광자기반 양자정보 연구 소개

DOI: 10.3938/PhiT.19.047

김 윤 호

Brief Introduction to Photonic Quantum Information Research

Yoon-Ho KIM

The photon concept has influenced critically to the breakthroughs in physics in the early 20th century. However, we now know that many effects originally thought to support the “particle” nature of light can in fact be described without invoking the quantum mechanical description of light. Observations of “true” quantum nature of light have begun only in the late 20th centuries and thus quantum optics, a study of quantized light field and its interaction with matter, was launched. In the recent years, quantum optics has shown to have many “applications” in quantum information. In this article, I give a brief summary of recent topics of research in quantum optics and quantum information.

양자광학의 시작

빛의 단위입자로서의 광자개념의 도입은 현대물리에서 양자역학의 발전에 큰 영향을 끼쳤다. 19세기 말 고전역학에서 가장 심각한 문제였던 흑체복사의 “uv catastrophe” 문제는 M. Planck에 의해 빛의 에너지가 불연속적인 단위로 방출된다는 가정이 도입되면서 해결되었고, A. Einstein은 이 개념을 더 발전시켜 광전효과를 설명하였다. 하지만, uv catastrophe, 광전효과, Compton 산란 등 현대물리 교과서에서 광자개념의 증명을 위해 사용되는 대부분의 현상들은 빛의 단위입자로서의 광자개념 없이도 충분히 설명이 가능한 현상들이 현재 알려져 있다.

양자광학(quantum optics)은 빛, 즉 전자기파의 양자화(quantization)를 통해 도입되는 광자(photon) 개념을 기초로 하여 단일광자 및 다광자 상태의 양자중첩 및 양자얽힘현상, 압

축광(squeezed-state of light)과 같이 고전 전자기파 이론으로 설명이 불가능한 비고전광(non-classical light), 빛과 원자와의 결합을 상호작용 등에 대한 현상들을 다루는 학문이다. 또 양자광학에서 중요한 연구주제인 양자중첩 및 양자얽힘 현상들은 최근 활발히 연구되고 있는 양자정보(quantum information) 분야의 핵심개념이 된다. 따라서 양자광학과 양자정보는 매우 밀접한 연구분야로 볼 수 있으며 현재 양자정보 분야의 실험연구는 대부분 양자광학적인 시스템을 기반으로 한다.

특히 양자얽힘에 대한 물리학적/철학적 연구는 양자광학 분야의 발전에 큰 영향을 끼쳤다. 1935년 A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen (EPR)이 Physical Review에 양자얽힘에 대한 논문을 처음 발표함으로써 양자역학의 “불완전성”에 대한 논의가 시작되었고 1964년 J. S. Bell이 (지금은 사라지고 없는) Physics라는 저널에 양자얽힘상태가 고전역학계가 반드시 만족해야 하는 부등식을 위배할 수 있다는 것을 보임으로써 양자얽힘에 대한 연구가 물리학의 테두리 안에서 연구되기 시작했다. 이후 J. F. Clauser 등이 Atomic cascade decay 과정에서 생성되는 광자쌍의 얽힘상태를 이용해 Bell 부등식의 위배를 실험적으로 관측하였다. 이때부터 얽힘상태, 단일광자상태 등의 비고전광에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다고 할 수 있다.

지금까지 알려진 가장 실용적이면서도 효율적인 비고전광원은 비선형결정을 이용한 SPDC(spontaneous parametric down-conversion)이다. 최근에는 원자기체, 반도체 양자점 등을 기반으로 하는 비고전광원에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다.

현재 양자광학 및 광자기반 양자정보 분야에서 많이 연구되는 연구주제들은 광자들간의 양자얽힘상태에 의한 양자간섭현상, 비고전광원의 개발 및 정량화 방법, 간단한 광자기반 양자정보 시스템 구현, 단일 및 얽힘광자를 이용한 Heisenberg-limited 양자측정, 고체 및 원자기체를 이용한 양자메모리 등 상당히 기초적인 연구들이다. 이 글에서는 광자기반 양자정보 연구와 밀접한 관련이 있는 양자광학 및 양자정보 분야의 세 가지 연구주제에 대해 간단히 소개한다.

