

超入門 量子力学

19世紀末、製鉄の効率を上げるために、
光の色から溶鉱炉の温度を正確に測定する必要がありました。
ここから量子仮説が生まれ、
小さな粒である“量子”という考えかたが提唱されます。
波だと思っていた光が、
実は粒子の性質を持つことがわかったのです。
そして、その類推からあらゆる粒子が波であると考えられ、
量子論が確立されていきました。

その後、電子のふるまいが計算できるようになると、
量子力学は半導体産業に応用されました。
今や半導体無しに現代人の生活は成立しません。
量子力学を基に先端技術が次々と生まれ、
私達の日常生活やビジネスの世界が
飛躍的な進化を遂げてきたのです。

今後も、新しい量子技術が世界を変えるとされています。
今回の特集では、
必読の量子力学入門解説から最先端の研究まで、
新進気鋭の研究者たちが解説します。

量子力学がより身近になる21世紀に Quantum mechanics is getting closer to YOU in the 21st century



応用物理学部門
数理物理学研究室
助教 小布施 秀明

PROFILE
出身高校 / 国立長野工業高等専門学校
研究分野 / 理論物理
研究テーマ / 開放量子系におけるダイナミクス、トポロジカル絶縁体、
量子ウォーク、不規則系における金属-絶縁体転移
研究室ホームページ / <http://subutu-ap.eng.hokudai.ac.jp>

Hideaki Obuse
Assistant Professor
Laboratory of Condensed Matter Physics
Division of Applied Physics

PROFILE
High school : National Institute of Technology, Nagano College
Research field : Theoretical Physics
Research theme : Dynamics in open quantum system, topological insulator,
quantum walk, metal-insulator transition in disordered systems
Laboratory HP : <http://subutu-ap.eng.hokudai.ac.jp>

「量子力学? とするあなたに」

Chapter 01

夢物語だった 量子コンピューターが現実に

みなさんは「量子力学」あるいは「量子〇〇〇」という言葉を聞いたことがありますか?最近では日本をはじめ世界各国の名だたる企業が「量子コンピューター」(図1)の開発を競っています。なかでもアメリカのIBMにある量子コンピューターはネット上から誰でも無料で利用できるため、今後北大の講義でも活用される場面が出てくるかもしれません。私が学生の頃は“夢物語”だと思われていた量子コンピューターが、こうして実用化に向けて一歩ずつ進んでいることを思うと、現代のテクノロジーの進化に感嘆するばかりです。



図1 IBMにより開発された量子コンピューター
Figure1: A quantum computer developed by IBM.
2017Macmillan Publishers Limited, part of Springer Nature

Chapter 02

猫の生死が「重なり合う」不可思議な量子力学

量子力学の本質的かつ不可思議な性質を象徴する用語に「シュレーディンガーの猫」(図2)という思考実験があります。よく小説などでも引用されることがあるようです。毒ガスが50%の確率で発生する密閉した箱の中に猫を閉じ込めると、箱を開けない、すなわち観測しない限り、箱の中で猫が活着している状態と死んでいる状態が“重なり合って”同時に存在することを意味します。この“重なり合う”という状態は、量子力学ならではの表現です。私たちの日常で「シュレーディンガーの猫」のような現象に遭遇することはまずありませんが、量子力学は現実世界の不可思議な自然現象を記述するのに極めて重要な理論であり、20世紀前半に確立した学問です。

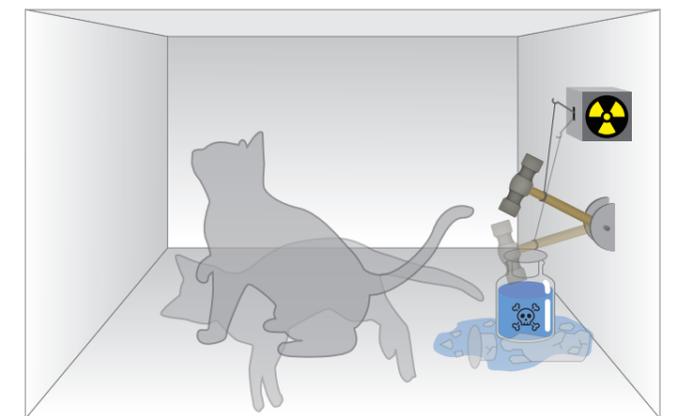


図2 シュレーディンガーの猫
Figure2: A schematic view of the Schroedinger's cat.

