

양자 맥락성을 이용한 새로운 계측 방법론으로 기존의 측정 정밀도 한계 극복

한양대학교 이광걸 교수

E kglee@hanyang.ac.kr

측정에서의 양자 맥락성(contextuality)을 양자적 자원으로 활용하여, 기존의 측정 정밀도의 한계로 알려진 양자 크라메르-라오 하한(quantum CRB: QCRB)을 넘어서는 새로운 계측 방법론 개발 및 실험적 검증을 수행하였다.

연구 배경

물리량을 측정하는 계측에서 중요한 두 가지 값으로 정확도(accuracy)와 정밀도(precision)가 있다. 정확도란 측정값(estimated value)이 실제값(true value)에 얼마나 가까운가를 의미하며, 정밀도란 측정값을 결정하는 데 있어서의 불확도(uncertainty)를 말한다. 이 측정에서 정밀도의 한계는 크라메르-라오 하한(Cramér-Rao lower bound: CRB)으로 알려져 있으며, 피셔 정보(Fisher Information: FI)¹⁾의 역수로 주어진다. 이를 양자 상태를 측정하는 양자 계측으로 확장시켰을 때, 획득 가능한 정밀도의 한계는 양자 크라메르-라오 하한(quantum CRB: QCRB)으로 주어지며, 양자 피셔 정보(quantum FI: QFI)의 역수에 해당한다.

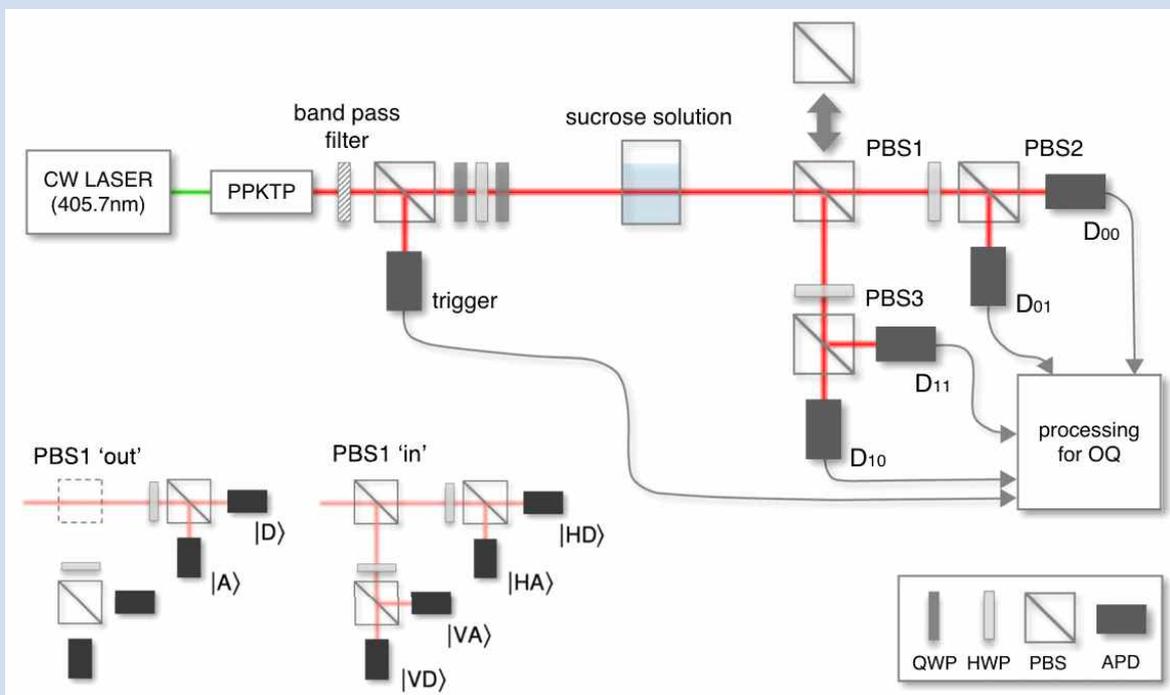
지금까지의 양자 계측은 이 QCRB에 도달 가능한 방법론에 대한 연구가 주가 되어오고 있다. 예를 들어, 어떠한 양자 상태를 이용하는 것이 유리한지, 주어진 상태에 대해 QCRB에 도달 가능한 측정 방식은 무엇이며 실험적으로 구현 가능한가에 대한 연구들이 이에 해당한다. 이 QCRB를 극복 가능한 새로운 방법론 개발은 기존의 양자 계측의 범위를 한층 확장하는 중요한 의미를 가지게 된다.

