

## VI. 原子核実験グループ

|       |   |
|-------|---|
| 教授    | 小沢顕、江角晋一  |
| 准教授   | 笹公和   |
| 講師    | 中條達也  |
| 助教    | 森口哲朗、新井田貴文、野中俊宏、Norbert Novitzky、轟木貴人   |
| 研究員   | Ashutosh Kumar Pandey、坂井真吾  |
| 技官    | 加藤純雄  |
| 大学院生  | 19名（数理解物質科学研究科後期課程2名、前期課程16名、教育研究科前期課程1名）<br>西谷理佐 (D2)、熊岡卓哉 (D1)、市沢太地 (M2)、一色萌衣 (M2)、伊藤直利 (M2)、<br>大久保孝祐 (M2)、佐藤優里 (M2)、須藤悠久 (M2)、津久井宏祐 (M2)、富田啓介 (M2)、<br>中里龍馬 (M2)、矢崎敬祐 (M2)、Park Hanseo (M1)、江下もも (M1)、岡田柊人 (M1)、<br>要直登 (M1)、喜屋武奨之 (M1)、田辺飛鷹 (M1)、千葉俊哉 (M1) |
| 卒業研究生 | 9名<br>藤谷有輝、浅水微野、池田誠、岩永一希、榎本真隆、<br>大池駿、永田遼太郎、林実香、矢野朝陽  |

理化学研究所のRIBF施設における元素合成研究による宇宙における物質生成のメカニズム、超新星爆発、中性子星合体、ブラックホール合体における物質生成を紐解く研究を推進した。CERN研究所のLHC加速器や、BNL研究所のRHIC加速器を用いた高エネルギーの原子核実験衝突実験により、高温の宇宙初期状態から高密度の中性子星内部の状態にわたる広範囲のQCD層構造の解明を目指している。2018年度末から始まったRHICにおける第2期ビームエネルギー走査実験（BES-II）により、QCD臨界点と1次相転移の探索実験を行った。将来計画としては、ALICE-FoCalによる衝突初期の解明を行い、GSI-FAIR計画やJ-PARC施設での重イオン加速計画などによる、臨界点の向こう側の高密度領域を目指す。

クロスアポイント教員の、埼玉大学の山口貴之氏は、理研のRIBF施設における元素合成に関する共同研究を進めた。オランダ・ユトレヒト大学のThomas Peitzmann氏、Marco van Leeuwen氏は、ALICE実験でFoCal検出器の開発研究を共同で進めた。また、原子力研究開発機構の佐甲博之氏、高エネルギー加速器研究機の小沢恭一郎氏は、J-PARC施設における高密度核物質研究に関する共同研究を進めた。

### [1] 低エネルギー原子核実験グループ

(小沢顕、笹公和、森口哲朗)

#### (1) 稀少RIリングでのNi領域の質量測定

自然界に存在する元素のうち、鉄より重い元素の約半数の元素は、rプロセスと呼ばれる早い中性子捕獲過程で生成されたと考えられている。しかしながら、rプロセスは、その起源などまだ未解明の点が多い。我々は、rプロセス解明を目指し、rプロセスを決める物理量の中で質量に注目し、理化学研究所の稀少RIリング(R3)において、rプロセスに関与すると考えられている中性子過剰不安定核の質量測定に取り組んでいる。2020年度は、R3のキッカー磁石のアップグレードを行い、マシンスタディを行った。

これまでのR3のキッカー磁石の磁場波形は図1(a)の黒線に示したように正弦波に近い形をしてお

り、入射する粒子のタイミングによりキック量が変わるという問題があった。以前、 $^{78}\text{Kr}$  ビームで確認した際の結果が図 1(a) の黒丸で示されている。今回は、3 台あるユニットにキャパシターを付け波形をずらして重ねることにより、フラットトップを作ることを試みた。キッカー磁石に印加する電流波形から予想したキッカー磁石の磁場波形が図 1(b) の青線で示されている。この磁場波形を確かめるためにマシンスタディを行った。 $^{238}\text{U}$  の一次ビームから、約  $165\text{MeV/u}$  の  $^{75}\text{Ga}$  を生成し、R3 に入射した。キッカー磁石直後のプラスチックシンチレーターで  $^{75}\text{Ga}$  のイベントを測定した。図 1(b) にキッカー磁石印加のトリガーのタイミングを変えた時のイベント量を示した (青丸)。イベント量は、500ns から 600ns でほぼ一定を示し、約 100ns のフラットトップが形成できたことが確認できた。今後は、このキッカー磁石波形を使って質量測定を行う予定である。

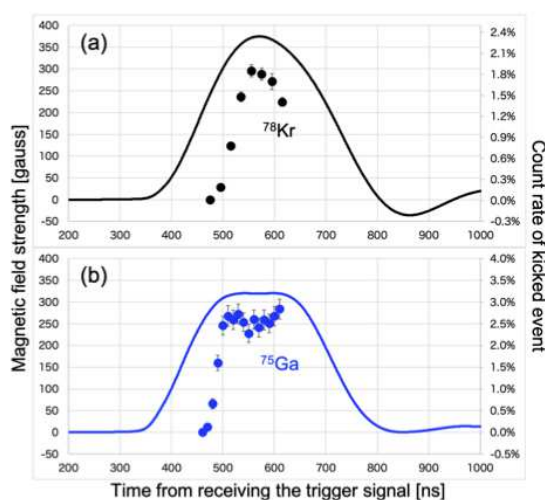


図 1 (a) これまでのキッカー磁石の磁場波形 (黒線) と生成量の測定結果。(b) 今回のキッカー磁石の磁場波形 (青線) と生成量の測定結果

## (2) 回転磁場による不安定核 $^{29}\text{P}$ の核磁気モーメントの符号の測定

我々は、不安定核の核磁気モーメントの符号の測定のための回転磁場を発生させるための高周波系を開発してきた [1]。2020 年度は、不安定核  $^{29}\text{P}$  の核磁気モーメントの符号を決定した。我々のシステムでは、回転磁場を発生させるために交差コイルを使うが、交差コイル間に位相差をつけるために、二つの高周波系の間にケーブルディレイを入れている。実験は、筑波大学 6 MV タンデム加速器で行った。12MeV まで加速した偏極陽子ビームを Si 標的に照射し、偏極した  $^{29}\text{P}$  を生成した。静磁場の方向は下向きで、1.647kG に設定し、高周波は、この磁場のラーモア周波数を含む、 $3.10 \pm 0.05\text{MHz}$  に設定した。この周波数は、320ns の周期に相当する。オフラインの測定で、ケーブルディレイを 80ns にしたときに、右回りの回転磁場が生成することがわかっている。測定された  $\beta$ -NMR エフェクトのケーブルディレイ依存性を図 2 に示した。この図から、50ns ディレイを入れたときに、 $\beta$ -NMR エフェクトが消えたことがわかる。核磁気モーメントの符号が正であれば、静磁場が下向きで右回りの回転磁場で NMR エフェクトが消えるので、今回の結果から、 $^{29}\text{P}$  の核磁気モーメントの符号は正であることがわかった。正の符号は、単一粒子模型からの予測と一致している。今後は、 $^{25}\text{Al}$  など、核磁気モーメントの絶対値は測定されているが、符号が決定されていない不安定核の核磁気モーメントの符号決定を行っていく。

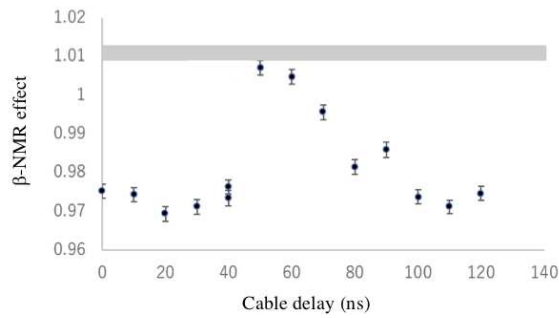


図2  $^{29}\text{P}$ に対する $\beta$ -NMRエフェクトのケーブルディレイ依存性。灰色のハッチは、高周波オフでのエフェクトを示す。

### (3) 稀少 RI リングで用いる位置敏感型検出器 (BE-MCP90) の開発

稀少 RI リングを利用した不安定核の精密質量測定にとって、輸送するビームの質（位置や角度等）を最適化することは、リングへの入射および出射効率だけでなく質量精度（運動量の補正に位置情報を使う）の向上につながる。現在、炭素薄膜と2枚のMicro Channel Plate (MCP) によって構成された位置敏感型検出器 (BE-MCP90) の開発を進めている。図3に BE-MCP90 の構造を示す。イオンビームが炭素薄膜を通過する時に発生する二次電子を、磁場 (B) と電場 (E) によって前後の MCP へと輸送し検出する仕組みである。MCP は薄膜に対して 90 度傾いている。BE-MCP90 は、イオンビームが薄膜へ入射する位置 (x 軸方向) と前後に発生した二次電子が MCP に到達するまでの飛行時間の差に相関があることを利用する。BE-MCP90 は、物質厚が小さい (薄膜のみ) ことが特徴であり、我々のグループが開発した飛行時間検出器 (BE-MCP) [2] を応用し位置敏感型に改良したものである。位置分解能が磁場に依存することから、2020 年度は磁場を変化させた時の性能評価を行った。実験は放射線医学総合研究所の HIMAC で行った。核子あたり 200 MeV の Kr ビームを BE-MCP90 に照射し、磁場を 36, 49, 60 Gauss と変えて測定を行った。測定からいずれの磁場においても位置分解能は  $\sigma$  1.7 mm だった。これは位置分解能が MCP の時間分解能や磁場の不均一性に起因しているためと予想される。今後は、これらをシミュレーション等を用いて調べるとともに、MCP の検出範囲を広げた評価を行う予定である。

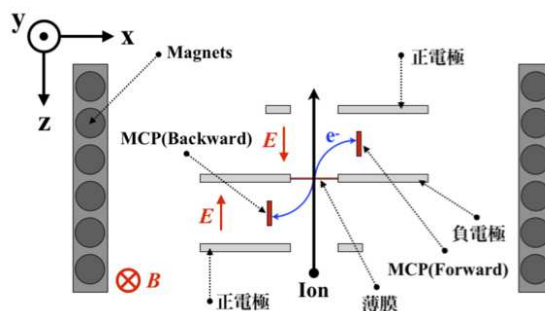


図3 位置敏感型検出器 (BE-MCP90) の構造。

### (4) $^{30}\text{P}$ の核磁気モーメント測定に向けた最適条件の検討

核磁気モーメント ( $\mu$ ) は原子核の核構造を反映した物理量であるため、これを実験的に測定することは大変重要である。特に、鏡映核の  $\mu$  を測定することが出来ると軌道角運動量期待値とスピン角運動量期待値を計算することが可能である。我々は自己鏡映核であり実験的に測定されていない  $^{30}\text{P}$  の  $\mu$  を、 $\beta$  線放出の非対称性を利用した核磁気共鳴法 ( $\beta$ -NMR 法) により測定しようと考えている。本研

究では $\mu$ が測定できていない $^{30}\text{P}$ の代わりに、原子番号が同じで標的中の超微細相互作用が同じだと考えられ、既に $\mu$ が測定できている $^{29}\text{P}$ を用いて、ビームエネルギーと標的について最適条件の検討を行った。

まず、 $\bar{p} + \text{nat. Si}$  反応による生成量のビームエネルギー依存性を解析した。ビームエネルギーを6、8、10、12 MeVと変化させたところ、ビームエネルギーの上昇に伴って $^{29}\text{P}$ の生成量は増加した。次に、 $^{29}\text{P}$ の核スピン偏極に比例する $\beta$ -NMRエフェクトのビームエネルギー依存性を確認した。それぞれの結果を示したのが図4で、横軸がビームエネルギー、左縦軸が生成量、右縦軸が $\beta$ -NMRエフェクトである。図4では $\beta$ -NMRエフェクトの大きなビームエネルギー依存性が無いことが分かる。以上から、 $^{30}\text{P}$ の $\mu$ 測定は12 MeVのビームエネルギーで行うことが最適であると結論付けた。最後に、 $\beta$ -NMRエフェクトの標的依存性を確認した。 $\text{nat. Si}$ を含む標的として、半導体Si、 $\text{SiO}_2$ 、SiCの3つを使用したところ、半導体Siとその他の標的の間で有意な $\beta$ -NMRエフェクトの大きさの差がみられた。この結果から、ビーム標的としては半導体Siを使用するのが最適だと結論付けた。 $\text{SiO}_2$ は切り出し面が(2-1-10)と(0001)の2種類を用いて測定を行った。これは標的内の対称性によって超微細相互作用が変わりうるからであり、今後は標的内の対称性を検討したうえで測定を行う。

