특집 ■ 양자정보

이온트랩 시스템을 이용한 양자정보처리

김태현*

1. 서론

1952년에 E. Schrödinger는 1935년에 자신의 사고실험에서 제안한 Schrödinger의 고양이를 비롯하여 양자역학을 거시 세계로 확장했을 때 생기는 모순들을 다음과 같은 방식으로 설명하였다.

"... we never experiment with just one electron or atom or (small) molecule. In thought experiments, we sometimes assume that we do; this invariably entails ridiculous consequences ..." [1]

하지만 1964년에 J. S. Bell은 단일 입자를 이용하여 양자 얽힘 현상을 실험적으로 검증할 수 있는 방법을 제안하였고 [2], 과학기술은 20세기 중반에 불가능하다고 단정했었던 단일 입자를 이용하여 실험하는 수준까지 발전하여 양자 얽힘 등의 양자 현상의 단순한 검증뿐만 아니라 적극적으로 활용하는 방법들을 고민하기 시작했다. 이러한 고민은 결국 1984년에 C. Bennett과 G. Brassard가 양자 암호키 분배 (QKD: Quantum Key Distribution) 프로토콜을 제안함으로써 [3] 양자역학만의 특징인 불확정성의 원리를 활용할 경우 기존 IT분야에서 고민해 오던 문제를 해결할 수 있다는 것을 보이게 되었고, 1994년에 P. Shor는 양자 중첩의 원리를 최대로 활용한 효율적인 소인수분해 알고리즘을 제안함으로써[4] 양자정보 분야의 중요성이 다시 한번 주목 받게 되었다.

이온트랩 기술은 앞에서 인용한 E. Schrödinger의 설명에서 불가능하다고 한 대표적인 시스템 중 하나로서 이온트랩은 우리가 원하는 정확한 개수의 이온을 장시간 유지할 수 있다는 장점이 있다. 특히 대부분의 양자 역학 실험을 수행하기 위해서는 측정시 중첩된 양자 상태가 하나의 상태로 붕괴되는 양자 역학의 특징적인 현상 때문에 양자 상태를 측정하기 위해서 반복적인 실험을 통해서 확률 분포를 얻어야 하는데, 다른 종류의 기술들은 대부분 새로운 입자 또는 광자를 이용해서 실험을 해야 하지만, 이온트랩의 경우 한번 포획된 입자를 한 장소에 장시간 유지할 수가 있어서 같은 입자를 가지고 반복실험이 가능하다. 경우에 따라서는 몇 달씩 같은 이온으로 실험한 경우도 있고, 필자의 실험실에서도 같은 입자를 하루 이상 유지하는 것은 그리 어려운 일은 아니다. 또한 이온들은 서로 척력에 의해 어느 정도의 간격을 유지하기 때문에 현미경과 유사한 광학계를 이용하여 입자의 개수와 위치를 확인 가능하므로 시스템에 대한 직관적인 이해가 쉽고 진공 중에 전기장으로만 이온을 포획하여 주변환경과의

* SK텔레콤 Quantum Tech. Lab

상호작용이 거의 없으며, 이온내의 전자의 상태는 레이저나 마이크로파 등으로 제어할 수 있다. 많은 양자역학의 이론들은 이상적인 환경을 가정하고 유도되는데 비해 대부분의 양자 역학 실험들은 주변 환경들의 지속적인 영향을 받으므로 이론을 실험으로 구현할 때나 그 결과를 해석할 때 복잡한 변환 과정을 거쳐야 하지만, 앞에서 설명한 특징들 덕분에 이온트랩은 많은 이론들을 직관적으로 적용하여 실험이 가능하기 때문에 양자역학을 처음 접하여 받아들이기 힘들어하는 학생들에게 양자 역학을 직관적으로 경험할 수 있는 좋은 실험용 장치로도 활용이 가능할 것으로 생각된다.

본 고에서는 이온트랩의 원리와 이를 이용한 양자정보 실험을 어떤 식으로 수행할 수 있는지에 대해 소개하고자 한다.

