

量子技術の実用化推進WG（第8回）・参考資料

量子技術イノベーション 創出基盤の国内外現状

2023年2月20日

JST 研究開発戦略センター



1. | 産業人材の確保・育成

日本の量子人材戦略

量子技術イノベーション戦略における人材戦略の取組状況

- 高等教育段階で教育・研究環境等を充実・強化し、**優れた若手研究者・技術者を戦略的に育成・確保**
- 早期から量子技術を使いこなす高い知識・技能を持つ「**量子ネイティブ (Quantum Native)**」を育成するとともに、ムーンショット等の量子技術のファンディング事業を通じて研究者層の拡大を図る
- 今後、量子技術イノベーション協議会等の場を通じて、産業界への量子人材の輩出の在り方や民間コンソーシアムによる取組等を活用したリカレント教育の充実を検討

IPA 未踏ターゲット事業 (対象:未踏的IT人材*) <量子技術イノベーション戦略との連携施策>

○「量子コンピューティング技術を活用したソフトウェア開発」に興味を持つ**未踏的IT人材**からプロジェクトを募集し、優れた能力と実績を持ち合わせたプロジェクトマネージャー等が指導・助言をする。加えて、活動実績(育成従事実績)に応じた活動費提供を行う。 ※ITを駆使してイノベーションを創出できる優れたアイデア・技術力をもつ人材

【実施内容】「アニーリングマシン」や「ゲート式量子コンピュータ」を活用したソフトウェア開発を通じた人材育成

科学技術イノベーション創出に向けた大学フェローシップ創設事業

○**博士後期課程学生の処遇向上** (生活費相当額 (180万円以上) の支援を含むフェローシップと**キャリアパスの確保** (博士課程修了後のポストへの接続) を、全学的な戦略の下で、一体として実施する大学への新たな補助金を創設(対象:博士後期課程学生)

光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)

○**FlagShipプロジェクト、基礎基盤研究:**
量子科学技術をリードする**卓越した研究人材の育成** (TA、RA ※の雇用を含む)
(対象:大学院生、若手研究者)

○**人材育成プログラム:**

- ①体系的に学習できる共通的なコアカリキュラムの開発(対象:大学生以上)
- ②各教育機関の特色を生かした先進的な人材育成プログラムの開発(対象:高校生以上)

※TA: Teaching Assistant, RA: Research Assistant

NICT量子人材育成プログラム **NQC**

量子ICTネイティブ人材を育成する講習会など大学、企業などと連携しながら実施

○**探索型/課題解決型研究:**
量子ICT知識・技能の応用力
対象:修士・博士課程、若手研究者など
(量子技術に関する基礎知識・技能を有する者)

○**講習会:基礎知識 (座学講習) + 技能習得 (演習)**
対象:高専生、大学生、大学院生など

トップクラス
研究者・エンジニア

各分野に量子技術を
応用できる人材を輩出



若手
研究者・
エンジニア

大学院生

大学生、高専生

高校生

量子ネイティブ(Quantum Native) 育成

リカレント教育

人材育成プログラム

Q-LEAP人材育成プログラム <https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/>

研究開発課題名	研究代表者	所属機関	役職
量子技術高等教育拠点標準プログラムの開発	根本 香絵	情報・システム研究機構国 立情報学研究所	教授
実践的研究開発による全国的量子ネイティブの育成	大関 真之	東北大学大学院情報科学研究科	准教授
量子技術教育のためのオンラインコース・サマースクール開発プログラム	野口 篤史	東京大学総合文化研究科	准教授
多様な専門分野で活躍する「量子ベース思考型」人材育成のための体験型プログラムの開発	岸本 哲夫	電気通信大学大学院情報理工学研究科	准教授
Quantum Transformation イノベーター人材育成の事業化の研究	崔 熙元	JellyWare 株式会社	代表取締役

