약한 측정과 양자 제어 기술

DOI: 10.3938/PhiT.22.020

이 승 우

Weak Measurement and Quantum Control Technology

Seung-Woo LEE

In this article, a description of a general quantum measurement aiming to understand the concept of a weak measurement will be introduced. In particular, the proof of a quantitative bound between information gain by a weak quantum measurement and its reversibility will be resumed. Then, quantum control, which not only is one of the hottest fields in recent physics research but also is regarded as being at the core of future information technologies, will be highlighted, and possible applications of weak measurements to quantum control will be discussed.

서 론

‘측정’ - 사물의 물리적 양을 어떤 계기나 장치를 사용하여 재다 - 의 사전적 의미는 모두에게 익숙할 것이다. 이 측정이라는 단어를 보고 어떤 사람들은 대중 목욕탕에서 몸무게를 잴던 기억을 떠올릴지도 모른다. 디지털 장치가 나타난 측정값은 바로 우리의 뉴런을 자극하고 측정 대상인 스스로에게 몇 가지 명령 하달을 통한 변화를 시도할 것이다(차후 논의하겠지만, 이는 되먹임 제어(feedback control)의 한 종류이다). 이렇게 측정해서 얻은 값은 의심 없이 현재의 자신의 몸무게를 나타낸다. 유효기간이 총 3일 정도의 다짐으로도 변하지 않던 몸무게가, 틈만 나면 체중계 위에 올라 소수점까지 읽어봐야 다른 몸무게가 나올 확률은 0이다. 이 사연은 고전물리가 지배하는 공간에 갇혀있으며, 또 스스로 제어

(control)하는 능력 또한 부족한 우리의 자화상이다. 이러한 이야기는 보통 현대인의 건강과 관련된 계몽성 글의 진부한 시작이 될 수 있겠지만, 필자는 전혀 다른 이야기로 문제의 원인을 돌려 보려고 한다. 스스로를 마치 이중 슬릿(double slit)^[1]을 통과하는 파동(wave)인지 입자(particle)인지도 모르는 정체성이 의심되는 전자(electron) 같은 존재, 또는 온 길이 이 골목인지 저 골목인지도 모르고 집에 돌아온 단일 광자(photon)처럼 불확실한 존재로 생각하는 사람들이 있다면, 체중계 앞에서 결과를 읽는 순간 이런 질문을 할 것만 같다. ‘과연 체중계는 나에게 무슨 짓을 한 것인가?’ 난생 처음으로 몸무게를 측정해본 것 같은 이 사람들은 아마 스스로의 몸무게가 결정된 원인을 체중계에서 찾는 듯하다. 덤으로 그 중 몇몇은 스스로의 신장에 가능한 가장 무거운 몸무게를 확인하는 순간 속된 말로 ‘멘탈이 붕괴’되는 경험을 할 것이다. 사실, 우리는 이렇게 몸무게가 체중계 위에 올라 결과를 확인하는 순간 결정되는 양자물리 현상을 ‘붕괴’(collapse)라고 부른다.

양자 상태(quantum state)가 붕괴되는 현상은 양자 측정(quantum measurement)의 근간이며 많은 양자 물리학 법칙의 핵심에 닿아있다. 사실 100여 년 전 양자 물리학의 태동기부터 최근의 양자 물리학의 재발견 및 양자 정보처리(quantum information processing)의 응용에 이르기까지 양자 측정은 다양한 관련 연구의 시발점이 되거나 핵심 요소가 되어왔다. 코펜하겐 해석(Copenhagen interpretation) 및 불확정성 원리(uncertainty principle)에서 보듯 양자 물리학의 해석에 있어서 가장 중요한 요소이며, 아인슈타인-포돌스키-로젠의 패러독스(EPR paradox)^[2]와 얽힘(entanglement)의 발견^[3] 또한 비국소적(nonlocal) 공간에서 양자 상태의 붕괴에 대한 논의로부터 시작되었다. 또한, 측정으로부터 측정대상에 대한 정보를 얻는다는 상식은 양자정보 과

저자약력

이승우 박사는 KAIST 학부, 석사를 마치고 University of Oxford 박사 학위(2009)를 받았다. 청암 펠로우쉽 등으로 서울대, 한양대, 영국 Imperial College (visiting)에서 연구했으며, 현재 미국 Dartmouth College 연구원이다. (swleego@gmail.com)

REFERENCES

- [1] T. Young, *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts* (1807), Vol. 1, p. 464.
- [2] A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
- [3] E. Schrödinger, *Proceeding of the Cambridge Philosophical Society* **31**, 555 (1935).

