

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：82401

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21102002

研究課題名(和文)超伝導量子サイバネティクスの研究

研究課題名(英文)Study of superconducting quantum cybernetics

研究代表者

蔡 兆申(Tsai, Jaw-Shen)

独立行政法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・チームリーダー

研究者番号：30469910

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 251,700,000円、(間接経費) 75,510,000円

研究成果の概要(和文)：「混合量子系」に関して：超伝導人工原子量子光学では固体素子での共鳴蛍光などの多数の重要な成果をあげ、人工原子と微視的量子系のハイブリッドでも、領域融合共同研究の結果、大きな成果を達成。「超伝導量子ビット制御・観測・結合・雑音」分野では、量子状態の量子非破壊達事象読み出しの達成や、高精度な状態制御、新規結合方式創出などの成功をおさめた。また「新たな発見」として、超伝導細線を使った量子磁束滑りデバイスを初めて実現した。

研究成果の概要(英文)：Concerning the "Hybrid Quantum Systems": many important results such as resonant fluorescence with solid state quantum system were obtained with superconducting artificial atom based quantum optics; concerning the hybrid of superconducting artificial atoms and microscopic quantum systems, important results were obtained under the interdisciplinary collaborations within the project. In the direction of "Superconducting qubit state control, observation, coupling and noise", significant results such as quantum non-demolition state single-shot observation, high precision state control, and creation of novel qubit coupling schemes were achieved. For the "Novel Discoveries", notable discovery of the coherent quantum phase slip in the superconducting thin wire are accomplished.

研究分野：複合新領域、数物系科学

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、マイクロ・ナノデバイス、物理学、物性I

キーワード：超伝導 ジョセフソン効果 量子ビット 量子光学 ハイブリッド量子系 蛍光散乱 レーザー発振 コヒーレント量子位相スリップ

## 1. 研究開始当初の背景

量子力学のコヒーレントな状態が、巨視的な物理系で発現することは、長年追及されてきた興味深い現象である。1999年、我々はこのような現象が超電導固体素子において現れることを初めて明確に示した[Nature, 398, 786, 1999]。この成果の重要性は、この技術が量子ビットとして量子情報処理への応用が可能であることもあり、瞬時に認識され、爾来、この発見を契機に、世界中で超電導コヒーレント系の研究は精力的に推進されてきた。

量子ビットとは自由に状態制御が可能な2準位系であり、この方面の研究では、我々は常に世界をリードしてきた。2003年には前記の量子ビットを二つ結合させ、巨視的系でのエンタングル状態の生成[Nature 421, 823, 2003]、初の量子固体素子論理ゲートを実現[Nature, 425, 941, 2003]、量子プロトコル実現[Science, 316, 723, 2007]などの成果を上げた。

その後、光子と超電導量子ビットを結合させ Circuit QED 技術がエール大学の研究グループ等により発表され、世界的に研究の流れをまた大きく変えることとなった。この例にみられるような、異なった種類の量子自由度の関与した物理系がコヒーレントに結合した複合量子状態の正確な制御という、全く新たな研究の可能性が示された。

このような超伝導量子回路の急速な発展は、更なる研究の機運が熟したことを示した。この将来展望を背景に、超伝導回路による「量子サイバネティクス」研究を開始し、実り多い新規な科学技術の芽生えを目指した。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、超伝導量子回路を使った、より高度で複雑な量子操作科学技術の発展を目指すものである。本計画研究では、大きく分けて2つの研究目標を立て、研究を推進した。

第一の目標は、新規な研究方向として、異種量子がハイブリッドにコヒーレント結合した混合量子系にかかわる一連の研究である。人工原子の電子状態と、共振器の光子状態がコヒーレント介在する混合量子系は、回路設計に自由度があるため、その研究はこれから大きく発展する余地が十分ある。例えば光子数の正確な操作、単光子の単事象観測などを目指す。また光子を介在した複数の量子ビットの結合の実現など新規な発展が見込まれる。光子以外にも、機械振動(フォノン)や磁性状態(マグノン)などと超伝導人工原子の結合した混合量子系の実現なども考えられる。

