

研究課題別研究評価

1. 研究課題名:

量子計算の実現に向けて

2. 研究者名:

竹内 繁樹

3. 研究のねらい:

量子計算の実現を目指した研究は、ここ数年で非常に活発化している。たとえば、半導体中の単一核スピンによる量子計算機の提案や、超伝導素子による単一キュービットの制御実験などである。しかし、それらはまだひとつのキュービットに対する操作の段階で、量子計算のアルゴリズムを実際にテストするための「テストベッド」としてはまだ用いることができないのが現状である。

延長期間では、「単一の量子を用いる、現状唯一のテストベッド」としての線形光学素子量子計算機の利点を生かして、量子計算で生じるエラー原因の究明や、他のアルゴリズムへの展開を図る。また現在のスーパーコンピュータを凌駕する「量子計算機」の実現に向け、光子-光子間の相関を用いた量子計算の実現にも取り組んでゆきたい。

具体的な項目として、以下の3課題について取り組むべく計画を行った。

- a. 「量子計算」において生じるエラーの原因究明と評価
- b. 線形光学素子量子計算機による計算経過の観測、誤り訂正の研究
- c. 光子-光子間相関を用いた量子計算の実現に向けた研究

4. 研究結果:

全体として、さきがけ研究において取り組んだ単一光子を用いた量子計算については、延長期間中においてエラーの完全な解析を行うことができた。また、延長期間中に併せて目指した、「複数の光子」への拡張については、基礎的検討にとどまったものの、今後の方向性を得ることができた。以下、各項目別に結果について述べる。

a. 「量子計算」において生じるエラーの原因究明と評価

場と反応における3年間の期間中に行った「単一光子量子計算」の実際の実験結果について、エラーの原因の究明と評価を行った。その結果、生じたエラーを、論理ゲートの誤動作(システムエラー)や位相緩和、誤検出などの諸要因ごとに定量的に分別することに成功した。また、規模を拡大した場合、11量子ビット程度までであれば現有技術で20%程度のエラー率にとどめられることを導いた。(原著論文 2, 3, 4)

b. 線形光学素子量子計算機による計算経過の観測、誤り訂正の研究

計算過程の観測や、誤り訂正を実現するには、光子を2つ以上を用い、かつそれらのあいだに量子もつれ合いを発生する何らかの方法を確立する必要がある。延長期間においては、複数の光子を同時に発生する方法についてさらに研究を進めた結果、高い確率(80%)で同時に発生することに成功した。(原著論文1)

c. 光子-光子間相関を用いた量子計算の実現に向けた研究

複数の光子のあいだでの制御ノットゲートの実現が、光子を用いた大規模な量子計算の実現のボトルネックとなっている。私は1995年にカルフォルニア工科大学において行われた実験やその後発表された理論を調査研究を行った。その結果、理論面では、入出力光子の量子状態の変化を記述できる理論がまだ存在しないこと、また、個体化を行わない限りは安定した動作は難しいことがわかった。現在、そのような理論、ならびに個体化に向けた予備実験に着手しつつある。

5. 自己評価:

この2年間は、前半に、場と反応で行った「線形光学素子量子計算実験」の詳細な解析とそれに基づく限界の把握を行った。後半が限界の打破に向けた次世代の研究のための予備的研究に費やされた。

延長期間開始時に目標に掲げたうち、「量子計算で生じるエラー原因の究明」については、ある程度十分な検討ができたと考えている。しかし、同時に掲げていた「単一光子を用いた線形光学素子量子計算の多のアルゴリズムへの展開」は行わなかった。前半に行った解析から、より「光子-光子間の相関を用いた量子計算」への道を歩むべきだと判断したためであるが、「単一光子と線形光学素子によるショアのアルゴリズムの実現」という選択肢もあったかも知れない。また、後半は「光子光子相関の実現」へと研究をシフトしたが、思うようには進まなかったと思う。

今後は、延長期間中の後半に試行錯誤し暖めたアイデアを元に、この手強い課題「複数の光子を用いた量子計算の実現」に対して着実に研究を進めたいと考えている。

6. 領域総括の見解:

追加研究期間の成果としては二つのものがある。本来の3年間で成功した単一光量子量子計算についてのエラーの詳細分析と複数光子の同時発生である。現在のところ量子計算を遂行するための実験装置という意味では、量子状態が乱されるまでの時間、ディコヒーレンスタイムの長い光子を用いるものが有力であるが、エラーの詳細分析は将来の発展のために重要である。光子を用いる量子計算機では2光子の量子もつれ合いを発生させる技術はかかせないが、そのための第1歩が複数光子の同時発生で80%の確率で発生させることができたのは注目に値する。今後の研究の進展を見守りたい。

7. 主な論文等:

(特許、受賞、招待講演等)

英文原著論文

- 1 Shigeki Takeuchi・Beam like twin photon generation using type-II parametric down conversion・Optics Letters・Vol. 26・843-845・2001 年
- 2 Shigeki Takeuchi・A Simple Quantum Computer: Experimental Realization of Quantum Computation Algorithms with Linear Optics・Electronics and Communications in Japan・Vol. 84 no.3 ・52-59・2001
- 3 Shigeki Takeuchi・Experimental demonstration of a three-qubit quantum computation algorithm using a single photon and linear optics・Phys. Rev. A ・Vol.62 ・032301.1-4・2000 年
- 4 Shigeki Takeuchi・Analysis of errors in linear-optics quantum computation・Phys. Rev. A ・Vol.61・052302 .1-15・2000 年

解説・総説

1. 竹内繁樹、「量子情報デバイス」、機能材料、投稿済み
2. 竹内繁樹、「量子計算、量子暗号の現状と今後」、ESTRELA 10月号 2-10(2001)
3. 竹内繁樹、「量子計算、量子情報通信の未来と展望」、数理科学・No.456・64-69・2001 年
4. 竹内繁樹、「量子計算と量子情報通信 - 何が可能になるのか - 」、電子情報通信学会誌・Vol. 84 (1)・17-25・2001 年
5. 竹内繁樹、「光子を用いた量子計算」レーザー研究、第 28 巻第 10 号 (2000) p671-676
6. 竹内繁樹、「光量子ビットを用いた量子計算機」光学 Vol.29 No.12 (2000) p745-750.
7. 竹内繁樹、「量子計算機」の現状と今後 情報処理, Vol 40, No.12 pp1192-1197(1999).
8. 竹内繁樹、井須俊郎「量子計算の実現に向けて」応用物理, Vol 68, No.9 pp1038-1041(1999).

招待講演:

・海外(国際) 3件

1. Shigeki Takeuchi, Experiments on quantum computers, 2000 INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID STATE DEVICES AND MATERIALS, 2000/8/27, sendai, Japan, invited.
2. Shigeki Takeuchi, Quantum Information Technology Using Photons, CLEO Pacific Rim 2001, 2001/7/15, Makuhari, Japan, invited.
3. Shigeki Takeuchi, Twin photon Beams for Single photon Generation, ISQM-Tokyo'01(The 7th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology), Hatoyama, Japan, invited.

・国内 8件

1. 竹内繁樹、量子コンピュータと光技術、レーザー学会、2001/1/31、東京、招待講演
2. 竹内繁樹、シンポジウム開催にあたって、物理学会「量子情報と物理」シンポジウム、2001/3/26、東京、シンポジウム講演
3. 竹内繁樹、量子計算の実験：最近の話題と光の量子状態制御、応用物理学会応用電子物性分科研究会、2001/1/18、招待講演
4. 竹内繁樹、光子を用いた量子情報処理、理研シンポジウム、2000/11/22、和光、招待講演
5. 竹内繁樹、量子暗号- その現状と課題 -、Optics Japan 2000、2000/10/7、北見、招待講演
6. Shigeki Takeuchi, Quantum computation using photons, NTT Work shop 2000/6/11、厚木、招待講演
7. 竹内繁樹、量子計算の実現にむけて -光子を用いた量子計算-、量子計算ワークショップ(広大)、2000/1/25、広島、招待講演
8. 竹内繁樹、光子を用いた量子計算、東北大学通研研究会「大規模量子コンピュータの実現に向けて」、2001/9/27、仙台、招待講演

特許 2件 (さきがけより出願)

- ・ルーティング機能付き量子暗号装置
- ・低損失高速光変調器