

All physics converge into quantum information

量子は何かという問いに対し誰もが様々な答え方をするでしょう。ある人は光子やスピンのようにミクروسコーピックなものが量子だと言い、ある人は回路のようなマクروسコーピックなものでも量子になり得ると言うでしょう。結局、粒子と波の両面性を示すものは量子だということで、その適用範囲はこれからもどんどんと増え、様々な分野を量子化していくことでしょう。現状では量子計算、量子通信、量子計測、量子生命の4つの大きな柱が日本では掲げられていますが、当然量子認証、量子マネー、量子ゲーム、量子医療、量子天文学、量子気象学、、と応用は尽きないと思います。私は光物性、特に励起子物性の研究者からスタートしましたが、その後半導体光デバイス、フォトニック結晶、量子光学、スピントロニクス、光通信、量子暗号通信、量子計算、量子センシングと様々な分野に触れることができ、最近では超伝導やオプトメカニカル結晶とさらに幅を広げていっています。このような多岐に渡る分野に関われるのは、実験屋としてはとても幸せなことです。電気回路が超伝導回路によって量子化されたように、光回路を構成する主要デバイスである EOM や AOM などのように電気と光を接続するデバイスも量子化されようとしており、まさに第二の量子革命を実感しています。この勢いで進めば、全ての装置が量子化することは夢ではないと思います。ネットワークを構成する装置が全て量子化すれば、当然ネットワーク全体が量子化され、それが量子インターネットという形で社会に出てくるのだと思います。ただ、量子インターネットをどのように利用するかというアイデアはまだ明確にはなく、先に上げた量子認証、量子マネー、量子ゲーム、量子医療、量子天文学、量子気象学などと言ったところでしょう。

日本では、量子情報に関するムーンショット型研究開発事業が昨年12月に立ち上がりました。「ムーンショット」とは、「月へのロケット打ち上げ」の意味で、ジョン・F・ケネディの1961年に始まるアポロ計画が言葉の由来です。当時は夢物語だった有人月面着陸をアメリカはこの合言葉を元に成功させ、ロケットや宇宙船の開発だけでなく通信、コンピュータなど周辺技術の発展に大きく寄与しました。ムーンショット全体ではAI、ロボット、バイオ、環境、量子、医療など7つの目標が制度化され、そのうち目標6がJSTの事業化した量子情報分野の「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」です。目標6はさらに3つのカテゴリー「ハードウェア、ネットワーク、ソフトウェア」に分けられ（図参照）、このうちネットワークカテゴリーのプロジェクトマネージャー（PM）に私、小坂が就任しました。プロジェクト名は「量子計算網構築のための量子インターフェース開発」です。

量子コンピュータの開発が日米欧中で爆発的に加速していますが、その性能はトランジスタに例えれば、真空管から漸く半導体に移行した程度と言えます。その根本的課題は、トラ

ンジスタが TTL に代表される閾値処理により誤り耐性を獲得したのと同様の誤り耐性を、現状の量子ビットは未だ獲得していないことです。既に理論的には様々な方式が開発されていますが、その代表である表面符号は一つの論理量子ビットを構成するのに膨大な数の物理量子ビットを要求し、このままでは月が遠すぎてかすんで見えます。ムーンショット目標 6 はこの問題を様々な物理系に立ち戻って解決しようとするもので、小坂プロジェクトでは量子ネットワークによる量子コンピュータの分散化で課題解決を目指します。単純なネットワーク接続ではかえって性能が劣化するので、インターフェース自体が誤り耐性型量子メモリを持ち、量子ビットを光量子でネットワーク接続することで規模が拡大できるだけでなく、誤り耐性まで獲得することを目指します。本プロジェクトはダイヤモンド量子メモリ、オプトメカニカル結晶、ピエゾマイクロ波共振器の3つのチームにより構成され、横国、東大、京大などの大学、産総研、物材機構、量研機構、理研などの国研が参画します。本学からは馬場俊彦教授、吉川信行教授、小坂（兼務）も課題推進者（研究代表者）となり各研究グループを構成します。ムーンショット研究の特徴は、科研費などのボトムアップ方式とは逆に、国が策定する計画に基づきトップダウンで方針決定されるもので、PM としては基礎研究と社会実装という両面性だけではない極めて困難な舵取りを要求されます。本学では、昨年 10 月に横浜国立大学に発足した量子情報研究センターを軸に活動を支援していきます。

量子コンピュータとは全く別のアプリケーションとして、量子暗号の開発が進んでいます。その最も重要かつ困難な課題は量子中継器の開発です。日本では 2000 年からその開発が進められてきましたが、昨年総務省の委託研究「グローバル量子暗号通信」という国家事業が開始されました。そのうちの一つの課題が量子中継技術であり、私が課題代表を務めています。横浜国立大学の量子メモリを用いた量子中継、東芝の全光量子中継、古河電工の波長多重量子中継の3つが柱となり、東大、産総研、物材機構、NICT の 4 機関がナノテクノロジーをベースとした周辺技術を支えます。量子中継器は光通信機能をもつ小型の量子コンピュータとも言え、その開発は量子コンピュータの開発と同程度に困難なものです。

最後に、量子情報の分野は高エネルギー科学や宇宙科学の分野に似ています。これは単に物理的な意味ではありません。どちらも非常に多くの知的労働力を必要とし、とても一国でこの労働力を賄えるものではありません。高エネルギー科学における加速器実験施設や宇宙科学における国際ステーションのように、様々な分野の研究者が集まる国際的な場を形成し、知の集積を図ることが不可欠です。高エネルギー科学の研究に不可欠な道具としてインターネットが生まれたように、量子コンピュータの研究に不可欠な道具として量子インターネットが生まれるのかもしれませんが、これがさらに高エネルギー科学や宇宙科学の進展に寄与し、スパイラル的に人類の知的能力が増していくように思います。



We choose to go to the Moon.
John F. Kennedy

「ムーンショット」とは、人々を魅了する野心的な目標を掲げて世界中の研究者の英知を結集しながら困難な社会課題の解決を目指し、挑戦的な研究開発を進める研究開発制度。

Moonshot for Human Well-being

内閣府資料（令和2年7月）