1) 피셔 정보(Fisher Information: FI) : 정보이론에서 추정의 정확도를 나타내는 중요한 값으로서, 측정을 통해 획득 되는 측정 대상 파라미터에 대한 정보의 양을 의미한다.

연구 내용

본 연구에서는 측정에서의 맥락성(contextuality)이라는 비고전적 특성을 계측에 활용하는 새로운 접근법을 제안하여, 측정 정밀도가 QCRB를 넘어설 수 있음을 이론 및 실험을 통해 증명하였다. 이 새롭게 제안된 "맥락성 양자 계측(contextual quantum metrology: coQM)"에서는 서로 호환되지 않는(incompatible) 두 측정을 순차적으로 수행하는 맥락성을 계측에서의 새로운 자원(resource)으로 활용함으로써, 측정에서 획득 가능한 정보의 양을 늘임으로써, 결과적으로 정밀도를 향상시키게 된다.

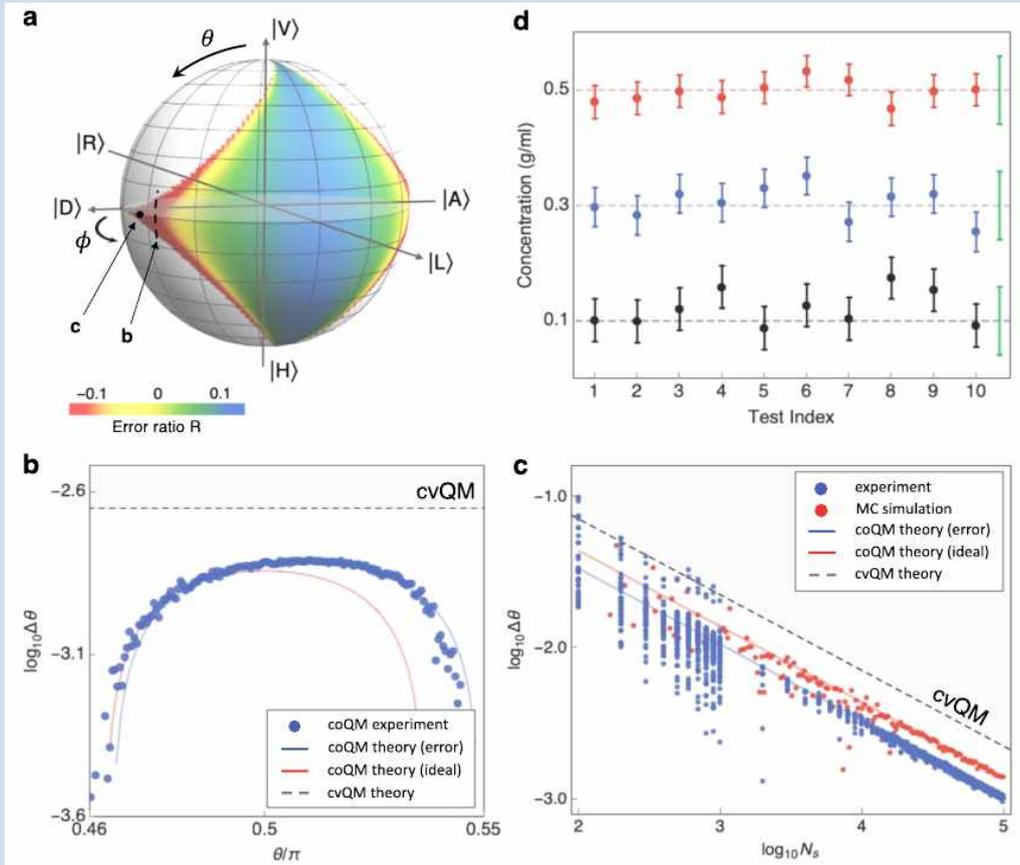
예고 단광자를 이용한 coQM 실험 모식도



설탕물(sucrose solution)을 통과할 때 발생하는 광자의 편광 상태의 변화량을 측정하기 위한 실험 장치이다. 예고 단광자는 자발 하향 매개 변환(spontaneous parametric down conversion)을 통해 생성하며, 광자의 수평/수직(H/V), 대각/역대각(D/A) 편광 측정을 두 호환되지 않는 측정으로 적용하였다.

