

VI. 原子核実験グループ

教授	三明康郎
准教授	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、Peter Schury
助教	鈴木 宏
準研究員	長江大輔
研究員	下村真弥、洞口拓磨
技 官	加藤純雄
大学院生	飯島正史 (D3)、池田義雅 (D3)、山口香菜子 (D3)、渡邊健悟 (D2)、森口哲朗 (D2)、坂田洞察 (D1)、佐野正人 (D1)、横山広樹 (M2)、梶谷緑 (M2)、浜田英太郎 (M2)、木村瑞希 (M2)、轟木貴人 (M2)、生山友博 (M2)、伊藤由太 (M2)、小川賢一郎 (M2)、石橋陽子 (M1)、大石寛人 (M1)、横山和幸 (M1)、関根裕輝 (M1)、竹内理将 (M1)

【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、Peter Schury、鈴木 宏、長江大輔)

(1-1) 稀少 RI リングプロジェクト

1-1-1. プロジェクトの現状

平成16年4月以来、理研のRIビームファクトリー(RIBF)の大型基盤実験装置の一つとして稀少RIリングの検討を行っている。平成21年度は、稀少RIリングの根幹をなす等時性蓄積リング本体の詳細設計を業者(日立および住友重機)に依頼した。各業者からの設計報告書と見積もりが12月に提出された。平成21年度の後半からは、予算規模削減のために等時性蓄積リングをTARNIIのセクター磁石のみで構成するとともに、入射ラインとしてSHARAQを利用し、SHARAQから直接蓄積リングにRIビームを入射するスキームの検討を始めた。ビーム光学系は、現在検討中であるが、蓄積リングの配置例が、図1に示されている。SHARAQを入射ラインとすることにより、ビームの遅延時間が $1.2 \mu\text{s}$ 程度になり、蓄積リングに入射するRIビームのエネルギーを100 A MeVまで下げる予定である。また、TARNIIのセクター磁石を使用することで運動量アクセプタンスが制限され(磁極幅で制限される)、仕様が $\pm 0.5\%$ に変更された。平成22年度は、磁場分布計算などを進め、TARNIIのセクター磁石のみで構成する蓄積リングの詳細設計を行うとともに、キッカー磁石の実機仕様のテストを行い、要求される遅延時間(トリガー信号入力からサイクロトロン貫通まで450ns)でキッカー磁石が動作するかのテストを行う。また、ショットキープローブなど、関連する実験装置の開発も進める予定である。

1-1-2. 稀少 RI リングのビーム光学シミュレーション

理研RIBF[1, 2]における稀少RIリング[3, 4]は、1セクション当たり4台の双極電磁石からなる6箇所の曲線部と、セクション間の6箇所の直線部からなる、周長63.2 mのサイクロトロン型のリングである。合計24個の双極電磁石は、ビームの偏向と収束の機能を兼ね備えている。ビームの周回数は1,000回を想定している。性能の面では、ビームのエミッタンスを数十 π mm-mradとして、運動量領域 $\pm 0.5\%$ にわたって 10^{-6} の等時性が要求される。

稀少RIリングのデザインを検討し必要なパラメータを決定するために、昨年度に開発した高精度

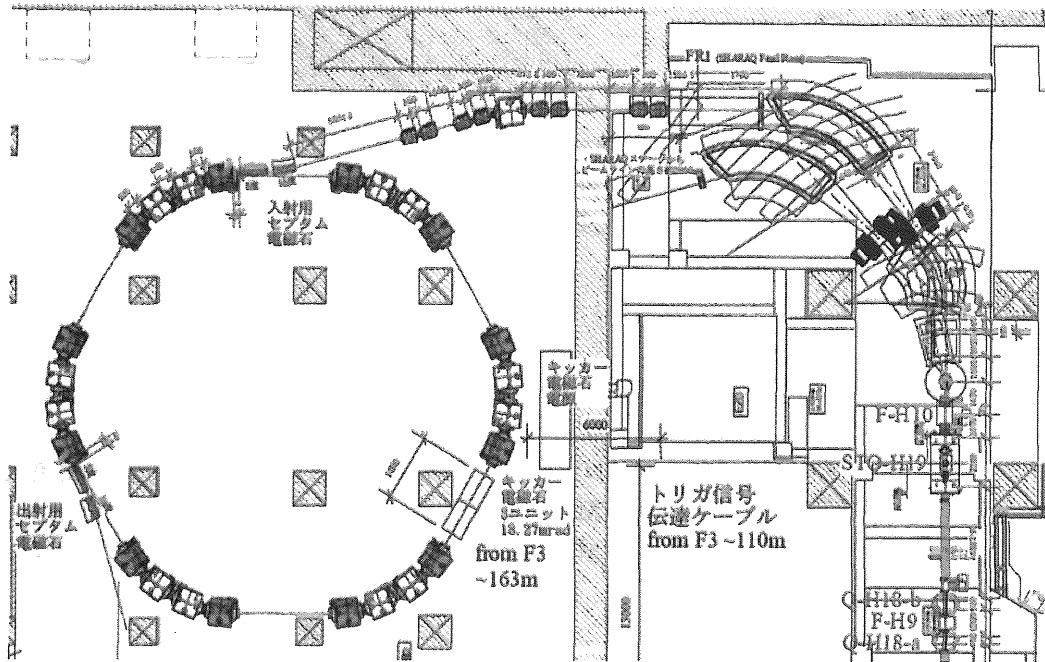


図 1: RIBF における稀少 RI リングの 現状レイアウト

のビーム光学シミュレーションを用いた。計算は4次のルンゲ-クッタ法を用い、ビーム軌道を小さな空間セグメントに分割し、各々のセグメントの中で円軌道を描くと仮定した幾何学的追跡法を採用している。また磁石が発生させる磁場の形として、矩形 (Hard-Edge) を採用した。

水平方向の粒子軌道を、10周分のみ図2の左側に示した。中心運動量に比べ+0.5%、0%、-0.5%の運動量を持つ粒子が、水平方向の運動量分散 (8.366 cm/%) を保ちながら進んでいる。垂直方向の粒子軌道は図2の右側に示した。こちらでは、全ての粒子は中心運動量を持ち、中心軌道面の+1 cm、0 cm、-1 cm の位置から軌道が始まっている。この方向では、粒子がベータトロン振動している様子が見える。

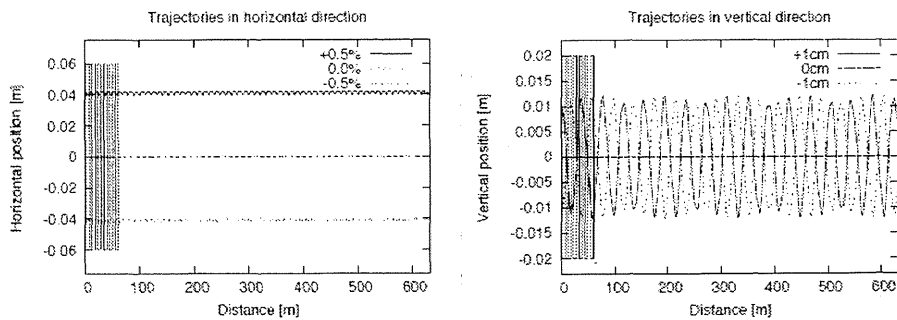


図 2: 水平方向 (左) と垂直方向 (右) の 10 周分の粒子の軌道。細長い四角は稀少 RI リングの曲線部を表す。

次に、 10^{-6} の等時性を保つエミッタンスを調べた。図3に、粒子が1000周運動した時の水平方向と垂直方向のエミッタンスを、入射位置での位置と角度の関数として表した。+で表される範囲が、 10^{-6} の等時性を保つエミッタンスを示す。粒子の運動量に関わらず、等時性を保つエミッタンスは、

水平方向と垂直方向でそれぞれ約 100π mm-mrad と 20π mm-mrad と分かった。これは BigRIPS から供給される不安定核ビームを通すのに、十分な広さを持っている。

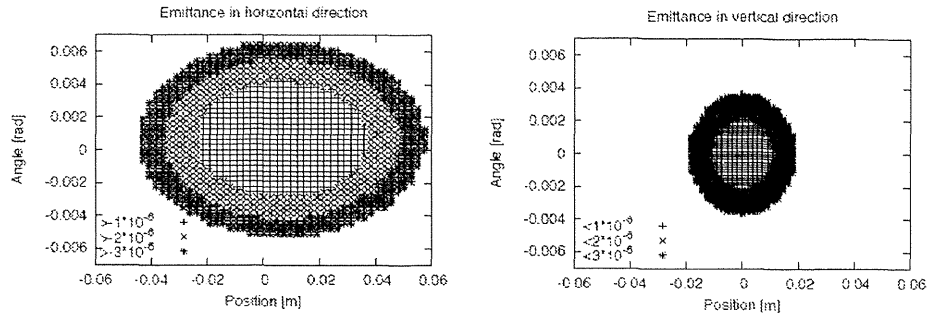


図 3: 水平方向 (左) と垂直方向 (右) の 1000 周分のエミッタンス。

現在は、磁場計算コード TOSCA を使用して磁石が実際に発生させるであろう磁場分布を計算している。より現実に近い磁場分布をシミュレーション計算に入れることにより、稀少 RI リングのデザインを決定しようとしている。

1-1-3. 磁場校正のためのクラスターイオン源の開発

現在、理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) において生成量が少なく非常に短寿命な不安定核の質量を精密に測定するための等時性蓄積リングが計画されている。この装置では、宇宙元素合成過程の r プロセスに関係する核種の質量を精密に測定することができる。このために求められる質量精度は 10^{-6} である。この精度を実現するためには、リングの磁場の時間的な揺らぎも 10^{-6} 以下の精度で校正する必要がある。本研究では、原子クラスターを磁場の揺らぎの測定のプローブとして用いるために、そのクラスター生成のためのクラスターイオン源の開発を行った。原子クラスターの磁気剛性は RI ビームの磁気剛性と一致させる必要がある。2 重閉殻核で r プロセスに大きな影響を与えると考えられている ^{78}Ni を例にとり、このときの要求されるクラスターサイズを表 1 に示す。ここでは、RI ビームのエネルギーとして $200[\text{MeV/u}]$ を仮定した。

表 1: 原子核の磁気剛性に対応するクラスター

	原子数	質量	エネルギー	電荷
原子核 (^{78}Ni)	-	78[u]	$\sim 200[\text{MeV/u}]$	+28
Cu クラスター (Cu_n)	800	$63 \times 800[\text{u}]$	$\sim 30[\text{keV}]$	+1
W クラスター (W_n)	280	$184 \times 280[\text{u}]$	$\sim 30[\text{keV}]$	+1

クラスターを磁場校正に用いるためには、最低限このサイズのクラスターを生成できる必要がある。昨年度は Cu 及び W クラスターイオンについて要求されるクラスターサイズが生成できていることを確認した。Cu クラスターについての結果を図 4 に示す。

しかし、現時点でクラスターの強度はまだ非常に小さく、強度を上げる必要がある。さらに分解能の向上と実際に蓄積リングに組み込むために、レーザーイオン化システムの構築や電源の開発、シミュレーションなどが必要であり、今後行っていく予定である。

1-1-4. 大面積 MCP を用いた飛行時間検出器の開発

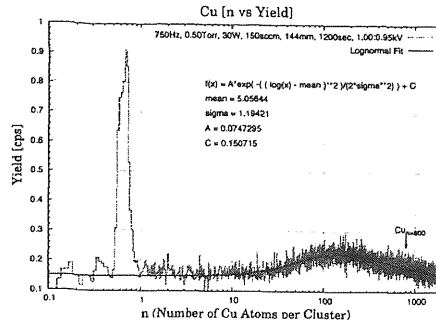


図 4: Cu クラスタースペクトル

稀少 RI リングでの質量測定は RI ビームの飛行時間を測定することにより行う予定である。その為の飛行時間検出器の開発に着手した。この飛行時間検出器に求められるのは RI ビームの電荷が検出器通過前後で変化しないこと、大きなビーム径で飛行する RI ビームを全て検出することである。その為、この検出器は可能な限り薄くかつ大面積を有しなくてはならない。このような飛行時間検出器はすでに GSI の ESR で使用されている [5]。これは炭素薄膜に RI ビームを通過させ、その際に炭素薄膜から放出される電子を電磁場中で制御し、大面積の検出器 (MCP) に導くものである。我々も GSI のものと同様の原理で動作する検出器を開発する予定である。現在、小面積の MCP を用いた原理実証機の製作を進めている。小面積 MCP は購入済みで線源を用いた動作テストの準備が進行中である。炭素薄膜は、厚さが $60 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ および $70 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ で、大きさが $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ のものをすでに製作済みである。並行して、薄膜から放出された電子を制御する為の電場を印加する電極の製作、磁場発生用のコイルの製作を進めている。今後は原理実証機を用いて、線源を用いたテスト、筑波大学タンデム加速器でのビーム照射実験を行う予定であり、その結果を基に大面積の飛行時間検出器を製作する。今年度後半には放射線医学研究所において、大面積検出器を用いた重イオンビームによる照射実験を行う予定である。

(1-2) 不安定核の反応断面積測定

1-2-1. 固体水素標的を用いた ^{11}Li の反応断面積実験

原子核を理解する上で、核半径は重要な物理量の一つである。近年盛んに行われている不安定原子核の研究から、核図表の安定線から離れた中性子過剰核では、安定核には見られない性質を持つことがわかってきた。その一つが、中性子スキンである。これは、原子核を構成する中性子と陽子のフェルミエネルギーの違いによって、中性子分布と陽子分布に差がある構造をいう。

今まで、中性子スキンは核子密度分布と陽子分布から求められてきた。前者は反応断面積実験から、後者はレーザーを使用したアイソトープシフトの測定から得られる。しかし、アイソトープシフトから陽子分布を求めることができるのは、特定の原子核に限られている。そのため、現在、スキンが未知である中性子過剰核は数多く存在する。

本研究は、固体水素標的を用いて ^{11}Li の反応断面積を測定し、過去の反応断面積のデータと合わせて、 ^{11}Li の中性子スキンを導出することを目指す。スキンを導出するためには、原子核の陽子分布と中性子分布の違いを反応断面積に反映させなければならない。低エネルギー領域において、陽子-中性子全断面積は、陽子-陽子、もしくは、中性子-中性子全断面積に比べて数倍大きいことが知られている。これは、標的となる陽子が原子核の陽子分布と中性子分布に対して異なる感度を持つことを意味する。 ^{11}Li はアイソトープシフトの測定から中性子スキンを求めることができるので、本研究から得られた値と比較することができる。この手法が確立すれば、アイソトープシフトの測定が

困難な不安定核に関して、反応断面積さえ測定すればスキンを見積もることができると期待できる。

実験は理化学研究所のRIビーム発生装置RIPSで行った。一次ビームとして核子当たり 100 MeV の ^{18}O を Be 標的に当て、核子当たり 45 MeV の ^{11}Li ビームを生成した。図5は反応標的前段での粒子識別の様子である。固体水素標的、及び、炭素標的に ^{11}Li を入射させ、それぞれの標的での反応断面積を測定した。この実験では、直径 50mm、厚さ 30mm の固体水素標的を使用した。現在、実験データの解析中である。

