

## VI. 原子核実験グループ

教授 小沢顕、三明康郎  
准教授 新井一郎、江角晋一、笹公和  
講師 小松原 哲郎、中條達也  
助教 長江大輔、益井宙  
技官 加藤純雄  
大学院生 石橋陽子 (D3)、佐野 正人 (D3)、轟木貴人 (D3)、新井田貴文 (D3)、  
Jihyun Bhom (D3)、阿部康志 (D2)、福岡翔太 (D2)、水野三四郎 (D2)、  
木村創大 (D1)、中込宇宙 (D1)、渡邊大介 (D1)、稲葉成紀 (M2)、  
大島一軌 (M2)、大西貴博 (M2)、岡田俊祐 (M2)、尾崎瞳 (M2)、  
木原宏一 (M2)、小林大洋 (M2)、斎藤佑多 (M2)、田中直斗 (M2)、  
向井もも (M2)、新井郁也 (M1)、泉 大希 (M1)、佐藤 航 (M1)、  
沢畑克樹 (M1)、野中俊宏 (M1)、細川律也 (M1)、渡部隼士 (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、長江大輔)

#### (1-1) 稀少 RI リングプロジェクトの現状

平成 16 年 4 月以来、理化学研究所の 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 (Rare-RI Ring)[1] の R&D を行ってきた。稀少 RI リングは、RIBF 棟の K4 室に設置される。理化学研究所の予算により、平成 24 年 4 月より稀少 RI リングの製作が始まった。平成 25 年度は、磁石と電源の配線を完了し、制御系整備、通水試験、各種磁石の励磁等を行った。真空排気系の整備を進め、真空排気を始めた。さらに、入射ラインとして使用する SHARAQ スペクトロメーターとの接続部分を整備し、SHARAQ 室内に二つの Q 磁石を設置した。キッカー磁石と電源の製作と設置も行ったが、予算不足のために、キッカー磁石の最大 rigidity は、2 Tm にとどまっている。キッカー磁石は、一つの磁石で入射と出射を行うが、電源の制約のために、入射と出射の間隔は約 1 ms、レートは最大で約 1 Hz である。平成 26 年度以降の予算により、最大 rigidity の 6 Tm へと整備して行く予定である。Schottky-probe の製作、設置を行い、probe の基本性能を確認した。蓄積リング内のビームモニター検出器 (スクリーンモニター、フォイル検出器) の製作を行った。平成 25 年度の後半より、 $\alpha$  線及び 250 MeV 陽子 ( $\sim 2$  Tm) の蓄積実験 (マシンスタディ) のための整備を始めた。 $\alpha$  線を蓄積リング内で 1 周させ、この飛行時間を測定するために、ミラー電場を用いたフォイル検出器 (飛行時間のスタート) を整備し、各直線部分に、モニター用のプラスチックシンチレータを設置した。平行して、セクター磁石のメイン磁場及び等時性磁場を生成するためのトリムコイルの制御系の整備を行った。真空系及び、磁場の調整等は、計測室からリモートで行うことができるようになった。250 MeV 陽子測定のための検出器等を整備し、 $\alpha$  線による等時性磁場のチェックの後、平成 26 年 6 月には、陽子の蓄積実験を行う予定である。

#### (1-2) 飛行時間検出器の開発

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。飛行時間のスター

トシグナルを供給する検出器（軽粒子用と重粒子用）の開発を進めている。加えてリング内に入射した RI ビームの周回数を測定する検出器の開発も進行中である。スタート検出器に求められるのは i) 100 ps 以下の時間分解能、ii) ビームの通過におけるエネルギー損失、エネルギー広がりが小さいこと、iii) 検出器通過前後でビームの電荷状態が変化しないこと、iv) 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 (100 mm×50 mm) を有しなくてはならない。軽粒子用として厚さ 0.1 mm のプラスチックシンチレーター (100 mm×50 mm) を利用した検出器の開発を昨年度より開始し、放射線医学総合研究所の HIMAC において 200 A MeV の Kr ビームにて性能評価を行った。得られた時間分解能は  $\sigma \sim 60$  ps であり、十分な時間分解能が得られている。その他の要請も全て満たす事ができており、稀少 RI リングヘインストールする実機製作を進めている。重粒子用のスタート検出器として炭素薄膜と Micro Channel Plate(MCP) で構成され、ビームが炭素薄膜を通過する際に放出される電子を電磁場中で制御し、MCP に導く方式 [5] の検出器の開発を行っている。この方式では放出される電子は放出位置、放出角度、初期エネルギーによらず等時性を持って MCP に到達する。これまでに  $\alpha$  線源、200 ~ 300 A MeV の重粒子ビームを用いて時間分解能の測定、等時性の測定を行った。今年度は電場勾配一様性の改善を目的として MCP 位置の調整を行った。また磁場均一度向上を目的として補正コイル設置し、時間分解能、等時性の測定を HIMAC における重粒子ビーム、 $\alpha$  線源を用いて行った。補正コイルによって磁場の非一様性は 6.0% から 2.5% に向上した。MCP 位置の調整前後で時間分解能は 4% 向上した。補正コイルの有無により等時性は 1 ns から 100 ps 程度に改善した。性能の向上は見られたが、必要な性能にはまだ達していない。今後は印加電場の増強により時間分解能向上を目指す。

周回数測定用検出器に求められるのは時間分解能 ( $\sigma \sim 1$  ns) 以外、スタート検出器と同様である。この検出器の原理の大部分は重粒子用スタート検出器と同様であり、炭素薄膜から放出される電子を MCP へ導くものであるが、電子を制御するのが電場のみであるところに違いがある。昨年度は試作器の製作、性能評価を行い、時間分解能としては  $\sigma \sim 340$  ps、検出効率としては約 75% が得られ、周回数測定検出器として十分な性能を持っていることが示された。但し同様の原理に基づく他の検出器の時間分解能 ( $\sigma \approx 65 \sim 170$  ps) を大きく下回っている [6, 7]。そこで時間分解能の向上を目指し、ジオメトリ等に改良を加えた。HIMAC における重粒子ビームを用いた性能評価により、時間分解能としては  $\sigma \sim 130$  ps、検出効率としては約 70% が得られた。時間分解能の向上は見られたが、検出効率はいまだ低い値である為、依然として改良の余地があるものと考えられる。

### (1-3) 核モーメントの符号決定手法の開発

磁気双極子モーメントの符号を実験的に決定できる  $\beta$ -NMR 法の開発を進めている。NMR に寄与するのは回転磁場であるが、従来の  $\beta$ -NMR 法では右回転、左回転の磁場を足し合わせた振動磁場を印加しており、どちらの回転磁場が NMR に寄与したか判別出来ない。その為、得られる磁気双極子モーメントは符号を決定することが出来ず、その絶対値のみとなる。符号を決定するためには、回転磁場が必要である。右回り、あるいは左回りの回転磁場を作用させ、どちらの回転磁場で NMR が起こるかを観測できれば、静磁場の方向から磁気双極子モーメントの符号を決定できる。これまでに回転磁場生成システムの構築、回転磁場の検出を行い、回転磁場による  $\pi/2$  パルス NMR による陽子 (水試料) の磁気モーメントの符号 (正) の測定を行った。大きな振幅の自由誘導減衰が得られた回転磁場の方向と印加している静磁場の方向から陽子の磁気モーメントの符号 "正" が確認できた。

平成 25 年度は  $\beta$ -NMR 法による符号決定検証の為、磁気双極子モーメントの値およびその符号が既知の不安定原子核  $^{20}\text{F}$  (符号: 正) を用いての原理実証実験を大阪大学、核物理研究センターにて行った。 $\beta$ -NMR 法を適用するに必要な核スピン偏極した  $^{20}\text{F}$  は偏極重陽子ビームと  $\text{CaF}_2$  を用いたスピン偏極移行反応により生成した。核スピン偏極  $^{20}\text{F}$  に対し右回り、左回りの回転磁場を作用させ、大

きな NMR 信号が得られた回転方向と静磁場の方向から符号”正”が確かめられた。これによって回転磁場による  $\beta$ -NMR 法によって磁気双極子モーメントの符号測定が可能であることが示された。今後はより高偏向な回転磁場の生成を行い、核構造の観点から興味深い陽子過剰 P 同位体 ( $^{28}\text{P}$  等) の磁気双極子モーメントの値およびその符号測定へと進む予定である。

#### (1-4) 理研での核モーメント測定

安定線から離れた中性子過剰核では、安定核では見られなかった異常核構造が次々と見つかりつつある。例えば  $^{32}\text{Mg}$  周辺では従来の魔法数  $N = 20$  が変形の効果によってその魔法性を失うことが知られているが、最近、同様の現象が  $N = 28$  でも起こっているとの指摘が、理論・実験両面からなされている。また、 $N = 28$  近傍の  $^{43}\text{S}$  では、変形共存現象など新規な現象も予測されていて、その核構造の調査が求められている。そこで本研究では、 $N = 28$  近傍領域における異常な核構造の発現機構を微視的立場から調べるために、中性子過剰核  $^{41}\text{S}$ 、 $^{43}\text{S}$  核の基底状態の系統的な核電磁気モーメント測定の第一段階として、 $^{41}\text{S}$  の偏極生成実験および磁気モーメント測定実験を行った。理研 RIPS で核破碎反応を利用して生成した [2] 偏極不安定核  $^{41}\text{S}$  の AP 値を AFR 法 [3] を用いて測定した。今回の実験では CaS、ZnS、Si の 3 種類の結晶を用意した。そこで停止試料ごとに AP 値を測定し、停止試料ごとの AP 値を図 1 に示した。これらの結果から停止試料が CaS では、 $AP = 0.14(4)\%$  という結果を得ることができたが、ZnS、Si 結晶を用いた場合では統計が足りず、有意な偏極度を得ることができなかった。また  $\beta$ -NMR 法 [4] を用いた磁気モーメントのサーチも行ったが統計が足りずに、磁気モーメントの値を決定するには至らなかった。今回  $^{41}\text{S}$  が偏極していることは確認出来たが偏極度が小さいこともあり、今後は生成標的や停止試料の選別や運動量や角度を最適化することで磁気モーメントの決定を目指す。

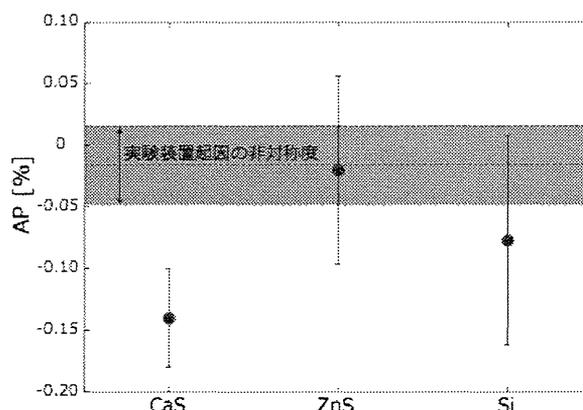


図 1: 各停止試料毎の AP 値の測定結果

#### (1-5) 固体水素標的を用いた陽子ドリップライン近傍核の高効率な生成手法の開発と $^{36}\text{Ar}$ , $^{33}\text{Cl}$ の荷電変換断面積測定による荷電核半径の導出

陽子ドリップライン近傍核は従来、入射核破碎反応により生成されてきたが、安定核から離れるにつれ生成断面積が急激に減少するため、特に重い領域では生成は困難である。陽子ドリップライン近傍核の新しい生成手法として、入射核破碎反応と固体水素標的 (SHT) [8] による  $(p, n)$  反応を組み合わせることを提案し、 $^{36,35,34}\text{K}$  の生成を目標とした実験を放射線医学総合研究所の HIMAC で平成 25 年 7 月に行った。1 次ビームには 400 MeV/u の  $^{36}\text{Ar}$  を用い、2 段階生成として

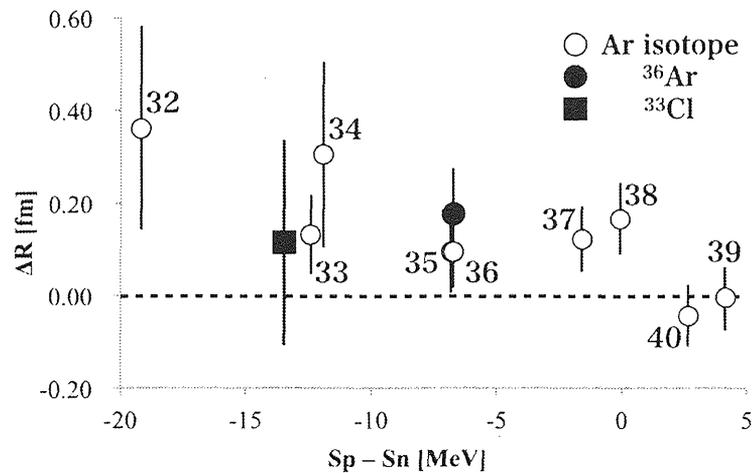


図 2:  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{33}\text{Cl}$  の陽子スキンの厚さと分離エネルギーの関係

$^{36}\text{Ar} + \text{Be} \rightarrow ^{36,35,34}\text{Ar} + \text{p} \rightarrow ^{36,35,34}\text{K}$  反応による生成を試み、2次標的 SHT での K 同位体の生成断面積  $\sigma_{(p,n)}$  の測定を行った。また、2次標的として炭素標的を使用し、 $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{33}\text{Cl}$  の荷電変換断面積  $\sigma_{cc}$  の測定により荷電核半径の導出を行った。測定された結果から、生成目標であった  $^{36,35}\text{K}$  については入射核破碎反応を用いて一次ビームから直接生成する方が効率的であることが示唆された。 $^{34}\text{K}$  は非束縛核とされており [9]、 $^{34}\text{Ar}$  の  $\sigma_{(p,n)}$  については、現在も解析を進めている。また、グラウバーモデル計算により、 $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{33}\text{Cl}$  の  $\sigma_{cc}$  から荷電核半径を導出した。 $^{36}\text{Ar}$  については先行研究と誤差の範囲で一致する結果を得た。既知の平均二乗根質量半径  $r_m$  [10] を用い、平均二乗根陽子半径  $r_p$ 、平均二乗根中性子半径  $r_n$  を導出した。 $r_p$  と  $r_n$  の差が陽子スキン ( $\Delta R \equiv r_p - r_n$ ) を与える。スキンの厚さは、陽子分離エネルギー  $S_p$  と中性子分離エネルギー  $S_n$  の差と相関することが知られている。図 2 の黒塗りの点为本研究で導出したものである。今回の結果は Ar 同位体で見いだされた相関と矛盾しないことがわかった。

#### (1-6) KISS の開発状況

KISS[11] のオンライン試験結果：平成 25 年 9 月のオンライン試験では鉄ビームを用いてガスセルの性能試験を行った。この試験ではガスセル内に鉄ビームを停止・中性化させ、レーザーによって再イオン化した鉄イオンを引き出した。引出効率(質量数 A と原子番号 Z を選択した鉄イオンの数/入射ビームの量)は 0.25%、選択度(レーザー ON/OFF での A=56 のイオン数の比)は 100 であった。この結果は期待される性能には及ばないが N=126 近傍核の  $\beta$  崩壊の寿命測定が可能な値である。平成 25 年 12 月のオンライン試験では、本実験 ( $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$ ) の反応系に近い  $^{124}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$  による弾性散乱  $^{198}\text{Pt}$  の引出効率測定、多核子移行反応生成物である  $^{196}\text{Ir}$  の寿命および遅延  $\gamma$  線測定を目指した。結果、ビーム強度に依らず  $^{198}\text{PtAr}_2$  の引出効率 0.15% を得た。高電圧系のトラブルにより  $^{124}\text{Xe}$  ビーム強度を上げられず、 $^{196}\text{Ir}$  の収量が少なかったため、 $^{196}\text{Ir}$  が起源の遅延  $\gamma$  線は見いだせず、寿命測定も出来なかった。また、予想よりも低いイオン化効率の原因を探るため、低励起状態にある  $^{198}\text{Pt}$  原子数の測定を行ったが、低励起状態にある原子数はバックグラウンドレベルだった。次に、引出効率が鉄の場合よりも小さくなった原因の一つとして、鉄の場合と異なり、 $^{198}\text{Pt}$  のガスセル内停止領域が標的の表面に集中するため、標的抑え等によりアルゴンガス流れが停滞し  $^{198}\text{Pt}$  原子のガス輸送が阻害されていた可能性が考えられる。そこでガスセル中のガス圧を変えて  $^{198}\text{PtAr}_2$  イオンの引

