

V. 原子核実験グループ

教授 三明康郎
助教授 青木保夫、青木孝義、田岸義宏、小沢 顕
講師 新井一郎、江角晋一、小松原哲郎、笹 公和
準研究員 奥村紀浩、山口充孝
技官 加藤純雄
大学院生 22名

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

(1) 陽子弾性散乱と反応時間の推定

珪素原子核による陽子弾性散乱の全反応断面積は、(p,n) 反応閾値付近で共鳴的なエネルギー依存性を示す事を先に報告した。

この全反応エネルギー依存性のエネルギー幅から、この場合の反応時間はほぼ 2×10^{-21} 秒程度と推定された。この反応時間の推定の精密化として、弾性散乱波位相のずれのエネルギー依存性を測定する事が考えた。薄い珪酸ガラスを標的とする陽子弾性散乱の実験を細かなエネルギー幅で行い、確かに弾性散乱でも後方の微分断面積に顕著なエネルギー依存性がある事を確認した。図は、ラザフォード散乱で割った弾性散乱微分断面積の書く分布のエネルギー依存性を示したものである。重心系のエネルギーで 14.943, 15.909 MeV での微分断面積よりもその中間のエネルギーである 15.1336 MeV での微分断面積の方が後方での下がりには顕著に大きい。

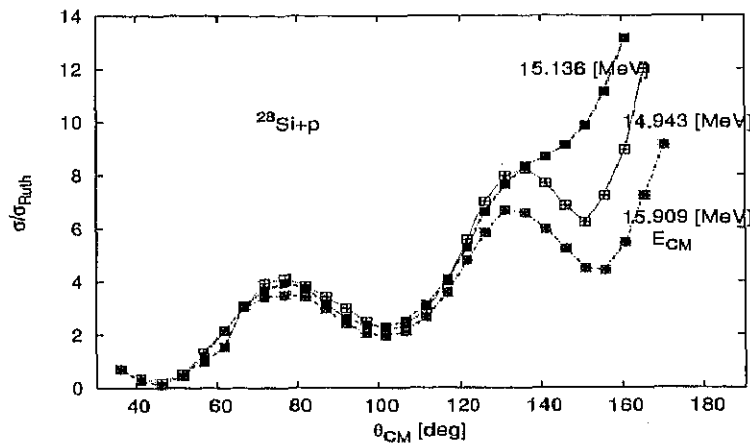


図 1: 大きなエネルギー依存性を示す陽子弾性散乱微分断面積

偏極陽子を用いた左右非対象性にもこれほど顕著ではないが、エネルギー依存性がある事が分かっている。

この実験データの光学模型による解析を考えている。簡単な解析では、うまくいかない。即ちポテンシャルパラメータが分かると、これから弾性散乱の各種物理量を計算する事は可能であるが、実験データからポテンシャルパラメータを確定的に結論する事は不可能である事が知られている。この問題は逆散乱問題といわれる数学的にも挑戦的な分野である。

これまでの系統的なパラメータを用いた現在までの経験では、全反応断面積の絶対値が大きすぎるだけでなく、その大きさがエネルギーと共に小さくなる。このエネルギー依存性は、どちらかというところと我々の経験とは逆である。

光学ポテンシャルの表現方法における自由度の導入という問題を取り上げる事になる。光学模型の計算過程におけるポテンシャルの表現方法の一つとして、フーリエベッセル型の手法があり、一時期は歓迎されたがそのうちに廃れていった。この手法の見直しを思い立ち、ひとまずの到達点にたどり着いた。この見直しのアイデアの一端を、ホームページに直交関数系に関する文として掲載した。このアイデアを光学模型に組み込み、パラメータの自動探索を可能とするプログラム開発が終った段階に来た。

(2) 陽子全反応断面積のエネルギー依存性測定. 新しい実験装置の準備

新しい実験装置の準備

上に記した様に (p,n) 反応閾値付近で全反応断面積が共鳴的なエネルギー依存性を示すという事実は、未だ広く認知された訳ではない。

更なる実験例を提示する事を計画した。全反応断面積測定の実験は非常に困難な実験であり、その例は微分断面積の測定に比較すると極端に少ない。非常に細かいビームを通す専用の実験コースが必要である。UTTAC 加速器の磁気分析器調整の後、組替えを実施する必要があったが、現在もその作業が続いている。過去の実験装置では、あまりにも入射ビームの操作が困難であったので、簡素化出来る部分を見つけ出し、これを簡素化する事に努力した。炭素を標的とし、標的を照射した時と標的無しでの計測との比が $1/1000$ を幾らか下回るところまでこぎ着けた。もうすこして、過去の実験例を再現するところまでいけると期待している。

(3) 重陽子のクーロンストリッピング反応

サイクロトロン発明者であるローレンスは、当時発見されて間もない重陽子を加速し、残留放射能の強度測定から (d,p) 反応断面積のエネルギー依存性は、ガモフのトンネル効果理論よりも小さいと結論した。オープンハイマーとフィリップスはこれは、入射重陽子が標的核のクーロン場で分解反応を起こし、その生成物である中性子が原子核に吸収されるという可能性を WKB 法により評価した。この可能性はその後、クーロンストリッピングという名前と呼ばれる様になった。

このクーロンストリッピングの可能性は、定量的に調べられないまま長い時間が経過し、否定的な論文が 90 年代後半に提出された。一方、著者が開発した重陽子の弾性散乱を CDCC 法を用いて計算するプログラムで重陽子の全反応断面積を計算すると、クーロン分解過程の寄与のエネルギー依存性は非常に大きく、クーロン障壁よりも低いエネルギー領域では無視し得ないという結論となった。このプログラム (ctak) は著者のホームページで公開されている。

一方、重陽子を各種軽元素に照射し、この時に放射される γ 線強度のエネルギー依存性を調べる研究がルーブル (多分美術館) に於いて行われた。この報告結果をトンネル効果で説明可能かどうか調べてみたが、著者 (青木) の計算では、トンネル効果だけで説明できるかどうかは疑わしいという結論であった。そこで、先ずクーロンストリッピングが無視できないと考えられる標的に対して実験を行う事を考えた。

標的としては、原子番号が大きく、非常に低エネルギーの中性子を吸収できる S 状態が基底状態 (又はその近く) に存在する原子核を選ぶ必要があると考え、錫 118 を選定した。この原子核では、 (d,p) 反応は発熱反応であるから、弾性散乱重陽子よりも高いエネルギーの陽子が放出されるので、粒子識別が容易である。

予備実験として、天然錫を 7.5 MeV で照射し、後方で $\Delta E \cdot E$ 型の検出系で放出粒子のエネルギー測定を行った。

図は 150 度の散乱角での測定例である。 ^{118}Sn からの (d, p) 反応による陽子と識別できるピークは検出出来た。約 40 msr という非常に広い立体角での測定である。

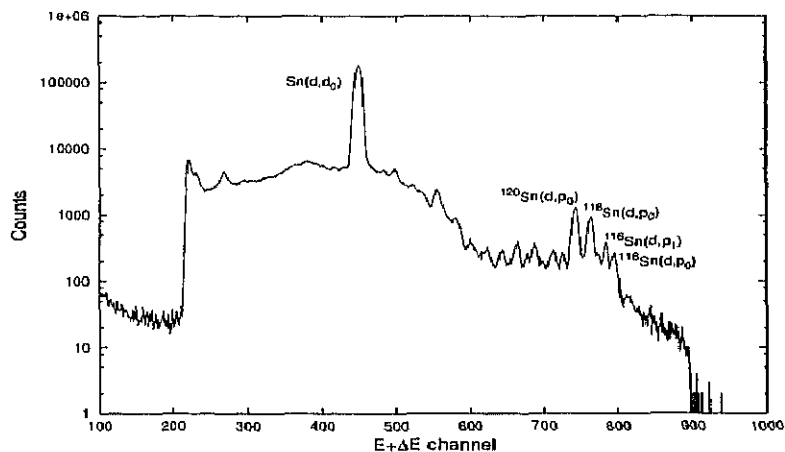


図 2: $^{nat}\text{Sn}(d,d),(d,p)$ 反応のエネルギースペクトル

今後は原子核的に分離された、出来るだけ厚い標的を用いて本実験に入る予定である。

(4) プログラム開発

クーロン分解過程を含む CDCC 法の適用範囲を広げる事は、望まれている。その一環として、これまでにクーロン波動関数を計算する副プログラムの開発を昨年度に行った。これは $1/\rho$ による漸近展開を利用するこれまでの手法を止めて、連分数展開を利用する方向への転換であった。今年度は、大きな角運動量 (> 1000) が登場する場合への対応を目的とし、Clebsch-Gordan 係数を計算する副プログラムの開発を行った。これまでは、Racah が書き下した式を用いていたが、この式では階乗を含む非常に大きな数値が登場し計算機の数値表現の範囲を大きく逸脱していた。

今年は、階乗を使用しない計算法を開発する事に目的を絞った。代案は、漸化式を使用する事である。角運動量の大きさや磁気量子数に関する 2 次元的な漸化式を、更に利用しやすい 1 次元的な漸化式とし、この利用法を工夫する事である。大きな角運動量が登場する場合には、一つだけの Clebsch-Gordan 係数を取り出して計算するというこれまでの考えを改める必要があると考える様になった。現在では、問題に応じて副プログラムを書き下すだけの経験を積んだと考えている。

次は、Racah 係数に対して同様な考えを進める段階に来たと思われる。

(5) 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計画の実験装置の一つとして、蓄積リングを提案している。蓄積リングを使ってどんな実験が可能であるか、検討を行い、その成果を 3 月 12 日の研究会で報告した [1]。不安定核の質量測定、寿命測定はドイツ GSI の ESR で行われており、これらの測定の可能性について検討している。また、蓄積リングにインターナルターゲットにおいて、RI ビームの散乱実験も検討するとともに、RI ビームではなく、原子クラスターを蓄積する提案もなされている。

(6) 陽子過剰不安定核 ^{23}Al の核磁気モーメントの測定

陽子過剰核 ^{23}Al は、陽子分離エネルギーが小さく、陽子ハロー核の候補である。中国 HIRFL の全反応断面積の実験では、異常に大きな断面積が測定された [2]。一方、この核はスピンすら決定されておらず、この核がどのようなハロー構造を持つか不明である。今回は、理研の RIPS において、この核の核磁気モーメントの測定を試みた。予備的な結果ではあるが、核スピンとして、 $5/2$ が示唆された。

(7) 入射エネルギー 90 keV での $^6\text{Li}(d,p)^7\text{Li}$ 反応の偏極分解能の測定

入射エネルギー 90 keV において、 $^6\text{Li}(d,p)^7\text{Li}$ 反応の偏極分解能 $A_y, A_{zz}, A_{xz}, A_{xx-yy}$ の測定を昨年引き続いて行った。このような低い入射エネルギーにおいて、この反応は共鳴反応成分が支配的である。同様の実験および解析が、入射エネルギー 640 および 960 keV において報告されているが [3]、これらのエネルギー領域では直接反応成分の影響が無視できない。Czerski 等の報告 [4] によると、960, 640, 90 keV の入射エネルギーにおける同反応の直接反応成分の割合はそれぞれ 50%, 30%, 13% であり、エネルギーの減少と共に直接反応成分の寄与が減少している事がわかる。また、入射エネルギー 640 および 960 keV においては入射波の p- および d-波が反応に関与し解析を複雑にする。入射エネルギーの低下は核反応の収量の急激な低下をもたらす、実験は困難になる。しかし、関与する反応経路の個数が減少することで解析がシンプルになり、ひいては反応機構の解明への重要なデータを提供すると考えている。

実験は筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門においてラムシフト型偏極イオン源 [5] に散乱曹を設置して行った。図 3 に散乱曹内部の模式図を示す。ターゲットにはアルミニウム箔に真空蒸着した炭酸リシウムを用いた。また、抵抗分割法を用いて 12 個の半導体検出器を接続し、多数の角度を同時に測定することでデータの収集効率を高めた。

測定した偏極分解能はルジャンドル多項式で以下のように展開される。

$$\sigma_0^N(\theta)A_j(\theta) = \sum_{L=m} a_j(L)P_{L,m}(\cos\theta), \quad (1)$$

ここで、

$$m = \begin{cases} 0, & \text{for } j = zz \\ 1, & \text{for } j = y \text{ and } xz \\ 2, & \text{for } j = xx - yy \end{cases} \quad (2)$$

である。図 4 は測定した偏極分解能および (l, s, J) 反応行列因子による解析の結果を示す。実線は、最小二乗法を用いて実験結果を再現する展開係数を求めた結果を表している。得られた展開係数を表 1 に示す。また、破線は、 $(l, s, J^{\pi}, l', s') = (0, 2, 2^+, 1, 2)$ の反応経路のみを考えた場合の結果を表しており、実験値を大体再現している。これはこの反応経路が主な経路であることを示している。

図 5 と図 6 に、展開係数のエネルギー依存性を示す。600 および 960 keV におけるデータは文献 [3] によるものである。まず、ベクトル偏極分解能の係数 $a_y(1)$ が、大きな 0 でない値を持っている。これは、共鳴状態または反応経路の干渉項が存在するを示している [7]。テンソル偏極分解能に関して言えば、 $a_j(1)$ と $a_j(2)$ が 0 でない値を持っている。ある 1 つの共鳴だけが、s-波によって主に励起される場合、テンソル偏極分解能の係数のうち $a_j(2)$ のみが 0 でない値を持ち、それらの係数は次の関係式を満たす。[7]

$$a_{zz}(2) = 2a_{xz}(2) = 2a_{xx-yy}(2). \quad (3)$$

表 1: ルジャンドル多項式による展開係数 $a_j(L)$

L	$a_y(L)$	$a_{zz}(L)$	$a_{xz}(L)$	$a_{xx-yy}(L)$
0		0.051 ± 0.021		
1	-0.127 ± 0.021	0.133 ± 0.033	0.113 ± 0.064	
2	-0.013 ± 0.018	0.508 ± 0.041	0.283 ± 0.052	0.317 ± 0.050
3	0.008 ± 0.014	-0.091 ± 0.049	-0.022 ± 0.042	-0.016 ± 0.030
4	-0.002 ± 0.011	0.000 ± 0.053	-0.000 ± 0.032	-0.006 ± 0.020
5	0.002 ± 0.010		-0.001 ± 0.030	0.006 ± 0.013
6				-0.001 ± 0.009

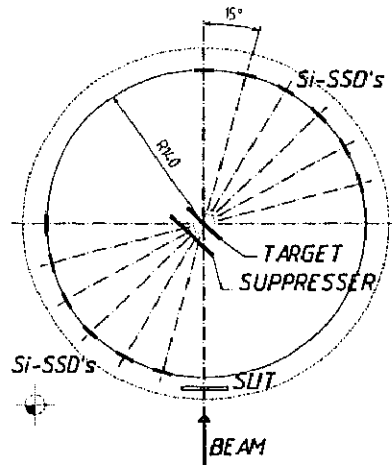


図 3: 散乱室内部の模式図。図中の寸法の単位は mm.

