HTREM でよく観察される [5]。Cu クラスターに関するシミュレーションは、付着し合った多数のクラスターを熱的に励起することによってそれらが生じる可能性があることを示唆している。

我々は、Gupta 型の多体ポテンシャルを使って、原子間相互作用を記述した。原子間距離 r_{ij} の関数として、ポテンシャルは以下のように表される。

$$V = \sum_{j=1}^n \left[A \sum_{i(\neq j)=1}^n \exp[-p(r_{ij}/r_{0n} - 1)] - \left(\xi^2 \sum_{i(\neq j)=1}^n \exp[-2q(r_{ij}/r_{0n} - 1)] \right)^{1/2} \right]$$

Cu に対するパラメータとして、 $A=0.0855$ 、 $\xi=1.224$ 、 $p=10.96$ 、および $q=2.278$ を採用した。これらは、バルクの銅に対するフィッティングによって得られた値である [6]。2つのクラスター Cu₃₈ と Cu₇₅ は、始めにそれぞれ最も安定な構造である面取正 8 面体および準結晶の配位をとり、互いに接近しながら徐々に加熱される。長時間緩和させた後、付着の結果生成された大クラスターの構造をステップ毎に記録した。

図 4 は、温度を増加させて行った時の Cu₃₈₊₇₅ の構造的な発展を示している。ゼロ運動エネルギーの状態が付着している場合、各部のもともとの形や構造は大変よく保存されている (図 4a 参照)。しかし、少し加熱して温度が 160K になると、各部の内部構造を維持したまま、もっとずっと密着してくる。一方、各結晶の方向性は境界面で一致するように調節される (図 4b 参照)。温度が更に上がって 602K になると、2つの小クラスターは図 4c のように再構成され、多重双生粒子となる。このようにして得られた最終的な配位は、金クラスター (~2nm) に電子線を照射して行なった実験的観察 [5] と極めてよい一致を示している。

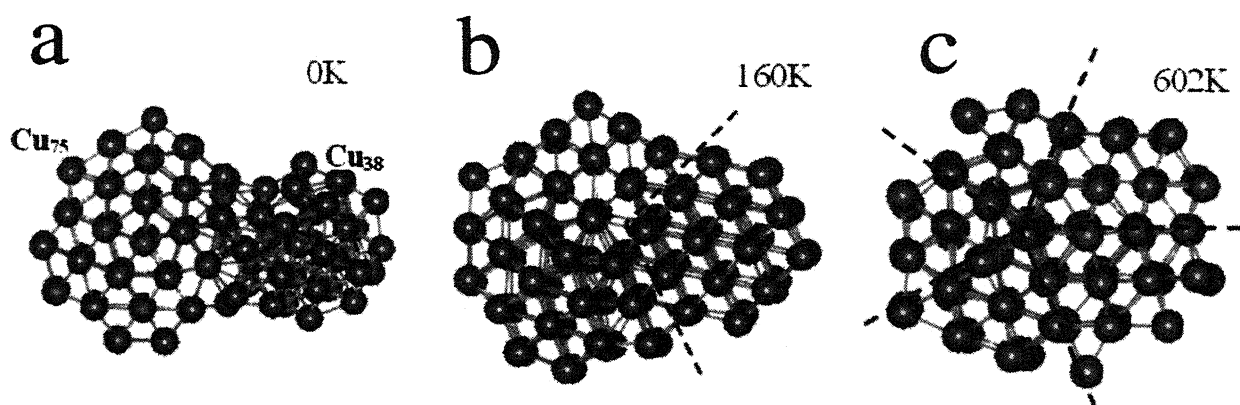


図 4: 付着させてから a)0K、b)160K および c)602K まで加熱した後の 2つの銅クラスター (N=38 and 75) の構造

(3) クラスター分裂実験用交差ビーム装置において光子/多価電荷イオン衝撃により生成される解離分子の TOF スペクトル

多価イオンと分子やクラスターとの電荷移行反応の研究に向けて、反応生成物を調べるための飛行時間測定型質量分析システムを開発した。その動作確認として、ベンゼンをターゲットに用いてキセノンの 20 価イオンとの交差実験を行ない、反応生成物のスペクトルを得た。

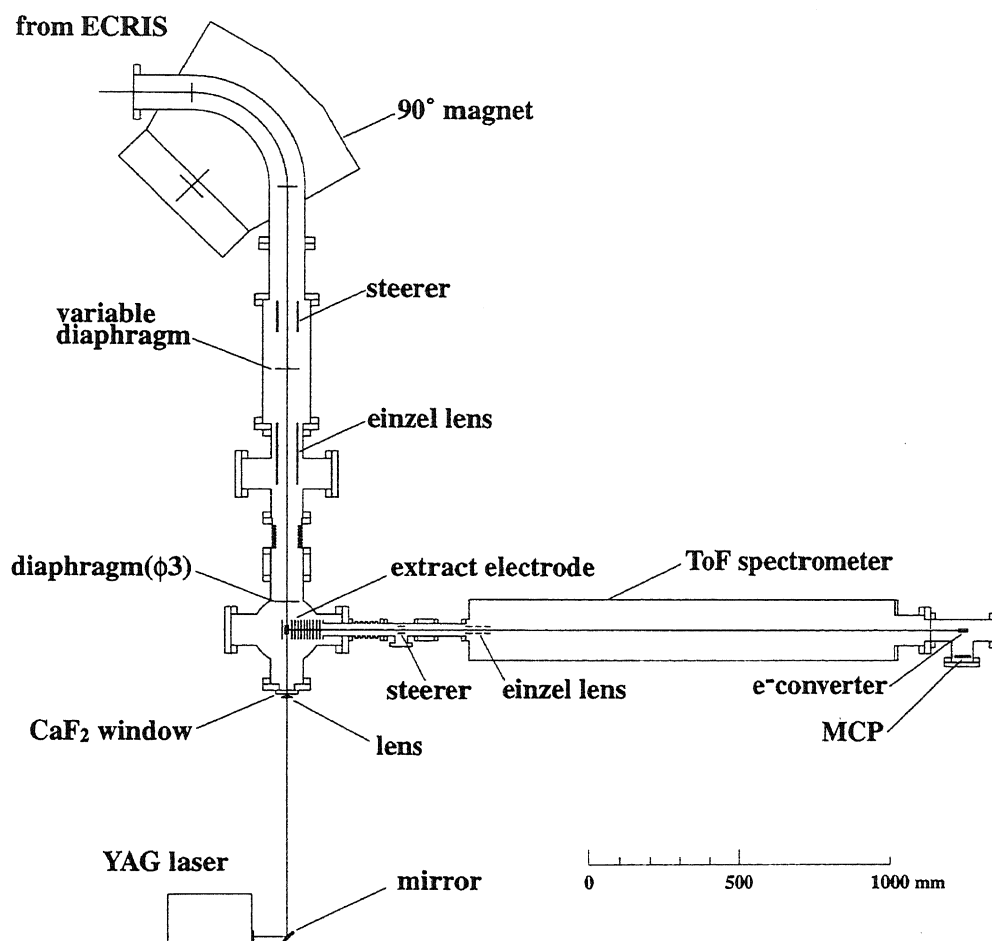


図 5: 実験装置の全体図

装置の全体図を図 5 に示す。多価イオンは電子サイクロトロン共鳴イオン源を用いて生成し、分析電磁石にて質量・電荷比の分離を行った。イオン源の引き出し電圧を 15kV としたとき、キセノンの 20 価のイオンが 1 マイクロアンペア得られた。偏向電極板にパルスの高電圧 (+2.8kV) をかけることによりこのビームを長さ 200ns のパルスビームとした。パルス高電圧は高速トランジスタスイッチ (Behlke, HTS31-GSM) を用いて発生させた。このパルスビームをレンズで収束させた後、3mm のスリットを通してターゲット領域に入射させた。 10^{-8} torr まで真空に引かれたターゲットチェンバーにベンゼン蒸気を 1.0×10^{-6} torr になるまで導入した。

ターゲットチェンバー内の引き出し電極部は、イオン化部と加速部からなっている。多価イオンのパルスビームが完全にターゲット領域を通過した後、イオン化部にパルスの引き出し電圧をかけることによって反応生成物を引き出すようにした。加速部には定常的に加速電場がかかっているが、前半と後半で異なる電場勾配にしてある。これは、イオン化部で発生したイオンは空間的に多価イオンビームの径程度の広がりを持っているが、その広がりによる TOF 分解能の低下を緩和するためである。

る。すなわち、異なる位置で発生した(同じ m/q の)イオンが、TOF 検出器位置において同時刻に到着するようにするためである。加速電圧は 2700V、第一加速部の電場勾配と長さは 107V/cm および 5cm、第二加速部は 525V/cm および 4cm とした。加速部は 1cm 間隔に並べられた 10 枚の電極板によって、均一な電場勾配が形成されるようになっている。

引き出されたイオンは、偏向電場で軌道修正、アインツェルレンズで収束され、2m の無電界区間を飛行し検出器に入る。検出器には、カップ型の二次電子変換ダイノード付き MCP を用いた。パルス引き出しのタイミングをスタート、検出器からの信号をストップとし、2GHz のマルチストップ型 TDC(FAST ComTec, 7886E) を用いて TOF スペクトルを収集した。