更に領域内での有機的共同研究として、固体素子である超伝導人工原子と、電子スピンのような微視的量子系とが結合した混合量子系実現なども目指した。

もう一つの研究目標は、複数の超伝導量子

ビットを複雑に組み合わせた、大きな自由度を持つ量子系の実現である。これはシュレディンガーの猫に相当する真の巨視的量子系であり、情報処理などへの展開も考えられている。そのような回路において、より長い量子ビットの寿命と、より正確な量子状態操作を目指す。量子非破壊読み出しや、量子エラー訂正の実行など、量子情報処理への応用も可能な量子制御・検出の研究を行う。

## 3. 研究の方法

実験は理研蔡研究室(研究代表:蔡兆申、研究開始時の連携研究者:中村泰信、山本剛、パシュキン・ユーリ、アスタフィエフ・オレグ、吉原文樹、猪股邦宏、アブドゥマリコフ・エイ)で主に行った。ここでは実験で使う微細ジョセフソン接合回路サンプルの作成から、極低温環境での実験などを担当する。最適な量子ビットの結合方式、および共振器中の超伝導量子ビット回路の理論的研究は理研ノリ研究室(研究分担者ノリ・フランコ、研究開始時の連携研究者:丸山耕司、サヘル・アシュハブ、リュウ・ユージ)が分担した。産総研日高研究室(連携研究者:日高睦夫)で実験用のニオブ系超伝導集積回路の一部作成を行った。NTT(のちNII,NICT)の仙場グループ(連携研究者:仙場浩一)では量子ビット結合実験の一部や、領域内連携の一環として、公募研究代表の水落憲和と半導体量子ドット代表の都倉康弘との共同研究を行い、ダイヤモンドNV中心と超伝導量子ビットの結合した新規な混合量子系の実現を目指した。

## 4. 研究成果

研究成果を「混合量子系」、「超伝導量子ビット制御・観測・結合・雑音」、そして新規なセレンディピティとして「新たな発見」の3点にしばり、以下にまとめた。

領域融合的研究では、特に混合量子系(1-2)で重要な成果を上げた。

数多くの成果が達成され、多くのトップ1%引用論文も派生した。(総論文数187件、トップ1%以上引用の論文15件)

### (1) 混合量子系:

異種の量子系をハイブリッドさせたこのような物理系は、寿命・均一性・制御性や設計の自由度といった、それぞれの量子系特有の利点を伸ばし欠点を補うことができる、新規な可能性をもたらすものである。

### (1-1) 超伝導人工原子量子光学の確立

これは超伝導人工原子(量子ビット)と光子を強く結合させた系であり、これまで自然原子を使った量子光学の多くの重要な効果を、ほぼすべて単一の人工原子のみを使い再現した。

人工原子として一つの磁束量子ビットを使い、これを1次元伝送線の中に配置した実

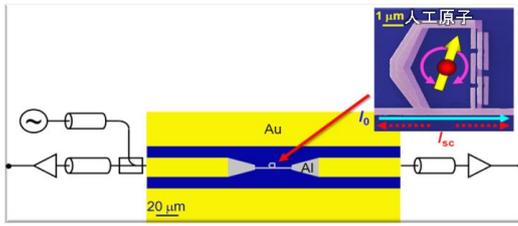


図1 1次元伝送路に結合した人工原子

験では(図1)、共鳴蛍光と呼ばれる量子光学の基本原則を観測し、共鳴条件で入射電磁波がほぼ完全に反射されること(透過電磁波の消滅)が観測された。また入射光を強くした非弾性散乱領域では Mollow トリプレットが明確に観測された[Science, 327, 840, 2010, トップ1%論文]。同様な解放量子系で、電磁誘導透明化現象[PRL 104, 193601, 2010, トップ1%論文]、量子増幅[PRL 104, 183603, 2010]、そして解放量子系の動的制御[PRL 107, 043604, 2011]などの重要な成果を次々に上げた。

