

VI. 原子核実験グループ

教授 三明康郎
助教授 新井一郎、江角晋一、小沢顕
講師 小松原哲郎、笹 和、中條達也
準研究員 安田裕介
技 官 加藤純雄
大学院生 久保政憲（数理解物質科学研究科博士課程（5年一貫）5年）、金野正裕（同5年）、坂井真吾（同5年）、下村真弥（同5年）、益井宙（同5年）、飯島正史（同4年）、五十嵐智（同4年）、岡暢哉（同4年）、奥本一尚（同4年）、永田善彦（同4年）、成澤正紀（同4年）、三木健太郎（同研究科博士後期課程1年）、池田義雅（同研究科博士前期課程 2年）、石川泰士（同2年）、近藤彰（同2年）、佐藤尚徳（同2年）、菅谷俊雄（同2年）、田邊嶺（同2年）、富田祐介（同2年）、新井田貴文（同2年）、三柴寛行（同2年）、恵比寿和也（同1年）、橋爪祐平（同1年）、保谷毅（同1年）、森口哲朗（同1年）、渡邊健悟（同1年）

【1】低エネルギー原子核実験グループ（新井一郎、小沢顕、小松原哲郎、笹 公和、安田裕介）

(1) 稀少 RI ビーム蓄積リングの検討

平成16年4月以来、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。平成18年度は、平成17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などを進めた。以下、個別の項目に関して現状を述べる。

1. 入射ライン

入射ラインは、ビームを遅延させる($1\mu\text{s}$)必要があるため150m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。蓄積リングのフロアレイアウトがほぼ決まったこともあり(図1参照のこと)、一次のビーム光学の検討を行った。予備的な値ながら、ビームエミッタンスは、水平方向が $7\pi\text{ mm-mrad}$ 、垂直方向が $4\pi\text{ mm-mrad}$ であり、運動量アクセプタンスは、 $\pm 0.7\%$ である。平成19年度の検討課題としては、アクセプタンスを大きくするようなビーム光学の検討、および入射ライン設置に向けての各種見積もり作業を行なう予定である。

2. 個別入射のためのキッカー磁石およびセプタム磁石

キッカー磁石に関しては、仕様書の作成を行ない、メーカー(ニチコン(株))に技術的な検討を行うことを要請した。特に問題とされたのは、一つのキッカー磁石で入射と出射が可能であるか(1ms程度の繰り返しが可能か)という点と、キッカー磁石のリングングの問題である。これら2点については、平成19年度に検討することとなった。技術的な見通しが立てば、平成19年度は、詳細設計を行なう予定である。蓄積リングへの入射にはセプタム磁石も必要である。平成18年度は、セプタム磁石の概念設計も始めた。平成19年度も引き続き設計を進める予定である。

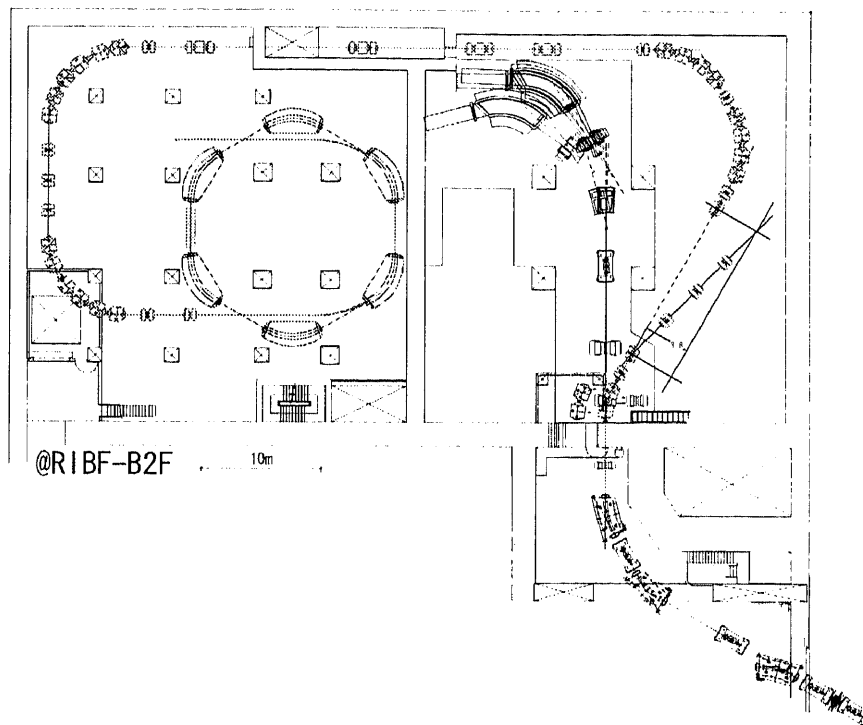


図 1: RIBF における稀少 RI リングのレイアウト

3. 等時性蓄積リング

平成18年度も引き続き等時性蓄積リングの概念設計を進めた。蓄積リング設置場所の物理的な制限（柱や壁の存在）により、等時性蓄積リングは、6個のセクター磁石で構成される。周長は56.13 m（ハーモニクス=6）である。等時性磁場は、一次のオーダは、磁石の面角で決め、二次のオーダは、磁石内のトリムコイルで調整する。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、 5π mm-mradであり、これは、入射ラインのエミッタンス程度である。平成19年度は、シュミレーションプログラムにより磁石の設置精度や、磁場の不均一性についてどの程度のトレランスがあるかなどを検討し、より現実的な設計を行なう予定である。

蓄積リングはセクター磁石のみで構成されるため、セクター磁石の磁場の均一性が最終的な等時性に大きく影響する。しかしながら既存のセクター磁石についてどの程度の磁場均一性が得られているのかは必ずしも良く調べられていなかった。我々は、最近エコー電子（株）が開発した 10^{-7} の精度が得られるNMRにより、既存セクター磁石の磁場測定を計画している。平成19年度中に測定を行ない、均一性およびその時間変動に関するデータを取得する。

4. 検出器などの開発研究

等時性蓄積リングに関しては、キッカー磁石を励磁するためのトリガー信号を発生させるためのトリガー検出器、飛行時間測定のための検出器、および粒子識別のための検出器などが必要になる。特にトリガー検出器は非常に早い応答が望ましく、そのための検出器の開発研究を平成18年度から

始めた。トリガー検出器への応用として我々が注目をしたのは、浜松ホトニクス（株）製の Hybrid Photo Detector (HPD) である。通常の Photo Multi Detector (PMD) が光電子を多段増幅しているのに対し、HPD は一段のみの増幅なので、飛行時間が短く PMT より早い応答が期待できるとともに、PMT 並みの時間分解能も期待できる。応答時間および時間分解能の測定を UTTAC および放医研の HIMAC などで行なっている。この研究は平成 19 年度も引き続き行う。

蓄積リングに入射する RI ビームのエネルギーは固定で、200 A MeV である。このエネルギーでは、特に原子番号の大きい RI ビームの場合、電荷が全てはぎ取られる状態にはならず、検出器などで荷電状態が分散することが予想される。荷電状態の分散は、質量測定効率を落とすと同時に、等時性磁場の校正に使われる一次ビームを失わせることになる。荷電状態の分散については、GSI で開発された荷電分布を計算するプログラム：GLOBAL によりよく再現されることが期待されるが、200 A MeV 付近のエネルギーで軽い原子核から重い原子核まで広く実験値を再現するかどうかのチェックはされてはいなかった。我々は、放医研の HIMAC により、そのチェックをするための実験を始めた。平成 18 年度は、Xe⁴²⁺ ビームと Fe²⁰⁺ ビームの 2 種類のビーム（エネルギーはそれぞれ 200 A MeV）について、様々な厚さの炭素薄膜（10～500 μg/cm²）での荷電状態の分散の測定をおこなった。予備的な解析では、おおよそ実験値と GLOBAL の予想値との一致は良い。この研究は、平成 19 年度も引き続き行なう予定である。

(2) A=3 体系鏡映核の相互作用断面積の測定

不安定核の核半径の測定は、1980 年代、米国 LBL において行われた相互作用断面積の測定に始まる。相互作用断面積 (σ_I) は陽子数あるいは中性子数が変化する断面積と定義されており、 $\sigma_I = \pi [R_p + R_t]^2$ のように表される。ここで R_p は入射核の相互作用半径、 R_t は標的原子核の半径である。LBL において ¹¹Li に中性子ハロー構造が発見されたことを契機に、現在様々な不安定核の核半径測定が精力的に行われている。その中で、これまで測定されたことのない質量数 A=3 体系鏡映核 ³He と ³H の相互作用断面積を様々なエネルギーで測定し、核半径を決定することをこの研究の目的とする。

実験は千葉県にある放射線医学総合研究所の HIMAC で行った。相互作用断面積の測定にはトランスミッション法を用い、反応標的の前後で独立に粒子識別を行う。トランスミッション法は反応標的での反応率から相互作用断面積を求めるため、検出器中での反応の寄与を打ち消すために反応ターゲット無しの測定も行う必要がある。粒子識別は、前段で B ρ-Δ E-ToF 法を、後段で Δ E-E 法を用いて行った。また、核半径の導出にはグラウバー理論を用いる。グラウバー理論はビームエネルギーが 100 A MeV 以上でよく成り立っているため、ビームエネルギーを 100～220 A MeV までの間で 6 点測定を行った。反応標的として炭素を使用した。現在実験データを解析中である。大阪大グループによる低エネルギーでの反応断面積の系統的な研究により、グラウバー理論を低エネルギーにおいても適用することが可能であることが分かっている。平成 19 年度は、100 A MeV 以下のエネルギーでの測定を行い、核半径だけでなく核子密度分布の導出を目指す。

