

1. 서론

우리는 정보를 다루기 위해 여러 물리적인 장치를 이용한다. 책, 논문 등과 같이 종이를 이용하여 정보를 기록하고, 신호등의 색깔을 통해 정보를 전달하기도 하며, 최근에는 컴퓨터와 스마트폰을 이용하여 정보를 만들어내고 교환한다. 현대의 디지털 정보기기는 정보의 기본단위로 0과 1로 표현되는 이진수 기반의 단위를 사용하는데 이를 비트(bit; binary digit)라고 한다. 여기서 0과 1이란 특정 물리계의 구별가능한 두가지 상태를 나타내는데, 빛의 있고 없음, 전압의 높고 낮음 등을 예로 들 수 있다. 비트를 기반으로 하는 정보처리 방법을 양자정보의 입장에서 고전정보라고 부른다. 그렇다면 양자정보는 고전정보와 어떻게 다를까? 먼저

신과 양자전산으로 크게 나누어 볼 수 있다.

양자정보가 최근 주목받고 있는 이유는 아래와 같이 몇 가지로 간단히 요약해 볼 수 있다. 1) 기존의 고전 정보처리 방법이 발전하면서 궁극적으로는 단일 양자계를 이용해 통신 및 전산을 구현해야 할 것으로 예상되며 이 경우 양자계의 결맞음 현상을 더 이상 무시할 수 없고 이를 이용해야만 한다. 2) 몇몇 양자통신 및 양자전산 프로토콜은 고전정보의 한계를 극복할 수 있는 것으로 알려져 있다. 3) 양자전송, 양자암호와 같은 고전적으로는 불가능한 전산, 통신 프로토콜을 가능하게 한다.

이번 글에서는 먼저 양자정보의 공통적인 기본 특징을 정리하고 광자를 이용해 양자정보를 구현하려는 노력, 즉 광자기반 양자정보에 대해 간략히 소개하고자 한다.

특집 ■ 양자정보

광자 기반의 양자정보 연구

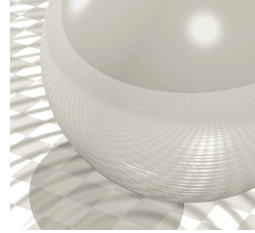
임향택, 라영식, 홍강희, 송영선, 김윤호*

정보의 기본 단위는 비트가 아닌 큐비트(qubit; quantum bit)이며 큐비트는 0과 1로 표현되는 구별 가능한 두가지 물리적인 상태가 아닌 0과 1의 모든 가능한 양자중첩상태를 의미한다. 즉, 비트의 경우 0 또는 1만이 표현 가능하지만 큐비트의 경우 양자중첩의 원리로 인해 0과 1을 동시에 표현하는 것이 가능하며 따라서 양자결맞음이 있는 양자역학적 물리계를 이용해서만 구현할 수 있다. 양자계의 이러한 양자간섭현상에 기반을 둔 정보처리 방법을 양자정보라 하며 양자통

2. 양자정보의 기본 특징

위에서 설명한 바와 같이 고전정보는 비트를 기본단위로 하며 구별가능한 두개의 물리적인 상태를 이용해 구현가능하다. 즉, 고전계인 동전의 앞뒷면을 이용해 비트를 구현할 수 있듯이 양자계인 전자의 스핀을 이용해서도 비트를 구현할 수 있다. 다만 양자정보의 경우 0과 1의 양자중첩을 이용하므로 양자계를 이용해서만 구현이 가능하다. 양자정보의 기본단위인 큐비트는 기

* 포항공과대학교 물리학과



존의 비트와는 확연히 다른 세가지 특징을 가지는데, 양자중첩, 양자얽힘, 그리고 복제불가능성이다. 먼저 이 세가지 특징에 대해 간단히 알아보도록 하자.

가. 양자중첩(quantum superposition)

양자역학을 처음 접할 때, 누구나 한 번쯤 “슈뢰딩거의 고양이”에 대해 들어보았을 것이다. 양자역학을 탄생시킨 물리학자 중 한 사람인 슈뢰딩거가 코펜하겐 해석 이후 1935년에 떠올려낸 사고실험으로, 밀폐된 박스에 고양이와 함께 절반의 확률로 작동하는 독가스장치를 집어넣으면, 고양이가 죽어있을 경우와 살아있는 경우가 중첩이 되어 측정하기 전까지 두 상태가 공존한다는 것이다. 이 사고실험은 수많은 양자역학적 논의를 함의하고 있지만, 여기서는 고양이가 가질 수 있는 두 상태가 함께 공존하는 현상, 즉 양자중첩에 초점을 맞추도록 하자.

