

VI. 原子核実験グループ

教授	三明康郎、小沢顕
准教授	江角晋一、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
研究員	坂井真吾
技官	加藤純雄
大学院生	20名（数理物質科学研究科後期課程3名、前期課程16名、教育研究科前期課程1名） 李準一 (D3)、金秉徹 (D3)、西谷理佐 (D1)、 落合悠太 (M2)、景澤怜央 (M2)、富田圭介 (M1)、 市沢太地 (M2)、高村匡広 (M2)、田所賢一 (M2)、 中川果南 (M2)、畠山みな (M2)、星有輝子 (M2)、 一色萌衣 (M1)、伊藤直利 (M1)、大久保孝祐 (M1)、佐藤優里 (M1)、 須藤悠久 (M1)、津久井宏祐 (M1)、中里龍馬 (M1)、矢崎敬祐 (M1)
卒業研究生	パクハンセオ、磯朋也、江下もも、河端孝政、 喜屋武奨之、田辺飛鷹、千葉俊哉

スイス・フランスの欧州共同原子核研究機構（CERN）のLHC加速器や、アメリカ・ブルックヘブン国立研究所（BNL）のRHIC加速器を用いた高エネルギー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。特に、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（BES2）により、QCD臨界点と1次相転移の探索実験を行う。将来的には、ドイツFAIR計画、ロシアのNICA計画、中国のHIAF計画や、日本の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さらに高密度領域での研究を目指す。また、理研での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する。

クロスアポイント教員のオランダ・ユトレヒト大学のThomas Peitzmann氏、Marco van Leeuwen氏は、筑波大学グループとLHC-ALICE実験を共同で推進するとともに、ALICE実験における将来計画である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、向井 もも)

(1) 稀少RIリングでの質量測定

鉄からウランまでの重元素のうち半分を生成したと考えられているrプロセスは、宇宙での起源も明らかになっておらず、実験的にはほとんど検証されていない。我々のグループは、rプロセスを決める物理量の中で質量に注目し、rプロセスに関与する不安定核(RI)の質量測定に取り組んでいる。2019年度は、2018年11月に行ったNi領域での質量測定実験のデータ解析を引き続き進めている。2019年12月には、Ni領域での質量と寿命測定に関する実験プロポーザルを理研RIBFに提出した。

(2) 稀少 RI リングでの精密質量測定に用いる飛行時間検出器の開発

稀少 RI リングでは、リング内におけるイオンの飛行時間からイオンの質量を精密に導出するため、高時間分解能 ($\sigma < 50$ ps) の飛行時間検出器が不可欠である。また、飛行時間測定のスタート信号を発生する検出器では、通過粒子のエネルギーストラグリングを可能な限り抑える必要がある。小沢研究室ではこれらの要求を満たす飛行時間検出器の開発を行っている。検出器は一枚の二次電子発生用薄膜と複数枚の平行に配置した電極、永久磁石からなり、粒子通過に伴って薄膜から発生した二次電子を、交差電磁場でマイクロチャンネルプレート検出器へ誘導し検出する仕組みである。

これまでの開発では、検出器内での放電が原因で安定動作できないことが課題だった。今年度は、電場強度を下げることで安定動作可能な電磁場設定を確立し、本番環境と同等の重イオンビームを使用して性能試験を行った。性能試験では、放射線医学総合研究所 HIMAC で供給される ^{84}Kr ビーム (200 MeV/u) を検出器に照射し、時間分解能と検出効率を評価した。時間分解能は $\sigma < 21$ ps、検出効率は二次電子発生用薄膜のほぼ全面 ($\phi 40$ mm) で 90% 以上であり、稀少 RI リングでの実用に必要な性能が得られた。また、 ^{84}Kr ビームまたは ^{40}Ar ビームを Be 標的に入射して核破砕反応により生成した二次粒子を検出器に照射し、検出効率の原子番号 (Z) 依存性を調べた。本調査により、本検出器は二次電子発生用薄膜としてアルミ蒸着マイラー膜を使用した場合に、 $Z \geq 18$ のイオンビームであれば約 80% 以上の効率で検出可能であることがわかった。

(3) 陽子ドリップライン核 ^{17}F の反応断面積測定

不安定核における興味深い現象の一つにスキン構造 (原子核表面に現れる陽子もしくは中性子のみの層) が挙げられる。スキンの厚さ (Δr) は原子核中の陽子密度分布半径 (r_p) と中性子密度分布半径 (r_n) の差として定義されるため、 Δr を実験的に知るためには、 r_p と r_n の導出が必要となる。天然に存在しない不安定核は人工的に生成する必要があり、また短寿命で崩壊することから、現状、スキン厚の測定手法は必ずしも確立されているわけでない。そこで、本研究では陽子標的を用いた反応断面積 (σ_R) 測定に注目する。 σ_R は原子核の大きさに感度を持つことから、 σ_R 測定は半径を知る上で有効とされている。特に、反応標的として陽子標的を用いることで、 r_p と r_n の導出、つまり、 Δr を導出できると期待されている。これは、核子核子全断面積が、“陽子-陽子” と “陽子-中性子” で異なることに基づく。本研究では、陽子ドリップライン核 ^{17}F に注目し、固体水素標的を用いた σ_R 測定を実施した。実験は放射線医学総合研究所の HIMAC で行った。令和元年度は主にデータ解析を進めた。図 1 は現在得られている σ_R の解析結果を示す。核子当たり数 10 から数 100 MeV までの広い領域において、 σ_R のエネルギー依存性を取得できた。図中のグラウバーモデルは、中高エネルギー領域における代表的な原子核反応モデルであり、入射核および標的核の密度分布によって σ_R を表すことができる。今後は、 ^{17}F のスキン厚の導出に向け、実験データの更なる解析と、グラウバーモデルの検証を進める予定である。

(4) 異なる Si 標的による核偏極の生成

我々のグループは、応用加速器部門において 偏極イオン源からの偏極ビームを利用した不安定核の核モーメントの測定を行なっている。これまでは、偏極陽子ビームの立ち上げ、および不安定核の核モーメント測定のためのベータ線を指標とした核磁気共鳴 (β -NMR) 装置の立ち上げなどを行なってきた。2019 年度は、12 MeV 偏極陽子ビームを用い、不安定核 ^{29}P ($T_{1/2} = 4.2$ s) をプローブとして、異なる 4

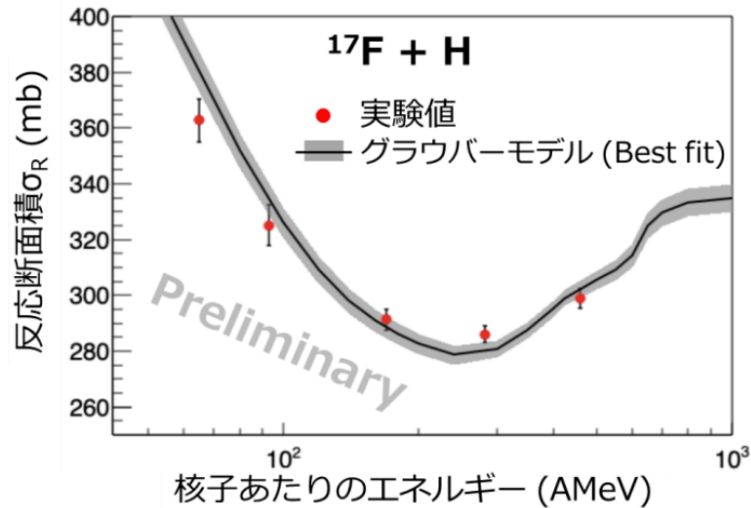


図1 ^{17}F と陽子標的との反応断面積 (σ_R) のエネルギー依存性。赤丸は本研究で得た実験値、実線はグラウバーモデルを用いたフィッティング結果を表す。

種類の Si 標的 (n-type 低-抵抗、n-type 高-抵抗、p-type 低-抵抗、p-type 高-抵抗) に対して、核偏極量の測定を行った。実験では、静磁場を固定 (約 1.6kG) し、高周波磁場 (RF) を掃引した。測定結果を図 2 に示す。2.95MHz 付近の凹みが、 ^{29}P の核磁気モーメント (1.2349 n.m.) に相当している。凹みの深さは、核偏極量に相当している。実験結果から、Si 標的の違いにより核偏極量が大きく変わることがわかった。特に、Si (n-type 高-抵抗) および Si (p-type 高-抵抗) で大きな核偏極量が観測された。Si 標的の違いによる核偏極量の大きな変化は、Si 標的中の超微細相互作用が異なっていることを示唆している。今後は、緩和時間、共鳴幅などの測定を行い、Si 標的中の超微細相互作用を解明していく。

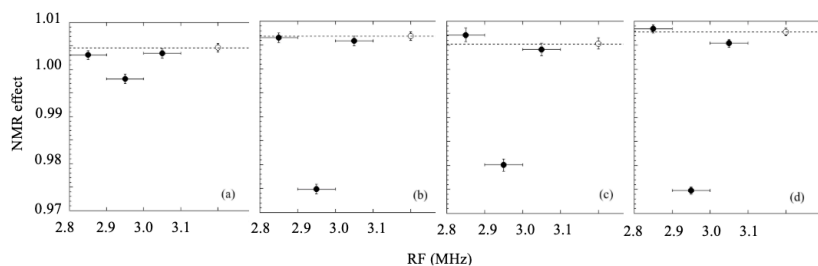


図2 異なる Si 標的に照射した際の NMR スペクトル。(a) Si (n-type 低-抵抗) の結果。(b) Si (n-type 高-抵抗) の結果。(c) Si (p-type 低-抵抗) の結果。(d) Si (p-type 高-抵抗) の結果。黒丸は高周波磁場 (RF) をかけた結果、白丸は RF なしでの結果を示す。

(5) 構造材料計測用マイクロビーム分析装置による水素イメージング測定

筑波大学 6 MV タンデム加速器において、構造材料の組成解析を目的としたマイクロビーム分析装置の開発を進めている。マイクロビーム分析装置は、ライン長が 8.73 m であり、Oxford Microbeams 社製 OM-2000 を用いて MeV イオンビームの収束をおこなう。これまでに、3 MeV の陽子ビームと 9 MeV の ^4He ビームなどのマイクロビーム形成試験を実施しており、約 $1.5\ \mu\text{m}$ のビーム収束径を達成し

ている。水素の測定では、 ^4He ビームによる透過型の弾性反跳粒子検出分析法 (Elastic Recoil Detection Analysis : ERDA) を用いている。高エネルギーイオン ($>0.75\text{ MeV/核子}$) を標的軽元素原子核に入射すると、角度やエネルギー選択的な核弾性散乱過程を引き起こす。特に $7 - 10\text{ MeV}$ の ^4He 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 2 次元イメージング測定が可能になる。反跳水素のエネルギーは水素がイオンと衝突した位置の深さ (表面からの距離) を反映しているため、材料中の水素の 3 次元分布情報へと変換可能である。水素チャージしたアルミニウム材料中の水素に対して、 8 MeV の ^4He ビームを用いた透過型 ERDA 法の概略と表面から $2\text{ }\mu\text{m}$ ごとの深さ方向の水素分布の断層画像を図に示す [1]。図では明るいところほど水素濃度が高いことを示しており、水素は表面層よりも深部に存在し、直径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 程度の集積体を形成して、3 次元的にも不均一に分布していた。水素濃度は最大で $1.6 \times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ 程度であった。

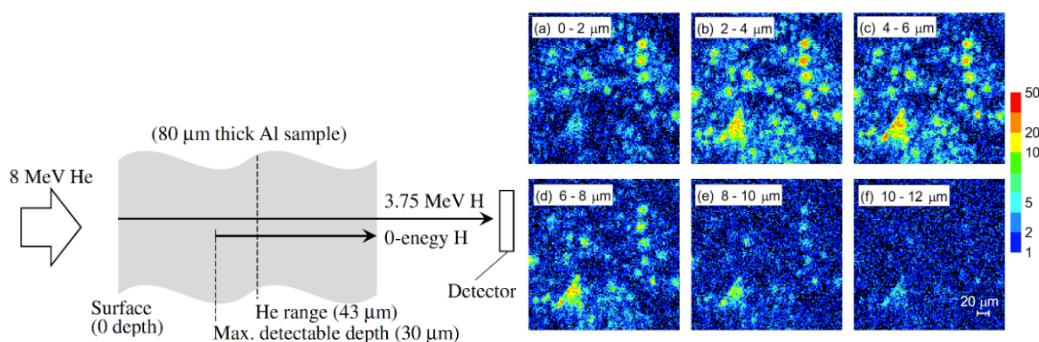


図3 透過型 ERDA 測定法概略図

図4 水素チャージしたアルミニウム材料中の水素分布

(6) 加速器質量分析法を用いた塩素 ^{36}Cl 測定における低バックグラウンド検出手法の開発

^{36}Cl (半減期 30.1 万年) は宇宙線生成核種として知られており、地球科学分野等で幅広く応用されている。 ^{36}Cl の測定は、半減期が長く放射線計数法による測定が困難なため、加速器質量分析法 (AMS) が主に用いられている。しかし、AMS では同重体 ^{36}S が妨害核種となり、 ^{36}Cl の高感度測定への妨げとなる。そこで、筑波大学 AMS システムでの ^{36}Cl 測定における ^{36}S の影響低減を目的として、 ^{36}Cl の最適な検出エネルギーおよび測定スペクトルの解析手法などを考察した。筑波大学 AMS システムでは、加速電圧 6.0 MV により、 $^{36}\text{Cl}^{8+}$ を 54.0 MeV に加速して測定をおこなっている。ガス検出器内における ^{36}Cl と ^{36}S の損失エネルギー差を大きくして、測定スペクトル上でそれぞれの核種を分離識別することができる。しかしながら、加速器の荷電変換炭素フォイルでの荷電変換効率 ($^{36}\text{Cl}^- \rightarrow ^{36}\text{Cl}^{8+}$) が 8% と悪く、得られるカウント数の少なさが問題となっていた。そこで、加速電圧 6.0 MV においてより荷電変換効率が高い 36.0 MeV ($^{36}\text{Cl}^{5+}$; 15%, Ar ガス) や 48.0 MeV ($^{36}\text{Cl}^{7+}$; 12%, 炭素フォイル) のエネルギーについて測定した (図 5)。特に $^{36}\text{Cl}^{7+}$ の 48.0 MeV の場合は、測定スペクトル上での分離度 M' [2] が 1.4 ch と、 54.0 MeV における 1.5 ch より劣るものの、同程度のバックグラウンド同位体比を得ることができた。また、測定データの解析によって ^{36}S の影響を低減させる手法を開発した。ゲート範囲の見直しや、全粒子エネルギーデータの活用などを検討した結果、バックグラウンド同位体比として $^{36}\text{Cl}/\text{Cl} < 4 \times 10^{-16}$ を得た。

