

原子核のヒッグス応答による新奇核子超流動の探索

Search for exotic nuclear superfluidity via Higgs response

代表研究者	大阪大学	大田 晋輔	The University of Osaka	Shinsuke OTA
協同研究者	京都大学	堂園 昌伯	Kyoto University	Masanori DOZONO
	大阪大学	吉田 賢市	The University of Osaka	Kenichi YOSHIDA
	KEK ^{*1}	本多 良太郎	KEK ^{*1}	Ryotaro HONDA

This study addresses a fundamental challenge in nuclear physics: elucidating the properties of nuclear matter, particularly the novel nucleon superfluidity arising from nucleon pair correlations, defined by isospin and spin. Experimentally quantifying their strength, via the condensation potential's depth or curvature, has been elusive. Our research pioneers the first experimental derivation of this crucial curvature for neutron and proton-neutron pairs. By comparing experimental results with theoretical calculations, we've advanced towards establishing a reliable methodology for assessing pair correlation strength.

A significant breakthrough was developing a novel high-speed data acquisition system. This system was essential for detecting extremely weak transition strengths at high excitation energies via challenging reactions like ($^4\text{He}, ^6\text{He}$) and ($^4\text{He}, ^6\text{Li}$). Successful data collection with this system is a pivotal step towards detailed analysis of nuclear superfluidity. Notably, initial findings in the measurement of the neutron pair removal reactions suggest consistency with theoretical expectations for the pair polarizability, validating the ($^4\text{He}, ^6\text{He}$) reaction as a suitable probe. For proton-neutron pairs, no strong condensation was observed near the ground state; however, an unexpected peak at several MeV offers a crucial avenue for future quantification. These results collectively pave the way for systematic measurements to fully elucidate superfluidity mechanisms in nuclear matter.

研究目的

本研究は、核子物質の物性解明を大きな目標とし、特に核子対相関による対凝縮相の発現・抑制機構を実験と理論の両面から解明することを目的としています。核子対相関は、荷電スピンの（陽子数と中性子数の非対称性に依存）とスピンによって特徴づけられます。様々な対凝縮相の有無は、対応する量子数を持つ対凝縮ポテンシャルの極小値を与える秩序変数が有限の大きさを持つかどうかで決定されます。一方で、ポテンシャルの深さあるいは相関の強さは、対凝縮ポテンシャルの曲率によって特徴づけられると考えられていますが、これまで実験的な導出の試みはありませんでした。本研究では、世界で初めて中性子対および陽子・中性子対について実験的にポテンシャルの曲率を導出し、理論計算と比較するこ

とにより、対相関の定量化手法を確立することを目指します。

対凝縮相は超伝導や超流動として知られ、電子、原子、核子、ハドロン、クォークなど、様々な構成要素からなる多体系で発現する普遍的な現象です。その多様性は質量階層を超えて注目され、例えば中性子星内部の対凝縮相シミュレーションに冷却原子系が用いられたり、中性子星の冷却過程やパルサーグリッチの説明にはスピン三重項対の存在が仮定されたりします。固体物性分野では高温超伝導に関連したエキゾチックな対凝縮相の研究も進んでいます。電子系では一種類のフェルミオンの対凝縮相に限られますが、核子系は二種類のフェルミオンからなり、スピン、空間に加え荷電スピンの自由度があるため、新たな対相関が可能です。特に、陽子・中性子対の

¹ 高エネルギー加速器研究機構 (High Energy Accelerator Research Organization)

うち荷電スカラースピン三重項対は、自由空間で重陽子として存在するほど強い引力を持つにもかかわらず、原子核中ではその対凝縮相が未発見という興味深い状況にあります[1]。特にこのような状況は秩序変数がゼロであることに起因するため、これまでの手法では対相関の強さを定量的に評価することができず、新たな手法が必要とされました。