양자역학이 가지는 가장 큰 특성은 이처럼 구별가능한 (즉 직교하는) 둘 이상의 상태가 함께 공존할 수 있다는 사실이며, 이런 양자중첩은 양자정보의 가장 중요한 특성이다. 우리에게 이미 익숙한 기존의 고전정보에서는 정보의 기본 단위가 비트로, 0 또는 1의 정보를 기록할 수 있다. 그러나 양자정보의 기본 단위인 큐비트는 0과 1의 상태를 각각 따로 따로 기록할 수 있을 뿐만 아니라 0과 1이 동시에 존재하는, 즉 0과 1의 양자중첩상태를 기록할 수 있다.

이렇게 양자정보를 이용하여 정보를 중첩된 상태로 저장하는 특성은 양자시스템의 규모가 커질수록, 즉 큐비트의 개수가 많아질수록 놀라우리만큼 강력한 기능을 발휘할 수 있는데, 이를 이용한 양자정보기술의 한 예로 양자컴퓨터를 들 수 있다. 양자컴퓨터는 특정한 연산을 기존의 컴퓨터보다 훨씬 빠른 속도로 구현할 수 있는 것으로 알려져 있는데, 그 대표적인 예가 Shor의 소인수분해 양자알고리즘이다 [1]. 양자컴퓨터를 이용해 Shor의 알고리즘을 구현할 수 있다면 현재 사용되는 대부분의 정보보안체계를 뚫을 수 있는 것으로 알려져 있다. 이 외에도 단 한번의 시도로 주어진 함수의 특성을 판별할 수 있는 Deutsch-Jozsa 알고리즘 [2]과 고전컴퓨터보다 더 효율적인 검색을 할 수 있는 Grover의 검색 알고리즘 [3]등이 있다. 물론 이러한 알고리즘을 구현하기 위해서

는 많은 수의 큐비트가 필요하며 큐비트 간의 양자얽힘이 필수적이다.

나. 양자얽힘(quantum entanglement)

양자역학의 가장 기묘한 특성 중 하나인 양자얽힘 현상은 양자시스템에서 나타나는 상관관계가 시공간적으로 멀리 떨어진 경우에서도 나타나는, 즉 비국소적 (non-local) 특성을 나타내는 현상이다. 양자얽힘을 나타내는 가장 대표적이고 기본적인 형태는 “벨 상태 (Bell-state)”로, 다음과 같은 수학적 구조를 지닌다:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B)$$

위의 수식에서 볼 수 있듯이 벨 상태는 두 개의 큐비트 A, B로 구성된 상태이며, 두 큐비트 모두 0의 상태에 있는 경우와 두 큐비트 모두 1의 상태에 있는 경우가 양자중첩되어 있는 상태이다. 만약 큐비트 A의 관측 결과가 0이라면, 그 순간 큐비트 B의 상태도 0으로 정해지며, 그 반대의 경우도 마찬가지이다. 이 상관관계는 앞서도 말했듯이 시공간적인 거리에 무관하며, 이러한 비국소적인 특성으로 인해 벨 상태는 다양한 양자정보기술에서 필수적인 자원으로 사용된다.

벨 상태를 이용한 양자정보기술의 가장 대표적이고 신기한 응용 중 하나는 양자원격전송 (quantum teleportation)이다 [4]. SF영화의 단골 소재로 등장하는 원격 전송은 상상속의 기술처럼 알려져 있지만, 실제 양자역학의 세계에서 양자얽힘을 이용하여 A쪽의 양자정보를 B쪽으로 전송할 수 있으며 실제로 이러한 양자원격전송은 이미 실험적으로 구현되었다 [5]. 다만, 영화에서처럼 순식간에 완전한 정보를 전송할 수 있는 것은 아니며 아인슈타인의 특수상대성이론 때문에 빛보다 빠른 정보의 전송은 불가능하다. 양자원격전송은 그 자체의 의미만으로도 중요할 뿐만 아니라 여러 양자정보기술에 핵심적인 역할을 차지한다. 특히 2001년 Knill, Laflamme, Milburn (KLM)에 의해 제안된 광자 기반의 양자컴퓨터의 구현 방법에서는 양자원격전송이 프로토콜의 핵심적인 요소로 등장함으로써 그 중요성이 더욱 부각되었다 [6]. 벨 상태 응용의 또 다른 예로 양자집속 코딩(quantum dense coding)을 들 수 있는데, 이는 단

광자 기반의 양자정보 연구

일 입자의 전송을 통해 고전통신보다 더 많은 정보를 전송할 수 있다는 것이다 [7].

