

# 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 Investigation of quantum mechanical phenomena by means of optical experiments for quantum-information technique

長谷川祐司

Yuji Hasegawa

科学技術振興機構

Japan Science and Technology Agency

**概要:** 本研究は完全結晶から切り出した中性子干渉計を用いた干渉実験と中性子ポラリメータを用いた光学実験によって量子力学的に特異な物理現象を研究した。干渉実験としてはパスとスピンの2キュービットの実験を手始めに、エネルギーを加えた3キュービットの実験までラウエ・ランジュバン研究所(フランス)で行った。また、日本原子力研究機構の JRR-3M を使った干渉実験も行った。さらに、ポラリメータに関しては、幾何学的位相やスピンとエネルギーの2キュービットに関する実験と、同時にいくつかの理論的な考察を行った。

**【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[1]、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ました。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ました。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繁に使われてきました。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す。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ました。この中性子干渉計を用いて、 $1/2$  スピンの  $4\pi$  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ました[2]。

近年の量子情報技術の発展に際して、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ます。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

ています。多くの実験は研究者の滞在しているヨーロッパの Atominstitut(ウィーン)、ラウエ・ランジュバン研究所(フランス)で行いました。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いました。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す。

**【研究方法】** 本研究には大きく分けて(1)中性子干渉実験と(2)中性子ポラリメータ実験が存在する。そのため、以下では(1)と(2)に関して基礎概念と実施した研究方法に関して記述する。

## 1. 中性子干渉計実験

熱中性子領域での干渉計は1970年代にウィーンの Atominstitut(研究者の研究場所)で始めて開発された。このシリコン完全結晶から切り出した干渉計は、位相の安定性および90%以上の高コントラストといった点において、ほとんど唯一、中性子の干渉実験の応用に使用されている。

研究者は、最近、2粒子間ではなく単一粒子の2つの自由度間でのベルの不等式の破れを示す実験を行った[3]。具体的には、干渉計内の中性子のパスとスピンという自由度をキュービットとして用いている。本研究では、まずこの2キュービットを利用した実験から取り掛かった。具体的には、Kochen-Speckerの定理として知られているような「論理的な矛盾」を示す実験と密度行列の全要素の測定にあたる量子トモグラフィの実験を行った。さらに中性子の時間依存した磁場との相互作用を利用したコヒーレントなエネルギー操作を行うことによって、中性子のエネルギーの自由度をキュービットとして追加して、3キュービットの実験に進んだ。その結果、いわゆるGHZ状態の実験を行った。

上記の実験は研究者が滞在しているヨーロッパのInstitut Laue Langevin (ILL)で最終実験を行った。その一方、研究者は日本原子力研究所(現日本原子力研究機構JAEA)の改造3号炉(JRR-3M)でも中性子干渉実験を行ってきたので、今回のさきがけ研究を機に、再びJRR-3Mにおける干渉実験の環境整備に取り掛かった。まずはPrecise Neutron Optics (PNO)ビームラインでの干渉実験を行い、波長等の最適化をはかることで従来以上の結果を得た。しかし、ビームタイムの融通が利かないために、Ultra Small angle scattering (ULS)ビームラインでの実験を試みている。

## 2. 中性子ポラリメータ実験

中性子スピンエコーをはじめとして、中性子を用いた分光法に、スピンを利用することはもっとも有利な方法のひとつである。中性子ポラリメータもその一例であり、磁

性研究等の分光法として長い間使われてきた。我々の実験はこの装置の量子光学実験への応用である。つまり、最も簡単な量子2準位系である中性子の1/2スピンをアップとダウンのスピンを重ねあわせとみなし、例えば磁場による歳差運動をそれらの2準位間の位相差に起因するとして解釈する。これにより、ポラリメータはそれぞれのスピン状態に依存した位相の違いをスピンの歳差運動として検知できる機器となり、例えば、中性子で派生するアハラノフ・ボーム(AB)位相の測定実験が行われてきた[4]。

