twitter
はじめました
@keiokyuri

Kyurizukai

新版 窮理図解

2011 August
no. 07

慶應義塾大学理工学部広報誌
http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai
English versions are also available:
http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai/top_eng.html

慶應理工の 量子光エレクトロニクス

量子力学が切り拓く
新しい光エレクトロニクスの可能性

物理情報工学科
早瀬潤子（はやせじゅんこ）
（准教授）

研究紹介

今回登場するのは、情報技術を飛躍的に革新する
「量子光エレクトロニクス」の実用化を目指す早瀬潤子准教授です。

半導体と光技術に量子力学の原理を応用

“0でもあり1でもある世界”の可能性

原子や分子、電子、素粒子などの非常に小さな世界で起こる、古典力学では説明しきれない現象を扱う量子力学。理論の確立から１世紀近くを経て、実験によってその正しさが証明され、いまや人類が活用できる技術へと進歩を遂げつつある。早瀬潤子准教授は、光と半導体の量子力学的性質を制御する技術を開拓し、量子光エレクトロニクスの実用化に向けた研究に取り組んでいる。

パルス光と半導体を組み合わせて新技術を創る

「量子力学の最大の応用技術として注目されるのが量子情報技術です。量子力学的性質を活用できれば、遠く離れた場所へ一瞬で情報を伝える量子テレポーテーションや、現在のコンピュータでは何億年もかかる問題を超並列計算で一瞬にして解く量子コンピュータ、決して盗聴できない絶対安全な量子暗号システムなど、従来の情報技術では想像もしなかったようなことが可能になるのです」、と早瀬潤子准教授は言う。

早瀬さんの専門分野は量子光エレクトロニクス。パルス光（一瞬だけ光るフラッシュのような光）と半導体ナノ構造を組み合わせ、光子*と電子の量子力学的性質を自在に制御するための研究を進めている。

「現在の情報化社会は光エレクトロニクス（光電子工学）によって支えられていますが、量子力学の原理を十分活かしきれているとは言えません。量子力学的性質を制御し活用することができれば、従来の常識を覆すような新しい技術を創りだすことができるでしょう。その１つの例が量子情報技術です」。

0でもあり１でもある“重ね合わせ状態”とは

私たちがパソコンや携帯、インターネットなどで利用するあらゆる情報は、ご存じのように、“0”か“1”かのビットを最小単位として、その組み合わせ“01101…”で表わされている（図１）。その“0”か“1”かを表現するのが、光や電流の強度（ON／OFF）だ。しかしそれは、光や半導体の性質のほんの一部を使った技術でしかない。そこで、世界中の研究者たちが期待しているのが、量子情報技術だ。量子力学の世界で起こる、“0でもあり１でもある”という摩訶不思議（まかふしぎ）な現象が、これまで想像もしなかった情報技術を可能にするのだという。

「量子力学の概念を示すのに有名なのが『シュレーディンガーの猫』です（図２）。箱Ａの中に猫を入れて、毒ガス発生装置を仕掛けます。一方、箱Ｂにはランダムに作動するスイッチをセットしておいて、スイッチが入ると箱Ａの毒ガス発生装置が起動するようにつなげておきます。一定時間が経過した後では、どちらかの箱を覗いて観測するまで猫が生きている（0）か、死んでいる（1）かわかりません。このような状態を“0でもあり１でもある重ね合わせ状態”といい、これを情報の単位（量子ビット）に用いたのが量子コンピュータです。１つの量子ビットで０と１両方の処理が同時にできるので、たくさんの量子ビットがあると超並列計算が可能になるのです」。

もう１つの重要な概念が「量子もつれ」だ。「スイッチが入る前（B=0）なら猫は生きており（A=0）、入った後（B=1）なら死んでいる（A=1）。つまり『Aが0ならBが0』『Aが１ならBが1』のどちらかですが、観測するまではわかりません。このような状態を“量子もつれ状態”と言います。箱Ａと箱Ｂを空間的に離しておけば、箱Ａを観測した

