



2020. 8. 3.(월)

문의 : 담당자 연락처(02-880-2635)

연구단장/연구책임자 정현석 교수(02-880-2635) / 교신저자

연구단/연구진 스리크리슈나 옴카 연구원(02-880-2635) / 제1저자

## 빠른 오류 제어가 가능한 양자컴퓨팅 방법 개발

- 하이브리드 양자 얽힘을 이용하여 적은 자원으로 빠르고 정확한 양자 오류 수정 -

- 서울대학교 물리천문학부 정현석 교수 연구팀은 빠르고 정확한 오류의 수정이 가능한 양자컴퓨팅 방법을 설계하였다.
  - 양자컴퓨터 연산의 기본단위인 큐비트는 쉽게 손상되어 오류를 발생시키는 특성이 있다. 양자컴퓨팅 연산중 일어나는 이러한 양자 오류의 발생과 누적은 정확한 연산을 불가능하게 만든다. 이는 실용적인 양자컴퓨터의 구현에 결정적인 장애물로 알려져 있다.
  - 현재까지 큐비트 오류를 수정하는 다양한 ‘양자 오류수정’ 방법이 연구되었다. 그러나 양자 오류수정의 정확도를 높이기 위해서는 많은 양의 큐비트들과 연산 과정들이 추가적인 자원으로 소모된다. 이러한 자원소모량은 처리해야 하는 연산의 규모가 늘어날수록 기하급수적으로 증가한다.
  - 이는 양자컴퓨터의 연산에 막대한 과부하가 걸리게 만들고 실용적인 양자컴퓨터의 구현을 불가능하게 하는 중대한 장애물이다. 따라서 빠르면서도 (즉 적은 양의 추가 자원을 사용하면서도) 동시에 정확한 양자 오류수정을 구현하는 것은 극히 어려운 문제로 여겨져 왔다.
  - 연구진은 적은 양의 추가 자원을 이용하여 빠르게 작동하면서도 정확한 오류수정이 가능한 양자 오류수정 알고리즘을 제안하였다.
- 연구의 핵심 아이디어는 파동 성질을 가지는 부분과 입자 성질을 가지는 부분의 두 부분이 양자 얽힘을 이루고 있는 하이브리드 큐비트를 이용하

여 가능한 적은 자원으로 최대한의 오류수정 정확도를 얻어내는 것이다.

\* 양자 얽힘: 여러 개의 입자들이 비고전적인 상관관계를 가지고 양자역학적으로 연결되어 있는 현상

○ 연구진은 여러 개의 하이브리드 큐비트들로 이루어진 클러스터 상태라고 불리는 양자 얽힘 상태를 만든 후에 추가적인 게이트 연산 없이 오직 큐비트 측정만을 통해 오류수정을 포함한 범용 양자컴퓨팅을 수행하는 것이 가능함을 보였다.

○ 하이브리드 큐비트의 파동 상태 부분의 간섭 효과를 이용하면 양자 측정의 성공률을 높일 수 있어 적은 수의 추가적 큐비트만을 가지고도 빠른 오류수정이 가능하다. 또한 입자 상태 부분의 성질을 이용하면 큐비트가 손실되는 오류가 발생할 때 입자의 수 줄어들게 되므로 연산 과정에서 이를 정확하게 찾아낼 수 있다.

○ 이를 광학적 모델에 적용하여 기존에 알려진 모든 방법들보다 양자 오류수정에 요구되는 자원소모량을 획기적으로 줄일 수 있는 동시에 오류수정의 정확도를 끌어올릴 수 있음을 증명하였다.

□ 본 연구를 통해 실용적인 양자 컴퓨터 구현을 위한 주요 과제인 오류 수정의 ‘자원 과부하’와 ‘정확도’라는 두 가지 문제를 동시에 개선하여, 오류를 극복하는 본격적 양자컴퓨팅의 구현에 한 단계 더 가까워졌다. 연구결과는 **Physical Review Letters**에 **출판될 예정**(교신저자 정현석 교수, 제1저자 스리크리슈나 옴카 박사, 참여저자 용시아 테오 박사)이다.

[붙임] 1. 연구결과      2. 용어설명      3. 그림설명  
4. 연구진 이력사항

## 연구결과

### Resource-efficient topological fault-tolerant quantum computation with hybrid entanglement of light

Srikrishna Omkar, Yong Siah, Teo, Hyunseok Jeong

(Physical Review Letters, *in press*)

양자컴퓨터 연산의 기본 단위인 큐비트는 매우 민감하여 약간의 잡음만 있어도 손상되어 오류를 발생시킨다. 실용적인 양자컴퓨터의 구현은 이러한 양자 오류라는 장애물을 극복해야 가능하다. 특히 많은 큐비트를 한꺼번에 처리해야 하는 양자컴퓨팅 과정에서 이러한 오류의 누적은 정확한 정보처리를 불가능하게 만든다.