このような中性子ポラリメータを用いて研究者はパウリのスピン行列の非交換関係に関する実験等を行ってきた[5]。さらに、本研究ではこのようなポラリメータを用いて、幾何学的位相(ベリー位相)、特に混合状態およびrobustnessに関して、実験を行った。さらに上記の3キュービットの一部として、偏向度や個別のコンポーネントの操作の効率が99%を超えることを利用した高度な操作下の、スピン+エネルギー、2キュービットの実験も行った。最後にウィグナー関数とComplete Positive (CP) Mappingの実験に関しての理論的考察を行った。

## 【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しての成果を記述する。

##### 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

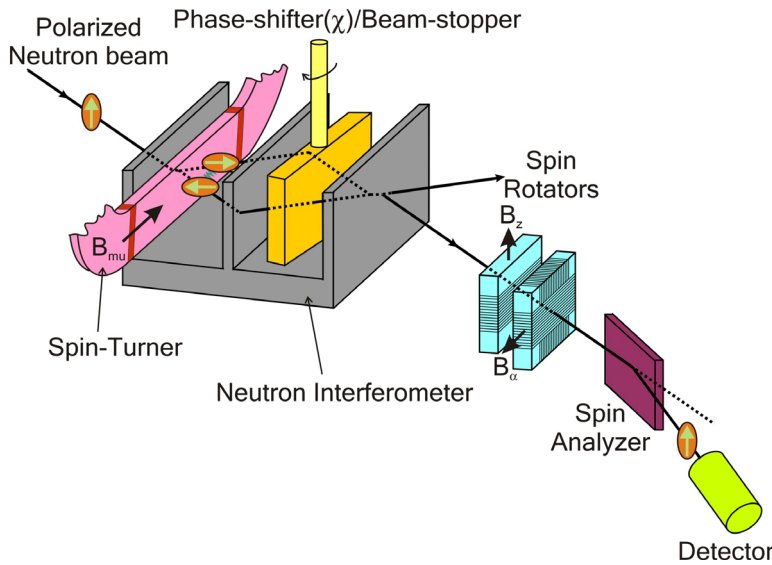


図1 Kochen-Specker の定理に関する実験の配置

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[6]。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は100%とはなりえ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。

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 的な現象の考察を行った。近々、この理論の論文と実験を終える予定である。

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[7]。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。

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。

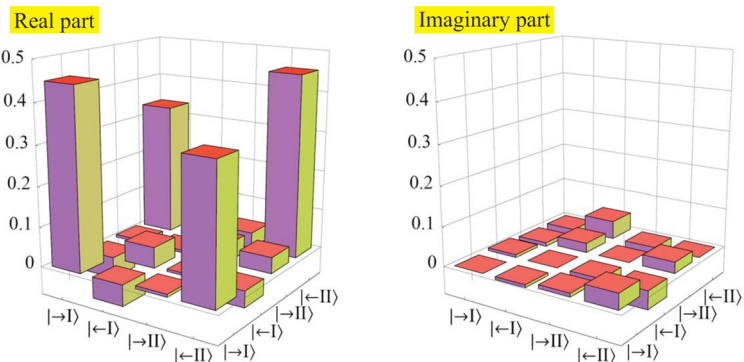


図2 量子トモグラフィックの結果

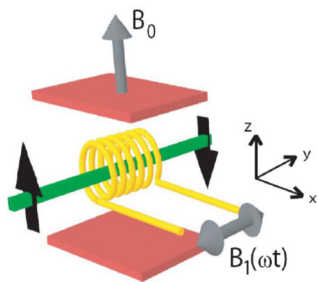
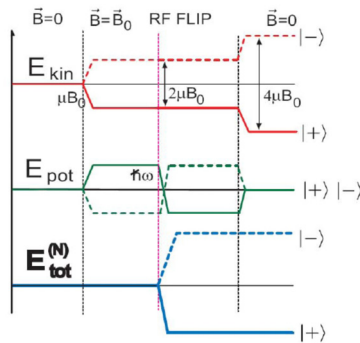


図3 エネルギーのコヒーレントな操作



$\omega$ 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、スピンスリッパ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。

### 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量子操作

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。

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。ここで注意すべきは、まず2つのラジオ波(RF)スピンスリッパの周波数が

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る、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