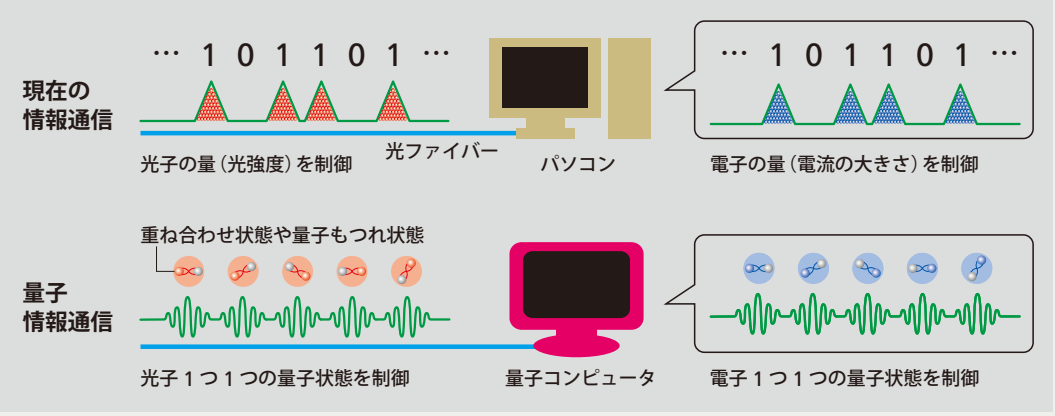


図１　量子を利用した未来の情報技術

現在の情報技術では、光の強さ（光子の量）や電流の大きさ（電子の量）を制御して情報（０か１）を表わしている。これに対し、「重ね合わせ状態」や「量子もつれ状態」と呼ばれる量子状態を活用できれば、量子テレポーテーションや量子コンピュータ、量子暗号システムなどの革新的な情報技術を実現できる。

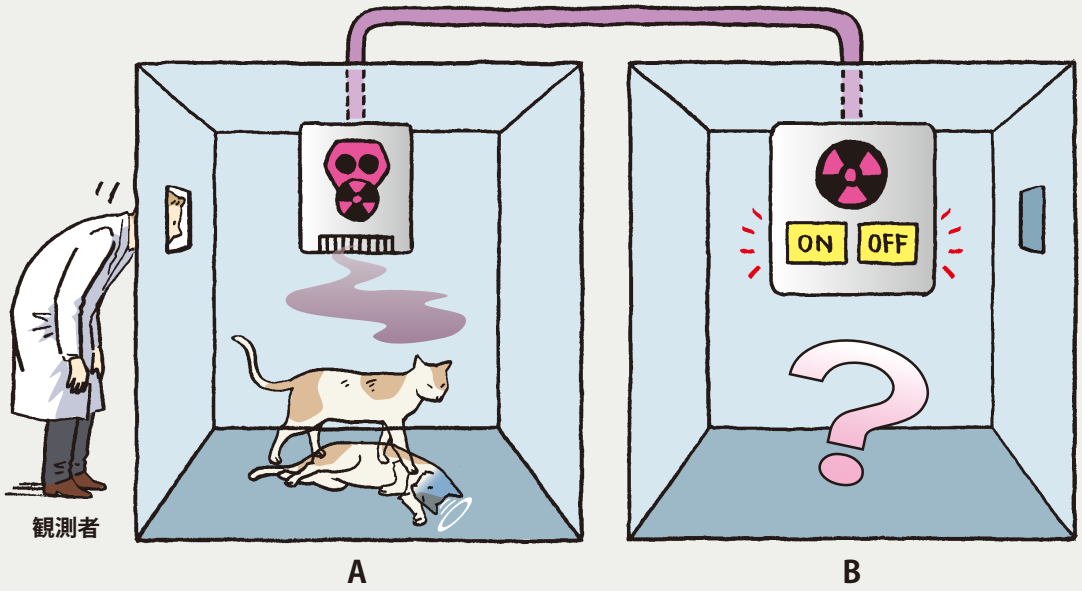


図2　シュレーディンガーの猫

量子力学の不思議な世界を分かりやすく描いたのが、有名な「シュレーディンガーの猫」の絵である。観測者が箱の中を見るまで、猫は生きている（0）か死んでいる（1）か分からない。こうした状態を「重ね合わせ状態」という。また、箱Bのスイッチが入る前（B＝0）なら箱Aの猫は生きており（A＝0）、スイッチが入った後（B＝1）なら猫は死んでいる（A＝1）。どちらであるかは箱Aか箱Bの中を見るまでわからない。こうした状態を「量子もつれ状態」という。