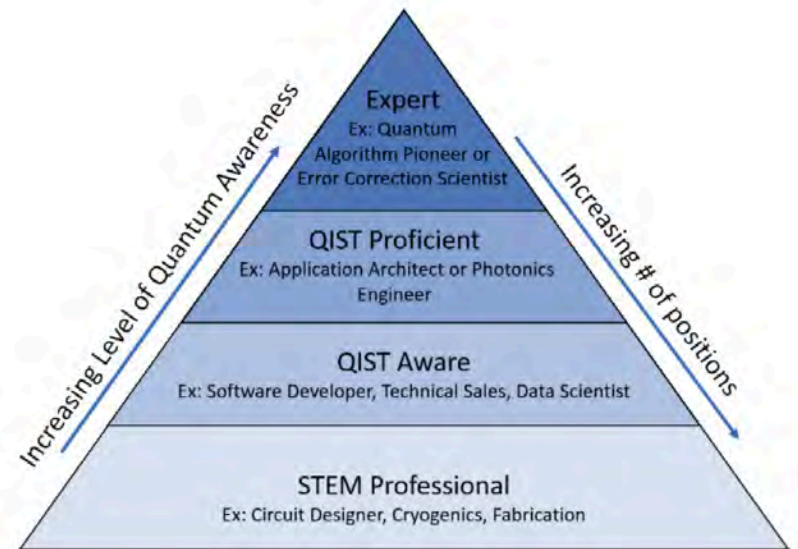
量子技術フェロースhip [科学技術イノベーション創出に向けた大学フェロースhip創設事業。 https://www.jst.go.jp/shincho/program/fellowship.html](https://www.jst.go.jp/shincho/program/fellowship.html)

機関	フェロースhip名称	機関	フェロースhip名称
東北大学	東北大学高等大学院博士学生フェロースhip(量子・スピントロニクス分野)	京都大学	未来を創る先端量子技術創出フェロースhip
筑波大学	筑波研究学園都市のオープンイノベーション拠点と連携した量子分野横断型人材育成フェロースhip	大阪大学	大阪大学フェロースhip「量子リーダー人材」
千葉大学	千葉大学量子科学フェロースhip	大阪市立大学	南部・アインシュタインフェロースhip
東京大学	量子科学技術フェロースhip	広島大学	広島大学大学院リサーチフェロースhip制度(量子分野)
名古屋大学	名古屋大学融合フロンティアフェロースhip(量子科学分野)	九州大学	九州大学先導的人材育成フェロースhip事業(量子分野)

米国：QIST労働力開発のための国家戦略プラン

Quantum Information Science and Technology Workforce Development National Strategic Plan

- 国家科学技術会議（NSTC）の量子情報科学小委員会（SCQIS）が発行したQIST労働力開発のための国家戦略計画（2022年2月）
- 人材不足がQISTの進歩の妨げになるとの認識のもと、一連のアクションを通じて**すべてのレベルでのトレーニングと教育の拡大を通じ、QISTの労働力を増やすこと**を強調。
- 特定された4つの主要なアクション：
 1. 短期的・長期的な視点で、QISTエコシステムにおける労働力ニーズの理解を深める。
 2. アウトリーチや教育を通じて、幅広い聴衆にQISTを紹介する。
 3. 専門的な教育と訓練の機会におけるQIST固有のギャップに対処する。
 4. QISTとその関連分野でのキャリアをよりアクセスしやすく公平なものにする。



<https://www.quantum.gov/scqis-releases-strategic-plan-for-qist-workforce/>

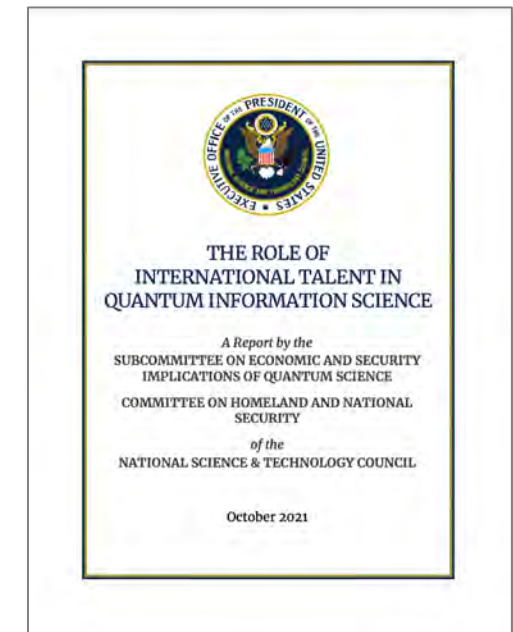
©2023 CRDS

米国：報告書「量子情報科学における国際人材の役割」

The Role of International Talent in Quantum Information Science

- 国家科学技術会議（NSTC）の量子科学の経済的および安全上の影響に関する小委員会（ESIX）が発行（2021年10月）
- 世界中で量子科学技術に関する教育を受けた人が継続的に不足していると主張。米国が技術でリーダーシップを維持するためには、**労働力を増やすことが重要**と指摘。

