

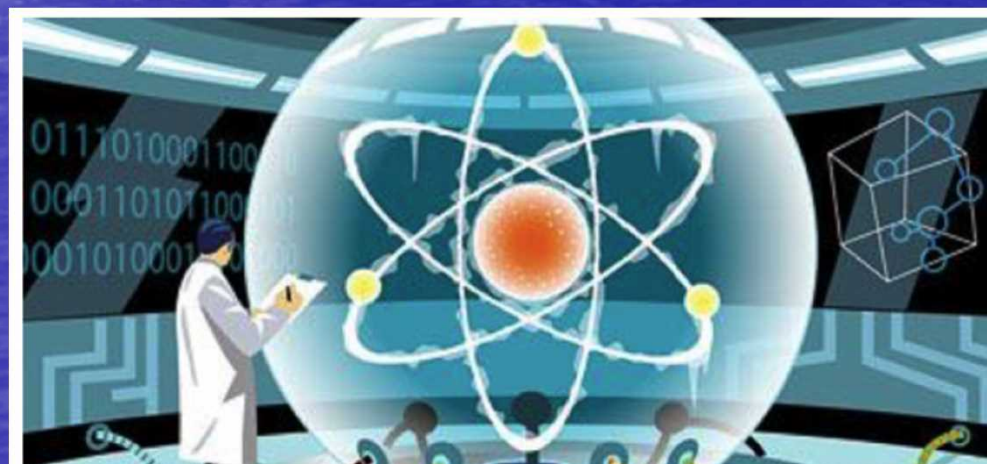
量子科学技術委員会（第4回）資料

平成2016年6月20日 文部科学省

資料3-2
科学技術・学術審議会 先端研究基盤部会
量子科学技術委員会(第4回)
平成28年6月20日

長距離量子情報通信のための 量子中継技術について -量子メモリ、量子テレポーテーション-

小坂 英男(横浜国大)



量子情報通信(暗号鍵配布)ネットワーク構築へ向けて

絶対的に安全な長距離鍵配布を実現 テロ対策、医療情報保護、エネルギー情報管理



第一世代～100km (光子が届く距離) (NICT主導で東芝、NECら商用化、ImPACT課題)

第二世代～200km (中継が一回必要) (デルフト大 Hansonら実証、英国・蘭国特化)

第三世代～1000km (中継が何度も必要) ⇒ **決定論的量子中継** (確実な中継)

