

研究課題別評価書

1. 研究課題名

光学実験を手段とした量子情報処理のための量子力学的物理現象の研究

2. 氏名

長谷川祐司

3. 研究のねらい

思考実験は量子物理学の核心を示すもので、その多くはレーザーをはじめとした光学実験として実現されてきた。歴史的に、量子システムとしては電子、原子などが広範に使われてきた。その一方、1930年代のチャドウィックによる発見以来、中性子は物性物理学の、あるいは、核物理学の研究の有用な手段として頻りに使われてきた。量子操作の点からすると、中性子は検出器をはじめ操作の高効率性が特に有用である。1970年代の結晶学的なそして測定器の発展によって、中性子の物質波を用いた広範な干渉実験に耐える干渉計が開発された。この中性子干渉計を用いて、 $1/2$ スピンの 4π 対称性、重力ポテンシャルによる位相シフト、アップ・ダウンのスピンの重ね合わせなどの多くの思考実験がはじめて行われた。

近年の量子情報技術の発展に際し、本研究は、技術の基礎基盤である量子力学的物理現象の研究を目指している。特に干渉計とスピン干渉計であるポラリメータを用いた量子干渉効果の研究に重点をおいている。多くの実験はヨーロッパの Atominstitut(ウィーン)、ラウエ・ランジュバン研究所(フランス)で行った。さらに次世代中性子源に照準を合わせた将来計画の推進のために日本原子力研究機構でも実験を行った。最後に、中性子を用いた量子光学の研究が日本でも根付くのに本研究が役立てば本望である。

4. 研究成果

1. 中性子干渉計実験

1.1. 2キュービット

ここでは、ベルの不等式の破れに使ったパスとスピンの自由度を2キュービットとした実験に関する成果を記述する。

1.1.1. Kochen-Specker 的な実験

量子力学と古典力学の違いが、ベルの不等式が示す統計的な破れとしてではなく、no-go theorem である Kochen-Specker の定理として知られているような論理的な矛盾として示される特殊な場合があることが(論理的に)知られている。本研究ではそのような Kochen-Specker の定理に関する実験を行った。実験配置を図1に示す。

実験の解析としては、実際の量子操作の効率性は 100%とはならないので矛盾を示すと同時に2つの不等式を導出して実験結果を吟味した。

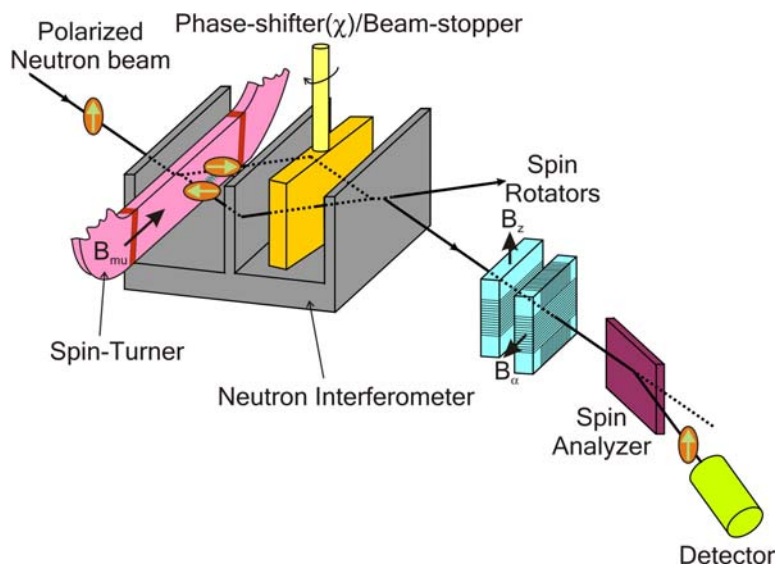


図1 Kochen-Specker の定理に関する実験の配置

実験結果は、実際の干渉計のコントラストが 70%弱だったことを反映して、(1)約 63%の Kochen-Specker 的な矛盾、ならびに、(2)統計的な確率を考慮した不等式の破れ、(3)product observables を用いた不等式の破れが観測された。この実験に触発されて、スペインの理論家 A. Cabello との共同研究が始まり、中性子を用いてさらに高率な Kochen-Specker 的現象の考察を行い、理論の論文を投稿し、実験の準備を進めている。