図 6 を見ると、90 keV において誤差の範囲で上の関係式を満たしていることがわかる。しかし、 $a_{zz}(1)$ および $a_{xz}(1)$ が 0 でない値を持っており、このことは、 2^+ 以外の共鳴状態が反応に関与していることを示唆している。

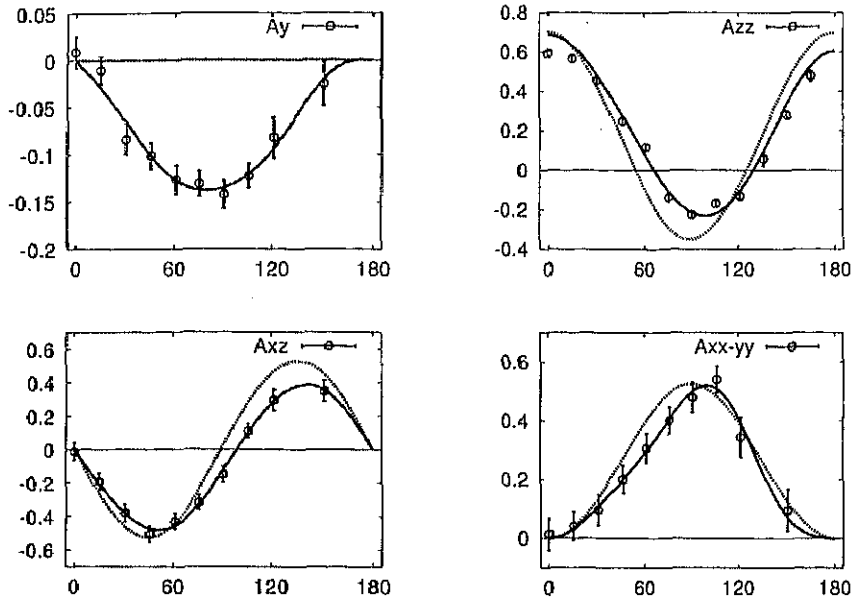


図 4: 実験で得られた偏極分解能。実線は、ルジャンドル多項式で実験結果を再現したもの。破線は共鳴過程の経路 $(l, s, J^\pi, l', s') = (0, 2, 2^+, 1, 2)$ だけを経由すると仮定した場合の理論値。

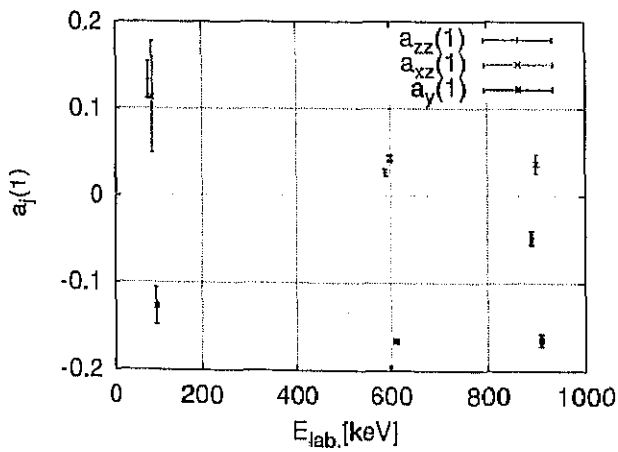


図 5: 展開係数 $a_j(1)$ のエネルギー依存性。600 および 960 keV のデータは文献 [3] によるもの。

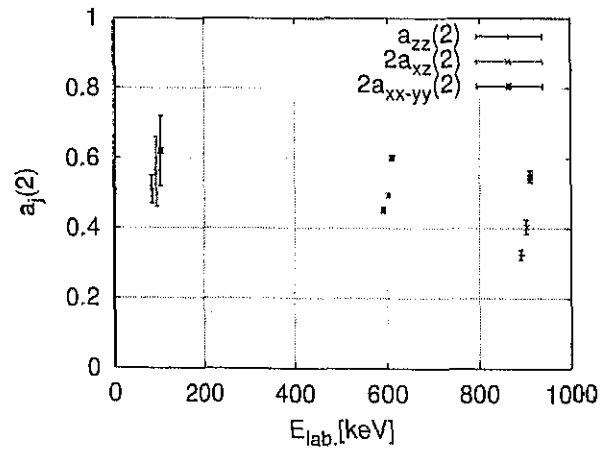
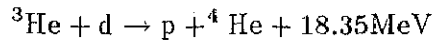


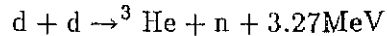
図 6: $a_{zz}(2)$, $2a_{xz}(2)$ および $2a_{xx-yy}(2)$ のエネルギー依存性。600 および 960 keV のデータは文献 [3] によるもの。

(8) 重陽子融合反応におけるスピン相関実験

重陽子融合反応は、少数核子系の核物理の研究および核融合エネルギー源の対象として重要な核反応である。我々は、これまで偏極重陽子ビームを用いて $D(d,p)T$ 反応の偏極分解能に関して貴重な実験データを提供してきた。研究の次のステップとして偏極標的と偏極ビームによる反応すなわちスピン偏極核融合の実験が強く期待されている。またスピン偏極核融合実験は、核融合エネルギー源の面からも興味もたれている。中性子発生もない最もクリーンな理想的なエネルギー源としての核融合反応は、



である。しかし ${}^3\text{He}$ と d のプラズマ中では、同時に重陽子融合反応が進行し



なる反応から中性子の放出が起こり完全にクリーンな融合炉は不可能である。その解決策として、重陽子を核偏極させる事によって $d + d$ の融合反応を抑制し、しかも ${}^3\text{He} + d$ 反応を促進させる事の可能性が指摘された。このようにスピン偏極核融合実験は、核物理のみならず将来の核融合炉設計にたいして貴重なデータを提供するものである。偏極重陽子どうしの核反応実験は、その技術的な困難さからいまだなされていない。今回我々は、偏極重陽子標的と偏極重陽子ビームによる $D(d,p)T$ 反応の実験を名古屋大学と共同で行なう事になり、昨年度名古屋大学において開発された偏極標的システム一式を加速器センターに搬入し、新しくビームコースを組み上げた。図7にスピン偏極重陽子標的装置の構造図を示す。この装置は、標的試料を極低温 (200mK) まで冷却し保持する ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ 希釈冷凍器、標的核をビーム軸に垂直な向きに偏極させるための、ヘルムホルツ型の超伝導マグネット (2.5T)、動的偏極法 (DNP) により重陽子の偏極を励起させるためのマイクロ波発振・照射部、そして、偏極度をモニターする NMR 信号検出部の 4 つの部分で構成されている。標的として厚さ $30\sim 50\mu\text{m}$ の重陽子化ポリエチレン膜を用いた。試料の大まかな偏極度は NMR 信号を検出することにより測定することができる。しかしビーム照射位置での正確な偏極度を知るには、核反応を用いる必要がある。それには無偏極重陽子ビームを用い偏極重陽子標的からの弾性散乱の左右非対称から求めることができる。今回得られた結果の一例を示す。この標的からの NMR 信号により約 10% の偏極度が得られた。この標的にエネルギー 20MeV の無偏極重陽子ビームを照射し、ビーム軸に対して左右 32.5° に設置したカウンターテレスコープ型シリコン半導体検出器によって、弾性散乱された重陽子を測定した。各検出器の立体角は 2msr である。図8に重陽子のエネルギースペクトルを示す。図中、上部の影がついているのが $D(d,d)D$ 反応からの重陽子である。エネルギー分解能は FWHM で 350keV である。重陽子弾性散乱のイールドの左右非対称から得られた偏極度は、約 10% となり NMR 信号で得られた値と一致した。今回の標的温度は、約 800mK で、目標の 300mK 以下の低温が得られなかったため、小さな偏極度しか得られなかった。今後冷却法を改善し目標としている約 30% の偏極度を実現し、スピン相関の測定をスタートさせる。

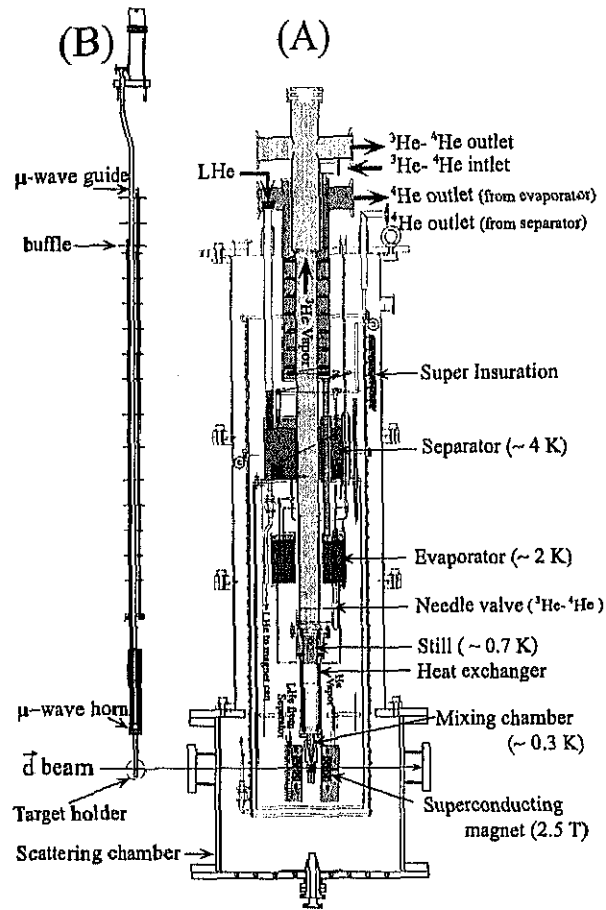


図 7: スピン偏極重陽子標的装置

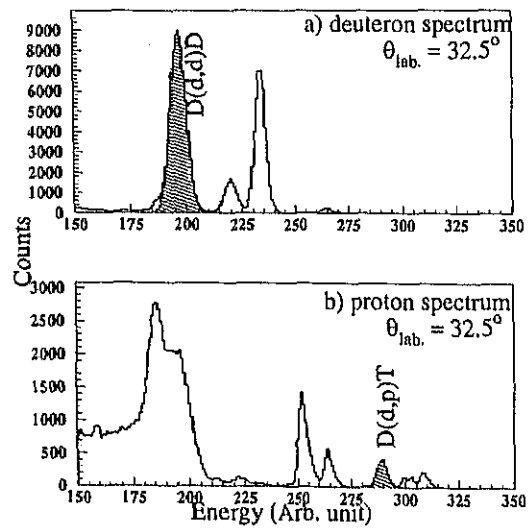


図 8: 重陽子および陽子のエネルギースペクトル

(9)UTTACにおける不安定核 ^8Li の生成

筑波大学加速器センターのタンデム加速器と既存の装置を用いて不安定核ビーム ^8Li の生成を試みた。最初不安定核ビームの生成法として、以下の方法を計画した。

タンデム加速器のターミナル部には、荷電交換のためのC-foilが設置されている。ここに重陽子標的を設置する事によって、例えば負の ^7Li ビームを入射させ、ターミナル部で、 $\text{D}(^7\text{Li}, ^8\text{Li})\text{p}$ 反応から ^8Li の正イオンを生成し、それを加速する。その量を見積もってみる。重陽子標的として、C-foilに C_6D_4 を約 $10\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 真空蒸着したものをを用いる。この重陽子標的は、ビームに対して丈夫である。ターミナル10MVで、入射 ^7Li ビーム約 $0.5\mu\text{A}$ とする。タンデム出口で、エネルギー約40MeVの $^8\text{Li}^{3+}$ が、毎秒約10k程度得られることになる。このビームをエネルギー分析し、実験室に導く。イオン輸送系において、電場と磁場を用いているので、他の核種の混ざりの無いビームが期待される。しかし現在の加速器センターのタンデムでは、ターミナル電圧は、タンデム出口に接続されている、エネルギー分析電磁石のスリット電流によってコントロールされている。したがって今回のような極めて強度の弱いビームではスリットコントロールは機能せず、安定してターミナル電圧を保つことは不可能である。また既存のGVMコントロール系においてもターミナル電圧を安定に保つことは難しく現時点では、この方法で安定したビームを得ることは困難であると考え、次のような通常用いられている方法によって ^8Li ビームの生成を行なった。 ^7Li ビームを40MeVに加速し、エネルギー分析電磁石出口スリット後方に厚さ約 $1.8\text{mg}/\text{cm}^2$ の CD_2 標的を設置し、 $\text{D}(^7\text{Li}, ^8\text{Li})\text{p}$ 反応から ^8Li を生成しこれをビームラインに導く。エネルギーは約38MeVである。 ^8Li ビームには、多数の ^7Li ビームがバックグラウンドとして混入しており、これらを振り分ける必要がある。既存の装置系でこの分離が期待できるのは、QDQマグネットより構成されているコースである。このコースは2回散乱専用コースとして設計されたもので、反応陽子の偏極度の測定が行なわれた。このスペクトロメーターの出口に小さな真空容器を接続し内部にSi半導体検出器を設置し分析されたビームのエネルギーを測定した。測定されたエネルギースペクトルを図9に示す。 CD_2 標的に入射した ^7Li ビーム90nAに対して毎秒約1.5kの ^8Li がQDQスペクトロメーターを通過してきた。図9に示すように、このとき ^7Li の混入は約10%であるが実験として十分使用可能である。 CD_2 標的はビーム分析電磁石室に設置されているので、実験室での中性子等のバックグラウンドはほとんど無いものと思われる。

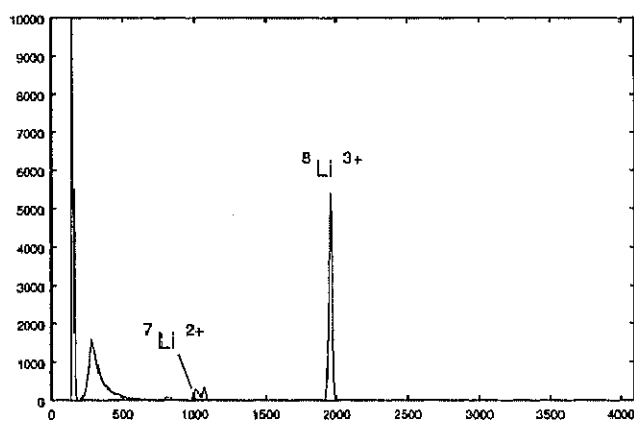


図9: QDQ スペクトロメーター通過後のスペクトル

参考文献

- [1] URL: <http://www.tac.tsukuba.ac.jp/uttac/workshop2004/>
- [2] H.Y.Zhang et al., Nucl. Phys. A 707 (2002) 303.
- [3] M.Glor, H.P.Naegele, G.Morgan, R.Neff, H.Rudin and F.Seiler, Nucl. Phys. A286 (1977) 31-41
- [4] K.Czerski, H.Bucka, P.Heide and T.Makubire, Phys. Rev. Lett. B 307 (1993) 20-24
- [5] Y.Tagishi and J.Sanada, Nucl. Instr. and Meth. 164 (1979) 411.
- [6] Gerald.G.Ohlsen, J.L.McKibben, G.P.Lawrence, P.W.Keaton, Jr., and D.D.Armstrong, Phys. Rev. Lett. 27 (1971) 599.
- [7] F.Seiler, Nucl. Phys. A187 (1972) 379

[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) 重水・軽水電解液切り替え時の中性子発生現象の追実験 (高エネルギー加速器機構との共同研究)

はじめに：パラジウムを陰極とし白金を陽極として、アルカリ重水電解液中での電気分解を軽水電解液に急速に切り替えた直後に中性子が発生が報告されている [1]。実験の再現性は5割以上をもち、さらに別グループにより成功例が報告されている [2]。何らかの測定ミスによる報告と推測するが、実験的事実であれば重大であるので先例に倣い実験の再現を試みた。

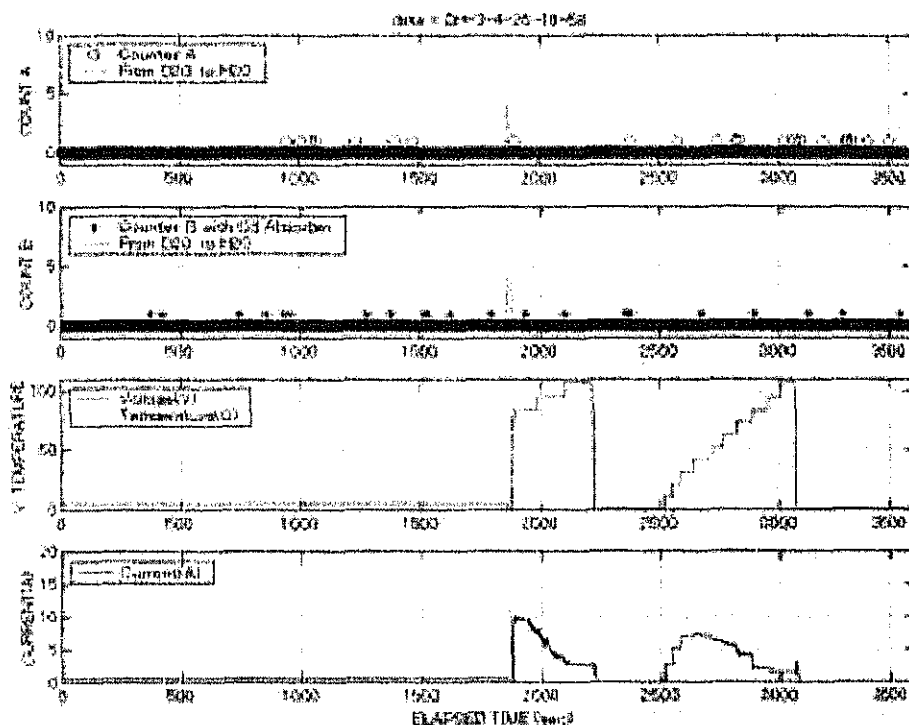


Fig. 1.