Chapter 03

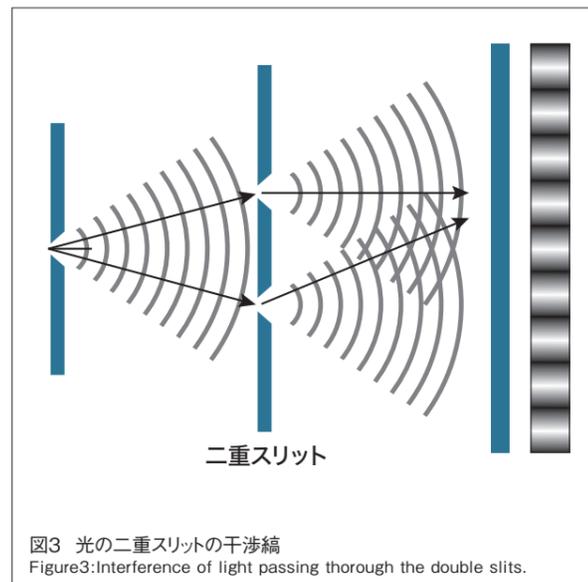
金属の鉄と絶縁体のダイヤモンド 電気伝導特性の違いを明らかに

では、量子力学がなければ説明できない自然現象とは何でしょう？例えば、物質を極低温まで冷やすと電気抵抗がゼロになる超伝導現象もその一つであり、さらに身近な例をあげると金属と絶縁体もその一例です。鉄は鉄原子、ダイヤモンドは炭素原子が規則正しく周期的に並んだ結晶ですが、前者は電気をよく流す金属で、ダイヤモンドは電気を流さない絶縁体。全く異なる電気伝導特性を示します。この電気伝導特性の違いも電子の運動を量子力学によって記述することで初めて説明できるようになります。量子力学は意外と身近な存在なのです。

