단일 이온: 개별적 이온의 포획과 정밀 측정

2012년 노벨 물리학상: 데이비드 와인랜드 박사

DOI: 10.3938/PhiT.21.050

김 기 환

Physics Nobel Prize in 2012: Dr. David Wineland

Kihwan KIM

In this article, I introduce Dr. David Wineland who, along with Prof. Serge Haroche, won this year's Nobel Prize. Dr. David Wineland received the Prize for ground-breaking experimental methods that enabled the measurement and the manipulation of individual quantum systems, especially systems with trapped ions. Dr. David Wineland improved a trapped ion system and opened a new quantum world that will eventually lead to quantum computation. He also realized optical atomic ion clocks with unprecedented precision through his experimental research. I briefly review the history of trapped ion systems, the development of trapped-ion-based quantum computation, and the development of the atomic ion clock, which are mainly related to Dr. Wineland achievements.

서 론

이온 포획장치를 다루는 사람 중에서 데이비드 와인랜드(Dr. David Wineland, National Institute of Standards and Technology) 박사의 노벨상 수상을 기대하지 않은 사람은 없을 것이다. 내가 와인랜드 박사와 가장 절친한 사람 중 하나인 몬로(Prof. Chris Monroe, University of Maryland)

저자약력

김기환 교수는 서울대학교 물리학과에서 학부, 석사, 박사과정을 마쳤다. 이후 오스트리아 인스브르크와 메릴랜드 대학에서 박사후 연수과정을 하고 2011년부터 칭화대학교 교차산학연구원(清华大学交叉信息研究院, Institute for Interdisciplinary Information Sciences, Tsinghua University)에 물리학전공 교수로 있다. 현재 이온포획장치를 이용한 양자 컴퓨터를 실현하는 연구를 하고 있다. (kimkihwan@mail.tsinghua.edu.cn)

교수에게 와인랜드 박사의 노벨상 수상 여부에 대해서 물어 볼 때면 “우리는 항상 기다리지(We are always waiting for it)” 하며 대답하곤 했다. 와인랜드 박사는 중성원자에서 레이저를 이용한 냉각이 실현되기 훨씬 전에 전하를 띤 원자, 이온을 레이저로 냉각했다. 이온 냉각은 전하를 가지고 있다는 것 이외에는 원리가 중성원자와 전혀 차이가 없기 때문에 그 공로로 1997년 스티븐 추(Prof. Steven Chu) 교수, 윌리엄 필립스(Dr. William Phillips) 박사, 그리고 코헨 타누치(Prof. Cohen Tanuji) 교수에게 노벨상이 수여될 때, 와인랜드 박사가 제외된 것에 대해서 공정하지 않았다고 생각했던 사람들이 많이 있었다. 사실 와인랜드 박사는 명예나 수상에는 별로 관심이 없어 보이는 과학자이다. 이삼십 년에 걸쳐 수많은 경이로운 업적을 이뤘지만 나는 한 번도 그가 그의 놀라운 결과들을 흥분해서 발표하는 것을 본 적이 없다. 그는 언제나 담담히 실험결과들을 기술할 따름이었다. 그가 드디어 “개별적인 양자 시스템을 측정하거나 조작할 수 있도록 하는 획기적인 실험 방법들의 발명 및 발견(for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems)” 공헌으로 하로쉬(Prof. Serge Haroche) 교수와 함께 노벨상을 수상했다.

노벨상위원회는 하로쉬 교수와 와인랜드 박사의 수상 이유를 “Advanced Information”^[1]에서 좀 더 자세히 설명하고 있다. 와인랜드 박사에 관한 설명을 간단히 살펴보면 폴(Prof. Wolfgang Paul, 1989년 노벨상 수상) 교수와 데멜트(Prof. Hans Dehmelt, 1989년 노벨상 수상) 교수부터 시작한 이온 포획장치를 발전시켜 원자를 개별적으로 포획하고 관찰할 수 있도록 발전시켰고, 다양한 양자 상태를 구현하여, 양자컴퓨터를 실현할 수 있는 근본적인 토대를 놓았고 현재까지 가장 정밀한 원자시계를 구현하였다. 어떤 면에서는 이 상은 그의

REFERENCES

- [1] Advanced Information at the website of http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2012/advanced.html.