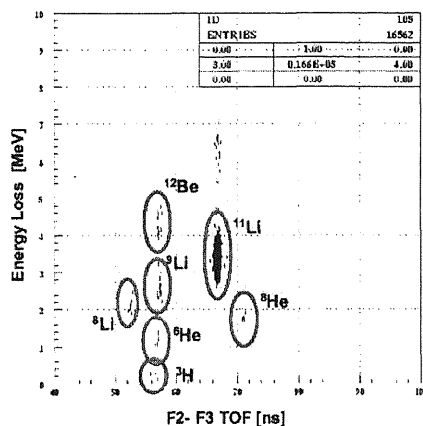


図 5: 反応標的前段の粒子識別図。

1-2-2. Na アイソトープの反応断面積測定

理化学研究所の Projectile-Fragmentation Separator である BigRIPS において、中性子過剰な Ne, Na アイソトープを生成し、その反応断面積を測定する実験を行った。実験のセットアップを図6に示す。

核子あたり 350 MeV に加速された ^{48}Ca ビームは、BigRIPS 入り口 (F0) に置かれた Be 標的に照射され、入射核破砕反応を起こし、Na アイソトープを含む様々な破砕核へ変化する。その様々な破砕核から $B\rho$ 、 ΔE とスリットにより目的の核を選別する。反応断面積測定のための炭素標的は F5 に置かれた。 $B\rho$ や ΔE 、TOF (Time of Flight) の情報を使って粒子を識別し、F3 および F7 で目的の核の数を数えることで反応断面積を導出する。我々のグループは、実験では主に F3 での粒子識別に用いる ΔE 測定用イオンチェンバーの準備を担当した。

Ne, Na, Mg の $N=20$ の領域は "island of inversion" と呼ばれており、中性子数が魔法数であるにも関わらず、核子の殻構造の準位が安定核と比べて変化し、核の変形を引き起こしている可能性が示唆されている。Na の場合、準位の変化が支配的になるのは $N=18$ からだという報告があり [6]、 $N=18$ よりも中性子過剰側に位置する Na アイソトープの核半径は、それらの核の殻構造解明の手がかりになることが期待される。

1-2-3. B アイソトープの荷電変換断面積 (CCCS) 測定

近年、不安定核の研究が進み、陽子や中性子の分布が安定核にはみられないスキンやハローの構造を持つ原子核が発見されてきた。中性子数が過剰な B 同位体では荷電変換断面積が中性子が増加しても変化しないことが報告されている。これは核内における陽子の分布半径が中性子数に依らないことを示唆し、中性子過剰な B 同位体ではスキン・ハロー構造が起きていることを示している。但し測定されている荷電変換断面積の誤差が大きい為、詳細な議論ができていないのが現状である。そこで

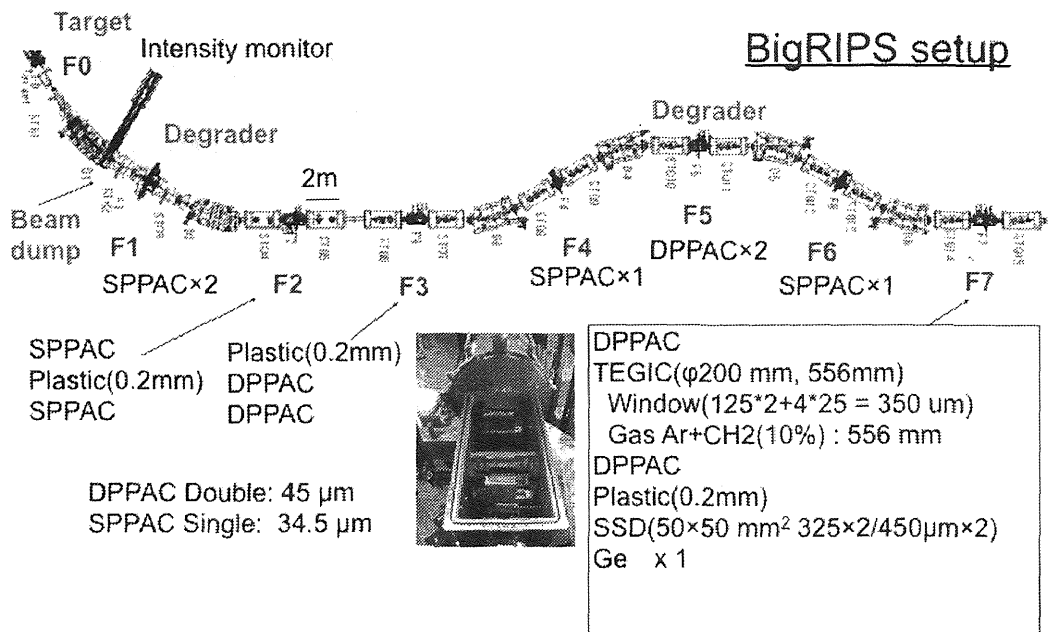


図 6: BigRIPS Setup

我々は $^{11,12,13,14,15}\text{B}$ 同位体の詳細な荷電変化断面積測定を行った。さらにその後の展望として、測定した荷電変化断面積から B 同位体の荷電半径（陽子分布半径）を導出し、中性子過剰核におけるスキン・ハロー構造の解明につなげる。荷電変化断面積から荷電半径を求める方法は、手法としてはいまだ確立されていないものの、高い精度で荷電半径を決定できる可能性を持っている。

荷電変化断面積はトランスミッション法によって測定した。荷電変換反応を起こしていない粒子の計測から荷電変化断面積を求めるこの手法は精度の良い測定ができる利点を持つ。実験は大阪大学核物理研究センター、EN コースで行った。リングサイクロトロンによって核子あたり 80~MeV まで加速された ^{18}O ビームを Be 標的に照射し、その結果生じた幾種もの破砕片から双極磁石とエネルギー損失により分離を行い B 同位体を得た。その後、B 同位体を C または Al 標的に照射し、標的と散乱した B 同位体を 4 枚のシリコン検出器によって測定した。4 枚のシリコン検出器での各々のエネルギー損失から入射粒子を識別し、C または Al 標的の通過後も荷電変換反応を起こしていない粒子の数を特定することにより、荷電変化断面積を決定する。

現在、荷電変換反応を起こさず B のままの粒子の同定を 4 枚のシリコン検出器のデータから用いて行っている。

(1-3) 不安定核の核モーメント測定

1-3-1. 不安定核 ^{40}Sc の核磁気モーメント測定

不安定核 ^{40}Sc (半減期 $T_{1/2} = 182\text{ms}$) は二重閉殻核で非常に安定な ^{40}Ca の近傍に位置し、その構造は興味深い。しかしながら ^{40}Sc の核磁気モーメント (μ) はまだ測定されていない。 μ は原子核の配置混合に敏感であるため、我々は昨年度から μ (^{40}Sc) の測定を始めた。

昨年度、我々は CaF_2 結晶中だけで μ 測定を行った。しかし、純度が低かったこともあり、 μ の中心値を得ることは出来なかった。そこで今年度は大きく 3 つの改良を行った。まず初めに ^{20}F のシステムチェックを行った。これまでの研究により、偏極重陽子ビームから偏極移行反応によって ^{20}F の核偏極が確認されており、 μ の値も知られていたためである。 ^{20}F の NMR の結果を図 7 に示す。ま

た、 β 線測定のス/Nを向上させるためにエネルギー測定用の厚さ 10mm のプラスチックシンチレータを製作した。さらに、電子散乱の影響を抑えるためチェンバーの素材をアルミからデルリンに変更した。

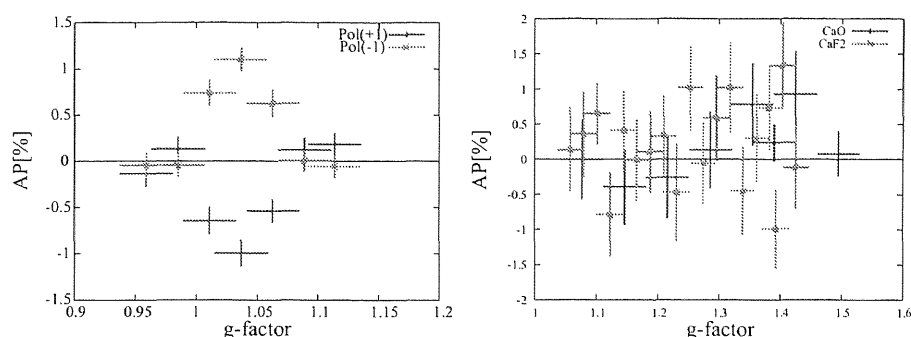


図 7: (左) ^{20}F の NMR スペクトル。(右) ^{40}Sc の NMR スペクトル

最後に、ストッパーを CaF_2 結晶から CaO のペレットに変更した。先行研究により、 ^{41}Sc が CaO 結晶中で核偏極を保持し、 ^{41}Sc の μ が CaO により測定されているためである。 CaO のペレットは CaCO_3 の粉末を圧縮し、電気炉で 900°C で一晩焼くことで作成した。

以上の改良を行った後の ^{40}Sc の NMR 測定の結果を図 7 に示す。この図からどちらのストッパーでも μ を決定することは出来なかった。これは我々が適用していた静磁場が偏極保持に十分でなかった可能性がある。またペレット作成の際に不純物が残っていた可能性もある。そこで今後の測定のためには静磁場を大きくし、より純度の高いストッパーを作成して実験することが必要になる。

1-3-2. 不安定核 ^{30}P の核磁気モーメントの測定

核磁気モーメントは原子核の構造をよく反映している。不安定核 ^{30}P の核磁気モーメントはまだ測定されておらず、その測定のためにまず、 ^{30}P の生成量と純度について評価を行った。

不安定核 ^{30}P は $^{30}\text{Si}(p,n)^{30}\text{P}$ 反応または、 $^{29}\text{Si}(d,n)^{30}\text{Si}$ 反応により生成する。陽子ビームについては 8,9,10MeV、重陽子ビームは 4,5MeV を用いて、標的は Si 単体を用いた。先ほどの反応により生成した ^{30}P は標的内に留まり、そこから β 線を放出するが、その β 線を標的の上下に配置したシンチレーションカウンターにより検出する。生成核は β 線の検出から得られるタイムスペクトルより判断することができる。実際に得られたタイムスペクトルを図 8 に示した。このスペクトルを指数関数でフィッティングを行い、生成核を推定した結果、 ^{30}P の生成の確認が確認されたが、それに伴い ^{29}P も生成されていることが判明した。そこで生成量を Y 、純度を P としたとき、Figure of Merit(FOM) = $Y \times P^2$ と定義される FOM により評価を行った。この FOM の値が大きいほど、実際に核磁気モーメントを測定する際、実験的に有利になる。それぞれの実験条件での生成量及び純度、FOM について表 2 にまとめた。この結果から実験条件としては重陽子ビームで 4 MeV のエネルギーが実験に最適であることが判明した。

続いて ^{29}P の β -NMR を行い、ターゲット Si の偏極保持の確認および β -NMR のシステムチェックを行った。その結果、Si ターゲット中では核スピンの保持が確認され、 β -NMR についても、核磁気モーメントを決定できるようなデータが収集できることが確認できた。

(1-4) 低エネルギー核反応測定用検出器 GEM-MSTPC の開発

超新星爆発時の種核形成に重要な役割をなす $^8\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}$ 反応の断面積測定では、より低温での

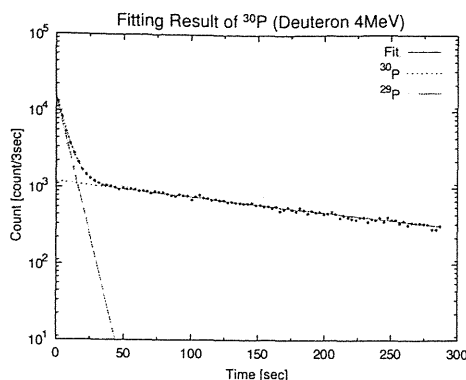


図 8: 重陽子 4MeV の時に得られたタイムスペクトルとフィッティング結果

表 2: 各実験における結果

Beam	Energy [MeV]	生成量 [Count/sec]	純度 [%]	Figure of Merit
Proton	10	$(75.7 \pm 1.1) \times 10^3$	90.2 ± 0.1	$(61.6 \pm 1.0) \times 10^3$
Proton	9	$(66.2 \pm 1.0) \times 10^3$	93.1 ± 0.3	$(57.4 \pm 0.9) \times 10^3$
Proton	8	$(76.5 \pm 3.1) \times 10^2$	94.8 ± 0.3	$(68.8 \pm 3.0) \times 10^2$
Deuteron	5	$(95.1 \pm 1.7) \times 10^3$	61.5 ± 0.1	$(59.7 \pm 1.3) \times 10^3$
Deuteron	4	$(13.2 \pm 1.5) \times 10^4$	50.8 ± 0.1	$(79.2 \pm 1.2) \times 10^3$

反応率測定をめざして、GEM(Gas Electron Multiplier)を採用した3次元飛跡検出型ガス検出器(MSTPC)の改造を行っている。

昨年度に引き続き低圧で動作する重イオン用 GEM フォイルの最適化が最も重要な開発課題であった。大きな問題点は、(1) 低圧であるためにフォイル内での増幅度を十分に稼げないこと、(2) 重イオン入射強度が高くなるため、フォイルでの電子増幅に伴い発生する大量の陽イオンによりフォイル上部の電子ドリフト領域での電場が乱れ、性能が劣化すること、の2点にまとめられる。

両者の問題は、様々な形状(穴径穴間距離、穴周辺の絶縁部形状)の GEM フォイルおよび、陽イオン吸収用シールド GEM の配置に対する系統的測定によって基本的な解決をみた。本年度後半は、実際に重イオンビームを打込み、装置の長時間安定性を見ることとした。この開発実験では、高強度ビームによる増幅率の緩慢な低下が見られたため、これが GEM フォイル上でのゆっくりとしたチャージアップ事象に起因すると考え、環境をオイルフリーにし、GEM 表面の金属面(銅)に金コートを行い、解決することができた。

目標とする 100 kpps の ^8Li 入射環境では、増加するバックグラウンドイベントのため、従来用いていたデータ収集系が使えなくなる。そこで、反応を起こさなかった ^8Li ビームによるバックグラウンドイベントを棄却するため、GEM-MSTPC 下流には、GEM フォイルによる VETO カウンターが配置される。

VETO カウンターは、フォイルと信号読み出しアノード電極が近接して置かれ、なおかつビーム軸と平衡に GEM-MSTPC 直下流に配置される。そのため、開発実験当初は、MSTPC と VETO カウンター間で発生した電子も増幅され、遅延信号として表れるために、十分な棄却力を持つカウンターか否か判断することが困難であった。そこで、上流から流れてくる電子を吸収するための開口率の高いグリッドを置くことで、上記の問題が解決できることを示せた。最終的に得られたビームの棄却率はほぼ 99% で、初期の目標に到達することができた。2月に行った検出器の最終試験では、本実験の条件であるビーム入射強度 100 kpps でも十分な位置分解能(1mm 以下)と安定な増幅度を長時間