학(quantum information science)의 가장 기본은 양자 측정에 있다는 사실을 알게 해준다. 이렇게 양자 측정에 대한 재미있고도 수수께끼 같은 많은 이야기들이 있지만, 이 글에서는 그 중 약한 측정(weak measurement)에 대해서 이야기하려고 한다.

우선 약한 측정이란 무엇인지 정의를 알아보고 또 약한 측정의 되돌림에서 정보가 어떻게 보존이 되는지 알아보자. (또 다른 연구 방향인 Y. Aharonov가 제안한 약한 측정과 약한 값(weak value)에 대한 주제는^[4] 이 글에서는 다루지 않기로 한다.) 그리고 이 글의 후반부에서는 양자 제어 기술(quantum control technologies)에 대한 소개와 약한 측정을 통한 양자 제어 응용 가능성을 이야기해보도록 한다.

측정의 정의: 약한 측정

그럼 약한 측정이란 무엇일까? 뭔가 우리가 알지 못하는 새롭고 심오한 뜻이 숨어 있을까? 사실은 전혀 그렇지 않다. 말 그대로 약하게 측정한다는 의미로, 측정대상과 측정장치간의 상호작용이 아주 약하게 이루어지는 경우를 말한다. 마치 체중계 위에 한쪽 발만 올려놓고 측정하는 것과 같다. 측정 시점에 있어서 '정해져 있는 물리적 양을 읽어내는 행위'라는 의미를 갖는 고전 물리학에서는 측정이 약한 경우가(나쁜 측정으로 예시할 게 아니라면) 아무짝에 쓸모가 없을지도 모른다. 하지만 양자 물리학에서는 조금 이야기가 달라진다.

양자 측정은 보통 연산자(operator)를 통해서 표현된다는 형식적인 이야기로부터 시작해보자. 어떤 관측가능량(observable) $\hat{A}$ 의 표현은 그 고유 측정 기저(measurement basis) $|\omega_j\rangle$ 와 고유값 ω_j 을 통해서 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{A} = \sum_j \omega_j \hat{P}_j$$

이때, $\hat{P}_j = |\omega_j\rangle\langle\omega_j|$ 는 투영(projection) 연산자라고 하며 이러한 투영 연산자에 대응하는 측정을 우리는 투영 또는 폰 노이만(Von Neumann) 측정이라고 한다. 이 연산자들은 각각 서로에 대해서 직교맞춤(orthonormal) 상태에 있다. 처음 임의의 양자 상태 $|\varphi\rangle$ 에 있는 어떤 입자에 총 n 가지 결과값을 갖는 투영 측정을 가한다고 하면, 각각의 결과가 나올 확률은 $\langle\varphi|\hat{P}_j|\varphi\rangle$ 로 표현되고 전체 확률의 합은 1이 된다. 그리고 결과가 나온 후 입자의 상태는 $\hat{P}_j|\varphi\rangle$ [주: 앞으로의 모든 식에서 맞춤(normalization)은 생략하도록 한대로 변하게 된다.

자 그럼 모든 측정은 이처럼 투영 연산자로 표현이 될까? 답은 '그렇지 않다'이다. 사실 어떠한 실제 측정 행위도 이처럼 상태 벡터에 직접 가해지는 연산자로 표현될 수 없다. 예를 들어, 우리가 어떤 원자(atom)를 측정한다고 할 때, 우리는 그

Fig. 1. The Stern-Gerlach Experiment (licensed under Creative Commons).

원자의 상태를 직접 읽을 수는 없다. 원자가 주변의 전자기장과 상호작용을 하고 나온 복사장(radiation field)을 다시 광 검출기에서 받아들이고 이때 측정 장치 내의 회로의 전류 값이 변하게 되어 디지털 단말기 값을 변화시킨다. 또, 다시 우리가 망막을 통해 단말기 값을 읽게 되면 뉴런에 결과값이 전달이 된다. 이렇게 측정이라는 행위는 측정대상과 측정자(observer) 사이에 여러 장치들이 연결된 상호작용이라고 볼 수 있다. 이를 측정 고리 또는 폰 노이만 고리(Von Neumann chain)라고 하며, 실제로 어느 순간 양자 상태의 붕괴가 일어나는지에 대한 논의는 여전히 해결되지 않은 흥미로운 주제이기도 하다.

