

### 3.6.7 未来 ICT 研究所 巨視的量子物理プロジェクト室

室長(兼務) 仙場浩一

#### 巨視的量子物理の研究を通じて未来の ICT に役立つ新現象の開拓を目指す

##### 【概要】

半導体産業の発展を支えてきたサブミクロン領域での微細加工技術を用いて、天然の原子とは異なる固体素子でできた様々な単一量子系(量子二準位系: qubit)が創られその量子状態の観測やコヒーレント操作が可能となっている。従来のように、多数個の集団の平均量を観測するのではなく、単一の量子系の量子状態を観測し制御する必要がある。我々は、超伝導体アルミニウムで作製した微小ジョセフソン接合を含む電気回路を使い、単一量子系を準備した。この巨視的な超伝導人工原子を使えば、天然の原子と光子の結合に比べて、数桁以上も強い結合更には光子自体のエネルギーよりも結合が強い状況(超強結合)も実現可能と考えられており、この未開拓の分野は注目されている。マイクロ波光子系と強結合した超伝導人工原子系で生じる量子レベルの現象の精密制御を研究する「回路量子電磁力学」や、超伝導人工原子系を電子スピンなどの異種のマイクロな量子系と結合させた「ハイブリッド量子系」で発現する現象を量子1個のレベルで解き明かす研究を通じ、未来の ICT に役立つ新原理・新現象の開拓を目指している。

平成 26 年度は、量子ノード技術あるいは量子センサへの応用の可能性を持つ、ダイヤモンド NV 中心集団の隠れた量子状態(ダーク状態)を発見した。また、回路量子電磁力学の必須技術である、マイクロ波1光子レベルの極微弱信号の精密増幅が可能な ジョセフソン・パラメトリックアンプ の開発に成功した。

##### 【平成 26 年度の成果】

##### (1) 回路量子電磁力学の研究成果

マイクロ波光子系と強結合した超伝導人工原子系で生じる量子レベルの現象の精密制御や単一の量子系の量子状態を観測するためには、マイクロ波光子1個相当の極微弱な信号の低ノイズ増幅が可能な測定系が不可欠である。従来、当該研究分野では、分布定数型の増幅器が主に用いられてきたが、より回路設計の自由度が高い集中定数型のジョセフソン・パラメトリックアンプ(JPA)の作製を行い(図1)、平均光子数が1以下の極微弱マイクロ波信号の低ノイズ増幅に成功した(図2)。主な動作特性は、シグナル周波数 7.35 GHz、ゲイン 30 dB (ポンプ周波数: 14.7 GHz = 7.35 × 2)、バンド幅 5 MHz、動作温度 約 100 mK である。JPA の実体は、シリコンチップ上に微細加工されたアルミニウム製の蒸着回路パターンであるが、パラメトリック増幅に不可欠な非線形インダクタンス部分は SQUID (超伝導量子干渉素子) が担っている。