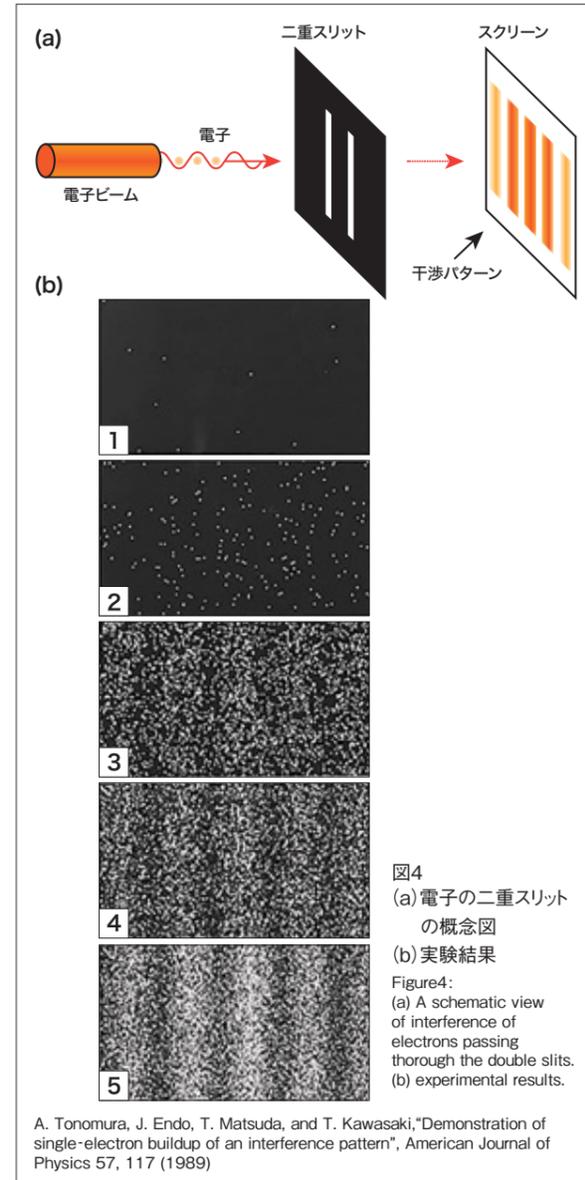
Chapter 04

「二重スリットの干渉実験」 波のようにもふるまう粒子

「量子」の存在が明らかになったのは20世紀初頭の頃。光（電磁波）のエネルギーが連続的に変化するのではなく、実はとびとびの不連続な値を示すことがわかり、エネルギーの最小単位量が粒のようなもの、「量子」であることが発見されました。量子の一種類に光の粒子、光子（こうし：フォトン）があり、有名な「二重スリットの干渉実験」（図3）によって光子は波の性質も持つことが明らかになっています。すなわち光子は、粒子と波の両方の性質を備えており、これを「粒子と波動の二重性」といいます。この性質は光子に限らず、量子力学に従う粒子が等しく持つ性質で



す。電子も二重スリットを通過すると[図4(a)]、スクリーンに到達した1つの電子の場所を表す白い点の現れ方にムラが生じ、干渉効果を起こすことが確かめられています[図4(b)]。



A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, and T. Kawasaki, "Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern", American Journal of Physics 57, 117 (1989)

Chapter 05

量子力学の運動方程式は シュレーディンガー方程式

ここで、思考実験「シュレーディンガーの猫」を提唱したオーストリアの物理学者エルヴィン・シュレーディンガーが提案した、量子力学に従う粒子の運動方程式である「シュレーディンガー方程式」を見てみましょう。

質量 m の粒子が直線の x 軸上を自由に運動する場合は、次のように記述されます。 ψ はギリシャ文字で「プサイ」と発音します。

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2}$$

$\psi(x, t)$ を波動関数、 \hbar を換算プランク定数といい、 i は虚数単位を表します。左辺は $\psi(x, t)$ の時間 t についての微分、右辺は位置 x についての微分であり、シュレーディンガー方程式は偏微分方程式なのです。

$\psi(x, t)$ は粒子の量子力学的状態[図5(a)]を表し、波動関数という名から分かる通り、シュレーディンガー方程式では粒子の状態を波として記述します。さらに量子力学では、 $|\psi(x, t)|^2$ が、時刻 t 、位置 x における粒子の存在確率に比例すると解釈します[図5(b)]。古典力学とは異なり、たとえ初期状態が正確に分かっていても確率的にしか粒子の運動を予測することができません。また、波動関数 $\psi(x, t)$ は通常複数の状態の「重ね合わせ」となっており、これを説明する思考実験が「シュレーディンガーの猫」なのです。

私がこの式を初めて見たとき、「これで世界の根本理論が説明できるんだ!」と衝撃を受け、この式を理解したくて物理の道に進みました。わからないからこそ惹かれてしまう。これは、量子力学に限らず、全ての学問に共通するものだと思います。

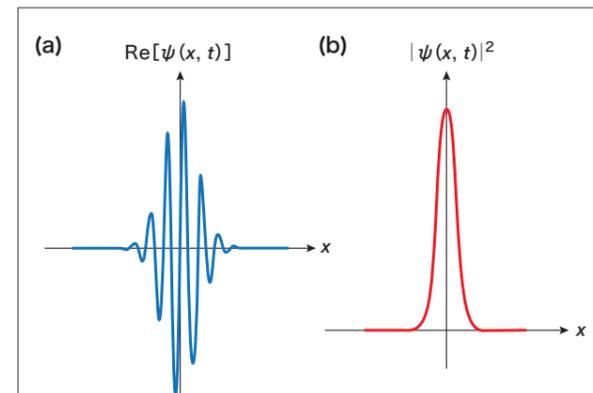


Figure 5: (a) real part of a wave function for a quantum state, (b) probability distribution to observe a particle at position x and time t .

