

戦略的創造研究推進事業

－CRESTタイプ－

研究領域

「量子情報処理システムの
実現を目指した新技術の創出」

研究領域中間評価用資料

平成20年1月30日

1. 戦略目標

「情報通信技術に革新をもたらす量子情報処理の実現に向けた技術基盤の構築」

2. 研究領域

「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」（平成 15 年度発足）

本研究領域は、ミクロの世界で観測される量子力学的現象を制御し、記憶、演算などの情報処理を行うシステムへ展開していくための基盤となる新しい技術の創出を目指す研究を対象とするものです。

この領域では量子情報処理のハードウェアの構成方法に関する実験的、理論的研究が切望されています。

本領域で目指すものは光・電子・原子・原子核など様々な系の量子効果に基づく基本的なデバイスや多量子ビット化の技術、量子情報処理の伝送技術や中継技術であり、さらにそれらの基盤となる要素研究、例えば量子もつれ現象の制御・観測に関する研究等に関するシミュレーションを含めた研究です。

具体的には、イオントラップ、冷却原子、半導体中の電子スピンもしくは原子核スピン、ジョセフソン接合素子、NMR、線形光学系などを用いた量子コンピュータ技術、また、原子集団や量子テレポーテーションを用いた量子中継技術、単一光子やエンタングル光子対を用いた量子暗号技術などを目指しています。

3. 研究総括

氏名 山本 喜久 （所属：国立情報学研究所／スタンフォード大学 教授）

4. 採択課題・研究費

* 研究費：平成19年度上期までの実績額に平成19年度下期以降の計画額を加算した金額
(百万円)

採択年度	研究代表者	中間評価時 所属・役職	研究課題	研究費*
平成 15年度	井元 信之	大阪大学 教授	光子を用いた量子演算処理 新機能の開拓	460.9
	蔡 兆申	NEC/理研 主席研究員/ チームリーダー	超伝導量子ビットシステムの研究開発	662.7
	清水 富士夫	NTT/電通大 客員教授/ 共同研究員	中性原子を使った 量子演算システムの開発	426.0
	高橋 義朗	京都大学 教授	原子アンサンブルを用いた 量子情報処理の基盤技術開発	440.0
	古澤 明	東京大学 教授	量子ネットワークへ向けた量子エンタングルメント制御	407.0
平成 16年度	占部 伸二	大阪大学 教授	冷却イオンを用いた量子情報処理基礎技術	441.2
	小坂 英男	東北大学准教授	単一光子から単一電子スピンへの量子メディア変換	416.9
	百瀬 孝昌	情報通信研究機構 客 員研究員	分子の電子・振動・回転状態を用いた量子演算基盤技術の開発	531.9
平成 17年度	井上 恭	大阪大学 教授	通信波長帯量子もつれ光子とその応用システム	324.3
	香取 秀俊	東京大学准教授	極低温原子を用いる量子計測法の開拓	438.5
	北川 勝浩	大阪大学 教授	分子スピン量子コンピュータ	469.7
	宮下 精二	東京大学 教授	量子多体協力現象の解明と制御	253.1
			総研究費	5,272.2

5. 研究総括のねらい

量子情報処理は、情報科学と物理学が 100 年以上の長い歳月をかけて共通の概念、言葉を構築し、目標を共有することにより今日の隆盛にたどり着いた長い伝統を持つ研究分野である。物理学の立場から見れば、磁気共鳴 (NMR)、レーザ、量子光学という 3 代のノーベル賞の対象分野の延長上に位置付けられ、情報科学の立場から見れば、古典的な情報理論、計算機理論の量子化の問題と位置付けられる (図 1)。この分野を構成している研究者のスペクトルは広く、応用数学、計算機科学、通信理論、原子物理、量子光学、光通信、半導体デバイス、超伝導回路、原子核・電子スピン磁気共鳴、分子合成化学、と多岐にわたる学際的研究領域である。さらに言えば、何を研究すればいつ量子コンピュータへたどり着くのか、その答えが誰にも分からない未知未開拓の研究領域でもある。それ故に、21 世紀の自然科学、技術開発を支える知的リーダーを育成する研究分野として、これ以上適した領域はないと考える。本研究領域で実現をねらったことの第一は、広い視野を持ち、学問的基礎がしっかりしていて、独創性、創造性のある若手研究者の育成である。量子情報処理の命運は、今後 30-40 年研究の第一線で活躍する彼等、彼女等の手に委ねられているからである。

