

VI. 原子核実験グループ

教授 田岸義宏、三明康郎
助教授 青木孝義、青木保夫、新井一郎、江角晋一、小沢 顕
講師 小松原哲郎、笹 公和
準研究員 山口充孝
技 官 加藤純雄
大学院生 21名

【1】 低エネルギー原子核実験グループ1 (田岸義宏、青木保夫、小沢顕、山口充孝)

(1) 入射エネルギー 110 keV における ${}^6\text{Li}(d,p_1){}^7\text{Li}$ 反応の偏極分解能の測定

入射エネルギー 110 keV において ${}^6\text{Li}(d,p_1){}^7\text{Li}$ 反応の偏極分解能の測定を行った。実験装置は昨年度使用していたものを改良した。今回の反応は、昨年度のものに比べ、反応断面積が小さいので、測定器と標的との距離を縮めて測定装置の立体角を大きくした。図 1 が実験結果を表している。前方の散乱角度では、 p_0 と p_1 のピークを分離できなかったために、大きな不確かさが生じたので結果から省いた。図中の曲線は (l, s, J) 反応行列要素による解析 [1] の結果を示す。

(2) 稀少 RI ビーム蓄積リングの検討

理研の RI ビームファクトリー (RIBF) の大型実験装置の一つとして稀少 RI ビーム蓄積リングの検討を行っている。2004年3月の研究会での討議を受けて、蓄積リングは、不安定核の質量測定用の等時性リングを検討することが決まった。これにより、2004年度以来、等時性蓄積リング、入射ライン等の概念設計を行っている。2004年度は質量測定装置としての蓄積リングのおおまかな配置の検討を行った。その結果、装置は以下の3つの部分から構成される。

1. RI ビームの速度測定用、及び、キッカー励磁までのビーム遅延用の長い入射ライン。入射ラインの一部には、現在 KEK に保管中の重イオン蓄積リング TARNII の電磁石を再利用する予定である。
2. 「個別入射」のための高速応答キッカー磁石。RIBF の BigRIPS 中にトリガー用の検出器を置き、その検出器の信号をキッカー磁石のトリガーとする。ビームの遅延時間は、 $\sim 1\mu\text{s}$ なので、キッカー磁石はこの遅延時間内で励磁されなくてはならない。
3. 質量測定のための等時性蓄積リング。RI ビームのエネルギーは、200 A MeV を想定し、蓄積リングの運動量アクセプタンスは、 $\pm 1\%$ として、概念設計をはじめている。蓄積リングは、8 あるいは 10 のセクター磁石のみから構成される。周長は約 60 m である。等時性は、第一近似はセクター磁石のエッジの形で決める。より高い等時性のためにトリムコイル等で補正磁場を作る予定である。

以上の検討結果は 2004 年 11 月の理研 RIBF の国際アドバイザー会議 (IAC) で報告を行った。IAC では「不安定核の質量測定法として革新的な手法である」という評価を受けた [2]。次年度

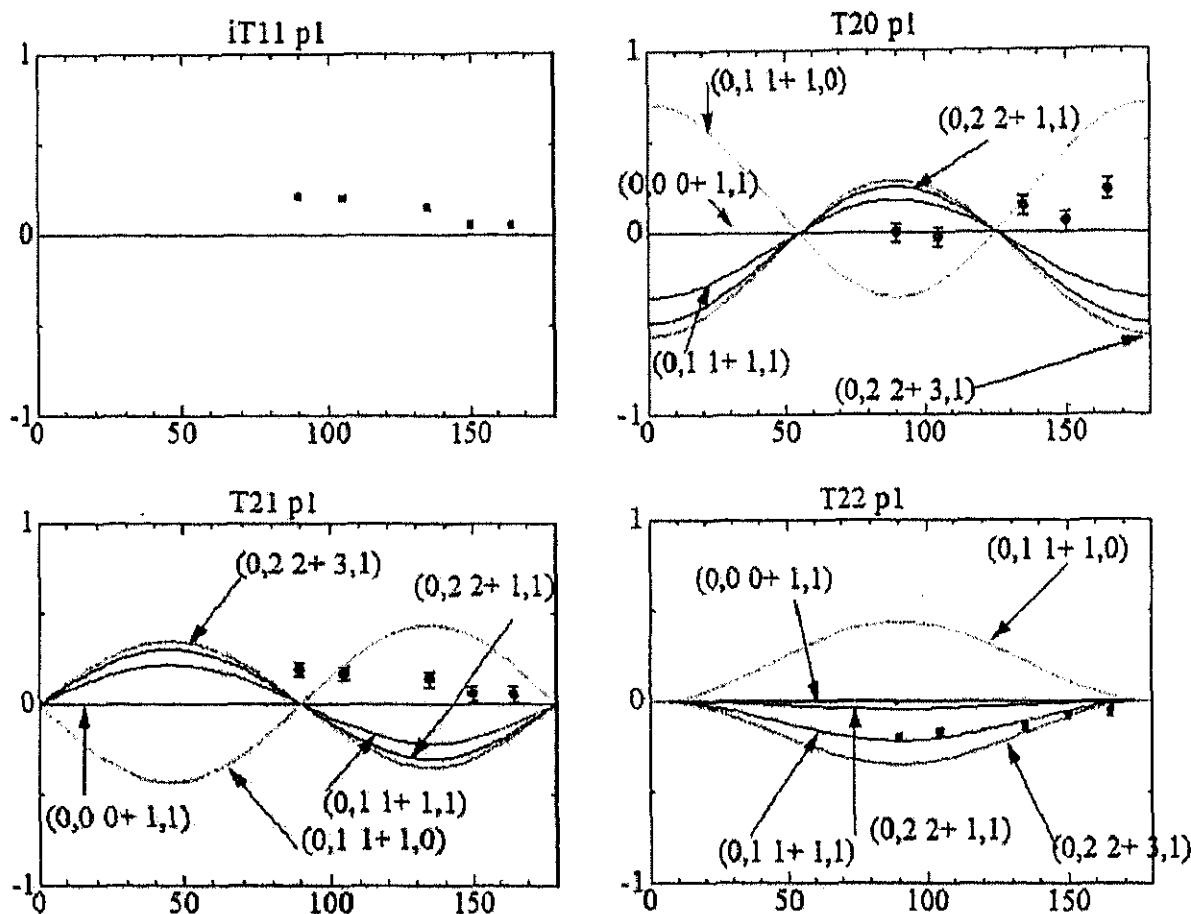


図 1: 実験結果と (l, s, J) 反応行列要素による解析結果.

は、概念設計をさらに進めるとともに、リング中のビーム軌道のシュミレーションプログラムを開発し、蓄積リング及び入射ラインの詳細設計をはじめめる。

(3) 陽子過剰不安定核 ^{23}Al の核磁気モーメントの測定

2003年度に予備的な測定を行ったが、今回は、さらに精密測定を行った。実験は理研の不安定核ビームライン RIPS で行った。理研のリングサイクロトロンにより 135 A MeV に加速した ^{28}Si の入射核破砕反応により ^{23}Al を生成し、RIPS で分離を行った。 ^{23}Al は陽子過剰核であり、アイソトーン (^{22}Mg , ^{21}Na など) の混入が深刻なバックグラウンドとなる。これらのアイソトーンの混入を少なくするため、RF デフレクター [3] を使用した。RF デフレクターの使用によりアイソトーンの混入は 1/7 程度になった。 ^{23}Al は、Si ストッパー中にとめられ、 β 線を指標とした NMR により、核磁気モーメントの測定を行った。NMR の静磁場は、2003年度の測定と同じ (3kG) にした。最初に、周波数幅を 2003年度の測定と同じ、 $\pm 500\text{kHz}$ とし、2003年度の実験結果が再現するかチェックを行った。ほぼ同じ周波数で共鳴が見えたので、さらに精密測定を目指して、周波数幅を $\pm 200\text{kHz}$ として測定を行った。これらの測定結果を図 2 に示す。これより、 ^{23}Al の核磁気モーメントとして、 $g=1.557(88)$ を得た。 ^{23}Al の核スピン (J^π) は未知である。殻模型からの予想では、 $J^\pi=1/2^+$

の場合、 $g=3.40$ であり、 $J^\pi=5/2^+$ では、 $g=1.58$ である。今回の測定値は、 $J^\pi=5/2^+$ の予想と一致しており、 ^{23}Al の核スピンは、 $J^\pi=5/2^+$ と決定できた。

(4) $^{72-80}\text{Kr}$ アイソトープの相互作用断面積の測定

我々は、相対論的エネルギー (~ 1 AGeV) で不安定核の相互作用断面積の系統的な測定を行っている。2004年度は、Kr アイソトープの相互作用断面積の測定を行った。Kr アイソトープは、その荷電核半径が、アイソトープシフトの測定から分かっているので [4]、我々の相互作用断面積の測定と組み合わせることで、スキンの情報を引き出すことができる。実験はドイツ GSI の不安定核ビームライン FRS で行った。GSI の重イオンシンクロトロン SIS により ^{80}Kr を ~ 1 AGeV まで加速し、Be ターゲットとの入射核破碎過程により、Kr アイソトープを生成した。FRS の中間焦点面に炭素の反応二次ターゲットをおき、炭素ターゲットの上流、下流で粒子識別を行い、反応しなかった Kr アイソトープの数を測定した。反応ターゲットの有り/無しでその比を測定し、相互作用断面積を導出した。実験データは解析中であるが、予備的な結果では、陽子過剰核 ^{72}Kr では、 ^{80}Kr より大きな断面積が得られている。この結果は、質量数が小さいにも関わらず、 ^{72}Kr の核半径が大きいことを示しており、 ^{72}Kr での陽子スキンの存在を示唆している。

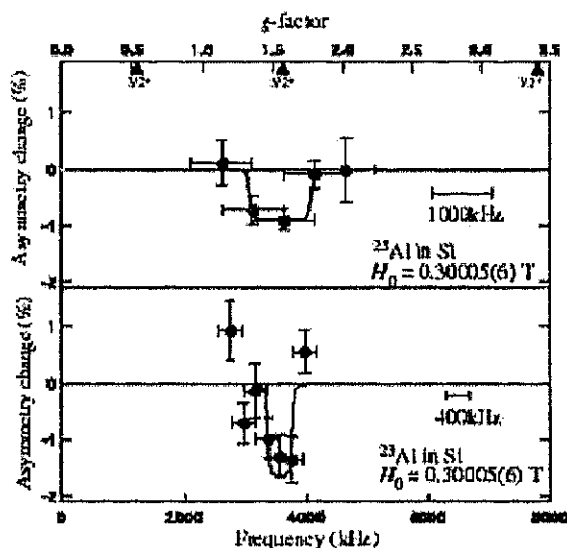


図 2: ^{23}Al の NMR スペクトル

(5) クーロン障壁以下のエネルギーでの $^{118}\text{Sn}(d,p)$ 反応

クーロン障壁よりも十分に低い運動エネルギーの重陽子を用いた際に起こる (d, p) 反応の反応機構を問題としている。クーロン分解過程を経由する 2 次の摂動過程が、どの程度核力による 1 次の摂動過程と競合するかを問題とするという事である。この場合、重陽子内の中性子が標的に軌道角運動

量を持ち込まないと考えられるので、終核の中性子状態として $s_{1/2}$ が基底状態となる標的を選択するのが望ましいと考えて、 ^{118}Sn を標的とした。因みに、スズのクーロン障壁エネルギーは 1.2 MeV 弱と計算される。

低エネルギーでは強度の強い重陽子弾性散乱と非常に弱い (d,p) 反応に起因する陽子を識別して計数する必要がある。この標的に対する (d,p) 反応の Q 値は約 4.26 MeV の発熱反応であるから、陽子のエネルギーが重陽子よりも大きいと言う特徴を利用して、2枚の半導体放射線検出器を組み合わせ両者を識別し、微分断面積のエネルギー依存性を測定した。この場合、計数率の上限が実験効率を決定し、重陽子強度を上げられないという欠点がある。エネルギー範囲は、4.5-7 MeV とした。

標的は、95.75% の ^{118}Sn を含む、厚さ $4.8\text{mg}/\text{cm}^2$ のスズ箔を用いた。得られた微分断面積の角度積分値のエネルギー依存性を、 $L=0$ クーロン波を用いたエネルギー依存性と DWBA 計算でのエネルギー依存性とを比較し、図 3 に示す。

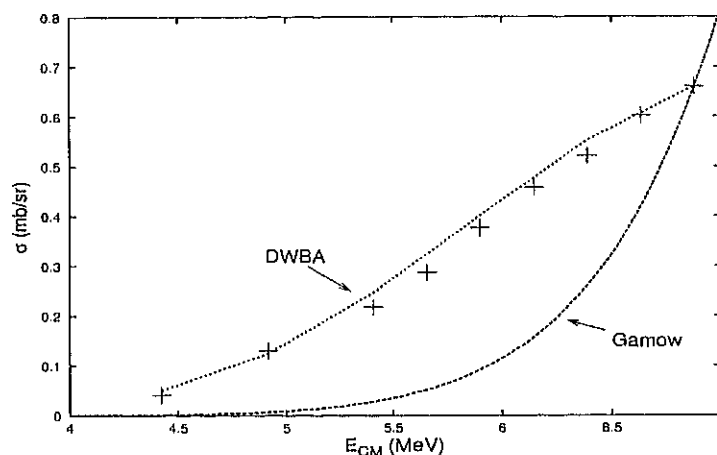


図 3: $^{118}\text{Sn}(d,p)$ 反応断面積のエネルギー依存性。十字印は実験値、DWBA と書いたのは DWBA 計算によるエネルギー依存性。Gamow と書いたのはトンネル効果だけを考慮したものである。

これまでのエネルギーでは、核力の 1 次の摂動で説明出来る。これ以下のエネルギーではどうなるかを来年度は調べたい。この場合、重陽子ビーム強度を増やす事が出来ないのも、弾性散乱重陽子を排除する必要がある。更に、標的を薄くする必要もあるので、新しい実験手段を用いる必要がある。この準備を始めた。

(6) 陽子全反応断面積のエネルギー依存性測定

α 粒子で構成されるような原子核における (p,n) 反応の Q 値は約 1.5 MeV と近隣の原子核のそれとはかなり大きく異なっている。その結果、陽子全反応断面積に対してチャンネルが閉じているか、開いているかで有意なエネルギー依存性を示すと予想した。珪素を標的とする場合には予想通りであったが、実験例を増やす為に、炭素を標的として測定する事にした。この炭素標的の場合には、重心系での (p,n) 反応 Q 値は 18.12 MeV であり、実験室系では 19.63 MeV となる。

昨年度は測定系の整備に力を注いだ。その結果、標的の厚さをある程度確保すると、おおよその全反応断面積が測定出来るようになった。以下の図 4 に他の測定との比較の為に、現在の測定値を例示する。

現在の実験値では誤差が大きいですが、この原因は主に加速器からのビームの安定性に起因するもので

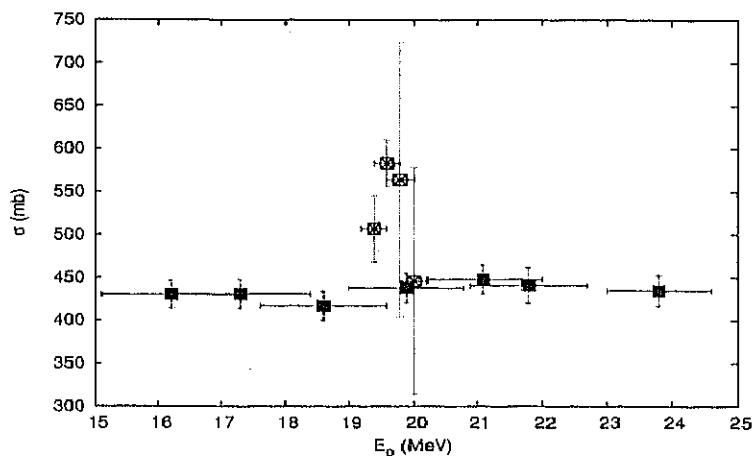


図 4: ^{nat}C 標的に対する陽子全反応断面積のエネルギー依存性。白抜き印の細線は現在の測定結果。黒塗りつぶし印は、論文 [5] より引用した。

ある事が判明している。引用した論文では、エネルギーの誤差に幅がありすぎるが、これは非常に厚い標的を利用した為であると想像される。

(7) 重イオン用プログラム開発

^8Li 加速の可能性を想定して、重イオン核反応の研究を開始する機運が盛り上がって来たように思うので、重イオン用の CDCC プログラム *hetac* を開発した。利用する側面から考えると、理論形式は古いものを踏襲するのが良いと考えて河合達九州大学の理論グループの集大成の論文に出来るだけ忠実に従った。但し、当面はスピン・軌道力の部分は、簡単に拡張出来る様にしつつ、無視しておいた。更に、これまでは FORTRAN77 を用いていたが、記憶域管理の容易さを考慮して、FORTRAN90 の記憶管理機能を利用した。