得られたスペクトルを図 6 に示す。ベンゼンの+1、+2、+3 価のイオンおよび残留ガスのピークが現れているのがわかる。ベンゼン+1 価イオンのピークから求めた分解能は $m/\Delta m=200$ となった。多価イオンのかわりに YAG レーザーの 4 倍波を用いてイオン化させたときのスペクトルを図 7 に示す。多価のベンゼンイオンは現れず、ベンゼンの崩壊物のピークが多く出ている。このことから、多価イオンを用いて分子をイオン化させた場合、ターゲットの内部エネルギーをあまり上昇させることなく多数の電子をはぎ取ることができると考えられる。今後は、ターゲットに金属クラスターを用いて内部温度の低い多価クラスターイオンを発生させ、クラスターの相転移点を挟んでの分裂のパターンの変化、表面張力の異なる物質のクリティカルサイズの測定などを予定している。

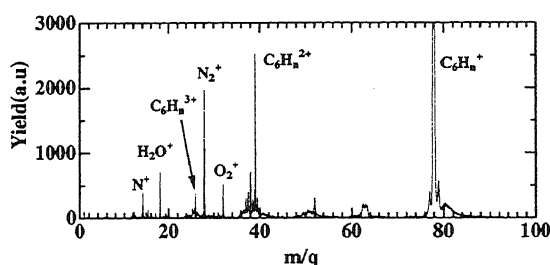


図 6: Xe^{20+} 多価イオンビームとベンゼン分子の交差実験による TOF スペクトル

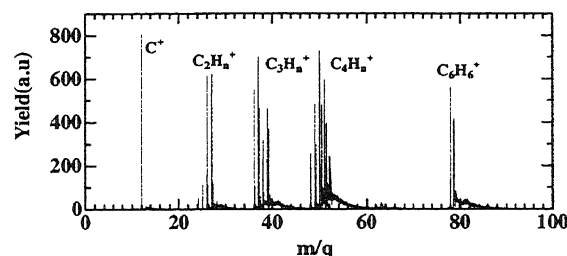


図 7: YAG レーザーとベンゼン分子の交差実験による TOF スペクトル

(4) 液体 He を用いない超電導電子サイクロトロン共鳴イオン源 (RAMSES) からの多価電荷イオンの生成に対する最小ミラー磁場強度の影響

我々は超伝導電磁石を用いて 2 つの電子サイクロトロン共鳴型イオン源 (ECRIS) を作成した。それぞれ、理化学研究所の 18GHz ECRIS (RAMSES) および我々の研究室の 14 GHz ECRIS (SHIVA) である [7][9][8]。これらのイオン源の特徴として、非常に多価の重イオンを連続的に生成する事が可能であることが挙げられる。RAMSES では、典型的な結果として、 Kr^{27+} において 5emA および Kr^{29+} において 2 emA のビーム強度が得られた。一方、SHIVA では、 Xe^{30+} において 10 emA、 Xe^{36+} において 1 emA のビーム強度が得られた。

最近の Catania の Laboratorio Nazionale Sud における ECRIS(SERSE) を用いた実験結果によると、生成した Xe^{20+} のビーム強度を最大にするミラー磁場の最小値 (B_{min}) が存在することが報告されている [10]。しかしながら、その他の価数のビーム強度に対する B_{min} の効果は未だに明らかにされていない。この効果の有無と ECRIS より引き出される様々な価数のビーム強度を最大にする最適磁場構造とを明らかにするため、我々はビーム強度を B_{min} の関数として測定した。

実験には理化学研究所の RAMSES を使用した。図 8 は RAMSES の断面図である。ビーム強度に

対する B_{min} の効果を調べるため、図9に示すようにビーム引き出し側とマイクロ波導入側の磁場強度 (B_{ext} と B_{inj}) を固定したまま、 B_{min} を 0.25T から 0.6T まで変化させた。 B_{ext} と B_{inj} はそれぞれ 1.13T および 1.7T とした。また、導入したマイクロ波のパワーは 500W、引き出しの電圧は 12kV であった。更に、ビーム強度が最大となるようにイオン源のガス圧、バイアス電極の位置と電圧を調整した。実験を簡単にするため、ここではガス混入法を用いなかった。

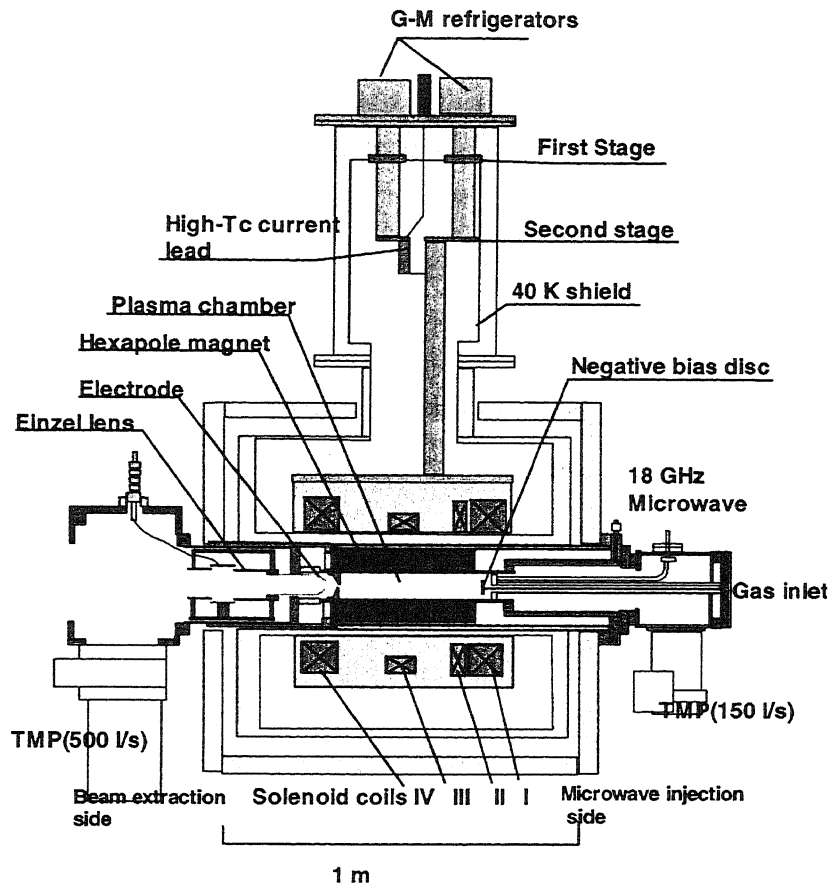


図 8: 理化学研究所の RAMSES の断面図

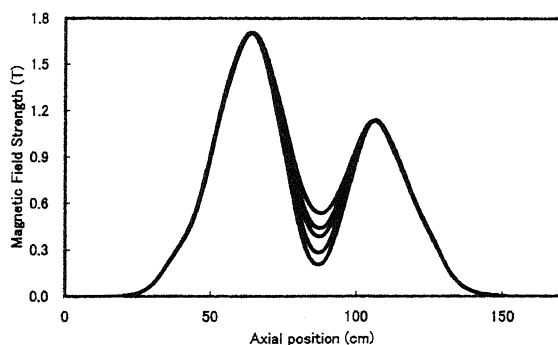


図 9: ECR プラズマ閉じ込め磁場分布

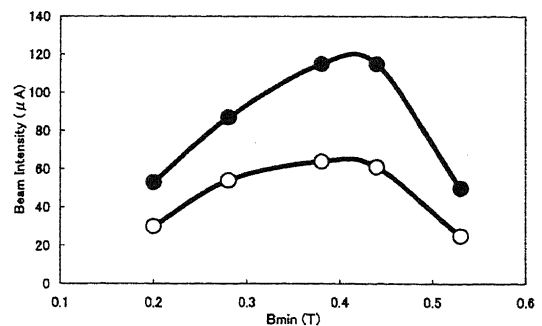


図 10: B_{min} に対する Ar^{7+} と Ar^{11+} のビーム強度

我々が測定したイオン種は $O^{5+,6+}$ 及び $Ar^{7+ \sim 11+}$ である。図 10 は B_{min} に対する Ar^{7+} と Ar^{11+}

のビーム強度である。 Ar^{7+} と Ar^{11+} では、ビーム強度は B_{min} が 0.45T になるまでは徐々に増加しているが、それ以降は減少していることが分かる。この結果は他のイオン種においても同様であった。

参考文献

- [1] I. Arai, Desorption 2000 Int. Conf., Saint Malo, France, 3-7(2000), invited talk.
- [2] I. Arai et al., Trans. Material Research Society of Japan, **26**, (2001) 1139.
- [3] I. Arai et al., Trans. Material Research Society of Japan, **27**, (2002) 193.
- [4] W.Krakow et al., Phys. Rev. B49, (1994) 10591.
- [5] S.Iijima and T.Ichihashi, Phys. Rev. Lett. 56, (1986) 616.
- [6] F.Cleri and V.Rosato, Phys. Rev. B48, (1993) 22.
- [7] T. Nakagawa et. al., Rev. Sci. Instrum., **73**, (2002) 513.
- [8] T. Kurita et. al., Nucl. Instrum. Methods B (to be published).
- [9] T. Kurita et. al., UTTAC Annual Report 2000, Tandem Accelerator Center, University of Tsukuba.
- [10] D. Hitz, et. al., Rev. Sci. Instrum. 73 (2002) 509.