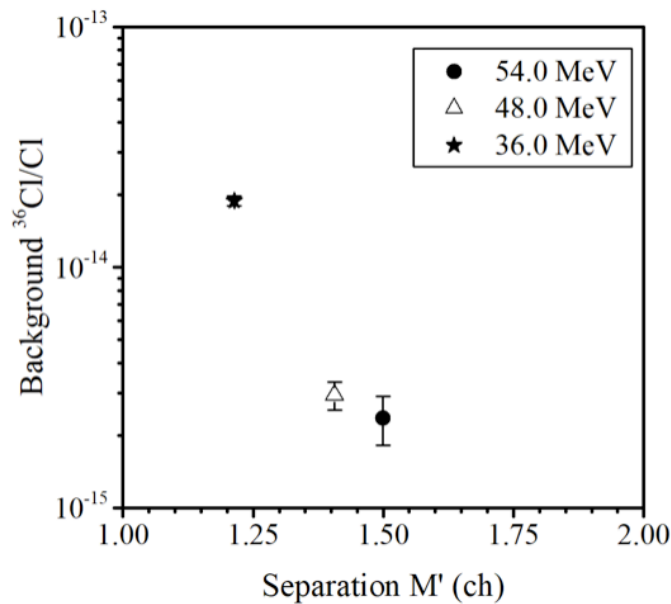


図5 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ バックグラウンドに関するエネルギー依存性と ^{36}Cl および ^{36}S の分離度.

(7) 宇宙線生成核種 ^{10}Be と ^{36}Cl の降下フラックス

宇宙線は平均エネルギーが 1 GeV 程度の高エネルギー粒子であり、地球へ入射すると地球を構成する元素との間で核反応を起こし様々な粒子を生成する。この時に生成される粒子の中でも ^{10}Be と ^{36}Cl は高生成率 (^{10}Be ; $290 \text{ atoms m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ^{36}Cl ; $25 \text{ atoms m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) かつ長寿命 (^{10}Be ; 1.36 Ma, ^{36}Cl ; 0.301 Ma) である。現在では、年代測定や環境トレーサー、過去の宇宙線強度変動の復元など様々な分野で利用されている。 ^{10}Be と ^{36}Cl は大気中で類似の挙動を示すと考えられているものの、測定が困難なこともあって長期的に同時に観測された例は少ない。よって、 ^{10}Be と ^{36}Cl 降下フラックスの測定をおこない、降下フラックス同士の相関を検討することで、 ^{10}Be と ^{36}Cl の環境中での振る舞いについて検討した。2014 年 1 月から 2018 年 12 月までのつくば市における ^{10}Be , ^{36}Cl 降下フラックスを一か月ごとに測定した。 ^{10}Be 降下フラックスは 50 ± 2 から $(1.2 \pm 0.1) \times 10^3 \text{ atoms m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の範囲を変動していて、また ^{36}Cl 降下フラックスは 2 ± 1 から $(1.4 \pm 0.1) \times 10^2 \text{ atoms m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の範囲を変動していた。結果から、 ^{10}Be , ^{36}Cl 降下フラックスの相関を計算すると、相関係数 $r = 0.51$, $p < 0.01$ であり、2 つの降下フラックスは相関を持っていることがわかった。観測地点によって ^{10}Be , ^{36}Cl 降下フラックスは季節変動を持つことが示唆されている。得られた結果を各月ごとに平均すると、春と秋に降下フラックスが増大する二山型の傾向がみられた。これは偏西風の影響等により、春と秋に成層圏と対流圏の交換速度が上昇するためである。図 6 につくば市における月平均の ^{10}Be と ^{36}Cl の降下フラックスを示す。

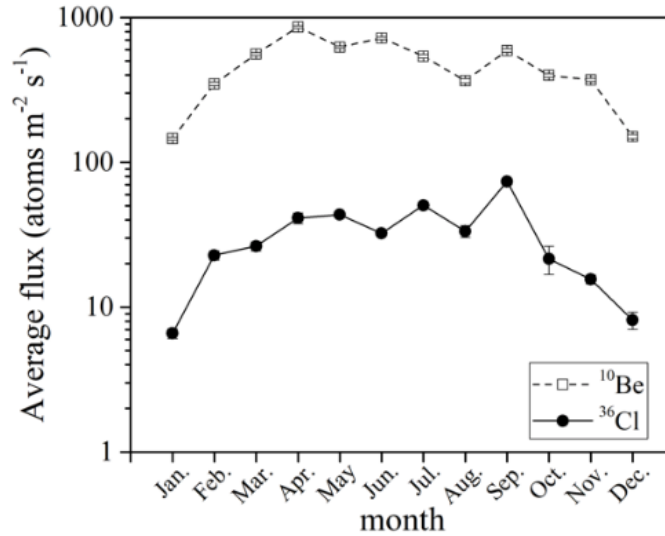


図6 茨城県つくば市における ¹⁰Be, ³⁶Cl 降下フラックスの月平均変動

【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、新井田貴文、野中俊宏、Norbert Novitzky、坂井真吾、加藤純雄)

(8) LHC-ALICE 実験高度化に向けた FoCal プロトタイプの 2018 年テストビーム解析結果及び検出器評価用テストベンチの構築

QGP 物性を理解するにあたり、未解明な点の一つとして原子核衝突初期状態がある。近年の研究で、衝突初期状態にカラーガラス凝縮 (Color Glass Condensate, CGC) と呼ばれる物質状態の存在が提唱されているが、未だ発見には至っていない。CGC に感度の高い量として、前方方向の直接光子の測定が重要なプローブになると考えられている。そこで、衝突前方方向での直接光子の測定を目的とした、LHC-ALICE 実験のアップグレード計画の 1 つとして、FoCal (Forward Calorimeter) の開発及び性能評価を行っている。

2018 年に CERN の PS と SPS の両加速器において、FoCal のプロトタイプである Mini-FoCal の性能評価実験を行った。まず、ハドロンビームを 1 枚のシリコンパッドセンサーに打ち込む実験を計 15 枚分を行い、その平均を求めることにより、最小電離粒子を測定したパッドの ADC 平均値は 117.2 チャンネルであることが測定された。この値より求めた 1ADC あたりのシリコンでのエネルギー損失は 0.76keV であることが計算された。また、シミュレーション結果と照らし合わせることで、エネルギー分解能が求められ、入射エネルギーの再構成可能性も証明された。(図 7) その結果、 $\Delta E/E = 3.7\%$ のエネルギー分解能を得た。

この結果及びアップデートされたシミュレーションの結果を受けて、2019 年には FoCal の要求するダイナミックレンジ及び分解能を満たすために、新たな読み出し用集積チップの候補である SkiROC2 の性能評価も行われた。チップ単体の性能としては、最新のシミュレーション結果により計算されたシャワーマックスにおける 1.5 TeV のエネルギーに対して、1.4 TeV 程度のエネルギーが測定可能であることがわかった。今後はチップ単体ではなく、実際に Si パッドを通した際の性能評価実験を行うことが必要である。実験室における高強度レーザ使用のための環境構築も 2019 年に行われたため、今後

は本レーザーシステムを活用して、検出器の評価実験を行う予定である。

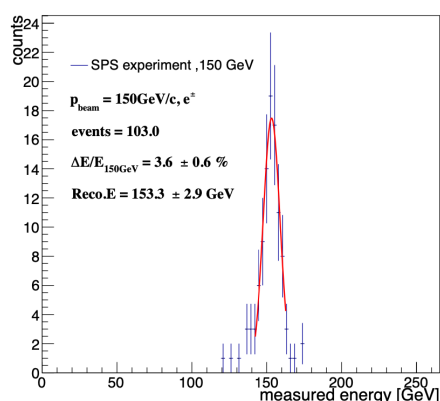


図7 150 GeV の粒子を入射した際に得られた陽電子選定後の Mini-FoCal 全体での測定エネルギー分布 [3]

(9) E16 実験に向けた MRPC の時間分解能評価

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 ϕ 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。 ϕ 中間子が電子陽電子対に崩壊する時の ϕ 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、 ϕ 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 MRPC(Multi-gap Resistive Plate Chamber) の導入を検討している。

2019 年に SPring-8 の LEPS で行った逆コンプトン散乱による反跳電子を利用したテストビームにおいて、MRPC の時間分解能はおよそ 70 ps 程度まで達成することが出来た。また、E16 実験では数 MHz 程度の高レートのイベントが予想される為、FPGA を搭載した回路を新たに採用し情報処理の高速化を行った。FPGA を搭載した回路系での時間分解能の評価を宇宙線を利用して行った結果、時間分解能はおよそ 70 ps 程度であった。これは SPring-8 で行った実験とは異なる情報処理回路系を用いて一致する結果を得られたことを示しており、このことから新たに採用した FPGA を搭載した回路系でも MRPC は同等の精度で利用することが可能であり、また MRPC の時間分解能評価の信頼性を高いことが分かった。

(10) ALICE 実験 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 9)、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、未だ実験的証拠が得られていない、高エネルギーハドロン of 普遍的な描像「カラーグラス凝縮 (CGC)」の世界初観測、及び小さな x 領域における原子核内グルーオン・分布関数を世界最高精度で測定することを主な目的としている。この検出器の ALICE 実験への導入を 2025-2026 年の長期 LHC 停止期間 (LS3) に、また最初の物理測定を 2027 年 (LHC-Run-4) に行うため、計画を進めている。2019 年度において

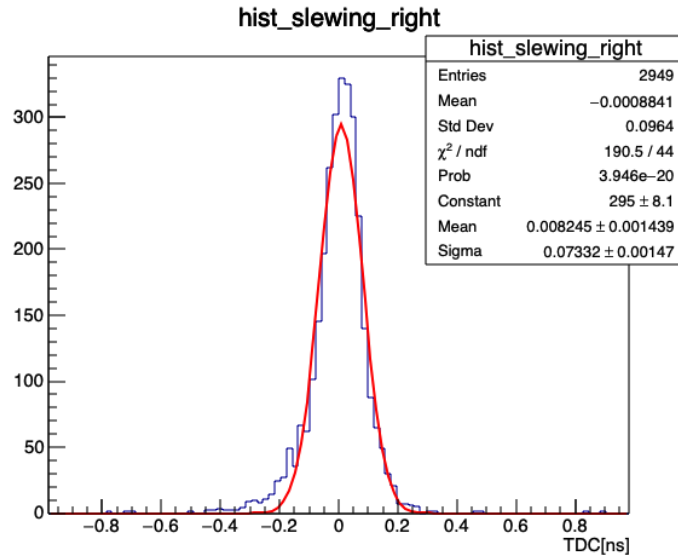


図 8 Spring-8 での MRPC の時間分解能評価

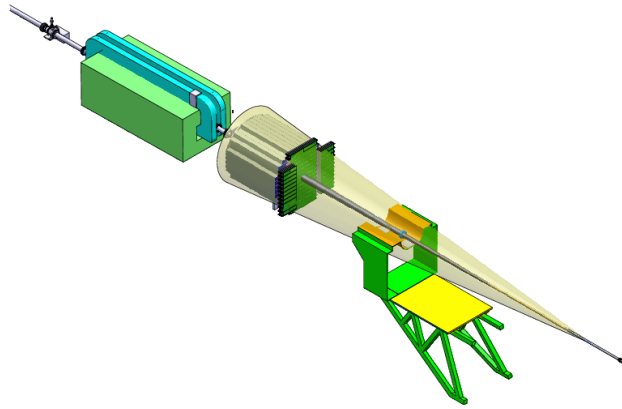
は、実験提案書 (Letter of Intent, LoI) [4] の策定と公開、国内外のコラボレーション形成、ALICE 実験内における外部パネルも含めた FoCal プロジェクトのレビュー (2020 年 1 月) などを行なった。筑波大グループは FoCal 電磁カロリメータ部分の FoCal-E Pad 検出器の主担当である。グルノーブル LPSC 研究所、理化学研究所、および高エネルギー加速器研究機構のシリコン検出器プラットフォームと新たな協力関係を結び、2020 年度からの最終試作機に向けた準備に入った。さらに 2018 年度の FoCal プロトタイプの性能評価、過去の試作機の性能評価 [5]、新規読出しテスト、レーザー構成システムの構築を行なった。

