2024 年度 MERIT / MERIT-WINGS 自発融合研究 報告書

測定型量子計算の包括的なプログラミング言語の開発

福島誠人 [A]，渡邉悠稀 [Bf]

[A] 理学系研究科 物理学専攻 井手口研究室

[B] 理学系研究科 物理学専攻 岡研究室

提出日：2025 年 1 月 15 日

要旨

本研究は，測定型量子計算（Measurement-based Quantum Computation, 以下 MBQC）の理論的枠組みにもとづき，リソース状態から測定パターン生成までを包括的に扱う実用的なソフトウェアの開発を目的とする．本研究で構築したソフトウェアは，量子アルゴリズム等に基づく量子回路をシミュレーションや実機で実行可能な測定パターンへと変換する「MBQC 用コンパイラ」として機能する．測定パターンベースのライブラリである Graphix と連携することで，IBM や Quandela の量子デバイス，Aer や Perceval などのシミュレータ上での量子アルゴリズム実装やその最適化が可能になることが見込める．これにより，量子デバイス実機におけるブラインド量子計算や量子計算機の検証アルゴリズム等 MBQC プロトコルの開発、実装や改善がより容易になることが期待される．

著者紹介

[A] 福島誠人：専門は光学計測（中赤外フォトサーマル顕微鏡）．本研究ではグラフ状態から測定パターンを出力するまでの一連のワークフローの実装を担当した．

[B] 渡邉悠稀：専門は物性理論（古典確率過程の時間周期駆動・非エルミート物理）．本研究では ZX-Calculus の計算アルゴリズムを実装した．

研究背景

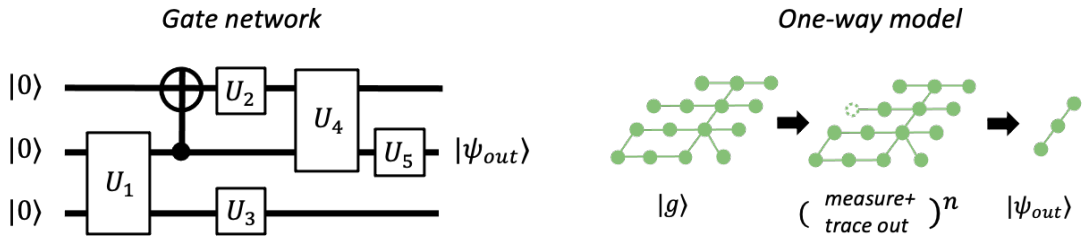

図 1. MBQC の概要図．入力状態に対して測定とフィードフォワード操作を行っていくことで，汎用的な量子計算を実現する [1].

MBQC は，スタビライザー状態の一種であるグラフ状態への量子測定（以下ではグラフ状態と量子測定を合わせて計算グラフと呼ぶ）と，測定結果に応じた訂正（フィードフォワード）操作を組み合わせることで，汎用的な量子計算を実現する理論的枠組みである[1]（図 1）．回路モデルとは異なり，MBQC はグラフ状態に対する量子測定とフィードフォワード操作のみで万能量子計算を実現できるため，ユニバーサルゲートセットを確率的にしか実現することができない光量子コンピュータで強い関心を集めている．また，MBQC の枠組みを用いることで，クライアント側に高度な量子リソースを要求せずに安全なクラウド量子計算を実現するブラインド量子計算が提案されており [2]，MBQC は理論的にも応用的にも有望な計算手法と位置づけられる．また，近年では量子

回路のゲート数最適化のために提案された ZX Calculus が MBQC の計算グラフの最適化にも応用可能であることが示されている[3]. 実機に近い低レイヤーでの量子ビットの操作手順を記述する言語として測定パターン[4]が整備されている．測定パターンでは，測定コマンドの交換則を用いることで, 実機や計算機でのシミュレーションに合わせた実行順序へと最適化することができる．