다. 복제불가원리(no-cloning theorem)

서류를 스캔하고 복사해서 같은 (고전)정보가 포함된 여러장의 서류를 만들 수 있으며 컴퓨터상에서 동영상 파일 하나를 여러 개로 복사하는 것이 가능하다. 복사과정에서의 오류가 없다면 복사된 파일은 원본과 완전히 동일하며 즉, 동일한 (고전)정보를 가진다. 다시 말하면 고전정보의 기본단위인 비트는 전기적 또는 광학적 신호로서 구현되며 이를 기반으로 한 고전정보는 얼마든지 복제할 수 있다. 이러한 복제가 가능한 이유는 고전물리에서는 측정의 한계가 없기 때문이다.

그러나 고전정보와는 다르게 양자역학적 특성에 기반을 둔 양자시스템에서는, 임의의 양자정보를 완벽하게 복제하는 게 불가능하다는 것이 밝혀져 있다 [8]. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다:

$$|\psi\rangle_A|0\rangle_B \nrightarrow |\psi\rangle_A|\psi\rangle_B$$

양자정보의 복제불가능성은 양자물리의 선형성(linear)에 기인하는 것으로 만약 복제가 가능하면 정보를 빛보다 빠르게 전송하는 것이 가능하게 된다.

복제불가원리는 양자암호통신(quantum cryptography)의 핵심적인 요소로, 정보 전달 과정에서 도청의 위협을 원리적으로 막을 수 있다. 가령, 도청자가 전송되고 있는 정보를 가로채 측정을 하고, 그 정보를 복제하여 받는 사람에게 다시 보낸다고 해보자. 이 경우 도청자는 자신의 존재를 들키지 않고도 정보를 가로챌 수 있다. 그러나 임의의 양자정보를 완벽하게 복제하는 것은 불가능하기 때문에, 양자정보를 가로챌 도청자는 자신이 가로챌 정보가 아닌 조금 다른 정보를 받는 사람에게 보내게 되고, 그렇게 되면 통신자들은 도청자의 존재를 감지할 수 있게 된다. 이렇게 원리적으로 안전한 통신인 양자암호 프로토콜은 1984년 Bennett과 Brassard에 의해 최초로 제안되었으며 현재 유럽, 미국, 일본, 중국에서 활발한 연구가 진행되고 있다 [9,10].

양자정보기술을 구현하고 활용하기 위해서는 양자정보를 기록, 전송, 측정 할 수 있는 양자시스템에 대한 연

구가 필요하다. 또 더 많은 양의 양자정보를 활용할 수 있기 위해서는 많은 수의 큐비트가 필요할 뿐만 아니라 다차원 양자시스템으로 구현되는 큐비트 확장 개념인 다차원 양자상태가 필수적이다. 양자정보기술의 기초 및 응용연구에 가장 활용도가 높을 것으로 기대되는 물리계는 광자인데, 이는 기본적으로 양자통신이 광자를 이용해야 하기 때문이며 광자기반 양자컴퓨터와 양자통신 시스템의 결맞는 동작이 가능할 것으로 기대하기 때문이다. 아래에서는 광자를 이용해 다차원 및 다입자 양자계를 구현하는 방법, 이를 이용한 양자정보 구현, 그리고 구현된 양자 시스템의 응용 가능성에 대해 간략하게 알아보도록 한다.

3. 다광자 상태와 양자정보

다광자 양자상태의 가장 기본적인 형태는 두 개의 광자로 이루어진 양자상태, 즉 이광자 상태라고 할 수 있다. 이러한 이광자 상태를 준비하기 위한 다양한 방법이 있으나 가장 널리 쓰이는 방법 중 하나는 자발매개하향변환(Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC) 과정을 이용한 방법이다(그림 1(a)). SPDC 과정은 하나의 펌프 광자가 비선형 결정을 지나면서 일정 확률로 두 개의 ‘낮춤-변환된 광자’로 변환되는 과정으로, 에너지 보존과 운동량 보존이 모두 만족되는 조건 하에서 일어난다. 이렇게 생성된 두 개의 광자는 결맞음 특성 및 양자얽힘 등의 양자역학적 특성을 지니고 있기 때문