実験方法：直径が1 mmで長さが30 mmのパラジウム金属棒を、テフロンを被覆してある銅の導線に接続して陰極とする。白金をコートしたチタン製の金網に導線を繋ぎ陽極とした。重水 (Isotec, 99.9 Atom % D) 400cc に加熱し無水化した K_2CO_3 を加えて0.2 M溶液を作り、重水電解液とした。同様にして軽水電解液を1000cc作成した。コルツとプラスチックの容器に電解液をそれぞれ入れて、並立させ陽極を配置した。2本のヘリウム3中性子検出器 (Reuter-Stokes, 1.5×10^{-2} 中性子絶対検出効率) にモデレーターをつけ、容器に最接近させて横に積み重ねた。全体を20 cm以上のパラフィンとプラスチック板で囲み中間に0.5mm厚のCdを入れ、外来BKG中性子を減少させた。まず重水中で3時間から24時間の電気分解を行なう。陰極Pdを重水から引き抜いて軽水中へ移行し、電解を続行する。移動後の数秒から60秒の間に中性子の発生が期待された。2秒間隔で、検出中性子数、電解の電圧、電流、電解液の温度をモニターした。図の中央部に移行時が示

されている。

結果：予備実験を含み15例の測定を行ったが、移行後の短時間に中性子が明確に増加した事は今のところ無い。条件を変えて更に試行してみる予定である

(2) 金クラスターへの珪素の吸着

最近新しい金属-珪素クラスター、すなわちタングステンの周囲を珪素が取り囲む形状のクラスター、がシラン分子とタングステンクラスターとの反応によって生成されることがわかってきた。[3]。そのようなクラスターは、近い将来、ナノ加工の素材として活用され得る。これまで、実験[4]も理論計算[5]も主に金属単原子が珪素クラスターに内包される構造について研究してきた。一方、金属クラスターに珪素が内包される構造についての研究は実験[6]の数が少ないだけでなく、理論計算もほとんど行われていない。これまでのところ、そのような珪素内包クラスターについては、その基本的な形成機構についてさえ全く調べられていない。そこで、その基本的な形成機構を理解するため、珪素原子と金属クラスターの反応の分子動力学計算を行った。この計算は、近い将来行う予定のシラン分子と金属クラスターの反応の予備的研究としても大きな意味を持つ。計算は、金クラスター Au_n ($n = 3 - 14$) とタングステンクラスター W_n ($n = 3 - 14$) に対して行った。

分子動力学では、多体系の運動方程式を追跡するのに、ベルレ法[7]を用いた。時間のステップ幅は $2 fs$ にとった。また、観察時間は $800 ps$ にとった。この時間は系が安定状態に到達するのに十分な長さの時間である。一般に、分子間の有効ポテンシャルは全系の運動の進行に対して重要な役割を担う。ここでは、第一原理計算の結果導かれた有効ポテンシャルを採用した。金-金相互作用にはグプタポテンシャル[8]、タングステン-タングステン相互作用にはモースポテンシャル[9]を用いた。また、その他の相互作用にはレナードジョーンズポテンシャルを用いた。

具体的には、以下の通りである。

- レナードジョーンズポテンシャル $V_{LJ} = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$

- グプタポテンシャル $V_G = \sum \left[\epsilon_0 \sum_{i \neq j} e^{-p \left(\frac{r_{ij}}{r_{0n}} - 1 \right)} - \sqrt{\xi^2 \sum_{i \neq j} e^{-2q \left(\frac{r_{ij}}{r_{0n}} - 1 \right)}} \right]$

- モースポテンシャル $V_M = D \left[e^{-2\lambda(r-r_0)} - 2e^{-\lambda(r-r_0)} \right]$

ここで ϵ , σ , ϵ_0 , ξ , p , q , D , λ は物質によって異なるパラメータである。

まず、金のクラスターに珪素原子を吸着させる反応のシミュレーションをした。クラスターサイズは3から14で試した。珪素原子を吸着させたときの珪素原子の束縛エネルギーを求め、状態の安定性についてサイズ依存性を調べた。Fig. 2 に結果を示す。横軸に金のクラスターサイズ、縦軸に珪素原子の束縛エネルギーがとってある。この図からサイズが6以下ではサイズが増加するにつれて束縛エネルギーが増加してゆくが、6以上ではほとんど一定になることがわかる。

次にタングステンのクラスターに珪素原子を吸着させる反応のシミュレーションをした。クラスターサイズは3から14で試した。珪素原子を吸着させたときの珪素原子の束縛エネルギーを求め、状態の安定性についてサイズ依存性を調べた。Fig. 3 に結果を示す。横軸にタングステンのク

ラスタサイズ、縦軸に珪素原子の束縛エネルギーがとってある。この図からサイズが変化しても束縛エネルギーがほとんど一定であることがわかる。

Fig.4にサイズが6の金クラスターに珪素原子を吸着させたときの終状態の幾何学的構造を示す。珪素原子が金クラスターの内側に入り、金原子に囲まれることによって大きな束縛エネルギーを得て安定していることがわかる。一方、Fig. 5にサイズが6のタングステンクラスターに珪素原子を吸着させたときの終状態の幾何学的構造を示す。珪素原子はタングステンクラスターの外側に付着する。したがって、この場合は珪素原子に接触するタングステンの原子数はクラスターサイズによらず、ほぼ一定である。その結果、珪素原子の束縛エネルギーはクラスターサイズによらず不変になる。

本研究の結果、これまで予想されていなかった物質、すなわち珪素原子を内包したコア-シェル構造を持つ金-珪素2成分クラスター、の創成の可能性が初めて示唆された。珪素原子を吸着させたときの金クラスターとタングステンクラスターの大きな違いはポテンシャルの違いに由来すると結論づけられた。

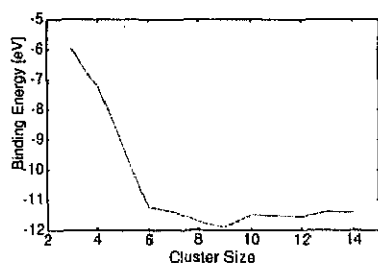


Fig. 2. 金クラスターのサイズと珪素原子の束縛エネルギーの関係

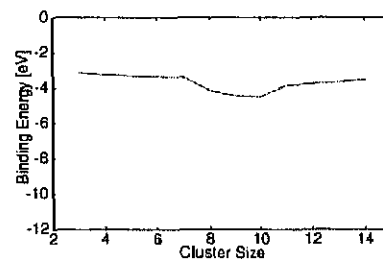


Fig. 3. タングステンクラスターのサイズと珪素原子の束縛エネルギーの関係

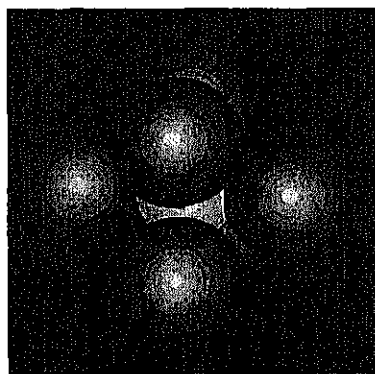


Fig. 4. 金クラスターのサイズが6のときの珪素原子の吸着の様子(薄色が珪素)

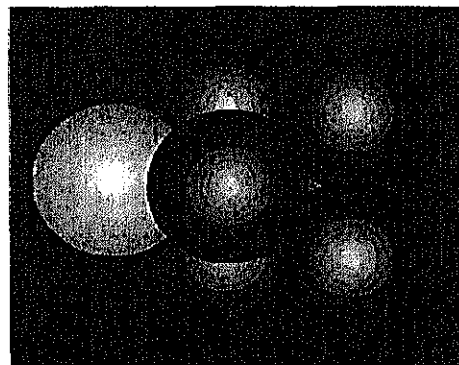


Fig. 5. タングステンクラスターのサイズが6のときの珪素原子の吸着の様子(薄色が珪素)

(3) クラスタ衝撃による金属表面からの2次電子放出

ダイノードに金属銅標的を用いた所謂ダリタイプ粒子検出器 [10] と同様の配置で、クラスタ衝撃による金属表面からの2次電子放出を測定した。最適の配置はイオン輸送シミュレータ *SIMION* [11] を用いて決定した。サイズ選別された Cu_n ($n = 1, 2, 3, 5, 7$) クラスタをバイアス電圧 (15, 20, 25, 30 kV) で加速し、ダイノードに当てた。入射角度は45度であった。放出された2次電子は、同じバイアス電圧で加速され、半導体検出器 (SSD) へと導かれた。放出統計法 [12] を用いて放出2次電子の個数分布を評価した。

それぞれエネルギー E_0 を持つ n 個の2次電子が SSD に入射した場合、SSD に誘起されるエネルギー信号は全エネルギー nE_0 に比例するはずである。しかし残念ながら、信号は後方散乱電子 [13] の存在によって大きく影響を受ける。その結果、SSD の応答関数 $F_n(E)$ は $(n+1)$ 個の正規分布関数の和で表される。ここで、各項は後方散乱電子数 $0-n$ に対応する。そこで、測定したスペクトルに対しては、多重正規関数フィッティングを行う必要が出てくる。SSD のプロファイル関数は

$$S(E) = \sum_{n=1}^N Y_n F_n(E)$$

で与えられる。ここで、 Y_n は2次電子の収量である。フィッティングによって求めた Y_n ($n = 1-N$) が実際に放出された2次電子の個数分布を構成する。さらに、このようにして求めた Y_n をポリヤ分布でフィッティングする。ここで、ポリヤ分布は

$$P(n; \mu, b) = \frac{\mu^n}{n!} (1 + b\mu)^{-n-1/b} \prod_{i=1}^n (1 + (i-1)b)$$

で与えられる。 μ は平均放出電子数 γ と同じである。 b はポリヤパラメータと呼ばれる。

図6にクラスタの速度と換算 γ 、即ち入射1原子あたりの γ 、の相関を示す。 γ は2つの寄与、(1) ポテンシャル放出 [14] と (2) キネティック放出 [15]、からなるが、測定したエネルギー領域ではキネティック放出が支配的である。ここで γ についての和則が正しいとすれば [13][16]、すべてのデータ点は Parilis-Kishinevskii 理論通り $f(v) = k \tan^{-1} \alpha(v - \beta)$ という曲線上に載るはずである。しかし、現実にはそうになっていないようである。係数 k は一定ではなく、むしろ

$$k(n) = k_0 n^\tau$$

のように抑制因子 (負の集団効果) を伴っていると考えたほうがよさそうである。データを最小2乗フィッティングした結果、パラメータ k_0 と τ はそれぞれ 0.154 と -0.20 と決定された。このように改良された和則により、実験データが非常によく再現された (図6の曲線参照)。図7に換算 γ とポリヤパラメータ b の相関を示す [17]。パラメータ b は換算 γ の増加とともに増加する。

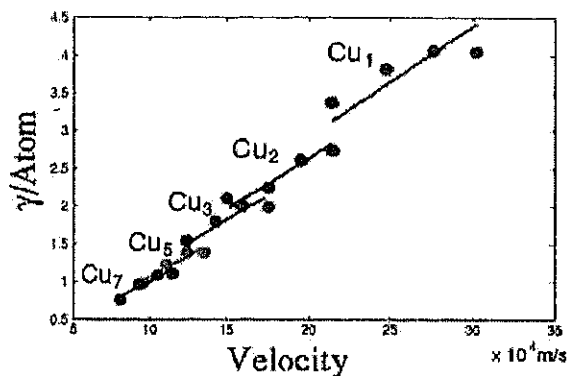


Fig. 6. クラスターの速度と換算 γ の相関

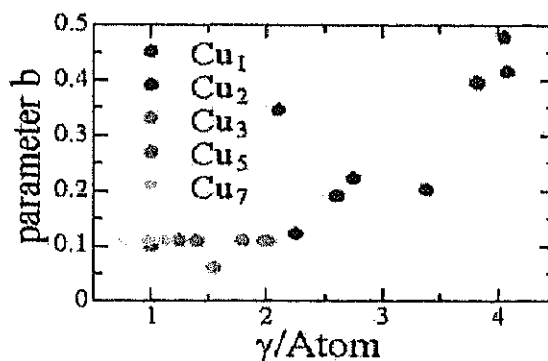


Fig. 7. 換算 γ とポリパラメータ b の相関

(4) 多価電化イオンと C_{60} との間の電荷移行反応の価数 - および速度 - 依存性

多価電化イオン (HCI) が物質表面に接近すると、自身の持つ深いクーロンポテンシャルによるオーバーザバリアーイオン化によって、表面の電子を剥ぎ取る。それと同時に、その付近に大きなエネルギーを放出する [18]。本研究では、 C_{60} を標的にして、 HCI と C_{60} との間の電荷移行を観察した。そのような観察は、物質表面に対して HCI が引き起こすイオン化過程の全容を、単原子に対して HCI が引き起こすイオン化過程と関連させて理解するために決定的な役割を果たすと期待される。ここでは特に、 HCI の価数と速度を変化させて系統的に電荷移行の観察を行った。