出時間測定を行い、上記予測を一部裏付ける結果を得た。オフラインでの Ir フィラメントを使った  $^{193}\text{Ir}$  イオンの引出試験で得られた Ir の化合物イオンの形成比と、オンライン試験で得られた Pt の化合物イオンの形成比の比較から、分子形成に化学的な性質が大きく関与していることが示唆された。

KISS のための高融点元素の二段階レーザー共鳴イオン化経路探索：KISS 計画で  $\beta$  崩壊核分光を予定している Ta(Z=73)、W(Z=74)、Re(Z=75)、Os(Z=76)、Ir(Z=77)、Pt(Z=78) の励起状態はこれまでに良く調べられているが、自動イオン化状態 (AIS) についてはほとんど研究されていない。そのため、これらの元素の自動イオン化状態を探索し、高効率な二段階レーザー共鳴イオン化の経路を確立する必要がある。はじめに真空中での AIS を探索するため、KISS とは独立にイオン化経路探索を恒常的に行える実験装置を設計、製作した。この装置では各元素のフィラメントから放出された中性原子をイオン化し、電場で加速分離した後、チャンネルトロンで検出する。実験では、Ta、W、Re、Ir について、励起状態から AIS までの波長  $\lambda_2$  を走査して 5 個以上の AIS を新たに発見し、二段階レーザー共鳴イオン化経路を決めた。また、各元素について比較的イオン化効率の高い数個の AIS を経由する遷移の光子吸収断面積を導出し、その結果を元に真空中でのイオン化効率を求めた。光子吸収断面積は、発見した AIS を用いたイオン化経路でのイオン数のレーザー強度依存性の測定結果と、各原子状態の存在率と遷移確率を考慮したレート方程式から得られるイオン数のレーザー強度依存性とを比較することから得た。KISS ではガス中でイオン化するため、原子状態の吸収幅の広がりやレーザーの線幅、原子がガスセル中で基底状態の中性原子として存在する確率等を考慮すると、30%以上のガス中でのイオン化効率が必要となる。本実験で得られた真空中でのイオン化効率からガス中でのイオン化効率を見積もると、Ta、W で 1%以下、Re、Ir で 7%程度となった。一部の元素については  $\beta$  崩壊の寿命測定に本実験で開拓したイオン化経路を利用できるが、効率良く寿命測定を行うためには、更に条件の良い AIS を探索しイオン化経路を決める必要がある。

(1-7) $^{45}\text{Sc}+p$  反応における宇宙元素合成の研究

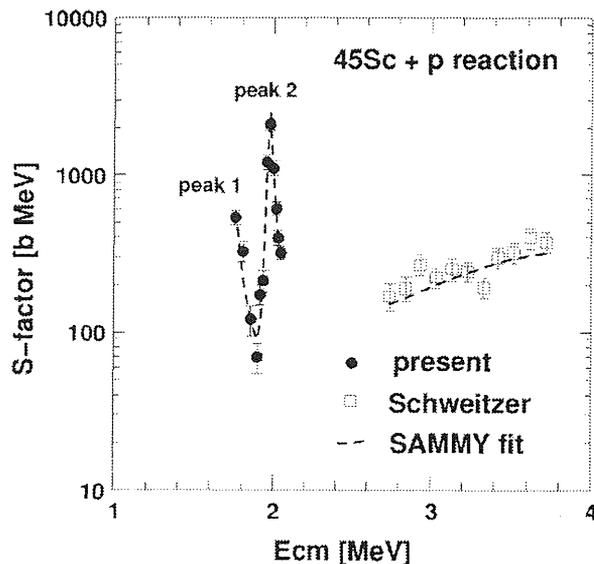


図 3:  $^{45}\text{Sc}(\alpha, p)^{42}\text{Ca}$  反応の astrophysical S-factor のエネルギー依存性。黒丸が今回の実験値。四角は先行研究の結果 [12]。点線は SAMMY によるフィッティング結果。

平成 24 年度に引き続き、恒星内の元素合成過程の一つである silicon burning において bottleneck

として知られている  $^{45}\text{Sc}$  周辺の反応のうち、 $^{42}\text{Ca}(p, \alpha)^{45}\text{Sc}$  の反応率の評価のためにその逆反応である  $^{45}\text{Sc}(\alpha, p)^{42}\text{Ca}$  反応について研究を行った。平成 25 年度は  $^{45}\text{Sc}(\alpha, p)^{42}\text{Ca}$  反応の微分断面積及び角分布を測定し、結果として Gamow peak に相当するエネルギー領域において resonance を観測した (図 3 参照)。次に、観測された resonance を R-matrix code SAMMY を用いて解析した結果、2 つの resonance を含んでいることがわかり、それぞれ  $E_R=1.693\text{MeV}(1^-)$ 、 $1.970\text{MeV}(0^+)$  となった。さらに、Q-value をふまえて複合核  $^{46}\text{Ti}$  の励起準位と比較すると、 $12.46\text{MeV}(0^+)$  近くに準位が存在し、これが  $E_R=1.970\text{MeV}(0^+)$  に相当していると考えられる。一方、 $E_R=1.693\text{MeV}(1^-)$  については対応する準位が見られない。ただし、この resonance はピークの形がはっきりと観測されていないので、まだ  $E_R$  および  $J^\pi$  については断定できない。また、反応率を解析で得られた共鳴幅  $\Gamma$  から計算すると、 $E_R=1.970\text{MeV}(0^+)$  については過去の計算値と一致しており、ほとんど影響しない。 $E_R=1.693\text{MeV}(1^-)$  では計算値より一桁ほど大きくなった。ただ、この resonance を温度に直すと  $T=2.5\text{GK}$  程度で silicon burning 中の温度より低いためあまり影響しない。さらに、前述のようにこの resonance については不定性が大きいため、 $E_R$  および  $J^\pi$  が変化すると共鳴幅  $\Gamma$  も変化し、反応率も今回の結果と変わってしまうことが考えられる。今後、 $E_p=1.8\text{MeV}$  以下の領域の測定および角度分布の測定を行い、 $E_R=1.693\text{MeV}(1^-)$  の resonance が複合核のどの準位に相当するのか調べ、反応率への影響も確定したい。さらに、 $E_p=2\text{MeV}$  以上での測定も行い、先行研究 [12] と一致するか確かめる必要がある。

#### (1-8) 高エネルギーガスキャッチャーのためのイオンサーフィン型 RF カーペットの性能評価

イオントラップを用いた精密実験では、高速の RI ビームはガスセル内で減速・停止し、その後低速のイオンビームとして引き出されて使われる。高圧のガスセルからイオンを高速かつ高効率に引き出すためには電場による力が必要になる。そのための手法として RF カーペット (RFC) が広く用いられてきた [13, 14]。RFC は不均一高周波電場によるイオンバリアによって、ガスセル中で熱化されたイオンをガスセルの内壁で失うことなく引き出す。従来、この RFC の表面における出口穴までの輸送速度は、高周波に重畳させた静電位の勾配を用いていた。そのため、大型のガスセルから高速に引き出すには高電圧が必要となり、放電限界などの問題によって制限がかかっていた。この問題を解決する新しい手法として、『イオンサーフィン法』が提案された [15, 16]。イオンサーフィン法では静電位勾配の代わりに進行波を用いてイオンを輸送する。イオンバリアを形成する高周波電圧に、隣り合う電極間で位相が 90 度ずつずれた可聴周波電圧を重畳させることで、イオンバリア上に進行波が形成され、その進行波にまるで“波乗り”しているようにイオンが輸送される。この手法は直線型の RFC を用いて実験的に確認されている [15, 16]。しかし、実際のガスセルに RFC を適用することを考えると、最後は小さいノズル穴を通してガスセルから高真空側へイオンを引き出すことが必要になる。そこでイオンサーフィン法を同心円型の RFC に適用し、イオンの引き出し効率  $\varepsilon_{\text{ext}}$  を測定した。結果、最大 100% の輸送・引き出し効率を得ることができた [17]。次に、He ガス圧 60 mbar から 300 mbar までの広いガス圧範囲における特性を評価した。測定は  $\text{K}^+$  と  $\text{Cs}^+$  のイオンについて行い、質量の依存性を評価した。その結果からより、ガス圧が大きくなると、効率が下がる傾向が見られ、イオンの質量が重い方が有利に輸送できることも実験的に確認した。ガス圧の増大による効率の低下は、ガス衝突によるイオンの運動の減衰が大きくなるため、相対的にイオンバリアが小さくなることに起因する。また、イオンの質量が重いと不均一高周波電場によるイオンバリアが強くなるという理論的予測 [16] を裏付けることができた。今後は、実際の加速器実験で使用する 1.5 m 長のガスセルにイオンサーフィン型 RFC を適用し、そのガスセルのテストを行っていく。

#### (1-9) 福島第一原発事故により放出された $^{129}\text{I}$ の分布と $^{131}\text{I}/^{129}\text{I}$ 比の評価

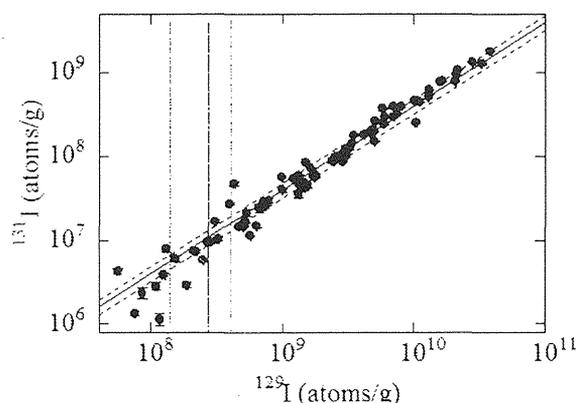


図 4: 福島県内の表層土壌中の  $^{129}\text{I}$  と  $^{131}\text{I}$  の相関関係 (2011 年 3 月 11 日換算) で、実線は  $^{131}\text{I}/^{129}\text{I}$  比の重み付き平均であり、点線は  $1\sigma$  の誤差を示す。

福島第一原発事故により、核分裂生成の放射性核種が大量に放出された。しかし、 $^{131}\text{I}$  の半減期が約 8 日と短い為に、被ばく線量評価を実施する為の詳細データの入手が既に困難となっている。そこで、半減期約 1,570 万年の  $^{129}\text{I}$  を  $^{131}\text{I}$  の輸送及び降下・沈着量の推定に利用することが考えられる。本研究では、福島県内の表層土壌中の  $^{129}\text{I}$  を加速器質量分析法 (AMS) で測定し、陸域環境での  $^{129}\text{I}$  分布状況と  $^{131}\text{I}/^{129}\text{I}$  比の関係を調査した。筑波大学において  $^{131}\text{I}$  を測定した表層土壌 (表面深さ 5 cm まで)[18] について、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  同位体比を東京大学 MALT の AMS[19] により測定した。安定ヨウ素である  $^{127}\text{I}$  は ICP-MS を用いて測定を行い、 $^{129}\text{I}$  濃度を算出した。事故時の炉内放射能比は ORIGEN2.2 コード [20] により推定されており、各炉内の  $^{131}\text{I}/^{129}\text{I}$  原子数比の計算結果は、 $3.18 \times 10^{-2}$  (1号機)、 $4.57 \times 10^{-2}$  (2号機)、 $4.81 \times 10^{-2}$  (3号機) である。福島第一原発事故後における表層土壌中の単位重量当たりの  $^{131}\text{I}/^{129}\text{I}$  原子数比は、実測値として  $(4.02 \pm 0.81) \times 10^{-2}$  (2011 年 3 月 11 日換算) となり、ORIGEN2.2 コードによる計算値と矛盾しない結果となった (図 4)。

#### (1-10)6 MV タンデム加速器システムの導入

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門 (UTTAC) では、震災復興計画により 6 MV タンデム加速器の導入準備を進めている。加速器本体は、2014 年 1 月に米国 National Electrostatics Corp. において加速電圧試験を実施し、6 MV の加速電圧を達成した。筑波大学には、2014 年 3 月 6 日に加速器本体が搬入され、現在、据付・調整とビームラインの組み立て作業を実施している。2014 年 8 月には、ビーム加速調整試験が行われる予定である。なお、ビーム利用実験の共用開始は 2014 年 10 月を予定している。加速器導入に併せて施設改修工事を実施しており、全長 8.8 m、直径 2.7m の加速器本体を室内に導入するために、加速器室搬入口の拡張工事が行われた。その他、加速器室空調設備の更新、制御室の改修工事、SF6 貯蔵タンク設置等を行っている。また、偏極イオン源実験棟が新たに建設され、施設 9 階に設置されていたラムシフト型偏極イオン源を移設した。図 5 に加速器室に搬入された 6 MV タンデム加速器の写真を示す。

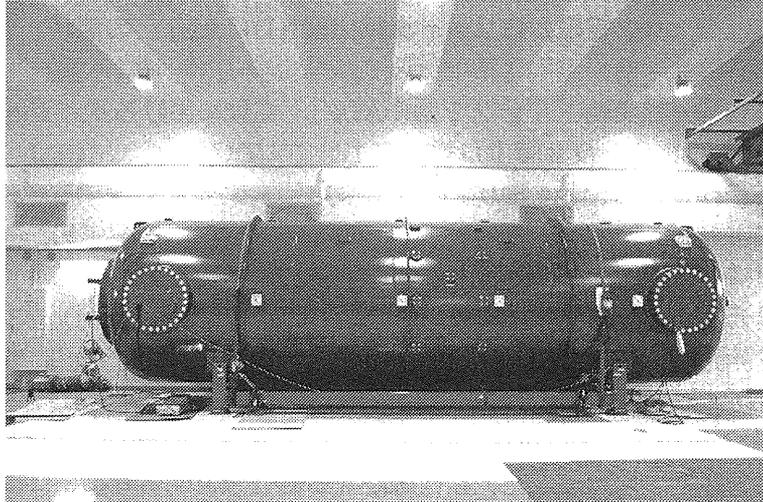


図 5: 応用加速器部門に搬入された 6 MV タンデム加速器本体の写真。

## 【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、益井宙、加藤純雄)

### (2-1) ALICE ダイジェット電磁カロリメータ検出器 (DCAL) の現状

筑波大学高エネルギー原子核実験グループでは、ALICE 実験におけるダイジェット電磁カロリメータ検出器 (DCAL) の建設を 2008 年より推進している。DCAL の設置により、LHC 加速器での重イオン衝突で生成されるダイジェットの直接測定や光子・ジェット、ハドロン-ジェット相関測定が可能となる。それによりクォーク・グルーオンプラズマ (QGP) 物性、特に QGP 中でのパートンのエネルギー損失機構や、ジェット通過による媒質応答を調べることができる。現在 DCAL は、2015 年初頭の物理データ取得を目前に控え、建設の最終段階にある。2013 年度では以下の活動を行った。まず、大学院生 2 名を CERN 研究所に 2 ヶ月間派遣し、DCAL に用いる新規の読み出し系 (SRU, Scaleable Readout Unit) の動作確認を行った (4 月～6 月)。その後、大学院生 5 名、スタッフ 1 名により、全 DCAL スーパーモジュールへのフロントエンド読み出しボード (FEE)、トリガーボード (TRU) のインストールと、動作確認を行った (9 月) (図 6)。また今年度は DCAL のトリガー系構築にも着手した。ユバスキラ大学 (フィンランド) と共同で、DCAL 用のジェット、光子トリガーの構築を行った (大学院生 1 名、スタッフ 1 名)。現段階で、約半数の DCAL モジュールのインストールが完了しており、残り半数は 2014 年 11 月にインストールが予定されている。インストール後、読み出し系とトリガー系の最終チェックを行い、2015 年 1 月の最初の物理ランに備える。