2. 이온트랩의 원리

이온 트랩은 전하를 띈 입자를 전자기장만을 이용하여 3차원 공간에 포획하는 장치인데, 간단히 생각하면 정전기장(static electric field)만으로도 가능할 것처럼 보이지만, 맥스웰방정식 $\nabla \cdot \nabla\varphi=0$ 을 만족하는 정전기장은 공간상에서 포텐셜의 최저점을 가질 수 없다는 한계 때문에 진동하는 전기장이나 자기장을 추가로 활용한다. 본 고에서는 진동하는 전기장을 이용하는 폴트랩(Paul trap)에 대해서만 논의할 예정이다.

폴트랩은 그림 1 (a)와 같이 네 개의 전극 중 두 개의 전극을 접지시키고, 나머지 두 개의 전극에 사인파의 전압을 걸어주면 사인파의 주기 및 진폭, 전극의 모양 및 위치에 따라 전하량 대 질량비가 만족해야 하는 범위가 결정되고 이를 만족하는 입자는 전기장이 0이 되는 지점에서 평균적인 포텐셜이 최저가 되어 전하를 띈 입자가 포획되는 원리를 이용한다. 그림 1 (a)의 경우는 RF전극에 (+)전압이 걸렸을 때 전기장의 방향을 나타내며 (−)전압이 되었을 때는 전기장의 방향은 반대가 되지만 전기장의 분포는 바뀌지 않으므로 전기장이 0이 되는 지점은 RF전압의 부호에 관계없이 일정하다. [5]

이 원리를 이용하여 그림 1 (a)의 전극을 z축으로 연장을 시키면 그림 1 (b)와 같이 4개 전극봉 구조가 되고, 평균적인 포텐셜의 최저점은 4개 전극봉의 중심을 따라 형성되어 전하를 띈 입자가 방사 방향으로는 갇힌 구조가 되며, 여기에 초록색 전극에 (+)의 DC전압을 가하면 축 방향으로도 갇힌 구조가 되어 여러 개의 이온들을 동시에 포획할 수 있게 된다. 따라서 이러한 구조의 폴트랩을 선형 트랩이라 부른다.

그림 1 (c)는 그림 1 (a)의 구조를 y축을 중심으로 회전시켰다고 상상할 수 있으며 이 경우는 그림 1 (c)와 같이 3차원 공간의 중심점이 평균적인 포텐셜의 최저점이 되고, 고리 트랩 (ring trap) 또는 점 트랩 (point trap)이라고 불리기도 한다. 이 경우는 선형 트랩에 비해 추가적인 DC전극이 없어도 된다는 장점이 있으나, 하나 이상의 입자를 포획하려고 할 경우 전기장이 0이 되는 지점은 공간상의 한 점밖에 없으므로 나머지 입자들은 micromotion이라는 현상을 겪게 되어 하나 이상의 입자를 포획해야 하는 상황에서는 불리하다. 하지만, 양자정보 응용에서는 2차원 격자에 여러 개의 점트랩을 배치하여 많은 수의 이온을 포획하는 구조도 제안되었다.

포텐셜에 갇힌 모든 종류의 입자의 운동은 단순 조화진동자 (simple harmonic oscillator)로 근사가 가능하고, 이 경우 입자의 운동은 양자화되어 진동에 의한 포논(phonon)으로 해석 가능한 것은 양자역학의