現時点での本研究領域が考えている量子情報処理のロードマップを図 2 に示す。考え方に多少の違いはあっても米国と欧州共同体の考え方も概略同じである。本研究領域は、このロードマップに基づいて構築され、運営された。個々の量子デバイス技術、量子鍵配送、量子標準技術の 3 分野は、原理の実証を終え、実用技術として使われるための開発フェーズにあり、この領域からの具体的技術開発成果として世の中へアピールする役割を担っている。量子中継、量子コンピュータ、量子ネットワークの 3 分野は、その概念が提案されたのみで、実現手段を模索する基礎研究段階にある。遠い将来を見据えた地道な、しかし的確な研究を定着させることが、本研究領域の重要な役割の一つである。量子シミュレーションは、この両者の間に位置し、基礎研究の成果が実用的な量子情報処理技術へ発展するかどうかの極めて大事な時期にさしかかっている。(米国でも、昨年よりこの分野に特化した DARPA プログラムがスタートし、そこには欧州共同体の研究グループも積極的に参加している。) この量子シミュレーション分野で、欧米に遅れを取らないこと、日本の存在感を示すことも、この研究領域の目標の一つである。

日本の研究者は自分の狭い研究分野に閉じこもる傾向が強い。色々な研究分野に興味を示したり、異分野を渡り歩く研究者はあまり尊敬されない風潮がある。また、基礎研究の成果から明確な方向性が示された後、国家プロジェクトとして全体のリソースを一点に集中させて、全員の努力でこれを実用化することも比較的不得意である。こうした弱点を克服するための種をまいて置くことにも努めた。具体的には、大学院生やポスドクを各研究室から一堂に集め、相互に交流させ、欧米の同世代の若手研究者にも接触させ、上に述べた多岐に渡る幅広い知識を獲得させるべく、様々な機会を設けた。また、領域全体が目指す方向を常に明らかにし、同一の目標を共有する異チーム間の共同研究、

情報交換の場を提供するように努めた。

6. 選考について

選考方針

図 1 に示した 7 つの量子情報分野をバランス良くカバーすることを第一義とした。また、研究チームの中に、将来この分野の中心となるべき有望な若手人材がいるかどうかに着目して選考した。

選考結果

1 年目に 5 チームを採択した。超伝導ジョセフソン素子を用いた量子コンピュータの研究で NEC/理研の蔡チームを採択した。このチームは量子コンピュータ素子の研究で世界的なレベルにあり、代表研究者と共に、NEC の中村はこの分野における日本の若手研究者の代表格である。また、同チーム内の単一磁束量子回路の研究は、個別量子デバイス技術として、幅広い応用が期待される。最先端の基礎研究から実装技術の開発にいたる分厚い研究体制を有する恐らく日本では唯一の研究チームである。冷却原子を用いた量子シミュレーションと量子コンピュータの研究で京大の高橋チームを採択した。様々な Yb 原子アイソトープのボーズ凝縮体、フェルミ縮退相の光格子への閉じ込め技術で世界をリードし、光格子を用いた量子シミュレーションの研究で有利な立場にある。また、同チーム内の原子アンサンブルを用いた量子メモリの研究（上妻）、光子対の発生と検出の研究（北野）は個別量子デバイス技術としての発展が期待された。光を用いた量子情報システムの研究で阪大の井元チームを採択した。このチームは広いスペクトルをカバーしている。小数光子量子ビットを用いた量子情報処理の研究（井元）が中心であるが、非古典光を用いた量子計測技術（竹内）、連続量量子鍵配送技術（平野）、量子暗号の安全性理論（小芦）の 3 人の若手の研究も世界的な研究レベルにある。光と原子を用いた量子情報の研究で、NTT/電通大の清水チームを採択した。このチームも広スペクトルをカバーしている。光格子中の 2 種類の原子を用いた量子コンピュータ（清水）、超伝導永久電流を用いたアトムチップ（向井）、原子共振器 QED と光とのインターフェイス技術（久我）、アトムチップでの原子のボーズ凝縮（中川）、原子アンサンブルを用いた非線形光学情報処理（光永）の 5 グループがある。このチームの研究テーマには強力なライバルが欧米にいるが重要な分野であり、国内の研究チームを育成すべきとの観点から採択した。光を用いた連続量量子情報処理の研究で、東大の古澤チームを採択した。スクイーズ光の発生とエンタングル状態への変換（古澤）、単一光子検出技術とこれを用いた非古典光の発生（佐々木）は、個別量子デバイス技術として重要な研究テーマであると判断した。