これまでに開発した軽イオン用 CDCC プログラム *ctak* と機能的に異なるのは、1) 角運動量の上限を広げる事、2) クーロン波動関数の利用可能パラメータ範囲を広げる事、3) 相互作用行列要素と結合方程式の積分に於いて、計算機で利用可能な上限まで、記憶域を使用出来るようする事などである。

もう少し詳しく述べると、1) ではこれまでは Racah の式を用いて明示的な表現を用いて計算していた幾何学的因子を全て漸化式の利用に置き換えた。これにより、階乗計算を排除し角運動量の上限をこれまでの 500 から 50000 又はそれ以上に広げた。この手法により、実質的な意味で原子核物理に登場する 3-j, 6-j, 9-j 係数の計算に上限は無くなったと了解しても良いだろう。

2) に付いては、これまでは漸近展開法を利用する Perey のアルゴリズムを利用するが多かったが、これでは (η, ρ) 平面で上限が 10 程度に押えられていた。漸近展開の収束性に関する問題があったためである。そこで、漸化式を連分数展開に持ち込む手法を採用した。連分数展開では、漸化式が発散する時に収束するという形式に持ち込む事が出来るから、利用可能範囲を非常に広げる事が出来る。 $\eta = 1000$ といった場合にも利用可能な副プログラムが出来た。

3) は色々な意味あいがある。相互作用の行列要素の多重極展開を精度を保ちつつ高速に行う事。2次元表現での内挿を取り入れる事で、記憶域を節約する事。等が行列要素の計算に工夫されている。大次元の二階連立微分方程式を解く必要がある。この場合も、高速性と記憶域の確保が大切であ

る。更に、関係する解の数値が非常に広い数値範囲にわたる為の対策をする必要がある。特にクーロン力による分解過程を取り入れると、脅威的な範囲の数値を取り扱う事になるから、このための手当も必要である。

これらの事を考慮しゼロからプログラムを書いた。使用経験を得るために、30–40 MeV $^{208}\text{Pb}+^8\text{Li}$ 弾性散乱の計算をした。

11月末に行った研究会でこの hctak の開発の利用に関する報告をした。この報告の中身は、「原子核研究」において報告したので、そちらを参照されたい。

なお、プログラムそのものは、以下のホームページで公開している。

<http://www.tac.tsukuba.ac.jp/yaoki>

参考文献

- [1] M. Yamaguchi, Y. Yoshimaru and Y. Tagishi, UTTAC annual report 2003 (2004) 17
- [2] ‘ Executive summary ’ IAC meeting Nov. 18-20, 2004, RIKEN, Wako, Japan.
- [3] K.Yamada et al., Nucl. Phys. A 746 (2004) 156c.
- [4] M.Keim et al., Nucl. Phys. A 586 (1995) 219.
- [5] T.J.Gooding *et al.*, Nucl. Phys. **12**, 241(1959)

【2】低エネルギー原子核実験グループ2 (青木孝義、新井一郎、小松原哲郎、笹 公和)

(1) スパッター型負重イオン源を用いた放射性同位元素の打ち込み方法の開発 (高エネルギー加速器機構 吉川宣治氏 共同研究)

放射性同位元素 (R I) を物質内に埋め込んで行うさまざまな研究がある。この場合まず、R I を研究対象の物質中に埋め込み可能か否かがまず問題である。R I を研究対象物質内部に組み入れる手段は現実にはかぎられている。物質が金属等であれば、R I と物質を高温加熱する事による熱拡散方法でR I 化した資料は得られるが、金属以外の物質では、熱分解で変化してしまう事が多い。R I 元素との化合物が研究対象であれば、R I と化学合成をすれば良い。しかし、その様な物質は数が非常に少ない。現状では研究対象にする事のできる物質の数には限度がある。これを打開するために、R I をイオン化して加速し、任意の研究対象物質に打ち込事が考えられる。これが手軽にできるになれば、物性研究のための摂動角度相関研究、R I の医療手術における利用研究、環境物質による原子核の崩壊モードの影響研究等 [1]、さまざまな基礎研究が盛んになると予想できる。この技術の開発は重要であろう。この目的の為にタンデム加速器を用いた。イオン源部品のカソード装置の先端にターゲット物質をつけ、これを加速器ビームで照射して、目的のR I を作った後、カソード装置全体を重イオン源 (アイソトープ部門) に装着できれば、手軽であり放射線被曝を避ける事ができる。事前に ^{32}P 、 ^{125}I 、 ^{197}Pt 等のR I を購入して予備実験をした。カソードに中心孔を穿ちR I を詰めた後、イオン源に装着しR I ビームを引き出した。カソードの形状、中心孔の寸法 ($1\Phi \times 2\text{mm}$)、伝導物質の選択等の最適値を求めた。その結果、R I 収率 (イオン源からビームとして取り出したR I の量に対するイオン源に装着したR I 量の比) として、7%~15%がこれらのR I に対して得られた。これらを参考にして、加速器ビーム照射用のカソードに $2\Phi \times 4\text{mm}$ の穴を空け、ターゲット物質のAgの酸化物を詰めた。アルファ粒子で照射し、 ^{111}In を作った。これは摂動角度相関実験で良く用いられているが、多くの実験の解析結果は一致を見る事が少ない。この原因はこのR I がEC崩壊する為に、娘核が高電離状態になる為であると予想している。この問題に迫る為に ^{111}In を今回選んだ。

タンデム加速器からの 20MeV のアルファ加速粒子をもちい、 $^{109}\text{Ag}(\alpha, 2n)^{111}\text{In}$ 反応で作った。照射時間は5時間、ビーム強度は 100nA であった。12時間の冷却後、イオン源にカソード装置を設置して、酸化インジウム分子イオンを取り出して、アルミニウム板に打ち込んだ。直後にイオン源のセシウム量の制御が不安定になり、正常運転が不可能になった。結果として打ち込みR I 効率は0.2%以下であった。通常得られる効率の100分の1以下であった。イオン源を整備し再実験を試みる。

(2) Ni_{13} クラスタと酸素原子の反応

最近、 Ni_{13} クラスタの酸化反応の最終生成物が Ni_{13}O_8 であることがわかった。この理解を深めるために Ni_{13} と酸素原子の分子動力学シミュレーションを実行した。シミュレーションでは150Kと170Kにおいて Ni_{13}O_n に酸素原子が付着し、 $\text{Ni}_{13}\text{O}_{n+1}$ になる現象を追跡した。そして酸素原子のエネルギープロファイルからクラスタの安定性を調べた。この計算においてペルレの差分法を用いた。時間ステップ幅は2fsで、4nsまで実行した。n個の遷移金属原子間の相互作用ポテンシャルにはグプタポテンシャル

$$V(r_{ij}) = \sum \left[\epsilon_0 \sum_{i \neq j} e^{-p \left(\frac{r_{ij}}{r_{0n}} - 1 \right)} - \sqrt{\xi^2 \sum_{i \neq j} e^{-2q \left(\frac{r_{ij}}{r_{0n}} - 1 \right)}} \right] \quad (1)$$

が用いられた。 r_{0n} 、 p 、 q 、 ϵ_0 、 ξ は物質に依存するパラメータである。ニッケルの場合は $r_{0n}=2.5$ Å、 $p=16.999$ 、 $q=1.189$ 、 $\epsilon_0=0.0376$ eV、 $\xi=1.070$ eV である。他の相互作用ポテンシャルにはレナードジョーンズポテンシャル

$$V = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (2)$$

が用いられた。 ϵ と σ は物質に依存するパラメータである。酸素原子同士の相互作用では $\epsilon=5.63 \times 10^{-3}$ eV、 $\sigma=3.0$ Å である。ニッケル原子同士の相互作用では 2 個のニッケル原子間のグプタポテンシャルのエネルギー最小値とその距離から等価レナードジョーンズポテンシャルのパラメータを決め、 $\epsilon=0.95$ eV、 $\sigma=2.25$ Å とした。ニッケル原子-酸素原子間の相互作用では、Lorentz-Berthlot 混合則から、 $\epsilon=0.073$ eV、 $\sigma=2.725$ Å とした。

150K ではニッケルクラスターの表面に酸素原子が付着し、10 個以上つくことがわかった。図 1 は 150K での Ni_{13}O_8 の幾何学的形状である。170K では 8 個まで付着可能であった。図 2 は 170K での Ni_{13}O_8 の幾何学的形状である。170K では、これが最終生成物であった。

図 3、4 はそれぞれ 150K と 170K における Ni_{13}O_8 中の酸素原子のエネルギープロファイルである。エネルギープロファイルは、各ステップ毎に酸素原子の束縛エネルギーをチェックし、とりうるエネルギー状態の相対頻度を示したものである。150K では最大値が -0.5×10^{-2} eV の束縛エネルギー帯域にあるが、170K ではこの最大値が 0eV に達している。この場合酸素原子は、ある程度の時間経過の後に束縛エネルギーが 0eV の配置に遭遇して系から離脱すると考えられる。したがって、170K では酸素原子は Ni_{13}O_8 にそれ以上付着しなくなる。つまり、 Ni_{13}O_8 が最終生成物となる。

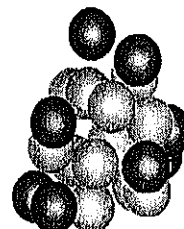
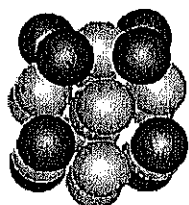


図 1: A geometrical shape of Ni_{13}O_8 cluster at 150K(Oxygen:black, Nickel:gray)

図 2: A geometrical shape of Ni_{13}O_8 cluster at 170K(Oxygen:black, Nickel:gray)

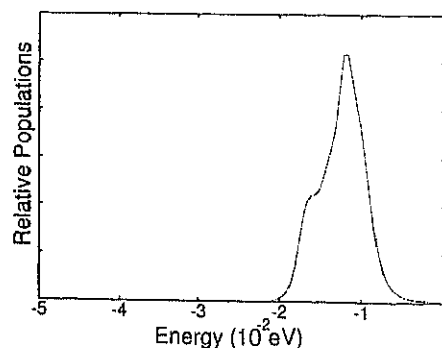
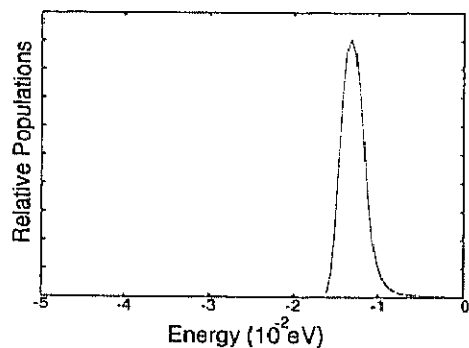


図 3: Binding energy profile of oxygen atoms in Ni_{13}O_8 cluster at 150K.

図 4: Binding energy profile of oxygen atoms in Ni_{13}O_8 cluster at 170K.

(3) マグネトロン・スパッター型ガス凝集クラスター源で生成される中性金属クラスターのサイズ分布

従来のもののおよそ半分の大きさを持つマグネトロン・スパッター型ガス凝集クラスター源を開発した。従来の装置では、サイズが50までの金属クラスター陽イオンが測定されている。実験セットアップの制約から、これまで中性金属クラスターの測定は行われていない。一方、ガス凝集によるクラスター生成機構を理解するためには、中性クラスターの測定が是非とも必要である。現在、新たに開発したガス凝集クラスター源で生成される中性クラスターを測定している。ターゲットにはAlとCuを用いている。ガス凝集クラスター源からの中性クラスターに波長266 nmのNd:YAGレーザーを照射してイオン化する。測定にはWiley-McLaren型の飛行時間質量分析器を用いる。生成されたクラスター陽イオンは3 kVの引き出し電場で加速され、電場のないドリフト領域へと導かれる。ドリフト領域の終端で、マイクロ・チャンネル・プレート検出器によって検出される。ドリフト領域での飛行時間はパーソナル・コンピュータに接続したマルチ・ストップTDC (Time-to-Digital Converter) で計測し、最終的には質量電荷比スペクトルへと変換される。これまでの試験実験では、サイズ4までのAlクラスター (図5参照) とサイズ17までのCuクラスター (図6参照) が確認されている。

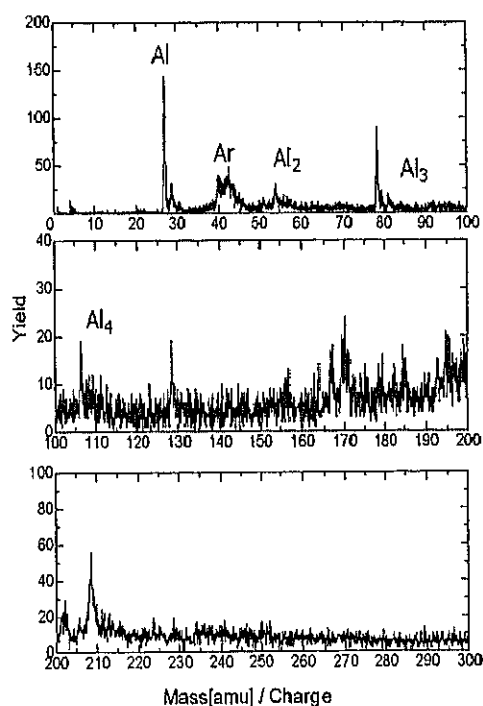


図 5: Al クラスターの質量電荷比スペクトル

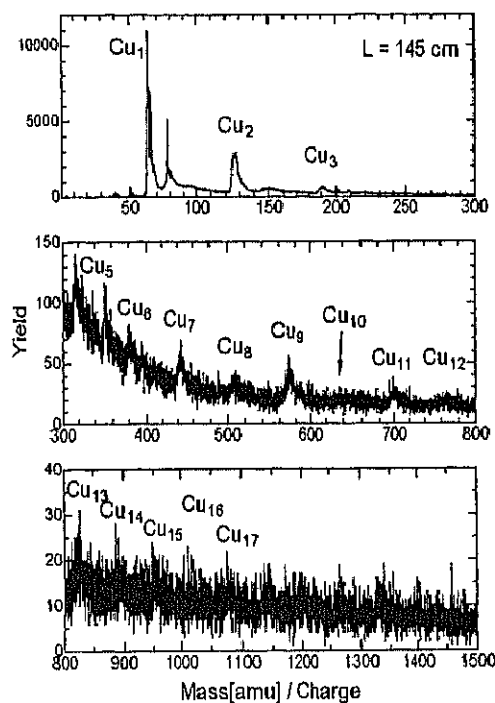


図 6: Cu クラスターの質量電荷比スペクトル

(4) 金属クラスターイオンビームのパルス引き出し

本研究の目的はマグネトロンスパッター型クラスター源からクラスターイオンをパルスの引き出し加速する装置を開発する事にある。装置はマグネトロンスパッター型クラスター源とパルス加速部