実験セットアップは次の通りである。 C_{60} 標的については、 400°C に加熱された噴出し源からの分子ビームを用いた。 HCI ビームを筑波大学加速器センターの ECR イオン源 *SHIVA* から取り出し、飛行時間 (*TOF*) 質量分析器の引き出し電極の間にある相互作用領域まで導き、そこで C_{60} ビームと交差させた。 HCI ビームには、 Ar^{q+} ($q = 4 - 12, E = 5q - 15q[\text{keV}]$) と、 Xe^{q+} ($q = 6 - 30, E = 5q - 15q[\text{keV}]$) を用いた。 HCI と C_{60} との衝突によって生成された二次イオンを *TOF* 質量分析器へと引き出し、質量 - 電荷比にしたがって分析した。図 8 は典型的な *TOF* スペクトルで、 $60 \text{ keV } Xe^{12+}$ を入射したときのものを示す。図では、 C_{60}^+ 、 C_{60}^{2+} 、...、 C_{60}^{6+} に対応するピーク構造が明瞭に観察される。

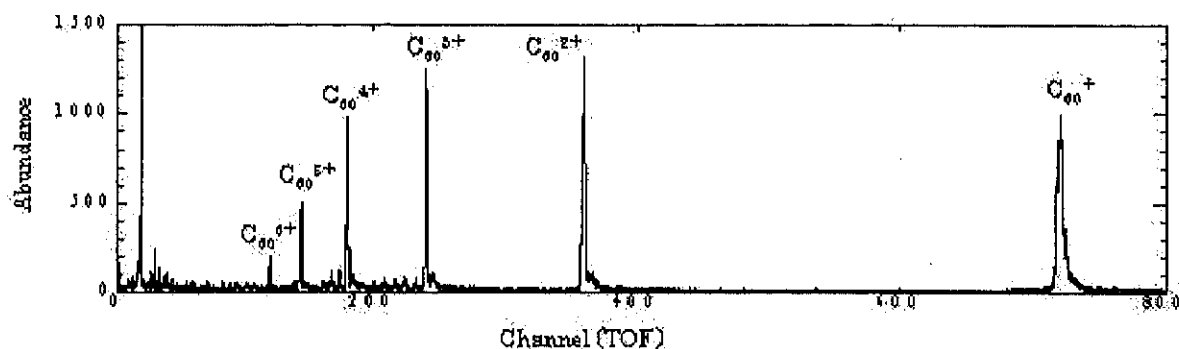


Fig. 8. 典型的な *TOF* スペクトル; $60 \text{ keV } Xe^{12+}$ 入射の場合

それぞれの C_{60}^{n+} ($n = 1 - 6$) の収量 $Y(n)$ は、対応するピーク構造を正規関数フィッティングし

て求めた、 C_{60} イオンの平均電荷 Q を

$$Q = \frac{\sum n^2 Y(n)}{\sum n Y(n)}$$

で計算した。図9に平均電荷 Q と入射 HCI の価数との相関を示す。比較のため、古典的オーバーザバリアー (COB) 模型 [19] の計算結果も示す。図から、入射 HCI の価数が大きいと平均電荷 Q も大きくなり、 COB 模型の計算結果に近付くことがわかる。平均電荷 Q と入射 HCI の速度との相関については、入射 HCI の速度が小さいほど平均電荷 Q が大きくなり、 COB 模型の計算結果に近付くことがわかった。同様の傾向は、金属表面と HCI の間の電荷移行反応でも観察されており、 C_{60} 表面と金属表面とのある種の類似性を示唆している。

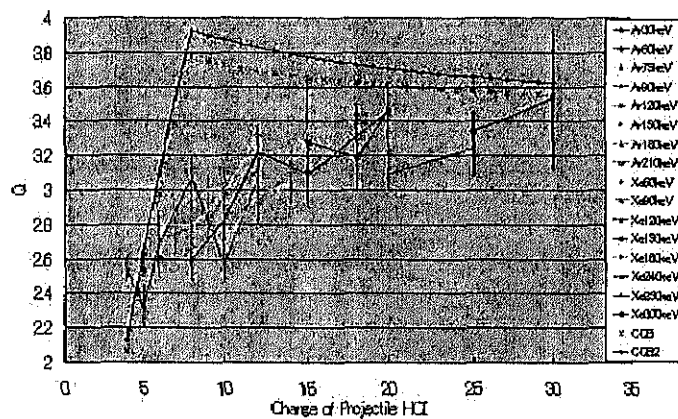


Fig. 9. 平均電荷 Q と入射 HCI の価数との相関

(5) 陽子弾性散乱同時計数法による鉱物試料の水素分析

現在加速器センターにおいて開発中の陽子弾性散乱同時計数法は、20 MeV の陽子ビームを厚さ 0.2mm の標的に照射し、散乱陽子と反跳陽子を同時に検出して標的中の水素濃度を測定する非破壊分析法である。マイクロビーム照射装置に検出器を組み込み、顕微鏡で観察しながら照射するシステムが構築された。照射サンプルとして、大きさ約 3 ミリメートルの石英を用い、これを 2 枚のマイラーフィルムで挟み真空中に保持する。このマイラーの水素も同時に測定できる為、マイラー中の水素量を標準値とする事で、測定精度が非常に向上した。このターゲット保持フィルムとして、他に放射線耐久性が大きいカプトンも挙げられる。しかし、カプトンは黄色であり、無色透明なマイラーに比べ顕微鏡による観察像が不鮮明である欠点がある。一方、マイラーの耐久性を調べた結果、やはりカプトンよりは劣るが、一回 50nC の照射ではほとんど散乱水素の数は変化しない事を確認した。

この測定方法では物質中を陽子が通過する際の阻止能が散乱の前後で大きく異なる為、ターゲット中の厚さ方向の情報を得る事ができると考えられる。エネルギースペクトルを変換して水素濃度を得る為の基礎データとして、図 10(a) に示す様に、 SiO_2 内に均質に水素があると仮定して散乱

陽子のスペクトルを計算した。このスペクトルのチャンネル数が厚さに対応するような変換式を導き図 10(b)を得た。無水ガラスとマイラーの多層サンプルにビームを照射し得られたスペクトルを図 11(a)に示す。このチャンネル数を厚さに対応する様に変換し図 11(b)を得た。さらに、二回散乱を指数関数で補正し図 11(c)を得た。

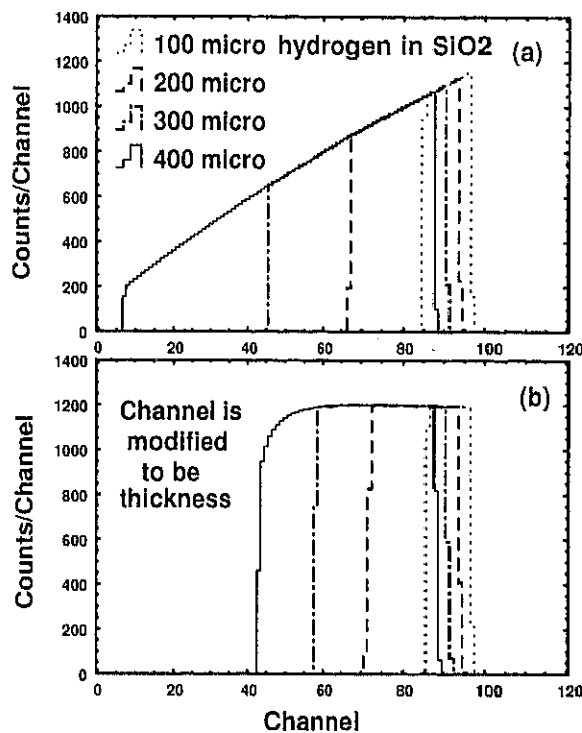


Fig. 10. (a) SiO_2 内に均質に水素があると仮定し 45° 方向に散乱された陽子のエネルギー分布の計算結果、(b) 阻止能の変化を考慮し、エネルギー分布から水素濃度を求めた結果

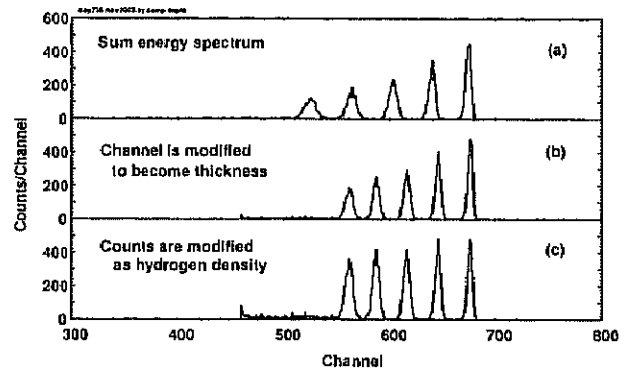


Fig. 11. (a) 多層膜の実験結果 (b) 阻止能を考慮した変換の結果 (c) 2回散乱を考慮した変換の結果

(6) 原子クラスターの高エネルギー加速研究 (物理工学系との共同研究)

高速原子クラスターの照射効果は、単原子イオンと比較して非線形であり、物理的にもまた材料科学の研究においても興味深いものである。高速原子クラスターの照射によって固体内に誘起される衝突関連現象の特徴は、クラスター原子数 n についての非線形効果という形をとり、単原子イオンでは実現されない衝突過程の知見をもたらすと考えられる。クラスター照射によるスパッタリング、損傷等の核的阻止能に起因する効果が従来の単原子イオンにおける常識とは相当違うことに対応して、電子的阻止能すなわち固体電子系へのエネルギー移行に起因する現象にもクラスター特有の効果が現れることが最近報告されている。高速原子クラスターの照射では、初期条件としての励起・電離過程が単原子イオンと異なることは確実であり、それらの素過程の解明によって照射誘起効果の新たな展開がもたらされる可能性が高い。我々の研究グループでは、1MV タンデトロン加速

器により1原子当りのエネルギーを揃えて(240keV/atom)、 B_n クラスタ、 C_n クラスタ、 Al_n クラスタ、 Si_n クラスタ及び Cu_n クラスタの MeV エネルギー加速に成功した。表1に加速に成功した原子クラスタを示す。加速システムの改良を行っており、高速ビームパルス化装置とビーム減衰器の開発と 2° 方向ビームラインの整備を進めている。新たなビームラインでは、 Au_n クラスタ及び C_{60} フラーレンの加速研究を計画している。現在、高速原子クラスタ照射による2次電子分光の研究を実験・理論両面から進めている。最近の成果として、固体に入射した多原子系が固体電子系の誘電応答よりも早い相関電離を起こしていることを見出した。Fig. 12に示すような前段加速方式(試料に-50eV程度のバイアス进行ける)によりクラスタ照射による誘起2次電子分光スペクトルを測定した。電子スペクトル測定時のビーム電流値は10pA程度に安定調整している。Fig. 13に規格化された C_n クラスタ誘起電子スペクトルとスペクトル比を示す。電子スペクトルの縦軸は一定の入射原子数で規格化されている。Fig. 13(下)は、クラスタ誘起による電子スペクトルを $n=1$ のスペクトルで規格化したものである。いずれの場合も低エネルギー電子放出におけるクラスタ効果が従来の実験よりも明確に現れることがわかった。電子エネルギー0-5eVにおけるスペクトル比はクラスタ電離を特徴づけるものと考えられる。なお、電子エネルギー0付近の電子は固体中でフェルミレベルから約5eV(仕事関数)のエネルギーを持っていたはずであるから、その脱出長は約70Åと見積られる。高速クラスタ誘起2次電子放出の非線形性はelectron-sweep効果、すなわち固体に入射した多原子系が固体電子系の誘電応答よりも早い相関電離を起こしていることに起因する可能性が高いことを実験データは示している。このことは高速クラスタ照射によって、固体中に高電離ナノ領域が形成されることを意味する。

コース	Energy		$^{11}B_1^+$	B_2^+	B_3^+	B_4^+
15*	29.1 keV/u	320 keV/atom	●	●	●	●
	43.6 keV/u	480 keV/atom	●	●	●	●

コース	Energy		$^{12}C_1^+$	C_2^+	C_3^+	C_4^+	C_5^+	C_6^+	C_7^+	C_8^+
11*	20 keV/u	240 keV/atom	●	●	●	●	●	●	●	●
	30 keV/u	360 keV/atom	●	●	●	●	●			
	42 keV/u	504 keV/atom	●	●	●	●				

コース	Energy		$^{27}Al_1^+$	Al_2^+	Al_3^+	Al_4^+
11*	8.80 keV/u	240 keV/atom	●	●	●	●

コース	Energy		$^{28}Si_1^+$	Si_2^+	Si_3^+	Si_4^+
11*	8.57 keV/u	240 keV/atom	●	●	●	●

コース	Energy		$^{63}Cu_1^+$	$^{63}Cu_2^+$
15*	7.62 keV/u	480 keV/atom	●	●

表1. 1MV タンデトロン加速器による原子クラスタ加速

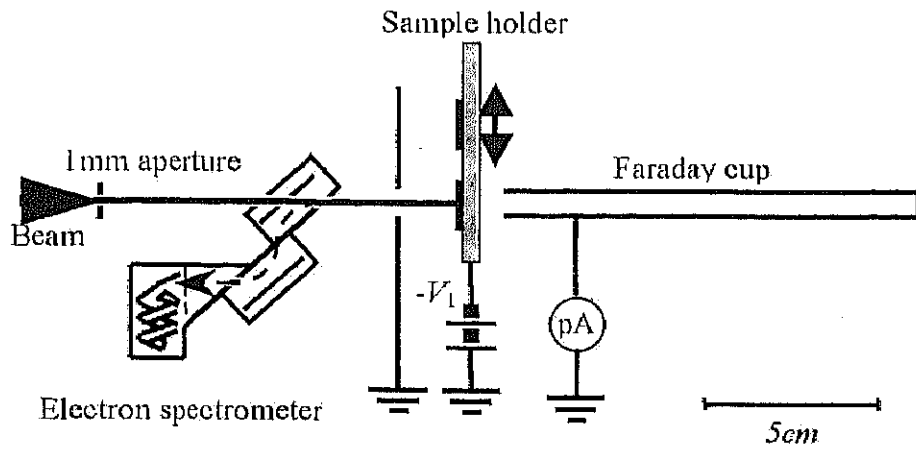


Fig. 12. 前段加速によるクラスター誘起2次電子測定系

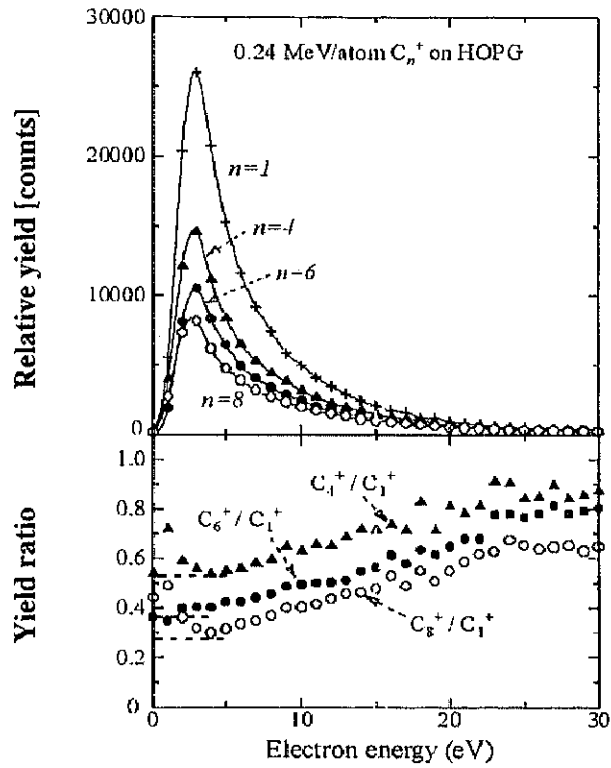


Fig. 13. 規格化された C_n クラスター誘起電子スペクトルとスペクトル比

(7) 小型 2.45GHz-ECR イオン源の開発 (KEK との共同研究)