【3】 スピン偏極核反応実験 (青木保夫、田岸義宏、奥村紀浩)

(1) 陽子弾性散乱実験

昨年度迄に、 ^{28}Si 原子核を標的とした、全反応断面積の実験を行った。[1] この実験の着眼点は、(p, n) 反応の閾値付近ではエネルギー依存性に異常が見られるはずだというものであった。この予想されたエネルギー依存性の異常は予想通りに実験で観測された。

今年度の目的は、陽子弾性散乱チャンネルでもこの現象は観測されるはずだとの仮定の下に、この現象を確認する事である。偏極陽子を用いて、(p,n) 反応の閾値付近 $E_p = 15 - 17 \text{ MeV}$ で細かく、微断面積と偏極分析能の角分布を測定した。弾性散乱微断面積の例を以下に示す。

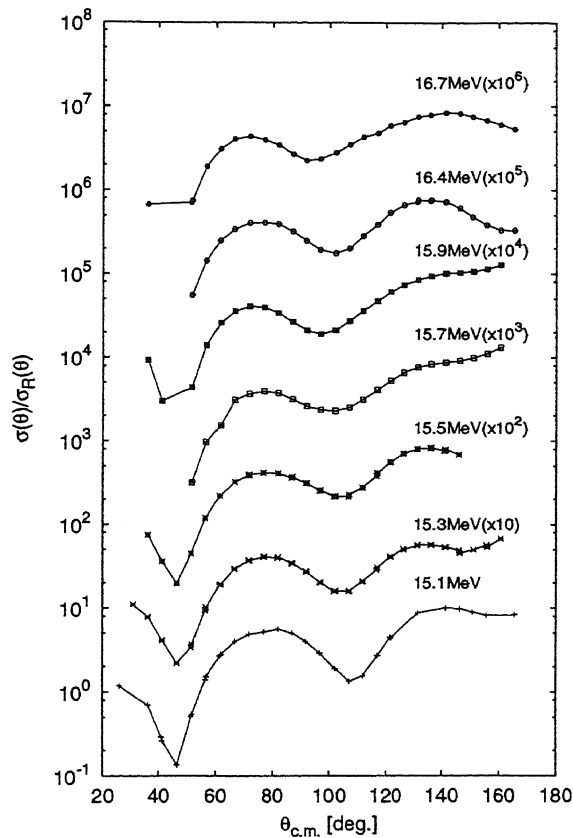


図 6: $^{28}\text{Si}(p,p)$ 弾性散乱微断面積のエネルギー依存性

次の仕事は、これらのデータから、部分波毎の位相のずれを推定しそのエネルギー依存性を導き出す事である。旨く位相のずれのエネルギー依存性が導き出せると、反応時間や標的核のどのあたりで、このようなエネルギー依存性が発生しているかという物理が導き出せる。

(2) 重陽子クーロン分解過程の解析

重陽子が原子核に衝突した時に起こる、原子核反応の一つに分解反応と呼ばれる反応があり、(d,pn) と書かれる。古くは、1935年のオープンハイマーの論文に迄そのルーツを辿る事が可能である。特に、核力とクーロン力が同時に反応に関与すると考えられる場合にはその相互作用半径が大きく異

なる為に解析が困難であった。近年、CDCC 法が重陽子弾性散乱の解析に成功し、一方で計算機の発達が著しい。この両者を融合すると、重陽子の分解過程の S 行列を評価する事が可能となってきた。

下図 7 は、岡村等により測定された陽子と中性子が同時に 0 度に放出された時の、陽子のエネルギースペクトル (3 重微分断面積) を計算値と比較している。

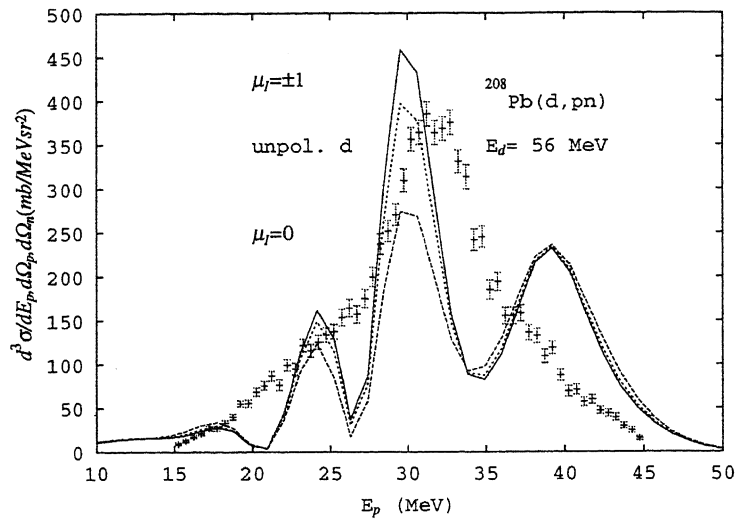


図 7: $^{208}\text{Pb}(d, pn)$ 反応の 3 重微分断面積の実験値と計算値の比較。重陽子のエネルギーは 56 MeV、陽子と中性子は 0 度方向で時間的に同時に検出している。

計算結果は、陽子と中性子の検出器が標的を見込む立体角にわたり平均値を計算している。この場合にはクーロン力がかかなり重要であり、核力による分解過程と相殺的に干渉する。最終的にはクーロン力の効果が大きく現れる為、非常に大きなピークを示す。

反応機構として、重陽子の基底状態から散乱状態への 1 次の摂動以外に、散乱状態間の遷移も大切である事が分かった。

このような解析手段と結果は、宇宙初期や超新星爆発時における元素合成過程も考える上で重要な項と無視して良い項の分離という作業をするのに不可欠である。

一方、次の様な応用を考える事も可能である。重陽子の分解過程は、核力による部分とクーロン力による部分があるが、結果的には原子核の断面積が核力で決定される面積の 4 倍程に大きく見える、即ち沢山の中性子が作られる事になる。陽子と同時計数することにより、タグ付の高エネルギー中性子源として利用できそうである。

(3) ITER についての考察

地上で人類の制御下に核融合を実現し、エネルギーを供給する為核融合実験をしようと言う動きがある。これに関連し、原子核物理的側面からこの動きを見直してみた。結果的に言うと、原子核が関与する現象の断面積は原子現象の断面積と比較して非常に小さいために、原子核現象の断面積の精度は非常に低いと考えられる。中性子が直接的に関与する現象である事も大きな原因となっている。代表的な中性子断面積に測定精度は 10% であり、例外的な場合でも 5% である。一方、この中性子検出精度の向上に向けた努力はなされているだろうが、過去の歴史的な事情から推定するに、今後数 10 年の内に 1 桁の向上は見込めないと思われる。

これらに関して、原子力研究所の複数の専門家と意見交換を行った。又、物理学会誌にも ITER の

実行は時期尚早であるとの投稿した。[3]

(4) 低エネルギー領域における ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ および ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}$ 反応の偏極分解能の測定

核反応エネルギーが 100 keV 以下の非常に低いエネルギー領域における原子核反応の反応機構の研究は、天体核物理学の分野において、astrophysical S-factor や、核反応率 (stellar reaction rate) の決定において重要である。今回 ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ および ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}$ 反応の反応機構を調べるため入射重陽子エネルギー 90 keV で偏極分解能の測定を行なった。このような低エネルギー領域におけるこれらの反応は、今まで無偏極重陽子を用いた反応断面積の励起関数や微分反応断面積のデータしかない。これらの測定だけでは、核反応機構の詳細な議論をするのは難しい。それに対して偏極分解能はスピンの影響を強く反映している物理量なので、複合核生成時に経由する状態のspinパリティの値に大きく依存することが期待される。測定は、加速器センター偏極ビーム入射系に専用小型散乱槽を設置して行なった。 ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ 反応の偏極分解能の測定は、実験室系散乱角 0, 10, 30, 50, 70, 90 度の 6 点で測定した。その測定結果を図 8 に示す。結果は、ベクトル偏極分解能 iT_{11} は全ての測定点において、誤差の範囲でゼロになった。それに対してテンソル偏極分解能 (T_{20}, T_{21}, T_{22}) の角度分布は、それぞれ固有の曲線を描き大きな角度依存性を持っている。これらの偏極分解能の測定結果に対して、複合核反応モデルおよび直接反応モデル (DWBA) による解析を行なった。複合核反応モデルに対しては、この反応は、複合核である ${}^8\text{Be}$ の $J=2^+$ の励起状態のみを經由するというモデルの理論計算値 (図 8 に実線で示す) と、測定結果がよく一致した。一方直接反応モデル (DWBA) に関しては、理論計算値と測定結果に大きなずれが生じた。今回の解析の結果から入射重陽子エネルギー 90 keV における ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ 反応は $J=2^+$ の励起状態を經由する複合核反応が支配的であることが分かった。次に ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}(g.s.)$ 反応に関して、同じように偏極分解能の測定を入射重陽子エネルギー 90 keV で行なった。それらの結果を図 9 に示す。テンソル偏極分解能 T_{20}, T_{21}, T_{22} は、 ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ 反応の場合に比べて、全て位相が逆転している。またベクトル偏極分解能は、ゼロでない負の値を持っている。これらの実験結果をもとに ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}(g.s.)$ 反応の反応機構について現在解析中である。