2 年目には 3 チームを採択した。分子の振動・回転準位を用いた量子情報処理の研究

で、京大の百瀬チームを採択した。量子固体にドーブされた分子の振動・回転準位は狭いスペクトル幅を有し、しかも光で制御できるため、これを量子情報処理に応用しようとする大胆な提案であった。採択時には、極めてユニークな手法であったが分子を用いた量子情報処理はその後世界的潮流の一つになりつつある。このチームには超高速光パルス技術で分子の状態を制御、測定する研究で知られる分子研の大森がいる。やはり若手のホープである。トラップイオンを用いた量子情報処理の研究で阪大の占部チームを採択した。この分野では、NISTのWinelandのグループ、InnsbruckのBlattのグループが他に大きく水をあけて先行している。しかし、量子コンピュータをはじめ様々な量子情報システムの実現に最も近いとされるこの技術分野で日本国内に世界的なレベルの研究グループを育成することが必要との観点から採択した。研究体制は、量子コンピュータへの応用（占部、Chuang）、量子中継への応用（早坂）、光時計への応用（杉山）となっている。半導体スピントロニクス技術を用いた量子中継の研究で、東北大の小坂チームを採択した。光子から電子スピンへの量子情報転写を、電子スピンのg因子エンジニアリングを利用して実現しようという大胆な提案に興味を持たれた。

3年目には4チームを採択した。光格子時計の研究で東大の香取チームを採択した。次世代の時間標準技術をトラップイオンと激しく競っている光格子時計（マジック波長）の概念を最初に提案したのは代表研究者の香取であり、以後一環してこの研究分野をリードしてきた。日本における時間標準技術に責任を持ち、実用技術としての蓄積を有する産総研の洪の率いるチームを組んでの提案であった。分子アンサンブルの磁気共鳴（核スピン、電子スピン）を用いた量子コンピュータの研究で阪大の北川チームを採択した。数年前にIBM研究所から発表された核スピン量子コンピュータの欠点を克服して、真のアンサンブル量子コンピュータを実現するという地道であるが正攻法の研究方針が支持された。差動位相シフト方式の量子鍵配送の研究で阪大の井上チームが採択された。この方式は代表研究者の井上が提案したものであり、現在最も実用的な量子鍵配送方式とみなされている。この方式の実用化への取り組みをNTTと産総研のチームを組んでおこなう。量子シミュレーションの理論研究で、東大の宮下チームを採択した。この分野の研究は光・原子物理学の実験技術と固体物理、統計力学の理論の組み合わせで発展していくものと思われ、後者をカバーするチームが領域内に一つは欲しいという希望から採択された。

こうして、3年にわたって採択された研究チームとその手法を、7つの量子情報研究分野に対して示したものが図3である。当初意図したように、7つの研究分野にバランス良く研究チームを貼り付けることができた。

7. 領域アドバイザーについて

領域アドバイザー名	現在の所属	役職	任期

五神 真	東京大学	教授	平成 15 年 10 月～平成 23 年 3 月
樽茶 清悟	東京大学	教授	平成 15 年 10 月～平成 23 年 3 月
細谷 暁夫	東工大	教授	平成 15 年 10 月～平成 23 年 3 月
藪崎 努	大阪電通大	教授	平成 15 年 10 月～平成 23 年 3 月
覧具 博義	東京農工大	教授	平成 15 年 10 月～平成 23 年 3 月
和達 三樹	東京理科大	教授	平成 15 年 10 月～平成 23 年 3 月

人選にあたっての考え方

量子情報処理分野に理論的・実験的基盤を与えているのは、(1)量子論、(2)統計力学、固体物性論、(3)原子・光物理、(4)固体電子物性、(5)固体光物性、(6)オプトエレクトロニクス技術の諸分野である。各分野で日本を代表する研究者の方に領域アドバイザーになっていただいた。具体的には、(1)の分野で東工大の細谷、(2)の分野で東京理科大（東大）の和達、(3)の分野で大阪電通大（京大）の藪崎、(4)の分野で東大の樽茶、(5)の分野で東大の五神、(6)の分野で農工大の覧具の各先生方にアドバイザーになって頂いた。