瞬間に箱Bの状態が確定し、遠く離れた場所同士で情報を伝えることができる。これが量子テレポーテーションの原理です」。

重ね合わせ状態や量子もつれ状態といった量子状態は、蓋を開けるまではいくつかの可能性が共存しているが、蓋を開け、観測した瞬間に結果が確定してしまう。言い換えれば、量子状態は観測すれば壊れてしまうことを意味する。

「光子が暗号に活用できるのは、光子が最小の粒子で分割できないことに加え、仮に盗聴された（観測された）としても、量子状態が壊れるため、盗聴がわかってしまうからなんですね。また光子を使えば、非常に微弱なエネルギーで情報がやり取りできるため、究極の省エネルギー情報通信が可能となります」。

半導体量子ドットと超短光パルスを組み合わせる

早瀬さんは現在、量子光エレクトロニクスの実現に向けて、半導体中の電子と光子の間で量子状態をやり取りしたり、それらの状態を制御したりするための実験を行っている（図3）。しかし、光子のもつ量子力学的な情報を半導体に伝えるには、様々な課題が山積する。

「量子状態は非常に脆くて、アッという間に壊れてしまいます。量子状態を保持しながら、制御したり、移動させたりする必要があるのですが、それが非常に難しいのです」。

そこで注目されるのが、量子状態を保持し制御するのに適した半導体、半導体量子ドットだ。これは、最新のナノテクノロジーによってつくられる、10^{-8}メートルという極微小な半導体の粒。小さな領域に電子を閉じ込めることで、あたかもその領域が1個の原子のような振る舞いをするため、1つ1つの電子の量子状態の制御や保持が容易になるという。

「量子ドットの特長は、サイズや形状によって特性を自由に変えられること。私の研究グループでは、特殊な手法を用いることで、光ファイバー通信で使われている光と強く相互作用する量子ドットを作製しています。他のグループよりもずっと長く、重ね合わせ状態を保持することにも成功しています」。

とはいえ、量子状態が時々刻々と壊れていくことは避けられない。そこで早瀬さんは、10^{-13}秒というとてつもなく短い時間に瞬間的に光を出すことができる超短パルスレーザーを超高速なフラッシュとして使うことで、量子状態が壊れる前に制御したり、量子状態が壊れていく様子を観測したりしている。超短パルスレーザーを用いることで、通常の光では起こらない非線形な現象を利用し、重ね合わせ状態や量子もつれ状態を制御することが可能になるという。

もっとも、光子1つに相当する光の強度は極微弱なので、光子と電子の間で狙い通りの効果を引き起こすことは非常に難しい。そこで、量子ドットをたくさん集めることにより、光子と電子の相互作用を高める方法を探っているという。

「量子力学の面白さは、その可能性が計り知れないところ。数十年後の世界を飛躍的に変えるような大発見を目指して研究に取り組んでいます」。

（取材・構成　田井中麻都佳）

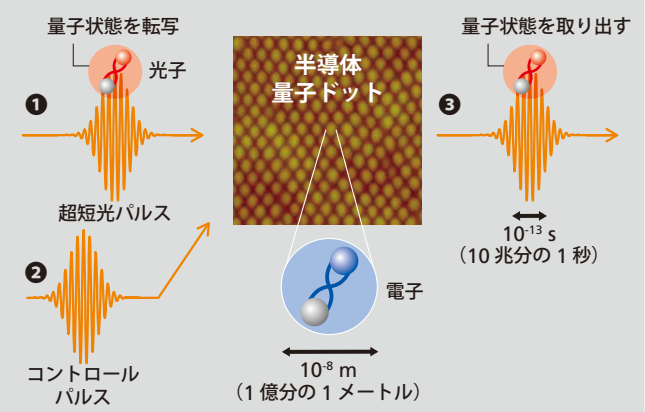


図3　光子と電子の間での量子力学的な情報のやりとり

超短光パルスを半導体量子ドットに照射し、光子のもつ量子力学的な情報（量子状態）を半導体の中の電子に転写する❶。一定時間後にコントロールパルスを照射し❷、電子に転写した量子力学的情報を再び光子として取り出す❸。