(3) ドイツ GSI における不安定核の質量測定

ドイツ重イオン科学研究所 (GSI) の不安定核ビーム蓄積リング (ESR) で行なわれている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。本研究は、GSI の ESR を利用して、不安定核の質量を系統的に精密測定するものである。質量は原子核物理学にとって最も基礎的な量であるというだけでなく、超新星爆発での r-process による元素合成過程を理解する上で非常に重要な量であると認識されている。ESR では、電子クーラーと組み合わせた Schottky Mass Spectrometry (SMS) と ESR を等時性リングとする Isochronous Mass Spectrometry (IMS) の二つの方法で不安定

核の質量測定を行なっている。平成18年度はIMSの測定が行なわれた。

今回の実験では、約400 A MeVに加速した ^{238}U ビームをベリリウム標的板に照射し、 ^{135}Sn をはじめとする周辺の中性子過剰な不安定核を生成、ESRに入射しその周回周期をESR内のTOF検出器により精密測定した。イオンの周期を精密測定するため、本実験ではTOF検出器からの信号を高速デジタルオシロスコープ（サンプリングレート40GS/s、周波数帯域15GHz）により取得した。データはテラバイトにおよぶ膨大な容量になり現在解析中であるが、質量精度 10^{-6} まで向上が期待される。GSIのESRでは定期的に不安定核の質量測定および寿命測定が行なわれており、平成19年度は寿命測定が予定されている。

(4) 金クラスター陽イオンの硫化反応

レーザー蒸発超音速膨張クラスターイオン源およびフーリエ変換イオンサイクロトロン共鳴質量分析装置を用い、室温において金クラスター陽イオン Au_n^+ ($n=1-10$)とジメチルスルフィド $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ の反応を調べた。まず、反応生成物および最終生成物の同定を行った。さらに、質量スペクトルの時間変化から、 Au_n^+ と $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ の反応速度定数を求めた。主要な1次生成物としては、偶数電子系のイオンが安定的に生成された。また、反応速度定数からは、第1段階反応が $n=1, 3, 9$ の閉殻電子系で遅くなること、その他のサイズではLangevin模型の従う高い確率で反応することが分かった。最終生成物については、 Au_n^+ が平面構造をとるときには $\text{Au}:\text{S}$ がほぼ1:1で、立体構造をとるとSの割合が小さくなる傾向を示した。このことは、 Au_n^+ と $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ の結合の際にクラスターの構造に変化がないとすると、 Au_n^+ が平面構造のときに金原子にほぼ1つつ $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ が付着し、立体構造をとるとある特定のサイトにのみ $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ が付着することを示唆する。また、 H_2S 、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{SH}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{SH}$ との反応の実験データと比較すると、炭素鎖の長いもののほうが硫化反応が進む傾向にあると考えられる。

(5) DSMC法によるマグネトロンスパッタ型クラスター源の評価

現在開発中のスパッタリング型ガス凝集クラスター源2号機では、予想よりもクラスターの収量が少なかった。これに施すべき改良の手がかりを得るには、凝集セル中の希薄流体の流れがどのようになっているかを調べる必要がある。そこで、コンピュータによる希薄流体シミュレーションによって凝集セル内の様子を詳細に調べることにした。計算にはDSMC法(Direct Simulation Monte Carlo method)を用いた。凝集セルにはサイズが半径30mm、長さ400mmの同軸配置を採用し、半径方向を120セル、長さ方向を80セルに分割した。また、実機を模倣して、スパッタリング標的を凝集セル上流の中心軸上に置き、搬送/冷却用のアルゴンガスを凝集セル上流の外周部から導入した。シミュレーションを行った結果、アルゴンガスが下流の壁に当たって回り込んで中心軸付近を上流に逆流する流れを作るため、この配置では中心軸の下流にあるオリフィスからのクラスターの取り出しを阻害していることが分かった。そこで、アルゴンガスの導入位置を中心軸の上流のスパッタリング標的の近傍に変えてシミュレーションを行ったところ、中心軸上を下流に向かう流れが確認され、クラスターの生成と取り出しが確認された。今後は、ガス流量、温度、凝集長などのパラメータを変えて、最適条件を調べる必要がある。

(6) 分子動力学計算による水素ハイドレートの研究

分子動力学計算を用いて水素ハイドレートの構造を調べるための予備研究として、現在利用している分子動力学計算コードを H_2O 分子を取り扱えるように改良し、簡単な H_2O 分子クラスターを調

べた。本研究ではH₂O分子を剛体回転子として扱い、分子の形状を相互作用や運動様式に反映させた。具体的には、H₂O分子の運動を並進運動と回転運動に分けて記述した。H₂O分子間の相互作用にはSPC/Eポテンシャル、水素分子間の相互作用にはLennard-Jonesポテンシャルを用いた。また、H₂O分子と水素分子間の相互作用にはLorentz-Berthelotの混合則を適用した。改良したコードを使って、水6量体クラスター(H₂O)₆を作りその挙動を調べた。第1原理計算による先行研究からは、3種類の最安定配位(Prism, Book, Cage)が報告されている。計算の結果、それらのうち2種類(Prism, Cage)に類似の配位が確認された。さらに、これらに水素分子1つを付加した水素ハイドレートクラスターの計算を行ったが、いまのところ安定構造は見つかっていない。

(7) 陽子弾性散乱による水素分析

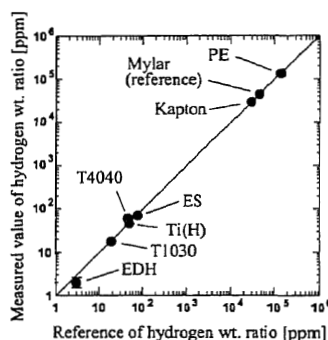


図 2: 水素濃度測定値と基準値との比較

20MeV陽子ビームを用いた弾性散乱同時計数法による水素分析は個体試料中の水素濃度を非破壊で測定する優れた手法である。厚み0.2mm程度のサンプルを直径約30μmのマイクロビームで照射し火山放出物であるガラス包有物の水素分析を容易に行う事ができる測定システムが構築された。得られたサムエネルギースペクトルは水素の厚さ分布情報をもたらすが、このスペクトルの解析手法として新たにべき関数近似法を導入した。陽子の物質中での阻止能をエネルギーのべき関数により次式で近似する。

$$S(E) = a E^{-b}$$

このパラメータ a と b を用いて、サムエネルギーから厚み x [mg/cm²] を算出できる。

$$x = \frac{E_{sum}^{b+1}}{a(b+1)(2^{b+1.5} - 1)} + constant$$

ここで $constant$ はスペクトルの位置を調節する変数である。得られたスペクトルの高さは水素濃度質量比に比例する。この近似法は従来の逆線形関数近似法に比べ、より良く数値を再現する為、解析の際の系統的な誤差が減少する事が利点である。

水素濃度の測定精度を確認する為に様々な標準物質を照射し水素濃度の測定を行った。有機物サンプルとして、マイラー、カプトン、ポリエチレン、また、米国NISTから提供されたTi(H)のサンプルを照射し、校正値と測定値を比較したところ、相対誤差5%以内で水素濃度が測定できる事が確認できた。さらに、水和ガラスサンプルの測定により、測定濃度の下限値がおおよそ1ppmである事が確認できた。実験の結果は図2に示す。この下限値は得られたスペクトルのバックグラウンドに大きく依

存する。バックグラウンドの原因は (1) チャンスコインシデンス、(2) パイラップ、(3) 拡散ビーム、(4) 核反応による 2 陽子蒸発、などが考えられるが明確な原因は究明できていない。

マイクロビーム照射では非常に小さな部分の分析が可能である半面、照射物質のビームによる損傷が増大する欠点がある。我々の測定手法では、鉱物サンプルを保持する為のマイラーフィルムの損傷が問題となる。有機物フィルムに陽子ビームを照射すると物質中の水素が放出されて、徐々に散乱陽子の個数が減少する。この減少は以下の関数で与えられる。

$$Y = Y_0 e^{-\sigma\phi}$$

ここで ϕ は入射陽子のフルエンス [個/cm²] であり、この ϕ はビームスポットの面積の逆数に比例する。また、 σ は損傷断面積である。照射物質の厚みやビーム強度、スポットの大きさを変化させて損傷断面積を測定したところ、測定値のゆらぎが大きく精度は不十分であるが、マイラーフィルムでは $\sigma=0.8\text{Mb}$ 程度、またカプトンフィルムでは $\sigma=0.08\text{Mb}$ 程度である事が判明した。

(8) 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、全てのチャン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。

こうして得られた波動関数および、中性子虚部ポテンシャルの期待値を用いて、Oppenheimer-Phillips 過程の断面積 (以下 OP 断面積) を求めた。その際に、重陽子中の陽子-中性子間の $^3S_1 - ^3D_1$ 状態のポテンシャルの深さを変えて、束縛状態および散乱状態を計算した。この計算の結果として、仮想的な重陽子の束縛エネルギー、電気四重極能率等を得た (図 3)。

また、この仮想的な重陽子を用いて、 $E_{d''} = 5\text{MeV}$ での $^{118}\text{Sn}(d,p)$ 反応の OP 断面積を求めた (図 4)。