Fig. 1. Dr. David Wineland at his lab. [실험실에 있는 데이비드 와인랜드 박사]

특정한 실험결과보다는 그가 한평생에 쌓아올린 전체적인 성과에 수여되었다고 말하는 것이 옳을 것이다.

이 글에서는 와인랜드 박사의 업적을 중심으로 이온 포획의 역사, 이온 양자 컴퓨터의 발달과 이온 원자 시계의 진보에 대해서 살펴보고, 끝으로 미래의 과제들을 점검하고 전망하도록 하겠다.

이온포획의 역사

정전기장만으로는 불가능한 이온 포획은 크게 두 가지 방법으로 가능하다. 하나는 폴 교수가 발전시킨 진동하는 전기장을 이용하는 폴 트랩(Paul Trap, Fig. 2(a))이고 다른 하나는 데멜트 교수가 개발한 자기장을 이용하는 페닝 트랩(Penning Trap, Fig. 2(b))이다. 생각해 보면 진동하는 전기장을 이용하거나 자기장을 이용하여 전하를 띤 입자를 포획하는 것은 간단한 아이디어지만 폴 교수와 데멜트 교수는 그 공로로 1989년에 노벨상을 수상했다. 데멜트 교수는 독일 괴팅겐에서 박사학위를 하는 동안에 폴 교수와 약간의 오버랩이 있었다. 당시 폴은 괴팅겐 대학의 강사였는데 데멜트는 폴이 담당하던 실험과목이 무척이나 재미있었다고 회상하고 있다.^[2]

이후 데멜트 교수는 미국으로 건너가 시애틀에 있는 워싱턴 대학(Univ. of Washington)에서 대부분의 생애를 보낸다. 와인랜드 박사는 워싱턴 대학에서 박사후연수 과정으로 데멜트 교수와 같이 이온포획장치를 발전시켰다. 그후 와인랜드 박사는 NIST(National Institute for Science and Technology)로 옮겼고 그곳에서 모든 원자, 분자를 통틀어 최초로 레이저를 이용한 입자 냉각에 성공한다.^[3] 와인랜드 박사는 원자 냉각을 구현하려고 할 때가 연구 인생에 있어서 가장 어려웠다고 내게 이야기해 준 적이 있다. 도플러 냉각에 성공한 이후로는 연구소에서 그가 무엇을 하든지 믿어주고 후원해주었다고 했다. 그의 공헌은 바로 원자 한 개를 포획하고 관찰

Fig. 2. (a) Paul Trap and (b) Penning Trap. For the Paul and Penning trap, oscillating electric field (rf) and magnetic field produce radial confinement, respectively. In both traps, static electric field generates axial confinement. [(a) 폴 트랩 (b) 페닝 트랩. 폴 트랩에서는 진동하는 전기장이, 페닝 트랩에서는 자기장이 가로 방향으로 이온을 가둔다. 두 경우 모두 정전기장으로 세로 방향 제약을 준다.]

하는 것으로 이어졌다.^[4]

단 한 개의 원자(a single atomic ion)를 포획하게 되면서 그것을 이용한 새로운 분광학의 세계가 열리게 되었다. 이후 와인랜드 그룹은 단원자 내부 상태들(internal states)을 측정 가능하게 한 양자점프(quantum jump) 현상을 관측했다.^[5] 곧이어 원자 내부 상태뿐 아니라 외부상태도 선풍이 좁은 레이저를 이용해 퍼텐셜의 가장 바닥 상태까지 냉각하게 되었다.^[6] 이온 포획장치는 개발 초기부터 원자들의 질량을 정밀하게 측정하거나 전자의 g-factor의 값을 정밀하게 얻는데 이용되었다. 이때 발전된 분광학 실험들, 특별히 양자점프 현상은 진동수 빗(frequency comb) 기술(2005년 노벨상 수상)과 함께 가장 정밀한 광 원자 시계(optical atomic clock)를 실현하

REFERENCES

- [2] Autobiography of Hans G. Dehmelt in http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1989/dehmelt.html.
- [3] D. J. Wineland, R. E. Drullinger and F. L. Walls, Phys. Rev. Lett. **40**, 1639 (1978).
- [4] W. Neuhauser, M. Hohenstatt, P. E. Toschek and H. Dehmelt, Phys. Rev. A **22**, 1137 (1980); D. J. Wineland and W. M. Itano, Phys. Lett. A **82**, 75 (1981).
- [5] W. Nagourney, J. Sandberg and H. Dehmelt, Phys. Rev. Lett. **56**, 2797 (1986); J. C. Bergquist, R. G. Hulet, W. M. Itano and D. J. Wineland, Phys. Rev. Lett. **57**, 1699 (1986).
- [6] F. Diedrich, J. C. Bergqvist, W. M. Itano and D. J. Wineland, Phys. Rev. Lett. **62**, 403 (1989); C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King, S. R. Jefferts, W. M. Itano, D. J. Wineland and P. Gould, Phys. Rev. Lett. **75**, 4011 (1995).