本原稿執筆現在 (2020 年 5 月末)、FoCal プロジェクトは ALICE 実験の正式なプロジェクトとして承認され (2020 年 4 月)、さらに LHC 実験計画の最高意識決定機関である LHCC 委員会 (LARGE HADRON COLLIDER COMMITTEE) に LoI を提出し、2020 年 6 月、同意委員会にて審査が予定されている。

(11) 陽子・陽子 $\sqrt{s} = 5.02 \text{ TeV}$ における荷電ジェットの横運動量分布

ALICE 実験において、陽子・陽子 $\sqrt{s} = 5.02 \text{ TeV}$ での荷電ジェット生成断面積および横運動量 (p_T) 分布を測定した [6]。 p_T 領域は、 $5 < p_T < 100 \text{ GeV}/c$ である。ジェットの再構成には、荷電粒子のみを用い、anti- k_T アルゴリズムというジェット再構成法を用いた。ジェットの半径方向の大きさを表す R (ジェット分解能パラメータ) は、0.2, 0.3, 0.4, および 0.6 であり、ジェットを測定する擬ラピディティ領域は $|\eta| < 0.9 - R$ である。荷電粒子のジェット生成断面積を、LO (leading-order)

及び NLO (next-to-leading-order) での摂動 QCD 計算 (pQCD) と比較した。その結果、NLO 計算の結果の方が、実験値をより再現していることが分かった。また異なる R でのジェット生成断面積比を求めた (図 10)。その結果、これらの比は、低い p_T から高い p_T にかけて増加し、高い p_T 領域では一定になっていることが分かった。これはジェットのコリメーションが、高い p_T の方が、低い p_T と比べてより大きいことを示している。これらの結果は、pQCD 計算とのより詳細な比較を可能とすると同時に、同衝突エネルギーにおける鉛・鉛衝突でのジェット測定に対して、重要なベースラインデータを与え、LHC 重イオン衝突で生成される高温・高エネルギー密度物質中のパートン・エネルギー損失機構



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

図9 FoCal 検出器の外観。前方の中央部に見える緑色の板状のものが FoCal-E であり、その後方に FoCal-H (ハドロンカロリメータ) がある。

解明の重要な基礎データを与える。

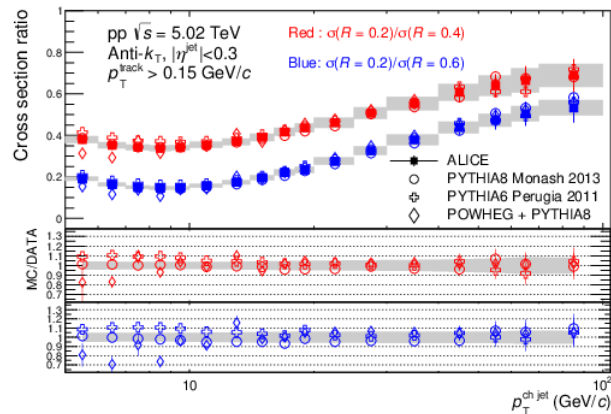


図10 荷電ジェット生成断面積の異なるジェット分解能での比 [6]。 $\sigma(R = 0.2)/\sigma(R = 0.4)$ (赤) と $\sigma(R = 0.2)/\sigma(R = 0.6)$ (青) を、理論計算 LO (PYTHIA) と LO (POWHEG+PYTHIA8) で比較した。

(12) ALICE 実験 鉛・鉛および陽子・陽子衝突 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV におけるハドロン-ジェット相関測定

クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の物性研究における強力なプローブに1つにジェットがある。鉛・鉛 中心衝突事象においては、ジェット起源ではない多数の低横運動量 (p_T) の粒子が生成されるため、一般に低い p_T 領域でのジェット測定は困難である。しかしながら、荷電ハドロンをトリガー粒子とし、その 180° 反対方向に生成される反跳ジェットを測定することにより、バックグラウンドの効果を抑制しつつ、大きな R (ジェット分解能パラメータ) における低い横運動量領域でのジェット測定が可能となる。今回、LHC Run-2 の 鉛・鉛および陽子・陽子衝突事象データを用いて、ハドロン-ジェット相関測定を行い、鉛・鉛衝突と陽子・陽子衝突の反跳ジェット生成比 ($\Delta_{recoil}^{Pb-Pb}/\Delta_{recoil}^{PP} = I_{AA}$) を測定

した (図 11)。その結果、鉛・鉛 0-10% 中心衝突事象において、特に低い p_T 領域において、大きな反跳ジェット抑制効果が見られた。また異なる R における I_{AA} の測定したところ、大きな R 依存性はみられなかった。今後、低い横運動量かつ大きな R での反跳ジェット・方位角分布 (acoplanarity) を測定することにより、ジェット-QGP 媒質相互作用と、それに伴う低横運動量ハドロン生成について、研究の進展が期待される。

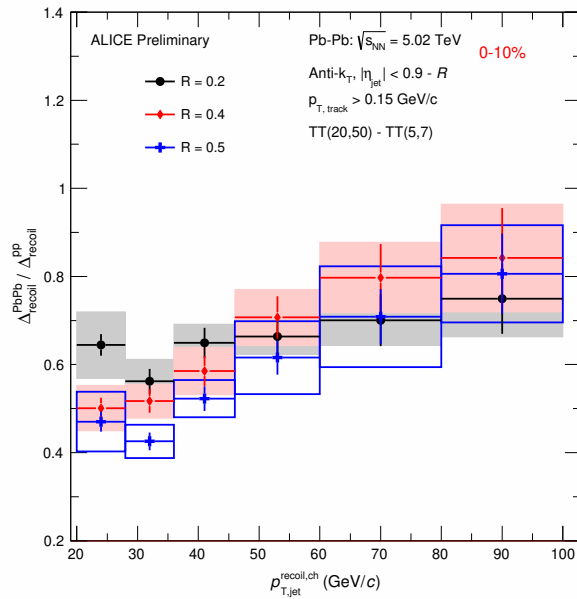


図 11 鉛・鉛および陽子・陽子衝突 $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV を用いた I_{AA} 分布。中心衝突度 0-10% $R = 0.2, 0.4$ および 0.5 のデータ。

(13) LHC-ALICE 実験 $\sqrt{s} = 13$ 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

高エネルギー原子核衝突実験における hard process による cross section は、perturbative QCD(pQCD) によって構成されて pQCD は三つの物理量、parton distribution function(PDF)、fragmentation function(FF)、QCD matrix によって理解されている。PDF は incoming proton の parton の運動量部分で、FF は、パートンエネルギーと比較したときの、測定されたハドロンの運動量率の関数として、outgoing parton が観測されたハドロンの確率を表す。この二つの関数は non-perturbative 効果によって理論的に計算するのが難しく、様々な衝突エネルギーに対して実験を行なっている。

先行実験として、ALICE 実験 $\sqrt{s} = 5.02$ TeV 陽子陽子衝突におけるジェット内部や Inclusive measurement の中性中間子の測定が報告され、それぞれ異なる中性中間子の生産量が報告されている [8]。しかし、 $\sqrt{s} = 5.02$ TeV 陽子陽子衝突における実験はデータの統計的不定性が大きい。我々の実験では high p_T での jet fragmentation function を直接測定する事が期待されている。

中性中間子の再構成は、光子の不変質量を再構成することにより、2 光子崩壊チャンネルを介して行われる。すべての光子候補ペアの組み合わせを作成するため、ピークの下に膨大な background が現れる。この background は event mixing method を使用して差し引かれる。中性中間子からの崩壊光子は、最小バイアストリガーを使用して ALICE 検出器の電磁カロリメーター (EMCal) によって測定される。

p_T スライスの各中性中間子の不変質量分布に統合されている raw yield を計算した後、検出器の geometrical acceptance、reconstructed efficiency、secondary particle 効果などの correction factors を考慮した invariant yield を再構成し、 π^0 中間子と η 中間子の両方の invariant yield の再構成を行った。今後、ジェット内部の η/π^0 の比を inclusive measurement と比較することで、ジェット内部の中性中間子生成の変化を調べる予定である。

(14) ALICE 実験における Pb-Pb $\sqrt{s} = 5.02$ TeV におけるフル・ジェットの測定と原子核変調効果

QGP 物質の性質を理解するために真空状態と比較した重イオン衝突実験におけるジェットの変調の研究は有用となる。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粒子が円錐状に拡散する現象である。この生成された粒子が生成直後に QGP 物質中を通過すると、真空状態と比較しジェットがエネルギーを失うことで、ジェットの横運動量 p_T 分布が変化すると予想される。

LHC-ALICE 実験では小さい衝突系である陽子-陽子衝突実験でのジェットの生成量は QGP 物質を通過せず得られたと考え、重イオン (Pb-Pb) 衝突実験で得られたジェットの生成量との比 (R_{AA}) を求めることによって、ジェットの変調効果を測定した [10]。この測定では 2015 年に取得した $\sqrt{s} = 5.02$ TeV の衝突データより得られた、荷電粒子だけではなく中性粒子由来のジェットも含んだ全てのジェットに対し行われた。いわゆる「フルジェット」の横運動量分布の測定である。その結果、Pb-Pb 衝突 (中心衝突度 0–10%) において、ではジェットの生成は強く抑制されていることが確認された (図 12)。またジェット分解能パラメータ R による生成量の違いは見出されなかった。今後さらに 2018 年のデータを用いることにより低い p_T 領域とより R に対し解析を行うことができると期待される。

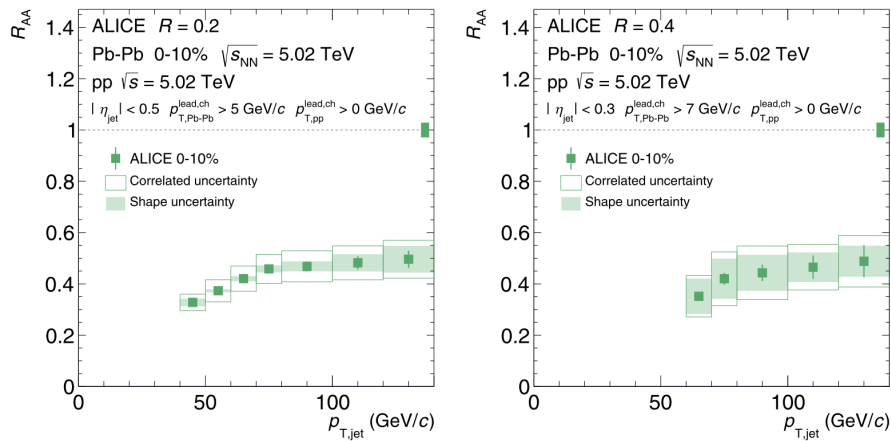
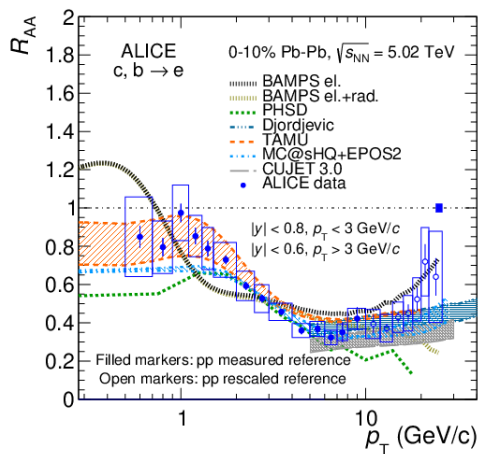


図 12 ジェットの定義半径 0.2, 0.4 における R_{AA} の p_T 分布

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

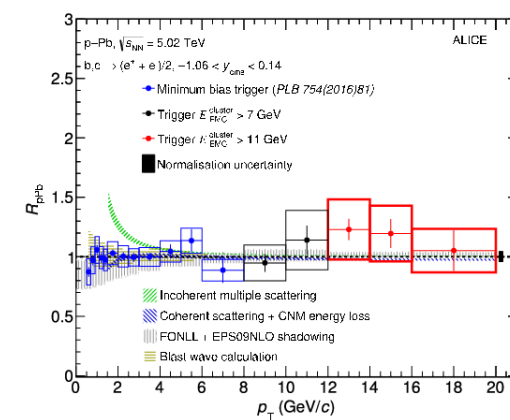
高エネルギー原子核衝突実験における特有の現象に、parton のエネルギー損失による粒子生成の抑制がある。量子色力学 (QCD) の計算によるとエネルギー損失は parton の質量に依存することが予想されており [11]、高温高密度下での QCD 検証をする上でエネルギー損失機構を理解することは重要である。LHC-ALICE 実験では主に D meson や heavy flavour 起源 (charm quark と beauty quark) 電子を測