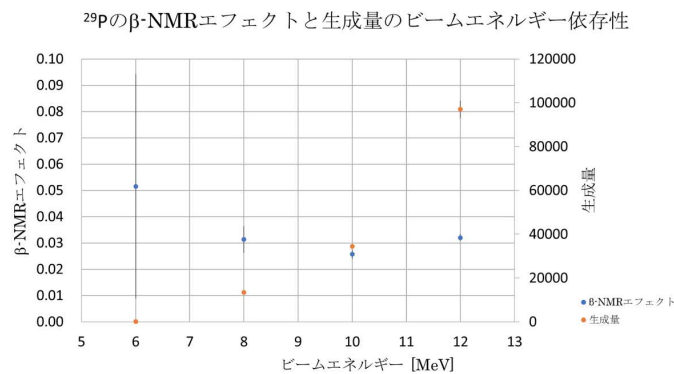


図4  $^{29}\text{P}$ の $\beta$ -NMRエフェクトと生成量のビームエネルギー依存性。

#### (5) マイクロビームを用いた透過ERDAによる水素深さ分布測定法の開発

筑波大学6 MV タンデム加速器に設置したマイクロビーム分析装置において、8 MeVの $^4\text{He}$ ビームを数 $\mu\text{m}$ に収束させて、透過型の弾性反跳粒子検出分析法(Elastic Recoil Detection Analysis: ERDA)を用いた水素分析法の開発を進めている。7-10 MeVの $^4\text{He}$ イオン入射による水素原子核の反跳断面積は前方に集中するとともに、クーロン散乱過程よりも2桁程度大きな断面積を有する。また、マイクロビーム走査と合わせて、広い立体角全体で反跳水素粒子を検出することにより、水素原子の3次元イメージング測定が可能となる。アルミニウム材料中の水素を想定して、表1に示すような3つの水素模擬試料(S-1, S-2, S-3)を用意した。PPS [polyphenylene sulde ( $\text{C}_6\text{H}_4\text{S}$ ) $_n$ ] フィルムの厚さは、 $1.35 \pm 0.05 \mu\text{m}$ であった。また、ビーム前方方向に設置した半導体検出器のアクセプタンスは $4.1^\circ$ であった。測定結果とTRIMによる理論計算結果を図5に示す。この結果より、8 MeVの $^4\text{He}$ ビームを用いた透過ERDA法による、アルミニウム材料中の水素の深さ方向測定の分解能は、 $1.5 - 4.9 \mu\text{m}$ となった[3]。

#### (6) 加速器質量分析法を用いた放射性ヨウ素129測定におけるバックグラウンド

長半減期放射性ヨウ素129 ( $^{129}\text{I}$ : 半減期 1,570 万年) は、人為起源および自然起源により地球環境中に極微量に存在している核種である。ヨウ素同位体比 ( $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ) の測定は、地殻、大気、海洋などの

表 1 水素含有アルミニウムの模擬試料

| Sample name and structure                            | Peak energy (MeV) | FWHM (MeV) | FWHM ( $\mu\text{m}$ ) | $\Delta z$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|--|-------------------|------------|------------------------|------------------------------|
| S-1: PPS/Al(50 $\mu\text{m}$ )                       | 4.25              | 0.130      | 1.81                   | 1.59                         |
| S-2: Al(10 $\mu\text{m}$ )/PPS/Al(50 $\mu\text{m}$ ) | 3.31              | 0.160      | 1.78                   | 1.56                         |
| S-3: Al(20 $\mu\text{m}$ )/PPS/Al(50 $\mu\text{m}$ ) | 2.14              | 0.202      | 1.68                   | 1.45                         |

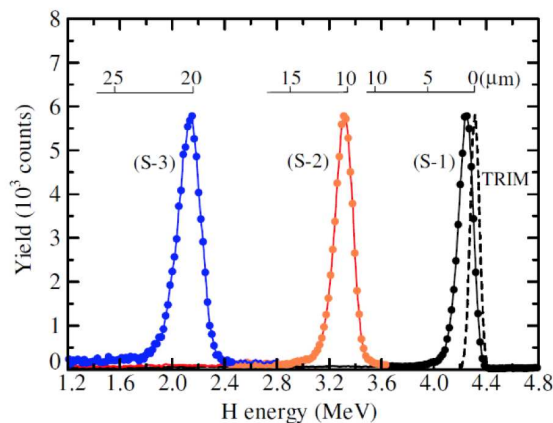


図 5 8 MeV- $^4\text{He}$  ビームによる透過 ERDA を用いた S-1, S-2, S-3 の反跳水素粒子の測定結果と  $0^\circ$  方向反跳水素の TRIM 計算結果。半導体検出器のアクセプタンスは  $4.1^\circ$  である。

様々な研究分野において利用されている。筑波大学加速器質量分析装置 (AMS) では、ヨウ化銀 (AgI) のターゲットから、スパッタリングで I $^-$  を引き出し、5 MV で I $^{5+}$  を 30 MeV まで加速している。同位体比の低い試料を測定する場合、バックグラウンドを如何に下げることが重要となる。筑波大学 AMS の  $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  のバックグラウンド測定では、米国 DeepWater 社の Old iodine 試料 ( $^{129}\text{I}/^{127}\text{I} \sim 1\text{-}2 \times 10^{-14}$ ) から作製したヨウ化銀 (試薬ブランク) を用いている。 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  のバックグラウンドに寄与する要因としては、試料調製で添加する  $^{127}\text{I}$  キャリアー、試料調製を行う部屋の  $^{129}\text{I}$  レベル、測定中のメモリー効果などがある。図 6 に、試薬ブランクの 5 分  $\times$  5 回測定、または 3 分  $\times$  11 回測定による、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  のバックグラウンドの平均値を示す。2018 年から 2019 年にかけて、福島事故起源の試料測定などによりバックグラウンドの測定値が上昇した。しかし、試料作製過程の対策の結果などにより、2020 年度のバックグラウンドは  $^{129}\text{I}/^{127}\text{I} \sim 2 \times 10^{-14}$  となり、 $10^{-14}$  台の前半の測定が実現できるようになった [4]。

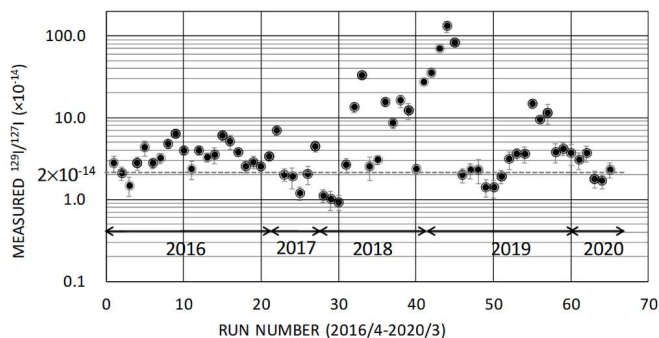


図 6  $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  のバックグラウンド測定の平均値の変化

## [2] 高エネルギー原子核実験グループ

(江角晋一、中條達也、新井田貴文、野中俊宏、Norbert Novitzky、  
轟木貴人、Ashutosh Kumar Pandey、坂井真吾、加藤純雄)

### (1)LHC-ALICE 実験における包括ジェットの原子核効果因子の測定

高エネルギー重イオン衝突で生成されるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の物性を解明する上で、ジェットは強力なプローブとなる。ジェットとは初期パートンの硬散乱によって生成されたクォークやグルーオンが円錐状に拡散する現象である。陽子・陽子衝突でのジェットの生成断面積は、理論モデルの値とよく一致することが分かっている [5]。一方、重イオン衝突実験では、ジェットの生成断面積は単純な核子・核子衝突の重ね合わせでは説明することができず、収量が大きく減少する。これをジェット抑制効果と呼ぶ。ジェットの起源となる初期パートンが、QGP 中でエネルギー損失をすることに起因すると考えられている。

これまで、2015 年に ALICE で取得した鉛・鉛原子核衝突 ( $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV) の結果を用いて、原子核効果因子 ( $R_{AA}$ ) の測定が行われた [6]。その結果、中心衝突度 0-10 %、横運動量 45-140 GeV/c の範囲において、原子核効果因子は 1 を下回りジェットの生成が大きく抑制されていることが分かった (図 7)。しかしながら、ジェットの生成断面積は様々なジェット抑制効果を取り入れたモデル予想があり、いずれも実験データと良い一致が見られていない。

今回我々は、これまでのデータに対し 3 倍の統計量を持つ高統計の鉛・鉛衝突データ (2018 年取得) を用いて、これまで測定できなかった低・高の横運動量領域、および異なる中心衝突度に対して、原子核効果因子の測定を行っている。検出器効果の補正前のジェットの横運動量分布を測定し、日本物理学会にて報告した (2020 年 9 月)。今後、検出器効果および背景事象の効果の補正、系統誤差の評価を行い、理論モデルと比較し、エネルギー損失機構の更なる解明を目指す。

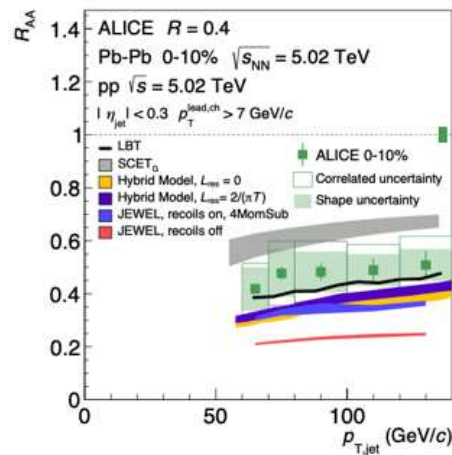


図 7 鉛・鉛  $\sqrt{s} = 5.02$  TeV (2015 年取得データ), 0-10% 中心衝突における  $R_{AA}$  [6]。

### (2)LHC-ALICE 実験における荷電ジェット生成の粒子多重度依存性の測定

LHC ALICE 実験において、陽子・陽子衝突  $\sqrt{s} = 13$  TeV における荷電粒子のジェット測定を行い、その粒子多重度依存性を調べた。測定した横運動量領域は  $5 < p_T < 140$  GeV/c である。ジェットの再構成には anti- $k_T$  アルゴリズムを用い、ジェット分解能パラメータ  $R$  は 0.2-0.7、擬ラピディティ領域

は  $|\eta| < 0.9 - R$  の範囲で測定した。得られた実験データを LO, NLO 摂動 QCD 計算と比較した。その結果、NLO 摂動 QCD 計算と概ね良い一致が見られたが、低い横運動量領域では、NLO 摂動 QCD 計算でもデータを再現しないことが分かった (POWHEG+PYTHIA8, 図 8)。

またミニマム・バイアス事象、すなわち粒子多重度による事象選択を行わない条件での測定に加えて、今回新たに、前方方向の粒子検出器 (V0) を使った、粒子多重度毎のジェット収量を測定した。その結果、ジェットの収量は、高い粒子多重度事象ではミニマム・バイアス事象に比べて高く、低い粒子多重度事象では低くなることがわかった。ミニマム・バイアス事象に規格化されたジェット収量は、(規格化された) 生成荷電粒子数とともに増加し、その増加の仕方 (傾き) は 1 より大きいことがわかった。またこれらの結果は、ジェットの横運動量とジェット分解能にほとんど寄らないこともわかった。今後、実験とデータとの詳細な比較により、多重パートン散乱 (Multi-Parton Interaction, MPI) の影響等、高粒子多重度事象でのジェット生成機構が明らかになることが期待される。本研究は、現在、ALICE 実験内の論文提案が承認され、投稿論文の内部レビューが進んでいる。

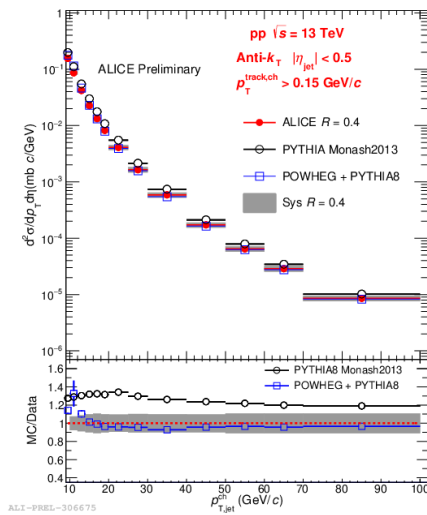


図 8 陽子・陽子  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  衝突における荷電ジェットの横運動量分布と理論モデル ( $R = 0.4$ )。

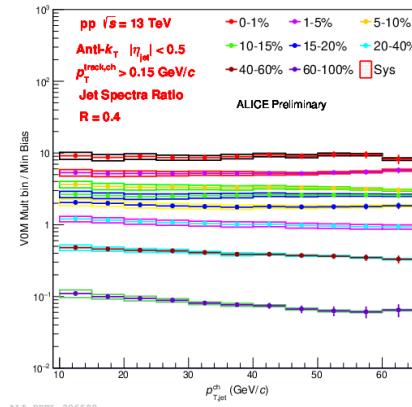


図 9 陽子・陽子衝突  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ,  $R = 0.4$  における荷電ジェットの横運動量分布の比。分母はミニマム・バイアス事象のジェット収量、分子は粒子多重度毎のジェットの収量。

### (3)LHC-ALICE 実験における heavy flavour 生成の測定

チャームクォークやボトムクォークなどの重いクォークは衝突初期のハードな散乱で主に生成され、その生成は量子色力学 (QCD) により理解されてきた。そのため高エネルギー原子核衝突実験で重いクォークを測定することにより、QGP 中でのパートン運動力学や性質が明らかにできると期待されている。また QCD の予言によるとパートンは QGP 中でカラー荷、質量などに依存してエネルギーを失うことが予言されており [7]、重いクォークを用いたエネルギー損失の研究は高温高密度下での QCD 検証という点においても重要な役割を果たす。我々のグループは  $D$  中間子や  $B$  中間子から崩壊してくる電子を測定することにより、その生成量が強く抑制されていることを発見し [8]、さらなるエネルギー損失機構の解明のために方位角異方性の強度 ( $v_2$ ) の測定を行っている。

近年小さい衝突系である陽子-陽子衝突や、陽子-鉛衝突での高粒子多重度事象においても、リッジ構造や有限の  $v_2$  など、重イオン衝突と同様の結果が得られている。これらの現象は未だ理論的に解明され