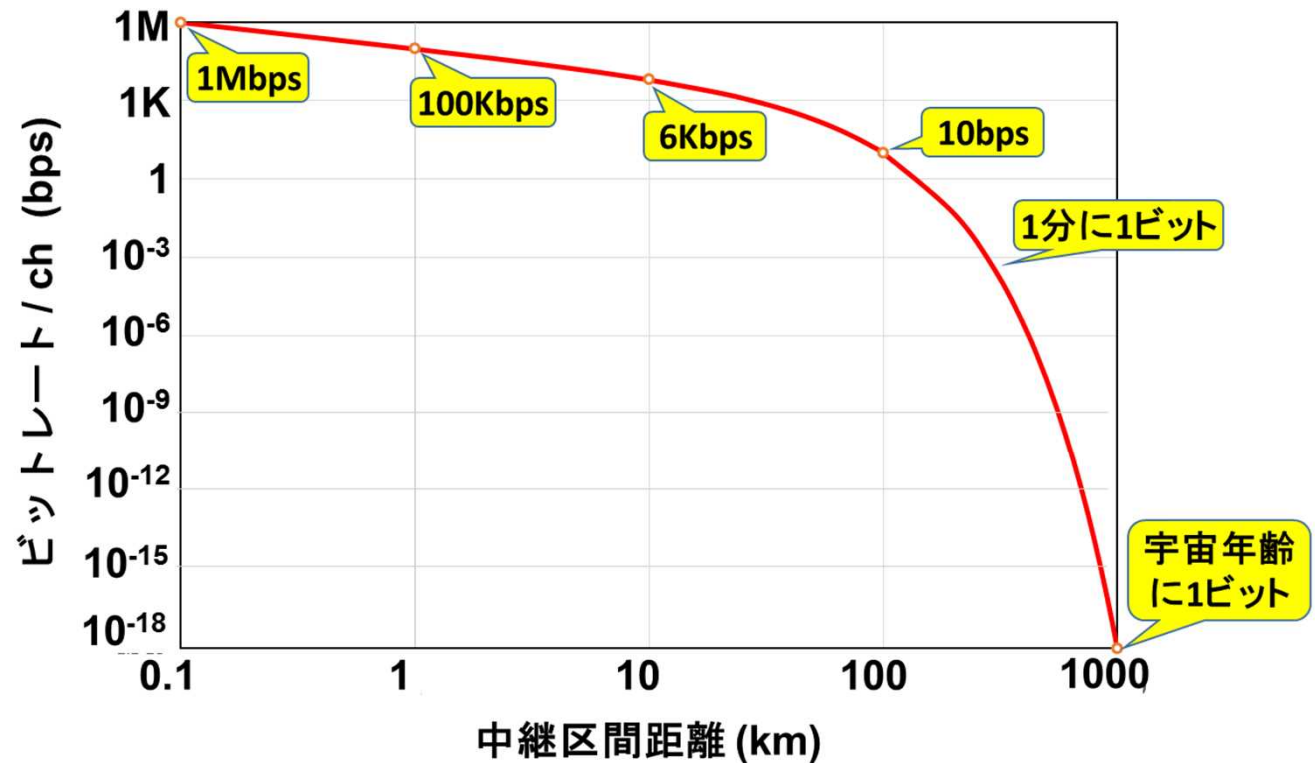
まずは東京－大阪間の量子幹線を！

量子情報通信ネットワーク構築へ向けて

- ・量子情報通信は遠距離(>100km)でこそ真の意味がある。
- ・古典的trusted nodesは本当に信用できるか？
- ・量子情報通信の進化速度は我々の情報収集能力を超えている。
固体量子のメモリー時間の進化に支えられている。
(この10年で10桁の成長)
- ・第二世代は既に開発競争に入りつつある。日本の国土の広さを考えると第三世代の準備をしなければいけない。(中国は着々と準備している)
- ・現状では 1対1の通信プロトコルしかないが、量子は本来多体もつれが得意。固体量子の集積メモリーへの進化は始まっている。
- ・距離と速度の『原理的』限界は条件設定でどうにでもなる。
⇒量子ルータの飛躍的低価格化(各家庭に配布)はその一例。
- ・量子中継のスケラビリティはとても単純である。(故に難題！)
⇒量子回路の完成度は目的意識がないと向上しない。

量子情報通信ネットワーク構築へ向けて

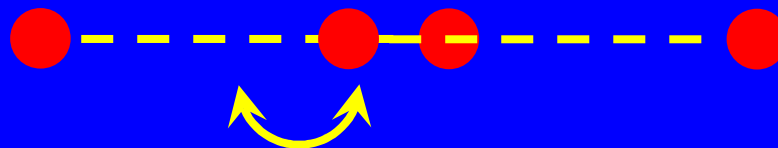
- ・量子情報通信は
- ・古典的trusted
- ・量子情報通信の
固体量子のメモ
(この10年で10
- ・第二世代は既に
を考えると第三世
準備している)
- ・現状では 1対1の
つれが得意。固体
- ・距離と速度の『原理的』限界は条件設定でどうにでもなる。
⇒量子ルータの飛躍的低価格化(各家庭に配布)はその一例。
- ・量子中継のスケラビリティはとても単純である。(故に難題！)
⇒量子回路の完成度は目的意識がないと向上しない。