Chapter 06

新物質が続々と発見 「トポロジカル絶縁体」

現在も量子力学の研究は日進月歩で進んでおり、新物質が続々と発見されています。例えば15年ほど前に発見された「トポロジカル絶縁体」[図6(a)、(b)]は金属とも絶縁体とも異なる特異な電気伝導特性を持ち、世界中の物理学者により精力的に研究が行

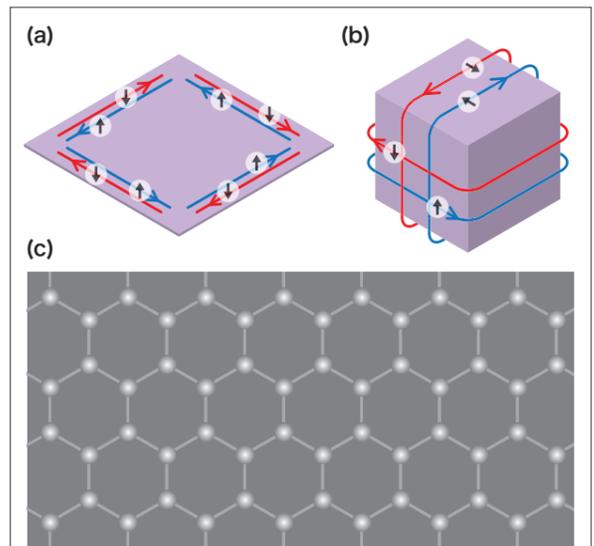


Figure 6: Schematic views of (a) two-dimensional and (b) three-dimensional topological insulators. In both cases, electronic current near the surfaces of topological insulators can flow like a metal, while electrons inside the materials cannot move as insulators. (c) A schematic view of a graphene. Carbon atoms form the honeycomb structure on the two-dimensional plane.

われています。トポロジカル絶縁体中の電子の運動が、前述したシュレーディンガー方程式ではなく、相対論的量子力学の「ディラック方程式」で説明されるところも我々研究者にとって新たな驚きでした。

また同時期に発見された、炭素原子が平面上のハニカム構造になっている「グラフェン」[図6(c)]も、その中の電子の運動がディラック方程式に従うため、非常に特異な電気伝導特性を示します。グラフェンはすでに応用段階にあり、近い将来みなさんの身の回りにグラフェンを用いた電子機器が登場するかもしれません。

Chapter 07

21世紀の量子力学を みなさんの手で!

一口に量子力学といっても複数の専門分野に枝分かれしており、まだ理論的にも未整備な領域が随所に残っています。冒頭に触れた量子コンピューターの発展と並行して、我々研究者が互いの領域を行き来することでさらに新たな発見や理論が生まれる可能性に満ちています。興味がある人はぜひ、北海道大学で量子力学の扉をノックしてみてください。より詳しい入門書として長岡洋介先生が書かれた『基礎物理学シリーズ・現代物理学』（東京教学社）もお勧めです。

やってみないとわからない! 計算科学で未来のものづくり



計算科学が拓く新しい電子の世界

Computational science opens up a new world of electronics



応用物理学部門
物性理工学研究室
助教 江上 喜幸

PROFILE
出身高校 / 福岡県立筑紫丘高等学校
研究分野 / 物性物理学
研究テーマ / 電子の量子輸送現象のシミュレーション
研究室ホームページ
<http://zimg-ap.eng.hokudai.ac.jp/>

Egami Yoshiyuki
Assistant Professor
Laboratory of Theoretical Solid State Physics
Division of Applied Physics