＊光子：光のエネルギーの最小単位。量子力学的にみると、光は波としての性質と粒（光子）としての性質の両方をもっている。

研究に必要なのは、チャレンジ精神と集中力

女性研究者では珍しい量子光エレクトロニクスの研究を手掛ける早瀬潤子さん。その柔らかな物腰からは想像できないが、高校時代はボート部に所属し、全国大会で４位になったほどの実力だ。早瀬さんは、部活で鍛えた体力と集中力を武器に、自らの手で研究者としての道を切り拓いてきた。

――どのような子ども時代を過ごされましたか？　昔から、理系科目が得意だったのでしょうか。

私自身は全く覚えていないのですが、両親が言うには、しょっちゅう「どうして？」「どうして？」と質問ばかりしている子だったようです。ただ小さい頃は、とりたてて理系科目が得意だったというわけではありませんでした。

生まれは福島県で、のんびりしたところに育ったので、小学生の頃はあまり勉強した記憶はありません。中学のときに埼玉県に引っ越し、進学した県立高校で教わった物理の先生との出会いが大きな転機になりました。

この先生はちょっと変わっていて、毎回必ず実験をして、なぜそうなるのかを生徒たち自身に考えさせるという授業だったのです。定期試験でも、計算問題はほとんど出さず、「なぜこうなるのか説明せよ」といった設問ばかりでした。もともと考えることが好きだったので、この先生との出会いで、物理の面白さに目覚めました。とはいえ、このときはまだ、研究者というのは憧れの存在でしかなかったのですが……。

というのも、高校時代はボート部に所属し、インターハイに出るなど、部活動しかやっていなかったんですね。高校３年の９月の国体までは、部活一色の生活でした。なので、受験勉強はほとんどせずに、推薦で上智大学の物理学科に入学しました。

――でも、普段の成績が良くなければ推薦は受けられませんね？

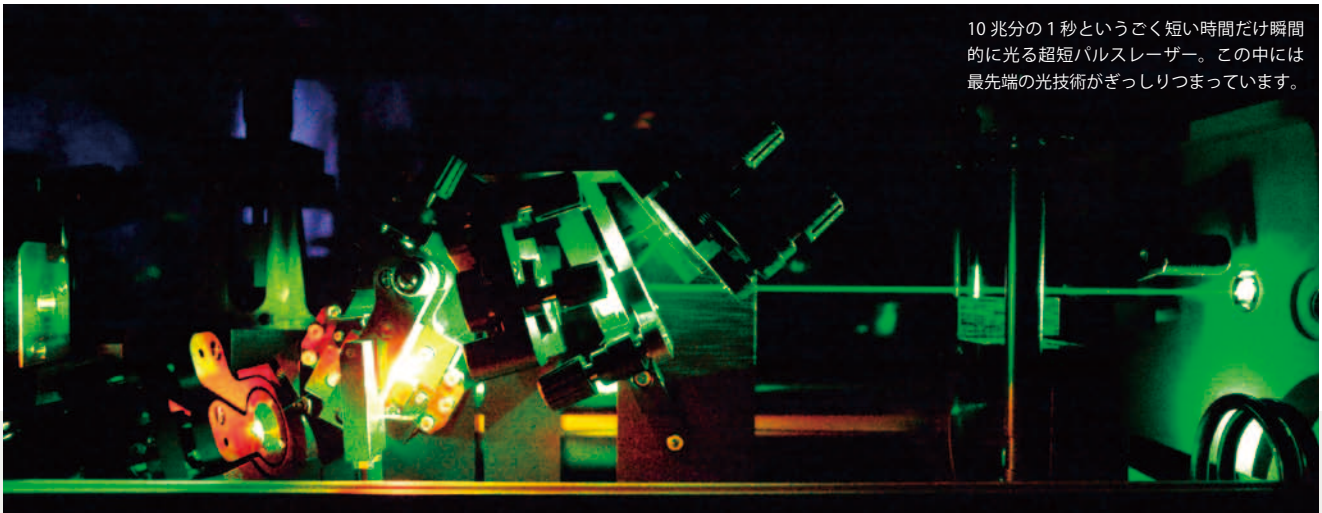
ボート部で体力がつき、集中力が鍛えられたおかげだと思います。体力と集中力で、定期試験を一気に乗り切っていました。実を言うと、私は一度も塾に行ったこともないし、模試も１回しか受けたことがないんですよ。