しかし，これら MBQC の理論的枠組みが持つ階層性と自由度を活用し，実機実行やシミュレーションと結びつけるための実用的なソフトウェア基盤は未成熟である．Qiskit などの量子回路モデルを前提とするソフトウェアでは，フィードフォワード操作を取り入れることで MBQC の記述は可能だが, MBQC で必要となるグラフ状態の Qubit 数だけ回路幅が必要となり, 埋め込む量子計算を効率的にプログラミングすることには適していない．MCBeth[5]は測定パターンをもとにシミュレーションを行うソフトウェアであるが，測定コマンドの並べ替え機能のみを実装しており，ZX Calculus で行われるような MBQC 上で許されるグラフの変形操作を扱うことには適していない。ZX Calculus は PyZX[6]で行えるが, 計算グラフの最適化に終始しており, 実機での実行コマンド列である測定パターンへと変換を行うコンパイラの部分は整備されていない. これらの状況から, 計算グラフの設計から測定パターンの最適化までを包括的にカバーするソフトウェア基盤が求められている．

研究目的

本研究では，MBQC の理論的枠組みに忠実に基づきながらもソフトウェア実装に適した構造に再構築した上で, 計算グラフの設計から測定パターンの最適化までを包括的にサポートするソフトウェアを開発する．本ソフトウェアは, MBQC における量子計算の最も抽象的な表現である計算グラフとそれに付随するフィードフォワード戦略から，実機で実行可能な測定パターンへと高速かつ安全に変換する「MBQC 用コンパイラ」に相当する計算グラフの形式でリソース状態を直感的に設計し, 数値シミュレーションや実機実行に適した形式へ変換する基盤を提供することで，量子デバイスにおける応用・検証を容易にすることを目指す．

本研究の価値と特徴

本研究では，(1) 計算グラフの最適化層，(2) フィードフォワード操作を効率的に行う層，(3) 測定パターンとして出力する層を，階層的に統合したアーキテクチャを構築した（図 2）．このアーキテクチャにより，本ソフトウェアは計算の抽象表現である計算グラフを MBQC における「アセンブリ言語」に相当する測定パターンへと直接コンパイルする「MBQC 用コンパイラ」として機能する．ゲートモデルでは，量子ゲート列をハードウェア命令に翻訳するソフトウェア基盤が整備されているが，MBQC では測定とフィードフォワードを中核とする計算資源ゆえに, 単純な回路変換では対処しにくい. 本研究のソフトウェアは，こうした MBQC 特有の計算資源を直接扱える点に理論的な意義がある．つまり，本ソフトウェアは MBQC 理論を抽象的な議論から「使える形」へと落とし込み, 新たな量子アルゴリズム設計や資源最適化研究を促す研究基盤としての役割を担うことが期待できる．