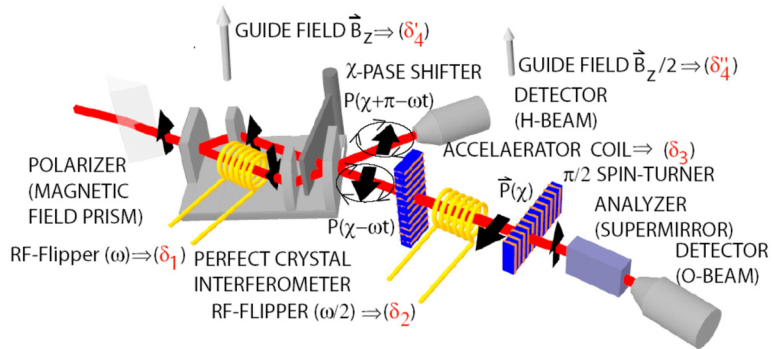


図4 エネルギーの操作を含む干渉実験

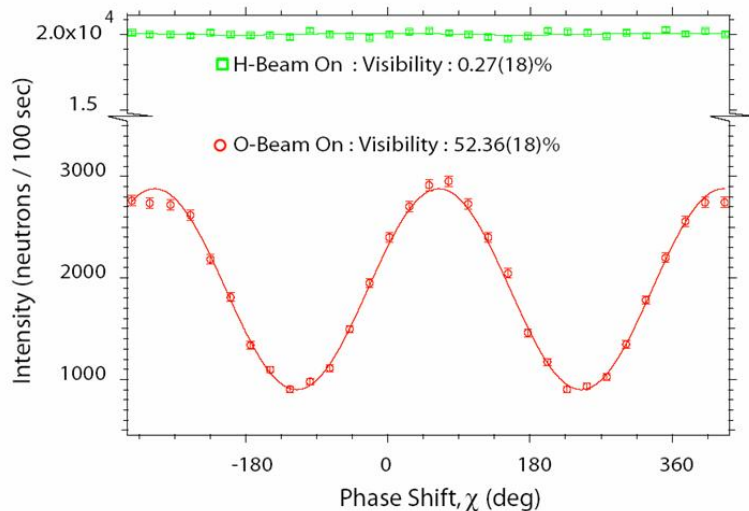


図5 エネルギー差を補償した干渉パターン

エネルギー差が補償され、干渉計のもと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。

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( $\chi$ )、磁場によるスピントリ回転( $\alpha$ )、ゼロ場歳差( $\gamma$ )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、

$$M \equiv E[\sigma_x^p \cdot \sigma_x^s \cdot \sigma_x^e] - E[\sigma_x^p \cdot \sigma_y^s \cdot \sigma_y^e] - E[\sigma_y^p \cdot \sigma_x^s \cdot \sigma_y^e] - E[\sigma_y^p \cdot \sigma_y^s \cdot \sigma_x^e]$$

$M$ 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る。

### 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

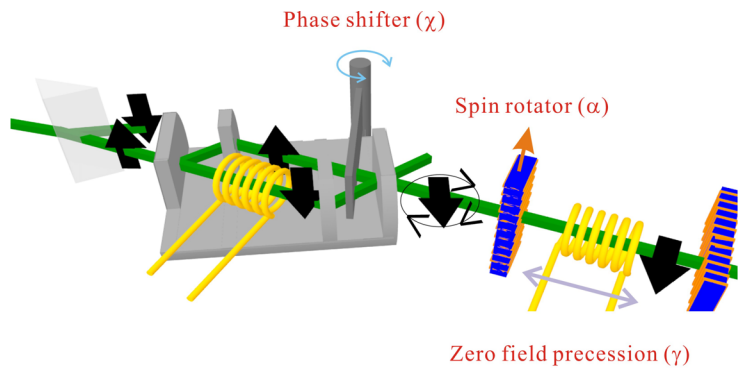


図6 GHZ状態の干渉実験

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、収量は少なかった。一方、2006年度には新規の干渉計を製作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