이 문제를 해결하기 위해 학자들은 양자 오류수정 방법들을 연구해 왔고, 큐비트 하나의 오류율이 어떤 '한계 오류율'을 넘지 않으면, 오류를 보정하고 극복하는 양자컴퓨팅이 가능하다는 사실을 밝혔다. 그러나 실제 구현 가능한 큐비트에서 발생하는 물리적 오류율과 알려진 양자 오류수정 방법들의 큐비트당 한계 오류율 사이에는 아직 상당한 차이가 있다. 또한 하나의 큐비트에서 발생하는 오류의 보정을 위해서는 많은 보조 큐비트와 연산 과정들이 추가적인 자원으로 소모된다는 문제가 있다. 양자컴퓨터가 처리해야 하는 계산의 규모가 늘어날수록 양자 오류수정을 위해 소모되는 자원의 양도 기하급수적으로 늘어난다. 이는 양자컴퓨팅 연산에 과부하를 걸리게 하고 최종 오류율이 낮은 실용적인 양자컴퓨터의 구현을 어렵게 만든다. 일반적으로 높은 한계오류율과 낮은 자원소모량을 동시에 만족시키는 양자컴퓨팅 방법을 찾는 것은 매우 어려운 문제로 알려져 있다.

이번 연구에서는 파동성질 부분과 입자성질 부분이 양자 얽힘을 이루고 있는 이루어진 하이브리드(이종, 異種) 큐비트를 이용하여 기존에 알려진 방법들에 비해 오류 한계율을 크게 높이는 동시에 자원소모량은 획기적으로 낮출 수 있는 방법을 제안하였다. 먼저 클러스터 상태라고 불리는 여러 하이브리드 큐비트들이 얽혀 있는 양자 얽힘 상태를 만들고, 하이브

리드 큐비트의 파동상태 부분과 입자상태 부분에 각각 측정을 가하여 양자컴퓨팅을 수행하는 방법이다. 클러스터 상태를 만든 후에는 추가적인 작용 없이 오직 큐비트 측정만을 통해 오류 수정을 포함한 범용 양자컴퓨팅을 수행하는 것이 가능함을 보였다. 이 방법의 장점은 하이브리드 큐비트의 파동상태 부분의 간섭 효과를 이용하면 양자 측정의 성공률을 높일 수 있어서 적은 수의 추가적 큐비트만을 가지고도 빠른 오류보정이 가능하고, 입자 상태 부분의 성질을 이용하면 큐비트가 손실되는 오류가 발생할 때 입자의 수 줄어들게 되므로 연산 과정에서 이를 정확하게 찾아낼 수 있다는 점이다. 이를 광학적 모델에 적용하여 기존에 알려진 모든 방법들보다 양자 오류 수정에 요구되는 자원 소모량을 획기적으로 줄일 수 있는 동시에 오류 수정의 정확도를 끌어올릴 수 있음을 증명하였다.

본격적인 양자컴퓨터의 출현은 정보기술의 미래를 혁신적으로 바꿀 것으로 기대된다. 그러나 이러한 양자컴퓨터의 구현은 양자 오류라는 장애물을 극복해야 가능하다. 구체적으로는 한계 오류율을 높이고 자원요구량을 동시에 줄여야 하는데, 이 두 가지 지표는 한 가지를 개선하기 위해서는 다른 한 가지를 희생시켜야 하는 성질이 있어서 한꺼번에 개선시키는 것이 매우 어려운 문제였다. 본 연구를 통해 이를 해결하는 방법을 제시하여 양자오류를 극복하는 본격적 범용 양자컴퓨팅의 구현에 한 단계 더 가까워졌다.

# 용 어 설 명

## 1. 큐비트(양자 비트)

- 양자 중첩의 원리를 이용한 양자정보처리의 기본단위. 고전적인 비트는 특정 시간에 0 혹은 1이라는 하나의 상태에만 존재할 수 있지만 큐비트는 0과 1의 중첩 상태에 존재하는 것이 가능하다.

## 2. 양자컴퓨터

- 양자 중첩과 양자 얽힘과 같은 양자역학의 원리들을 이용하여 큐비트들을 처리하는 방식으로 계산을 수행하는 컴퓨터. 특정한 문제들을 고전적인 컴퓨터보다 효율적으로 풀어낼 수 있다는 것이 알려져 있다.