1.1.2. 量子トモグラフィ

ベルの不等式、Kochen-Specker の定理の実験の後、エンタングルした2キュービットの完全な特徴づけのために、様々な系で行われてきた、密度行列で表された系のトモグラフィックな測定を行った。それぞれ4点に相当するパスとスピンのオブザーバブルの16個のジョイント測定をしている。

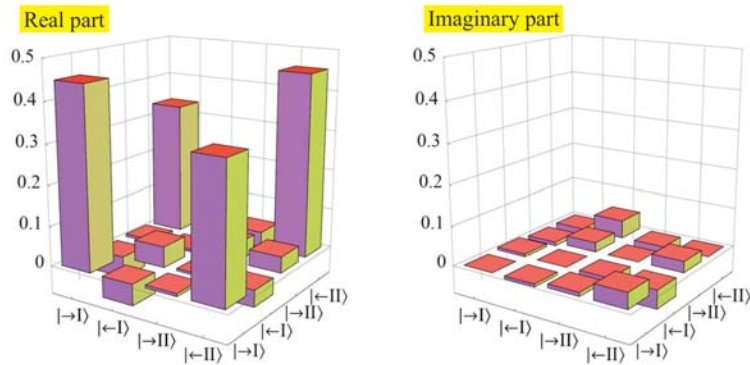


図2 量子トモグラフィの結果

ベル状態のひとつに関する結果をヒストグラムに表したものを図2に示す。さらに Fidelity (生成した状態と望んだ状態のオーバーラップ) は 0.79、そして Concurrence (エンタングルメントの指標である) は 0.59 であると確定した。また、我々の実験配置の利点であり具体的には干渉計を微小角回転させて容易に生成できる、他のベル状態に関してもトモグラフィック測定を行った。その状態の Fidelity と Concurrence は 0.75 と 0.52 であった。先の状態に比べての若干の減少は入射ビームに含まれる高調波の影響だと考えられる。

1.2. 3キュービット

ここでは先のパスとスピンの2キュービットに、エネルギー自由度を加えて3キュービットとした実験の成果を記述する。

1.2.1. エネルギー固有状態の操作

2キュービットの実験を高度化するためにはさらなるキュービットを加える必要がある。中性子において、時間依存した磁場との相互作用でコヒーレントなエネルギーの操作が可能なが知られている(図3参照)。本研究ではこの操作を利用してエネルギー自由度を第三のキュービットとして加え、3キュービットの実験の可能性を探った。