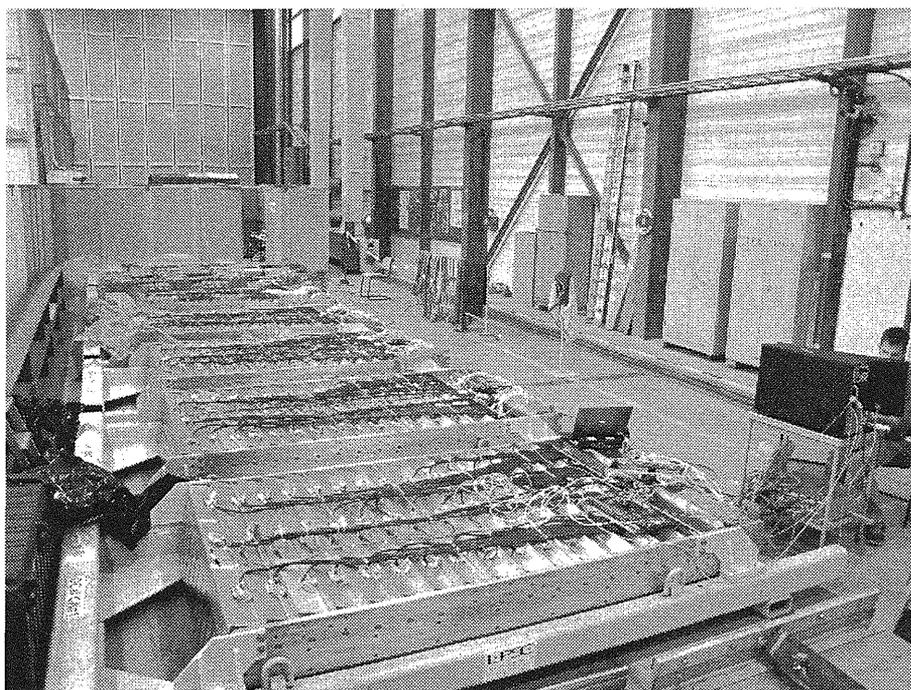


図 6: インストール前の ALICE DCAL 検出器 (2013 年 9 月撮影、CERN 研究所 P2)

## (2-2) 高時間分解能飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber の開発, Fermilab Test Beam Facility におけるテストビーム実験

高エネルギー原子核衝突において、発生する多数の粒子の同定は非常に重要である。特に QGP の性質解明の鍵となるハドロン、特に  $\pi$  中間子、K 中間子、陽子等を高い運動両領域まで同定するためには、高い時間分解能を持った飛行時間測定器 (TOF: Time Of Flight) が必要となる。以前は TOF 検出器として光電子増倍管を用いたシンチレーションカウンターが使われていたが、近年では小型で安価な Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) が広く使われるようになってきた。小型の MRPC は衝突点近くに設置することができ、より衝突初期の物理現象に迫れる一方、MRPC に要求される時間分解能も高くなる。

印加電圧を上げることなく時間分解能を向上させるためには、MRPC を何段か重ねて信号をまとめて読み出すという手段が有効とされ、4 段型 (24 ギャップ) で 20 ピコ秒の時間分解能を達成したという報告もある [21]。本研究室では昨年度 4 段型の MRPC を製作し (図 7)、宇宙線テストによって 50~70 ピコ秒の時間分解能を持つことが確認された。

4 段型の MRPC の性能評価を行うために、2014 年 2 月、フェルミ国立加速器研究所において、120 GeV の陽子を使ったテストビーム実験を行った。図 8 は時間分解能の印加電圧依存性である。横軸が 1 段あたりの基板間に印加する電圧 [kV]、縦軸が時間分解能 [ps] で、色の違いはガスの種類の違いである。これによれば、時間分解能は 100 ピコ秒ほどであり、さらに電圧依存性が見えていないことが分かる。MRPC のシグナルの立ち上がり時間も宇宙線テストの時と比べて遅くなっており、長いテールを引く形となってしまった。残念ながらこの問題はビームテスト期間中に解決することができなかった。

しかし帰国後の調査により、MRPC を構成する高抵抗ガラスの一部が破損していることが判明した。高電圧線をガラスと基板の間に圧着していることによりその部分に厚みができてしまい、また少ない段数のものと比べてガラスにかかる重みが大きいため、その厚みの部分から割れてしまったと考えられる。まずは MRPC の製作方法から改善を計り、引き続き 20 ピコ秒、更には 10 ピコ秒の時間分解能を目指して実験を行う。

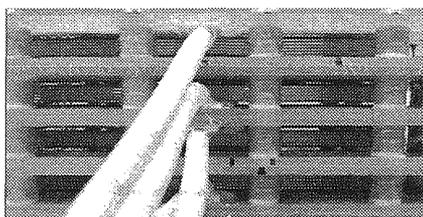


図 7: 4 段型 MRPC

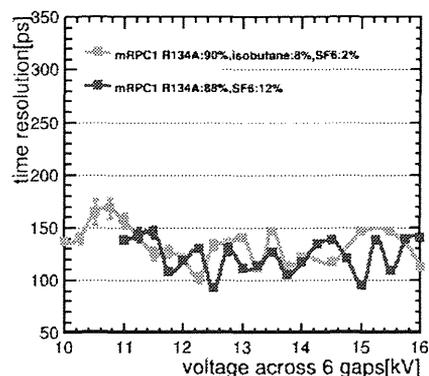


図 8: 時間分解能の印加電圧依存性

### (2-3) LHC-ALICE 実験における $\sqrt{s} = 7$ TeV 陽子・陽子衝突での中性パイ中間子と荷電粒子ジェットの方角相関の研究

ジェット測定は高エネルギー原子核衝突によって生成される高温高密度物質 (QGP) の性質を調べる上で有用なプローブとなる。ジェットが QGP 中を通過する際に失うエネルギーを測定することによって、パートンの QGP 中のエネルギー損失機構を解明することにつながり、さらにそこから QGP の密度や温度などの物理量の導出が期待できる。

高運動量のハドロンをトリガーとして選んだ場合、 $180^\circ$  反対方向に生成されるジェットの QGP 中での通過距離を長くすることができる。上で述べたように、粒子は QGP 中を通過する際にエネルギー損失を起こすので、高運動量のハドロンは QGP との相互作用をほとんど受けていない可能性が高く、このことは QGP の表面付近で生成されていることを示している。よってトリガーとなるハドロンの運動量を変えることによって、ジェットの QGP 中での通過距離をコントロールすることができる。

スイスのジュネーブにある欧州原子核研究機構 (CERN) で、2010 年から LHC 加速器の運用が始まった。LHC 加速器に付随している 4 つの実験のうちの ALICE 実験で 2011 年に取られた重心系  $\sqrt{s} = 7$  TeV 陽子・陽子衝突実験データを使い、中性パイ中間子と荷電粒子ジェットの方角相関についての研究を行った。中性パイ中間子の再構成には電磁カロリメータ検出器 (EMCal)、荷電粒子ジェットの再構成にはシリコン検出器 (ITS) とタイムプロジェクトンチェンバー検出器 (TPC) を用いて行った。

本研究では高運動量の中性パイ中間子を再構成する必要がある。中性パイ中間子の運動量が高くなるにつれて 2 つの崩壊光子の崩壊角は小さくなり、EMCal 上の 2 つの電磁シャワーは重なってしまう。従来の不変質量再構成の方法では重なった電磁シャワーからうまく中性パイ中間子が再構成できない。本研究では 2 つの重なった電磁シャワーの形を楕円形と仮定してその長軸方向の長さを使い中性パイ中間子を再構成した。この方法を使うことによって 40 GeV までの中性パイ中間子の再構成をすることができた。

図 9 は中性パイ中間子と荷電粒子ジェットの方角相関を示している。トリガーの中性パイ中間子の運動量領域は、 $8 < p_{T,\pi^0}^{trig} < 12$  (GeV/c)、 $16 < p_{T,\pi^0}^{trig} < 20$  (GeV/c)、 $24 < p_{T,\pi^0}^{trig} < 36$  (GeV/c) である。トリガーである中性パイ中間子の運動量が高くなるにつれて near side と away side のピークが上昇している。このことは高運動量の粒子になるほど、ジェットとの相関を持っていることを示しており、また中性パイ中間子がトリガーとなるハドロンに適していることを示している。この結果を参照データとして、今後重イオン衝突実験の解析を進めて行き、ジェットの QGP 中でのエネルギー損失機構の通過距離依存性について研究を進めて行く。

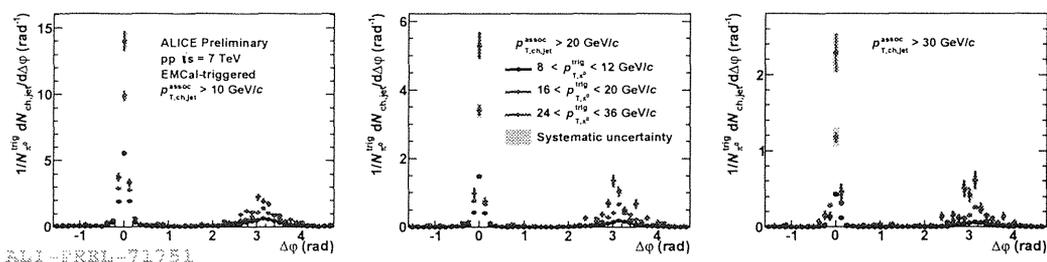


図 9: 中性パイ中間子と荷電粒子ジェットの方角相関 ( $\sqrt{s} = 7$  TeV 陽子・陽子衝突)

#### (2-4) 量子統計干渉効果を用いた重イオン衝突における時空発展の研究

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の PHENIX 実験では、相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC) を用いた重イオン衝突実験により、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の物性研究が進められている。重イオン衝突では、QGP 生成後すぐに流体的な膨張が起り、ハドロン物質へと転移する。ハドロン最終放出時 (終状態) における粒子の密度分布は、膨張の強さや膨張時間、QGP の粘性、初期状態に強く依存すると考えられ、終状態における粒子の密度分布を詳細に調べることは上記物理情報への有用なプローブである。また近年、初期状態における核子密度分布の揺らぎが起因となり、終状態における放出分布に高次の方位角異方性があることが報告された [36]。これは、衝突イベント毎に核子が楕円的 (2次) または三角形的 (3次) 密度分布をしているためと考えられ、その後の系の膨張に伴い、密度分布の高次成分が終状態に至るまでにどのように変化しているかを調べることは興味深い研究である。

本研究では、 $\pi$  中間子対に働く量子統計干渉効果 (HBT) を用いて、衝突終状態における系の空間的分布の広がりや形状の詳細測定を行った [23, 24]。特に、高次方位角異方性の軸 (イベント平面) を基準とした初めての HBT 測定を行った。図 10 は、HBT の 3次元解析で得られた粒子放出領域の大きさ (HBT 半径) を 2次および3次のイベント平面に対して測定した結果である。両次数において、HBT 半径のイベント平面依存性、すなわち  $\cos$  および  $\sin$  関数的振幅が観測された。2次の結果については、STAR 実験で測定された結果と一致しており、衝突初期における系の楕円形状が短軸方向への強い膨張によって円に近づいているが、反転はしていないことを示唆している。3次の結果については、理論モデルおよびモンテカルロシミュレーションとの比較をすることで、観測された振幅は三角形的膨張 (3次の方位角異方性) が支配的であることがわかった。さらに2次の場合とは異なり、系の三角形形状が終状態では反転している可能性を示唆する非常に興味深い結果も得られている。これらの結果は、次数によって膨張への応答が異なるということを示しており、QGP の時空発展を記述する理論モデルへの有用な情報になり得ると期待される。

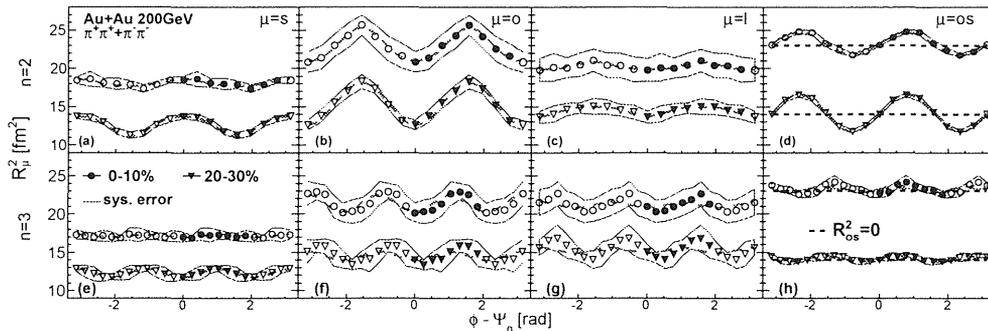


図 10:  $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$  金原子核衝突における HBT 半径の 2次および3次のイベント平面依存性

#### (2-5) 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

高エネルギー重イオン衝突初期において生成された QGP 媒体は系の膨張と共に冷え、QGP-ハドロン相転移の後に粒子を放出すると考えられる。ここで非中心衝突時の初期の QGP 媒体の楕円的な形状の異方性に伴う密度勾配の異方性と粒子の短い平均自由行程によって、粒子放出の異方性を生むことが流体力学計算から予測されている [25]。PHENIX 実験においてハドロンの楕円方位角異方性

として測定され、その強度はフーリエ級数2次の項を以て表し、 $v_2$ と呼ぶ。

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

N: 粒子数,  $\Psi$ : 反応平面 [rad],  $\phi$ : 粒子放出角 [rad],  $v_2$ : 楕円強度

このハドロンの方角異方性は質量と構成クォーク数に依存しており、特に構成クォーク数でのスケールはQGP中でのクォークの集団運動とQGP-ハドロン相転移におけるクォーク再結合を示唆する [26, 27]。

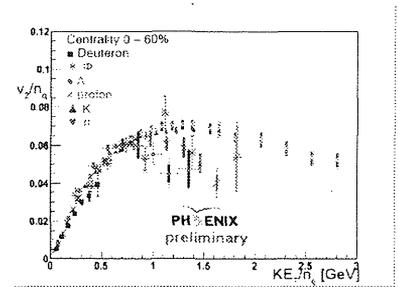
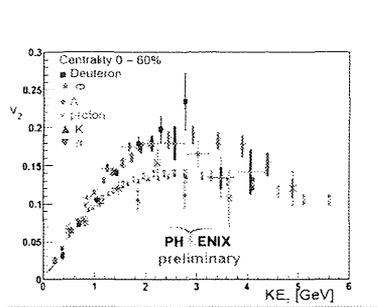
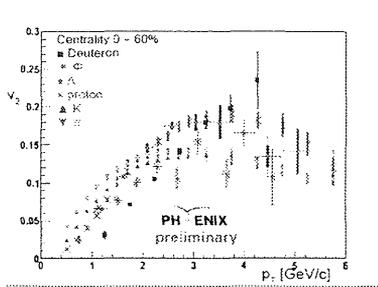


図 11: 方位角異方性強度 AuAu 200 GeV ( $v_2$ )

図 12:  $KE_T$  スケーリング ( $v_2$ )

図 13: 構成クォーク数スケーリング ( $v_2$ )

図 11 は PHENIX 実験において行われた核子当たり重心系 200GeV の AuAu 衝突について、6 粒子の楕円異方性を比較したもので、そこへ  $KE_T = m_T - m_0$  スケールを用いることで質量依存の効果を打ち消したものが図 12、さらに各構成クォーク数で規格化したものが図 13 である [28]。これら全ての値が低運動量 ( $JE_T < 0.7$ ) においてクォーク数でスケールしており、QGP 中でのクォークの集団運動と QGP-ハドロン相転移におけるクォーク再結合を示唆する証拠を得た。また高運動量においてはスケールが破れており、ハドロンジェットによる粒子生成と高温媒体との相互作用による異なる方位角異方性の起源を示唆する証拠を得た。さらに 2 核子当たり重心系 39, 62GeV の AuAu 衝突についても同様に解析し、これら低エネルギー衝突においてもクォーク数スケール則はおおよそ成り立っており、よって AuAu 衝突による QGP 生成の衝突エネルギー閾値はこれらよりも低いことを明らかにした [28]。