単一の光子と人工原子を決定論的に相互作用させることにより、単光子検知器、炭鉱メモリや単光子トランジスタなどの新規デバイスの実現が可能になる。このような決定論的な制御を可能とする、ポンプ光で作られるインピーダンス整合したラムダ型の準位を使う方式を新規に提案した[PRL 111, 153601, 2013, New J. Phys 15, 125013 2013]。この回路を実現するため、磁束型超伝導人工原子と超伝導コプレーナ型共振器を結合させた系を使い実験を行った。系のインピーダンスはポンプ光の強度で調整できる。インピーダンス整合すると、理論予測通りの入射マイクロ波の完全な吸収と周波数の下方変換が観測された[PRL 投稿中]。また同様な実験で、人工原子の状態を観測することにより、マイクロ波単光子の検出をすることに成功した。マイクロ波領域の低エネルギー光子の単光子観測は、このような完全に量子的な系を作ることによって初めて可能になった。

我々はジョセフソンパラメトリック増幅器の研究を進めている。これは非常に優れた低ノイズ性能を有していることから、回路量子電磁力学分野への応用等に有望なデバイスである。極低温環境下において、磁束駆動型のジョセフソンパラメトリック増幅器の系統的な特性評価を行った。特に、増幅器のスケーリング特性の詳細について研究し、10dB の増幅器利得において、およそ 4.9dB の真空揺らぎのスケーリングを観測した。また、増幅器のノイズ温度が標準量子限界よりも小さくなることを観測した[New J Phys. 15, 125013, 2013]。また同様な系での光子のエンタングルメント創生に成功した[PRL 109, 250502, 2012, トップ1%論文]。

真空のゆらぎの中で仮想粒子の生成・消滅が起こる「動的カシミール効果」を、電磁共振器と超伝導磁束型人工原子を結合させた

系で観測することに初めて成功した[Nature 479, 376, 2011, トップ1%論文]。生成された仮想光子を観測可能な光の実粒子に変換することに人工原子を使った。またこれに先立つ実験の理論的提案も詳細に行ってきた[PRA 87, 043804, 2013; PRA, 82, 052509, 2010; PRA, 82, 032511, 2010]。この成果は Physics World 誌で、2011年の物理学世界5大成果の一つに選ばれた。

### (1-2) 超伝導人工原子と微視的量子系

領域内の融合的共同研究の一環として、固体素子である超伝導磁束型人工原子と、微視的なスピンのアンサンブルとがコヒーレントに結合した混合量子系の研究を進めた(図2)。これは超伝導計画研究と、半導体計画研究、そしてダイヤモンド NV 中心公募研究の三研究グループが共同で行ったものである。このような結合系の実験において、分光実験と時間領域実験において、巨視的系と微視的系の上に量子コヒーレンスが存在することの確証を得ることに成功した[Nature 478, 221, 2011, トップ1%論文]。このような成果は、新学術領域研究のような幅広い研究の枠組みで初めて可能になるものである。

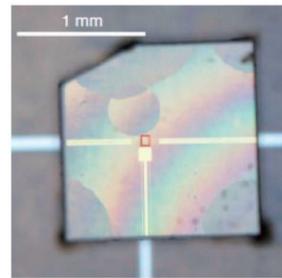


図2 超伝導人工原子とダイヤモンド薄膜

これ以外にも、同様な異分野の融合的共同研究は、NV 中心以外のスピンと超伝導人工原子の混合量子系の実現を目指し進められた。分子スピン計画研究や外部シリコングループとの連携研究が現在も進行している。