とからなる。マグネトロンスパッター型クラスター源では、マグネトロンで試料をスパッターして単量体原子を生成し、搬送ガス (Ar、He) に載せてそれらを移動させ、ガス凝集セル部で凝集させて中性クラスターを形成する。中性クラスターは、励起 He 原子からの光子によってイオン化される。パルス加速部では、クラスターイオンをパルスのに加速する。具体的には、緩やかな正の電場勾配を形成してクラスターイオンを捕捉している電極群の中央電極の電圧を、パルススイッチを用いて一定時間だけ高くし、その結果生成される大きな負の電場勾配によってクラスター正イオンを前方に加速する。クラスターイオンは必ずしも同じエネルギーに加速されないが、各電極にかけるバイアス電圧を調整することによりエネルギーのばらつきを減少させて最適化した。パルス加速には、電圧 1kV、幅 $2\mu\text{s}$ 、繰り返し間隔 1 ms の高電圧パルスを使った。現在、ファラデーカップを使ってパルス加速がなされていることを確認したところである。

(5)DSMC 法によるマグネトロン・スパッター型ガス凝集クラスター源のシミュレーション

新型のマグネトロン・スパッター型ガス凝集クラスター源を開発している。装置は2つの部分（マグネトロン・スパッター部とガス凝集セル部）から構成される。マグネトロン・スパッター部では、イオン化された Ar 原子がマグネトロンの陰極にマウントされたターゲット金属表面をスパッターし、多量のモノマー原子を放出する。それらは、搬送ガスへ混合され、ガス凝集セルへと運ばれる。搬送ガスは Ar と He の混合ガスである。ガス凝集セルは液体窒素温度に冷却されていて、そこではモノマー原子が凝集してクラスターを形成する。さらに、搬送ガス中の励起 He 原子の放出する光子によってクラスターがイオン化される。ガス凝集セルのクラスター成長は（1）クラスター成長領域の長さ、（2）搬送ガスの圧力・温度・流れなどの制御パラメータによって制御されると考えられる。これらのパラメータを最適化することによって、クラスター源のパフォーマンスは飛躍的に向上すると期待される。クラスター源を十分に理解するには、ガス凝集セル中の現実のガスの流れを考察することが不可欠である。現実のガスの流れをできるだけ精密にシミュレーションするため、DSMC (Direct Simulation Monte Carlo Method) を採用した。これまでに、（1）ガス凝集セル中の搬送ガスの流れはセル出口付近のオリフィスの口径に大変敏感である、（2）モノマー原子のセル中の平均滞在時間がクラスターの成長速度に大きく影響する、（3）平均残留時間は前述の制御パラメータによって決定される、などの結果が得られている。図7と図8は、それぞれ、オリフィス径 1.5mm のときのモノマー原子がセル中の特定位置へ到着するまでの時間の平均値と分散を示している。これらから、スパッターされたモノマー原子はクラスター成長領域の長さ 4 cm のところで熱化され、搬送ガスとともに流れ、拡散してゆくことがわかる。

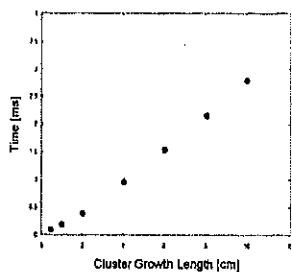


図 7: モノマー原子到着時間の平均値

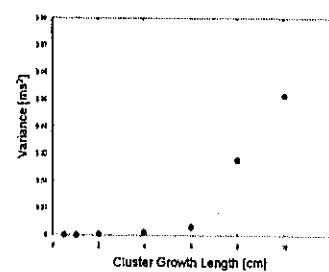


図 8: モノマー原子到着時間の分散

(6) 金と Lennard-Jones 原子混合クラスターの分子動力学計算

金クラスターと LJ 原子 (Lennard-Jones ポテンシャルに従う原子) のクラスターについて、ポテンシャルの深さ (ϵ_{LJ}) と温度 (T) を変えて反応させる分子動力学計算を行い、混合クラスターの形態変化を調べた。有効ポテンシャルは物質によって決まるので、物質の組み合わせにより、クラスター構造をどのように制御し得るかの予想を与えられると期待される。

有効ポテンシャルについては、Au 原子-Au 原子間には Gupta ポテンシャル、LJ 原子-LJ 原子間には Lennard-Jones ポテンシャルを用いた。Au 原子-LJ 原子間には Lennard-Jones ポテンシャルを用い、ポテンシャルの深さとボンド長には、Lorentz-Berthelot 混合則を適用した、混合クラスターの生成方法としては、始めに Au 原子クラスターと LJ 原子クラスターをそれぞれ作り、二つのクラスターを一定の距離 (2.0Å) まで近づけた上で反応させた。Au 原子クラスターは面心立方格子の構造をとるので、最もサイズが小さく対称性のよいものとして、Au₆ クラスターと Au₁₅ クラスターを選んだ。LJ 原子については、LJ₈ クラスターを用いた。MD 計算においては、Verlet 法を用いて各原子の位置と速度を追跡した。時間ステップは 0.25 [fs] とし、時刻 0~1[ps] にわたって計算を行った。

ポテンシャルの深さ ϵ_{LJ} を小さい値 (0.0032[eV]) から大きな値 (32[eV]) まで変化させたところ、形態は以下に示す様に大きく分けて三つの状態、すはわち、(1) 一方の原子が他方のクラスター表面に付着する (コア-シェル状態)、(2) Au 原子と LJ 原子が混ざり合う (混合状態)、(3) それぞれが固まって二つの集団に分かれる (分離状態)、を示した。温度に関しては、T = 100[K], 300[K], 500[K] について計算した。 ϵ_{LJ} が小さいと、反応後の形態に温度依存性が見られた。 ϵ_{LJ} が大きいと、温度依存性は見られなかった。以下に例として、T=100[K] で ϵ_{LJ} を変化させたときの Au₁₅LJ₈ の形態を載せる。(濃淡の薄いほうが Au 原子)

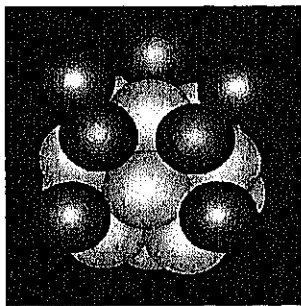


図 9: $\epsilon_{LJ} = 0.0032[eV]$

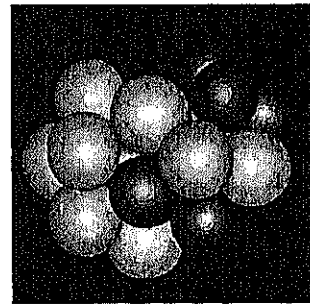


図 10: $\epsilon_{LJ} = 0.16[eV]$

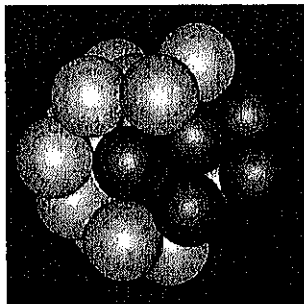


図 11: $\epsilon_{LJ} = 1.6[eV]$

(7) 高温状態での金クラスター陽イオンとシランの反応

小さなサイズのクラスターは熱心に研究されていて、特に金クラスターはバルク時と比べて様々な特徴で大きく異なるため、強い関心がよせられている。また、電子デバイスや他のナノスケール物質にとって将来有望な構成単位となる事が期待されている。我々のグループはこれまでに室温 (300K) での遷移金属クラスター陽イオン (V, Nb, Ta, W, Au) とシランガス SiH_4 との反応研究をおこなってきた。今回は金クラスター陽イオンと SiH_4 の高温状態での反応を研究した。実験装置は主にクラスター源と FT-ICR/MS(フーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴質量分析器) からなる。金クラスター陽イオン, Au_n^+ ($n=1-9$), はレーザー蒸発法により生成した。そしてクラスターイオンを FT-ICR へ輸送し、温度 493K に設定したセル中に磁場と電場によってトラップした。Ar ガス衝突による熱平衡後、圧力 1×10^{-8} Torr の SiH_4 と Au_n^+ を反応時間 0.1s-15s にわたって反応させ質量スペクトルを観測した。そして、 Au_n^+ ($n=1-9$), Au_nSi^+ ($n=1-9$), $Au_nSiH_2^+$ ($n=1-3$) と SiH_4 との反応速度定数 k_1, k_2, k_3 をもとめた。主な反応過程は以下の通りであった。

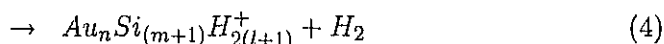
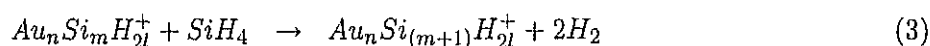


図 12 は高温 (493K) と室温 (300K) で求めた反応速度定数を示してある。それをみると高温、室温での反応速度定数はほとんど変わらない事がわかる。クラスターは一般的にバルクより融点が低いといわれていて、シミュレーションでは特に融点が $\sim 280-320$ K になるものが存在すると報告されている。しかし今回の実験結果は、金クラスターと金-シリコンクラスターは温度領域 300K \sim 493K では転移温度が存在せず、相転移のような大きな構造変化がこの温度領域では起こらないという事を示唆している。また Au_n^+ と SiH_4 との反応 (k_1) が Langevin モデル (温度依存しない、 $k \sim 1 \times 10^{-9}$) で説明できる一方、 Au_nSi^+ ($n=2-5$), $Au_nSiH_2^+$ と SiH_4 との反応 (k_2, k_3) はこのモデルから大きく外れていることがわかる。反応速度定数は Arrhenius の式に従う温度依存性を示すことが経験的に知られている。それによると、493K の方が ~ 15 倍程度大きくなるはずだが、今回 $n=2-5$ ではそこまでの違いがみられなかった。このことは、 Au_nSi^+ ($n=2-5$), $Au_nSiH_2^+$ と SiH_4 との反応が従来考えられていた反応機構とは違うものであることを示唆している。

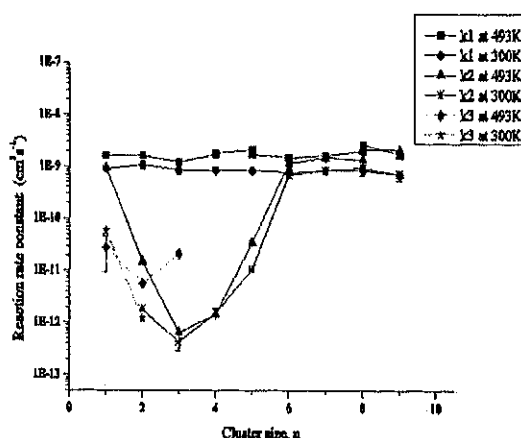


図 12: 高温 (493K) と室温 (300K) での Au_n^+ ($n=1-9$), Au_nSi^+ ($n=1-9$), $Au_nSiH_2^+$ ($n=1-3$) と SiH_4 との反応速度定数 k_1, k_2, k_3

(8) 陽子弾性散乱同時計数法による鉱物試料の水素分析

陽子ビームを用いた弾性散乱同時計数法（ERCS法）による鉱物試料中水素分析法の開発が進行中である。実験は研究基盤総合センター応用加速器部門の12UDペレトロンタンデム型静電加速器による20MeV陽子ビームを用いて行われている。我々が主に分析する鉱物試料は、火山噴火に由来する噴出物内に見出される大きさ百マイクロメートル程度のガラス包有物である。これは、ホスト鉱物がマグマ中で結晶成長する際に周囲のマグマを取り込んだものであり、地底深部で融解しているマグマの一部が閉じ込められた状態で地上にもたらされたと考えられている。

本年度は検出器系、測定系を改良しスペクトルの質の向上を図った。大面積の荷電粒子検出器を導入し、検出器の立体角が約2倍になった。また、バックグラウンドの根源を追求し、その減少を図った。測定スペクトルのバックグラウンドには以下の原因が考えられる。1) 照射ビームエネルギーの分散、2) 検出器前面のスリットによるエッジ散乱、3) 検出器前面の遮光用Alフォイルによる散乱、4) 検出器の不感領域境界付近からの信号、5) チャンスコインシデンス、6) パイラップである。これらのうち、エッジ散乱はスリットのエッジを丸く鏡面状態に加工した結果、半減した。また、スリットと検出器の幾何学的な配置を良く合わせた結果、有感領域と不感領域の境界に粒子が入射しない様に工夫した。さらに電気回路系を整備し、パイラップリジェクター信号を導入した。また同時計数の時間分解能を向上させて、チャンスコインシデンスを減少させた。図13は2.5 μm のマイラー箔にビームを照射して得られたサムエネルギースペクトルである。全カウント数に対するピーク面積の比率は非常に良く93%を達成した。

ERCS法で得られたサムエネルギースペクトルを水素濃度に変換する際、新たに阻止能の情報を考慮した解析手法を見出した。この手法はエネルギースペクトルの横軸を mg/cm^2 単位の厚みに変換する。また、スペクトルの高さは水素濃度を表し、質量比として表示される。測定値を評価する際、水素濃度の質量比が非常に重要であるが、新たに開発した解析手法ではこの質量比がスペクトルから直読でき画期的である。もし、この手法を用いない場合、まず濃度から全水素量を見積もり、そして、顕微鏡の観察から大きさを求め、さらに密度を仮定して算出する事になる。計算の過程で、電子阻止能が成分に依存しない事を仮定しているが、ホスト鉱物とガラス包有物はどちらも主成分が SiO_2 であり、電子阻止能はほぼ同じである為、非常に都合が良い。また、通常、ホスト鉱物とガラス包有物は密度が異なるが、この解析法では密度が異なる場合にも適用可能である。さらに、副産物として、包有物の大きさや密度、また3次元的な形状を推定する事も可能である。

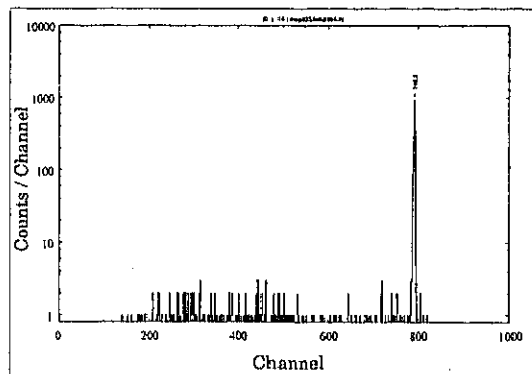


図 13: 厚さ 2.5 μm のマイラー箔による ERCS のスペクトル。

(9) 高精度加速器質量分析法 (AMS) の開発

12UD ペルトロンタンデム加速器による ^{26}Al , ^{36}Cl 等の加速器質量分析 (AMS) 測定を行っている。 ^{36}Cl -AMS 測定での実用限界は $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}=3 \sim 4 \times 10^{-14}$ であり、標準試料 $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl} \sim 10^{-12}$ に対して 3% の測定精度を得ている。また ^{26}Al -AMS では、 $^{26}\text{AlO}^-$ と同時に妨害元素からなる $^{26}\text{MgO}^-$ をパイロットビームとして加速し、最終的に第 2 荷電変換炭素薄膜で $^{26}\text{Al}^{13+}$ に変換する完全電離法により ^{26}Mg の妨害を完全に除去し、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} < 5 \times 10^{-15}$ の高感度測定を実現している。測定系では、 ΔE -E 検出器について改良を行った。ガス検出器部を 2 連電極型として、各電極板位置での ΔE 値に対してゲートを掛けて、2 次元計測データにおける ^{36}S テール部分の ^{36}Cl 計測データへの影響を排除している。また測定粒子の入射窓を、 $7.5 \mu\text{m}$ の Kapton film から $4 \mu\text{m}$ の Aramid film に変更した。これらの改良の結果、2 次元計測データ上で、以前よりも明確に ^{36}Cl と妨害元素の ^{36}S の分離ができるようになった。図 14 に $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}=5.9 \times 10^{-11}$ の標準試料について、3 分間計測での ^{36}Cl の ΔE -E 測定結果を示す。

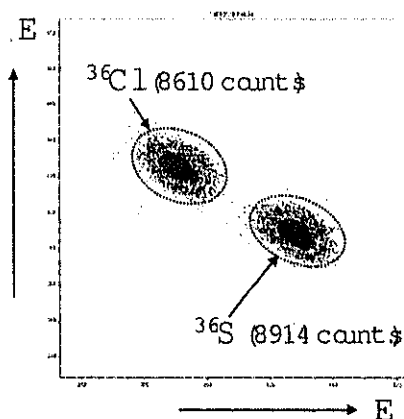


図 14: 改良した ΔE -E 検出器で 3 分間測定された $^{36}\text{Cl}^{9+}$ (90MeV) の 2 次元計測マップ (標準試料 $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}=5.9 \times 10^{-11}$).