(5) ${}^{208}\text{Pb}(d, p){}^{209}\text{Pb}(\frac{9}{2}^+)$ 反応における放出陽子の偏極度の測定

${}^{208}\text{Pb}(d, p){}^{209}\text{Pb}$ 反応に関しては、これまで我々は微分断面積および偏極分解能の測定を系統的に行なってきた。これらの実験データを直接反応過程による理論計算と比較することによって (d,p) 反応の反応機構を調べている。さらに、新しい物理量として放出陽子の偏極度を測定するためのポラリメータ系を開発し、今回初めて ${}^{208}\text{Pb}(d, p){}^{209}\text{Pb}(\frac{9}{2}^+)$ 反応における放出陽子の偏極度の測定を行なった。

入射エネルギーは 20.5 MeV、ターゲット上でのビームカレントは約 400 nA である。ターゲットの厚さは約 40 mg/cm² で、ターゲットの中央で重陽子のエネルギーが約 20 MeV になるように入射エネルギーを選んだ。鉛と重陽子との核反応により生成した陽子は、QDQ-型の磁気分析器により選別された単一のエネルギーの陽子がポラリメータに入射する。入射する陽子の個数は 1 秒間に約 3000 個程度と非常に少ないため、ポラリメータは新しく開発した液体ヘリウムを散乱体に用いた高効率のものを使用している。

測定は散乱角 30 度から 100 度までの間の 6 点について行なった。散乱角の広がり、水平方向が約 ±2 度、垂直方向が約 ±1 度である。測定の結果と解析の結果を図 10 に示す。finite-range DWBA 解析と CDCC(d,p) 解析の結果はいずれも、前方角度において負の値になり、実験値は誤差の範囲内で 0 であった。同じ反応における他の観測量、特に、微分断面積とベクトル偏極分解能は同様の解析

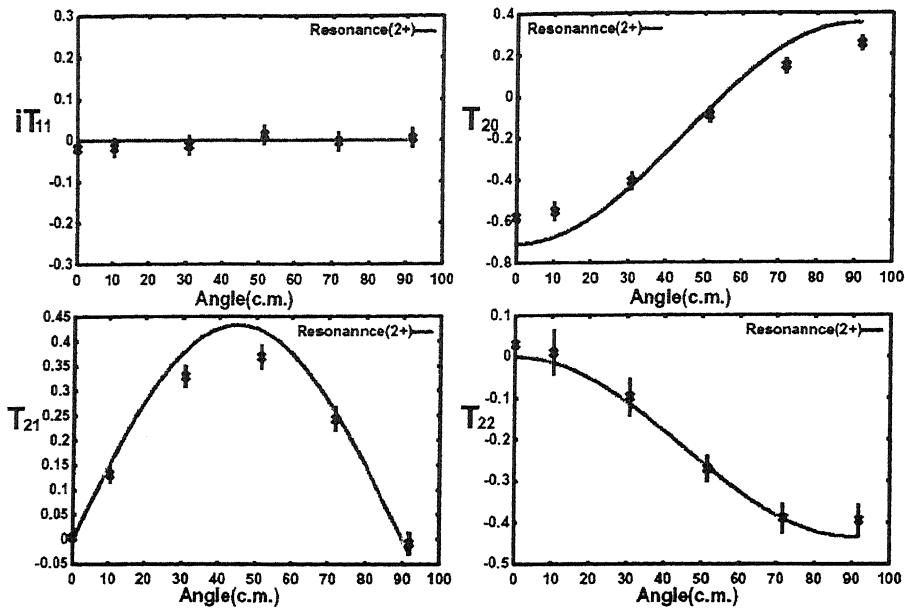


図 8: 重陽子エネルギーが90 keV の時の ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ 反応の偏極分可能な測定値と計算値の比較

で実験値をほぼ再現している。

これまで、放出陽子の偏極度の測定はほとんどなされていない。今回のように前方角において理論と実験値に大きな違いが見られたのは ${}^{208}\text{Pb}$ 標的によるものかどうか、さらに系統的な測定実験が必要である。

参考文献

- [1] N. Okumura, Y. Aoki, T. Joh, Y. Honkyu, K. Hirota, K. S. Itoh, to be published in Nucl. Instru. Meth. A.
- [2] H. Okamura, A. Ishida, N. Sakamoto, O. Otsu, T. Uesaka, T. Wakasa, H. Sakai, T. Niizeki, H. Toyokawa, Y. Tajima, H. Ohnuma, M. Yosoi, K. Hatanaka and T. Ichihara, Phys. Rev. **C58** (1998) 2180
- [3] 物理学会誌 (2001) 8月号 会員の声

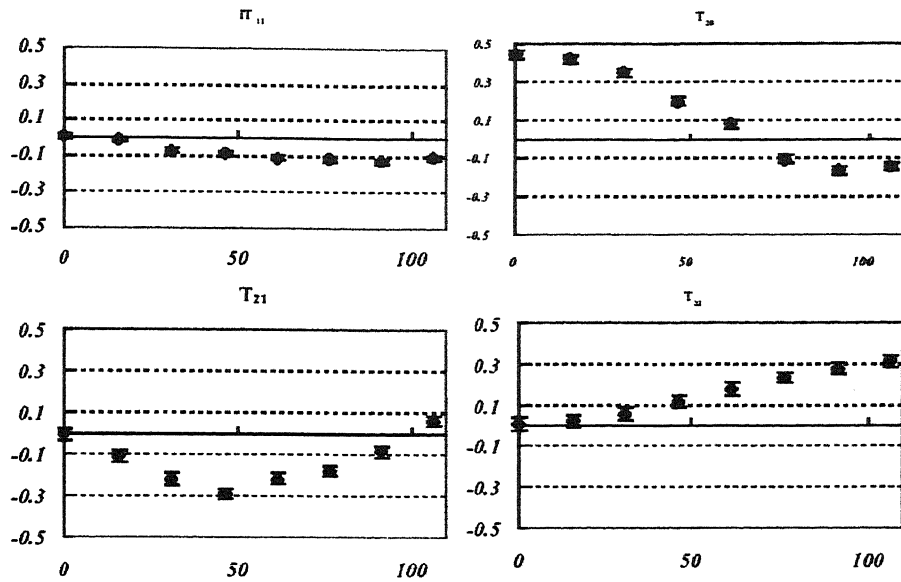


図 9: 重陽子エネルギー 90 keV における ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ 反応の偏極分可能な測定値と計算値の比較

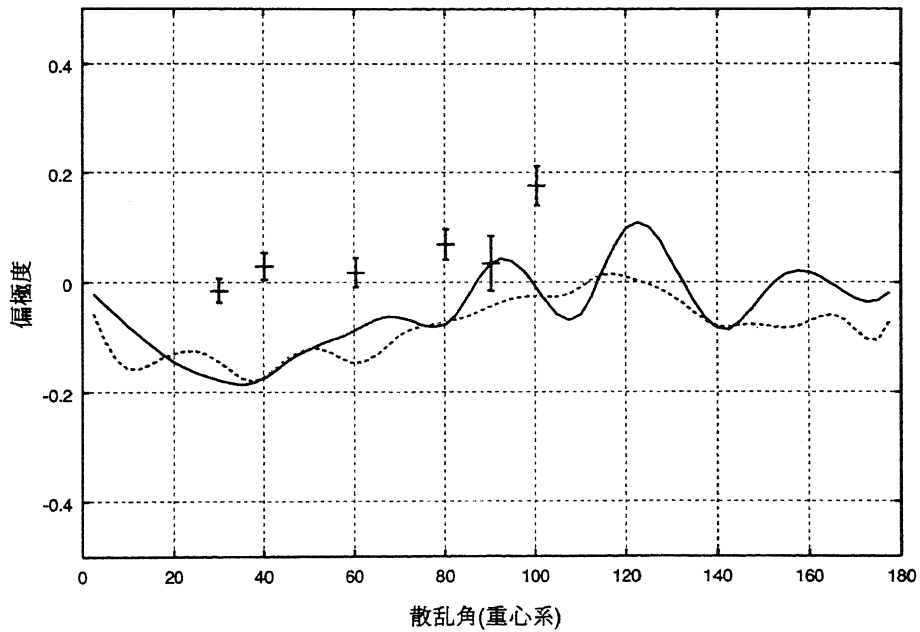


図 10: ${}^{208}\text{Pb}(d,p){}^{209}\text{Pb}(\frac{9}{2}^+)$ 反応における放出陽子の偏極度。実線は finite-range DWBA による解析結果。破線は CDCC(d,p) による解析結果。

【4】高エネルギー原子核実験（三明康郎、江角晋一、加藤純雄）

(1) 高エネルギー重イオン衝突における高運動量領域抑制効果

米国ブルックヘブン国立研究所（BNL）では世界初の衝突型高エネルギー重イオン衝突型加速器（RHIC）の運転が2000年より開始された。2000年6月から9月には $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV、2001年8月からは $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV の金原子核同士の衝突実験が行われ、データ収集を行った。

2000年に収集したデータの解析から、生成粒子の dE_t/dy から推定される初期エネルギー密度は $\sqrt{s_{NN}} = 17$ GeV で行われた CERN・SPS の鉛・鉛衝突実験に比べ約60%の上昇し、QGP生成が十分可能と考えられるエネルギー密度が得られた [1],[2]。 K^+ 対 K^- 中間子生成比、反陽子対陽子生成比はより一層1.0に近づき、化学平衡を仮定する熱的統計モデルによる解析では180 MeVを越える化学平衡温度が報告され、予測されるQGP相転移温度程度の値が得られることがわかった。

