

VI. 原子核実験グループ

教 授	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、中條達也
準研究員	長友傑
研究機関研究員	太田寛史
技 官	加藤純雄
大学院生	26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、長友傑、太田寛史)

(1) 重陽子分解過程を経由した、中性子吸収による (d,p) 反応の計算

これまでに、 $^{118}\text{Sn}(d,p)^{119}\text{Sn}$ 反応を想定した、(d,p) 反応の非常に低いエネルギーでの断面積のエネルギー依存性を調べる実験を実験してきた。この実験データは、これまでは DWBA 手法で解析された。しかし、重陽子の束縛エネルギーが低いので、クーロン障壁付近での分解過程を考慮する必要があると考えている。これを数値的に評価する目的で、CDCC プログラムを改造し、全てのチャネルの歪曲波を計算し、出力出来るようにした。クーロン分解過程を含む場合には、途中で何度も直交化しながら連立微分方程式を解くので、それなりに複雑な作業となる。

得られた波動関数の内、重陽子分解チャネルに対応する部分での中性子虚部ポテンシャルの期待値を計算する。これは重陽子が壊れた後、中性子だけが虚部ポテンシャルにより運動状態を変える、主に標的に吸収されて実質的に (d,p) 反応が起こる断面積を与える。この計算を、 $E_d = 3 \rightarrow 10$ MeV に対し、核力だけの分解及び核力にクーロン力が加わった場合の分解を考慮した計算を行った。低エネルギー域ではクーロン分解が核力分解を圧倒している事が分かった。

図1は、入射重陽子のエネルギー毎に、分解後の $p-n$ 系の重心運動の運動エネルギー毎に、複合核形成断面積が描かれている。

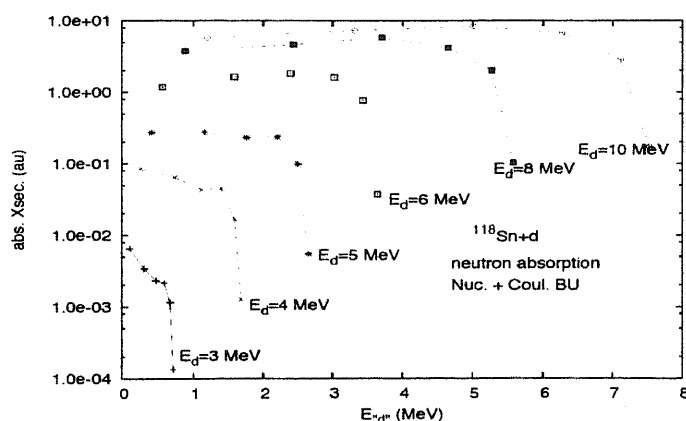


図 1: $^{118}\text{Sn}(d,p)$ 反応を想定した CDCC Compound 過程の計算。

3－5 MeV では右肩が幾らか膨らんでいるのが核力による分解過程の寄与である。このエネルギー依存性は、Gamow 理論で予想されるエネルギー依存性よりもかなり緩やかだと想像される。

CDCC プログラムから、正しく規格化された歪曲波が出力されると、この波動関数を用いた、拡張された DWBA の可能性が開ける。この作業が次の宿題となる。

(2) クーロン障壁以下での $^{118}\text{Sn}(d,p)$ 反応

これまでは大型散乱槽と半導体検出器で行っていた実験を、磁気分析器を用いて行う事とした。この時、同位体分離した薄い (約 $700\mu\text{g}/\text{cm}^2$) を用意した。これまでの実験よりも、くつきりと基底状態付近のスペクトルを得る事が出来るようになった。(図 2 参照)

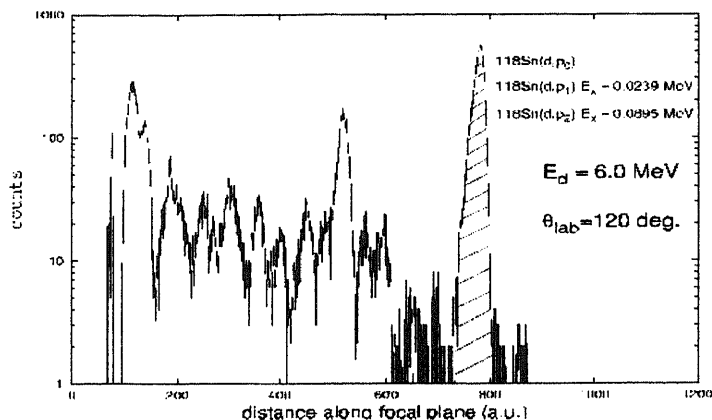


図 2: 6 MeV 重陽子を用いた $^{118}\text{Sn}(d,p)$ 反応における ^{119}Sn 基底状態付近の運動量スペクトル

微分断面積のエネルギー依存性を図 3 に示す。

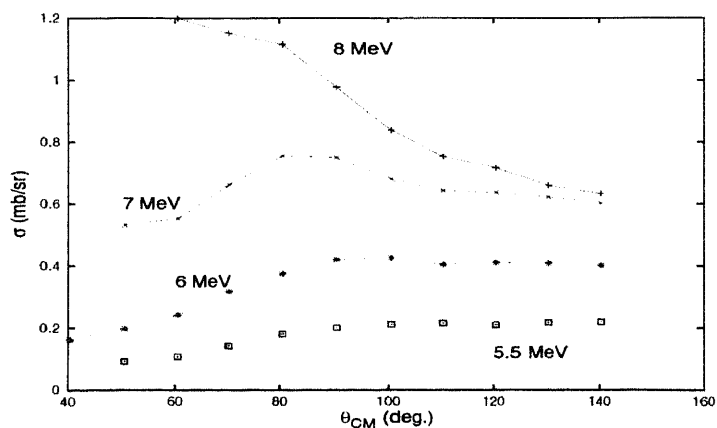


図 3: $^{118}\text{Sn}(d,p)^{119}\text{Sn}$ 反応基底状態付近の遷移に対する微分断面積のエネルギー依存性

(3) 硅素核の陽子弾性散乱を用いた、共鳴状態探索

陽子の全反応断面積のエネルギー依存性の一部として (p,n) 反応閾値依存性が考えられた。このアイデアを検証する効率的な手法として、厚い標的を用い陽子弾性散乱断面積のエネルギー依存性を調べる事を思い付いた。

図4を見ながら、もう少し詳しく説明しよう。例えば厚さ100ミクロンの硅素基板を置き、これに垂直に陽子ビームを照射し、弾性散乱を後方135度で観測する。入射陽子は、標的中でエネルギーを失いながら、標的のある位置で弾性散乱する。散乱陽子は、更に標的中を通過しなければ外へ出られない。この散乱後の標的通過により、弾性散乱した陽子の運動エネルギーは幅を広げられる。即ち、直接的な検出器を分解能を5倍程改良した実験が出来る事になる。

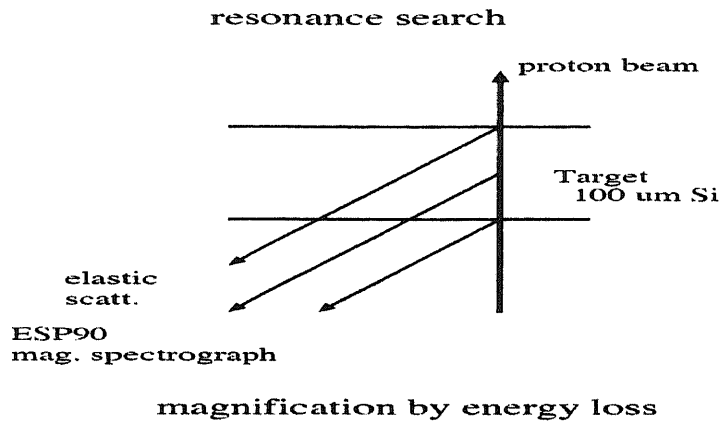


図 4: 厚い標的による陽子弾性散乱と共鳴状態検出

標的中でのエネルギー損失に対応したエネルギー領域の断面積が一度に測定出来る事になる。

図5に135度で散乱された陽子のエネルギースペクトルを示す。

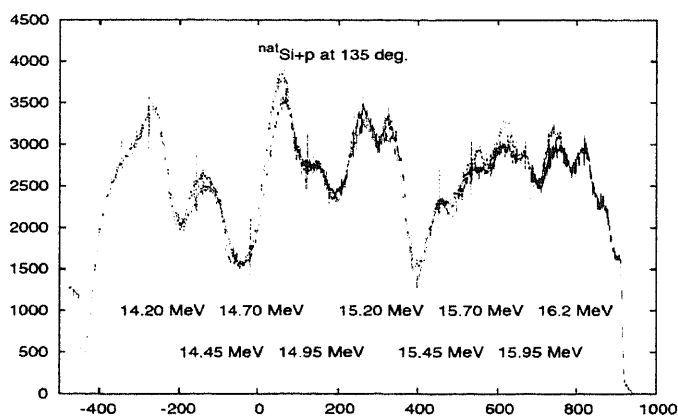


図 5: 135度方向への $^{28}\text{Si} + p$ 弾性散乱のエネルギー依存性

全反応断面積の実験をしている頃には想像出来ない程多数の共鳴状態の存在が了解出来た。

(4) 講義ノートのホームページへの登録

青木はずっと前に、筑波大学第1学群に学生用のLANを起動に尽力した。このシステムは今年度で停止したが、このシステムを学生に利用させる事を目的の一つとして、講義ノートを電子化して、ホームページで公開する事をしてきた。

青木のこの努力に対して、8名の学生が協力を申し出てくれた。この学生の協力で、10年以上前に行った電磁気学・電磁物理学の講義ノートの電子化が完成した。これまでも、大学院生がイオン光学の講義ノートの電子化に協力してくれていたが、8名もの学生が自主的に申し出てくれた事は、驚きでもあり、嬉しくもあった。大学教員としての非常に大きな名誉と感じている。以下のホームページに他の講義ノートと共に、公開されている。

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

(5) 稀少 RI ビーム蓄積リングの検討

低エネルギー原子核実験グループは、2004年4月以来、理研、埼玉大、宇都宮大、新潟大のグループと共同で、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。蓄積リングは不安定核の質量測定用の等時性蓄積リングである。2005年度は、2004年度から引き続いて入射ライン、個別入射のためのキッカー磁石、および質量測定用の等時性蓄積リングの概念設計を進めた。特に2005年11月に理研で技術アドバイザリー会議(TAC)が行われ、その会議で現状の報告を行い国際委員から評価とアドバイスを受けた。[1] 以下、個別の装置に関して現状を述べる。

1. 入射ライン

入射ラインは、ビームを1 μ s 程度遅延させる必要があるため150 m程度の長さが必要である。このため重イオン蓄積リング TARNII の電磁石を再利用することを検討している。2005年6月に電磁石および電源を KEK から理研へ移管した。

2. 個別入射のためのキッカー磁石

ビームの遅延時間は1 μ s 程度であり、キッカー磁石はこの時間内に励磁されなくてはならない。信号の輸送時間などを考慮すると、キッカー磁石はトリガー信号入力後500ns 以下で励磁される必要がある。この時間で励磁が可能かどうか理研のテスト用キッカー磁石で検討を行った。その結果、技術的には、約450ns で励磁させることが可能であることが分かった。

3. 等時性蓄積リング

2005年度は等時性蓄積リングの概念設計を進めた。概念設計のためにシュミレーションプログラムを開発した。[1] 蓄積リングは8個のセクター磁石で構成される。周長は約70 m である。シュミレーションプログラムによる予備的な計算では、等時性は 10^{-7} 以下が可能で、またそのエミッタンスは、約 10π -mm-mrad である。

現在検討中のレイアウトを図6に示した。入射ラインを含む実験装置は、RIBF 実験棟の地下2階に設置される予定である。次年度は以上の個別の装置の詳細設計を進める予定である。

(6) 中性子ドリップライン核 ^{22}C の反応断面積の測定

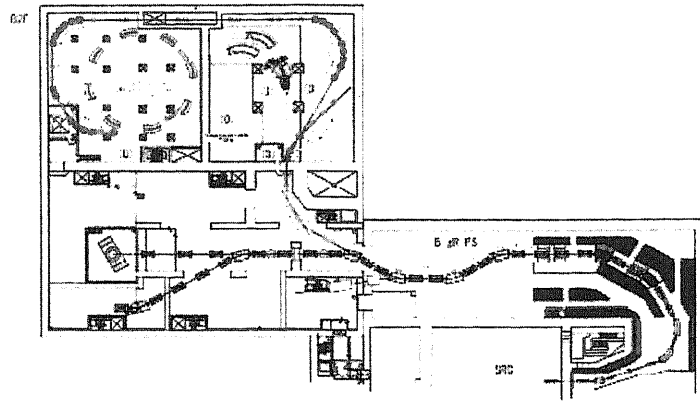


図 6: RIBF における稀少 RI リングの配置 (予定) 図

理研、埼玉大、新潟大のグループと共同で、中性子ドリップライン核 ^{22}C の反応断面積の測定実験を行ったので、これについて報告する。 ^{22}C は炭素アイソトープで最も質量数が多く、中性子ドリップラインに位置している。また、中性子数は 16 であり、中性子過剰領域では 16 が新しい魔法数であることが示唆されていることから、[2] その核構造に興味を持たれる。 ^{22}C は、安定核から遠く離れているためその生成が難しく寿命以外は、その物理量はほとんど測定されていない。今回はその核半径の導出を目的として反応断面積の測定実験を行った。