このような混合量子系に関する理論的研究も進めた。スピンのアンサンブルを電磁共振器間の結合エネルギーを高めるため、両者を磁束量子ビットを介して結合させる方式を提案した[Phys. Rev. B 87, 144516, 2013]。また磁束量子ビットの補助メモリとして NV 中心を使うことを想定した両者の混合量子系の係合の最適化条件を検討した。理論と記憶部が分離する利点が示された[Phys. Rev. A 88, 012329, 2013]。超伝導人工原子と異種の量子系の結合した混合量子系に関するレビュー論文をまとめた[Rev. Mod. Phys. 85, 623, 2013, トップ0.02%論文]。

### (1-3) 超伝導人工原子と機械振動

機械的共振器の振動モードは、超伝導人工原子を遥かに超える巨視的な量子状態である。機械振動の量子エネルギー以下に環境熱エネルギーを冷却することにより、振動のフ

オノンモードの量子化を図り、超伝導量子ビットとコヒーレントに結合させることにより、機械振動モードの制御や観測が可能になる。現在まで、機械的共振器を量子領域まで冷却することはまだ達成できていない。これは共振器の微細化により、その振動エネルギーを熱エネルギーより大きくしようとすると、それに比例して共振器の散逸が必ず顕著になるからである。今後はもういっそうの工夫が必要である。

これまでに、機械的共振器を超伝導電荷型人工原子や超伝導磁束型人工原子と結合した系を研究した。機械的振動を簡便に電荷量子ビット(単電子トランジスタとして動作)を使い読み出すことに成功した[Appl. Phys. Lett. 96, 263513, 2010]。また機械的共振器を超伝導磁束量子ビットと結合した系の作成も進めた[Appl. Phys. A, Invited Paper, DOI: 10.1007/s00339-012-6981-8, 2012]。また機械的共振器の散逸温度特性から、その微視的散逸メカニズムに関しての考察を行い、微視的な2準位系の関与を示唆した[PRB81, 184112, 2010]。

## (2) 量子ビット結合・観測・制御・雑音

超伝導人工原子を多数結合させ、より複雑な量子系を実現する研究を進めてきた。このような巨大な量子系を正確に操作することにより、新たな科学技術のパラダイムシフトが生ずると期待されている。物理的には、これはシュレディンガーの猫に相当する多くの自由度を持つ巨大な量子状態を固体素子で実現することを意味し、工学的には量子情報処理などのシステムに道を開く技術でもある。

### (2-1) 結合方式の新規開発

量子ビット(人工原子)をスケラブルに数多く結合させることは、さまざまな困難な要素を含んでいる。固体素子である超伝導量子ビットは、この点に関し、比較的有利な点が多い。

我々はZcQED(Z軸回路量子電磁力学)と名付けた回路方式を提案した。これはイオントラップ系の量子操作に発想を得たものである。この結合方式は、2次元の最近接結合を有する回路である。望ましくない隣同士の量子ビット間の余剰結合を取り除くため、それらは2つの直列した電磁共振器で接続されている。この回路には読み出し用の低雑音超伝導アンプも配置できる[PRX 投稿中]。また更にコンパクトな、非線形結合器を用いる結合方式も提案した(ZZZ方式)。

また多数の量子ビットを、単純なパルス操作で一週にエンタグルさせることができる回路方式も提案した。これは多数の量子エネルギー可変型磁束量子ビットを結合させた電磁共振器を、いくつも円形に結合させた回路である[PRB 85, 024537, 2012]。

### (2-2) 量子状態観測の高度な進展

量子状態をいかに正確に観測できるかは重要な問題である。また一回の観測で評価を行う単事象観測や、観測後の量子状態を乱さない量子非破壊観測などの高度な観測技術も重要な研究目標であった。

分散読み出しと呼ばれる、量子ビットと超伝導共振器を接合させた系の、共振周波数の変化を利用した量子ビット状態の観測方式の研究をしてきた。新規な試みとして、磁束量子ビットと共振器をキャパシタンスで結合させる回路を開発した。この回路方式により、従来のインダクタンスによる結合方式より桁違いに大きな周波数変調を達成した[PRB 86, 140508(R), 2012; New J. Phys. 16, 015017, 2014]。