## (2-6) 二粒子相関を用いたクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 流体と内部高運動量パートン相互作用の研究

相対論的重イオン衝突により生成される QGP 流体は、衝突関与核子分布の揺らぎに起因する放出粒子数の高次方位角異方性を示す [36]。これまでに衝突時の核子内パートン分布、QGP への熱平衡化過程、及び QGP 流体の粘性を考慮した相対論的流体モデルが実験結果の記述に成功している [30]。今後異方性測定及び理論モデルの精密化による QGP の性質の厳密な決定が期待される。QGP の集団的運動を主眼とした流体計算に加えて流体中での高運動量パートンのエネルギー損失を考慮した計算が近年試みられ、二粒子相関の実験結果との比較により妥当性が検討されている [31]。更に計算に制限を加えるパートンエネルギー損失の距離依存性に関する測定を行うことが重要である。

本研究では  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV Au+Au 衝突において、高運動量トリガー粒子を二次及び三次異方向の基準軸（反応平面）に対して選択し、トリガー粒子に対するアソシエイト粒子の QGP 内の通過距離を制限した二粒子ハドロン相関を測定した。図 14 に  $|\Delta\phi - \pi| < \pi/4$  領域における二粒子相関の積分値をアソシエイト粒子の二次反応平面に対する相対方位角依存性として示す。ただし、 $\Delta\phi$  はアソシエイト粒子のトリガー粒子に対する相対方位角である。 $p_T : 2-4 \times 1-2$  GeV/c における二粒子相関において、非中心衝突ではパートン通過距離最小の  $\phi^a - \Psi_2 = 0$  において値が最大となり、中心衝突ではパートンの通過距離最大の  $\phi^a - \Psi_2 = \pi/2$  において最大値が示される。非中心衝突における傾向は距離に依存したパートンのエネルギー損失描像と一致し、中心衝突における傾向は損失したエネルギーのパートン通過方向への再分配が可能性として考えられる。これは従来の計算では考慮されていない効果であり、今後の理論計算に対する示唆として重要である。

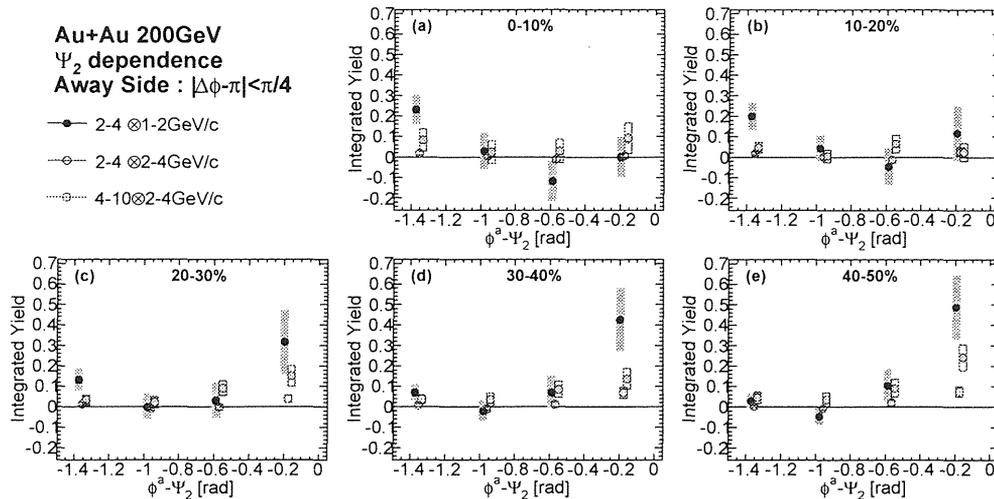


図 14:  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV Au+Au 衝突における二粒子相関の  $|\Delta\phi - \pi| < \pi/4$  領域における積分値の二次反応平面依存性

## (2-7) ALICE 高度化計画のための前方光子検出器 (FOCAL) の開発

ALICE 実験高度化計画の 1 つに、前方方向 ( $\eta = 3.3 - 5.3$ ) における直接光子や崩壊光子を測定し、重イオン衝突の初期条件の決定や QGP 早期熱化の謎に迫る、前方光子検出器 (Forward Calorimeter, FOCAL) 計画がある。本研究グループは、2013 年度よりこの FOCAL 計画に本格的に参加した。初年度である 2013 年度では、以下の研究・開発を行った。

(1) データ読み出しシステムの構築 FOCAL のデータ読み出しの試作機として、CERN-RD51 グループが開発した 128 チャンネル APV 25 hybrid チップ、SRU (Scaleable Readout Unit) 読み出しを用いた ADC/FEC (Front End Card) システムがある。我々はそれを CERN より購入した。現在このシステムを筑波大に設置し、LabVIEW を用いたデータ収集制御システムを構築中である。

(2) FOCAL PAD 検出器プロトタイプ 2014 年 1 月にオークリッジ研究所 (ORNL, 米国) を訪問し、FOCAL の共同研究・開発を開始した。その際、オークリッジ研究所から FOCAL 検出器のプロトタイプを譲り受けた (図 15)。これはシリコン・フォトダイオードとタンゲステンの金属板から構成されている。我々はこれを筑波大に設置し、宇宙線や LED を用いたテストベンチを構築中である。

(3) シミュレーションによる評価 FOCAL 検出器シミュレーションを行うため、ユトレヒト大学(オランダ)との共同研究を開始した。大学院生2名、スタッフ1名をユトレヒト大学に1ヶ月間派遣し、シリコンピクセル上に発生するノイズに対する耐性評価や、重イオン衝突による多粒子生成の環境下における中性  $\pi$  中間子の再構成の評価を行った。

2014年度は、(1)、(2)の FOCAL プロトタイプと読み出し系を使った、CERN PS, SPS 両加速器でのテストビーム実験を実施する予定である。

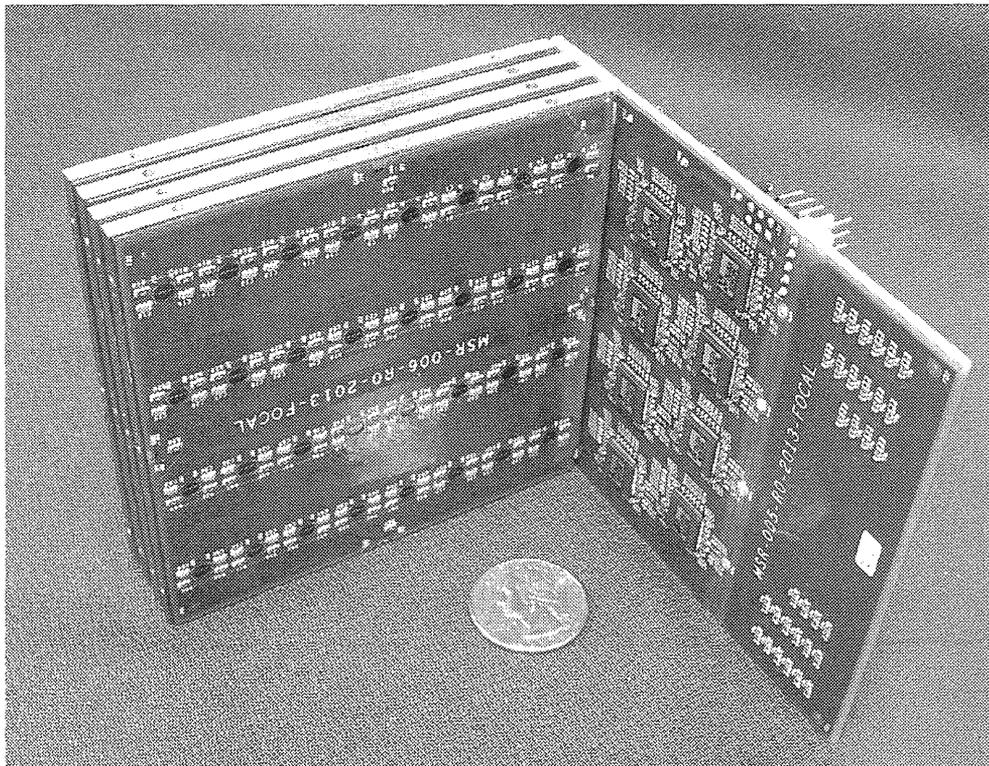


図 15: FoCal PAD 検出器プロトタイプ

### (2-8) 銅+金衝突における指向型方位角異方性 $v_1$ のラピディティ依存性の測定

相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC) を用いた銅+金の原子核衝突実験を行い、衝突領域の初期幾何学的形状やその揺らぎを起源とする終状態での生成粒子の方位角異方性を測定した。異なる原子核同士の衝突系により非対称な初期状態を作り出し、その後のクォーク・グルーオン・プラズマの集団運動的な発展の様子を調べる事を目的とした。指向型方位角異方性  $v_1$  のラピディティ依存性を調べ、衝突関与部と傍観部の独立性を示す  $v_1^{odd}$  と  $v_1^{even}$  成分を観測し、先に報告された LHC エネルギーでの対称系での結果と比較した [33]。図 16 に、銅原子核側の衝突傍観部による反応平面を基準にした  $v_1$  と、金原子核側の衝突傍観部による反応平面を基準にした  $v_1$  をそれぞれ示した。これらの2つの  $v_1$  の差が  $v_1^{even}$  に、これらの平均が  $v_1^{odd}$  に対応する。非対称な衝突系により銅側の傍観部方向へ  $v_1^{odd}$  はより大きい事を観測した。一方で  $v_1^{even}$  に関しては、基準とする傍観部による反応平面とは逆の方向に  $v_1$  がシフトしている事を観測した。

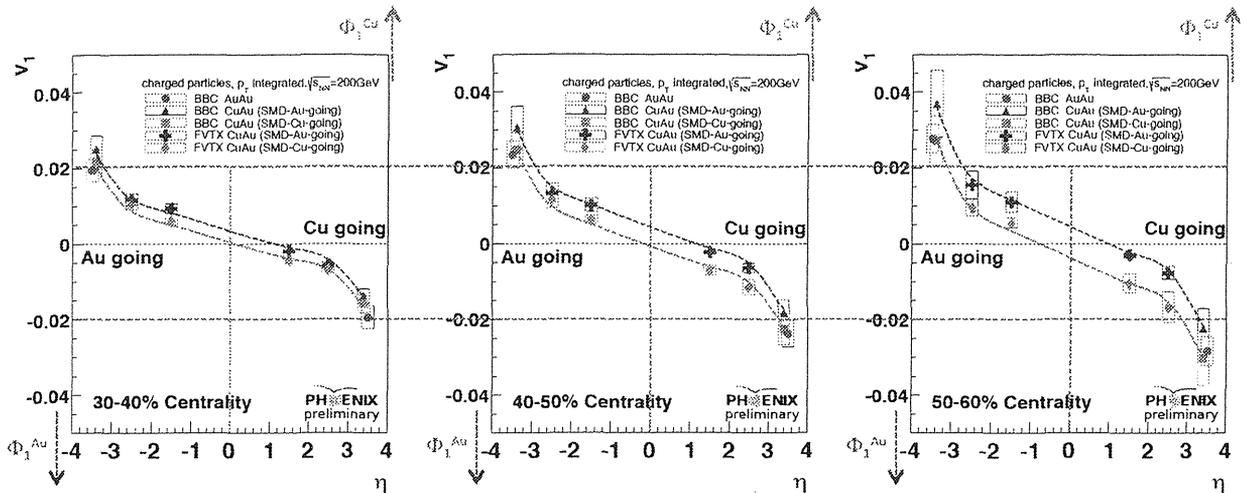


図 16:  $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$  銅+金原子核衝突における  $v_1$  の依存性

## (2-9) Direct photon $v_2, v_3$ at RHIC

QGP の研究において、直接光子 (ハドロン崩壊から放出される光子を除いた、衝突から生成される全ての光子) の測定が重要であると考えられている。その理由は、光子が様々な起源を持っており、さらに、QGP と強い相互作用をしないために、生成された時の情報を持って放出されるからである。特に低い横運動量領域の光子は、QGP やハドロンガスからの熱放出によるものが支配的だと考えられている。直接光子の横運動量に対する収量測定の結果から、衝突初期の温度測定が行われ、非常に高温の熱源から光子が放出されていることが観測された [34]。

また、直接光子の方位角異方性 (衝突から放出される粒子数が方位角方向に対して偏りを持っていること) の測定も行われた。 $v_2$  (2 方向への偏りの大きさ) 測定の結果、ハドロンの  $v_2$  と同程度の強度を持つことがわかった。[35] 方位角異方性は衝突初期の反応関与部の形状を起源として、QGP の膨張によって生成され、強度は膨張の時間に依存していることがわかっている。そのため、 $v_2$  の結果から直接光子はハドロンと同程度のタイミング、つまり、温度が低いときに生成される光子が支配的であるという結果が得られた。この 2 つの観測から得られた結果には矛盾があり、直接光子のパズルと呼ばれている。

解決のための一つの手がかりとして、方位角異方性の 3 方向への偏りの大きさ ( $v_3$ ) 測定が行われた。その結果、 $v_2$  と同様に  $v_3$  でもハドロンと同程度の強度が測定された。この結果から考えられることとして、 $v_2$  の結果と同様に、低い温度からの光子が支配的であると考えられる。この  $v_3$  の結果によって、光子の生成メカニズムの理解、パズルを解く助けになると期待される。

## (2-10) 銅-金衝突における方位角異方性の研究

重イオン衝突では、生成粒子は異方性を持って流体的な膨張をする。この異方性は衝突初期に関与した粒子分布の幾何学的な形を起源とし、圧力勾配が生じ、膨張の過程を経て測定されるため、QGP 研究において重要なプローブとされている。RHIC ではこれまで金-金、銅-銅衝突実験が行われており、同一の原子核同士の衝突からなる QGP の方位角異方性測定が行われてきた。2012 年度に初めて銅原子核、金原子核による非対称な衝突系の実験が行われた。非対称な系では対象な系と違い、衝突初期形状、圧力勾配、生成粒子の分布の形などが異なる事が予想される。

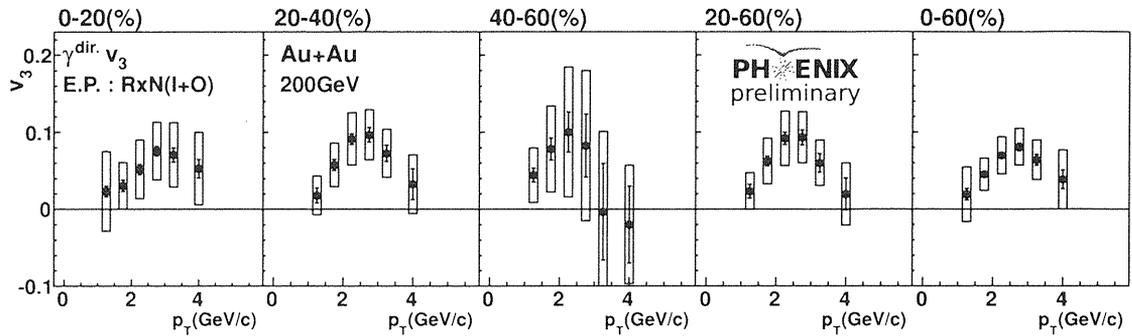


図 17: Au+Au 200GeV 衝突実験で観測された直接光子の  $v_3$  結果

本研究では、銅-金衝突における方位角異方性の横運動量依存性の測定、対称な系である金-金、銅-銅衝突における方位角異方性との比較を行った。図 18 は、銅-金衝突における横運動量依存性を示している。 $v_2$  は楕円型異方性と言い、粒子放出が 2 方向に多い異方性の強さを示し、 $v_3$  は三角形型異方性と言い、3 方向に粒子放出が多い異方性を表す。パネルの違いは中心衝突度の違いを表しており、左から右側に行くにつれ中心衝突から周辺衝突に変わる。 $v_2$  は強い centrality 依存性を持っている事が分かり、 $v_3$  は依存性が見えなかった。図 19、20 は対称な系との比較結果を示す。左の図 19 が  $v_2$  で右の図 20 が  $v_3$  の結果であり、横軸は衝突に関与した核子数となっている。 $v_2$  は衝突系に大きく依存していることが分かり、 $v_3$  は衝突系には依存していない事が分かった。