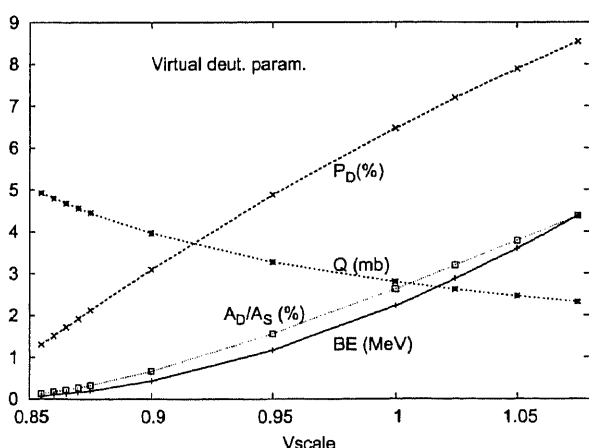


図 3: ポテンシャルの深さのスケールパラメータに対する、仮想的な重陽子の各種パラメータの変化。BE(MeV) が束縛エネルギー、Q(mb) が電気四重極能率

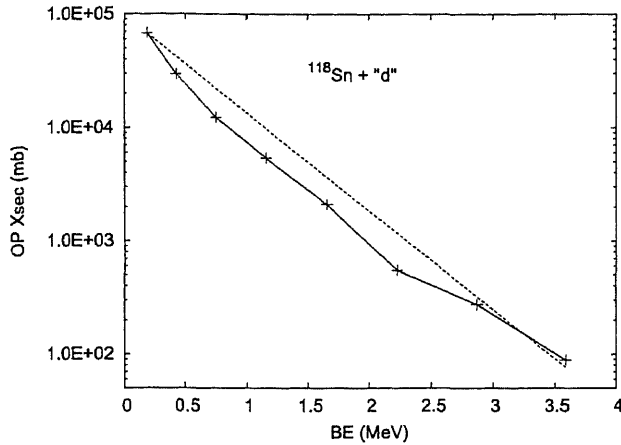


図 4: $^{118}\text{Sn}(d,p)$ 反応における OP 断面積の束縛エネルギー依存性。OP 断面積は束縛エネルギー BE MeV に対して $\sigma \propto \exp\{-2 \times (BE)\}$ で変化している。

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

$E_d = 3.2 \sim 6.0$ MeV で $^{118}\text{Sn}(d,p)$ 反応の微分断面積を測定した (図 5)。zero-range DWBA 計算との比較を行った。DWBA による計算値を $E_d = 6.0$ MeV で実験値に規格化した。 $E_d = 3.2 \sim 5.0$ MeV の計算値は $E_d = 6.0$ MeV の計算値に対する相対値である。

このとき、 $E_d = 4.0, 5.0$ MeV では計算値は実験値を再現しているが、 $E_d = 3.2, 3.5$ MeV では実験値を過小評価している。

現在 CDCC による解析を検討中である。

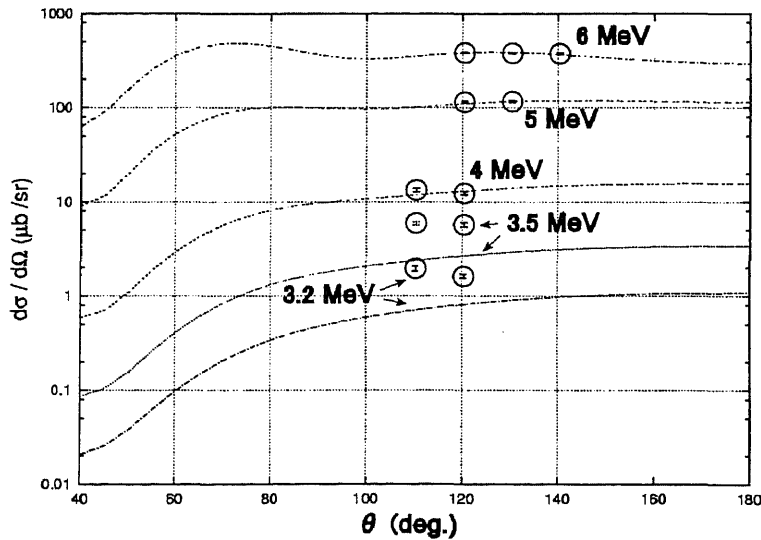


図 5: $^{118}\text{Sn}(d,p)$ 反応の微分断面積のエネルギー依存性。

(10) 硅素核の陽子弾性散乱を用いた、共鳴状態探索

^{28}Si に対する陽子弾性散乱の励起関数を測定し、(p,n)反応の閾値付近で共鳴があるかを確かめた。励起関数を測定する際の分解能を上げるために、図6のように100 μm の ^{nat}Si ターゲットを用いて、後方($\theta_{\text{lab}} = 135^\circ$)で測定を行なった。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、検出器の実際の分解能よりもよい分解能で測定が行えることになる。

例えば、図6の設定では $15.64 \leq E_p \leq 16.2 \text{ MeV}$ の励起関数が1つのrunで求められる。入射陽子のエネルギーを $E_p = 14.5 \sim 19 \text{ MeV}$ の間でおよそ300 keVずつ変更し、図7を得た。測定したエネルギー領域で多数の共鳴が見られ、(p,n)反応の閾値($E_p = 15.1 \text{ MeV}$)付近でも共鳴らしきものが見られた。

また、Lamb shift型の偏極イオン源を用いて、偏極分解能 A_y の励起関数も測定した(図8)。ビームの偏極度の測定はquench methodを用いて行った。二重微分断面積の時よりも分解能が向上し、(p,n)反応の閾値付近にもピークが見られる。

結論として、(p,n)反応の閾値付近($E_p = 14 \sim 19 \text{ MeV}$)で二重微分断面積および A_y に多数の構造が見られた。しかし、 $E_p = 15.1 \text{ MeV}$ 付近のピークも含めて、これが(p,n)閾値の影響によるものなのかは断言できない。