我々は前述したような、極低雑音特性を持つ磁束駆動型ジョセフソンパラメトリック増幅器(JPA)の研究を進めてきた。この増幅器を使い、分散読み出し法の変調信号を増幅し、単事象かつ量子非破壊観測を達成した。またこの観測方式を使い、連続した観測下で量子ビットの量子状態の変化(量子ジャンプ)を観測した。エネルギー緩和時間を他の独立した観測方式と比較した結果、このような連続した観測は、量子状態の寿命に何ら影響を及ぼさないことが分かった[Appl. Phys. Lett. 103, 132602, 2013]。

### (2-3) 高精度な量子状態制御の達成

量子ビットの制御精度の向上を阻害する一つの根本的要因は、量子状態のデコヒーレンスである。デコヒーレンスが絶えず量子状態の保全を脅かす環境下では、量子状態操作をデコヒーレンス時間に比べはるかに高速に行うことにより、より正確な量子状態操作を達成することができる。逆に言うと、より長いデコヒーレンス時間を持つ量子ビットほど正確な量子状態操作を行うことが期待できる。

我々は磁束量子ビットの実験で、けた違いに寿命の長いデバイスを作り出すことに成功した[Nature Phys. doi: 10.1038/nphys1994, 2011 トップ1%論文]。この磁束量子ビットを、実際に高速にゲート操作してその状態操作の忠実度を評価した実験では、忠実度 99.8% を達成した[PRL 110, 040502, 2013]。このような高精度の量子状態操作は、量子情報処理を含めたさまざまな応用の場への展開が期待できる。

### (2-4) 雑音の解析と解明

デコヒーレンス時間をさらに長くすることを可能にするには、量子ビットのデコヒーレンスを限定している雑音などの要因を特定することが重要である。位相緩和を引き起こす低周波揺らぎは、電荷量子ビットでは電荷の揺らぎ、磁束量子ビットでは磁束の揺らぎが支配的であることがこれまでに知られていた。

我々は磁束ゆらぎ雑音は、局所的な電子スピンのゆらぎなどに由来することを、結合した磁束量子ビットの実験で突き止めた[PRB 81, 132502, 2010]。またこの低周波ゆらぎ雑音を、これまで以上に高精度にかつ周波数領域を広げて解析することに成功した[PRB 89, 020503(R), 2014]。この実験では 1.7 GHz 程度まで、周波数の上昇とともに雑音密度が減少することが分かり、また多くの微視的なスピンの相関して揺らいでいる可能性も示した。また同様な磁束ゆらぎスペクトラムの温度特性[PRB 85, 174521, 2012]や雑音源の解析を行った[PRA 87, 022324, 2013]。

### (3) 新たな発展：

#### コヒーレント量子位相滑りの実現

我々は長年探求されてきた「量子位相滑り」効果を、InOx 細線(図 3)を使った超伝導磁束人工原子の分光実験により、量子コヒーレンスの存在を示すことで初めて実現した[Nature, doi:10.1038/nature10930, 2012, トップ 1%論文]。これは超伝導細線を磁束がトンネルする現象で、ジョセフソン効果に対し量子力学的共役な関係にある、超伝導状態の基本的な輸送現象である。丁度ジョセフソン効果の提案の 50 年後に実現したこの成果は、この名高い効果と同じような幅広い科学技術での役割を果たすことが期待される。

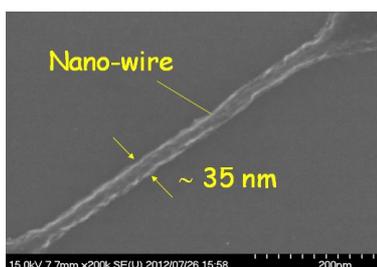


図 3 量子位相滑り細線デバイス

このトンネル効果のトンネル確立の指数関数的な細線幅依存性も検証した[Phys. Rev. B 88, 220506(R), 2013]。このデバイスでのラビ振動や直流電気特性も観測している。