このように2000年のデータ解析から数々の興味深い結果が得られたが、なかでも多くの研究者が注目しているのは、一粒子測定における横運動量分布が変形し、高運動量成分が減少するという全く新しい現象である [3]。図11左に磁気スペクトロメーターによって測定された荷電粒子の横運動量分布、右に電磁カロリメーターによるパイゼロ中間子の横運動量分布を示す。それぞれにおいて金原子核同士の周辺衝突と中心衝突を比較しているが、2 GeV/c以上の高運動量領域では、初期核子・核子衝突数で規格化した陽子・陽子衝突の横運動量分布と良い一致が見られるのに対し、中心衝突では規格化した陽子陽子衝突の横運動量分布に比べ減少している。電磁カロリメーターによるパイゼロ中間子測定においても磁気スペクトロメーターによる荷電粒子測定においても同様の傾向が見られる。

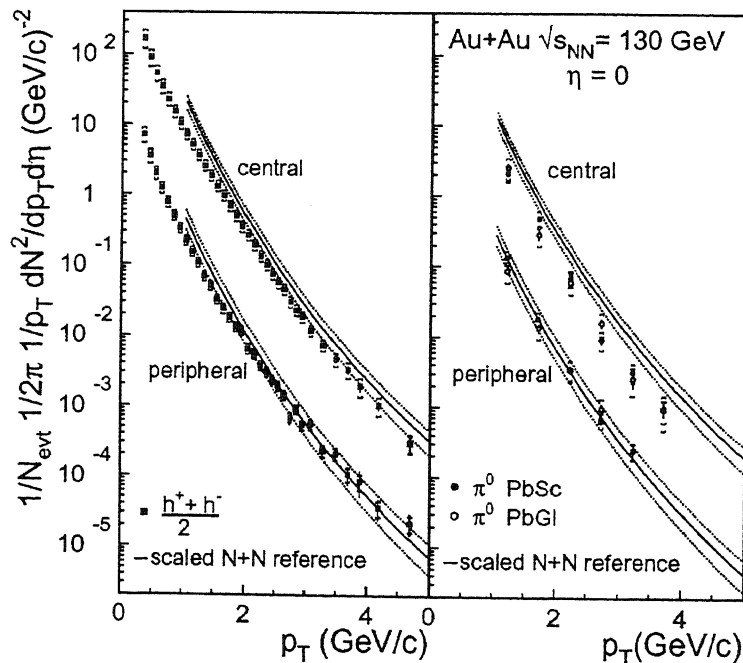


図 11: 左；磁気スペクトロメーターによって測定された荷電粒子の横運動量分布、右；電磁カロリメーターによるパイゼロ中間子の横運動量分布。曲線は初期核子・核子衝突数で規格化した陽子・陽子衝突の横運動量分布。 [3]

次に、金・金中心衝突と陽子・陽子衝突の横運動量比を横運動量の関数として示す（図12）。縦軸

として示したのは、平均初期核子・核子衝突数 $\langle N_{\text{binary}} \rangle$ で規格化した比；

$$R_{AA} = \frac{\sigma_{AA}(p_T)}{\langle N_{\text{binary}} \rangle \cdot \sigma_{pp}(p_T)}$$

である。但し、 $\sigma_{AA}(p_T)$ 、 $\sigma_{pp}(p_T)$ は、それぞれ金・金中心衝突、陽子・陽子衝突における横運動量微分断面積を示す。荷電粒子を角、パイゼロ中間子を丸で示す。横運動量が 0.5 GeV/c 以下の領域では Wounded Nucleon 模型に相当する 0.2 程度から横運動量とともに徐々に増加するものの 2 GeV/c 以上においても R_{AA} は 1 以下であることがわかった。 $\sqrt{s_{NN}} = 17$ GeV の鉛・鉛衝突の結果を点線で比較しているが、2 GeV/c 以上では R_{AA} はむしろ 1 より大きい値を示しており、全く異なった傾向を示す。 $\sqrt{s_{NN}} = 17$ GeV の鉛・鉛衝突の振る舞いは高運動量領域では熱的粒子生成ではなく初期のパートンレベルの衝突の結果発生するという摂動 QCD 模型でよく説明される。従って、今回観測された高運動量領域の抑制効果は今までとは全く異なる多体効果であると考えられる。これらの報告は

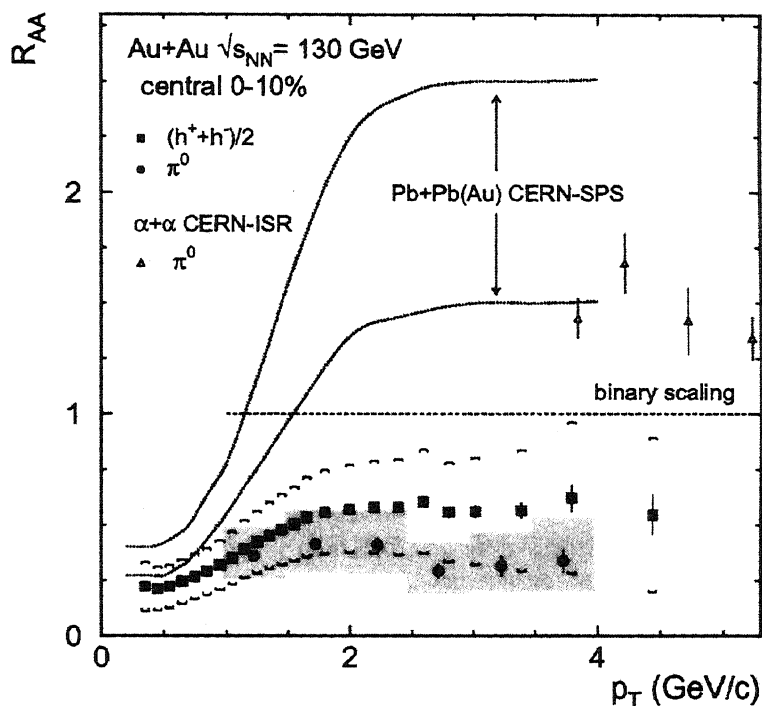


図 12: 平均初期核子・核子衝突数で規格化した金・金中心衝突と陽子・陽子衝突の横運動量比 [3]。磁気スペクトロメーターによって測定された荷電粒子を角、電磁カロリメーターによって測定されたパイゼロ中間子を丸で示す。

Physical Review Letters に掲載され、2002年2月号の表紙を飾った。[3] 従前の重イオン衝突では見られなかった現象であり、QGP生成を示す Jet Quench 効果 [5] ではないかと研究者の注目が集まっている。

Jet Quench 効果とは、荷電粒子が物質中では電離によってエネルギー損失を起こすように、衝突初期に発生したパートンが衝突で発生した高密度物質中を伝搬する際に特徴的なエネルギー損失を起こすというものである。QGP中でコヒーレントなグルオン放射のために 1 fmあたり数 GeVもの大きなエネルギー損失を起こす。他のQGP生成の証拠に比べ、プローブとなる信号は摂動論で記述されるために理論的精度が高く、また極めて反応初期の様子を探ることができるという際だった利点がある。

電子生成量の解析からは金・金原子核衝突からのチャーム生成量は誤差の範囲で平均初期核子・核子衝突数で規格化した陽子・陽子衝突と矛盾しない結果が得られている [4]。これは Jet Quench 効果の質量依存性とも矛盾しない結果と考えられ、大変興味深い。今後の理論的解析が待たれる。

参考文献

- [1] PHENIX collaboration, Phys. Rev. Lett. 86, 3500(2001).
- [2] PHENIX collaboration, Phys. Rev. Lett. 87, 052301(2001).
- [3] PHENIX collaboration, Phys.Rev.Lett. 88, 022301(2002).
- [4] PHENIX collaboration, Phys.Rev.Lett. 88, 192303(2002).
- [5] X.N. Wang, Phys. Rev. C 58, 2321(1998); X.N. Wang and M. Gyulassy, Phys. Rev. Lett. 68, 1480(1992).

