

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 8 月 22 日現在

機関番号：92704

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26286068

研究課題名（和文）オンチップ光子-原子ハイブリッド量子系の研究

研究課題名（英文）Research on an on-chip hybrid quantum system with photons and atoms

研究代表者

向井 哲哉（Mukai, Tetsuya）

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員

研究者番号：70393775

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000 円

研究成果の概要（和文）：超伝導チップ上に捕捉した原子集団（ボース凝縮体）を、ラジオ波、マイクロ波、および、近赤外光によって長時間コヒーレントに制御する技術を開発した。これを量子重ね合わせ状態を記録するメモリとして用いることで、秘匿安全性の高い量子メモリが構成できるスキームを考案し、これを実証した。また、光子状態を記録する量子メモリとして冷却原子集団を用いる実験では、原子集団に記録したスピン状態と記録の成功を伝令する光子との非古典的な相関が、伝令光子を長距離通信に適した波長へと変換して光ファイバーにより伝送した後も、保たれていることを確認した。

研究成果の概要（英文）：We developed a technique to control stably and coherently the spin-states of atomic ensemble (Bose-Einstein condensate) trapped above a superconducting atom chip using radio, microwave, and infrared light fields. Since this technique can be applicable for recording superposition of atomic spin states, we proposed a scheme for realizing a security enhanced quantum memory using atomic ensemble, and succeeded in the demonstration of it. Moreover, we demonstrated the quantum memory for photons with an atomic ensemble, and succeeded in observing non-classical correlations between the recorded atomic spin state and the heralding photon state after the frequency conversion and transportation via an optical fiber.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：量子メモリ 量子通信 冷却原子 アトムチップ 量子メモリの暗号化

1. 研究開始当初の背景

量子現象の応用により、従来技術を凌駕することを目指した試みが、光子・原子・超伝導などの様々な物理系で開始され、既に10年以上が経過している。その結果、基本的な量子的振る舞いが観測される中で、各々の物理系の短所を長所で補うハイブリッド量子系の重要性が着目され始めた時期に本研究が開始された。技術的にはNTTで超伝導チップ上に冷却原子集団やそのボース凝縮体を捕捉する技術が完成し、冷却原子を高度に制御するチップの開発に道が開けたこと、並びに、大阪大学では、通信波長と原子共鳴波長とを固体素子を用いて変換する量子波長変換技術が確立されたことから、それまで独立に研究を行っていた技術を組み合わせた量子通信・量子メモリの研究を実施する素地が整ってきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、長いコヒーレンス時間を持つ冷却原子系と長距離伝送性に優れた光子系とを組み合わせたハイブリッド量子系を作製し、量子ネットワークを構築する上での技術的課題を明確にして、将来に繋がる基盤技術を確立することである。

3. 研究の方法

本課題で構築した光子-原子ハイブリッド量子系は、ルビジウム原子の基底状態に含まれる2つのスピン状態を、近赤外波長で共鳴する励起状態を介して結ぶ $\Lambda$ 型3準位を用いるラマン散乱を基本動作原理とする。特に、(1)自発ラマン散乱による確率的方法と、(2)誘導ラマン散乱による決定論的方法のそれぞれを明らかにすることで、将来の実用的な技術の基礎構築を行った。具体的には、自発ラマン散乱を用いる方法では、光子状態を記録する量子メモリとして冷却原子集団を用い、遠隔地間で量子エンタングルメントを共有する為に不可欠な量子中継の基礎技術の研究を行った。また、誘導ラマン散乱を用いる方法では、個々の原子を量子ビットとする量子ゲート・量子メモリ素子を、ラジオ波、マイクロ波、レーザー周波数の光を用いてコヒーレントに制御する基礎技術の研究を行った。