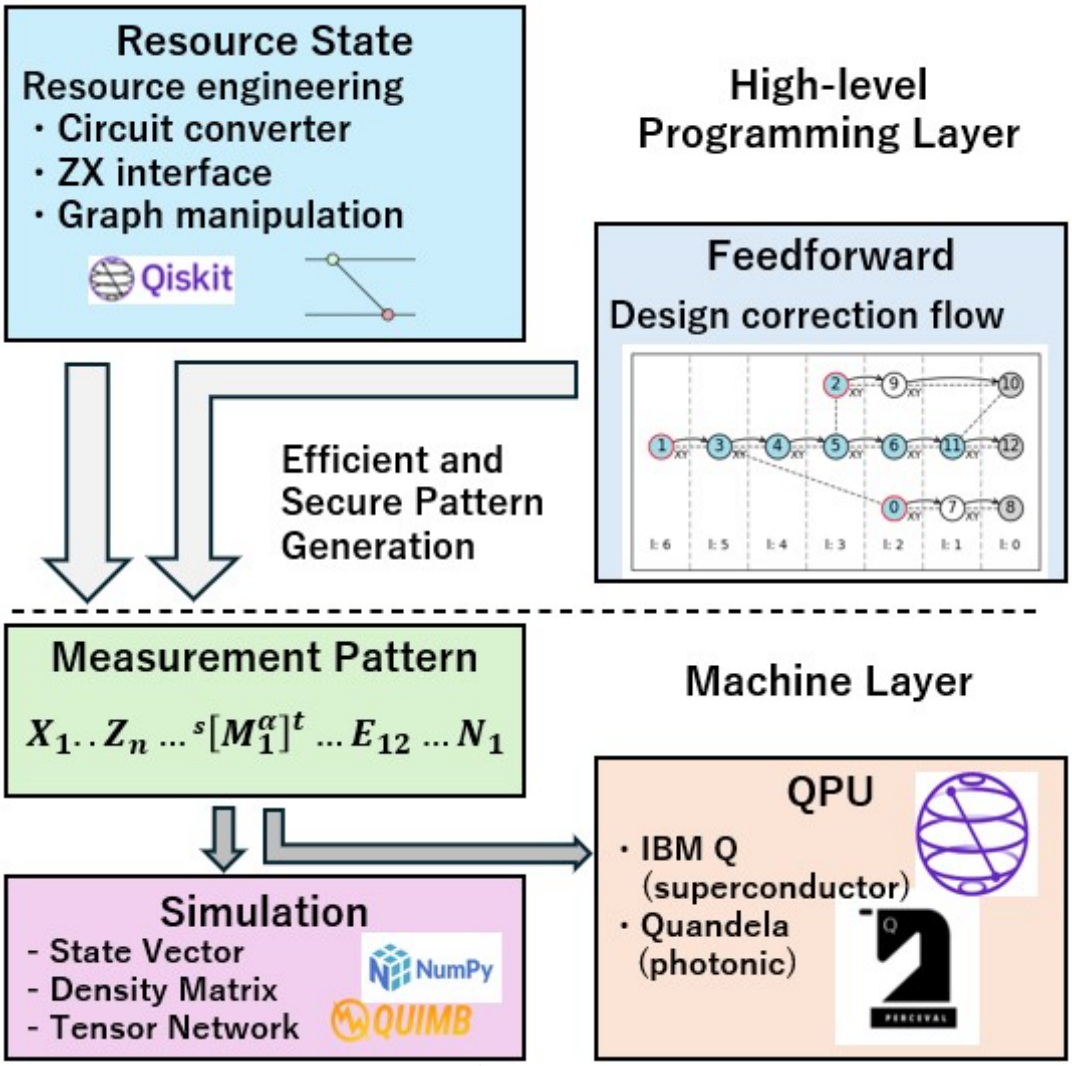

図 2. MBQC コンパイラーとアセンブリ言語翻訳のアーキテクチャ．High-level Programming Layer が本ソフトウェアに相当する．上位層で計算グラフとフィードフォワード操作のプログラミングを行い，実行に最適化された測定パターンを生成し，シミュレーションや実機での実行をサポートする．

結果

本ソフトウェアは Backens et al.[4]の理論的枠組みに基づきつつソフトウェア実装に適した形に発展を行い，計算グラフを ZX diagram で表現し，その上で最適化処理を行えるように実装した（図 2）．ZX diagram は，量子状態・操作をノードとエッジを用いてグラフィカルに表現したテンソルネットワーク状の構造であり，ZX Calculus[3]の理論的枠組みにもとづいて変形・単純化が可能である．

本研究では，計算グラフにおいて不要な Pauli 測定ノードを除去する最適化処理を実装した（図 3，表 1）．Pauli 測定ノードとは，Pauli 基底と呼ばれる特別な測定を示すノードである．特定の条件を満たす Pauli 測定の影響は，隣り合うノードの測定操作の影響として吸収できるため，ZX diagram から除去できることが知られている．これにより，もとの計算グラフが実現する計算能力を維持しつつ，測定パターンを簡潔化できる．

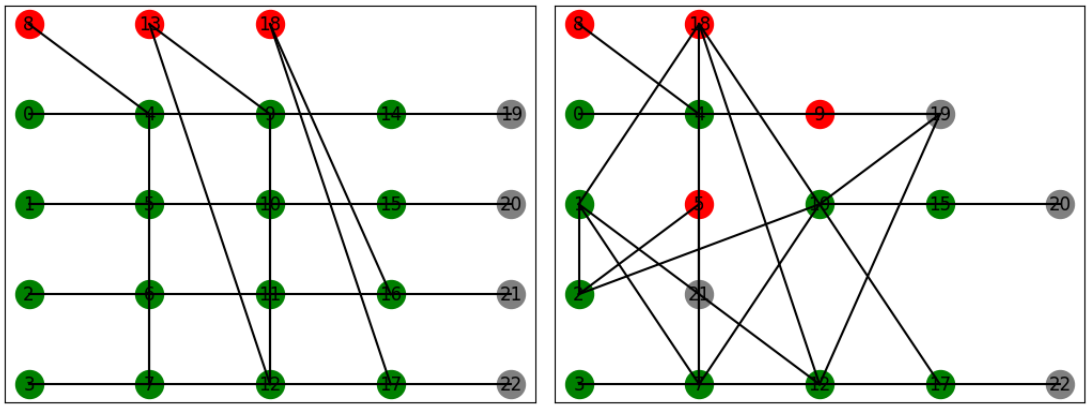

図 3. 初期状態（左）と，不要な Pauli 測定ノードを除去する最適化処理を施した結果（右）．緑色は XY 平面測定をするノード，赤色は YZ 平面測定をするノード，黒色は出力ノードを表す．測定角は表 1 を参照．