維持できる性能を示すことができた。

来年度は、4月に本実験を行い、測定結果の解析を行う。

(1-5) 多重反射飛行時間型質量分析器の開発

昨年、我々は理研において多重反射飛行時間型質量分析器:MRTOF-MSの開発を引き続き行った。この装置は、理研の低速RIビーム生成装置:SLOWRIにおける重要な実験装置の1つである。MRTOF-MSでは、半減期5[ms]までの非常に短寿命な不安定同位体の精密質量測定を可能にする。

MRTOF-MSは、最終的にガスセル、イオントラップ、多重反射チェンバーから構成される。ガスセルはRIPS, BigRIPS, GARISからの高エネルギーRIビームを熱運動化し、イオントラップはガスセルからのビームをさらに冷却、パルス化し、多重反射チェンバーはパルス化されたイオンを長い距離飛行させるために用いられる。これまで、多重反射チェンバーの構築を完了し、MRTOF-MSのために特化したイオン冷却用のトラップの開発を行い、必要なエレクトロニクスの構築を進めた。

特にイオントラップの開発は大きな成果である。このトラップは、一般的にこれまで用いられてきた4つのロッドを用いたものとは異なり、4重極電場を作るように6つの平らな電極配置で構成され、いままでにないデザインとなっている。(図9) こうすることで、イオンのトラップへの入射とは垂直の方向への引き出しが容易になる。これは自動的に引き出したイオンのエネルギーの広がりを減らすことになり、すなわち飛行時間における時間の広がりを小さくすることとなる。

我々は、この効果を冷却のためのバッファーガスの圧力、冷却時間の変化に対する応答を測定することで確認した。ガス圧と冷却時間の増加に伴い、検出されるイオンの数は増大した。(図9) 一方、その時間分布に変化はなかった。すべての場合において、イオンのパルス幅は ~ 100 [ns]であった。

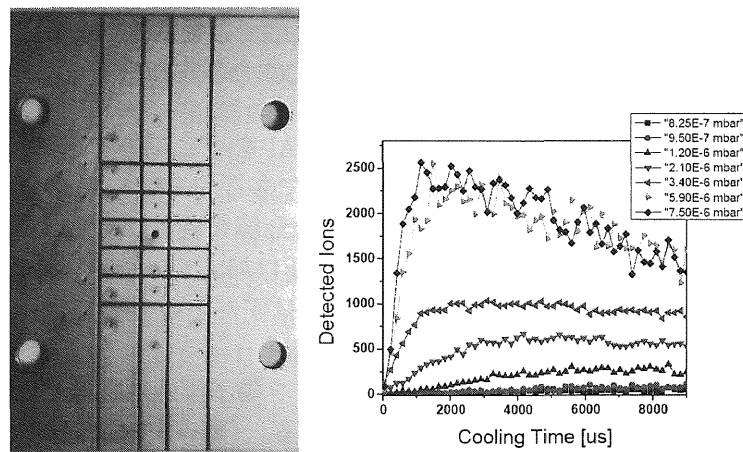


図9: (左) イオントラップの構成電極。中心出口は0.5mm。(右) 様々なヘリウム圧での冷却時間。イオン強度の増加は、イオンの集団がより小さな集まりとなり、より多くのイオンが出口から出ていることを表している。

理研でのMRTOF-MSの開発に加え、アメリカのニューメキシコ州立大学のGary Eicemann、Hermann Wollnikとの共同研究やミシガン州立大学/NSCLの質量測定グループとの共同研究も引き続き行う。ミシガン州立大学/NSCLのグループとは、次世代のイオン移動度分光計のための先進的なエレクトロニクスおよびシミュレーションの開発を行う。これらは、うまくいけば例えば血液サンプルのタンパク質分析といった生命科学分野での利用が容易になり、分光計が有用なものになる可能性がある。

(1-6) 重イオン用 CDCC 計算プログラムの開発

平成20年度は、弱束縛重イオン誘起反応、特に入射粒子の弾性散乱と分解反応を対等に取り扱う、CDCC (Continuum Discretized Coupled Channels) 法による三体問題的原子核反応のプログラム開発とその運用練習を行った。平成21年度はそのプログラムに関連した、分解反応生成物の運動量分布を実験に即した形で計算し、計算結果を実験と突き合わせる事を2・3の実験データを対象として行った。その結果は、岡山大学で行われた春の物理学会にて報告した。結果の一部を以下に図10に示した。

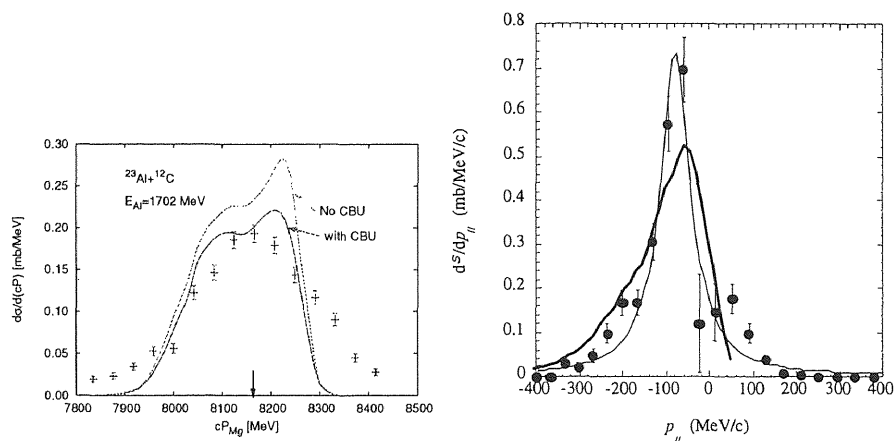


図10: (左) $^{23}\text{Al} + ^{12}\text{C}$ 反応で0度方向に放出される ^{22}Mg の運動量分布。実験結果はクロスで示されている。実線は CDCC での計算結果。(右) $^{19}\text{C} + p$ 反応での0度方向に放出される ^{18}C の運動量分布。実験結果は黒丸で示されている。太い実線は CDCC での計算結果。

図10の左の図は、運動エネルギーが1702 MeVの ^{23}Al を ^{12}C 標的に照射し、0度方向に置かれた開き角が5度の検出器で測定した ^{22}Mg の運動量分布である。

二本の曲線は、核力のみによる分解(緑)及びクーロン分解を核力に加えた場合(赤)のCDCCによる計算値である。絶対値まで含めて、特に計算値に修正は加えていない。但し、実験値の横軸は絶対値が与えられていないので、原理的にこの場所であるはずだという所(矢印の位置)までずらしてある。

図10の右の図は、運動エネルギーが760 MeVの ^{19}C を陽子標的に照射した時の ^{18}C の運動量分布である。CDCCによる計算値が太い実線で示されている。(薄い実線は実験値をローレンチアンでフィットした結果である) CDCC計算では、 ^{19}C を $^{18}\text{C} + n$ として考えている。先行研究より ^{19}C のバレンス中性子は、s-waveが主要であるので、CDCC計算でもs-waveを仮定している。計算値は、実験値の一中性子剥離断面積に規格化しているが、実験値の幅はよく再現できている。

重イオン原子核物理は未だ歴史が浅いので、使用するパラメータに未だ不確定要素が多いので断定的では無いが、これらの計算結果を見ると将来性は充分にあると思われる。

ここで開発したプログラムは、詳しい説明付きで、以下のホームページにて公開している。

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

更に、このプログラムに関連した mini-workshop を行い、その結果、九州大学でも重陽子関連の CDCC プログラムが公開された。

(1-7) 加速器質量分析法 (AMS) による宇宙線生成核種分析

筑波大学 AMS システムでは、半減期 30.1 万年の宇宙線生成核種 ^{36}Cl について 10 MV の加速電圧で加速器質量分析 (Accelerator Mass Spectrometry : AMS) が可能となっている。 ^{36}Cl は同重体 ^{36}S が妨害となり検出が難しい放射性核種であるが、地球環境分野への応用が期待されている。 ^{36}Cl -AMS の検出限界は $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 同位体比で 10^{-16} レベルであり、測定可能な同位体比範囲は $10^{-10}\sim 10^{-15}$ となっている [9]。また現在、新たに宇宙線生成核種 ^{41}Ca の AMS 開発を進めている。

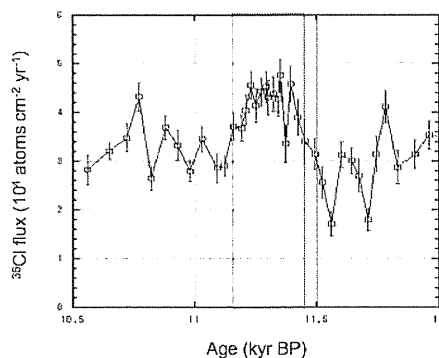


図 11: 南極ドームふじアイスコアを用いて測定された宇宙線生成核種 ^{36}Cl の降下量変動。約 11.2-11.4 kyr BP 付近に宇宙線強度変動に起因する ^{36}Cl 降下量の増大が確認できる。

2009 年度は地球環境試料を中心に 332 試料の AMS 測定を実施した。「南極ドームふじアイスコア第二期プロジェクト」では、コア深度 320 - 547 m (10.5-22.5 ka BP) のアイスコア試料を 0.5 m 間隔 (時間分解能 30-40 yr/sample) で測定をおこなった。約 11.2- 11.4 kyr BP に、宇宙線強度変動が原因と考えられる ^{36}Cl 降下量の増大が確認された (図 11)。南極内陸域の ^{36}Cl 降下量は $1\sim 4\times 10^4$ atom cm^{-2} yr^{-1} の範囲にあると見積もられた。アイスコア研究では、新たに「グリーンランド NEEM アイスコア国際共同研究プロジェクト」への参加も計画している。核実験起源 ^{36}Cl パルスを用いた地下水滞留時間の推定 [10] では、「富士山周辺湧水の年代測定と地下水流動系の解明」が実施された。カルスト地形の形成過程に関する研究では、カルサイト中の ^{36}Cl を用いて炭酸塩岩の削剥速度の決定を行った [11]。本研究の応用として、「中国天抗の形成過程を探る国際共同研究プロジェクト」に参加している。また、ミューオンにより生成される ^{36}Cl の核反応断面積を AMS で測定する実験を実施した。

(1-8) 宇宙元素合成に関する研究

ゲルマニウム検出器によるガンマ線分光は原子核の励起状態のエネルギーを精密に観測する優れた研究手法である。この為、宇宙元素合成の計算に必要な陽子閾値近傍の励起準位を正確に知ることができ、原子核反応率を精密に求める事ができる。この観点から、我々は ^{26}Si の励起状態のガンマ線分光を行っている。

ガンマ線観測衛星によって ^{26}Al からの 1.8 MeV のガンマ線が観測された [12]。 ^{26}Si はこの ^{26}Al の生成過程のバイパス過程である。 ^{26}Al は $^{25}\text{Al}(e^-, \nu)^{25}\text{Mg}(p, \gamma)^{26}\text{Al}$ 反応で生成される。一方、新星や超新星爆発などの内部で核反応が短時間に進行した場合は ^{25}Al が β 崩壊する前に反応を起こし、 $^{25}\text{Al}(p, \gamma)^{26}\text{Si}$ 反応が進むと推定されるが、この ^{26}Si は β 崩壊で ^{26}Al のアイソマー状態に崩壊し、 2^+ の励起状態を経由せずに ^{26}Mg の基底状態へ崩壊する。即ち 1.8 MeV のガンマ線を放出しないバイ

パス経路が進行する。 ^{26}Al の生成率を正確に求めるためにはこのバイパス経路の反応率も同様に求める必要がある。特に、 $^{25}\text{Al}(p,\gamma)^{26}\text{Si}$ 反応は ^{26}Si の励起状態 3^+ を経由して共鳴核反応が進行すると予想されるが、この励起状態には実験的に不確定な部分がある。我々はゲルマニウム検出器 3 台によるガンマ線同時計数測定によって、これまで見出されていなかった 5886 keV の準位を観測した。この状態のスピンを決定する為にガンマ線角度相関測定を行った。

このガンマ線角度相関測定は 2 台のゲルマニウム検出器を 90° と 90° に配置した実験と 90° と 135° に配置した実験から求めたが、立体角の異なる 2 つの実験から導いた為、導出の過程においてノーマリゼーションパラメーターの任意性を生じた。そこで、今年度の実験では、検出器の立体角を一定に保ったまま角度を変えられる様に、直径 1.5 m のゴニオメーターを新たに設置した。

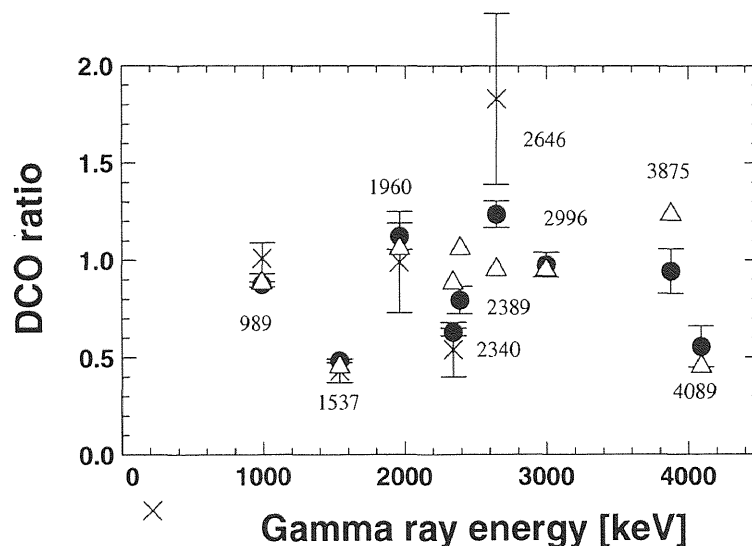


図 12: ^{26}Si の DCO 比。

^{26}Si の角相関実験は筑波大学応用加速器部門の 12UD タンデム加速器を用いて行った。 ^{26}Si は 10 MeV に加速された ^3He ビームを用いて $^{24}\text{Mg}(^3\text{He},n)^{26}\text{Si}$ 反応で生成した。ターゲットは $3\text{mg}/\text{cm}^2$ のマグネシウムを用いた。検出効率 40% と 35% の 2 台のゲルマニウム検出器を用いて、ガンマ線同時計数の頻度の角度依存性を測定した。35% のゲルマニウム検出器を 90° に固定し、40% のゲルマニウム検出器の角度を変化させ 90° または 135° とした。実験の結果を図 12 の × 印で示す。昨年度の結果は ● で示した。また、既知のスピンの基づく理論値をプログラム CORREL [13] を用いて計算し白三角で示した。989-keV、1537-keV、1960-keV と 2340-keV 遷移については今年度の結果と昨年度の結果は良く一致した。今年度の実験は、ゲルマニウム検出器の検出効率が小さかった為、3875-keV と 4089-keV のガンマ線は統計精度が悪く、値を算出できなかった。今年度と昨年度の角相関実験の結果の比較から、昨年度のノーマリゼーションパラメーターの決め方の正当性が確認された。