定することにより、QGP 中での heavy flavour のエネルギー損失の研究が行われている。我々のグループでは主に heavy flavour 起源の電子を用い、その解明を目指している。図 13 は LHC-ALICE 実験における Pb-Pb 衝突 5.02 TeV で測定された heavy quark 起源電子の nuclear modification factor (R_{AA}) という抑制効果の度合いを表す量であり、測定より R_{AA} の最小値が ~ 0.3 となり、これは最大で 70% の heavy quark 起源電子が高エネルギー原子核衝突実では抑制されていることを意味する [12]。この大きな抑制効果は heavy quark のエネルギー損失を考慮したモデルでよく再現されている。一方で Pb-Pb 衝突で測定された heavy quark 起源電子は、QGP に由来にするパートンのエネルギー損失以外にも Cold Nuclear Matter effect という QGP 生成前の物理効果により、その生成量に変化することが予想されている。この検証のため、heavy quark 起源電子の測定を p-Pb 衝突 5.02 TeV で行った。図 14 は p-Pb 衝突での nuclear modification factor (R_{pPb}) を測定した結果である [13]。この測定より p-Pb 衝突での抑制効果は非常に小さく、Pb-Pb 衝突で測定された抑制は QGP 由来のものであることが確認された。これらの研究結果は ALICE 実験より投稿され、我々のグループは解析及び論文執筆で中心的な役割を果たした。さらに詳細なエネルギー損失機構を理解するためには初期の parton レベルの情報を引き出す必要があると考え、現在 heavy flavour 起源の jet(charm,beauty quark が形成する粒子群) の測定方法の確立及び測定を進めている。図 15 は陽子-陽子衝突実験で測定された heavy-flavour 起源の電子を含む jet の生成断面積を QCD が予想する heavy flavour 由来 jet の生成断面積と比較したものである。この比較より QCD 計算はよく実験結果を再現していることがわかる。さらに同測定を p-Pb でも行い R_{pPb} を計算したところ (図 16)、jet の level でも生成量に変化がないことを確認した。今後は、charm 由来の jet と beauty 由来 jet に分離し、さらに Pb-Pb 衝突での解析を行い、parton level でのエネルギー損失機構の解明を行う。



ALI-PUB-327783

図 13 Pb-Pb 衝突 5.02TeV の heavy quark 起源電子の R_{AA}



ALI-PUB-340012

図 14 p-Pb 衝突 5.02TeV の heavy quark 起源電子の R_{pPb}

(16) RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 27\text{GeV}$ における Glauber model を用いた Event Plane Detector による Centrality 決定の探求

重イオン衝突実験において Centrality とは衝突した粒子の重なりを表すパラメータである。この重なりによって衝突後の様子は異なるが、これを直接観測する手法はいまだない。そこで得られた観測

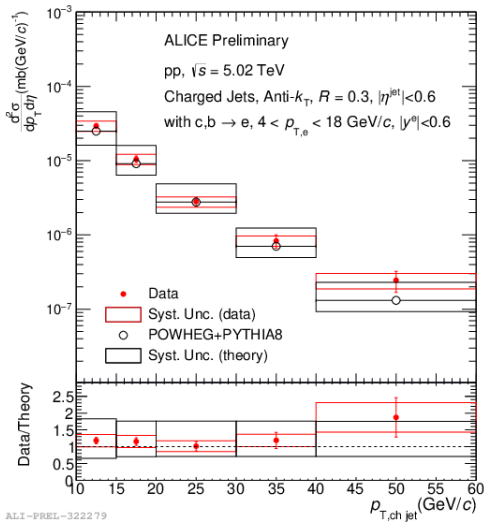


図 15 pp 衝突 5.02TeV の heavy quark 由来 jet の普遍断面積

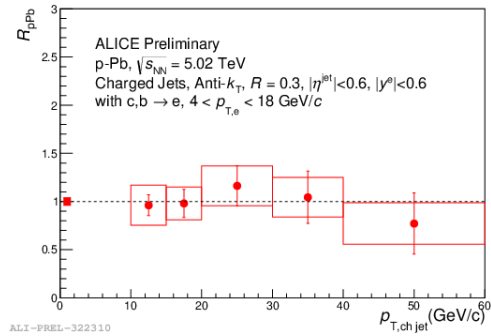


図 16 p-Pb 衝突 5.02TeV の heavy quark 由来 jet の R_{pPb}

量、例えば荷電粒子の数から推定されるのが一般的である。STAR 実験では従来 TPC で得られた荷電粒子の数から Centrality を計算していた。しかし、QCD 臨界点探索に敏感な量として観測されている net-charge 分布および net-baryon 分布の高次ゆらぎでは TPC の領域で Centrality を決定すると auto-correlation effect によって抑制されることが提唱された [14]。

そこで本研究では 2015 年に新たに導入された EPD を用いて Centrality を決定するフレームワークを作成することを目的としている。EPD では TPC と測定している領域が異なるため、auto-correlation effect がなくなることが期待されている。重イオン衝突実験によく用いられる Glauber model を仮定し、EPD 特有の効果を取り入れてブートストラップ法を用いることで検出器の反応をシミュレーションし、その結果から Centrality が決定される。データとシミュレーションの乖離が大きい部分があり、今後それを近づけていけるように努力が必要となる。先行研究として、TPC の値を教師データに機械学習法で Centrality を決定しているものが報告されている [15]。今後はより詳細なシミュレーションを作成し Centrality を決定するとともに、先行研究の結果との間にどのような違いなどがあるか検証することも必要となる。

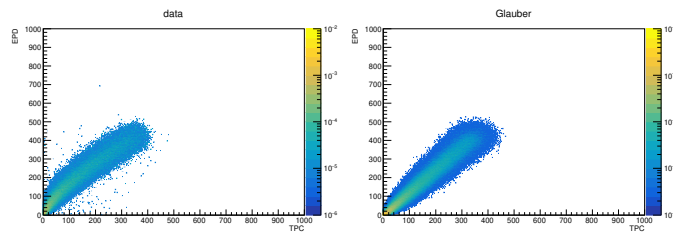


図 17 右：実際のデータ 左：シミュレーション

(17) RHIC-STAR 実験における Λ 粒子の偏極の測定

原子核衝突実験では、非中心衝突において生成された系は回転していると予想されていた。そこで RHIC-STAR 実験ではこれまでに $\sqrt{s_{NN}} = 7.7\text{--}200$ GeV にかけて Λ 粒子を用いて偏極が測定された [16, 17, 18]。この測定で有限な偏極のシグナルが観測されたことで系が回転している実験的な証拠となった。また、原子核衝突の初期に発生する磁場も偏極に影響を及ぼすと考えられる。磁場からの寄与を受ける場合、粒子と反粒子は互いに逆方向に偏極させられる。そのため Λ 粒子と $\bar{\Lambda}$ 粒子の偏極の違いを測定すると磁場を直接的に測定することができる。しかしこれまでの測定ではこの差は観測されていなかった。また以前までの測定では $\sqrt{s_{NN}} = 39$ GeV と 200 GeV の間には大きなエネルギーギャップがあった。

そこで本研究では RHIC-STAR 実験で測定された $\sqrt{s_{NN}} = 54.4$ GeV のデータを用いて Λ 粒子の偏極を測定した。図 18 は Λ 粒子の偏極の衝突エネルギー依存性である。偏極の有限なシグナルが観測されたことからこのエネルギーでの原子核衝突でも生成された系は回転していることがわかった。また、衝突エネルギーが低くなるほど Λ の偏極は大きくなることがわかった。一方で Λ 粒子と $\bar{\Lambda}$ 粒子の偏極の差は観測されなかったが、系統的に $\bar{\Lambda}$ の方が大きくなっている。これは磁場から寄与を受けた時の予想と一致している。RHIC-STAR 実験では 2019 年から低エネルギー領域で高統計なデータを測定するビーム走査実験 II が行われている。これを用いることでさらに詳細な測定が行えると期待されている。

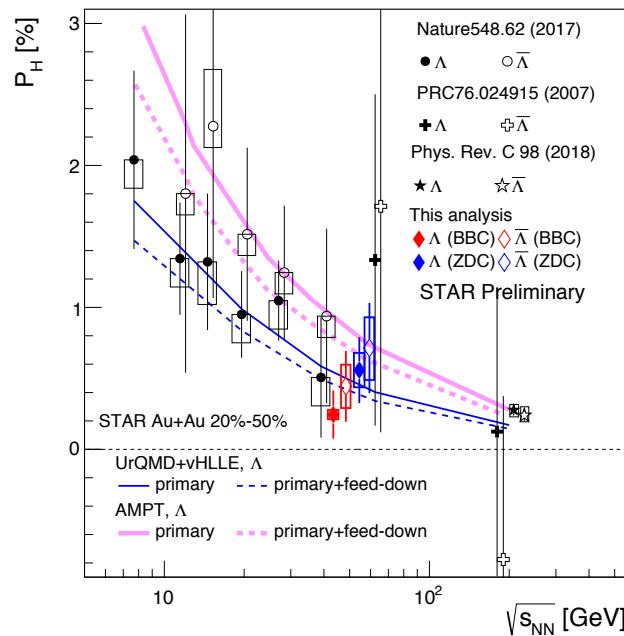


図 18 Λ 粒子の偏極の衝突エネルギー依存性

(18) RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV におけるバリオン-バリオン相互作用による dibaryon 探索

近年の LatticeQCD 理論計算によると、2つのバリオン同士が束縛状態をとった、6つのクォークから構成される原子核、dibaryon の存在が予想されている。特にその中でもストレンジネスを含むバリオンであるハイペロン粒子のうちの一つ、ラムダ粒子、オメガ粒子の束縛状態である、「H-dibaryon」、 「di-Omega」の存在が期待されている [19]。バリオン 2 粒子による散乱パラメータは、相関関数の構造に現れる。よって、実験的には、2 粒子相関法を用いて相関関数を測定し、散乱パラメータを算出し、

束縛状態の有無や、束縛エネルギーを求める。先行実験として、STAR 実験から、2015 年にラムダ粒子 相関関数の初測定結果が報告されている [20]。しかし、その他の実験報告を含め、未だ、データの統計 的不確実性が大きく、明確な束縛状態の理解には至っていない。

本研究では、重イオン衝突実験、STAR 実験金+金衝突 $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ における 2011 年、2014 年、 2016 年の高統計データを用いて、ラムダ粒子、グザイ粒子、オメガ粒子の相関関数測定を行っている。 より統計的不確実性の小さな結果をもとに、束縛状態について明らかにすることを目的としている。またグザイ粒子の相関関数測定は、今回が実験史上初測定となり、その相関関数の構造から、ストレンジ ネス数に依存する、強い相互作用による効果を測定する。現在、STAR 実験において、ラムダ粒子、グザイ粒子ともに、十分な高統計で、再構成可能であることが確認できている。今後、相関関数測定の後、バリオン相互作用を記述する理論モデルによるフィットを行い、散乱パラメータを求め、dibaryon 生成、束縛状態の有無を探索する。

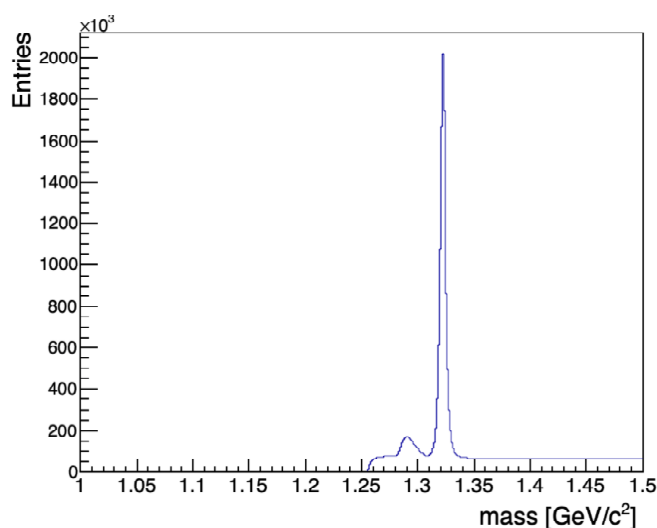


図 19 グザイ粒子不変質量分布

(19) 局所渦による偏極

高エネルギー原子核衝突において生成される物質は観測史上最速で回転 ($\omega \sim 10^{22} \text{ s}^{-1}$) していることが粒子スピン偏極測定から判明した [21, 22]。この系全体の“渦”に加えて、様々な局所渦の生成が予測されている。特に楕円フローと呼ばれる集団膨張に起因するビーム軸を回転軸とした局所渦の観測が期待されている。この局所渦は系全体の渦に比べて時間的に後から発展するために、渦からスピン偏極への緩和時間を探る上で重要な情報となる。我々のグループは、STAR 実験で取得された Au+Au $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$ のデータを解析し、ビーム軸方向のスピン偏極 P_z の測定を行った [23]。図 20(左) は Λ ($\bar{\Lambda}$) 粒子の P_z の方位角依存性である。楕円フローから予測通り、偏極が方位角に依存し、かつその符号が反転している。さらに偏極強度は周辺衝突において増大している (図 20(右))。局所熱平衡を仮定した流体モデル [24] や輸送モデル [25] では、符号自体が実験結果と一致していない。Blast-Wave と呼ばれる集団膨張モデルに基づき、楕円フローや粒子収量から決定されたパラメータを用いて偏極を計算したところ、実験結果を再現できることがわかった。理論モデル間で不一致がみられており、業界内で引き続き議論が行われている。これらの結果は Physical Review Letters に出版され、我々のグループは