저자약력

김윤호 교수는 University of Maryland, Baltimore County에서 응용물리학으로 2001년 박사학위를 받았고 Oak Ridge National Laboratory에서 Eugene P. Wigner Fellow로 2004년까지 근무하였다. 현재 포항공과대학교 물리학과에 재직 중이다. (yoonho72@gmail.com)

1. 비고전 광원에 대한 연구

비고전광이란 고전역학을 이용해 통계적인 성질을 완전히 기술할 수 없는 빛을 말하며 전자기파의 양자화를 통해서만

Fig. 1. Spatial profile of entangled photon pairs generated by type-II spontaneous parametric down-conversion (SPDC). The nonlinear medium is a BBO crystal. The pump and SPDC wavelengths are 400 nm and 800 nm, respectively. The polarization entangled state of photon pairs can be produced if the two cross-section points are selected.

그 특성을 설명할 수 있는 빛이다. 광자 수 상태(Photon number state), 얽힘상태, 압축광 등이 비고전광의 대표적인 예이며 이러한 비고전광을 생성하기 위해서는 대개 광자간의 상호작용을 필요로 한다. 따라서 선형매질(linear medium)을 이용해서는 비고전광을 생성할 수 없고 비선형매질(nonlinear medium)을 이용해야 한다.

지금 양자광학 및 양자정보 실험에서 가장 많이 사용되는 비고전광원은 BBO, LBO, KTP 등의 2차비선형결정을 레이저로 펌핑했을 때 vacuum fluctuation에 의해 광자쌍이 동시에 생성되는 SPDC이다. SPDC 과정을 통해 생성되는 광자쌍은 에너지 보존 및 운동량 보존을 만족해야 하므로 광자쌍 얽힘상태의 특성을 쉽게 바꿀 수 없다. 하지만 얽힘상태 광자를 양자정보 프로토콜에 이용하기 위해서는 광자의 여러 자유도(degree of freedom)를 이용할 수 있어야 하며 또 프로토콜의 요구조건에 맞는 얽힘상태를 생성할 수 있어야 한다. 현재 SPDC 광자쌍을 양자정보 프로토콜에 필요한 양자상태로 직접 생성하려는 연구들이 많이 진행되고 있으며 최근에는 광섬유, Photonic Crystal fiber, 원자기체 등 3차 비선형 매질에서의 Four-Wave Mixing 과정을 이용한 비고전광원 개발에 대한 연구도 많이 수행되고 있다.

또 양자정보 프로토콜의 구현을 통해 최종적으로 얻는 결과물은 입력하는 양자상태의 양자간섭 현상으로 설명할 수 있다. 양자간섭 현상은 양자상태의 특성뿐만 아니라 측정방법에 따라 크게 결과가 바뀌므로 양자상태의 특성 및 측정방법이 양자간섭 현상에 어떻게 영향을 주는지에 대해서도 자세한 연구를 필요로 한다. 따라서 최근에는 양자상태의 측정에 문제들을 SPDC 광자를 이용한 실험을 통해 구현해보고 이 결과를 이용해 양자상태 측정에 필요한 최적의 양자프로토콜을 찾는 연구들이 진행되고 있다.

Fig. 2. The fringe spacing d of the interference pattern formed by two coherent light waves of wavelength λ is determined by the angle θ . The minimum spacing is given as $d = \lambda/2$ and is known as the Rayleigh limit or the classical limit.

2. 양자광학적 측정기술 연구

CD-ROM, DVD, Blu-Ray로 대표되는 레이저 광을 이용한 데이터 저장장치의 발전에서 쉽게 볼 수 있듯이 더 짧은 파장의 빛을 이용할수록 더 많은 양의 데이터를 기록하고 더 작은 무늬를 구별할 수 있다. (CD-ROM 780 nm; DVD 650 nm; Blu-Ray 405 nm) 일반적으로 파장 λ 인 빛을 이용한 광학적 기록 및 측정 장치에서 간섭무늬의 최소간격인 $\lambda/2$ 보다 작은 패턴을 기록하거나 읽어내는 것은 불가능하다고 알려져 있으며 이를 Rayleigh limit 또는 고전 광학적 한계라고 한다.