【2】 高エネルギー原子核実験 (三明康郎、江角晋一、中條達也、下村真弥、洞口琢磨、加藤純雄)

(1) RHIC-PHENIX 実験における荷電ハドロンの楕円方位角異方性の系統的研究

相対論的重イオン衝突は、地球上で Quark と Gluon が束縛から解放される状態、Quark-Gluon Plasma (QGP) 状態を作り出す方法として提案され、QGP を生成しその性質を調べることを目的

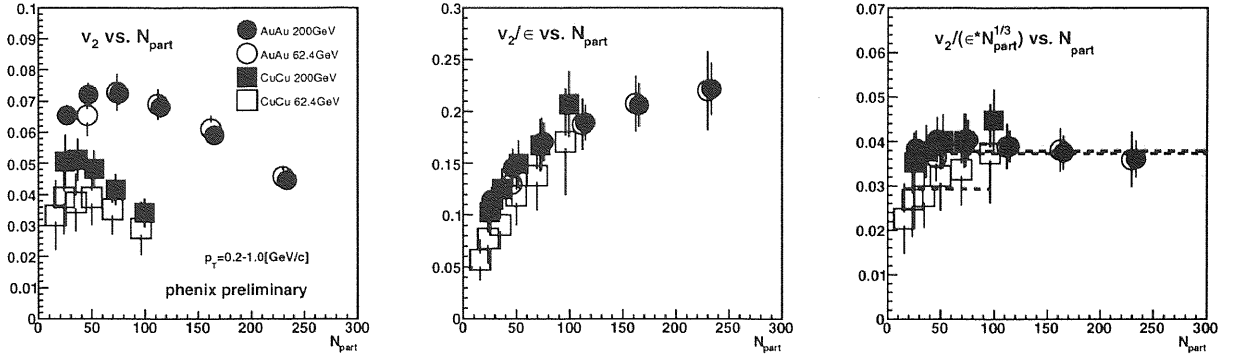


図 13: 4つの異なる衝突系における v_2 の N_{part} 依存性の比較。左図； v_2 vs. N_{part} 、中央図； v_2/ϵ vs. N_{part} 、右図； $v_2/(\epsilon \cdot N_{part}^{1/3})$ vs. N_{part} 。

として、米国ブルックヘブン国立研究所で相対論的重イオン型加速器 (RHIC) が建設され西暦 2000 年から実験が行われている。QGP 生成を証明し、その性質を明らかにすることができる測定量であると近年特に注目されているのが、生成粒子の方位角異方性である。特に、楕円方位角異方性 (運動量空間における方位角異方性) は、反応初期の幾何学的な異方性が原因であることが自明であるために、その変換効率は圧力勾配など、反応衝突の高温高密度物質の状態方程式を反映する。

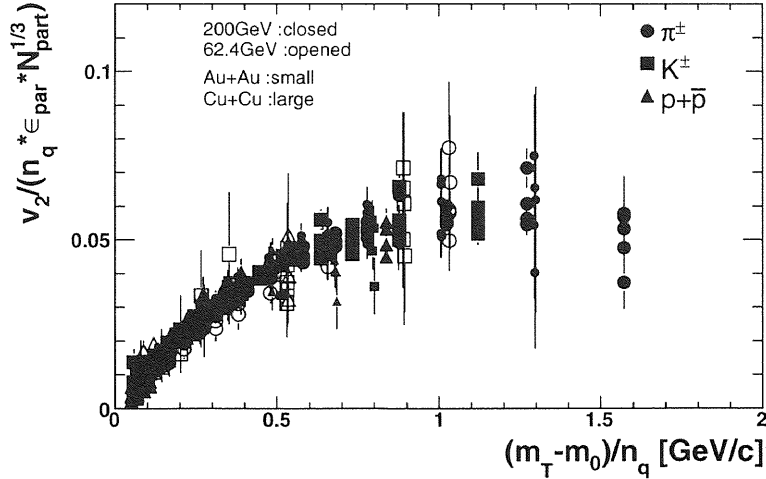


図 14: 金金-200 GeV, 金金-62.4 GeV, 銅銅-200 GeV 衝突における π , K, p の $v_2/(\epsilon \cdot N_{part}^{1/3} \cdot q_n)$ vs. K_{ET}/q_n 。中心衝突度は、0-50% を 10% ステップに 5 クラス、合計 45 本の曲線でできている。系統誤差を含めて polinormal fit を行ったときの χ^2/NDF は 2.1。

これまでの RHIC 実験における重要な発見の一つとして、 v_2 の測定から、低横運動量領域 ($p_T < \sim 2$ GeV/c) では、 v_2 は、非常に短い熱平衡の到達時間 (< 0.5 fm/c) を仮定する流体力学計算と一致し、低・中間横運動量領域 ($p_T = 1 - 4$ GeV/c) では、クォーク数 (n_q) でスケールするリコンビネーションモデルを示唆する結果がある。[14][15] また、衝突エネルギーが 17 GeV, 62 GeV, 130 GeV, 200 GeV における系統的測定から、荷電ハドロン の v_2 はエネルギーと共に大きくなるが、62 GeV 以

上ではほぼ一定で飽和していることから、QGP 生成の閾値に相当するのではないかという指摘がある。[16] この方位角異方性の起源に対する包括的理解を目的として、我々は、 v_2 の系統的測定、すなわち衝突核子当たり 200 GeV と 62 GeV の金+金及び銅+銅衝突実験において粒子識別されたハドロンの方位角異方性を測定し、衝突エネルギー、衝突系、衝突の中芯度による依存性や規則性について v_2 の系統的比較を行った。その結果、金+金衝突で 62.4 GeV と 200 GeV の v_2 vs. p_T は、測られた全ての中心衝突度において、 π , K, p, 包括荷電ハドロンとも、よく一致していることがわかった。(図 13 の左図) また、62 GeV の金+金衝突、200 GeV の銅+銅衝突での v_2 も KE_T +クォーク数スケールリング則をほぼ満たすことがわかった。銅+銅の周辺衝突には、これらのスケールリング則からのずれが見えはじめており、サイズの小さい系では、十分な熱平衡に達していない可能性を示唆しているが結論を出すにはさらに詳細な研究が必要である。さらに、金+金衝突と銅+銅衝突の比較から、 v_2 をエキセントリシティ、 ϵ (衝突関与粒子群の楕円率) で規格化したものを衝突関与核子数 (N_{part}) の関数として比べると一致することがわかった。(図 13 の中央図) これは衝突後、初期の幾何学的異方性が消える前に、非常に短い時間で物質が熱平衡に達していることを示している。

また、幾何学的楕円率のみで規格化しようと考えられていた v_2 は、衝突関与粒子数依存性が明確に観測され、衝突関与粒子数の 1/3 乗に比例して大きくなっていることがわかった。(図 13 の右図) これにより、従前の幾何学的楕円率、及びクォーク数によるスケールリングに加えて衝突関与粒子数の 1/3 乗則を新たに適用することにより、RHIC で観測されたすべての衝突系、すべての粒子種の v_2 が一つの曲線として表現できる (v_2 の Universal Scaling) こととなった。(図 14) この結果について膨張速度 β_T と熱的凍結温度 T_{fo} をパラメータとする単純膨張モデルであるブラストウェーブモデルを用いて、測定された荷電ハドロンのスペクトラと v_2 両方から考察したところ、 β_{AT} の方位角依存性は、系の大きさによらず初期の幾何学的異方性にのみよっていることを発見した。また、この結果と断熱膨張を仮定したモデル計算より、衝突関与粒子数の 1/3 乗則は、運動学的凍結条件に対応していることがわかり、このモデルによって、低横運動量領域の v_2 の Universal Scaling のみならず、横運動量分布を統一的に記述しうることがわかった。[17]

(2) RHIC-PHENIX $\sqrt{s}=200\text{GeV}$ 陽子・陽子衝突実験における 累積方位角相関と平均横運動量の粒子多重度依存性

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC) における実験から $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ の重イオン衝突ではクォーク・グルーオンプラズマ (QGP) が生成されていることが明らかとなってきた。QGP の今後の研究は QGP 物性の研究、特に、QGP 相転移 (広義) の次数や相転移温度など相転移の物性的特徴を調べることが重要である。従来、十分な反応体積が期待できない陽子・陽子衝突では QGP は生成されていないと考えられてきた。しかしながら、高エネルギーの陽子・陽子衝突では極めて多数の粒子を生成する事象が存在し、そのような稀な事象では QGP 生成の可能性を排除できない。欧州原子核研究機構 (CERN) の LHC 加速器においては 9 TeV から 14 TeV の陽子・陽子衝突が予定されており、さらに粒子多重度の大きな事象の観測が可能になる。QGP 生成の有無を予想する際に、粒子生成のメカニズムの検証は重要な課題である。高エネルギー衝突における粒子生成過程として、大きな運動量変化を伴う「ハード」プロセスと、大きな運動量変化を伴わない「ソフト」プロセスに大別されることが知られ、その様子は標準的衝突モデル (PYTHIA) で記述できると考えられている。QGP など集団的なメカニズムによる粒子生成が起こると標準的衝突モデル (PYTHIA) からのズレとして観測出来よう。

本研究では LHC における陽子・陽子衝突解析の準備研究として、高粒子多重度事象の反応メカニズムを検証するために、RHIC-PHENIX で行われた 2006 年に収集された $\sqrt{s}=200\text{GeV}$ 陽子・陽子

衝突実験のデータを解析した。粒子生成過程の違いを反映する量として平均横運動量 \bar{p}_t 及び累積方位角相関 (C_C) を各事象において評価し、事象の粒子多重度との依存を調べた。事象分けに際して、粒子多重度を中央領域 ($|\eta| < 0.35$) と前方領域 ($3.0 < \eta < 3.9$) の2つの領域で測定し、2種類の衝突事象分けを行って比較を行った。

$$\bar{p}_t = \langle p_t \rangle \quad (1)$$

$$C_C = \left\langle \sum_i \cos 2(\phi_{p_i} - \phi_i) \right\rangle \quad (2)$$

図 15 は観測された平均横運動量の粒子多重度依存性である。Central 領域を用いた事象分けでは粒子多重度とともに平均横運動量の増加が見られる。標準的衝突模型 (PYTHIA) においても同様の傾向が見られる。ところが、Forward 領域を用いた衝突事象分けでは PYTHIA では粒子多重度に対して変化を見せないが、観測データは増加を示すことがわかった。次に、図 16 に累積方位角相関の粒子多重度依存性を示す。平均横運動量と同様に、Central 領域を用いた衝突事象分けでは粒子多重度と共に累積方位角相関が増加する様子が見られた。一方で Forward 領域を用いた衝突事象分けでは粒子多重度に対する変化は見られず、PYTHIA 模型の計算結果も同様の傾向を示すことがわかった。

高エネルギー衝突における粒子生成メカニズムの理解は QGP 生成のみならず興味深い課題である。LHC 実験における高多重度事象のデータが望まれる。

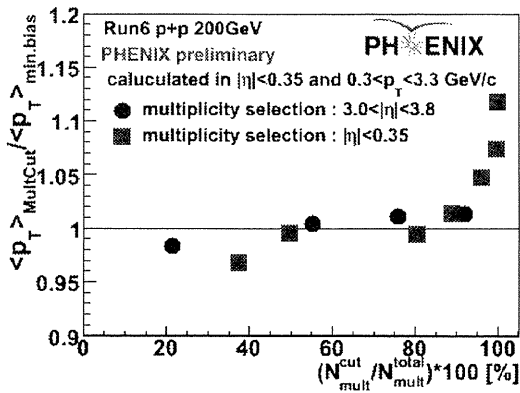


図 15: 平均横運動量の粒子多重度依存性。縦軸の平均横運動量は横運動量平均値と全観測事象の横運動量平均値の比で示している。横軸は規格化された粒子多重度を示す。●印が前方領域 ($3.0 < \eta < 3.9$)、■印が中心領域 ($|\eta| < 0.35$) を示す。

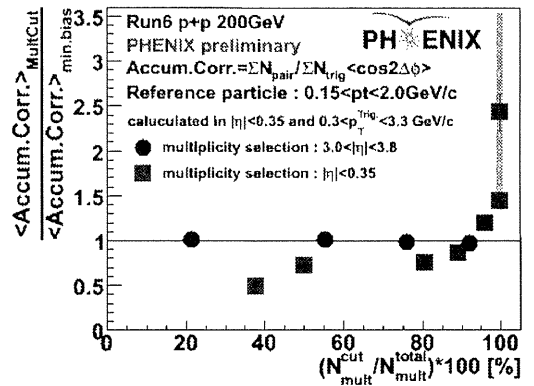


図 16: 累積方位角相関の粒子多重度依存性。縦軸の平均横運動量は横運動量平均値と全観測事象の横運動量平均値の比で示している。横軸は規格化された粒子多重度を示す。●印が前方領域 ($3.0 < \eta < 3.9$)、■印が中心領域 ($|\eta| < 0.35$) を示す。

(3)2 粒子方位角相関解析によるジェットの研究

米国ブルックヘブン研究所 (BNL) で行われている相対論的重イオン衝突加速器 (RHIC) を用いた高エネルギー原子核衝突実験において、クォーク・グルーオン・プラズマ物質相の実験的検証が進められている。高エネルギー衝突で発生する初期パートンのその物質相内でのエネルギー損失や、初期の幾何学的形状を源とした楕円型集団運動的膨張を裏付ける大きな楕円型方位角異方性が観測された。この2つの観測を結びつける一つの試みが、ハード・ソフト相関解析であり、高い運動量を持ったトリガー粒子を基準として、低い運動量を持ったパートナー (アソシエート) 粒子の相対方位角分布や相対ラピディティ分布を測る事である。トリガー粒子の反対側の方位角へのマッハコーン状の粒子

生成や、トリガー粒子の方位角と同じ方向でラピディティー方向へ拡がったリッジ状の粒子放出が注目されているが、その原因はいまだ明らかではない。そこで、さらに衝突の幾何学的形状を決める反応平面に対するトリガー粒子の方位角の関数として、そのパートナー粒子のトリガー粒子に対する相対方位角分布を詳細に評価する事を提案した。[18, 19]RHIC-PHENIX 実験でこれまで測定してきたデータを用いて、200GeV 金+金衝突実験における荷電ハドロン²の2粒子方位角相関分布のトリガー粒子方位角依存性結果 (PHENIX Preliminary) を図 17 に示す。[20] 実験データの条件の詳細は、図 17 の脚注に記す。この結果から、クォーク・グルーオン・プラズマ中を通過して放出されるトリガー粒子、及び、パートナー粒子の生成が、その物質相内の通過距離に依存している事を見出す事ができる。[21] さらに、その通過距離依存性は、先ず反応平面に対して水平方向への粒子放出は厚みによる減少、吸収を示し、さらに垂直方向への粒子生成は表面放出の寄与がある事を示唆している。現在進行中であるさらに詳しい多粒子相関解析及び多次元解析により、マッハコーン状の粒子生成や、リッジ状の粒子放出の原因を解くヒントがより良く見えてくるようになり、それによって、このようなハード・ソフト相関を用いたクォーク・グルーオン・プラズマ物質相の理解がより深まると思われる。