対凝縮ポテンシャルの形状は、凝縮がない場合には調和振動子のように振る舞い、凝縮がある場合にはワインボトル型の形状を示します。凝縮がない場合、ポテンシャル形状は最小値付近の曲率によって決まり、凝縮がある場合は秩序変数と曲率によって極小値の深さが決定されます。近年、原子核の対相関場のポテンシャル形状を定量化するため、対相関場に対するヒッグス応答とポテンシャルの曲率を結びつける物理量として「対分極率」が新たに提案されました[2]。対分極率は曲率の逆数であり、対分極率が大きいほど曲率が小さく、ポテンシャルの底が緩やかになるため、大きなゆらぎが生じます。物質中の対相関場に対するヒッグス応答は、特定のエネルギーを持つモードとして現れますが、原子核中では対称性の破れが完全でないためにエネルギーが分散します。しかし、分散したヒッグス応答の強度を高い励起エネルギー状態まで逆エネルギー和を取ると収束が見られ、これが対分極率と対応づけられます。約 20MeV までの励起エネルギーの和を取ると、およそ 80%程度収束することが分かっています。ヒッグス応答そのものを実験的に求めることは困難ですが、「対除去」と「対付加」という二種類の対移行反応の遷移強度を測定することでヒッグス応答を評価できるという提案もあります。そこで、これらの反応を高励起状態まで測定することによって、対分極率を導出することを試みます。

高励起状態は連続状態であるため、その領域での遷移強度を求めるには、一般に多重極展開法と呼ばれる手法が用いられます。これは、反応における移行角運動量ごとに計算された微分断面積を用いて遷移強度を分解・導出する方法です。多重極展開法では、散乱角度が小さい、いわゆる前方散乱の断面積が必要となります。これは、現在着目している空間対称な対相関の励起確率が、他の移行角運動量成分と最も異なる領域だからです。そのため、磁気スペクトログラフを用いた測定が不可欠となります。しかしながら、我々が新たに提案する(4He,6He)反応お

よび(4He,6Li)反応においては、4He の非弾性散乱による背景事象が 1000 倍以上存在します。磁気スペクトログラフにおいては磁場 B の中を通過する粒子の運動量 $p=mv$ 、電荷 q として、その回転半径 ρ との間に $mv = qB\rho$ という関係が成り立ちますが、このとき質量電荷比が同じで近しい速度を持つ粒子は分離しづらいという特徴があります。したがってこれをアナログ的に排除することは非常に困難です。実行可能な時間内に実験を完遂するためには、例えば毎秒 20 万個以上の散乱粒子を取得する必要がありますが、従来のトリガー型データ収集システムではこれは非常に困難です。トリガーを待ってからアナログ-デジタル変換を行うため、どうしても待ち時間が発生してしまうことが原因ですが、このような困難は、様々な原子核実験において共通の問題となっています。そこで、国内の原子核実験研究者が一同に会して開発を行う SPADI Alliance[3] が立ち上がり、新たに連続読み出しデータ収集システムが開発されました。我々は、このデータ収集システムをいち早く導入することで、この問題に対応することにしました。

研究経過

2023 年、実機購入を前提として、上述のデータ収集システムのプロトタイプシステムを借り受け、大阪大学核物理研究センター加速器施設において物理実験 E585 および学生実験を実施しました。AVF サイクロトロンで加速された 100 MeV の ^4He ビームを研究対象とする種々の薄膜標的に照射します。標的中において二核子が移行される原子核反応が起こり、中性子対の場合には 6He が陽子・中性子対