レーザーイオン源により固体試料を抽出して、ECR(Electron Cyclotron Resonance) プラズマで多価イオンを生成する新しい型のイオン源を開発している。また 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使用予定である。不安定核の荷電増倍装置、 C_{60} 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を考えている。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 領域の磁場を形成する。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。プラズマ容器の内径は 32mm、長さは 72mm である。イオン源本体の寸法は、 $\phi 130 \times 132 \text{mm}^3$ と小型な設計となっている。Fig. 14 に 2.45GHz-ECR イオン源の断面図を示す。また性能表を表 2 に示す。

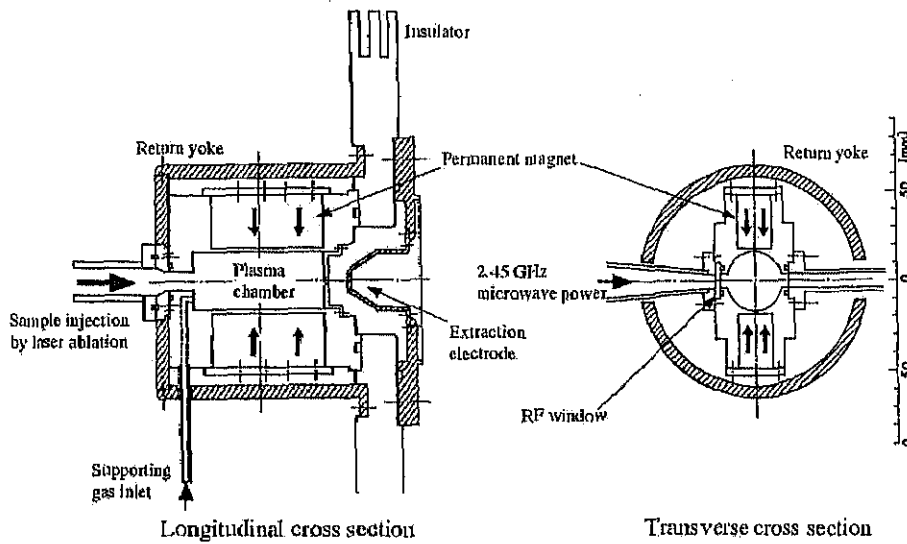


Fig. 14. Cross-sectional view of the compact 2.45 GHz ECR ion source.

Extraction voltage	1-10	[kV]
Beam current density	> 10	[mA/cm ²]
Beam aperture	ϕ 2-3	[mm]
Normalized beam emittance	$\sim 0.6 \pi$	[mm mrad]
ECR zone	ϕ 19 \times 36	[mm ³]
Plasma chamber	ϕ 32 \times 72	[mm ³]
Outer size of main body	ϕ 130 \times 132	[mm ³]
2.45GHz microwave power	< 1.3	[kW]

表 2 Main characteristics of the compact 2.45 GHz ECR ion source.

(8) 加速器質量分析法 (AMS) による環境及び地球科学研究

筑波大学研究基盤総合センターの 12UD タンデム加速器を利用した加速器質量分析法 (AMS) は、 ^{36}Cl 及び ^{26}Al 測定が可能なシステムである。 ^{36}Cl は半減期が 3.01×10^5 年あり、自然界には $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} \sim 10^{-14}$ のレベルで存在している。筑波大学 AMS は微量な試料から高感度で迅速に ^{36}Cl を検出できる特徴を持っている。2003 年度は、新しいガス検出器の開発を行った。筑波大学 AMS を用いて実施された研究テーマと内容は、以下の通りである。

1. 東海村及び日本各地域の土壌中 ^{36}Cl 測定 (化学系及び環境科学研究科との共同研究)

微量な放射性核種の ^{36}Cl が、どのように環境中で挙動しているか調査を行っている。測定結果は Fig 15 に示すように $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 比で、東海村原子力施設周辺が高く、離れるにつれて小さくなっていることを示した。最高値で 2.7×10^{-11} とかなり高い値を示し、日本各地の平均値 (バックグラウンド、 4.7×10^{-13}) に比べ ~ 100 倍程度も高いことが判った。原子力施設から何らかの原因による放射性物質の漏洩が、極めて微弱ではあるがあったものと思われる。

2. 各種加速器施設におけるシールドコンクリート中の ^{36}Cl 濃度測定 (KEK 放射線科学センターとの共同研究)

各種加速器施設のシールドコンクリート中に生成される ^{36}Cl 濃度の深度分布を、AMS により測定している。今後、本格的に始まる原子力施設におけるクリアランスレベルの議論において、この ^{36}Cl 測定法は重要な評価方法となっている。

2003 年度は、東京大学原子核科学研究センター SF サイクロトロン、KEK 田無分室 1.3GeV 電子シンクロトロン、東北大学原子核理学研究施設 300 MeV 電子リニアック、高エネルギー加速器研究機構 12 GeV 陽子シンクロトロンの 4 施設のシールドコンクリートまたは床下コンクリートをボーリングし、深度方向の $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 比分布 (深度分布) を測定した。 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 比の最大は東北大核理研 300MeV リニアックで 3×10^{-8} となった (Fig 16)。比放射能として求めると $2 \times 10^{-3} \text{Bq/g}$ となり、 ^{36}Cl のクリアランスレベル (2Bq/g) の $\sim 1\%$ 程度であり、加速器施設の遮蔽コンクリートの廃棄にはなんら問題の無いことが判った。

3. 南極落下隕石の年代測定 (東京都立大学宇宙化学研究室との共同研究)

隕石の金属相及びケイ酸塩相中の ^{36}Cl 分析手法を確立した。

4. 地下水トレーサーへの応用 (化学系及び環境科学研究科との共同研究)

5. ^{26}Al 測定による天体核物理 (中国原子能研究院との共同研究)

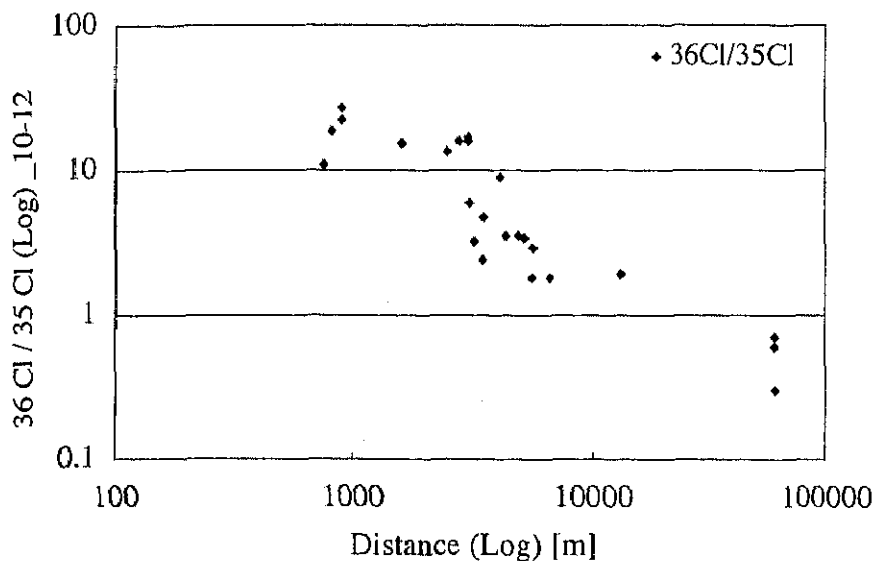


Fig. 15. 東海村原子力施設からの直線距離と $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 比

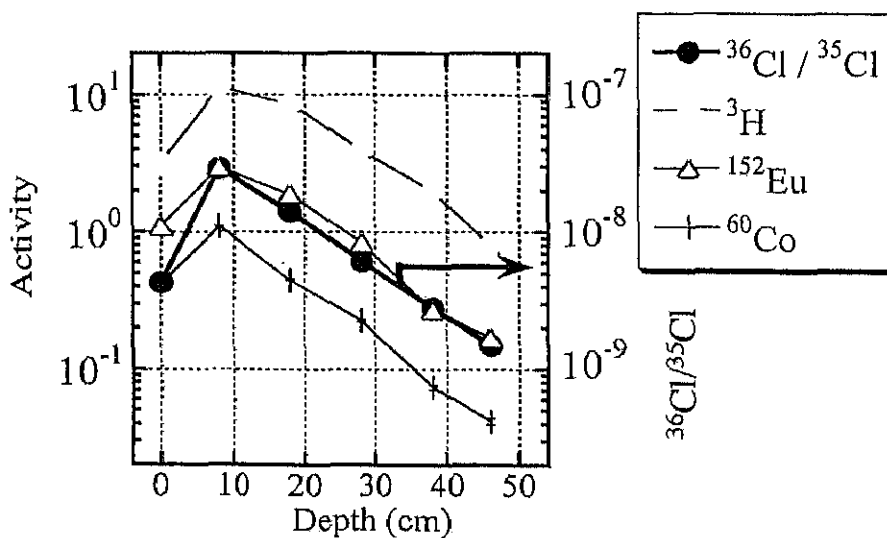


Fig. 16. 東北大核理研 300MeV リニアック遮蔽コンクリートの深度方向 $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 比分布 (深度分布)

(9) 高速重荷電粒子の物質中での荷電平衡到達厚さ (物理工学系との共同研究)

物質中での入射重荷電粒子の荷電平衡到達厚さ T_{eq} を見積もることは、加速器科学や原子核実験での研究上重要な意味を持つ。例えば、重イオン加速器のビーム輸送系に設置する荷電変換膜厚

さの最適値についての見積りは、ビーム輸送効率の向上に寄与する。荷電変換の為の炭素膜について、殻構造に基づく T_{eq} の系統的な傾向が発見された。

References

- [1] Tadahiko MIZUNO, Tadashi AKIMOTO, Tadayoshi OHMORI, Akito TAKAHASHI, Hiroshi YAMADA and Hiroo NUMATA: Jpn. Appl. Phys. **40**(2001)L989.
- [2] Takayuki Ohya, Yuji Isobe and Akito Takahashi: JCF4 ABSTRACTS,15.
- [3] A. Negishi et al., Chem. Phys. Lett. **388**(2004)463.
- [4] M. Ohara et al., Chem. Phys. Lett. **371**(2004)490.
- [5] J. Lu and S. Nagase, Phys. Rev. Lett **90**(2003)115506.
- [6] Y.G. Byun et al., J. Am. Chem. Soc. **100**(1996)14281.
- [7] L. Verlet, Phys. Rev. **159**(1967)98.
- [8] F.Cleri and V.Rosato, Phys. Rev. Lett **56**(1986)616.
- [9] K.C. Mundim et al., J. Mol. Str. **539**(2001)191.
- [10] N.R. Daly, Rev. Sci. Instr. **31**(1960)264.
- [11] SIMION3D, Idaho National Engineering Laboratory Chemical Materials & Processes Department, Lockheed Idaho Technologies Company.
- [12] L.A. Dietz and L.C. Sheffield, Rev. Sci. Instr. **44**(1973)183.
- [13] G. Lakits, F. Aumayr and H. Winter, Rev. Sci. Instr. **60**(1989)3151.
- [14] L.M. Kishinevskii, Rad. Effects **19**(1973)23.
- [15] F. Thum and W.O. Hofer, Surf. Sci. **90**(1979)331.
- [16] Hasselkanp et al., Particles Induced Electron Emission II, Springer-Verlag, Berlin(1992).
- [17] A. Itoh et al., Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. **B193**(2002)626.
- [18] R. Morgenstern et al., in Proceedings of XXI International Conference on the Physics of Electronic and Atomic Collisions, Sendai, Japan, 1999, AIP Conf. Proc. No.500, edited by Y. Itikawa et al. (AIP, New York, 2000).
- [19] A. Baray et al., Nucl. Inst. and Meth. **B98**(1995)184.
- [20] Q. Yan et al., Phys. Rev. **A54**(1996)641.

【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) 粒子識別された v_2 とクォーク数によるスケーリング

図1 (左図) は、PHENIX 実験における飛行時間測定器を使って識別されたハドロン (π^{+-} 、 K^{+-} 中間子、陽子、反陽子、重陽子、反重陽子) ($|\eta| < 0.35$) 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 [1]。ここで、スタートタイミング、トリガー及び、衝突中心度測定を兼ねるビーム・ビーム検出器 ($3 < |\eta| < 4$) を用いて、楕円的なモーメントを用いて反応面の方位角を求めた。低い運動量領域 ($p_T < 2$ GeV/c) では、粒子の質量による v_2 の依存性が顕著に現れており、流体力学的なモデルでよく再現されている [2]。一方、高い運動量領域 ($p_T > 2$ GeV/c) では、その依存性が逆転し、バリオンの v_2 の方がメソンの v_2 より、大きくなっている事が、初めて観測された [1]。この実験の特徴を説明するため、クォークコアレスセンス模型が提案された [3]。この模型では、 v_2 はハドロンが形成される前のクォーク相 (クォーク・グルーオンプラズマ) に起源があるとされ、 v_2 はハドロンの v_2 はクォーク再結合時に決定されると考える。図1 (右図) は、左図の縦軸 (v_2) 及び、横軸 (p_T) を共に、それぞれのハドロンに含まれる構成クォーク数で規格化されている。つまり、ハドロンの v_2 を構成するクォークの1個あたりの v_2 に焼き直して表示している。クォーク1個あたりの v_2 が、ハドロンの種類によらず同一であることは、単一のクォーク分布が存在していたことを意味しており、これらハドロンが一様な熱的分布を持つクォーク相であったことを示唆している。 π^{+-} 中間子に関しては、ややずれているが、 π に崩壊する共鳴粒子が多いことから、その崩壊特性により、定性的かつ定量的に説明することができた [4, 5]。しかしながら、図1 (右図) におけるもう一つ付け加えるべき特徴は、クォーク1個あたりの v_2 は、上に述べたように大まかに粒子種に依らず合っているが、細かく見ると、ハドロンの質量による順番付けの効果が多少残っている。これは、クォーク相での流体的膨張による v_2 生成後、ハドロン化した後も流体的な膨張がある事を意味していると考えられる。