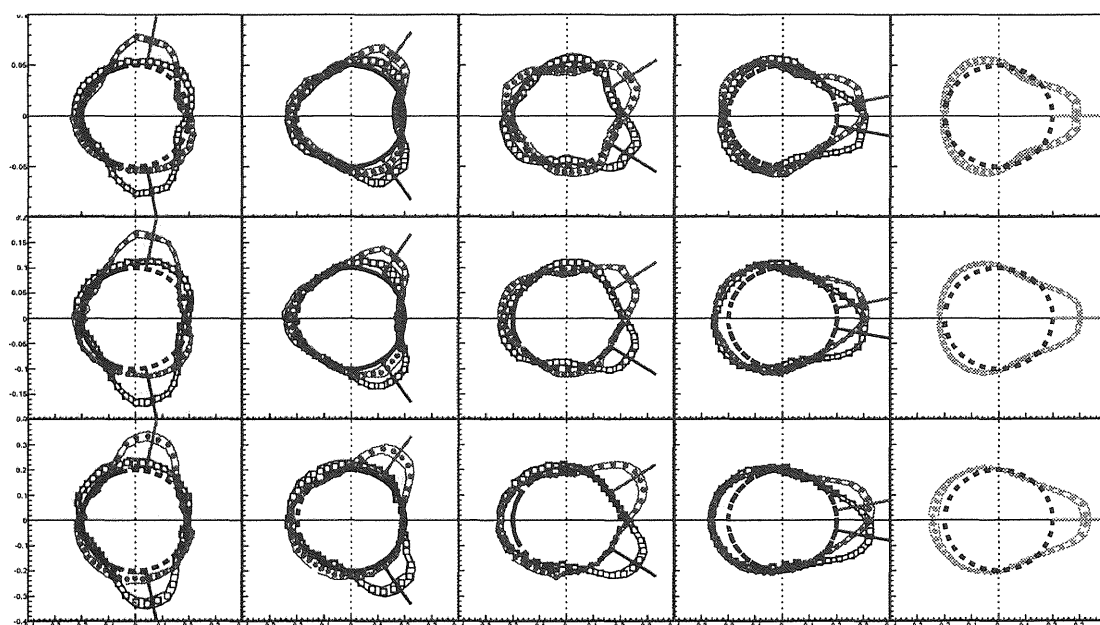


図 17: 200GeV 金+金衝突実験における荷電ハドロン²の2粒子方位角相関の反応平面に対するトリガー粒子方位角依存性の解析結果 (PHENIX Preliminary) を示している。粒子の横運動量領域は、トリガーハドロン $p_T = 2 \sim 4$ GeV/c、アソシエートハドロン $p_T = 1 \sim 2$ GeV/c。反応平面を横 (x) 軸にとり、トリガーハドロン方位角方向を実線で示し、点線の円を収量ゼロの基準線として、アソシエートハドロン分布を半径方向に極座標表示した。左から右へ、トリガーハドロン方向が反応平面に対して垂直方向から平行方向へと変わっており、最も右側は、反応平面に対してトリガーハドロン²の方向を区別しない場合 (右から 4 図全ての平均) をトリガー方向を x 軸に合わせて表示している。上から下へ、中心衝突度が 0 ~ 20% (中心衝突)、20 ~ 50%、50 ~ 93% (周辺衝突) と表示している。

(4) 高エネルギー重イオン衝突における楕円方位角異方性の精密測定

米国ブルックヘブン研究所 (BNL) で行われている相対論的重イオン衝突加速器 (RHIC) を用いた高エネルギー原子核衝突実験において、クォーク・グルーオン・プラズマ物質相の実験的検証が進められている。重心系 200GeV の金原子核衝突における重要な発見の一つとして生成粒子の非常に大きな楕円方位角異方性が観測されたことが挙げられる。これは反応平面 (衝突する両原子核のビーム軸を含む平面) に対して、粒子の放出分布が方位角 ϕ 方向に楕円の偏りを見せる現象で、その強度はフーリエ級数 2 次の項を以って表し、 v_2 と呼ぶ。(図 18)

$$\frac{dN}{d\phi} = N\{1 + \cos 2(\phi - \Psi)\} \quad (3)$$

N: 粒子数, Ψ : 反応平面 [rad], ϕ : 粒子放出角 [rad], v_2 : 楕円強度

この楕円方位角異方性 v_2 は相対論的重イオンの衝突領域の最初期の形状 (非中心衝突をした時に、楕円形となる) に起因すると考えられ、生成粒子が高温・高エネルギーの衝突領域内で、十分短い平均自由行程を持っていたことになる。言い換えれば、大きな方位角異方性は反応初期の高密度状態と、衝突直後の QGP 生成を示唆するものである。また興味深いことに、測定される方位角異方性は、衝突反応直後の熱平衡状態と、クォークやグルーオンが完全流体として振舞うと仮定した理論計算と極めて良く一致した。(図 19) [22] これはクォークとグルーオンの集団運動を示唆し、QGP 生成を示す重要な証拠の一つである。

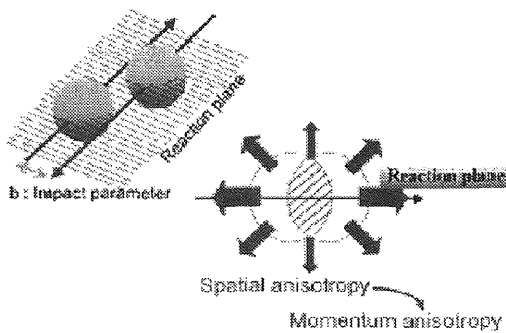


図 18: 反応平面 (reactionplane) と方位角異方性

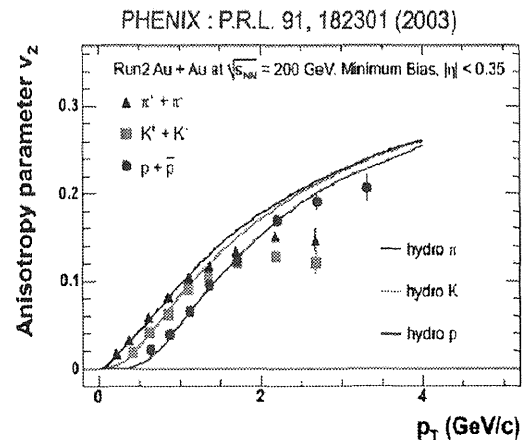


図 19: 楕円方位角異方性 v_2 と流体モデル計算

方位角異方性 v_2 は反応平面 Ψ を基準に測定されるため、統計の小さな衝突エネルギー、高運動量領域、希少粒子等の観察には高精度の反応平面分解能が必要となる。これまでの PHENIX における反応平面分解能はそういった測定に対しては十分でなく、方位角異方性測定は比較的統計の多い粒子の低運動量領域のみに限られていた。そこで我々は新たに反応平面決定精度向上のために新たな検出器 Reaction Plane Detector (Rxp) を開発し実装した。(図 20) これによって PHENIX の反応平面分解能は従来の 2 倍に向上した。これは測定される方位角異方性の統計誤差が半減することを意味する。図 21 は PHENIX における衝突中芯度 (0% を中心衝突、100% をかすり衝突とした値) に対する反応平面分解能の新旧の値の比較である。反応平面の分解能は測定値 Ψ_{obs} と真の値 Ψ_{real} との関係から次式で定義される。

$$R.P. \text{ resolution} = \langle \cos 2(\Psi_{obs} - \Psi_{real}) \rangle \quad (4)$$

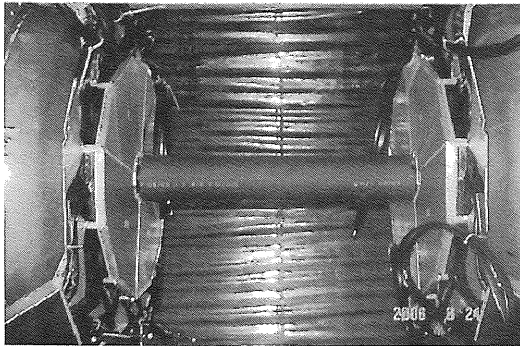


図 20: 反応平面検出器 RxP

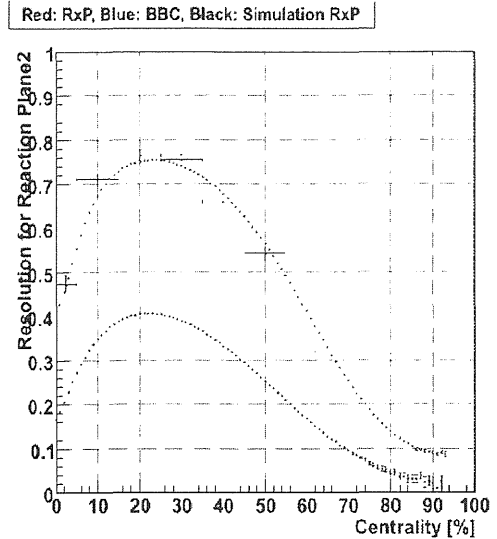


図 21: 反応平面分解能

図 22 は RxP を以て解析したハドロンの楕円方位角異方性 v_2 の p_T (ビームに垂直方向の運動量) に対する値を表す。ここから興味深い事実が見えてくる、先ず質量の重い粒子ほど高 p_T 側にシフトしている、そしてピークを迎える $p_T=3-5\text{GeV}$ 辺りの値はバリオンとメソンで決まった値をとる。これらの事実もクォークの集団運動を示唆する証拠であると考えられる。前者は生成粒子が高エネルギー媒体中である速度の集団運動 (流体的相互作用) を経るなら、重い粒子ほど高い運動量を得ると解釈できる。後者は、粒子がそれを構成するクォークの数に依存した方位角異方性 v_2 を持ち、その物理量がクォークレベルの集団運動によって (即ち QGP 相にて) 生まれたことを示唆する。これらの事実をより比較しやすくするために、 KE_T (ローレンツ因子であるビーム軸に対する横質量 m_T から静止質量 m_0 を引いた値) 及び構成クォーク数 n_q によるスケーリングを行った。横軸を KE_T とすることによって、質量依存の効果を打ち消すことが出来る (図 23)、さらに縦横の軸をクォーク数 n_q でスケールすることで、各粒子種からクォーク 1 個分の値を導き出すことが出来る。(図 24) その結果、主にソフトな成分である低運動量領域において、各ハドロンから見積もったクォークの方位角異方性に、美しい一致がみられた。ハードな運動量領域ではこれが破れており、ソフトとハードで異なる粒子生成と方位角異方性の起源が考えられる。

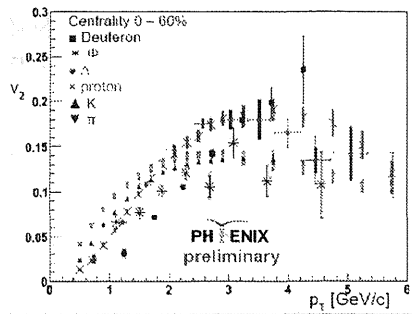


図 22: RxP によって測られたハドロンの方位角異方性

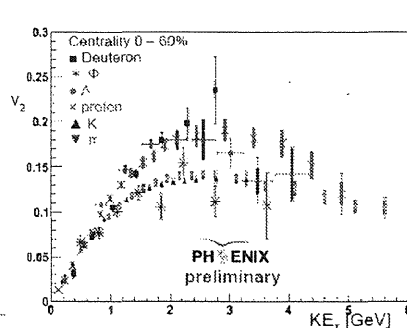


図 23: KE_T スケーリング

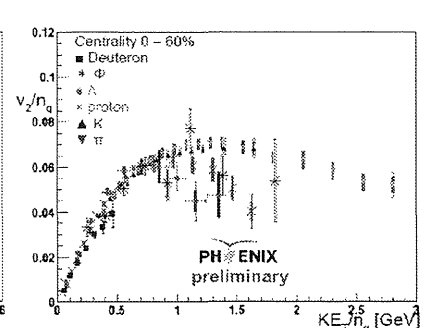


図 24: クォーク数スケーリング

2010年現在 PHENIX では 200 GeV, 63 GeV, 39 GeV, 7.7 GeV と、四種類の重心系エネルギーの衝突が測定されている。RXP 検出器の性能を生かして粒子統計の取り難い低エネルギーの衝突を解析することで、クォーク集団運動に対する衝突エネルギーの閾値を得ることが期待されている。また 2011 年に実装される VTX 検出器によって D 中間子の可能になれば、比較的重い c クォークが他の軽いクォークと共に集団運動に参加しているか知ることが出来、粒子の生成過程の重さによる違いを調べることが出来る。このように PHENIX における方位角異方性の研究は、検出器のアップグレードにより反応平面分解能や粒子識別能を向上させ、より幅広い解析が可能となってきた。

(5) 陽子・陽子衝突 $\sqrt{s} = 200$ および 62.4 GeV におけるハドロン横運動量分布 (RHIC-PHENIX 実験)

陽子・陽子衝突 $\sqrt{s} = 200$ および 62.4 GeV における、中心ラピディティ領域でのハドロン横運動量 (p_T) 分布の測定を、RHIC-PHENIX 実験で行った。測定した荷電粒子は π^\pm , K^\pm , 陽子, 及び反陽子である。粒子識別には筑波大学で製作した飛行時間測定器 (TOF) を用いた。これらの結果は、重イオン衝突データに対する重要なリファレンスを与えるとともに、高エネルギー陽子・陽子衝突におけるハドロン生成機構、さらには摂動論的 QCD 計算で用いる破砕関数への知見を与える。

今回使用したデータは、2005年 (200 GeV) と 2006年 (62.4 GeV) に収集されたデータである。統計量はそれぞれ 920 M イベント (200 GeV)、264 M イベント (62.4 GeV) である。これら高統計のデータを使うことによって、陽子と反陽子の測定可能な p_T 領域の上限値が、従来の 3.2 GeV/c から 4.5 GeV/c にまで上がり、($p+p$ 200 GeV の場合)、低い p_T 領域におけるソフトな粒子生成から、高い p_T 領域でのハード散乱による粒子生成まで、幅広い運動学的領域のスペクトルをカバーすることが可能となった。一方、 $p+p$ 62.4 GeV のデータは、1970~80年代に行われた従来の測定結果より高精度であり、同一エネルギーで測定された重イオンデータに対して重要な参照データを与える。

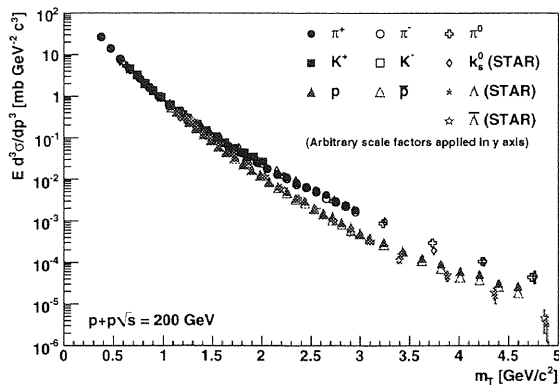


図 25: 陽子・陽子衝突 $\sqrt{s} = 200$ GeV での π^\pm , K^\pm , 陽子, 及び反陽子の m_T 分布. π^0 (PHENIX) は [23], K_s^0 , Λ , $\bar{\Lambda}$ (STAR) は [25] を参照。