ておらず、小さい衝突系における高粒子多重度事象での粒子生成過程の解明が重要である。ALICE では、図 10 に示すように陽子-陽子 13 TeV において重いクォーク起源電子生成の粒子多重度依存性が測定された。この現象は高粒子多重度事象におけるパートン再結合モデル (color reconnection model [10]) により説明がなされており、さらなる理解のためにはパートンレベルでの理解が必要であると考えられている。そこで我々のグループでは、クォークレベルでの重クォーク生成の粒子多重度依存性の解明のために、陽子-陽子 13 TeV における重いクォーク起源ジェット測定を行っている。また、同じ小さい衝突系である陽子-鉛 5.02 TeV において、重いクォーク起源電子をチャームクォーク起源の電子とボトムクォーク起源の電子に分けて測定することで質量依存性や異なる衝突系での比較を通して、より詳細な理解を目指している。一方で小さい衝突系で QGP が生成された場合、鉛-鉛衝突同様に重いクォークのエネルギー損失効果が実験的に測定されるはずである。しかしながら、我々のグループが行った陽子-鉛衝突における重いクォーク由来電子の生成量測定ではそのような効果は確認できなかった [9]。現在はより詳細な検証を行うために重いクォーク起源ジェットの測定を陽子-鉛衝突でも行っている。図 11 は重いクォーク起源ジェットの生成断面積をその広がり ( $R$ ) を変えて測定し、その生成断面積比を陽子-陽子衝突と陽子-鉛衝突で比較したものである。衝突において QGP が生成された場合、ジェットの広がりに変化が現れることが予想されているが、そのような効果は測定されなかった。この結果は ALICE 実験で承認され、現在投稿論文を準備中である。

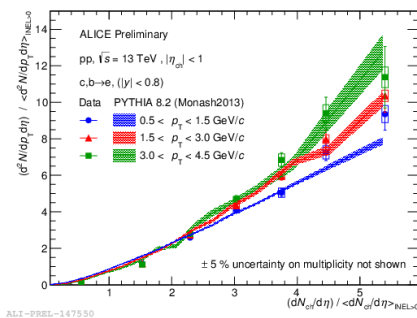


図 10 陽子-陽子衝突 13TeV における重いクォーク起源電子生成の粒子多重度依存性

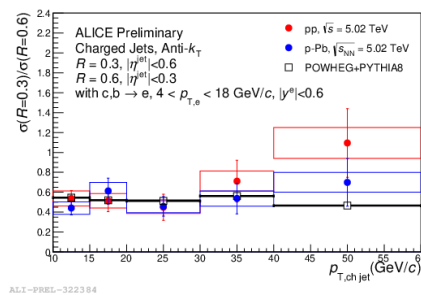


図 11 p-Pb 衝突 5.02TeV における重いクォーク起源のジェット生成の  $R$  依存性

#### (4)LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$ 陽子陽子衝突におけるジェット内部の中性中間子の測定

高エネルギーの陽子・陽子衝突、および原子核（陽子）・原子核衝突において、高い横運動量を持つハドロンの横運動量分布を測定することにより、初期パートンのハード散乱を起源に持つ粒子生成機構を調べることができる。一般にハード散乱によるハドロン生成は、摂動 QCD(pQCD) 計算によって良く記述できることが分かっている。摂動 QCD 計算では、(1) パートン分布関数 (PDF)、(2) 破砕関数 (FF)、(3) QCD 散乱断面積、の 3 項の寄与として分離できるが、このうち PDF, FF については非摂動的効果が入るため理論計算が難しい。そのため、PDF, FF の決定には、様々な衝突エネルギーにおける実験データを用いて求める必要がある。

そこでハード散乱によるハドロン生成機構の理解するためには、ハドロンの破砕関数の実験的測定が不可欠となる。破砕関数の測定は、ジェットとハドロンの両方を同時に測定することで可能となる。ALICE 実験では、 $\sqrt{s} = 5.02\text{TeV}$  陽子・陽子衝突における中性中間子 ( $\pi^0, \eta$ ) の測定行なった。条件として、ジェットを要求した場合（ジェット内でのハドロン生成）と、ジェットを要求しない場



合 [11](inclusive) のそれぞれについて測定を行なった (図 12)。その結果、 $\pi^0/\eta$  比は、ジェットの要求の有無で異なることが分かり、特に低い横運動量領域 ( $p_T$ ) でのジェット内の  $\pi^0/\eta$  比は、ジェットを要求しない場合より低くなり、高い  $p_T$  領域では、両者はほぼ一致することが分かった。より精度良く  $\pi^0, \eta$  中間子の破碎関数を決定するためには、高統計データを用いることが有効である。そこで我々のグループでは、電磁カロリメータ・トリガーかつ、高統計データセットを用いた測定を進めている。高統計データとして  $\sqrt{s} = 13$  TeV を使い、 $\eta/\pi^0$  の測定をジェット内とジェットを要求しない場合で求め、検出器効果等の補正、系統誤差の決定を行なった。現在、最終結果に向けて解析が進行中である。

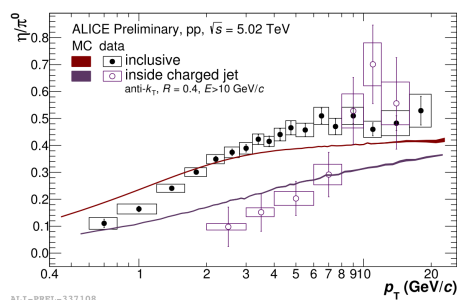


図 12 陽子・陽子  $\sqrt{s} = 5.02$  TeV における  $\eta/\pi^0$  比 (ALICE)

#### (5) RHIC-STAR 実験での固定標的モード衝突における集団運動と 2 粒子 HBT 相関

第 2 期ビームエネルギー走査実験 (BES-II 実験) に先立って行った RHIC-STAR 実験における固定標的実験のテスト的測定の結果を示す [12]。正味陽子の指向的方位角異方性  $v_1$  の傾きに観測された非単調な振る舞い、特に、20 GeV 付近の極小点は、高密度核物質の状態方程式の変化や、QCD 相図の 1 次相転移や臨界点の兆候である事が期待されている。1 核子数あたりに規格化した指向的方位角異方性  $v_1$  のラピディティに対する傾きの衝突ビームエネルギー依存性を図 13 (左) に表している。重心系 3-5 GeV 領域での固定標的実験モードによる金原子核同士の測定を行い、これまで 7-40 GeV において行ってきた衝突実験モードによる測定をさらに低いエネルギー領域へ拡張し、その  $v_1$  の傾きの増大を観測し、また核子数によるスケールリング、つまりの軽い原子核の核子融合模型による生成過程を確認した。左図内に挿入した結果は、BES-I 実験における陽子と重陽子の  $v_1$  の傾きを表す [13]。図 13 (右) には、2 粒子 HBT 相関解析により得られた 3 次元粒子発生源の  $R_{out}$  (奥行き) と  $R_{side}$  (幅) の差分を表し、これは粒子放出持続時間を意味する。20 GeV にある持続時間の極大値は、同じく 1 次相転移や臨界点の兆候である事が期待される。

#### (6) ビームエネルギー走査実験による臨界点探索

第 1 期ビームエネルギー走査実験 (BES-I 実験) の期間に収集した実験データを用いた、正味陽子数分布の高次揺らぎに関する最終結果を公表した。電荷数やバリオン数などの保存量の揺らぎを観測することにより、QCD 相図の臨界点付近で期待される高温・高密度衝突系の相関長の急激な変化や相転移などによる状態の変化による信号を探索した。特に、高次揺らぎがその変化に敏感であると期待されるが、図 14 (右) に示したように、正味陽子数分布の尖度を表す 4 次キュムランの衝突エネルギーに対する非単調な依存性を観測した [14]。この振る舞いは、臨界点付近で期待される極小・極大を持つ振動パターンに酷似しており、現在収集中の第 2 期ビームエネルギー走査実験 (BES-II 実験) による高統計、及び系統的な測定によりその傾向を確認する予定である。

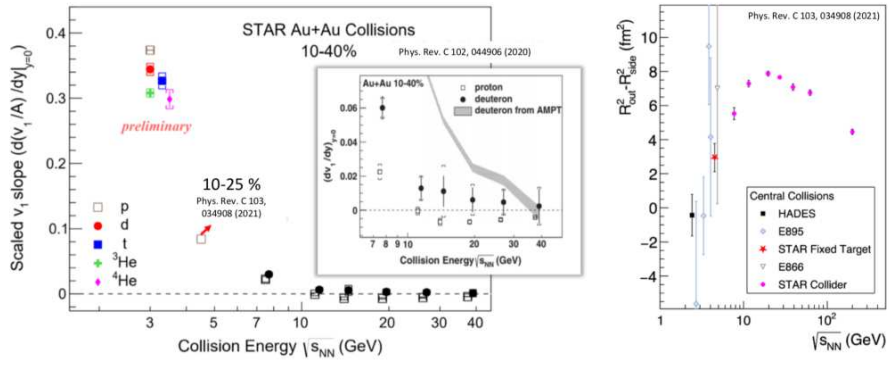


図 13 指向的方位角異方性  $v_1$  の傾きの衝突ビームエネルギー依存性 (左)、2 粒子 HBT 相関解析による粒子発生源の粒子放出持続時間の衝突ビームエネルギー依存性 (右)

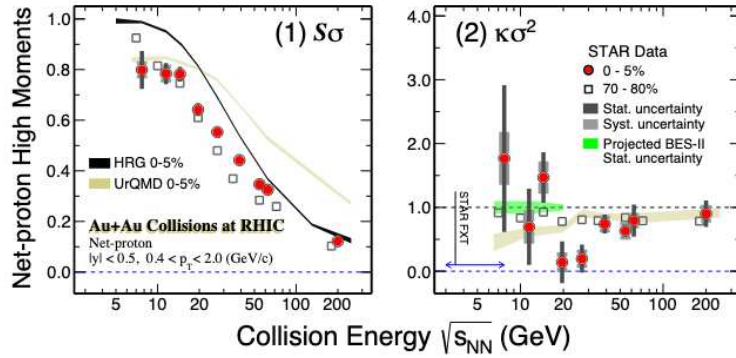


図 14 正味陽子数分布の 3 次揺らぎの衝突ビームエネルギー依存性 (左)、4 次揺らぎの衝突ビームエネルギー依存性 (右)

### (7) 陽子・陽子衝突における正味陽子数分布の高次揺らぎ

QCD 相構造を実験的に理解するため、RHIC-STAR 実験では第 2 期ビームエネルギー走査実験 (BES-II 実験) が行われており、近年、Au+Au 衝突で中心衝突における正味陽子数分布の高次揺らぎの結果が注目されている。特に 4 次揺らぎの衝突エネルギーに対する非単調な振る舞いは、相転移付近における QCD 臨界点のシグナルを示唆する理論予測と定性的に一致する [14]。さらに、200 GeV における Au+Au 衝突で観測された負の 6 次揺らぎは、格子 QCD で予測されている低  $\mu_B$  領域の滑らかなクロスオーバー相転移と関連している可能性がある。本研究では、Au+Au 衝突に対する物理的なベースラインを決定するため、200 GeV における  $p+p$  衝突で正味陽子数分布のキュムラントを測定した。2012 年のデータを用い、 $n$  次のキュムラント  $C_n$  ( $n \leq 6$ ) における粒子多重度依存性を測定し、キュムラント比  $C_4/C_2$ 、 $C_5/C_1$ 、 $C_6/C_2$  を Au+Au 衝突と比較した結果を図 15 に示した。2 つのデータセットの比較結果では、 $p+p$  衝突の平均値が Au+Au 衝突の粒子多重度依存性と滑らかにつながる。さらに  $C_5/C_1$  と  $C_6/C_2$  において  $p+p$  衝突が高い粒子多重度においても正の値を示していることが Au+Au 衝突の中心衝突で見られる負の値と対称的である。

### (8) 高次揺らぎに対するパイラップ補正

RHIC の第 1 期ビームエネルギー走査実験 (BES-I 実験) で測定された正味陽子数分布の 4 次キュム

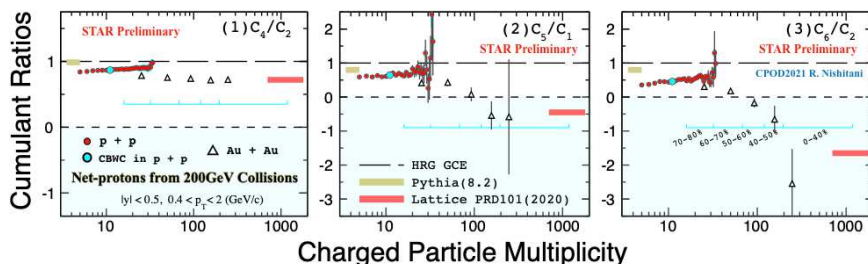


図 15 200 GeV  $p + p$  衝突と Au+Au 衝突における正味陽子数のキュムラント比  $C_4/C_2$ 、 $C_5/C_1$ 、 $C_6/C_2$  の粒子多重度依存性

ラント比は  $7.7 \leq \sqrt{s_{NN}} < 20$  GeV で非単調的に振舞っており、QCD 臨界点のシグナルではないかと言われている [14]。現在、 $\sqrt{s_{NN}} \leq 7.7$  GeV における固定標的実験が進行中であり、臨界点の存在領域にさらなる制限がかけられることが期待される。一方、固定標的型実験において問題になるのがパイルアップ事象である。衝突型実験と比較して重イオンの衝突頻度が桁違いに高く、複数の衝突事象が重なって測定されてしまう確率が、無視できないほど大きくなる。

我々はパイルアップ事象に対する高次キュムラントの補正手法を新たに考案した [17]。パイルアップ事象を含まない真の粒子多重度分布を決定することにより、低粒子多重度事象から再帰的に補正を行う。図 16 は数値シミュレーションにおける補正前後のキュムラントを中心衝突度の関数として比較したものである。パイルアップ事象により、中心衝突においてキュムラントの値が増大することがわかるが、我々が考案した手法を適用することで、真のキュムラントへ補正することが可能である。