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 6.3 MeV に加速した ^{40}Ar ビームを Ta ターゲットに照射し、入射核破碎過程により ^{22}C を生成し、RIPS で分離した。RIPS の F3 に液体水素を置き、これを反応ターゲットとした。液体水素の周りを NaI(Tl) で構成される DALI2 検出器で囲みガンマ線の検出を行った。水素反応ターゲットの下流には超伝導の三連四重極電磁石を置き、反応しなかった ^{22}C を最終焦点面 F4 まで輸送した。F4 に輸送された ^{22}C は、PPAC、Si、Plastic counter などの検出器を通過後 NaI(Tl) 検出器に打ち込まれた。実験は 11 日間行われ、得られた ^{22}C のイベント数は、約 10^3 個であった。

この実験では、 ^{19}C および ^{20}C の生成も行い、それぞれの液体水素ターゲットでの反応断面積も測定した。以前、GANIL において、炭素ターゲットを使った相対論的エネルギーでの反応断面積の測定実験により、 ^{19}C および ^{20}C の核半径が求められている。今回の実験は、ターゲットおよびエネルギーが異なるので今回の実験結果と組み合わせることにより、 ^{19}C と ^{20}C のより現実的な密度分布の導出も可能である。現在、これらの実験結果を解析中である。

(7) GANIL における不安定核の質量測定

GANIL で行われている CIME サイクロトロンを用いた不安定核の質量測定に共同研究者として参加したので、これについて報告する。GANIL には重イオン加速用の二台のサイクロトロン (CSS1、CSS2) と RI ビーム生成分離器 (SPIRAL)、及び RI ビーム再加速用サイクロトロン (CIME) がある。サイクロトロンを用いた原子核の質量測定はまず CSS2 を用いて行われた。[3] しかし CSS2 の加速周波数は前段の CSS1 の加速と結合しているため自由度が少なく、測定可能な範囲が一次ビームによって依存するという問題があった。そこで CSS2 の後に RI ビーム分離装置 SPIRAL と RI ビーム加速用のサイクロトロン CIME を建設し、この CIME を用いて不安定核の質量測定が進められることになった。

この研究の目的は、CIME サイクロトロンを用いた、不安定核の高精度質量測定技術の開発で、 $\Delta m/m \sim 10^{-6}$ 程度の精度を目指す。特に ISOLTRAP, MISTRAL や ESR 等では測定できていない領域での適用を目指している。CIME を用いた原子核質量測定は安定核についてのテストがすでに行われている。[4] 今回の実験の質量測定対象は $^{31,32}\text{Ar}$ であり、これらはすでに SPIRAL を用いて RI ビームとして得られている。報告されている質量は ^{32}Ar については 50keV の誤差があり、 ^{31}Ar については報告されていない。ここではサイクロトロンを高分解能スペクトロメータとして用いている。ほぼ m/q が等しいイオンをサイクロトロンで同時に加速して加速最終段後までの飛行時間 (TOF) を測定する。この TOF の時間差 δt は加速周波数 (f) の位相差 ($\delta \phi$) に対応する。わずかに質量が異なる二つのイオンが同時に加速されたとき、これらのイオンの荷電質量比の差は δt と次の関係がある。

$$\frac{\delta(m/q)}{(m/q)} = \frac{\delta t}{t} = \frac{\delta \phi}{\phi} \quad (1)$$

これにより質量が既知のイオンと同時に測定することで未知の質量を知ることが出来る。また数十 μs 程度の半減期の不安定核についても測定が可能である。実際の測定では高周波の周波数を少しずつ変化しながら荷電質量比が既知のイオンに対する TOF または位相の差を測定する。このときの荷電質量比と周波数の変化は次の関係が成り立つ。

$$\frac{\delta(m/q)}{(m/q)} = -\gamma^2 \frac{\delta f}{f} \quad (2)$$

ここで γ は Lorentz factor である。この関係を利用して未知の質量を測定する。CSS2 と異なり、CIME サイクロトロンでは前段の加速器には無関係に周波数を変えることが出来るため、測定に適した周波数範囲を選ぶことが出来る。目的の原子核及び校正用の原子核の両方をカバーするように周波数の変調を行う。再現性を確認するため及び統計を上げるために同じ測定を繰り返す。磁石磁場などの測定の他のパラメータの影響を小さくするため、周波数変調のステップは小さく ($\delta f/f \sim 10^{-5}$) し、繰り返しも速くしている。位相差と周波数の関係について、テスト実験での安定核の結果を図 7 に示す。ここでは $^{12}\text{C}^{3+}$ をはじめ、 $A/q \sim 4$ の安定核についての結果が示されている。

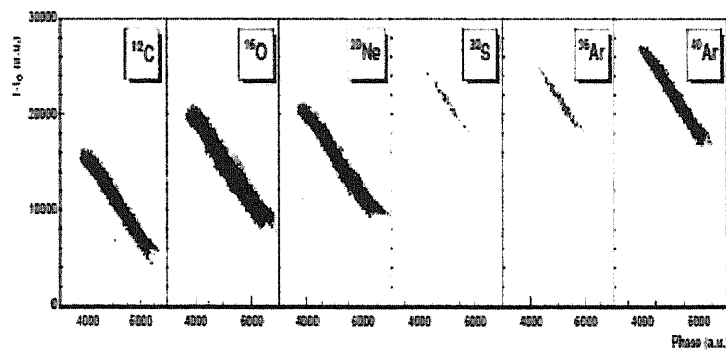


図 7: $A/q \sim 4$ の安定同位体の位相差－サイクロトン周波数のグラフ

次に実験について述べる。CSS で 95 A MeV まで加速した ^{36}Ar ビームを炭素ターゲットに照射し、SPIRAL で質量分析後 CIME に入射する。CIME で加速した粒子は CIME 内に置かれた粒子検出器 (ΔE 及び E Si 検出器) で時間及びエネルギー信号が観測される。時間は CIME の高周波信号に対する時間差をとり記録される。CIME サイクロトロン等の等時性磁場の作成は安定核である $^{84}\text{Kr}^{13+}$ を用いて行う。動径方向での周期の測定を行いこれが等時性を保つようにサイクロトン磁場の補正を行う。この補正には GANIL で開発したプログラムを用いており、等時性が得られるまでの繰り返しが少ない。

なくすむようになっている。なおこのときの Kr の等時性の測定は CIME に備え付けられている検出器で行った。得られた等時性磁場を測定に用いる A/q に合わせて測定を行う。

測定は最初に $A=33$ のビームを入射した。非常に多くのバックグラウンドが観測された。これはイオン源内に残留していた安定核がイオン化され、 A/q が近いものが加速され CIME 内に入ってきていることが、一次ビームを on/off することで確認された。次に $A=31$ に調整して測定を行った。 $A=31$ での主な混入イオンは安定核の ^{31}P である。オンライン解析での ^{31}Ar の収量は約 10^3 個であった。また、実験時間が限られていたため ^{32}Ar の測定は断念した。 $A=31.33$ のデータについては現在解析中である。

(8) 核スピン整列した ^{20}F の β 線角度分布の精密測定

阪大のグループと共同で、核スピン整列した ^{20}F の β 線角度分布の精密測定実験を行ったのでこれについて報告する。弱い相互作用は、電磁気学のように古典論に直接対応する現象が無いために、一つ一つの構成要素を検証していく必要がある。弱い相互作用の構成要素の一つである誘導テンソル型の相互作用は、核子を構成するクォークの違いや核媒質効果等から小さいながらもその存在が期待され、陽子と中性子の入換え及び粒子と反粒子の入換えにより違いが現れる相互作用である。よって、この相互作用は鏡映核での β 崩壊と β^+ 崩壊の崩壊強度を比較することで検証ができる。本研究では、核スピン整列した ^{20}F の β 線の角度分布を精密に測定し、誘導テンソル型相互作用に最も感度の高いルジャンドル関数 $P_2(\cos \theta)$ 角度依存性の係数である整列相関係数 $\alpha(E)$ を測定した。

実験は筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門で行った。 MgF_2 結晶に 12UD ベレトロン加速器を用いて 6MeV に加速した偏極重陽子ビームを照射することで、核スピンの偏極した ^{20}F を生成した。 β 線を指標とした NMR 法を基礎とする核スピン操作法によって、スピンを整列させ (図 8) それぞれの状態での強度比を測定した。この結果、図 9 に示される整列相関係数 $\alpha(E)$ をエネルギーの関数として得ることができた。現在、誘導テンソル項の検証の為、鏡映対である ^{20}Na の解析についても解析を行っている。

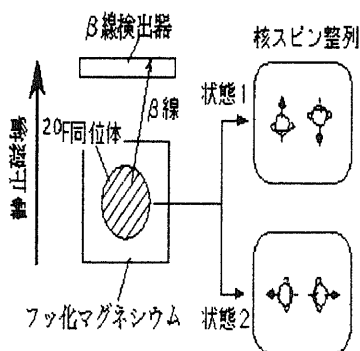


図 8: β 線測定模式図と核スピン整列

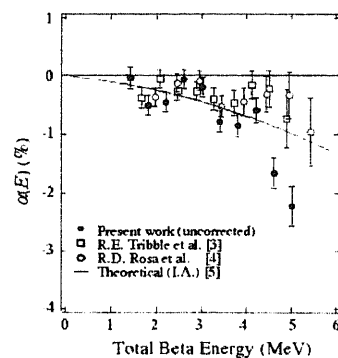


図 9: 整列相関係数 $\alpha(E)$

参考文献

- [1] I.Arai *et al.*, Reports on RIKEN RI Beam Factory Project for RIBF TEchnical Advisory Committee 2005.

- [2] A.Ozawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 5493(2000).
- [3] M.Chartier *et al.*, Hyperfine Interactions **132**, 275(2001).
- [4] M.B.Gomez-Hornillos *et al.*, J. Phys. G **31**, S1869(2005).

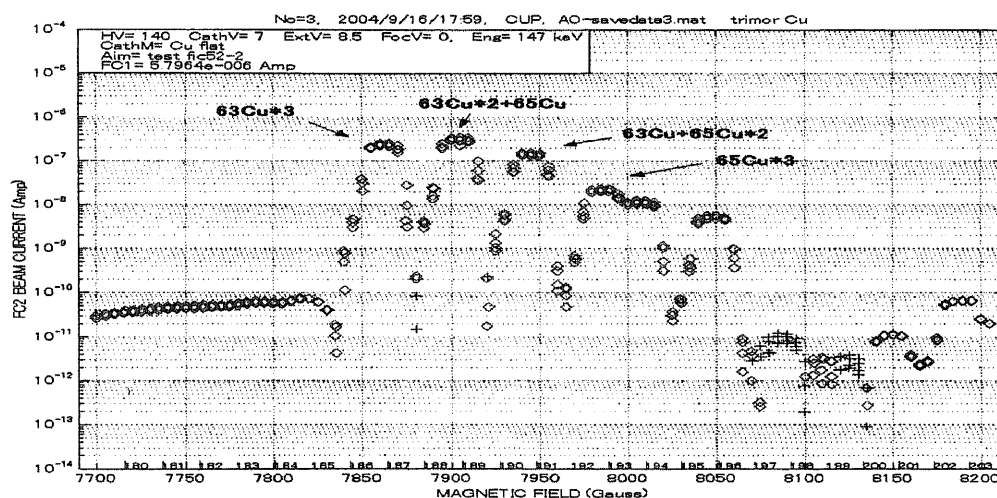
【2】低エネルギー原子核実験グループ(青木孝義、新井一郎、小松原哲郎、笹 公和)

(1) 銅分子イオン電流の生成比と重複順列

【序文】スパッター型負イオン源のカソード物質から、各種の分子イオンが生成する事は知られている。その中で、同一元素の多数の同位体原子からなる多原子分子同士の相対強度の測定は興味がある。例えば、カソード物質を銅としたときに銅の同位体 (^{63}Cu , ^{65}Cu) からなる多原子分子の生成比を精密に測定できれば、それらの多原子分子の生成過程が判明する可能性がある。

【実験・考察】 カソード物質を銅にした時に、下図の様に Cu の3原子分子の質量スペクトルが得られる。同位元素の構成が $^{63}\text{Cu}^*3$ 、 $^{63}\text{Cu}^*2+^{65}\text{Cu}$ 、 $^{63}\text{Cu}+^{65}\text{Cu}^*2$ 、 $^{65}\text{Cu}^*3$ である4本のピークが見られる。これらはどのような形成過程を経て形成されるのであろうか。形成モデルを考える際、物理過程を無視した数学的な順列・組み合わせ論だけを採用する重複順列モデル^{1, 2)}が解析の出発点となろう。次の段階では、物理的過程を考慮したカスケードピクアップモデル(形成中の多原子分子が物質中を飛来しながら、1個ずつ拾い上げながら成長する)とそれに対極にある一撃離脱モデル等(入射原子1個がカソードの結晶格子のブロックを叩き出し、これが分子イオンとなる)が考えられる。実験精度が上がれば、どちらのモデルが適切か判定できよう。

【結果】 ^{63}Cu と ^{65}Cu の存在確率を各々 $a = 69.17\%$ 、 $b = 30.83\%$ とすると、順列モデルを用いれば、 Cu の n 分子の各ファミリ内の強度は a と b の n 次の単項式で表される。実験は予備的であるが、



計算値と実験値は数%以内で一致していることが判明した。

【実験値と重複順列モデルの比較】 3原子分子イオン (Cu^*3)

分子イオン		$^{63}\text{Cu}^*3$	$^{63}\text{Cu}^*2+^{65}\text{Cu}$	$^{63}\text{Cu}+^{65}\text{Cu}^*2$	$^{65}\text{Cu}^*3$
実験値	実験電流値	2.265 (-7)	2.773 (07)	1.421 (-7)	0.2107 (-7)
	電流規格化	1.000	1.223	0.6274	0.09303
順列モデル 計算値	存在確率	$1 * a * a * a$	$3 * a * a * b$	$3 * a * b * b$	$1 * b * b * b$
		0.3309	0.4425	0.1972	0.02930
	規格化確率	1.000	1.3371	0.5959	0.08854

1. 笹部貞市郎編、楼数学要綱 定理公式証明辞典、聖文社、1977

2. Ernest F. Haeussler, Jr. Richard Paul and R. J. Wood, Introductory Mathematical analysis, 2005, Pearson Education, Inc.