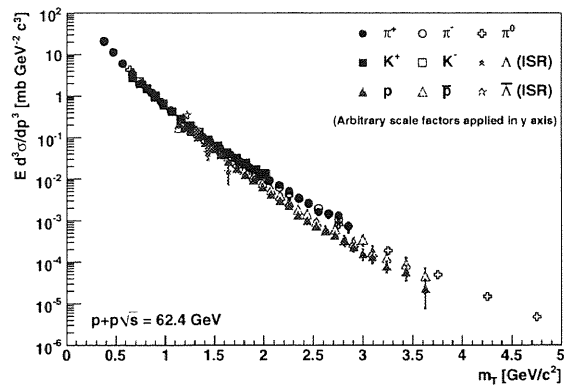


図 26: 陽子・陽子衝突 $\sqrt{s} = 62.4$ GeV での π^\pm , K^\pm , 陽子, 及び反陽子の m_T 分布. π^0 (PHENIX) は [24], Λ , $\bar{\Lambda}$ (ISR) は [26] を参照。

陽子・陽子衝突における π^\pm , K^\pm , 陽子及び反陽子の m_T 分布を図 25 (200 GeV) と図 26 (62.4 GeV) に示す。横軸は $m_T = \sqrt{p_T^2 + m^2}$ (m はハドロンの静止質量)、縦軸は不変微分断面積である。さらに縦軸のスケールは、 $m_T = 1.0 - 1.5$ GeV/c² 付近の π 中間子の収量で全ての分布を規格化している。これらの図から、バリオン (陽子、反陽子、ラムダ等) とメソン (π^\pm , K^\pm 等) の2つの

ラインに明瞭に分かれていることが分かる。この現象の一つの解釈としては、メソン生成にはクォーク・反クォーク対のみが要求されるのに対し、バリオンはダイクォーク・反ダイクォーク対が要求されるため、ある与えられたジェットエネルギーに対して、バリオンよりもメソンの方が作られやすいことが考えられる。

これらの結果の他、運動量分布のスロープパラメータ、平均横運動量、単位ラピディティあたりの収量 dN/dy 等を求め、他の実験結果との比較を行った。また x_T スケーリング則、 m_T スケーリング則について調べ、流体モデルとの比較や NLO pQCD 計算との比較を行った。

これらの結果をまとめ、近日中に Physical Review D 誌に投稿する予定である。

(6) DCal 設計とシミュレーション

欧州原子核研究機構 (CERN) における Large Hadron Collider (LHC 加速器) を用いた ALICE 実験では、2009 年 11 月の本格始動以来、重心系エネルギー 900 GeV および 7 TeV の陽子・陽子衝突実験が行われている。ALICE 実験の先行実験である RHIC-PHENIX 実験、STAR 実験では、クォーク・グルオンプラズマ (QGP) 物質相の探索および物性理解において、ジェットおよびジェット変貌効果が重要なプローブとなることが発見されたが、RHIC よりもさらに高エネルギー重イオン衝突実験 (鉛・鉛衝突、 $\sqrt{s_{NN}} = 5.5 \text{ TeV}$) が予定される ALICE 実験では、ジェット事象の生成断面積はより大きくなることから、その重要性はさらに増すと考えられる。特に、ダイジェット事象 (反対方向角方向にジェット対が生成される事象) の測定は、ジェット変貌効果の理解において必要不可欠であり、我々のグループでは、この測定を可能とする電磁カロリメータ: DCal の ALICE 実験への搭載を計画している。

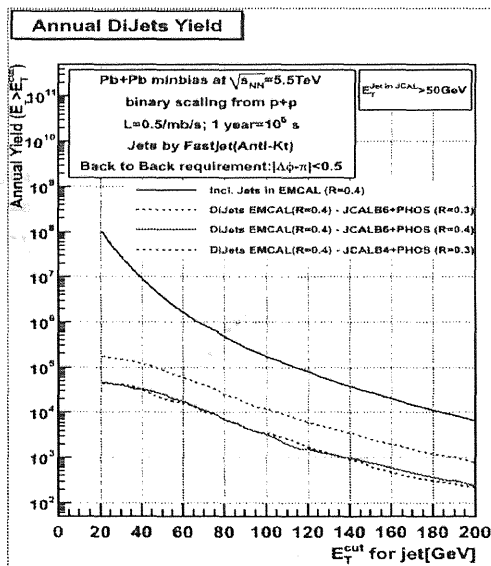


図 27: 鉛・鉛衝突 $\sqrt{s_{NN}} = 5.5 \text{ TeV}$ でのダイジェット事象の年間収量 (異なる DCal super module 数、設置方法の場合を併記)。トリガージェット $E_T > 50 \text{ GeV}$ 。

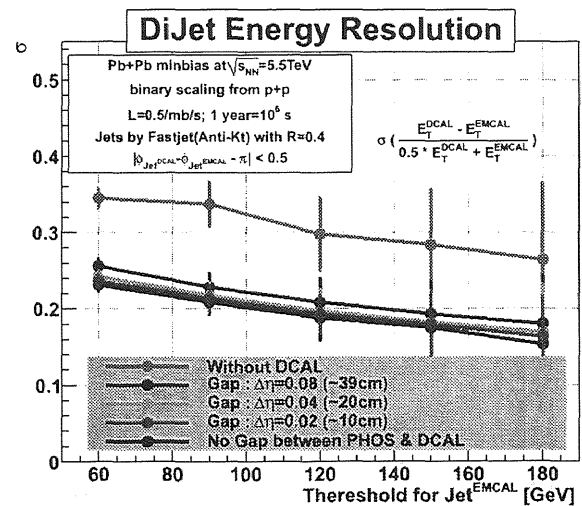


図 28: ダイジェットエネルギーバランス分解能のトリガージェット E_T 依存性。分解能は図中の式として定義。既存の電磁カロリメータ (PHOS) と DCal 間の異なる Gap 間隔の結果を示している。DCal を使わない場合の値が一番上のラインで、Gap 間隔を小さくしていくと共に値が小さくなり、Gap 間隔が 0 の場合が一番下のラインとなる。

図 27 は異なる DCAL super module の数、設置方法における、ダイジェット事象の年間収量を表す。建設予定の DCal (図中の JCALB6) では、 $E_T = 100\text{GeV}$ 程度まで年間 10000 事象ものダイジェット事象の測定が期待できる (Jet Cone Size:R=0.3)。さらに、ダイジェットエネルギーバランス分解能のトリガージェット E_T 依存性を図 28 に記す。図 28 には、DCal 無しの場合の分解能が一番上のデータで、既存の電磁カロリメータ (PHOS) と DCal との異なる Gap 間隔を小さくすると共に分解能が改善 (小さくなっている) している事を示す。図 28 から分かるように、現実的な 3 通りの Gap 間隔と理想的な Gap 無し (最も下のライン) の場合を比較し、期待される年間収量の統計誤差の範囲内でほぼ同等であるが、DCal 無し (最も上のライン) の場合と DCal 有りの場合を比較すると、最大 10% 程度のエネルギーバランス分解能の改善が見られる。このような分解能の向上はジェット変貌効果の理解において、重要な知見を与えると考えられる。これらのようなシミュレーションから、ダイジェット測定において DCal の重要性が定量的に示され、現在では、アメリカ、中国、イタリアなどのグループとの協力のもと、着々と DCAL の Construction が行われている。

(7) ALICE Di-Jet Calorimeter における検出器シミュレーションの構築

欧州原子核研究機構 (CERN) における Large Hadron Collider (LHC) は、2009 年秋季より運転を再開し、陽子-陽子衝突における重心系衝突エネルギー 900GeV 及び 7TeV のデータを蓄積中である。また、2010 年冬季には LHC において初となる重心系衝突エネルギー 5.5TeV の鉛-鉛衝突実験が予定されている。LHC ALICE では、今後の更なる物理推進のために、LHC 初年度のデータ収集の成功と同時に、ALICE 検出器のアップグレード計画を推進中である。筑波大学では、ALICE アップグレード計画の一つとして、Di-Jet 測定に焦点を当てた Di-Jet カロリメータ (DCAL) の開発を推進している。図 29 に CERN-LHC 加速器を使った ALICE 実験の現在のセットアップと、EMCAL (図 30 上) 及び DCAL (図 30 下) を追加する事によるアップグレード計画を示す。

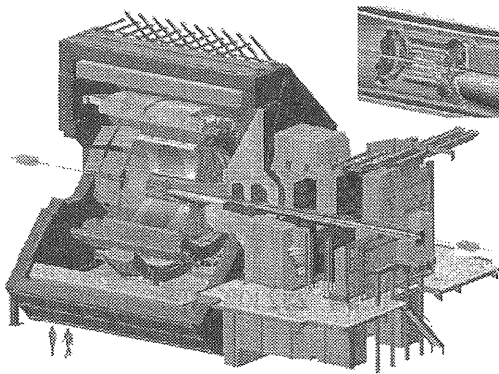


図 29: LHC-ALICE 実験のセットアップ

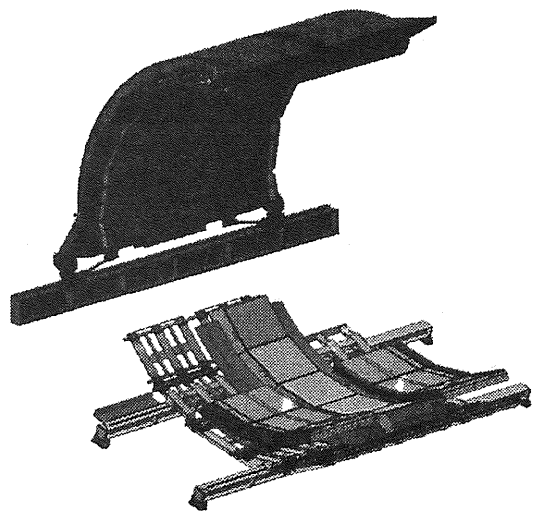


図 30: EMCAL/DCAL によるアップグレード計画

Di-Jet とは、陽子-陽子及び重イオン衝突において一つのジェットを観測した際に、そのジェットの反対方向に放出されるジェットとの対のことである。特に、重イオン衝突下の初期衝突において生成されたジェット対は、重イオン衝突下で生成されるであろう QCD 物質中との相互作用によって、エネルギーを失うと考えられている。このような現象はジェット抑制と呼ばれ、Di-Jet が生成された位置によって QCD 物質中との相互作用する距離が変わることから、QCD 物質の厚みに関する情報を

抽出することが期待されている。これはジェットトモグラフィーと呼ばれる手法で、Di-Jet 測定を利用したクォーク・グルーオンプラズマの探索及び物理解析に強力な指針を与えると考えられている。

筑波大学では、この DCAL による物理シミュレーションを積極的に推進し、筑波大学 LHC ALICE 実験解析用コンピューターファームに於いて、DCAL 用検出器シミュレーションを構築した。筑波大学では、この DCAL を含む検出器シミュレーションを用いて、DCAL による今後の物理解析における基盤を構築すべく研究を推進中である。

参考文献

- [1] Y.Yano, Nucl. Instrum. Methods. Res. **B261**, 1009 (2007).
- [2] T.Kubo, Nucl. Instrum. Methods. Res. **B204**, 97 (2003).
- [3] T.Yamaguchi *et al.*, Proceedings of STORI'05, 297 (2005).
- [4] Y.Yamaguchi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **B266**, 4575 (2008).
- [5] J. David and R. H. Heffner, Nucl. Inst. and Meth. **148**, 503 (1978).
- [6] T.Vandana *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 162501(2005).
- [7] M. Kamimura *et al.*, Prog. Theor. Phys. Jpn, Supp. **89**, (1986).
- [8] D. Q. Fang *et al.*, Phys. Rev. **C76**, 031601(R) (2007).
- [9] Kimikazu Sasa *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. **B268**, 871 (2010).
- [10] Yuki Tosaki *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. **B268**, 1261 (2010).
- [11] Yuki Matsushi *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. **B268**, 1205 (2010).
- [12] R. Diehl, *et al.*, Nature **439**, 45 (2006).
- [13] K.S. Krane, *et al.*, Nuclear Data Tables **11**, 351 (1973).
- [14] S. S. Adler *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 182301 (2003)
- [15] A. Adare *et al.*, PHENIX Collaboration, Phys. Rev. Lett. **98**, 162301 (2007)
- [16] S. S. Adler *et al.*, PHENIX Collaboration, Phys. Rev. Lett. **94**, 232302 (2005)
- [17] M. Shimomura for the PHENIX Collaboration, Nucl.Physc.**A830** 183C-186C (2009)
- [18] J. Phys. G, Nucl. Part. Phys. 36(2009)064060, S. Esumi for the phenix collaboration.
- [19] Proceedings of Science, PoS(High-pT physics09)031, S. Esumi.
- [20] Quark Matter 2009 poster, S. Esumi for the PHENIX Collaboration.
- [21] Jiangyong Jia, ShinIchi Esumi, Rui Wei, Phys. Rev. Lett. 103(2009)022301.
- [22] S. S. Alder *et al.* PHENIX Collaboration, Phys. Rev. Lett. 91, 182301 (2003)

- [23] A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Phys. Rev. **D76**, 051106 (2007).
- [24] A. Adare et al. (PHENIX collaboration), Phys. Rev. **D79**, 012003 (2009).
- [25] B. I. Abelev et al. (STAR collaboration), Phys. Rev. **C75**, 064901 (2007).
- [26] D. Drijard et al., Zeit. Phys. **C12**, 217 (1982).

