양자센서 겨울학교

2021.02.01. ~ 2021.02.03.

주제: 양자측정 및 양자센싱

강사:

김윤호 (POSTECH 물리학과) - 양자토모그래피: 양자비트의 상태측정 및 정량화

라영식 (KAIST 물리학과) - 양자압축 광원을 이용한 양자센싱

강의 내용:

(1) 양자토모그래피: 양자비트의 상태측정 및 정량화

양자비트(quantum bit) 혹은 큐빗(qubit)은 2차원 양자시스템의 양자상태이며 양자정보의 기본단위이다. 단일 큐빗의 양자상태는 0과 1로 표현되는 두 물리적 양자상태의 중첩으로 표현되며 양자게이트를 이용하면 큐빗의 다양한 양자상태를 생성할 수 있다. 또한 다중 큐빗의 얽힘상태는 양자정보처리의 구현에 필수적인 요소이다. 큐빗의 양자상태는 밀도함수(density matrix)로 표현되는데 정확한 양자상태를 확인하기 위해서는 양자측정을 통해 밀도함수를 재구성 하는 과정이 필수적이다. 이번 겨울학교에서는 큐빗의 양자상태, 즉 밀도함수를 측정을 통해 재구성하는 방법, 그리고 큐빗 2개의 밀도함수로부터 얽힘정도를 판별하는 방법에 대해 강의한다.

1. 양자상태의 생성 및 측정: 양자상태의 개념을 소개하고 Stern-Gerlach 장치를 이용해 큐빗의 양자 중첩 및 양자 측정의 개념을 설명한다. 또 파동함수와 밀도함수의 개념, 그리고 물리적인 밀도함수의 조건에 대해 소개한다.

2. Pure state와 Mixed state: 파동함수를 통해 표현되는 양자상태, 즉 pure state와 결어긋남을 통해 생성되며 밀도함수로 표현되는 Mixed state의 차이에 대해 소개한다.

3. 밀도함수 및 얽힘의 정량화: 큐빗 2개의 양자상태, 즉 2-큐빗 밀도함수로부터 얽힘을 정량화 하는 방법을 소개한다.

4. 양자상태 토모그래피: 양자측정을 통해 밀도함수를 재구성하는 방법을 소개하고 재구성된 밀도함수의 문제점을 언급한다. 또 실험결과를 가장 높은 확률로 생성하는 물리적인 밀도함수를 얻어내는데 사용되는 Maximum Likelihood Estimation (MLE) 방법을 소개한다.

(2) 양자압축 광원을 이용한 양자센싱

양자센싱은 계측 정밀도의 근본적인 한계를 양자현상을 이용하여 극복하는 기술이다. 양자적 특성을 가진 빛(양자광원)은 대표적으로 양자압축

상태(squeezed vacuum state)가 있으며, 이는 중력파 검출기에도 활용되어 측정 감도를 향상시키는 역할을 한다. 이번 겨울학교에서는 양자압축 광원을 이용한 양자센싱의 기초 원리를 소개한다. 양자센싱에 관심이 있는 비전공자 및 학생들도 내용을 쉽게 이해할 수 있도록 다양한 예시를 사용하여 강의할 예정이다. 이번 강의를 통해 물리량 계측 정밀도의 근본적 한계가 발생하는 원인을 파악할 수 있고, 양자압축 광원이 이러한 한계를 극복할 수 있는 원리를 이해할 수 있을 것이다. 총 4가지 주제로 강의를 구성하였으며 세부 내용은 다음과 같다.

1. 양자광학 기초: 전체 강연의 개요를 우선적으로 소개한 후, 비전문가를 위해 양자광학의 기초를 간략하게 설명한다. 구체적으로 빛의 양자적 기술 방법, 양자잡음 현상, 다양한 빛 상태들의 특성을 다룰 것이다. 또한 빛의 전기장을 양자 측정하는 원리(호모다인 측정)를 소개한다.

2. 양자압축 광원: 양자압축 광원이란 무엇이고 어떤 특성을 가지는지 알아본다. 양자압축 광원을 구현하는 원리를 소개하고 이를 실험으로 구현하는 방법을 알아본다. 마지막으로 양자압축 상태를 측정하기 위해 필요한 호모다인 검출기를 제작하는 방법을 소개한다.

3. 다중모드 양자압축 광원: 양자압축 광원의 규모를 확장시킨 다중모드 (multimode) 양자압축 광원을 소개한다. 빛의 다중모드를 기술하는 방법을 다룬 후, 다중모드에서 나타나는 양자얽힘 현상을 살펴본다. 이해도를 높이기 위하여 본 연구실에서 진행하는 주파수 모드 기반의 양자압축 제작 실험을 예로 들어 설명할 것이다.

4. 양자센싱: 양자압축 광원이 양자센싱에 실제 어떻게 적용될 수 있는지 살펴본다. 센싱 과정에 대응하는 변수 계측 (parameter estimation) 이론을 소개하고, 계측 정밀도의 한계인 표준 양자 한계 와 하이젠베르크 한계를 공부한다. 중력파 검출기를 예로 들어서 양자압축 광원이 중력파 측정 감도를 향상시킬 수 있는 원리를 소개할 것이다.