中継が完全であればビットレートは全長には無依存！

量子中継

1. もつれ生成

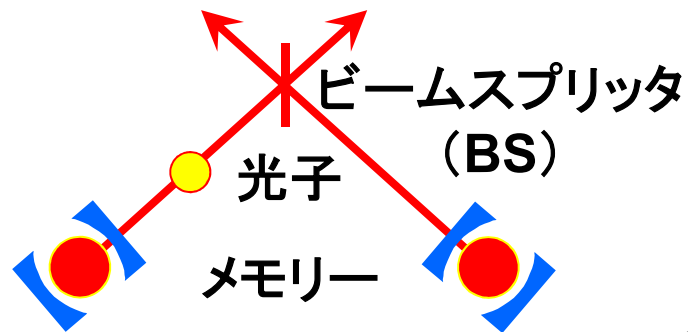


2. もつれスワッピング



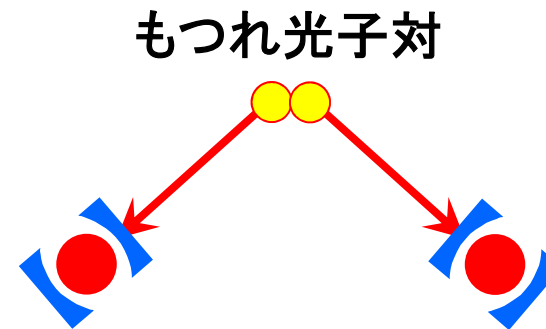
もつれ生成法の種類

(a) 発光方式



伝送路の完全なコヒーレンスを要求

(b) 吸収方式



狭帯域のもつれ光子対源が必要

(c) 発光＋吸収方式



伝送路にも光共振器にも
完全性を要求しない

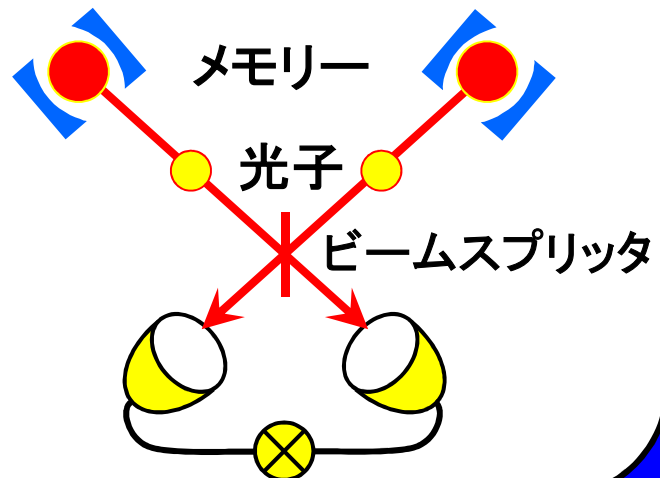
(d) 散乱方式



光共振器の完全性を要求

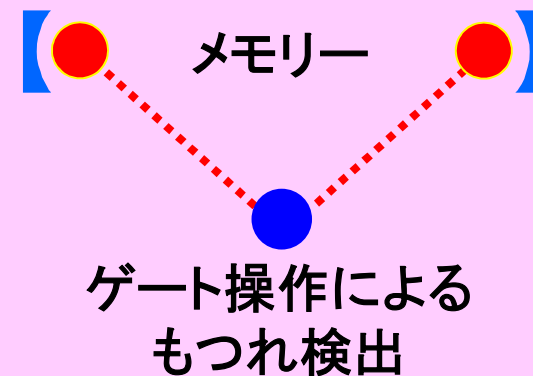
もつれスワッピング法の種類

(a) 発光方式



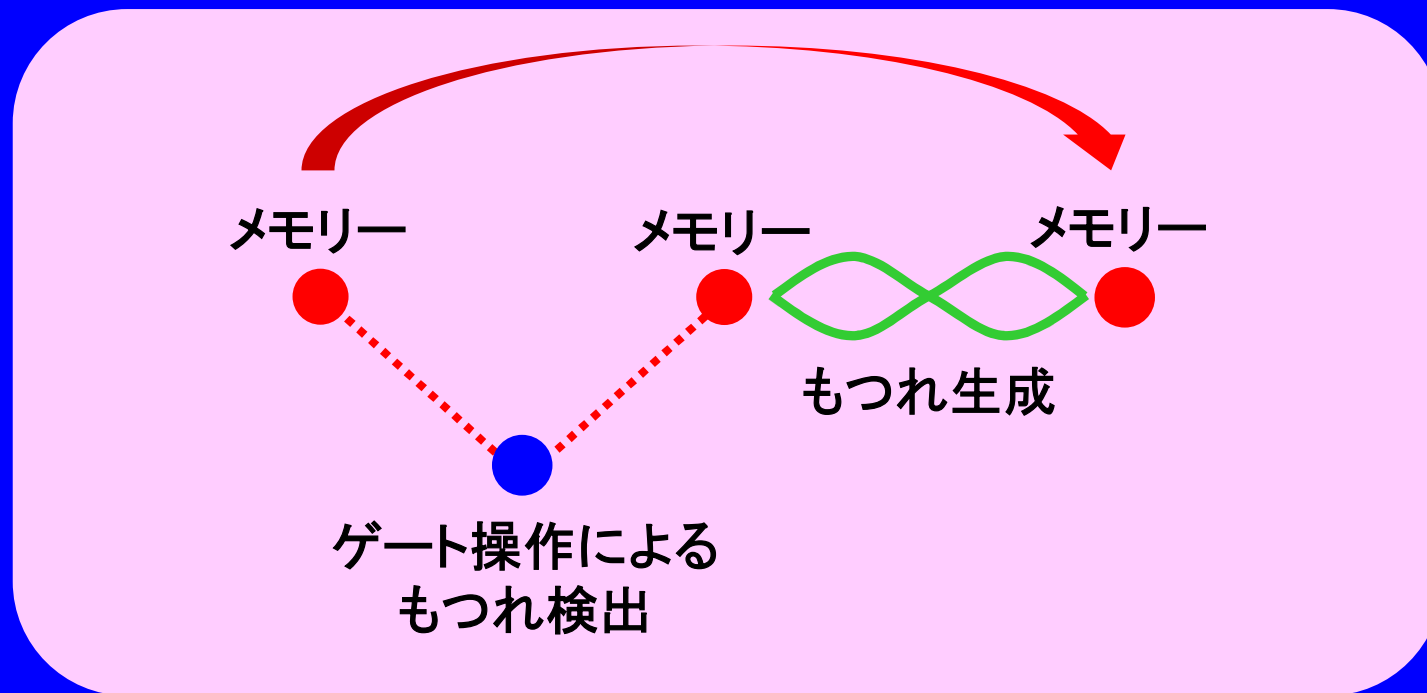
全ての効率が1であっても
確率的な中継に留まり
第三世代量子通信は不可

(b) 局所ゲート操作



完全なもつれ測定が可能で
決定論的な中継ができ
第三世代量子通信が可能

量子中継の原理～量子テレポーテーション



量子テレポーテーションに成功している物質量子

できて当たり
前の時代に

秒が当たり
前の時代に

室温動作に
向けた試み

ハイブリッド実
装へ向けて

	操作性	メモリー 時間	動作温度	集積性	備考
ダイヤモンド NV	○	◎ (>10s)	◎ (<20K)	△	小規模集積化は ¹³ C で、大規模集積化は ハイブリッド構造で
トラップ イオン	○	◎ (>10s)	?	△	イオンの長時間保持 が困難
半導体 量子ドット	○	× (<1ms)	△ (<1K)	○	Siは光子との相互作 用がない
超電導 量子回路	◎	× (<1ms)	× (<10mK)	○	光子との直接相互作 用はない
希土類 結晶	×	× (<1ms)	△ (<3K)	×	アンサンブルの 場合