Fig. 3. Number of entangled qubits in trapped ion system vs. years. [시간의 변화에 따른 얽힘상태에 있는 이온큐비트 개수의 증가]

는 토대가 되었다. 그리고 원자 외부상태를 퍼텐셜의 바닥상태까지 냉각한 이후로 생각지 못한 양자 컴퓨터 어플리케이션이 생겼다. 와인랜드 박사는 양자 컴퓨터 아이디어가 나오면서 이온포획 실험은 매우 재미있어졌다고 이야기하곤 했다.

양자 컴퓨터와 와인랜드 박사

양자 컴퓨터에 대한 본격적인 관심은 쇼어(Prof. Peter Shor, MIT) 교수가 불가능한 것으로 알려진 매우 큰 수의 소 인수분해를 양자컴퓨터는 효과적으로 해결 가능하다는 것을 보이면서부터이다.^[7] 그러나 그 이전에도 양자화폐(quantum money)나 양자 시뮬레이션(quantum simulation)에 있어 양자 컴퓨터가 고전역학이 제공하는 것과는 다른 차원의 효용성이 있을 것이라는 제안은 계속 있어왔다. 최근에는 컴퓨터연산 복잡도 이론(Computational Complexity Theory) 체계가 무너지지 않기 위해서라도 양자컴퓨터는 일반적인 컴퓨터를 능가할 수밖에 없다는 것이 밝혀졌다.^[8] 양자컴퓨터가 고전컴퓨터보다 특정한 문제에 있어서는 탁월한 것은 분명하다. 그러나 그 한계가 어디까지인지는 아직까지도 명확히 밝혀져 있지 않은 열려진 문제이다. 이번 와인랜드 박사의 노벨상 수상은 그가 양자컴퓨터를 현실에서 구현하는 일을 시작했기 때문에 주어지기도 한 것이라고 할 수 있다.

현재까지는 이온포획 실험장치(Trapped ion system)가 여러 면에서 실제적인 양자컴퓨터의 실현에 가장 가깝다고 할 수 있다. 간단히 얽힘 상태를 생성할 수 있는 큐비트(qubit) 개수를 보면 이온포획은 14, 광자는 8, 초전도 시스템은 3이다.^[9] 그리고 저자가 알기로 오직 이온포획만 1만 개 이상의 큐비트를 다루는 컴퓨터에 대한 마스터플랜이 있다.^[10] 최근에는 양자컴퓨터로 할 수 있는 것을 다른 계산으로 할 수 없다면 우리는 그것을 실제적인 양자 컴퓨터라고 부를 수 있다고 생각한다. 그런 관점에서는 약 40-50개의 큐비트를 다룰

Fig. 4. Truth tables of (a) CNOT gate (b) Z gate. (c) Trapped ion realization of Z gate.

수 있는 시스템을 만드는 것이 관문이라고 생각된다. 그리고 그림 3에서 보듯이 그 실현은 멀지 않아 보인다.

그러한 일은 1995년 와인랜드 박사와 그 동료들로부터 시작되었다. 1995년에 줄러(Prof. Peter Zoller, Innsbruck) 교수와 시락(Ingusio Cirac, MPQ) 박사는 이온포획을 이용해서 CNOT 게이트를 제작할 수 있다는 제안을 했다.^[11] 같은 해 와인랜드 박사팀은 바로 이 제안이 실현 가능함을 실험적으로 보였다.^[12] 시락 교수와 줄러 교수의 CNOT 게이트는 다음과 같이 설명될 수 있다. CNOT 게이트는 2개의 큐비트와 관련된 것으로 그림 4(a)와 같은 진리표를 가진다. 잘 알려진 대로 CNOT 게이트와 단큐비트(single qubit) 게이트만 있으면 모든 양자 연산은 가능하다. CNOT 게이트뿐 아니라 Z 게이트도 그런 의미에서는 동일하게 보편적인(universal) 게이