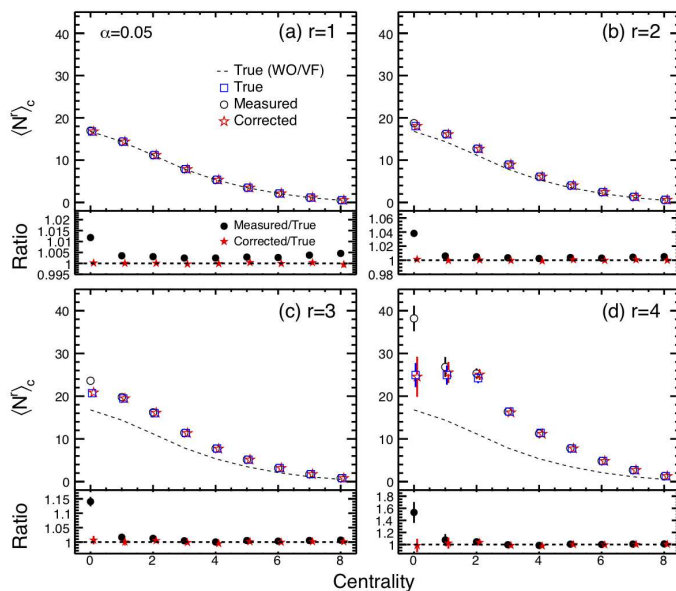


図 16 数値シミュレーションにおけるキュムラントの中心衝突度依存性。青四角がパイルアップ事象を含まない結果、黒丸がパイルアップ事象を含む結果である。黒丸に補正を適用したものが赤星である。

### (9)E 粒子および $\Omega$ 粒子のグローバル偏極

原子核衝突におけるグローバル偏極は、初期角運動量と生成粒子のスピンの軌道相互作用に

よって生じる。パリティ非保存の弱い相互作用を介して崩壊するハイペロン粒子を用いることで偏極測定が可能となる。これまでに STAR 実験では  $\Lambda$  粒子のグローバル偏極が観測され、原子核衝突における高速渦の生成が判明した。 $\Lambda$  粒子の偏極のエネルギー依存性は流体モデルや輸送計算などで再現できる一方、局所渦など理論モデルでは説明できない実験結果が複数報告されている。現在、実験理論双方での議論が続いており、これら疑問を解明するためにも異なる粒子種、特に異なるスピンをもつ粒子の偏極データが期待されている。本研究では、STAR 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV 金原子核衝突における  $\Xi$  (スピン 1/2) と  $\Omega$  (スピン 3/2) のグローバル偏極測定を行った。(図 17)

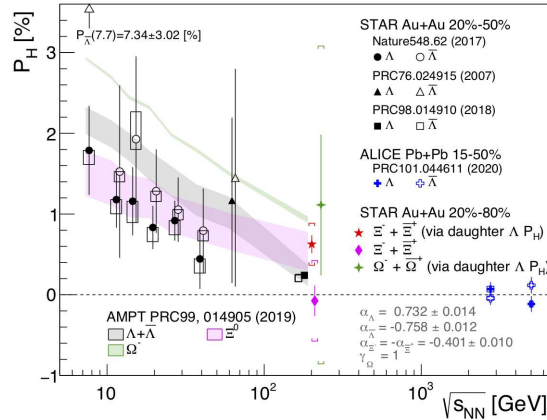


図 17 グローバル偏極の衝突エネルギー依存性。バンド線は輸送モデルの計算である。

$\Xi$  粒子の偏極測定には、 $\Xi$  から崩壊する  $\Lambda$  の方位角分布を調べる方法と崩壊  $\Lambda$  自身の偏極を調べる方法の 2 つを用いた。これら独立した 2 つの結果を組みわせると、 $\Xi$  粒子の偏極  $P_{\Xi}$  は  $\langle P_{\Xi} \rangle \approx 0.47 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 0.23(\text{syst.})\%$  と測定された。 $2\sigma$  程度の有意性で正の偏極であることが判明し、原子核衝突における渦描像を支持する結果となった。本結果は、 $\Xi$  粒子が  $\Lambda$  粒子よりも大きな偏極であることを示唆しており、輸送モデル [20] とも定性的に一致している。スピン 3/2 の  $\Omega$  粒子についても崩壊  $\Lambda$  粒子の偏極から測定し、 $P_{\Omega} = 1.11 \pm 0.87(\text{stat.}) \pm 1.97(\text{syst.})\%$  となった。ただし、崩壊  $\Lambda$  の偏極を  $\Omega$  粒子偏極に変換する際に、未測定のパラメータ  $\gamma_{\Omega}$  に起因する不確実性が残る (経験的に  $\gamma_{\Omega} \approx \pm 1$  と推測され、本研究では  $\gamma = +1$  を仮定)。現状の結果では有意な偏極が見られていないが、今後の測定では  $\gamma_{\Omega}$  の制約が可能となる。これらの結果は Physical Review Letters へ出版された [21]。今後は高統計データの解析により、より高精度な  $\Xi$  および  $\Omega$  粒子の偏極を行う。

#### (10) 固定標的型金 + 金衝突 $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$ GeV における $\Lambda$ 粒子のグローバル偏極

原子核衝突実験において、非中心衝突事象では 2 つの原子核によって運ばれる初期の軌道角運動量を保存するため、生成される系は回転運動を示す。これにより生成粒子はスピン軌道相互作用によって偏極されるはずである。これまでに RHIC-STAR 実験では  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$  から 200 GeV にかけて様々なエネルギーで測定が行われた [22, 18, 19]。これらの測定によりグローバル偏極は衝突エネルギーが低くなるとともに値が大きくなる傾向が観測された。一方で理論計算によると系の軌道角運動量方向の角速度はエネルギーが低くなるとともに大きくなるが、ある値を境に急激に小さくなると報告されている [23]。そのため低エネルギー領域における詳細なグローバル偏極の測定が必要とされている。

そこで RHIC-STAR 実験では  $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$  GeV において  $\Lambda$  粒子のグローバル偏極の測定がされた。図 18 は  $\Lambda$  粒子のグローバル偏極の衝突依存性である。その結果有限なグローバル偏極のシグナルが観

測された。また衝突エネルギーに対しては  $\sqrt{s_{NN}} = 7.2 \text{ GeV}$  に関してもこれまでと同様に、エネルギーの低下とともに値が上がり続ける傾向が観測された。

グローバル偏極は磁場などの寄与によって粒子と反粒子間で差が生じると考えられている。そこで高統計なデータを用いて反ラムダ粒子のグローバル偏極を測定し、ラムダ粒子との差から磁場などの寄与を見積もることが期待される。また現在 STAR 実験では第 2 期ビームエネルギー走査実験 (BES-II 実験) が行われており、アップグレードされた検出器を用いて低いエネルギーにおいて高統計なデータが取得されている。これにより低い衝突エネルギーの広範囲領域における詳細な測定が期待されている。

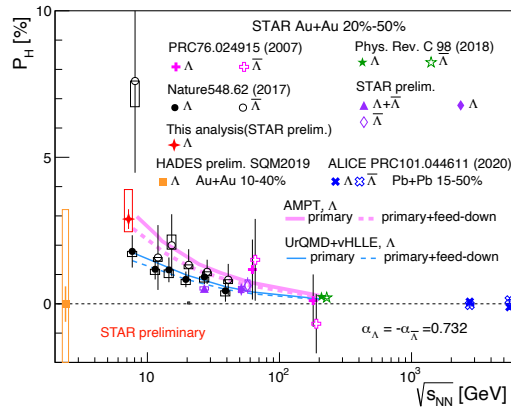


図 18 固定標的実験を含む  $\Lambda$  粒子の偏極の衝突エネルギー依存性

### (11) RHIC-STAR 実験におけるバリオン相関 $\Lambda$ - $\Lambda$ と $\Xi$ - $\Xi$ 相関関数測定

バリオン相関については、未だ実験的にも理論的にも理解されていないことが多い。ハイペロン-ハイペロン ( $Y$ - $Y$ ) の相関を測定することは  $H$ -dibaryon をはじめとするエキゾチックハドロンを知ることが目的とした研究において、重要度の高い測定である。バリオン間束縛状態を調べるにおいて、2 粒子相関法を用いた femtoscopy という測定方法が用いられる。測定された相関関数に Ledniky-Lyuboshitz フィット [24] を行うことで散乱パラメータ等を求め、束縛状態の有無を探る。 $\Lambda$ - $\Lambda$  相関関数に関しては、STAR 実験で 2015 年に発表された先行研究があるが、統計誤差が大きい [25]。 $\Xi$  粒子についての束縛状態については、未だ理論的に研究途上であり、attractive な相関が予想されているが、束縛状態を作るには十分に強くはないのではとされている [26, 27]。

今回、先行研究と比較しておよそ 4 倍の高統計データでの測定が可能になった。また、かつて  $\Xi$ - $\Xi$  相関関数が測定されたことはなく、今回が世界初測定となった。図 19 は  $\Lambda$ - $\Lambda$  相関関数である。スムーズな anti-correlation が観測された。STAR 実験の先行研究結果と系統誤差の範囲で一致した結果が得られた。高い相対運動量  $Q_{inv}$  において residual な成分があることがわかった。次に、図 20 が  $\Xi$ - $\Xi$  相関関数である。明瞭な anti-correlation が測定された。これらの結果は、今後 feed-down 補正、運動量分解能の補正等を施し、最終的な相関の大きさを求める必要がある。

### (12) Charged particle flow and identical pions HBT in $\sqrt{s_{NN}} = 27.0 \text{ GeV}$ Au+Au collisions at RHIC-STAR experiment

Femtoscopic/HBT studies of identical pions provides a direct tool to measure the space-time dimensional information of the homogeneity region of the fireball, produced in the heavy-ion collisions. In the femtoscopic studies, generally two particle correlation functions are studied to get various source parameters

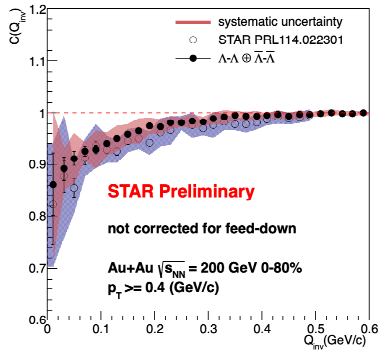


図 19  $\Lambda$  粒子の相関関数

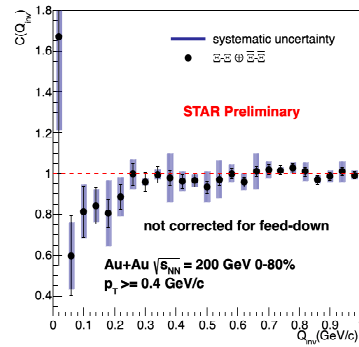


図 20  $\Xi$  粒子の相関関数

in 1-dimension and 3-dimensions depending on the constructed two particle correlation function. The main source of correlations between identical pion-pion pairs are Bose-Einstein correlations and Coulomb correlation (needed to correct for it to get real parameters). The study of correlation function w.r.t. different bins of  $\Psi_1$  (first order event plane angle) provides various odd source parameters using which the tilt angle of the source can be extracted. In the current pion HBT studies at 27 GeV, the correlation functions has been studied in 1-dimension ( $Q_{inv}$ ) and 3-dimension ( $q_{out}, q_{side}, q_{long}$ ) for different centrality,  $k_T$  and  $\Psi_1$  bins after applying various track and pair cuts. To get the various source parameter, fitting is being done.

The second part of the study is related to charged particle flow. In this study,  $(\Delta\eta, \Delta\phi)$  correlation functions are being studied for different track transverse momentum ( $p_{T1}, p_{T2}$ ) ranges. The fitting is being done to extract various flow coefficient.