量子中継には
量子メモリが不可欠

半導体量子ドット間の量子テレポーテーション



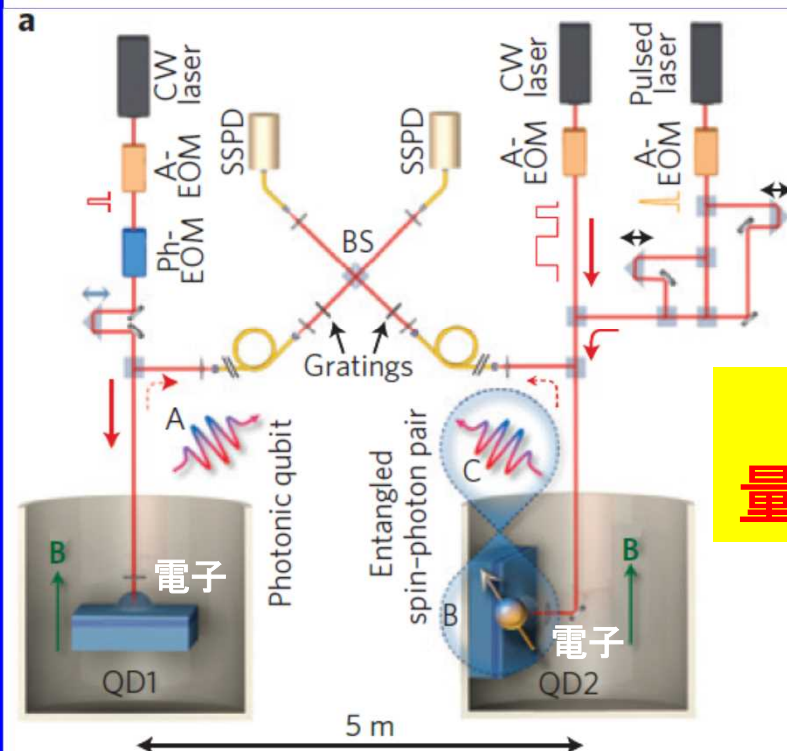
ARTICLE

Received 8 Jul 2013 | Accepted 9 Oct 2013 | Published 1 Nov 2013

DOI: 10.1038/ncomms3744

Quantum teleportation from a propagating photon to a solid-state spin qubit

W.B. Gao¹, P. Fallahi¹, E. Togan¹, A. Delteil¹, Y.S. Chin¹, J. Miguel-Sanchez¹ & A. Imamoglu¹



Nature Communications 2013

電子状態の
量子テレポーテーション(5m)

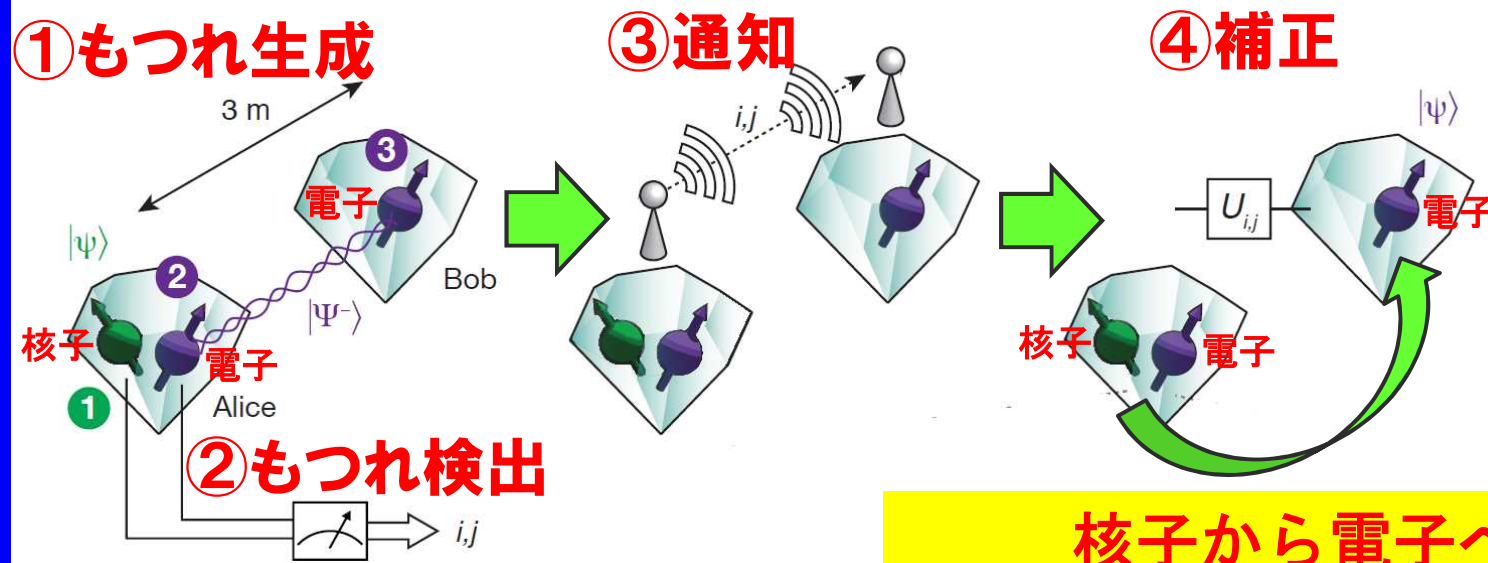
ダイヤモンド間の量子テレポーテーション

nature International weekly journal of science

Unconditional quantum teleportation between distant solid-state qubits

Wolfgang Pfaff, Bas Hensen, Hannes Bernien, Suzanne B. van Dam,
Machiel S. Blok, Tim H. Taminiau, Marijn J. Tiggelman, Raymond N. Schouten, Matthew
Markham, Daniel J. Twitchen, and Ronald Hanson

Nature 2014



核子から電子への
量子テレポーテーション(3m)

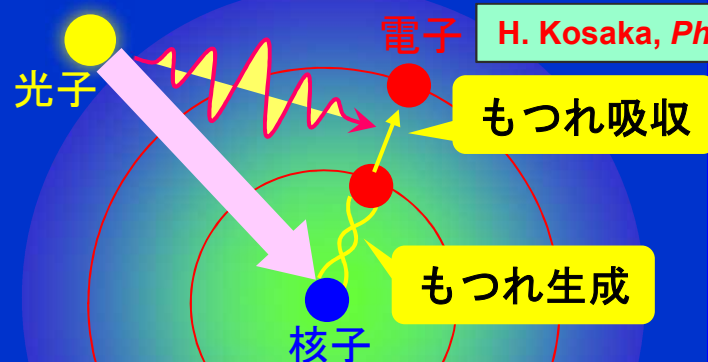
ダイヤモンドへの量子テレポーテーション転写

nature
photonics

High fidelity storage of arbitrary photon states in a single nuclear spin

Sen Yang^{1§}, Ya Wang^{1§}, Thai Hien Tran¹, S. Ali Momenzadeh¹, M. Markham², D. J. Twitchen², Rainer Stöhr¹, Philipp Neumann¹, Hideo Kosaka³, and Jörg Wrachtrup¹