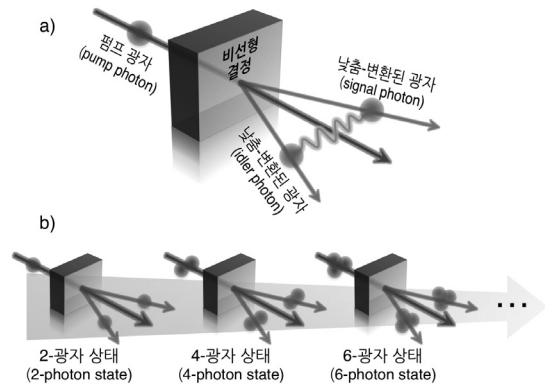
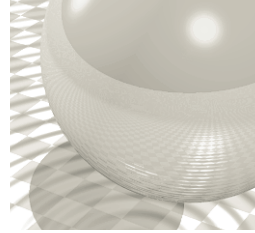


그림 1. (a) ‘자발매개하향변환’ 과정. 낮춤-변환된 광자쌍은 양자얽힘 등 양자역학적 특성을 가지고 있다. (b) SPDC과정에서 다광자 상태가 생성될 확률은 광자의 개수에 따라 지수적으로 감소한다.



에, 광학소자들을 이용한 추가적인 조작을 통해서 우리가 원하는 양자상태로 변환할 수 있다. 특히, SPDC를 통해 생성된 이광자 상태를 바탕으로, 광자의 편광 자유도를 제어하여 앞서 언급했듯이 양자정보 분야에서 가장 중요하고 널리 쓰이는 양자상태인 벨 상태를 생성할 수 있다.

많은 광학 기반의 양자정보 실험들이 이렇게 생성된 벨 상태, 즉 두 개의 광자의 얽힘상태에 의존하지만, 고급 양자정보기술의 구현과 실용화를 위해서는 궁극적으로는 더욱 많은 수의 광자를 바탕으로 한 다광자 얽힘상태를 생성할 수 있어야 한다. 다광자 상태의 생성 역시 SPDC 과정에 기반을 두는데, 이 과정에서 이광자 상태만 생성되는 게 아니라 더 많은 수의 광자가 생성되기도 한다. 이광자 생성 확률보다 더욱 낮은 확률로 두 개의 펌프 광자가 네 개의 낮춤-변환된 광자로 변환되는 경우도 발생하며, 일반적으로는 n 개의 펌프 광자가 $2n$ 개의 낮춤-변환된 광자로 변환되기도 한다 (이 때, 생성 확률은 n 에 따라 지수적으로 감소한다). 다광자 양자상태는 바로 이 과정에서 생성되는 광자들을 이용한다 (그림 1(b)). 이렇게 생성된 다광자 상태는 광학소자들을 이용한 제어를 통해 다양한 양자상태로 변환시킬 수 있다. 이광자 양자얽힘 상태와 달리 다광자 상태의 얽힘은 이광자 상태에 비해 더 복잡한 양상을 가지며, 다양한 종류의 얽힘 상태를 가진다

다광자 얽힘 상태의 구현은 다양한 양자정보기술의 실용화를 위해서 필수적인 단계이다. 큐비트의 개수가 많아짐에 따라 기하급수적인 성능 향상을 나타내는 양자컴퓨터를 비롯하여, 많은 양자 정보 기술들이 단순한 원리검증을 넘어서 실질적인 효율성을 발휘하기 위해서는 큐비트 개수의 확장이 따라야 하기 때문이다. 다수의 큐비트를 사용한 실험의 예를 들면, 4개의 광자로 이루어진 얽힘 클러스터 (cluster) 상태를 이용한 한방향 (one-way) 양자컴퓨터의 실험적 구현 [11], 고전적인 검색 알고리즘보다 더 빠르다고 알려져 있는 Grover의 검색 알고리즘 구현 [12] 등을 들 수 있다. 또 다른 응용 사례에는 “NOON 상태”를 이용한 정밀 위상 측정을 들 수 있다. NOON 상태는 N 개의 광자로 구성된 다광자 상태의 하나로, 경로 a에 N 개의 광자가 있고 경로 b에 광자가 없는 경우와, 반대로 경로 a에 광자가 없고 경로 b에 N 개의 광자가 있는 경우가 중첩되어 있