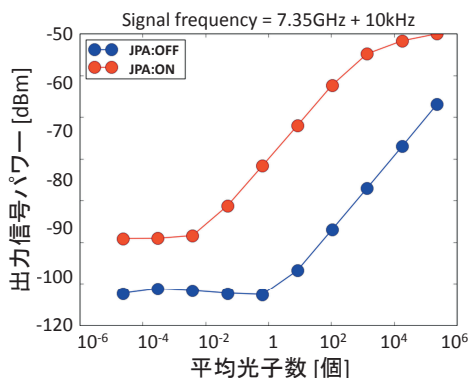


図2 ジョセフソン・パラメトリックアンプの増幅特性。平均光子数1付近でのゲインは約30 dBである。

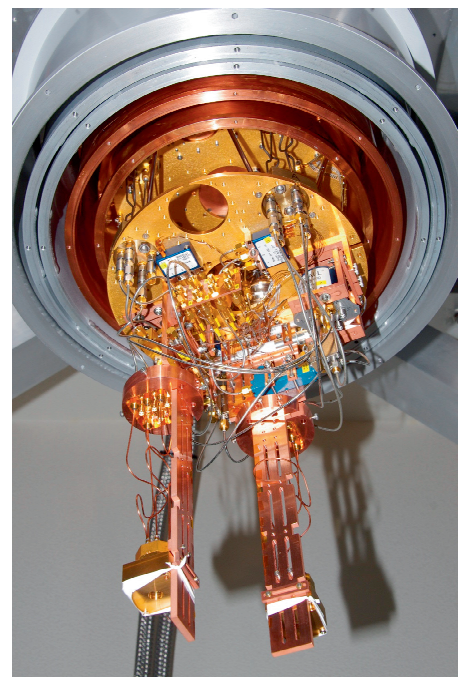


図1 ジョセフソン・パラメトリックアンプ(JPA)特性評価用冷凍機内部の様子。8 mK まで冷却可能な最低温度ステージは室温から5重の輻射シールドの中にある。

## (2) ハイブリッド量子系の研究成果

日本電信電話株式会社 (NTT)、大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所 (NII)、国立大学法人 大阪大学 との共同研究として、超伝導磁束量子ビットとダイヤモンド量子メモリを組み合わせたハイブリッド系 (図 3) において、長い寿命を持つ隠れた量子状態 (ダーク状態) が発現するメカニズムを世界で初めて明らかにした<sup>[1]</sup>。また、ダイヤモンド中に閉じ込められた電子スピンの超伝導磁束量子ビットを結合させることにより、ダイヤモンド中の電子スピンの寿命が約 10 倍に伸びることを初めて理論的に示した<sup>[2]</sup> (図 4)。ダイヤモンド中の電子スピンは、数十ナノメートル程度の局所領域に閉じ込めることが可能であり、磁場や電場や温度を高い精度で検出できることから、ナノスケールの物質構造などを高精度でイメージングできるとされる量子センサへの応用が期待されている。本研究結果によって電子スピンの寿命が改善することで十分な計測時間の確保が可能になるため、計測感度の向上が期待される。

### 参考文献：

- [1] X. Zhu et al., Nature Communications 5, 3524 (2014).  
 [2] Y. Matsuzaki et al., Phys. Rev. Lett. 114, 120501 (2015).

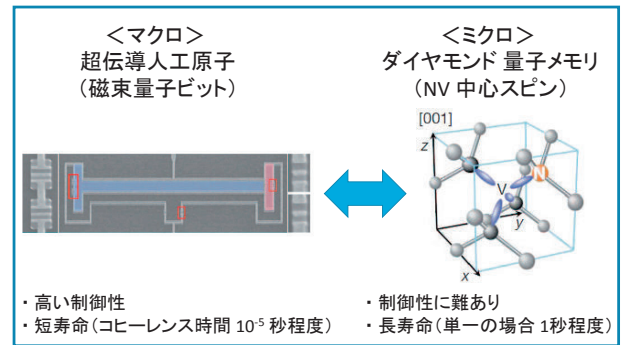


図 3 ハイブリッド量子系の例  
超伝導量子ビット(左)、ダイヤモンド NV カラーセンター(右)

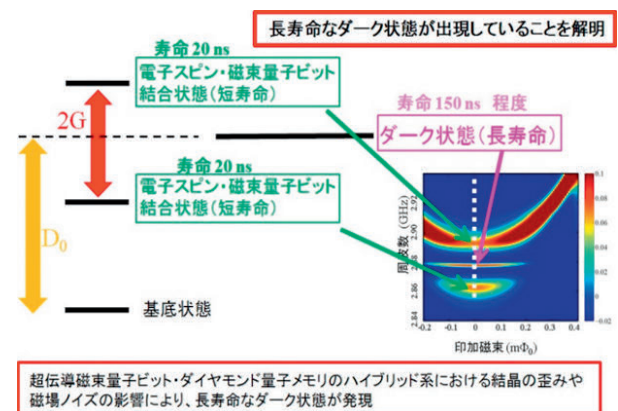


図 4 超伝導量子ビット・ダイヤモンド NV センター ハイブリッド量子系のスペクトル測定概念図。超伝導量子ビットとの強結合で生じた外界とほとんど相互作用しない隠れた量子状態 (ダーク状態) が NV センター電子スピン集団に形成される。