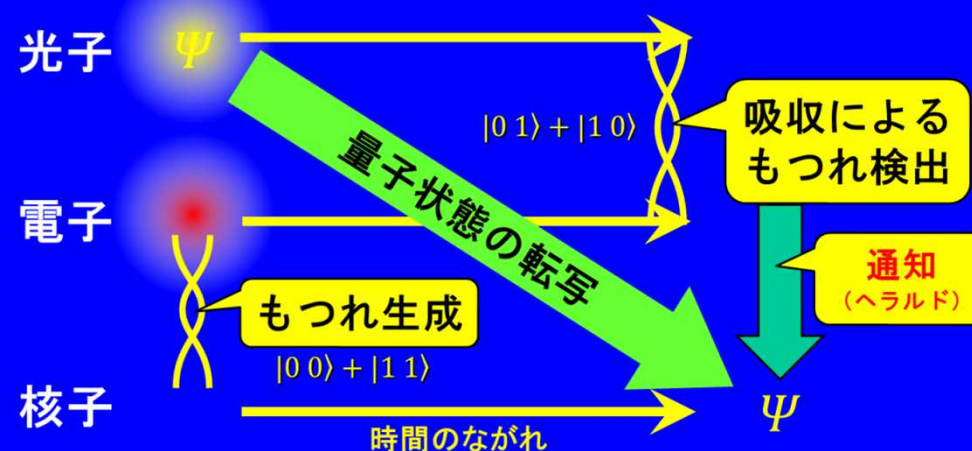
Nature Photonics 2016



H. Kosaka, *Phys. Rev. Lett.* 2015

量子メモリー時間 > 10秒 !

Nature Photonics 2016



光子から核子への
量子テレポーテーション転写
(量子メディア変換)

ダイヤモンドによる確率的量子中継

nature International weekly journal of science

Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres

B. Hensen^{1,2}, H. Bernien^{1,2,†}, A. E. Dréau^{1,2}, A. Reiserer^{1,2}, N. Kalb^{1,2}, M. S. Blok^{1,2}, J. Ruitenbergh^{1,2}, R. F. L. Vermeulen^{1,2}, R. N. Schouten^{1,2}, C. Abellán³, W. Amaya³, V. Pruneri^{3,4}, M. W. Mitchell^{3,4}, M. Markham⁵, D. J. Twitchen⁵, D. Elkouss¹, S. Wehner¹, T. H. Taminiau^{1,2} & R. Hanson^{1,2}

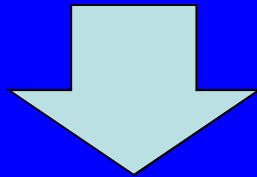
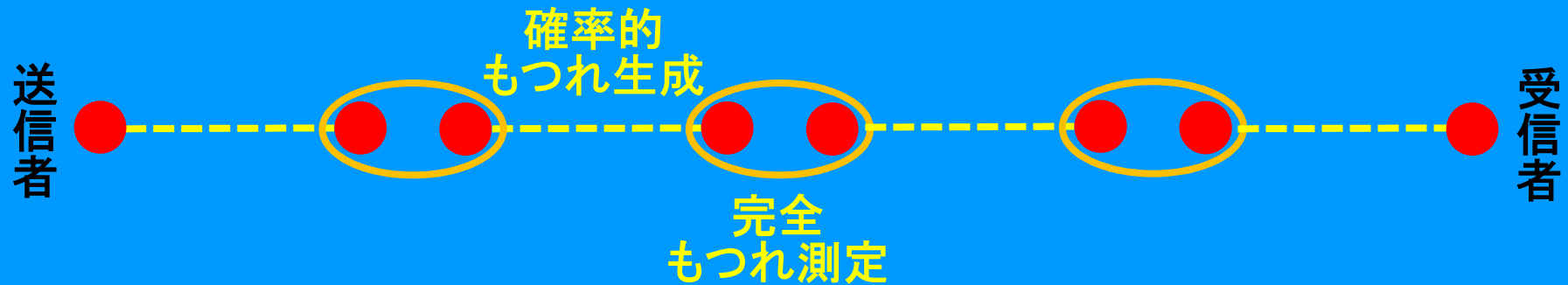
Nature 2015