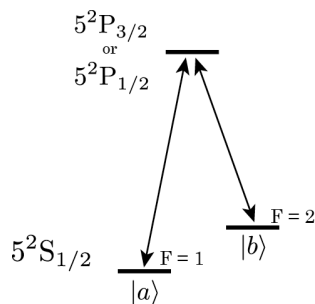


図1 ルビジウム原子の $\Lambda$ 型3準位

4. 研究成果

(1) 自発ラマン散乱を用いた研究

①光子状態を記録する量子メモリ

N個の原子からなる冷却原子集団の全ての原子を1つのスピン状態 ( $|a\rangle$ 状態) に偏極させ、そこに1光子レベルの弱い近共鳴光 (書き込み光) を入射することで、自発ラマン散乱により、光子検出器で観測する特定の方向に1光子 (伝令光子) が散乱される事象が確率的に発生する。ここで原子集団には、集団励起スピン状態の回折格子が出来た状態となっている。即ち、エネルギー保存の観点からは、1つの原子のスピン状態が第2のスピン状態 ( $|b\rangle$ 状態) に遷移しているが、N個の原子集団中のどの原子が励起されたかは特定されない為、N個の異なる状態の重ね合わせとなっている。また、運動量保存の観点からは、特定の方向に光子を散乱した情報が、 $|b\rangle$ 状態に遷移した1つの原子の運動量変化として記録されているが、これも励起された原子の不特定性から、N個の異なる状態の重ね合わせとなっている。特に原子集団が空間的な広がりを持つこと、並びに、運動量変化がベクトル的事象であることから、原子集団にスピン励起の空間的な回折格子が形成されたと考えられる。これが冷却原子集団に光子状態を記録した量子メモリの状態である。

この量子メモリへの光子状態記録の成功確率は、光子と原子との衝突断面積に左右されるが、原子間衝突が無視出来る希薄で低温の原子集団では、一般的に成功確率は小さい。しかしながら、伝令光子により成功が担保される為、事後選択 (ポストセクション) により観測が可能である。

上記により記録した光子状態は、 $|b\rangle$ 状態を励起する共鳴光 (読み出し光) を原子集団に照射することで、 $|b\rangle$ 状態から励起された原子が $|a\rangle$ 状態に緩和する過程で散乱する光子 (再生光子) として読み出される。ここで読み出し光を書き込み光と対向する向きに入射する事で、原子集団に記録された集団励起スピン状態の回折格子により、再生光子は伝令光子と対向する方向に、理論的に100%の確率で散乱される。

②量子メモリを用いた量子通信実験

上記の量子メモリへの記録を、冷却原子集団を用いて実施した。冷却原子集団は磁気光学トラップ (MOT) により捕捉して偏光勾配冷却の後に、磁場・冷却光を共に遮断して自由空間中に解放した状態を用いている。伝令光子と再生光子の非古典性、並びに、両光子間の量子相関は、伝令光子・再生光子の自己相関、ならびに、相互相関を計測することで確認した。

更に、長距離伝送を行った場合については、伝令光子を固体の波長変換器 (PPLN 導波路) を用いて、光ファイバーでの損失が小さい通信波長帯に量子波長変換し、光ファイバーで伝送後にも非古典性を維持していることを、上記と同様の自己相関・相互相関を計測する

ことで確認した。

以上のように汎用性の高い固体の波長変換器を用いて量子相関を確認したことは前例に無く、本研究成果は学術誌 OPTICA に論文が掲載された。

本研究成果は、量子エンタングルメントを遠隔地間で共有する為に不可欠な技術であり、より長距離間での実現を目指した JST CREST プロジェクト「グローバル量子ネットワーク」として、更なる研究の発展が進捗中である。

## (2) 誘導ラマン散乱を用いた研究

### ①中性原子の量子ビット

自発ラマン散乱における伝令光子と同じ波長で、書き込み光（ここでは、ポンプ光）との位相差が固定された光（ストークス光）をポンプ光と同時に入射することで、2光子誘導ラマン散乱による  $|a\rangle-|b\rangle$  状態間のコヒーレントなラビ振動を誘起することが出来る。

このラビ振動は1個の原子に対しても観測が可能である。即ち、1回の測定では原子の状態が  $|a\rangle$  状態、もしくは、 $|b\rangle$  状態のいずれかという確率的な結果しか得られないが、ポンプ光+ストークス光の照射時間を変数として、単一原子に対する同条件の観測を多数回繰り返し行うことで、原子スピンの状態遷移率の振動としてラビ振動を観測することが出来る。これを利用することで  $|a\rangle$  と  $|b\rangle$  とを2状態とする量子ビットを構成することが出来る。