REFERENCES

- [7] P. W. Shor, *Proc. 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science* (1994), p. 124.
- [8] S. Aaronson and A. Arkhipov, *Proceedings of ACM STOC* (2011), p. 333.
- [9] T. Monz, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 130506 (2011); X. -C. Yao, *et al.*, *Nature Photonics* **6**, 225 (2012); M. Neeley, *et al.*, *Nature* **467**, 570 (2010); M. D. Reed, *et al.*, *Nature* **482**, 382 (2012).
- [10] C. Monroe, R. Raussendorf, A. Ruthven, K. R. Brown, P. Maunz, L.-M. Duan and J. Kim, *ArXiv* 1208.1661 (2012).
- [11] J. I. Cirac and P. Zoller, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 4091 (1995).
- [12] C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King, W. M. Itano and D. J. Wineland, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 4714 (1995).

(a) 4 qubit entanglement

(b) Quantum CCD

Fig. 5. (a) Nature Cover for the demonstration of four-qubit entanglement. (b) Quantum CCD proposal to scale up the trapped ion quantum computation published in Nature [(a) 네 개의 큐비트 얽힘상태를 구현한 네이처 논문 표지. (b) 실제적인 이온 양자 컴퓨터를 실현할 수 있는 방법을 제시한 네이처 논문]

트이다 (단큐비트 게이트와 CNOT 게이트로 Z 게이트를 구현할 수 있고 그 반대로 가능하다).

이온의 두 내부 상태를 한 큐비트($|0_e\rangle, |1_e\rangle$)로 생각하고 외부상태인 조화진동자에 바닥상태($|0_m\rangle$)와 첫 번째 들뜬 상태($|1_m\rangle$)를 또 다른 큐비트로 생각하자. 이 두 개의 큐비트로 구성된 힐버트 공간(Hilbert Space)은 그림 4(c)와 같은 레벨 다이어그램으로 표현할 수 있다. 여기에서 핵심은 외부상태 $|0_m\rangle$ 은 바닥상태로 그 밑으로는 더 이상 상태가 존재하지 않는다는 것이다. Z 게이트를 만들기 위해서는 단지 $|1_e\rangle$ 내부상태만 연결되는 보조 내부 상태(Auxiliary electronic state)가 있어야 된다. 이제 레이저의 진동수를 잘 조절하여 $|1_e, 1_m\rangle$ 상태와 $|AUX, 0_m\rangle$ 상태 사이에 전이가 일어나도록 한다. 이 경우 그림 4(c)에서 볼 수 있듯이 단지 $|1_e, 1_m\rangle$ 상태만 $|AUX, 0_m\rangle$ 상태 사이에서 라비 진동(Rabi Oscillation)이 생기게 되고 다른 세 상태들은 이 레이저에 의해 아무 영향을 받지 않는다. 레이저를 보내는 시간을 적당히 조절하여 다시 $|1_e, 1_m\rangle$ 로 돌아오도록 하면 $|1_e, 1_m\rangle$ 상태만 -1의 위상을 갖게 되고 다른 세 상태는 그대로 존재하게 된다. 이것이 시락과 졸러 교수 아이디어의 핵심이다. 마지막으로 덧붙이자면 외부 진동 상태를 큐비트로 이용하는 큐비트의 개수를 증가시키는데 제약이 많기 때문에 외부 상태 대신 다른 이온의 내부 상태를 이용해야 한다. 그것은 단순히 한 원자의 내부상태 큐비트를 외부 상태 큐비트로 바꾸는 조작에 의해서 가능하다. 이온 포획장치에서 모든 이온들의 외부 상태는 공유되기 때문에 원리적으로는 이온 큐비트 개수에 관계 없이 이 방법을 이용해 아무 원자간에 CNOT가 가능하다. 두 개의 이온을 이용한 CNOT 게이트는 2003년에 인스부르크의 블랏(Prof. Rainer Blatt, Innsbruck University) 교수 그룹에서 실현했다.^[13]