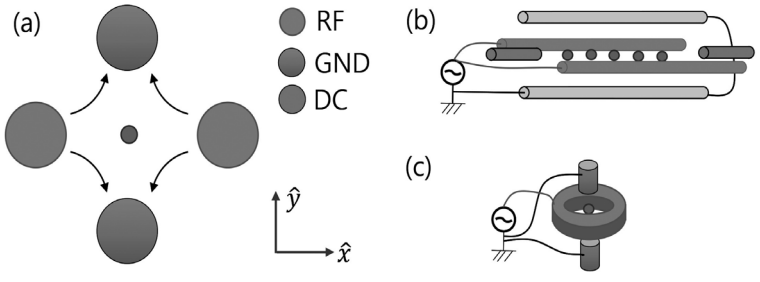

그림 1. 이온트랩의 전하를 띈 입자의 포획 원리 [5]. (a) 4극자 전극 구조 중 2개의 전극에 같은 세기의 (+)전압을 인가시 전기장의 방향. 전극의 대칭구조에 의해 중심점의 전기장의 세기는 전압의 부호에 관계없이 0이 되며 전하를 띈 입자가 느끼는 평균적인 포텐셜은 전기장이 항상 0인 지점에서 최저가 됨. (b) 4극자 전극 구조를 z축 방향으로 연장시킨 구조. (c) 4극자 구조를 y축을 중심으로 회전시킨 것과 유사한 구조.

잘 알려진 사실이다. 이온트랩은 원칙적으로 위에 설명된 전기장의 형성만으로 이온의 장시간 포획이 가능하므로 이온내의 전자의 양자 상태만 이용할 경우 입자의 외부상태를 제어할 필요가 없지만, 양자 논리 회로의 구현을 위해서는 포논을 이용하는 경우가 많기 때문에 대부분의 실험들은 이온의 외부상태도 제어를 한다. 이것은 얼핏 듣기에는 다른 양자 실험들에 비해 복잡한 것으로 보일 수도 있지만, 반대로 생각하면 다른 양자 실험들에 비해 훨씬 더 정밀한 제어가 가능하다는 것을 의미한다. 따라서 포논의 개수도 제어 가능한 숫자로 만들기 위해 레이저를 이용한 도플러 냉각을 시키고, 뒤에서 설명할 양자 게이트 방식 중 Cirac-Zoller 게이트를 구현할 때는 sideband cooling을 이용하여 포논의 개수를 하나씩 줄여서 포논의 개수가 0인 상태를 만들기도 한다.

3. 이온트랩의 양자정보 응용

양자정보처리를 구현하기 위해서는 이온화되었을 때 최외각 궤도에 전자가 하나뿐인 원소를 선택하고, 포획된 이온의 최외각 전자가 가질 수 있는 여러 가지 양자 상태 중 두 개의 양자 상태를 $|0\rangle$과 $|1\rangle$로 정의하여 양자 정보의 기본 단위인 큐빗(qubit: quantum bit)을 저장하는데 사용한다. 이온트랩에서는 그림 2에 설명한 것과 같은 초미세큐빗 (hyperfine qubit)과 광큐빗(optical qubit) 을 주로 사용한다[6].

초미세큐빗은 그림 2 (a)와 같이 원자의 초미세상태를 큐빗으로 이용하는 것으로 두 상태 모두 바닥상태에 있으므로 큐빗이 자발방출에 의해 상태가 변하는 경우가 거의 없다는 장점이 있으나 $|0\rangle$과 $|1\rangle$ 상태간의 Rabi 진동을 구현하기 위해서는 Raman 전이를 이용해야 한다는 단점이 있다. 양자 정보 처리에서는 연산 결과의 $|0\rangle$과 $|1\rangle$상태를 구분하는 것이 중요한데 예를 들어 $^{171}Yb^{+}$같은 초미세큐빗은 선택규칙에 의해 그림 2 (a)의 녹색 점선으로 표시된 전이만이 허용된다는 점을 이용하여 파란색 화살표에 해당하는 주파수를 가진 레이저를 조사할 경우 $|1\rangle$상태의 경우에만 형광의 관측이 가능하고, $|0\rangle$상태의 경우 공진조건이 맞지 않아 형광이 발생하지 않는다는 점을 이용하여 구별 가능하다.

그림 2 (b)와 같은 수명이 긴 들뜬 상태를 $|1\rangle$로 사용하는 광큐빗의 경우는 상태 측정시 오류가 발생할 확률이 작다는 장점이 있지만, 선폭이 상당히 작은 레이저를 사용해야 한다는 단점이 있다. $^{40}Ca^{+}$으로 대표되는 광큐빗의 경우에는 $|0\rangle$과 $|1\rangle$상태의 구분을 위해 397nm 레이저와 866nm 레이저를 동시에 조사해 주면 바닥상태($|0\rangle$)에 있을 때는 계속해서 형광이 나옴에 비해 이미 $|1\rangle$큐빗에 해당하는 상태에 있을 경우는 공진조건이 안 맞아 형광이 관측되지 않는다는 점을 이용한다.