<論文>

1. Daiya Kaji, Kouji Morimoto, Nozomi Sato, Takatoshi Ichikawa, Eiji Ideguchi, Kazutaka Ozeki, Hiromitsu Haba, Hiroyuki Koura, Yuki Kudou, Akira Ozawa, Takayuki Sumita, Takayuki Yamaguchi, Akira Yoneda, Atsushi Yoshida, Kosuke Morita, Production and Decay Properties of ^{263}Hs , J. Phys. Soc. Jpn., Vol.78, No.3, (2009) p.035003.
2. K.Tanaka, T.Yamaguchi, T.Suzuki, T.Ohtsubo, M.Fukuda, D.Nishimura, M.Takechi, K.Ogata, A.Ozawa, T.Izumikawa, T.Aiba, N.Aoi, H.Baba, Y.Hashizume, K.Inafuku, N.Iwasa, K.Kobayashi, M.Komuro, Y.Kondo, T.Kubo, M.Kurokawa, T.Matsuyama, S.Michimasa, T.Motobayashi, T.Nakabayashi, S.Nakajima, T.Nakamura, H.Sakurai, R.Shinoda, M.Shinohara, H.Suzuki, E.Takeshita, S.Takeuchi, Y.Togano, K.Yamada, T.Yasuno, M.Yoshitake, Observation of a Large Reaction Cross Section in the Drip-Line Nucleus ^{22}C , Phys. Rev. Lett. 104, 062701 (2010).
3. N.Aoi, E.Takeshita, H.Suzuki, S.Takeuchi, S.Ota, H.Baba, S.Bishop, T.Fukui, Y.Hashimoto, H.J.Ong, E.Ideguchi, K.Ieki, N.Imai, M.Ishihara, H.Iwasaki, S.Kanno, Y.Kondo, T.Kubo, K.Kurita, K.Kusaka, T.Minemura, T.Motobayashi, T.Nakabayashi, T.Nakamura, T.Nakao, M.Niikura, T.Okumura, T.K.Onishi, H.Sakurai, S.Shimoura, R.Sugo, D.Suzuki, M.K.Suzuki, M.Tamaki, K.Tanaka, Y.Togano, K.Yamada, Development of Large Deformation in ^{62}Cr , Phys.Rev.Lett. 102, 012502-012505 (2009).
4. Y.Ichikawa, T.K.Onishi, D.Suzuki, H.Iwasaki, T.Kubo, V.Naik, A.Chakrabarti, N.Aoi, B.A.Brown, N.Fukuda, S.Kubono, T.Motobayashi, T.Nakabayashi, T.Nakamura, T.Nakao, T.Okumura, H.J.Ong, H.Suzuki, M.K.Suzuki, T.Teranishi, K.N.Yamada, H.Yamaguchi, H.Sakurai, β decay of the proton-rich nucleus ^{24}Si and its mirror asymmetry, Phys. Rev. C 80, 044302-044313 (2009).
5. S.Takeuchi, N.Aoi, T.Motobayashi, S.Ota, E.Takeshita, H.Suzuki, H.Baba, T.Fukui, Y.Hashimoto, K.Ieki, N.Imai, H.Iwasaki, S.Kanno, Y.Kondo, T.Kubo, K.Kurita, T.Minemura, T.Nakabayashi, T.Nakamura, T.Okumura, T.K.Onishi, H.Sakurai, S.Shimoura, R.Sugou, D.Suzuki, M.K.Suzuki, M.Takashina, M.Tamaki, K.Tanaka, Y.Togano, K.Yamada, Low-lying states in ^{32}Mg studied by proton inelastic scattering, Phys.Rev. C 79, 054319-054329 (2009).
6. S.Takeuchi, N.Aoi, H.Baba, T.Kubo, T.Motobayashi, K.Tanaka, K.Yamada, T.Fukui, S.Ota, Y.Hashimoto, Y.Kondo, T.Nakabayashi, T.Nakamura, T.Okumura, K.Ieki, S.Kanno, K.Kurita, R.Sugou, E.Takeshita, Y.Togano, N.Imai, T.Minemura, H.Iwasaki, T.K.Onishi, H.Sakurai, D.Suzuki, H.Suzuki, M.K.Suzuki, S.Shimoura, M.Tamaki, Study of low-lying states in ^{32}Mg , Int. J. Mod. Phys. E18, 2025-2029 (2009).
7. Masanori Kurosawa, Satoshi Ishii, Kimikazu Sasa, Trace-element compositions of single fluid inclusions in the Kofu granite, Japan: Implications for compositions of granite-derived fluids, The Island Arc, Volume 19, Number 1, March 2010, 40-59.
8. Norikazu Kinoshita, Hiroshi Matsumura, Kotaro Bessho, Akihiro Toyoda, Kazuyoshi Masumoto, Yuki Matsushi, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Shozo Mihara, Toshiyuki

Oki, Masumi Matsumura, Yuki Tosaki, Keisuke Sueki, Michiko Tamari, Yasuo Nagashima, Depth Profile of Radioactivity Induced in the Thick Concrete Shield in EP1 Beam Line at the KEK 12-GeV Proton Synchrotron Facility, Nuclear Technology, Volume 168, Number 3, 2009, Pages 694-699.

9. Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Yuki Tosaki, Yuki Matsushi, Keisuke Sueki, Michiko Tamari, Takahiro Amano, Toshiyuki Oki, Shozo Mihara, Yoshihiro Yamato, Yasuo Nagashima, Kotaro Bessho, Norikazu Kinoshita, Hiroshi Matsumura, Status and research programs of the multinuclide accelerator mass spectrometry system at the University of Tsukuba, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 268 (2010) 871-875.
10. Kimikazu Sasa, Yuki Matsushi, Yuki Tosaki, Michiko Tamari, Tsutomu Takahashi, Yasuo Nagashima, Kazuho Horiuchi, Hiroyuki Matsuzaki, Yasuyuki Shibata, Motohiro Hirabayashi, Hideaki Motoyama, Measurement of cosmogenic ^{36}Cl in the Dome Fuji ice core, Antarctica: Preliminary results for the Last Glacial Maximum and early Holocene, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 268 (2010) 1193-1196.
11. Yuki Tosaki, Gudrun Massmann, Norio Tase, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Yuki Matsushi, Michiko Tamari, Yasuo Nagashima, Kotaro Bessho, Hiroshi Matsumura, Distribution of $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ in a river-recharged aquifer: Implications for the fallout rate of bomb-produced ^{36}Cl . Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 268, 1261-1264.
12. Yuki Matsushi, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Keisuke Sueki, Yasuo Nagashima, Yukinori Matsukura, Denudation rates of carbonate pinnacles in Japanese karst areas: Estimates from cosmogenic ^{36}Cl in calcite, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 268, 1205-1208.
13. 笹 公和, 会議報告: 第 11 回重イオン加速器技術に関する国際会議 (HIAT09) 報告, 日本加速器学会誌「加速器」 Vol. 6(3) (2009) 251~255. Meeting report: Report on the 11th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology (HIAT09), Journal of the Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 6(3) (2009) 251-255.
14. Plasmonic activity on gold nanoparticles embedded in nanopores formed in a surface layer of silica glass by swift-heavy-ion irradiation, K. Nomura, Y. Ohki, M. Fujimaki, X. Wang, K. Awazu, T. Komatsubara NANOTECHNOLOGY, 20-47, pp.475306-1-475306-7、2009/10
15. Penning trap mass spectrometry of neutron-rich Fe and Co isotopes around $N=40$ with the LEBIT mass spectrometer R. Ferrer, M. Block, C. Bachelet, B. R. Barquest, G. Bollen, C. M. Campbell, M. Facina, C. M. Folden, III, C. Gunaut, A. A. Kwiatkowski, D. L. Lincoln, D. J. Morrissey, G. K. Pang, A. M. Prinke, R. Ringle, J. Savory, P. Schury, and S. Schwarz Phys. Rev. C 81, 044318 (2010).
16. High-precision Penning trap mass measurements of neutron-rich sulfur isotopes at the $N=28$ shell closure R. Ringle, C. Bachelet, M. Block, G. Bollen, M. Facina, C. M. Folden, III, C. Gunaut, A. A. Kwiatkowski, D. J. Morrissey, G. K. Pang, A. M.

- Prinke, J. Savory, P. Schury, S. Schwarz, and C. S. Sumithrarachchi Phys. Rev. C 80, 064321 (2009).
17. Multi-reflection time-of-flight mass spectrograph for short-lived radioactive ions P. Schury, K. Okada, S. Shchepunov, T. Sonoda, A. Takamine, M. Wada, H. Wollnik and Y. Yamazaki Eur. Phys. J. A 42 343-349 (2009).
 18. Isotope shift measurement of $^{11,9,7}\text{Be}^+$ A. Takamine, M. Wada, K. Okada, T. Nakamura, P. Schury, T. Sonoda, V. Lioubimov, H. Iimura, Y. Yamazaki, Y. Kanai, T.M. Kojima, A. Toshida, T. Kubo, I. Katayama, S. Ohtani, H. Wollnik and H.A. Schussler Eur. Phys. J. A 42 369-373 (2009).
 19. Precision Penning trap mass measurements of rare isotopes produced by projectile fragmentation S. Schwarz, M. Block, G. Bollen, C.M. Campbell, M. Facina, R. Ferrer, C.M. Folden III, A.A. Kwiatkowski, D.J. Morrissey, G.K. Pang, A.M. Prinke, R.J. Ringle, J. Savory and P.H. Schury Eur. Phys. J. A 42 323-326 (2009).
 20. rp Process and Masses of $N \sim Z \sim 34$ Nuclides J. Savory, P. Schury, C. Bachelet, M. Block, G. Bollen, M. Facina, C. M. Folden, III, C. Gunaut, E. Kwan, A. A. Kwiatkowski, D. J. Morrissey, G. K. Pang, A. Prinke, R. Ringle, H. Schatz, S. Schwarz, and C. S. Sumithrarachchi Phys. Rev. Lett. 102, 132501 (2009).
 21. S. Afanasiev, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), High-pT π^0 Production with Respect to the Reaction Plane in Au + Au Collisions at $\sqrt{s(NN)} = 200\text{-GeV}$. Phys.Rev.C80:054907,2009.
 22. S. Afanasiev, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Kaon interferometric probes of space-time evolution in Au+Au collisions at $\sqrt{s(NN)} = 200\text{-GeV}$. Phys.Rev.Lett.103:142301,2009.
 23. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Measurement of Bottom versus Charm as a Function of Transverse Momentum with Electron-Hadron Correlations in p+p Collisions at $\sqrt{s}=200\text{ GeV}$. Phys.Rev.Lett.103:082002,2009.
 24. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Photon-Hadron Jet Correlations in p+p and Au+Au Collisions at $\sqrt{s(NN)} = 200\text{-GeV}$. Phys.Rev.C80:024908,2009.
 25. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Photoproduction of J/ψ and of high mass $e+e^-$ in ultra-peripheral Au+Au collisions at $\sqrt{s(NN)} = 200\text{-GeV}$. Phys.Lett.B679:321-329,2009.
 26. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Systematic Studies of Elliptic Flow Measurements in Au+Au Collisions at $\sqrt{s(NN)} = 200\text{-GeV}$. Phys.Rev.C80:024909,2009.
 27. D. Adamova, S. Esumi et al. (CERES Collaboration), Modification of jet-like correlations in Pb-Au collisions at $158A\text{-GeV}/c$. Phys.Lett.B678:259-263,2009

28. Jiangyong Jia, ShinIchi Esumi, Rui Wei, Away-side asymmetry of jet correlation relative to reaction plane: A Sensitive probe for jet in-medium modifications. Phys.Rev.Lett.103:022301,2009
29. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Double Helicity Dependence of Jet Properties from Dihadrons in Longitudinally Polarized p+p Collisions at $s^{*(1/2)} = 200$ -GeV. Phys.Rev.D81:012002,2010.
30. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Detailed measurement of the $e^+ e^-$ pair continuum in p+p and Au+Au collisions at $s(NN)^{(1/2)} = 200$ -GeV and implications for direct photon production. Phys.Rev.C81:034911,2010.
31. A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, T. Horaguchi, Y. Miake, M. Shimomura et al. (PHENIX Collaboration), Enhanced production of direct photons in Au+Au collisions at $s(NN)^{(1/2)}=200$ GeV and implications for the initial temperature. Phys.Rev.Lett.104:132301,2010

<学位論文 (博士論文) >

1. 理学 (博士)、下村真弥 (Shimomura, Maya)、Systematic Study of Azimuthal Anisotropy for Charged Hadrons in Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions at RHIC-PHENIX、(RHIC-PHENIX 実験での相対論的原子核衝突における荷電ハドロンの方角異方性の系統的研究)

<学位論文 (修士論文) >

1. 修士 (理学)、生山友博 (Ikuyama, Tomohiro)、銅クラスター陽イオンと硫化水素との反応についての研究
2. 修士 (理学)、伊藤由太 (Itoh, Yuta)、RI 蓄積リングの磁場校正のためのクラスターイオン源の開発 (Developments of Cluster Ion Source for Magnetic-field Calibration in Rare RI Ring)
3. 修士 (物理学)、小川賢一郎 (Ogawa, Ken-ichiro)、RI ビームのエネルギー損失測定用傾斜電極型電離箱の性能評価 (Developments of Tilted Electrode Grid Ion Chamber for measurements of energy loss for RI beams)
4. 修士 (理学)、梶谷緑 (Kajigaya, Midori)、RHIC-PHENIX $\sqrt{s} = 200$ GeV 陽子-陽子衝突実験における累積方位角相関と平均横運動量の粒子多重度依存性の研究、(Multiplicity dependence of the accumulative correlation and mean pT in $\sqrt{s}=200$ GeV p+p collisions at RHIC-PHENIX)
5. 修士 (理学)、木村瑞希 (Kimura, Mizuki)、核子対当たり重心系衝突エネルギー 200GeV での銅-銅衝突における荷電二粒子相関のジェット分布測定、(Jet distribution of two particle correlations for charged hadrons in Cu+Cu collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV)

6. 修士 (理学)、轟木貴人 (Todoroki, Takahito)、 $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ 金・金衝突における包括光子 - ハドロン相関の反応平面及びラピディティ依存性の研究、
(Study of reaction plane and rapidity dependence of inclusive photon - hadron correlation in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{ GeV}$)
7. 修士 (理学)、浜田英太郎 (Hamada, Eitarou)、RHIC-PHENIX 実験 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ 金+金衝突における多粒子相関の反応平面依存性を用いたパートン-QGP 間相互作用の研究、
(Study of parton-QGP medium interactions by measurements of reaction plane dependence of multi-particle correlations for charged hadrons in $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ Au+Au collisions at RHIC-PHENIX)
8. 修士 (理学)、横山広樹 (Yokoyama, Hiroki)、LHC-ALICE 実験における QGP 研究のためのクォーク/グルーオン・ジェット識別能力の評価、
(Capability of Quark/Gluon-Jet Separation for QGP Study at LHC-ALICE)

< 学士論文 >

1. 学士、阿部康志 (Abe, Yasushi)、不安定核 ^{30}P の生成量評価 (Estimation of yield of unstable nuclei ^{30}P)
2. 学士、上口長昭 (Kamiguchi, Nagaaki)、固体ネオン検出器の開発と性能評価 (Developments of solid Ne detector)
3. 学士、杉山由紀 (Sugiyama Yuki)、ゴニオメーターを用いた γ 線測定による ^{26}Si の核構造の研究 (Gamma-ray spectroscopy for ^{26}Si by using goniometer)
4. 学士 黒住和奈 (Kazuna Kurosumi)、宇宙線生成核種 ^{36}Cl の加速器質量分析による宇宙線強度変動の測定 (Measurement of cosmic ray changes by cosmogenic Cl-36 AMS)
5. 学士、窪田晋太郎・近藤祐樹 LHC-ALICE 実験における Di-jet 測定用電磁カロリメータの製作と性能評価
6. 学士、水野三四郎 RHIC-PHENIX 実験 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ 金-金衝突におけるストレンジネス重粒子探索
7. 学士、渡辺吉彬 LHC-ALICE 検出器シミュレーションを用いた $\sqrt{s} = 14\text{ TeV}$ p-p 衝突における Di-Jet 再構成の研究

< 招待講演 (国際会議) >

1. Kimikazu Sasa (Invited talk),
Multi-nuclide AMS system at the University of Tsukuba, 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, November 9 - 13, 2009, University of Tsukuba, Ibaraki, Japan
2. Kimikazu SASA (Invited lecture)
AMS programs at the University of Tsukuba, Guangxi University, China, 23 July, 2009.