그러나 시락과 졸러 교수가 제안한 게이트는 몇 가지 실험

Fig. 6. Developed technologies toward a large scale quantum computation with trapped ions. (a) Original Ion trap used in David Wineland's group. (b) Large scale surface trap that would contain more than 500 qubits. (c) Cryostat trapped ion system. (d) Stylus trap for the photonic connection between different traps. [실제적인 이온 양자 컴퓨터 개발을 위한 와인랜드 박사 그룹의 이온포획장치들 (a) 오랫동안 사용되었던 이온포획장치 (b) 500개 이상의 이온을 포획하기 위한 이온포획장치 (c) 저온이온 포획장치 (d) 광자 연결을 위한 이온 포획장치]

적 한계가 있어서 요즘에는 거의 이용되지 않는다. 이후에 뮐머(Prof. Klaus Mølmer, University of Aarhus)와 죄원젠(Prof. Anders S. Sørensen, The Niels Bohr Institute) 교수가 제안한 다른 개념의 게이트가 이온 포획 그룹에서 주로 사용되고 있다. MS 게이트라고 불리는 이 게이트는 이온의 외부 상태를 바닥상태까지 낮출 필요가 없고 이온에 정확하게 레이저빔이 보내지지 않아도 작동하는 등 실험기술상의 많은 제약들을 완화시켰다. 와인랜드 박사그룹에서는 이 게이트를 이용해 2000년에 4개의 큐비트(그림 5(a)), 2005년에 6개의 큐비트에 적용되는 게이트를 만들었다.^[14] 인스부르크에서 실현한 14큐비트 얽힘상태도^[9] 가장 에러가 작은 CNOT 게이트도^[15] 이 게이트의 원리를 이용한 것이다.

그러나 MS게이트가 장점이 있지만 큐비트의 개수를 증가시키기에 따라서 성능이 급격하게 감소한다. 이 게이트만으로는 이온 양자 컴퓨터에 큐비트 개수를 수십 개 이상으로 늘리는 것이 근본적으로 한계가 있다. 가장 큰 문제는 이러한 게이트는 단 한 개의 노말 모드를 이용하는데 큐비트 수가 늘어나

REFERENCES

- [13] F. Schmidt-Kaler, H. Haffner, M. Riebe, S. Gulde, G. P. T. Lancaster, T. Deuschle, C. Becher, C. F. Roos, J. Eschner and R. Blatt, *Nature* **422**, 408 (2003).
- [14] C. A. Sackett, *et al.*, *Nature* **404**, 256 (2000); D. Leibfried, *et al.*, *Nature* **438**, 639 (2005).
- [15] J. Benhelm, G. Kirchmair, C. F. Roos and R. Blatt, *Nature Physics* **4**, 463 (2008).

Fig. 7. Comparisons of uncertainties of atomic clocks among microwave Cs, optical neutral atoms and optical atomic ions (Courtesy of Till Rosenband). [마이크로웨이브 Cs 원자 시계, 광학 중성원자 시계, 광학 이온시계의 정밀도 비교]

게 되면 진동 모드 구조가 복잡해져서 게이트의 에러를 증가 시키게 된다. 이것을 극복하여 양자 컴퓨터의 실현을 위해 나온 것이 2002년에 와인랜드 박사 그룹에서 나온 quantum CCD 제안이다(그림 5(b)).^[16] 분명히 소규모의 이온들은 매우 정밀하게 다룰 수 있으므로 메모리 영역과 작동영역을 구별하여 전체적인 큐비트 개수를 늘리는 훌륭한 계획이었다. 그러나 실제 실현에서는 생각지 못했던 많은 난관들이 있었다. 와인랜드 박사 그룹은 10년 이상 이 제안을 실현하기 위해서 엄청난 에너지와 노력을 쏟아 부었으나 최근에야 조금씩 그 결과들이 발표되고 있다.^[17] 그러나 완전한 양자 컴퓨터의 실현을 위해서는 아직도 갈 길이 멀다. 이 글에 소개된 것 이외에도 와인랜드 박사 그룹은 이온 양자 컴퓨터의 실현을 위한 중요한 길목들을 개척했다. 와인랜드 박사의 홈페이지(<http://www.nist.gov/pml/div688/grp10/index.cfm>)에 가면 훨씬 더 많은 정보를 찾을 수 있다.