表 1. 初期状態の測定基底(a)と最適化処理後の測定基底(b)．ノード番号に色をつけているものが Pauli 測定ノードである．

(a)

node	plane	angle $[/\pi]$
0	XY	0
1	XY	$-2/3$
2	XY	$-2/3$
3	XY	-1
4	XY	$-1/3$
5	XY	$-1/3$
6	XY	0
7	XY	$-2/3$
8	YZ	$2/3$
9	XY	$-2/3$
10	XY	$-1/3$
11	XY	0
12	XY	$-1/3$
13	YZ	0
14	XY	0
15	XY	$-1/3$
16	XY	0
17	XY	$-1/3$
18	YZ	$2/3$

(b)

node	plane	angle $[/\pi]$
0	XY	0
1	XY	$4/3$
2	XY	$4/3$
3	XY	-1
4	XY	$5/3$
5	YZ	$5/3$
7	XY	$4/3$
8	YZ	$2/3$
9	YZ	$4/3$
10	XY	$5/3$
12	XY	$5/3$
15	XY	$-1/3$
17	XY	$-1/3$
18	YZ	$2/3$

また，従来は測定パターン上で間接的に行われていたフィードフォワード操作の最適化を，測定パターンよりも一段階上の層（図 2）において直接的に行うように再構成した．具体的にはフィードフォワード操作を Flow（Causal Flow，Generalized Flow，Pauli Flow [7]）と呼ばれる決定性を担保する写像で表現し，Flow の変換を経由してフィードフォワード操作の最適化を実現した（図 4）．フィードフォワードの最適化では，グラフ状態上のスタビライザー演算子の恒等性を用いることによって，計算の深さを削減することができる．実行結果は[4]の”Signal Shifting”で実現される結果と整合しており，フィードフォワード操作が本研究の枠組みを用いても最適化可能であることを示している．