1. 米国は、研究安全性の懸念との適切なバランスを取りつつ、才能のある国際的な研究者を歓迎し続けるべき。
2. 米国連邦組織は、活発で安全な国際的QISTエコシステムの確保のために、同盟国・パートナーとの緊密な協力を継続する必要がある。
3. 量子情報科学に関するNSTC小委員会（SCQIS）は、QIST労働力開発のための5年間の戦略プランを策定する必要がある。
4. QISTの研究、開発にファンディングする連邦組織は、知財保護のための包括的な技術保護プランを策定する必要がある。



https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2021/10/2021_NSTC_ESIX_INTL_TALENT_QIS.pdf

米国 : National Q-12 Education Partnership

量子労働力強化のための産・官・学・教育コミュニティのパートナーシップ (2020年8月)

- 大統領府科学技術政策局 (OSTP) とNSFが主導するコンソーシアム。NSF資金によるプログラム "Q2Work" (イリノイ大アーバナシャンペーン校、シカゴ大、ピッツバーグ大が参画) が中心。
- 産業界 (IBM, Intel, Google, Microsoft, Boeing, Lockheed Martinなど)、学術界 (OSA, APS, SPIEなど)、教育コミュニティ (American Association of Physics Teachers) など18の企業・団体がメンバー。
- 次世代の量子リーダーを刺激するための **"K-12 Quantum learning tools"** (中学・高校でのアウトリーチ、大学などの学習教材や量子関連カリキュラム基盤) を、**米国教育者と協力して構築**。実践的な体験のための教室ツールの提供から、教材開発、量子キャリアへの道筋のサポートまで、強力な量子学習環境を確保。教育者が学生に量子キャリアの機会を与えられるような環境を整える。

National Q-12 Education
Partnership

<https://q12education.org/>

米国 : NSF Research Traineeship Program

大学院生対象の教育プログラムで量子情報科学・工学 (QISE) 分野を重点化 (2020年12月)

<https://www.quantum.gov/the-nsf-research-traineeship-nrt-program-adds-qise/>

- 大学院生対象の教育プログラム (~\$55M) で、量子情報科学・工学 (QISE) とAI分野を、他のNSF「Big ideas」6分野と同様に重点化。
- NRT-QL (The Quantum Leap: Leading the Next Quantum Revolution) として採択。

Accelerating Quantum-Enabled Technologies

(U. Washington、2020年-、\$3M/5年)



ワシントン大の博士・修士課程学生対象の12-15ヶ月トレーニングプログラム。量子情報/量子コンピューティングに関する「Introduction」「Implementations」「Advanced Topics」の3コース

<https://www.quantumx.washington.edu/training/aqet/>

A Program for Training a Quantum Workforce

(Colorado School of MinesとSan Jose State U.の共同、2021年-、合計\$3M/5年)

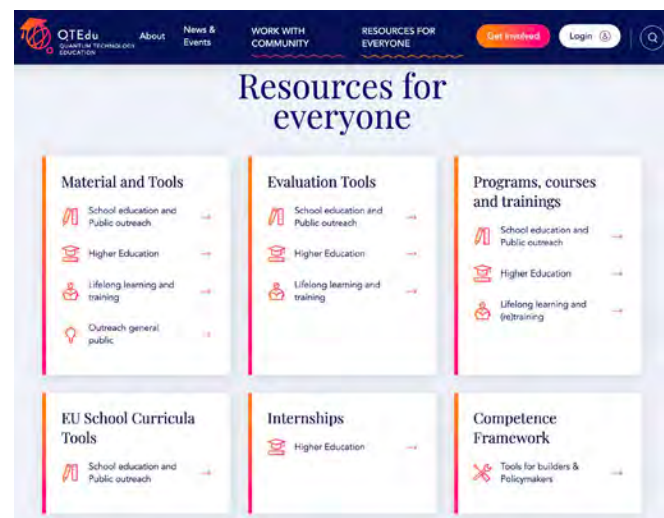
他分野の学生に量子情報科学技術の基本を紹介するトレーニング資料開発、学生に企業や国研で行われている最先端技術・研究へのアクセス・経験提供、学生のリクルート・メンタープログラムなどを実施。量子情報科学技術における労働力の多様性確保を目指す。

https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=2125899&HistoricalAwards=false
https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=2125906&HistoricalAwards=false