### (13)RHIC での小さい衝突系における方位角異方性 $v_n$ の測定

高エネルギー重イオン衝突における QGP 流体生成の証拠の一つが方位角異方性  $v_n$  の観測であり、今後の課題として流体力学計算の適用限界や多重パートン相互作用の評価が挙げられる。最近の RHIC-PHENIX 実験での  $p+Au$ 、 $d+Au$ 、及び  $^3He+Au$  衝突における測定では、 $v_n$  が衝突初期形状に対するスケールリングや流体力学計算との一致を示し、荷電粒子多重度  $dN_{ch}/d\eta = 13$  程度の小さい系での流体生成が示唆された [28]。現在小さい系での  $v_n$  の更なる理解を目指した測定が、RHIC 加速器の PHENIX と STAR 両実験にて進められている。

図 21(左)に  $p+Au$  衝突における中心ラピディティ領域での  $v_2$  の最新の測定結果を示す。粒子多重度が大きく、より流体成分が強い後方領域を利用した PHENIX の測定 (図中 Nat. Phys.) [28] は横運動量  $p_T = 2 \text{ GeV}/c$  で  $v_2 = 0.1$  程度の値を示す。一方、粒子多重度が小さくジェットの影響がより大きい中心領域や前方領域を使用した STAR や PHENIX の測定 (図中 3x2PC) は  $p_T = 2 \text{ GeV}/c$  で  $v_2 = 0.17$  程度のより大きい値を示し、 $v_2$  の値が測定方法により 70% 程度の幅を持つことが確認された。次に、図 21(右)に  $p+Au$  衝突における中心ラピディティ領域での  $v_3$  の最新の測定結果を示す。後方領域を利用した PHENIX の測定や STAR の測定による  $v_3$  は正の値を示すが、前方領域を含めた PHENIX 測定では虚数の値を示すことが判明した。これは前方領域でのジェットの寄与が流体的な発展を圧倒し、既存の  $v_n$  測定手法の適用限界を超えたためと考えられる。

これらの測定から、小さい系における流体発展由来の  $v_n$  の信号は小さく、ジェット等の背景事象に測定が大きな影響を受けることが判明した。今後小さい系における  $v_n$  の統一的な理解を目指すために、測定におけるジェット成分の見積もりとその分離手法の確立が重要である。

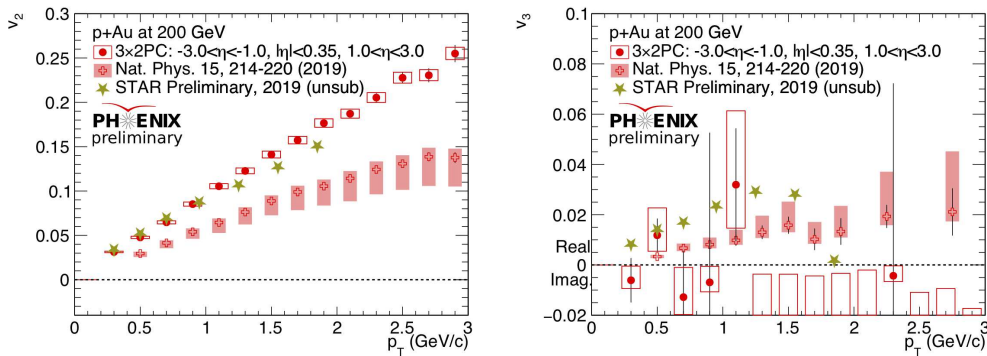


図 21 200GeV 陽子+金原子核衝突における荷電粒子  $v_2$  及び  $v_3$  の横運動量依存性

#### (14)E16 実験に向けた Multi-gap Resistive Plate Chamber の研究開発

J-PARC(大強度陽子加速器施設)では、原子核中のカイラル対称性の自発的破れの回復に伴う  $\phi$  中間子の質量の変化を観測するための E16 実験が進められている。 $\phi$  中間子が電子陽電子対に崩壊する時の  $\phi$  中間子の質量を真空中と原子核中で比較することを目的としている。我々は、 $\phi$  中間子の  $e^+e^-$  崩壊だけでなく  $K^+K^-$  中間子に崩壊するチャンネルも合わせて測定することを提案しており、そのために必要な K 中間子識別のできる飛行時間検出器として高い時間分解能を持ち、かつ、高レート耐性のある Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC) の導入を検討している。

E16 実験の実験環境から高イベントレート及び 2nd level trigger の待ち時間に対応できるデータ収集系が要求されている。そのため、今回の Run0 実験では FPGA を用いた Tapped Delay Line 方式の TDC を採用した。この TDC を利用したデータ収集系では MRPC の信号の leading edge と trailing edge の時刻情報を測定することができ、leading edge と trailing edge の時間差 (Time Over Threshold) により信号の波高を分析し、解析に利用している。今回の Run0a 実験では LEPS 実験用に開発された MRPC を利用して E16 実験環境下においての動作試験および時間分解能評価を行った。

また、2021 年 11 月に E16 実験用に大きさ等を最適化した MRPC を SPring-8 にて製作した。SPring-8 の LEPS 実験施設のビームラインを利用して製作した MRPC の時間分解能と検出効率の性能評価試験を行い、結果として  $79 \pm 1$  ps の時間分解能を得ることができた (図 22)。

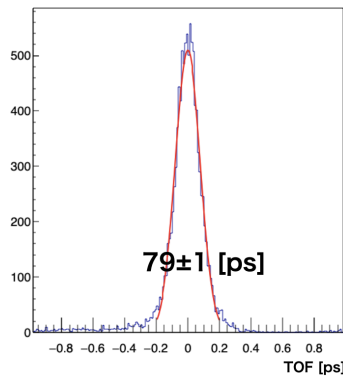


図 22 製作した MRPC の時間分解能評価

### (15)ALICE FoCal プロジェクト

高エネルギー原子核実験グループでは、ALICE 実験の次期アップグレード計画として、前方カロリメータ検出器プロジェクト FoCal (Forward Calorimeter) を推進している。これは、ALICE 検出器の前方方向 ( $3.4 < \eta < 5.8$ ) に電磁カロリメータおよびハドロンカロリメータを新たに設置し (図 23)、前方方向に発生する直接光子、崩壊光子などの位置、エネルギーを精度よく測定することにより、(1) 未だ実験的証拠が得られていない、ハドロンの普遍的な描像「カラーグラス凝縮 (CGC)」の世界初観測、(2) 小さな  $x$  領域の原子核内グルーオン・分布関数の世界最高精度測定、を主な目的としている。2025-2027 年の長期 LHC 停止期間中に本検出器をインストールし、2027 年後半に (LHC Run-4) に最初の物理測定を行う計画である。

以下、2020 年度の活動について報告する。まず昨年度策定した FoCal 実験提案書 (Letter of Intent, LoI) [29] の審査と承認が行われた。最初に ALICE 実験内での審査が行われ、承認された (4 月)。その後、本提案は LHCC 委員会 (LARGE HADRON COLLIDER COMMITTEE) で審査され、承認された (6 月)。LHCC の承認を受けて、FoCal 実験は TDR (Technical Design Report) 策定に向けて最終デザインを決定する段階に移行した。

日本グループは、FoCal の主要部である「FoCal-E pad」の主担当であり、本プロジェクトを主導している。FoCal-E pad に用いる p 型シリコンセンサとその読み出し方法について議論するため、国際研究集会「Mini-workshop on ALICE FoCal and continuous readout electronics」を開催した (4 月)。また p 型シリコンセンサを新たに製作し (図 24)、赤外光レーザーとソースメーターを使用し、動的特性や I-V 特性等を測定した。2 月、東北大学・電子光理学研究センターにおいて、本シリコンセンサに電子ビームを照射し、評価実験を行った。その結果、最小電離粒子 MIP のシグナルが確認された。その後、宇宙線を使ったテストを行い、MIP シグナルを測定し、所定の性能を有していることを確認した。中條は FoCal プロジェクトを代表して、ALICE 実験内で現状を報告した (3 月)。また初期の FoCal 試作機について、その結果を論文にまとめ、Nucl. Inst. and Methods A 誌に投稿し、掲載された [30]。

理化学研究所が FoCal プロジェクト推進のため、ALICE アソシエイトメンバーとして再登録することが承認された (11 月)。また佐賀大学も ALICE フルメンバーとして加入し (3 月)、FoCal 後段の読み出し開発に参加する予定である。

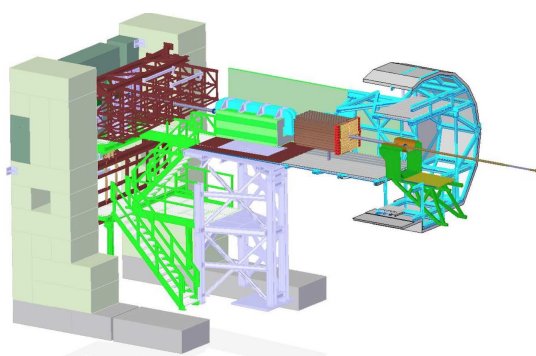


図 23 FoCal 検出器の外観。中央部に見える直方体状のものが FoCal。右側に衝突点がある。

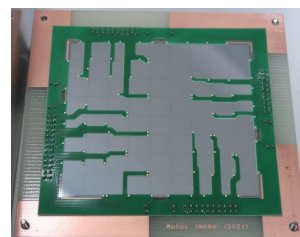


図 24 ELPH テストビーム実験に用いた p 型シリコンセンサ (8x9 タイプ)

### (16)ALICE FoCal Simulation

The initial simulations for the FoCal detector performance were done with an ideal geometrical setup



and published in the LoI [29]. The implementation of the realistic geometry and the impact on the physics performance is crucial for the success of the FoCal project. One of the main concern is arising from the dead space between the silicon sensors which are necessary to include the guard rings around each main sensor. There are also additional mechanical constraints which has to be included in the real detector geometry. Fig. 25 shows the signal to background from the idealistic simulation from  $p_T > 2$  GeV/c. The inclusion of the realistic model slightly reduces the signal to background ratios, shown in Fig. 26. From these results we can conclude that the modifications in the geometrical setup from its ideal configuration is not changing the performance of the detector and we can achieve the physics results we seek.

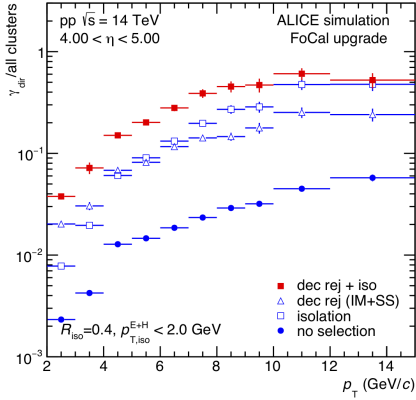


Figure 25 The signal to background ratio in the ideal simulation for the FoCal geometry.

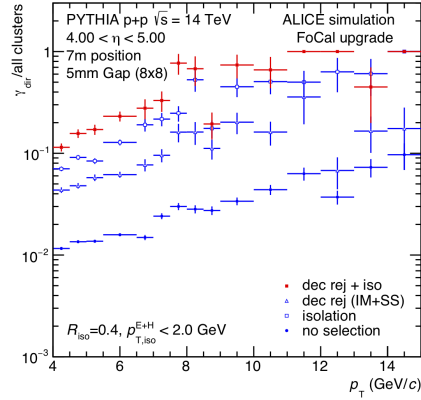


Figure 26 The same performance with the realistic FoCal geometry.

In addition to the full geometry simulation, we also constructed a standalone mode simulation based on GEANT4. The standalone simulation is constructed in the same specifications as the final prototype testbeam planned in 2021 September-October, see in Fig. 27. The detector would consist in total of 18 PAD layers, 2 PIX layers and a capillary tube HCal detector behind it. The advantage of the standalone simulation is the quick response to any geometrical or mechanical constraints for the upcoming testbeam. This simulation would also allow us quickly evaluate the performance of the final prototype.

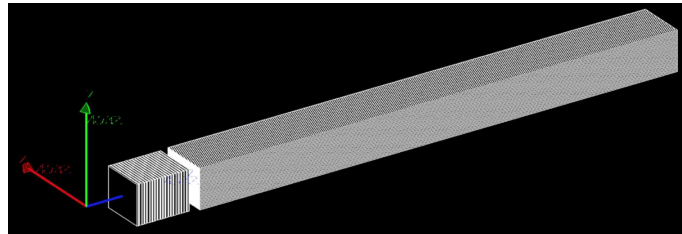


Figure 27 The Geant4 setup of the final FoCal prototype detector geometry.

### (17)ELPH testbeam

The first p-type silicon sensors were tested at the ELPH (Research Center for Electron Photon Science) beam facility in Sendai at Tohoku University. The facility provided positron beam at 800 MeV energy. We

had few sensors to test, namely (1) 2x2 sensor including a small calibration cell in one PAD, (2) the full size 9x8 sensor and (3) monitoring photo-diode. In our case, we used the SRS APV25 readout unit for the (1) and (2) options, and a amplifier and CAEN digitizer for the (3) case.

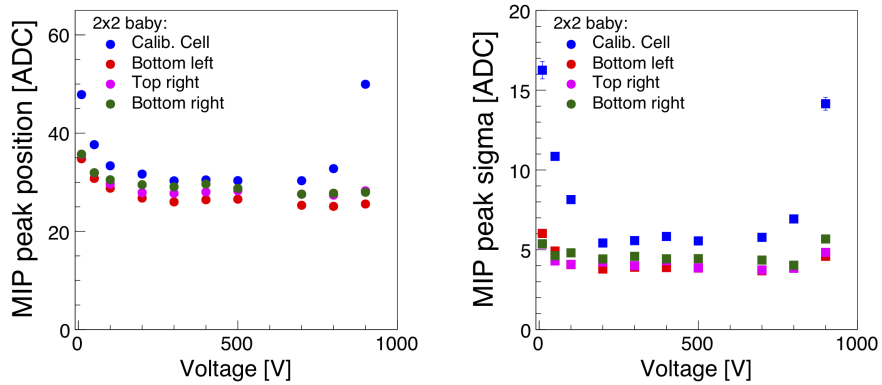


Fig. 28 The voltage scan results on the different pads for the 2x2 baby Silicon sensor. The MIP peaks were fitted with a Landau function and the left panels show the MPV values while the right panels shows the sigma values in a function of the applied bias voltage.

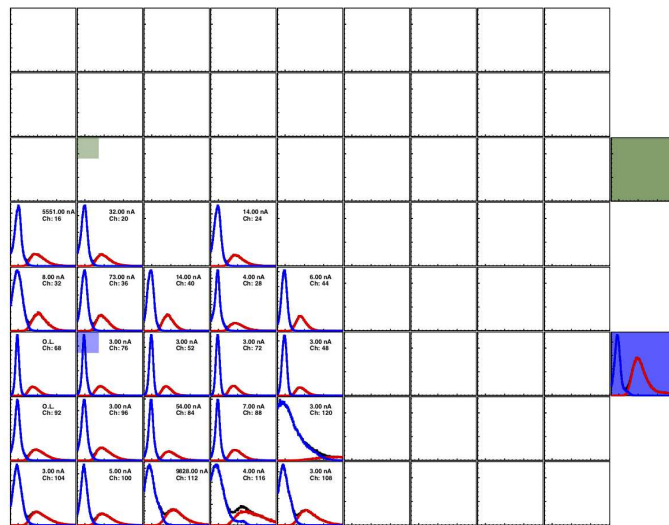


Fig. 29 The ADC distributions of the full sensor readout in the geometrical representation of the sensor. The blue line shows the pedestal distribution, the red line is the MIP response of the sensor.

