

# 非平衡量子系における新奇現象のための量子アルゴリズム



藤村晴伸

大阪大学 理学研究科 物理学専攻

共同研究者：藤井啓祐、本多正純、Le Duc Truyen (Ongoing)

HP:



## 1. 導入

### ムペンバ効果

[Mpemba-Osborn, 1969]

非平衡系では直感に反する現象が起こる。  
例：“熱いお湯がぬるいお湯よりも早く凍る”

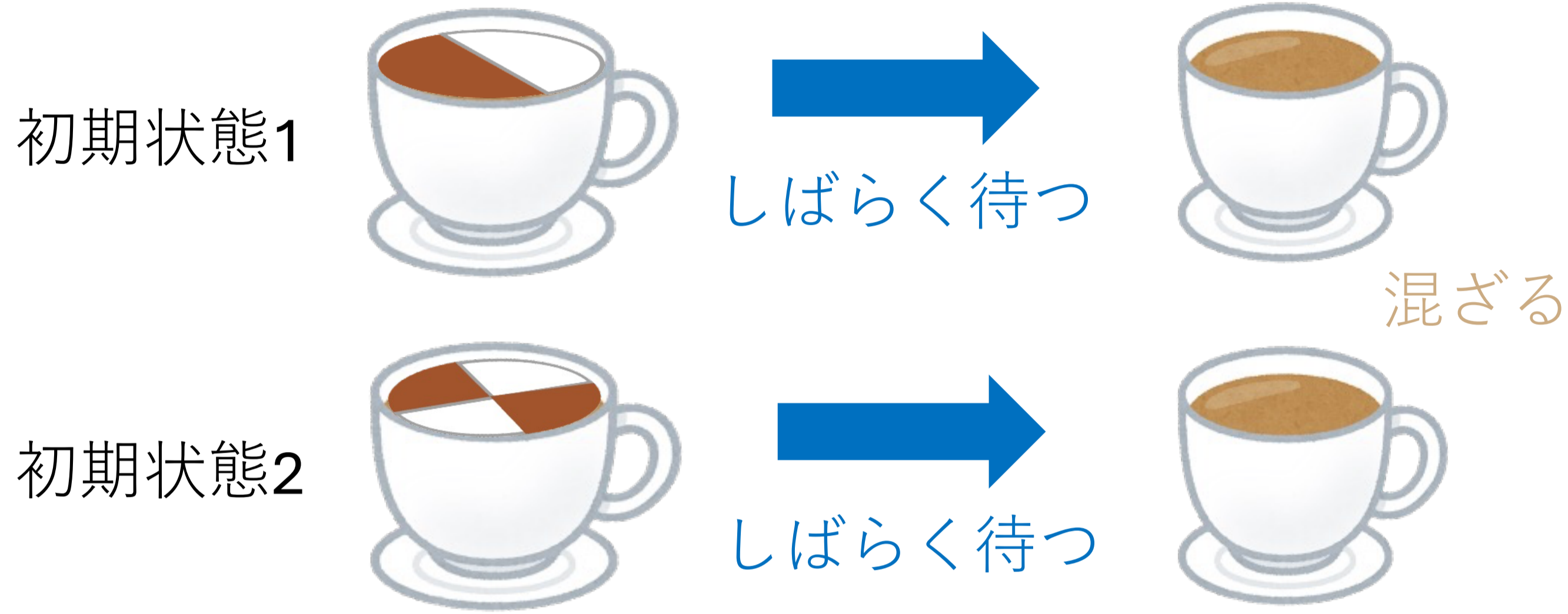
➡ 非平衡物理の長年のトピックの一つ

### 量子ムペンバ効果

[Ares et al, 2022]

対称性の破れた状態

対称性のある状態



### 量子ムペンバ効果

対称性の破れが大きいほど、対称性の回復が早くなる

(初期状態2よりも初期状態1の方が早く混ざる)

➡ 直感に反する異常な緩和現象！

### 分野背景

量子ムペンバ効果は物性、素粒子論、量子情報といった幅広い分野で研究され、注目を集めている。

しかし、量子ムペンバ効果の原理や起こる条件は未だによくわかっていない。

### 課題

- 理論解析は簡単なスピン系や共形場理論のみ。
- 数値計算でも非平衡系や実時間発展を扱うことは難しい。現状は小さいサイズの系のみ計算可能。

特に、自由度の多い量子多体系や場の量子論において、量子ムペンバ効果の解析は非常に困難。

### 本研究

- 自由度の多い量子系で量子ムペンバ効果を効率的に解析する量子アルゴリズムを考案した。
- 考案した手法は既存手法と比べて指数加速を実現。
- 例としてSchwinger model (2次元量子電磁気学) における量子ムペンバ効果を実際に解析した。

