

量子ウォークによるドレスト光子シミュレーターに向けて

瀬川 悦生 (横浜国立大学)

量子ウォークの本格的な研究は 2000 年前半に、幾つかの典型的な離散空間構造中の量子探索アルゴリズムの中で駆動させて、いわゆる古典的なアルゴリズムと比較してその高速化を達成したことが、引き金である。現在ではこれをきっかけに、約 20 年弱の年月が経過したが、量子アルゴリズム以外にも、物性物理、量子レーザー工学、数学の諸分野、特に確率論や関数解析、グラフ理論など、様々な分野が参入し、この量子ウォークという一つのキーワードで、分野横断的な議論が可能な研究分野に発展してきた。

ところで量子ウォークとひとことで言っても、このように様々な分野から様々なモチベーションをもって、論じられているために、その姿形が変わる。例えば、物性物理や量子情報、スペクトル散乱理論などの分野においては、ネットワークの各頂点に内部状態を持たせることで定義する Coined 量子ウォーク、また幾つかの量子探索アルゴリズムにおいては 2 部グラフで生成された Bipartite ウォーク、さらに組合わせグラフ理論的な視点から、与えられたグラフの 2 種類のクリーク分解によって構成される Staggered ウォークなどが提案されている[1]。これらのモデルは一見するとそれぞれ異なっているように見えるが、実は全て同値になることが示された[2]。つまりどのモデルもしくはその背後にある分野が量子ウォークにおいては優位とかではなく、量子ウォークの視点からすればユニタリ同値の意味でみんな同等なのである。例えば、ちょっと冷静になって客観的な視点に立ってよく観察してみると Coined 量子ウォークにおいては、与えられたネットワーク G_1 の各有向辺、Bipartite ウォークでは二部グラフ G_2 の無向辺、Bipartite ウォークでは G_3 の頂点が、それぞれの主役になっているだけの話であった。このことに気が付くと、与えられたネットワークをグラフ理論でよく用いられる変形を使って、これら 3 種類の量子ウォークモデルを自由に行き来することができる。この私の小さなオプザベーションをちょっと大げさにいってしまえば、客観的な視点に立てる数学が異分野間をとりもったひとつの事例とも言える。このことから、量子ウォークは色々な分野との懸け橋になり、融合研究をさらに加速させることのできるポテンシャルを秘めているともいえるかもしれない。

そしてさらに、もしかすると色々なことが量子ウォークで語れてしまうのではないかという、安直な期待をもち、折角なら、分野横断的に様々な理論を巻き込む壮大な研究テーマであるドレスト光子との対応関係を考えてみようと思った。実際に光がナノスケールの物質と相互作用を起こすことによって、その物質が光を纏うという、ドレスト光子のある主の局在化現象と、量子ウォークにも時刻無限大でも正の確率で存在する局在化現象や、その伝搬方法が拡散的なガウスではなく、線形的なある種の逆釣り鐘型的になっているという類似点が指摘されている[3]。まずはこれをとっかかりとして、現在、量子ウォークが着目されるもう一つの要因である、幾つかの代表的な現象を記述する方程式のある種の時空間離散版として捉えることができるといふ幾つかの事例から勇気もらいながら、ドレスト光子においてもある種の量子ウォークシミ

ュレーターが考案できないかを試みている。

そこで、以下では、まだ「想い」の段階のことで恐縮ではあるが経過を報告させていただく。まず量子ウォークの時間発展作用素の全ての固有値の絶対値の意味での「主張」が均等に1であるにもかかわらず、定常状態を与えるような工夫が必要である。するとその工夫の結果、量子探索などで駆動する量子ウォークのクラスにおいては、次のことがこの研究の最初のステップとして解った[4]。

- (A) エネルギーがゼロの入射波に相当する量子ウォーカーをネットワークに打ち込み続けると、そのグラフが一点に見えるくらい大域的に見たときの散乱は、ネットワークの表面の情報を記述するパラメータのみに依存する、局所的なダイナミクスを再現する。
- (B) 定常状態において、ネットワークの内部にも、量子ウォーカーが存在する。

この量子ウォークのある種の摂動展開を与える現象(A)(B)に対して、それぞれ“ナノ物質に当たった自由光子の散乱” \Leftrightarrow (A)、そして“物質に纏わりつくドレスト光子” \Leftrightarrow (B)、と置き換えてみたくならないだろうか？また他にもドレスト光子と類似する量子ウォークの現象が数値的に確認されている。すると、このような単純なモデルをもってして、実はドレスト光子の大雑把な振る舞いがある程度予想してみたいという素敵な妄想に掻き立てられることを禁じ得ない。未だ類似性の状況的証拠を羅列したに過ぎないのではあるが、今後はこの事例を元に、理論的な確証を与え、またどの意味で「シミュレート」なのかというこの「想い」をかなえるべくトキメク課題に取り組むことになる。現在、色々な分野の方からのアドバイスを頂きながら、この研究を進めているところである。ドレスト光子のメカニズムを解明するための有効な道具の一つになればという期待を持ちながらも、そのことがまた量子ウォークの研究においても新たな研究の地平に乗り出そうとしているようにも思え、双方の研究の相乗的促進効果が得られると確信している。

参考文献

- [1] R. Portugal, Quantum Walks and Search Algorithms, 2nd edition, (2018), Springer.
- [2] N. Konno, R. Portugal, I. Sato, E. Segawa, “Partition-based discrete-time quantum walks”, Quantum Information Processing 17 (2018) 100.
- [3] M. Ohtsu, T. Kawazoe, H. Saigo, Spatial and temporal evolutions of dressed photon energy transfer, OffShell: 1710R.001.
- [4] Yu. Higuchi and E. Segawa, Dynamical system induced by quantum walk, arXiv:1812.04730.