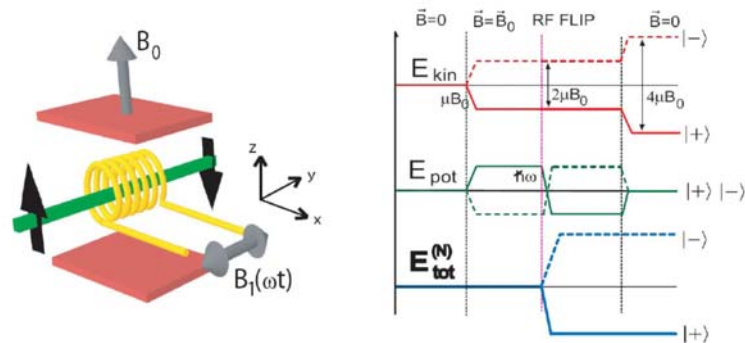


図3 エネルギーのコヒーレントな操作

そのためには、まず、干渉計内で一方のビームのエネルギー操作を行い、その後、2つのビームのエネルギー差を補償する方法を考えた。実験配置を図4に示す。

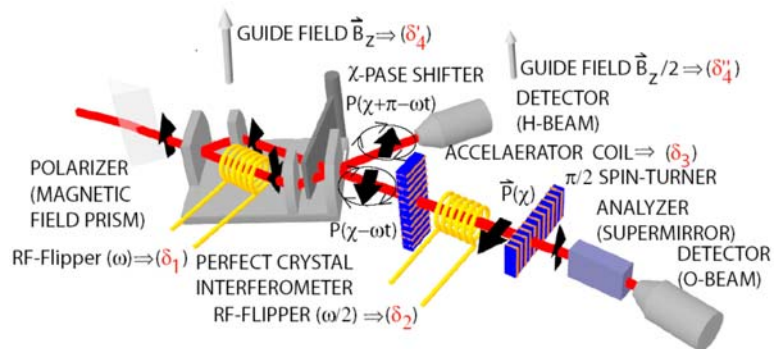


図4 エネルギーの操作を含む干渉実験

ここで注意すべきは、まず2つのラジオ波(RF)スピントリッパーの周波数が ω と $\omega/2$ であることである。そのため、干渉計周辺には第二のヘルムホルツコイルで追加のガイド磁場を印加している。また、中性子干渉計は温度差に敏感なので、スピントリッパーやヘルムホルツコイルはすべて水冷機構がなされている。

実験結果を図5に示す。H波(反射側の干渉波)はエネルギー差が補償されず時間依存したスピンの回転が起こっていると思われ、定常的な干渉パターンは観測できない。一方、O波(透過方向の干渉波)はエネルギー差が補償され、干渉計のももとのコントラストと同等の、干渉パターンが観測された。

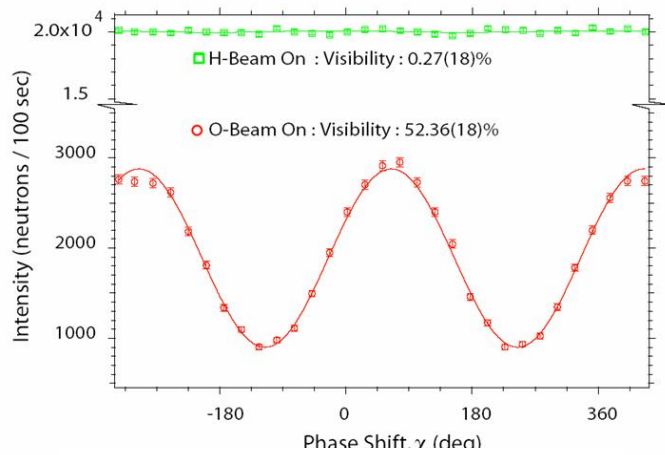


図5 エネルギー差を補償した干渉パターン

この実験により、さらなるキュービットである中性子のエネルギー準位のコヒーレントな操作が確立し、3キュービットの実験にむけて大いに進歩した。さらに、2つのRFスピントリッパーを用いた操作は幾何学的位相の生成をも含み今後の応用が期待されている。

1.2.2. GHZ状態

まずはエンタングルした3キュービットの実験の手始めとして、光子や原子を使って行われてきたGHZ状態の実験を行った。実験配置を図6に示す。3つのキュービットの位相はそれぞれ、位相板(χ)、磁場によるスピン回転(α)、ゼロ場歳差(γ)によつ調整する。量子力学と古典力学の予測の違いはマーミンが定義した、

