

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2023

課題番号：20K22347

研究課題名（和文）量子コンピュータの素粒子事象ジェネレータへの応用

研究課題名（英文）Application of quantum computing for particle physics event generators

研究代表者

飯山 悠太郎（Iiyama, Yutaro）

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：10878177

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、量子コンピュータを素粒子物理実験におけるイベントジェネレータ（衝突型加速器などで起こる高エネルギー粒子散乱現象のシミュレーション）として応用する方法を見出すことを目的とした。研究過程で粒子散乱現象全体のシミュレーションを量子コンピュータで行う必要があると判明し、それを可能にする量子場の理論の表現法について、既存研究を発展させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

古典計算機を用いた現行の素粒子散乱イベントジェネレータでは、シミュレーションの精度を上げたりシミュレートすべき終状態を複雑にしたりすると計算時間が爆発的に増加してしまうことがわかっており、高輝度大型ハドロン衝突型加速器（HL-LHC）、国際リニアコライダー（ILC）、欧州の次世代円形加速器（FCC）など将来計画されている加速器実験に対して実用が困難になると考えられる。量子コンピュータを使ったイベントジェネレータは重要なブレイクスルーとなり得ると考えられ、本研究はその実現への道筋を示した。

研究成果の概要（英文）：The goal of this research project was to establish a way to utilize quantum computers as event generators for high energy physics. Event generators are computer programs that simulate particle scattering phenomena at the center of particle colliders. As the project proceeded, it became clear that we would need to perform the full simulation of quantum field theory on the quantum computer to realize this goal. Therefore, based upon an existing work, we developed a formulation of quantum field theory suitable for this purpose.

研究分野：実験素粒子物理学

キーワード：量子コンピューティング 量子シミュレーション 高エネルギー物理 粒子散乱

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学の実験では、陽子や電子などの粒子を高エネルギーに加速し、物質標的に照射したり、そのような粒子同士を衝突させたりする。特に後者の衝突型加速器実験では、重心系エネルギーが高いため、質量とエネルギーの等価性によって、衝突点で多数の粒子が生成され、様々な方向に放出される。そのような衝突を無数に繰り返し、その都度放出された粒子の種類や運動量を記録することで、素粒子やその相互作用の性質を明らかにすることができるが、そこで重要な役割を果たすのがイベントジェネレータと呼ばれるコンピュータ・プログラムである。

イベントジェネレータは粒子散乱（衝突と粒子放出）現象のシミュレーションで、入射粒子の種類やエネルギーを指定すると、仮定された物理法則に従ってどのような粒子がどのような確率分布で放出されるかを計算する。従う物理法則に、例えば理論的に予言される新たな法則を加えることも可能で、そうして計算された粒子の分布と実験的で観測された分布とを比較することで、実際の自然界の物理法則を推定することができる。

コンピュータ・プログラムである以上、イベントジェネレータでの計算には有限の時間がかかるが、シミュレートする現象を複雑化すると、その時間が爆発的に増加することがわかっている。具体的には、例えば放出される粒子の数に対して計算時間が指数関数的にスケールする。いっぽう、現在稼働している欧州原子核研究機構の大型ハドロン衝突型加速器（LHC）の高輝度運転（HL-LHC）や、提案段階にある次世代加速器計画（ILC、FCCなど）での実験結果から最大限に物理的知見を引き出すためには、現在利用されているよりも高い精度、多い粒子数のイベントジェネレーションが必要となる。プロセッサの計算能力を上げたり、使用するプロセッサの数を増やしたりしても、指数関数的にスケールする計算量は賄えなくなる。

このような状況に対するブレイクスルーをもたらさうる技術として、量子コンピュータがある。量子コンピュータとは量子系（超伝導振動回路や冷却原子など）を用いる計算機で、量子力学的現象のシミュレーションに特に有用であると考えられている。例えば量子コンピュータで粒子の散乱現象をシミュレートすると、計算時間が粒子数で変わらない、もしくは高々多項式的にしか増加しないというような計算法が原理的には可能である。ただし、量子コンピュータの実機の性能や、具体的なシミュレーションアルゴリズムの実装法などは、まだまだ発展途上にある。

## 2. 研究の目的

この研究の目的は、将来の加速器実験計画での実用を見据えて、量子コンピュータを利用したイベントジェネレーションの手法を開発することであった。特に、どのようなアルゴリズムが最も適しているかを考え、その実装の道筋を示すことを中心的な目的とした。実機の性能が年々飛躍的に向上しており、近い将来にいわゆるエラー耐性量子計算も可能になるうとしているため、その発展に合わせた現実的な解を模索した。

## 3. 研究の方法

多段階での研究開発を計画した。まず、素粒子を支配する物理法則を記述する「量子場の理論」を量子コンピュータ上で完全に表現するのはこの研究で想定するタイムスケールでは非現実的だと考え、シミュレーション部分を従来どおり古典計算機で行い、その結果を確率分布に焼き直すステップを量子コンピュータで行うという役割分担に基づいたイベントジェネレーション法を検討した。前述した、粒子数に対して指数関数的に必要な時間が増加する計算はまさにこの確率分布の生成に相当するので、そこだけを量子コンピュータで行う場合でも十分に既存手法に対して優位となることに着目した。

当初計画では、このような役割分担型の手法を確立させた上で、現実的に実装できる場の量子論の量子コンピュータ上の表現法を検討することになっていた。しかし、第一段階に対して原理的な困難があることが判明したため、第二段階の表現法の研究に早急に移行した。