얽힘상태의 광자의 양자간섭현상을 이용할 경우 고전광학적인 Rayleigh limit을 넘는 해상도를 구현할 수 있다. 특히 N 개의 단일광자가 서로 다른 두 경로에 동시에 존재하는 양자 얽힘상태를 이용할 경우 (이러한 양자얽힘상태를 흔히 NOON 상태라고 부른다) 양자간섭무늬의 최소간격은 $d = \lambda/(2N)$ 으로 주어져 레이저와 같은 고전광을 이용한 경우보다 N 배의 해상도 및 분해능의 향상을 기대할 수 있다. 이러한 얽힘상태 광자의 양자간섭현상을 이용하면 임의의 패턴을 고전적인 경우보다 N 배의 해상도로 기록할 수 있는 Quantum lithography와 Quantum imaging을 구현할 수 있음이 알려져 있다.

또 NOON 상태와 같은 양자얽힘상태는 매우 정밀한 위상측정에 이용될 수 있다. 불확정성 원리에 따르면 위상값 ϕ 의 불확정도와 광자수 N 의 불확정도 사이에는 $\Delta N \cdot \Delta \phi \geq 1$ 의 관계식이 성립한다. 고전광인 레이저의 경우 광자수가 Poisson 분포를 따르므로 ΔN 은 $\sqrt{N}$ 으로 주어져 고전광을 이용한 간섭계의 위상의 불확정성은 $\Delta \phi \geq 1/\sqrt{N}$ 로 주어진다. 여기서 $\Delta \phi = 1/\sqrt{N}$ 인 경우를 표준양자한계(standard quantum limit; SQL)라고 한다. 하지만 얽힘상태인 NOON 상태를 이용한 양자간섭계의 경우 ΔN 은 N 이므로 위상의 불확정성은 $\Delta \phi \geq 1/N$ 으로 주어져 고전광을 이용한 간섭계에 비해 $\sqrt{N}$ 배의 위상정밀도를 기대할 수 있다. ($\Delta \phi = 1/N$ 인 경우를

Heisenberg limit이라고 부른다.) 즉, 얽힘상태를 이용할 경우 SQL을 넘어서 양자역학적인 한계인 Heisenberg limit에 도달할 수 있다. Heisenberg limit에 도달하기 위해서는 얽힘상태를 높은 Fidelity로 생성하고 측정할 수 있어야 한다. 또 N 이 충분히 큰 얽힘상태 즉 Schrödinger cat 상태와 같이 아주 광자수가 많은 얽힘상태를 구현하고 또 이를 이용해 양자간섭장치를 구현할 수 있어야 한다.

3. 간단한 광자기반 양자정보 시스템 연구

현재 우리가 사용하는 정보처리 및 통신의 기본단위는 비트(bit)라고 불리며 0 또는 1로 표현한다. 컴퓨터는 비트로 표시된 정보에 범용게이트(universal gate)인 NAND 게이트의 집합을 이용하여 다양한 연산을 수행하며 비트를 기반으로 하는 정보처리 및 통신체계를 고전정보라고 한다. 양자정보는 고전정보와는 근본적으로 달리 양자역학의 핵심적이고 기본적인 개념인 양자중첩과 양자얽힘이 정보의 기본단위에 도입된다.

양자정보가 현재 외국에서 많이 연구되고 있는 이유는 고전적인 방법으로는 불가능한 양자암호, 양자전산, 양자전송(quantum teleportation) 등의 양자정보 프로토콜들을 구현할 수 있기 때문인데 이들 양자정보 프로토콜들은 정보처리 및 통신을 고전적인 방법보다 훨씬 더 빠르거나 효율적으로 할 수 있게 해준다.

하지만 양자정보 및 양자통신을 실제로 구현하기 위해서는 많은 문제들을 해결해야만 한다. 특히 정보처리의 기본단계에서 양자중첩 및 양자얽힘이라는 양자적인 현상을 고려해야 하므로 현재 사용하고 있는 고전정보의 처리/통신을 위한 장치들은 사용할 수 없다. 먼저 양자정보에서는 큐비트(양자비트; quantum bit)이라는 기본단위를 도입하는데 이는 2차원 자유도를 갖는 임의의 양자중첩상태이다. 큐비트를 구현하기 위해 여러 양자역학적 시스템을 사용할 수 있는데 광자, 이온, 중성원자, 조셉슨 결합, 단일 양자점 등이 흔히 고려되는 큐비트 시스템들이다. 이 중 광자 및 이온을 이용한 큐비트 기술이 양자정보 시스템에 가장 적합한 것으로 현재 고려되고 있다.