## 3. 양자 얽힘

- 여러 개의 입자들이 비고전적인 상관관계를 가지고 양자역학적으로 연결되어 있는 현상이며 양자컴퓨팅 등 양자정보처리의 수행을 위한 자원으로 이용된다.

## 4. 양자 오류수정

- 큐비트는 고전 비트에 비해 쉽게 오류를 발생시키는 성질이 있다. 양자 중첩 상태에 있는 큐비트는 환경과의 상호작용을 통해 쉽게 중첩 정보를 잃어버리기 때문이다. 양자 오류의 수정은 신뢰할만한 양자컴퓨터의 구현을 위해 해결해야만 하는 선결 조건이다. 이를 해결하기 위해 추가적인 큐비트들과 연산 작용들을 이용하여 양자 오류를 수정하는 방법들, 즉 양자 오류수정 코드들이 제안되었다.

## 5. 한계 오류율

- 양자컴퓨팅을 수행하는 과정에서 양자 오류수정을 통한 오류의 통제가 가능하게 만들기 위해서는 물리적 큐비트 하나가 발생시키는 오류의 비율이 어느 한계를 넘어서면 안 되며, 이 오류율을 한계 오류율이라고 부른다. 한계 오류율은 물리적 큐비트에 발생하는 오류의 종류와 양자컴퓨팅을 위해서 어떤 방법을 사용하는지 등에 따라 달라진다.

## 6. 클러스터 상태

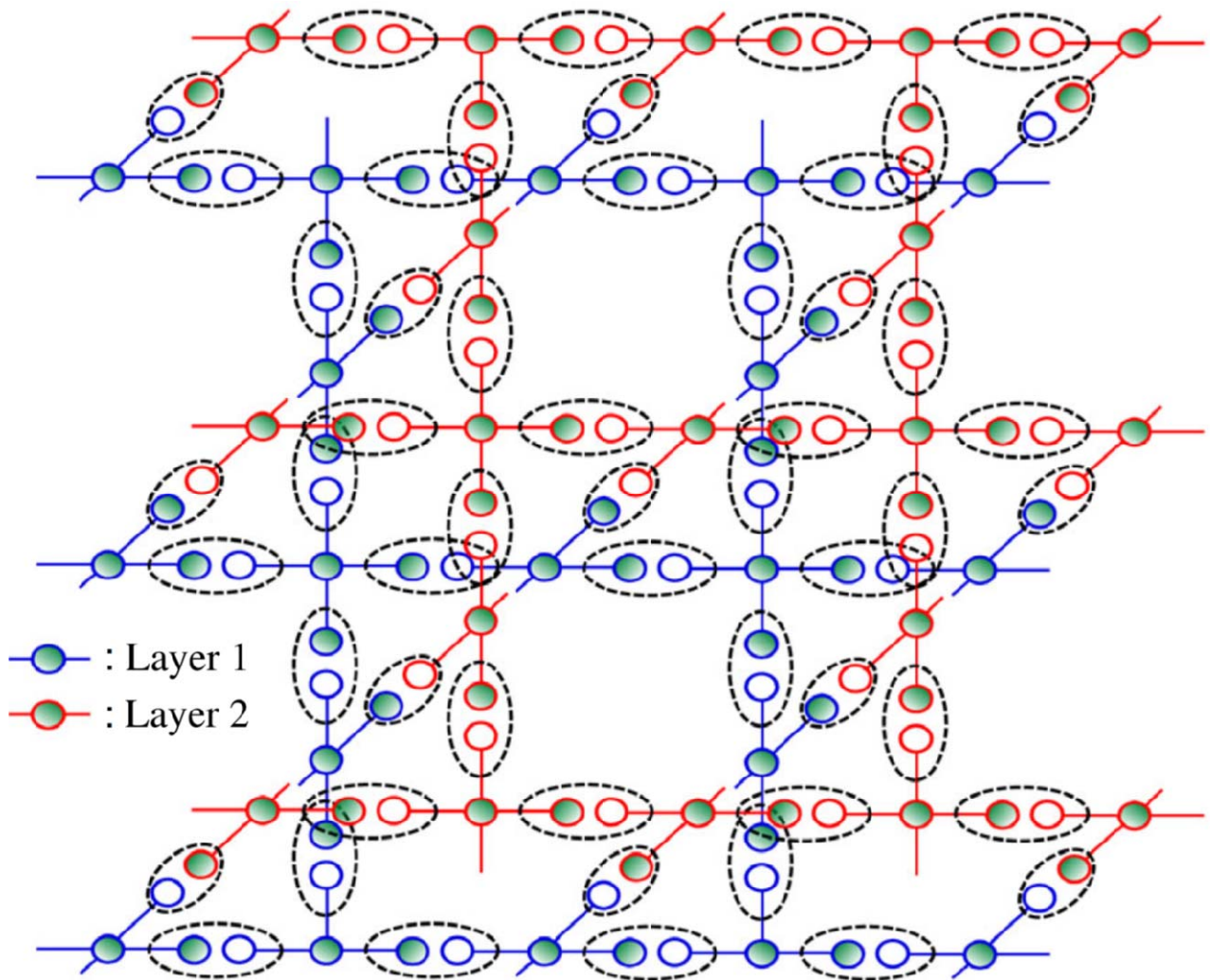
- 많은 큐비트들이 얽혀 있는 양자 얽힘 상태의 일종이며, 양자컴퓨터의 구현을 위한 유용한 자원으로 사용될 수 있다. 클러스터 상태를 구성한 후 측정만으로 계산을 수행하는 방법을 측정기반 양자컴퓨팅이라고 부른다.