場の量子論を量子コンピュータ上で表現するには、通常、空間を多数の格子点に離散化し、その各点及び点と点を結ぶ接続上に個別に量子ビット群をあてがうという手法をとる。このとき、格子点の数がシミュレーションに含むことのできる粒子の運動量の幅と対応する。衝突型加速器実験で生じる粒子の運動量の幅は広く、シミュレーションは各空間次元に対して $10^5$ ほどのオーダーをカバーできる必要がある。これを空間3次元にし、各点にあてがう量子ビットの数も数百程度必要になると考えると、この表現法では $10^{17}$ という非現実的な

数の量子ビット数が必要となる。

そこで、空間中の点ではなく、量子場の励起の現れである粒子一つ一つに量子ビット群をあてがうという表現法“single-particle digitization”を採用することにした。これは参考文献[1]で提唱されている手法で、必要な量子ビット数が表現する運動量の幅の対数で与えられるという特徴を持つ。

文献[1]では相互作用のある量子場の中で最も単純なスカラー $\phi^4$ 理論というモデルの表現方法が与えられている。本研究ではまずこの結果を実際の量子回路で再現し、より発展的な場面に一般化する方法を検討することとした。

#### 4. 研究成果

当初計画の第一段階においての成果は、確率分布の生成に関するものである。量子場の理論のシミュレーション結果を数値的に量子コンピュータ上の量子ビットの列として符号化できれば、それを元に確率分布を効率的に生成できることを文献[2]で示し、その実装を単純な問題に対して与えた(図1)。しかし、前述したように、そのシミュレーション結果の符号化の部分で、使う量子ビット数に対して指数関数的な演算量が必要になることが判明し、この方向での研究推進を断念した。

Single-particle digitization では、スカラー $\phi^4$ 理論の空間1次元での2粒子問題に対して、初期状態生成、粒子対の時間発展、相互作用、の全ての過程を量子回路として記述することに成功した。初期状態生成に関しては、文献[1]よりも効率よく指数関数型の波束(粒子の存在確率分布)を作成する方法を発見した(図2)。また、初期状態生成と自由時間発展について、空間2次元への拡張も可能にした。

この手法を実用的なものにするには、空間3次元への拡張、スカラー場だけでなく(フェルミオン場やゲージ場)への拡張など、数多くの課題が存在する。これらは本研究補助期間終了後、科研費研究課題(基盤C)「粒子ベース表現による散乱過程の量子シミュレーション」に受け継がれる。

#### 参考文献

- [1] Barata et al. Physical Review. A 103 (4): 042410. (2021)
- [2] Iiyama. arXiv:2006.00975

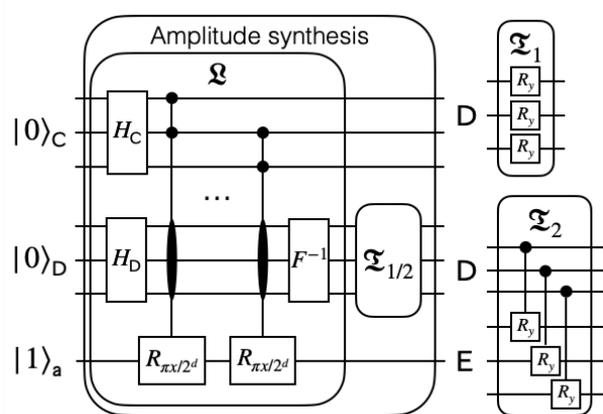


図1: 確率分布生成の量子回路模式図。Q部分の回路で古典的な計算の結果が量子レジスタDに書き込まれ、Q<sub>1</sub>またはQ<sub>2</sub>で確立振幅に変換される。

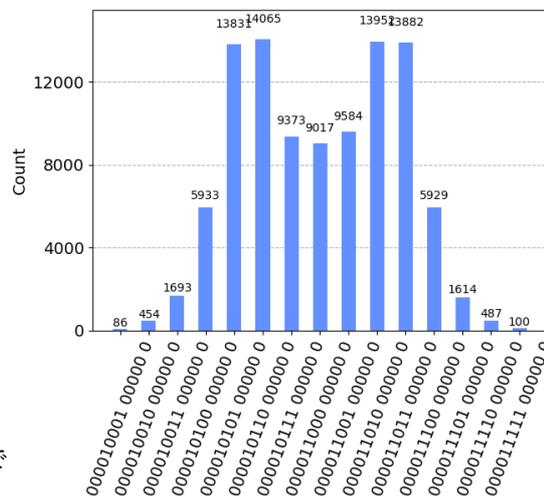


図2: 指数関数型波束を一定時間自由時間発展させ、粒子の空間分布を測定した結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Toshiaki Inada, Wonho Jang, Yutaro Iiyama, Koji Terashi, Ryu Sawada, Junichi Tanaka, Shoji Asai	4. 巻 1
2. 論文標題 Measurement-Free Ultrafast Quantum Error Correction by Using Multi-Controlled Gates in Higher-Dimensional State Space	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv:2109.00086	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.48550/arXiv.2109.00086	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yutaro Iiyama	4. 巻 1
2. 論文標題 Quantum state preparation with multiplicative amplitude transduction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 arXiv:2006.00975	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 飯山悠太郎
2. 発表標題 Quantum computation of fundamental interactions
3. 学会等名 量子情報と量子基礎論の諸側面（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前野伶太
2. 発表標題 実スカラー場における散乱現象の量子シミュレーションへの実装
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------