

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：38005

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K05316

研究課題名（和文）光ナノファイバデータバスを用いたリドベルグ原子の量子ネットワーク

研究課題名（英文）Towards a quantum network using Rydberg atoms next to an optical nanofiber

研究代表者

NICCHORMAIC SILE (Nic Chormaic, Sile)

沖縄科学技術大学院大学・量子技術のための光・物質相互作用ユニット・教授

研究者番号：10715288

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：この研究は光ナノファイバーの近接場にリドベリ原子を生成できることを示しています。D 状態に対して $n=68$ という高い励起を達成しました。リドベリ状態への励起パルスの前に基底状態の原子の位置を制御することにより、これをさらに高い状態に拡張することができます。これにより、特に導波路量子電気力学の分野で多くの新しい研究手段が開かれ、量子光学の進歩やリドベリ原子 - 導波路量子ネットワークの開発に貢献することが期待されます。私たちの研究は国際社会で認められ、他のいくつかの研究室がリドベリ原子と光ナノファイバーの実験的取り組みを始めるきっかけとなりました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

In quantum technologies, atoms are ideal for storing quantum information, acting as quantum nodes and photons transfer this information, creating a quantum “bus” for data. A loss of photons can occur during the transfer. This can be surmounted by using optical nanofibres in the atom system.

研究成果の概要（英文）：The research has shown it is possible to create Rydberg atoms next to an optical nanofiber. We have achieved excitation as high as $n=68$ for D states. We can extend this to higher states by controlling the position of the ground state atoms prior to the excitation pulse to the Rydberg state. This opens up many new avenues of research, particularly in the area of waveguide quantum electrodynamics, contributing to advances in quantum optics and possibly the development of Rydberg atom-waveguide quantum networks. Our work has successfully been recognized by the international community and has led several other laboratories worldwide to commence experimental endeavors on Rydberg atoms and optical nanofibres. We have published several peer-reviewed articles related to the experimental and theoretical outcomes and have given a number of invited talks at conferences in many countries including the USA, Spain, Germany, United Kingdom, and Japan on the outcomes.

研究分野：Physics

キーワード：Rydberg optical nanofiber quantum network Casimir-Polder dielectric cold atoms ionization

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

In quantum information science, atoms are considered as ideal components for the storage of quantum information, i.e. atoms act as quantum nodes, whereas photons are used to transfer this information between atoms, thereby creating a quantum “bus” for data. One of the impediments for this is the loss of photons that can occur during this transfer process and the use of optical fibres as mediators for the photon information is critical over long distances. However, usually a method of coupling light from the atom to the fibre relies on optical coupling techniques. This can be surmounted by the use of optical nanofibres that can be embedded into a cloud of cold atoms with minimal disturbance of the atoms. In recent years, research attention has turned towards the use of Rydberg atoms as an alternative to ground state cold atoms for atom-based quantum networks. They have the distinct advantage that a single excitation to the Rydberg state within the atomic ensemble is shared amongst all the atoms present, creating a so-called two-level super atom. This is a direct consequence of the Rydberg blockade phenomenon. Prior to this work, no attempt had been made to create or probe Rydberg systems using light transmitted entirely via an optical nanofibre, despite the fact that such a system would make the realization of several theoretically proposed schemes far more realistic. Crucially, this can reduce the requirements for achieving Rydberg blockade to lower excited atom states, thereby reducing the risk of unintentional ionisation of the atom and loss of the super atom for quantum gate operations.

2. 研究の目的

With the rapid advances in atom trapping, cooling and manipulation in the last decades, neutral atoms are viewed as one of the more promising platforms for implementations of quantum computing and quantum information transfer. Rydberg atoms, i.e. highly excited neutral atoms, offer additional benefits over “ground state” neutral atoms due to the phenomenon known as “Rydberg blockade”, whereby a *super atom* - consisting of a single Rydberg atom within an ensemble of ground state atoms - is created. This super atom results in millions of atoms behaving like a single two-level system that is ideal for quantum logic operations. We propose to develop an all-fibred cold Rydberg system for studying implementation of a quantum logic gate. The very first stages of the project addressed the feasibility of Rydberg atom creation via the evanescent fields of an optical nanofibre and the impact the nearby dielectric medium may have over the blockade phenomenon. The advantage of such a system over conventional cold Rydberg systems lies in the control that we can have over the photon coupling between a Rydberg atom and the modes of the optical fibre by varying the atom-surface distance using different excitation levels.

