

## 単一光子計数法で探るナノ・量子の世界 コロイドドット量子光源の高性能化に向けて



井原 章之  
(いほら ちゆき)

未来ICT研究所  
フロンティア創造総合研究室  
デニュアトラック研究員

大学院博士課程修了後、東京大学生産技術研究所、京都大学化学研究所を経て、2017年NICT入所。顕微鏡分光、ナノ構造物性、量子光源などに関する研究に従事。博士（理学）。

情報通信や情報処理の革新に向けて、「量子」を扱った技術の研究開発が世界的に活発化しています。ナノメートルという極微なサイズの材料を用いると、非古典的な性質をもつ特殊な光を発生させる「量子光源」を容易に作製できます。量子光源は、情報通信をはじめとした様々な用途に活用できるため、高輝度化・安定化・室温動作などを目指して、世界中で研究が進められています。本稿では、コロイド量子ドットと呼ばれる半導体微粒子材料からなるコロイドドット量子光源の特徴と、光源性能を精密に評価するために開発した独自の計測システムを紹介いたします。

### ■量子ICTのキーとなる「ナノ量子光源」

近年、古典的な波の概念ではとらえることのできない、様々な種類の「非古典光」を生成できる光源が、世界中で研究されています。例としては、それ以上分離できない「単一光子」を生成する光源

のほか、量子的な相関をもつ「もつれ合い光子対」や「識別できない複数の光子」を生成する光源などが挙げられます。これらの光源は、盗聴不可能な通信を実現できる量子暗号技術や、既存のコンピュータの計算速度を圧倒的に上回る高速情報処理技術等に活用できることが知られています。非古典的な光を発生できる光源のうち、優れた性能が期待されている候補のひとつが「ナノ量子光源」です。ナノ量子光源は、ナノメートルという極微なサイズの材料で構成された光源で、その特性は量子力学に従います。量子ICT技術と呼ばれる先端技術の開発競争が世界的に激化している中で、非古典光を効率よく生成できるナノ量子光源の開発も大きく加速しています。

### ■コロイドドット量子光源の特徴

本研究では、コロイド量子ドット (CQD) と呼ばれる材料に着目し、量子光源としての性能を調べる実験を行っています。

CQDは、室温において高い効率で発光する半導体微粒子で、低いコストで容易に量子光源を作製できる材料です。粒子の直径は2~10ナノメートル程度で、サイズや形状、材質等に応じて、発光の色（波長）等の特性が大きく変化する特徴を持ちます。本研究では、図1に示す手順に従ってコロイドドット量子光源 (CQD) からなる量子光源を作製しています。低濃度に分散させたCQDに短い波長の光を照射すると、長い波長の単一光子がCQDから放出されます。CQDから放出される単一光子の指向性は低いのですが、油浸対物レンズという顕微鏡部品を使用してロスを減らし、高い輝度を実現しています。

近年の研究で、コロイドドット量子光源の性能には、図2に示すような様々な物理現象が影響することが分かってきました。図2Aは、単一のCQDに電子が入り出す現象で、発光強度の時間的な変動（発光明滅）の要因のひとつです。図2BはCQD内部の電界に有無に起因して、電子の波動関数に変化が起きる現象で、発光の色や時間的な変動を引き起こします。図2Cは、単一のCQDが2つの光子を連続的に放出する過程で、2光子カスケード発光と呼ばれる現象です。CQDに限らず、多くのナノ量子光源の性能は、これらの物理現象に強く影響されます。高性能なナノ量子光源を実現するためには、これらの現象の発生メカニズムを深く理解し、制御する技術を開発する必要があります。

く理解し、制御する技術を開発する必要があります。

### ■単一光子計数法による光源分析

本研究では、図2に示すような多彩な物理現象を観測し分析するために、「単一光子計数法」を活用しています。この計測手法を用いると、10ピコ秒程度の高い時間分解能で、単一光子の検出時刻をテキストファイルに記録することができます。図3に、本研究で開発した計測システムの概要図を示します。低雑音かつ高感度の超伝導ナノワイヤ単一光子検出器や2光子カスケード発光などの特性を、極限的な精密さで分析しています。