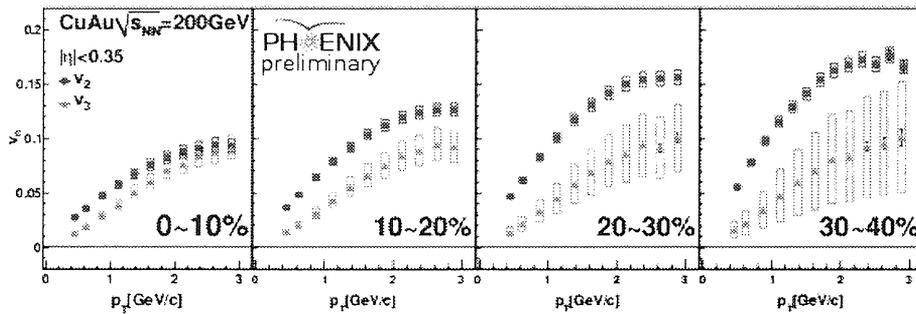


図 18: Cu+Au 衝突での  $v_2, v_3$  の横運動量依存性

## (2-11) ALICE Physics Analysis and Tier-1/2 Workshop

2014年3月3日～7日、筑波大学・大学会館にて、「ALICE 実験物理解析および計算機科学国際ワークショップ（主催：数理物質系物理学域）」（ALICE Physics Analysis and Tier-1/2 Workshop）を開催した。フランスから15名、全世界から約35名の高エネルギー原子核物理学と計算機科学の研究者を招き、国内の参加者30名と合わせて、合計80名の参加者があった。前半の物理解析に関するワークショップでは、ALICE 実験における結果や現在進行中の解析状況の報告、将来計画、さらに理論物理の講演があり、今後の物理解析や高度化計画に関する議論が行われた。後半の計算機物理に関するワークショップでは、Grid コンピューティングの専門家が一同に会し、ALICE Tier-1/2

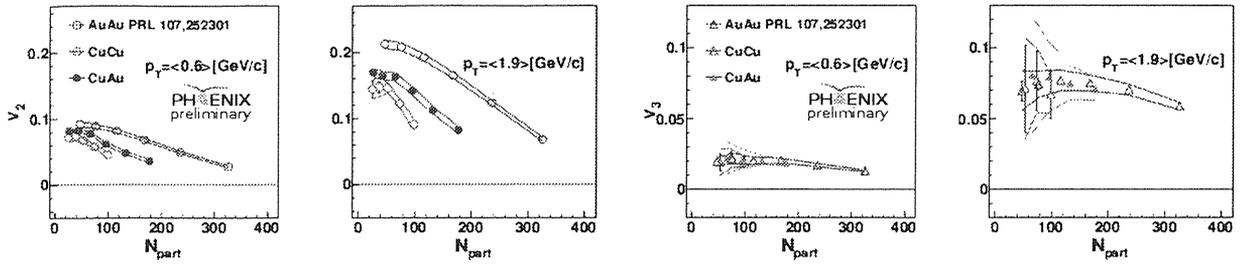


図 19: Au+Au,Cu+Au,Cu+Cu 衝突での  $v_2$  の  $N_{part}$  依存性  
 図 20: Au+Au,Cu+Au,Cu+Cu 衝突での  $v_3$  の  $N_{part}$  依存性

センターの各部門や運営体勢、将来計画についての議論が行われた。また大学院学生を対象とした、専門家による”ALICE analysis tutorial”も開催した。

会議 Web ページ: <http://indico.cern.ch/event/274974/>

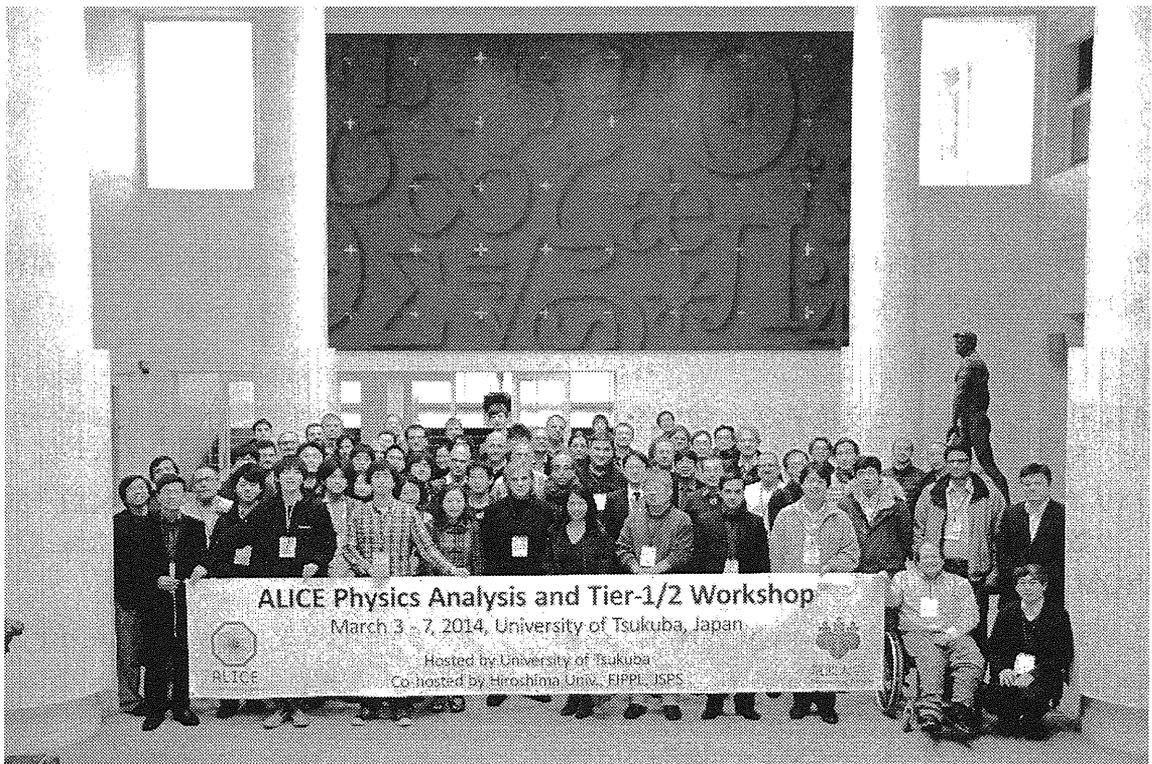


図 21: ALICE Physics Analysis and Tier-1/2 Workshop, Mar.3-7, 2014, 筑波大学

(2-12) 識別された荷電ハドロンの楕円方位角異方性のビームエネルギー依存性

2010年から2011年にかけて、ブルックヘブン国立研究所における相対論的重イオン衝突型加速器RHICを用いてビームエネルギー走査プログラム(BES)が行われた。BESの目的の1つは、RHIC最

高エネルギーや LHC エネルギーで生成され得るクォークグルーオンプラズマ (QGP) 消失シグナルの探索である。QGP 生成シグナルの 1 つとして有力な観測量に、生成粒子の楕円方位角異方性  $v_2$  がある。特に、実験的に確認された  $v_2$  の構成クォーク数スケーリングは、ハドロニ化以前にクォーク自由度が存在したことを示唆する結果である。したがって、このスケーリング則がどのエネルギーまで成り立つのかを検証することによって、QGP 消失（もしくは生成）閾エネルギーを決定し得ると期待される。STAR 実験では、重心系核子対当たり 7.7 GeV から 62.4 GeV までのエネルギーにおいてデータを収集し、識別された荷電ハドロンの楕円方位角異方性  $v_2$  測定を行った。楕円方位角異方性解析を通して、QGP 消失シグナルの探索を目的として研究を行った。

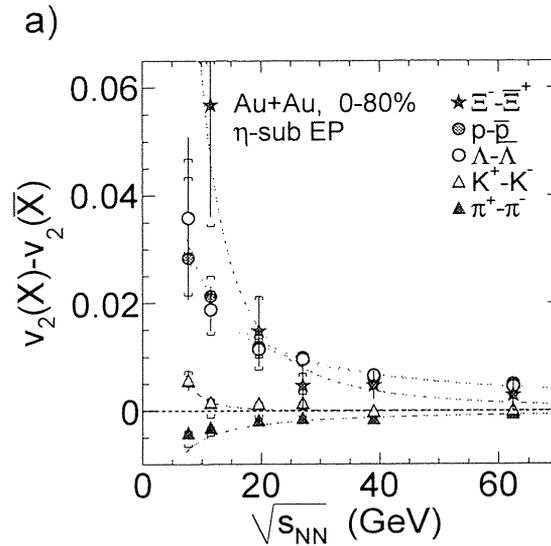


図 22: 識別された荷電ハドロンの楕円方位角異方性強度  $v_2$  のビームエネルギー依存性。縦軸は粒子と反粒子の  $v_2$  の差 [37]。

図 22 は測定された粒子と反粒子の  $v_2$  強度差のビームエネルギー依存性である。エネルギーが減少すると、粒子と反粒子の  $v_2$  差が大きくなることが観測された。特に、ビームエネルギー 39 GeV 以下のバリオンに関してより大きな違いが見られた。この結果から、少なくとも粒子と反粒子間ではクォーク数スケーリング則が破れていることが分かった [37]。またこの結果は、典型的な輸送計算模型 (UrQMD, AMPT) では再現できないことも分かった。

## 参考文献

- [1] A.Ozawa *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2012**, 03C009 (2012).
- [2] K. Asahi *et al.* Phys. Lett. B **251**, 488 (1990).
- [3] Y. Ishibashi *et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, **317**, 714 (2013).
- [4] K. Sugimoto *et al.* Phys. Lett. **18**, 38 (1965).
- [5] J. David and R. H. Heffner, Nucl. Inst. and Meth. **148**, 503 (1978)
- [6] F. Busch, *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. **171**, 71 (1980)
- [7] A.V. Kuznetsov, *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A **452**, 525 (2000)
- [8] T.Moriguchi *et al.*, Nucl. Instrum. Methods. Res. **A624**, 27 (2010).
- [9] Nuclear Data Sheets **113**, 1724 (2012).
- [10] A.Ozawa *et al.*, Nucl. Phys. **A709**, 60 (2002).
- [11] S.C. Jeong *et al.*, KEK Report 2010-2.
- [12] J.S.Schweitzer *et al.*, Nucl. Phys. **A287**, 344 (1977).
- [13] M. Wada *et al.* Nucl. Instr. Meth. B **204**, 570 (2003).
- [14] A. Takamine *et al.* Rev. Sci. Instrum. **76**, 103503 (2005).
- [15] G. Bollen, Int. J Mass Spectrom. **299**, 131 (2011).
- [16] M. Brodeur, *et al.* Int. J Mass Spectrom. **336**, 53 (2013).
- [17] F.Arai *et al.* Int. J Mass Spectrom. **362**, 56 (2014).
- [18] Norikazu Kinoshita, Keisuke Sueki, Kimikazu Sasa *et al.*, PNAS **108**, 19526-19529 (2011).
- [19] Hiroyuki Matsuzaki *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. **B 259**, 721-726 (2007).
- [20] Kenji Nishihara *et al.*, JAEA-Data/Code 2012-018.
- [21] S. An a, Y.K. Jo a, J.S. Kim a, M.M. Kim a, D. Hatzifotiadou b, M.C.S. Williams b, A. Zichichi c,d, R. Zuyeuski a : " A 20 ps timing device—A Multigap Resistive Plate Chamber with 24 gas gaps "
- [22] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **107**, 252301 (2011)
- [23] 新井田貴文, 博士論文, 筑波大学 (2013)
- [24] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), arXiv:1401.7680 (2014), accepted by Phys. Rev. Lett.
- [25] S. S. Alder *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **91**, 182301 (2003).

- [26] R.J. Fries, B. Muller, C. Nonaka, S.A. Bass, Phys. Rev. Lett. **90**, 202303 (2003).
- [27] R.J. Fries, B. Muller, C. Nonaka, S.A. Bass, Phys. Rev. C **68**, 044902 (2003).
- [28] 池田義雅, 博士論文, 筑波大学 (2013).
- [29] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **107**, 252301 (2011)
- [30] B. Schenke *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 042301 (2011)
- [31] L. Pang *et al.*, arXiv:1309.6735v2 (2013)
- [32] 轟木貴人, 筑波大学 数理物質科学研究科 物理学専攻 博士論文 (2014)
- [33] B. Abelev *et al.* (ALICE Collaboration), Phys. Rev. Lett. **111**, 232302 (2013)
- [34] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), P.R.L. 104, 132301 (2010)
- [35] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), P.R.L. 109, 122302 (2012)
- [36] A. Adare *et al.* (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. **107**, 252301 (2011)
- [37] L. Adamczyk *et al.* (STAR collaboration), Phys. Rev. C **88** 014902.

## 原子核実験グループ研究業績リスト

### <論文>

1. “Nuclear structure of  $^{30}\text{S}$  and its implications for nucleosynthesis in classical novae” K. Setoodehnia, A. A. Chen, D. Kahl, T. Komatsubara, J. Jos, R. Longland, Y. Abe, D. N. Binh, J. Chen, S. Cherubini, J. A. Clark, C. M. Deibel, S. Fukuoka, T. Hashimoto, T. Hayakawa, J. Hendriks, Y. Ishibashi, Y. Ito, S. Kubono, W. N. Lennard, T. Moriguchi, D. Nagae, R. Nishikiori, T. Niwa, A. Ozawa, P. D. Parker, D. Seiler, T. Shizuma, H. Suzuki, C. Wrede, H. Yamaguchi, and T. Yuasa *PHYSICAL REVIEW C* 87, 065801 (2013).
2. “Single-reference high-precision mass measurement with a multireflection time-of-flight mass spectrograph” Y. Ito, P. Schury, M. Wada, S. Naimi, T. Sonoda, H. Mita, F. Arai, A. Takamine, K. Okada, A. Ozawa, and H. Wollnik *PHYSICAL REVIEW C* 88, 011306(R) (2013).
3. “Density distributions of  $^{11}\text{Li}$  deduced from reaction cross-section measurements” T. Moriguchi, A. Ozawa, S. Ishimoto, Y. Abe, M. Fukuda, I. Hachiuma, Y. Ishibashi, Y. Ito, T. Kuboki, M. Lantz, D. Nagae, K. Namihira, D. Nishimura, T. Ohtsubo, H. Ooishi, T. Suda, H. Suzuki, T. Suzuki, M. Takechi, K. Tanaka, and T. Yamaguchi *PHYSICAL REVIEW C* 88, 024610 (2013).
4. “Probing effect of tensor interactions in  $^{16}\text{O}$  via (p,d) reaction” H.J. Ong, I. Tanihata, A. Tamii, T. Myo, K. Ogata, M. Fukuda, K. Hirota, K. Ikeda, D. Ishikawa, T. Kawabata, H. Matsubara, K. Matsuta, M. Mihara, T. Naito, D. Nishimura, Y. Ogawa, H. Okamura, A. Ozawa, D. Y. Pang, H. Sakaguchi, K. Sekiguchi, T. Suzuki, M. Taniguchi, M. Takashina, H. Toki, Y. Yasuda, M. Yosoi, J. Zenihiro *Physics Letter B* 725 (2013) 277-281.
5. “The challenge of precision mass measurements of short-lived exotic nuclei: Development of a new storage ring mass spectrometry” T. Yamaguchi, Y. Yamaguchi, A. Ozawa *International Journal of Mass Spectrometry* 349-350 (2013) 240-246.
6. “Nuclear physics experiments with ion storage rings” Yu.A. Litvinov, S. Bishop, K. Blaum, F. Bosch, C. Brandau, L.X. Chen, I. Dillmann, P. Egelhof, H. Geissel, R.E. Grisenti, S. Hagmann, M. Heil, A. Heinz, N. Kalantar-Nayestanaki, R. Knoobel, C. Kozhuharov, M. Lestinsky, X.W. Ma, T. Nilsson, F. Nolden, A. Ozawa, R. Raabe, M.W. Reed, R. Reifarth, M.S. Sanjari, D. Schneider, H. Simon, M. Steck, T. Stohlker, B.H. Sun, X.L. Tu, T. Uesaka, P.M. Walker, M. Wakasugi, H. Weick, N. Winckler, P.J. Woods, H.S. Xu, T. Yamaguchi, Y. Yamaguchi, Y.H. Zhang *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 317 (2013) 603-616.
7. “Construction of rare-RI ring at RIKEN RI Beam Factory” Y. Yamaguchi, M. Wakasugi, T. Uesaka, A. Ozawa, Y. Abe, T. Fujinawa, M. Kase, M. Komiyama, T. Kubo, K. Kumagai, T. Maie, D. Nagae, J. Ohnishi, F. Suzuki, A. Tokuchi, Y. Watanabe, K. Yoshida, K. Yamada, T. Yamaguchi, H. Yamasawa, Y. Yanagisawa, J. Zenihiro, Y. Yano *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 317 (2013) 629-635.