The first test was to scan the silicon response as a function of the applied bias voltage. The peaks from the minimum ionizing particles (MIPs) were fitted with a Landau function and the most probable value (mpv) and the sigmas are shown in Fig. 28. We can observe a flat plateau between 200V and 800V and at lower and higher voltages the observation of the MIP peak is affected by the noise levels. We also tested the final design of the full sensor, containing 9x8 PAD for the final detector, however, the APV25 readout was connected only to quarter of the sensor. The results in Fig. 29 show the separation of the pedestal and MIP peaks in each PADs separately.

Lastly, we also tested the monitor PD in the beam with a CAEN readout unit. The amplifier and the

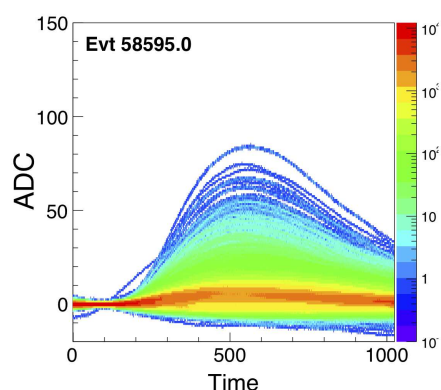


图 30 The results of the monitor PD with the CAEN readout unit in the function of the timestamps.

shaper were located 50 and 100 cm away from the silicon sensor. This amplified and shaped response was then read out by the CAEN unit as shown for almost 600k events in Fig. 30. Due to the distance between the amplifier and the sensor, the readout is largely affected by the noise picked up in the longer lines. Therefore, we can clearly see the signal, however, the sigma (or spread) of the signal is too large in order to constraint MIP peak position.

## 参考文献

- [1] D. Nagae et al., *Hyperfine Interact.* 220, 65 (2013)
- [2] S. Suzuki et al., *NIM A* 965, 163807 (2020)
- [3] A. Yamazaki, K. Sasa et al., *AIP Advances* 9, 105111 (2019)
- [4] M. Matsumura, K. Sasa et al., *Analytical Sciences*, 36, 631-636 (2020)
- [5] ALICE Collaboration, *Phys. Rev. D* **100**, 092004 (2019)
- [6] ALICE Collaboration, *Phys. Rev. C* **101**, 034911 (2020)
- [7] S. Wicks, W. Horowitz, M. Djordjevic, M. Gyulassy, *Nucl. Phys. A.* 783 (2007), pp. 493-496
- [8] ALICE Collaboration, *Phys.Lett.B* 804 (2020) 135377
- [9] ALICE Collaboration, *JHEP* 02 (2020) 077
- [10] Jesper R. Christiansen, et. al., *JHEP* 08 (2015) 003
- [11] ALICE Collaboration, *EPJ C* 78, 263.
- [12] STAR Collaboration, *Phys. Rev. C* 103, 034908 (2021)
- [13] STAR Collaboration, *Phys. Rev. C* 102, 044906 (2020)
- [14] STAR Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 126, 092301 (2021)
- [15] Y. Aoki, et al., *Nature* 443, 675 (2006)
- [16] A. Bazavov et al, *Phys. Rev. D* 95, 054504 (2017)
- [17] T. Nonaka, M. Kitazawa, S. Esumi, *Nucl. Instrum. Meth. A* 984, 164632 (2020)
- [18] STAR Collaboration, *Nature* 548, 62 (2017)
- [19] STAR Collaboration, *Phys. Rev. C* 98, 014910 (2018)
- [20] D.-X. Wei, W.-T. Deng, and X.-G. Huang, *Phys. Rev. C* 99, 014905 (2019)

- [21] J. Adam et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. 126, 162301 (2021)
- [22] STAR Collaboration, Phys. Rev. C 76 024915 (2007)
- [23] X.G Deng et al, Phys. Rev. C 101 6, 064908 (2020)
- [24] R. Lednický, V. L. Lyuboshitz, Sov. J. Nucl. Phys. 35, 770 (1982)
- [25] STAR Collaboration, Phys. Rev. Lett. 114, 022301 (2015)
- [26] J. Haidenbauer et al., Eur. Phys. J. A 51, 17 (2015)
- [27] T. Doi et al., EPJ Web Conf. 175, 05009 (2018)
- [28] PHENIX Collaboration, Nature Phys. 15, 214-220 (2019)
- [29] ALICE Collaboration, ALICE-PUBLIC-2019-005, <http://cds.cern.ch/record/2696471>
- [30] T. Awes et al., Nucl. Instrum. Meth. A **988**, 164796 (2021)

## 原子核実験グループ研究業績リスト

### <原著論文>

1. K. Masumoto, H. Matsumura, T. Miura, G. Yoshida, A. Toyoda, H. Nakamura, K. Bessho, T. Nakabayashi, F. Nobuhara, K. Sasa, T. Moriguchi, H. Tsuchida, S. Matsuyama, M. Matsuda, A. Taniike, Evaluation of activated area in the electrostatic accelerator facilities in the reactor facility, Radiation Protection, 41(2) (2021) 145-150.
2. Go Yoshida, Hiroshi Matsumura, Hajime Nakamura, Akihiro Toyoda, Kazuyoshi Masumoto, Taichi Miura, Kimikazu Sasa, Tetsuaki Moriguchi, Survey Methodology for the Activation of Beamline Components in an Electrostatic Proton Accelerator, Radiation Safety Management, 20 (2021) 1-8. DOI: 10.12950/rsm.200813
3. Kimikazu Sasa, Maki Honda, Seiji Hosoya, Tsutomu Takahashi, Kenta Takano, Yuta Ochiai, Aya Sakaguchi, Saori Kurita, Yukihiko Satou and Keisuke Sueki, A sensitive method for Sr-90 analysis by accelerator mass spectrometry, Journal of Nuclear Science and Technology, 58:1 (2021) 72-79. DOI: 10.1080/00223131.2020.1801530
4. Hiroshi Matsumura, Go Yoshida, Akihiro Toyoda, Kazuyoshi Masumoto, Hajime Nakamura, Taichi Miura, Koichi Nishikawa, Kotaro Bessho, Kimikazu Sasa, Tetsuaki Moriguchi, Fumiyoshi Nobuhara, Yoko Nagashima, Nondestructive High-Sensitivity Measurement Method for Activation Estimation in Accelerator Room Concrete, Radiation Protection, 2020, 40 (6), 677-682.
5. Masanori Kurosawa, Kimikazu Sasa, Satoshi Ishii, Quantitative PIXE analyses of trace Ti in single fluid inclusions in quartz from Tsushima granite, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 479, 15 September 2020, 35-41.
6. Y.X.Watanabe, M.Ahmed, Y.Hirayama, M.Mukai, J.H.Park, P.Schury, Y.Kakiguchi, S.Kimura, A.Ozawa, M.Oyaizu, M.Wada, and H.Miyatake, “Deexcitation  $\gamma$ -ray transitions from the long-lived  $I \pi = 13/2+$  metastable state in 195Os”, PHYSICAL REVIEW C 101, 041305(R) (2020).
7. D. Nagae, Y. Abe, S. Okada, S. Omika, K. Wakayama, S. Hosoi, S. Suzuki, T. Moriguchi, M. Amano, D. Kamioka, Z. Ge, S. Naimi, F. Suzaki, N. Tadano, R. Igosawa, K. Inomata, H. Arakawa, K. Nishimuro, T. Fujii, T. Mitsui, Y. Yanagisawa, H. Baba, S. Michimasa, S. Ota, G. Lorusso, Yu.A. Litvinov, A. Ozawa, T. Uesaka, T. Yamaguchi, Y. Yamaguchi, M. Wakasugi, “Development and

- operation of an electrostatic time-of-flight detector for the Rare RI storage Ring” , Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **986** (2021) 164713.
8. S. Naimi, H.F.Li, Y. Abe, Y. Yamaguchi, D. Nagae, F. Suzaki, M. Wakasugi, H. Arakawa, W. Dou, D. Hamakawa, S. Hosoi, Y. Inada, K. Inomata, D. Kajiki, T. Kobayashi, M. Sakaue, K. Yokoya, T. Yamaguchi, R. Kagesawa, D. Kamioka, T. Moriguchi, M. Mukai, A. Ozawa, S. Ota, N. Kitamura, S. Masuaoka, S. Michimasa, D. S. Ahn, H. Baba, N. Fukuda, Y. Shimizu, H. Suzuki, H. Takeda, C.Y. Fu, Z. Ge, S. Suzuki, Q. Wang, M. Wang, Yu.A. Litvinov, G. Lorusso, and T. Uesaka, “Experimental Challenges of the First Mass Measurement Campaign at the Rare-RI Ring” , J. Phys. Conf. Ser. **1643** (2020) 012058.
  9. T. Moriguchi, M. Amano, A. Ozawa, W. Horiuchi, Y. Abe, T. Fujii, R. Kagesawa, D. Kamioka, A. Kitagawa, M. Mukai, D. Nagae, M. Sakaue, S. Sato, S. Suzuki, T. Suzuki, T. Yamaguchi, K. Yokota, “Measurements of total reaction cross sections for  $^{17}\text{Ne}$  using a solid hydrogen target” , J. Phys. Conf. Ser. **1643** (2020) 012099
  10. A. Homma, M. Tanaka, M. Takechi, T. Ohtsubo, M. Fukuda, T. Suzuki, D. Nishimura, T. Moriguchi, D. S Ahn, A. S Aimaganbetov, M. Amano, H. Arakawa, S. Bagchi, K.-H. Behr, N. Burtebayev, K. Chikaato, H. Du, T. Fujii, N. Fukuda, H. Geissel, T. Hori, S. Hoshino, R. Igosawa, A. Ikeda, N. Inabe, K. Inomata, K. Itahashi, T. Izumikawa, D. Kamioka, N. Kanda, I. Kato, I. Kenzhina, Z. Korkulu, Ye. Kuk, K. Kusaka, K. Matsuta, M. Mihara, E. Miyata, D. Nagae, S. Nakamura, M. Nassurulla, K. Nishimuro, K. Nishizuka, S. Ohmika, K. Ohnishi, M. Ohtake, H.J. Ong, A. Ozawa, A. Prochazka, H. Sakurai, C. Scheidenberger, Y. Shimizu, T. Sugihara, T. Sumikama, S. Suzuki, H. Suzuki, H. Takeda, Y. Tanaka, Y. K. Tanaka, T. Wada, K. Wakayama, S. Yagi, T. Yamaguchi, R. Yanagihara, Y. Yanagisawa, K. Yoshida, T. K. Zholdybayev, “Development of a Method to Deduce Point-proton Radii from Charge Changing Cross Sections” , JPS Conf. Proc. **32** (2020) 010032.
  11. M.Mukai, Y.Hirayama, Y.X.Watanabe, S.Schiffmann, J.Ekman, M.Godefroid, P.Schury, Y.Kakiguchi, M.Oyaizu, M.Wada, S.C.Jeong, J.Y.Moon, J.H.Park, H.Ishiyama, S.Kimura, H.Ueno, M.Ahmed, A.Ozawa, H.Watanabe, S.Kanaya, and H.Miyatake, “In-gas-cell laser resonance ionization spectroscopy of  $^{196,197,198}\text{Ir}$ ” , PHYSICAL REVIEW C **102**, 054307 (2020).
  12. C.Y.Fu, Y.H.Zhang, M.Wang, X.H.Zhou, Yu.A.Litvinov, K.Blaum, H.S.Xu, X.Xu, P.Shuai, Y.H.Lam, R.J.Chen, X.L.Yan, X.C.Chen, J.J.He, S.Kubono, M.Z.Sun, X.L.Tu, Y.M.Xing, Q.Zeng, X.Zhou, W.L.Zhan, S.Litvinov, G.Audi, T.Uesaka, T.Yamaguchi, A.Ozawa, B.H.Sun, Y.Sun, and F. R. Xu, “Mass measurements for the  $T_z = -2$  f p-shell nuclei  $^{40}\text{Ti}$ ,  $^{44}\text{Cr}$ ,  $^{46}\text{Mn}$ ,  $^{48}\text{Fe}$ ,  $^{50}\text{Co}$ , and  $^{52}\text{Ni}$ ” , PHYSICAL REVIEW C **102**, 054311 (2020).
  13. Design and performance of a silicon–tungsten calorimeter prototype module and the associated readout, T. Awes, C. L. Britton, T. Chujo et al., Nucl. Instrum. Meth. A **988**, 164796 (2021)
  14. Centrality dependence of  $J/\psi$  and  $\psi(2S)$  production and nuclear modification in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 8.16$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., JHEP **02**, 002 (2021)
  15. Pion-kaon femtoscopy and the lifetime of the hadronic phase in Pb–Pb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **813**, 136030 (2021)
  16. Production of  $\omega$  mesons in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Eur. Phys. J. C **80**, no.12, 1130 (2020)
  17. Elliptic and triangular flow of (anti)deuterons in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. C **102**, no.5, 055203 (2020)