### ②冷却原子集団による量子ビット

上記の1つの原子に対する多数回の繰り返し計測は、全く同等の状態にあるN個の原子集団を用意することが出来れば、1回の測定で同様の遷移率を各スピン状態の占有率として計測出来ることとなる。ただし、全く同等の状態にあるN個の原子集団を準備するには、十分な注意を要する。特に重力場中で自由落下の影響が無視できない時間スケールの測定を行うには、原子集団をポテンシャルによって空間的に保持することが不可欠と成る。しかしながら、ポテンシャルが存在することに寄る不均一性が、空間的に広がって存在する個々の原子の同等性に影響を与えることが問題となる。更に原子の運動が激しい場合、即ち、原子集団の温度が高い場合には、空間的な不均一性の影響がより顕著となり、原子集団としてのコヒーレンスが損なわれる結果と成る。

以上を考慮して、本研究では  $|a\rangle$  状態と  $|b\rangle$  状態との間の磁場に寄るエネルギーシフト（ゼーマンシフト）が2次のオーダーまで一致する磁場（マジック磁場）に調整した磁場ポテンシャルによって捕捉した極低温のボース凝縮体を用いて実験を行った。ボース凝縮体は、全ての原子が運動量空間の最低エネルギー状態に初期化され 100 nK 程度にまで冷却されている為、同等の状態にあるN個の

原子集団として理想的と考えられる。また、デコヒーレンスの原因となる原子間衝突を抑える為に、原子集団の密度は  $1 \times 10^{13}$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) 以下に制限して測定を行った。

### ③ $D_1$ 線によるラビ振動

ルビジウム原子を用いる場合、 $\Lambda$  型3準位の励起状態には幾つかの選択肢が考えられるが、本研究ではポンプ光+ストークス光の組として、795 nm の2本の  $D_1$  線の組、および、マイクロ波とラジオ波の組の2種類を用いて研究を行った。マイクロ波とラジオ波の組を用いるラビ振動は、既に先行研究によりコヒーレントな振動が確認されているが、 $D_1$  線の組によるコヒーレントな振動は本研究の報告が世界初と考えられる。

$D_1$  線の周波数はマイクロ波よりも5桁程度高周波であり、高い空間分解能が期待出来る利点がある。また、誘導ラマン散乱の中間状態である励起状態からの自然放出率が高いこと、並びに、光子の反跳による運動量変化が大きいことが特徴である。従って、励起状態からの自然放出によるデコヒーレンスの影響を回避する為に、実励起を極力避ける必要がある。即ち、ポンプ光、および、ストークス光の周波数は、励起状態からの離調を大きくすることが有利と考えられる。しかしながら、離調の増大はラビ周波数の低下に繋がる為、最適な離調の選択には、ラビ振動の振幅が  $1/e$  にまで減衰する時間に観測されるラビ振動の振動回数（有効遷移回数）により評価することとした。その結果、ポンプ光、ストークス光の周波数を、2つの励起状態 ( $F=1$ 、 $F=2$ ) の中間となる約 400 MHz（自然幅の約 70 倍）の離調に設定することで、最も高い有効遷移回数を得られることを明らかにした。この結果を考察すると、離調が2つの励起状態の間の場合、 $F=1$  への励起と  $F=2$  への励起に関するエネルギーシフト（光シュタルクシフト）量が相殺する為、ラビ振動の光強度依存性が抑えられ、ポンプ光、ストークス光の不均一なビームプロファイルの影響が低減されることが、有効遷移回数を向上させる要因の一つとなっていると考えられる。