는 상태를 말한다. 이 NOON 상태를 간섭계를 이용하여 위상을 측정하면, 고전적으로 예측되는 광학적 한계를 능가하는 정밀도로 측정할 수 있으며, 이러한 정밀도는 광자의 개수에 따라 원리적으로는 무한히 증가할 수 있다 [13]. 이 원리를 이용한 양자리소그래피 (quantum lithography)는 반도체 기판에 새겨지는 회로의 정밀도를 고전적인 빛을 이용한 경우보다 더 높일 수 있어서, 반도체의 집적도를 높이는 방법으로서 부각되고 있다 [14]. 이 밖에도 다광자 양자 상태는 슈뢰딩거의 고양이 상태라 불리는 거시 양자 얽힘상태에도 직접적인 관련이 있고, 기존의 고전적인 편광 개념으로는 설명할 수 없는 양자편광의 특성을 가지고 있는 등 양자정보 분야에의 응용성과 더불어 다광자 양자 상태 그 자체만으로도 풍부한 양자역학적 신비를 지니고 있다.

장기적으로 광자기반 양자기술의 응용성 및 실용성을 추구하기 위해서는 다광자 상태의 생성효율을 높일 필요가 있는데, 이에 대한 연구는 아직 초기단계이다.

4. 다차원 상태와 양자정보

양자상태, 즉 양자상태를 기술하는 힐버트 공간의 규모를 키우는 방법으로 큐비트의 개수를 늘리는 방법이 있다. 이 방법은 앞서 언급되었지만 현재 효율이 좋지 않고, 시스템을 안정적으로 유지하기가 힘들다는 단점이 있다. 일반적으로 시스템을 구성하는 큐비트 수가 늘어날수록 시스템이 외부 환경과 상호작용할 확률이 높아지기 때문에 시스템의 고유한 양자적 성질(결맞음)을 잃어버리기 쉬워진다. 양자적 성질을 잃어버린 시스템은 더 이상 양자연산의 수단으로 사용될 수 없다. 따라서 고성능 양자컴퓨터의 구현을 위해 다중 큐비트 상태를 이용하고자 한다면, 시스템을 안정하게 유지하는 방법에 대한 연구가 선행되어야 한다.

힐버트 공간의 규모를 키우는 방법 또 다른 방법으로는 정보의 최소단위가 갖는 차원을 키우는 것이다. 큐비트의 경우 2차원 양자상태를 이용하지만 차원을 확장함으로써 3차원 양자상태 (큐트리트; qutrit), 4차원 양자상태 (큐쿼트; ququart) 등의 구현이 가능하며 d -차원의 양자상태 또는 큐디트(qudit)도 구현할 수 있다. 광자를 이용해 큐디트를 구현하기 위해서는 단일광

광자 기반의 양자정보 연구

자의 외부자유도(external degree of freedom) 또는 내부자유도(internal degree of freedom)를 이용할 수 있다.

가. 광자의 외부자유도를 이용한 다차원 양자상태의 구현

광자를 흔히 국소적인 입자라고 생각하기 쉽지만, 실제로 광자는 단광자 검출기에 의해 관측되기 전까지는 비국소적인 성질을 띠고 있다. 이러한 광자의 성질을 이용하여 다차원 양자상태를 구현할 수 있는데, 그 방법은 크게 다음 두 가지로 나눌 수 있다.

먼저 그림 2(a)와 같이 광자가 지나는 경로를 이용해 큐비트 시스템을 구현하는 것이 가능하다. 빔 분할기는 빛을 특정 확률로 반사시키거나 투과시키는 광학소자이며, 이를 거친 광자는 투과된 경우와 반사된 경우가 양자적 확률로 중첩되어 있기 때문에 각각 큐비트 시스템의 0과 1에 대응시킬 수 있다. 그러므로 빔 분할기를 여러 개 사용해서 가능한 경로를 여러 개 만들어 줌으로써 다차원 양자상태를 구현하는 것도 가능하다. 예를 들어 그림 2(a)에서 첫번째 빔 분할기에서 투과되고 두 번째 빔 분할기에서 투과된 광자는 큐비트 시스템의 0에 대응되며, 첫 번째 빔 분할기에서 투과되고 두 번째 빔 분할기에서 반사된 광자는 큐비트 시스템의 1에 대응된다. 이렇듯 빔 분할기의 투과/반사 비율을 적당히 설정하여 각 경로를 지나가는 확률을 조절함으로써 원하는 큐비트 시스템을 준비할 수 있다.