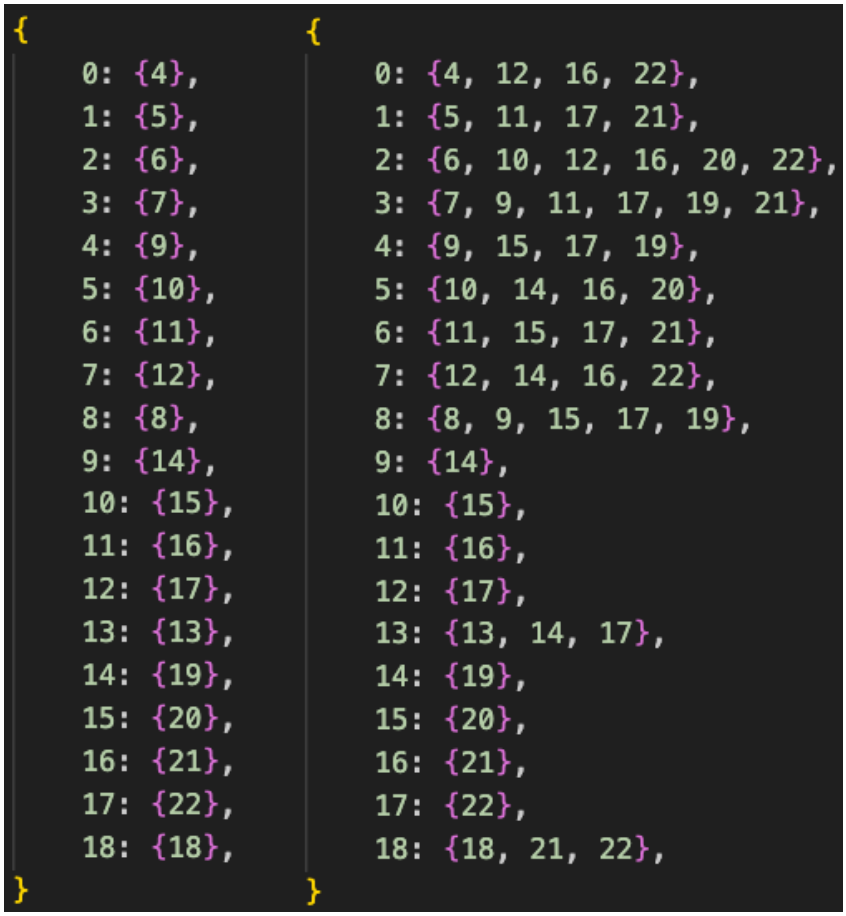

図 4. フィードフォワード操作の最適化処理の結果. 左は最適化処理前の Flow(図 3 左・表 1(a)のグラフ状態に対応)で，右は最適化処理後の Flow を表す.

さらに，最適化後の基本グラフ状態とフィードフォワード操作をもとに，実行可能な測定パターンへと変換（コンパイル）できることを確認した（表 2，3）．表 2 は最適化処理をせずに測定パターンにコンパイルした結果で，表 3 は最適化処理の後にコンパイルした結果である．最適化処理をしなかった場合は測定パターンを構成するコマンド数は 74 個であるのに対し，最適化処理をした場合は 62 個まで削減された．

得られた 2 つの測定パターンから状態ベクトルを生成し，ランダムな 2x2 のエルミート演算子の期待値を比較したところ，最適化処理後も期待値が同一となることを確認した（図 5）．これは最適化処理が正しく行われていることを示唆する結果である．

表 2. 初期状態とフィードフォワード操作の最適化を行わずにコンパイルすることで得られた測定パターン．紙面の都合上省略しているが，Command の総数は 74 である．

Command	Contents
Nodes	$4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22$
Edges	$(9, 10), (10, 11), (0, 4), (9, 13), (11, 16), (1, 5), (4, 9), (3, 7),$ $(12, 13), (6, 7), (5, 10), (14, 19), (7, 12), (16, 21), (9, 14),$ $(16, 18), (17, 18), (4, 7), (10, 15), (12, 17), (6, 11), (9, 12),$ $(15, 20), (11, 12), (17, 22), (2, 6), (5, 6), (4, 8)$
Measurements	Node 0: Plane = XY, Angle = 0, s-domain = {}, t-domain = {}
	Node 1: Plane = XY, Angle = -2.094, s-domain = {}, t-domain = {}
	Node 2: Plane = XY, Angle = -2.094, s-domain = {}, t-domain = {}
	Node 3: Plane = XY, Angle = -3.142, s-domain = {}, t-domain = {}
	Node 4: Plane = XY, Angle = -1.047, s-domain = $\{0\}$, t-domain = $\{8, 3\}$
	$\vdots$
	Node 17: Plane = XY, Angle = -1.047, s-domain = $\{12\}$, t-domain = $\{18, 7\}$
	Node 18: Plane = YZ, Angle = 2.094, s-domain = $\{11, 12\}$, t-domain = {}
X Operations	Node 19: Domain = $\{14\}$
	Node 20: Domain = $\{15\}$
	Node 21: Domain = $\{16\}$
	Node 22: Domain = $\{17\}$
Z Operations	Node 19: Domain = $\{9\}$
	Node 20: Domain = $\{10\}$
	Node 21: Domain = $\{11\}$
	Node 22: Domain = $\{12\}$