### ④量子メモリとしてのラムゼイ干渉法

$|a\rangle-|b\rangle$  状態間でのコヒーレントなラビ振動が観測出来ることから、 $\pi/2$  パルスに相当するポンプ光+ストークス光のパルスのある時間間隔で2回照射することにより、ラムゼイ干渉を観測することが出来る。このラムゼイ干渉を応用することで、冷却原子集団に  $|a\rangle$ 、 $|b\rangle$  状態の任意の重ね合わせ状態を記録することが考えられる。具体的には、 $|a\rangle$ 、 $|b\rangle$  状態の所望の重ね合わせ状態に適するパルス面積をラムゼイ干渉計の第1パルスに用い、読み出しには同じパルス面積を持つ第2パルスを、干渉計の位相が  $\pi$  の奇数倍だけ時間発展したタイミングで照射する。その後

$|a\rangle$ 状態の占有率が100%と確認されれば、所望の重ね合わせ状態が記録されていた事になる。このようにラムゼイ干渉法を応用することで、量子重ね合わせ状態を記録する量子メモリとして冷却原子集団を用いることが出来る。

ラムゼイ干渉計の特徴として、2つのパルスは同位相であることが条件であり、正しい量子状態の読み出しには、第1パルスに関する照射時間・周波数・位相の情報が不可欠である。以上を考慮すると、ラムゼイ干渉型の量子メモリは、第1パルスに関する情報を鍵とする「シングル鍵量子メモリ」と考えることが出来る。

### ⑤ダブル鍵量子メモリのスキーム

上記のラムゼイ干渉型量子メモリ (WRI: write-read-interferometer) で2つのパルスを照射する間に、更に別の $\pi/2$ パルスを照射することを考える。この追加した $\pi/2$ パルスの位相が、WRIのパルスと同じであれば通常の $\pi/2$ パルスによるゲート演算として考えられるが、互いにランダムな位相を持つ場合、ラムゼイ干渉計の量子位相が $\pi$ の幅で攪乱される為、正確な量子状態の読み出しが困難となる。即ち干渉計の量子位相にスクランブルがかかった状態となる。

上記の量子位相のスクランブル状態は、追加した $\pi/2$ パルスと同位相の $\pi/2$ パルスを適切なタイミングで照射する事でスクランブルを解消し、元の量子位相を回復させることが出来る。具体的には、追加した2つのパルスが第2のラムゼイ干渉計 (SRI: scramble-retrieve interferometer) を構成し、パルス照射の時間間隔が、ちょうど $\pi$ の奇数倍だけ位相発展するようにすればよい。この場合 SRI のパルスの照射時間・周波数・位相の情報は WRI で書き込んだ量子状態を読み出す為に必要不可欠な第2の鍵と考えられる為、2つのラムゼイ干渉計を重ねた量子メモリは「ダブル鍵量子メモリ」として秘匿安全性が向上することとなる。

### ⑥秘匿安全性を向上した量子メモリ実験

③に記した  $D_1$  線の組によるラビ振動とマイクロ波+ラジオ波の組によるラビ振動は、同じ $|a\rangle-|b\rangle$ 状態間のラビ振動であり、1つの原子集団に対してラムゼイ干渉計を構成することが出来る。ただし本研究では、複雑な動作を避ける為、 $D_1$ 線とマイクロ波・ラジオ波との同時照射は扱わないこととし、照射するパルスの面積は全て $\pi/2$ パルスとする。

$D_1$ 線とマイクロ波・ラジオ波との位相関係に着目すると、マイクロ波・ラジオ波は共に1つのRb基準振動に固定され、1Hzの精度で位相が固定されている。一方  $D_1$ 線は、ULE共振器に周波数が固定されているものの、周波数線幅は1kHz程度であり、レーザー発振の自然放出に起因する位相の不確定性を持つ。従って、各測定 of の繰り返し時間が40秒

程度であることを考慮すると、 $D_1$ 線とマイクロ波・ラジオ波との位相は、互いに全くランダムな位相と考えることが出来る。このことは、第1パルスにはマイクロ波・ラジオ波の $\pi/2$ パルスを用い、第2パルスには $D_1$ 線の $\pi/2$ パルスを用いたラムゼイ干渉計を構成した場合に、全くランダムな状態遷移率が実測されることにより確認した(図2)。