解析および論文執筆において中心的な役割を果たした。今後は、衝突における渦構造やスピン偏極のメカニズムを解明するために、異なる粒子種や衝突エネルギーを調べて行く。

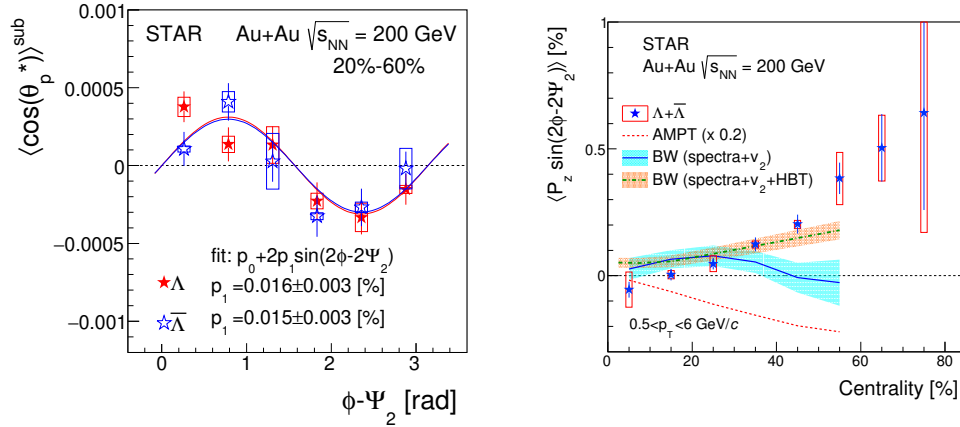


図 20 (左図)Au+Au $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV におけるビーム軸方向 Λ 粒子偏極 ($P_z = 3\langle \cos \theta_p^* \rangle / \alpha_H$) の方位角依存性、(右図) そのフーリエサイン 2 次成分の中心衝突度依存性。実線および破線は Blast-Wave モデルによる計算、点線は輸送モデル (AMPT) による計算である。

(20) RHIC-STAR 実験における Event Plane Detector を用いた一次の反応平面の分解能測定

Relativistic Heavy-Ion Collider (RHIC) を用いた STAR 実験では、量子色力学 (QCD) 相図上の臨界点探索を目的とした第二ビームエネルギー走査実験が行われている。衝突で生成される粒子が運動量空間において非一様に分布する現象である方位角異方性の測定において、特に一方向への粒子放出の偏りを示す指向的方位角異方性 v_1 及びその傾き dv_1/dy' は一次相転移付近で特徴的な振る舞いを示す [26]。 v_1 は、粒子の方位角 ϕ と反応平面 (衝突パラメータとビーム方向の間の面) の方位角 Ψ_1 から計算される量であり、 v_1 の精度は反応平面の分解能に依存するため、高い精度で反応平面を決定することは重要である。 STAR 実験が 2018 年に新しく導入した検出器 Event Plane Detector (EPD) は、以前よりも細かく、広い領域において反応平面の測定を行い、観測領域とは異なる領域で反応平面の決定を行うため、観測量に含まれる自己相関を取り除いた測定を行うことができる。

図 21 は、EPD と Time Projection chamber (TPC) で決定した反応平面の分解能の比較を、衝突中心度 (centrality) ごとに行ったものである。この結果から、centrality=20-30% 付近においては EPD の分解能は TPC の分解能より約 5 倍良いことが明らかになっている。今後は EPD で測定した反応平面を用いた v_1 測定の結果が明らかになり、QCD 相構造解明へのさらなるアプローチが期待される。

(21) RHIC-STAR 実験における新しい中心衝突度の定義と保存量揺らぎの測定に与える影響

Net baryon, net charge, net strangeness といった保存量の揺らぎは、QCD 臨界点を探る重要な手がかりになると言われている。近年 net-proton の 4 次揺らぎについて非単調な衝突エネルギー依存性が報告され、臨界点のシグナルの可能性があると考えられている。この結果のさらなる理解のため、2019 年からより低い衝突エネルギーに着目し、Beam Energy Scan II が開始された。

従来、STAR では TPC を用いて中心衝突度を決めている。注目する粒子と同じ η 領域で中心衝突度を決めることによって、粒子数揺らぎの測定結果に自己相関の効果が含まれている可能性が指摘されて

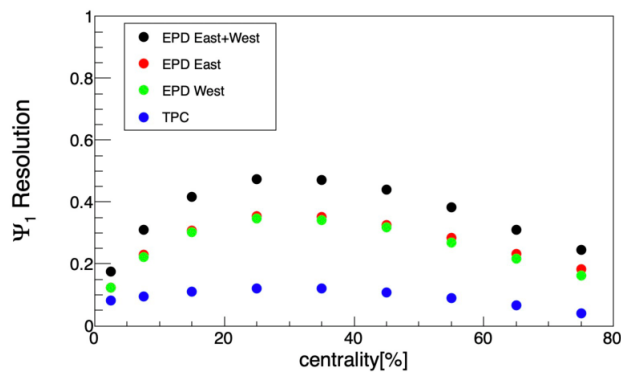


図 21 検出器 EPD と TPC の分解能の比較

いる。BES-II に先立って衝突点前後方に設置された Event Plane Detector は、中心衝突度の決定を担う新たな検出器として期待されている。

以下の図 22 は、2018 年に測定された Au+Au 27GeV において、EPD の各 ring における MIP と mid-rapidity の粒子数 (従来の中心衝突度に相当) の相関を示したものである。EPD の内側の ring における spectator の効果、検出器の原理からくる Landau 揺らぎの効果が示されている。spectator の効果を補正する手段として機械学習の手法も取り入れ、EPD の中心衝突度分解能の研究を行なった。今後は新しい中心衝突度定義による揺らぎの結果を比較し、その変化が自己相関の減少によるものか、あるいは検出器の性能の差によるものか議論を続ける必要がある。

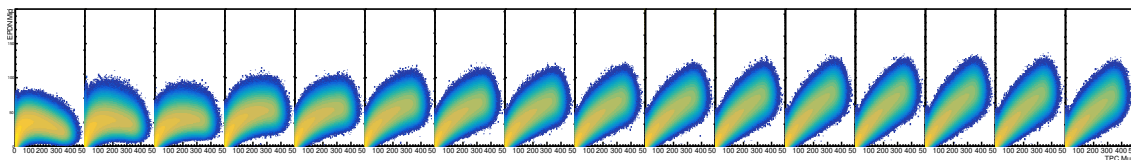


図 22 EPD 領域と TPC 領域の粒子数相関

(22) RHIC-STAR 実験における臨界点探索

QCD 相図中に臨界点が存在するかどうかは、高エネルギー物理学における究極的な問いの一つである。臨界点に敏感な観測量として注目されているのが、保存量分布の高次揺らぎである。臨界点まわりでは系の相関長が発散するため、高次揺らぎの急激な増大が期待される。

RHIC-STAR 実験では、2010 年から 2017 年にかけて、核子あたりの衝突エネルギー 7.7 GeV から 200 GeV まで、計 8 つのエネルギーにおいて金原子核の衝突実験を行った。図 23 は正味陽子数分布の 3 次揺らぎ (左)、および 4 次揺らぎ (右) の衝突エネルギー依存性である [27]。20 GeV 以下において 4 次揺らぎが一旦減少した後、7.7 GeV において急激な増大していることがわかる。この非単調性が理論モデルの予測 [28] と定性的に非常に良く似ていることから、臨界点のシグナルではないかと言われている。今後より決定的な信号を測定するために、2019 年から 2021 年にかけて 20 GeV 以下に焦点をあてた実験が進行中である。

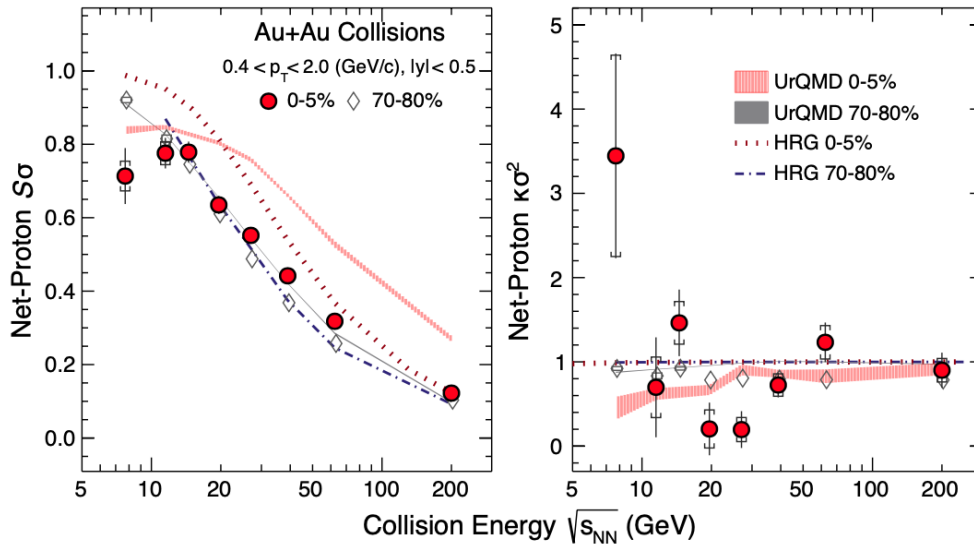


図 23 正味陽子分布の 3 次、4 次揺らぎの衝突エネルギー依存性。

原子核実験グループ研究業績リスト

<原著論文>

1. Kejun Dong, Yongjin Guan, Xiangdong Ruan, Shan Jiang, Exposure Age Dating of Chinese Tiankengs by ^{36}Cl -AMS, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Vol.459, 15 (2019) 29-35. DOI: 10.1016/j.nimb.2019.07.006
2. Hongtao Shen, Kimikazu Sasa, Qi Meng, Masumi Matsumura, Tetsuya Masunaka, Seiji Hosoya, Tsutomu Takahashi, Maki Honda, Keisuke Sueki, Ming He, Baojian Huang, Zhaomei Li, Zhenchi Zhao, Qingzhang Zhao, Kejun Dong, Yongjin Guan, Shan Jiang, ^{36}Cl preparation method for Chinese karst samples (Tiankeng), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 458 (2019) 126-129.
3. Hajime Nakamura, Hiroshi Matsumura, Go Yoshida, Akihiro Toyoda, Kazuyoshi Masumoto, Taichi Miura, Kimikazu Sasa and Tetsuaki Moriguchi, Investigation of Neutron-fluence Measurement Methods for Estimating Neutron-induced Activity from an Electrostatic Accelerator Source, Environmental Radiochemical Analysis VI, Royal Society of Chemistry
4. M. Tanaka, M. Takechi, A. Homma, M. Fukuda, D. Nishimura, T. Suzuki, Y. Tanaka, T. Moriguchi, D. S. Ahn, A. Aimaganbetov, M. Amano, H. Arakawa, S. Bagchi, K.-H. Behr, N. Burtebayev, K. Chikaato, H. Du, S. Ebata, T. Fujii, N. Fukuda, H. Geissel, T. Hori, W. Horiuchi, S. Hoshino, R. Igosawa, A. Ikeda, N. Inabe, K. Inomata, K. Itahashi, T. Izumikawa, D. Kamioka, N. Kanda, I. Kato, I. Kenzhina, Z. Korkulu, Y. Kuk, K. Kusaka, K. Matsuta, M. Mihara, E. Miyata, D. Nagae, S. Nakamura, M. Nassurulla, K. Nishimuro, K. Nishizuka, K. Ohnishi, M. Ohtake, T. Ohtsubo, S. Omika, H. J. Ong, A. Ozawa, A. Prochazka, H. Sakurai, C. Scheidenberger, Y. Shimizu, T. Sugihara, T. Sumikama, H. Suzuki, S. Suzuki, H. Takeda, Y. K. Tanaka, I. Tanihata, T. Wada, K. Wakayama, S. Yagi, T. Yamaguchi, R. Yanagihara, Y. Yanagisawa, K. Yoshida, T. K. Zholdybayev, Swelling of