3. 研究の方法

As a first step we installed an optical nanofibre into the magneto-optical setup for ^{87}Rb atoms. The fibre was designed to allow propagation of all wavelengths of interest (760 nm for the blue trap 1064 nm for the red trap, 480 nm and 780 nm for the Rydberg two-photon excitation, see Fig. 1) at least in the fundamental mode. Once the fibre was installed, creation of a cold atom ensemble of atoms around the nanofibre and transfer of the cloud to the two-color dipole trap was achieved and optimized using a machine-learning algorithm known as SANN developed in ANU, Australia.

While the Rydberg atoms cannot be trapped in this dipole trap, we created them directly from the MOT atoms. Both excitation and detection of the Rydberg atoms was via the EIT technique.

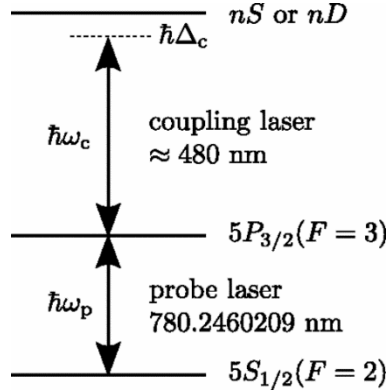


Fig. 1: Energy level scheme used for excitation of ^{87}Rb atoms to Rydberg states. The 780 nm laser is used to cool the atoms and simultaneously provided the first step in the two-photon excitation process. The 480 nm laser is tuned to excite specific Rydberg levels from $n = 24$ to 70.

We next investigated the creation of different Rydberg states (by varying the n value on tuning the 480 nm laser) close to the optical nanofibre and (ii) the lifetime of the excited states. These were two crucial questions to address to contribute to the realisation of an all-fibred Rydberg quantum network. Initial creation of Rydberg states was limited to certain distances from the nanofibre due to localized ionization that rendered the fibre inoperable.

We also explored the different phenomena depending on whether we used an nS or nD excitation. The nS levels should be less sensitive to electric fields but we discovered that the symmetry of the electron probability distribution limited the accessibility of high n states for S levels. The orientation of the D states allowed us to go as high as $n=68$ without controlling the distance from the fibre. This is a critical result in the field.

Theoretically, with Dr Etienne Brion, we explored the impact of two Rydberg atoms next to an optical nanofibre and any interactions or enhancements to emissions that occur due to the presence of the dielectric material.

4. 研究成果

The research outcome has been primarily that it is indeed possible to create Rydberg atoms next to an optical nanofibre despite expectations from the community that this would be impossible due to the presence of the dielectric and ionization issues. We have achieved excitation as high as $n = 48$ for S states and $n = 68$ for D states. We can extend this to even higher states by controlling the position of the ground state atoms prior to the excitation pulse to the Rydberg state. This opens up many new avenues of research, particularly in the area of waveguide quantum electrodynamics, whereby the waveguide is used to enhance the emission from the atoms thereby contributing to advances in quantum optics and possibly the development of Rydberg atom – waveguide quantum networks for the transfer of secure communication protocols. Our work has successfully been recognized by the international community and has led several other laboratories worldwide to commence experimental endeavors on Rydberg atoms and optical nanofibres. We have published several peer-reviewed articles related to the experimental and theoretical outcomes and have given a number of invited talks at conferences in many countries including the USA, Spain, Germany, United Kingdom, and Japan on the outcomes.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件/うち国際共著 15件/うちオープンアクセス 15件）