원자시계와 와인랜드 박사

양자 컴퓨터의 강력한 후보이기 이전에 이온 포획장치는 이미 세계에서 가장 정밀한 원자 시계의 플랫폼이고 그것은 와인랜드 박사의 연구를 통해서 이루어졌다. 현재는 세슘(Cs) 원자의 9 GHz 마이크로 웨이브 전이(microwave transition)가 세계의 표준 시간을 제공하고 있지만 광학적 전이(optical transition)를 이용한 원자시계(atomic clock)나 이온시계(atomic ion clock)의 측정 정밀도가 표준 원자시계를 넘어선 지는 오래 되었다. 차세대 표준이 광학적 전이를 이용한 이온이 될지 원자가 될지는 더 지켜보아야 할 일이지만 현재까지는 와인랜드 박사 그룹의 알루미늄 이온($^{27}\text{Al}^+$) 시계가 세계에서 가장

정밀한 측정에 성공하고 있다. 최근에 발표된 알루미늄 이온 시계의 정밀도는 10^{-17} 보다 작다.^[18] 정밀도 10^{-17} 시계는 우주가 생성된 이후 지금까지 약 5초 정도만 오차가 있을 정도로 정확하다. 그래서 이 시계가 얼마나 정확한지 알 수 있는 유일한 방법은 하나를 더 만들어서 비교하는 것뿐이다.^[18]

이러한 측정정밀도로 인해 최근에는 속도와 지면 높이에 따른 상대론 효과를 관측했다. 잘 알려진 대로 특수 상대성 효과로 움직이는 물체에서는 시간이 천천히 가게 되고 일반 상대성 효과로 가속도나 중력의 세기에 따라서 시간이 달라진다. 대략 10 m/s의 속도로 움직이게 되면 시간은 1×10^{-15} 정도의 비율로 천천히 가게 되고 지구에서 30 cm 정도 올라가면 중력이 달라져 0.5×10^{-16} 정도 시간이 변화하게 된다.^[19] 천체에서나 볼 수 있으리라 생각되었던 상대론 효과들을 와인랜드 박사 그룹의 시계 정밀도의 향상으로 인해 지구의 한 테이블에서 관측한 것이다. 아마도 우주의 알파 상수가 바뀌는지 여부를 결정짓는 것은 이온 시계가 될지도 모른다.

알루미늄 이온 시계는 특별하다. 최근의 요구되는 시계정밀도 수준에 가면 이전까지는 사소한 오차나 실험상의 문제가 크게 영향을 미치게 된다. 광학전이를 이용하는 시계의 경우 10^{-16} 정밀도 수준에서 가장 큰 불확실성은 블랙바디 레디에이션에 있다. 현재까지 알려진 원자 중에 가장 그 영향이 작은 것이 알루미늄 이온이다. 이 때문에 앞으로도 다른 광학 원자시계들은 알루미늄 시계의 성능을 넘어서기 쉽지 않다. 또한 알루미늄 이온은 다른 이온들에 비해 쿼드루폴 쉬프트(Quadrupole shift)가 없다는 큰 장점이 있다.

알루미늄 이온 시계를 실현하는 데 있어서 가장 큰 문제는 시계 전이(Clock transition)에 해당하는 레이저(267 nm)는 있으나 양자 점프를 볼 수 있는 상태 측정에 해당하는 레이저의 파장이 너무 짧아서(167 nm) 가능한 레이저가 없다는 것이다. 와인랜드 박사는 양자 로직을 이용하여 이 문제를 극복했다. 기본적인 아이디어는 알루미늄 이온의 시계전이에 있는 정보를 다른 측정 가능한 베릴륨 이온($^9\text{Be}^+$)으로 옮겨서 그 이온을 관측

REFERENCES

- [16] D. Kielpinski, C. R. Monroe and D. J. Wineland, *Nature* **417**, 709 (2002).
- [17] J. D. Jost, *et al.*, *Nature* **459**, 683 (2009); J. P. Home, *et al.*, *Science* **325**, 1227 (2009); D. Hanneke, *et al.*, *Nature Phys.* **6**, 13 (2010); J. M. Amini, *et al.*, *New J. Phys.* **12**, 033031 (2010); K. R. Brown, *et al.*, *Nature* **471**, 197 (2011); C. Ospelkaus, *et al.*, *Nature* **476**, 181 (2011).
- [18] C. W. Chou, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 070802 (2010).
- [19] C. W. Chou, D. B. Hume, T. Rosenband and D. J. Wineland, *Science* **329**, 1630 (2010).
- [20] P. O. Schmidt, *et al.*, *Science* **309**, 749 (2005).