EU : QT Flagship 「QTEdu」プロジェクト

教育・アウトリーチプログラムに関するポータル機能を担うPJ

- 教育&トレーニング、アウトリーチ、ジョブ&インターンシップ、イベントに関する情報提供
- 「第2次量子革命」のためには、教育とアウトリーチがカギ。
- そのために、教育リソースの探求による学習、さまざまなプロジェクトへの資金提供、最先端の教育とアウトリーチ活動およびツール作成、が貢献する。
- 以下4つのデータベースを、量子コミュニティー（学習者、教育者、政策立案者）をサポートするために提供。
 1. 教育コース・プログラムなど（公式・非公式の）**教育&トレーニング機会情報**（77件）
 2. 量子技術の普及とトレーニングのための資料、活動、内容、およびツールなどの**アウトリーチ資料**（49件）
 3. 企業や研究機関での学部生および大学院生向けの**ジョブ&インターンシップ情報**（87件）
 4. 研究、教育、および会議、会議、ワークショップ、学校、ハッカソン、フェスティバルなどのアウトリーチのための**イベント情報**



<https://qtedu.eu/>

EU : QTedu 「能力フレームワーク」

教育・訓練プログラム設計のための能力・スキルのマップ



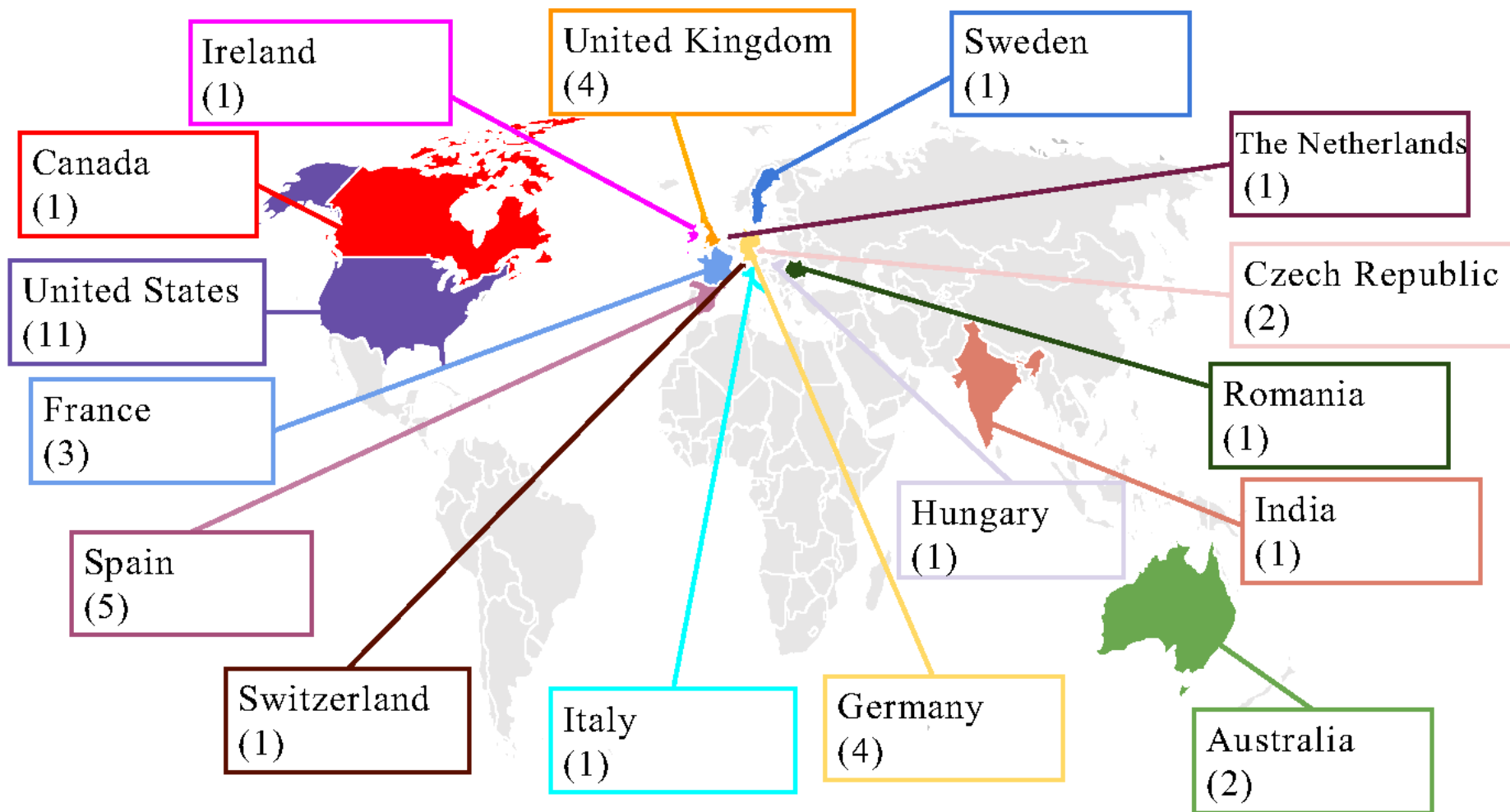
節ごとに細かく階層化されている



冊子版も提供されている

<https://qtedu.eu/european-competence-framework-quantum-technologies>

量子技術に特化した修士プログラム



M. Kaur et al., Defining the quantum workforce landscape: a review of global quantum education initiatives, *Optical Engineering*, 61, 8, 081806 (2022)