量子情報のような研究分野では、深い学問的基礎と幅広い視野を持ち、短期的な流行に流されず、研究の本質を見極める洞察力が大切である。領域アドバイザーになって頂いた方々は、こうした資質を兼ね備えている人達であった。

8. 研究領域の運営について

- ・ 各研究チームの研究実施場所へのサイトビジットを定期的に行い、研究の現状把握を行い、必要なアドバイスを必要最小限のレベルで与えた。
- ・ 各研究チームの年毎の研究成果を発表し合う場として、領域全体のワークショップを毎年12月に3～4日の日程で開催した。参加者は毎年250～300名程度であった。ここで研究代表者、グループ代表者からの進捗報告を受け、アドバイザーと共に、必要なコメントをフィードバックした。
- ・ また、この機会を利用して、領域総括の考え方、世界の研究動向、などを参加した全ての研究者に伝えた。
- ・ 研究実施報告書、サイトビジットの結果、領域ワークショップでの発表などを通して得た各研究チームの進捗状況を基に、研究費の配分を行った。また、計画以上の成果が上げられそうな研究グループや他の理由で追加の研究費が必要と思われるチ

ームには、追加の研究費を配分した。

- ・ 当領域のホームページを作成し、研究内容、研究成果、あるいはワークショップ資料などを公開し、領域の活動の広報に努めた。
- ・ 領域が行った施策の一つに、量子情報学生チャプターの創設がある。これは、ポスドクや大学院生の横のつながりを強化するための組織で、関東地区、関西地区に各一つずつ立ち上げられた。研究総括（領域アドバイザー）—代表研究者—グループ代表者—助教・ポスドク—大学院生—学部学生というたて構造の中では、ポスドクや大学院生はともすると、各研究室に孤立してしまう傾向がある。研究の本当の担い手は、第一線にいるポスドクや大学院生であることは皆知っていることである。彼等が企画・運営する様々な研究会での若手研究者の交流を通して、日本国内の量子情報研究の最新の知識と実験技術が全ての研究室に共有され、また博士課程へ進学する学生が増え、日本全体としてのレベルアップが図られることを目指した。
- ・ 課題間の連携が有効と思われる場合にはアドホックな研究ユニットをその都度立ち上げた。例えば量子シミュレーションの研究を促進するため、京大高橋チーム（光格子中の冷却原子を用いた実験）、領域総括（山本）自身のチーム（半導体励起子ポラリトンを用いた実験）、東大宮下チーム（統計力学、固体物性理論）の3チームは6ヶ月に一度のペースで研究会を開催して情報を交換し合った。また、最近 NTT 基礎研究所で成功した 100Km のエンタングル光子対量子鍵配送の実験には、井上チーム内の NTT グループで開発された PPLN 導波路ダウンコンバータ素子と古澤チーム内の NICT グループで開発された超伝導単一光子検出器(SSPD)が使われた。この量子鍵配送実験は CREST チームを横断したプロジェクトであり、欧米の研究チームに先駆けて達成された大きな成果であった。

欧米の研究動向とのすり合わせ

欧米の研究動向を調査すると共に、日本の研究状況を知らしめるために、国際シンポジウムを開催した(第一回を 2006 年ハワイで開催、第二回を 2008 年奈良で開催予定)。