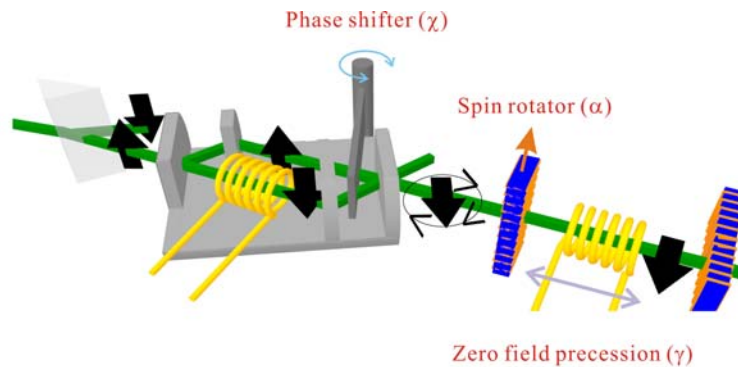


図6 GHZ状態の干渉実験

$M \equiv E[\sigma_x^p \cdot \sigma_x^s \cdot \sigma_x^e] - E[\sigma_x^p \cdot \sigma_y^s \cdot \sigma_y^e] - E[\sigma_y^p \cdot \sigma_x^s \cdot \sigma_y^e] - E[\sigma_y^p \cdot \sigma_y^s \cdot \sigma_x^e]$ を用いると、古典的にはこの M の絶対値は2以下であるのに対して、量子力学では $M=4$ になることが示されている。我々の実験ではこの M が2.62となり、ここでも古典的な予測の破れが見られた。

1.3. 日本原子力研究機構での実験

以前、研究者はJAEAでビームラインを建設し干渉実験を行った。今回は再び干渉実験を試みた。まず2005年度は既存の干渉計を用いて干渉実験を行った(図7参照)。この干渉計は不均一さがあり、干渉パターンを得るには入射ビームの波長を短くし、ビームを絞る必要があり、そのためコントラストは40%に達したが、

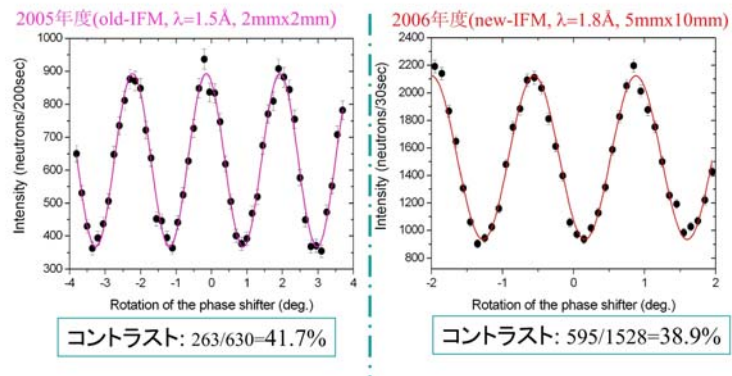


図7 PNOでの干渉実験の結果

収量は少なかった。一方、2006 年度には新規の干渉計を作成し長めの波長を用いて実験を行った。この干渉計は、だいたい均一にできており、ビームサイズを大きくすることにより、コントラストはあまり改善されなかったが収量はすこぶる増加した。上記の実験はPNOビームラインで行ったが、このビームラインはビームタイムの調整に難があった。さらに、炉室のPNOよりもガイドビームラインであるULSのほうが干渉計実験に適した波長の収量の点で得るとの解析があり、最終年度にはULSビームラインでの実験の準備を行った。

2. 中性子ポラリメータ実験

2.1. 幾何学的位相

研究者は、長年、幾何学的位相(ベリー位相)に関して様々な実験を行ってきた。本研究では、特に混合状態における幾何学的位相および幾何学的位相の robustness に関しての実験を行った。図8に前者の実験配置を示す。ここでは、入射スピンをノイズを加えた $\pi/2$ スピン回転器でアップとダウンの重ね合わせの混合状態を生成しSU(2)での発展後の位相を測定した。

実験は、当初、均一な混合状態を生成するのに苦労したが、最終的には純幾何学的、純動力学的、そして両者の混合の位相を測定できた。その結果の一部を図9に示す。理論的に予想されたように、混合比 r に比例しない位相がそれぞれ観測された。さらに、一般的な混合状態に関して全位相は純幾何学的位相と純動力学的位相の和で与えられないことを実験的に確認した。これは今までどこにも発表されておらず、今回の研究における重要な知見であると思われる。

さらに幾何学的位相に関しては、量子計算の応用が期待されている、ノイズなど外的な摂動に対する robustness に関する実験を行った。具体的には、数分間以上にわたって溜めた超冷中性子を用いてポラリメータ配置で実験を行った。実験結果から、操作時間を長くするにつれて位相の分散が小さくなることが観測された。