産業人材育成の戦略

エンドユーザー企業がとりうる戦略の重要度は短期・中期・長期で変わる

戦略	短期	中期	長期
量子技術コンサルタントの利用	高	高	中
戦略・訓練サービス提供者とのパートナーシップ	高	高	中
イベント・ワークショップの実施	高	高	中
スタートアップとの協力・出資	高	高	中
産学連携（共同研究、博士学生支援、インターンシップ）	高	中	低
コンソーシアムや産業団体への参加	高	中	中
外部の訓練プログラム参加によるスキルアップ	高	中	低
内部の訓練プログラム実施によるスキルアップ	低	低	中
新たに人材を雇用する	低	中	高
量子技術を用いたビジネスを試行する	低	中	高
自社での研究開発、新たな知見の獲得	低	中	高

低← 重要度 →高

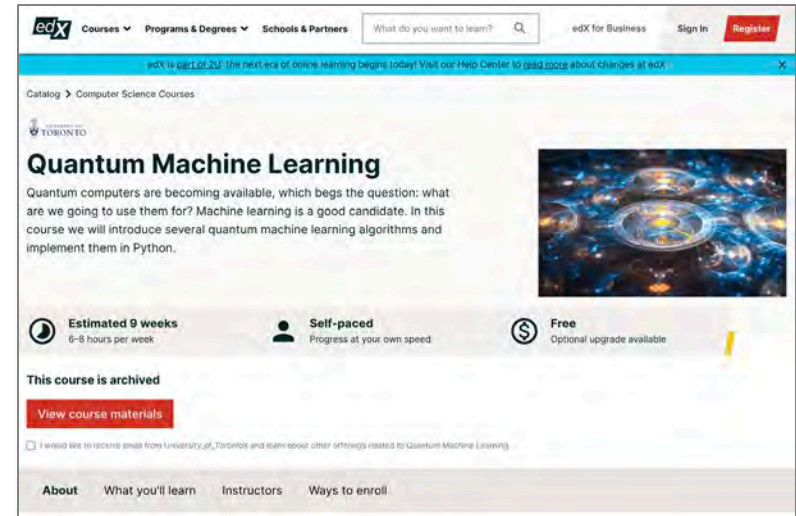
オンラインコース (MOOC)

The Quantum Internet and Quantum Computers: How Will They Change the World? (デルフト工科大学、6週間)



<https://online-learning.tudelft.nl/courses/the-quantum-internet-and-quantum-computers/>

Quantum Machine Learning (トロント大学、9週間)



<https://www.edx.org/course/quantum-machine-learning>

edX上には他にも

Introduction to Quantum Computing for Everyone (シカゴ大学)

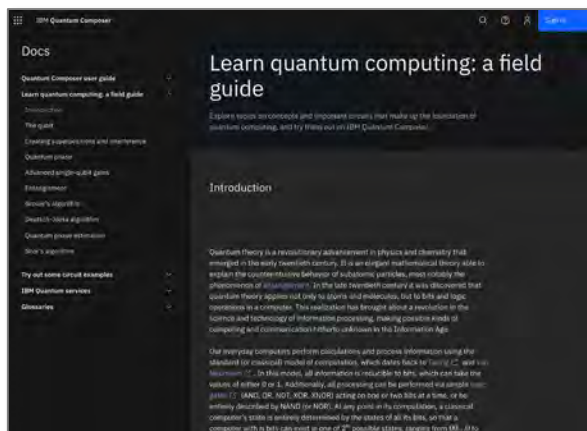
Architecture, Algorithms, and Protocols of a Quantum Computer and Quantum Internet (デルフト工科大)

Introduction to Quantum Transport (パデュー大学)

など様々なコースが用意されている。

ハンズオン・チュートリアル (プログラミング)

クラウドのチュートリアルとして提供
(IBM、Xanadu)