――研究者になろうと思われたのは、いつ頃ですか？

大学４年のときです。着任されてまだ２年目の江馬一弘先生の研究室に入ることにしたのですが、研究室では、超短光パルスを使った非線形分光という、世界でも最先端の研究を手掛けていました。大学３年生までは、答えの用意されている理論や実験について学びましたが、研究室では、世界でまだ誰もやっていないような実験を自分たちでやり、次々に新しい結果を出すことができました。非常に充実していましたね。研究室に泊まって、夜通し実験するということもよくありましたが、全く苦になりませんでした。一度集中すると、とことんやらないと気がすまないんです。

そうした環境に身を置いたことで、たんなる憧れから、研究者になりたいという思いが強くなっていったのだと思います。一見、私はおっとりしていると言われるのですが、結構、頑固者らしく、一度こうと決めたら譲らない性格なんですね（笑）。「大学を卒業したら就職して、いい人を見つけて結婚すればいい」という親の意見には全く耳をかさず、大学院の博士課程まで進むことにしました。

博士号を取得した後は、アカデミック研究者を目指して、理化学研究所に入所



10 兆分の１秒というごく短い時間だけ瞬間的に光る超短パルスレーザー。この中には最先端の光技術がぎっしりつまっています。

学部４年生が半数以上を占めるフレッシュな雰囲気の研究室。研究以外はなごやかムードで、よく一緒に食事や飲み会にでかけます。

しました。今でいうポスドクの立場で、3年の任期付き。自分で研究テーマを提案する形式の応募で、運良く採用されました。今の研究とは少し違うのですが、光と半導体ナノ構造を扱うという意味では、同じような分野の研究です。任期終了後は、情報通信研究機構（NICT）に移り、そこで量子ドットと出合いました。ちょうどNICTには特徴的な量子ドットを作っている研究部隊がいて、面白そうだと思ったのがきっかけでした。ここに4年半くらい在籍したのですが、NICTの場合も、自分で就職活動をして得た職でした。

研究資金を獲得するため、また安定的な研究環境を探すためにあちこちに応募をしていたのですが、NICTに在籍中、運良く15倍の高い倍率をくぐり抜け、科学技術振興機構（JST）の個人型研究を対象とする競争的研究資金制度「さきがけ」に採択されることになりました。「さきがけ」に採択されて良かったのは、採択された研究者や審査側のアドバイザーが一堂に会して、半年に一度、合宿で議論を戦わせる場があったこと。そこで研究の進捗について発表するのですが、厳しい意見を含め、非常にレベルの高い意見や助言をもらえることで、成長できたと思います。

「さきがけ」がステップアップのきっかけとなり、その後、テニュア・トラック制度（若手研究者が、任期付きの雇用形態で自立した研究者としての経験を積み、厳格な審査を経て安定的な職を得る仕組み）を利用して電気通信大学の教員になりました。そしてようやく昨年、縁あって慶應義塾大学に着任し安定的な職を得ることができました。今は、学部生と院生計6名を抱える研究室を運営していく側になり、責任の重さと、大きなやりがいを感じています。

――女性研究者として苦労したり、逆に得をしたりしたことはありますか？

あまり意識したことはありませんね。自分が女性であることが意識にものぼらないというか、「女性だから…」と特別に考えたことはなく、いつも自然体でいます。得したことといえば、目立つので覚えてもらえることですね。また最近は、女性研究者を後押しする制度もあり、得しているかもしれません。仮に得をしているとしたら、その分ちゃんと成果を出して、お返ししなければと思っています。

――研究の合間の息抜きは？

普段は慌ただしく過ごしているので、オフのときは夫と一緒に買い物をしたり、旅行に行ったりして、ゆったり過ごすようにしています。研究にはやはり、体力と集中力が欠かせませんので、そのためには適度な休息が必要ですね。研究室の学生たちにも、やる時には集中してやる、休む時には休むメリハリのある研究生活を送って欲しいなと思います。