전자회로에서는 AND, OR, NOT과 같은 기본 게이트만 구현할 수 있으면 아무리 복잡한 임의의 전자회로 역시 이들 기본 게이트를 조합하여 구현할 수 있듯이 양자회로에서도 기본 게이트만 구현할 수 있으면 전체 회로는 이들의 조합으로 구성이 가능하다. 이러한 기본 게이트 중 하나는 전자회로의 NOT게이트처럼 하나의 큐빗의 상태만을 바꾸는 단일 큐빗 게이트(single qubit gate)이다. 단일 큐빗 게이트는 $|0\rangle$과 $|1\rangle$ 상태간의 에너지 차이와 일치하는 전자기파를 이용하면 공진에 의해 발생하는 Rabi진동의 양과 위상을 제어하여 구현이 가능하다. 따라서 초미세큐빗의 경우는 Raman전이에 사용되는 두 레이저의 주파수 차이가 에너지 차이에 일치하도록 제어하는 반면 광큐빗은 레이저의 주파수가 $|0\rangle$과 $|1\rangle$의 에너지 차이와 일치하도록 유지해야 한다. 또 다른 기본 게이트는

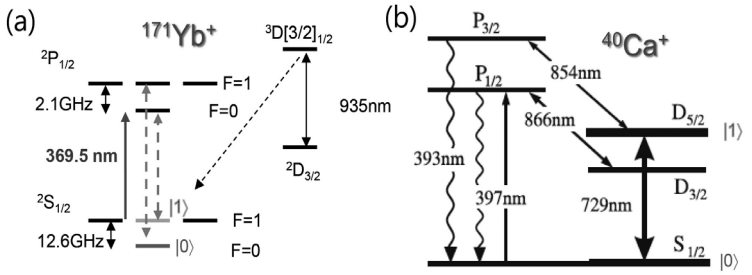

그림 2. 큐빗의 상태의 정의 [6]. (a) $^{171}Yb^{+}$이온의 초미세큐빗. (b) $^{40}Ca^{+}$이온의 광큐빗.