그러므로 일반적으로 양자 측정을 나타낼 때는 측정 대상과 측정 기기(measurement apparatus)와 이들의 상호작용을 항상 고려해야 한다.^[5] 예를 들어, 은(silver) 원자가 갖고 있는 전자의 스핀 1/2 양자상태를 측정한다고 생각해보자. 이 원자의 상태 벡터는 정해진 방향의 측정 기저인 위방향 $|\uparrow\rangle$ 과 아랫방향 $|\downarrow\rangle$ 의 임의의 중첩(superposition)으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$$

여기서 a, b 는 복소수(complex) 값으로 보른 법칙(Born's rule)에 의해 각각의 절대값이 상태를 결정하는 확률이 되어 $a^*a + b^*b = 1$ 의 관계를 만족한다. 이 원자가 만약 비균질 자기장(inhomogeneous magnetic field)이 걸려있는 장치로 투입되면, 스핀에 따라서 각기 다른 방향으로 편향(deflection)이 일어나게 되고, 최종적으로 측정 막(screen)에서 위와 아래로 나뉜 두 지점의 결과값으로 나타난다. 이 방법은 슈테른-게를라흐(Stern-Gerlach) 실험이라고 하며^[6](그림 1), 양자역학에서 측정의 개념을 보여주는 기초적인 실험 모델이다. 이 측정 장치에 대응하는 고유 벡터를 $|\omega\rangle$,

REFERENCES

- [4] Y. Aharonov, D. Z. Albert and L. Vaidman, Phys. Rev. Lett. **60**, 1351 (1988).
- [5] H. M. Wiseman and G. J. Milburn, *Quantum Measurement and Control* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2010).
- [6] W. Gerlach and O. Stern, Zeitschrift für Physik **9**, 353 (1922).

|아래>와 같이 정의할 수 있다고 하자. 측정이 시작되면 원자와 장치가 상호작용을 하게 되고 스크린에 입사하기 전 전자의 스핀과 측정 장치의 상태는 이상적인 경우 다음과 같이 변하게 된다.

$$a|\uparrow\rangle|위\rangle + b|\downarrow\rangle|아래\rangle$$

이때, 우리가 스크린에서 결과값 ‘위’ 또는 ‘아래’를 읽게 되면, 입자의 최종 상태는 $|\uparrow\rangle$ 또는 $|\downarrow\rangle$ 로 붕괴된다.

위와 같은 이상적인 상황은 측정 대상과 측정 기기의 상호작용이 충분히 강하고 다른 영향이 없다는 가정을 한 결과이다. 하지만, 대부분의 실제 측정에서는 다양한 요인으로 측정 기기와 대상간의 상호작용이 약해질 수 있다. 예를 들면, 슈테른-게를라흐 실험에서 원자가 자기장에 짧은 시간 동안만 노출이 되었거나, 비균질 자기장의 방향 변화 값이 아주 작은 경우, 또는 측정 방향과 자기장 방향의 축이 틀어져 있는 상황 등 여러 가지 원인을 생각해 볼 수 있다. 이러한 상호작용의 세기를 1과 0의 사이의 어떤 값 s 로 정의해보자. 이 약해진 상호작용의 영향으로 스크린에 입사하기 전 원자와 장치의 상태는 다음과 같이 주어진다.

$$(a\sqrt{1+s}|\uparrow\rangle + b\sqrt{1-s}|\downarrow\rangle)|위\rangle + (a\sqrt{1-s}|\uparrow\rangle + b\sqrt{1+s}|\downarrow\rangle)|아래\rangle$$

즉, s 가 1보다 작은 경우엔 스크린에서 읽은 결과값이 ‘위’라고 할 지라도 입자의 스핀값은 $|\downarrow\rangle$ 일 수도 있으며 ‘아래’의 결과 또한 마찬가지로 스핀값이 $|\uparrow\rangle$ 인 경우를 포함한다. 이렇게 약한 상호작용으로 측정 대상의 양자 상태가 부분 붕괴(partial collapse)만 일어나는 측정을 약한 측정(weak measurement)이라고 한다.

여기서 정의한 약한 측정은 폰 노이만 측정을 확장한 일반적인 개념의 양자 측정으로 이해할 수 있으며, 일반화된 측정 연산자로 표현이 가능하다. n 개의 결과값을 갖는 임의의 측정은 각각의 결과값에 대응하는 n 개의 측정 연산자 $\hat{M}_1, \hat{M}_2, \dots, \hat{M}_n$ 로 표현이 된다. 이 연산자들은 $\hat{M}_1^\dagger \hat{M}_1 + \hat{M}_2^\dagger \hat{M}_2 + \dots + \hat{M}_n^\dagger \hat{M}_n = \hat{1}$ 의 식을 만족하는 완비 세트(complete set)를 이루게 되는데, 각각의 결과값이 나올 확률의 합이 1이라는 의미와 같다. 이 측정 뒤의 입자의 상태 벡터는 $\hat{M}_j|\varphi\rangle$, $j=1, \dots, n$,와 같이 나타낼 수 있다. 각각의 측정 연산자들은 행렬 형태로 표현했을 때 대각선화(diagonalization)를 할 수 있는데, 이렇게 해서 얻은 대각선 요소들을 특이값(singular value)이라고 하며 항상 0 이상의 값을 갖게 된다.^[7] 이때, 0이 아닌 특이값의 개수가 1개이면 투영 연산자이며, 2개 이상일 경우를 약한 측정 연산자라고 한다.