第二世代量子中継(1.3km)の実証実験！

第三世代量子通信

1. もつれ生成 と もつれ測定

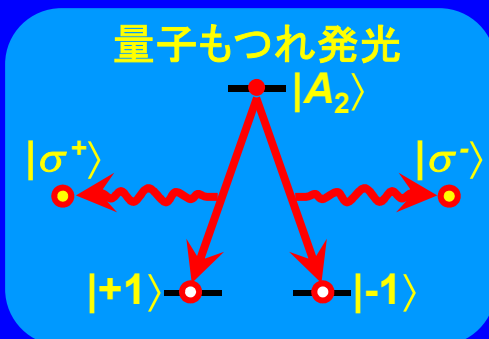
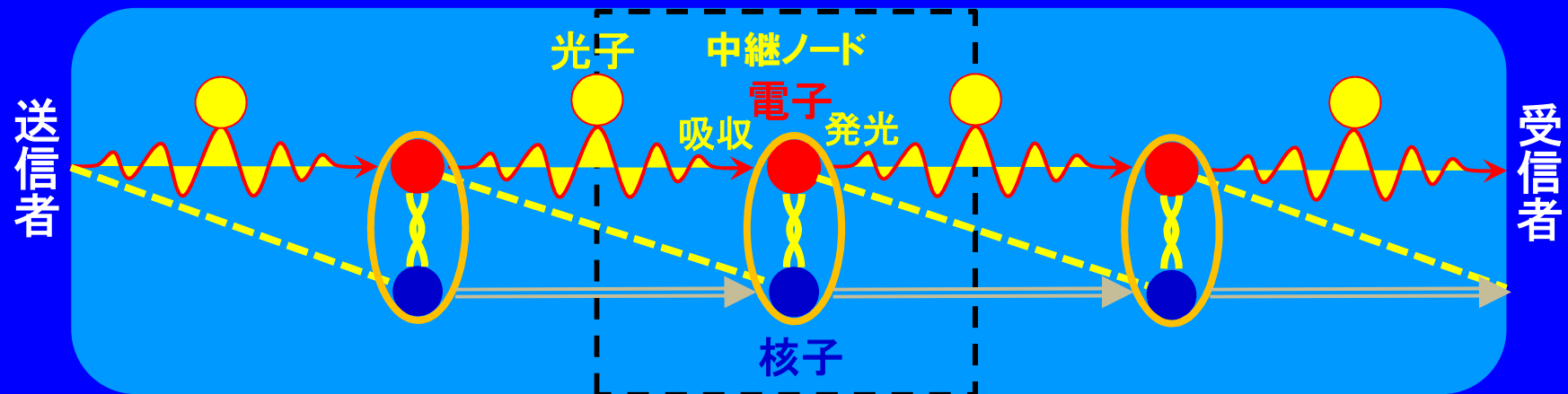


2. 決定論的もつれスワッピング

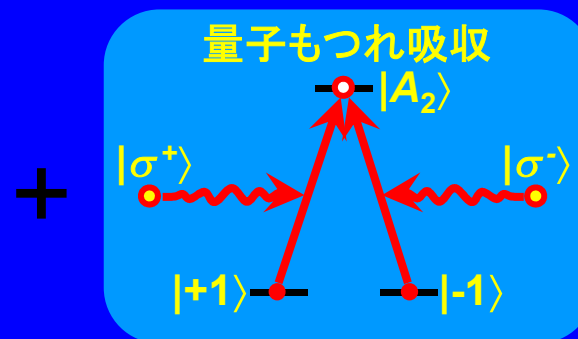


やり直しのないことが重要！

第三世代量子通信の具体例



M. Lukin, *Nature* 2010

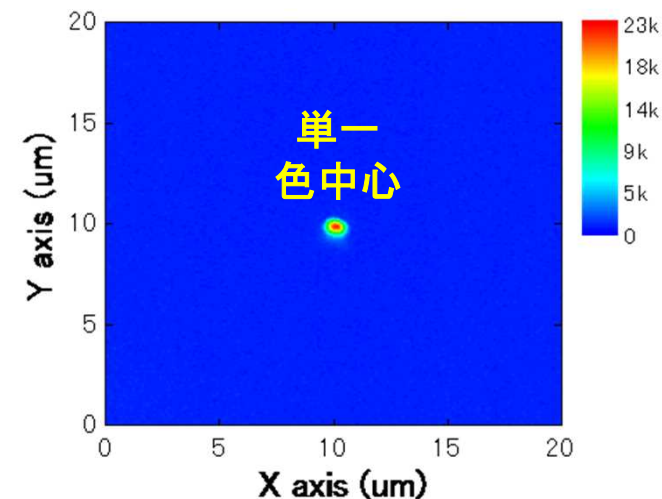
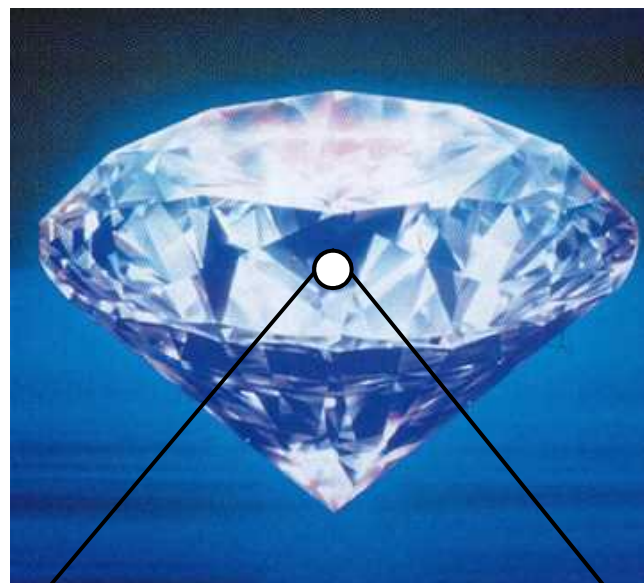