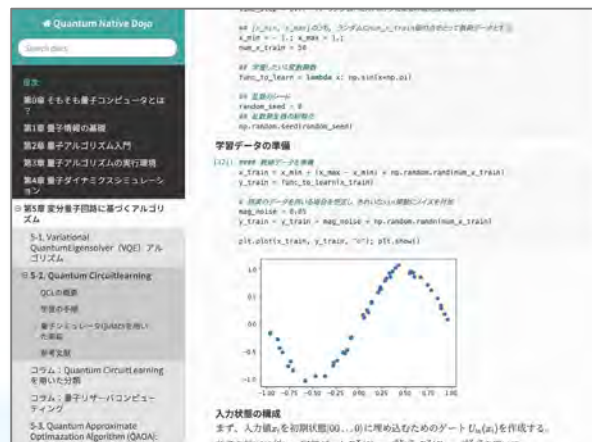
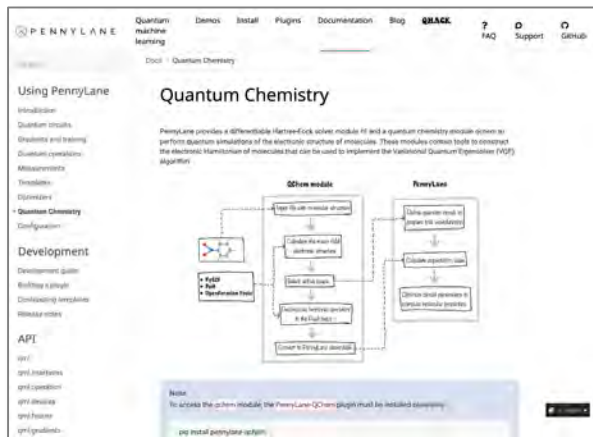


<https://quantum-computing.ibm.com/composer/docs/iqx/guide/>

プロジェクトの成果展開として提供
(シカゴ大EPIQC)



量子回路シミュレーター込みでコード公開
(Quantum Native Dojo)



教科書 (主に量子コンピューティング)

						
価格・ページ数 発売日	19530円・962頁 2004/12/24	6314円・518頁 2019/11/28	3960円・332頁 2020/8/27	4840円・368頁 2020/8/28	3520円・289頁 2020/11/9	3300円・256頁 2021/11/26
量子計算の基本 (行列, 量子回路 等)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
データ処理周り (Encoding, QRAM 等)			✓	✓	✓	
量子情報理論 (Holevo限界 等)	✓					
量子シミュレーション (時間発展)	✓			✓		
位相推定 (ショアのアルゴリズム)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
量子化学計算 (位相推定でFull-CI)					✓	
グローバルアルゴリズム (検索, 最適化)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
量子機械学習 (HHL, QSVM, QPCA等)			✓	✓	✓	
NISQアルゴリズム (VQE, QCL等)				✓	✓	✓
計算複雑性理論 (BQP, QMA, 量子超越等)	✓				✓	✓
量子暗号鍵配送、耐量子計算機暗号	✓					
量子誤り訂正 (スタビライザ, Clifford等)	✓	✓			✓	✓
表面符合 (符号距離、格子手術等)					✓	
プログラミング言語・コンパイラ		✓			✓	✓
ハードウェア (超伝導, イオントラップ 等)	✓					✓
量子コンピュータアーキテクチャ					✓	
量子コンピュータの歴史・開発の現状	✓	✓			✓	✓
最近のトピックス (2014年以降)		✓			✓	✓
回路型以外の計算モデル (測定型 等)						
量子アニーリング				✓		✓
演習問題・ハンズオン教材	✓	✓	✓			

シンガポールの量子人材戦略

海外リーダー招聘 + 若手育成で伸長

シンガポール国立大学（NUS）に量子技術センター設置（2007）

- 研究テーマは量子セキュア通信（光ファイバー、人工衛星）、量子コンピューティング・シミュレーション、量子センシング、と多岐にわたる。

各分野のリーダーに欧州トップ人材を招聘

- 量子情報・通信 → A. K. Ekert
- 量子センシング → V. Vedral
- 量子マテリアル → A. H. Castro-Neto



A.K. エカート



V. ヴェドラル



A.H. カストロ・ネト

ポーランド出身（2003年～）
情報、セキュア通信
1990年、新しい量子暗号考案
オックスフォード大でも講義

セルビア出身（2006年～）
センシング、基礎科学
2022年夏～ 退任

ブラジル出身（2010年～）
材料（2次元材料とグラフェン）
複数のベンチャーでCEO兼務

量子工学プログラム（2018～）

- 3つの重点分野・実現技術で合計27 PJsが採択
- 第2期「QEP2.0」では3つの施策を実施予定

施策	内容
量子コンピューティング・ハブ	シンガポール初の独自の量子コンピュータかを設置。企業や政府機関がクラウドネットワーク経由でなく直接アクセスして検証できるようになる。
国立量子ファブレス・ファウンドリー	マイクロ・ナノ加工を必要とする量子デバイス開発を通じて研究コミュニティを支援。国内外・産学の橋渡し役を担う。
量子セキュア通信技術の国内試験	重要インフラや機密データを扱う企業に強固なネットワークセキュリティ提供を目指す。NRFの支援で、民間企業と政府機関の15の組織が参加。

