

課題名(タイトル): 高エネルギー原子核物理学

利用者氏名: 四日市 悟(1,2), 渡辺 康(1), 秋葉 康之(1), 市川 真也(2), 中井 恒(2), 村上 智紀(2), 中須賀 さとみ(2)

理研における所属研究室名: (1)仁科加速器科学研究センター RHIC 物理研究室
(2) 仁科加速器科学研究センター 核反応研究部

1. 本課題の研究の背景、目的、関係する課題との関係
当研究室では国内外の高エネルギー粒子加速器を用いて、原子核物理学の実験的研究を行っている。研究の主目的は、強い相互作用をする素粒子であるクォークやグルーオン、およびそれらが構成するハドロンの性質を理解し、強い相互作用の法則である量子色力学(QCD)を実験的に解明することである。具体的には、RHIC/PHENIX 実験での原子核衝突実験により生成される高温状態におけるクォーク・グルーオンプラズマの性質の研究、同じく PHENIX 実験での偏極陽子衝突実験による、陽子スピンの担い手としてのグルーオンやクォークの性質の研究、J-PARC での陽子原子核反応実験による高密度状態での中間子の性質の研究などを遂行している。

このような高エネルギー原子核実験では、たとえば毎秒 100 万回におよぶ原子核反応から、400 万チャンネルの大型検出器を使用して毎秒 500 MB におよぶ大量のデータが記録される。年間での典型的データ量は、生データで1PB、荒い解析後で 200 TB 程度となる。

このデータを取り扱うため、大規模ストレージおよび大量の CPU パワーは必須であるが、当研究室では 2000 年度より計算機センターである RIKEN-CCJ を運用し、国際共同実験 PHENIX の遂行に大きな役割を果たしてきた。増大するデータ量に対応するため、2004 年度からは情報基盤センターの運用する RSCC、その後 RICC で CPU を占有利用し、また大規模ストレージ HPSS を利用してきた。

2. 具体的な利用内容、計算方法

実験固有のデータ解析およびシミュレーションソフトウェアを使用している。また、業界共通の Toolkit である GEANT、ROOT などのライブラリを使用している。国際共同実験のため、世界各地で同じデータをもとに解析を進めている。その際解析場所によって結果が変わることを防ぐことが重要な課題になって

おり、共同実験全体で、OSなどのソフトウェア環境を統一することにした。その環境構築は、2017 年度までは CPU ノードの占有利用により行っていた。HOKUSAI の IA サーバ運用開始ののち、占有利用ができなくなったため、コンテナテクノロジーを用いた上記環境の実現をめざしている。また、HOKUSAI 移行により HPSS は廃止されたが、そこに保管されていた実験データ 1.7 PB のうち生データを除く 0.9 PB の実験データを HOKUSAI のストレージに移行して使用している。2020-24 年度には 620 TB 程度の J-PARC 新規実験データのストレージとしても利用している。

3. 結果

研究成果リストに示すように、6 報の査読つき論文、3 本の会議報告。研究の性格上、2024 年度以前の実験データおよび解析結果に基づく論文も含まれる。

4. まとめ

高エネルギー原子核実験の大規模データの解析のためには、HOKUSAI のストレージを使用することが必須である。2024 年度は 500TB 程度の実験データと、解析結果及びシミュレーションデータで 90TB 程度のストレージ(テープ)を利用し、テープ量合計は 1680 TB 程度になった。また、CPU は無償利用可能な分をテストのほか、シミュレーションに使用した。資源購入は行わなかった。

5. 今後の計画・展望

HOKUSAI BW2 のテスト運用で、singularity による運用可能性を実証した上で必要に応じて CPU 資源追加を申し込む予定である。いずれにせよインテルアーキテクチャの CPU が前提であり、2-3 年以内に GPU を利用することはな

いと考えている。singularity テストを始めたがまだ大規模にはおこなっていない。

ペタバイト級ストレージについては PHENIX 実験、その後継の sPHENIX 実験、J-PARC 実験とも必須であるので、引き続き利用させていただかないと実験が成立しない。J-PARC での実験は 2020 年より開始して最低 2027 年くらいまでは、また、sPHENIX 実験は 2023 年より 2025 年までデータ取得が行われる。取得完了後 5 年程度は利用したいという計画である。なお、理研の規程により、論文投稿より 5 年間のデータ保存義務があることに鑑みても、データ取得終了後最低 5 年のストレージ利用は必須となる。システム更新による新テープストレージ(HCL)への移行については情報システム部の協力のもとすすめている。現在までは CPU とディスクストレージは基本的に当研究室のものをつかっているため、基本的にはテープストレージでも問題はないが、今後 HCL から BW2 の CPU を使う場合の、解析におけるテープとディスクの間のやりとりの最適化は検討課題である。

2024 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

- 1) Transverse single-spin asymmetry of charged hadrons at forward and backward rapidity in polarized p+p, p+Al, and p+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration ·N.J. Abdulameer(Debrecen U.) et al. , Phys.Rev.D 108 (2023) 7, 072016
- 2) Disentangling Centrality Bias and Final-State Effects in the Production of High-pT Neutral Pions Using Direct Photon in d+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration ·N.J. Abdulameer(Debrecen U.) et al. Phys.Rev.Lett. 134 (2025) 2, 022302
- 3) Identified charged-hadron production in p+Al, 3He+Au, and Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV and in U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}}=193$ GeV
PHENIX Collaboration ·N.J. Abdulameer(Debrecen U.) et al. , Phys.Rev.C 109 (2024) 5, 054910
- 4) Jet modification via π^0 -hadron correlations in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
PHENIX Collaboration ·N.J. Abdulameer(Debrecen U.) et al. , Phys.Rev.C 110 (2024) 4, 044901
- 5) Centrality dependence of Lévy-stable two-pion Bose-Einstein correlations in $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV Au+Au collisions
PHENIX Collaboration ·N.J. Abdulameer(Debrecen U.) et al. Phys.Rev.C 110 (2024) 6, 064909
- 6) Measurement of the transverse single-spin asymmetry for forward neutron production in a wide pT range in polarized p+p collisions at $\sqrt{s} = 510$ GeV
RHICf Collaboration, M. H. Kim et al. Phys.Rev.D 109 (2024) 1, 012003

【会議の予稿集】

- 1) Measurement of the transverse single spin asymmetry for forward neutron production in a wide transverse momentum range
Minho Kim for the RHICf collaboration , PoS SPIN2023 (2024) 073
- 2) Analysis of spectral modification in nuclei using the PHSD transport approach,
M. Ichikawa et al., J.Subatomic Part.Cosmol. 3 (2025) 100018
- 3) Experimental investigation of vector mesons in medium through dielectron decay at J-PARC,
K. Aoki et al., J.Subatomic Part.Cosmol. 3 (2025) 100019