H. Kosaka, *Phys. Rev. Lett.* 2015

H. Kosaka, J. Wrachtrup, *Nature Photonics* 2016

＝ 電子・核子もつれ生成

ダイヤモンドNVセンター

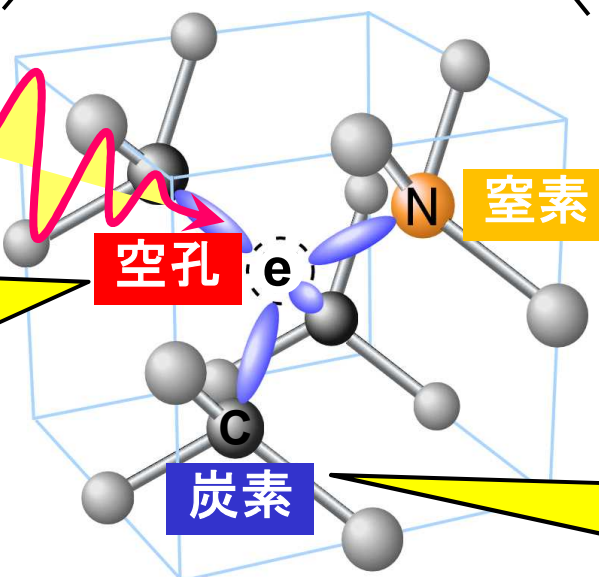


伝送路を飛ぶ
光子
量子コンピューター

光子

空孔に捕獲された
電子
量子プロセッサ

1秒のメモリー時間

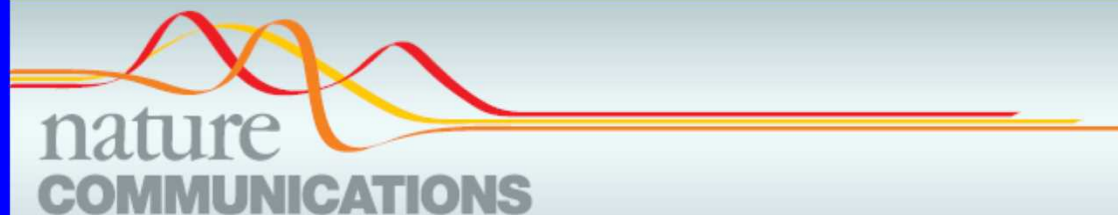


炭素を置換した
窒素の核子
量子メモリー

10秒以上のメモリー時間

天然で1.1%存在する
同位体炭素の核子
集積量子メモリー

幾何学的量子ビット と 幾何学的スピンエコー



ARTICLE

Received 1 Sep 2015 | Accepted 18 Apr 2016 | Published 19 May 2016

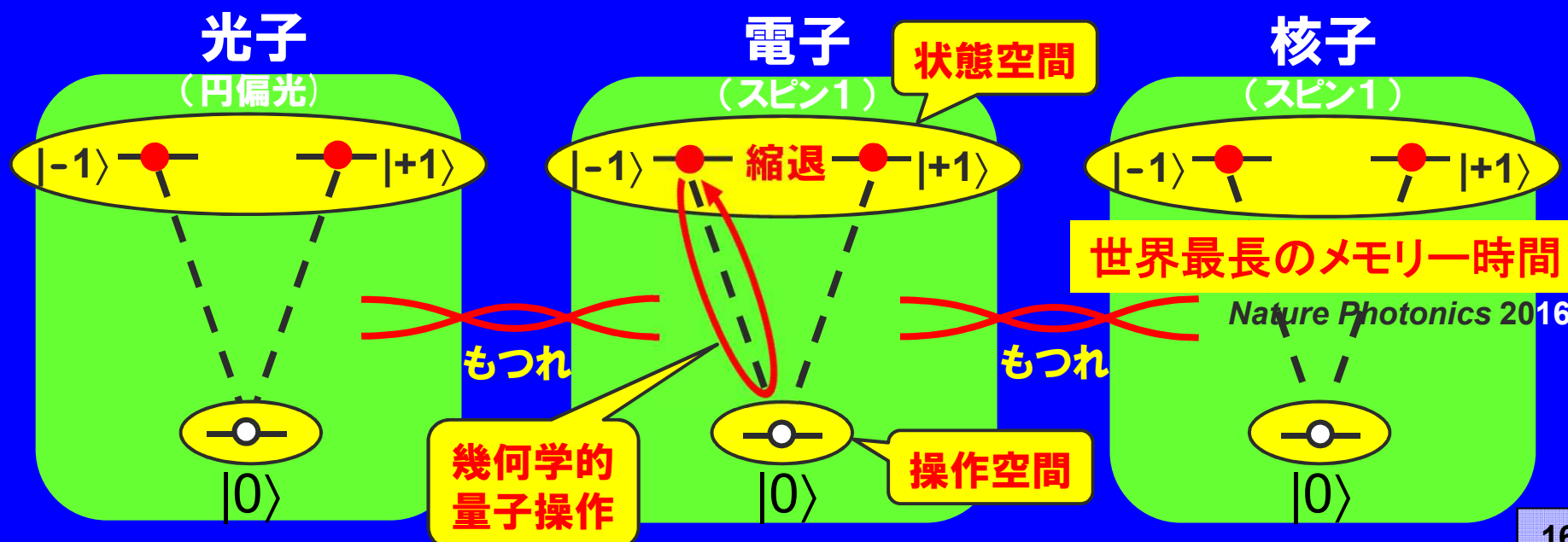
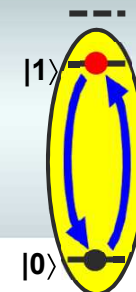
DOI: 10.1038/ncomms11668

OPEN

Geometric spin echo under zero field

Yuhei Sekiguchi¹, Yusuke Komura¹, Shota Mishima¹, Touta Tanaka¹, Naeko Niikura¹ & Hideo Kosaka¹

従来の量子ビットは
磁場印加などで
エネルギー差をもつ



研究実績まとめ

光から電子スピンへの
コヒーレンス転写

Phys. Rev. Lett. 2008
(小坂)

単一光子→電子転写

APL 2010 (小坂)

光による電子スピンの
コヒーレンス測定

Nature 2009
(小坂)

量子テレポーテーション転写

Nature Photon. 2016
(小坂&Wrachtrup)

書き込み

読み出し

メモリ

操作

幾何学量子ビット
(幾何学的エコー)

Nature Commun.
2016
(小坂)

ダイヤモンドNV

もつれ測定

単一光子
非線形操作

Nature Photon. 2009
(小坂&枝松)

2電子(光子)
量子もつれ操作

Phys. Rev. Lett. 2009
(小坂&今村)
Phys. Rev. Lett. 2012
(小坂&枝松)

単一光子発光

Nature Photon. 2012
(水落&加藤)
Nature Commun. 2014
(寺地&Jelezko)