전자회로의 AND나 OR게이트처럼 두개의 큐빗의 상태의 조합에 따라 게이트의 결과값이 바뀌는 쌍큐빗 게이트(two qubit gate)이다. 쌍큐빗 게이트에도 몇가지 종류가 있으나 AND와 NOT을 조합해서 OR를 구현할 수 있고, 반대로 OR와 NOT으로 AND를 구현할 수도 있듯이 양자회로에서도 한가지 종류의 쌍큐빗 게이트만 구현할 수 있으면 다른 종류의 쌍큐빗 게이트는 단일 큐빗 게이트와 쌍큐빗 게이트로 구현이 가능하다. 이온트랩에서 주로 구현하는 가장 기본 쌍큐빗 게이트는 CZ게이트 (Controlled-Z gate) 또는 CPhase 게이트(Controlled-Phase gate)라 불리는 게이트로, 두 개의 큐빗이 모두 |1⟩인 경우에만 입력 상태의 위상이 180도 바뀌는 연산을 수행한다. 이를 단일 큐빗 게이트와 조합을 하면 일반적으로 많이 사용하는 CNOT 게이트(Controlled-NOT gate)를 구현할 수 있게 된다. 쌍큐빗 게이트는 몇가지 방법으로 구현이 가능한데 이중 가장 직관적으로 이해하기 쉬운 것이 J. I. Cirac과 P. Zoller가 제안한 방법이다 [7]. 이 방법은 앞에서 설명한 포논이 여러 개의 이온들 사이에 동시에 공유된다는 사실을 이용하여 일종의 정보를 실어 보내는 버스로 이용한다. 만약 포논의 개수가 0개로 초기화되어 있으면 |g⟩과 |e⟩ 사이의 주파수 차이를 ω_0, 포논의 주파수를 ω_p로 표시할 때 $\omega_0-\omega_p$의 주파수를 가진 레이저로 Rabi진동을 시키면 전자의 상태 뿐만 아니라 포논의 개수도 변하는 과정을 활용하면 이온과 포논간의 큐빗정보의 전달이 가능하고 이를 활용하면 여러 개의 이온들 중 임의의 두 개 이온간의 CZ게이트의 구현이 가능해진다. 좀 더 구체적으로 설명하면 그림 3 (a)와 같이 우리가 사용하고자 하는 이온이 큐빗정보를 저장할 바닥상태 |g⟩와 여기상태 |e⟩ 외에도 보조상태 |a⟩가 있다고 가정하고, (b)와 같이 여러 개의 이온이 동시에 포획되어 있고 이 중에서 m번째와 n번째 이온간 CZ게이트를 구현한다고 가정해 보자. 이 경우 (b)와 같이 m번째 이온에 앞에서 언급한 $\omega_0-\omega_p$레이저를 조사하면 m번째 이온의 전자의 상태에 따라 포논이 증가하기도 하고, 증가하지 않을 수도 있다. 이것은 그림 3 (c)를 보면 이해하기가 쉬운데, |e, n⟩은 이온의 전자가 여기상태에 있을 때 포논의 개수가 n개임을 나타내며 마찬가지로 |g, n⟩는 이온의 전자가 바닥상태에 있으면서 포논의 개수가 n개임을 나타낸다. 이 경우 포논의 개수에 따라 전체 에너지가 달라지므로 그림 3 (c)와 같이 4개의 조합이 서로 에너지가 다른 상태로 나타나게 되고, $\omega_0-\omega_p$ 레이저에 의해 |e, 0⟩ 상태가 |g, 1⟩ 상태로 변하게 된다. 이에 비해 |g, 0⟩ 상태는 레이저의 주파수와 공진을 일으킬 수 있는 다른 양자상태가 없으므로 변하지 않고 결국 이 과정을 거치면 m번째 이온의 초기의 내부 상태와 상관없이 m번째 이온의 전자 상태는 바닥상태 |g⟩가 되고 초기에 이온에 저장되어 있었던 양자 정보는 포논의 개수로 전달된다. 이제 그림 3 (d)와 같이 n번째 이온에 보조상태 |a⟩와의 주파수 차이 ω_a 보다 포논의 주파수만큼 낮은 $\omega_a-\omega_p$의 주파수를 가진 레이저를 쏘아주면 그림 3 (e)와 같이 n번째 이온이 바닥상태에 있고 동시에 포논의 개수가 1개일 경우 (|g, 1⟩)에만 Rabi공진이 가능하고, 나머지 3가지 조합의 경우에는 해당하는 에너지 상태가 없어서 공진이 안 일어나게 된다. Rabi공진의 특징 상 2π-펄스를 경험한 양자 상태는 추가적인 180도 위상을 얻게 되는 반면 Rabi공진을 겪지 못한 양자 상태들은 위상 변화가 없게