1. 著者名 F Le Kien, S Nic Chormaic, T Busch	4. 巻 103
2. 論文標題 Optical trap for an atom around the midpoint between two coupled identical parallel optical nanofibers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 63106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.103.063106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 KS Rajasree, K Karlsson, T Ray, S Nic Chormaic	4. 巻 33
2. 論文標題 1.6 GHz Frequency Scanning of a 482 nm Laser Stabilized Using Electromagnetically Induced Transparency	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Technology Letters	6. 最初と最後の頁 780-783
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LPT.2021.3092316	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Tridib Ray, Ratnesh K Gupta, Vandna Gokhroo, Jesse L Everett, Thomas Nieddu, Krishnapriya S Rajasree, Sile Nic Chormaic	4. 巻 22
2. 論文標題 Observation of the 87Rb 5S1/2 to 4D3/2 electric quadrupole transition at 516.6 nm mediated via an optical nanofibre	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 62001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.033341	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 KS Rajasree, RK Gupta, V Gokhroo, F Le Kien, T Nieddu, T Ray, S Nic Chormaic, G Tkachenko	4. 巻 2
2. 論文標題 Spin selection in single-frequency two-photon excitation of alkali-metal atoms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 33341
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.2.033341	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 E Stourm, M Lepers, J Robert, S Nic Chormaic, K Moelmer, E Brion	4. 巻 101
2. 論文標題 Spontaneous emission and energy shifts of a Rydberg rubidium atom close to an optical nanofiber	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 52508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.101.052508	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K. S. Rajasree, T. Ray, K. Karlsson, J. L. Everett, S. Nic Chormaic	4. 巻 2
2. 論文標題 Generation of cold Rydberg atoms at submicron distances from an optical nanofiber	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 012038(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.012038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Ray, R. K. Gupta, V. Gokhroo, J. L. Everett, T. Nieddu, K. S. Rajasree, S. Nic Chormaic	4. 巻 22
2. 論文標題 Observation of the 87Rb 5S1/2 to 4D3/2 electric quadrupole transition at 516.6 nm mediated via an optical nanofibre	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 62001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/ab8265	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 E. Stourm, M. Lepers, J. Robert, S. Nic Chormaic, K. Moelmer, E Brion	4. 巻 101
2. 論文標題 Spontaneous emission and energy shifts of a Rydberg rubidium atom close to an optical nanofiber	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 52508
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.101.052508	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 E Stourm, M Lepers, J Robert, S Nic Chormaic, K Molmer and E Brion	4. 巻 25
2. 論文標題 Interaction of two Rydberg atoms in the vicinity of an optical nanofibre	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 23022
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/acb83f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Fam Le Kien, Sile Nic Chormaic, Thomas Busch	4. 巻 107
2. 論文標題 Direction-dependent coupling between a nanofiber-guided light field and a two-level atom with an electric quadrupole transition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 13713
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.107.013713	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Fam Le Kien, Sile Nic Chormaic, Thomas Busch	4. 巻 106
2. 論文標題 Transfer of angular momentum of guided light to an atom with an electric quadrupole transition near an optical nanofiber	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 13712
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.106.013712	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Fam Le Kien, Sile Nic Chormaic, Thomas Busch	4. 巻 105
2. 論文標題 Optical force between two coupled identical parallel optical nanofibers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 63517
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.105.063517	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Vandna Gokhroo, Fam Le Kien, Sile Nic Chormaic	4. 巻 55
2. 論文標題 Rubidium atom spectral lineshapes in high intensity light fields near an optical nanofibre	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 125301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6455/ac6bd4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ratnesh K. Gupta, Jesse L. Everett, Aaron D. Tranter, Rene Henke, Vandna Gokhroo, Ping Koy Lam, Sile Nic Chormaic	4. 巻 4
2. 論文標題 Machine learner optimization of optical nanofiber-based dipole traps	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AVS Quantum Science	6. 最初と最後の頁 26801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1116/5.0086507	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Fam Le Kien, D. F. Kornovan, Sile Nic Chormaic, and Thomas Busch	4. 巻 105
2. 論文標題 Repulsive Casimir-Polder potentials of low-lying excited states of a multilevel alkali-metal atom near an optical nanofiber	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 42817
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.105.042817	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計25件 (うち招待講演 20件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 S. Nic Chormaic
2. 発表標題 Nanostructured optical nanofibres for quantum optics