◎ちょっと一言◎

● 学生さんから：本当にタフな方だなぁと思います。どんなに大変なときでも、時間にきちんと来て、集中して研究する姿勢は、研究者の鑑（かがみ）です。先生を見習おうと、僕も体力づくりを始めました。

（取材・構成　田井中麻都佳）

さらに詳しい内容は
http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai
YouTube 慶應義塾大学チャンネル研究紹介ビデオ
http://www.youtube.com/watch?v= D3wvAgDzPQc

常に新しいことに
チャレンジする精神を
持ち続けたいと思います。

早瀬潤子 Junko Hayase

専門分野は量子光エレクトロニクス。特に超短光パルスを用いた半導体ナノ構造の光物性、量子制御、量子情報応用に関する研究に従事。2001年上智大学にて博士（理学）を取得後、（独）理化学研究所基礎科学特別研究員、（独）情報通信研究機構専攻研究員、（独）科学技術振興機構さきがけ研究者、電気通信大学先端領域教育研究センター特任助教を経て、2010年慶應義塾大学理工学部准教授、現在に至る。2009年度文部科学大臣表彰・若手科学者賞。

早瀬研究室ができるまで

2010年4月に発足した早瀬研究室。どのように実験室が出来上がっていくのか、立ち上げの様子を紹介します！

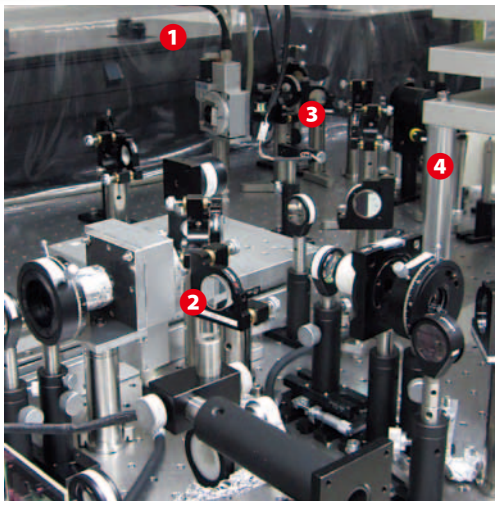
2010年4月
何もない実験室で0からのスタート。まずは空調・電気工事をし、実験環境を整えます。未来を想像しながら、部屋のレイアウトを思案中…。

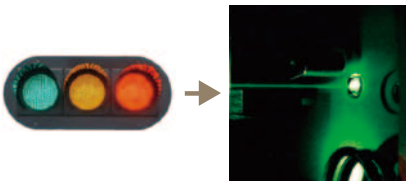
2010年7月
苦労して獲得した資金で、実験機器を少しずつ揃えていきます。写真は光の実験に使用する特殊な実験台の搬入の様子。

2011年6月
実験台の上にずらりと並んだ光学部品は、全て学生の手により組み立てられたもの。オリジナルの測定システムで、大きな成果を目指します！

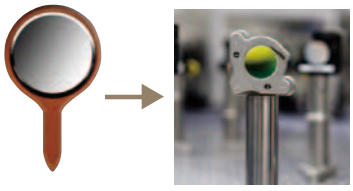
研究室のこだわりPoint!

実験室で使用している機器の性能を、身の周りのものと比較して説明します。

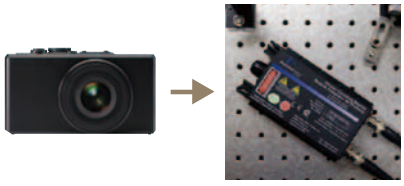




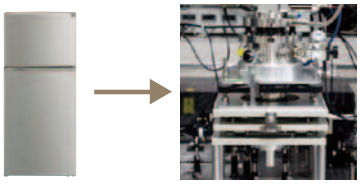
1 超短パルスレーザー：光の実験に必要不可欠なレーザー。波の位相の揃った光を発生できる点が、LEDや太陽光と大きく異なる点です。中でも早瀬研究室で用いられるのは、たった10^{-13}秒の極短い時間に瞬間的に強い光を出す超短パルスレーザー。1秒間に地球を7周半もする光が、髪の毛の太さほどの距離しか進めないくらい短い時間です。