두 번째 방법은 그림 2(b)와 같이 광자가 단광자 검출기에 도달하는 시간을 이용해 큐비트 시스템을 구현하는 것이다. 그림과 같이 빔 분할기를 이용하여 한 개의 광자가 짧은 경로로 가거나 중간 경로, 긴 경로로 가는

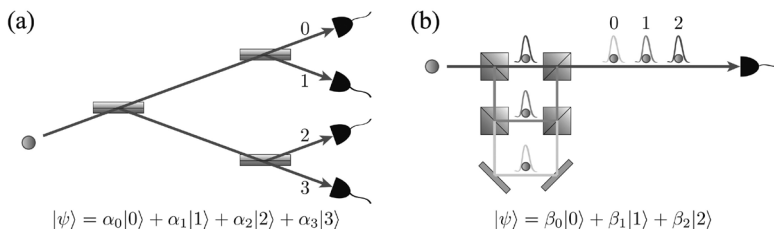


그림 2. 광자에 정보를 인코딩하는 방법. (a) 광자가 지나가는 경로를 이용하여 큐비트 시스템 구현. (b) 광자가 단일 광자 검출기에 도달하는 시간을 이용하여 큐비트 시스템 구현.

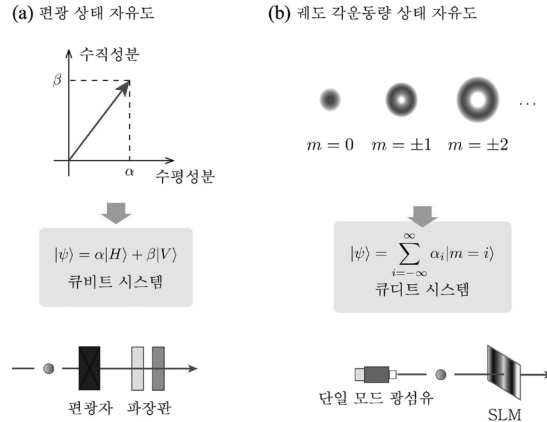


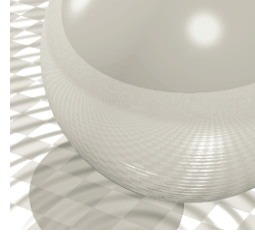
그림 3. 광자의 내적 자유도를 이용하여 광자에 정보를 인코딩하는 방법. (a) 광자가 가질 수 있는 두 편광상태를 이용한 큐비트 시스템의 구현. (b) 광자가 가지는 궤도 각운동량을 이용한 큐비트 시스템의 구현.

경우를 양자적 확률로 중첩시킬 수 있다. 후에 다시 빔 분할기를 이용하여 경로가 합쳐졌을 때 위 세 가지 경우는 도달 시간의 중첩으로 나타나게 된다. 광자가 긴 경로로 돌아서 가는 시간, 짧은 경로로 돌아서 가는 시간, 직진해서 들어오는 시간은 각각 큐비트 시스템의 0, 1, 2상태에 대응된다. 이 방법에서도 각 경우가 발생할 확률을 조절하여 원하는 상태의 큐비트 시스템을 준비할 수 있다.

나. 광자의 내부자유도를 이용한 다차원 양자상태 구현

앞에서 소개한 방법에서 광자의 비국소성을 이용하였다면, 이번에는 광자가 가진 고유한 성질을 이용한 다차원 양자상태 구현에 대해 알아보자. 하지만 그에 앞서, 광자로 구현할 수 있는 가장 간단한 양자상태인 편광을 이용한 큐비트 시스템에 대해 알아보자. 단일광자의 편광은 고전역학적으로도 잘 알려져 있는 빛의 편광과 같은 개념으로, 그 방향은 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이, 수평 성분과 수직 성분의 조합으로 나타낼 수 있다. 여기서 두 성분의 비율을 나타내는 계수가 양자적 확률을 나타내기 때문에 편광의 수직, 수평성분을 각각 0과 1에 대응

시켜 주는 것이 중요하다. 수평 성분과 수직 성분의 조합으로 나타낼 수 있다. 여기서 두 성분의 비율을 나타내는 계수가 양자적 확률을 나타내기 때문에 편광의 수직, 수평성분을 각각 0과 1에 대응



시켜 큐비트 시스템을 구성할 수 있는 것이다. 단일광자를 편광자에 통과시켜 특정한 편광 성분을 갖도록 투영시킨 뒤, 1/2파장판, 1/4파장판을 이용하여 편광 방향을 원하는 방향으로 준비할 수 있다. 단일광자의 편광 상태는 광학소자만으로도 쉽게 조작할 수 있고 안정적이어서 많은 양자정보 프로토콜의 실험에 널리 사용되고 있다. 그러나 편광 상태가 가질 수 있는 값이 수평, 수직의 두 가지 뿐이기에 이것만으로는 가장 작은 단위인 큐비트 시스템을 구현할 수 있을 뿐이다.