## 2. 対称性の破れの定量化

縮約密度行列を保存電荷の固有ベクトルで行列表示する。

$$\rho_A = \begin{pmatrix} \blacksquare & * & * \\ * & \blacksquare & * \\ * & * & \blacksquare \end{pmatrix} \quad \rho_{A,S} = \begin{pmatrix} \blacksquare & & & \\ & \blacksquare & & \\ & & \blacksquare & \\ & & & \blacksquare \end{pmatrix}$$

非対角成分=対称性の破れ

対称性のある状態

### Rényi Entanglement Asymmetry (REA)

$$\Delta S_A^{(n)} \equiv \frac{1}{1-n} (\log \text{Tr}[\rho_{A,S}^n] - \log \text{Tr}[\rho_A^n])$$

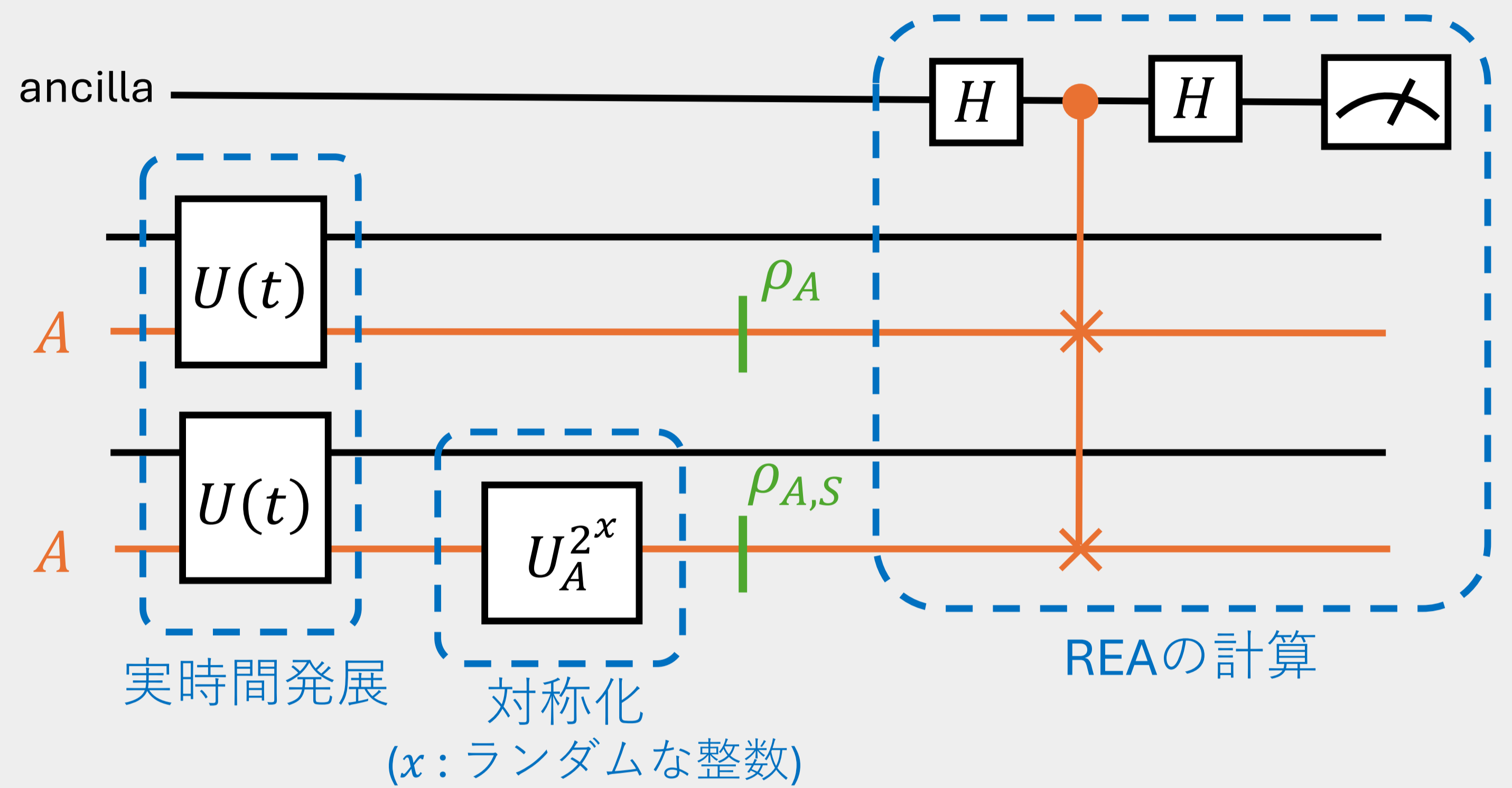
REAは対称性の破れを定量化する性質の良い量！

## 3. 量子アルゴリズム

$\rho_A, \rho_{A,S}$  :  $2^{N_A} \times 2^{N_A}$  行列,  $N_A$  : 注目している系Aのサイズ  
古典計算では $O(2^{3N_A})$ の計算コストが必要...