9. 研究の経過と所見

研究の進捗状況

ほとんどの研究チームで期待した通りの研究の進展があった。量子情報処理の中核技術に正面から取り組む研究、そこから派生した新しい方向性をめざす研究、その位置付

けは様々であるが、世界をリードする地位を確立したチーム、世界のトップレベルの研究に肩を並べるところへ到達したチーム、などが形成された。

特筆すべき研究成果

先に述べた7つの量子情報分野毎にまとめる。

(1) 個別量子デバイス技術

- ・量子鍵配送システムの性能を決定する単一光子検出器のうちでも、速い応答速度と低いダークカウントなど特に優れた性能を示す超伝導単一光子検出器(SSPD)の開発でNISTと並び世界トップレベルの性能を達成した(NICT 佐々木グループ)
- ・低雑音でしかも波長変換を必要としないエンタングル光子対発生を可能にする光ファイバー・サニャック・ループおよび単結晶Si導波路を用いた4光波混合器を提案し、開発した(NTT 武居グループ)
- ・共振器付パラメトリックダウンコンバージョンでスクイーズ光を発生し、これを連続光エンタングル状態に変換する技術で、世界をリードする地位を確立した(東大古澤グループ)。
- ・ジョセフソン接合素子を人工原子とする世界初の固体単一原子メーザーを開発した(NEC 蔡グループ)。
- ・超伝導量子ビットを制御、検出する単一磁束量子回路を開発した(横国大吉川グループ、名古屋大藤巻グループ)。
- ・雑音の少ない超伝導永久電流でトラップされたアトムチップ回路を開発した(NTT 向井グループ)。
- ・様々な精密計測技術へ応用が期待できるアトムチップ上での原子ボーズ凝縮体の生成に成功した(電通大中川グループ)。
- ・原子ボーズ凝縮体を用いたホログラフィックメモリを開発した(東大久我グループ)
- ・真空スクイーズ光を原子集団のEIT現象を利用してトラップする技術を開発した(東工大上妻グループ)

この分野の日本の研究は本領域がスタートする前は欧米に比べてかなり立ち遅れていたが、現在は世界に肩を並べるところへ到達したと考えられる。

(2) 量子鍵配送

- ・差動位相シフト(DPS)プロトコルとSSPD検出器を用いて、クロック周波数10GHz、光ファイバー長200km、安全鍵生成レート10bit/sという世界最長、最速の単一光子量子鍵配送方式を実現した(NTT 武居グループ)。

- ・BBM92 プロトコルと PPLN ダウンコンバータ、SSPD 検出器を用いて、光ファイバー長 100km の世界最長のエンタングルメント量子鍵配送方式を実現した (NTT 武居グループ、NICT 佐々木グループ)。

- ・ハイゼンベルグの不確定性原理に基づく量子鍵配送プロトコルの絶対安全性証明の理論を確立した (阪大井元グループ)。

・

この分野では日本は現在、実験 (DPS プロトコルの提案、方式実現、コンポーネントの開発)、理論 (安全性の証明) とともに世界をリードする立場にある。また、総務省、NICT のサポートによる研究プログラムが本領域と並行して走っており、本 CREST 領域と NICT プロジェクトの併存がこの分野の成功に大きな役割を果たしている。

(3) 量子計測

- ・光格子に閉じ込められた冷却原子をマジック波長で励起するタイプの原子時計を提案し、これを実証した (東大香取グループ)。この日本発の技術は昨年、世界度量衡委員会により次世代の“秒の候補”として認定され、世界各国の標準技術研究所が次々と研究開発に参入する状況にある。

- ・光子数状態 (NOON 状態) を用いた非古典的光干渉計をこれまでの最多の光子数 (4 光子) で実現した (北大竹内グループ)。この研究は、昨年度の精密計測分野でサイエンティフィック・アメリカン誌が選んだベスト論文に選ばれた。

- ・分子の量子波動関数をアト秒 (10^{-18} sec) の精度で計測できる光パルス分光法を開発した (分子研大森グループ)。

(4) 量子シミュレーション

- ・Yb 原子を光格子へ閉じ込めた系でのボーズ凝縮、フェルミ縮退の実現 (京大高橋グループ)

- ・量子アニーリングの概念の提案と理論的解析 (東工大西森グループ)

この分野では、本領域が開始されるまで日本で研究が行なわれていなかったこともあり、欧米にリードされている状況にある。しかし、7 つの Yb 原子アイソトープの散乱長の評価、光フェシュバハ共鳴の提案と実証、7 つ全てのアイソトープに対するボーズ凝縮とフェルミ縮退の実現、など重要な成果が得られ、光格子にトラップされた冷却原子を用いた量子シミュレータの実現に向けた準備が着々と整えられている。

(5) 量子中継

この分野の研究でも、日本は欧米に遅れをとっている。個別の量子メモリの研究 (原子アンサンブル (東工大上妻グループ)、単一イオン共振器 QED (NICT 早坂グループ)、