(2) 等時性蓄積リングのコンピュータ・シミュレーション

理化学研究所 R I ビームファクトリーの大立体角核破砕片分離器 (BigRIPS) によって得られる世界最強度の R I ビームを用いて不安定核の超精密質量分析に向けて、等時性蓄積リングの建設が検討されている。既に概念設計は済んでいるが、実施計画の策定にあたっては、詳細な性能評価および実験の実現可能性の検討が必要である。本研究では、詳細な性能評価および実験の実現可能性の検討のため、等時性蓄積リングのコンピュータ・シミュレーション・コードの R & D を行った。

等時性蓄積リングは 8 個の扇形電磁石 (曲げ角 $\phi = 4.5^\circ$) と 8 個の直線部で構成される。扇形電磁石は直線の面を持ち、面角を β とし開角が $(\phi - \beta)$ となるようにした。また、扇形電磁石内部の磁場は 2 つの成分、(1) 主コイルによる一様磁場 B_0 および (2) トリム・コイルによるハーモニック磁場 B_h 、からなる。基本的な設計原理は以下の通りである。

- 1) 分散整合入射を採用する。
- 2) 面角 β を調節して、等時性における $\Delta p/p$ の 1 次の項を補償する。
- 3) ハーモニック磁場 B_h を調節して、等時性における $\Delta p/p$ の 2 次の項を補償する。

コンピュータ・シミュレーションでは、フリンジング磁場に関してハードエッジ近似を採用し、ビーム粒子の飛跡に関しては幾何学的追跡を行った。また、扇形電磁石を 150 の微小扇形電磁石に分割し、4 次のルンゲークッタ法を採用した。シミュレーションの結果、約 $10 \pi \text{ mm mrad}$ のエミッタンス範囲において、分散整合入射と面角 β の調節により、 $\Delta p/p$ が $\pm 1\%$ の範囲で $\sim 10^{-4}$ の等時性が、さらにハーモニック磁場 B_h の調節により、 $\sim 10^{-8}$ の等時性が実現できることが分かった。

シミュレーションの結果得られている等時性蓄積リングのパラメータを表に示す。

Table I: Storage Ring Main Parameters

Injection Energy	200 [MeV/A]
Particle Velocity	0.56769 [c]
Circumference	70 [m]
Straight Sections	5.45133 [m/Unit]
Sectors	
1) Number of Units	8 [Units]
2) Radius of Curvature	4.2 [m]
3) Bending Angle	0.78540 [rad]
4) Edge Angle	0.17651 [rad]
5) Radial Width	0.43237 [rad]
6) Magnetic Fraction	0.55052
7) k	0.00850 [$/\text{m}^2$]
Horizontal Tune	1.255
Vertical Tune	1.003

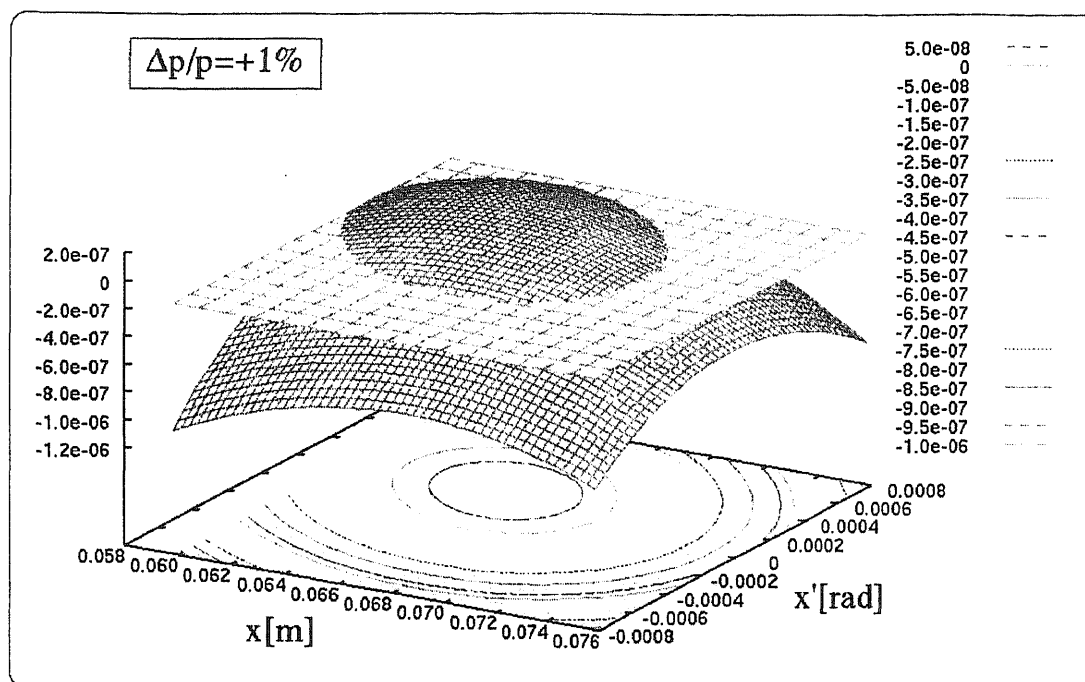


図 1、分散制御したときのエミッタンスと等時性

(3) FT-ICR によるコバルトクラスターの酸化反応の研究

金属クラスターの酸化反応の実験的研究が各国で行われている。これらの実験に呼応して、サイズ選別したニッケルクラスターの表面酸化反応から安定なナノ粒子を作成するために、ニッケルクラスターの酸化過程を調べる実験が FT-ICR 質量分析器を用いて行われた。この実験結果から、温度 300K、反応させた酸素の圧力 1.0×10^{-6} Torr (1.33×10^{-4} Pa) の条件下で、 $\text{Ni}_{13}\text{O}_8^+$ と $\text{Ni}_{16}\text{O}_{10}^+$ が安定であることがわかった。

コバルトはニッケルと同様に磁性を持っている。ニッケルクラスターとコバルトクラスターの性質を比較し、それらの酸化物に注目しながら、類似点と相違点を探るために、コバルトクラスター(陽イオン)の酸化反応の実験を室温、 1.0×10^{-8} Torr、 1.0×10^{-7} Torr、 1.0×10^{-6} Torr において行った。

実験のセットアップは主に外部のクラスターソースと FT-ICR 質量分析器である。コバルトクラスター(陽イオン)、 Co_n^+ はコバルトの棒にレーザーを当て、局所的に蒸発させることによって作られる。コバルトクラスターイオンは FT-ICR チェンバーに誘導され、室温での FT-ICR セル内で電磁場によってトラップされる。アルゴン原子での衝突によって熱平衡にした後、コバルトクラスター(陽イオン)は 1.0×10^{-8} Torr (1.0×10^{-7} Torr、 1.0×10^{-6} Torr) に保たれた状態の酸素と反応を起こす。そして、0.1 s – 10.0 s の反応時間において、各々の圧力での質量分布を測定した。

実験実験から、室温において圧力を上げると反応時間の増加と共に $\text{Co}_{13}\text{O}_8^+$ のピーク値が強くなる傾向にあることから、 $\text{Co}_{13}\text{O}_8^+$ が安定でありそうである。このことから、ニッケルクラスター(陽イオン)と同じ結果が示唆される。一方、ニッケルの場合 $\text{Ni}_{16}\text{O}_{10}^+$ の安定性が示されたけれども、コバルトの場合は $\text{Co}_{16}\text{O}_{10}^+$ の安定性を見出すことができなかった。このことから、酸化反応において Ni_n^+ と Co_n^+ の間に明らかな相違が見られた。

今後は、 Ni_n^+ と Co_n^+ の酸化反応の相違をさらに探るため、よりサイズの大きい Co_n^+ の酸化反応の解析を行い、 Ni_n^+ と Co_n^+ の酸化反応の類似点と相違点を検討して行く予定である。

(4) 陽子弾性散乱同時計数法による水素分析

研究基盤総合センター応用加速器部門において、12UDペレトロンにより加速された20MeV陽子ビームを用いたマイクロビームにより、鉱物試料微細領域の水素濃度測定方法の開発を行っている。この水素分析法は陽子弾性散乱同時計数法（ERCS法）と呼ばれ、標的中の水素原子核とビームの陽子イオンとの弾性散乱を前方45度方向に設置した2台の検出器で同時に測定する為、水素に対する感度が高く数十ppm程度の微量な水素も測定可能である。

同時計数法による検出では、2台の検出器の幾何学的な配置が非常に重要である。図1に今回新たに制作した検出器支持台を示す。左右の検出器の入射スリットの大きさを同一にすると、100 μ m以下の精度で位置合わせをする必要が生じる。しかし、一方のスリットを少し大きめにし、非対称な配置にすると、取り付け誤差が原因による立体角の変動がほとんど起きない事が判明した。照射位置から38ミリの位置に検出器スリットを設置し、右の直径を8ミリメートル、左を12ミリメートルに変更した。この改良の結果、測定値は安定し測定精度が非常に向上した。

図2左にERCS法で得られた2次元スペクトルを示す。照射サンプルは50 μ m厚の無水ガラス4枚とマイラーフィルム5枚を交互に重ねた積層サンプルである。測定で得られた2次元スペクトルには、5枚のマイラーフィルムに対応して5本の線が現れる。図の“1”は入射側のマイラー、“5”は出射側に対応する。検出器のスリットが45 \pm 6度の広がりを持つため、得られたスペクトルは曲がった曲線になる。この曲がりは“1”が最も顕著である。この2次元スペクトルの「歪み」を人為的に補正する手法を実験的な手法により開発した。図2右が変換の結果得られたスペクトルである。マイラーフィルムに由来する5本の線はほぼ平行になった。

ERCS法では、得られたスペクトルから厚み方向の水素濃度プロファイルを得ることが可能である。一方、非常に薄い表層中の水素分析に関する要請もあり、厚さの分解能の向上が要求されている。そこで、ビームのエネルギーを変化させ分解能を測定した。10 μ mの無水石英ガラスの両面にホルムバールを薄く塗り、ターゲットとした。ビームのエネルギーが20MeVの場合は石英ガラス200 μ m厚を透過する事が可能であるが、ビームエネルギーが4MeVの場合は飛程が短くなるため、この10 μ mの標的を使用した。水素濃度プロファイルの分解能は石英ガラスに換算し、20MeVでは9.2 μ m、4MeVでは0.85 μ mと測定された。厚み方向の分解能はエネルギーに強く依存し、低いエネルギーのビームを使用すると分解能が向上する事が示された。

ERCS法による水素濃度の測定の確からしさは、他の測定方法で得られた値との比較から導出する事ができる。マイラー、カプトン、ポリエチレン、ポリイミド（NTTアドバンステクノロジー社提供、PL-01）について、CHN元素分析法と比較した。また、米国NISTの標準物質である水素吸蔵チタンも分析した。比較実験の結果から、我々の水素分析の系統誤差は3%と見積もる事ができた。実際の測定ではマイラーフィルムを標準物質として使用するが、このマイラーの厚みと濃度のバラつきが3%である為、ERCS法による誤差は全体で5%であると結論された。

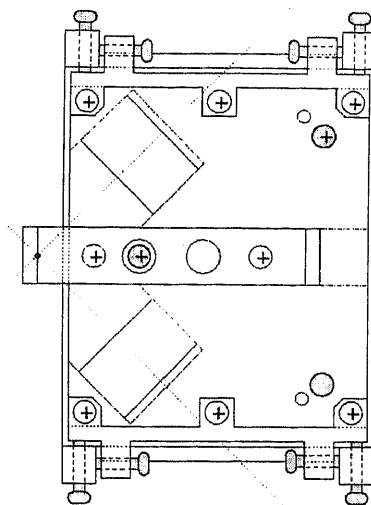


図1 ERCS法検出器支持台

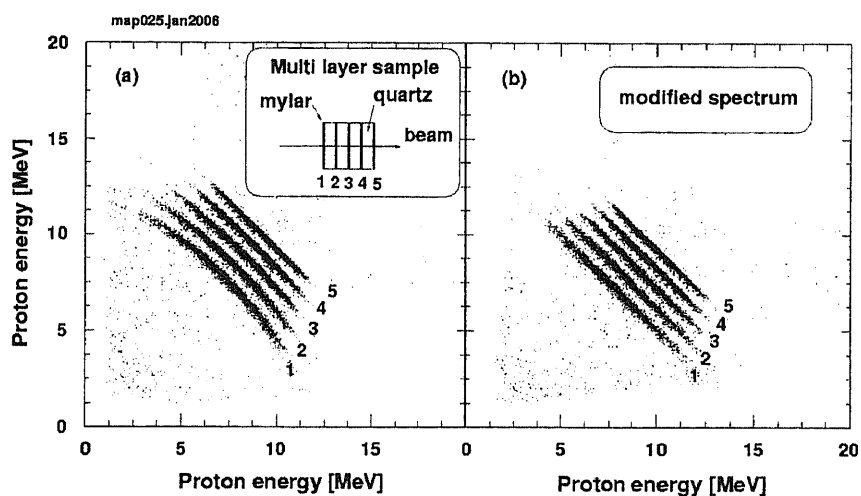


図2左：ERCS法により得られた2次元スペクトル。
右：新解析方法により変換されたスペクトル。図中の線の歪みが無くなった。

(5) 高精度加速器質量分析法(AMS)の開発

12UD ペレトロンタンデム加速器を用いて、高精度加速器質量分析法の開発を進めている。 ^{26}Al , ^{36}Cl -AMS 測定法は既に実用化されており、現在は測定精度向上の為に技術開発が進められている。特に ^{36}Cl 測定では、 $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 比で 10^{-14} オーダーの南極氷床コア試料の年代測定を計画しており、イオン生成系の改良やイオン交換法による試料処理方法の開発を進めている。 ^{36}Cl -AMS 測定での実用限界は $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl} = 2 \times 10^{-14}$ であり、 ^{26}Al -AMS では $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} < 5 \times 10^{-15}$ の高感度測定を実現している [1]。また新たに ^{129}I -AMS 測定法を開発を行っている。表1に筑波大学AMSシステム測定概要を示す。また図1に標準試料 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I} = 4.9 \times 10^{-10}$ を用いた ^{129}I -AMS 測定結果を示す。