8. “Design study of a resonant Schottky pick-up for the Rare-RI Ring project” F. Suzuki, J. Zenihiro, T. Yamaguchi, A. Ozawa, T. Uesaka, M. Wakasugi, K. Yamada, Y. Yamaguchi, Rare-RI Ring collaboration Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 317 (2013) 636-639.
9. “Time-of-flight detector applied to mass measurements in Rare-RI Ring” D. Nagae, Y. Abe, S. Okada, A. Ozawa, T. Yamaguchi, H. Suzuki, T. Moriguchi, Y. Ishibashi, S. Fukuoka, R. Nishikiori, T. Niwa, T. Suzuki, F. Suzuki, K. Sato, H. Furuki, N. Ichihashi, S. Miyazawa, Y. Yamaguchi, T. Uesaka, M. Wakasugi Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 317 (2013) 640-643.
10. “Performance of high-resolution position-sensitive detectors developed for storage-ring decay experiments” T. Yamaguchi, F. Suzuki, T. Izumikawa, S. Miyazawa, K. Morimoto, T. Suzuki, F. Tokanai, H. Furuki, N. Ichihashi, C. Ichikawa, A. Kitagawa, T. Kuboki, S. Momota, D. Nagae, M. Nagashima, Y. Nakamura, R. Nishikiori, T. Niwa, T. Ohtsubo, A. Ozawa, K. Sato, S. Sato, S. Suzuki Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 317 (2013) 697-700.
11. “Systematic study of individual charge-changing cross sections of intermediate-energy secondary beams” S. Yamaki, T. Yamaguchi, J. Kouno, K. Sato, N. Ichihashi, T. Suzuki, K. Abe, Y. Abe, M. Fukuda, H. Furuki, N. Inaba, K. Iwamoto, T. Izumikawa, Y. Kamisho, N. Kikuchi, A. Kitagawa, M. Mihara, S. Miyazawa, S. Momota, Y. Morita, D. Nagae, M. Nagashima, Y. Nakamura, R. Nishikiori, D. Nishimura, I. Nishizuka, T. Ohtsubo, J. Ohno, A. Ozawa, T. Sakai, S. Sato, D. Sera, F. Suzuki, S. Suzuki, S. Suzuki, M. Wakabayashi, M. Yaguchi, S. Yasumoto Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 317 (2013) 774-778.
12. “Development of an adiabatic field rotation system to measure spin polarization of unstable nuclei”, Y. Ishibashi, N. Yoshida, H. Ueno, A. Yoshimi, Y. Ichikawa, Y. Abe, K. Asahi, M. Chikamori, T. Fujita, T. Furukawa, E. Hikota, D. Nagae, Y. Ohtomo, Y. Saito, H. Shirai, T. Suzuki, X.F. Yang, N. Sakamoto Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B317, 714-716 (2013).
13. “Production of nuclear polarization of unstable nuclei via polarization transfer reactions”, Y. Ishibashi, D. Nagae, Y. Abe, T. Nagatomo, A. Ozawa, H. Suzuki, S. Fukuoka, R. Nishikiori, T. Niwa, K. Matsuta, Y. Tagishi Hyperfine Interact. 220, 71-77 (2013).
14. “Development of a new device control system for  $\beta$ -NMR experiments”, N. Yoshida, H. Ueno, A. Yoshimi, Y. Ishibashi, Y. Ichikawa, Y. Abe, K. Asahi, M. Chikamori, T. Fujita, T. Furukawa, E. Hikota, D. Nagae, Y. Ohtomo, Y. Saito, H. Shirai, T. Suzuki, X.F. Yang Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B317, 705-709 (2013).
15. “Control of stopping position of radioactive ion beam in superfluid helium for laser spectroscopy experiments”, X.F. Yang, T. Furukawa, T. Wakui, K. Imamura, H. Tetsuka, T. Fujita, Y. Yamaguchi, Y. Tsutsui, Y. Mitsuya, Y. Ichikawa, Y. Ishibashi, N. Yoshida, H. Shirai, Y. Ebara, M. Hayasaka, S. Arai, S. Muramoto, A. Hatakeyama, M. Wada, T. Sonoda, Y. Ito, T. Kobayashi, S. Nishimura, M. Nishimura, Y. Kondo, K. Yoneda, H. Ueno, T. Shinozuka, T. Shimoda, K. Asahi, Y. Matsuo Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B317, 599-602 (2013).

16. “Investigation of the thermonuclear  $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Ne}$  reaction rate via resonant elastic scattering of  $^{21}\text{Na} + p$ ” L.Y. Zhang, J.J. He, A. Parikh, S.W. Xu, H. Yamaguchi, D. Kahl, S. Kubono, P. Mohr, J. Hu, P. Ma, S.Z. Chen, Y. Wakabayashi, H.W. Wang, W.D. Tian, R.F. Chen, B. Guo, T. Hashimoto, Y. Togano, S. Hayakawa, T. Teranishi, N. Iwasa, T. Yamada, T. Komatsubara, Y.H. Zhang, X.H. Zhou *Physical Review C* 89, 015804 (2014).
17. “Resonant scattering of  $^{22}\text{Na}+p$  studied by the thick-target inverse-kinematic method” S.J. Jin, Y.B. Wang, J. Su, S.Q. Yan, Y.J. Li, B. Guo, Z.H. Li, S. Zeng, G. Lian, X.X. Bai, W.P. Liu, H. Yamaguchi, S. Kubono, J. Hu, D. Kahl, H.S. Jung, J.Y. Moon, C.S. Lee, T. Teranishi, H.W. Wang, H. Ishiyama, N. Iwasa, T. Komatsubara, B.A. Brown *Physical Review C* 88, 035801 (2013).
18. The  $^{18}\text{Ne}(\alpha, p)^{21}\text{Na}$  breakout reaction in x-ray bursts: Experimental determination of spin-parities for  $\alpha$  resonances in  $^{22}\text{Mg}$  via resonant elastic scattering of  $^{21}\text{Na} + p$  J.J. He, L.Y. Zhang, A. Parikh, S.W. Xu, H. Yamaguchi, D. Kahl, S. Kubono, J. Hu, P. Ma, S.Z. Chen, Y. Wakabayashi, B.H. Sun, H.W. Wang, W.D. Tian, R.F. Chen, B. Guo, T. Hashimoto, Y. Togano, S. Hayakawa, T. Teranishi, N. Iwasa, T. Yamada, T. Komatsubara *Physical Review C* 88, 012801(R) (2013).
19. Level structure of  $^{154}\text{Ho}$  C.B. Moon, T. Komatsubara, K. Furuno *Physical Review C* 88, 044308 (2013).
20. Study of nucleosynthesis by means of  $^{45}\text{Sc} + p$  reaction T. Onishi, T. Komatsubara, T. Yuasa, K. Sasa, A. Ozawa, D. Izumi, M. Mukai, S. Kubono, T. Hayakawa, T. Shizuma *JPS (The Physical Society of Japan) Conf. Proc.* 1, 013054 (2014).
21. Study for big bang nucleosynthesis concerning lithium isotopes T. Komatsubara, T. Yuasa, T. Onishi, Y. Saito, S. Okada, K. Sasa, A. Ozawa, T. Hayakawa, T. Shizuma, T. Kajino, S. Kubono *JPS (The Physical Society of Japan) Conf. Proc.* 1, 013055 (2014).
22. “Development of rotating magnetic field system for the  $\beta$ -NMR method” D. Nagae, T. Niwa, Y. Ishibashi, Y. Abe, S. Fukuoka, R. Nishikiori, S. Okada, Y. Saito, N. Inaba, A. Ozawa, Y. Aoki *Hyp. Int.* 220, 65-69 (2013).
23. “Production of spin polarized  $^{12}\text{N}$  through heavy ion reactions” M. Mihara, K. Matsuta, D. Nishimura, M. Fukuda, M. Yaguchi, K. Iwamoto, M. Wakabayashi, Y. Kamisho, J. Ohno, Y. Morita, T. Izumikawa, T. Ohtsubo, S. Suzuki, M. Nagashima, K. Abe, T. Sakai, S. Momota, A. Ozawa, D. Nagae, Y. Ishibashi, Y. Abe, T. Niwa, T. Nagatomo, T. Minamisono, M. K. Kubo, A. Kitagawa, M. Torikoshi, M. Kanazawa, S. Sato *Hyp. Int.* 220, 83-88 (2013).
24. “Spectroscopy of  $^9\text{Be}$  and observation of neutron halo structure in the states of positive parity rotational band” A.S. Demyanova, A.A. Ogloblin, A.N. Danilov, S.V. Dmitriev, S.A. Goncharov, N. Burtebaev, J. Burtebaeva, N. Saduev, T.L. Belyaeva, H. Suzuki, A. Ozawa, Y. Abe, S. Fukuoka, Y. Ishibashi, S. Ito, T. Komatsubara, T. Moriguchi, D. Nagae, R. Nishikiori, T. Niwa, K. Okumura, H. Ooishi, K. Yokoyama and S. Kubono *EPJ Web of Conferences* 66, 02026 (2014).

25. “Search for halo nucleus in Mg isotopes through the measurements of reaction cross sections towards the vicinity of neutron drip line” M. Takechi, S. Suzuki, D. Nishimura, M. Fukuda, T. Ohtsubo, M. Nagashima, T. Suzuki, T. Yamaguchi, A. Ozawa, T. Moriguchi, H. Ohishi, T. Sumikama, H. Geissel, M. Ishihara, N. Aoi, Rui-Jiu Chen, De-Qing Fang, N. Fukuda, S. Fukuoka, H. Furuki, N. Inabe, Y. Ishibashi, T. Itoh, T. Izumikawa, D. Kameda, T. Kubo, C. S. Lee, M. Lantz, Yu-Gang Ma, K. Matsuta, M. Mihara, S. Momota, D. Nagae, R. Nishikiori, T. Niwa, T. Ohnishi, K. Okumura, T. Ogura, H. Sakurai, K. Sato, Y. Shimbara, H. Suzuki, H. Takeda, S. Takeuchi, K. Tanaka, H. Uenishi, M. Winkler, Y. Yanagisawa, S. Watanabe, K. Minomo, S. Tagami, M. Shimada, M. Kimura, T. Matsumoto, Y. R. Shimizu and M. Yahiro EPJ Web of Conferences 66, 02101 (2014).
26. “Measurements of interaction cross sections for 22-35 Na isotopes” S. Suzuki, M. Takechi, T. Ohtsubo, D. Nishimura, M. Fukuda, T. Kuboki, M. Nagashima, T. Suzuki, T. Yamaguchi, A. Ozawa, H. Ohishi, T. Moriguchi, T. Sumikama, H. Geissel, N. Aoi, Rui-Jiu Chen, De-Qing Fang, N. Fukuda, S. Fukuoka, H. Furuki, N. Inabe, Y. Ishibashi, T. Ito, T. Izumikawa, D. Kameda, T. Kubo, M. Lantz, C.S. Lee, Yu-Gang Ma, M. Mihara, S. Momota, D. Nagae, R. Nishikiori, T. Niwa, T. Ohnishi, K. Okumura, T. Ogura, H. Sakurai, K. Sato, Y. Shimbara, H. Suzuki, H. Takeda, S. Takeuchi, K. Tanaka, H. Uenishi, M. Winkler and Y. Yanagisawa EPJ Web of Conferences 66, 03084 (2014).
27. “First EXL experiment with stored radioactive beam: Proton scattering on  $^{56}\text{Ni}$ ”, M. von Schmid, S. Bagchi, S. Bönig, M. Csatlós, I. Dillmann, C. Dimopoulou, P. Egelhof, V. Eremin, T. Furuno, H. Geissel, R. Gernhäuser, M. N. Harakeh, A.-L. Hartig, S. Ilieva, N. Kalantar-Nayestanaki, O. Kiselev, H. Kollmus, C. Kozhuharov, A. Krasznahorkay, T. Kröll, M. Kuilman, S. Litvinov, Yu. A. Litvinov, M. Mahjour-Shafiei, M. Mutterer, D. Nagae, M. A. Najafi, C. Nociforo, F. Nolden, U. Popp, C. Rigollet, S. Roy, C. Scheidenberger, M. Steck, B. Streicher, L. Stuhl, M. Thürauf, T. Uesaka, H. Weick, J. S. Winfield, D. Winters, P. J. Woods, T. Yamaguchi, K. Yue, J. C. Zamora and J. Zenihiro EPJ Web of Conferences 66, 03093 (2014).
28. “Charge-changing interactions probing point-proton radii of nuclei” S. Yamaki, J. Kouno, D. Nishimura, M. Nagashima, M. Takechi, K. Sato, K. Abe, Y. Abe, M. Fukuda, H. Furuki, I. Hachiuma, A. Homma, N. Ichihashi, C. Ichikawa, N. Inaba, T. Ito, K. Iwamoto, T. Izumikawa, Y. Kamisho, N. Kikuchi, S. Kinno, A. Kitagawa, T. Kojima, T. Kuboki, M. Mihara, S. Miyazawa, S. Momota, Y. Morita, D. Nagae, Y. Nakamura, K. Namihira, R. Nishikiori, I. Nishizuka, T. Niwa, M. Ogura, Y. Ohkuma, T. Ohtsubo, S. Okada, J. Ohno, A. Ozawa, Y. Saito, T. Sakai, S. Sato, D. Sera, F. Suzaki, S. Suzuki, S. Suzuki, T. Suzuki, M. Taguchi, H. Uenishi, M. Wakabayashi, D. Watanabe, M. Yaguchi, S. Yasumoto and T. Yamaguchi EPJ Web of Conferences 66, 03099 (2014).
29. “Developments of time-of-flight detectors for Rare-RI Ring”, Y. Abe, D. Nagae, and the Rare-RI Ring collaboration JPS Conf. Proc. 1, 013059 (2014).
30. “Transmission properties of C60 ions through micro- and nano-capillaries”, Hidetsugu Tsuchida, Takuya Majima, Shigeo Tomita, Kimikazu Sasa, Kazumasa Narumi, Yuichi Saitoh, Atsuya Chiba, Keisuke Yamada, Koichi Hirata, Hiromi Shibata, and Akio Itoh, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 315 (2013) 336-340.