2.2. 高精度な操作下の2キュービット

上記のGHZ状態の実験を行うにあたって、「ゼロ場歳差運動」に関する確証実験をする必要を感じた。そのため、急遽、ポラリメータを用いた実験を行った。実験配置を図10に示す。入射ビームのスピンを $\pi/2$ スピン回転器でアップとダウンの重ね合わせの状態にし、2つ目のRFスピンフリップの位置をずらして発展時間を調整して $\omega_c t$ 位相を観測した。ここで重要なのはRFフリップと同時にDCフリップを導入してラーマー歳差運動をキャンセルしている点である。

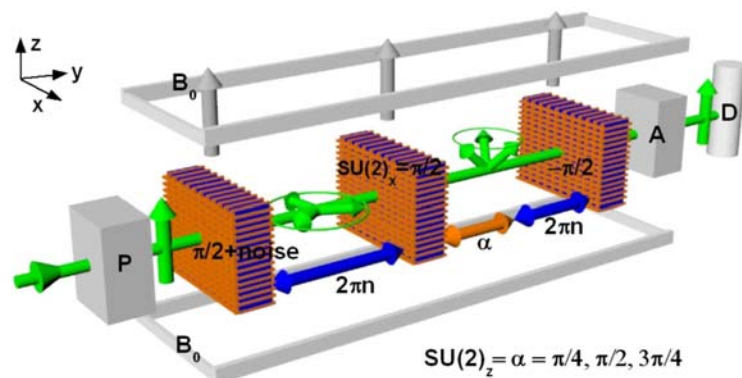


図8 混合状態の幾何学的位相の実験配置

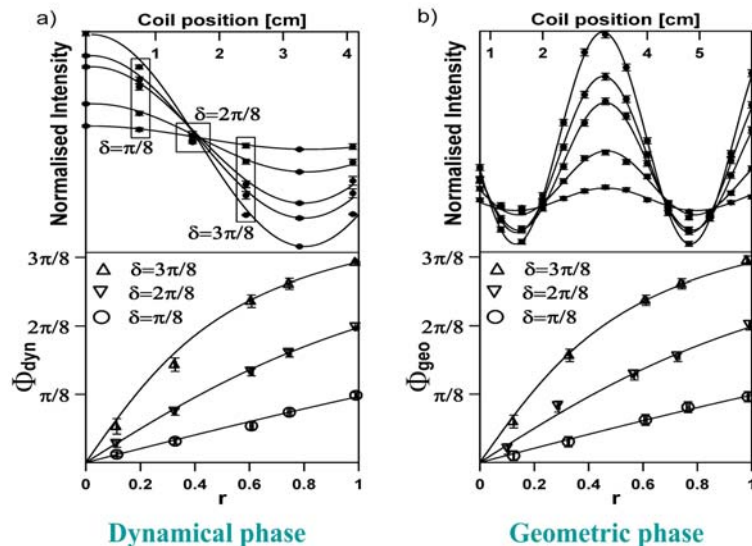


図9 混合状態の幾何学的位相

実験結果を図11に示す。ここでは、予想されたように、周期の ω_r の依存性が明確に見られる。さらに、ガイド磁場をスキャンした測定も行ったが、ここでは周期がガイド磁場に依存しないことが確認された。

このようなスピンとエネルギーの自由度を用いた2キュービットの実験に関して、現在、ベルの不等式の実験を行っている。そこではパスとスピンを用いた実験に比べて、各光学素子の効率が99%を超えることなどを利用した高度な操作下でのより高度な量子力学のテストとしてさらなる発展が期待されている。

2.3. Wigner 関数の測定

上記の実験以外にも、イタリアとチェコの理論家と共同で中性子のスピン操作の応用した、ウイグナー関数の測定の実験に関して理論的な考察を行った。本研究で数十 MHz を超える高周波を用いたスピンフリップパーの開発に関する予備実験を行った。その結果、提案された実験は十分実現可能であり、早急な実現が期待されている。