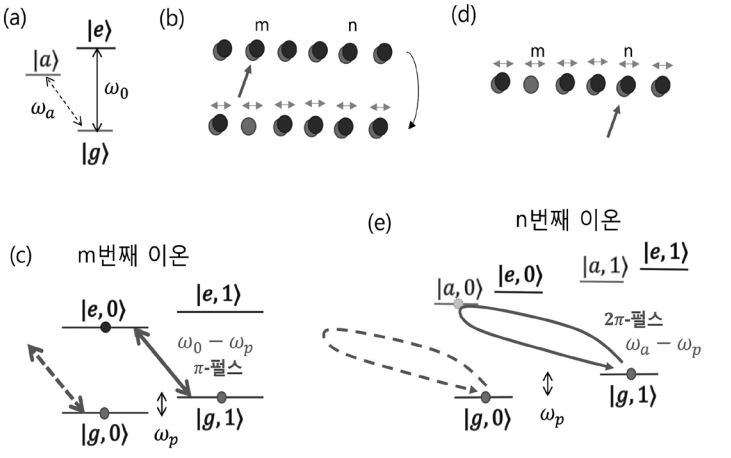

그림 3. CZ게이트의 원리 설명. (a) 이온내의 에너지 준위에 대한 가정. (b) 여러 개의 이온 중 m번째 이온에 레이저를 조사하여 m번째 이온의 상태에 따라 포논이 증가하는 모습. (c) m번째 이온에 레이저를 조사했을 때 가능한 전이. (d) n번째 이온에만 레이저를 조사하는 과정. (e) |g, 1⟩상태만 Rabi진동을 겪는 과정 설명.

이온트랩 시스템을 이용한 양자정보처리

되어 |g, 1⟩상태에만 차별적인 위상이 부여된다. 이 과정 후에 다시 그림 3 (b)와 같이 m번째 이온에 레이저를 조사하면 이번에는 포논의 개수에 따라 m번째 이온의 상태가 원래의 상태로 복원이 된다. 이 복원과정에서 추가적인 조건부 위상의 변화가 수반되어 궁극적으로는 두 이온 모두가 들뜬 상태일때만 위상이 180도 바뀐 결론을 얻게 되어 CZ게이트가 완성이 된다.

Cirac-Zoller 게이트는 실제 실험으로 구현은 되었으나 포논의 상태가 바닥상태인 것을 요구하기 때문에 실험이 쉽지 않아 최근에는 포논의 결맞은 상태(cohrerent state)를 위상 공간에서 조건부로 이동을 시키는 과정에서 얻게 되는 위상을 이용하는 Mølmer-Sørensen 게이트를 많이 이용하나 Cirac-Zoller 게이트에 비해 설명이 복잡하여 본고에서는 생략하도록 한다.

쌍큐빗 게이트는 같은 선형트랩내에 동시에 포획된 이온들간의 포논을 이용하기 때문에 선형트랩내에 동시에 포획 가능한 이온의 개수가 큐빗의 개수를 늘리는데 제약을 가한다. 이를 극복하기 위하여 2012년 노벨상 수상자인 D. Wineland박사가 이끄는 미국 NIST그룹에서는 하나의 이온트랩칩 내에 여러 개의 포획 가능한 구역을 나누고 이들 구역간에 이온을 옮기는 방법을 제안하였고 [9], 이를 위하여 전세계적으로는 몇 개의 연구팀이 수십 개의 전극을 가지는 이온 트랩 칩을 MEMS기술을 이용하여 개발 중이다. 필자의 연구팀은 지난 2년동안 서울대 전기·정보공학부 NML랩과 공동 연구를 통하여 국내 순수 기술로 그림 4와 같은 구조를 가진 이온 트랩 칩을 성공적으로 개발하여 현재 실험에서 사용 중이다. 현재 개발된 칩은 40여개의 독립적인 DC전극과 두개의 RF전극 및 접지 전극으로 구성되어 그림 1 (b)에서 설명한 기본적인 선형트랩의 기능 이외에 여러 장소에 이온을 포획하거나 이들의 위치를 제어할 수 있도록 설계되었다. 그림 5는 필자의 연구팀에서 실제로 이온을 포획한 모습으로 그림 5 (a)는 전체 칩상에서 6개의 이온이 차지하는 크기를 보여준다. 그림 5 (b)는 5개의 이온들이 일렬로 정렬된 모습을 보여주고, 그림 5 (c)는 이온트랩칩의 목적인 이온의 짧은 거리의 이동이 가능하다는 것을 보여준다. 현재 칩의 설계는 훨씬 더 먼거리까지 이동시킬 수 있는 구조로 현재 시험중에 있다. 그림 5 (d)는 5개의 이온 중 한 개가 형광이 나오지 않는 상태로 전이된 것으로 앞에서 설명한 양자 상태의 측정은 이와 유사한 원리를 이용한다.