(10) 加速器質量分析法 (AMS) による熱中性子積算線量評価法 (KEK 共同研究)

現在、原子炉施設のクリアランスレベルが議論されているが、 ^{36}Cl 濃度については、 2 Bq/g が想定されている。原子炉や加速器施設解体・改造時には、その廃棄物が多量に産出される。放射線安全管理上の観点から、コンクリート中に生成される ^{36}Cl 濃度の絶対量評価及び熱中性子の積算照射量の指標として、AMS による ^{36}Cl 測定が有効であるかを確認した。

測定例として、大阪大学核物理研究センター (RCNP) の AVF サイクロトロン の遮蔽壁コンクリート中の $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 比から見積った熱中性子束を示す (図 15)。AVF サイクロトロンは 1976 年から稼動しており、陽子を 65 MeV まで加速可能である。熱中性子束は、 ^{60}Co , ^{152}Eu の放射能濃度から求めた値とほぼ一致することがわかる。この結果から、AMS により求めた $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 比が、加速器運転開始から現在までの期間に、遮蔽壁コンクリートが受けた積算の熱中性子総数の評価に利用できることが示せた [2]。

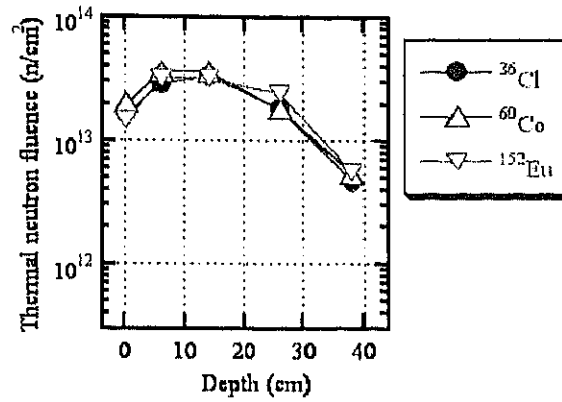


図 15: AVF サイクロトロンの $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 比及び ^{60}Co , ^{152}Eu の放射能濃度から見積った熱中性子束分布.

(11) 高速重イオンの荷電平衡到達厚さ (理工工学系共同研究)

高速重イオンが物質中で荷電平衡状態に到達する厚さは、加速器技術や原子核実験技術の分野において重要である。しかしながら重イオンと標的物質との衝突過程における荷電状態が、非平衡状態から平衡状態へと到達するのに必要な物質厚さを評価する手法は確立されていない。本研究では、入射重イオンの原子番号 Z_1 と炭素薄膜中で荷電状態が非平衡から平衡に到達する厚さ T_{eq} [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] を実験的に確かめた。原子番号 $Z_1=1$ から 53 のイオンに対して、入射イオンのエネルギー範囲 0.5 から数 MeV/u で実験をおこなった。図 16 に Z_1 の関数として、1, 2 及び 6 MeV/u での T_{eq} を表示した。図 16 から荷電変換の為の入射重イオン原子番号と炭素薄膜の膜厚 T_{eq} について、殻構造に基づく系統的な傾向が見出された。

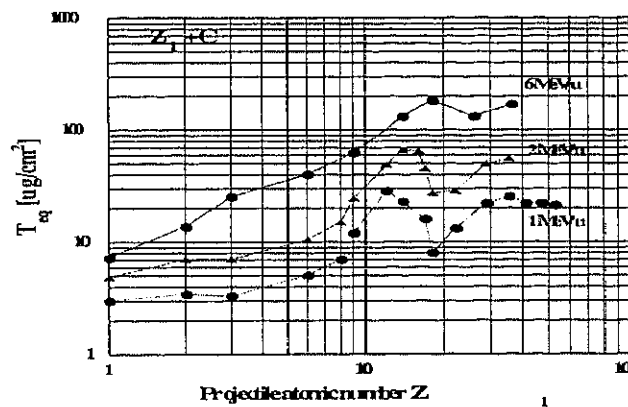


図 16: Charge equilibrium thickness T_{eq} of various ions with atomic number Z_1 passing through a carbon foil at projectile energies of 1, 2 and 6 MeV/u.

(12) 多価クラスターイオンの MeV エネルギー加速

1 MV タンデトロン加速器で、原子クラスターを MeV エネルギー領域まで加速している。荷電交換ガス通過後の高速原子クラスター分裂片を磁気分析器で測定したところ、多価クラスターイオンの生成を確認した。表 1 に現在までに確認した、MeV エネルギー加速された多価クラスターイオンを示す。

表 1: List of accelerated multi charged cluster ions obtained from the 1MV Tandetron accelerator.

Accelerated multi charged cluster ions	Beam energy [MeV]	Beam current [pA]	Injected cluster ion species	Injected beam current [nA]	Terminal voltage [MV]
C_3^{2+}	1.07	3.4	C_3^-	450	0.35
C_5^{2+}	2.03	3.2	C_6^-	400	0.71
C_7^{2+}	2.51	0.4	C_7^-	32	0.83
Al_2^{3+}	0.94	10	Al_2^-	1700	0.23
Al_3^{2+}	1.07	45	Al_3^-	330	0.35

(13) クラスター誘起による 2 次電子のエネルギー分布 (物理工学系共同研究)

高速クラスターイオン (数 MeV/atom) を物質表面に照射したとき放出される 2 次電子のエネルギースペクトルを 180° 方向で測定した。図 17 は 0.36 MeV/atom の C_n^+ ($n=1, 3, 5$) を HOPG に照射した場合の 1 原子あたりの 2 次電子スペクトルである。このスペクトルから低エネルギー側においてクラスターサイズ n が大きいほど 2 次電子収量が減少している。このスペクトルを積分することにより 180° 方向に散乱された 2 次電子の総収量を算出し、2 次電子総収量とクラスターサイズ n との関係調べた。2 次電子総収量とクラスターサイズ n とは線形の関係にあった。同様の振る舞いは Al クラスターにもみられ、その傾きはターゲット物質より、むしろ入射原子の種類に依存する傾向がある [3]。

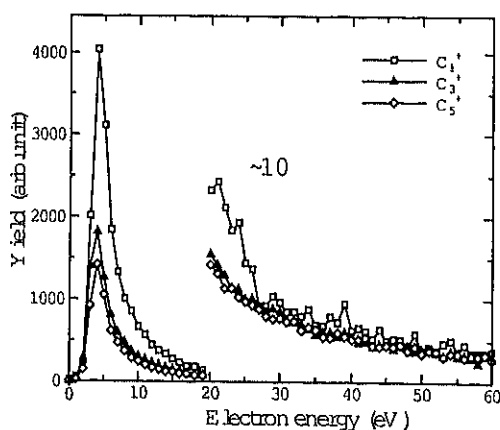


図 17: C_1^+ , C_3^+ , C_5^+ (0.36 MeV/atom) を HOPG に入射したときの 2 次電子エネルギースペクトル

(14) 小型高輝度 2.45GHz-ECR イオン源の開発

永久磁石型 ECR(Electron Cyclotron Resonance) イオン源の開発を進めている。使用するマイクロ波は 2.45GHz である。2 対の Nd-Fe-B 永久磁石で、875 Gauss の ECR 領域磁場を形成する。マイクロ波とサポートガスは径方向から供給する設計となっている。そのため、ビーム軸上流側から試料を ECR プラズマ中へ導入することが可能である。ECR プラズマによるイオントラップ効果の研究用装置として、また不安定核の荷電増倍装置、C₆₀ 多価フラーレンビームの生成及び微量元素分析装置への応用研究を実施している [4]。

参考文献

- [1] T.Aoki and N.Yoshikawa, The 6-th Meeting of Japan CF-Research Society, JCF 6 AB-STRACTS, 16p(2005)
- [2] K. Bessho, H. Matsumura, T. Miura, Q. Wang, K. Masumoto, T. Matsuhiro, Y. Nagashima, R. Seki, T. Takahashi, K. Sasa and K. Sueki, AMS Analysis of ³⁶Cl Induced in Concrete of Accelerator Facilities, Submitted to Radiochimica Acta.
- [3] H. Kudo, S. Tomita, W. Iwazaki, R. Uchiyama, M. Furutani, H. Wakamatsu, T. Shimada, K. Shima, K. Sasa, S. Ishii JAERI: K. Narumi, H. Naramoto, Y. Saitoh, S. Yamamoto, Measurements of energy spectra of cluster-induced electrons, Nucl. Instrum. and Methods B, (accepted for publication).
- [4] K.Sasa, I. Arai, M. kurosawa, T. Nakagawa, Preliminary experiments on laser coupling with an electron cyclotron resonance ion source for trace element analysis, Review of Science Instrument, 75 No.5 (2004) 1928-1930.

【3】 高エネルギー原子核実験 (三明康郎、江角晋一、加藤純雄)

(1) RHIC エネルギーにおける楕円型フロー強度 (v_2) の飽和

高エネルギー重イオン衝突実験において、非中心衝突の際に観測される生成粒子の楕円型フロー (v_2) は、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 生成の有効な証拠の一つとして注目を集めている。それは、粒子放出における楕円型フローが衝突後の非常に初期の様相を反映する測定量である、すなわち、重なり合った原子核の空間的な異方性に起因し、衝突初期の圧力勾配や密度の敏感な観測量であると考えられているからである。したがって、楕円型フローの測定は、未知の存在形態である QGP の性質、特に状態方程式 (密度や圧力) に関して重要な情報を提供するであろうと期待されている。楕円型フローの定量的評価の際には、生成粒子の方位角分布をフーリエ級数展開した式 (1) が良く用いられる。

$$\frac{dN}{d(\phi - \Psi)} \propto 1 + 2v_2 \cos(2(\phi - \Psi)) \quad (1)$$

ここで v_2 は楕円型フローの強度、 ϕ は実験室系における生成粒子の方位角、 Ψ はビーム軸と衝突径数によって決まる反応平面の方位角である。

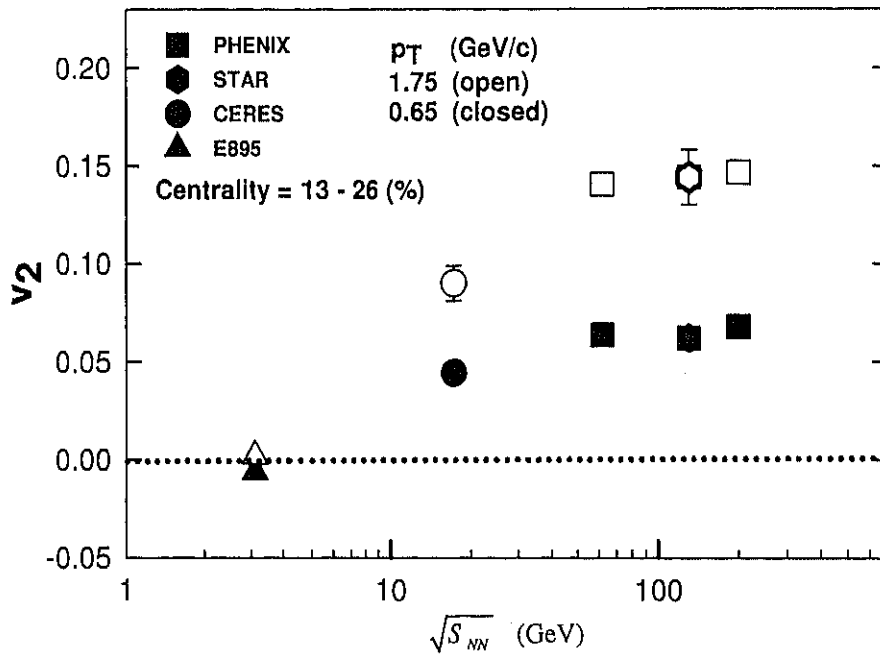


図 1: v_2 の衝突エネルギー依存性

図1は、楕円型フロー強度 (v_2) の衝突エネルギー依存性である。SPS ($\sqrt{s_{NN}} \sim 17$ GeV) と RHIC ($\sqrt{s_{NN}} = 62.4, 130, 200$ GeV) エネルギーを比較すると、RHIC では SPS に比べて約 50% もの v_2 の増加が観測されたことが分かる。ところが、RHIC エネルギー $\sqrt{s_{NN}} = 62.4 - 200$ GeV では、 v_2 はビームエネルギーに依存せず飽和していることが分かった [1]。図 2 は v_2 の反応関与粒子数 (衝突中心度に対応) 依存性 (左図) と横運動量 (p_T) 依存性 (右図) で、AGS から RHIC までのエネルギーで測定された v_2 の比較である。このように、衝突中心度や横運動量の関数で、 v_2 の振る舞いを詳しく調べて

も、RHIC エネルギーではその強度は非常に良く一致しており、エネルギーに依存していないことが明らかとなった。一方、 $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ GeV から 200 GeV の範囲では、衝突の際に達成されるエネルギー密度は約 30% 増加すると見積もられている。流体力学的な描像では、 v_2 は圧力勾配によって発生すると考えられており、圧力勾配は状態方程式を介してエネルギー密度と関係している。したがって、RHIC エネルギーにおける v_2 の飽和は状態方程式の軟化を示唆した結果である。今後 RHIC エネルギーにおける状態方程式にさらなる制約を加えるには、楕円型フローの測定だけではなく、様々なハドロン横運動量分布や同種粒子相関による粒子放出源半径の測定なども進めて行くことが重要である。

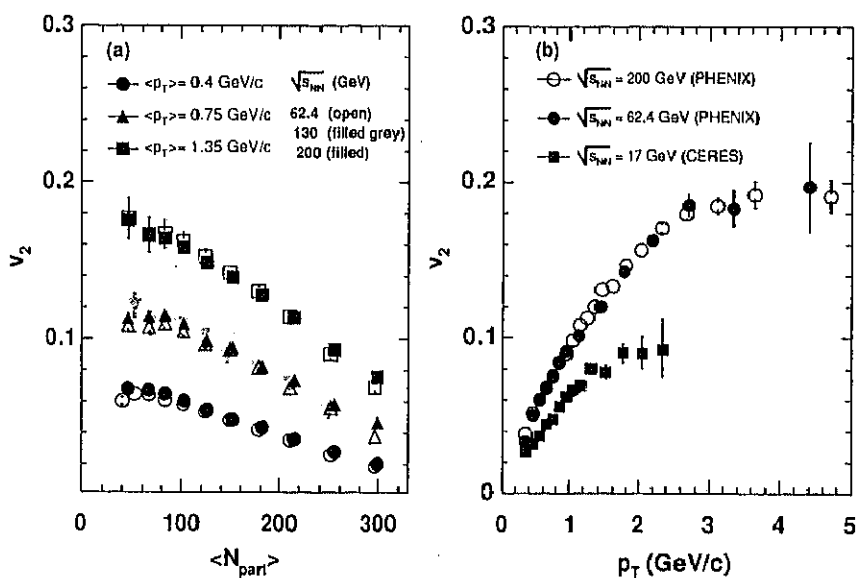


図 2: (左図) 楕円型フロー強度 v_2 の反応関与粒子数依存性 (右図) v_2 の横運動量依存性

(2) チャーム起源の電子の楕円方位角異方性の測定

RHIC-PHENIX 実験における Run1 の電子の解析から横運動量が約 1.0 GeV/c 以上では π^0 や η 起源の電子よりも charm quark 起源の電子の割合が大きくなっていくことが示された [2]。このことから、横運動量の高い領域での電子の方位角異方性は charm quark の方位角異方性を反映していると考えられる。charm quark のような重い quark が方位角異方性を示すということは、衝突初期の非常に早い段階で熱的平衡状態が実現されていることを示唆しており、これは QGP 生成の非常に有力な証拠だと考えられる。Charm quark が熱平衡に達しているかという問題は高エネルギー原子核衝突実験における重要な問題の一つであり、様々な議論が現在展開されているが、その結論には至っていない。また最近の研究から運動量の高い領域で charm quark の生成が抑制されることを示唆する結果が得られている。このような傾向は π 中間子などでも観測されており、衝突により非常に高密度な物質が衝突領域に形成され、その中を粒子が通過する際にエネルギーを失うため生成が抑制されたと考えられている。図:3 は R_{AA} と呼ばれる物理量で、粒子がエネルギー損失をしない場合は 1.0 に、エネルギー損失をする場合はそれよりも小さくなる。粒子放出における方位角異方性は、熱的平衡状態およびエネルギー損失を反映した物理量である。したがって charm quark の方位角異方性の研究は、これらの問題に対して新たな情報を与えてくれる。