- Doubly Magic ^{48}Ca Core in Ca Isotopes beyond $N = 28$, *Physical Review Letters*, 124, 102501 (6 pages), 2020.
5. 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, Energy dependence of total reaction cross sections for ^{17}Ne on a proton target, *Nuclear Physics A*, 994, 121663 (13 pages), 2020.
 6. S. Omika, T. Yamaguchi, N. Tadano, Y. Abe, M. Amano, Z. Ge, D. Kamioka, T. Moriguchi, D. Nagae, S. Naimi, A. Ozawa, F. Suzaki, S. Suzuki, T. Suzuki, T. Uesaka, M. Wakasugi, K. Wakayama, Y. Yamaguchi, Development of a new in-ring beam monitor in the Rare-RI Ring, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 463, 241-243, 2020.
 7. Zhuang Ge, Tomohiro Uesaka, Sarah Naimi, Daisuke Nagae, Yasushi Abe, Syunichiro Omika, Fumi Suzaki, Takayuki Yamaguchi, Yoshitaka Yamaguchi, Masanori Wakusugi, Hongfu Li, Kiyoshi Wakayama, Hiroki Arakawa, Kumi Inomata, Kunimitsu Nishimuro, Takaaki Kobayashi, Akira Ozawa, Shun Hosoi, Yasuto Inada, Shinji Suzuki, Tetsuaki Moriguchi, Momo Mukai, Masamichi Amano, Daiki Kamioka, Yasushige Yano, Scheme of high-resolution identification and selection of secondary ions for mass measurements with the Rare-RI Ring, *Hyperfine Interact.* 92, 240 (11 pages), 2019.
 8. M. Machida, D. Nishimura, M. Fukuda, S. Yagi, T. Sugihara, S. Kanbe, S. Yamaoka, M. Takechi, M. Tanaka, M. Amano, J. Chiba, K. Chikaato, H. Du, S. Fukuda, A. Homma, T. Hori, A. Ikeda, R. Ishii, T. Izumikawa, Y. Kamisho, N. Kanda, R. Kehl, A. Kitagawa, K. Matsuta, M. Mihara, E. Miyata, A. Mizukami, T. Moriguchi, M. Nagashima, S. Nakamura, M. Nassurlla, K. Ohnishi, T. Ohtsubo, S. Sato, J. Shimaya, T. Suzuki, S. Suzuki, T. Tahara, Y. Tanaka, T. Yamaguchi, R. Yanagihara, Development of prototype RICH detector with multi-anode photomultipliers for radioactive ions, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 931, 23-28, 2019.
 9. X.Xu, J.H.Liu, C.X.Yuan, Y.M.Xing, M.Wang, Y.H.Zhang, X.H.Zhou, Yu.A.Litvinov, K.Blaum, R.J.Chen, X.C.Chen, C.Y.Fu, B.S.Gao, J.J.He, S.Kubono, Y.H.Lam, H.F.Li, M.L.Liu, X.W.Ma, P.Shuai, M.Si, M.Z.Sun, X.L.Tu, Q.Wang, H.S.Xu, X.L.Yan, J.C.Yang, Y.J.Yuan, Q.Zeng, P.Zhang, X.Zhou, W.L.Zhan, S.Litvinov, G.Audi, S.Naimi, T.Uesaka, Y.Yamaguchi, T.Yamaguchi, A.Ozawa, B.H.Sun, K.Kaneko, Y.Sun, and F.R.Xu, Masses of ground and isomeric states of ^{101}In and configuration-dependent shell evolution in odd-A indium isotopes, *PHYSICAL REVIEW C* 100, 051303(R) (2019).
 10. F.C.Ozturk, B.Akkus, D.Atanasov, H.Beyer, F.Bosch, D.Boutin, C.Brandau, P.Buhler, R.B.Cakirli, R.J.Chen, W.D.Chen, X.C.Chen, I.Dillmann, C.Dimopoulou, W.Enders, H.G.Essel, T.Faestermann, O.Forstner, B.S.Gao, H.Geissel, R.Gernhouser, R.E.Grisenti, A.Gumberidze, S.Hagmann, T.Heftrich, M.Heil, M.O.Herdrich, P-M.Hillenbrand, T.Izumikawa, P.Kienle, C.Klaushofer, C.Kleffner, C.Kozuharov, R.K.Knobel, O.Kovalenko, S.Kreim, T.Kuhl, C.Lederer-Woods, M.Lestinsky, S.A.Litvinov, Yu.A.Litvinov, Z. Liu, X.W.Ma, L.Maier, B.Mei, H.Miura, I.Mukha, A.Najafi, D.Nagae, T.Nishimura, C.Nociforo, F.Nolden, T.Ohtsubo, Y.Oktem, S.Omika, A.Ozawa, N.Petridis, J.Piotrowski, R.Reifarth, J.Rossbach, R.Sanchez, M.S.Sanjari, C.Scheidenberger, R.S.Sidhu, H.Simon, U.Spillmann, M.Steck, Th.Stohlker, B.H.Sun, L.A.Susam, F.Suzaki, T.Suzuki, S.Yu.Torilov, C.Trageser, M.Trassinelli, S.Trotsenko, P.M.Walker, M.Wang, G.Weber, H.Weick, N.Winckler, X.L.Tu, D.F.A.Winters, P.J.Woods, T.Yamaguchi, X.D.Xu, X.L.Yan, J.C.Yang,

- Y.J.Yuan, Y.H.Zhang, X.H.Zhou and the FRS-ESR, ILIMA, SPARC, and TBWD Collaborations, New test of modulated electron capture decay of hydrogen-like ^{142}Pm ions: Precision measurement of purely exponential decay, *Physics Letters B* 797 (2019) 134800.
11. X. Xu, M. Wang, K. Blaum, J. D. Holt, Yu. A. Litvinov, A. Schwenk, J. Simonis, S. R. Stroberg, Y. H. Zhang, H. S. Xu, P. Shuai, X. L. Tu, X. H. Zhou, F. R. Xu, G. Audi, R. J. Chen, X. C. Chen, C. Y. Fu, Z. Ge, W. J. Huang, S. Litvinov, D. W. Liu, Y. H. Lam, X. W. Ma, R. S. Mao, A. Ozawa, B. H. Sun, Y. Sun, T. Uesaka, G. Q. Xiao, Y. M. Xing, T. Yamaguchi, Y. Yamaguchi, X. L. Yan, Q. Zeng, H. W. Zhao, T. C. Zhao, W. Zhang, and W. L. Zhan, Masses of neutron-rich $^{52-54}\text{Sc}$ and $^{54,56}\text{Ti}$ nuclides: The $N = 32$ subshell closure in scandium, *Phys. Rev. C* 99 (2019) 064303/1-6.
 12. J.T. Zhang, K. Yue, H.X. Li, X.L. Tu, C.J. Shao, P. Ma, B. Mei, X.C. Chen, Y.Y. Yang, X.Q. Liu, Y.M. Xing K.H. Fang, Z.Y. Sun, M. Wang Yu. A. Litvinov, T. Yamaguchi, P. Egelhof, Y.H. Zhang, X.H. Zhou, The development of in-ring reaction measurements at the HIRFL-CSR, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 948 (2019) 162848/1/5.
 13. Shinji Suzuki, Akira Ozawa, Daiki Kamioka, Yasushi Abe, Masamichi Amano, Hiroki Arakawa, Zhuang Ge, Kentaro Hiraishi, Yukina Ichikawa, Kumi Inomata, Atsushi Kitagawa, Takaaki Kobayashi, Hong Fu Li, Takuya Matsumoto, Tetsuaki Moriguchi, Momo Mukai, Daisuke Nagae, Sarah Naimi, Shunichiro Omika, Shinji Sato, Yoshiyuki Tajiri, Kiyoshi Wakayama, Takayuki Yamaguchi, Efficiency and timing performance of time-of-flight detector utilizing thin foils and crossed static electric and magnetic fields for mass measurements with Rare-RI Ring facility, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* 965 (2020) 163807.
 14. Masumi Matsumura, Kimikazu Sasa, Tetsuya Matsunaka, Keisuke Sueki, Tsutomu Takahashi and Hiroyuki Matsuzaki, Assessing the effect of laboratory environment on sample contamination for I-129 accelerator mass spectrometry, *Analytical Sciences*, 36, 2020, 631-636. DOI: 10.2116/analsci.20SBN05
 15. A. Yamazaki, K. Sasa, S. Tomita, S. Ishii, H. Naramoto, M. Sataka, H. Kudo, G. Itoh and M. Ohkubo, Microscopic 3-dimensional mapping of hydrogebubbles in polycrystalline Al by elastic recoil detection analysis under transmission geometry, *AIP Advances* 9, 105111 (2019); doi: 10.1063/1.5099528
 16. Tetsuya Matsunaka, Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Keisuke Sueki, Hiroyuki Matsuzaki, Pre- and post-accident ^{14}C activities in tree rings near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, *Radiocarbon*, Vol 61, 6 (2019) 1633–1642. DOI:10.1017/RDC.2019.147
 17. Jia Chen, Hongtao Shen, Kimikazu Sasa, Haihui Lan, Tetsuya Matsunaka, Masumi Matsumura, Tsutomu Takahashi, Seiji Hosoya, Ming He, Yun He, Zhaomei Li, Zhenchi Zhao, Mingji Li, Siyu Wei, Mingli Qi, Qingzhang Zhao, Xiuju Qin, Xinqiang Chen, Shan Jiang, Radio carbon dating of Chinese ancient tea trees, *Radiocarbon*, Vol 61, 6 (2019) 1741–1748. DOI:10.1017/RDC.2019.117
 18. Hongtao Shen, Kimikazu Sasa, Qi Meng; Masumi, Matsumura, Tetsuya Masunaka, Seiji Hosoya, Tsutomu Takahashi, Maki Honda, Keisuke Sueki, Ming He, Baojian Huang, Qingzhang Zhao, (2019) 152 – 160. Doi: 10.1039/9781788017732-00152
 19. Y. Shiina, R. Kinoshita, S. Funada, M. Matsuda, M. Imai, K. Kawatsura, M. Sataka, K. Sasa, S. Tomita, Measurement of Auger electrons emitted through Coster-Kronig transitions under irradiation of fast C^{2+} ions, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 460 (2019) 30–33. DOI: 10.1016/j.nimb.2018.10.041
 20. Evidence of rescattering effect in Pb-Pb collisions at the LHC through production of $\text{K}^*(892)$ and

- $\phi(1020)$ mesons, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 802 (2020) 135225, DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135225
21. 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, Shreyasi Acharya et al., JHEP 02 (2020) 077, DOI: 10.1007/JHEP02(2020)077
 22. Measurement of electrons from semileptonic heavy-flavour hadron decays at midrapidity in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 804 (2020) 135377, DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135377
 23. Measurements of inclusive jet spectra in pp and central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.C 101 (2020) 3, 034911, DOI: 10.1103/PhysRevC.101.034911
 24. Studies of J/ψ production at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JHEP 02 (2020) 041, DOI: 10.1007/JHEP02(2020)041
 25. Multiplicity dependence of (multi-)strange hadron production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Eur.Phys.J.C 80 (2020) 2, 167, DOI: 10.1140/epjc/s10052-020-7673-8
 26. ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ and ${}^3_{\Lambda}\bar{\text{H}}$ lifetime measurement in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV via two-body decay, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 797 (2019) 134905, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.134905
 27. Measurement of Upsilon(1S) elliptic flow at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.Lett. 123 (2019) 19, 192301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.192301
 28. Measurement of prompt D^0 , D^+ , D^{*+} , and D_s^+ production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JHEP 12 (2019) 092, DOI: 10.1007/JHEP12(2019)092
 29. Multiplicity dependence of light (anti-)nuclei production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 800 (2020) 135043, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.135043
 30. Measurement of the inclusive isolated photon production cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Eur.Phys.J.C 79 (2019) 11, 896, DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-7389-9
 31. Scattering Studies with Low-Energy Kaon-Proton Femtoscopy in Proton-Proton Collisions at the LHC, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.Lett. 124 (2020) 9, 092301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.092301
 32. Charged-particle production as a function of multiplicity and transverse sphericity in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ and 13 TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Eur.Phys.J.C 79 (2019) 10, 857, DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-7350-y
 33. Inclusive J/ψ production at mid-rapidity in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JHEP 10 (2019) 084, DOI: 10.1007/JHEP10(2019)084
 34. Study of the Λ - Λ interaction with femtoscopy correlations in pp and p-Pb collisions at the LHC, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 797 (2019) 134822, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.134822
 35. Production of muons from heavy-flavour hadron decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV, ALICE

- Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JHEP 09 (2019) 008, DOI: 10.1007/JHEP09(2019)008
36. Measurement of the production of charm jets tagged with D0 mesons in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JHEP 08 (2019) 133, DOI: 10.1007/JHEP08(2019)133
 37. Exploration of jet substructure using iterative declustering in pp and Pb–Pb collisions at LHC energies, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 802 (2020) 135227, DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135227
 38. Measurement of charged jet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.D 100 (2019) 9, 092004, DOI: 10.1103/PhysRevD.100.092004
 39. Measurement of jet radial profiles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 796 (2019) 204-219, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.07.020
 40. First Observation of an Attractive Interaction between a Proton and a Cascade Baryon, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.Lett. 123 (2019) 11, 112002, DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.112002
 41. Coherent J/ψ photoproduction at forward rapidity in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 798 (2019) 134926, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.134926
 42. One-dimensional charged kaon femtoscopy in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.C 100 (2019) 2, 024002, DOI: 10.1103/PhysRevC.100.024002
 43. Measurement of strange baryon–antibaryon interactions with femtoscopic correlations, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 802 (2020) 135223, DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135223
 44. Investigations of Anisotropic Flow Using Multiparticle Azimuthal Correlations in pp, p-Pb, Xe-Xe, and Pb-Pb Collisions at the LHC, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.Lett. 123 (2019) 14, 142301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.142301
 45. Multiplicity dependence of (anti-)deuteron production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 794 (2019) 50-63, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.05.028
 46. Calibration of the photon spectrometer PHOS of the ALICE experiment, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JINST 14 (2019) 05, P05025, DOI: 10.1088/1748-0221/14/05/P05025
 47. Measurement of D^0 , D^+ , D^{*+} , and D_s^+ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV with ALICE, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Eur.Phys.J.C 79 (2019) 5, 388, DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-6873-6
 48. Event-shape and multiplicity dependence of freeze-out radii in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., JHEP 09 (2019) 108, DOI: 10.1007/JHEP09(2019)108
 49. Real-time data processing in the ALICE High Level Trigger at the LHC, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Comput.Phys.Commun. 242 (2019) 25-48, DOI: 10.1016/j.cpc.2019.04.011
 50. Charged-particle pseudorapidity density at mid-rapidity in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Eur.Phys.J.C 79 (2019) 4, 307, DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-6801-9
 51. Λ_{c^+} production in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 793 (2019) 212-223, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.04.046
 52. Energy dependence of exclusive J/ψ photoproduction off protons in ultra-peripheral p–Pb collisions