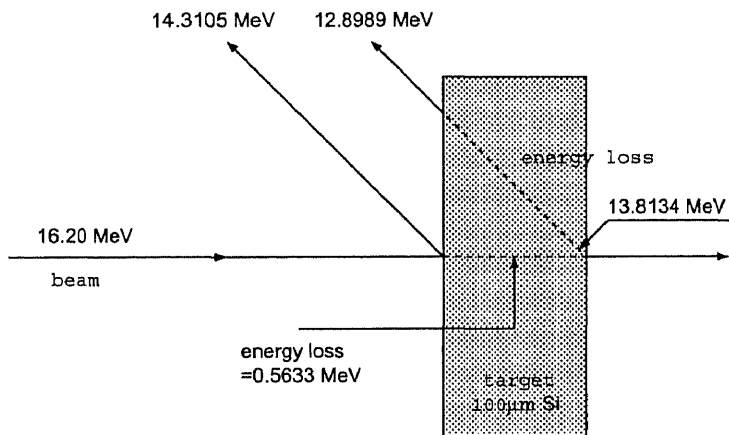


図6: 厚い標的による陽子弾性散乱と共鳴状態検出

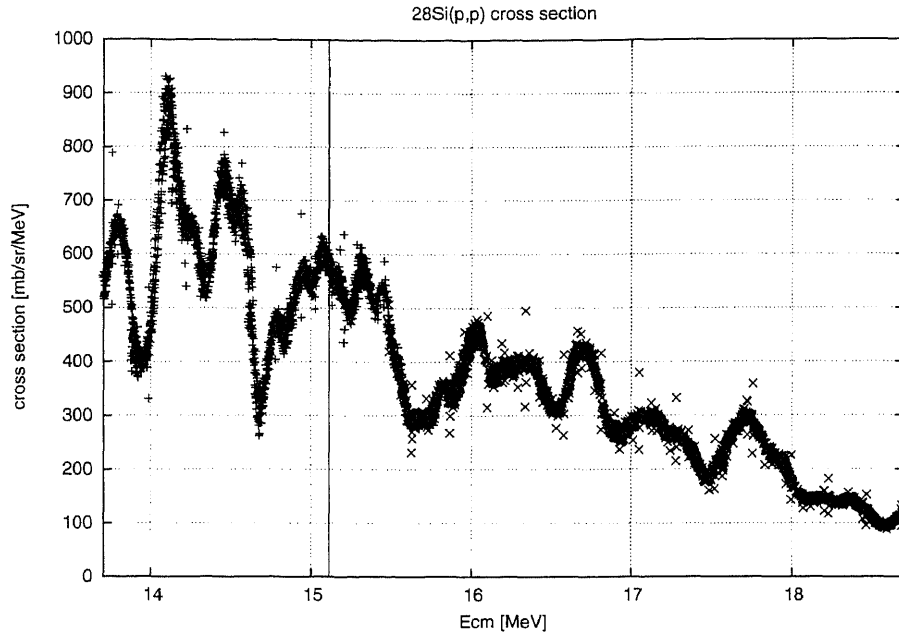


図 7: $\theta_{lab} = 135^\circ$ における $^{28}\text{Si}(p,p)$ 反応の二重微分断面積

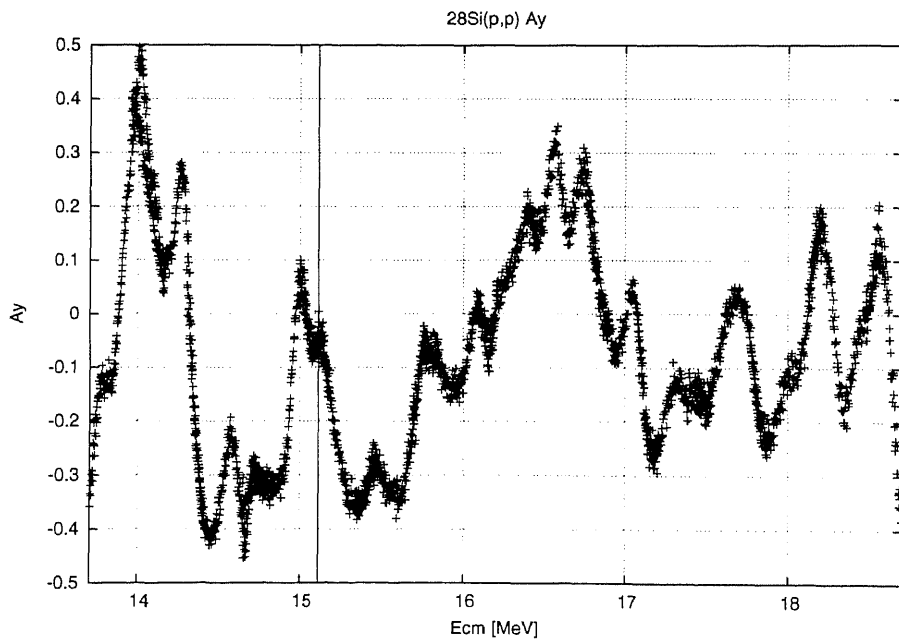


図 8: $\theta_{lab} = 135^\circ$ における偏極分解能 A_y のエネルギー依存性

(11) 高精度加速器質量分析法 (AMS) の開発と応用

筑波大学 12UD ペレトロンタンデム加速器を用いた加速器質量分析法 (Accelerator Mass Spectrometry: AMS) の開発をおこなっている。これまでに宇宙線生成核種 ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{129}I の高精度 AMS 測定に成功している。装置改良の結果、 ^{36}Cl -AMS では、検出限界として $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} = 5 \times 10^{-15}$ を達成している。また現在、科学研究費補助金 (基盤研究 B) により、 ^{32}Si -AMS 法の開発研究を実施している。2006 年度に実施した、筑波大学 AMS システムによる応用研究課題は以下の通りである。1. 加速器施設における遮蔽物中の ^{36}Cl 濃度測定 (KEK 放射線科学センター共同研究) 2. ^{36}Cl 核実験起源パルスによる地下水年代測定 (筑波大学生命環境科学研究科 共同研究) 3. 隕石中の ^{36}Cl 測定 (首都大学東京 宇宙化学研究室 共同研究) 4. ^{36}Cl 表面照射年代法の開発 (東京大学 共同研究) 5. 南極氷床コア試料中の宇宙線生成核種 ^{36}Cl の分析 (国立極地研究所、国立環境研究所、東京大学、弘前大学 共同研究) 2006 年に深度 3028 m の掘削に成功した南極氷床コアの最深部年代は、約 72 万年と見積もられている。極地の氷床コアには過去数 10 万年に及ぶ地球環境変動の記録が残されており、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、未知の宇宙・太陽環境の変動が明らかになる。これまでの氷床コア試料中の ^{36}Cl 分析の結果、 ^{36}Cl フラックスは浅層から深層部にかけてモデル年代に従って減少し、宇宙線生成核種 ^{36}Cl の半減期 (301 kyr) と調和的な減衰曲線を描いていた。宇宙線生成核種 ^{36}Cl の放射壊変による減衰量から、氷床コアの年代推定が可能であることを見出した。

(12) マイクロ PIXE 分析装置の開発

1 MV タンデトロン加速器において、陽子マイクロビーム励起特性 X 線 (PIXE) 微量元素分析システムの開発を行った。1.9 MeV の陽子ビームを $10 \mu\text{m}$ 径まで収束可能であり、標的位置合わせ、観察系等の制御システムを備えている。分析対象物質について μm 単位の微小領域で、多元素同時定量分析が可能である。2006 年度は、放射性廃棄物地層処分場調査の為に花崗岩体鉱物試料の微量元素分析、毛髪試料元素分析、原子核標的用薄膜及び J-PARC 用炭素薄膜の組成分析等を実施した。

【2】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。本年度の物理解析では、主に (1) 粒子識別された荷電ハドロン横運動量分布及び楕円方位角異方性の詳細・系統測定、(2) 高統計データによる直接光子の楕円方位角異方性の測定、(3) チャーム起源電子の楕円方位角異方性の測定 (坂井氏 博士論文)、などが行われた。これらの成果は、2006年11月に上海で行われた「クォーク物質国際会議 (Quark Matter 2006)」において報告され、本研究室からは4つの講演 (プレナリートーク1 (江角)、パラレルトーク3 (中條、坂井、金野)) が行われた。また PHENIX 実験検出器増強計画の一環として、本研究室では反応平面検出器と MRPC 型飛行時間測定器の開発・製作に関わってきた。両検出器とも、2006年夏に実験エリア内へのインストールが完了し、2007年3月にはデータ収集が開始された。その後のデータ解析により、両検出器ともに当初の設計通りのパフォーマンスで順調に動作していることが確認された。さらに、2007年秋から稼働予定である、スイス・CERN 研究所の LHC-ALICE 実験に本格的に参加するため、その準備が着々と進行中である。

(1) RHIC 重イオン衝突におけるハドロン生成

RHIC 衝突実験における発見の1つに、横運動量 p_T 2-5 GeV/c における、バリオン (陽子、反陽子など) の顕著な収量増大がある。このバリオン増大は、クォーク再結合過程、あるいは流体的な集団運動などをとり入れたモデルによって現在のところ説明がなされている。複数の異なるメカニズムがハドロン生成に関与していると考えられているが、それぞれの相対的な寄与はよく分かっておらず、この点が課題となっている。高エネルギー重イオン衝突における、ハドロン化のメカニズムと、ハドロン間の終状態相互作用を理解することを目的として、(反)陽子の横運動量分布解析を行った。ハドロン粒子識別は、飛行時間測定器と新たに導入したエアロジェルチェレンコフ検出器を用いて行った。これまでに収集された衝突データを系統的に解析し、(反)陽子の横運動量分布、収量、横方向集団運動の強度について、衝突エネルギー依存性と反応領域の体積・形状などの幾何学的な因子の役割を調べた。この結果、横方向集団運動によってハドロンが高い運動量側へ押し上げられる効果について、Blast Wave モデルを用いて、その寄与を推定した (図9)。横方向集団運動の強度が中心衝突側で大きくなるために、バリオン増大現象として観測されていると解釈できる (図10)。今後は、運動量分布のみならず方位角相関解析も行い、高エネルギー重イオン衝突によって生成される高温物質中でのハドロン生成についてさらに知見を深めたい。

(2) RHIC 実験における識別された荷電ハドロン ($\pi/K/p/d/\phi$) の楕円方位角異方性

反応平面方位角 Ψ に対する放出粒子の楕円方位角異方性 ($v_2 = \langle \cos(2[\phi - \Psi]) \rangle$) は、高エネルギー重イオン衝突実験において、衝突初期の状態に敏感に反映する観測量として注目されている。これまでの測定から、荷電ハドロン v_2 はそれを構成するクォークの数 (メソンなら $n_q = 2$ 、バリオンなら $n_q = 3$) で規格化できることが分かった (quark number scaling)。この振る舞いは、構成クォークモデルで予想されるように、ハドロン化する前のクォークが共通かつ一定の方位角異方性を持っていることを示唆している。この描像をより詳細に調べるために ϕ 中間子と重陽子の v_2 測定を行った。 ϕ 中間子はハドロニックな衝突断面積が比較的小さいことから、QGP 相での v_2 生成に敏感であると期待される。一方で、重陽子は陽子と中性子の再結合による生成が支配的であると考えられている。従って重陽子の v_2 は、1) ハドロン v_2 はそれを構成するクォーク (ハドロン) の数でスケールする

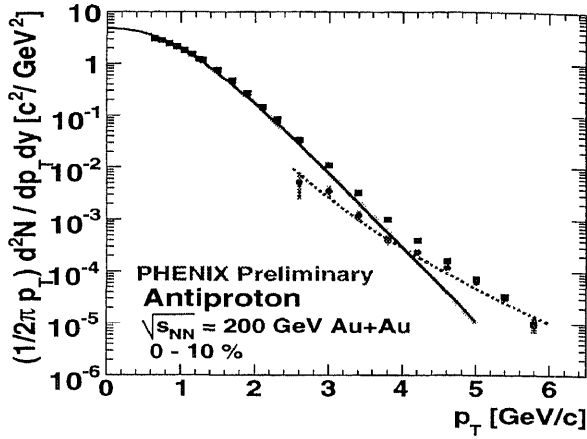


図 9: 反陽子の横運動量分布 ($\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV Au+Au, 中心衝突)。実線: Blast Wave モデルによるフィット、破線: スケールした p+p 衝突の分布。

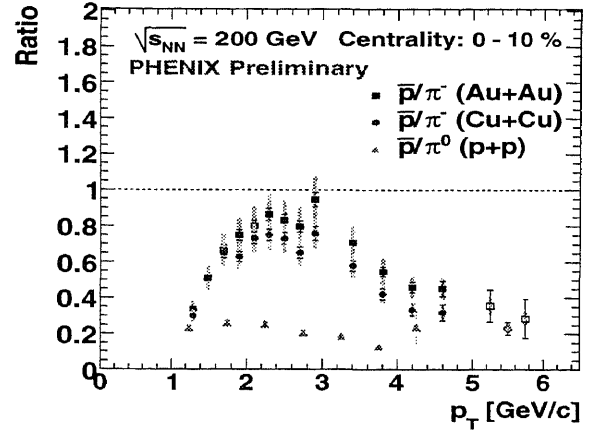


図 10: 反陽子/パイ中間子比の横運動量依存性 (Au+Au, Cu+Cu, p+p at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV)。

、2) スケーリングは加算的である、という基本的なスケージングのテストを行うのに最適である。

測定された ϕ 中間子と重陽子の v_2 の横運動量依存性を図 11 に示した [1]。横運動量 2 GeV/c 以下では、 v_2 の強度は質量が大きい程小さくなる傾向が ϕ 中間子と重陽子にも観測された。図 12 a) は v_2 の横運動エネルギー $KE_T = m_T - m_0$ 依存性で、 $KE_T > 1$ GeV/c では他のハドロンと同様に v_2 はハドロンの質量ではなく構成クォークの数でスケールすることが観測された。 ϕ 中間子は π や K 中間子のグループに、重陽子は陽子の v_2 に一致する。さらに、縦軸と横軸を構成クォークの数で割ると (図 12 b))、観測された全てのハドロンがスケールすることが観測された。この測定結果は、荷電ハドロンの v_2 強度はハドロン化前のクォークレベルですでに形成されていることを強く示唆している。