## 7. 측정기반 양자컴퓨팅

- 먼저 많은 큐비트들이 얽혀 있는 양자 상태를 구현한 후 단일 큐비트들에 대한 측정만을 이용하여 계산을 수행하는 방식의 양자컴퓨팅. 일방향 양자컴퓨팅(**one-way quantum computing**)이라고도 불린다. 초기화된 큐비트들에 양자 게이트들을 순차적으로 적용하여 수행하는 회로기반 양자컴퓨팅(**circuit-based quantum computing**)과 대조를 이룬다. 계산 과정에서 양자 게이트들을 필요로 하지 않는다는 장점이 있으나, 먼저 클러스터 상태와 같은 얽힘 상태를 준비해야 한다는 요구조건이 있다.

## 그림 설명

논문에서 제시된 양자컴퓨팅에 이용되는 클러스터 상태를 만드는 방법의 도해. 점선으로 표현된 부분은 두 개의 큐비트를 연결하는 ‘얽힘 측정’이다. 작은 원들은 큐비트들이며 실선으로 연결된 부분은 큐비트들이 이미 얽혀 있음을 나타낸다. 얽힘 측정들을 통해 큐비트들을 연결하여 입방체 구조를 가지는 클러스터 상태를 구성한다. 클러스터 상태를 만든 후에는 각각의 큐비트들에 대한 단일 큐비트 측정만으로 오류수정을 포함한 양자컴퓨팅이 수행된다.



# 연구자 이력사항

## 1. 인적사항

- 성 명 : 정현석
- 소 속 : 서울대학교 물리천문학부 교수
- 전 화 : 02-880-2635
- E-mail : jeongh@snu.ac.kr



## 2. 학력

- 1990 - 1996 서강대학교 물리학과 학사
- 1997 - 2000 서강대학교 물리학과 석사
- 2000 - 2003 Queen's University Belfast (영국) 이론물리학 박사

## 3. 경력사항

- 2003 - 2005 호주 퀸즐랜드 대학교 물리학과 박사후연구원
- 2005 - 2008 호주 퀸즐랜드 대학교 양자컴퓨터연구센터 연구원
- 2008 - 현재 서울대학교 물리천문학부 조교수, 부교수, 교수
- 2014 - 2016 국제학술지 *Annals of Physics* 편집인
- 2018 - 현재 한국광학회 양자광학 및 양자정보 분과 위원장

## 4. 기타 정보

- 2017 서울대학교 자연과학대학 연구상
- 2010 포스코재단 포스코사이언스펠로우(신진교수)
- 2004 영국물리학회(Institute of Physics) 광학 분야 최우수 박사학위 논문상



## 연구자 이력사항

### 1. 인적사항

- 성 명 : Srikrishna Omkar
- 소 속 : 서울대학교 물리천문학부 연구원
- 전 화 : 02-880-2635
- E-mail : omkar.shrm@gmail.com



### 2. 학력

- 2004 - 2007 Government First Grade College 학사
- 2007 - 2009 Indian Institute of Science Education & Research 석사
- 2009 - 2015 Poornaprajna Institute of Scientific Research 박사

### 3. 경력사항

- 2015 - 2016 Indian Institute of Science Education & Research 박사후연구원
- 2016 - 현재 서울대학교 물리천문학부 박사후연구원