- at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Eur.Phys.J.C 79 (2019) 5, 402, DOI: 10.1140/epjc/s10052-019-6816-2
53. Analysis of the apparent nuclear modification in peripheral Pb–Pb collisions at 5.02 TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Lett.B 793 (2019) 420-432, DOI: 10.1016/j.physletb.2019.04.047
 54. Production of the ρ (770) meson in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.C 99 (2019) 6, 064901, DOI: 10.1103/PhysRevC.99.064901
 55. Two particle differential transverse momentum and number density correlations in p-Pb and Pb-Pb at the LHC, ALICE Collaboration, Shreyasi Acharya et al., Phys.Rev.C 100 (2019) 4, 044903, DOI: 10.1103/PhysRevC.100.044903
 56. A Forward Calorimeter (FoCal) in the ALICE experiment, ALICE Collaboration, ALICE public note, ALICE-PUBLIC-2019-005, URL <http://cds.cern.ch/record/2696471>
 57. Fabrication and beam test of a silicon-tungsten electromagnetic calorimeter, Sanjib Muhuri et al., JINST 15 (2020) 03, P03015, DOI: 10.1088/1748-0221/15/03/P03015
 58. J/ψ 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, DOI: 10.1103/PhysRevD.101.052006
 59. Beam Energy and Centrality Dependence of Direct-Photon Emission from Ultrarelativistic Heavy-Ion Collisions, PHENIX Collaboration, A. Adare et al., Phys.Rev.Lett. 123 (2019) 2, 022301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.022301
 60. Measurement of two-particle correlations with respect to second- and third-order event planes in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, PHENIX Collaboration, A. Adare et al., Phys.Rev.C 99 (2019) 5, 054903, DOI: 10.1103/PhysRevC.99.054903
 61. Collision Energy Dependence of p_T Correlations in Au+Au Collisions at RHIC, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. C 99 (2019) 44918
 62. Azimuthal harmonics in small and large collision systems at RHIC top energies, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 172301
 63. Collision energy dependence of second-order off-diagonal and diagonal cumulants of net-charge, net-proton and net-kaon multiplicity distributions in Au+Au collisions, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. C 100 (2019) 14902
 64. Beam energy dependence of (anti-)deuteron production in Au+Au collisions at RHIC, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. C 99 (2019) 64905
 65. Observation of excess J/ψ yield at very low transverse momenta in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 193$ GeV, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. Lett. 123 (2019) 132302
 66. First observation of the directed flow of D_0 and \bar{D}_0 in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. Lett. 123 (2019) 162301
 67. Measurements of the transverse-momentum-dependent cross sections of J/ψ production at mid-rapidity in proton+proton collisions at $\sqrt{s} = 510$ and 500 GeV with the STAR detector, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. D 100 (2019) 52009
 68. Polarization of Lambda (anti-Lambda) hyperons along the beam direction in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. Lett. 123 (2019) 132301
 69. Measurement of inclusive J/ψ suppression in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV through the

- dimuon channel at STAR, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Lett. B 797 (2019) 134917
70. Longitudinal double-spin asymmetry for inclusive jet and dijet production in pp collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Rev. D 100 (2019) 52005
71. Charge-dependent pair correlations relative to a third particle in p+Au and d+Au collisions at RHIC, STAR Collaboration, J. Adam et al., Phys. Lett. B 798 (2019) 134975
72. Volume fluctuation and multiplicity correlation in higher-order cumulants, T. Sugiura, T. Nonaka and S. Esumi, Phys. Rev. C 100 (2019) 044904
73. Efficiency correction for cumulants of multiplicity distributions based on track-by-track efficiency, X. Luo and T. Nonaka, Phys. Rev. C 99 (2019) 044917

<レビュー、解説、書籍等>

1. Matsunaka Testuya and Sasa Kimikazu, Chapter 6.4, Distribution and migration of radioiodine in terrestrial environment, Environmental Contamination from the Fukushima Nuclear Disaster, Cambridge University Press, pp186-190, 2019-08-15, ISBN: 9781108475808.
2. 新井田貴文、江角晋一、日本物理学会誌 2019 10 月号 「高速回転する流体 - クォーク・グルーオン・プラズマの渦度」
3. 野中俊宏、日本物理学会誌 2020 1 月号 「中国・武漢滞在記」
4. 野中俊宏、原子核研究 Vol.64 No.2, 2020 3 月 「高次揺らぎを用いた QCD 相図の探索」

<国際会議（招待講演）>

1. T. Yamaguchi, 'ILIMA status report and phase-0 program', Nuster Week 2019, CNRS, Gif-sur-Yvette, France, 2019/9/23-27
2. Y Shiina, R Kinoshita, S Funada, S Tomita, M Matsuda, M Imai, K Kawatsura, M Sataka, K Sasa, Cluster effect on the yield of Auger electrons emitted through Coster-Kronig transitions, ISIAC, XXXIst International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions, Deauville, France, July 23-30, 2019
3. Yasushi Iwata, Ryo Morioka, Iwane Suzuki, Kanako Tomita, Nozomi Orita, Tetsuro Matsumoto, Akihiko Masuda, Kimikazu Sasa, Mutagenesis to the Target Genes of Microalgae with the ^{15}N -resonant Nuclear Reaction, 27th Advanced Materials Congress, European Advanced Materials Congress, 11-14 August, Stockholm Sweden
4. T. Chujo, Recent jet results and future directions in ALICE, Heavy Ion Cafe, June 22-23, 2019, Sophia University, Tokyo
5. T. Chujo, Jets in heavy ion collisions and future directions, Seminar at Shinshu University, October 9, 2019 @ Shinshu Univ.
6. R. Hosokawa, Recent results on hard probes in heavy-ion collisions from ALICE and LHCb, 7th Edition of the Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP 2019) 20-25 May 2019, Puebla, Mexico
7. N. Novitzky, ALICE Forward Calorimeter (FOCAL) – Detector design and physics reach, 7th Edition of the Large Hadron Collider Physics Conference (LHCP 2019) 20-25 May 2019, Puebla, Mexico

8. N. Novitzky, Calorimeter: ALICE FoCal Joint CFNS & RBRC Workshop on Physics and Detector Requirements at Zero-Degree of Colliders, 24-26 September 2019, Stony Brook University, NY, USA
9. T. Niida, Λ polarization along the beam direction in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV, A workshop on QCD Physics and Study of the QCD Phase Diagram and New-type Topologic Effect, Jul. 2019, Shandong University, China
10. Y. Miake, Strangelets, 原研先端研コロキウム, Jun. 4, 2019
11. Y. Miake, Heavy Ion Acceleration Plan at J-PARC, 3rd J-PARC Symposium, Sep. 26, 2019
12. T. Nonaka, Studying the QCD phase diagram in RHIC-BES at STAR, 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD2019), 24-26 June, Tokyo, Japan

<国際会議発表>

1. A. Ozawa, 'Mass measurements for Ni-isotopes in Rare-RI Ring RIBF', China-Japan Collaboration Workshop on "Nuclear Mass and Life for Unraveling Mysteries of R-process", 2019, 10/9-12, ITP/CAS, Beijing, P.R. China
2. M. Mukai, 'Measurement of nuclear magnetic dipole moments of 196-198Ir from laser spectroscopy at KISS', INPC2019, Glasgow (UK), 2020/7/28-8/2
3. T. Yamaguchi, 'New experimental plan and detector R&D at the Rare-RI Ring facility', China-Japan Collaboration Workshop on "Nuclear Mass and Life for Unraveling Mysteries of R-process", 2019, 10/9-12, ITP/CAS, Beijing, P.R. China
4. Hiroshi Matsumura, Go Yoshida, Akihiro Toyoda, Kazuyoshi Masumoto, Koichi Nishikawa, Hajime Nakamura, Taichi Miura, Kotaro Bessho, Kimikazu Sasa, Tetsuaki Moriguchi, Fumiyoshi Nobuhara, Yoko Nagashima, Nondestructive High-sensitivity Measurement Method for Activation Estimation in Accelerator Room Concrete, The 10th International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-10), July 16-19, 2019, in Taiyuan, China
5. N. Nitta, Y. Murao, H. Tsuchida, S. Tomita, K. Sasa, K. Hirata, H. Shibata Y. Hirano K. Yamada, A. Chiba, Y. Saitoh K. Narumi and Y. Hoshino, Surface Structures on Ge and Si Irradiated with C60 Cluster Ion Beams, 23rd International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions (IISC-23), 17-22 November 2019, Matsue, Japan
6. K. Sasa, M. Matsumura, T. Matsunaka, T. Takahashi, Y. Satou, N. Kinoshita, H. Matsuzaki and K. Sueki, Distribution of ^{129}I in the terrestrial environment around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant before and after the accident, 5th International Conference on Environmental Radioactivity, 8 –13 September 2019, Prague, Czech Republic
7. Y. Ochiai, K. Sasa, Y. Tosaki, T. Takahashi, M. Matsumura, K. Sueki, Variation of Chlorine-36 deposition flux in precipitation at Tsukuba, Japan, 5th International Conference on Environmental Radioactivity, 8 –13 September 2019, Prague, Czech Republic
8. Kimikazu Sasa, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Yuta Ochiai, Tetsuya Matsunaka, Aya Sakaguchi, Hangtao Shen, Keisuke Sueki, Progress of Ultrasensitive Detection Techniques for the 6 MV multi-nuclide AMS System at the University of Tsukuba, The 8th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 8), Nagoya University, 3 to 6 December, 2019.
9. Kayo Kanzawa, Fusa Miyake, Yuma Tada, Kazuho Horiuchi, Kou Ohtani, Kimikazu Sasa, Yuko

- Motizuki, Kazuya Takahashi, Yoichi Nakai, Hideaki Motoyama, Hiroyuki Matsuzaki, Variation of cosmogenic ^{10}Be for cosmic ray event in 5480 BC from Antarctic Dome Fuji ice core, The 8th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 8), Nagoya University, 3 to 6 December, 2019.
10. Yuta Ochiai, Kimikazu Sasa, Yuki Tosaki, Tsutomu Takahashi, Masumi Matsumura, Keisuke Sueki, Variations of Beryllium-10 and Chlorine-36 deposition flux at Tsukuba, Japan, The 8th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (EA-AMS 8), Nagoya University, 3 to 6 December, 2019.
 11. T. Chujo, QGP Tomography with jets, 2019 Joint workshop of FKPPL and TYL/FJPPL, Jeju island, South Korea, 8-10 May, 2019
 12. T. Chujo, ALICE T2 Status Hiroshima and Tsukuba, Ninth Annual ALICE Tier-1/Tier-2 Workshop Bucharest, Romania, 15 May, 2019
 13. T. Chujo, ALICE FoCal upgrade, Kick-off meeting of Platform B (Silicon), September 3, 2019 @ KEK
 14. T. Chujo, ALICE FoCal, a possibility of mass production in Japan KEK platform B (silicon) meeting, December 12, 2019 at KEK, Tsukuba, Japan
 15. T. Chujo, ALICE FoCal, a possibility for mass production in Japan KEK platform B (silicon) meeting, January 8, 2020 at KEK, Tsukuba, Japan
 16. T. Chujo, FoCal in Japan ALICE workshop in Hiroshima, January 26, 2020, Hiroshima Univ., Japan
 17. T. Chujo, Online Algorithm for FoCal Mini-workshop on next generation DAQ, March 16, 2020, Campus Innovation Center Tokyo, Tamachi Tokyo, Japan
 18. K. Tadokoro, Elliptic flow of electrons from heavy-flavour hadron decays in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with ALICE, Quark Matter 2019 - the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China (poster)
 19. S. Sakai, Measurement of heavy flavour jets with electrons from heavy-flavour hadron decays in pp and p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with ALICE, Quark Matter 2019 - the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China (poster)
 20. M. Takamura, The neutral meson measurement in jets in Pb-Pb collisions in ALICE, Quark Matter 2019 - the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China (poster)
 21. N. Novitzky, System size dependence of direct photon production in large and small system collisions from PHENIX, Quark Matter 2019 - the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China (poster)
 22. T. Niida, Global and local polarization of Λ hyperons in heavy-ion collisions, Nuclear Physics Seminar, Feb. 2020, BNL, USA
 23. K. Okubo, Differential measurements of global polarization of Lambda hyperons in Au+Au collisions at 54.4 GeV with STAR, Quark Matter 2019 - the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China (poster)