PROFILE
High school / Chikushigaoka High school
Research field / Condensed matter physics
Research theme / Quantum simulation of electron transport property
Laboratory HP / <http://mp-er.eng.hokudai.ac.jp/indexjp.htm>

理論と実験の架け橋となる 計算科学の魅力

豆電球を導線で電池につなぐ、そんな理科の実験を思い出してください。電池を直列に2本、3本とつなげていくと、豆電球はより明るく輝いていたと思います。ところが、髪の毛の太さのさらに数千、数万分の一の“ナノ”の世界では電池を増やすと逆に暗くなる、あるいは導線が断線していても明かりが灯るといった現象が起きることがあります。非日常的に感じるかもしれませんが、皆さんの周りにあるパソコンやスマホなどの電子機器の中では、そんな特殊なことが日常的に起きているのです。このようなナノの世界での電気の流れ、すなわち電子の運動を「第一原理計算」と呼ばれる量子力学に

基づいた数値シミュレーション(計算科学)を使って解き明かす、それが私の研究テーマです。電子の運動を記述する量子力学の基礎方程式であるSchrödinger(シュレーディンガー)方程式は非常に美しい式ですが、実はいざ解こうとすると、ほとんどの場合、厳密な解を得ることができません。また、実験によって電子が流れていることはわかっても、実際に電子が物質のどの部分を流れているのか、肉眼で見ることはもちろん、大掛かりな装置を用いても観測することは困難です。一方、計算科学ならば、数値データを用いて物質内の電子の動きを可視化することも可能となり(図1)、“バーチャル顕微鏡”となって理論研究と実験研究とをつなぐ架け橋となるのです。

非現実的だった数万原子の シミュレーションに成功

また、コンピューターの性能を十二分に活かすためのアルゴリズム開発も研究テーマの一つです。京コンピューターに代表されるような超並列計算

機が普及し、ハードウェアの能力は年々向上していますが、実際の実験と同じスケールでのシミュレーションはまだ困難です。

しかし、最近の研究で、簡単な行列演算の知識をもとにした新しいアルゴリズムを開発し、現実的な時間で、精度を落とすことなく数万原子を含む物質のシミュレーションを可能にしました(図2)。これらの研究を通して未知への扉を開いていくことで、より良い“ものづくり”を目指しています。