(2)RHIC-PHENIX 実験における方位角非等方性

指向的及び楕円的な発生粒子の方位角非等方性は、RHIC 加速器を用いた相対論的重イオン衝突の初期状態を測定するために良い感度を持っていることが期待されている。この初期状態ではクォーク、グルーオン、プラズマ (QGP) が生成されることが予想される。他のハドロンを用いたプローブが、重イオン衝突において最終的に起こるハドロン相互作用によってほとんど決ってしまう事に比べて、この方位角非等方性は衝突初期の情報をより多く含んでいると考えられている。これは放出される粒子の運動量空間における非等方性の事であるが、衝突する2つのビーム粒子が重なりあった瞬間の幾何学的な位置情報を残している。衝突領域にでき得る QGP の生成は、如何にこの初期の位置空間での非等方性が、終状態である運動量空間の非等方性を創り出すかという事に、影響を及ぼすかも知れない。衝突領域内での QGP の圧力は、初期にアーモンド型をしてる物質の時空発展を加速又は減速するはずである。従って発生粒子の方位角非等方性は、衝突初期状態の自由度や反応領域の動力学的発展を研究する為の一つの直接的な観測量である。

フェニックス実験では、RHIC 加速器における $\sqrt{s_{NN}} = 130$ 及び 200GeV の金+金衝突から中心ラピディティ付近に発生する荷電粒子及び粒子識別されたハドロンの v_1 と v_2 を測った。楕円型方位角非等方性 (v_2) は、AGS や SPS から RHIC へと衝突エネルギーを大きくすると同時に、増加する。しかしながら、カスケードモデルはしばしばこの v_2 を低く見積もるのに対して、流体力学モデルは大きく見積もる。一方で、RHIC エネルギー重イオン衝突では、高横運動量ハドロンが核子対衝突から予想される量よりも減少していることが発見された。その説明の一つが QGP 中でのジェットのエネルギー損失である。 v_2 の高横運動量領域での振舞いは、このジェットのエネルギー損失のさらなる詳しい研究に、新たな情報を付け加えると期待されている。エネルギー損失が初期のアーモンド型の衝突領域の軸 (反応平面) に如何に依存するかを測定する事ができる様になるからである。

良く使われる標準的な集団運動の反応平面に対する解析がある。[1, 2, 3, 4] 一方で、フェニックス実験は、これまで2粒子及び多粒子の方位角相関の手法を用いて来た。130GeV の金+金衝突における2粒子相関の解析結果を、図 13 に示す。 v_2 の横方向運動量及び中心衝突度依存性が示されている。右図の縦軸 A_2 は、予測される初期反応領域の非等方性で v_2 を規格化したものであり、 A_2 が 1 より小さいことは、 v_2 が初期反応領域の非等方性より小さいことを示唆している。しかしながら、この規格化定数は中心衝突度には依存するが、横運動量には依存しない事に注意して見るべきである。

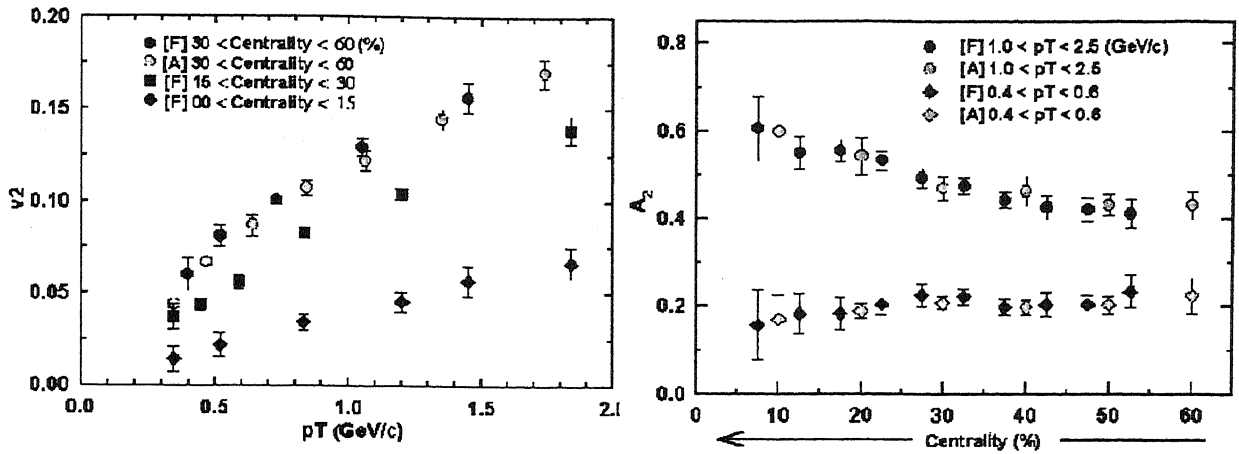


図 13: v_2 対 p_T を異なる中心衝突度の選択によって示す (左)。 v_2 を予測される初期反応領域の非等方で規格化した A_2 の中心衝突度依存性を示す (右)。 [F] と [A] はそれぞれ、固定 p_T 法と組合せ p_T 法を指す。固定 p_T 法は、2 粒子共に固定された p_T 領域から取り、2 粒子相関を測ることで、組合せ p_T 法とは、1 粒子を決められた p_T 領域から取り、もう 1 粒子はそれ以外の領域から取り、同様に相関を測ることである。後者は効果的に統計誤差を小さくすることが目的である。

高い横運動量領域の粒子 ($1 < p_T < 2$) の A_2 は、低い横運動量領域とは異なる中心衝突度依存性を持っている、これは異なる横運動量領域には、異なる効果 (反応平面との相関を持たない) が方位角非等方に含まれている事を暗示している。

我々は前方、後方ラピディティーにあるビーム検出器を用いて標準的な反応平面決定手法を適用した。また中心アーム検出器を用いた反応平面も計算し、それらの結果を比較した。これらの異なる手法による結果の比較は、非等方に含まれるミニジェットなどの異なる効果の識別や、高次の振動項を見出す手がかりになる。図 14 は異なる検出器で測定された反応平面間の相関を示す。左図は 2 つのビーム検出器間で 1 次の項 (指向的発生) に、また中図は同じく 2 次の項 (楕円的发生) に相関があるのが分かる。指向的発生が、前後方ラピディティーで逆方向に存在し、このラピディティー領域 ($\eta = 3 \sim 4$) で (指向的発生より) 強い楕円的发生があることを示している。右図は 2 つのビーム検出器を組み合わせて測定した楕円的发生の反応平面と、中心アームの検出器 ($\eta < 0.35$) で測った楕円的发生の反応平面どうしの相関を示す。幅の狭い (強い) 相関を持つのは、組み合わせたビーム検出器と中心アームの検出器の反応平面分解能が良いことを裏付けている。これは平面計算に使う粒子数の増加と、中心ラピディティー領域での楕円的发生の強さ (楕円率) の増大に起因する。

高い横運動量を持った荷電粒子及び識別されたハドロンの反応平面に対する発生方位角非等方の解析は現在進行中であり、異なる手法との比較によりこの非等方性の中に実験的に含まれる効果の探究中である。

(3) RHIC-PHENIX 実験のためのエアロジェルチェレンコフ検出器の開発

米国ブルックヘヴン国立研究所において、世界初の高エネルギー重イオン衝突型加速器 (RHIC) の運転が、2000 年より開始された。2000 年のデータ解析から、横運動量分布を中心衝突と周辺衝突とで比較すると、中心衝突では高横運動量成分が減少するという、全く新しい現象が確認された。この現象は Jet Quench 効果である可能性が高いと考えられている。QCD によると Jet Quench 効果はクォークジェットにくらべグルオンジェットにより強く現れると期待され、運動量分布の変化以外に

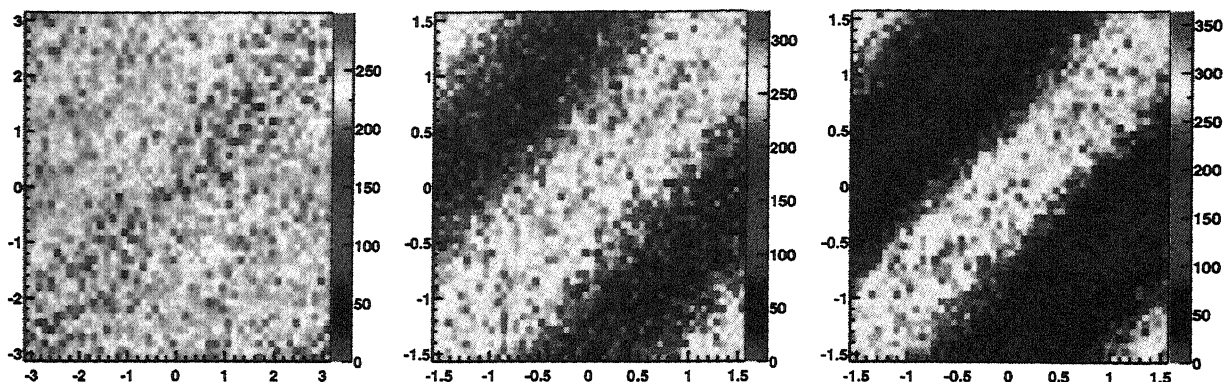


図 14: 異なる検出器間での反応平面どうしの相関。2つのビーム検出器間の指向的発生平面 (左図) と楕円の発生平面 (中図)、2つのビーム検出器を組み合わせたものと中心アームの検出器による楕円の発生平面 (右図)。

も、高運動量領域における陽子・反陽子比などの粒子生成比の変化となって現れることが既に予言されている。このため、今後ハドロンの高運動量領域における粒子識別能力を高めることは重要と考えられている。

PHENIX実験には、筑波大学のチームが中心になって開発・製作した飛行時間測定器（時間分解能100ピコ秒以下）、さらにエタンや二酸化炭素ガスをラディエーターとする Ring Imaging Cherenkov Counter (Index: 1.00041-1.00044) が既に稼働しており、エアロジェロチェレンコフカウンター (ACC) (Index 1.01) を新たに付加することによって、10 GeV/c までの陽子/K中間子/パイ中間子の選別が可能となる。

KEKのBELLE実験で開発されたACC[5]を参考にしながら、PHENIX実験のためのR&Dを開始した。発生したチェレンコフ光を効率良く集光し、かつ、荷電粒子の入射位置によらない、集光量の様性の高い集光系を追求している。荷電粒子の通過によってエアロジェル中で発生したチェレンコフ光は、エアロジェル中での散乱・吸収過程を経て光電子増倍管で検出される。その際、散乱光と、チェレンコフ光の指向性を残した直接光のどちらに検出の重点を置くかで集光系に二つの候補が考えられる。(1) 散乱光型；エアロジェルの両側にビーム軸と垂直に光電子増倍管を配置し、散乱光を主に検出する。(2) 直接光型；ビーム軸方向前方に出たチェレンコフ光をミラーによって光電子増倍管に集光する。

