小芦・佐々木研究室

（量子情報　理論）　量子通信、量子コンピュータ、量子インターネット、基礎論…

量子情報の面白さ：基礎と応用が密接に関連　　例えば…

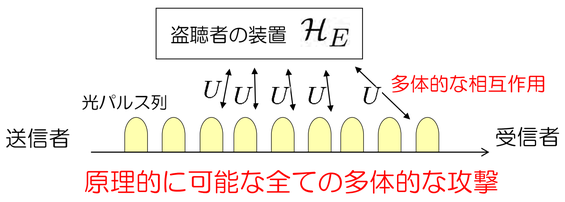
量子暗号

BennettとBrassardによる提案（1984年）

- ハイゼンベルクの不確定性原理を利用

「観測すると壊れる」

「盗聴者に読まれたことがあとでチェックすればわかる」



原理的に可能な全ての多体的な攻撃

直接計算しようとしても、歯が立たない。そこで…

量子力学のいろいろな性質を総動員して考察する。
（エンタングルメント、相補性、非局所性など）

シャノン理論の量子版などの根源的な問題が明らかに。

物理法則によって守られた高いセキュリティをもつ暗号通信の実現

量子情報の大きさとは？

古典情報　　シャノンの理論（情報理論の礎）

$\{p_i, i\}$　　ABCDBCDBCABCDBC….

確率　文字

$H(\{p_i\}) \equiv -\sum_i p_i \log_2 p_i$ bits Shannon(1948)

この信号を保存するのに最低限必要なメモリの大きさ

量子情報の場合は？

$\{p_i, \rho_i\}$　この信号を保存するのに必要十分な量子メモリの大きさは？

量子状態

$\rho \equiv \sum_i p_i \rho_i$

$S(\rho) \equiv -\mathrm{Tr}[\rho \log_2 \rho]$

$$\rho = \bigoplus_l p^{(l)} \sigma^{(l)} \otimes \tau^{(l)}$$

$$S(\rho) = H(\{p^{(l)}\}) + \sum_l p^{(l)} S(\sigma^{(l)}) + \sum_l p^{(l)} S(\tau^{(l)})$$

必要な古典メモリ(bits)　必要な量子メモリ(qubits)　保存の必要なし

一見、無関係に思える量子暗号のセキュリティの研究の副産物として、この公式が発見された。

量子誤り訂正

～大規模量子コンピュータに必須の仕組み～

量子ビット ⟷ 環境系：外場、不純物 etc

環境系とエンタングルしてしまう = デコヒーレンス

$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \to |\alpha|^2|0\rangle\langle 0| + |\beta|^2|1\rangle\langle 1|$

- 量子状態のパラメータは指数個の複素数
- 複製不可能定理→安直な冗長化はできない [Wootters-Zurek82]
- そもそもアナログの訂正ってできるの？

量子誤り訂正符号 [Shor, Stean]

- データはアナログのまま、発生したエラーをデジタル化

Peter Shor

http://www-math.mit.edu/~shor/

ムーンショット目標６

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal6/

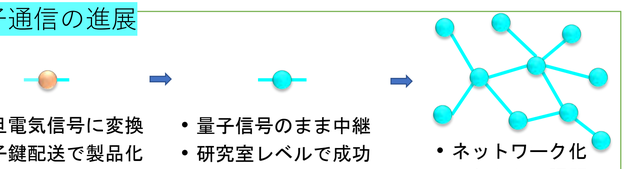
ムーンショット目標６

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

理論研究のプロジェクトを担当

量子インターネット　～量子状態の大規模通信網～

量子通信の進展



- 一旦電気信号に変換
- 量子鍵配送で製品化
- 量子信号のまま中継
- 研究室レベルで成功
- ネットワーク化
- これからの課題

アプリケーション

- 通信量の指数削減
  - 分散量子計算
  - ビザンチン将軍問題
- 高速意思決定
- セキュリティ
  - 秘匿量子計算
  - センシング
  - 量子マネー
  - 超長基線望遠鏡

量子状態送信の前提問題

- 複製不可能定理
  - 信号増幅できない
  - 信号送信に失敗すると再送もできない
- 現状の通信システムのようにはいかない

→

- 量子テレポーテーション
  - 信号送信=エンタングルメント共有+古典通信
- エンタングルメントの事前配布問題にすり替わる
  - エンタングルメントの配布は失敗してもやり直せる!