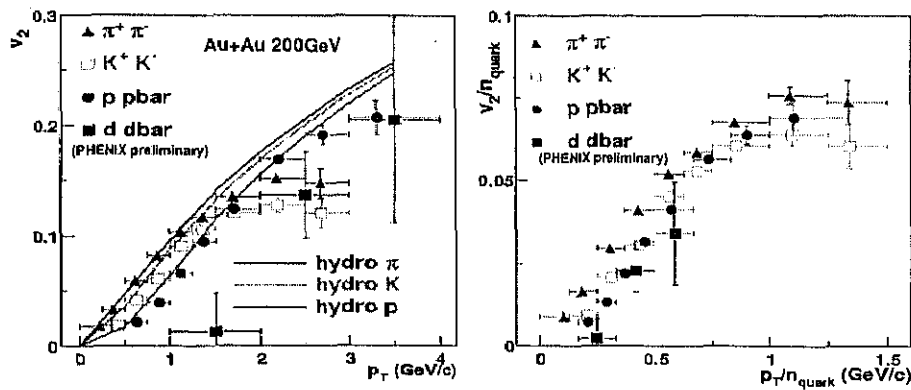


図1: 粒子識別されたハドロン v_2 の横方向運動量依存性 (左図) とクォーク1個あたりの v_2 (右図)。

図2は、光子、 π^0 、荷電ハドロンの v_2 の p_T 依存性を、3つの異なる中心衝突度 (中心衝突: 0-20%、20-40%、40-60%: 周辺衝突) で表したものである。荷電ハドロンは、 p_T が2GeV以上で陽子の寄与のため、 π^0 の v_2 より著しく大きくなる [6, 1]。測定される光子の殆どは、 π^0 の崩壊から来るが、高い運動量領域では、核子+核子衝突において発生する直接光子の寄与が、 p_T で3-4GeV/cから始まり、10GeV/c付近では既に π^0 崩壊の数倍になる事が測定された [7]。これは、高運動量領域でのメソン (π^0) の抑制によるもので、直接光子の発生は、核子対衝突回数あたりに規格化すると、抑制も増大

もなく核子対衝突回数によるスケーリング則に従っていることが実験的に示された。もし直接光子が初期の核子対衝突で生成されているのであれば、直接光子の反応平面に対する方位角異方性 (v_2) は 0 になるはずである。つまり、測定される光子の v_2 は、低い運動量、 p_T で 3 GeV/c 以下では、 π^0 の崩壊により決まり、その p_T 以上では直接光子の影響で (その v_2 が、 π^0 に比べて小さければ)、小さくなることが予想される。その兆候が、図 2 (左図) では、直接光子の π^0 に対する相対的な収量が最大になる中心衝突において見えているようである。測定された光子の収量に対する直接光子相対量と、測定された光子の大半を占める π^0 の v_2 を使って、包括的な光子の v_2 から、直接光子の v_2 が決定できよう。この図で使われた統計量の約 100 倍のデータが 2004 年初頭に記録され、現在解析中である。

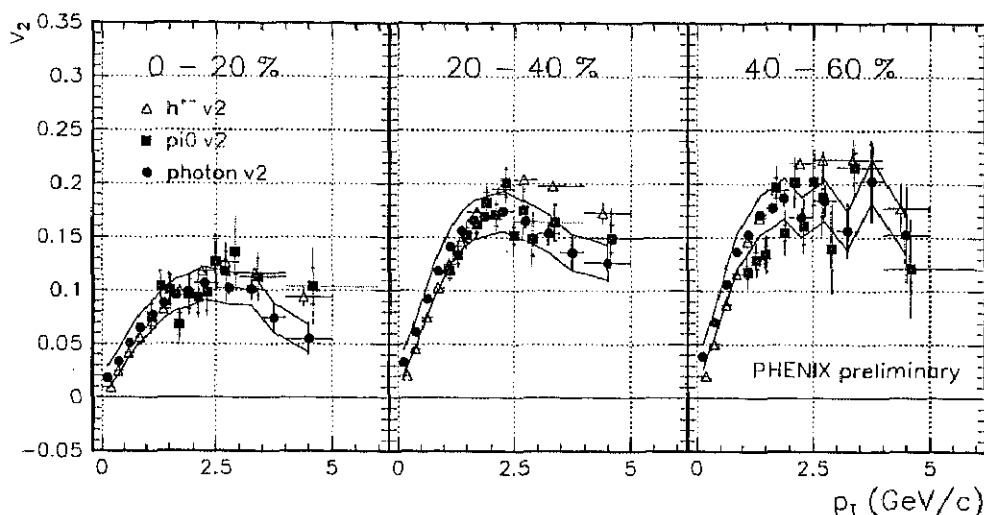


図 2: 光子、 π^0 、荷電ハドロンの $v_2(p_T)$ の中心衝突度による依存性 (0-20%, 20-40%, 40-60%)。

図 3 は、ハドロンの 2 粒子方位角相関関数を、片方の (高横運動量を持つ) 粒子が、ビーム・ビーム検出器で測定された反応平面で決まるビームに垂直な方位角に対して、(a) in-plane 方向 (水平、図内丸)、(b) out-of-plane 方向 (垂直、白抜き四角) の場合に分けて表示した。(a) では、2 粒子対の軸方向に他の多くの粒子が楕円的放出されている事により、0 度と 180 度方向に相関が強くなるのに対して、(b) では、楕円的放出と直交する 2 粒子対を選ぶため、90 度方向の相関が強くなる。この相関関数に対する、楕円的放出からの寄与は、測定した楕円的方位角異方性 v_2 と反応平面の実験的分解能から理論的に予想でき [8]、その予測されるカーブが、図 3 (左図) のラインで示されている。それを差し引いた相関関数を、図 3 (右図) に示す。0 度付近のピークは、高エネルギーの核子対衝突で発生する高い運動量のパートンを起源にするジェットのハドロンへの破砕関数によって記述される部分であり、選ばれた 2 粒子の軸が楕円軸 (反応平面軸) に対して平行の場合の方が、直交する場合よりピークの高さが高く、同様に相関関数の 180 度付近も (幅の狭いピークではないが) 同じように、平行の場合の方が大きくなっていることが分かる。楕円軸 (反応平面) に平行な方向は、高エネルギーの原子核衝突においては、円形の原子核同士が重なり合った部分にできるアーモンド領域の短い軸方向にあたる。つまり、高エネルギーのジェット生成が、アーモンド領域の短い軸方向に多い、言い換えると、長い軸方向に発生するジェットは吸収されやすい事、またジェットの破砕からできるクォークとその他のクォークとの再結合によるハドロン生成を示している。これは同時に、ジェット

自身が楕円方位角異方性 v_2 の成因の一つになっていることを示唆している [9].

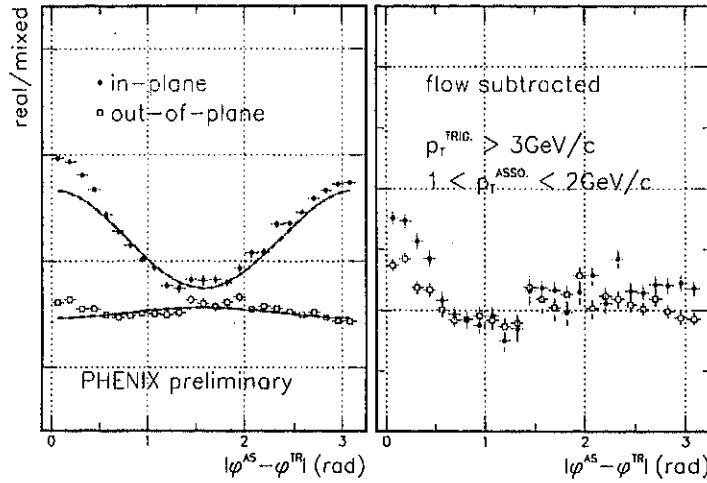


図 3: 2 粒子方位角相関関数の反応平面に対する依存性 (左図) と測定された v_2 による寄与を差し引いた相関関数 (右図)。

(2)3 粒子相関法による Directed Flow の解析

高エネルギー重イオン衝突における生成粒子の方位角分布は式 (1) で表される。

$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{2\pi p_T dp_T dy} (1 + 2v_1 \cos[\phi - \Psi_r] + 2v_2 \cos[2(\phi - \Psi_r)] + \dots) \quad (1)$$

ここで第一項が指向型方位角異方性 (Directed Flow, v_1)、第二項が楕円型方位角異方性 (Elliptic Flow, v_2) と呼ばれている。RHIC ではこれまで Elliptic Flow の解析は行われてきたが、Directed Flow に関しては余り研究が進んでいなかった。その理由としては、Directed Flow 自体のシグナルが Elliptic Flow に比べて小さいこと、そして、Non-flow contribution (反応面とは無関係に方位角異方性を作り出す効果、例えば粒子の崩壊・運動量の保存等の効果による) の取り扱いの難しさが挙げられる。特に non-flow contribution に関しては、これまでに確立された反応平面法や 2 粒子相関法ではその寄与を軽減することができない。そこで我々は新たに考案された 3 粒子相関法 [10] を用いることで、non-flow からの寄与を軽減し Directed Flow の測定を行った。3 粒子相関法による Directed Flow 強度は以下の式で与えられる。

$$\langle e^{i(\phi_a + \phi_b - 2\phi_c)} \rangle \approx v_{1,a} v_{1,b} v_{2,c} \quad (2)$$

ここで $\phi_{a,b,c}$ は生成粒子の方位角である。我々は式 (2) とは別に式 (3)

$$\langle e^{i(\phi_a + \phi_b - 2\Psi_2)} \rangle \approx v_{1,a} v_{1,b} \langle \cos[2(\Psi_2 - \Psi_r)] \rangle \quad (3)$$

を用いても同様の解析を行った。ここで、 Ψ_2 は Elliptic Flow で決まる反応平面の方位角、 Ψ_r は真の反応面の方位角である。3 粒子相関を用いる利点は、non-flow からの寄与を軽減するだけでなく、

すでに精密に測定された Elliptic Flow 強度を用いることで、統計誤差を従来の方法と同程度に留めることができる点である。

図4は多粒子相関法による Directed Flow 測定の結果である。データは2001年度 RHIC-PHENIX 実験の $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV の金・金衝突において収集されたものである。Directed Flow は QGP 生成の際に mid rapidity 付近で特徴的な振る舞いを示すことが過去に予言されているが [11]、今回の解析ではそのような特徴的な振る舞いを発見するまでには至っていない。

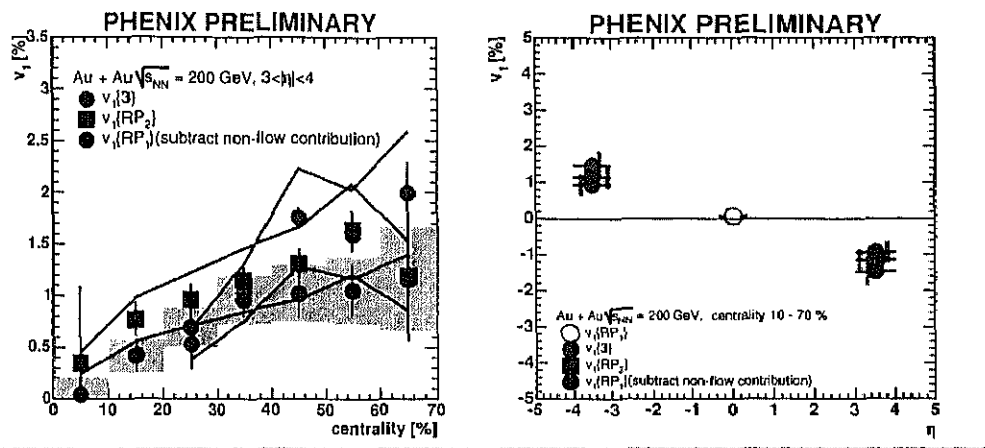


図4: Directed Flow 強度の衝突中心度依存性 ($3 < |\eta| < 4$) (左図) と擬 rapidity 依存性 (右図)。異なる3つの手法で測定した v_1 はいずれも誤差の範囲で一致した。

今後我々は

- 前後方に設置されている Shower Maximum Detector(SMD)を用いて、反応面を決定し Directed Flow 解析を進める。Directed Flow 強度は rapidity に比例しているため、SMD 領域では非常に精度よく反応面が決定できると期待されている。実際我々は SMD で反応面を決定し、既存の反応面よりも分解能を向上させることに成功した。
- $1 < |\eta| < 2$ の領域を覆っている Muon Arm 検出器群を用いることで、未だ測定されていない領域の Directed Flow 強度を見積もる。

を中心に研究を進めて行き、QGP 生成と方位角異方性の関係について明らかにしていきたい。

(3) 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 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 [12]。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。クォークコアレスセンス模型の観点から charm quark のような重い quark の方位角異方性を調べ、軽いクォークと比較することは大変興味のあることである。J ψ 収量に関してデバイ遮蔽効果の有無の検証が QGP 生成を調べる上で重要な課題であるが、RHIC のような高エネルギー衝突では J ψ がクォークコアレスセンスで生成される可能性も指摘されており、チャームの振る舞いの研究には興味が尽きない。

本研究では2001年 (Run2) に RHIC-PHENIX でおこなわれた核子対当たり 100 GeV の金・金衝突のデータをもちいて、電子の楕円方位角異方性をもつ方位角異方性についての解析をおこない、photon

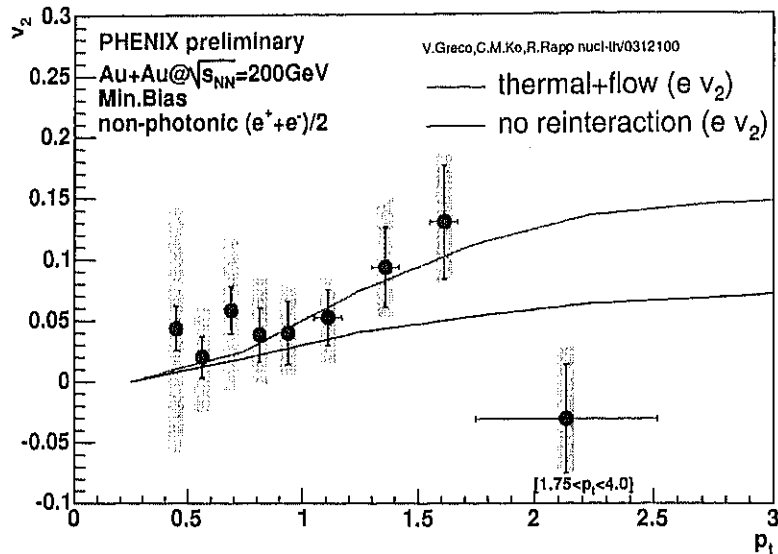


図 5: charm quark 起源の電子 v_2 とモデルとの比較。

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 (楕円の方位角異方性の強度) の見積もりをおこなった。図:5 は charm quark 起源の電子 v_2 の横運動量依存性とモデル [13] によって予言された charm quark が集団運動する (有限な v_2 を持つ) 場合としない場合の charm quark 起源の電子 v_2 との比較である。残念ながら現時点では統計エラーが大きいため、charm quark が有限な v_2 を持つかどうか、すなわち charm quark が集団運動しているかどうか決定することはできない。しかし 2003 年から 2004 年にかけて RHIC-PHENIX で収集されたデータ量は Run2 の約 40 倍といわれており、charm quark の集団運動の有無が充分議論できると期待を持つことができる。

(4) エアロジェルチェレンコフ検出器の製作

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) において、高エネルギー重イオン衝突実験によるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の探索を目的とした RHIC-PHENIX 実験が行われている。高エネルギー衝突ではジェットと呼ばれる特徴的な現象がある。量子色力学 (QCD) によると、ジェットは QGP のような高密度状態を通過する際に、グルーオンの放射により大きなエネルギー損失を受けると予想されている (Jet Quenching)。陽子・陽子衝突に比べ、金・金衝突では高横運動量粒子の収量の抑制が観測され、また、陽子・陽子衝突では見られた back-to-back のジェット相関が、金・金衝突では back-to-back のジェット相関が消失するという実験事実が見つかった。これらの現象は、金・金原子核衝突において高密度状態が作られたということを、強く示唆するものである。さらに高い横運動量領域での物理解析が待たれており、高横運動量領域での粒子識別能力の向上が求められている。