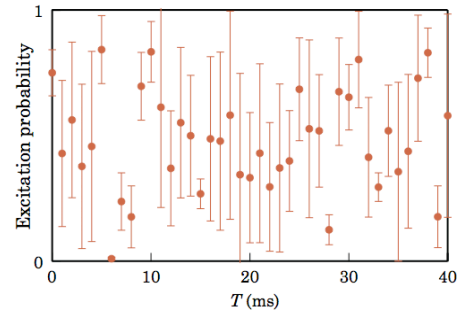


図2 マイクロ波・ラジオ波と $D_1$ 線によるラムゼイ干渉

⑤で記したスキームを実証する為に  $D_1$ 線によるラムゼイ干渉計でWRIを構成し、マイクロ波+ラジオ波によるラムゼイ干渉計でSRIを構成し実験を行った。その結果、量子位相のスクランブル(図3a)とその回復(図3b)を確認することに成功した。

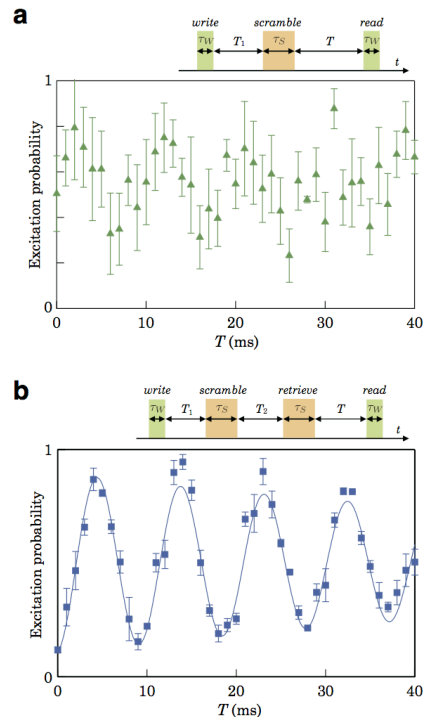


図3 秘匿安全性が向上した量子メモリの実験結果

- a. 量子位相をスクランブルした状態。
- b. 量子位相をスクランブルした後に回復させた状態。

上記の成果は特許出願を行うと共に学術誌 Scientific Reports への論文掲載が受諾されている。

本研究は冷却原子系に限らず様々な物理

系にも適用可能と考えられる汎用性のある量子メモリの暗号化を提案し、その有効性を現状で可能な技術によって実証したことに意義がある。ダブル鍵量子メモリは、他者間での秘密共有を可能にする技術であり、量子技術の安全性向上への新たな発展に繋がることが期待される。また、本研究はレーザー波長からマイクロ波・ラジオ波までの電磁場が同一の量子ビットの状態をコヒーレントに制御出来ることを実証した最初の報告と考えられ、超伝導量子ビットを駆動するマイクロ波と通信に用いる光子とを結ぶ量子デバイス実現への可能性を拓いたことにも意義があり、将来の発展が期待できる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Tetsuya Mukai, “Security enhanced memory for quantum state”, accepted for publication in *Scientific Reports*, 査読有り
- ② Andreas M. D. Thomasen, Tetsuya Mukai, and Tim Byrnes, “Ultrafast coherent control of spinor Bose-Einstein condensates using stimulated Raman adiabatic passage”, *Physical Review A* 94, 053636, 2016, DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.94.053636>, 査読有り
- ③ Rikizo Ikuta, Toshiki Kobayashi, Kenichiro Matsuki, Shigehito Miki, Taro Yamashita, Hiroataka Terai, Takashi Yamamoto, Masato Koashi, Tetsuya Mukai, and Nobuyuki Imoto, “Heralded single excitation of atomic ensemble via solid-state-based telecom photon detection”, *Optica*, vol.3, no.11, 1279-1284, 2016, DOI:<https://doi.org/10.1364/OPTICA.3.001279>, 査読有り
- ④ Tim Byrnes, Daniel Rosseau, Megha Khosla, Alexey Pyrkov, Andreas Thomasen, Tetsuya Mukai, Shinsuke Koyama, Ahmed Abdelrahman, Ebubekukwu Ilo-Okeke, “Macroscopic quantum information processing using spin coherent states”, *Optics Communications*, vol.337, 102-109, 2015, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.08.017>, 査読有り
- ⑤ Tetsuya Mukai and Hiromitsu Imai, “A Bose-Einstein Condensate Achieved on a Persistent-supercurrent Atom Chip”, *NTT Technical Journal*, vol. 12, No. 9, 2014, <https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201409fa6.html>, 査読無し
- ⑥ 向井哲哉, 今井弘光, “永久電流アトムチップによるボース・アインシュタイン凝縮”, *NTT 技術ジャーナル*(6月号) vol.26, No.6, 29, 2014, <http://www.ntt.co.jp/journal/1406/files/jn201406029.pdf>, 査読無し