3. Y. Ikeda (Invited talk),
"Measurement of Azimuthal Anisotropy with the New Reaction Plane Detector in the PHENIX experiment", 25th Winter Workshop on Nuclear Dynamics(WWND2009), Feb. 1-8, 2009, Big Sky Montana, USA
4. S. Esumi (Invited talk),
"Interplay between jet and v_2 ", 4th international workshop High-pT physics at LHC 09, Feb. 4-7, 2009, Prague, Czech
5. S. Esumi (Invited talk),
"Flow and non-flow in jet correlation" CATHIE-RIKEN Workshop Critical Assessment of Theory and Experiment on Correlations at RHIC, Feb. 25-26, 2009, BNL, USA,
6. Maya Shimomura (Invited talk),
"System Size and Collision Energy Dependence of v_2 for Identified Charged Hadrons at RHIC-PHENIX", Quark Matter 2009, Knoxville, TN, USA, Mar.30 -Apr.4, 2009
7. S. Esumi (Invited talk),
"Jet-flow correlations", Flow and dissipation in ultrarelativistic Heavy Ion Collisions, ECT* Trento, Italy, Sep.14-18, 2009,
8. M. Ikeda (Invited talk),
"Measurement of Azimuthal Anisotropy with the New Reaction Plane Detector in the PHENIX experiment", V Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, CERN, Oct. 14-17, 2009,
9. M. Shimomura (Invited talk),
"What We Have Learned from the Measurement of Azimuthal Anisotropy of Identified Particles in Relativistic Heavy Ion Collisions, Hawaii 2009 (JPS-DNP joint meeting), Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009
10. Y. Miake (Invited talk),
"Jet as a homework from RHIC to LHC", The workshop for ALICE upgrades by Asian countries, Yonsei University, Seoul, Korea, Nov. 5-7, 2009
11. T. Horaguchi (Invited talk),
"Photon analysis and J-Cal", The workshop for ALICE upgrades by Asian countries, Yonsei University, Seoul, Korea, Nov. 5-7, 2009
12. T. Chujo (Invited talk),
"ALICE-EMCal Extension Project -status and plan-", The workshop for ALICE upgrades by Asian countries, Yonsei University, Seoul, Korea, Nov. 5-7, 2009
13. H. Yokoyama (Invited talk),
"Jet analysis at ALICE", The workshop for ALICE upgrades by Asian countries, Yonsei University, Seoul, Korea, Nov. 5-7, 2009

14. S. Esumi (Invited talk),
"Experimental studies of quark gluon plasma at RHIC" (invited talk), 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium(JCNP 2009), Nov. 9-13, 2009, University of Tsukuba, Ibaraki, Japan

<招待講演 (国内) >

1. 笹 公和 (招待講演)
加速器質量分析 (AMS) による Cl-36 の測定とその応用 2009 日本放射化学会年会・第 53 回放射化学討論会日本大学文理学部百周年記念館, 2009 年 9 月 28 日 (月)~30 日.
2. 江角晋一 Towards Understanding of QGP Transport Properties- Recent jet-related results from RHIC、第 1 2 回 Heavy Ion Cafe、東京大学、2009 年 5 月 9 日
3. 江角晋一 Jet Quenching and Modification at RHIC and Jet Calorimeter for ALICE-LHC、第 6 回 Heavy Ion Pub、名古屋大学、2009 年 7 月 10 日
4. 中條達也 「RHIC 加速器をつかった QGP 生成とその性質の解明」名古屋大学 EHQ 研合同セミナー (2009 年 6 月 16 日)
5. 中條達也 "Proving Quark Gluon Plasma via Baryon Production at RHIC" 広島大学・セミナー (2009 年 11 月 30 日)
6. 中條達也 「加速器で探るビックバン直後の宇宙と QCD 相転移」広島大学・高エネルギー物理学特論 (学部 3 年生向け授業、2009 年 12 月 1 日)

<国際会議発表>

1. D. Nagae, T. Ishii, R. Takahashi, M. Asai, H. Makii, A. Osa, T.K. Sato, S. Ichikawa, Y.R. Shimizu, T. Shoji, "Lifetime Measurements for the First 2^+ States in $^{162,164}\text{Gd}$ Populated by the beta Decay of $^{162,164}\text{Eu}$ ", International Symposium on Exotic Nuclei (EXON-2009)
2. The 10 th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies, March 8-10, 2010, RCNP, Osaka, Japan, Astrophysical studies by means of gamma-ray spectroscopy
3. Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Yasuo Nagashima, Yuki Tosaki, Keisuke Sueki, Toshiyuki Oki, Takahiro Amano, Hiroshi Matsumura, Kotaro Bessho, Norikazu Kinoshita, Yuki Matsushi, Progress of an accelerator mass spectrometry system at the Tsukuba 12UD Pelletron tandem accelerator, The 11th edition of the International Conference "Heavy Ion Accelerator Technology - HIAT", Venice, Italy, from 8 to 12 June 2009.
4. K. Sasa, T. Takahashi, Y. Nagashima, Y. Tosaki, K. Sueki, Y. Takaya, N. Kinoshita, T. Amano, J. Kitagawa, K. Kurozumi, M. Matsumura, H. Matsumura, K. Bessho, Y. Matsushi, Application of Cl-36 AMS to geo-environmental sciences at the University of Tsukuba, 3rd East Asian Symposium on Accelerator Mass Spectrometry (EA-AMS-3), 19th-22nd October, 2009, Xi ' an AMS Center, Xi ' an China.

5. Kimikazu Sasa, Yuki Matsushi, Yuki Tosaki, Michiko Tamari, Tsutomu Takahashi, Yasuo Nagashima, Hiroyuki Matsuzaki, Kazuho Horiuchi, Yasuyuki Shibata, Motohiro Hirabayashi and Hideaki Motoyama, C osmogenic ^{36}Cl record in an ice core at the Dome Fuji station, Antarctica from the Last Glacial Maximum to Holocene, The 2nd International Symposium on the Dome Fuji ice core and related topics, November 18-20, 2009. NIPR in Tachikawa City, Tokyo.
6. Peter Schury Status of Multi-Reflection Time-of-Flight Spectrometer for Radio-Isotopes at RIKEN 第3回日米物理学会合同核物理分科会 October 13-17, 2009, Hilton Waikoloa Village on Hawaii's Big Island, USA.
7. Tatsuya Chujo, "JCAL - Status overview" ALICE Post-QM09 Workshop on Jet and Photon Physics and High Level Trigger, LBNL, CA, USA, Apr. 6-8, 2009
8. Yasuo Miake, "To-do list towards the next collaboration meeting" ALICE Post-QM09 Workshop on Jet and Photon Physics and High Level Trigger, LBNL, CA, USA, Apr. 6-8, 2009
9. Hiroki Yokoyama, "di-jet simulation study" ALICE Post-QM09 Workshop on Jet and Photon Physics and High Level Trigger, LBNL, CA, USA, Apr. 6-8, 2009
10. Takuma Horaguchi, "Preparation for the Di-Jet Study" ALICE Post-QM09 Workshop on Jet and Photon Physics and High Level Trigger, LBNL, CA, USA, Apr. 6-8, 2009
11. Shinichi Esumi, "di-jet rate study" ALICE Post-QM09 Workshop on Jet and Photon Physics and High Level Trigger, LBNL, CA, USA, Apr. 6-8, 2009
12. Shinichi Esumi (Poster), "Trigger Angle Dependence of Near- and Away-side Jet Shape with respect to the Reaction Plane at mid-pT region with a special emphasis on Left / Right Asymmetry" Quark Matter 2009, Knoxville, TN, USA, Mar.30 -Apr.4, 2009
13. S. Esumi, "Hard - Soft Interplay at RHIC", Hawaii 2009 (JPS-DNP joint meeting), Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009
14. T. Horaguchi, "Photon Physics at LHC-ALICE", Hawaii 2009 (JPS-DNP joint meeting), Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009
15. T. Todoroki, "Reaction plane and pseudo rapidity dependence of inclusive photon - hadron $\Delta\phi - \Delta\eta$ correlation in Au+Au $\sqrt{s_{\text{NN}}}=200$ GeV collisions at RHIC-PHENIX", Hawaii 2009 (JPS-DNP joint meeting), Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009
16. T. Chujo, "Identified Charged Hadron Spectra at RHIC and Phase of QCD from PHENIX", Hawaii 2009 (JPS-DNP joint meeting), Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009
17. D. Sakata and T. Horaguchi, "Optimization of Jet Finding Algorithm in High Energy Heavy Ion Collisions with ALICE at LHC", Hawaii 2009 (JPS-DNP joint meeting), Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009
18. M. Sano, "Study of jet trigger with ALICE EMCAL for PbPb 5.5TeV", Hawaii 2009 (JPS-DNP joint meeting), Hawaii, USA, Oct. 13-17, 2009

<日本物理学会発表>

1. 池田義雅、RHIC-PHENIX 実験における J/Psi とその他ハドロンの方位角異方性の比較、日本物理学会、第64回年次大会（2009年3月27日-3月30日）、立教大学
2. 坂田洞察、LHC-ALICE 実験における back-to back ジェットの観測と再構成、日本物理学会、第64回年次大会（2009年3月27日-3月30日）、立教大学
3. 横山広樹、LHC-ALICE 実験におけるクォークジェット・グルーオンジェット識別の研究、日本物理学会、第64回年次大会（2009年3月27日-3月30日）、立教大学
4. 浜田英太郎、RHIC-PHENIX 実験 $\sqrt{s_{NN}}=200\text{GeV}$ 金+金衝突における多粒子相関の反応平面依存の研究、日本物理学会、第64回年次大会（2009年3月27日-3月30日）、立教大学

<国内学会発表>

1. 小沢顕、RI ビームの粒子識別検出器の開発平成20年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会 2009, 4/13-14, ホテルポートプラザちば、千葉市
2. Akira Ozawa、Present status for rare RI ring project in RIBF Workshop on nuclear data and its application to nuclear astrophysics 2009, 4/20、理研、和光市
3. 小沢顕、Rare RI Ring in RIBF R I B F 実験における測定器についての検討会 2009, 12/21-22、理研、和光市
4. 小沢顕、UTTAC における不安定核研究と今後第6回停止低速不安定核ビームを用いた核分光研究会 2010, 3/1-2、東京工業大学、東京都目黒区
5. 小沢顕、RI ビームの質量測定とウラン元素合成過程の解明高度制御量子ビーム応用研究創出事業 研究成果報告会 2010, 3/15、筑波大学、つくば市
6. 小沢顕、重イオン用 CDCC による不安定核からの破碎片運動量分布の解析日本物理学会 第65回年次大会 2010, 3/20-23、岡山大学、岡山市
7. 小沢顕、HCTAK を使った計算の例重イオン用 CDCC に関するワークショップ 2010, 3/31、理研、和光市
8. 森口哲朗、固体水素標的を用いた ^{11}Li の反応断面積測定原子核若手三者夏の学校 2009, 8/24-29、パノマランド木島平、長野県木島平村
9. 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, 関場 大一郎, 工藤 博, 筑波大学タンデム加速器施設の現状, 第22回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」, 筑波大学 大学会館ホール, 2009年7月16日(木)~17日(金).
10. 笹 公和, 高橋 努, 戸崎裕貴, 末木 啓介, 筑波大学 12UD タンデム加速器を用いた加速器質量分析装置による極微量放射性核種の検出, 第6回日本加速器学会年会 2009, 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所, 2009年8月5日(水)~7日(金).

11. 笹 公和, 「マルチタンデム加速器施設の学術・産業共用促進事業- 高度制御加速イオンビーム産業利用によるイノベーション創出と人材育成 -」, 先端機器共用施設ネットワーク「イノベーションつくば」ワークショップ: テーマ「つくばを元気にするネットワークと人材育成」, 平成 22 年 1 月 23 日 (土), 筑波大学会館 国際会議室, TX テクノロジー・ショーケース in つくば 2010 (第 9 回つくばテクノロジー・ショーケース) .
12. 笹 公和, 高橋 努, 戸崎裕貴, 末木 啓介, 極微量放射性核種の加速器質量分析による環境モニタリング研究, 日本原子力学会 2010 年春の年会, 茨城大学, 2010 年 3 月 26-28 日.
13. Peter Schury Multi-Reflection Time-of-Flight Mass Spectrograph at RIKEN 第 6 回停止低速不安定核ビームを用いた核分光研究会 2010, 3/1-2、東京工業大学、東京都目黒区

<科学研究費取得状況>

1. 基盤研究 (C) 課題名: 銀河系ガンマ線源 A 1-26 の天体起源の解明
代表者: 小松原 哲郎 連携研究者: 早川 岳人、静間 俊行
2009 年度 2,100,000 円 (間接経費 630,000 円)
2. 基盤研究 (B) 花崗岩深部地下水に対する流体包有物組成の影響に関する研究
代表者: 黒澤正紀、分担者: 小松原 哲郎、笹 公和、安間 了、辻村 真貴
2009 年度 1,100 千円
3. 基盤研究 (B) (2009~2012) 加速器質量分析法を用いた極微量放射性核種分析による地球環境動態研究手法の確立
代表者: 笹 公和 分担者: 末木啓介、戸崎裕貴、大木俊征、別所光太郎、松村宏
2009 年度: 8,200 千円 (間接経費 2,460 千円)
4. 基盤研究 (A) (2007~2009) アイスコア中の宇宙線生成核種による宇宙線と地球環境の変動史に関する研究
代表者: 松崎 浩之 分担者: 笹 公和、横山祐典、堀内 一穂、村松康行、柴田康行、本山秀明
2009 年度: 6,300 千円 (間接経費 1,890 千円)
筑波大学 笹 公和 分担金: 1,000 千円 (間接経費 300 千円)
5. 基盤研究 (B) (2007~2009) 富士山周辺湧水の年代測定と地下水流動系の解明
代表者: 田瀬 則雄 分担者: 辻村真貴、笹 公和、藪崎志穂
2009 年度: 1,900 千円 (間接経費 570 千円)
笹 公和 分担金: 200 千円

<外部資金取得状況>

1. 平成 20 年度「原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ」若手原子力研究プログラム「極微量放射性核種 AMS による原子力施設環境モニタリング研究」研究代表者 笹 公和
研究期間 2008-2009 年度委託経費 計 20,000 千円
2. 日本学術振興会 国際学会派遣事業 平成 21 年度 I 期採択 The 11th edition of the International Conference "Heavy Ion Accelerator Technology - HIAT, Venice, Italy, from 8 to 12 June 2009.
3. 基盤研究 (S) 課題名：ジェット識別測定によるクォーク・グルーオンプラズマ物性の研究
代表者：三明康郎 分担者：江角晋一、中條達也、稲葉基、濱垣秀樹
直接経費 23,600,000 間接経費 7,080,000 30,680,000
4. 特別推進研究課題名：クォーク物質創成とフォトン物理
代表者：杉立徹 分担者：志垣賢太、本間謙輔、三明康郎、濱垣秀樹、稲葉基
直接経費 2,000,000

<研究会開催>

1. 第 22 回「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」、
H21 年 7 月 16 日(木)～17 日(金)
筑波大学 大学会館ホール
2. The 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium,
from November 9(Mon) to November 13(Fri), 2009,
University of Tsukuba, Ibaraki, Japan