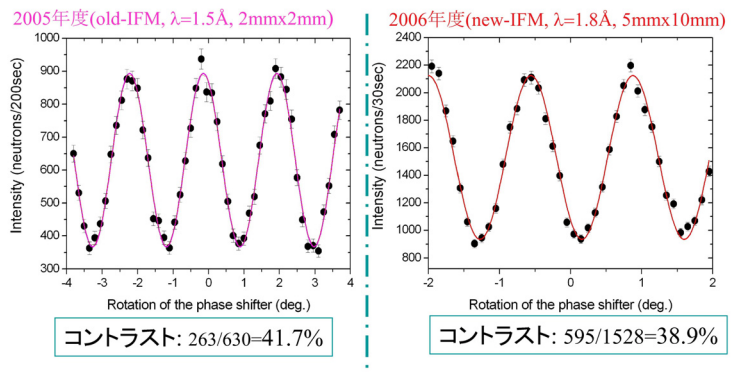


図7 PNOでの干渉実験の結果



で得るとの解析があり、最終年度にはU L S 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 $\pi/2$

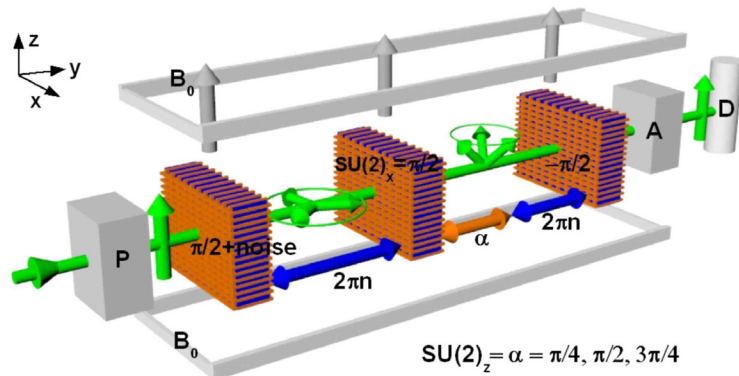


図8 混合状態の幾何学的位相の実験配置

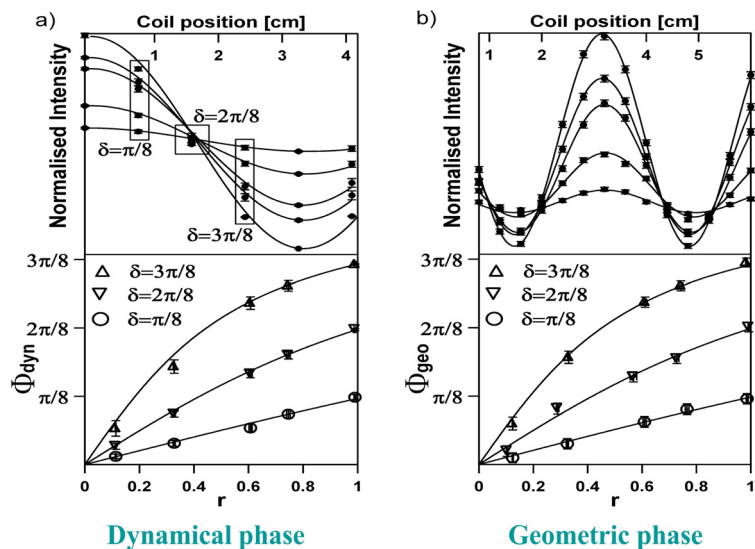


図9 混合状態の幾何学的位相

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スピントリッパの位置をずらして発展時間を調整して $\omega_r t$ 位相を観測した。ここで重要なのはRFトリッパと同時にDCトリッパを挿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。

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 $\omega_r$ 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、そ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。

さらに、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、より確かな破れが期待されている。

## 2.2. ウィグナー関数の測定

上記の実験以外にも、イタリアとチェコ共和国の理論家と共同で中性子のスピン操作を応用した、ウィ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[8]。実験的には、数十MHzを超える高周波を用いたスピントリッパ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。

## 2.3. Complete Positive (CP) Mapping

本研究では、当初、complete positive (CP) mappingに関する実験を行う予定であった。しかし、他の課題に追われこのテーマに費

やす時間を十分もてななかった。(とても残念である。)上記の量子トモグラフィーの実験結果にも見られるように、確定度にもよるが、実験結果的には complete positivity が満たされないこともあると思われる。現在の考察では、たとえ一般的な complete positivity は満たされていても、例えば時間的なゲートをかいた部分アンサンブルに関しての complete positivity はまだ理論的に議論の余地が十分ありうると思われる。また、それに関する実験の可能性も考察に値すると思われる。