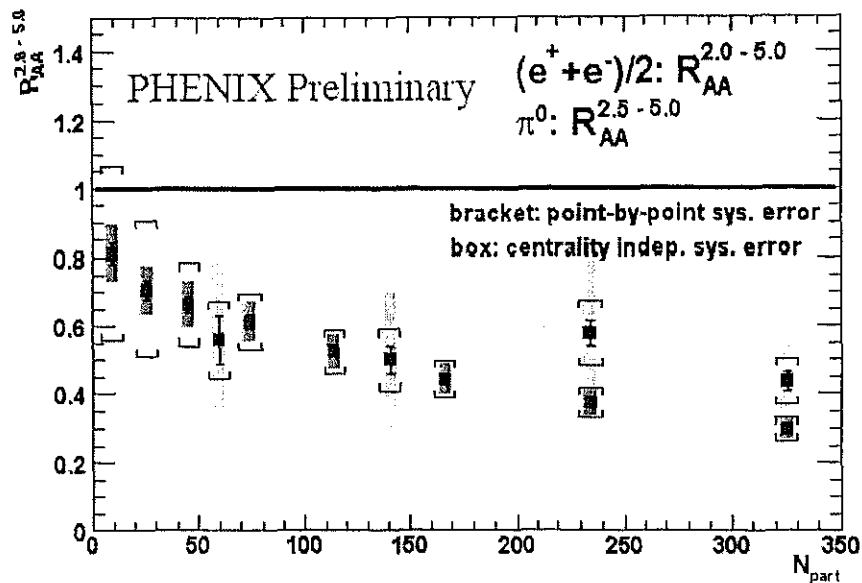


図 3: R_{AA} ($p_T > 2.0$ GeV/c) の centrality 依存性。

本研究では 2001 年 (Run2) に RHIC-PHENIX でおこなわれた核子対当たり 100GeV の金・金衝突のデータをもちい、電子の楕円な広がりをもつ方位角異方性についての解析をおこない、photon conversion やダリッツ崩壊などの charm quark 起源以外の電子の効果を差し引き、charm quark 起源の電子 v_2 (楕円方位角異方性の強度) の見積もりをおこなった。図:4 は charm quark 起源の電子 v_2 の横運動量依存性である [3]。この測定から横運動量が約 1.5GeV/c までで $v_2 \neq 0$ であることが測定された。このように charm quark 起源の電子が 0 でない v_2 をもつためには、親の v_2 、即ち D meson も 0 でない v_2 を持たなければならない。従ってこの結果は D meson が 0 でない v_2 を持つことを示唆していると考えられる。図中の実線および破線は quark coalescence model を用いて予想さ

れている charm quark 起源の電子 v_2 である。実線が charm quark の v_2 が 0 の場合 ($v_2=0$)、破線が charm quark の v_2 が 0 でない場合 ($v_2 \neq 0$) である。残念ながら現時点では統計および系統誤差が大きいため、charm quark が有限な v_2 を持つかどうか、すなわち charm quark に方位角異方性があるか決定することはできない。2003 年から 2004 年にかけておこなわれた RHIC-PHENIX 実験 (Run4) では本解析に用いられた統計の約 40 倍以上のデータが取られており、charm quark の方位角異方性の有無が議論できると期待されている。

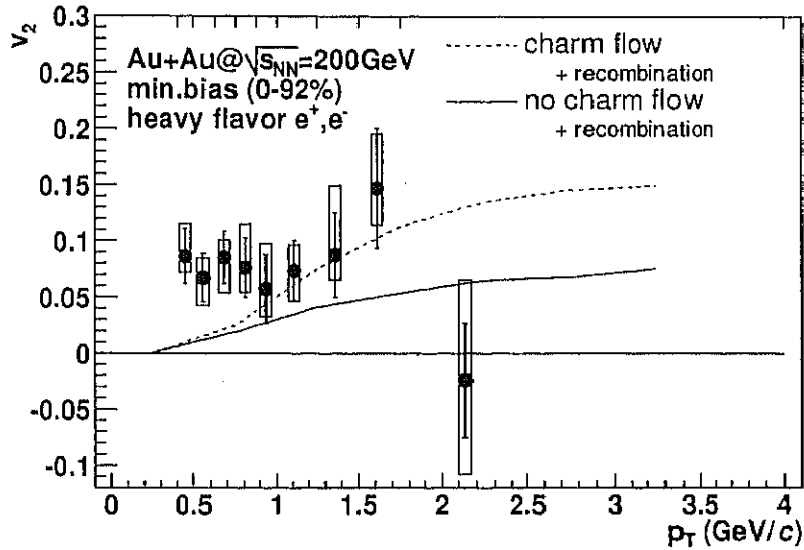


図 4: charm quark 起源の電子 v_2 とモデルとの比較。

(3) 直接光子の測定

RHIC エネルギーでの金+金衝突実験において、ハドロン及び π^0 の特に高横運動領域での収量が独立な陽子+陽子衝突重ね合わせに比べ、抑制されている事がこれまでの実験で分かっている。この結果及び同エネルギーでの重陽子+金衝突で同様の抑制が起こっていないという測定によって、金+金衝突においてクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) が生成されているようであると考えられるようになった。一方で衝突が生成される (直接) 光子は物質との相互作用が少なく抑制が小さい考えられている。図5は、PHENIX 実験の電磁カロリメータを使って測られた包括光子と、ハドロン (主に π^0) の崩壊から来る光子の比が示されている。低い横運動量領域では測定される光子の殆どが、ハドロンの崩壊によって作られているが、高い横運動量領域では既知の (測定された) ハドロンからの寄与に比べ数倍多い量の光子が観測された。QCD 計算から陽子+陽子衝突当たりで予測される直接光子の量を、金+金衝突中に起こりうる独立な核子衝突回数でスケールし、測定されたハドロン崩壊からの光子に対する比をとると、実線で描かれたようなラインとなり、ほぼ実験値を再現する。つまり、金+金衝突における直接光子の量を、核子衝突衝突回数でスケールした量 (R_{AA}) 用いて比較的高い運動量領域で表示すると (図6)、上に述べたような大きな抑制を示す π^0 のそれに比べ、直接光子は全く抑制されず、核子衝突数スケール (パイナリスケール) していることを示している [4]。これは、上の予測 (小さい相互作用から来る) を裏付ける結果であるが、今後、直接光子の楕円型方位角異方性測定及び、2粒子相関測定による光子ジェットに付随する粒子分布の測定によって、このスケールリングの意味が解き明かされることになる。

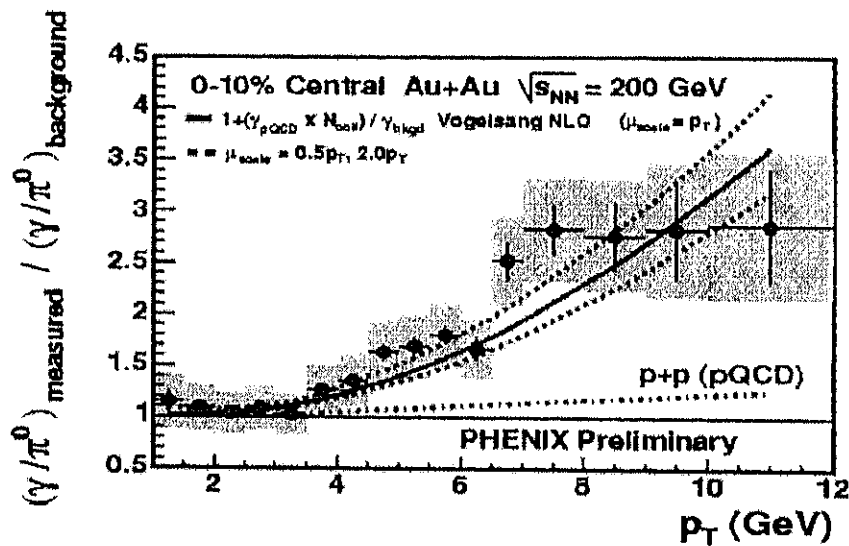


図5: 包括光子とハドロン起源の光子の比

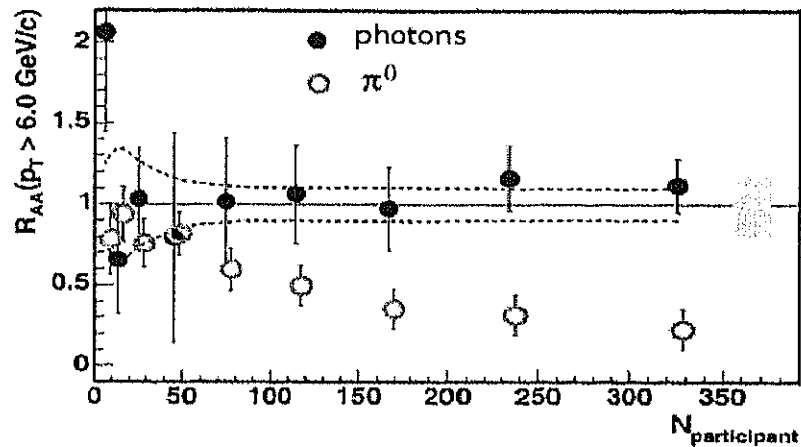


図 6: 直接光子の R_{AA}

(4) v_2 , p_T , HBT 半径とモデルの比較

ブルックヘブン国立研究所の超相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC) で行われている核子対当たり 200GeV の金+金衝突実験においてこれまでに測定された、ハドロンの横方向運動量分布、楕円型方位角異方性、2 粒子相関による粒子放出半径分布などの測定と、モデル計算から以下のようなことが分かってきた。図 7(上) は、PHENIX(及び STAR) 実験における識別されたハドロン (陽子、 π) の楕円方位角異方性 (v_2) の横方向運動量 (p_T) 依存性を示す [5]。ここでは、データやモデル計算の中心衝突度を取り除くために、衝突係数 (初期の原子核の重なり) によって決まる幾何学的異方性 (ϵ) によって規格化してある。図 7(下) は、識別されたハドロン (陽子、 π) の横方向運動量 (p_T) 分布を示す。様々な流体力学計算から、QGP を仮定するモデルやそうでないもの、また混合相を仮定するもの、またハドロン化するモデルとして、化学平衡と熱平衡を最後まで満たすもの、化学平衡を初期に止めるもの、カスケード計算を加えて粒子の散乱断面積を用いるものなどと比較した。これらモデルのパラメータをどのように決めるかによって、実験値と計算結果がどのように合うかを調べると、まだ量的な結論は出せないが、QGP 相での強い膨張と、混合層、さらにハドロンカスケードを加えたハイブリッドモデルが今の所、最も実験値をよく再現している。

図 8 は、2 粒子相関 (HBT) 測定による、フリーズアウト時の π の放出半径を 2 粒子の横方向運動量 (k_T) 依存性を示す。上で用いたのと同様なモデル計算が比較されている。 R_{side} が幾何学的半径を示しているのに対して、 R_{out} は時間的な拡がりを含むパラメータとして、知られているが、その比が実験的にかなり 1 に近いことは、本当に時間的な拡がり小さいのかそれとも、その粒子放出が HBT 測により見かけ上そのように観測されているかどうかは、まだ解き明かされていなく、HBT パズルと呼ばれている。

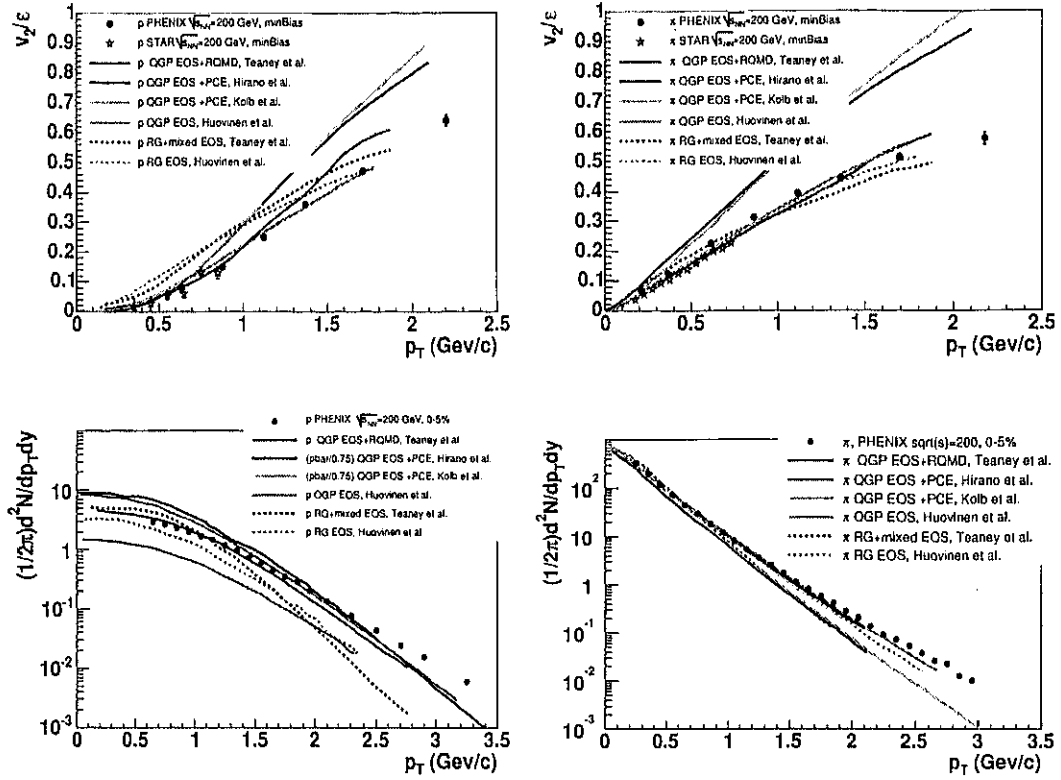


図 7: ハドロン $v_2(p_T)$ 、 p_T 分布とモデルとの比較

(5) HBT 半径の方位角依存性

図 9 は、核子対当たり 200GeV での金+金衝突における π の 2 粒子 HBT 相関解析による放出半径を反応平面に対する方位角の関数にして表示している。反応平面方向から見た粒子放出分布の幾何学的大きさ (R_{side}) が、反応平面と直行する方向から見た大きさに比べて大きい事、逆にその奥行きに時間的拡がりを加えた項 (R_{out}) は、平面から見た場合よりもそれに直行する方向から見た場合のほうが、大きく観測された。これは、縦 (y) 長のアーモンド型で始まった、横 (x) 膨張により、 v_2 に見られるように横 (x) 方向により多くの粒子を放出しているが、その終状態の幾何学的形状 (楕円の長軸の方向) は初期と同じ縦 (y) 方向であることを示唆している。しかし、この結論を導くためには、流体力学計算などのモデルの仮定が必要である。 R_{out} の振幅のほうが R_{side} の振幅よりも大きいことは注目すべきで、時間的及び膨張速度の方位角異方性のほうが、幾何学的異方性よりも大きいことを示している。またこのことは、上の HBT パズルを解く鍵も含んでいる。