이 coQM에 대한 실험적 검증은, 예고 단광자(heralded single photon)를 사용하여 설탕 용액의 농도를 측정하는 광학 편광계(polarimetry)실험을 통해 수행되었다. 서로 수직인 편광에 대한 측정을 순차적으로 적용하여, 문맥적 양자 계측을 구현하였으며, 기존 양자 피쳐 정보(QFI)한계 대비 최대 6배 향상된 정밀도를 보고하였다. 본 연구 내용은 npj Quantum Information에 게재되었으며, 국내에서 특허출원 되었다. 해외에 대한 특허출원을 진행 중이다.

양자 상태 측정값 정밀도 비교 - 이론, 시뮬레이션, 실험



- 기존 방법론들에서의 정밀도($\Delta\theta_{q/2}$, 맥락성 계측에서는 총 2번의 측정이 이루어지기 때문에 2를 고려하였다) 한계 대비 맥락성 계측에서의 정밀도($\Delta\theta_{co}$)의 비율을 Bloch sphere에 나타내었다($R=\log_{10}(\sqrt{2}\Delta\theta_{co}/\Delta\theta_q)$). 값이 작을수록 맥락성 계측의 우월성이 증가한다.
- $\phi=0.15\pi$ 일 때, θ 값 측정에서의 정밀도. 점선은 기존의 정밀도 한계를 나타낸다. 완벽한 실험 장치를 가정했을 때의 맥락성 계측에서의 정밀도 예측값(붉은색)과 실험에서의 오류를 고려하였을 때의 측정 정밀도(파란색)를 여러 θ 값에 대해 나타내었다.
- 측정 반복 회수(N_s : sample size)에 따른 정밀도 의존성. 제대로 된 추정을 위해서는 충분히 큰 N_s 값이 필요하다. d. 설탕물 농도 측정 실험 결과. 세 가지 다른 농도에 대한 결과로, 녹색은 기존 방법론에서의 정밀도를 의미한다.

논문 Contextual quantum metrology(npj Quantum Information, 2024)

[논문 보기](#)

특허 [국내] 측정 선택의 맥락성을 이용한 양자 계측의 정밀도 향상

차별성 및 우수성

본 연구에서 제안된 맥락성 양자 계측(contextual quantum metrology, coQM)은 기존의 양자 계측에서의 정밀도의 한계인 QCRB를 극복하는 새로운 방법론을 제안하며, 양자 계측의 범위를 한층 확장하는 의미를 가진다.

기존의 양자 계측 연구에서의 대표적 방법론으로 얽힘(entanglement) 상태를 이용해 측정의 정밀도를 높이는 전략이 있다. 하지만, 얽힘의 성질은 노이즈가 있는 상태에서 쉽게 소실될 수 있어, 실제 환경에서 양자 이득을 획득하는 것은 매우 어려운 문제가 된다. 본 coQM에서는 얽힘 없이도 불일치하는 측정들을 순차적으로 수행하는 맥락성을 활용하며, 노이즈에 대해 우수한 내구성을 가지고 있어 실제적 적용 가능성이 높다고 판단된다.

파급효과 및 활용계획

본 연구는 양자 상태의 매개변수를 정밀하게 측정하는 새로운 방법론 개발로서, 양자 컴퓨팅, 양자 통신, 양자 센싱 등 양자 정보 연구 전반에 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

예를 들어, 더 정밀한 측정은 실질적인 양자 컴퓨터 운영에서 오류 발생을 줄일 수 있어, 연산 효율을 높이는 의미를 가질 수 있으며, 고정밀 측정 방법론은 정밀 이미징, 시간 측정, 센서 개발 등의 분야에서 폭넓게 적용될 수 있다.

본 연구에서는 단일 광자(광큐빗)를 이용하였으나, 앞으로 멀티 큐빗으로의 확장에 대한 연구가 필요하다. 또한, 양자적 이득에 대한 근본적인 요인으로서 호환성(incompatibility), 맥락성(contextuality)에 대한 추가적인 연구가 필요하다.