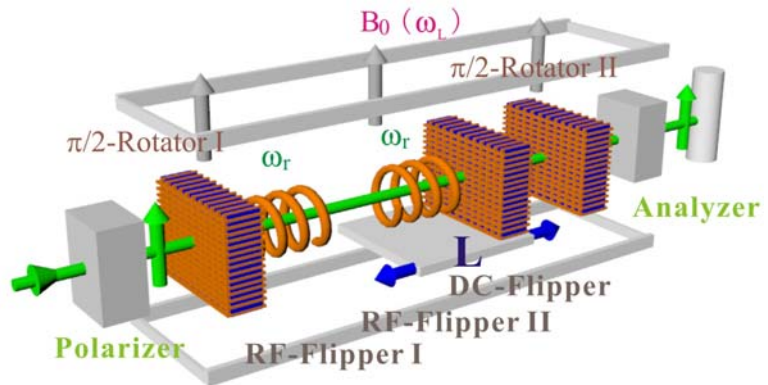


図10 ゼロ場歳差運動の実験配置

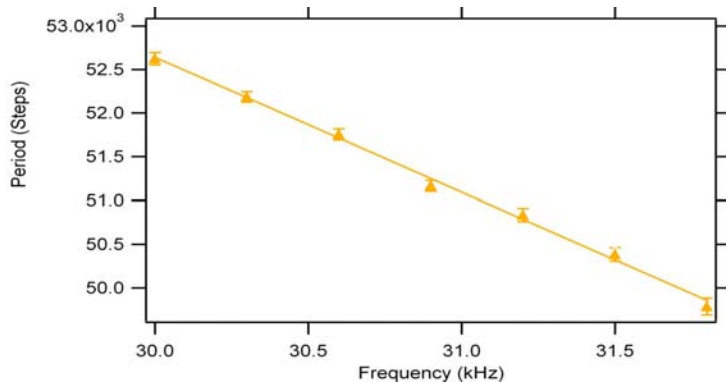


図11 ゼロ場歳差運動の実験結果

5. 自己評価

干渉実験に関しては、大きく分けて2キュービットとさらに発展させた3キュービットの実験を行った。まず、パスとスピンを用いた2キュービットの実験に関しては Kochen-Specker 的な実験を手始めに、量子トモグラフィまで完成した。その過程で、理論家との共同研究が生まれ、さらなる実験の可能性を議論し、新たな実験の種が見つかった。現在、実験の実現に向けて準備を進めている。さらに、プロジェクト開始当初は予期していなかった、エネルギーを加えた3キュービットの実験も紆余曲折の後に行うことができた。現在のところ、コヒーレントなエネルギーの操作と GHZ 状態に関する実験を終了した。このテーマの実験はまだ始まったばかりで、これから大いなる発展が期待できると思われる。特に、最近、k 空間を第四の自由度として加味できることに気づき、早々に実験を進めていく予定である。また、JAEAでの実験では、新たな研究パートナーとの共同研究が始まり j-parc での次世代パルス中性子源を使った研究に役立つと思われる。

一方、ポラリメータ実験に関しては、研究者が長年研究してきた幾何学的位相(ベリー位相)のいくつかの実験を終えた。混合状態の幾何学的位相の実験は一例であり、この実験をさらに発展させて、非ユニタリー発展する系の位相、k 空間とスピン空間それぞれの幾何学的位相などの実験をこれから取り掛かりたいと思っている。また、ゼロ場歳差運動をはじめとする、スピンとエネルギーエンタングルメントは、高効率な操作が可能であり、マルチエンタングルメントを含め、これからの発展が期待される。これらと平行して、Wigner 関数の測定に関する実験の理論的な取り扱いを終え、実験の実現に向けて取り組みを開始した。これらの研究は、現在の実験可能な領域を広げるとともに、より一般的な新たな実験の可能性を示し、あるいは理論的な取り扱いを終え、い

くつかのテーマは実験を待つのみである。

最後に、本研究では、オーストリアではウィーン工科大学の大学院生を、プロジェクト後半では日本で京都大学の学生の参加を積極的に促し、人材育成に努めた。このため、多くの研究テーマを同時進行で行うことになった。大学院生の活躍によって研究自体は大きく進展した反面、その研究成果を論文にまとめることに手間取り、本研究で得られた多くの研究成果の論文発表に手間取っている。今後、早急に研究成果を論文として発表する予定である。