Fig. 8. Quantum logic spectroscopy. (a) Spectroscopy ion is atom that you measure the transitions of and logic ion is atom that you detect through. (b) For the Al clock, Al^+ is the spectroscopy ion and Be^+ is the logic ion. (c) The concept of quantum logic transfer. Basically the transition of Al^+ is transferred to that of Be^+ . (Courtesy of P. O. Schmidt) [양자 로직 분광학에서는 (a) 구조를 알고자 하는 이온과 측정하는 이온이 다르다. (b) 알루미늄 이온 시계의 경우에는 알루미늄 이온이 시계전이를 제공하고 베릴륨 이온으로 그 전이를 측정한다. (c) 알루미늄 이온 상태를 베릴륨 이온으로 쿨롱 상호작용(Coulomb interaction)을 이용해 옮기는 개념도]

함으로 알루미늄 이온의 시계전이 결과를 얻게 되는 것이다 [그림 8(a), (b)]. 그림에서 보듯이 두 개의 서로 다른 이온이 같은 트랩 안에서 공유하는 진동 노랄 모드를 이용하면 한 원자의 정보를 다른 원자로 이동시킬 수 있다^[20] [그림 8(c)].

이러한 양자로직을 이용한 분광학은 알루미늄 이온뿐 아니라 다른 원자, 분자에게도 적용될 수 있어서 그 응용 범위가 대단히 넓다고 할 수 있다. 트랩의 한쪽에는 분광학을 하고자 하는 원자 또는 분자를 두고 다른 한쪽에는 측정 가능한 이온을 둔다. 레이저 진동수 빗살(Frequency comb)을 이용하여 알고 싶은 원자, 분자에 흡수가 일어나게 하고 그것을 다른 측정이온으로 옮긴다. 관심있는 원자, 분자에 관계없이 항상 같은 이온을 이용하여 측정하게 되므로 한 시스템으로 거의 모든 원자 분자의 분광학이 가능하게 되는 장점이 있다.

앞으로의 전망

지금까지 살펴보았듯이 와인랜드 박사에게 앞으로 더 폭넓게 이루어질 근본적인 양자역학 연구에 기초를 놓았다는 의

Fig. 9. The proposal from Chris Monroe, Luming Duan, and Jungsang Kim to scale up trapped ion quantum computation.^[10,21] [몬로 교수, 루밍 교수와 김정상 교수가 제안한 거대 이온 컴퓨터 개념도]

미에서 노벨상이 수여되었다고 볼 수 있다. 대단히 많은 일들이 이뤄졌지만 아직까지 어떤 의미에서이건 현존하는 컴퓨터를 넘어서는 양자 컴퓨터가 개발되지 않았다. 와인랜드 박사의 Quantum CCD 방식은 생각보다 기술적인 장벽이 커서 진전이 대단히 느리다. 최근에는 몬로(Prof. Chris Monroe, University of Maryland) 교수, 루밍(Prof. Luming Duan, University of Michigan) 교수와 김정상(Prof. Jungsang Kim, Duke University) 교수는 다른 방식, 광자를 이용하는 것으로 이온을 이용한 큐비트의 개수를 늘리는 제안을 했다.^[10,21] 그동안 이 방식으로 상당히 많은 진전을 이뤄 원리적으로는 그러한 방식으로도 개수를 늘리는 것도 가능하다는 것을 보였다. 그러나 여전히 그 방향으로도 기술적인 문제가 많이 남아 있다. 몬로 교수, 루밍 교수와 김정상 교수는 또한 단 하나의 트랩을 이용해서 수백 개의 큐비트를 다룰 수 있도록 하는 제안도 했지만 아직까지 원리적인 단계에서도 이 방법이 가능하다는 것을 보인 실험은 없다. 부정적으로 보면 실용적인 양자컴퓨터의 실현이 어려워 보이지만 다른 한편으로는 크게 공헌할 수 있는 여지가 아직도 많이 있다고 생각할 수 있다.

정작 가까운 미래에 누가 어떻게 실제적인 양자 컴퓨터를 실현할지는 창의적이고 열정적인 여러분의 도전과 노력에 달려 있을 수 있다.

REFERENCES

- [21] L.-M. Duan and C. Monroe, Rev. Mod. Phys. **82**, 1209 (2010).