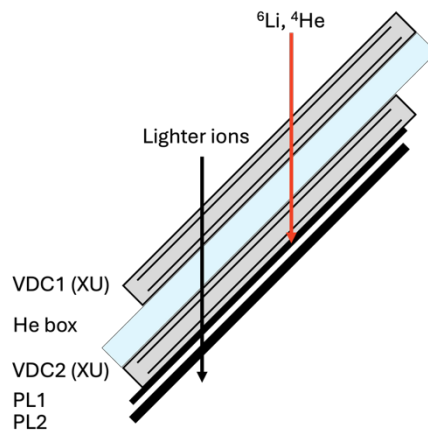


図 1: Focal plane detectors

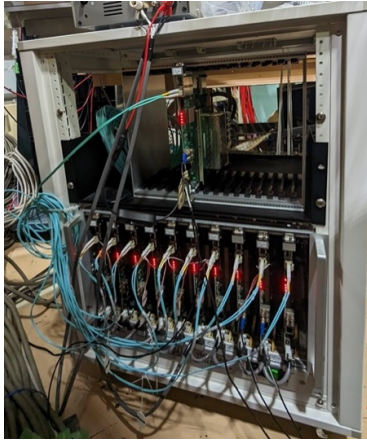


図 3: AMANEQ for data acquisition

の場合には 6Li が散乱粒子として出射されます。散乱粒子はグランドライデン磁気スペクトログラフを用いて運動量が分析されます。散乱粒子の識別、その運動量および散乱角度の決定にはグランドライデンの焦点面検出器 (図 1) である多芯線ドリフトチェンバー (VDC) および 2 枚のプラスチックシンチレータ (PS) を用います。粒子識別は VDC および PS で測定された電荷情報から ΔE -E 法を用いて行います。また、焦点面で測定された位置および角度の情報から、イオン輸送光学を使うことで標的上での運動量ベクトルを求めることができます。ビームおよび反応前の標的粒子の運動量ベクトルは既知とすることで、反応後の生成粒子の質量を求めることができます (質量欠損法)。

VDC からの信号は、電荷積分型の前置増幅器によって、到達時刻を立ち下がり時間、電荷量を時間幅情報として持つ NIM 信号に変換され、連続読み出し前置回路 AMANEQ に入力されます (図 2)。AMANEQ は、最高で 30 ps 程度の時間分解能を持つ時刻デジタル変換回路です。MIKUMARI と呼ばれる時刻同期システムを搭載しており、各信号の到達時刻と時間幅を連続的に記録します。AMANEQ のデータは、データ収集フレームワーク NestDAQ によって連続的に読み出され、並列処理することで全ての散乱事象を再構築し記録します。得られたデータは、解析フレームワーク ARTMIES によって、オンラインで解析・モニタリングされるとともに、オフラインで物理量に変換されます。

E585 実験においては、 $(\alpha, 6\text{He})$ 反応を中性子対凝縮が明らかになっている原子核である ^{120}Sn に対して行いました。毎秒 20 万個程度の散乱粒子を記録しながら、励起エネルギー 20 MeV 程度、散乱角度を 2.5

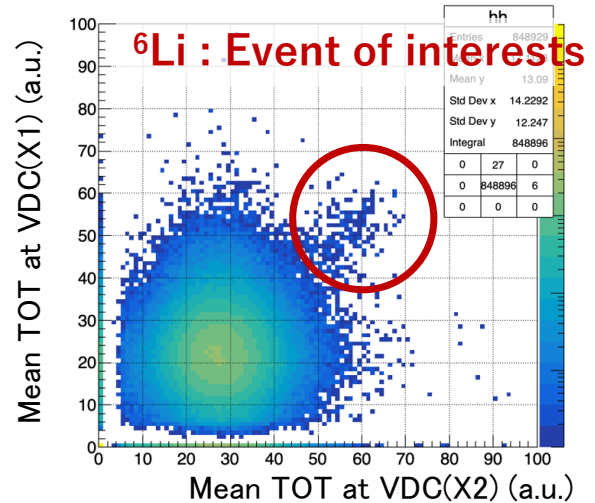


図 2: Particle identification by the energy deposit in the two planes among the VDCs.

度から 13 度と広い範囲で測定しました。信号雑音比が非常に悪い状況での信号である 6He 粒子の同定は困難を極めました、識別に成功し、多重極展開による遷移強度の導出に至りました。これらの実験における成果は 2 本の修士論文としてまとめられており、遷移強度分布は現在最終チェックを行っている段階で、年内には確定し投稿論文としてまとめられる見通しです。

この実験に続き、大阪大学の学生実験において、中性子過剰な環境において陽子・中性子対相関がどのように変容するかに着目し、 ^{120}Sn 標的および周辺核に対する陽子・中性子除去反応 ($((4\text{He}, 6\text{Li})$ 反応) の測定を行いました。焦点面における粒子のエネルギー損失の状況が想定とは異なり、当初想定していた粒子識別法が使えなかった事態が発生しましたが、VDC の電荷情報を用いることで事なきを得ました (図 3)。このような粒子識別の手法は例が少なく、思わぬ情報を得ることができました。また、0.1% という非常に悪い信号雑音比を改善する手段として連続読み出しデータ収集システムのなかにオンラインフィルターを組みこむための手法開発が修士学生によって行われ、これも修士論文としてまとめられました。