최근 들어 광자의 궤도 각운동량 (orbital angular momentum, OAM)이 다차원 양자상태 구현의 후보로서 연구되고 있다. 광자의 궤도 각운동량은 광자의 전자기장의 공간적 분포에 의존하는 각운동량 성분으로, 그림 3(b)에 궤도 각운동량의 고유 상태가 가진 세기 단면도가 광자의 진행 방향에 대하여 나타나 있다. 궤도 각운동량의 고유 상태에는 무한히 많은 가능한 양자상태가 있으며 ($m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$), 편광 상태와 마찬가지로 이들은 양자역학적 확률을 따르는 중첩상태에 있을 수 있다. 따라서 이를 이용한 보다 높은 차원의 큐비트 시스템의 구현이 가능하다. 단일 광자의 궤도 각운동량 상태를 준비하는 방법은 편광상태를 준비하는 방법과 유사하다. 먼저, 광자를 단일 모드 광섬유에 통과시켜 궤도 각운동량을 특정한 상태 ($m=0$)로 투영시켜 준다. 그런 다음 광자가 갖는 궤도 각운동량을 원하는 비율로 중첩된 상태로 만들기 위해 spatial light modulator (SLM)이라는 장비를 사용한다. SLM은 각 픽셀이 갖는 투과율과 위상차를 조절할 수 있는 스크린으로, 이 스크린을 통과한 단일 광자의 공간적 분포의 크기와 위상을 위치에 따라 변화시킬 수 있다.

위에서 소개한 것처럼 광자를 이용해 다차원 양자상태를 구현하는 방법에는 여러 가지가 있다. 또한, 위에서 살펴본 자유도들은 서로 무관하기 때문에 이들 중 두가지 이상을 섞어 더 높은 차원의 시스템을 구현하는 것도 가능하다. 큰 힐버트 공간을 차지하는 광자의 양자상태에 대한 연구는 양자물리분야의 기초연구를 광자를 이용하여 수행할 수 있게 하며 또 양자정보기술의 발전과 밀접한 관련을 가지고 있다 [15, 16]. 이러한 이유 때문에 다차원 양자상태가 가지는 고유의 특성을 파악하고 측정하기 위한 이론적 실험적 노력들이 최근 많이 진행되고 있다 [17, 18].

5. 결론

고전정보이론을 기반으로 하는 (고전)컴퓨터가 발명된 이후, 정보기술은 눈부시게 발전하여 현대 정보화 사회를 이루었지만, 고전물리학이 갖는 근본적인 한계점 또한 정보기술에서 서서히 나타나고 있다. 따라서 기존의 정보기술을 뛰어넘는, 양자물리에 기반을 둔 새로운 정보처리 패러다임인 양자정보기술의 필요성이 커지고 있다. 이 글에서는 광자 기반의 양자정보 연구의 한 방향에 대해 간략하게 기술하였다. 특히 단일 광자를 이용한 다차원/다입자 양자계를 구현하는 방법, 이러한 양자계를 이용한 양자정보의 기본단위를 구현하는 방법, 또 다차원/다입자 양자상태의 양자정보기술 응용가능성에 대해 간략하게 살펴보았다.

양자정보 분야의 전반적인 연구수준은 그 궁극적인 목표에 비교한다면 현재 걸음마 수준이라고 볼 수 있지만, 최근 연구를 통해 다입자/다차원 양자계 및 이를 이용한 양자정보 시스템에 대한 다양한 새로운 특성들을 밝혀내고 있다. 양자결맞음이 있는 다입자/다차원 양자계, 즉 큰 힐버트 공간을 활용하는 양자정보의 흥미로우면서 비직관적인 특성들은 향후 양자정보 응용기술의 실용화를 통해 우리 현실에서 더 이상 낮설지 않게 다가올 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] P. W. Shor, in Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (ed. Goldwasser, S.), 124–134 (IEEE Computer Society Press, 1994).
- [2] D. Deutsch and R. Jozsa, “Rapid solutions of problems by quantum computation”, Proceedings of the Royal Society of London A 439, 553 (1992).
- [3] L. K. Grover, “Quantum Mechanics Helps in Searching for a Needle in a Haystack”, Phys. Rev. Lett. 79, 325 (1997).
- [4] C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres, and W. K. Wootters, “Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein–Podolsky–Rosen channels.” Phys. Rev. Lett. 70, 1895 (1993).
- [5] Y.-H. Kim, S. P. Kulik, and Y. H. Shih, “Quantum teleportation of a polarization state with a complete Bell state measurement”, Phys. Rev. Lett. 86, 1370 (2001).
- [6] E. Knill, R. Laflamme, and G. J. Milburn, “A scheme for efficient quantum computation with linear optics”, Nature, 409, 46 (2001).