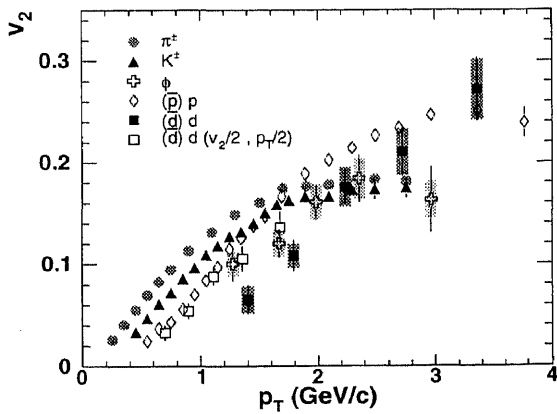


図 11: 中心衝突度 20 - 60 % の π 中間子、 K 中間子、陽子、重陽子、 ϕ 中間子の v_2 vs p_T (金・金衝突、 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV)

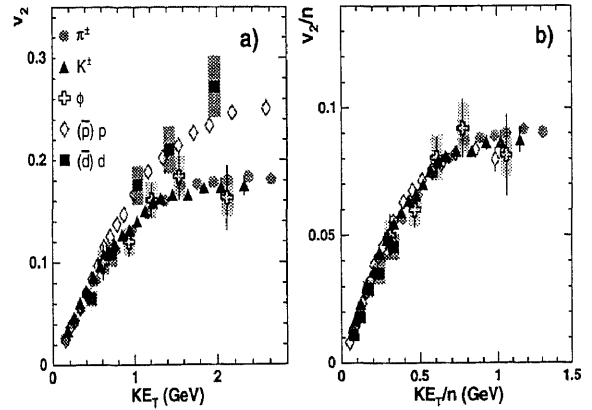


図 12: a) v_2 の横運動エネルギー (KE_T) 依存性。b) v_2/n_q vs KE_T/n_q (n_q は構成クォーク数)。重陽子と ϕ 中間子のデータポイントに付随するバンドは系統誤差。

(3) 直接光子の方位角異方性

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 [2]。また実験的に、包括光子の主な源である π^0, η 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、直接光子である事が分かった。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。

直接光子は、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解明を試みた [3]。

図 13 は、横運動量の関数として、中心衝突度 20% 毎に測定された直接光子の v_2 である。ハドロンが抑制される高横運動量領域 (4GeV/c 以上) ではより高い精度で測定されている。高横運動量領域では、直接光子の v_2 は誤差の範囲内で 0 であり、また中心衝突よりも周辺衝突の方がより大きな v_2 を持つ事が示されている。この事は、高横運動領域では直接光子の発生源として、初期衝突が支配的であることを示唆している。

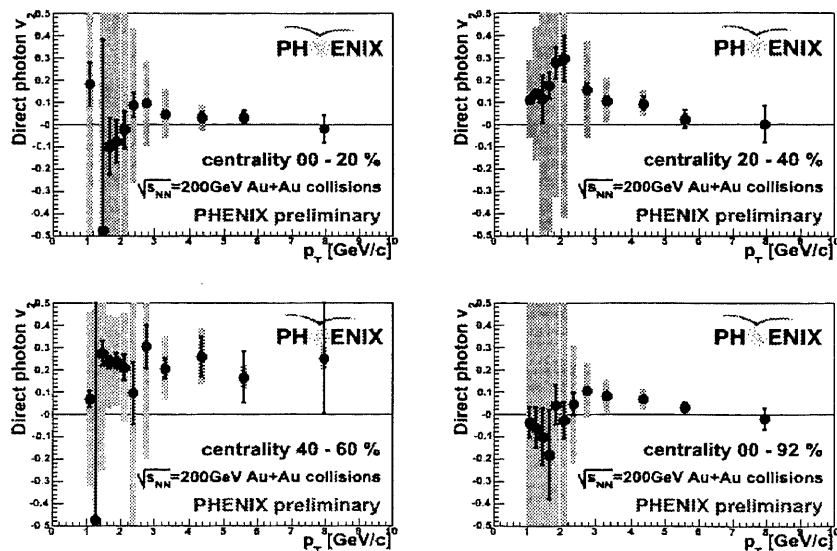


図 13: 包括光子の v_2 と、 π^0 等のハドロンから測定された、直接光子の v_2

(4) チャーム起源電子の楕円の方位角異方性

これまでの RHIC 実験における測定から、(2) で議論した様に、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 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されれば、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し、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、charm quark の方位角異方性の研究をおこなった [4]。その結果、図 14(b) に示す (横軸は横運動量を表し、縦軸は楕円方位角異方性の強度 (v_2) を表す) ように、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持つことがわかった。

図中の帯状のカーブは、charm や bottom quark を含む D メソン、B メソンの共鳴励起状態が物質中で弾性散乱することを仮定した理論の計算で、方位角異方性だけでなく、同図 (a) で示されているように、 R_{AA} (原子核衝突の収量を p+p 衝突で規格化した値。原子核衝突が p+p 衝突の重ね合わせで説明できればこの値は 1 になる) に現れる抑制の強さともほぼ一致している。このことから、比較的重い charm (や bottom) quark をも散乱・抑制させるような高密度物質が衝突により生成されたことがわかった。

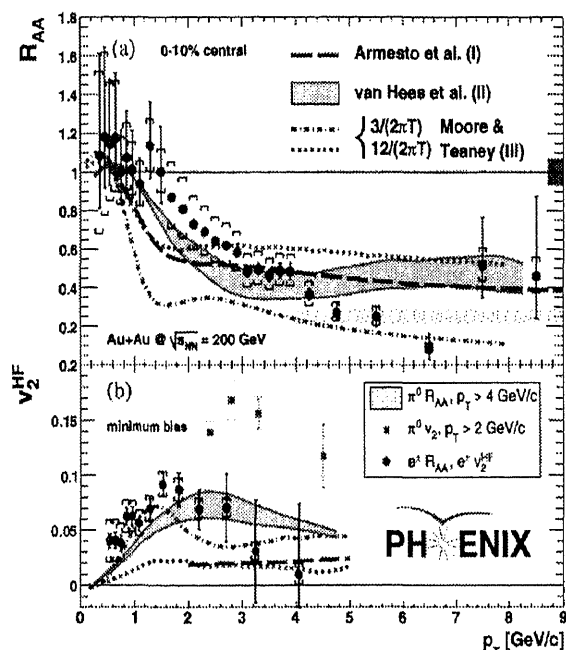


図 14: charm quark 起源の電子 v_2 と R_{AA} のモデルとの比較 [5]

(5) 反応平面決定のための新たな検出器

方位角異方性の測定は RHIC において多くの知見を与えてきた。方位角異方性の要となるのが、反応平面の決定である。従来のビームビームカウンターを用いて反応平面の測定を行ってきたが、この度 RHIC-PHENIX 実験において、反応平面決定精度向上のために新たな検出器 Reaction Plane Detector (RxNP) を設計製作した。RxNP の設計に当たっては、シミュレーションを行いながら反応平面決定用の検出器として各部を最適化させた。大きな特徴としては、より多くの統計をとるべく、カバーする立体角が可能な限り大きくなるよう各パラメータを設定されている。(図 15) 動作中の RxNP はシミュレーションで期待された通りの性能を発揮しており、PHENIX 実験における反応平面決定精度は従来の倍となる。(図 16) これにより、楕円方位角異方性の測定誤差も半分に抑えられることになる。統計の少ない高運動量の粒子 ($p_T > 3\text{GeV}/c$) や希少粒子 (J/ψ , D など) に関して、大きかった方位角異方性の測定誤差を減少させることや、また楕円よりも細かな粒子放出領域の形状の測定も可能となる。

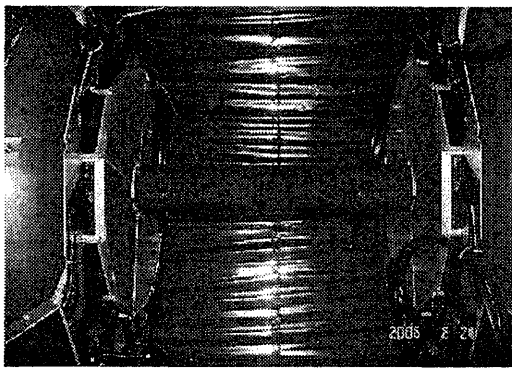


図 15: インストール直後の写真。写真中央は衝突点である。中央の左右に延びる黒い筒がビームラインである。RxNP はビームラインの南北を囲むように設置された円形のシンチレーションカウンタである。

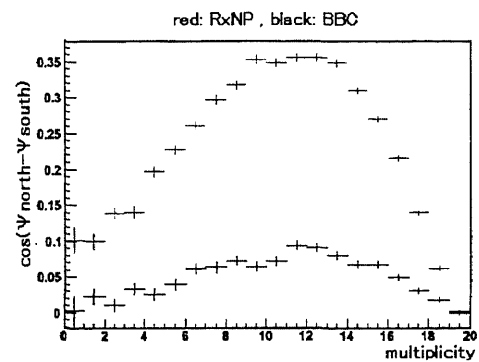


図 16: 反応平面精度の比較。反応平面精度は真の反応平面と観測された反応平面から $\cos(\psi_{real} - \psi_{observe})$ で決まるが、ここでは代わりに南北のパーツそれぞれから求めた反応平面より、 $\cos(\psi_{south} - \psi_{north})$ によって性能を比較している。赤は RxNP、黒は従来のビームビームカウンタ。

参考文献

- [1] S. Afansiev *et al.* (PHENIX Collaboration), nucl-ex/0703024.
- [2] S. S. Adler *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **94**, 232301 (2005).
- [3] S. S. Adler *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **96**, 032302 (2006).
- [4] 筑波大学大学院数理物質科学研究科 博士論文 坂井真吾 (2007), S. Sakai (for the PHENIX Collaboration), nucl-ex/0510027.
- [5] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **98**, 172301 (2007).