測定の結果は凝縮のある中性子対とは異なり、基底状態への遷移強度が小さいことから、陽子・中性子対の凝縮は見られないことが示唆されました。一方で、エネルギーの低い励起状態に強い遷移強度が認められていますが、連続状態であるため多重極展

開による解析が必要です。これを受けて 2024 年には離散的な状態を用いて核反応理論計算の妥当性を検証するための反応測定を炭素 12 を標的として行いました。このデータも現在解析を進めているところです。

理論研究においては共同研究者の吉田がカルシウム、ニッケル、スズの同位体における対分極率の計算を完了させ、投稿論文として提出しています。

考察

中性子対に対する測定においては高励起状態への遷移強度が思ったほど大きくないということがわかりましたが、逆エネルギー和の特徴から理論計算とは大きく違う結果となっています。一つの核種だけで結論づけるには早いものの、 $(4\text{He}, 6\text{He})$ 反応が対分極率の測定には良いプローブとなったこと、対分極率という量が比較的良い指標となりうることを示されたと考えています。

陽子・中性子対に対する測定においては、学生実験という限られた時間の中ではありましたが、基底状態近傍には強い遷移が認められず、いわゆる凝縮は起こっていないということがわかりました。一方で数 MeV 付近に認められるピーク構造は予期せぬものであり、この構造をしっかりと分析することで陽子・中性子対相関の定量化に一步近づくと考えています。また、 $(4\text{He}, 6\text{Li})$ 反応測定自体は問題なく行えることがわかったため、これを用いた高励起状態までの測定が可能となりました。一方で、スピン三重項を取り扱うため、終状態の分離には注意が必要であり、炭素標的を用いた実験においても同じ 1^+ を持つ状態でも角度微分断面積が異なるということがわかりました。ここから構造理論計算と比較可能な情報を引き出すために反応理論計算を用いた分析手法の確立が必要となっています。まずは炭素標的のデータを分析しながら、今後より重い原子核の既知の状態に対する実験を行うことで、反応理論計算の精度をあげて多重極展開をスピン三重項陽子・中性子対に対しても行えるように開発を進めていきます。

本研究では、大きな実験的障壁であった高速データ収集システムを実現し、核子対凝縮および対相関を対分極率を通じて定量的に評価する道筋を拓くことができました。また、本研究で実装したシステムは、結果として核物理研究センターの標準システム

として採用されることが決定し、2025 年度中には完全に置き換えられる予定であり、大きな波及効果があったと言えます。今後、中性子対、陽子・中性子対ともに解析を完了させるとともに、系統的な測定へと進み、核子物質における超流動・超伝導の発現・抑制メカニズムを明らかにしていきます。

参考文献

1. S. Frauendorf, and A.O. Macchiavelli, “Overview of neutron-proton pairing”, Prog. Part. Nucl. Phys. 78 (2014) 24–90
2. K. Takahashi, Y. Matsuda, and M. Matsuo, “Higgs response and pair condensation energy in superfluid nuclei”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2023 (2023) 083D01
3. SPADI Alliance,
<https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~spadi/>

研究の発表

口頭発表

1. S. Ota, “SPADI Alliance and ARTEMIS for SOR processing”, Streaming readout workshop SRO XII, Dec. 02-04, 2024, University of Tokyo, Japan
2. S. Ota, “Pair correlation and condensation via two-nucleon transfer reactions”, The 3rd RIKEN RNC-CAS IMP Joint symposium, Nov. 07-08, 2024, RIKEN, Wako, Japan
3. S. Ota, “Development and standardization of scalable streaming data acquisition and processing system in Japan”, Seminar at FRIB, Sept. 26, 2024, Michigan State University, U.S.
4. S. Ota, “Recent activities on the study of nucleonic matter properties EoS and Pair condensation”, JSPS/NRF/NSFC A3 Foresight Program “Nuclear Physics in the 21st Century” Joint Annual Meeting 2024, Jul. 19, 2024
5. S. Ota, “Experimental studies on the property of nucleonic matter from the nuclear scattering and pair transfer reactions”, Advancing physics at next RIBF (ADRI2024), Jan. 23, 2024, RIKEN, Wako, Japan
6. S. Ota, “EOS and Superfluidity in nucleonic matter via monopole transitions”, Seminar at Peking University, Peking, China, Jan. 12, 2024, and at Institute for Modern Physics, Lanzhou, China, Jan. 15,