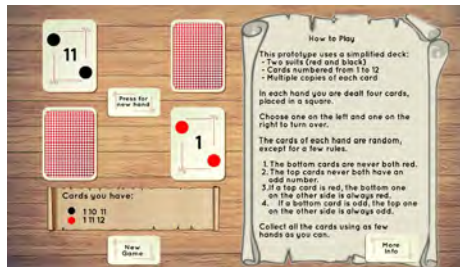
2. | アウトリーチ

QPlayLearn

オールト大学・ヘルシンキ大学が開発したゲーム・アート・動画などの教材群

Quantum Solitaire

ソリティアのようなカードゲーム。量子もつれについての直感的な理解がねらい。カード間の相関関係に関する知識を利用して、できるだけ少ないハンドですべての黒と赤のカードを集める。



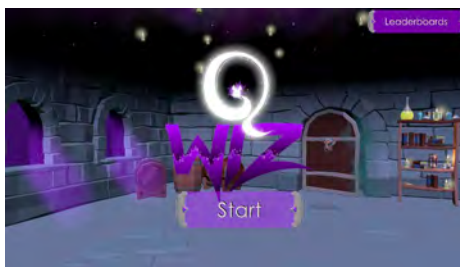
Q | Cards>

量子ビットやゲートなど量子コンピューティングの基本的な概念を学習できるカードゲーム（テーブル版・オンライン版）。ゲームプレイで作成された量子回路はIBMのQiskitで実際に実行できる。



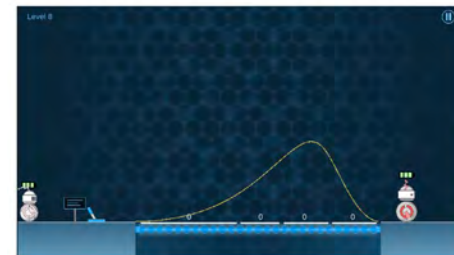
QWiz

量子魔法使いの見習いとして行動するゲーム。量子力学の法則に従って動く液体をの挙動を理解するのがゲーム上の目的で、左右のハンドル操作で液体をガラス容器に移動させる。