本システムでは、発生させた光子を50%ずつに分離する光学素子（ビームスプリッター）に通してから2本の光ファイバーに入射し、強度相関という量を計測します。単一光子が規則正しく一定の周期で生成されている場合は、分離した2つの光子が両方の光ファイバーに同じ時刻に入射する確率がゼロになります。そのため、2チャンネルの単一光子検出器で同時計数を測定すると、時間差=ゼロに現れる信号が消失します。図4に、実際に得られる強度相関の実験データの一例を示します。このデータでは、同時計数カウント値の最大値と時間差ゼロの値の比が0.01程度になっています。こ

の値は小さければ小さいほど良く、0.01という値は、世界で報告されている室温で動作する単一光子光源として、トップクラスの性能であることを表しています。最近の実験では、超伝導ナノワイヤ単一光子検出器の特徴を生かせば、更なる高性能化を実証できることを示唆するデータが得られています。室温ナノ量子光源の性能を極限的にどこまで向上させることが可能か、今後の実験で明らかになってくると期待されます。

### ■今後の展望

今回、CQDを活用して、性能の高い単一光子光源（コロイドドット量子光源）を容易に作製できることを明らかにしました。将来、単一光子だけでなくもつれ合い光子対や識別できない複数の光子を効率よく生成する技術を確立できれば、非古典光を使ったICT技術の実社会利用が飛躍的に広がると期待できます。また一方、単一光子計数法を高度に活用した実験を行う中で、CQDをはじめとした様々なナノ材料の持つ非古典的な性質や光学特性を定量的に評価できることも明らかになってきました。今後の研究では、ナノ量子光源の高性能化に向けた研究開発を進めるとともに、単一光子計数法を高度に活用した応用や、ナノ・量子の世界に現れる非古典的な性質を活用した応用を幅広く開拓していくことを目指します。

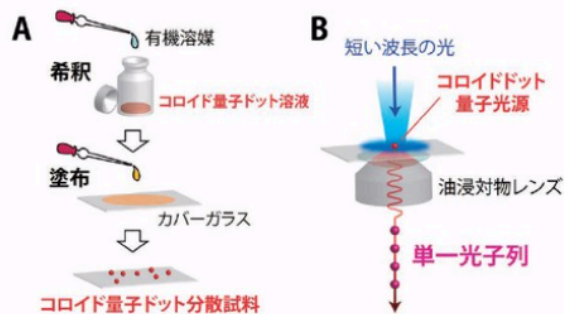


図1 A) コロイド量子ドット (CQD) 分散試料の作製方法。有機溶媒で希釈して低濃度にした後、ガラス基板上に塗布する。B) CQD分散試料を用いた単一光子生成方法。短い波長の光を照射すると、長い波長の単一光子が放出される。室温で動作するのが特徴。

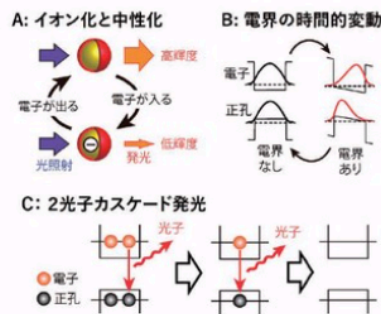


図2 コロイドドット量子光源の性能に影響する物理現象の例

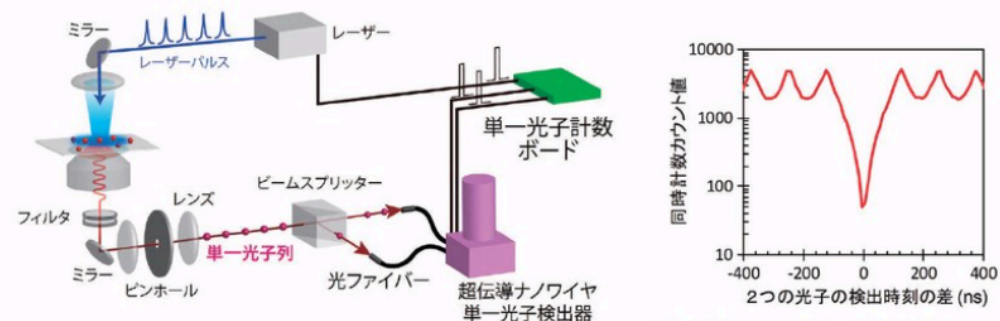


図3 本研究で開発した計測システムの概要図。生成された単一光子を超伝導ナノワイヤ単一光子検出器で検出し、その信号を単一光子計数ボードで記録する。

図4 単一のコロイド量子ドット発光の同時計数データの一例。同時計数カウント値の最大値と時間差ゼロの値の比が0.01程度になっており、世界トップクラスの性能を出せることを示している。