量子ドット（東北大小坂グループ）などはそれぞれ高いレベルにあるものの、まだシステム全体を考慮した骨太な研究開発体制を構築するに至っていない。量子中継のシステム実験はこれから本格化する分野であり、今後の研究開発の進展が期待される。

(6) 量子コンピュータ

- ・ 量子コンピュータ実現の有力候補の一つである超伝導量子ビットを用いた方式で、2量子ビット演算を世界に先駆けて実現した(NEC 蔡グループ)。
- ・ 量子コンピュータ実現のもう一つの有力候補であるトラップイオン量子ビットを用いる方式で、トラップ装置の冷却化により最長の量子ビットの寿命を達成した(MIT Chuang グループ)。

その他、クラスター状態線形光学（阪大井元グループ、北大竹内グループ）、分子の振動・回転準位（NICT/UBC 百瀬グループ、東工大金森グループ）、アンサンブル ESR/NMR（阪大北川グループ、大阪市大工位グループ）、光格子にトラップされた原子（京大高橋グループ）などを用いる方法が研究されている。今後の研究の進展が期待される。

(7) 量子ネットワーク

- ・ 連続量の量子テレポーテーションの実現（東大古澤グループ）

量子コンピュータと光ファイバー網を用いたエンタングルメント配送を組み合わせた高度な量子情報処理をめざすこの分野の研究は、いわば“夢”を語る段階にある。

今後の期待や展望

実用に近いと期待される(1)-(3)の研究分野においては、日本の研究は世界に肩を並べ、一部は世界をリードする立場にある。この分野で引き続き世界のリーダーシップを握るためには、“国としての研究開発体制、サポート体制”の確立が急務である。最終コーナーで世界に追い抜かれるという従来の図式が繰り返されないようにしなければならない。この点 JST の役割は重要である。

実用にはまだ遠いと思われる(4)-(7)の研究分野においては、日本の実力は着実に上がってきている。次世代の研究を担う若手研究者を世界で通用する人材として育てていくという長期的な視点を持つことが研究代表者側にも研究支援側にも必要である。こうした風土は徐々にではあるが、定着してきている。

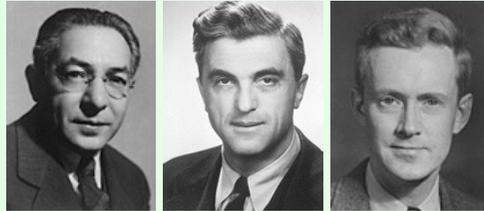
10. 総合所見

量子情報処理は、欧州を中心に発生した最初の思想が米国で具体的な研究開発目標へと変貌を遂げた分野である。光通信の研究がそうであったように、この分野を現実世界の中で役立つ実用技術へ発展させる役割を日本が果たすことを期待する。本領域が創設された理由もそこにある。この目標を達成するための人材とインフラづくりはまだまだ不十分である。特に各大学における教育の一層のレベルアップなくして、目標の達成はおぼつかない。実力のあるグループの力をいかに結集して一つの目標にベクトルを揃えるか、そのかじ取りをする仕掛けを国レベルで作る必要がある。教育と研究開発は不可分であり、JSTは従来の役割分担にとらわれず教育と研究開発の両面で積極的な役割を果たしていくことが期待される。

量子情報処理のもう一つの側面、“新しい科学の潮流”としての基礎研究分野は、将来の日本の知的リーダーを育てる最適な環境を学生達に与える。この分野の性格を象徴的な言葉で表現すると、学際的、密接な理論と実験の関係、分野をけん引する若手研究者、などとなる。この分野が健全で未来へ広かれたものであることが理解される。30年経過した時、本研究領域を決定した意義の第一は、日本国の知的リーダーを育てた人材育成だったと結論付けられていることと予測している。

Collateral Scientific Undercurrents toward Quantum Information Technology

Physics



I.I. Rabi F. Bloch E.M. Purcell

NMR
(1946)



C.H. Townes A.M. Prokhorov N.G. Basov

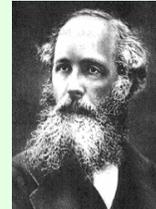
Laser
(1960)



R. Glauber T. Hansch J. Hall

Hardware

Information Science



J.C. Maxwell

Information and Physics
(1871)



H. Nyquist

Sampling
Theorem
(1928)