31. “High-Mobility Electron Conduction in Oxynitride: Anatase TaON” Atsushi Suzuki, Yasushi Hirose, Daichi Oka, Shoichiro Nakao, Tomoteru Fukumura, Satoshi Ishii, Kimikazu Sasa, Hiroyuki Matsuzaki, Tetsuya Hasegawa *Chemistry of Materials*, 26. 976 (2014).
32. “The 6 MV tandem accelerator project for nuclear physics and ion beam applications at the University of Tsukuba ” Kimikazu Sasa *AIP Conf. Proc.*1533 (2013) 184-188.
33. “Paleoclimatic changes on the southern Tibetan Plateau over the past 19,000 years recorded in Lake Pumoyum Co, and their implications for the southwest monsoon evolution ” M. Nishimura, T. Matsunaka, Y. Morita, T. Watanabe, T. Nakamura, L. Zhu, W.F. Nara, A. Imai, Y. Izutsu and K. Hasuike, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 396, 75-92 (2014)
34. ” A chronology of the PY608E-PC sediment core (Lake Pumoyum Co, southern Tibetan Plateau) based on radiocarbon dating of total organic carbon ” T. Watanabe, T. Nakamura, T. Matsunaka, W.F. Nara, L. Zhu, J. Wang, T. Kakegawa. and M. Nishimura, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 294, 520-523 (2013)
35. “Paleoclimatic changes on the southern Tibetan Plateau after the Last Glacial Maximum recorded in Lake Pumoyum Co, and its implication for the Southwest monsoon evolution ” T. Matsunaka, M. Nishimura, Y. Morita, T. Watanabe, T. Nakamura, L. Zhu, W.F. Nara, A. Imai, K. Sasa, K. Sueki, Y. Izutsu and K. Hasuike, *Proceedings of the 5th East Asia AMS Symposium*, 37-38 (2013)
36. ”Investigation of the ion surfing transport method with a circular rf carpet” F.Arai, Y.Ito, M.Wada, P.Schury, T.Sonoda, H.Mita *International Journal of Mass Spectrometry*, 362, 56-58 (2014).
37. Heavy-flavor electron-muon correlations in  $p + p$  and  $d+Au$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake *et al.*), *Phys. Rev. C* **89** (2014) 034915, DOI: 10.1103/PhysRevC.89.034915
38. Measurement of charged jet suppression in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), *JHEP* **1403** (2014) 013, DOI: 10.1007/JHEP03(2014)013
39. Two and Three-Pion Quantum Statistics Correlations in Pb-Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV at the LHC, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), *Phys. Rev. C* **89** (2014) 024911, DOI: 10.1103/PhysRevC.89.024911
40. Azimuthal anisotropy of  $\pi^0$  and  $\eta$  mesons in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake *et al.*), *Phys. Rev. C* **88** (2013) 064910, DOI: 10.1103/PhysRevC.88.064910
41.  $J/\psi$  production and nuclear effects in  $p$ -Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), *JHEP* **1402** (2014) 073, DOI: 10.1007/JHEP02(2014)073

42. Multiplicity Dependence of Pion, Kaon, Proton and Lambda Production in  $p$ -Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. **B728** (2014) 25-38, DOI: 10.1016/j.physletb.2013.11.020
43. Multi-strange baryon production at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. **B728** (2014) 216-227, DOI: 10.1016/j.physletb.2013.11.048
44.  $K_S^0$  and  $\Lambda$  production in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 22, 222301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.222301
45. Long-range angular correlations of  $\pi$ ,  $K$  and  $p$  in  $p$ -Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. **B726** (2013) 164-177, DOI: 10.1016/j.physletb.2013.08.024
46. Multiplicity dependence of two-particle azimuthal correlations in  $p-p$  collisions at the LHC, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), JHEP **1309** (2013) 049, DOI: 10.1007/JHEP09(2013)049
47. Multiplicity dependence of the average transverse momentum in  $p-p$ ,  $p$ -Pb, and Pb-Pb collisions at the LHC, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. **B727** (2013) 371-380, DOI: 10.1016/j.physletb.2013.10.054
48. Energy Dependence of the Transverse Momentum Distributions of Charged Particles in  $p-p$  Collisions Measured by ALICE, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Eur. Phys. J. **C73** (2013) 2662, DOI: 10.1140/epjc/s10052-013-2662-9
49. Directed Flow of Charged Particles at Midrapidity Relative to the Spectator Plane in Pb-Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 23, 232302, DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.232302
50. Performance of the ALICE VZERO system, ALICE Collaboration (E. Abbas, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), JINST **8** (2013) P10016, DOI: 10.1088/1748-0221/8/10/P10016
51. Nuclear Modification of  $\psi'$ ,  $\chi_c$ , and  $J/\psi$  Production  $d$ +Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 20, 202301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.202301
52.  $D$  meson elliptic flow in non-central Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 102301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.102301
53. Mid-rapidity anti-baryon to baryon ratios in  $p-p$  collisions at  $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$  and  $7$  TeV measured by ALICE, ALICE Collaboration (E. Abbas, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Eur. Phys. J. **C73** (2013) 2496, DOI: 10.1140/epjc/s10052-013-2496-5
54. Charmonium and  $e^+e^-$  pair photoproduction at mid-rapidity in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration (E. Abbas, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Eur. Phys. J. **C73** (2013) 2617, DOI: 10.1140/epjc/s10052-013-2617-1

55. Spectra and ratios of identified particles in Au+Au and  $d$ +Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. **C88** (2013) 2, 024906, DOI: 10.1103/PhysRevC.88.024906
56. Centrality dependence of the pseudorapidity density distribution for charged particles in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration (E. Abbas, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. **B726** (2013) 610-622, DOI: 10.1016/j.physletb.2013.09.022
57.  $J/\psi$  Elliptic Flow in Pb-Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration (E. Abbas, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 162301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.162301
58. Quadrupole Anisotropy in Dihadron Azimuthal Correlations in Central  $d$ +Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 21, 212301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.212301
59. Centrality dependence of  $\pi$ ,  $K$ ,  $p$  production in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys.Rev. **C88** (2013) 4, 044910, DOI: 10.1103/PhysRevC.88.044910
60. Charge correlations using the balance function in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. **B723** (2013) 267-279, DOI: 10.1016/j.physletb.2013.05.039
61. Measurement of the inclusive differential jet cross section in  $p - p$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. **B722** (2013) 262-272, DOI: 10.1016/j.physletb.2013.04.026
62. Medium modification of jet fragmentation in Au + Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV measured in direct photon-hadron correlations, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake *et al.*), Phys.Rev.Lett. **111** (2013) 3, 032301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.032301
63.  $\nu(1S+2S+3S)$  production in  $d$ +Au and  $p+p$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV and cold-nuclear matter effects, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. **C87** (2013) 044909, DOI: 10.1103/PhysRevC.87.044909
64. Inclusive cross section and single transverse spin asymmetry for very forward neutron production in polarized  $p + p$  collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, H. Masui, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. **D88** (2013) 3, 032006, DOI: 10.1103/PhysRevD.88.032006
65. Measurement of inelastic, single- and double-diffraction cross sections in proton-proton collisions at the LHC with ALICE, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Eur. Phys. J. **C73** (2013) 2456 DOI: 10.1140/epjc/s10052-013-2456-0
66. Measurement of electrons from beauty hadron decays in  $p - p$  collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Lett. **B721** (2013) 13-23, DOI: 10.1016/j.physletb.2013.01.069

67. Direct photon production in  $d+Au$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, PHENIX Collaboration (A. Adare, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. **C87** (2013) 054907, DOI: 10.1103/PhysRevC.87.054907
68. Net-Charge Fluctuations in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration (B. Abelev, T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake *et al.*), Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 15, 152301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.152301
69. Energy Dependence of Moments of Net-proton Multiplicity Distributions at RHIC, STAR Collaboration (L. Adamczyk, H. Masui *et al.*), Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 032302, DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.032302
70. Neutral pion cross section and spin asymmetries at intermediate pseudorapidity in polarized proton collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV, STAR Collaboration (L. Adamczyk, H. Masui *et al.*), Phys. Rev. **D89** (2014) 012001, DOI: 10.1103/PhysRevD.89.012001
71. Jet-Hadron Correlations in  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV  $p + p$  and Central Au+Au Collisions, STAR Collaboration (L. Adamczyk, H. Masui *et al.*), Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 122301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.122301
72. Freeze-out dynamics via charged kaon femtoscopy in  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV central Au+Au collisions, STAR Collaboration (L. Adamczyk, H. Masui *et al.*), Phys. Rev. **C88** (2013) 3, 034906, DOI: 10.1103/PhysRevC.88.034906
73. System-size dependence of transverse momentum correlations at  $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$  and 200 GeV at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider, STAR Collaboration (L. Adamczyk, H. Masui *et al.*), Phys. Rev. **C87** (2013) 6, 064902, DOI: 10.1103/PhysRevC.87.064902
74. Elliptic flow of identified hadrons in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 62.4$  GeV, STAR Collaboration (L. Adamczyk, H. Masui *et al.*), Phys. Rev. **C88** (2013) 1, 014902, DOI: 10.1103/PhysRevC.88.014902
75. Observation of an energy-dependent difference in elliptic flow between particles and anti-particles in relativistic heavy ion collisions, STAR Collaboration (L. Adamczyk, H. Masui *et al.*), Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 142301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.142301
76. Third Harmonic Flow of Charged Particles in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, STAR Collaboration (L. Adamczyk, H. Masui *et al.*), Phys. Rev. **C88** (2013) 1, 014904, DOI: 10.1103/PhysRevC.88.014904
77. Measurement of  $J/\psi$  Azimuthal Anisotropy in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, STAR Collaboration (L. Adamczyk, H. Masui *et al.*), Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 5, 052301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.052301
78. Experimental studies of di-jets in Au+Au collisions using angular correlations with respect to back-to-back leading hadrons, STAR Collaboration (L. Adamczyk, H. Masui *et al.*), Phys. Rev. **C87** (2013) 4, 044903, DOI: 10.1103/PhysRevC.87.044903

79.  $J/\psi$  production at high transverse momenta in  $p + p$  and Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, STAR Collaboration (L. Adamczyk, H. Masui *et al.*), Phys. Lett. **B722** (2013) 55-62, DOI: 10.1016/j.physletb.2013.04.010

<学位論文 (博士) >

1. 数理物質科学研究科・博士論文、伊藤由太 (Yuta Ito)、A multi-reflection time-of-flight mass spectrograph for high-precision mass measurements of short-lived nuclei (短寿命核精密質量測定のための多重反射型飛行時間質量分析器)
2. 数理物質科学研究科・博士論文、新井田貴文 (Takafumi Niida)、Measurements of Quantum Interference of Two Identical Particles with respect to the Event Plane in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV at RHIC-PHENIX (RHIC-PHENIX 実験 200 GeV 金+金衝突における同種 2 粒子を用いた量子力学的干渉効果の反応平面依存性の測定)
3. 数理物質科学研究科・博士論文、轟木貴人 (Takahito Todoriki)、Measurements of Two-Particle Correlations with respect to Higher-Order Event Planes in  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV Au + Au Collisions at RHIC-PHENIX (RHIC-PHENIX  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV 金・金衝突実験における二粒子相関の反応平面依存性の測定)
4. 数理物質科学研究科・博士論文、池田義雅 (Yoshimasa Ikeda)、Measurement of Particle Species Dependence of Elliptic Anisotropy with High Resolution Reaction Plane Detector at  $\sqrt{s_{NN}}=39, 62$  and 200 GeV Au+Au Collisions at RHIC-PHENIX (RHIC-PHENIX 実験での核子対あたり 39,62,200GeV 金+金衝突における高分解能反応平面検出器を用いた楕円型方位角異方性の粒子種依存性の測定)

<学位論文 (修士) >

1. 数理物質科学研究科・修士 (理学)、稲葉成紀 (Naruki Inaba)、回転磁場を使用した  $\beta$ -NMR による不安定核核磁気モーメントの符号測定
2. 数理物質科学研究科・修士 (理学)、大西貴博 (Takahiro Ohnishi)、低エネルギー領域における  $^{45}\text{Sc}(p, \alpha)^{42}\text{Ca}$  反応の研究
3. 数理物質科学研究科・修士 (理学)、岡田俊祐 (Shunsuke Okada)、稀少 RI リングに用いる飛行時間検出器の開発
4. 数理物質科学研究科・修士 (理学)、斉藤佑多 (Yuta Saito)、 $^{33}\text{Cl}$  の荷電変換断面積の測定と荷電核半径の導出
5. 数理物質科学研究科・修士 (理学)、向井もも (Momo Mukai)、KISS 実験のための高融点元素の高効率レーザー共鳴イオン化経路の探索
6. 数理物質科学研究科・修士 (理学)、大島一軌 (Kazuki Oshima)、LHC-ALICE 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV 陽子・鉛衝突における前方検出器を含めた長距離相関の研究 (Long-range angular correlation including forward rapidity detector in LHC-ALICE p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV)

7. 数理物質科学研究科・修士（理学）、尾崎瞳 (Hitomi Ozaki)、RHIC-PHENIX 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$  金・銅衝突における荷電粒子の高次方位角異方性の eta 依存性の研究 (Measurements of eta dependence of higher harmonic flow for charged hadron in  $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$  Cu+Au collisions at RHIC-PHENIX)
8. 数理物質科学研究科・修士（理学）、木原宏一 (Koichi Kihara)、RHIC-PHENIX 実験における荷電ハドロンを用いた 2 粒子相関及び高次方位角異方性の衝突システムサイズ依存性の研究 (System size dependence of higher harmonic azimuthal anisotropy for charged hadrons via two-particle correlations at RHIC-PHENIX)
9. 数理物質科学研究科・修士（理学）、小林大洋 (Taiyou Kobayashi)、LHC-ALICE 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{ TeV}$  鉛-鉛衝突におけるジェット対を伴った低横運動量ハドロン生成の研究 (Study on associated low pT hadron production with di-jet in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{ TeV}$  in LHC-ALICE)
10. 数理物質科学研究科・修士（理学）、田中直斗 (Naoto Tanaka)、LHC-ALICE 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{ TeV}$  鉛-鉛衝突における量子力学干渉効果のイベント平面に対する方位角依存性の研究 (Azimuthally sensitive HBT in  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{ TeV}$  Pb-Pb collisions at LHC-ALICE)

#### <招待講演 (国際会議) >

1. Akira Ozawa, Rare-RI Ring for Mass measurements at RIBF The 12th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG12) 2013, Nov. 18-21, International Congress Center EPOCHAL TSUKUBA, Tsukuba, Japan (招待講演)
2. T. Chujo, "Summary of recent results from LHC", 2013 RHIC & AGS Annual Users' Meeting, June 27, 2013, BNL, USA
3. S. Esumi, "Flow and Jet-correlation", 2nd Workshop on Initial State Fluctuations and Final State Correlations ( web ), August 11-14, 2013, Chengdu, China.
4. H. Masui, "Soft physics at RHIC", KPS(Korean Physical Society) 2013 fall meeting (Changwon, Korea, Oct. 30 - Nov. 1, 2013)
5. H. Masui, "RHIC Beam Energy Scan at STAR", Heavy Ion Meeting (Incheon, Korea, Nov. 2, 2013)

#### <招待講演 (国内) >

1. 小沢顕、Storage-ring mass spectrometry 第6回 RIBF 討論会「不安定核の質量」2013年5月24日（金）、理研仁科加速器センター（招待講演）
2. 笹 公和、筑波大学に導入される6 MV タンデム加速器での原子力教育の展望 2014年3月26日 日本原子力学会「2014年春の年会」（招待講演）
3. 益井宙「RHIC ビームエネルギースキンの最新結果と今後の展望」、第17回 Heavy Ion Pub、2013年9月13日、広島大学

<国際会議発表>

1. Akira Ozawa, “ Rare-RI Ring project ” University of Tsukuba and Beihang University Collaboration meeting on Nuclear Physics 2013, Nov. 11-12, Univ. Tsukuba, Tsukuba, Japan
2. Akira Ozawa, “ Rare-RI Ring project ” University of Tsukuba and Beihang University Collaboration meeting on Nuclear Physics 2013, Nov. 11-12, Univ. Tsukuba, Tsukuba, Japan
3. T. Komatsubara, “ Study for Big Bang Nucleosynthesis Concerning Lithium Isotopes ”, APPC12, The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS, Makuhari Messe, Chiba, Japan, July 14th-19th 2013.
4. T. Onishi, “ Study of Nucleosynthesis by means of  $^{45}\text{Sc}+p$  Reaction ”, APPC12, The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS, Makuhari Messe, Chiba, Japan, July 14th-19th 2013.
5. K. Sasa, “ Future prospects of the 6MV AMS project at the University of Tsukuba ”. 5th East Asia AMS Symposium, Daejeon, Korea, October 15-18, 2013.
6. T. Matsunaka, “ Paleoclimatic changes on the southern Tibetan Plateau after the Last Glacial Maximum recorded in Lake Pumoyum Co, and its implication for the Southwest monsoon evolution ”, 5th East Asia AMS Symposium, Daejeon Korea, 15-18 October 2013.
7. Kimikazu Sasa, “ Overview of 6 MV tandem accelerator project at UTTAC ” University of Tsukuba and Beihang University Collaboration meeting on Nuclear Physics 2013, Nov. 11-12, Univ. Tsukuba, Tsukuba, Japan
8. D. Watanabe, “  $\pi^0$ -jet correlations measurement for p+p and Pb+Pb 2.76 TeV”, (ALICE internal), ALICE Physics Week in Padova, May 19-24, 2013, Padova, Italy.
9. T. Chujo, “Exploitation of hard electro-magnetic probes and jets to study the QGP with LHC-ALICE”, FJPPL 2013, Joint Workshop of the France-Japan (TYL) and France-Korea (FKPPL) Particle Physics Laboratories, 4-6 June 2013, Yonsei University, Seoul, Republic of South Korea.
10. T. Niida, “Azimuthal angle dependence of HBT radii in Au+Au collisions at RHIC-PHENIX”, APPC12 The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS ASEPS3, The third Asia-Europe Physics Summit, July 14-19, 2013, International Conference Halls, Makuhari Messe Chiba, Japan
11. T. Kobayashi, “Study on associated low  $p_T$  hadron production with di-jet in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV in LHC-ALICE” (ALICE internal), APW 2013 Wuhan Combined ALICE Week and ALICE Physics Week 2013 Wuhan, 10-18 October 2013, Central China Normal University, Wuhan, China
12. J. Bhom, “Multiplicity dependence of two particle Delta phi, Delta eta correlation in proton-proton collisions at 7TeV center-of-mass energy with ALICE at LHC”, KPS(Korean Physical Society) 2013 fall meeting (Changwon, Korea, Oct. 30 - Nov. 1, 2013)