3. 学会等名 METANANO 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 E Stourm, M Lepers, J Robert, S Nic Chormaic, K Moelmer and E Brion
2 . 発表標題 Spontaneous emission rates and energy shifts of a Rydberg rubidium atom close to an optical nanofiber
3 . 学会等名 OSA Quantum 2.0 Online Conference (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. Nic Chormaic
2 . 発表標題 Ultrathin optical fibre applications from atomic physics to quantum optics
3 . 学会等名 SPIE Visiting Lecturer, IIST Trivandrum, India (招待講演)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 R Kumar Gupta, K Subramonian Rajasree, J Everett, V Gokhroo, K Karlsson, G Tkachenko, F Le Kien and S Nic Chormaic
2 . 発表標題 Multiphoton processes in cold rubidium atoms using optical nanofibers
3 . 学会等名 OSJ-OSA-OSK Joint Symposia on Optics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. Nic Chormaic
2 . 発表標題 Ultrathin optical fibre applications from atomic physics to quantum optics
3 . 学会等名 SPIE Visiting Lecturer, IIT Guwahati, India (招待講演)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Nic Chormaic
2. 発表標題 Probing and manipulating cold atoms using evanescent fields of optical nanofibres
3. 学会等名 Tohoku Quantum Alliance x OIST Virtual Quantum Meeting (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 Ultrathin optical fiber applications from atomic physics through quantum optics
3. 学会等名 Quantum Sensors of Magnetic and Inertial Forces, OIST Mini-Symposium (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R Kumar Gupta, J Everett, V Gokhroo and S Nic Chormaic
2. 発表標題 Machine optimization of evanescent field trap for Rb atoms
3. 学会等名 NCTS Annual Meeting on Quantum Science and Technology, National Tsing Hua University, Taiwan (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 V Gokhroo, R Kumar Gupta, J Everett, K Subramonian Rajasree and S Nic Chormaic
2. 発表標題 Electric quadrupole excitation in laser-cooled 87Rb atoms near an optical nanofibre
3. 学会等名 NCTS Annual Meeting on Quantum Science and Technology, National Tsing Hua University, Taiwan (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 Optical nanofibre mediated evanescent field interactions with cold rubidium atoms
3. 学会等名 NCTS Annual Meeting on Quantum Science and Technology, National Tsing Hua University, Taiwan (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Nic Chormaic
2. 発表標題 Optical nanofibre mediated multiphoton processes in cold neutral and Rydberg atoms
3. 学会等名 Seminar University of Mainz, Germany (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Nic Chormaic
2. 発表標題 Optical nanofibre mediated multiphoton processes in cold neutral and Rydberg atoms
3. 学会等名 Seminar, University of Stuttgart, Germany (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. S. Rajasree, T. Ray, K. Karlsson, S. Nic Chormaic
2. 発表標題 Formation of Rydberg atoms near an optical nanofiber (poster)
3. 学会等名 Frontiers in Optics, USA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. S. Rajasree, T. Ray, K. Karlsson, J. Everett, S. Nic Chormaic
2 . 発表標題 Generation of cold Rydberg atoms at submicron distances from an optical nanofiber (poster)
3 . 学会等名 ICOLS 2019, New Zealand
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S Nic Chormaic, A Vylegzhanin, Z Shahrabifarahani, A Raj, A Zaitsev, S Abdrakhmanov, W Li, J L Everett, D Brown
2 . 発表標題 Probing cold atom interactions via optical nanofibers
3 . 学会等名 SPIE Photonics West, San Francisco, USA (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S Nic Chormaic
2 . 発表標題 Evanescent field trapping and manipulation from cold atoms to microparticles
3 . 学会等名 Seminar, University of Vienna, Austria (招待講演)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S Nic Chormaic
2 . 発表標題 Trapping particles using near-field optics
3 . 学会等名 Seminar, ISI Brno, Czech Republic (招待講演)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 From cold atoms to microbeads - manipulation using optical nanofibres
3. 学会等名 Seminar, 5th Institute of Physics, Stuttgart University, Germany (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 From cold atoms to microbead manipulation using ultrathin optical fibres
3. 学会等名 Seminar, IEEE-Optica IIT Bombay Photonics Student Chapters (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 Using optical nanofibres to mediate cold atom interactions
3. 学会等名 Workshop "Delving into light-matter interactions and their applications" (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 From cold atoms to microbeads - manipulation using ultrathin optical fibre
3. 学会等名 Seminar, Maynooth University, Ireland
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 Manipulating and trapping particles from atoms to Janus spheres using optical nanofibres
3. 学会等名 Photon UK, Nottingham, England (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 Using optical nanofibres to mediate cold atom interactions
3. 学会等名 EOSAM 2022, Porto, Portugal (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S Nic Chormaic
2. 発表標題 Optical nanofibre dipole traps and Rydberg atom interactions
3. 学会等名 APPC 2022 (online), Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S Nic Chormaic, A Vylegzhanin, Z Shahrabifarahani, A Raj, RK Gupta, D Brown, JL Everett
2. 発表標題 Hybrid quantum systems using optical nanofibres integrated with cold rubidium atoms
3. 学会等名 CLEO Pacific Rim 2022, Sapporo, Japan (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	ブリオン エティエンヌ (Brion Etienne)	トゥールーズ・Physics・Professor	Theoretical support

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------