C. Shannon

Information
Theory
(1948)



J. von Neumann

Measurement Theory
(1955)



D. Deutsch



P. Shor



C.H. Bennett

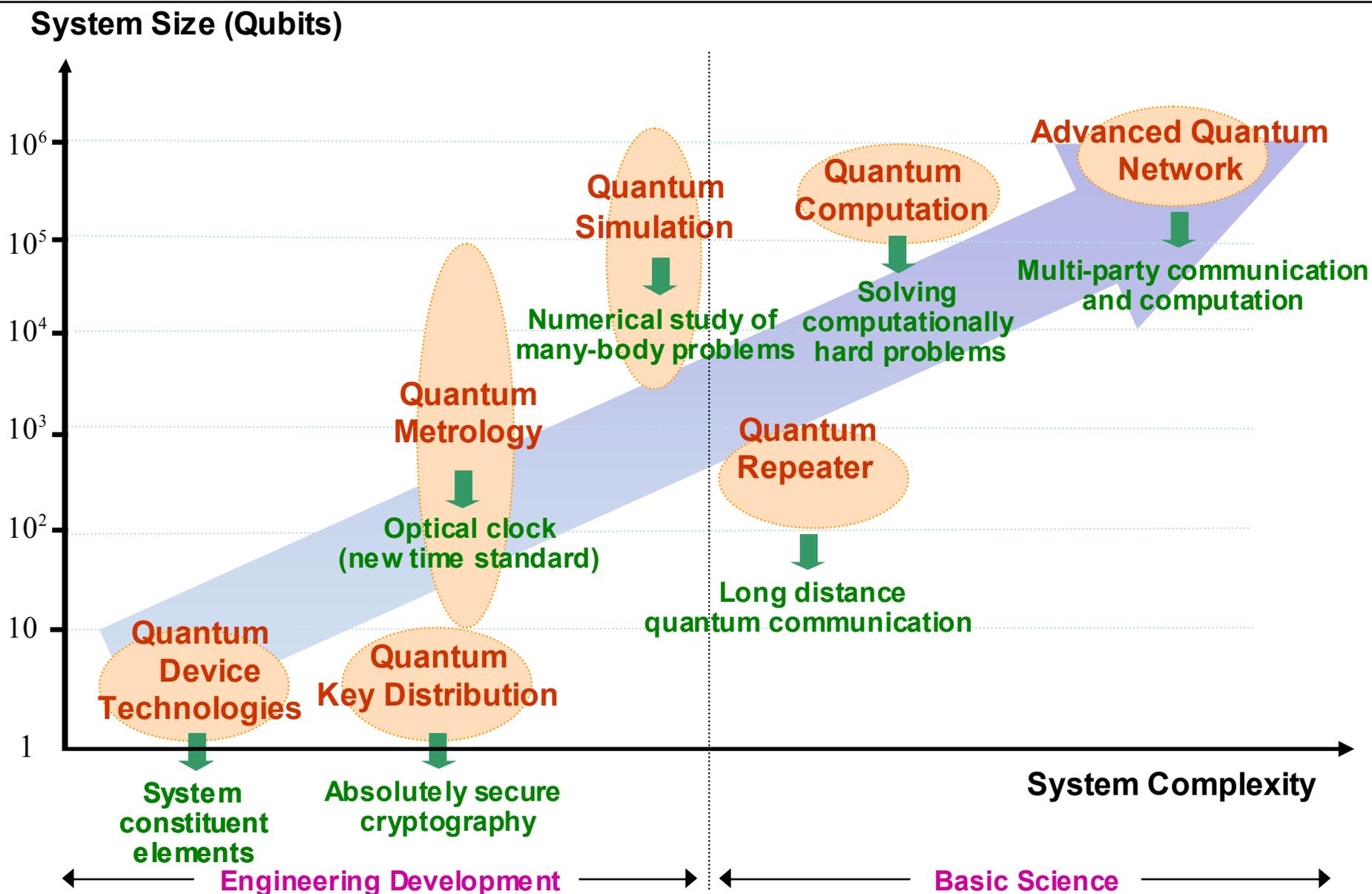
Quantum
Computation &
Quantum
Communication
(1985)

Software

Quantum Information Technology

Various Quantum Information Systems Studied in JST CREST Project

図 2



Research Groups of JST CREST Project