表 1 筑波大学 AMS システムにおける ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{129}I -AMS 測定概要

	Sample material	V_T	Injection ion	Pilot beam	Detection ion	Particle energy	Background
^{26}Al -AMS	$\text{Al}_2\text{O}_3 + ^{26}\text{MgO}_2 + \text{Ag}$	10.2 MV	$^{26}\text{AlO}^-$	$^{26}\text{MgO}^-$	$^{26}\text{Al}^{13+}$	78 MeV	5×10^{-15}
^{36}Cl -AMS	$\text{AgCl} + \text{C}_{60}$	10 MV	$^{36}\text{Cl}^-$	$^{12}\text{C}_3^-$	$^{36}\text{Cl}^{14+}$	100 MeV	2×10^{-14}
^{129}I -AMS	$\text{AgI} + \text{MoO}_2 + \text{Nb}$	9.7 MV	$^{129}\text{I}^-$	$^{97}\text{MoO}_2^-$	$^{129}\text{I}^{26+}$	126 MeV	$\sim 5 \times 10^{-13}$

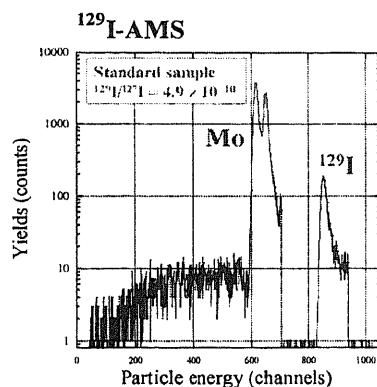


図 1 $^{129}\text{I}^{26+}$ (126 MeV) の計測スペクトル (標準試料 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I} = 4.9 \times 10^{-10}$)

研究グループでは、加速器質量分析法の研究進展と日本及び東アジア圏の関連研究者の相互交流を進める為、中国、韓国、アメリカ等からの 8 名の招待講演者を含む 102 名の参加者を得て、以下の国際シンポジウムを主催した [2]。

2006 年 1 月 26-28 日 「第 1 回東アジア AMS シンポジウム及び第 8 回 AMS シンポジウム」

(6) 加速器質量分析法(AMS)を用いた応用研究

筑波大学 AMS システムでは、原子核物理学から原子力、環境、地球科学研究等の広い範囲で学際応用研究を展開している。学内外研究機関との共同研究課題は以下の通りである。

^{36}Cl -AMS

- クリアランスレベル調査の為の加速器・原子力施設遮蔽物中の ^{36}Cl 濃度測定 (KEK)
- 比較的近年の地下水動態調査 (生命環境科学研究科)
- 南極落下隕石年代の調査 (首都大学東京)
- 南極ドームふじ氷床コア試料 ^{36}Cl 測定 (国立極地研究所, 国立環境研究所, 東大, 弘前大)

^{26}Al -AMS

- クーロン障壁近傍エネルギーの $^{14}\text{N}(^{16}\text{O}, \alpha)^{26}\text{Al}$ 天体核反応断面積 (CIAE, China)

^{129}I -AMS

- セミパラチンスク核実験場の土壌試料中 ^{129}I 測定 (広島大)
- ・ 比較的近年の AMS 年代測定方法の開発
(生命環境科学研究科 田瀬則雄氏、戸崎裕貴氏との共同研究)

1952~1958 年に海域で行われた核実験により、 ^{36}Cl は海水中の ^{35}Cl との $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 反応(44 barn)で大量に生成された。この自然環境放射性核種の増大は、核実験起源パルス(bomb pulse)と呼ばれている。この核実験起源 ^{36}Cl を用いて比較的近年(~50 年)の年代測定法を開発した。応用例として、茨城県つくば

市の筑波台地における近年の滞留地下水(深度 7、30、40、55、85、240 m)の年代測定を試みた。図 2 に深度 7–40 m における地下水中 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 比を示す。核実験起源パルスに対応して、それぞれ交点が 2 つずつ存在する。採水を行った 2004 年を基準として考えると深度 40 m の地下水は、左側の交点から初期の核実験の影響を受けた 50 年程度の滞留時間であると推定できる。また 30 m の地下水は、滞留時間は 35 年程度と推定される。深度 55 m 以深の地下水 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ は $1\text{--}2 \times 10^{-13}$ 程度であり、核実験以前のバックグラウンドレベルとなった [3]。

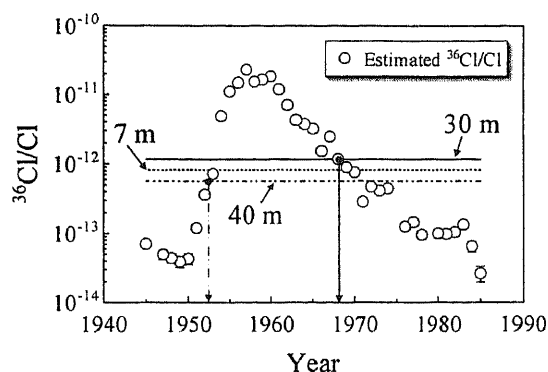


図 2 核実験起源パルスを応用した地下水滞留年代の推計。白丸はグリーンランド Dye-3 氷床コアから得られた $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 比

・南極氷床コア試料による年代指標

南極ドームふじ基地において、3,000 m 氷床深層掘削が進んでいる。極地の氷床コアには数十万年に及ぶ地球環境変動の記録が残されており、過去の宇宙線生成核種の降下量とその変動の変遷が解明されれば、過去 100 万年オーダーの年代校正指標として利用できる。また、精緻な環境変動記録の復元とそれに基づく地球環境システムのより正確な将来予測手法の確立が期待される。研究グループでは、この氷床コア計画において宇宙線生成核種 ^{36}Cl 分析を担当している。

予備的な測定として、氷床コア試料の深 100m 切削試料片の ^{36}Cl 測定を実施した。但し、キャリア 3.015 mg/mL 標準溶液(1.8 mg/kg)を添加し、キャリア比重 1 とした。測定結果より南極氷床コア試料中の ^{36}Cl 測定実施の可能性を確認した。

表 2 南極氷床コア試料の深 100m 付近の切削試料片中の ^{36}Cl 試験分析結果

$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$	error	^{36}S 補正率%	Cl (mg/g)	Cl (mol/g)	^{36}Cl (atoms/g)	error
2.49E-13	3.20E-14	12.85	0.0018	5.12E-08	7.68E+00	9.88E+02

(7) プロトン励起準単色 X 線を用いた高コントラスト X 線撮影技術の開発 (東京工業大学 小栗慶之氏、長谷川純氏との共同研究)

7MeV プロトンビームを La と Sn に照射して、X 線の K 吸収端を利用したヨウ素造影剤の高コントラスト透過画像撮影の技術開発を進めている。図 3 に CdTe 検出器による X 線測定結果と各種物質の X 線吸収スペクトルの計算値を示す。La の $K\alpha$ 線は 33.4 keV、Sn は 25.2 keV、I の K 吸収端は 33.2 keV である。ここではヨウ素造影剤を想定し、K 吸収端前後の準単色 X 線の差分を利用した高コントラスト透過

画像の撮影を試みた。アクリル製ファントムに濃度の異なる KI 溶液を装填し、標準試料として用いた。

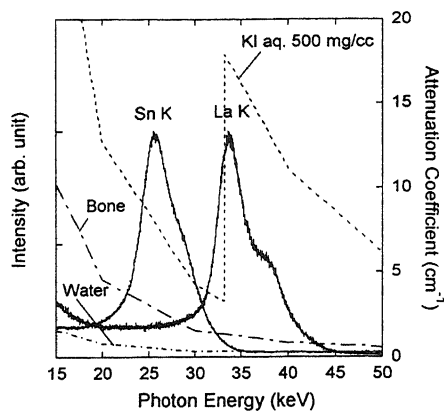


図 3 X-ray energy spectra and attenuation coefficient of iodine contrast medium,

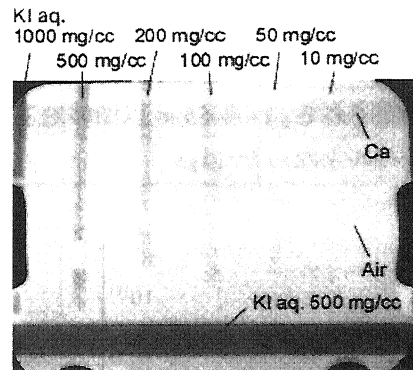


図 4 Transmission images of phantom with La target

図 4 は La 標的を用いたファントムの撮影画像である。KI 溶液濃度の違いが鮮明に識別でき、高コントラスト撮影の可能性を確認した。

(8) マイクロ PIXE システムの開発 (生命環境科学研究科 黒澤正紀 氏との共同研究)

1 MV タンデトロン加速器において、マイクロ PIXE 分析システムの開発を行った。1.9 MeV の陽子ビーム(1 nA 以下)を 10 μm 径まで収束可能であり、標的の位置合わせ、観察系等の制御システムを備えている。陽子ビーム励起特性 X 線(PIXE)では、対象物質の多元素同時定量分析(AI 以上)が可能であり、マイクロビームを用いることで極微小領域の元素分析も可能となる。図 5 に開発したマイクロ PIXE 分析システムの全体図を示す。

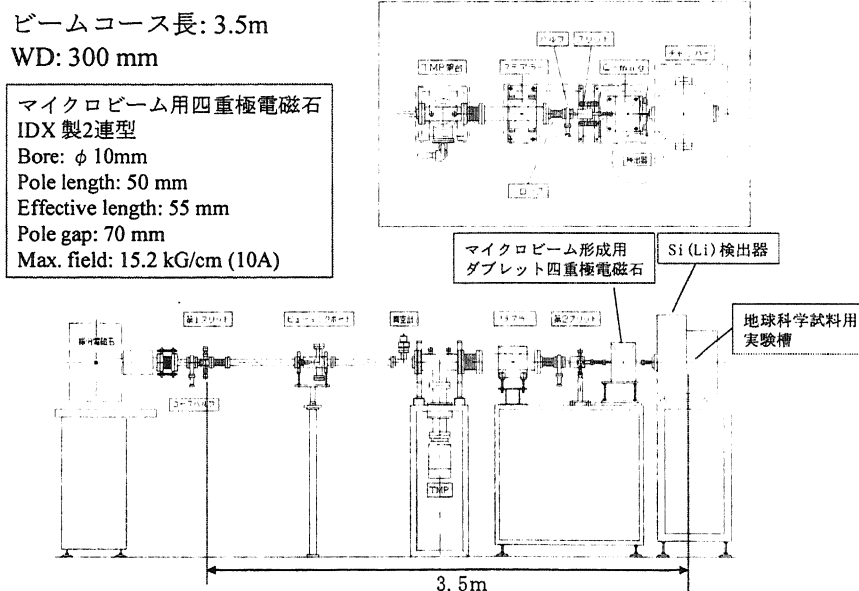


図 5 多元素同時定量の為のマイクロ PIXE 分析システム

References

- [1] K. Sasa, Y. Nagashima, T. Takahashi, R. Seki, Y. Tosaki, K. Sueki, et al., ^{26}Al and ^{36}Cl AMS system at the University of Tsukuba: A progress report, Nucl. Instrum. and Methods B, in press.
- [2] Proceedings of the First East Asian Symposium on Accelerator Mass Spectrometry, UTTAC-74, 2006, University of Tsukuba.
<http://web2.tac.tsukuba.ac.jp/ams8/>
- [3] Y. Tosaki, N. Tase, Y. Nagashima, R. Seki, T. Takahashi, K. Sasa, et al., Nucl. Instrum. and Methods B, in press.