光子 - 電子
量子もつれ吸収

Phys. Rev. Lett. 2015
(小坂)

日本の強みと取り組むべき課題

日本の強みと弱み

半導体における技術を活かし、**量子メモリー**として圧倒的な優位にある
ダイヤモンドを用いた**量子デバイス**技術で
世界に対して強みをもつ

斬新なアイデア軽視の弱み
異分野融合を率先する人材の欠如

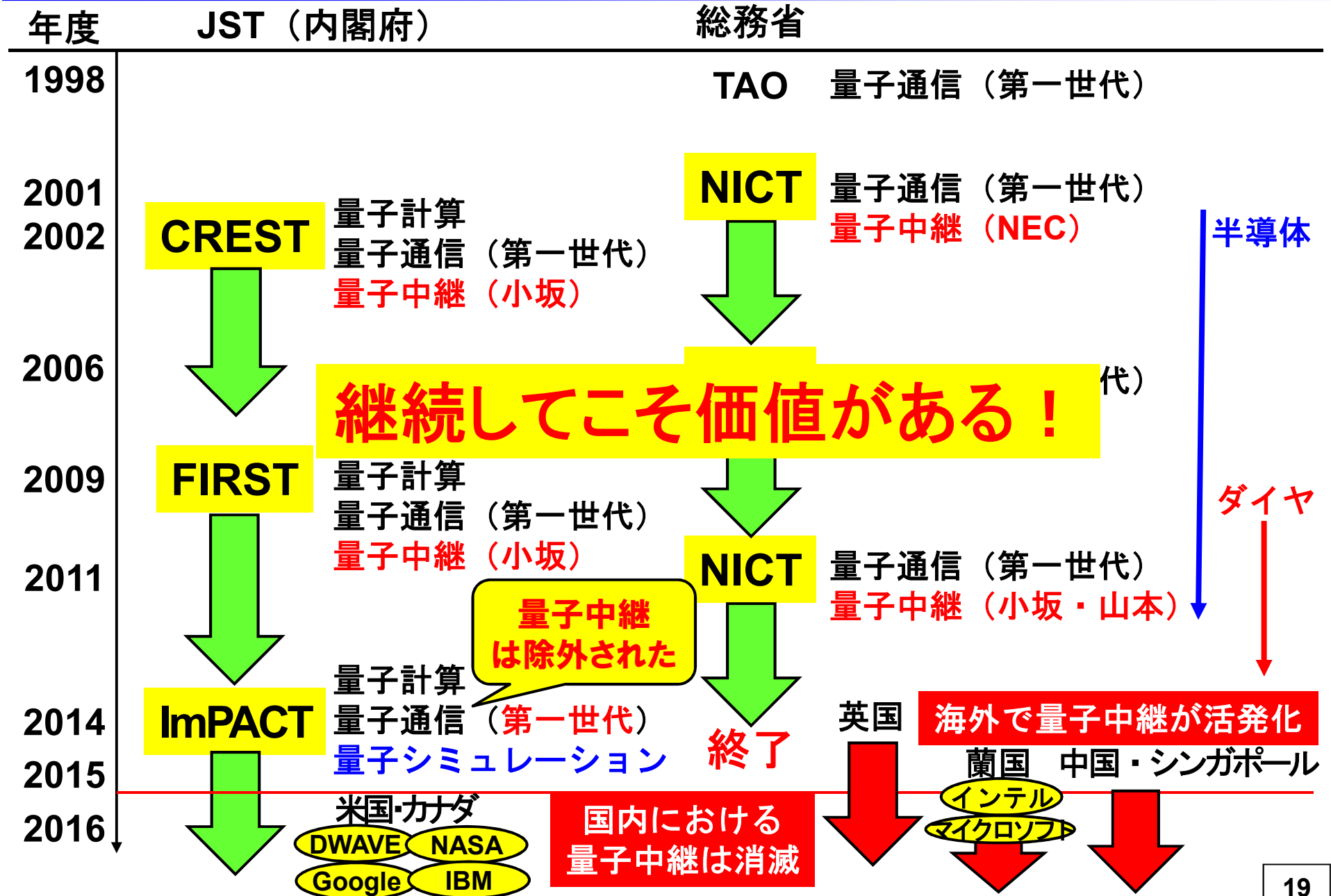
今後10年で取り組むべき課題

基礎理論、原理実証、デバイス作製、システム構築、アーキテクチャー
など一貫した開発体制の強化

研究推進上の課題

人材不足による層の薄さ
基礎物理からシステム開発まで見通せる人材の欠如
人重視ではなく組織重視の国策

量子通信プロジェクトの推移



海外の量子技術動向

英国：500億円/5年の巨大国家プロジェクト
(Oxford大、Canbridge大、Bristol大など)
量子計算、量子通信、量子中継、量子計測

オランダ：250億円/10年の国家プロジェクト
(インテルと提携、Delft大中心)

中国：100億円3年の国家プロジェクト
(USTC、北京大学など)

米国・カナダ：グーグル、インテル、D-Waveなどの民間や軍関係、国研、大学が連携し100億円規模の国家プロジェクトが多数乱立

ドイツ：マックスプランクを中心に多数の大学が基礎科学を牽引
(Stuttgart大、Ulm大など日本と連携)

EU・英国・米国：国際連携プロジェクト
(DIAMANT, DIADEMS, SIQS, EQuaM, QuASAR)

オーストラリア・シンガポール・・・

まとめ

- ・第三世代量子情報通信の準備をしなければならない。
- ・距離と速度の『原理的』限界は条件設定次第である。
- ・固体量子の進化は我々の想像を遥かに超えている。
⇒ **Game change**がすぐに起こる！