광자 기반의 양자정보 연구

- [7] C. Bennett and S. J. Wiesner, "Communication via one- and two-particle operators on Einstein-Podolsky-Rosen states", Phys. Rev. Lett. 69, 2881 (1992).
- [8] W. K. Wootters, and W. H. Zurek, "A single quantum cannot be cloned", Nature, 299, 802 (1982).
- [9] C. H. Bennett, and G. Brassard, in Proceedings of the IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing, Bangalore, India, 1984, 175-179, (IEEE, New York, 1984); IBM Tech. Discl. Bull. 28, 3153-3165 (1985)
- [10] N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, and H. Zbinden, "Quantum cryptography", Rev. Mod. Phys. 74, 145-195 (2002).
- [11] P. Walther, K. J. Resch, T. Rudolph, et. al., "Experimental one-way quantum computing", Nature, 434, 169 (2005).
- [12] L. K. Grover, "Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack", Phys. Rev. Lett., 79, 325 (1997).
- [13] M. W. Mitchell, J. S. Lundeen, and A. M. Steinberg, "Super-resolving phase measurements with a multiphoton entangled state", Nature, 429, 161 (2004).
- [14] A. N. Boto, P. Kok, D. S. Abrams, et. al., "Quantum interferometric optical lithography: exploiting entanglement to beat the diffraction limit", Phys. Rev. Lett. 85, 2733 (2000).
- [15] M. A. Solis-Prosser, A. Arias, J. J. M. Varga, et. al., "Preparing arbitrary pure states of spatial qudits with a single phase-only spatial light modulator" Opt. Lett. 38, 22, 4762-4765 (2013).
- [16] L. Neves, G. Lima, J. G. Aguirre Gomez, et. al., "Generation of Entangled States of Qudits using Twin Photons", Phys. Rev. Lett. 94, 100501 (2005).
- [17] P. Horodecki and A. Ekert, "Method for Direct Detection of Quantum Entanglement", Phys. Rev. Lett. 89, 127902 (2002).
- [18] H.-T. Lim, Y.-S. Kim, Y.-S. Ra, J. Bae, and Y.-H. Kim, "Experimental realization of an approximate transpose operation for qutrit systems using a structural physical approximation", Phys. Rev. A 86, 042334 (2012).

약력



임항택

2004년 포항공과대학교 물리학과에 입학하여 2008년 학사과정을 졸업하였고, 현재 동 대학원에서 석/박사 통합과정에 재학중이다. 현재 양자광학 연구실에서 광자기반 양자정보처리에 대한 연구를 수행중이다.



라영식

2004년 포항공과대학교 물리학과에 입학하여 2008년 학사과정을 졸업하였고, 현재 동 대학원에서 석/박사 통합과정에 재학중이다. 현재 양자광학 연구실에서 다광자 양자간섭현상에 관한 연구를 수행중이다.



홍강희

2008년 포항공과대학교 물리학과에 입학하여 2012년 학사과정을 졸업하였고, 현재 동 대학원에서 석/박사 통합과정에 재학중이다. 현재 양자광학 연구실에서 다차원 양자정보 구현에 관한 연구를 수행중이다.



송영선

2008년 포항공과대학교 물리학과에 입학하여 2012년 학사과정을 졸업하였고, 현재 동 대학원에서 석/박사 통합과정에 재학중이다. 현재 양자광학 연구실에서 양자편광 및 양자간섭 현상에 관한 연구를 수행중이다.



김윤호

김윤호 교수는 University of Maryland, Baltimore County(UMBC)에서 양자광학 실험으로 박사 학위(2001년)를 취득하였다. 이후 Oak Ridge National Laboratory에서 Eugene P. Wigner Fellow로 있었으며 2004년부터 포항공과대학교 물리학과에 재직중이다.