表 3. 初期状態とフィードフォワード操作の最適化を行ってからコンパイルすることで得られた測定パターン．Command の総数は 62 個である．

Command	Contents
Nodes	$4, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22$
Edges	$(5, 21), (1, 2), (0, 4), (9, 19), (3, 7), (2, 10), (12, 19),$ $(5, 7), (7, 12), (17, 18), (2, 5), (4, 7), (10, 15), (1, 18),$ $(12, 17), (1, 21), (4, 19), (7, 10), (15, 20), (17, 22),$ $(1, 7), (4, 8), (10, 19), (12, 21), (12, 18), (5, 18)$
Measurements	Node 0: Plane = XY, Angle = 0, s-domain = {}, t-domain = {} Node 1: Plane = XY, Angle = 4.189, s-domain = {}, t-domain = {} Node 2: Plane = XY, Angle = 4.189, s-domain = {}, t-domain = {} Node 3: Plane = XY, Angle = −3.142, s-domain = {}, t-domain = {} Node 4: Plane = XY, Angle = 5.236, s-domain = {0}, t-domain = {} ⋮ Node 18: Plane = YZ, Angle = 2.094, s-domain = $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 12\}$, t-domain = {}
X Operations	Node 19: Domain = $\{8, 3, 4\}$ Node 20: Domain = $\{2, 5, 15\}$ Node 21: Domain = $\{1, 18, 3\}$ Node 22: Domain = $\{0, 17, 18, 2, 7\}$
Z Operations	Node 19: Domain = $\{9, 5, 7\}$ Node 20: Domain = $\{8, 10, 4\}$ Node 21: Domain = $\{0, 2, 5, 7\}$ Node 22: Domain = $\{1, 3, 4, 8, 12\}$

```
Expectation values for rand_mat
================================
rand_mat:
 [[1.74138237+0.j         0.86083945-0.12750481j]
 [0.86083945+0.12750481j 1.15586911+0.j        ]]
Before optimization:  1.4486257417605
After optimization:  1.4486257417605004
np.isclose:  True
```

図 5. 最適化処理を行う前後の測定パターンが同じ計算を埋め込んでいることを確認するため，それぞれのパターンの出力状態に対してランダムな 2x2 のエルミート演算子の期待値を比較した．期待値が計算精度の範囲内で一致することを確認した．

課題と展望

現段階では，Pauli 測定ノードの除去で Clifford ゲートに相当する計算を除去することができるようになった．一方で，近年では一部の non-Clifford ゲートを除去する方法も提案されており[8]，これを反映した実装にすることで，MBQC 理論が示す幅広い計算モデルやリソース状態への対応が実現できる．これにより，さらなる最適化や高度な計算資源の活用が期待できる．また，本プロジェクトの前身である Graphix の測定パターンとの互換性を担保することで，graphix-ibmq，graphix-perceval サブモジュールを用いた IBM Quantum，Quandela デバイスや Aer，Perceval シミュレーター上でのデモ実行可能である．

今後の展望としては，計算グラフを実機で用意可能なグラフ形状へと埋め込むアルゴリズムの開発が挙げられる．MBQC は回路型よりも幅広いグラフ形状を計算に使用可能であるため，実機でのグラフ構築コストと計算グラフの最適化を組み合わせて考えることで，MBQC の省リソース性を最大限活用した実行方式を提案できる可能性がある．また，本研究で構築したソフトウェアにおいて，フィードフォワード操作を拡張することで，誤り耐性を持つような測定パターンのコンパイル方法を実装することも可能である．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，多くの方々および団体からご支援とご協力を賜りましたこと，心より感謝申し上げます．

まず初めに，Fixstars Amplify 社の皆様，特に代表取締役社長の平岡卓爾様には，本研究の契機となる機会を与えてくださったこと，並びに多大なご支援・ご協力を賜りましたことを心より感謝いたします．またオックスフォード大学所属の博士研究員である角南槙一氏，東京大学理学系研究科日下研究室所属の佐々木大地氏には定期的に研究や実装の方針を議論していただきました．東京大学理学系研究科藤堂研究室所属の白谷空氏には fastflow モジュールの実装をしていただき，効率的で高品質なプログラムの実装に関し多くの助言をいただきました．深く感謝を申し上げます．

次に，情報通信機構（NICT）の皆様に感謝を申し上げます．本研究を 2024 年度 NICT Quantum Camp 探索型人材育成コースに採用していただき，アドバイザーの皆様からの貴重な助言や経済的支援をいただきましたこと，深く感謝いたします．

最後に，研究活動に対する経済的な援助を賜りました東京大学国際卓越大学院「統合物質・情報国際卓越大学院プログラム」の皆様に感謝を申し上げます．

[1] R. Raussendorf et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 22 (2001).
[2] A. Broadbent et al., FOCS (2009).
[3] M. Backens et al., Quantum **5**, 421 (2021).
[4] V. Danos, et al., J. ACM, **54**, 2 (2007).
[5] A. Evans et al., arxiv:2204.10784 (2022).
[6] A. Kissinger et al., EPTCS 318 (2020).
[7] D. E. Browne et al., New J. Phys. **9**, 8 (2007).
[8] A. Kissinger et al., Phys. Rev. A, **102-2**, 102:022406, 8 (2020).