ACCのプロトタイプを製作しKEK-PSにおいて、プロトタイプ性能評価のためのテスト実験 (実験番号；T496) を行った。これらの結果を基に最終デザインを決定する。

3GeV/cの π 中間子テストビームを用いて、プロトタイプの基本的性能を評価した。評価項目は、ビームの入射位置依存性や運動量依存性などである。プロトタイプはチェレンコフ現象のはっきりとした閾値性と十分な集光量及びS/N比を持つことを確認できた。図15右は、縦軸に荷電粒子の飛行時間、横軸にACCの出力をプロットしたものである。飛行時間の差によって粒子識別を行った後の光電子数分布が右上に挿入してある。この分布により、プロトタイプがチェレンコフ放射の明確な閾値性を持っていることがわかる。異なる設計思想をもつ散乱光型と直接光型の比較では、散乱光型の方が集光性が高いことがわかった。3GeV/cのパイ中間子ビーム、エアロジェルの屈折率1.018という条件で、光電子数にしてPMTあたり十数個を得た。図15左は、集光量のビーム入射位置依存性である。ビームの入射位置と光電子増倍管との距離について、集光量の指数関数的な減衰が見られた。

T496の実験結果と別途進めてきたモンテカルロシミュレーションから、さらに詳細に検討すべき

点が浮かび上がった。散乱光の集光性に対する反射材の寄与、散乱空気槽の効果などである。T514 実験ではこれらの項目に的を絞って測定を行い、検出器の最終デザインに到達するために必要不可欠なデータの収集に成功し、目下解析中である。

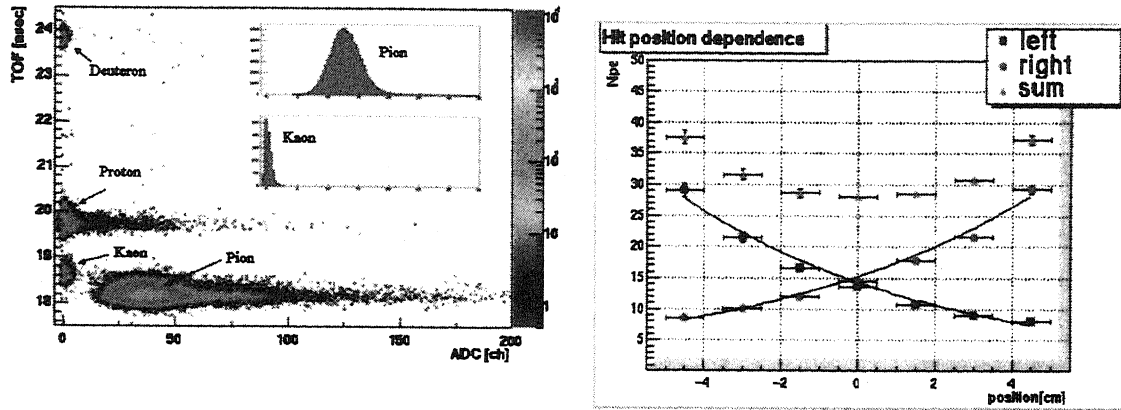


図 15: 左) ACC による粒子識別、右) 集光量の入射位置依存性

参考文献

- [1] J.Barrette et al., E877 Collaboration, Phys. Rev.Lett. **73**, (1994) 2532.
- [2] J.Barrette et al., E877 Collaboration, Phys. Rev. **C55**, (1997) 1420.
- [3] J.Barrette et al., E877 Collaboration, Phys. Rev. **C56**, (1997) 3254.
- [4] A.Poskanzer and S.Voloshin, Phys. Rev. **C58**, (1998) 1671.
- [5] T. Sumiyoshi et.al., Journal of Non-Crystalline Solids 225, 369(1998).

<論文>

1. C.B. Moon, S.J. Chae, J.H. Ha, T. Komatsubara, Y. Sasaki, T. Jumatsu, K. Yamada, K. Satou, K. Furuno, Level structure of ^{120}Cs , Nucl. Phys. A696, 45-63, (2001).
2. T. Shizuma, K. Matsuura, Y. Toh, Y. Hayakawa, M. Oshima, Y. Hatsukawa, M. Matsuda, K. Furuno, Y. Sasaki, T. Komatsubara, Y.R. Shimizu, Multi-quasiparticle states and K-forbidden transitions in ^{183}Os , Nucl. Phys. A696, 337-370, (2001).
3. C.B. Moon, T. Komatsubara, K. Furuno, Rotational bands built on the proton $h(11/2)$ orbital in ^{121}Cs , Journal of the Korean Physical Society 38, 83-87 (2001).
4. Y.H. Zhang, T. Hayakawa, M. Oshima, Y. Toh, J. Katakura, Y. Hatsukawa, M. Matsuda, N. Shinohara, T. Ishii, H. Kusakari, M. Sugawara, T. Komatsubara, Doubly decoupled structure in odd-odd $^{178-186}\text{Ir}$ nuclei, Chinese Physics Letters 18, 27-29 (2001).
5. Y.H. Zhang, T. Hayakawa, M. Oshima, Y. Toh, J. Katakura, Y. Hatsukawa, M. Matsuda, N. Shinohara, T. Ishii, H. Kusakari, M. Sugawara, T. Komatsubara, K. Furuno, Search for signature inversion in the $\pi i(13/2) \times \nu i(13/2)$ band in odd-odd ^{178}Ir , Chinese Physics Letters 18, 1323-1326 (2001).
6. X.H. Zhou, Y. Zheng, Y.H. Zhang, Z. Liu, Q.Y. Pan, Z.G. Gan, T. Hayakawa, M. Oshima, Y. Toh, T. Shizuma, J. Katakura, Y. Hatsukawa, M. Matsuda, H. Kusakari, M. Sugawara, K. Furuno, T. Komatsubara, In-Beam Study of ^{145}Tb , Eur.Phys.J. A 12, 253 (2001).
7. Y.H. Zhang, T. Hayakawa, M. Oshima, J. Katakura, Y. Hatsukawa, M. Matsuda, H. Kusakari, M. Sugawara, T. Komatsubara, K. Furuno, Configuration-Dependent Band Structures in Odd-Odd ^{180}Ir , Phys.Rev. C65, 014302 (2002).
8. K. Nishio, H. Ikezoe, S. Mitsuoka, K. Satou, S.C. Jeong, Effects of Nuclear Deformation on Fusion Probability in the Reactions, of $^{82}\text{Se} + ^{\text{nat}}\text{Ce}$ and $^{76}\text{Ge} + ^{150}\text{Nd}$ Near the Coulomb Barrier, Phys.Rev. C63, 044610, 6 pages(2001).
9. T. Katabuchi, K. Kudo, K. Masuno, T. Iizuka, Y. Aoki and Y. Tagishi, Polarization transfer for the $^2\text{H}(d,p)^3\text{H}$ reaction at $\theta = 0^\circ$ at a very low energy, SPIN 2000, 14th Int. Spin Physics Symposium, Osaka Japan 2000, AIP conference proceedings 570, p.694-698, 2001.
10. T. Katabuchi, K. Kudo, K. Masuno, T. Iizuka, Y. Aoki and Y. Tagishi, Polarization transfer coefficient K_y^y in the $2\text{H}(d,p)3\text{H}$ reaction at $\theta=0^\circ$ at very low energies, Physical Review C64(2001)047601-1-047601-3, 2001.
11. N. Okumura, K. Hirota, T. Jo, K. Ito, Y. Aoki, Measuring system of proton total reaction cross sections at tandem energy region, Nucl. Instr. Meth. A, in press.
12. K. Sasa, H. Ohshima, Y. Yamato, T. Komatsubara, T. Katabuchi, K. Shima, K. Furuno, M. Kurosawa, N. Yanagisawa, Hydrogen analysis of mineral samples at University of Tsukuba. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B Vol.190, 287-290 (2002).
13. M. Imanaka, T. Kurita, M. Tsukada, I. Arai, S.M. Lee and T. Nakagawa, Effect of a biased electrode on operation of electron cyclotron resonance ion source using liquid He free superconduction solenoid coils, Review of Scientific Instruments, 73, pp592-594, 2002.