18.  $J/\psi$  elliptic and triangular flow in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., JHEP **10**, 141 (2020)
19. Constraining the Chiral Magnetic Effect with charge-dependent azimuthal correlations in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  and 5.02 TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., JHEP **09**, 160 (2020)
20. Measurement of isolated photon-hadron correlations in  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV  $pp$  and  $p$ -Pb collisions, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. C **102**, no.4, 044908 (2020)
21. Dielectron production in proton-proton and proton-lead collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. C **102**, no.5, 055204 (2020)
22. Unveiling the strong interaction among hadrons at the LHC, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Nature **588**, 232-238 (2020)
23. Transverse-momentum and event-shape dependence of D-meson flow harmonics in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **813**, 136054 (2021)
24. First measurement of quarkonium polarization in nuclear collisions at the LHC, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **815**, 136146 (2021)
25. Z-boson production in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$  TeV and Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., JHEP **09**, 076 (2020)
26. Production of light-flavor hadrons in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  and  $\sqrt{s} = 13$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Eur. Phys. J. C **81**, no.3, 256 (2021)
27. Multiplicity dependence of  $J/\psi$  production at midrapidity in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **810**, 135758 (2020)
28. Measurement of the low-energy antideuteron inelastic cross section, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. Lett. **125**, no.16, 162001 (2020)
29.  $J/\psi$  production as a function of charged-particle multiplicity in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., JHEP **09**, 162 (2020)
30. Search for a common baryon source in high-multiplicity pp collisions at the LHC, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **811**, 135849 (2020)
31. Measurement of nuclear effects on  $\psi(2S)$  production in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., JHEP **07**, 237 (2020)
32. (Anti-)deuteron production in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Eur. Phys. J. C **80**, no.9, 889 (2020)
33. Multiplicity dependence of  $\pi$ , K, and p production in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Eur. Phys. J. C **80**, no.8, 693 (2020)
34. Coherent photoproduction of  $\rho^0$  vector mesons in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., JHEP **06**, 035 (2020)
35. Linear and non-linear flow modes of charged hadrons in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., JHEP **05**, 085 (2020)
36. Non-linear flow modes of identified particles in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., JHEP **06**, 147 (2020)
37. Production of (anti-) $^3\text{He}$  and (anti-) $^3\text{H}$  in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. C **101**, no.4, 044906 (2020)
38. Centrality and transverse momentum dependence of inclusive  $J/\psi$  production at midrapidity in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **805**, 135434

(2020)

39. Underlying Event properties in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., JHEP **04**, 192 (2020)
40. Longitudinal and azimuthal evolution of two-particle transverse momentum correlations in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **804**, 135375 (2020)
41. Measurement of electrons from heavy-flavour hadron decays as a function of multiplicity in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., JHEP **02**, 077 (2020)
42. Probing the effects of strong electromagnetic fields with charge-dependent directed flow in Pb-Pb collisions at the LHC, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. Lett. **125** (2020) 2, 022301
43. Jet-hadron correlations measured relative to the second order event plane in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. C **101**, no.6, 064901 (2020)
44. Multiplicity dependence of  $K^*(892)^0$  and  $\phi(1020)$  production in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **807**, 135501 (2020)
45. Measurement of spin-orbital angular momentum interactions in relativistic heavy-ion collisions, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. Lett. **125**, no.1, 012301 (2020)
46.  $\Upsilon$  production in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **806**, 135486 (2020)
47. Global baryon number conservation encoded in net-proton fluctuations measured in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **807**, 135564 (2020)
48.  $K^*(892)^0$  and  $\phi(1020)$  production at midrapidity in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. C **102**, no.2, 024912 (2020)
49. Measurement of the (anti-) $^3\text{He}$  elliptic flow in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Lett. B **805**, 135414 (2020)
50. Production of charged pions, kaons, and (anti-)protons in Pb-Pb and inelastic  $pp$  collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. C **101**, no.4, 044907 (2020)
51. Global polarization of  $\Lambda\bar{\Lambda}$  hyperons in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  and 5.02 TeV, ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Phys. Rev. C **101**, no.4, 044611 (2020)
52. Longitudinal double-spin asymmetry for inclusive jet and dijet production in polarized proton collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV, STAR Collaboration, Mohamed Abdallah et al., Phys. Rev. D **103** (2021) 9, L091103
53. Global Polarization of  $\Xi$  and  $\Omega$  Hyperons in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. Lett. **126** (2021) 16, 162301
54. Measurement of transverse single-spin asymmetries of  $\pi^0$  and electromagnetic jets at forward rapidity in 200 and 500 GeV transversely polarized proton-proton collisions, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. D **103** (2021) 9, 092009
55. Comparison of transverse single-spin asymmetries for forward  $\pi^0$  production in polarized pp, pAl and pAu collisions at nucleon pair c.m. energy  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. D **103** (2021) 7, 072005
56. Measurements of W and Z/ $\gamma$  cross sections and their ratios in p+p collisions at RHIC, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. D **103** (2021) 1, 012001

57. Flow and interferometry results from Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=4.5$  GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. C 103 (2021) 3, 034908
58. Beam-energy dependence of the directed flow of deuterons in Au+Au collisions, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. C 102 (2020) 4, 044906
59. Measurement of inclusive  $J/\psi$  polarization in p+p collisions at  $\sqrt{s}=200$  GeV by the STAR experiment, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. D 102 (2020) 9, 092009
60. Investigation of the linear and mode-coupled flow harmonics in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Lett. B 809 (2020) 135728
61. Measurement of inclusive charged-particle jet production in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. C 102 (2020) 5, 054913
62. Measurement of the central exclusive production of charged particle pairs in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=200$  GeV with the STAR detector at RHIC, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., JHEP 07 (2020) 07, 178
63. Results on total and elastic cross sections in proton-proton collisions at  $\sqrt{s}=200$  GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Lett. B 808 (2020) 135663
64. Measurement of groomed jet substructure observables in p+p collisions at  $\sqrt{s}=200$  GeV with STAR, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Lett. B 811 (2020) 135846
65. Beam energy dependence of net- $\Lambda$  fluctuations measured by the STAR experiment at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. C 102 (2020) 2, 024903
66. Nonmonotonic Energy Dependence of Net-Proton Number Fluctuations, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 9, 092301
67. Underlying event measurements in p+p collisions at  $\sqrt{s}=200$  GeV at RHIC, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. D 101 (2020) 5, 052004
68. Measurement of  $D^0$ -meson + hadron two-dimensional angular correlations in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. C 102 (2020) 1, 014905
69. Methods for a blind analysis of isobar data collected by the STAR collaboration, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Nucl. Sci. Tech. 32 (2021) 5, 48
70. First measurement of  $\Lambda_c$  baryon production in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. Lett. 124 (2020) 17, 172301
71. Bulk properties of the system formed in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=14.5$  GeV at the BNL STAR detector, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. C 101 (2020) 2, 024905
72. Beam-energy dependence of identified two-particle angular correlations in  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ -200 GeV Au+Au collisions, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. C 101 (2020) 1, 014916
73. Measurement of away-side broadening with self-subtraction of flow in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Chin. Phys. C 44 (2020) 104001
74. Strange hadron production in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=7.7, 11.5, 19.6, 27,$  and 39 GeV, STAR Collaboration, Jaroslav Adam et al., Phys. Rev. C 102 (2020) 3, 034909
75. Transverse single-spin asymmetries of midrapidity  $\pi^0$  and  $\eta$  mesons in polarized p+p collisions at  $\sqrt{s}=200$  GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., Phys. Rev. D 103 (2021) 5, 052009
76. Transverse momentum dependent forward neutron single spin asymmetries in transversely polarized p+p collisions at  $\sqrt{s}=200$  GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., Phys. Rev. D 103



(2021) 3, 032007

77. Production of  $\pi^0$  and  $\eta$  mesons in U+U collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=192$  GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., Phys. Rev. C 102 (2020) 6, 064905
78. Production of b,bbar at forward rapidity in p+p collisions at  $\sqrt{s}=510$  GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., Phys. Rev. D 102 (2020) 9, 092002
79. Polarization and cross section of midrapidity  $J/\psi$  production in p+p collisions at  $\sqrt{s}=510$  GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., Phys. Rev. D 102 (2020) 7, 072008
80. Measurement of jet-medium interactions via direct photon-hadron correlations in Au+Au and d+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., Phys. Rev. C 102 (2020) 5, 054910
81. Measurement of charged pion double spin asymmetries at midrapidity in longitudinally polarized p+p collisions at  $\sqrt{s}=510$  GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., Phys. Rev. D 102 (2020) 3, 032001
82.  $J/\psi$  and  $\psi(2S)$  production at forward rapidity in p+p collisions at  $\sqrt{s}=510$  GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., Phys. Rev. D 101 (2020) 5, 052006
83. Measurement of  $J/\psi$  at forward and backward rapidity in p+p, p+Al, p+Au, and 3He+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV, PHENIX Collaboration, U.A. Acharya et al., Phys. Rev. C 102 (2020) 1, 014902
84. Nuclear-modification factor of charged hadrons at forward and backward rapidity in p+Al and p+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV, PHENIX Collaboration, C. Aidala et al., Phys. Rev. C 101 (2020) 3, 034910
85. Pileup corrections on higher-order cumulants, Toshihiro Nonaka, Masakiyo Kitazawa, Shinichi Esumi, Nucl. Instrum. Meth. A 984 (2020) 164632
86. Reconstructing particle number distributions with convoluting volume fluctuations, Shinichi Esumi, Kana Nakagawa, Toshihiro Nonaka, Nucl. Instrum. Meth. A 987 (2021) 164802
87. Mapping the Phases of Quantum Chromodynamics with Beam Energy Scan, Adam Bzdak, Shinichi Esumi, Volker Koch, Jinfeng Liao, Mikhail Stephanov et al., Phys. Rept. 853 (2020) 1-87

#### <レビュー、解説、書籍等>

1. 笹 公和, “難測定核種の加速器質量分析による高感度検出手法の開発”, 応用物理学会放射線分科会誌「放射線」, 45(3) (2020) 128.
2. 中條 達也, ”LHC 超前方領域で切り拓く新しい量子色力学, カラーガラス凝縮と QGP 熱化機構”, 原子核研究 第 65 巻 1 号 (2020 年 9 月)

#### <学位論文 (修士) >

1. 数理物質科学研究科・修士 (理学)、市沢太地、「RHIC-STAR 実験 19.6 GeV 金 + 金衝突における指向的方位角異方性の測定」(Measurements of directed flow in  $\sqrt{s_{NN}}=19.6$  GeV Au-Au collision at RHIC-STAR experiment)
2. 数理物質科学研究科・修士 (理学)、一色萌衣、「RHIC-STAR 実験  $\sqrt{s_{NN}}=200$  GeV 金 + 金衝突における  $\Lambda$  粒子および  $\Xi$  粒子を用いた相関関数測定によるバリオン束縛状態の探索」(Search

for baryon bound state by correlation function measurement using  $\Lambda$  and  $\Xi$  particles in  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV Au+Au collision at RHIC-STAR experiment)

3. 数理物質科学研究科・修士(理学)、伊藤直利、「高エネルギー原子核衝突事象を記述する統一フレームワーク (JETSCAPE) を用いた理論モデルの検証と最適パラメータ抽出」(Verification of nuclear theoretical model and extraction of optimum parameters using unified framework (JETSCAPE) that describes high-energy nuclear collision events)
4. 数理物質科学研究科・修士(理学)、大久保孝祐、「RHIC-STAR 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 3.0, 7.2, 54.4$  GeV 金+金衝突におけるラムダ粒子のグローバル偏極の測定」(Measurements of global polarization of Lambda hyperons in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 3.0, 7.2, 54.4$  GeV with RHIC-STAR experiment)
5. 数理物質科学研究科・修士(理学)、佐藤優里、「RHIC-STAR 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 27$  GeV 金+金衝突における Event Plane Detector を用いた中心衝突度の決定と正味陽子数分布の高次キュムラントの測定」(Centrality determination with the Event Plane Detector and measurements of higher order cumulants of net-proton distributions in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}}=27$  GeV from STAR)
6. 数理物質科学研究科・修士(理学)、須藤悠久、「LHC-ALICE 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV 鉛+鉛衝突におけるボトムクォーク由来電子の楕円の方位角異方性の測定」(Measurement of electron  $v_2$  from bottom quark in Pb-Pb collisions at 5.02 TeV at LHC-ALICE experiment)
7. 数理物質科学研究科・修士(理学)、津久井宏祐、「J-PARC E16 実験における飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC) の性能評価および新型 MRPC の開発」(Performance evaluation of Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) for time-of-flight detector in J-PARC E16 experiment and development of new MRPC)
8. 数理物質科学研究科・修士(理学)、富田啓介、「回転磁場を利用した不安定核  $^{29}\text{P}$ ,  $^{25}\text{Al}$  の核磁気モーメントの符号測定」(Measurement of the sign of nuclear moment for unstable nuclei  $^{29}\text{P}$ ,  $^{25}\text{Al}$  by using rotating magnetic field)
9. 数理物質科学研究科・修士(理学)、中里龍馬、「RHIC-STAR 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 27$  GeV 金+金衝突における反応平面検出器を用いた中心衝突度決定に関する研究」(Centrality determination using Event Plane Detector in  $\sqrt{s_{NN}} = 27$  GeV Au-Au collisions at RHIC-STAR experiment)
10. 数理物質科学研究科・修士(理学)、矢崎敬祐、「LHC-ALICE 実験  $\sqrt{s} = 13$  TeV 陽子-陽子衝突における飛跡検出器及び電磁カロリメータ検出器群を用いたフルジェットの測定」(Measurement of Full Jet using track detectors and electromagnetic calorimeters in p-p collision at 13TeV at LHC-ALICE experiment)