### 5. 主な発表論文等

#### [雑誌論文](計 187 件)

Z.-L. Xiang, S. Ashhab, J.Q. You, F. Nori, Hybrid quantum circuits: Superconducting circuits interacting with other quantum systems, Rev. Mod. Phys., 査読有, 85, 2013, 623-653, 10.1103/RevModPhys.85.623  
 O. Astafiev, S. Kafanov, Yu.A. Pashkin, J.S. Tsai, (省略 5 名 2,5-8 番目), Coherent quantum phase slip, Nature, 査読有, 484, 2012, 355-358, 10.1038/nature10930  
 A.A. Abdumalikov, Jr., O.V. Astafiev, Yu.A. Pashkin, Y. Nakamura, J.S. Tsai,

Dynamics of Coherent and Incoherent Emission from an Artificial Atom in a 1D Space, Phys. Rev. Lett., 査読有, 107, 2011, 043604-1-4, 10.1103/PhysRevLett.107.043604  
 J. Bylander, F. Yoshihara, K. Harrabi, Y. Nakamura, J.S. Tsai, W.D. Oliver. (省略 4 名 2-3,6-7 番目), Noise spectroscopy through dynamical decoupling with a superconducting flux qubit, Nature Physics, 査読有, 7, 2011, 565-570, 10.1038/NPHYS1994  
 C.M. Wilson, F. Nori, P. Delsing, (省略 5 名 2-6 番目), Observation of the Dynamical Casimir Effect in a superconducting circuit, Nature, 査読有, 479, 2011, 376-379, 10.1038/nature10561  
 J.Q. You, F. Nori, Atomic physics and quantum optics using superconducting circuits, Nature, 査読有, 474, 2011, 589-597, 10.1038/nature10122  
 X. Zhu, Y. Tokura, N. Mizuochi, K. Semba, (省略 10 名 2-11 番目), Coherent coupling of a superconducting flux-qubit to an electron spin ensemble in diamond, Nature, 査読有, 478, 2011, 221-224, 10.1038/nature10462  
 A.A. Abdumalikov Jr., O. Astafiev, A.M. Zagoskin, Yu.A. Pashkin, Y. Nakamura, J.S. Tsai, Electromagnetically Induced Transparency on a Single Artificial Atom, Phys. Rev. Lett., 査読有, 104, 2010, 193601-1-4, 10.1103/PhysRevLett.104.193601  
 O. Astafiev, A.M. Zagoskin, A.A. Abdumalikov Jr., Yu.A. Pashkin, T. Yamamoto, K. Inomata, Y. Nakamura, J.S. Tsai, Resonance Fluorescence of a Single Artificial Atom, Science, 査読有, 327, 2010, 840-843, 10.1126/science.1181918

#### [学会発表](計 206 件)

J.S. Tsai, Progress in the superconducting quantum information processing, Quantum Science Symposium ASIA-2013, 2013/11/25, Sanjyo Conference Hall, the University of Tokyo, Tokyo, Japan  
 J.S. Tsai, Prospects of superconducting qubits for quantum computation -- the view from Japan, M2S 2012 Conference, 2012/8/3, Washington D.C., USA  
 J.S. Tsai, Quantum coherent behavior in macroscopic objects via superconducting devices, 2010/4/16, Aalto Physics Colloquium: Low

Temperature Laboratory - Aalto  
University, Helsinki, Finland

〔図書〕(計2件)

F. Nori, et al., Taylor & Francis,  
Optical Properties of Photonic  
Structures: Interplay of Order and  
Disorder, 2012, 566(55-86)

〔その他〕

報道関連情報

「超電導の新現象発見」, 2012/4/19 日  
本経済新聞, 日経産業新聞, 2012/4/24  
日刊工業新聞

「超伝導人工原子組み込み光スイッチ  
理研が開発」, 2010/5/10 NIKKEI NET  
総合, 2010/5/11 日刊工業新聞,  
2010/5/11 化学工業日報, 2010/5/11 マ  
ロジジャーナル, 2010/5/11 ELISNET