<論文>

1. M. Yamaguchi, Y. Tagishi, Y. Aoki, T. Iizuka, T. Nagatomo, T. Shinba, N. Yoshimaru, Y. Yamato, T. Katabuchi, and M. Tanifuji, Analyzing powers of polarized deuterons in low-energy ${}^6\text{Li}(d,\alpha){}^4\text{He}$ and ${}^6\text{Li}(d,p_0){}^7\text{Li}$ reactions in a resonance region, *Phys. Rev. C* 74(2006) 064606. Published 12 December 2006 (11 pages)
2. F.Schümann, S.Typel, F.Hammache, K.Sümmerer, F.Uhlig, I.Böttcher, D.Cortina, A.Förster, M.Gai, H.Geissel, U.Greife, E.Gross, 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, Low-energy cross section of the ${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ solar fusion reaction from the Coulomb dissociation of ${}^8\text{B}$, *Phys. Rev. C*, 73, 015806 (2006).
3. A.Ozawa, Y.Z.Cai, Z.Q.Chen, M.Chiba, D.Q.Fang, Z.G.Guo, T.Izumikawa, J.X.Li, R.S.Mao, T.Ohnishi, W.Q.Shen, T.Suda, Z.Y.Sun, T.Suzuki, I.Tanihata, W.D.Tian, J.S.Wang, M.Wang, Y.B.Wei, G.Q.Xiao, Z.G.Xiao, T.Yamaguchi, Y.Yamaguchi, A.Yoshida, W.L.Zhan, H.Y.Zhang, T.Zheng, C.Zhong, Measurements of the interaction cross-sections for ${}^{14}\text{Be}$ and ${}^{14,15}\text{B}$ as projectiles with a new scheme at RIBLL, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 247, 155-160 (2006).
4. A.Ozawa, K.Matsuta, T.Nagatomo, M.Mihara, K.Yamada, T.Yamaguchi, T.Ohtsubo, S.Momota, T.Izumikawa, T.Sumikama, Y.Nakashima, H.Fujiwara, S.Kumashiro, R.Matsumiya, M.Ota, D.Shinojima, H.Tanaka, T.Yasuno, S.Nakajima, T.Suzuki, K.Yoshida, K.Muranaka, T.Maemura, A.Chiba, Y.Utsuno, M.Fukuda, K.Tanaka, I.Tanihata, Y.Nojiri, T.Minamisono, J.R.Alonso, G.F.Krebs, T.J.M.Symons, Measurement of the spin and magnetic moment of ${}^{23}\text{Al}$, *Phys. Rev. C*, 74, 021301 (R) (2006).
5. T.Yamaguchi, T.Ohnishi, T.Suzuki, F.Becker, M.Fukuda, H.Geissel, M.Hosoi, R.Janik, A.Kelic, K.Kimura, S.Mandel, G.Münzenberg, S.Nakajima, T.Ohtsubo, A.Ozawa, A.Prochazka, M.Shindo, B.Sitar, P.Strmen, T.Suda, K.Sümmerer, K.Sugawara, I.Szarka, M.Takechi, A.Takisawa, and K.Tanaka, Production cross-sections of isotopes formed by fragmentation of ~ 1 A GeV ${}^{80}\text{Kr}$ beam; *Phys. Rev. C*, 74, 044608 (2006).
6. Z.Elekes, Zs.Dombradi, A.Saito, N.Aoi, H.Baba, K.Demichi, Zs.Fulop, J.Gibelin, T.Gomi, H.Hasegawa, N.Imai, M.Ishihara, H.Iwasaki, S.Kanno, S.Kawai, T.Kishida, T.Kubo, K.Kurita, Y.Matsuyama, S.Michimasa, T.Minemura, T.Motobayashi, M.Notani, T.Ohnishi, H.J.Ong, S.Ota, A.Ozawa, H.K.Sakai, H.Sakurai, S.Shimoura, E.Takeshita, S.Takeuchi, M.Tamaki, Y.Togano, K.Yamada, Y.Yanagisawa, and K.Yoneda, Proton inelastic scattering studies at the borders of the “island inversion”: The ${}^{30,31}\text{Na}$ and ${}^{33,34}\text{Mg}$ case, *Phys. Rev. C*, 73, 044314 (2006).
7. Zs.Dombradi, Z.Elekes, A.Saito, N.Aoi, H.Baba, K.Demichi, Zs.Fulop, J.Gibelin, T.Gomi, H.Hasegawa, N.Imai, M.Ishihara, H.Iwasaki, S.Kanno, S.Kawai, T.Kishida, T.Kubo, K.Kurita, Y.Matsuyama, S.Michimasa, T.Minemura, T.Motobayashi, M.Notani, T.Ohnishi, H.J.Ong, S.Ota, A.Ozawa, H.K.Sakai, H.Sakurai, S.Shimoura, E.Takeshita, S.Takeuchi, M.Tamaki, Y.Togano, K.Yamada, Y.Yanagisawa, and K.Yoneda, Vanishing $N=20$ Shell Gap: Study of excited States in ${}^{27,28}\text{Ne}$, *Phys. Rev. Lett.*, 96, 182501 (2006).

8. T. Kawabata, H. Akimune, H. Fujita, Y. Fujita, M. Fujiwara, K. Hara, K. Hatanaka, M. Itoh, Y. Kanada-En'yo, S. Kishi, K. Nakanishi, H. Sakaguchi, Y. Shimbara, A. Tamii, S. Terashima, M. Uchida, T. Wakasa, Y. Yasuda, H.P. Yoshida and M. Yosoi $2\alpha+t$ cluster structure in ^{11}B , Phys. Lett. B 646, p6-11, 2007
9. B.K. Nayak, U. Garg, M. Hedden, M. Koss, T. Li, Y. Liu, P.V. Madhusudhana Rao, S. Zhu, M. Itoh, H. Sakaguchi, H. Takeda, M. Uchida, Y. Yasuda, M. Yosoi, H. Fujimura, M. Fujiwara, K. Hara, T. Kawabata, H. Akimune and M.N. Harakeh, "Bi-modal" isoscalar giant dipole strength in ^{58}Ni , Phys. Lett. B 637, p43-47, 2006
10. Kotaro Bessho, Hiroshi Matsumura, Taichi Miura, Qingbin Wang, Kazuyoshi Masumoto, Takeshi Matsuhiro, Yasuo Nagashima, Riki Seki, Tsutomu Takahashi, Kimikazu Sasa and Keisuke Sueki, AMS analysis of ^{36}Cl induced in concrete of accelerator facilities, Radiochim. Acta 94, 801-805, 2006.
11. S. Tomita, S. Yoda, R. Uchiyama, S. Ishii, K. Sasa, T. Kaneko, H. Kudo, Nonadditivity of convoy- and secondary-electron yields in the forward-electron emission from thin carbon foils under irradiation of fast carbon-cluster ions, Phys. Rev. A, 73 (2006) 060901(R) (1-4).
12. Hiroshi Kudo, Wataru Iwazaki, Rumi Uchiyama, Shigeo Tomita, Kunihiro Shima, Kimikazu Sasa, Satoshi Ishii, Kazumasa Narumi, Hiroshi Naramoto, Yuichi Saitoh, Shunya Yamamoto and Toshiaki Kaneko, Energy Spectra of Electrons Induced by MeV Atom Clusters, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 22, 2006, pp. L565-568.
13. Masanori Kurosawa, Kunihiro Shima, Satoshi Ishii and Kimikazu Sasa, Trace Element Analysis of Fused Whole-Rock Glasses by Laser Ablation-ICP-MS and PIXE, Geostandards Newsletter: The Journal of Geostandards and Geoanalysis, 30, 2005, 17-30.
14. T. Komatsubara, K. Sasa, K. Okumoto, S. Ishii, Y. Yamato, K. Satou, K. Furuno, M. Kurosawa, Development of ERCS hydrogen analysis for melt inclusions in erupted magmatic samples, Nucl. Instrum. and Methods B, 251 (2006) 237-245.
15. 長島泰夫、関李紀、松広岳司、高橋努、笹公和、薄井利英、末木啓介、広島および長崎における原子爆弾放射線被爆線量の再評価線量評価システム 2002 DS02 (財団法人 放射線影響研究所) 第 8 章. 熱中性子放射化測定 F. 日本における ^{36}Cl 測定 567-572, 2006.
16. 小松原哲郎、笹公和、大島弘行、木村博美、田島義一、高橋努、石井聡、大和良広、黒澤正紀、古野興平、広島および長崎における原子爆弾放射線被爆線量の再評価線量評価システム 2002 DS02 (財団法人 放射線影響研究所) 第 10 章. 中性子測定値と計算値に寄与する因子 E. 花崗岩中の水素含有量 764-768, 2006.
17. K. Awazu, C. Rockstuhl, M. Fujimaki, N. Fukuda, J. Tominaga, T. Komatsubara, T. Ikeda, T. Ohki, High sensitivity sensors made of perforated waveguides, OPTICS EXPRESS Vol.15, No.5, 2592-2597 March (2007).
18. K. Awazu, X. Wang, M. Fujimaki, T. Komatsubara, T. Ikeda, Y. Ohki, Structure of latent tracks in rutile single crystal of titanium dioxide induced by swift heavy ions, Journal of Applied Physics 100, 044308 Aug (2006)