大規模通信網化における課題

- 大規模化しても量子の通信リソースを効率的に使える？
- 色々な物理系が混在していても効率的に使える？
- 本当に動くことをどう確かめる？
  - 小規模なネットワークを作って試してみる。(各国で開始中!)

日本での取組　QITF QUANTUM INTERNET TASK FORCE

量子アルゴリズム　～物性・化学の高速・高精度なシミュレーション～

量子多体系の問題

- 時間発展(ダイナミクス)　$|\psi\rangle \to e^{-iHt}|\psi\rangle$
- 熱平衡状態　$\rho_\beta \propto e^{-\beta H}$
- 固有値/固有状態　$H|\phi_n\rangle = E_n|\phi_n\rangle$

→ 低温物理（磁性,超伝導 etc）　化学反応

量子計算が従来の古典計算機より

多項式的 or 指数的な計算時間の改善

指数的な計算メモリの改善

の可能性！！

R. Feynman (1981) from wikipedia

当研究室の成果

K. Mizuta, K. Fujii, QIP 2023 / K. Mizuta, K. Fujii, Quantum 7, 962 (2023)

時間依存系の最適な量子アルゴリズム

$$|\psi\rangle \to \mathcal{T}\exp\left(-i\int_0^t \mathrm{d}t' H(t')\right)|\psi\rangle$$

時間周期系・準周期系

最適な計算コスト　$\alpha t + \omega t \log(1/\varepsilon)$　≅ 理論限界

高速・高精度な量子計算に向けた課題

理論上最も良い計算コストを持つ量子アルゴリズムの構築

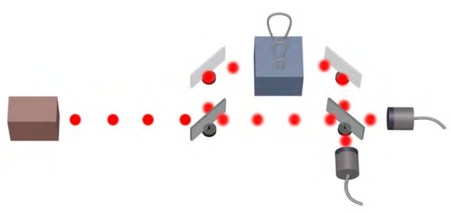
- Trotter 分解　・ユニタリ線型結合　・量子特異値変換

“量子多体系(物性物理)の知見”

- Lieb-Robinson 限界
- 時間周期系
- 量子開放系

量子情報には、まだまだ知らないことが眠っている！

全く新しい原理に基づく量子暗号



（従来）
「盗聴者に読まれたことがあとでチェックすればわかる」

「そもそも盗聴者がほとんど読めない」
不確定性原理は無関係

LETTER

doi:10.1038/nature13303

Practical quantum key distribution protocol without monitoring signal disturbance

Toshihiko Sasaki[1], Yoshihisa Yamamoto[2,3] & Masato Koashi[1]

Sasaki, Yamamoto, Koashi, Nature **509**, 475 (2014).
Takesue, Sasaki, Tamaki, Koashi, Nature Photonics **9**, 827 (2015).

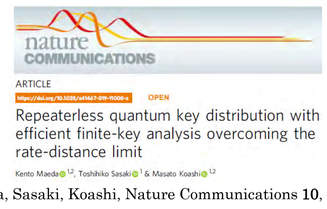
どうやら量子力学には、我々が３０年気が付かなかった情報の隠し場所があるらしい・・・

大学院生も第一線で活躍！

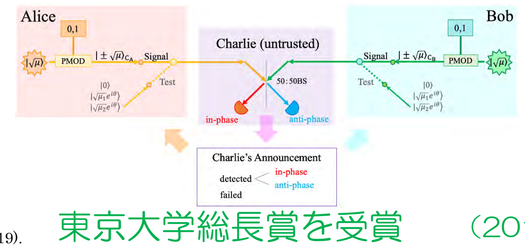
欧州のグループが
「量子暗号の通信距離を数百キロ長くするアイデア」をNature誌に発表
でも肝心の「セキュリティ」がどうなのかは不明

世界中の大御所がセキュリティ証明を競うお祭り状態

当時M1の学生が無謀にもこれに挑戦、見事に解決！



Maeda, Sasaki, Koashi, Nature Communications **10**, 3140 (2019).



東京大学総長賞を受賞　（2019年度）

2021年度にも博士学生が総長賞を受賞