[学会発表] (計9件)

- ① 向井哲哉, “冷却原子集団に記録した量子位相の制御”, 日本物理学会 第72回年次大会, 2017年3月19日, 大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市)
- ② Rikizo Ikuta, “Wavelength conversion of non-classical light from rubidium atoms to the telecom band”, *International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing (QCMC)*, 4-8 July 2016, Singapore
- ③ Toshiki Kobayashi, “Wavelength conversion of non-classical light from rubidium atoms to the telecom band”, 第34回量子情報技術研究会 (QIT 34), 2016年5月30-31日, 高知工科大学永国寺キャンパス (高知県高知市)
- ④ 小林俊輝, “冷却 Rb 原子集団を用いた通信波長光子のアンチバンチングの観測”, 第63回応用物理学会春季学術講演会, 2016年3月19-22日, 東京工業大学大岡山キャンパス (東京都目黒区)
- ⑤ 向井哲哉, “オンチップ BEC の 2 光子誘導ラマン遷移によるラビ振動”, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月19日, 東北学院大学泉キャンパス (宮城県仙台市)
- ⑥ Tetsuya Mukai, “Coherent optical control of a Bose-Einstein condensate on a persistent-supercurrent atom chip”, *ERATO International Workshop: Challenges in Precision Science*, 25-27 January 2016, The University of Tokyo, (東京都文京区)
- ⑦ 松木賢一郎, “冷却 Rb 原子集団からの非古典光の通信波長帯への波長変換実験”, 日本物理学会 2015年秋季大会, 2015年9月16-19日, 関西大学千里山キャンパス (大阪府吹田市)

- ⑧ 今井弘光, “擬1次元ボースガスの観測に向けた超伝導永久電流アトムチップ”, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月22日, 早稲田大学早稲田キャンパス (東京都新宿区)
- ⑨ **Tetsuya Mukai**, “Towards atom-photon coupling with a photonic crystal cavity”, Satellite workshop at Osaka University of AQIS 2014, Physics of Quantum Information Processing, 25-26 August 2014, 大阪大学豊中キャンパス (大阪府豊中市)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 量子メモリ装置  
発明者: 向井哲哉、稲葉謙介  
権利者: 日本電信電話株式会社  
種類: 特許願  
番号: 2017-028017  
出願年月日: 平成29年2月17日  
国内外の別: 国内

[その他]

報道発表  
日刊工業新聞 (平成28年11月5日) 21面掲載「量子メモリ: 光通信で書き込み読み出し」

ホームページ等

<http://www.brl.ntt.co.jp/people/tetsuya/exp/index-j.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

向井 哲哉 (Mukai Tetsuya)  
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員  
研究者番号: 70393775

### (2) 研究分担者

山本 俊 (Yamamoto Takashi)  
大阪大学・基礎工学研究科・准教授  
研究者番号: 10403130

生田 力三 (Ikuta Rikizou)  
大阪大学・基礎工学研究科・助教  
研究者番号: 90626475

稲葉 謙介 (Inaba Kensuke)  
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員  
研究者番号: 10564990

BYRNES TIMOTHY (BYRNES TIMOTHY)

国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・助教

研究者番号: 50597698

(平成26年12月末まで: 科研費受給資格の無い海外の大学へ異動の為)

今井 弘光 (Imai Hiromitsu)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・研究員

研究者番号: 00649551

(平成27年3月末まで: 社内他担当へ異動の為)