【3】高エネルギー原子核実験グループ (三明康郎、江角晋一、中條達也、加藤純雄)

高エネルギー原子核実験グループは、米国・ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の RHIC 加速器を用いた PHENIX 実験に参加し、高温・高エネルギー密度物質、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の実験的研究を行っている。本年度は、(1) 直接光子の方位角依存性の測定、(2) 2004 年に得られた高統計金原子核衝突データの解析、(3) 2005 年に得られた銅原子核衝突データの解析、など活発な研究活動が行われた。一方、PHENIX 実験のアップグレード計画においても精力的な活動を行っている。本グループでは、反応平面検出器と MRPC 型飛行時間測定器の開発・製作に関わり、2006 年夏の両検出器導入に向け、順調に計画が進行中である。

(1) 直接光子の方位角異方性

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方位角異方性 (v_2) は、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 生成の有力な証拠の一つである。この粒子放出における異方性 (v_2) が衝突後の非常に初期の様相を反映する測定量であるからである。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。また、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おり、QGP による高エネルギーパートンのエネルギー損失がその原因だと考えられる。それに対し、直接光子の金+金衝突における収量は、陽子+陽子衝突重ね合わせに比べ、抑制がほとんど無い事が観測された [1]。実験的には、包括光子の主な源である π^0 等のハドロンの抑制により、中心衝突度が上がるとともに特に高横運動領域での包括光子の主成分が直接光子になっている事が分かった。直接光子は衝突初期の核子+核子散乱過程で主に作られ、また物質との相互作用が小さいので、他のハドロンのような抑制が見られないと考えられる。

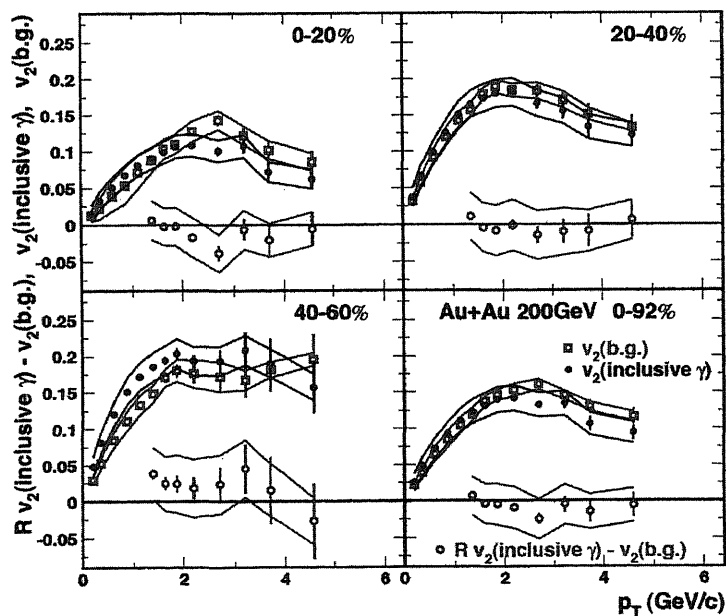


図 1: 包括光子の v_2 と、 π^0 等のハドロンから予想されるバックグラウンドの光子の v_2 [2]

しかし、パートンのエネルギー損失に伴う光子や、その後の破砕過程で作られる光子や、QGP 相からの熱的放射による光子などを含んでおり、それら全ての重ね合わせが、偶然に陽子+陽子衝突の重ね合わせで説明できている可能性もある。そこで、直接光子の包括収量測定とは独立な観測量である方位角異方性 (v_2) を測ることにより、光子生成のより詳しい理解を行った [2]。図 1 には、包括光子の v_2 と、 π^0 等のハドロンから予想されるバックグラウンドの光子の v_2 とその比較が示されている。直接光子の生成が重要になり始める高横運動領域 (4 GeV/c 以上) で、この差は小さい事は直接光子の v_2 が小さい事を示唆している。

図 2 は、包括光子の収量の、 π^0 等のハドロンから予想されるバックグラウンドの光子に対する比を示す。包括光子収量の直接測定から得られた結果を黒丸で示し [1]、包括光子の v_2 測定から直接光子の $v_2 = 0$ を仮定して得られた結果を白抜き丸で示す [2]。2つの結果が誤差の範囲で一致している事は、上の仮定 (直接光子の $v_2 = 0$) の妥当性を示している。

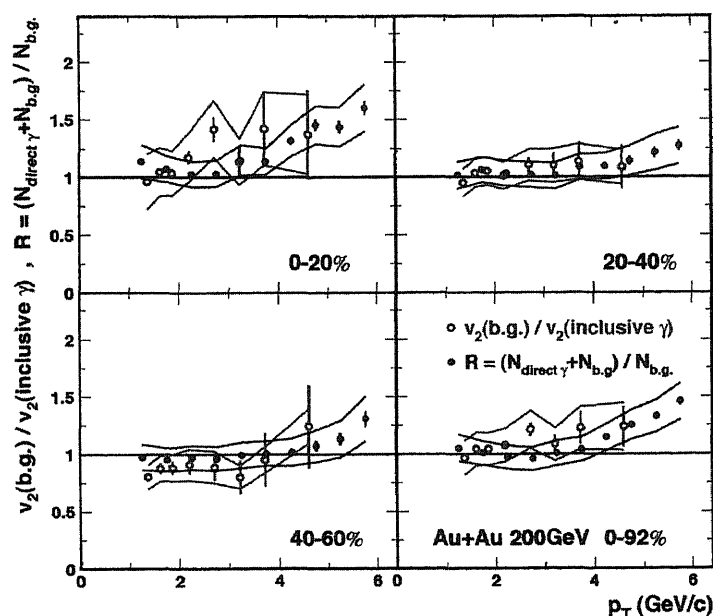


図 2: 包括光子の収量の、 π^0 等のハドロンから予想されるバックグラウンドの光子に対する比 [2]。包括光子収量の直接測定から得られた結果を黒丸で示し、包括光子の v_2 測定から直接光子の $v_2 = 0$ を仮定して得られた結果を白抜き丸で示す。

(2) チャーム起源の電子の楕円方位角異方性の測定

高エネルギー原子核衝突実験の目的は宇宙初期に存在していたと考えられている、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の生成である。QGP 生成のシグナルには様々なものが提唱されているが、その中でも生成粒子の方位角異方性は QGP 生成の有力なシグナルと考えられている。これまでの RHIC 実験での方位角異方性の測定から、主に u quark や s quark などの軽い quark からなる粒子 (π 中間子、K 中間子) の方位角異方性が確認され、その起源が u quark や s quark の quark level での方位角異方性に起因していることが示されている。charm quark は u quark などと比べ質量が大きいため、u quark と同様に方位角異方性を持つためには、衝突により非常に密度の高い物質が形成され、その中で何度も散乱する必要がある。そのため charm quark の方位角異方性が確認できれば、衝突によって高密度状態の物質が形成された一つの証拠であると考えられる。

本研究では電子の方位角異方性を測定することにより charm quark の方位角異方性の研究をおこなった [3]。まず初めに衝突により生成される全電子の方位角異方性の測定をおこない、そこから charm 起源以外の電子の効果を差し引くことによりその測定をおこなった。結果を図 3 に示す (横軸は横運動量を表し、縦軸は楕円の方位角異方性の強度 (v_2) を表す)。その結果、charm 起源の電子もこれまでに測定されている π 中間子などと同じように方位角異方性を示した。図中の線 (実線、破線) はモデルにより予想された charm 起源の電子の v_2 である [4]。実線は charm quark に方位角異方性がある場合の結果で、破線は方位角異方性がない場合の結果である。横運動量が 2.0 GeV/c 以下では charm quark に方位角異方性を仮定したモデルは測定された結果と一致していることがわかる。このことは charm quark にも方位角異方性があることを示唆していると考えられる。横運動量が高いところでのモデルからのずれは B meson 起源の電子の効果と考えられている [5]。

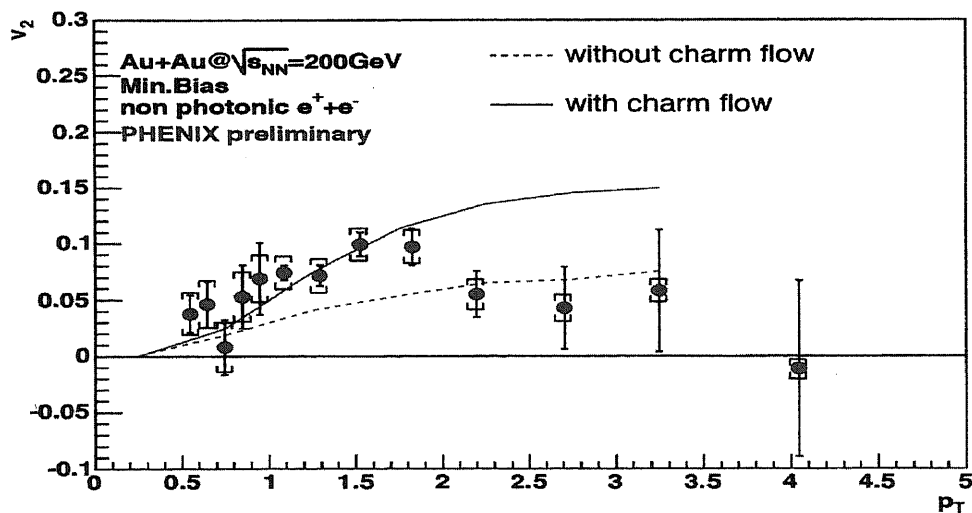


図 3: charm quark 起源の電子 v_2 とモデルとの比較 (横軸の単位は GeV/c) [3]

(3) RHIC-PHENIX 実験における金・金及び銅・銅衝突を用いた荷電ハドロンの系統的な楕円フローの測定

楕円フロー (v_2) は相対論的重イオン衝突加速器 (RHIC) を用いて行われている高エネルギー重イオン衝突実験において、衝突初期に生成され得る超高温・高密度な状態 (クォークグルーオンプラズマ, QGP) に敏感な測定量として注目されている。 v_2 は衝突初期の幾何学的非等方性 (ϵ) に起因する圧力勾配により発生すると考えられている。流体力学によると、もし QGP が完全流体で記述できるならば、 v_2 はスケーリング則に従い、衝突系の大きさには依存しない。また、より高次項である v_4 は完全流体力学では、 v_2 の二乗の 1/2 になると言われている。

2002 年度に PHENIX 実験において収集されたデータから、識別された荷電ハドロンの v_2 は、横運動量 (p_T) 約 1.5 GeV/c 以下では完全流体を仮定した力学モデルの計算と非常に良く一致することが分かった [6]。流体力学モデルでは衝突後約 1 fm/c という極短時間に熱平衡に達したと仮定している。したがって、この結果は RHIC エネルギーで系が熱平衡に達したことを強く示唆している。2004 年度と 2005 年度に行われた実験では、より高統計の金・金衝突及びそれと同程度の銅・銅衝突からのデータが得られた。以下では、それらのデータを解析して得られた v_2 測定の結果を示す [7]。図 4 は金・金及び銅・銅衝突実験で測定された包括荷電ハドロンの v_2 の p_T 依存性である。縦軸は、 v_2 を ϵ で割った量で、衝突系に依らず一定であることが広範囲にわたる衝突中心度で観測された。これは、比較的小さな系である銅・銅衝突でも、系が熱平衡に達したことを示唆する結果である。図 5 は識別された荷電ハドロンの v_4 の p_T 依存性である。図中の破線が示すように、測定された v_4 は $(v_2)^2$ の 1.5 倍でスケールすることが観測された。これはすでに測定された STAR 実験での結果 $v_4 \sim 1.2(v_2)^2$ とほぼ一致している。また、クォーク再結合模型によると、中間子と重粒子の v_4 はそれぞれ $(v_2)^2$ の 3/4、2/3 でスケールすると予想しているが、これらはいずれも測定結果に比べて小さい。今後 v_4 のより詳細な中心衝突度依存性、エネルギー依存性を調べることは、楕円フロー発生の起源や衝突初期状態の理解を深める上で重要なテーマの一つである。

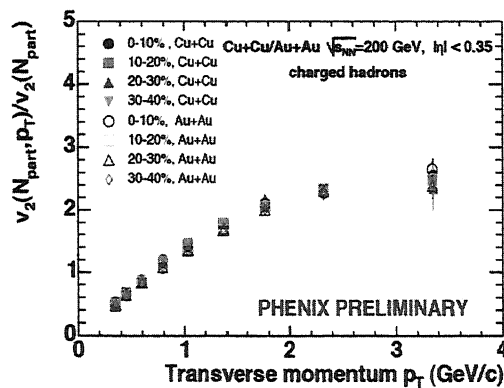


図 4: 重心系で核子対あたり 200 GeV の、金・金及び銅・銅衝突から得られた、識別されていない荷電ハドロンの v_2 の p_T 依存性 [7]。黒塗りのデータポイントは金・金衝突、白抜きは銅・銅衝突実験から得られた結果。縦軸は幾何学的異方性 (ϵ) でスケールした v_2 である。

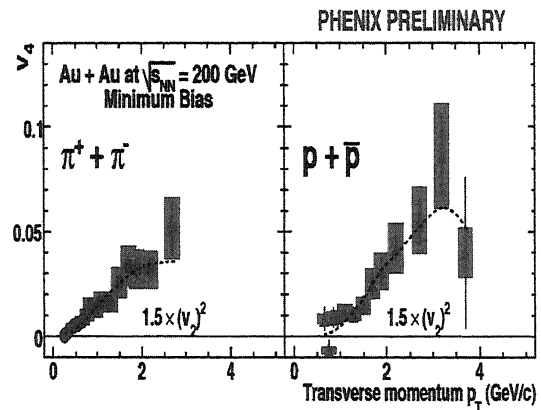


図 5: 重心系で核子対あたり 200 GeV の金・金衝突実験で測定された、 π 中間子 (左)、陽子 (右) の v_4 の p_T 依存性 [7]。水色のバンドは系統誤差を表している。図中の破線は $1.5 \times (v_2)^2$ 。

(4) 高横運動量領域でのハドロン粒子識別測定

RHIC 衝突実験におけるこれまでの発見の 1 つに、横運動量領域 p_T 2-4 GeV/c での粒子収量の粒子種依存性がある。メソン（パイ中間子や K 中間子など）の収量が、p+p 衝突に比べて大きく抑制されている一方で、バリオン（陽子・反陽子、ラムダ粒子など）の収量は増大されていることが観測された。この抑制効果は、生成されたミニ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るためと説明されている。一方、バリオンの増大効果も、様々な理論的モデルによって説明がなされているが、まだ確定的なものはない。このバリオン増大効果の起源を解明するために、さらに高い横運動量領域 ($p_T > 4$ GeV/c) でのバリオン測定が必要となっていた。この測定を可能にするために、ハドロン粒子識別能力強化用の、エアロジェルチェレンコフ検出器 ($n=1.011$) を開発・製作し、PHENIX 検出器系に導入した。2004 年までに、南北それぞれの部分のインストールが終了し、その後、検出器は順調に動作し、様々な衝突条件の下でのデータ収集がなされている。