이온트랩 기반 양자정보 처리의 중요한 결과 중 하나는 포획된 양자메모리(이온)간의 양자 얽힘 상태를 생성할 수 있고 양자 얽힘의 생성 여부를 정확히 판단할 수 있다는 점이다 [10]. 그림 6과 같이 원거리에 떨어진

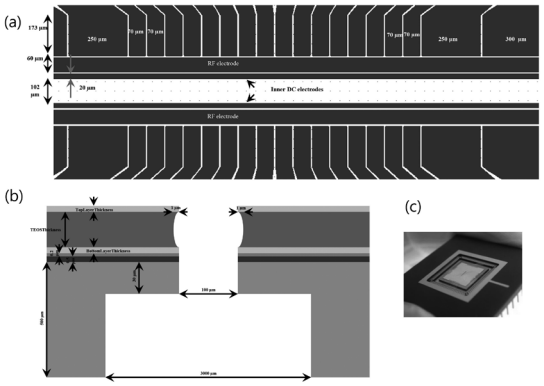

그림 4. 국내 MEMS기술로 제작된 이온 트랩 칩. (a) 이온 트랩 전극 구조 (b) 이온 트랩 칩의 단면도, (c) 제작된 칩의 사진.

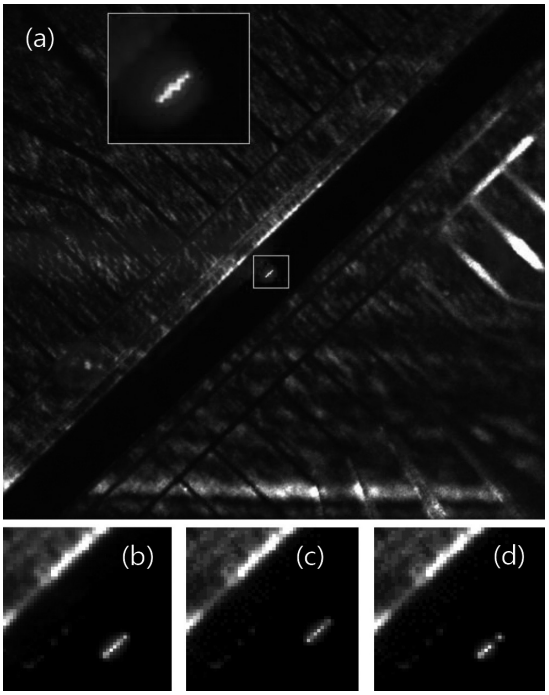

그림 5. 필자의 연구실에서 이온 트랩 칩 상에 포획한 다수의 이온의 모습. (a) 6개의 이온이 포획된 후 buckling이 일어난 모습, (b) 5개의 이온이 중앙에 포획된 모습. (c) 약 11um정도 이온의 위치를 이동시킨 모습. (d) 위에서 두번째 이온이 형광이 나오지 않는 상태로 전이된 모습.

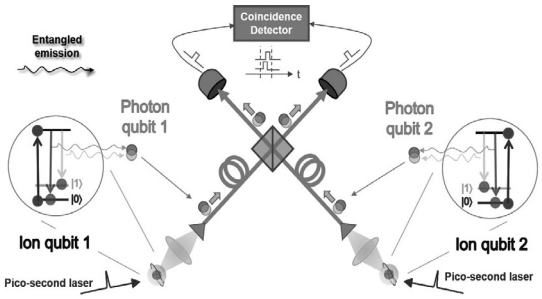

그림 6. 이온트랩을 이용하여 양자 얽힘을 생성하는 과정 [10]

두 개의 개별적인 이온들 각각에 피코초 레이저를 조사하여 그림에 보인 것처럼 이온들에서 광자를 발생시킨다. 이때 큐빗으로 사용하는 두 양자상태의 에너지 차이 때문에 방출되는 광자는 다른 두 개의 주파수를 가질 확률이 존재하고, 이것은 이온에 남아있는 양자상태와 얽힘 상태를 생성하게 된다. 이렇게 방출된 두개의 광자는 중간지점에서 만나게 되고 이 두 개의 광자들을 50:50 광선분할기를 이용해 간섭을 시키면 광자 두 개가 광선분할기의 다른 출력으로 나갈 때 양자 얽힘 교환 (entanglement swapping)이 이루어져서 남아있는 이온들간의 얽힘이 형성되게 된다. 이것은 QKD를 확장할 때 중요한 양자중계기를 구현하는데 필수적인 요소이다.