図2 不純物を含む2層カーボンナノチューブにおける輸送電子の密度分布。外側のチューブに不純物を導入することで、主に内側のチューブを電子が輸送している。

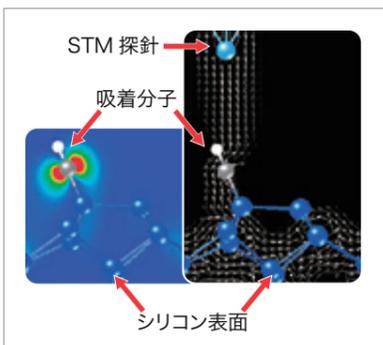


図1 シリコン表面に吸着した分子の電子状態と、表面とSTM探針間を流れるトンネル電流の可視化

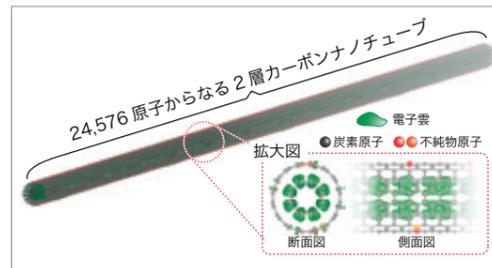
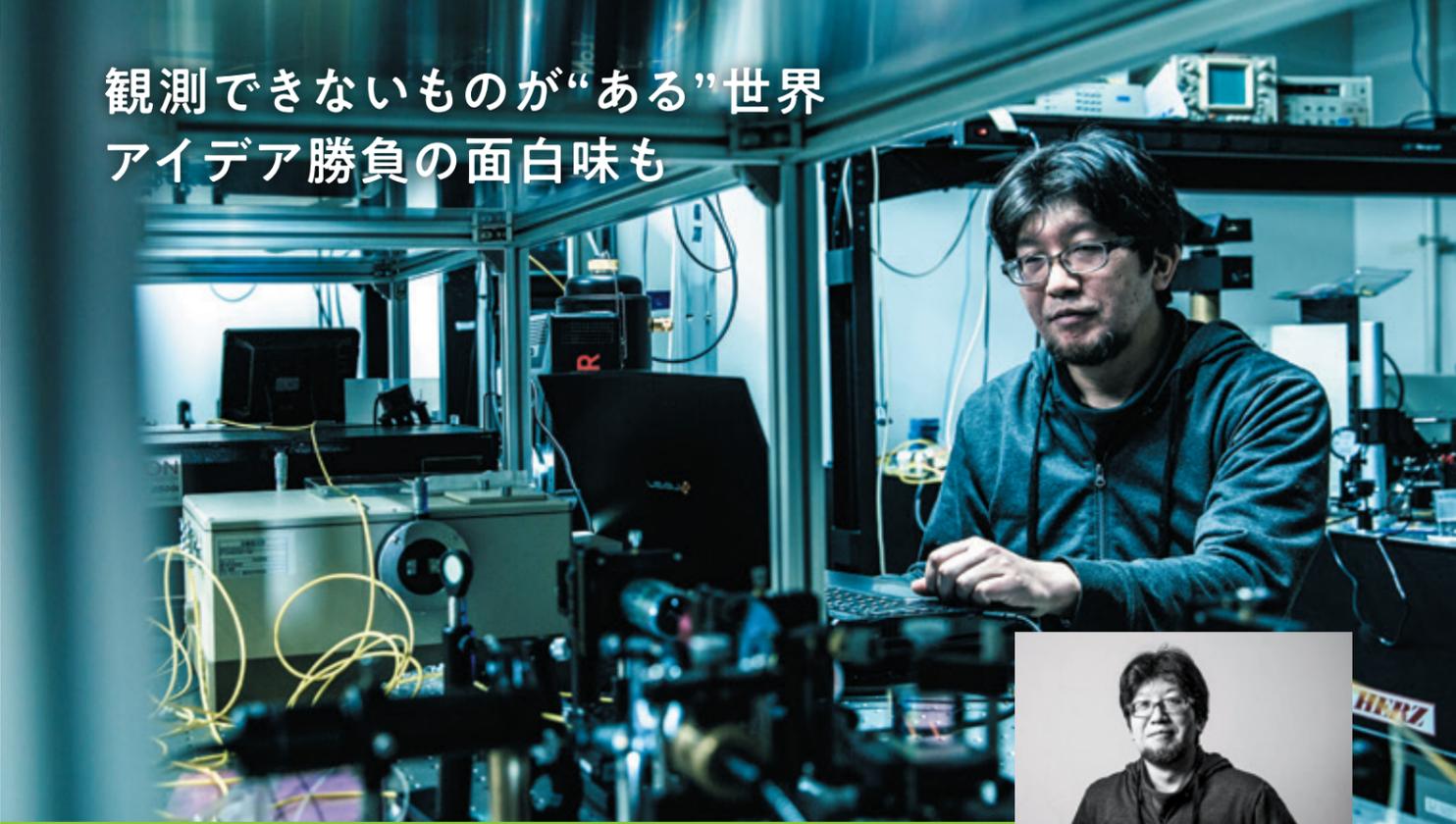


Figure 2: Charge density distribution of electrons flowing through an impurity-doped double-walled carbon nanotube. By introducing impurities into the outer tube, electrons are mainly transported through the inner tube.