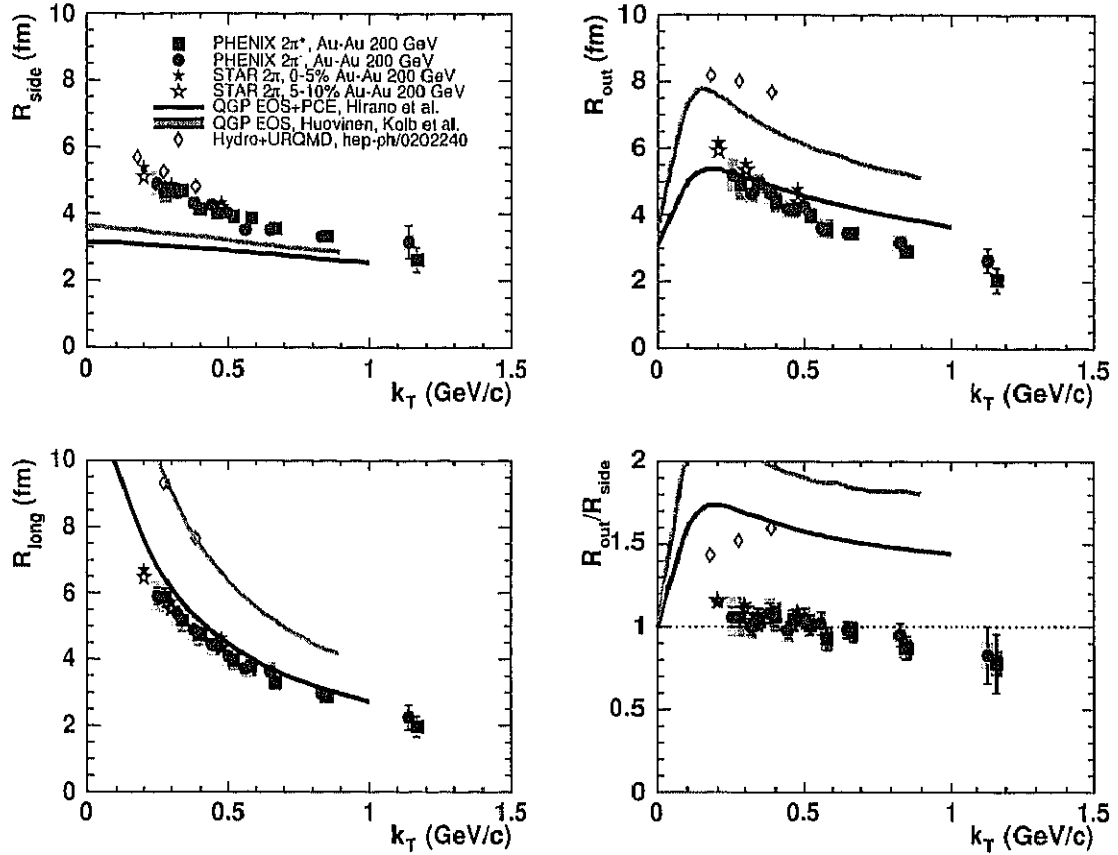


図 8: HBT 半径の k_T 依存性とモデルとの比較

(6) エアロジェルチェレンコフ検出器：インストール完了、衝突データの収集

(A) 導入理由: RHIC での衝突実験におけるこれまでの発見の 1 つに、高横運動量粒子の収量抑制現象がある。パイゼロ中間子や荷電ハドロンが、重心系エネルギー 200 GeV の Au+Au 衝突において、p+p 衝突での結果から期待される収量に比べ、抑制されていることが観測された。横運動量 $p_T > 5 \text{ GeV}/c$ では、5 分の 1 程度にまで抑制されている。この抑制現象は、生成されたジェットが高温状態にある衝突反応領域を通過する際に、大きなエネルギー損失を受けたためと説明されている (Jet Quenching 効果)。もう 1 つの発見が、横運動量 $p_T 2-4 \text{ GeV}/c$ における、収量抑制効果の粒子種依存性である。パイ中間子や K 中間子の収量が抑制されている一方で、陽子・反陽子、ラムダ粒子の収量は抑制されてはなかった。メソン・バリオン間で異なる振る舞いをしていることがわかる。粒子放出の方位角異方性強度 v_2 の測定においても、このメソン・バリオン間での異なる振る舞いが観測された。粒子収量、方位角異方性強度などの測定を粒子種ごとに、さらに高い横運動量領域までを含めて調べるために、ハドロン粒子識別能力の向上が求められている。

(B) インストール完了、衝突データの収集: ハドロン粒子識別能力強化のため、エアロジェルチェレンコフ検出器 (ACC) を開発・製作し、インストールすることになった。これは RHIC-PHENIX 検出器のアップグレード計画の 1 つである。衝突点からおよそ 450cm の位置に、縦およそ 120cm、横およそ 400cm の領域をカバーする。量産されている中で最も小さな屈折率 ($n=1.011$) をもつエアロ

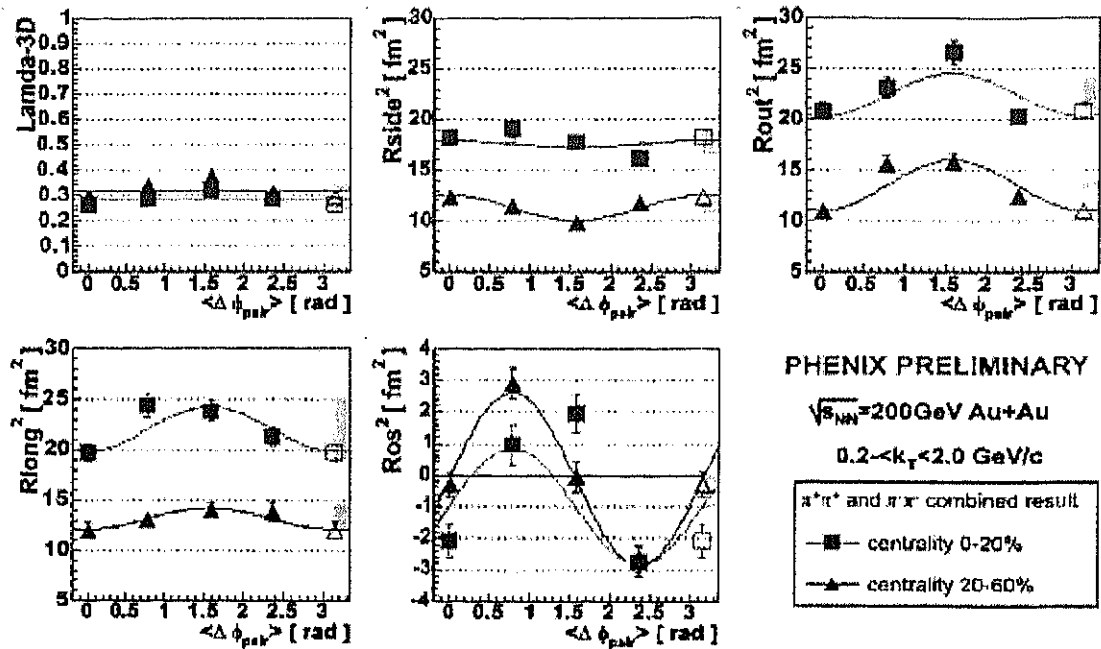


図 9: HBT 半径の方位角依存性

ジェルを使用する。ACCの研究・開発が2001年から筑波大学を中心に、CNS(東京大学)、BNL(米国)、JINR(ロシア)の各グループの協力の下で進められてきた。そして、2003年夏にACCの製作がBNLにおいて行われ、2003年11月に北側半分がPHENIX検出器にインストールされた。PHENIX実験Run4(重心系エネルギー200GeVのAu+Au衝突、2004年1-3月)において検出器は順調に動作し、計1500M事象の衝突データを収集することに成功した。その後、ACCの南側半分の製作、及び導入前テストを2004年の春から夏にかけて行い、8月にはインストール、及び読み出し回路を含む動作テストを行った。冬には、ACCの立ち上げ作業が終了した。Run5(200GeVのCu+Cu衝突、2005年1-3月)においても、計1000M事象の衝突データを収集した。昨年度の高統計Au+Au衝突データと、今年度のCu+Cu衝突データを用いて、高横運動量域(4-8GeV/c)でのハドロンの粒子識別が可能になる。粒子識別のスキームを完成させるためには、高時間分解能の飛行時間測定器が必要となる。MRPCを用いた飛行時間測定器の開発、製作が別途進んでいる(別項参照)。

(C) 粒子識別: 現在、取得したデータの較正作業と同時並行で、物理解析を進めている。粒子識別の様子を、図10、図11に示す。これらは、横軸に運動量と荷電符号の積、縦軸に質量2乗の二次元プロットである。図10は、荷電粒子が通過しエアロジェル検出器からのシグナルがある場合を示す。図11は、荷電粒子が通過しエアロジェル検出器からのシグナルがない場合(つまり、運動量がしきい値以下の粒子)を示す。荷電粒子の大半を占めるパイ中間子は運動量1GeV/c以上でチェレンコフ光を出す(K中間子は3 GeV/c、陽子は7GeV/cがしきい値)。図10から、運動量1GeV/c以上のパイ中間子のシグナルが見える。図11は、運動量1GeV/c以上のパイ中間子のシグナルが抑制されて、K中間子や陽子のシグナルのみが残っている様子を示す。運動量3GeV/c以上ではK中間子も光るので、陽子の粒子識別が可能になる。

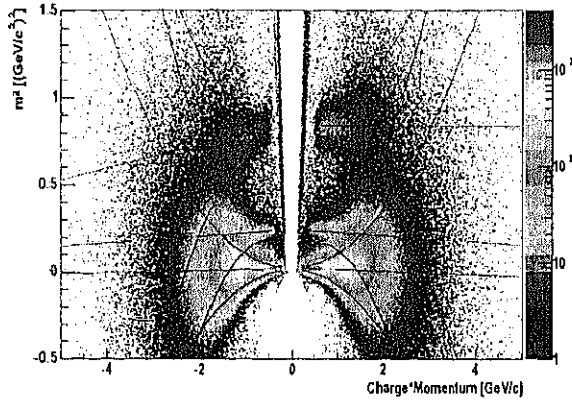


図 10: 質量 2 乗を運動量の関数として示す。エアロジェル検出器からのシグナルがある場合。

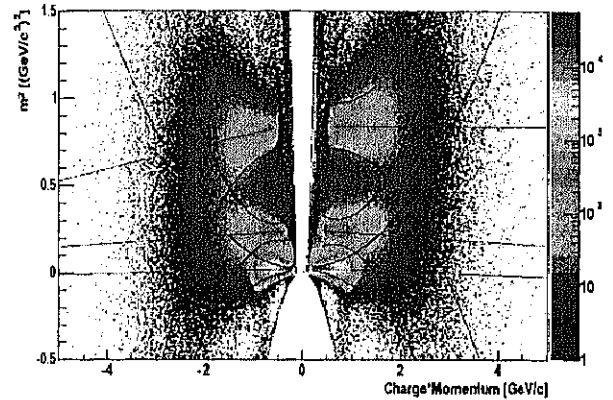


図 11: 質量 2 乗を運動量の関数として示す。エアロジェル検出器からのシグナルがない場合。

(7) 宇宙線ベンチテストのための TPC の設計開発

米国ブルックヘブン国立研究所にある超相対論的重イオン衝突型加速器において行っている高エネルギー原子核衝突実験で高粒子多重度環境下で使用する、粒子飛跡測定や粒子識別を行うための検出器の開発を行ってきた。それら検出器開発を大学の研究室で効率よく行うための、宇宙線測定ベンチに用いる 3 次元粒子軌跡測定用のタイム・プロジェクション・チェンバー (TPC) の開発研究を行った。この検出器は、実際の高エネルギー重イオン衝突実験にもよく用いられる検出器で、同時に発生する多くの粒子の軌跡を、精度良く測ることができる。TPC はガス検出器であり、荷電粒子がガスをイオン化したときに作られる電子は、ガス中にかげられた電場によりワイヤーチェンバーの方にドリフトする。その電子はワイヤーチェンバーのアノードワイヤー付近でガス増幅され、芯線に電子雪崩を形成する。その電子雪崩によって、カソードパッド上に誘起されるシグナルを、パッドから読み出す。またガス中での電子ドリフトや拡散及び、カソードパッドシグナルのシミュレーションにより、隣り合うパッド間での電荷分割を改善し、位置分解能を向上させるようにパッドのサイズ ($2 \times 2 \text{ cm}^2$)、形状 (くさび形) を決定した。また、ガス中ドリフト領域の電場の一様性を高めるために、四方の柱を用いてワイヤーによる 2 重のフィールドケージを作り、検出器を製作した。シグナル増幅用のプリアンプを製作し、読み出し回路 (CAMAC Flash-ADC) を用いて、基本的な検出器の性能を評価した。シンチレーション検出器をトリガーとして、宇宙線及び KEK-PS での粒子ビームを用いて 3 次元軌跡測定を行い、検出効率、分解能などの検出器としての基本性能を評価した。平均的なシグナルの大きさに対して、プリアンプや読み出し電子回路からのノイズは十分小さく、 $S/N \sim 50$ 程度を達成し、3 次元軌跡を測るための x (ワイヤー) 方向及び、y (ドリフト) 方向の位置分解能は共に 0.5mm 程度の精度と、また検出効率も 95% を十分満たした。

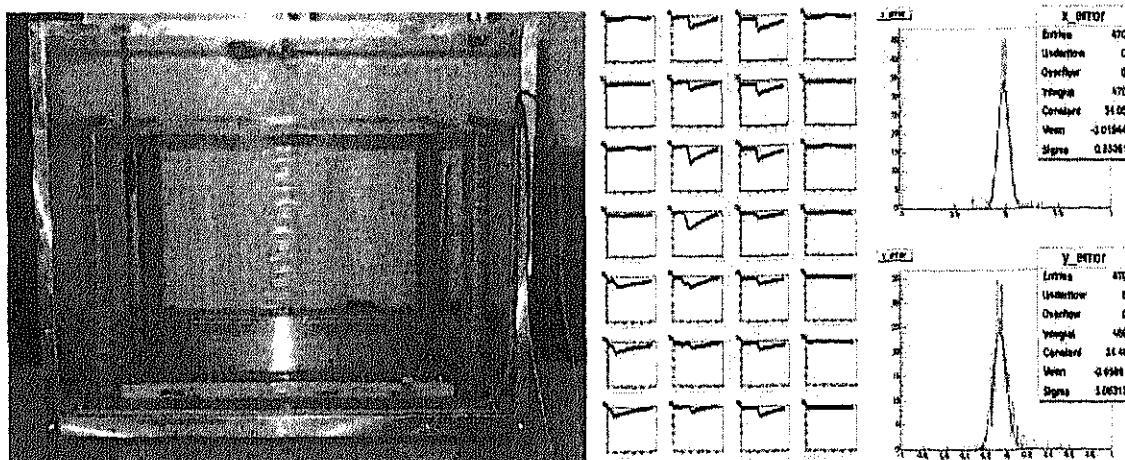


図 12: TPC の構造、イベントディスプレイ、x,y 分解能。

(8) 飛行時間測定器のための Multigap Resistive Plate Chamber の製作

高エネルギー重イオン衝突における反応機構・メカニズムの理解のため、生成された粒子の識別を行なうことが求められる。粒子識別は飛行時間測定法によって可能であり、時間分解能の良い飛行時間測定器として、従来から scintillation counter が用いられてきた。しかしながら、高エネルギー重イオン衝突における検出器への要求は小型かつ多数であるため、検出器として高価で、小型化にも構造的な制約を受けてしまう scintillation counter はその要求を満たすことができない。そこで、Multigap Resistive Plate Chamber(MRPC) が注目された。MRPC は、scintillation counter に比べ十分な理解がなされていないものの、良い時間分解能を持ち、なおかつ安価である。また、読み出しパッドを用いて信号を読み出すことで検出器としての小型化を可能としているため、scintillation counter に代わる新たな飛行時間測定器として期待されている。実際に製作した MRPC の構造を図 13 に示す。

gas chamber である MRPC は、図 13 中のガラスに挟まれた空間 (gap) にガスが満たされており、gap には高電圧がかけられている。gap を荷電粒子が通過する際ガス分子を電離してイオン対をつくり、gap にかけられた高電圧によってそのイオン対から電子なだれが発生する。その電子なだれで生じた電子 (イオン) によって読み出しパッドに誘起された電荷 (image charge) を MRPC の信号として読み出している。現在までに MRPC のプロトタイプ製作が終了し、宇宙線を使って検出効率や時間分解能のテストを行っている。今後、MRPC の読み出しパッドの形状や gap 数の最適化により、検出器のより詳しい性能評価を行う予定である。