新しく導入したエアロジェル検出器と、既に稼働中の飛行時間測定器を用いて、衝突データの解析を進めた。反陽子/パイ中間子比の横運動量依存性 ($\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV Au+Au) を図 6 に示す。パイ中間子に対する反陽子の収量が、2-4 GeV/c 付近で大きく増加していることを確認できた。また、より高い横運動量では、減少していくことが新しく分かった。これは、クォーク再結合モデルの予想と一致する [8]。これらの測定結果から、横運動量 2-4 GeV/c において、ハドロンの生成がソフト部分 (クォーク再結合過程) から、ハード部分 (媒質によるエネルギー損失を伴うジェット破碎過程) に移行すると考えられる。ここで、クォーク再結合モデルとは、熱平衡状態にあるパートンが融合してハドロン生成が行われたとするもので、通常のジェットの破碎過程とは異なるメカニズムで (反) 陽子が生成していることを意味する。つまり、ハドロンの閉じ込め状態が一度破れ、バラバラになったクォークが再結合するという考え方である。

また、異なる衝突条件 (衝突核種 Au+Au/Cu+Cu/p+p、衝突エネルギー 200/62/22 GeV) でのデータを用いて、系統的なハドロン測定も行った。衝突中心度を変えることは、反応領域の体積、表面積、形状を変えることに相当する。衝突核種を変えることで、同一の体積を保ったまま、表面積、形状を変えることもできる。これら幾何学的なパラメータが、どうハドロン生成に影響しているかを調べるのが目的である。図 7 は、反陽子/パイ中間子比の N_{part} (反応関与部の核子数) 依存性である [9]。同一の衝突エネルギーにおいては、Au+Au, Cu+Cu ともに同じような N_{part} 依存性を示している。今後も異なる衝突条件でのハドロン測定を続け、詳細に比較する予定である。

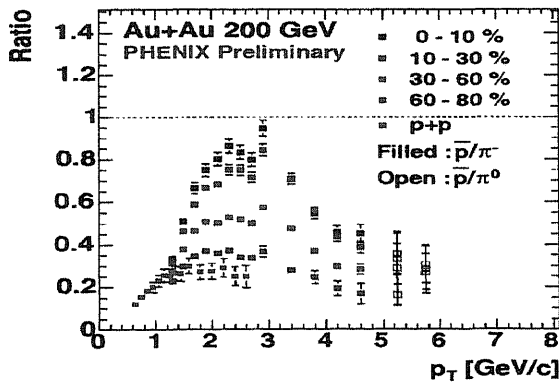


図 6: 反陽子/パイ中間子比の横運動量依存性 ($\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV Au+Au)

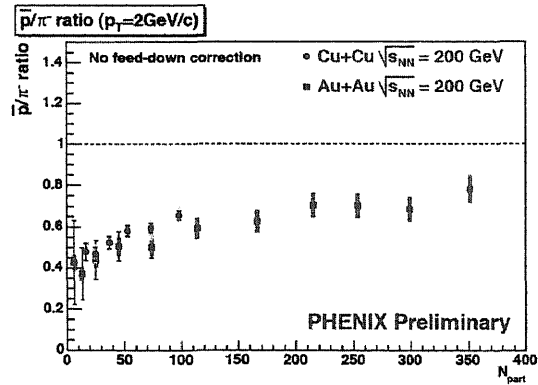


図 7: 反陽子/パイ中間子比の N_{part} 依存性 ($p_T=2$ GeV/c, Au+Au, Cu+Cu at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV) [9]

(5) RHIC におけるバリオン生成異常のビームエネルギー依存性

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の RHIC 加速器を用いた高エネルギー重イオン実験 (PHENIX) は、2006 年で 6 年目の物理測定に突入した。過去 5 年間の測定で、クォーク・グルーオンプラズマ相転移の存在を強く示唆する実験的証拠が次々に発見され、中でも高い横運動量領域でのジェット抑制効果やバリオンの異常生成は、RHIC の重イオン物理を特徴づける現象の 1 つである。しかしながら、これらの現象がどのビームエネルギーで生じ、また衝突させる原子核の大きさやビームエネルギーの変化とともにどのように発展するのか、明確ではない。そこで 2005 年の RHIC 物理ランでは、これまで用いていた金原子核よりも核子数が約 1/3 である銅原子核を用い、核子あたりの重心系エネルギー $\sqrt{s_{NN}} = 22.5, 62.4, 200 \text{ GeV}$ でのデータ収集が行われた。

本研究では、PHENIX 実験で新たに収集した低いビームエネルギー ($\sqrt{s_{NN}} = 22.5, 62.4 \text{ GeV}$) の銅原子核衝突 (Cu+Cu) にデータを解析し、各ビームエネルギーにおける π, K 中間子、陽子 (p)、反陽子 (\bar{p}) の収量横運動量分布、粒子比、Nuclear modification factor (R_{AA}) を測定した。図 8 は、Cu+Cu $\sqrt{s_{NN}} = 22.5, 62.4, 200 \text{ GeV}$ における p/π^+ 比 (左) \bar{p}/π^- 比 (右) の横運動量 (p_T) 依存性である。 p/π^+ 比は、ビームエネルギーの増加とともに大きくなり、逆に \bar{p}/π^- 比は減少することが分かった。Cu+Cu 22.5 GeV の p/π^+ 比が、他のビームエネルギーでの値よりも大きいのは、衝突によってつくられた陽子に加えて、銅原子核中にもともとあった陽子も測定しているためと考えられる。したがって、バリオン生成異常のビームエネルギー依存性を調べるには、衝突によって生成されたバリオン、すなわち反陽子に着目すべきである。Cu+Cu 22.5 GeV (中心衝突) の \bar{p}/π^- 比は、陽子・陽子衝突 ($p+p \sqrt{s_{NN}} = 53 \text{ GeV}$) のデータとほぼ一致し、かつ中心衝突度依存性がほとんど見られないことがわかった。この現象は Cu+Cu 22.5 GeV データにおいてのみ見られ、バリオン生成異常がこのエネルギーでは存在しないことを示唆し、非常に興味深い。より明確な結論を得るには、22.5 GeV 近傍での (1) 高統計データ、(2) 重い原子核 (Au+Au) のデータ、(3) 比較となる $p+p$ データ、の 3 つの測定が必要であり、将来の物理ランでの測定されることが期待される。

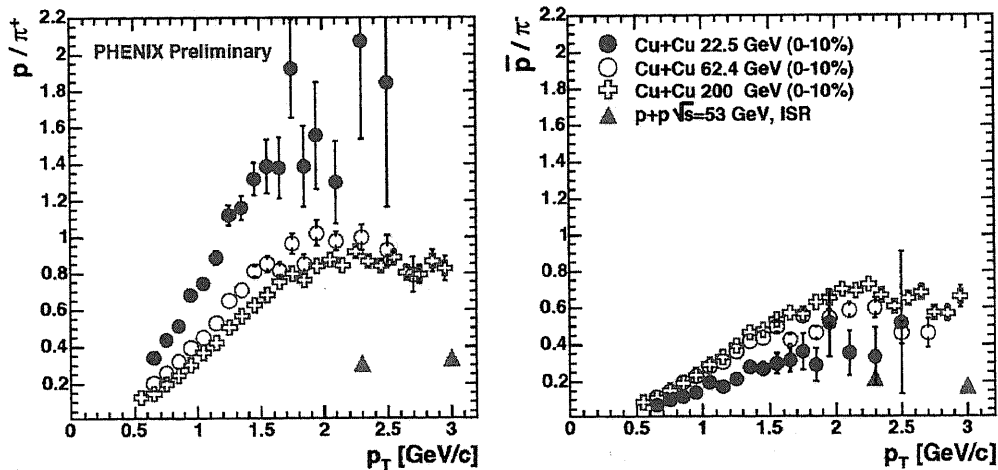


図 8: Cu+Cu $\sqrt{s_{NN}} = 22.5, 62.4, 200 \text{ GeV}$ (中心衝突) での p/π^+ 比 (左) と \bar{p}/π^- 比 (右) の横運動量 (p_T) 依存性

(6) 反応平面検出器による PHENIX 実験の改良

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の超相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC) を用いた高エネルギー重イオン衝突実験 (PHENIX) において、反応平面の測定精度を改善するための検出器開発のためのシミュレーション、設計、R&D テスト実験等を行った。反応平面とは、ビーム軸と原子核衝突時の原子核中心同士を結ぶ線 (インパクトパラメータ) 方向が決める平面の事をさし、 v_2 等の方位角異方性を測るのには、欠かせないものである。反応平面の改善は、特に稀な生成粒子 (J/ψ や、重いクォークを含むオープン・チャーム等のハドロンや直接光子) の方位角異方性を測るのに有効である。これは、反応平面の改善は、 v_2 測定の統計量に焼き直すとその二乗に対応するからである。それらの特に稀な粒子の方位角異方性の測定は、RHIC エネルギー領域での QGP の性質を理解するため重要であり、2006-2008 年に行われる高統計の金+金衝突実験において、必要不可欠な測定である。また、 v_n 測定等の方位角異方性の解析だけではなく、あらゆる観測される分布 (ジェット相関分布、HBT 相関分布、質量相関分布など) の反応平面に対する角度依存性を解析するために必要であり、反応平面の角度分解能が不十分な場合は観測自身不可能になる場合もある。2006 年度夏に本実験インストール予定の反応平面検出器は、鉛のコンバーターを前面に置いたシンチレーション検出器で、シグナルをオプティカル・ファイバーを通し、光電子増倍管 (高磁場中に置くため高磁場対応のファインメッシュ型の PMT) を使って読み出す。この検出器は前方後方ラピディティー ($|\eta|=1.5\sim3$) の領域、ミュオン・スペクトロメーターのハドロン吸収体の前面に置かれ、全ての荷電ハドロンと π^0 崩壊光子による変換電子の楕円型方位角異方性を用いて反応平面を与える。現在製作中の検出器の全体を図 9 に示す。検出器のシミュレーションを行い、設計された検出器の予想される分解能は現在のビーム・ビーム検出器による 0.4 程度 (平均 \cos 値) に比べ、この検出器を使うと 0.7 程度となる予定である。

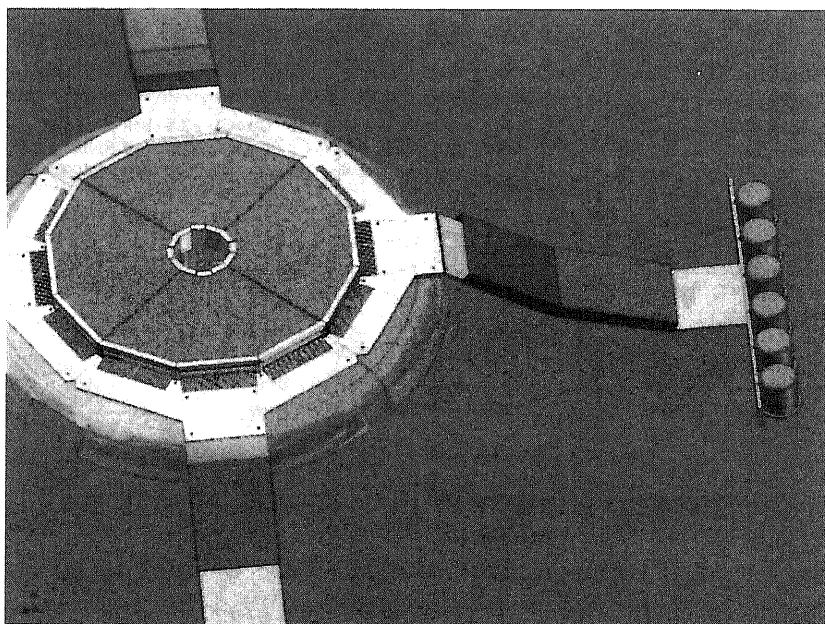


図 9: 反応平面検出器のデザイン

(7)MRPC 型飛行時間測定器による粒子識別の強化 (RHIC-PHENIX 実験)

我々は RHIC-PHENIX 実験におけるハドロン粒子識別強化プロジェクトの一環として、バンダービルト大学（米国）と共同で Multi-gap Registive Plate Chamber (MRPC) 型高時間分解能飛行時間測定器 (TOF) の研究開発、及び製作を行っている。2004 年に高エネルギー加速器研究機構において行われたビームテスト実験では、良好なパフォーマンスが得られたが、その後テスト実験の結果をふまえて、MRPC プロトタイプの製作と、プロトタイプの PHENIX 実験へのインストールを行った。2005 年には、銅原子核衝突のデータ収集を行い、MRPC プロトタイプが予想通り動作していることを確認した。図 10 は、MRPC プロトタイプによる荷電ハドロンの粒子識別の様子を示しており、高い運動量領域でも明確に π , K 中間子、陽子（反陽子）の識別が出来ていることがわかる。時間分解能は約 100 ps を達成している。

その後、さらなるデザインの改良が加えられた。また 2005 年 7 月から 8 月にかけて、中條と大学院生 2 名がバンダービルト大学に行き、物理測定用であるプロダクションタイプの MRPC の製作を行った。図 11 は実際にインストールされるプロダクションタイプの MRPC 検出器の写真である。白い部分が MRPC 検出器本体であり、アルミのガス容器に格納されている。2006 年 7 月に PHENIX 実験へのインストールが予定されており、現在その準備を進めている。

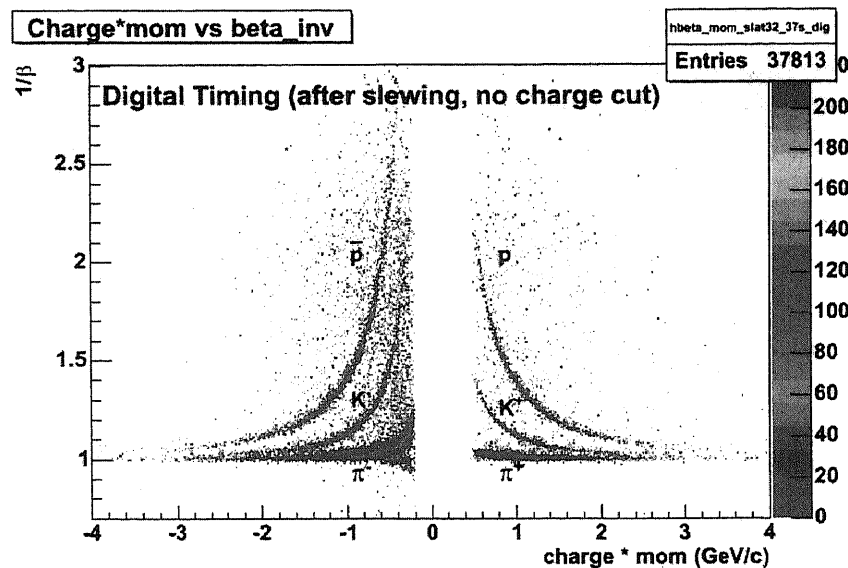


図 10: PHENIX MRPC-TOF (プロトタイプ) による荷電ハドロンの粒子識別の様子 (2005 年の Cu+Cu $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 衝突実験のデータ)

参考文献

- [1] S. S. Adler *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 232301 (2005).
- [2] S. S. Adler *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 032302 (2006).
- [3] S. Sakai (for the PHENIX Collaboration), nucl-ex/0510027.