また、原子核・原子核衝突後の粒子生成を記述する理論モデルの一つとして、quark coalescence model というモデルが提唱されている。このモデルの正当性を調べるためにも、高横運動量領域での粒子識別が大変重要である。

RHIC-PHENIX 検出器のアップグレード計画の一つとして、衝突点からおよそ 450cm の位置に、

縦およそ 120cm、横およそ 400cm の領域を量産されているエアロジェルとしては最も小さな屈折率 ($n=1.011$) を持つ 160 個のエアロジェルチェレンコフ検出器でカバーするという計画を推進している。そのため、エアロジェルチェレンコフ検出器の研究・開発が 2001 年から筑波大学を中心に、東大 CNS、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 年夏にエアロジェルチェレンコフ検出器の製作が BNL において行われ、2003 年 11 月に半分である 80 個のエアロジェルチェレンコフ検出器が RHIC-PHENIX 検出器へとインストールされた。エアロジェルチェレンコフ検出器の断面図を図 6 に示す。

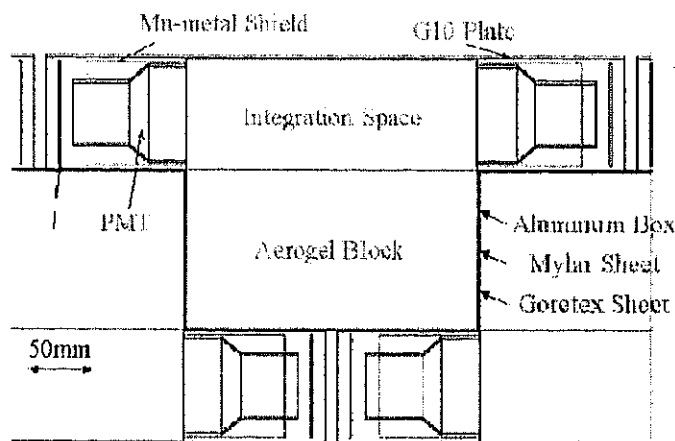


図 6: エアロジェルチェレンコフカウンターの構造

2003 年度に行われた実験で得られたデータの解析結果より、横軸に横運動量、縦軸に得られたエアロジェルチェレンコフ検出器で観測された光電子数の相関を調べた結果、運動量 $\sim 2\text{GeV}/c$ の領域において、明瞭な π 中間子のシグナルを見ることが出来た。この解析に使われた統計量は、実験で収集された全統計量の一部である。今後、全統計量を使った解析において K 中間子や陽子のシグナルを見ることが出来ると期待されている。

参考文献

- [1] S.S.Adler, et al, Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 182301.
- [2] P.Huovinen, P.F.Kolb, U.W.Heinz, P.V.Ruuskanen and S.A.Voloshin, Phys. Lett. **B503** (2004) 58.
- [3] Denes Molnar, Sergei A. Voloshin, Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 092301.
- [4] V.Greco, C.M.Ko, nucl-th/0402020 (2004).
- [5] X.Dong, S.Esumi, P.Sorensen, N.Xu and Z.Xu, nucl-th/0403030 (2004).
- [6] Masashi Kaneta for the PHENIX Collaboration, nucl-ex/0404014 (2004).

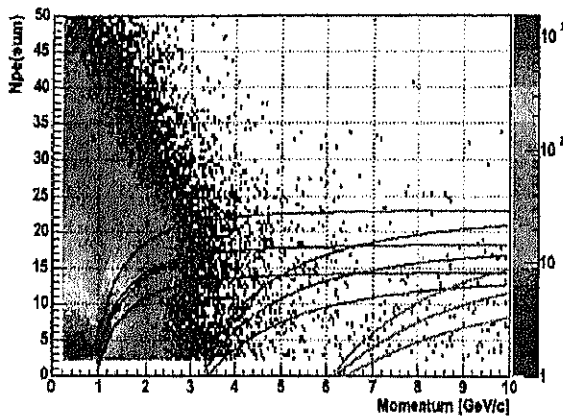


図 7: 観測された光電子数 vs 運動量。

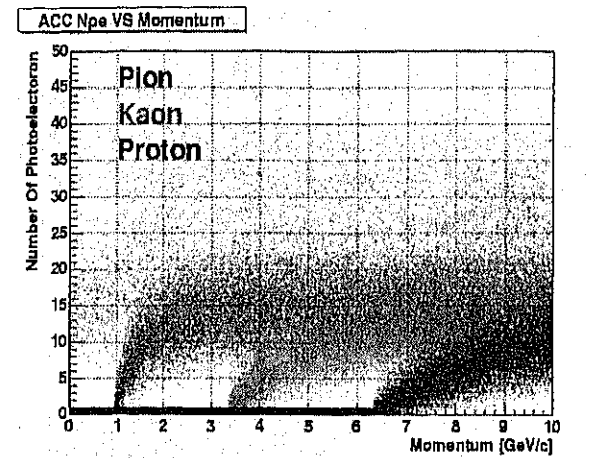


図 8: 粒子毎に予想される光電子数 vs 運動量。

- [7] Justin Frantz for the PHENIX Collaboration, nucl-ex/0404006 (2004).
- [8] J.Bielcikova, S.Esumi, K.Filimonov, S.Voloshin and J.P.Wurm, Phys. Rev. C **69** (2004) 021901.
- [9] ShinIchi Esumi, nucl-ex/0405016 (2004).
- [10] N. Borghini, P. M. Dinh, J.-Y. Ollitrault, Phys. Rev. Lett. C **66**, (2002) 014905.
- [11] Brachmann, Soff, Dumitru, Stocker, Maruhn, Greiner Bravina, Rischke, Phys. Rev. C **61**, (2000) 024909.
- [12] K.Adcox et al., Phys.Pev.Lett.88,192303(2002).
- [13] V.Greco,C.M.Ko,R.Rapp, nucl-th/0312100.

<論文>

1. M. Yamaguchi, K. Sawada, T. Katabuchi, N. Kawachi, N. Yoshimaru, K. Shiga and Y. Tagishi High-efficiency polarimeter for a secondary proton beam of 16-22 MeV
Nucl. Inst. and Meth. A **506**, 35-40, (2003).
2. H.Miyatake, H.Ueno, Y.Yamamoto, N.Aoi, K.Asahi, E.Ideguchi, M.Ishihara, H.Izumi, T.Kishida, T.Kubo, S.Mitsuoka, Y.Mizoi, M.Notani, H.Ogawa, A.Ozawa, M.sasaki, T.Shimoda, T.Shirakura, N.Takahashi, S.Tanimoto, and K.Yoneda
Spin-parity assignments in $^{15}\text{C}^*$ by a new method: β -delayed spectroscopy for a spin-polarized nucleus, Phys. Rev. C **67**, 014306 (2003).
3. A.Ozawa, Y.Yamaguchi, M.Chiba, R.Kanungo, K.Kimura, S.Momota, T.Suda, T.Suzuki, I.Tanihata, T.Zheng S.Watanabe, T.Yamaguchi, and K.Yoshida
Search for ^{21}B
Phys. Rev. C **67**, 014610 (2003).
4. A.A.Korshennikov, E.Yu.Nikolskii, E.A.Kuzmin, A.Ozawa, K.Morimoto, F.Tokanai R.Kanungo, I.Tanihata, N.K.Timofeyuk, M.S.Golovkov, A.S.Fomichev, A.M.Rodin, M.L.Chelnokov, G.M.Ter-Akopian, W.Mittig, P.Roussel-Chomaz, H.Savajols, E.Pollacco, A.A.Ogloblin, M.V.Zhukov.
Experimental evidence for the Existence of ^7H and for a Specific Structure of ^8He
Phys. Rev. Let. **90**, 082501 (2003).
5. D.Cortina-Gil, J.Fernandez-Vazquez, F.Attallah, T.Baumann, J.Benlliure, M.J.G.Borge, L.V.Chulkov, C.Forssen, L.M.Fraile, H.Geissel, J.Gerl, K.Itahashi, R.Janik, B.Jonson, S.Karlsson, H.Lenske, S.Mandal, K.Markenroth, M.Meister, M.Mocko, G.Munzenberg, T.Ohtsubo, A.Ozawa, Yu.Parfenova, V.Pribora, A.Richter, K.Riisager, R.Schneider, H.Scheit, G.Schrieder, N.Shulgina, H.Simon, B.Sitar, A.Stolz, P.Strmen, K.Summerer, I.Szarka, S.Wan, H.Weick, M.Zhukov
Nuclear and Coulomb breakup of ^8B
Nucl. Phys. A **720**, 3-19 (2003).
6. F.Schümann, F.Hammache, S.Typel, F.Uhlig, K.Sümmerer, I.Böttcher, D.Cortina, A.Förster, M.Gai, H.Geissel, U.Greife, N.Iwasa, P.Koczon, B.Kohlmeyer, R.Kulesa, H.Kumagai, N.Kurz, M.Menzel, T.Motobayashi, H.Oeshler, A.Ozawa, M.Ploskon, W.Prokopowicz, E.Schwab, P.Senger, F.Strieder, C.Sturm, Zhi-Yu Sun, G.Surowka, A.Wagner, and W.Walus
Coulomb Dissociation of ^8B and the Low-Energy Cross Section of the $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$ Solar Fusion Reaction
Phys. Rev. Let., **90** 232501 (2003).
7. S.Nishimura, M.Kurata-Nishimura, K.Morimoto, Y.Nishi, A.Ozawa, T.Yamaguchi, T.Ohnishi, T.Zheng, M.Chiba, I.Tanihata
Systematic studies of scintillation detector with timing resolution of 10 ps for heavy ion beam
Nucl. Instr. Meth. A **510**, 377-388 (2003).

8. T.Yamaguchi, T.Zheng A.Ozawa, M.Chiba, R.Kanungo, T.Kato, K.Katori, K.Morimoto, T.Ohnishi, T.Suda, I.Tanihata, Y.Yamaguchi, A.Yoshida, K.Yoshida, H.Toki, N.Nakajima
Momentum distributions of ^{14}C and ^{15}C fragments from ^{16}C breakup
Nucl. Phys. A **724** 3-13 (2003).
9. T.Baumann, H.Ikeda, M.Kurokawa, M.Miura, T.Nakamura, Y.Nishi, S.Nishimura, A.Ozawa, T.Sugimoto, I.Tanihata, M.Thoennessen
Using passive converters to enhance detection efficiency of 100-MeV neutrons
Nucl. Instr. and Meth. A **505**, 25-28 (2003).
10. R.Kanungo, M.Chiba, S.Adhikari, D.Fang, N.Iwasa, K.Kimura, K.Maeda, S.Nishimura, Y.Ogawa, T.Ohnishi, A.Ozawa, C.Samanta, T.Suda, T.Suzuki, Q.Wang, C.Wu, Y.Yamaguchi, K.Yamada, A.Yoshida, T.Zheng, I.Tanihata
Possibility of a two-proton halo in ^{17}Ne
JPhys, Lett. B **571** 21-28 (2003).
11. L.S.Geng, H.Toki, A.Ozawa and J.Meng
Proton and neutron skins of light nuclei within the relativistic mean field theory
Nucl. Phys., A **730**, 80-94 (2003).
12. I. Arai , S. Shimakura, K. Hino, T. Miyazaki and S.-M. Lee,
Secondary Electron Emission from Cu Surface by Bombardment of Cu Cluster Ions,
Transactions of the Materials Research Society of Japan, **28**, 859-862, (2003).
13. K. Teranishi, T. Miyazaki, I. Arai and S.-M. Lee,
Cluster Abundance Spectra of Low Melting Temperature Metals Produced by Bombardment of 6 keV Xe Atoms,
Transactions of the Materials Research Society of Japan, **28**, 863-866, (2003).
14. J.A. Macdonald, I. Arai, et al.,
Apparatus for a search for T-violating muon polarization in stopped-kaon decays,
Nucl. Instr. and Meth., **A506**, 60-91, (2003).
15. 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 Tb-146,
Eur. Phys. J. A **19**, pp. 7-9 (2004)
16. C.B. Moon, T. Komatsubara, K. Furuno,
Band structures in I-116,
Nucl. Phys. A **730**, pp.3-22 (2004)
17. Y.H.Zhang, M.Oshima, Y.Toh, X.H.Zhou, M.Koizumi, A.Osa, A.Kimura, Y.Hatsukawa, T.Morikawa, M.Nakamura, M.Sugawara, H.Kusakari, T.Komatsubara, K.Furuno, H.L.Wang, P.Luo, C.S.Wu, F.R.Xu,
Rotational bands and signature inversion in odd-odd ^{172}Re ,
Phys.Rev. C **68**, 054313 (2003)

18. C.B. Moon, T. Komatsubara, T. Shizuma, Y. Sasaki, K. Furuno, C.S. Lee,
Collective bands in odd-odd 118I,
Nucl. Phys. A **728**, pp.350-364 (2003)
19. C.-B.Moon, T.Komatsubara, K.Furuno,
A Dipole Band in 122Xe,
Journal of the Korean Physical Society **43**, pp.574-577 (2003)
20. C.B. Moon, T. Komatsubara, K. Furuno,
Collective bands in 115I,
Journal of the Korean Physical Society **43**, pp.319-324 (2003)
21. Y.H. Zhang, F.R. Xu, J.J. He, Z. Liu, X.H. Zhou, Z.G. Gan, M. Oshima, T. Hayakawa,
Y. Toh, T. Shizuma, J. Katakura, Y. Hatsukawa, M. Matsuda, H. Kusakari, M. Sug-
awara, K. Furuno, T. Komatsubara, T. Une, S.X. Wen, Z.M. Wang,
High-spin states and signature inversion in odd-odd Au-182,
Science in China Series G-Physics Astronomy **46**, pp.382-389 (2003)
22. Z. Liu, Y.H. Zhang, Y.J. Ma, Y. Sasaki, K. Yamada, H. Oshima, H. Yokose, M. Ishizuka,
T. Komatsubara, K. Furuno,
High-spin states of Sb-125: Particle-core excitation coupling,
Science in China Series G-Physics Astronomy **46**, pp.390-397 (2003)
23. K. Sasa, K. Furuno, Y. Yamato, H. Ohshima, S. Ishii T. Komatsubara, M. Kurosawa,
The Tsukuba high-energy nuclear microprobe for hydrogen analysis of mineral samples,
Nucl. Instr. and Meth. B **210**, 48-53 (2003).
24. K Furuno, T. Komatsubara, K. Sasa, H. Ohshima, Y. Yamato, S. Ishii, H. Kimura, M.
Kurosawa,
Measurement of hydrogen concentration in thick mineral or rock samples
Nucl. Instr. and Meth. B **210**, 459-463 (2003).
25. 笹 公和、島 邦博、小松原哲郎、工藤 博
12MV 及び 1MV タンデム型静電加速器による応用研究の展開
原子核研究 (Genshikaku Kenkyu), Vol.48, No.5, 43-52 (2003).
英訳: K. Sasa, K. Shima, T. Komatsubara, H. Kudo,
Applied research by the 12MV tandem accelerator and the 1MV tandetron accelerator.
26. T. Abbott, Y. Miake, 他 8 8 名、
Further observations on midrapidity et distributions with aperture corrected scale.
Phys. Rev. C **68** :034908,2003
27. M. Aizawa, S. Esumi, Y. Miake, 他 6 4 名、
Phenix central arm particle id detectors.
Nucl. Instrum. Meth. A **499** :508-520,2003
28. K. Adcox, S. Esumi, Y. Miake, 他 5 8 3 名
Phenix detector overview.
Nucl.Instrum.Meth.A **499** :469-479,2003