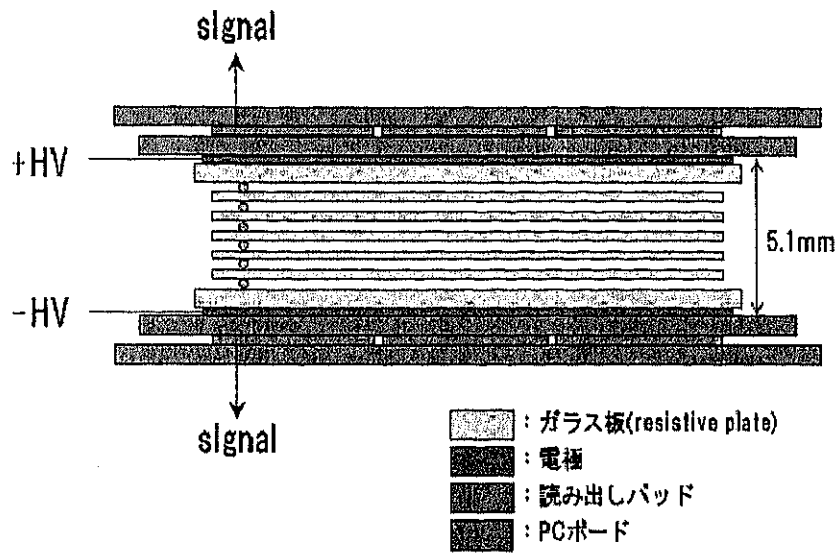


図 13: MRPC の構造

参考文献

- [1] S.S.Adler, et al, nucl-ex/0411040.
- [2] K.Adcox et al., Phys.Pev.Lett.88,192303(2002).
- [3] S.S. Adler, et al, nucl-th/0502009.
- [4] S.S.Adler, et al, nucl-ex/0503003.
- [5] K.Adcox, et al, nucl-ex/0410003.

<論文>

1. M. Yamaguchi, Y. Tagishi, Y. Aoki, N. Kawachi, N. Okumura, N. Yoshimaru, Measurement of proton polarization in the $208\text{Pb}(d, p)209\text{Pb}$ reaction at an incident energy of 20 MeV, *Nucl. Phys. A* **747**, pp 3-13 (2005).
2. K.Sasa, I. Arai, M. kurosawa, T. Nakagawa, Preliminary experiments on laser coupling with an electron cyclotron resonance ion source for trace element analysis, *Review of Science Instrument*, **75** No.5 1928-1930 (2004).
3. Y. Nagashima, R. Seki, T. Matsuhira, T. Takahashi, K. Sasa, K. Sueki, M. Hoshi, S. Fujita, K. Shizuma, H. Hasai, Chlorine-36 in granite samples from the Hiroshima A-bomb site, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **223**, pp 782-787, (2004).
4. 笹 公和、国内の加速器関連施設、筑波大学タンデム加速器施設日本加速器学会誌「加速器」1巻1号(2004) 44.
5. M.Petrascu, A.Constantinescu, I.Cruceru, M.Giurgiu, A.Isbasescu, M.Isbasescu, H.Petrascu, C.Bordeanu, I.Tanihata, T.Kobayashi, K.Morimoto, K.Katori, M.Chiba, Y.Nishi, S.Nishimura, A.Ozawa, T.Suda, K.Yoshida, Pre-emission of correlated neutrons in the fusion of ^{11}Li halo nuclei with Si targets, *Phys. Rev. C* **69**, 011602(R) (2004).
6. A.Yoshida, K.Morita, K.Morimoto, D.Kaji, T.Kubo, Y.Takahashi, A.Ozawa, I.Tanihata, High-power rotating wheel targets at RIKEN, *Nucl. Instrum. and Methods A* **521**, 65-71 (2004).
7. Z.Elekes, Zs.Dombradi, A.Krasznahorkay, H.Baba, M.Csatlos, L.Csige, N.Fukuda, Zs.Fulop, Z.Gacsi, J.Gulyas, N.Iwasa, H.Kimugawa, S.Kubono, M.Kurokawa, X.Liu, S.Michimasa, T.Minemura, T.Motobayashi, A.Ozawa, A.Saito, S.Shimoura, S.Takeuchi, I.Tanihata, P.Thirot, Y.Yanagisawa, K.Yoshida, Decoupling of valence neutrons from the core in ^{16}C , *Phys. Lett. B* **586**, 34-40 (2004).
8. D.Q.Fang, T.Yamaguchi, T.Zheng, A.Ozawa, M.Chiba, R.Kanungo, T.Kato, K.Morimoto, T.Ohnishi, T.Suda, Y.Yamaguchi, A.Yoshida, K.Yoshida, I.Tanihata, One-neutron halo structure in ^{15}C , *Phys. Rev. C* **69**, 034613 (2004).
9. A.Ozawa, Recent experiments for interaction and reaction cross-sections, *Nucl. Phys. A* **734**, 315-318 (2004).
10. C. Wu, Y.Yamaguchi, A.Ozawa, R.Kanungo, I.Tanihata, T.Suzuki, D.Q.Fang, T.Suda, T.Ohnishi, M.Fukuda, N.Iwasa, T.Ohtsubo, T.Izumikawa, R.Koyama, W.Shinozaki, M.Takahashi, Study of the density distribution of ^{17}C from reaction cross section measurement, *Nucl. Phys. A* **739**, 3-14 (2004).
11. H.Jeppesen, R.Kanungo, B.Abu-Ibrahim, S.Adhikari, M.Chiba, D.Fang, N.Iwasa, K.Kimura, K.Maeda, S.Nishimura, T.Ohnishi, A.Ozawa, C.Samanta, T.Suda, T.Suzuki, I.Tanihata, Q.Wang, C.Wu, Y.Yamaguchi, K.Yamada, A.Yoshida, T.Zheng, One- and two-neutron removal from ^{15}O , *Nucl. Phys. A* **739**, 57-66 (2004).

12. K.Morita, K.Morimoto, D.Kaji, H.Haba, E.Ideguchi, J.C.Peter, R.Kanungo, K.Katori, H.Koura, H.Kudo, T.Ohnishi, A.Ozawa, T.Suda, K.Sueki, I.Tanihata, H.Xu, A.V.Yeremin, A.Yoneda, A.Yoshida, Y.-L.Zhao, T.Zheng, S.Goto, F.Tokanai, Production and Decay Properties of $^{272}111$ and its Daughter Nuclei, *Journal of the Physical Society of Japan* **73**, 1738-1744 (2004).
13. A.Ozawa, Reaction cross-sections for carbon isotopes, *Nucl. Phys. A* **738**, 38-44 (2004).
14. A.Ozawa, Measurements of Reaction Cross-Sections and Determination of Nucleon Matter Density Distributions, *Horizons in World Physics, Vol. 244*, 301-321 (2004).
15. D.Cortina-Gil, J.Fernandez-Vazquez, F.Aumann, T.Baumann, J.Benlliure, M.J.G.Borge, L.V.Chulkov, U.Datta Pramanik, C.Forssten, L.M.Fraile, H.Geissel, J.Gerl, F.Hammache, K.Itahashi, R.Janik, B.Jonson, S.Mandal, K.Markenroth, M.Meister, M.Mocko, G.Munzenberg, T.Ohtsubo, A.Ozawa, V.Prezado, V.Pribora, K.Riisager, H.Scheit, R.Schrieder, G.Schrieder, H.Simon, B.Sitar, A.Stolz, P.Strmen, K.Summerer, I.Szarka, H.Weick, Shell structure of the near-dripline nucleus ^{23}O , *Phys. Rev. Lett.* **93**, 062501 (2004).
16. M.Chiba, R.Kanungo, B.Abu-Ibrahim, S.Adhikari, D.Q.Fang, N.Iwasa, K.Kimura, K.Maeda, S.Nishimura, T.Ohnishi, A.Ozawa, C.Samanta, T.Suda, T.Suzuki, I.Tanihata, Q.Wang, C.Wu, Y.Yamaguchi, K.Yamada, A.Yoshida, T.Zheng, Neutron removal studies on ^{19}C , *Nucl. Phys. A* **741**, 29-41 (2004).
17. K.Morita, K.Morimoto, D.Kaji, T.Akiyama, S.Goto, H.Haba, E.Ideguchi, R.Kanungo, K.Katori, H.Koura, H.Kudo, T.Ohnishi, A.Ozawa, T.Suda, K.Sueki, H.Xu, T.Yamaguchi, A.Yoneda, A.Yoshida, Y.-L.Zhao, Experiments on the Synthesis of Element 113 in the reaction $^{209}\text{Bi}(^{70}\text{Zn}, n)^{278}113$, *Journal of the Physical Society of Japan* **73**, 2593-2596 (2004).
18. Z.Elekes, Zs.Dombradi, A.Saito, N.Aoi, H.Baba, K.Demichi, Zs.Fulop, J.Gibelin, T.Gomi, H.Hasegawa, N.Imai, M.Ishihara, H.Iwasaki, S.Kanno, S.Kawai, T.Kishida, T.Kubo, K.Kurita, Y.Matsuyama, S.Michimasa, T.Minemura, T.Motobayashi, M.Notani, T.Ohnishi, H.J.Ong, S.Ota, A.Ozawa, H.K.Sakai, S.Shimoura, E.Takeshita, S.Takeuchi, I.Tanihata, M.Tamaki, Y.Togano, K.Yamada, Y.Yanagisawa, K.Yoneda, Bound excited states in ^{27}F , *Phys. Lett. B* **599**, 17-22 (2004).
19. Y.Yamaguchi, C.Wu, T.Suzuki, A.Ozawa, D.Q.Fang, M.Fukuda, N.Iwasa, T.Izumikawa, H.Jeppesen, R.Kanungo, R.Koyama, T.Ohnishi, T.Ohtsubo, W.Shinozaki, T.Suda, M.Takahashi, I.Tanihata, Density distribution of ^{17}B from a reaction cross-section measurement, *Phys. Rev. C* **70**, 054320 (2004).
20. K.Matsuta, Y.Tagishi, T.Nagatomo, H.Fujiwara, M.Yamaguchi, A.Ozawa, T.Yasuno, A.Chiba, M.Fukuda, M.Mihara, K.Minamisono, T.Minamisono, Production of polarized ^{20}F by polarized deuteron beam and the beta-ray angular distribution, *Genshikaku Kenkyu, Vol. 49, No. 4*, 31-36 (2005).
21. R.J. Li, Y.J. Ma, X.G. Wu, Y.H. Zhang, L.H. Zhu, S.Y. Wang, M.F. Li, G.D. Liang, X.Z. Cui, X.F. Li, G.Y. Zhao, J.B. Lu, Y.Z. Liu, Z.M. Wang, G.S. Li, S.X. Wen, C.X.

- Yang, T. Komatsubara, K. Furuno, Identification of high-spin states in odd-odd ^{126}I , High Energy Physics and Nuclear Physics-Chinese Edition **29** (1): 1-4 (2004).
22. C.Y. Xie, X.H. Zhou, Y. Zheng, Y.H. Zhang, Z. Liu, Z.G. Gan, T. Hayakawa, M. Oshima, T. Toh, T. Shizuma, J. Katakura, Y. Hatsukawa, M. Matsuda, H. Kusakari, M. Sugawara, K. Furuno, T. Komatsubara, Level structure of ^{146}Tb , Eur. Phys. J. **A19**, pp.7-9 (2004).
23. C.B. Moon, T. Komatsubara, K. Furuno, Band structures in ^{116}I , Nucl. Phys. **A730**, pp.3-22 (2004).
24. C.B. Moon, T. Komatsubara, Yrast band based on the proton $h(11/2)$ orbital in ^{125}I , Journal of the Korean Physical Society **45** (4): L791-L794 OCT (2004).
25. S.Y. Wang, Y.J. Ma, T. Komatsubara, Y.Z. Liu, Y.H. Zhang, K. Furuno, T. Hayakawa, J. Mukai, Y. Iwata, T. Morikawa, G.B. Hagemann, G. Sletten, J. Nyberg, D. Jerrestam, H.J. Jensen, J. Espino, J. Gascon, N. Gjorup, B. Cederwall, P.O. Tjom, Structure of the $\pi g(7/2) [404]7/2(+)$ band in odd proton nucleus ^{123}I , Chinese Physics Letters **21** (6): 1024-1026 JUN (2004).
26. S.Y. Wang, Y.J. Ma, T. Komatsubara, Y.Z. Liu, Y.H. Zhang, G.D. Liang, K. Furuno, T. Hayakawa, J. Mukai, Y. Iwata, T. Morikawa, G.B. Hagemann, G. Sletten, J. Nyberg, D. Jerrestam, H.J. Jensen, J. Espino, J. Gascon, N. Gjomp, B. Cederwall, P.O. Tjom, High-spin level scheme of ^{126}Cs , High Energy Physics and Nuclear Physics-Chinese Edition **28** (5): 491-494 MAY (2004).
27. P. Luo, Y.H. Zhang, X.H. Zhou, M.L. Liu, Y.X. Guo, Z. Liu, X.G. Lei, L.T. Song, Y. Zheng, H.L. Wang, H.P. Yu, C.Y. Xie, Y.J. Ma, Y. Sasaki, K. Yamada, H. Ohshima, S. Yokose, M. Ishizuka, T. Komatsubara, K. Furuno, Experimental observation of high spin states in ^{135}La nucleus, High Energy Physics and Nuclear Physics-Chinese Edition **28** (5): 495-501 MAY (2004).
28. Y. Zheng, X.H. Zhou, Y.H. Zhang, T. Hayakawa, M. Oshima, Y. Toh, T. Shizuma, J. Katakura, Y. Hatsukawa, M. Matsuda, H. Kusakari, M. Sugawara, K. Furuno, T. Komatsubara, Multi-quasiparticle excitations in ^{145}Tb , Journal of Physics G-Nuclear and Particle Physics **30** (4): 465-479 APR (2004).
29. P. Luo, M.L. Liu, Z. Liu, Y.H. Zhang, X.H. Zhou, Y.X. Guo, Y.J. Ma, Y. Sasaki, K. Yamada, H. Ohshima, S. Yokose, M. Ishizuka, T. Komatsubara, K. Furuno, In-beam gamma-ray spectroscopy of level structure in ^{134}Ba , High Energy Physics and Nuclear Physics-Chinese Edition **28** (3): 268-273 MAR (2004).
30. A. Negishi, N. Kariya, K.I. Sugawara, I. Arai, H. Hiura, T. Kanayama, Size-selective formation of tungsten cluster-containing silicon cages by the reactions of W_n^+ ($n=1\sim 5$) with SiH_4 , Chem. Phys. Lett., **388**, 463-467 (2004).
31. 高エネルギー陽子マイクロビームによる鉍物中の水素定量分析法の開発、古野興平、黒澤正紀、小松原哲郎、笹公和、大和良広、石井聰、大島弘行、岩石鉍物科学 **33**, 51-61, (2004)