13. S. Esumi, "Recent results on Quark Gluon Plasma and Future Plans", Beihang-Tsukuba Collaboration Meeting, Nov. 10-11, 2013, Tsukuba
14. T. Niida, "Azimuthal angle dependence of HBT radii with respect to the Event Plane in Au+Au collisions at PHENIX, WPCF 2013 IX Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy, 5-8 November 2013, Acireale (Catania), Italy
15. T. Chujo, "ALICE STATUS", ALICE Physics Analysis and Tier-1/2 Workshop, Mar.3-7, 2014, Univ of Tsukuba, Japan
16. D. Watanabe, "Jet azimuthal distributions with high pT neutral pion triggers in pp collisions 7 TeV in ALICE", ALICE Physics Analysis and Tier-1/2 Workshop, Mar.3-7, 2014, Univ of Tsukuba, Japan
17. T. Kobayashi, "Di-jets in p-p and Pb-Pb", ALICE Physics Analysis and Tier-1/2 Workshop, Mar.3-7, 2014, Univ of Tsukuba, Japan
18. S. Esumi, "Flow measurements in ALICE experiment", ALICE Physics Analysis and Tier-1/2 Workshop, Mar.3-7, 2014, Univ of Tsukuba, Japan
19. J. Bhom, "Multiplicity dependence of long and short range two particle correlations in  $\sqrt{s} = 7$  TeV proton - proton collisions at LHC-ALICE experiment", ALICE Physics Analysis and Tier-1/2 Workshop, Mar.3-7, 2014, Univ of Tsukuba, Japan
20. K. Oshima, "Long range correlation including forward rapidity detector in p+Pb collision  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV LHC-ALICE experiment", ALICE Physics Analysis and Tier-1/2 Workshop, Mar.3-7, 2014, Univ of Tsukuba, Japan
21. M. Inaba, "EMCal/ DCal Upgrade", ALICE Physics Analysis and Tier-1/2 Workshop, Mar.3-7, 2014, Univ of Tsukuba, Japan
22. H. Masui and R. Hosokawa, "EMCal/DCal L1 gamma and jet trigger", ALICE Physics Analysis and Tier-1/2 Workshop, Mar.3-7, 2014, Univ of Tsukuba, Japan
23. T. Chujo, "Forward Direct Photons with FoCal in ALICE", ALICE Physics Analysis and Tier-1/2 Workshop, Mar.3-7, 2014, Univ of Tsukuba, Japan

#### <日本物理学会発表>

1. 阿部康志、稀少 RI リングのビームモニターの開発、日本物理学会秋季大会、2013 年 9 月 20-23 日、高知大学
2. 小沢顕、理研 RIBF における稀少 RI リングの展望、日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 29 日、東海大学湘南キャンパス（招待講演）
3. 笹公和、シンポジウム：新たな加速器技術の放射線物理研究への適用と今後の展望 -はじめに - 日本物理学会 第 69 回年次大会、2014 年 3 月 27-30 日 東海大学
4. 新井郁也、高エネルギー RI 用ガスキャッチャーのための高圧下における ion surfing 型 RF カーペットの性能評価、日本物理学会 第 69 回年次大会、2014 年 3 月 27-30 日 東海大学

5. 中條達也 シンポジウム・高温クォーク物質研究の最前線：発見から物性研究へ「RHIC/LHC/J-PARC の次期計画；高エネルギー重イオン衝突の新展開」、日本物理学会 2013年秋季大会（2013年9月20日-9月23日）（高知大学朝倉キャンパス）
6. 水野三四郎 「RHIC-PHENIX 実験における高次方位角異方性の直接光子依存性の研究」、日本物理学会 2013年秋季大会（2013年9月20日-9月23日）（高知大学朝倉キャンパス）
7. 小林大洋 「Study on associated low pT hadron production with di-jet in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV in LHC-ALICE」、日本物理学会 2013年秋季大会（2013年9月20日-9月23日）（高知大学朝倉キャンパス）
8. 大島一軌 「LHC-ALICE 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV 陽子・鉛衝突における前方検出器と中心検出器を用いた2粒子相関の研究」、日本物理学会 2013年秋季大会（2013年9月20日-9月23日）（高知大学朝倉キャンパス）
9. 水野三四郎 「RHIC-PHENIX 実験における  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV AuAu 衝突を用いた直接光子の方位角異方性の研究」、日本物理学会 第69回年次大会（2014年3月27日-3月30日）（東海大学湘南キャンパス）
10. 大島一軌 「LHC-ALICE 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV 陽子・鉛衝突における前方検出器を含めた長距離相関の研究」、日本物理学会 第69回年次大会（2014年3月27日-3月30日）（東海大学湘南キャンパス）
11. 尾崎 瞳 「RHIC-PHENIX 実験における  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV 金・銅衝突を用いた荷電粒子の高次方位角依存性の測定」、日本物理学会 第69回年次大会（2014年3月27日-3月30日）（東海大学湘南キャンパス）

#### <国内学会発表>

1. 小沢顕、二重魔法数エキゾチック核  $^{78}\text{Ni}$  の質量精密測定、新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」公募研究交流会 2013年9月12日（木）、東北大学理学部
2. 小沢顕、筑波大学6 MV タンデム加速器による原子核実験の展望、UTTAC 研究会 2014「筑波大学複合タンデム加速器施設の研究展望 - 6 MV タンデム加速器による新たな研究の創出と展開」、2014年3月18日（火）、筑波大学
3. 笹 公和、筑波大学6 MV タンデム加速器の導入計画と研究プロジェクトの概要、第26回 タンデム加速器及びその周辺技術研究、ホテルキャスル山形、2013年7月5-6日
4. 笹 公和、筑波大学6 MV タンデム加速器システム導入計画の現状、第10回日本加速器学会、名古屋大学 2013年8月3日（土）～5日（月）
5. 笹 公和、加速器質量分析法 (AMS) 及びイオンビーム分析法 (IBA) の原理と応用、第52回核化学夏の学校、千葉県 国民宿舎 サンライズ九十九里、2013年8月26日-28日。
6. 笹 公和、福島第一原発事故により放出された  $^{129}\text{I}$  の陸域環境での分布状況と  $^{131}\text{I}$  降下量の復元、2013年度日本地球化学会第60回年会、つくば、9月11日-13日。

7. 笹 公和、筑波大学 6 MV AMS システムの導入状況、第 16 回 AMS シンポジウム、東京大学大気海洋研究所講堂、2014 年 3 月 19 - 20 日
8. 泉大希、粒子・重イオン輸送計算コード PHITS を用いた  $^{36}\text{Cl}$ -AMS シミュレーションと測定結果の比較、第 16 回 AMS シンポジウム、東京大学大気海洋研究所講堂、2014 年 3 月 19 - 20 日
9. 松中哲也、筑波大学 6MV AMS システムによる  $^{14}\text{C}$  測定の計画について、研究集会「樹木年輪の  $^{14}\text{C}$  年代測定の実験室間比較による高精度の歴年代較正データの確立」、名古屋、2014.3.22-23.
10. 松中哲也、帰還困難区域における福島第一原子力発電所事故前後の土壌中の  $^{129}\text{I}$  深度分布、第 16 回 AMS シンポジウム、柏、2014.3.19-20.
11. 松中哲也、蔵王山熱水系における  $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  を用いた火山活動モニタリングの試み、第 15 回「環境放射能」研究会、つくば、2014.3.6-8.
12. 松中哲也、チベット高原南部域の湖沼堆積物に基づく 19,000 年前以降の南西モンスーン変動の解析、2013 年度日本地球化学会年会、つくば、2013.9.11-13
13. 松中哲也、筑波大学における  $^{14}\text{C}$ -AMS システムの高度化計画、第 26 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、山形、2013.7.5-6
14. 福岡翔太、J-PARC 主リングにおける補償用キッカー電磁石試験機の実験的解析、第 10 回日本加速器学会、名古屋大学 2013 年 8 月 3 日(土)～5 日(月)
15. 江角 晋一 「フローとジェットに関する実験的解析」, 「RHIC-LHC 高エネルギー原子核反応の物理研究会」QGP の物理研究会 信州合宿, 2013 年 6 月 22 日、23 日、長野県
16. 中込 宇宙 「PHENIX 実験におけるフロー解析」, 「RHIC-LHC 高エネルギー原子核反応の物理研究会」QGP の物理研究会 信州合宿, 2013 年 6 月 22 日、23 日、長野県
17. 益井宙 「STAR results from RHIC Beam Energy Scan」, J-PARC 重イオンミーティング (東海・日本原子力研究開発機構)、2013 年 9 月 12 日
18. 江角 晋一, "RHIC、LHC における高エネルギー重イオン衝突による クォーク・グルーオン・プラズマ研究の現状と展望", 第二回中性子星核物質研究会, 2013 年 12 月 27-28 日, 理化学研究所・和光キャンパス.

#### <非常勤講師・セミナー等>

1. 中條 達也, "加速器で分かる宇宙の歴史", 「若い世代のための出前講義 (筑波大学東日本大震災復興・再生支援プログラム事業)」, 2013 年 11 月 15 日、岩手県立久慈高等学校

#### <科学研究費取得状況>

1. 基盤研究 (B) 「蓄積リングおよび原子核実験用の窓無し固体水素パラ標的の開発」、研究期間：2011-2013 年度、研究代表者：石元茂、研究分担者：小沢顕、2013 年度：200 千円
2. 基盤研究 (C) 「ビッグバン元素合成におけるリチウム合成機構の解明」、研究期間：2012-2013 年度、研究代表者：小松原哲郎、2013 年度：700 千円

3. 若手研究 (B) 「磁気双極子モーメントの符号決定手法の開発」、研究期間：2012-2013 年度、研究代表者：長江大輔、2013 年度：1,300 千円
4. 基盤研究 (A) 「加速器質量分析法を用いた人為起源の長寿命放射性核種分析による環境影響評価」、研究期間：2012 - 2015 年度、研究経費：直接経費 33,700 千円、間接経費 10,110 千円、研究代表者：笹 公和、研究分担者：末木啓介、松崎浩之、松四 雄騎、松村宏
5. 挑戦的萌芽研究 「難測定核種カルシウム 41 を高エネルギー加速器質量分析により超高感度で検出する試み」、研究期間：2011 - 2013 年度、研究経費：直接経費 2,700 千円、間接経費 810 千円、研究代表者：笹 公和、研究分担者：末木啓介、木下哲一、松四 雄騎
6. 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「福島原発事故により放出された放射性核種の環境動態に関する学際的研究」「水・土砂移動に伴う放射性物質の移行過程の理解」、研究期間：2012 - 2016 年度、研究経費：直接経費：85,200 千円、間接経費：25,560 千円、研究代表者 恩田 裕一、研究分担者 笹 公和 (分担額: 2013 年度 直接経費 1,300 千円)
7. 基盤研究 (C) 「M-type 花崗岩の熱水流体の組成と挙動」、研究期間：2012 - 2014 年度、研究経費：直接経費 3,600 千円、間接経費 1,080 千円、研究代表者 黒澤正紀、研究分担者 笹 公和 (分担額: 2013 年度 直接経費 50 千円)
8. 基盤研究 (B) 「粒子・ジェット方位角相関測定によるグルーオン衝撃波の探索」、研究期間：H 25 年度～H 28 年度、研究経費 (H 25 年度)：直接経費 2,200 千円、間接経費 660 千円、研究代表者：三明康郎、研究分担者：江角晋一、中條達也
9. 基盤研究 (B) 「LHC-ALICE 実験・前方光子検出器のための高速読み出し系の開発」、研究期間：H 25 年度～H 27 年度、研究経費 (H 25 年度)：直接経費 4,482 千円、間接経費 1,530 千円、研究代表者：中條達也、研究分担者：三明康郎、杉立徹、稲葉基
10. 新学術領域研究 (公募研究) 「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」「高温高密度クォーク物質の QCD 臨界点探査」、研究期間：H 25 年度～H 26 年度、研究経費 (H 25 年度)：直接経費：900 千円、間接経費：270 千円、研究代表者：江角晋一

#### <外部資金取得状況>

1. JST/CREST 「持続可能な水利用を実現する革新的な技術とシステム」平成 23 年度採択課題 「安全で持続可能な水利用のための放射性物質移流拡散シミュレータの開発」代表 東京大学 沖 大幹、CREST 移流拡散チーム 末木グループ 研究代表者 末木啓介、研究分担 笹 公和、恩田裕一、研究者分担金 笹 公和 2013 年度: 300 千円
2. 筑波大学・KEK 連携事業「物質-量子ビーム融合領域」素粒子原子核分野 (原子核・加速器科学分野) 笹 公和、小沢 顕、中條達也 1,450 千円 (2013 年度)
3. 日本学術振興会 二国間交流事業・共同研究 (フランス (CNRS) との共同研究) 「電磁カロリメータ検出器によるクォーク・グルーオンプラズマ超高温相の物性研究」、研究期間：H 25 年度～H 26 年度、研究経費 (H 25 年度)：2,500 千円、研究代表者：中條達也
4. The France-Japan (TYL, 日仏素粒子物理学研究所 (FJPPL) )、「Exploitation of hard em probes and jets to study the QGP with LHC-ALICE」研究期間：2010 年度～2013 年度、研究経費 (2013 年度)：4,000 ユーロ (フランス研究機関のみ)、研究代表者：三明康郎、Y. Schutz

### <学内プロジェクト>

1. 平成 26 年度筑波大学・ドイツ学術交流会 (DAAD) パートナーシップ・プログラム (筑波-DAAD 共同研究プログラム) 「量子ビームを用いた高効率太陽電池の研究 (Studies of high-efficiency solar cells using quantum beams)」2014 年 4 月 1 日～2016 年 3 月 31 日代表 上殿明良、分担 秋本克洋、櫻井岳暁、笹公和、平成 26 年度 1,214 千円、平成 27 年度 589 千円
2. 2011 筑波大学 東日本大震災復興支援プログラム「東日本大震災による原発事故後の放射性核種の汚染の実態と対策」研究代表者 松本 宏 アイソトープ環境動態研究センター長、研究者分担金 笹 公和 150 千円 (2013 年度)
3. 平成 25 年度 筑波大学研究基盤支援プログラム (A タイプ), 「宇宙線生成核種  $^{14}\text{C}$  と  $^{10}\text{Be}$ ・ $^{26}\text{Al}$  によるヒマラヤ氷河後退の年代と速度の研究」、代表：松中哲也、採択金額：268 千円

### <研究会開催>

1. ALICE Physics Analysis and Tier-1/2 Workshop、実施期間：平成 26 年 3 月 3 日 (月) ～7 日 (金)、実施場所：筑波大学 大学会館特別会議室、第 1 会議室、国内参加者 40 名、国外参加者 40 名、合計 80 名、主催：数理物質系物理学域、主催者：中條達也、杉立徹、Y. Shutz, G. Balbastre Conesa, L. Betev  
会議 Web ページ: <http://indico.cern.ch/event/274974/>

### <紹介記事>

1. 高エネルギーニュース、Vol.32 No.1 2013/04.05.06、「LHC—ALICE 実験の初期成果」(志垣賢太、中條達也、郡司卓) <http://www.jahep.org/hepnews/>