29. S. Nikolaev, Y. Miake, 他 1 2 7 名
Photon flow in 158-A-GeV Pb + Pb collisions.
Nucl.Phys.A715:579-582,2003
30. S.S. Adler, S. Esumi, Y. Miake, 他 3 2 4 名
Absence of suppression in particle production at large transverse momentum in $s(NN)^{1/2} = 200$ -GeV d + Au collisions.
Phys.Rev.Lett.91:072303,2003
31. A. Drees, S. Esumi, Y. Miake, 他 3 0 6 名
Heavy ion collisions at collider energies: insights from phenix.
Pramana 60:639-650,2003
32. S.S. Adler, S. Esumi, Y. Miake, 他 3 2 3 名
Suppressed π^0 production at large transverse momentum in central Au + Au collisions at $s(NN)^{1/2} = 200$ GeV. Phys.Rev.Lett.91:072301,2003
33. Bedangadas Mohanty, Y. Miake, 他 1 1 5 名
Particle density fluctuations.
Nucl.Phys.A715:339-348,2003
34. K. Adcox, S. Esumi, Y. Miake, 他 304 名
Centrality dependence of the high $p(t)$ charged hadron suppression in Au+Au collisions at $s(NN)^{1/2} = 130$ -GeV.
Phys.Lett.B561:82-92,2003
35. M.M. Aggarwal, Y. Miake, 他 1 2 5 名
Centrality dependence of charged neutral particle fluctuations in 158-A-GeV Pb-208 + Pb-208 collisions.
Phys.Rev.C67:044901,2003
36. S.S. Adler, S. Esumi, Y. Miake, 他 3 2 3 名
Mid-rapidity neutral pion production in proton proton collisions at $S^{1/2} = 200$ -GeV.
Phys.Rev.Lett.91:241803,2003
37. S.S. Adler, S. Esumi, Y. Miake, 他 3 2 2 名
Elliptic flow of identified hadrons in Au+Au collisions at $s(NN)^{1/2} = 200$ -GeV.
Phys.Rev.Lett.91:182301,2003
38. S.S. Adler, S. Esumi, Y. Miake, 他 3 2 2 名
Scaling properties of proton and anti-proton production in $s(NN)^{1/2} = 200$ -GeV Au+Au collisions.
Phys.Rev.Lett.91:172301,2003
39. D. Adamova, S. Esumi, 他 57 名,
Event by event fluctuations of the mean transverse momentum in 40, 80 and 158 A GeV/c Pb - Au collisions.
Nucl.Phys.A727 (2003) 97-119

40. D. Adamova, S. Esumi, 他 52 名,
Enhanced production of low mass electron pairs in 40-A GeV Pb+Au collisions at CERN SPS,
Phys.Rev.Lett.91 (2003) 042301-042305
41. D. Adamova, S. Esumi, 他 52 名,
Universal pion freezeout in heavy ion collisions,
Phys.Rev.Lett.90 (2003) 022301-022305
42. D. Adamova, S. Esumi, 他 57 名,
Beam energy and centrality dependence of two pion bose-einstein correlations at SPS energies,
Nucl.Phys.A714 (2003) 124-144

<学位論文（博士論文）>

1. 物理学研究科・博士（理学） 佐藤健一郎 (Sato Kenichiro), An experimental study of shell effects of interacting nuclei on heavy-ion fusion reactions

<学位論文（修士論文）>

1. 数理物質科学研究科・修士論文 金野正裕 (Konno Masahiro) Development and Construction of Aerogel Cherenkov Detector for RHIC-PHENIX Experiment (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と製作)
2. 数理物質科学研究科・修士論文 下村真弥 (Shimomura Maya) Analysis of high pT charged hadron in 200 GeV Au+Au collisions at RHIC-PHENIX Experiment (PHENIX実験における 200GeV 金・金衝突での高横運動量 荷電ハドロン解析)
3. 数理物質科学研究科・修士論文 高木敏志 (Takagi Satoshi), Simulation study for Aerogel Cherenkov Counter at RHIC-PHENIX (RHIC-PHENIX実験における Aerogel Cherenkov Counter のシミュレーションによる評価)
4. 理工学研究科・修士論文 神長誉人 (Kaminaga Shigeto), Identified hadron spectra in p+p collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ ($\sqrt{s_{NN}} = 200\text{ GeV}$ の陽子・陽子衝突実験における π 、K、p の横運動量分布)
5. 理工学研究科・修士論文 新井秀幸 (Arai Hideyuki), Effect of Bias Disk on ECR Plasma (バイアスディスクが ECR プラズマに与える影響)
6. 理工学研究科・修士論文 久保政憲 (Kubo Masanori), Absorption of Si Atoms on Gold Cluster (金クラスターへの珪素の吸着)
7. 理工学研究科・修士論文 高梨康志 (Takanashi Yasushi), Interaction of Highly Charged Ion with Matter (多価電荷イオンと物質の相互作用)
8. 理工学研究科・修士論文 石黒浩之 (Ishiguro Hiroyuki), Measurement of energy dependence of total reaction cross section of $^{12}\text{C}+p$ system around (p,n) threshold energy

9. 理工学研究科・修士論文 吉丸直子 (Yoshimaru Naoko)、The ${}^6\text{Li}(d,p){}^7\text{Li}$ reaction with polarized deuterons at an incident energy of 90 keV (入射エネルギー 90keV の偏極重陽子を用いた ${}^6\text{Li}(d,p){}^7\text{Li}$ 反応)

<国際会議発表>

1. M. Iio, I Daito, N. Horikawa, T. Hasegawa, Y. Tagishi, T. Iwata, Y. Yamaguchi, T. Sinnba, N. Yoshimaru, N. Okumura, T. Kobayashi, T. Inagaki, N. Doshita, K. Kondo, Y. Tajima, S. Ishii, Development of polarized target for nuclear fusion experiments, 9th International Workshop on Polarized Solid Targets and Techniques, Bonn, Germany, Oct. (2003)
2. A. Ozawa
Recent progress of interaction and reaction cross-section measurements
Relativistic structure models for the physics of radioactive nuclear beams (RSM2003), 2003. 5/12-16, Bad Honnef, Germany
3. A. Ozawa
Recent experiments for interaction and reaction cross-sections
Nucleus-Nucleus Collisions VIII, 2003. 6/17-21, Moscow, Russia
4. A. Ozawa
Reaction cross-sections for C-isotopes
CLUSTER 2003, 11/24-29, Nara, Japan
5. K. Sasa, I. Arai, M. Kurosawa, T. Nakagawa,
Preliminary experiments on laser coupled to electron cyclotron resonance ion source for trace element analysis.
The 10th International Conference on Ion Source, Dubna, Russia, Sep.8-13, 2003.
6. S. Esumi, Azimuthal anisotropy in high-energy heavy-ion collisions at RHIC energies, 20th Winter Workshop on Nuclear Dynamics, Mar 15-20, 2004, StarFish Resort in Trelawny Beach, Jamaica
7. S. Esumi, Event anisotropy measurements in 200GeV Au+Au collisions at RHIC-PHENIX with a special emphasis on PID,
BNL physics seminar, Mar 9 2004, Brookhaven National Lab, NY, USA
8. S. Esumi, Analysis of event anisotropy and azimuthal pair correlation: looking for the origin of large v_2 at RHIC (poster), The Seventeenth International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2004) January 11 - 17, 2004 in Oakland, California
9. S. Esumi, Recent Results from the RHIC experiments searching for QGP, YITP workshop on "Nuclear Matter under Extreme Conditions (Matter03)" (December 1-3 2003, YITP, Kyoto, Japan)

10. S. Esumi, Charged particle v_2 and pair correlation w.r.t. R.P. at PHENIX, RIKEN-BNL workshop on Collective flow and QGP properties (November 17-19, 2003, Brookhaven Natinal Laboratory)
11. S. Esumi, Charged particle azimuthal correlation with respect to the reaction plane to look for the origin of large v_2 at RHIC
Minisymposium: Collective Flow in Relativistic Heavy Ion Collisions II at 2003 Fall Meeting of the Division of Nuclear Physics October 30 - November 1, 2003, Tucson, Arizona

<日本物理学会発表>

1. 奥村 紀浩、石黒 浩之、飯島 正史、五十嵐 智、石川 泰士、青木 保夫
15MeV 付近の $^{28}\text{Si} + \text{P}$ 弾性散乱の部分波反応時間の推定
日本物理学会 春の年会 (九州大学)
2. 飯尾雅実、他、20MeV の偏極重陽子ビームと偏極重水素標的による $\text{D}(\text{d},\text{p})\text{T}$ 反応の測定
日本物理学会 (宮崎)
3. 小沢 顕
14,15C の反応断面積とフラグメントの運動量
日本物理学会、2003 年秋季大会
4. 小松原哲郎、笹公和、大島弘行、木村博美、石井聡、大和良広、黒澤正紀
マイクロビームを用いた陽子弾性散乱同時計数法による鉱物試料中の水素分析
日本物理学会、2003 年秋期大会
5. 金野正裕、高木敏志、三明康郎、江角晋一、下村真弥、永田善彦、猩々智康、川岸隆之、神長誉人、益井宙、坂井真吾、黒木義昭、鶴岡裕士、E.Kistenev、佐藤進、稲葉基、栗原成美、小沢恭一郎、V.Peressedov、S. Afanassiev、A.Litvinenko、L.Zolin
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・製作
日本物理学会、2003 年秋期大会
6. 江角晋一、for PHENIX Collaboration
Interplay between v_2 and jets at 200 GeV Au+Au collisions at RHIC-PHENIX
日本物理学会、2003 年秋期大会
7. 益井宙、for PHENIX、
Azimuthal anisotropy with respect to the reaction plane in $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ GeV d-Au collisions at RHIC-PHENIX Collaboration
日本物理学会、2003 年秋期大会
8. 坂井真吾、for PHENIX Collaboration、
Elliptic flow of electrons/positrons in 200 GeV Au+Au collisions at RHIC-PHENIX、
日本物理学会、2003 年秋期大会
9. 神長誉人、for PHENIX Collaboration、
RHIC-PHENIX 実験における $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 200$ GeV p-p 衝突実験での識別されたハドロン

の横方向運動量分布

日本物理学会、2003年秋期大会

10. 三明康郎、シンポジウム講演 「はじめに」
日本物理学会、2003年秋期大会
11. 高木敏志、他、RHIC-PHENIX実験における Aerogel Cherenkov Counter の性能評価
日本物理学会、2004年春期大会
12. 坂井真吾、for PHENIX Coll., Azimuthal anisotropy of electrons in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV measured with PHENIX at RHIC
日本物理学会、2004年春期大会
13. 下村真弥、for PHENIX Coll., The comparison of two methods for high pt charged hadron background study in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions at RHIC-PHENIX
日本物理学会、2004年春期大会
14. 益井宙、for PHENIX Coll., Measurement of directed flow via 3 particle azimuthal correlation at RHIC-PHENIX
日本物理学会、2004年春期大会

<国内学会発表>

1. 小沢 顕、RIBFにおける反応断面積測定
「RI ビームファクトリーと研究計画」ワークショップ 2003. 3/4-5, Wako, Japan
2. 小沢 顕、高速粒子識別システムとその応用
理研シンポジウム「原子核実験における信号処理の高度化」2003. 7/28, Wako, Japan
3. 小沢 顕、蓄積リング
RI ビームファクトリーで建設する実験装置に関する研究会 2003. 12/26 Wako, Japan
4. 小沢 顕、「トリガーシステム」
筑波大学「蓄積リングにおける元素合成、不安定核の研究」2004年3月12日
5. 新井一郎、「クラスターと蓄積リング」
筑波大学「蓄積リングにおける元素合成、不安定核の研究」2004年3月12日
6. 田岸義宏、「UTTACにおける不安定核 ^8Li の生成」
筑波大学「蓄積リングにおける元素合成、不安定核の研究」2004年3月12日
7. 新井一郎、「蓄積リングとクラスター」、
加速器センター研究会「蓄積リングにおける元素合成、不安定核の研究」
8. 新井一郎、「クラスター衝突による2次電子生成」、
加速器センター・ワークショップ「原子衝突における電子励起と関連現象：基礎・応用・基盤技術」

9. 小松原哲郎、笹公和、古野興平、大島弘行、木村博美、石井聡、大和良広、石塚信、黒澤正紀
陽子弾性散乱同時計数分析法による水素分析法の開発
第40回理工学における同位元素・放射線研究発表会2003年7月9日～7月11日、
日本青年館
10. 小松原哲郎、高輝度レーザーにともなう放射線発生とその計測
第3回“超高強度レーザーの切り拓く科学技術”研究会2004年3月17日～3月18日、
日本原子力研究所関西研究所、多目的ホール
11. 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、山口充孝、小松原哲郎、
島邦博、古野興平、工藤博
筑波大学加速器センターの現状
第16回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、2003.6.30-7.1、神戸商船大学、
12. 笹公和、12MV及び1MVタンデム型静電加速器による応用研究の展開
第2回小型加速器研究会「小型加速器の利用推進に関する研究会」、KEK、2003.7.16-17.
13. K. Sasa, K. Furuno, T. Komatsubara, Y. Yamato, S. Ishii, H. Ohshima, M. Kurosawa,
高エネルギー陽子マイクロビームを用いた地球科学試料中の水素分析
Hydrogen analysis of geophysical samples using a high-energy proton microbeam.
第5回応用加速器・関連技術研究シンポジウム(ARTA2003), 東京工業大学, 2003.10.21-22.
14. 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、小松原哲郎、島邦博、
工藤博
筑波大学加速器センター施設報告
第14回加速器科学研究発表会、つくば、2003.11.11-13.
15. 笹公和、新井一郎、中川考秀、黒澤正紀
微量元素分析のためのレーザー結合ECR型イオン源の開発
第2回21世紀連合シンポジウム、東海大学、東京、2003.11.16-18.
16. 江角晋一、Recent results from high-energy heavy-ion collisions at RHIC,
KEK physics seminar, Sep 2 2003, KEK, Japan
17. 三明康郎、“SPS&RHIC、僕たちのこだわり”、
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」における
講演、2003年10月29日、大阪大学核物理センター

<科学研究費取得状況>

1. 若手研究B(2002～2003)、「レーザー結合ECRプラズマを用いた小型高輝度金属イオン源の開発」、代表：笹公和
2002年度 3,100千円
2003年度 800千円
2. 基盤研究C(2002～2005)、「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

3. 基盤研究B(2002~2004)、「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

<外部資金取得状況>

1. 学内プロジェクト、ECRプラズマの粒子トラップ効果と大電流金属イオンビームの生成
代表、笹公和、500千円
2. 日米科学技術協力事業(高エネルギー物理分野)、RHICにおける高エネルギー重イオン衝突実験(PHENIX)、代表；浜垣秀樹(東大CNS)、筑波大執行分 約3000万円

<研究会開催>

1. 「蓄積リングにおける元素合成、不安定核の研究」2004年3月12日、世話人：小沢 颯、田岸義宏、小松原哲郎、参加者：約50名