アウトリーチ活動情報

2013/9/19, 国立情報学研究所平成25  
年度市民講座「未来を紡ぐ情報学」, 蔡  
兆申, 超伝導人工原子のインパクト ~  
より日常的スケールでの量子世界の実現  
~, 国立情報学研究所

2012/10/27, 科学ライブショー「ユニバ  
ース」ノーベル賞特別番組, 蔡兆申, 「量  
子のへんてこな世界を操作する」, 科学  
技術館

2012/4/21, サイエンスレクチャー: 理研  
一般公開講演, 蔡兆申, 「量子と情報」

2011/10/25, S S H 先端科学講座, 蔡兆  
申, 「量子力学と情報処理」, 群馬県立  
高崎高校

2011/4/23, 市民講座: 理研一般公開講演  
蔡兆申, 「量子の制御とコンピュータ」,  
<http://dml.riken.jp/outreach.php>

ホームページ情報

[http://www.riken.jp/research/labs/cems/qtm\\_inf\\_electron/macro\\_qtm\\_coh/](http://www.riken.jp/research/labs/cems/qtm_inf_electron/macro_qtm_coh/)  
[http://www.riken.jp/research/labs/cems/qtm\\_inf\\_electron/qtm\\_condens\\_matter/](http://www.riken.jp/research/labs/cems/qtm_inf_electron/qtm_condens_matter/)  
<http://www.riken.jp/Qcybernetics/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蔡 兆申 (TSAI, Jaw-Shen)  
独立行政法人理化学研究所・創発物性科学  
研究センター・チーフリサーチ  
研究者番号: 30469910

(2) 研究分担者

川 フランコ (NORI, Franco)  
独立行政法人理化学研究所・創発物性科学  
研究センター・グループディレクター  
研究者番号: 50415262

(3) 連携研究者

中村 泰信 (NAKAMURA, Yasunobu)  
東京大学先端科学技術研究センター・教授及  
び理化学研究所・チーフリサーチ

研究者番号: 90524083

山本 剛 (YAMAMOTO, Tsuyoshi)  
NECシステム研究所・主任研究員及  
び理化学研究所・客員研究員  
研究者番号: 90524190

パシキン ユーリ (PASHKIN, Yuri)  
ツカター大学・教授及び理化学研究所・客  
員研究員  
研究者番号: 70508704

アスタフエフ オレグ (ASTAFIEV, Oleg)  
ロイヤルホロウエインドン大学・教授及び理化学研  
究所・客員研究員  
研究者番号: 50509859

吉原 文樹 (YOSHIHARA, Fumiki)  
理化学研究所・研究員  
研究者番号: 80525907

猪股 邦宏 (INOMATA, Kunihiro)  
理化学研究所・研究員  
研究者番号: 50525772

丸山 耕司 (MARUYAMA, Koji)  
大阪市立大学・客員准教授  
研究者番号: 00425646

サヘル アッシュブ (SAHEL, Ashhab)  
理化学研究所・客員研究員  
研究者番号: 40469903

日高 睦夫 (HIDAKA, Mutsuo)  
産業技術総合研究所・研究員  
研究者番号: 20500672

仙場 浩一 (SEMBA, Koichi)  
情報通信研究機構・研究員  
研究者番号: 50393773

ピランジェオン ピエールマリ (BILLANGEON,  
Pierre-Marie)  
理化学研究所・協力研究員  
研究者番号: 30584205  
(平成22年度より連携研究者)

カファノフ セルゲイ (KAFANOV, Sergey)  
研究者番号: 80597360 (平成25年度転出)

宮崎 利行 (MIYAZAKI, Toshiyuki)  
研究者番号: 10573909 (平成24年度転出)

アブドゥマリコフ アイ (ABDUMALIKOV, A.)  
研究者番号: 40525771 (平成22年度転出)

リュウ ユーシ (LIU, Yu-xi)  
研究者番号: 30415335 (平成22年度転出)