#### <学位論文(学士)>

1. 物理学類・学士(理学)、麻谷有輝、「LHC-ALICE 実験超前方光子測定用電磁カロリメータ開発に向けた p 型シリコンセンサーの動的特性の測定」
2. 物理学類・学士(理学)、浅水微野、「J-PARC E16 実験に向けた Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC) の製作と印加電圧及び閾値電圧依存性についての性能評価」
3. 物理学類・学士(理学)、池田誠、「RHIC-STAR 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 19.6$  GeV 金+金衝突における量子力学的干渉効果の測定」
4. 物理学類・学士(理学)、岩永一希、「RHIC-STAR 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 19.6$  GeV 金+金衝突における iTPC 検出器を用いた正味陽子数揺らぎのアクセプタンス依存性の測定」

5. 物理学類・学士（理学）、榎本真隆、「LHC-ALICE 実験超前方光子測定用電磁カロリメータ開発に向けた P 型シリコンセンサの静的性能の評価」
6. 物理学類・学士（理学）、大池駿、「AMPT モデルを用いた  $\sqrt{s_{NN}} = 20\text{GeV}$  金 + 金衝突における方位角異方性とその擬ラピディティ間隔依存性の研究」
7. 物理学類・学士（理学）、永田遼太郎、「RHIC-STAR 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 200\text{ GeV}$  金 + 金衝突における EPD を用いた広い擬ラピディティ領域における方位角異方性の研究」
8. 物理学類・学士（理学）、林実香、「アークプラズマ蒸着源からの出射粒子の測定」
9. 物理学類・学士（理学）、矢野朝陽、「UTTAC 6MV タンデム加速器における  $\bar{p} + {}^{nat}\text{Si}$  反応の研究」

#### <国際会議>

1. G. Yoshida, H. Matsumura, H. Nakamura, A. Toyoda, K. Masumoto, T. Miura, K. Sasa, T. Moriguchi, "Survey Methodology for the Activation of Beamline Components in an Electrostatic Proton Accelerator", 14th International Conference on Radiation Shielding and 21st Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division, ICRS 14/RPSD-2020, Seattle, WA, USA, September 13-17, 2020.
2. N. Novitzky, "Probing small-x gluons with the ALICE Forward Calorimeter upgrade", The VI th International Conference on the Initial Stages (IS2021), online, 10-15 January 2021
3. Takafumi Niida, "Global and local polarization measurements at RHIC and LHC", INT workshop on Chirality and Criticality: Novel phenomena in HIC, May 11-22, 2020, Online (invited)
4. Takafumi Niida, "Experimental overview of spin polarization signatures", ECT star workshop on Spin and Hydrodynamics in Relativistic Nuclear Collisions, Oct. 15-16, 2020, Online (invited)
5. Takafumi Niida, "Global polarization of hyperons from STAR experiment", RHIC and AGS Annual Users Meeting, Oct. 22-23, 2020 (invited)
6. Takafumi Niida, "Vorticity and polarization in heavy-ion collisions", Workshop on tracking, reconstruction and physics performance studies at FAIR and NICA, Dec. 8, 2020, Online (invited)
7. Takafumi Niida, "Vorticity and polarization of hyperons in heavy-ion collisions", NA61/SHINE Open Seminar, Jan. 21, 2021, Online (invited)
8. Takafumi Niida, "Global polarization of  $\Xi$  and  $\Omega$  hyperons in heavy-ion collisions", LBNL-HIT Seminar, Feb. 9, 2021, Online (invited)
9. ShinIchi Esumi, "Centrality determination in STAR at RHIC in BES2 and Fixed-Target program", Workshop on analysis techniques for centrality determination and flow measurements at FAIR and NICA, 24 - 28 August 2020, Online (invited)
10. ShinIchi Esumi, "Results from Beam Energy Scan Program at RHIC-STAR", the International conference on Critical Point and Onset of Deconfinement, CPOD2021, 15 - 19 March 2021, Online (invited)
11. Risa Nishitani, "Measurements of net-proton fluctuation for p + p collisions at  $\sqrt{s} = 200\text{ GeV}$  from the STAR experiment", the International conference on Critical Point and Onset of Deconfinement, CPOD2021, 15 - 19 March 2021, Online

## <国内会議>

1. 菅澤佳世, 三宅美沙, 多田悠馬, 堀内一穂, 大谷昂, 笹公和, 高橋努, 松村万寿美, 落合悠太, 望月優子, 高橋和也, 中井陽一, 本山秀明, 松崎浩之, “約 100 年分のドームふじアイスコア中  $^{10}\text{Be}$  と  $^{36}\text{Cl}$  の高分解能測定による BC5480 年宇宙線イベントの調査”, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, 2020 年 9 月 8 – 11 日.
2. 大石脩人, 村尾吉輝, 新田紀子, 土田秀次, 富田成夫, 笹公和, 平田浩一, 柴田裕実, 平野貴美, 山田圭介, 千葉敦也, 斎藤勇一, 鳴海一雅, 星野靖, “C60 クラスタールイオンビーム照射による Si 表面構造の形成”, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, 2020 年 9 月 8 – 11 日.
3. 笹公和, 高橋努, 松村万寿美, “ $^{36}\text{Cl}$  の加速器質量分析における妨害同重体  $^{36}\text{S}$  の除去方法の検討”, 第 81 回応用物理学会秋季学術講演会, オンライン開催, 2020 年 9 月 8-11 日.
4. 笹公和, 石井聡, 高橋努, 大和良広, 田島義一, 松村万寿美, 森口哲朗, “筑波大学タンデム加速器施設の現状報告”, オンライン開催, 第 17 回日本加速器学会年会, 2020 年 9 月 2 – 4 日.
5. 黒澤正紀, 笹公和, 石井聡, “対馬花崗岩の流体包有物中のニッケル”, 日本鉱物科学会 2020 年オンライン年会, 2020 年 9 月 16 – 17 日.
6. Shigeo Tomita, Yoko Shiina, Ruri Suganuma, Makoto Matsuda, Makoto Imai, Masao Sataka, and Kimikazu Sasa, “The threshold foil thickness for the disappearance of the vicinage effect on the convoy-electron yield”, 第 21 回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会, 京都大学宇治キャンパス (現地会場とオンラインのハイブリッド形式), 2020 年 12 月 4 – 5 日.
7. N. Oishi, Y. Murao, N. Nitta, H. Tsuchida, S. Tomita, K. Sasa, K. Hirata, H. Shibata, Y. Hirano, K. Yamada, A. Chiba, Y. Saitoh, K. Narumi, Y. Hoshino, “Energy dependence of nanostructure formation by fast C60 cluster ion beam on Si”, 第 21 回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会, 京都大学宇治キャンパス (現地会場とオンラインのハイブリッド形式), 2020 年 12 月 4 – 5 日.
8. 笹公和, “加速器質量分析を用いた宇宙線生成核種および人為起源核種の環境動態研究”, 金沢大学環日本海域環境研究センター セミナー, 金沢大学, 2020 年 11 月 17 日. ” Invited ”
9. 富田成夫, 山崎義明, 石井聡, 笹公和, 左高正雄, 榎本洋, 工藤博, “透過 ERDA によるアルミニウム中の水素 3 次元計測”, 2021 年第 68 回応用物理学会春季学術講演会, オンライン開催, 2021 年 3 月 16 – 29 日.” Invited ”
10. 笹公和, 山崎明義, 石井聡, 富田成夫, 左高正雄, 榎本洋, 工藤博, “構造材料用マイクロビーム装置における多元素同時分析のためのイオンビーム分析システム”, 2021 年第 68 回応用物理学会春季学術講演会, オンライン開催, 2021 年 3 月 16 – 29 日.
11. 脇山義史, 松村万寿美, 松中哲也, 平尾茂一, 笹公和, “阿武隈川における出水時の  $^{129}\text{I}$  の挙動”, 第 7 回福島大学環境放射能研究所成果報告会, コッラセふくしま, 2021 年 3 月 18 日.
12. 中村司, 山崎信哉, 石井聡, 富田成夫, 左高正雄, 榎本洋, 工藤博, 笹公和, 末木啓介, “マイクロビーム PIXE による福島第一原子力発電所事故で放出した放射性粒子の元素分布測定”, 第 22 回「環境放射能」研究会, 2021 年 3 月 10 – 12 日, オンライン開催.
13. A. Ozawa, Present status of Rare-RI Ring (R3) and mass measurements RIBF Users Meeting 2020, 2020, 9/8-10, RIKEN (On-line), (Invited).
14. 富田啓介,  $^{29}\text{P}$  の核磁気モーメントの符号測定, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 14 日 ~ 17 日 (オンライン)

15. 中條 達也、「FoCal 他前方カロリメータ」、KEK 研究会「素粒子・原子核コライダー物理の交点」、2020 年 8 月 31 日 (月) - 9 月 1 日 (火)、招待講演
16. 中條 達也、「ALICE Forward Calorimeter (FoCal); a high granularity Si-W EMCal and HCal」、新学術「クラスター階層」第 2 回検出器ワークショップ、2020 年 12 月 25 日 (金)
17. 中條 達也、「LHC 超前方領域で切り拓く新しい量子色力学 カラーグラス凝縮と QGP 熱化機構」、原子核実験セミナー、大阪大学、2021/1/6(水)
18. N. Novitzky, "Experimental overview of jets and photons in heavy ion collisions", 第 38 回 Heavy Ion Cafe, 2020 年 9 月 18 日 (金), online, 招待講演
19. 野中 俊宏、「核子当たり衝突エネルギー 200 GeV の金-金衝突において STAR 実験で初測定された正味陽子数分布の 6 次のキュムラント」(日本物理学会若手奨励賞受賞記念講演)、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14-17 日
20. 新井田 貴文、「Probing QGP with flow and particle correlations」(招待講演)、日本物理学会 2020 年秋季大会、シンポジウム「揺らぎと流体的発展からみる物理の面白さ」、Sep. 15, 2020
21. 熊岡 卓哉、「LHC-ALICE 実験における鉛-鉛衝突を用いたフルジェットの原子核効果因子 (RAA) の測定」、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14-17 日
22. 須藤 悠久、「LHC-ALICE 実験 鉛 + 鉛  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV における重クォーク起源電子の楕円の方位角異方性の測定」、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14-17 日
23. 佐藤 優里、「RHIC-STAR 実験 Beam Energy Scan II に向けた新しい中心衝突度の決定と保存量揺らぎの測定への影響」、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14-17 日
24. 大久保 孝祐、「RHIC-STAR 固定標的実験  $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$  GeV 金 + 金衝突におけるラムダの偏極の測定」、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14-17 日
25. 喜屋武 奨之、「J-PARC E16 実験のための、MRPC を用いたハドロン粒子識別装置の研究開発」、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14-17 日
26. 新井田 貴文、「高エネルギー原子核衝突で生成される渦と偏極」、Heavy Ion Pub, Sep. 28, 2020
27. 野中 俊宏、「高次キュムラントに対するパイルアップ補正」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 12-15 日
28. 西谷 理佐、「RHIC-STAR 実験 p+p 衝突  $\sqrt{s} = 200$  GeV における正味陽子数揺らぎの測定」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 12-15 日
29. 大久保 孝祐、「RHIC-STAR 固定標的実験  $\sqrt{s_{NN}} = 7.2$  GeV 金 + 金衝突におけるラムダのグローバル偏極の測定」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 12-15 日
30. 一色 萌衣、「RHIC-STAR 実験  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV 金 + 金衝突における  $\Lambda$ - $\Lambda$  および  $\Xi$ - $\Xi$  2 粒子相関関数測定」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 12-15 日
31. 江下 もも、「LHC-ALICE 実験 陽子-陽子衝突 13 TeV における重クォーク起源ジェット生成の粒子多重度依存性の測定」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 12-15 日
32. 千葉 俊哉、「LHC-ALICE 実験  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  TeV 陽子-鉛衝突におけるボトムクォーク由来電子の粒子多重度依存性の測定」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 12-15 日

#### <科学研究費、外部資金取得状況>

1. 科学研究費 基盤研究 (A)、蓄積リングでの質量測定によるハロー原子核の探索、代表、小沢 顕、4,290 千円
2. 科学研究費 基盤研究 (C)、中性子星の構造解明に向けた重い中性子過剰核のスキン厚測定、代表、

森口 哲朗、3,380 千円

3. 科学研究費 挑戦的研究 (開拓)、宇宙線生成核種の分析にもとづく断層活動度の新しい評価法の開発と検証、分担、笹公和
4. 科学研究費 基盤研究 (B)、両極アイスコアの高解像度分析による放射性ヨウ素・塩素のフォールアウト変動の解明、分担、笹公和
5. 科学研究費 基盤研究 (A)、高解像度マルチアーカイブ分析による太陽地磁気変動史と宇宙線イベントの解明、分担、笹公和
6. 科学研究費 基盤研究 (S)、過去 1 万年間の太陽活動、分担、笹公和
7. 科学研究費 基盤研究 (A)、多核種分析による完新世の極端太陽現象の頻度と規模解明、分担、笹公和
8. 科学研究費 基盤研究 (A)、ALICE 実験ジェットと前方光子で探る高温クォーク物質生成の起源、代表、中條達也、4,290 千円
9. 科学研究費 基盤研究 (S)、LHC 超前方光子測定によるグルーオン飽和と QGP 生成起源、代表、中條達也、29,250 千円
10. 科学研究費 基盤研究 (B)、LHC 鉛原子核衝突：フォトンで探る極初期状態 (initial stage)、分担、中條達也
11. 科学研究費 新学術領域研究 (研究領域提案型)、クォーク階層とハドロン階層を繋ぐ動的機構、分担、中條達也
12. 科学研究費 基盤研究 (S)、高次ゆらぎと粒子相関による高密度クォーク核物質の 1 次相転移と臨界点観測への挑戦、代表、江角晋一、22,750 千円
13. 伊藤科学振興会研究助成、原子核衝突ビームエネルギー走査による高密度クォーク核物質の研究、代表、江角晋一、1,000 千円