2 誘電体多層膜ミラー：私たちが普段用いているミラーは、アルミ（金属）がコーティングされたもので、反射率は80%程度。一方、光の実験で主に用いられるのは、電気を通さない誘電体という材料を何層も積み重ねて作られた特殊なミラー。設計により、反射率をほぼ0%から100%まで自由に変えることができます。



3 単一光子検出器：光のエネルギーの最小単位である光子を、1つ1つ数えることのできる超高感度な光検出器。光子1つ分のエネルギーは、LED電球のエネルギーの100億分の1。最新式デジカメの1000倍以上の感度をもつ特殊な半導体素子を用いて、たった1つの光子を捉えます。



4 極低温冷凍機：半導体量子ドットを冷やすための冷凍機。冷やすのは量子力学的性質を長持ちさせるため。液体窒素よりもさらに低温の液体ヘリウムを用いて、－270℃の世界を実現します。家庭にある冷凍庫（温度－18℃程度）と比較すると、いかに低温かよくわかりますね。

私の本棚

My favorite books

Ultrafast Spectroscopy of Semiconductors and Semiconductor Nanostructures　半導体ナノ構造における超高速非線形分光の研究事例が数多く掲載されているレビュー的な本。半導体研究の奥深さ、多様さをうかがい知ることができます。予想通りの実験結果が得られやすい「原子」と、厳密な理論構築が難しく予想と異なる実験結果が得られやすい「半導体」。人工原子と呼ばれる半導体量子ドットは、「原子」と「半導体」の両方の面白さを享受できる、非常に興味深い半導体ナノ構造であると言えます。

Nonlinear Optics　「非線形光学」の教科書。学部４先生の時に輪講で勉強して以来、ずっとお世話になっています。私が修士１年生の時に初めて参加した国際会議で、著者の R. W. Boyd 博士に偶然お会いして感激した覚えがあります。若輩者の私に対しても、とてもフランクに接していただきました。身分や経歴などに関係なく対等に議論できる、そんなところが研究者の良いところだと実感した出来事です。

探偵ガリレオ　東野圭吾さんの本が好きで、時間があるとよく読んでいます。「秘密」「白夜行」など面白い作品が数多くありますが、中でも「探偵ガリレオ」シリーズは、科学を題材にした異色の理系サスペンス。自然科学の法則と、様々な事件のトリックを結び付ける柔軟な発想力には頭が下がります。ふと東野圭吾さんの経歴を見ると、電子工学科卒業でエンジニアとして働いていたとのこと。どうりで物理に詳しい訳です。

鏡の中の物理学　著者はノーベル物理学賞に輝いた朝永振一郎博士。摩訶不思議で理解の難しい量子力学の世界が、明快かつわかりやすく書かれています。中でも短編「光子の裁判」は必見。光は波でもあり粒子であるという二重性を、「波野光子」を被告とする裁判仕立てでユーモアたっぷりに解説しています。量子力学は難しくてとっつきにくい、と思っている人に読んで欲しい本です。

基礎からの量子光学　光そのものや、光と物質の相互作用を量子力学的に取り扱う研究分野を「量子光学」と言います。本書は量子光学の基礎理論から、量子情報技術の実用化に向けた最近の取り組みまで網羅した教科書で、量子光学をこれから学ぼうとする人におすすめの本です。私が初めて執筆に携わった（といっても１章分ですが）本として、思い入れがあります。私以外にも、慶應義塾大学の先生２名が著者に名を連ねています。

量子ドットエレクトロニクスの最前線　日本における量子ドット研究の最近の成果が網羅された本。量子ドットは日本人研究者によって初めて提唱された日本発祥のナノテクノロジー。今では多くの日本人研究者が、世界の最前線で活躍されている研究分野でもあり、日本の科学技術の裾野の広さを垣間見ることができます。私も１章分執筆させていただいている、思い入れのある本です。

若手研究者と競争的研究資金

大学における研究活動を資金面で支えるもののひとつに、競争的研究資金があります。競争的研究資金とは、研究者が提案した数年間の研究計画に対して複数の研究者が評価を行い、採択を決める公募形式の研究費のことです。競争的研究資金の代表格は科学研究費補助金ですが、とくに若手研究者による萌芽的な研究を助成するものとして、JST（科学技術振興機構）の「さきがけ」などがあります。