32. K. Awazu, M. Fujimaki, Y. Ohki, T. Komatsubara
Three-dimensional lithography for rutile TiO₂ single crystals using swift heavy ions
Engineered porosity for microphotonics and plasmonics/MRS proceedings (Wehrspohn
Garcia-Vidal Notomi Scherer) **Vol. 797**, No. 1, pp. 69-74 (2004).
33. S.S. Adler, S. Esumi, Y. Miake, 他 330 名, Mid-rapidity direct-photon production in
p+p collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ -GeV, *Phys. Rev. D* **71**:071102 (2005).
34. S.S. Adler, S. Esumi, Y. Miake, 他 330 名, Nuclear modification factors for hadrons at
forward and backward rapidities in deuteron-gold collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ -GeV, *Phys.*
Rev. Lett. **94**:082302 (2005).
35. S.S. Adler, S. Esumi, Y. Miake, 他 326 名, Centrality dependence of charm production
from single electrons measurement in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ -GeV, *Phys.*
Rev. Lett. **94**:082301 (2005).
36. S.S. Adler, S. Esumi, Y. Miake, 他 327 名, Systematic studies of the centrality and
 $\sqrt{s_{NN}}$ dependence of the $d e(t) / d \eta$ and $d (n(ch) / d \eta$ in heavy ion collisions at
mid-rapidity, *Phys. Rev. C* **71**:034908 (2005).
37. S.S. Adler, S. Esumi, Y. Miake, 他 326 名, Deuteron and antideuteron production in Au
+ Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ -GeV, *Phys. Rev. Lett.* **94**:122302 (2005).
38. S. Esumi, Recent results from the RHIC experiments searching for QGP, *Prog. Theor.*
Phys. Suppl. **156**:163-166 (2004).
39. S.S. Adler, S. Esumi, Y. Miake, 他 329 名, Double helicity asymmetry in inclusive mid-
rapidity π_0 production for polarized p + p collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ -GeV, *Phys. Rev.*
Lett. **93**:202002 (2004).
40. X. Dong, S. Esumi, P. Sorensen, N. Xu, Z. Xu, Resonance decay effects on anisotropy
parameters, *Phys. Lett. B* **597**:328-332 (2004).
41. S.S. Adler, S. Esumi, Y. Miake, 他 326 名, Bose-einstein correlations of charged pion
pairs in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ -GeV, *Phys. Rev. Lett.* **93**:152302 (2004).
42. J. Bielcikova, S. Esumi, K. Filimonov, S. Voloshin, J.P. Wurm, Elliptic flow contribution
to two particle correlations at different orientations to the reaction plane, *Phys. Rev.*
C **69**:021901 (2004).
43. S.S. Adler, S. Esumi, Y. Miake, 他 325 名, Measurement of nonrandom event by event
fluctuations of average transverse momentum in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ -GeV Au+Au and p+p
collisions, *Phys. Rev. Lett.* **93**:092301, (2004).

<学位論文（博士論文）>

1. 数理物質科学研究科・博士（理学） 清道 明男 (Akio Kiyomichi) Study of identified hadron spectra and yields at mid-rapidity in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au Collisions

<学位論文（修士論文）>

1. 数理物質科学研究科・修士論文 岡 暢哉 (Masaya Oka) Measurement of yield and Identified charged hadron at intermediate p_T range in Au+Au collisions $\cdot \sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV from RHIC-PHENIX experiment (RHIC-PHENIX 実験からの $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV \cdot Au+Au 衝突における中間横運動量領域での荷電ハドロン識別と収量の測定)
2. 数理物質科学研究科・修士論文 永田 善彦 (Yoshihiko Nagata) Charged Hadron Identification with Aerogel Cherenkov Counter and ElectroMagnetic Calorimeter at RHIC-PHENIX experiment (RHIC-PHENIX 実験におけるエアロゲルチェレンコフ検出器と電磁カロリメーターを用いた荷電ハドロン粒子識別)
3. 数理物質科学研究科・修士論文 浜島 伸輔 (Shinsuke Hamajima) Simulation of Gas Aggregation Cluster Source with Use of DSMC Method (DSMC 法によるガス凝集クラスター源のシミュレーション)
4. 理工学研究科・修士論文 飯島 正史 (Masashi Iijima) $^{118}\text{Sn}(d,p_0)$ reaction below Coulomb barrier (クーロン障壁以下のエネルギーでの $^{118}\text{Sn}(d,p_0)$ 反応)
5. 理工学研究科・修士論文 川岸 隆之 (Takayuki Kawagishi) Measurement of HBT Interferometry at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au Collisions ($\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV の金・金衝突実験における HBT 干渉効果測定)
6. 理工学研究科・修士論文 狸々 智康 (Tomoyasu Shohjo) Research and Development of Time Projection Chamber for Cosmic Ray Test (宇宙線テストのための Time Projection Chamber の開発研究)
7. 理工学研究科・修士論文 榛葉 卓也 (Takuya Shinba) Measurement of analyzing powers for the $^6\text{Li}+d$ reaction at deuteron energy of 110 keV (重陽子エネルギー 110 keV における $^6\text{Li}+d$ 反応の偏極分解能の測定)
8. 理工学研究科・修士論文 鈴木 才輝 (Toshiki Suzuki) Time-Of-Flight mass spectrometry of neutral cluster produced by gas-aggregation cluster source (ガス凝集クラスター源における中性クラスターの TOF 質量分析)

<招待講演（国際会議）>

1. A.Ozawa, (Invited talk), Nuclear radii of unstable nuclei and related topics The fifth Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium 2004. 3/7-10, Fukuoka, Japan
2. 三明康郎 (招待講演) 韓国物理学会 (韓国済州島 Cheju Univ.) 日韓シンポジウム Have we seen a QGP at RHIC?
3. ShinIchi Esumi, (Invited talk), Event anisotropy in heavy-ion collisions at RHIC energies, Collective Dynamics in Relativistic Heavy Ion Collisions Oct 17-19, 2004, University of Science & Technology of China(USTC) 中国科学技術大学 Anhui, Hefei, China
4. ShinIchi Esumi (Invited Talk), Event anisotropy measurement in high-energy heavy-ion collisions at RHIC, ロスアラモス国立研究所、物理セミナー 2005.3.29
5. K. Satou, K. Komatsubara, K. Sasa, S. Ishii, Y. Yamato, K. Miyakawa, M. Kurosawa, (INVITED TALK), Hydrogen analysis for geoscience by using nuclear micro beam, The 5th Italy-Japan Symposium, *Recent Achievements and Perspectives in Nuclear Physics*, Naples, November 3-6 (2004).

<招待講演（国内）>

1. 小沢顕、(シンポジウム招待講演) 稀少 RI 蓄積リングと精密質量測定日本物理学会 2004 年秋季大会 (高知大学朝倉キャンパス)
2. 三明康郎 (招待講演)、「RHIC の物理 (見つけたこと、見つからなかったこと) 基研研究会「場の量子論の基礎的諸問題と応用」、平成 16 年 12 月 16 日～18 日、京都大学基礎物理学研究所
3. 益井宙 (シンポジウム招待講演) Elliptic Flow in High Energy Heavy Ion Collisions 本物理学会 2004 年秋季大会 (高知大学朝倉キャンパス)
4. 三明康郎 (招待講演) What we have learned and what need to do at RHIC 理研ワークショップ Physics at RHIC 2004.12.6-12.5, 理研
5. 江角晋一 (招待講演) High-energy heavy-ion collisions viewed with v_2 , singles and HBT measurements, RCNP 研究会「RHIC, SPS での高エネルギー重イオン実験の現象論的解析」大阪大学、核物理研究センター、2004.11.4-5

<日本物理学会発表>

1. Hiroshi Masui for the PHENIX collaboration, Detailed shape analysis of azimuthal distribution with respect to the reaction plane at RHIC-PHENIX 日本物理学会 (春、第 60 回年次大会) 東京理科大学 野田
2. Shingo Sakai for PHENIX collaboration, Azimuthal anisotropy of heavy flavor electrons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV measured with RHIC-PHENIX 日本物理学会 (春、第 60 回年次大会) 東京理科大学 野田

3. Takayuki Kawagishi for the PHENIX Collaboration, Measurement of Charged pion Interferometry with respect to Reaction Plane in $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ Au+Au collision at RHIC-PHENIX 日本物理学会 (春、第60回年次大会) 東京理科大学 野田
4. Masaya Oka for the PHENIX Collaboration, Measurement of identified Charged Hadron and particle yield at intermediate p_T range in Au+Au collisions $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ at RHIC-PHENIX 日本物理学会 (春、第60回年次大会) 東京理科大学 野田
5. Maya Shimomura for the PHENIX Collaboration, Measurement of Elliptic Flow for High p_T charged hadron at RHIC-PHENIX 日本物理学会 (春、第60回年次大会) 東京理科大学 野田
6. Satoshi Takagi for the PHENIX Collaboration, Measurement of Charged Hadron Spectra in $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ Au+Au collisions at RHIC-PHENIX 日本物理学会 (春、第60回年次大会) 東京理科大学 野田
7. 奥村紀浩、石黒浩之、飯島正史、五十嵐智、石川泰士、青木保夫、1.5 MeV 付近の $^{28}\text{Si}+p$ 弾性散乱の部分波反応時間の推定 日本物理学会 (春、第60回年次大会) 東京理科大学 野田
8. Satoshi Takagi for the PHENIX Collaboration, Measurement of Single Particle Spectrum with Aerogel Counter in $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ Au+Au Collisions at RHIC-PHENIX 日本物理学会 2004年秋季大会 (高知大学朝倉キャンパス)
9. Masahiro Konno for the PHENIX Collaboration, Particle Identified v_2 in Au+Au Collisions at RHIC-PHENIX 日本物理学会 2004年秋季大会 (高知大学朝倉キャンパス)
10. 飯島正史、青木保夫、五十嵐智、石川泰士、石黒浩之、伊藤雄司、奥村紀浩、田岸義宏、山口充孝、クーロン障壁よりも低いエネルギーでの $^{118}\text{Sn}(d, p)$ 反応、日本物理学会 2004年秋季大会 (高知大学朝倉キャンパス)

<国内学会発表>

1. 田岸 義宏、「UTTAC での偏極核物理」、原子核研究、Vol.49、No.4、研究会報告、「軽イオンと偏極現象：この30年から未来へ、筑波大学応用加速器部門」、pp. 1-8, (2005).
2. 山口 充孝、「低エネルギー重陽子による $^6\text{Li}(d,p)$, (d,α) 反応」、原子核研究、Vol.49、No.4、研究会報告、「軽イオンと偏極現象：この30年から未来へ、筑波大学応用加速器部門」、pp. 9-16, (2005).
3. 青木 保夫、「重イオン用 CDCC プログラムの開発とその応用」、原子核研究、Vol.49、No.4、研究会報告、「軽イオンと偏極現象：この30年から未来へ、筑波大学応用加速器部門」、pp. 87-93, (2005).
4. 田岸 義宏、「UTTAC での偏極核物理」、「軽イオンと偏極現象」ワークショップ：この30年から未来へ、2004.11.26 筑波大学応用加速器部門
5. 山口 充孝、「低エネルギー重陽子による $^6\text{Li}(d,p)$, (d,α) 反応」、「軽イオンと偏極現象」ワークショップ：この30年から未来へ、2004.11.26 筑波大学応用加速器部門

6. 青木 保夫、「重イオン用 CDCC プログラムの開発とその応用」、「軽イオンと偏極現象」ワークショップ：この30年から未来へ、2004.11.26 筑波大学応用加速器部門
7. 久保政憲、李天信、新井一郎「金クラスターへのケイ素吸着」ナノ学会第2回大会、東京
8. 高梨康志、久保政憲、佐々木玄、新井一郎「多価電荷イオン - C60 電荷移行反応の価数・速度依存性」ナノ学会第2回大会、東京
9. 鈴木才輝、島倉理、宮崎隆、新井一郎「金属表面からのクラスター衝撃による2次電子放出」ナノ学会第2回大会、東京
10. 小松原哲郎、笹公和、古野興平、宮川一尚、石井聡、大和良広、黒澤正紀、「陽子弾性散乱同時計数法による鉱物試料の水素分析法」第40回理工学における同位元素・放射線研究発表会 2004.7.7-9 日本青年館
11. 石井聡、小松原哲郎、笹公和、大和良広、宮川一尚、黒澤正紀、「20 MeV の陽子ビームを用いた ERCS による水素分析」、第17回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会 2004.6.21-22 放射線医学総合研究所
12. 小松原哲郎、「花崗岩中水素測定」、広島・長崎原爆放射線量新評価システム DS02 に関する専門研究会、2004.7.29-30 京都大学原子炉実験所
13. 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、小原 哲郎、島 邦博、工藤 博、「筑波大学タンデム加速器の現状」、第17回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、放射線医学総合研究所、2004.6.21-22 報告集 p 42-45.
14. 笹 公和、島 邦博、石井 聡、工藤 博、「1MV タンデトロン加速器による原子クラスター加速」、第6回応用加速器・関連技術研究シンポジウム、2004.6.17-18 東京工業大学.
15. 笹 公和、榮 武二、「筑波大学における加速器に関わる研究開発」、シンポジウム「原子力分野における加速器の研究開発 -新たな展開を目指して-」2004.8.10-11 京都大学原子炉実験所. KURRI-KR-110(2004) 74-77.
16. 笹 公和、島 邦博、石井聡、富田成夫、工藤博、「高速原子クラスターの加速と照射効果」、第3回21世紀連合シンポジウム、2004.11.20-21 埼玉工業大学、シンポジウム抄録集 (ISSN1347-9717) (2004) 67-68.
17. 笹公和、長島泰夫、関李紀、高橋努、末木啓介、戸崎 裕貴、別所光太郎・松村 宏・三浦太一「筑波大学 AMS の現状と ^{36}Cl 測定精度向上への試み」、第7回 AMS シンポジウム、2005.1.15 京都大学理学部物理学教室.
18. 笹 公和、「筑波大タンデム加速器におけるビーム利用研究」、筑波大学応用加速器部門シンポジウム、原子衝突における電子励起と関連現象 2005、2005.3.17-18、筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門.
19. 小沢顕、「核半径と密度分布の測定」、不安定核物理 この10年とこれから RIBF-UEC/理研共催研究会 2004. 6.15-17 Wako, Japan
20. 坂井慎吾 「電子による charm quark flow の測定」 CNP 研究会「RHIC, SPS での高エネルギー重イオン実験の現象論的解析」大阪大学、核物理研究センター、2004.11.4-5

21. 江角晋一 「Event anisotropy in heavy-ion collisions at RHIC energies」、理研ワークショップ Physics at RHIC 2004.12.6-12.5, 理研

<科学研究費取得状況>

1. 基盤研究 C、「高エネルギーイオン線による地球内部流体分析法の開発」、代表：黒澤正紀、分担：小松原哲郎、笹公和、加藤工、中野孝教
2002年度 3,100 千円
2003年度 500 千円
2004年度 200 千円
2005年度 400 千円
2. 基盤研究 B、「極微量環境アルミニウム 26 をタンデム加速器を用いて超高感度に測定する方法の研究」、代表：長島泰夫、分担：笹公和、関李紀、青木孝義
2002年度 8,200 千円
2003年度 2,400 千円
2004年度 1,300 千円
3. 基盤研究 B、「核破砕片分離装置を用いたクリプトン同位体の核半径と EOS 研究」、分担：小沢 顕 (代表者、埼玉大、理、鈴木健)、
2004年度 10,200 千円
2005年度 1,900 千円
4. 若手研究 B、「レーザーアブレーション試料導入法による ECR プラズマ極微量元素分析法の研究」、代表者：笹公和
2004年 1,900 千円
2005年 1,000 千円
5. 基盤研究 C、「高エネルギー陽子ビームによる鉱物試料水素分析」、代表者：小松原哲郎、分担者：笹公和、黒澤正紀
2004年度：1,700 千円
2005年度：500 千円
2006年度：700 千円

<外部資金取得状況>

1. 学内プロジェクト、奨励研究、
「高速クラスター加速と物質照射効果」、代表：笹公和、300 千円

<研究会開催>

1. 「軽イオンと偏極現象：この30年から未来へ」2004年11月26日、世話人：田岸義宏、青木保夫、小松原哲郎、小沢顕、参加者：29名