6. 研究総括の見解

おそらく世界でも数少ない中性子干渉計を用いた量子力学の基本原則に関する数々の実験を行い多くの成果を上げた。その大部分は中性子の経路とスピンをそれぞれキュービットとして扱うが、最近ではさらにエネルギーの自由度もとり入れて3キュービットとしている。Kochen-Speckerの定理の破れ、GHZ状態の実験、幾何学的位相(ベリー位相)、量子トモグラフィーなど多岐にわたっている。

中性子という特徴のある系について、量子力学の基本的研究の有用性はこれからもあると思われる。この領域の研究で国際的評価と国内的評価のギャップの最も甚だしいもので、総括として継続的なアピールの必要性を感じる。

7. 主な論文等

【A さきがけの個人研究者が主導で得られた成果】

①論文

- Y. Hasegawa, R. Loidl, G. Badurek, M. Baron, and H. Rauch, Quantum contextuality in a single-neutron optical experiment, *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 230401.
Y. Hasegawa, R. Loidl, G. Badurek, M. Baron, and H. Rauch, Quantum contextuality in neutron interferometer experiments, *Physica B* **385-386**, part 2 (2006) 1377-1380.
Y. Hasegawa, R. Loidl, G. Badurek, S. Filipp, J. Klepp and H. Rauch, Evidence of entanglement and full tomographic analysis of Bell states in single-neutron system, *Phys. Rev. A.* **76** (2007) 052108.

②特許出願

なし

③受賞

なし

④著書

なし

⑤学会発表

- Y. Hasegawa, R. Loidl, S. Filipp, J. Klepp and H. Rauch, Quantum state tomography of neutrons, 55.Jahrestagung der ÖPG(The Austrian Physical Society) (2005).
R. Loidl, J. Klepp, S. Sponar, S. Filipp, G. Badurek, H. Rauch, Y. Hasegawa, Violation of Mermin's inequality for GHZ state neutron interferometry, 57.Jahrestagung der ÖPG(The Austrian Physical Society)(2007).
Y. Hasegawa, Quantum Contextuality in Neutron Interferometer Experiments, International conference on neutron scattering (ICNS2005), Sydney Convention & Exhibition Centre, Sydney, Australia, 27.Nov.-2.Dec. 2005.
Y. Hasegawa, Exploring quantum states with neutrons, 13th Central European Workshop on Quantum Optics (CEWQO), Scientific Center of the Polish Academy of Sciences, Vienna, Austria, May 23-27, 2006.
Y. Hasegawa, Spin-Path Entanglement in Neutron Interferometer Experiments, Theoretical and Experimental Foundations of Recent Quantum Technologies, University of KwaZulu-Natal, Durban, South Africa, July 10-14, 2006.

⑥招待講演

Y. Hasegawa, Quantum Contextuality in Single-Neutron Optical Experiments, Quantum Theory: reconsideration of foundations-3, Vaexjoe University, Vaexjoe, Sweden, 6-11 June 2005.

Y. Hasegawa, Neutron optical experiments exploring fundamental quantum phenomena, Workshop 'Classical and Quantum Interference', Palacky University, Olomouc, Czech Republic, 20. October, 2005.

【B その他の主な成果】

①論文

R.A. Bertlmann, K. Durstberger, and Y. Hasegawa, Decoherence modes of entangled qubits within neutron interferometry, quant-ph/0512103, Phys. Rev. A. **73** (2006) 022111.

G. Badurek, P. Facchi, Y. Hasegawa, S. Pascazio, H. Rauch, J. Rehacek, T. Yoneda, Neutron wave packet tomography, quant-ph/0503215, Phys. Rev. A. **73** (2006) 032110.

②特許出願

なし

③受賞

なし

④著書

なし

⑤学会発表

なし

⑥招待講演

Y. Hasegawa, Quantum Contextuality in Single-Neutron Interferometer Experiments: Violation of a Bell-like Inequality, Congress of Philosophy and Foundations of Science-IXb, CPFS-XIb, India International Center, New Delhi, India, 10-14 January 2005.