4. 결론

현재 양자정보처리를 구현하기 위하여 광자, 중성원자, 이온, 초전도체, 양자점, NMR 등 양자현상을 보일 수 있는 다양한 시스템들이 사용 중이다. 각각의 시스템은 그 나름대로의 장단점을 가지고 있어서 궁극적으로는 이들 시스템 중 몇 개가 살아남고 그 시스템들간의 장점들이 상호보완적으로 사용될 것이라고 전망되는데 이러한 측면에서 이온트랩은 양자정보처리에 필요한 많은 기능들이 구현이 되어 있어서 당분간은 유리한 위치를 차지할 것으로 보인다. 또한 한동안 이온트랩의 최대 단점으로 지적되었던 부분은 실험이 복잡하여 초기 실험 구성에 시간이 많이 걸린다는 점이었으나, 국내 인프라도 전무한 상황에서 대부분 비전문가로 구성된 필자의 연구팀에서도 소수의 인원으로 1년반 정도 만에 실험에 성공하였다는 점을 볼 때 실험의 복잡도는 더 이상 단점으로 보이지는 않는다.

본 고에서는 주로 이온트랩의 양자정보적인 측면만을 논의했으나 이온트랩은 질량분석기나 광시계 등에서도 매우 뛰어난 성능을 보이고 있어 해외에서는 많은 연구가 진행되고 있으나, 국내에서는 아직도 연구 활동이 그리 많지 않아 좀더 많은 관심이 필요한 실정이다.

참고문헌

[1] E. Schr¨dinger, "Are There Quantum Jumps?," British Journal for the Philosophy of Science 3, 233 (1952).
[2] J. S. Bell, "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox," Physics 1, 195 (1964).
[3] C. H. Bennett and G. Brassard. "Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing," Proc. of IEEE Int. Conf. on Computers, Systems and Signal Processing, Bangalore India, 175, 8 (1984).
[4] P. Shor, "Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring," Proc. of 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Santa Fe, NM, 124 (1994).
[5] D. Leibfried, R. Blatt, C. Monroe, and D. Wineland, "Quantum dynamics of single trapped ions," Rev. of Mod. Phys. 75, 281 (2003).
[6] S. Olmschenk et al., "Manipulation and detection of a trapped Yb+ hyperfine qubit," Phys. Rev. A 76, 052314 (2007); F. Schmidt-Kaler et al., "How to realize a universal quantum gate with trapped ions," Appl. Phys. B 77, 789 (2003).
[7] J. I. Cirac and P. Zoller, "Quantum Computation with Cold Trapped Ions," Phys. Rev. Lett. 74, 4091 (1995).
[8] A. Sørensen and K. Mølmer, "Quantum computation with ions in thermal motion," Phys. Rev. Lett. 82, 1971 (1999).
[9] D. Kielspinski, C. Monroe, and D. J. Wineland, "Architecture for a large-scale ion-trap quantum computer," Nature 417, 709 (2002).
[10] S. Olmschenk et al., "Quantum Teleportation Between Distant Matter Qubits," Science 323, 486 (2009).

약 력

김태현

- 2011년 9월 – 현재
  SK텔레콤 Quantum Tech. Lab – 이온트랩기반 양자중계기 개발
- 2008년 6월 – 2011년 8월
  Duke대학 전기컴퓨터공학과 박사후 연구원 – 이온트랩기반 양자중계기 연구
- 2000년9월 – 2008년5월
  Massachusetts Institute of Technology 물리학과 박사 – 입자물리 및 양자광학 전공
- 1997년3월 – 2000년6월
  공군사관학교 전산통계학과 강사 / 전임강사
- 1995년3월 – 1997년2월
  서울대학교 제어계측공학과 석사 – MEMS전공
- 1991년3월 – 1995년 2월
  서울대학교 컴퓨터공학과 학사