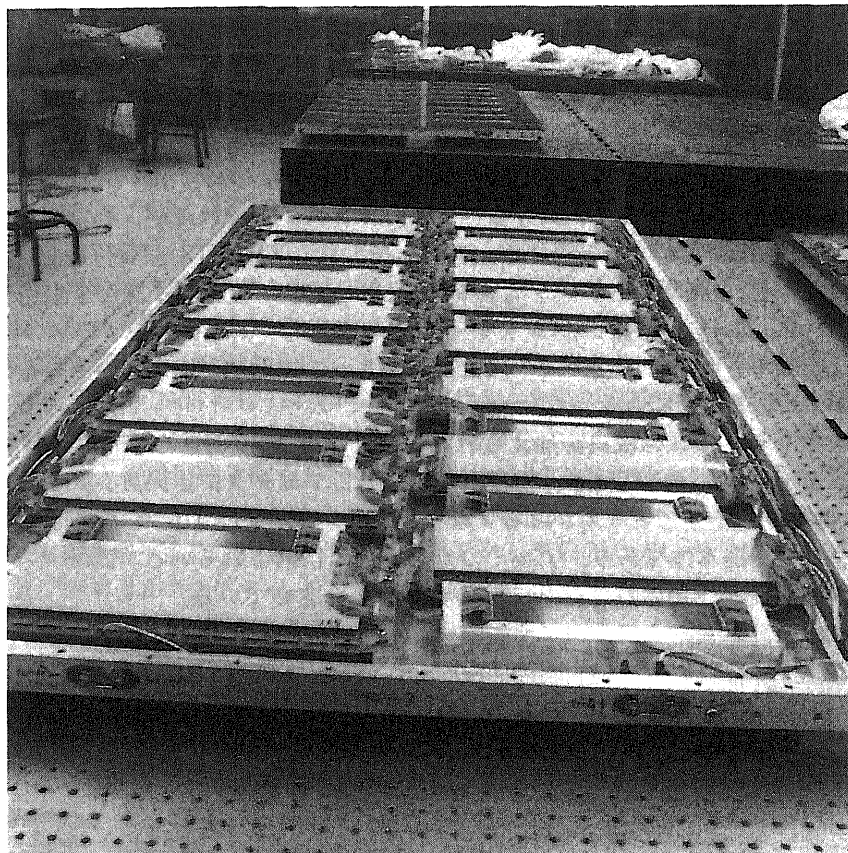


図 11: 2006 年 7 月にインストール予定の PHENIX MRPC-TOF 検出器 (一部)

- [4] V. Greco, C. M. Ko, R. Rapp: Phys. Lett. B **595**, 202 (2004).
- [5] H. van Hees, V. Greco, R. Rapp, Phys. Rev. C **73**, 034913 (2006) [nucl-th/0508055].
- [6] S. S. Adler et al., Phys. Rev. Lett. **91** 182301 (2003).
- [7] H. Masui (for the PHENIX Collaboration), nucl-ex/0510018.
- [8] R. J. Fries, B. Muller, C. Nonaka, S. A. Bass, Phys. Rev. Lett. **90**, 202303 (2003); R. C. Hwa, C. B. Yang, Phys. Rev. C **70**, 024905 (2004); V. Greco, C. M. Ko, P. Levai, Phys. Rev. Lett. **90**, 202302 (2003).
- [9] M. Konno (for the PHENIX Collaboration), nucl-ex/0510022.

<論文>

1. C. Wu, Y. Yamaguchi, A. Ozawa, I. Tanihata, D. Jiang, H. Hua, T. Zheng, Z. Li and Y. Ye. Neutron removal reactions of ^{17}C . *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* **31** (2005) 39-47.
2. Y.L. Ye, D.Y. Pang, D.X. Jiang, T. Zheng, Q.J. Wang, Z.H. Li, X.Q. Li, Y.C. Ge, C. Wu, G.L. Zhang, Q.Y. Hu, J. Wang, Z.Q. Chen, A. Ozawa, Y. Yamaguchi, R. Kanungo, and I. Tanihata. Quasielastic scattering of ^6He on ^9Be at 25 MeV/nucleon. *Physical Review C* **71**, 014604 (2005).
3. K. Kimura, T. Izumikawa, R. Koyama, T. Ohnishi, T. Ohtsubo, A. Ozawa, W. Shinozaki, T. Suzuki, M. Takahashi, I. Tanihata, T. Yamaguchi, Y. Yamaguchi. High-rate particle identification of high-energy heavy ions using a tilted electrode gas ionization chamber. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **538**, 608-614 (2005).
4. R. Kanungo, Z. Elekes, H. Baba, Zs. Dombradi, Zs. Fulop, J. Gibelin, A. Horvath, Y. Ichikawa, E. Ideguchi, N. Iwasa, H. Iwasaki, S. Kawai, Y. Kondo, T. Motobayashi, M. Notani, T. Ohnishi, A. Ozawa, H. Sakurai, S. Shimoura, E. Takeshita, S. Takeuchi, I. Tanihata, Y. Togano, C. Wu, Y. Yamaguchi, Y. Yanagisawa, A. Yoshida, K. Yoshida. Excited states in neutron rich boron isotopes. *Physics Letters B* **608** (2005) 206-214.
5. Z. Elekes, Zs. Dombradi, R. Kanungo, H. Baba, Zs. Fulop, J. Gibelin, A. Horvath, E. Ideguchi, Y. Ichikawa, N. Iwasa, H. Iwasaki, S. Kanno, S. Kawai, Y. Kondo, T. Motobayashi, M. Notani, T. Ohnishi, A. Ozawa, H. Sakurai, S. Shimoura, E. Takeshita, S. Takeuchi, I. Tanihata, Y. Togano, C. Wu, Y. Yamaguchi, Y. Yanagisawa, A. Yoshida, K. Yoshida. Low-lying excited states in $^{17,19}\text{C}$. *Physics Letters B* **614** (2005) 174-180.
6. R. Kanungo, Z. Elekes, H. Baba, Zs. Dombradi, Zs. Fulop, J. Gibelin, A. Horvath, Y. Ichikawa, E. Ideguchi, N. Iwasa, H. Iwasaki, S. Kawai, Y. Kondo, T. Motobayashi, M. Notani, T. Ohnishi, A. Ozawa, H. Sakurai, S. Shimoura, E. Takeshita, S. Takeuchi, I. Tanihata, Y. Togano, C. Wu, Y. Yamaguchi, Y. Yanagisawa, A. Yoshida, K. Yoshida. Search for an isomeric state in ^{19}C . *Nuclear Physics A* **757** (2005) 315-328.
7. Zs. Dombradi, Z. Elekes, R. Kanungo, H. Baba, Zs. Fulop, J. Gibelin, A. Horvath, E. Ideguchi, Y. Ichikawa, N. Iwasa, H. Iwasaki, S. Kanno, S. Kawai, Y. Kondo, T. Motobayashi, M. Notani, T. Ohnishi, A. Ozawa, H. Sakurai, S. Shimoura, E. Takeshita, S. Takeuchi, I. Tanihata, Y. Togano, C. Wu, Y. Yamaguchi, Y. Yanagisawa, A. Yoshida, K. Yoshida. Decoupling of valence neutrons from the core in ^{17}B . *Physics Letters B* **621** (2005) 81-88.
8. M. Kurosawa, K. Miyakawa, T. Komatsubara, K. Sato, K. Sasa, S. Ishii, Y. Yamato, Y. Kobayashi, R. Anna. Hydrogen analysis of melt inclusions in chromian-diopside megacrysts from basaltic andesite dykes intruded in a collision zone of the Izu-Bonin arc. 黒澤正紀、宮川一尚、小松原哲郎、佐藤健一郎、笹公和、石井聡、大和良広、小林洋二、安間了、伊豆一小笠原弧衝突境界付近に発達するクロム透輝石を含む岩脈の水濃度、月刊地球、Vol.27, No.7, pp.519-524. (2005).
9. T. Hashimoto, H. Ishiyama, T. Ishikawa, T. Kawamura, K. Nakai, Y.X. Watanabe, H. Miyatake, M.H. Tanaka, Y. Fuchi, N. Yoshikawa, S.C. Jeong, I. Katayama, T. Nomura,

- T. Furukawa, S. Mitsuoka, K. Nishio, M. Matsuda, H. Ikezoe, T. Fukuda, S.K. Das, P.K. Saha, Y. Mizoi, T. Komatsubara, M. Yamaguchi, Y. Tagishi, Gated multiple-sampling and tracking proportional chamber new detector system for nuclear astrophysical study with radioactive nuclear beams. N.I.M. **A556** (1): pp.339-349, Jan 1 (2006).
10. E. Ideguchi, M. Niikura, C. Ishida, T. Fukuchi, H. Baba, N. Hokoiwa, H. Iwasaki, T. Koike, T. Komatsubara, T. Kubo, M. Kurokawa, S. Michimasa, K. Miyakawa, K. Morimoto, T. Ohnishi, S. Ota, A. Ozawa, S. Shimoura, T. Suda, M. Tarnaki, I. Tanihata, Y. Wakabayashi, K. Yoshida, B. Cederwal, Study of high-spin states in the Ca-48 region by using secondary fusion reactions. Eur. Phys. J. **A25**, pp.429-430. (2005).
 11. K. Awazu, M. Fujimaki, Y. Ohki, T. Komatsubara, Photonic crystals of titanium dioxide fabricated by swift heavy ions. Rad. Meas. **40** (2-6): pp.722-729 Sp. Iss. SI. NOV (2005).
 12. T. Komatsubara, K. Sasa, S. Ishii, Y. Yamato, K. Miyakawa, K. Satou, M. Kurosawa, Hydrogen analysis for geoscience by using nuclear microbeam. Proc. of The 5th Italy-Japan Symposium, *Recent Achievements and Perspectives in Nuclear Physics*, pp.429-437, (2005).
 13. T. Komatsubara, K. Sasa, H. Ohshima, H. Kimura, Y. Tajima, T. Takahashi, S. Ishii, Y. Yamato, M. Kurosawa, K. Furuno, Hydrogen Content in Granite. "Reassessment of the Atomic Bomb Radiation Dosimetry for Hiroshima and Nagasaki-Dosimetry System 2002". Report of the Joint US-Japan Working Group, Chapter 10, Part E, pp.750-754. Radiation Effects Research Foundation, (2005).
 14. S-Y Wang, T Komatsubara, Y-J Ma, K Furuno, Y-H Zhang, Y-Z Liu, 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, Band Structure in ^{123}I . J. Phys. G: Nucl. Phys. **32** pp.283-294. (2006).
 15. Ming He, Shan Jiang, Y. Nagashima, Yaoyun Yang, T. Takahashi, Kexin Liu, K. Sasa, Kejun Dong, Shayong Wu, T. Matsuihiro, H. Tosaki, Xiaotang Ren, R. Seki, K. Sueki, Measurement of the cross-section of $^{14}\text{N}(^{16}\text{O},\alpha)^{26}\text{Al}$ with AMS. Nucl. Instrum. and Methods B, 240 (2005) 612-616.
 16. Yasuo Nagashima, Riki Seki, Takeshi Matsuihiro, Tsutomu Takahashi, Kimikazu Sasa, Toshihide Usui, Keisuke Sueki, ^{36}Cl Measurements in Japan. "Reassessment of the Atomic Bomb Radiation Dosimetry for Hiroshima and Nagasaki-Dosimetry System 2002". Report of the Joint US-Japan Working Group, Chapter 8, Part F, pp.555-560. The Radiation Effects Research Foundation, (2005).
 17. T. Nagatomo *et al.* J.Phys.:Conf.Ser. 20 (2005)173-174.
 18. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Jet structure of baryon excess in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. Phys. Rev. C **71**, 051902(R) (2005).

19. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Centrality Dependence of Direct Photon Production in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au Collisions, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 232301 (2005).
20. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Saturation of Azimuthal Anisotropy in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 62$ -200 GeV, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 232302 (2005).
21. K. Adcox, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration, *Nucl. Phys. A* **757** (2005) 184-283.
22. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Production of ϕ mesons at midrapidity in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions at relativistic energies, *Phys. Rev. C* **72**, 014903 (2005).
23. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, S. Sakai, *et al.*, Measurement of single electron event anisotropy in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, *Phys. Rev. C* **72**, 024901 (2005).
24. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Measurement of Transverse Single-Spin Asymmetries for Midrapidity Production of Neutral Pions and Charged Hadrons in Polarized p+p Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 202001 (2005).
25. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, J/ψ Production and Nuclear Effects for d+Au and p+p Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 012304 (2006).
26. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Single Electrons from Heavy-Flavor Decays in p+p Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 032001 (2006).
27. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Nuclear Modification of Electron Spectra and Implications for Heavy Quark Energy Loss in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 032301 (2006).
28. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Measurement of Identified π^0 and Inclusive Photon Second-Harmonic Parameter v_2 and Implications for Direct Photon Production in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 032302 (2006).
29. M. M. Aggarwal, Y. Miake, *et al.* (WA98 Collaboration), Centrality and Transverse Momentum Dependence of Collective Flow in 158 A GeV Pb+Pb Collisions Measured via Inclusive Photons, *Nucl. Phys. A* **762** (2005) 129-146.
30. G. Agakichiev, S. Esumi, *et al.* (the CERES Collaboration), e^+e^- -pair production in Pb-Au collisions at 158 GeV per nucleon, *Eur. Phys. J. C* **41**, 475-513 (2005).
31. T. Chujo (for the PHENIX Collaboration), Hadron production at intermediate p_T at RHIC, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **31**, S393-S398 (2005).

< 著書・総説等 >

1. K. Yagi, T. Hatsuda, Y. Miake, "Quark-gluon plasma: From big bang to little bang", Cambridge University Press, 2005, 446 p (Cambridge monographs on particle physics, nuclear physics and cosmology, 23).

< 学位論文 (修士論文) >

1. 数理解物質科学研究科・修士論文 伊藤雄司
「クローン障壁以下のエネルギーでの $^{118}\text{Sn}(\text{d},\text{p})$ 反応」
2. 数理解物質科学研究科・修士論文 三木健太郎
「高エネルギー重イオン衝突実験における直接光子の楕円的方位角異方性の測定」
3. 数理解物質科学研究科・修士論文 安野琢磨
「不安定核のエネルギー損失測定のための傾斜電極型気体電離箱の研究」

< 招待講演 (国際会議) >

1. A. Ozawa, **(Invited Talk)**, Nuclear matter radii determined by interaction cross sections, Workshop on Physics with Ultra Slow Antiproton Beams, 2005, 3/14-16, Wako, Japan.
2. A. Ozawa, **(Invited Talk)**, Recent experiments of interaction and reaction cross sections and the related results, Hawaii 2005 second joint meeting of the nuclear physics division of the APS and JPS, 2005, 9/18-22, Maui, Hawaii, USA.
3. Tatsuya Chujo, **(Invited Talk)**, "Hadron Physics at RHIC", JPS/DNP Award Talks by Distinguished Young Reseachers (核談新人賞記念講演) . 2nd Joint Meeting of DNP-APS and JPS, Sep. 18-22, 2005, Ritz-Carlton, Kapalua Maui, Hawaii, USA.
4. Shinichi Esumi, **(Invited Talk)**, "Event anisotropy in high-energy heavy-ion collisions at RHIC", 2nd Joint Meeting of DNP-APS and JPS, Sep. 18-22, 2005, Ritz-Carlton, Kapalua Maui, Hawaii, USA.
5. Yasuo Miake, **(Invited Talk)**, "Measurement of Azimuthal Anisotropy and the QGP", ACPTP(Asia Pacific Center for Theoretical Physics) workshop, Nov. 4, 2005, Pohang, Korea.
6. Tatsuya Chujo, **(Invited Talk)**, "Soft Particle Production at RHIC", Physics of QCD Quark Gluon Plasma at RHIC (RIKEN-CNS International Workshop), Feb. 16 - 17, 2006, Nishina Hall, RIKEN, Saitama, Japan.
7. Shingo Sakai, **(Invited Talk)**, "The azimuthal anisotropy in high energy heavy ion collisions at RHIC", Physics of QCD Quark Gluon Plasma at RHIC (RIKEN-CNS International Workshop), Feb. 16 - 17, 2006, Nishina Hall, RIKEN, Saitama, Japan.

8. Shin'ichi Esumi. **(Invited Talk)**. "Overview of heavy flavor v_2 ". International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM2006). Mar. 26 - 31. 2006. UCLA. Los Angeles. USA.

<招待講演 (国内) >

1. 三明康郎 (招待講演) 「粒子加速器を用いた極初期宇宙の状態の探求」 広島大学・高エネルギー加速器研究機構 連携学術講演会、 2005 年 12 月 5 日、広島大学、広島
2. 中條達也 (招待講演) 「RHIC におけるクォークグルーオンプラズマ研究の最前線」 KEK 研究会 QCD とハドロン物理の新展開、 2006 年 2 月 27 日～3 月 1 日、高エネルギー加速器研究機構、つくば市

<国際会議発表>

1. A. Ozawa, Interaction cross section / mass measurement. Workshop on nuclear physics collaboration between Germany and Japan. 2005. 12/16-17. RIKEN. Wako. Japan.
2. Kimikazu Sasa, Yasuo Nagashima, Tsutomu Takahashi, Riki Seki, Yuki Tosaki, Keisuke Sueki, Taichi Miura, Kotaro Bessho, Hiroshi Matsumura, Ming He. ^{26}Al and ^{36}Cl AMS system at the University of Tsukuba: A progress report. The 10th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (2005). Berkeley. UCLA.
3. Kimikazu Sasa, Yasuo Nagashima, Tsutomu Takahashi, Riki Seki, Yuki Tosaki, Keisuke Sueki, Kotaro Bessho, Hiroshi Matsumura, Taichi Miura, Jiang Shan and Ming He. Status and future plans of the Tsukuba AMS system. 1st East Asian Symposium on Accelerator Mass Spectrometry 26-27. January 2006. University of Tsukuba. Proceedings of the 1st East Asian Symposium on Accelerator Mass Spectrometry. UTTAC-74 (2006) 69-80.
4. T. Nagatomo. "Magnetic Moment of Extremely Proton-rich Nucleus ^{23}Al ". 2nd Joint Meeting of DNP-APS and JPS. Sep. 18-22. 2005. Ritz-Carlton. Kapalua Maui. Hawaii. USA.
5. Hiroshi Masui. "Measurement of azimuthal anisotropy at RHIC". VIII International Workshop Relativistic Nuclear Physics: From Hundreds MeV to TeV. May 23 - 28. 2005. JINR. Dubna. Russia.
6. Hiroshi Masui. "Anisotropic flow in $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ Cu+Cu and Au+Au collisions at RHIC-PHENIX". 18th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2005). August 4-9. 2005. Budapest. Hungary.
7. Masahiro Konno. "Systematic study of identified particle production in PHENIX". 18th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2005). August 4-9. 2005. Budapest. Hungary.

8. Maya Shimomura, "High pT π^0 , η , identified and inclusive charged hadron spectra from PHENIX" 18th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2005), August 4-9, 2005, Budapest, Hungary.
9. Shingo Sakai, (*Poster presentation*), "The azimuthal anisotropy of electrons from heavy flavor decays in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au-Au collisions by PHENIX", 18th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2005), August 4-9, 2005, Budapest, Hungary.
10. Kentaro Miki, (*Poster presentation*), "Measurement of inclusive photon and direct photon v_2 in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au-Au collision with the PHENIX experiment at RHIC", 18th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2005), August 4-9, 2005, Budapest, Hungary.
11. Masaya Oka, (*Poster presentation*), "Identified charged hadron in Au+Au collisions in PHENIX", 18th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2005), August 4-9, 2005, Budapest, Hungary.
12. Shingo Sakai, "The azimuthal anisotropy of electron from heavy flavor decays in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions by PHENIX" 2nd Joint Meeting of DNP-APS and JPS, Sep. 18-22, 2005, Ritz-Carlton, Kapalua Maui, Hawaii, USA.
13. Masaya Oka, "Identified charged hadron spectra in Au+Au and Cu+Cu collisions in PHENIX" 2nd Joint Meeting of DNP-APS and JPS, Sep. 18-22, 2005, Ritz-Carlton, Kapalua Maui, Hawaii, USA.
14. Shingo Sakai, "The Azimuthal Anisotropy of Electrons from Heavy Flavor Decays in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au-Au Collisions at PHENIX", International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM2006), Mar. 26 - 31, 2006, UCLA, Los Angeles, USA.
15. Maya Shimomura, (*Poster presentation*), "Elliptic Flow Measurement of High p_T Inclusive Charged Hadrons and Pions at RHIC-PHENIX", International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM2006), Mar. 26 - 31, 2006, UCLA, Los Angeles, USA.

<日本物理学会発表>

1. 小沢顕, " ^{18}C の反応断面積測定と $^{17,18}\text{C}$ からのフラグメントの運動量分布の測定", 日本物理学会第61回年次大会、2006年3月27日～30日、愛媛大学、松山市
2. 長友傑, "質量数20体系の β 崩壊のG変換対称性", 日本物理学会第61回年次大会、2006年3月27日～30日、愛媛大学、松山市
3. 中條達也, " Identified charged hadron production in Cu+Cu at $\sqrt{s_{NN}} = 22.5$ and 62.4 GeV in PHENIX", 日本物理学会第61回年次大会、2006年3月27日～30日、愛媛大学、松山市

4. 金野正裕、“Measurement of high p_T identified charged hadrons in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions at RHIC-PHENIX”. 日本物理学会第61回年次大会、2006年3月27日～30日、愛媛大学、松山市
5. 三木健太郎、“RHIC-PHENIXにおける $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV 金・金原子核衝突での π^0 と direct photon の楕円方位角異方性の測定” 日本物理学会第61回年次大会、2006年3月27日～30日、愛媛大学、松山市

<国内学会発表>

1. 笹公和、榮武二、筑波大に於ける加速器利用と展望、日本原子力学会春の年会加速器・ビーム科学部会企画セッション日時：平成18年3月25日（土）13：00-15：20 場所：日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター
2. 笹公和、長島泰夫、関李紀、高橋努、戸崎裕貴、末木啓介、別所光太郎、松村宏、三浦太一、加速器質量分析法(AMS)による中性子線量評価とその応用、第7回応用加速器・関連技術研究シンポジウム、2004.6.9-10、東京工業大学. Proceedings of the Seventh Symposium on Accelerator and Related Technology for Application [ISSN 1344-4514] (2005) 61-65.
3. 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、長島泰夫、筑波大学タンデム加速器の現状、第18回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、2005.7.1-2 九州大学. 「第18回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集、2005、1-4.
4. 太田寛史、RIビームファクトリーにおける高精度質量測定のための等時性蓄積リングの設計、第2回日本加速器学会年会、佐賀県鳥栖市(2005年7月20日-22日)
5. 小沢顕、「等時性蓄積リングによる不安定核の質量測定」、「等時性蓄積リングによる不安定核の質量測定と宇宙元素合成」研究会 2005. 9/29. UTTAC, Tsukuba, Japan
6. 笹公和、長島泰夫、関李紀、高橋努、戸崎祐貴、末木啓介、別所光太郎、松村宏、三浦太一、加速器質量分析法(AMS)で探る原子力エネルギーの功罪、第4回21世紀連合シンポジウムー科学技術と人間ー 2005.11.26-27 工学院大学
7. 笹公和、石井聡、大和良広、黒澤正紀、筑波大学における地球科学試料用PIXE分析装置、第22回PIXE研究会、2005.11.28-30、若狭湾エネルギー研究センター

< 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、「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
3. 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
4. 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
5. 萌芽研究、「ウラン 236 加速器質量分析による新しい核不拡条約順守検証方法の開発研究」、代表者：長島泰夫、分担者：笹公和、関李紀、青木孝義
2005 年度：1.000 千円
6. 基盤研究 (A)、「氷床コア中宇宙線起源放射性核種の高密度高精度測定手法の開発」
代表者 国立環境研究所 柴田康行、筑波大学側分担者 長島泰夫（実施担当 笹公和）
筑波大学 配分額
2005 年度：2.750 千円

< 外部資金取得状況 >

1. KEK 加速器科学総合支援事業、マルチタンデム静電加速器による重イオンビーム学際利用への新展開
代表 長島 泰夫、担当 笹 公和
2005 年度 8.000 千円

2. 平成17年度 数理物質科学研究科イニシアチブ 若手奨励研究サポート
「RHIC-PHENIX 実験のための大立体角ハドロン粒子識別検出器の開発」
代表：中條 達也、300 千円

<研究会開催>

1. 「等時性蓄積リングによる不安定核の質量測定と宇宙元素合成」ワークショップ、2005年9月29日、筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門、世話人：小沢 顕、新井 一郎、小松原 哲郎、参加者：32名。
2. 第1回東アジア AMS シンポジウム & 第8回 AMS シンポジウム (1st East Asian Symposium on Accelerator Mass Spectrometry & 8th Japanese Symposium on Accelerator Mass Spectrometry University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, 26-28 January 2006)
主催：筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門、国立歴史民俗博物館学術創生研究グループ、AMS 研究協会
2006.1.26-27
筑波大学総合研究棟 B0110 公開講義室 参加者数 102 名
筑波大学世話人 笹 公和、長島泰夫

<特許願>

1. 特許出願、特願2005-380028、「ERCSスペクトルの単位変換方法及び水素検出方法」、小松原哲郎、笹公和、黒澤正紀。