14. I. Arai, H. Sasaki, J. Hirose, K. Teranishi and S.M. Lee, Abundance Spectra of Clusters for Various Metals in Sputtering and Their Formation Mechanism, Transactions of Materials Research Society of Japan, 27, pp193-196, 2002.
15. M. Imanaka, T. Kurita, T. Nakagawa, H. Sasaki, S.G. Lee, I. Arai and S.M. Lee, Highly-Charged Ion Beam for Study of Cluster Physics, Transactions of Materials Research Society of Japan, 27, pp181-184, 2002.
16. T.X. Li, S.M. Lee, S. J. Han and G.H. Wang, Structural transitions of ^{55}Au isomers, Phys. Lett. A, to be published.
17. T. Abbott, Y. Miake, et.al., Systematics of Midrapidity Transverse Energy Distributions in Limited Apertures from p + Be to Au + Au Collisions at Relativistic Energies. Phys.Rev.C63:064602, 2001, Erratum-ibid.C64:029901,2001
18. K. Adcox, S. Esumi, A. Kiyomichi, Y. Miake, M. Ono, M. Suzuki, H. Tsuruoka, et.al., Measurement of the Midrapidity Transverse Energy Distribution from $s(\text{nn})^{1/2} = 130\text{-GeV}$ Au+Au Collisions at RHIC. Phys.Rev.Lett.87:052301,2001
19. K. Adcox, S. Esumi, A. Kiyomichi, Y. Miake, M. Ono, M. Suzuki, H. Tsuruoka, et.al., Suppression of Hadrons with Large Transverse Momentum in Central Au+Au Collisions at $s(\text{nn})^{1/2} = 130\text{-GeV}$. Phys.Rev.Lett.88:022301,2002
20. M.M. Aggarwal, Y. Miake, et.al., Direct Photons in WA98. Nucl.Phys.A698:135-142,2002
21. L. Rosselet, Y. Miake, et.al., One-, Two- and Three-Particle Distributions from Central Pb + Pb Collisions at 158-A-GeV/c. Nucl.Phys.A698:647-650,2002
22. W.A. Zajc, S. Esumi, A. Kiyomichi, Y. Miake, M. Ono, M. Suzuki, H. Tsuruoka, et.al., Overview of Phenix Results from the First RHIC Run. Nucl.Phys.A698:39-53,2002
23. M.M. Aggarwal, Y. Miake, et.al., Transverse Mass Distributions of Neutral Pions from Pb-208 Induced Reactions at 158-A-GeV. Eur.Phys.J.C23:225-236,2002
24. D. Adamova, S. Esumi et al. New Results From Ceres. Nucl.Phys.A698:253-260,2002
25. I.G. Bearden, S. Esumi et al. Two Kaon Correlations in Central Pb + Pb Collisions at 158 A GeV/c. Phys.Rev.Lett.87:112301,2001
26. Mikhail L. Kopytine, S. Esumi et al. Event Texture Search for Critical Fluctuations in Pb+Pb Collisions. Nucl.Phys.A698:651-654,2002
27. I.G. Bearden, S. Esumi et al. One-Dimensional and Two-Dimensional Analysis of 3π Correlations Measured in Pb + Pb Interactions. Phys.Lett.B517:25-31,2001

<学位論文（博士論文）>

1. 博士（理学）、栗田哲郎（Tetsuro Kurita）、'Development of ECR Ion Source Using Liquid Helium Free Superconducting Solenoid Coils'

<学位論文（修士論文）>

1. 横瀬貞治（理工学研究科）、 ^{165}Ho 核における基底回転準位の寿命測定
2. 飯塚智幸（理工学研究科）、 $E_d=90\text{keV}$ における $^6\text{Li}(d,\alpha)^4\text{He}$ 反応
3. 根岸昭博（理工学研究科）、遷移金属-ケイ素クラスターの生成過程の観測
4. 小野雅也（数理物質科学研究科）、Azimuthal Anisotropy of Particle Emission in Au +Au Collisions at RHIC-PHENIX
5. 鶴岡裕士（数理物質科学研究科）、RHIC-PHENIX 実験における p+p 衝突実験のための衝突検出器の設計と開発

<招待講演（国際会議）>

1. 李相茂、「原子クラスターとナノ・サイエンス」、特別講演、朝鮮民主主義人民共和国科学院自然科学部門、2001年6月20日（S.M. Lee, 'Atomic Cluster and Nanoscience', Invited Lecture, Natural Science Division, Academy of Science, Democratic People's Republic of Korea, June 20, 2001.）

<招待講演（国内）>

1. 李相茂、「原子クラスター物理学」、大阪大学大学院理学研究科集中講義、2001年10月17-19日
2. 三明康郎、「クォーク・グルオン・プラズマ」北海道大学理学部特別講義、平成14年2月4、5、6日

<国際会議発表>

1. 河地有木、A new method for measurement of diffusion and trapping of the implanted deuterons by using reaction $^2\text{H}(d,p)^3\text{H}$ 15th International Conference on Ion Beam Analysis, Cairns, Australia
2. 三明康郎、HIGH PT PROJECT OF PHENIX, Yonsei-Tsukuba Workshop, Yonsei, Korea, Aug.20-22,2001
3. T. Komatsubara, K. Sasa, T. Katabuchi, N. Kawachi, M. Yamaguchi, T. Iizuka, H. Oshima, Ying-jun Ma, Y. Sasaki, S. Yokose, M. Ishizuka, Y. Tagishi, K. Furuno, Measurement of Proton Spin Precession by Transient Magnetic Field First Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of APS and JPS, Hawaii 2001, October 17-20, 2001, Wailea, Maui, Hawaii
4. K. Sasa, H. Ohshima, Y. Yamato, T. Komatsubara, T. Katabuchi, K. Shima, K. Furuno, M. Kurosawa, N. Yanagisawa. Hydrogen analysis of mineral samples at University of Tsukuba. 15th International Conference on Ion Beam Analysis. Cairns, Australia, July 16-20, 2001.

5. M. Imanaka, T. Kurita, M. Tsukada, T. Nakagawa, S.M. Lee, The Effect of a Biased Electrode of ECR Ion Source Using Liquid He Free Superconducting Solenoid Coils, The 9th International Conference on Ion Sources, Oakland, California USA, Sep. 3, 2001.

<日本物理学会発表>

1. 河地有木、 $^2\text{H}(d,p)^3\text{H}$ 反応を用いた注入重陽子の実時間測定、日本物理学会年会 (立命館大学)
2. 青木保夫、奥村紀浩、城哲男、井芹康統、CDCC 法を用いた重陽子弾性分解過程の陽子エネルギースペクトルの計算、日本物理学会年会 (立命館大学)
3. 清道明男 for the PHENIX Collaboration Hadron Production ratios in Au+Au Collisions at RHIC-PHENIX、日本物理学会年会 (立命館大学)
4. 江角晋一 for the PHENIX Collaboration Directed and elliptic flow in Au+Au collisions at RHIC-PHENIX、日本物理学会年会 (立命館大学)
5. 金野正裕、益井宙、江角晋一、大木俊和、小野雅也、神長誉人、清道明男、黒木義昭、坂井真吾、高木敏志、鶴岡裕士、三明康郎、小沢恭一郎、E. Kistenev RHIC-PHENIX 実験の粒子識別能力向上のためのエアロジェロチレンコフ検出器の開発、日本物理学会年会 (立命館大学)
6. 坂井真吾、江角晋一、小野雅也、清道明男、黒木義昭、佐藤進、進藤美紀、団村絢子、鶴岡裕士、益井宙、三明康郎 高飛行時間分解能チレンコフ・ビームカウンターの開発、日本物理学会年会 (立命館大学)

<国内研究会>

1. 笹公和、石井聡、大島弘行、木村博美、高橋努、田島義一、大和良広、片渕竜也、小松原哲郎、島邦博、古野興平、「筑波大学加速器センターの現状」、第14回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、2001年6月28-29日 核燃料サイクル機構 東濃地科学センター
2. 笹公和、黒澤正紀、大島弘行、木村博美、大和良広、小松原哲郎、島邦博、古野興平、地球科学試料の水素・軽元素分析用マイクロビーム装置、第14回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、2001年6月28-29日 核燃料サイクル機構 東濃地科学センター
3. 笹公和、筑波大学における水素分析用マイクロビーム装置の開発、筑波大学加速器センター シンポジウム、「イオンビームによる構造、組成分析法の開発と応用」2002年1月16日
4. 新井一郎、佐々木玄、寺西功一、広瀬治郎、李相茂、「6keV-Xe 原子スパッタリングによる金属クラスター生成の物理過程」、超微粒子とクラスター懇談会第5回研究会、
5. 新井一郎、佐々木玄、広瀬治郎、寺西功一、李相茂、'Abundance Spectra of Clusters for Various Metals in Sputtering and Their Formation Mechanism', 第13回日本MRS学術シンポジウム
6. 今中雅士、栗田哲郎、中川孝秀、佐々木玄、李相坤、新井一郎、李相茂、'Highly-Charged Ion Beam for Study of Cluster Physics', 第13回日本MRS学術シンポジウム
7. 李相坤、今中雅士、「Multiply Charged Ion Beam Impact によって金属表面から放出された2次 cluster ion の charge state 依存性」、第12回在日韓国科学技術者協会学術大会、東京、2002年3月2日

<科学研究費取得状況>

1. 基盤研究A、研究（2）、一般、共鳴原子核反応法による岩石・鉱物中の水素分析法の研究、代表者：古野興平、分担者：宮野 敬、加藤 工、黒沢 正紀、小松原 哲郎、笹 公和平成12年度：8,100,000円13年度：9,900,000円14年度：6,400,000円

<外部資金取得状況>

1. 日韓科学協力事業、「ハドロンの系統的測定によるクォークグルオンプラズマの研究」、平成11年9月1日～平成13年8月31日、代表・三明康郎、2,212千円（初年度経費 570千円、2年度経費 1,150千円、3年度経費 492千円）
2. 奨励研究、「偏極陽子ビームによるトランジェント磁気相互作用の研究」、代表（小松原哲郎）、500千円
3. 奨励研究、「高エネルギー原子核衝突における粒子識別用エアロジェルチェレンコフ検出器の開発」、代表・江角晋一、500千円