최근에는 큐딤(qudit)이라는 d -차원의 ($d > 2$) 자유도를 갖는 양자상태에 대한 연구도 많이 되고 있는데, 큐딤은 큐비트보다 구현하기가 힘들고 측정 및 제어가 복잡하지만 큐딤을 이용할 경우 특정 양자정보처리/통신 알고리즘을 큐비트보다 효과적으로 구현가능하다.

큐비트 및 큐딤에 기록한 양자정보를 이용해 유용한 정보처리 및 통신을 하기 위해서는 양자게이트(quantum gate)가 필요하다. 양자게이트는 입력 양자상태를 적절한 출력 양자상태로 바꾸어 주는 역할을 하는 장치인데 단일 큐비트/큐딤에 대한 제 1형 양자게이트와 두 개 큐비트/큐딤에 대한 제 2형 양자게이트로 나눌 수 있다. 광자기반의 큐비트/큐딤에 대해 제

1형 양자게이트를 구현하는 것은 쉽지는 않으나 가능하다. 하지만 두 개 큐비트/큐딤의 상호작용이 필요한 제 2형 양자게이트는 광자기반 큐비트/큐딤에서 구현하는 것은 매우 어려운데 그 이유는 일반적으로 단일광자 수준에서 광자-광자 상호작용이 매우 비효율적이기 때문이다.

현재 선형광학과 광자상태의 측정(projection measurement)을 이용해 제 2형 양자게이트의 동작을 구현해 내는 선형광학적 양자게이트가 많이 연구되고 있다. 여러 종류의 다른 선형광학적 양자게이트가 연구되고 있으며 이러한 선형광학적 양자게이트를 모아 특정 양자회로를 구현하는 연구도 되고 있다. 제2형 양자게이트 구현을 위한 또 다른 접근 방법으로는 광자-광자 간의 비선형 상호작용 계수가 아주 큰 비선형매질을 만들어내는 것이다. 단일 광자 수준에서 비선형 효과가 크면서 투명한 매질을 새롭게 만들어 내는 것은 매우 어려운 문제인데, 최근에는 원자기체를 매우 작은 공간에 집어넣고 광자와의 상호작용 효율을 높이는 연구도 진행되고 있다.

광자와 원자 간의 비선형 상호작용에 대한 연구는 광자의 양자상태를 원자에 저장했다가 나중에 원래의 양자상태를 가진 광자로 재생해내는 양자메모리 연구와도 밀접한 관계가 있다.

맺는말

양자광학 및 양자정보 분야의 연구내용들은 양자중첩, 양자얽힘, 측정 등 양자역학의 핵심 아이디어들과 깊은 연관이 있어 양자역학의 최경계에 있다고 할 수 있다. 또 이러한 연구들은 아직도 기초 연구에 해당하므로 빛의 양자적 효과 및 현상들을 직접 응용할 수 있는 단계에 도달하기까지는 좀 더 시간이 걸릴 것으로 생각한다. 하지만 이 분야들이 아직 기초 연구의 단계에 있기 때문에 응용 분야와 비교할 때 상대적으로 적은 투자로 큰 결과 즉 새로운 발견을 기대할 수 있다.

뿐만 아니라 양자광학 및 양자정보 연구를 통해 얻어나가는 새로운 지식들의 장단기적인 응용성 또한 매우 높다고 생각한다. 먼저 단기적으로 단일광자 수준에서 빛을 제어하고 양자상태를 정확히 측정하는 양자광학적 기술들은 광학적 측정기술의 정밀도를 향상하는데 응용할 수 있다. 장기적으로는 양자광학 시스템을 이용한 양자컴퓨터 및 양자통신기술의 구현에 응용될 수 있다. 양자광학 및 양자정보 분야의 기초 및 응용연구에서 한국도 조만간 선도 연구그룹에 들어갈 수 있기를 희망하면서 글을 맺는다.

Fig. 3. The qubit can be represented as a vector on the Bloch sphere.