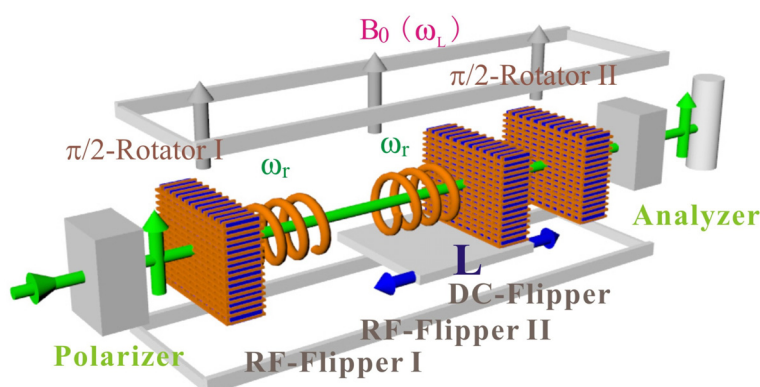


図10 ゼロ場歳差運動の実験配置

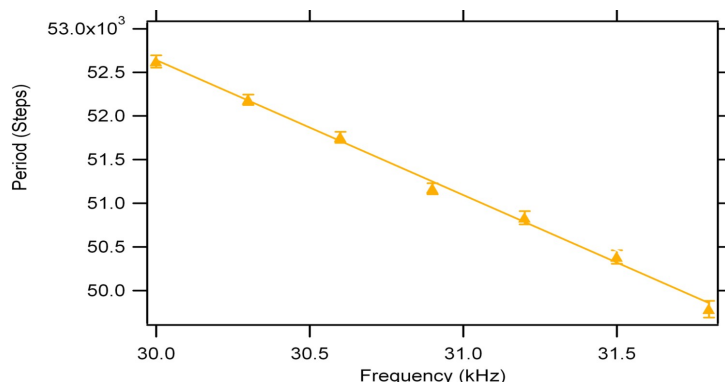


図11 ゼロ場歳差運動の実験結果

**【今後の展開】** 干渉実験に関しては、パスとスピンを用いた2キュービットの実験を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が示されつつある。また、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を行った。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。さらに、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 での次世代中性子源を使った研究に役立つと思われる。

次に、ポラリメータ実験に関しては、研究者が長年研究を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。それらは、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た。また、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、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。

**【結言】** 本研究は、量子操作が比較的確立しているが量子情報技術の点からいまだに特異な量子システムである、中性子を用いた量子光学実験です。（当初、光を用いた、い

わゆる、n-photon 光学の実験も考えていましたが、その余裕はありませんでした。）3年の期間では中性子の魅力を十分にはアピールできなかったことは残念です。その反面、今回のプロジェクト参加によって、当初の予想を越えたいくつかの結果が得られ、これからの研究の継続に役立つと思われる。

**【謝辞】** 本研究は Atominsitut、日本原子力研究機構、理化学研究所との共同研究です。このプロジェクトに参加した多くの方々に深く感謝いたします。また本研究の遂行に不可欠であった科学技術振興機構「量子と情報」研究領域総括の細谷先生、領域アドバイザー、ならびに領域事務所の皆様に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) S. Haroche and J.-M Raimond, *Exploring the Quantum* (Oxford Univ. Press 2006).
- 2) H. Rauch and S.A. Werner, *Neutron Interferometry* (Oxford Univ. Press 2000).
- 3) Y. Hasegawa, et al., *Nature* **425**, 45 (2003).
- 4) G. Badurek, et al., *PRL* **71**, 307 (1993).
- 5) Y. Hasegawa et al., *PRA* **59**, 4641 (1999).
- 6) Y. Hasegawa et al., *PRL* **97**, 230401 (2006).
- 7) Y. Hasegawa et al., *PRA* (in print).
- 8) G. Badurek et al., *PRA* **73**, 032110 (2006).