19. S.Y. Wang, Y.Z. Liu, T. Komatsubara, Y.J. Ma, Y.H. Zhang, Candidate chiral doublet bands in the odd-odd nucleus Cs-126, *Phys. Rev. C* **74** (1) 017302 JUL (2006)
20. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Common suppression pattern of η and π^0 mesons at high transverse momentum in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 202301 (2006).
21. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Improved measurement of double helicity asymmetry in inclusive midrapidity π^0 production for polarized $p + p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV, *Phys. Rev. D* **73**, 091102(R) (2006).
22. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Jet structure from dihadron correlations in $d + Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, *Phys. Rev. C* **73**, 054903 (2006).
23. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Azimuthal angle correlations for rapidity separated hadron pairs in $d + Au$ Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 222301 (2006).
24. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Dense-Medium Modifications to Jet-Induced Hadron Pair Distributions in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 052301 (2006).
25. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Nuclear effects on hadron production in $d + Au$ collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV revealed by comparison with $p+p$ data, *Phys. Rev. C* **74**, 024904 (2006).
26. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Jet properties from dihadron correlations in $p + p$ collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV, *Phys. Rev. D* **74**, 072002 (2006).
27. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Measurement of High- p_T Single Electrons from Heavy-Flavor Decays in $p + p$ Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 252002 (2006).
28. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Measurement of Direct Photon Production in $p+p$ Collisions at $=200$ GeV, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 012002 (2007) .
29. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, High transverse momentum meson production in $p + p$, $d + Au$, and Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, *Phys. Rev. C* **75**, 024909 (2007).
30. S. S. Adler, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake, *et al.*, Evidence for a Long-Range Component in the Pion Emission Source in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 132301 (2007).
31. D. Adamov, S Esumi, *et al.*, Leptonic and Charged Kaon Decay Modes of the ϕ Meson Measured in Heavy-Ion Collisions at the CERN Super Proton Synchrotron, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 152301 (2006) .
32. Y. Miake, Azimuthal anisotropy and the QGP, *AIP Conf. Proc.* **865** 293-299 (2006).

33. M. Shimomura (for the PHENIX Collaboration), High-pT π^0, η , identified and inclusive charged hadron spectra from PHENIX, Nucl. Phys. A 774 (2006) 457-460.
34. M. Konno (for the PHENIX Collaboration), Systematic study of identified particle production in PHENIX, Nucl. Phys. A 774 (2006) 461-464.
35. H. Masui (for the PHENIX Collaboration), Anisotropic Flow in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Cu+Cu and Au+Au collisions at PHENIX, Nucl. Phys. A 774 (2006) 511-514.
36. S. Esumi, Overview of heavy flavour collectivity, J. Phys. G32, S343-S350 (2006).
37. S. Sakai (for the PHENIX Collaboration), The azimuthal anisotropy of electrons from heavy flavour decays in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions by PHENIX, J. Phys. G32, S551-S556 (2006).
38. T. Chujo (for the PHENIX Collaboration), Search for the onset of baryon anomaly at RHIC-PHENIX, Eur. Phys. J. C 49, 23-28 (2007).
39. M. Konno (for the PHENIX Collaboration), Identified charged hadron production at high pT in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au + Au collisions at RHIC-PHENIX, Eur. Phys. J. C 49, 29-34 (2007).
40. S. Sakai (for the PHENIX Collaboration), Azimuthal anisotropy of electrons from heavy flavor decays in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au-Au collisions at PHENIX, Eur. Phys. J. C 49, 383-387 (2007).
41. H. Masui (for the PHENIX Collaboration), Elliptic flow in PHENIX, AIP Conf. Proc. 870, 703-706 (2006).

<学位論文（博士論文）>

1. 数理解物質科学研究科・博士論文 坂井真吾
Measurement of electron azimuthal anisotropy and implications of heavy quark flow in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV (核子対あたり 200 GeV の金・金衝突における電子の方位角異方性の測定と heavy quark の集団運動)

<学位論文（修士論文）>

1. 数理解物質科学研究科・修士論文 池田義雅
RHIC-PHENIX 実験における高エネルギー原子核衝突の反応平面決定のための検出器開発
2. 数理解物質科学研究科・修士論文 田邊嶺
 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV の銅・銅衝突における ϕ 中間子の楕円方位角異方性の測定
3. 数理解物質科学研究科・修士論文 三柴寛行
DSMC 法によるマグネトロンスパッタ型凝集クラスター源の評価
4. 数理解物質科学研究科・修士論文 成澤正紀
Multigap Resistive Plate Chamber の数値シミュレーションによる性能評価
5. 数理解物質科学研究科・修士論文 菅谷敏雄
金クラスター陽イオンの硫化反応研究

6. 数理解物質科学研究科・修士論文 五十嵐智
ビームシミュレータ MOCADI の JAVA による GUI 化
7. 数理解物質科学研究科・修士論文 新井田貴文
 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV の金・金衝突における量子力学的干渉効果の系統的解析
8. 教育研究科・修士論文 山口香菜子
不安定核質量測定のための蓄積リングの研究
9. 数理解物質科学研究科・修士論文 富田祐介
RHIC-PHENIX 実験における超前方ラピディティ領域での反応平面を用いた指向的及び楕円の方位角異方性の測定
10. 数理解物質科学研究科・修士論文 近藤 彰
分子動力学計算による水素ハイドレートの研究

<招待講演 (国際会議) >

1. Akira Ozawa, (**Invited Talk**), "Reaction cross sections of unstable nuclei", The Sixth China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, May 16th-20th, 2006, Shanghai, China.
2. Yasuo Miake, (**Invited Talk**), "Azimuthal Anisotropy and the QGP", The Sixth China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, May 16th-20th, 2006, Shanghai, China.
3. Masahiro Konno, (**Invited Talk**), "Soft Hadron Production at RHIC", Frontiers in the Physics of Quark-Gluon Plasma (RIKEN Workshop), July 7 - 8, 2006, RIKEN, Wako, Japan.
4. Shinichi Esumi, (**Invited Talk**), "Rapporteur 3: Bulk properties and collective phenomena", Quark Matter 2006, The 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Nov. 14 - 20, 2006, Shanghai, China.
5. Tatsuya Chujo, (**Invited Talk**), "Baryon Anomaly at RHIC", Mini-Workshop "Strongly Coupled Quark-Gluon Plasma: SPS, RHIC and LHC" 16-18 February 2007, Nagoya, Japan.

<国際会議発表>

1. I. Sugai, Y. Takeda, M. Oyaizu, H. Kawakami, S. Ishii, K. Sasa and K. Shima, First Result of Target Preparation by a HIVIPP Method in High Pressure Higher than 1 Atm, The 23rd World Conference of the International Nuclear Target Development Society (INTDS) in TSUKUBA, Japan. Tsukuba Epochal International Congress Center at Tsukuba, October 16 - 20, 2006.
2. Kimikazu Sasa, Yasuo Nagashima, Yuki Tosaki, Yuki Matsushi, Michiko Tamari, Tsutomu Takahashi, Ben Hu Zhou, Keisuke Sueki, Kotaro Bessho, Hiroshi Matsumura, Kazuho Horiuchi, Yasuyuki Shibata and Hideaki Motoyama, Preliminary results of ^{36}Cl measurement in an ice core retrieved from the Dome Fuji station by the Tsukuba AMS system, The 9th symposium of Japanese AMS society, Prospects for the New Frontiers of Earth and Environmental Sciences, 20, 21 October 2006, Takeda Hall, The University of Tokyo.

3. Tatsuya Chujo, "Search for the onset of the baryon anomaly at RHIC-PHENIX", Hot Quarks 2006, Workshop for young scientists on the physics of ultrarelativistic nucleus-nucleus collisions, May 15 - 20, 2006, Villasimius, Sardinia, Italy.
4. Masahiro Konno, "Identified Charged Hadron Production at high-pT", Hot Quarks 2006, Workshop for young scientists on the physics of ultrarelativistic nucleus-nucleus collisions, May 15 - 20, 2006, Villasimius, Sardinia, Italy.
5. Shingo Sakai, "The azimuthal anisotropy of electrons from heavy flavor decays in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au-Au collisions at PHENIX", Hot Quarks 2006, Workshop for young scientists on the physics of ultrarelativistic nucleus-nucleus collisions, May 15 - 20, 2006, Villasimius, Sardinia, Italy.
6. Hiroshi Masui, "Elliptic Flow in PHENIX", CIPANP 2006, Conference on the Intersections of Particle and Nuclear Physics, May 30 - June 3, 2006, Westin Rio Mar Beach, Puerto Rico.
7. Hiroshi Masui, "What have we learned from the Anisotropic Flow of identified hadrons?", 2006 RHIC & AGS Annual Users' Meeting, June 5 - 9, 2006, Brookhaven National Laboratory, NY, USA.
8. Shingo Sakai, "Elliptic flow of electrons from heavy flavor decays", 2006 RHIC & AGS Annual Users' Meeting, June 5 - 9, 2006, Brookhaven National Laboratory, NY, USA.
9. Masahiro Konno, "Identified Charged Hadron" (POSTER), 2006 RHIC & AGS Annual Users' Meeting, June 5 - 9, 2006, Brookhaven National Laboratory, NY, USA.
10. Kentaro Miki, "Measurement of Direct photon v_2 in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions at RHIC-PHENIX" (POSTER), 2006 RHIC & AGS Annual Users' Meeting, June 5 - 9, 2006, Brookhaven National Laboratory, NY, USA.
11. Tatsuya Chujo, Excitation functions of baryon anomaly and freeze-out properties at RHIC-PHENIX (Parallel Talk), Quark Matter 2006, The 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Nov. 14 - 20, 2006, Shanghai, China.
12. Shingo Sakai, Elliptic flow of electron from heavy flavor decay by the PHENIX (Parallel Talk), Quark Matter 2006, The 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Nov. 14 - 20, 2006, Shanghai, China.
13. Masahiro Konno, High- p_T Identified Hadron Production in Au+Au and Cu+Cu Collisions at RHIC-PHENIX (Parallel Talk), Quark Matter 2006, The 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Nov. 14 - 20, 2006, Shanghai, China.
14. Maya Shimomura, Measurement of Azimuthal Anisotropy for High pT Charged Hadrons at RHIC-PHENIX (Poster), Quark Matter 2006, The 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Nov. 14 - 20, 2006, Shanghai, China.
15. Kentaro Miki, Azimuthal anisotropy measurement of direct photon in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions at RHIC-PHENIX (Poster), Quark Matter 2006, The 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Nov. 14 - 20, 2006, Shanghai, China.