24. K. Okubo, Measurements of the Lambda polarization in Au+Au collisions at 54.4GeV, Workshop on the QCD Phase Structure at High Baryon Density region, Nov. 13-15, 2019, Central China Normal University, China
25. Y. Sato, Centrality determination with the Event Plane Detector for fluctuation measurements from STAR, Quark Matter 2019 - the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China (poster)
26. Y. Sato, Centrality determination with new detector EPD at STAR, Workshop on the QCD Phase Structure at High Baryon Density region, Nov. 13-15, 2019, Central China Normal University, China
27. T. Nonaka, Measurement of the sixth-order cumulant of net-proton multiplicity distributions at RHIC, 13th Workshop on QCD Phase Transition and Relativistic Heavy-Ion Physics (QPT 2019) 16-20 August, 2019, Enshi, China
28. T. Nonaka, Measurement of the sixth-order cumulant of net-proton multiplicity distributions from the STAR experiment (selected as plenary flash talk award), Quark Matter 2019 - the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China
29. T. Nonaka, Measurements of the sixth-order cumulants of net-particle distributions, Workshop on the QCD Phase Structure at High Baryon Density region, Nov. 13-15, 2019, Central China Normal University, China
30. S. Esumi, Beam-energy and collision-system dependence of the linear and mode-coupled flow harmonics from STAR (on behalf of Niseem Abdelrahman), Quark Matter 2019 - the XXVIIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 3-9 November 2019, Wanda Reign Wuhan Hotel, Wuhan, China

<国内会議発表（招待講演）>

1. 笹 公和, イオンビーム分析法を用いた材料中の水素を含む多元素同時イメージング, 軽金属学会アルミニウム中の水素と材料物性研究部会第2回研究会, 2019年11月6日, 日本アルミニウム協会第一会議室.
2. 中條達也, ジェット物理の最前線, 理研シンポジウム: チュートリアル研究会「高エネルギー重イオン衝突の物理: 基礎・最先端・課題・展望」, August 19-21, 2019, RIKEN Wako, Japan
3. 中條達也, クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) とカラーガラス凝縮 (CGC), 京都大学・集中講義「高エネルギー重イオン衝突の物理」セミナー・談話会, 2019年12月4日-6日
4. 中條達也, クォーク・グルーオン・プラズマ物理の最前線, 新学術領域「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」スクール, 2020年3月3日 (理化学研究所 和光)
5. T. Niida, Global and local polarization of Λ hyperons in heavy-ion collisions, Seminar at Quantum Hadron Physics Laboratory, Jul. 2019, Riken, Japan
6. 新井田貴文, 「偏極、CME、CVE」, チュートリアル研究会「高エネルギー原子核の物理」, Riken, Japan
7. Kosuke Okubo, Global polarization of Lambda hyperons in Au+Au collisions at STAR, Heavy Ion Cafe, Jun 22-23, 2019, RIKEN Wako, Japan
8. 野中俊宏, ビームエネルギー走査の最新結果, 理研シンポジウム: チュートリアル研究会「高エ

エネルギー重イオン衝突の物理：基礎・最先端・課題・展望」、August 19-21, 2019, RIKEN Wako, Japan

9. 江角晋一、小さい系・フローの最先端、理研シンポジウム：チュートリアル研究会「高エネルギー重イオン衝突の物理：基礎・最先端・課題・展望」、August 19-21, 2019, RIKEN Wako, Japan

<国内会議発表>

1. 景澤怜央、固体水素標的を用いた 17F の反応断面積測定、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学（東山キャンパス）、2020 年 3 月 16 日～19 日
2. T. Moriguchi, Energy dependence of reaction cross section for 17Ne on proton target, The International Nuclear Physics Conference (INPC) 2019, Scottish Event Campus, Glasgow, UK, Jul. 29 – Aug. 2, 2019 (Poster)
3. 森口哲朗、「固体水素標的を用いた不安定核のスキン厚導出手法の開発」、H30 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会、ホテルポートプラザ千葉、2019/04/22-23
4. 向井もも、「薄膜を利用した飛行時間検出器の開発」、日本物理学会 2019 年秋季大会、山形大学、2019 年 9 月 17 日～20 日
5. 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 1、上殿 明良、筑波大学タンデム加速器施設 UTTAC の現状（2018 年度）、第 32 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究會、2019 年 7 月 5 – 6 日 神戸大学。
6. 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、上殿 明良、筑波大学タンデム加速器施設の現状報告、第 16 回日本加速器学会年会、2019 年 7 月 31 日 – 8 月 3 日、京都大学
7. 笹 公和、落合 悠太、高橋 努、松村 万寿美、末木 啓介、カルシウム 41 の加速器質量分析法による高感度検出手法の開発、2019 年第 80 回応用物理学会秋季学術講演會、2019 年 9 月 18 – 21 日、北海道大学
8. 菅澤佳世、三宅美沙、堀内一穂、笹公和、望月優子、高橋和也、中井陽一、本山秀明、松崎浩之、ドームふじアイスコア中 10Be と 36Cl 濃度の測定による BC5480 年宇宙線イベントの調査、2019 年 9 月 17 日 – 20 日、山形大学（小白川キャンパス）
9. 落合悠太、笹公和、高橋努、松村万寿美、末木啓介、加速器質量分析法を用いた塩素 36 測定における低バックグラウンド検出手法の開発、2019 年第 80 回応用物理学会秋季学術講演會、2019 年 9 月 18 – 21 日、北海道大学
10. 横山 大輝、笹 公和、松中 哲也、高橋 努、松村 万寿美、高野 健太、落合 悠太、長谷川 涼、太田 裕貴、末木 啓介、福島県の避難指示区域における I-129 の分布と Cs-137 との関係性、日本放射化学会第 63 回討論會 (2019)、2019 年 9 月 24 – 26 日、いわき産業創造館（LATOV 6 階）
11. 松中 哲也、笹 公和、高橋 努、松村 万寿美、末木 啓介、松崎 浩之、樹木年輪に記録された福島第一原子力発電所発事故由来 C-14 の分布、日本放射化学会第 63 回討論會 (2019)、2019 年 9 月 24 – 26 日、いわき産業創造館（LATOV 6 階）
12. 松村 万寿美、森口 哲朗、笹 公和、上殿明良、筑波大学 6MV タンデム加速器ビームラインの放射線サーベイ、公益社団法人日本アイソトープ協会 放射線安全取扱部会年次大会、2019 年 10 月 24 – 25 日、倉敷市芸文館（岡山県倉敷市）
13. 松中哲也、後藤章夫、渡邊隆広、土屋範芳、平野伸夫、笹公和、蔵王山における火山活動と熱水系ヨウ素同位体比の変動、日本陸水学会 第 84 回金沢大会、2019 年 9 月 27 日 – 9 月 30 日、金沢大

学角間キャンパス。

14. 菰田誉大, 村尾 吉輝, 新田 紀子, 土田 秀次, 冨田 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, 斉藤 勇一, 鳴海一雅, 星野 靖, C60 クラスタイオンを照射した Si の照射角度依存性, QST 高崎サイエンスフェスタ 2019, 2019 年 12 月 10 - 11 日, 高崎シティギャラリー
15. 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, BC5480 年宇宙線イベントにおける ^{10}Be と ^{36}Cl の変動: ドームふじアイスコアからの証拠, 応用物理学会 2020 年春季学術講演会, 2020 年 3 月 12 日 - 15 日, 上智大学 四谷キャンパス.
16. 笹 公和, 山崎 明義, 石井 聡, 冨田 成夫, 左高 正雄, 檜本 洋, 工藤 博, 構造材料用マイクロビーム分析装置を用いた水素を含む多元素同時分析法の開発, 応用物理学会 2020 年春季学術講演会, 2020 年 3 月 12 日 - 15 日, 上智大学 四谷キャンパス.
17. 田所賢一 (for the ALICE collaboration), LHC-ALICE 実験 鉛-鉛衝突 5.02TeV における重クォーク起源電子の方位角異方性の測定, 日本物理学会 秋季大会, 山形大学 9/17-20
18. 一色萌衣 (for the ALICE FoCal collaboration), ALICE 実験アップグレード計画における超前方電磁カロリメータ FoCal の Geant-4 シミュレーションを用いた最終デザインの検討, 日本物理学会 秋季大会, 山形大学 9/17-20
19. 大久保孝祐 (for the STAR collaboration), Global polarization of Lambda hyperons in Au+Au collisions at 54.4GeV with STAR, 日本物理学会 秋季大会, 山形大学 9/17-20
20. 佐藤優里 (for the STAR collaboration), RHIC-STAR 実験 $\sqrt{s_{NN}} = 54 \text{ GeV}$ 金 + 金衝突における net-proton 4 次のキュムラントの測定, 日本物理学会 秋季大会, 山形大学 9/17-20

<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査」、小沢顕、代表、4,100 千円
2. 金沢大学環日本海域環境研究センター共同研究, 「日本海と太平洋における人為起源 ^{129}I と ^{137}Cs および ^{36}Cl の降下量変動評価と海洋循環トレーサーへの適用」、笹 公和、代表、210 千円
3. 放射能環境動態・影響評価ネットワーク共同利用・共同研究拠点, 「樹木年輪に記録された原発事故由来 C-14 の分布」笹 公和、代表、100 千円
4. 放射能環境動態・影響評価ネットワーク共同利用・共同研究拠点, 「河川における I-129 の動態」、笹 公和、代表、100 千円
5. 科学研究費 若手研究, 「稀少 RI リングを用いた未踏核種の精密質量測定による金、白金の起源解明」、向井もも、代表、平成 31 年度～平成 33 年度、4,290 千円
6. 科学研究費 基盤研究 (A), 「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」、中條達也、代表、2017-2020、43,680 千円
7. 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)」, 中條達也、分担、2,000 千円
8. 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」、中條達也、分担、850 千円
9. TYL-FJPPPL 日仏事業 (KEK-CNRS), 「QGP Tomography with photons, jets, and heavy flavors」、中條達也、代表、400 千円

10. 科学研究費 基盤研究 (B)、「Di-Jet 識別装置を用いたグルオン衝撃波の探索」、三明康郎、代表、2017-2020、1,1960 千円
11. 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」、江角晋一、代表、2019-2024、103,350 千円

参考文献

- [1] A. Yamazaki, K. Sasa et al., AIP Advances 9, 105111 (2019).
- [2] S. Hosoya, K. Sasa et al., Nucl Instrum Meth B 439 (2019) 131-135.
- [3] 奈良女子大学 港陽子 (2019), 令和元年度修士論文
- [4] A Forward Calorimeter (FoCal) in the ALICE experiment, ALICE Collaboration, ALICE-PUBLIC-2019-005, <http://cds.cern.ch/record/2696471>
- [5] Design and Performance of a Silicon Tungsten Calorimeter Prototype Module and the Associated Readout, T. Awes, C.L. Britton, T. Chujo, T. Cormier, M.N. Ericson et al., e-Print: 1912.11115 [physics.ins-det]
- [6] Measurement of charged jet cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV, S. Acharya et al., (ALICE Collaboration), Phys. Rev. D 100, 092004 (2019)
- [7] "Jet quenching and acoplanarity via hadron-jet measurements in pp and Pb–Pb collisions at 5.02 TeV with ALICE", Y. Mao (for the ALICE collaboration), QM2019 proceedings.
- [8] L. Lamers "Neutral Meson and Jet Reconstruction in Heavy Ion Physics," n.d., 73.
- [9] (ALICE Collaboration), Eur. Phys. Journal C 78, no. 3 (2018)
- [10] ALICE Collaboration, Phys. Rev. C. 101.034911(2019)
- [11] S. Wicks et al., Nucl. Phys. A. 783, 493 (2007)
- [12] A. Shreyasi et al. (ALICE Collaboration), Phys. Lett. B 804, 135377 (2020)
- [13] J. Adam et al. (ALICE Collaboration), JHEP 02, 077 (2020)
- [14] X. Luo, J. Xu, B. Mohanty, and N. Xu, J. Phys. G40,105104 (2013)
- [15] Y. Sato, Centrality determination with the Event Plane Detector for fluctuation measurements from STAR, Quark Matter 2019, 4 Nov 2019, Wuhan
- [16] B. I. Abelev et al, STAR Collaboration, Phys. Rev. C 76, 024915 (2007)
- [17] L. Adamczyk et al, STAR Collaboration, Nature 548, 62 (2017)
- [18] J. Adam et al, STAR Collaboration, Phys. Rev. C 98, 14910 (2018)
- [19] T. Inoue et al. (HAL QCD Collaboration) Phys. Rev. Lett. 106, 162002 (2011)
- [20] L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration) Phys. Rev. Lett. 114, 022301 (2015)
- [21] L. Adamczyk et al. (STAR Collaboration), Nature 548, 62 (2017)
- [22] J. Adam et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. C 98, 014910 (2018)
- [23] J. Adam et al. (STAR Collaboration), Phys. Rev. Lett. 123, 132301 (2019)
- [24] F. Becattini and Iu. Karpenko, Phys. Rev. Lett. 120, 012302 (2018)
- [25] X.-L. Xia et al., Phys. Rev. C 98, 024905 (2018)
- [26] J. Steinheimer et al., Phys. Rev. C 89, 054913 (2014)
- [27] J. Adam et al. (STAR collaboration), arXiv:2001.02852 (2020)
- [28] M. A. Stephanov, Phys. Rev. Lett. 107, 052301 (2011)