➡ 本研究では $\rho_A, \rho_{A,S}$ の構成やREAの計算を全て量子コンピューター上で行う。

本研究で考案した量子回路 (n = 2の例)



### メリット

- 必要な測定回数が系のサイズに依らない  
 $N_{\text{shot}} = O(\epsilon^{-2})$ ,  $\epsilon$ : 求める精度
- 量子回路の複雑性のスケールリングが冪則  
# of 2 qubit gates  $\sim N^\#$ , # of T gates  $\sim N^\#$ ,  $N$ : 系のサイズ

従来手法と比べて指数加速を実現！場の量子論といった自由度の多い量子論の解析に最適。

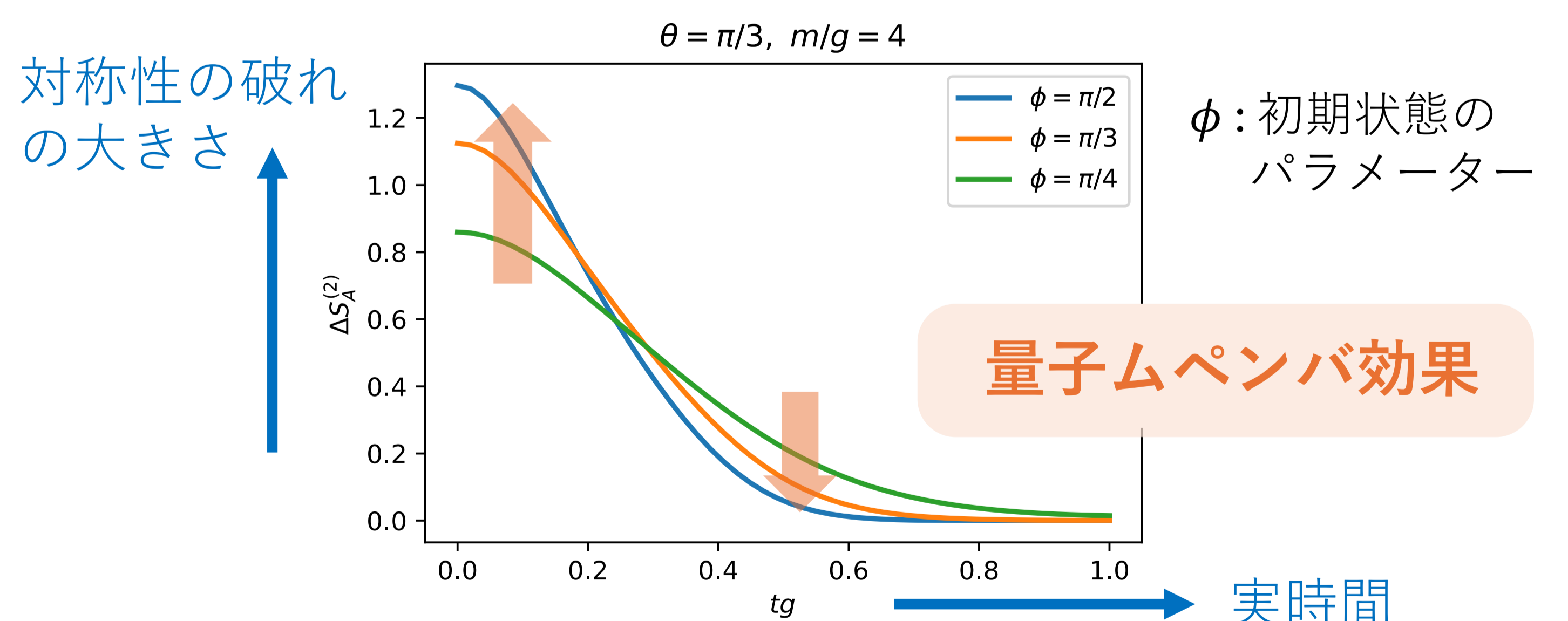
## 4. 応用例

場に量子論の例としてSchwinger model を考える。

$$H = H_{ZZ} + H_{\pm} + H_Z$$

$$H_{ZZ} \sim \sum_n \sum_{1 \leq k < \ell \leq n} Z_k Z_\ell, \quad H_{\pm} \sim \sum_n (X_n X_{n+1} + Y_n Y_{n+1}), \quad H_Z \sim \sum_n Z_n$$

$X_n, Y_n, Z_n$ : n番目のサイト上のパウリ行列



本研究の提案した手法を用いて、実際に場の量子論の量子ムペンバ効果が解析できることを示した。

## 5. まとめ

- 量子ムペンバ効果といった非平衡現象は大きい系で解析することが困難。
- 本研究では量子計算を用いた解析方法を考案し、場の量子論のような系に実際に応用できることを示した。