16. Masahiro Konno, Flow Measurement in PHENIX, International Workshop on Hadron Physics and Property of High Baryon Density Matter, Nov. 22 - 25, 2006, Xi'an, China.
17. Kentaro Miki, Azimuthal anisotropy measurement of direct photon in $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ Au+Au collisions at RHIC-PHENIX, International Workshop on Hadron Physics and Property of High Baryon Density Matter, Nov. 22 - 25, 2006, Xi'an, China.
18. Shinichi Esumi, Heavy flavor v_2 results from RHIC, Selected Topics on Heavy Flavor Production in High-Energy Collisions, Nov. 22 - 23, 2006, Beijing, China.

<日本物理学会発表>

1. 富田成夫、古谷公哉、西村拓也、依田聡、笹公和 MeV クラスター入射に対する半導体粒子検出器の応答 (26pWD-5)、日本物理学会 2006 年秋季大会、2006 年 9 月 20 日～23 日、奈良女子大学
2. 小沢顕、 ^{23}Al の反応断面積測定とフラグメントの運動量分布の測定、日本物理学会 2006 年秋季大会、2006 年 9 月 20 日～23 日、奈良女子大学
3. 坂井真吾、Measurement of elliptic flow of electrons from heavy flavor decays at RHIC (シンポジウム講演)、日本物理学会 2006 年秋季大会、2006 年 9 月 20 日～23 日、奈良女子大学
4. 下村真弥、The Study of Azimuthal Distribution for High pT Charged Hadron at RHIC-PHENIX、日本物理学会 2006 年秋季大会、2006 年 9 月 20 日～23 日、奈良女子大学
5. 三木健太郎、RHIC-PHENIX 実験における高横運動量領域での直接光子の楕円方位角異方性の測定、日本物理学会 2006 年秋季大会、2006 年 9 月 20 日～23 日、奈良女子大学
6. 金野正裕、Scaling Properties of Identified Hadron Transverse Momentum Spectra in Au+Au and Cu+Cu Collisions at RHIC-PHENIX、日本物理学会 2007 年春季大会、2007 年 3 月 25 日～28 日、首都大学東京南大沢キャンパス

<国内学会発表>

1. 小沢顕、Present status and strategy at RIBF RIBF ミニワークショップ：反応断面積で探る核構造 2006, 11/17-18, Wako, Japan
2. 小沢顕、UTTAC における核物理研究と今後筑波大学-KEK 連携支援事業セミナー「マルチタンデム加速器による重イオンビーム学際利用への新展開」-UTTAC の最新研究成果と動向- 2007, 3/16, UTTAC, Tsukuba, Japan
3. 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) による近年から過去数十万年オーダーの年代測定第 8 回応用加速器・関連技術研究シンポジウム (ARTA2006), 2006.6.8-9 東京工業大学 Proceedings of the Seventh Symposium on Accelerator and Related Technology for Application [ISSN 1344-4514] (2006) 81-84.

4. 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、長島 泰夫筑波大学タンデム加速器の現状、2006.7.1-2 サンレイク草木 (株式会社パレオラボ主催)、「第 19 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集、2006、17-20.
5. 笹 公和、石井 聡、大和 良広、黒澤正紀筑波大学タンデトロン加速器における地球科学試料用 2006.7.1-2 サンレイク草木 (株式会社パレオラボ主催) 「第 19 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集、2006、84-87.
6. 小栗 慶之、福田 一志、長谷川 純、中野 和也、林 通道、金子 順一、笹 公和 PIXE による環境・医療関連研究 2006.7.1-2 サンレイク草木 (株式会社パレオラボ主催) 「第 19 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集、2006、95-98.
7. 小栗慶之、長谷川純、小川雅生、金子順一、笹公和ヨウ素造影剤と陽子線励起特性 X 線を用いた二波長差分法による血管造影のファントム試験第 23 回 PIXE シンポジウム、2006 年 11 月 13-15 日 ホテル松島大観荘.
8. 笹 公和、筑波大学 AMS システムの現状と展望及び南極氷床コア ^{36}Cl -AMS 分析報告筑波大学-KEK 連携支援事業セミナー「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」-UTTAC の最新研究成果と動向-、2007 年 3 月 16 日 筑波大学
9. 笹 公和、松四 雄騎、戸崎 裕貴、玉理 美智子、高橋 努、末木 啓介、長島 泰夫、別所 光太郎、松村 宏、堀内 一穂、柴田 康行、本山 秀明宇宙線生成核種 Cl-36 の分析報告、南極氷床の物理・化学・生物のフロンティア 3、2007 年 3 月 21-22 日、国立極地研究所
10. 小松原哲郎、笹公和、石井聡、大和良広、黒澤正紀、陽子弾性散乱同時計数法による鉱物サンプルの水素分析、「タンデム加速器およびその周辺技術の研究会」2006年7月1・2日、サンレイク草木
11. 小松原哲郎、陽子弾性散乱による水素分析の現状報告、「マルチタンデム静電加速器による重イオン学際利用への新展開」2007年3月16日、応用加速器部門大セミナー室
12. 江角晋一、マッハ錐についてのコメント「ジェットの v_2 」と「ジェット分布の変化」は区別できるのか?、RHIC 現象論松本合宿「RHIC 高エネルギー原子核反応の物理研究会」2007年2月10日～11日、長野県安曇野市松本大学
13. 益井宙、Anisotropic Flow @ RHIC、RHIC 現象論松本合宿「RHIC 高エネルギー原子核反応の物理研究会」2007年2月10日～11日、長野県安曇野市松本大学
14. 下村真弥、Identified Hadron Production at low to mid pT (5.0GeV/c) in Au+Au and Cu+Cu Collisions、RHIC 現象論松本合宿「RHIC 高エネルギー原子核反応の物理研究会」2007年2月10日～11日、長野県安曇野市松本大学
15. 益井宙、Anisotropic Flow at RHIC、第3回 Heavy Ion Cafe ～重イオン衝突の物理を語る集い～、2007年3月3日、東京大学理学部(本郷)

<非常勤講師・セミナー等>

1. 小沢 顕、東京工業大学における集中講義、「RI ビームで探る不安定核の核構造」、2006年6月26日～28日

2. 三明康郎、筑波大学附属駒場高校における出前授業（筑波大学朝永振一郎博士生誕100年記念事業教育プログラム）、「朝永博士と宇宙の歴史」 2006年7月18日、筑波大学附属駒場高校
3. Yasuo Miake, "What we have seen at RHIC", Seminar at RCNP, Osaka University, Japan, 27, July 2006.
4. 三明康郎、埼玉大学における集中講義「相対論的重イオン衝突に見るQGPの世界」、2006年9月4日、5日
5. 中條達也、理化学研究所 仁科加速器研究センター岩崎先端中間子研究室セミナー、「次世代飛行時間測定器としてのMRPC (Multi-gap Resistive Plate Chamber)」、2006年9月13日
6. 三明康郎、茨城県立竹園高校における「第9回全国環境学習フェア・環境とエネルギー」への出前授業、(「原子力エネルギーの光と影～原子力利用と環境～」)、茨城県立竹園高校、2006年10月6日
7. 三明康郎、平成18年度筑波大学高校生公開講座「相対性理論とブラックホールへの招待」、2007年3月24日
8. 三明康郎、筑波大学 e-Learning シンポジウム、「筑波大学におけるOCWへの取り組み」、筑波大学大学会館、2007年3月29日

<科学研究費取得状況>

1. 基盤研究(B) 極微量放射性核種シリコン32の加速器質量分析による超高感度検出法の開発
代表者：笹 公和、分担者：長島 泰夫、末木 啓介、田瀬 則雄
2006年度：直接経費 6,900 千円、間接経費 2,070 千円
2007年度：3,800 千円
2008年度：2,100 千円
2. 基盤研究(C) 高エネルギーイオン線による島弧衝突境界下のマグマ起源流体の研究
代表者：黒澤正紀、分担者：安間 了、小松原哲郎、笹 公和
2005年度 1,600 千円
2006年度 500 千円
2007年度 500 千円
3. 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
4. 基盤研究(B)、超新星爆発のニュートリノ過程の鍵を握る La-138 の新アイソマーのインパクト
代表者：早川 岳人、分担者：静間俊行、小松原哲郎、藤原守、中田仁、千葉敏、梶野敏貴
2006年度：3,100 千円
2007年度：4,200 千円

2008年度：1,200千円

<外部資金取得状況>

1. KEK 大学等連携支援事業 「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」事業責任者 長島 泰夫、筑波大学担当 笹 公和
2. 安田裕介、物理学系若手奨励研究プロジェクト、中間エネルギー (p,pn) 反応測定のための中性子検出器の開発、代表、¥208,850

<研究会開催>

1. 「核反応データ解析の歩み」ワークショップ、2006年11月24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、矢花 一浩、小松原 哲郎、参加者：32名.
2. 「R プロセス元素組成の統合的理解」ワークショップ、2007年3月9日、国立天文台（三鷹キャンパス）解析棟大セミナー室
世話人：小沢 顕、梶野敏貴、参加者：40名.