観測できないものが“ある”世界 アイデア勝負の面白味も



量子で繋ぐ安全なネットワーク

Development of secure network based on quantum mechanics



応用物理学部門
半導体量子工学研究室
准教授 笹倉 弘理

PROFILE
出身高校 / 富山県立富山中部高等学校
研究分野 / 量子光学、半導体スピン物性
研究テーマ / 半導体量子ドットを用いた量子ノードの開発
研究室ホームページ
<http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/semi/>

Sasakura Hiroataka
Associate Professor
Laboratory of semiconductor quantum physics
Division of Applied Physics

PROFILE
High school / Toyama Chubu High School
Research field / Quantum optics, semiconductor spin physics
Research theme / Quantum node based on semiconductor quantum dots
Laboratory HP / <http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/semi/>

量子の不確定性を強みに変え 情報セキュリティ向上に寄与

個人情報の流出や「なりすまし」の報道からもわかるように、多様な情報サービスが提供されている現代のネットワーク社会において、電子化された情報のセキュリティ確保と処理能力向上のニーズは高まり続けています。私の研究テーマは、こうした社会情勢を前提にした半導体量子ドットを用いた量子ノードの開発です。中央演算処理装置(CPU)・メモリなど現在の情報処理デバイスは半導体素子の集合体で構成されています。これまでのデジタル式情報処理の枠組みでは量子の不確定性が誤動作の要因になるかもしれないと敬遠されてきましたが、逆にこの不確定性を強みに変え、量子の力を積極的に用いて情報のセキュリティや処理能力を高めていくことを目的としています。例えば、「なりすまし」を防ぐ量子暗号の研究もその

ひとつ。もし情報の盗聴者がいた場合、観測された時点で量子の状態が不確定から確定に変わることによって「盗聴者がいた」という痕跡が残ります。セキュリティ強化に寄与できると期待しています。量子暗号の実用化も、そう遠くない未来なのかもしれません。

量子ドット内蔵型 光ファイバーデバイスを開発

超伝導体・半導体・光など様々なプラットフォームで個々の強みを生かした量子ノード・量子プロセッサの開発は、世界中で盛んに行われています。さらには、それらの独立した系に「相関」を持たせる量子ネットワーク系を構築するため、光ファイバー通信網の活用が求められています。光の素粒子である「光子」の数が確定した特殊な状態が、光ファイバー通信網を介する「量子」として最も適しているのです。

私の研究室でも前述の「なりすまし」対策とし

て、現行の光ファイバー通信網と親和性の高いデバイスの実現に向けて、半導体量子ドットを光ファイバーに内蔵する技術を開発しています(図1)。このデバイスは驚くくらい簡単かつ安価な素材でできています。ナノメートルスケールの狭い空間に閉じ込められた電子のエネルギーは量子化し、そこから「パウリの排他律」の助けを借りて特殊な状態の光が発生します。こうした量子ドット内蔵型光ファイバーデバイスを用いると、異なる量子ノード間を簡単に結合させることができるため、複合システムによる高機能化を目指しています。

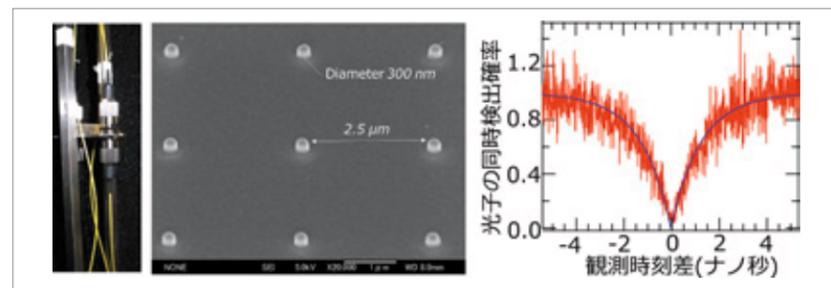


図1 (左)量子ドット内蔵型光ファイバーデバイス。(中央)ナノピラーアレイを施した半導体量子ドットのSEM像。(右)光子数が1であることを示した結果。

Figure 1 : (Left) Quantum-Dot-in-Fiber device. (Center) SEM image of nano pillar array. (Right) Anti-bunching behavior.