

量子ウォークによるドレスト光子のエネルギー移動の自律性について

A quantum walk simulation of autonomy in dressed photon energy transfer

横浜国立大¹, 広島工業大², 長浜バイオ大³, (株)リコー⁴, ドレスト光子⁵,瀬川 悦生¹○, 松岡 雷士², 西郷 甲矢人³, 三宮 俊⁴, 大津 元一⁵Yokohama Nat. Univ.¹, Hiroshima Inst Tech², Nagahama BioSci Tech³, Ricoh Co., Ltd⁴, Dressed Photon⁵,○Etsuo Segawa¹, Leo Matsuoka², Hayato Saigo³, Suguru Sangu⁴, Motoichi Ohtsu⁵

E-mail: segawa-etsuo-tb@ynu.ac.jp

量子ウォーク (QW) は, グラフの各有向辺で生成される線形空間上のユニタリ作用素で, 離散的に時間発展をする. そして幾つかの代表的な量子的ダイナミクスの離散的類推を与えるので, 量子デバイス上でのシミュレーターとしての応用が期待されている. この研究では, この単純な QW モデルを通じてナノ物質上のドレスト光子のエネルギー推移の自律性 [1] と QW の挙動の比較検討することで, ドレスト光子というものを深く理解するための手がかりを探す.

時間発展作用素は, 与えられたグラフの対称有向辺の集合 A に対する二つの同値関係から誘導される, 二つのユニタリ作用素の積 $U = SC$ と記述される. 一つ目の同値関係による商集合をベースにして QW を読み治すと, 自然に各辺に, 2つの状態を付随した $\ell^2(E; \mathbb{C}^2)$ のように空間を記述できる. このことをライングラフ化と呼ぶ. このように頂点そのものよりも, むしろその頂点間の接続関係をベースにした考察が QW の特徴の一つである.

そこでまず半無限システムにおける QW の定常性を利用する. この QW における定常状態は背後にあるランダムウォークの可逆性が反映され, 電気回路で表現される [2]. しかしながら, その入射が時刻に依存して振動するような場合は, グラフの内部構造の推定や最適化に有用であることが期待されているにも関わらず, ほとんど何も知られていない. そこでまず手始めに 1次元有限パスの場合の散乱に関する明示的な表示が得られたので報告する. M 個の微小な粒子がパス上に並んでおり, パスの左端からレーザーを照射し続け, ドレスト光子のエネルギー

の推移が自発的に連鎖することにより, 反対側のパスの右端で, どのような応答を得られるかを考える. 各微小粒子におけるエネルギー推移のルールは行列式 Δ の 2次元ユニタリ行列 $C = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ によって与えられるものとする. すると, パスの数え上げの母関数を用いることによって, 次のような結果が得られた:

定理: $M \geq 2$ とする. 位相が時間に依存する量子ウォーカーを左端から $\alpha_L e^{i\xi n}$, 右端から $\alpha_R e^{i\xi(n-M+1)}$ ($\xi \in \mathbb{R}$, $\alpha_L, \alpha_R \in \mathbb{C}$) で入射し続け, 十分に時刻 n が経過したときの応答をそれぞれ β_L, β_R とすると,

$$e^{i\xi} \begin{bmatrix} \beta_R \\ \beta_L \end{bmatrix} = \Sigma_M(\xi) \begin{bmatrix} \alpha_R \\ \alpha_L \end{bmatrix}. \quad (1)$$

ここで, $\tilde{U}_n(\xi) := U_n\left(\frac{\cos \eta}{|a|}\right)$ (第二種チェビシェフ多項式), $\eta := \arg(\Delta)/2 - \xi$ とし, ユニタリ行列 $\Sigma_M(\xi)$ は,

$$\frac{1}{\tilde{U}_{M-1}(\xi) - |a|e^{i\eta}\tilde{U}_{M-2}(\xi)} \begin{bmatrix} \Delta^{1/2}|a|\left(\frac{a\Delta^{-1/2}}{|a|}\right)^M & b\tilde{U}_{M-1}(\xi) \\ c\tilde{U}_{M-1}(\xi) & \Delta^{1/2}|d|\left(\frac{d\Delta^{-1/2}}{|d|}\right)^M \end{bmatrix}.$$

この明示公式から, 例えば任意の M において, 透過量 (対角成分) を最大 (完全透過) にするパラメータをコントロールすることができ, 実装の際に有用であることが期待される.

謝辞: 本研究の一部は (一社) ドレスト光子研究起点の助成を受けた.

参考文献: [1] M. Ohtsu, T. Kawazoe, H. Saigo, Spatial and temporal evolutions of dressed photon energy transfer, OffShell: 1710R.001.

[2] Yu. Higuchi and E. Segawa, J. Phys. A 52 (39) (2019).