Psi & Delta

粒子の波のような振る舞いを探るパズルゲーム。光と電子との相互作用を使う敵を回避しながらゴールを目指す。2人プレイも可能。



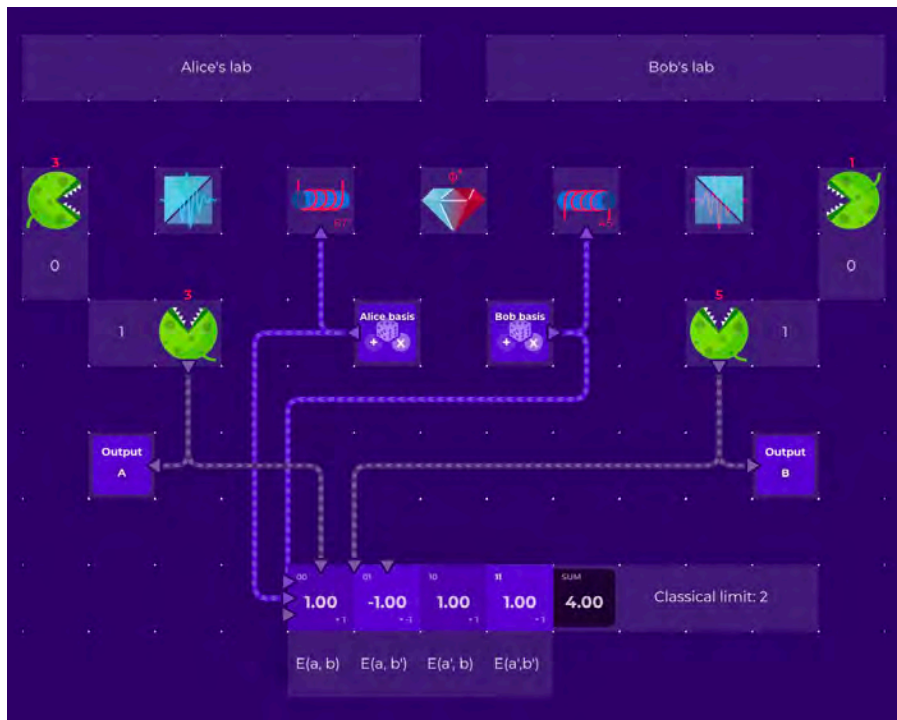
<https://qplaylearn.com/>

Quantum Lab - Virtual Optical Table

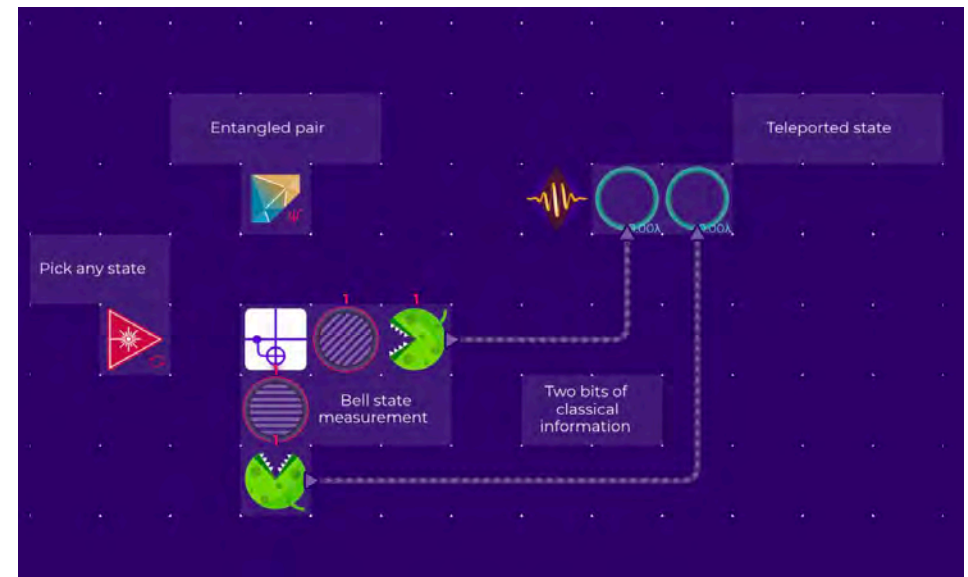
スタートアップQuantum Flytrap社が開発した量子光学の「レゴブロック」

各種の光学素子を仮想空間上の光学定盤にドラッグアンドドロップでセットするだけで、誰でも干渉、量子テレポーテーション、QKDプロトコルなどの量子光学実験をすることができる。

ベル不等式の破れの検証



量子テレポーテーション



<https://quantumflytrap.com/virtual-lab/>

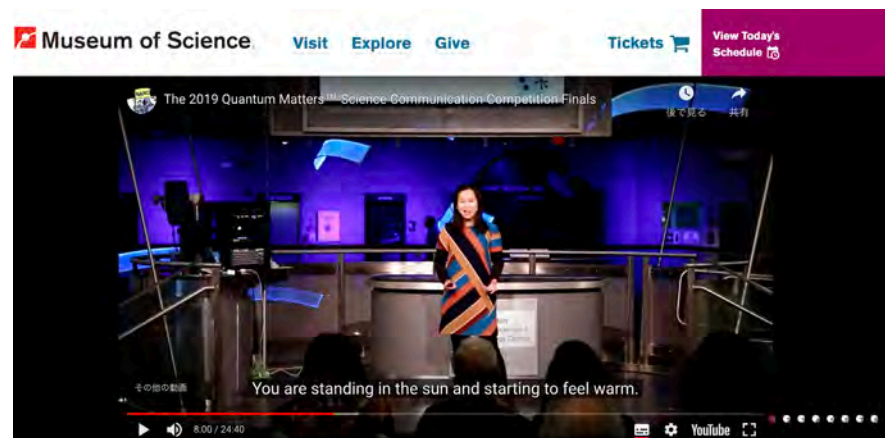
ボストン科学館

量子コンピューター（IBM、モックアップ）の展示

量子マテリアル科学コミュニケーションコンテスト（2018,2019）



<https://www.mos.org/events/nanodays-with-a-quantum-leap-2021>



The Quantum Matters™ Science Communication Competition

Learn about the 2021 Reach Out Science Slams!

Reach Out is a new science communication competition involving early-career researchers affiliated with the nation's 12 NSF Science & Technology Centers. Find out more [here](#).

See the winners of the 2019 Competition and watch the 2019 film.

See the winners of the 2018 Competition and watch the Telly Award winning 2018 film.

<https://www.mos.org/quantum-matters-competition-2019>