2024

7. S. Ota, "SPADI Alliance for Standardization of SRO DAQ in Japan", Streaming readout workshop SRO-XI, Nov. 28 - Dec. 02, 2023, Honolulu, Hawaii, U.S.
8. S. Ota, "Development of CAT-M for experiments with high-intensity heavy-ion beams", 6th Joine Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS "New Results and Prospects of Time Projection Chambers for Low-energy Nuclear Physics", Nov. 27, 2023, Honolulu, Hawaii, U.S.
9. K. Yoshida, "Proton-neutron pairing in neutron-rich nuclei", Kyoto-Soongsil Nuclear Physics Joint Workshop (75th OMEG SSANP workshop), Soongsil University, Seoul, Korea (7-8 June, 2024)
10. K. Yoshida, "Shell effects in the proton-neutron pairing", TOMOE Theory Workshop, Tohoku University, Sendai, Miyagi (6--10 January, 2025)
11. K. Yoshida, "Proton-neutron pairing in neutron-rich nuclei", TOPTIER Focus Program: Cutting-Edge Nuclear Theories for Exotic Nuclei, IBS, Daejeon, Korea (21--22 Apr, 2025)
12. Masanori Dozono, "Measurement of highly-excited neutron-pair vibration", RCNP Workshop "Microscopic approach from pair correlation to pair condensation", Osaka (4-6, September 2023)
13. Masanori Dozono, "Search for highly-excited pair vibration modes in heavy nuclei using alpha-induced pair-transfer reactions", RCNP-CENuM-OMEG symposium on Nuclear Structure, Reaction, and Astrophysics: NuSRAP2024, Osaka (12/18-20, 2024)
14. 堂園昌伯、「原子核の対振動モードとその実験的研究」、RCNP 研究会「核子系と電子系における対相関と対凝縮相」、大阪、9/9--11, 2024
15. DAQ フロントエンドとバックエンドの最近の成果、本多良太郎、シン・測定器開発センターキックオフミーティング, 2023 年 9 月 1 日
16. 連続読み出し High-Resolution TDC の現状とその先、本多良太郎、計測システム研究会 2023, 2023 年 11 月 20-21 日
17. Ryotaro, Honda, "Standardization of trigger-less data-streaming DAQ system in Japan", 2023 Fall Meeting of APS DNP and JPS, Nov. 26- Dec. 1st, 2023
18. Ryotaro Honda, "SRO FEE development Japan", Streaming readout Workshop SRO-XI, Nov. 28- Dec. 2nd, 2023
19. Ryotaro Honda, Masahiro Ikeno, Che-Sheng Lin, Masayoshi Shoji, "General-purpose data streaming TDCs for nuclear and hadron experiments in Japan", 24th IEEE Real Time Conference, Apr 22-26, 2024

誌上発表

1. K. Yoshida, "Proton-neutron pair correlations in neutron-rich nuclei",
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.13963>
2. R. Honda, M. Ikeno, C.S. Lin, M. Shoji, "General-Purpose Data Streaming FPGA TDC Synchronized by SerDes-Based, Clock Synchronization Technique", IEEE TNS, vol 72, no. 3, 614-622, Mar. 2025, doi: 10.1109/TNS.2025.3541731
3. 池水玄、「核子超流動の性質解明に向けた($\alpha,6\text{He}$)反応の微分断面積測定」、京都大学大学院理学研究科 2024 年度修士論文
4. 伊津野勝英、「原子核の高励起対振動探索のための($\alpha,6\text{He}$)反応スペクトルの多重極展開解析」、京都大学大学院理学研究科 2024 年度修士論文
5. 古川史也、「連続読み出しデータ収集システムを用いた核子対移行反応測定に向けたオンラインフィルター開発」、大阪大学大学院理学研究科 2024 年度修士論文