早瀬准教授はインタビューで、「“さきがけ”の合宿で若手研究者やアドバイザーと率直な意見交換を行ったことで、成長できたと思います」と語っていました。早瀬准教授は、平成 22 年度に、世界をリードすることが期待される潜在的可能性を持った研究者に対する研究支援制度である最先端・次世代研究開発支援プログラムにも「単一光子－半導体量子ドット電子スピン集団励起間の革新的量子インターフェースの実現」というテーマで採択されています。

このような競争的研究資金は、ベテランに比べて研究を遂行する環境がまだ整っていない若手研究者の育成に一役買っていますが、その一方で、公募テーマが今日的な問題解決に対して設定され、どちらかというと短期間で成果を期待する課題になりがちな面も否定できず、もっと長期的視野で基礎研究に投資できる仕組みを整備すべきだという声もあります。

今年 3 月 11 日の東日本大震災を受けて、科学技術政策担当大臣より「当面の科学技術政策の運営について」（平成 23 年 5 月 2 日）が発表され、情勢を鑑みた科学技術政策の見直しが行われています。今後の科学技術政策がどのような方向へ進むのか、各界からの注目が集まっています。

理 工 学 Information

イノベーション創出戦略マネジメント講座（ソニー寄附講座）公開シンポジウム 2011　人類・社会の新たなる発展をめざして「第1回　イノベーションと雇用」

2011 年 10 月 14 日（金）18：00 ～
慶應義塾大学日吉キャンパス　協生館藤原洋記念ホール
参加費無料・事前申込制
http://www.koukai-sympo.net/portal/

大学院理工学研究科に設置されている寄附講座による公開シンポジウムを今年度も３回開催します。申し込みは上記 URL からどうぞ。
※講演の日時は、節電対策等の影響で変更になる可能性があります。
最新の情報は、各ホームページにてお知らせします。

©慶應義塾大学

公開シンポジウム 2010 の様子

今後のイベント

- 2011 年 10 月 28 日（金）　第 12 回 KLL 産学連携セミナー
- 2011 年 12 月　9 日（金）　第 12 回 KEIO TECHNO-MALL
- 2012 年　2 月 24 日（金）　第 13 回 KLL 産学連携セミナー

詳細は順次、慶應義塾先端科学技術研究センター（KLL）の Web サイト（http://www.kll.keio.ac.jp/）にアップされます。

WEB サイトナビ

東日本大震災で被災されました皆様へ心よりお見舞い申しあげます。
東日本大震災の復旧・復興に関連した学内の研究活動を紹介するポータルサイトが開設されました。以下の URL からご覧いただけます。
http://www.rcp.keio.ac.jp/srp/20110624.html

編集後記

早瀬研究室は、まだ走り出したばかり。学生によれば、「研究室を作っていくのが面白い。雑用も楽しんでいます」とのこと。きれいに整頓された土足禁止の研究室では、節電のため 1 人 1 台のミニ扇風機を導入。早瀬准教授の柔和な人柄ゆえか、穏やかながら、しっかりと信頼感のただよう研究室でした。

薄暗い廊下の向こう、窓からは明るい日差しが差し込み、今日も新しいアイデアがキャンパスの随所できらめいています。矢上キャンパスは、ただいま節電中。

（平良沙織）

「新版　窮理図解」twitter はじめました！　http://twitter.com/#!/keiokyuri
取材のこぼれ話や理工学 Information、メディア情報などを発信しています。
7号の感想をぜひ聞かせてください！

新版 窮理図解

No.07　2011　August

編集　新版窮理図解編集委員会
写真　邑口京一郎
イラスト　中村知史
デザイン　八十島博明（GRID）
編集協力　サイテック・コミュニケーションズ
発行者　青山藤詞郎
発行　慶應義塾大学理工学部
〒 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1
問い合わせ先（新版窮理図解全般）
kyurizukai@info.keio.ac.jp
問い合わせ先（産学連携）
liaison@educ.cc.keio.ac.jp
web 版　http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai
twitter　http://twitter.com/#!/keiokyuri