약한 측정은 사실 많은 실제 측정 장치에서 흔하게 일어난다고 할 수 있다. 하지만, 어떤 경우는 측정 후 측정 대상의 양자 상태가 그대로 남아 있지 않고 소멸되거나 측정 장치로 흡수가 되어서 약한 측정을 구현하기가 어렵다. 예를 들면, 광자는 광자 수 검출기

Fig. 2. (a) Weak measurement on photon polarization qubit using the Brewster-angle glass plates (BP).^[8] (b) Circuit schematic for the Josephson phase qubit, where X represents the Josephson junction. The measurement operation is implemented with a broadband 50-ohm transmission line with cold attenuators, which is connected to the flux bias line with a bias tee. During the measurement pulse, the energy barrier is lowered so that the tunneling probability of $|1\rangle$ increases.^[9] (Reprinted with permission from AAAS).

(photon number detector)에서 측정된 후에 광자수 상태 벡터 $|n\rangle$ 에 남아 있지 않고 검출기에 흡수가 되어 진공상태가 된다. 실험적으로 제어가 가능한 약한 측정의 예로는, 광자의 편광을 선택적으로 반사하고 광 검출기로 측정하는 방법 [그림 2(a)], 또는 투영 측정이 어려운 초전도체나 양자점에서 전하값 등을 연속적으로 읽는 양자 점접촉(quantum point contact) 등이 있다 [그림 2(b)].

측정 되돌림(Undoing quantum measurement)과 약한 측정에서 정보의 보존관계

입자에 약한 측정을 가한 경우는 측정 후에도 상태 벡터가 측정 기저로 완전히 붕괴되지 않기 때문에 측정 전의 입자의 정보가 일부 남아있다고 볼 수 있다. 그러므로 측정 이후 입자를 다시 원래 상태 벡터로 되돌리는 작용을 생각할 수 있는데, 이 되돌림 [주: 측정 가역, 측정 가역성 등으로 번역할 수도 있으나, 비선택적 가역성과의 혼동을 막기 위해 필자는 본 글에서 되돌림이라는 표현을 사용하였다] 작용을 위한 연산자는 다음과 같이 정의된다. 임의의 양자 상태 $|\varphi\rangle$ 에 있는 입자에 n 개의 결과값을 갖는 측정을 가한다고 하자. 이 측정 후 입자의 상태는 각각의 결과값에 대응하는 연산자 $\hat{A}_1, \hat{A}_2, \dots, \hat{A}_n$ 들로 표현이 된다. 예를 들면 임의의 결과값 k 를 얻은 경우 입자의 상태는 다음과 같다.

REFERENCES

- [7] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2000).
- [8] Y.-S. Kim, Y.-W. Cho, Y.-S. Ra and Y.-H. Kim, *Opt. Express* **17**, 11978 (2009).
- [9] N. Katz *et al.*, *Science* **312**, 1498 (2006); N. Katz *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 200401 (2008).

$$\hat{A}_k|\varphi\rangle$$

우리는 이때 입자에 또 다른 측정을 가할 수 있는데, 이 측정을 첫 번째 측정과 특수한 관계에 있도록 선택한다. 즉, 이 두 번째 측정이 총 m 개의 결과값을 갖고 각각의 연산자가 $\hat{B}_1, \hat{B}_2, \dots, \hat{B}_m$ 라고 했을 때, 이중 결과값 1에 대응하는 연산자 $\hat{B}_1$ 는 다음과 같은 조건을 만족시킨다.

$$\hat{B}_1\hat{A}_k|\varphi\rangle = \mu_k|\varphi\rangle$$

그러므로 두 번째 측정의 결과값이 1이면, 입자는 측정 전의 임의의 양자 상태 $|\varphi\rangle$ 로 돌아가게 된다. 이를 측정 되돌림 (undoing measurement or measurement reversal)이라고^[10,11] 하고, $\hat{B}_1$ 을 $\hat{A}_k$ 에 대응하는 되돌림 연산자라고 부른다. 여기서 복소수 μ_k 는 되돌림 성공확률의 진폭 값이다. 마찬가지로, 다른 첫 번째 측정의 결과값들에 대해서도 각각 다른 되돌림 측정이 정의될 수 있다. 주어진 측정에 대한 전체 되돌림 성공확률은 각 결과값의 확률 분포로 되돌림 성공확률을 평균을 내서 구하게 되는데 이를 측정의 되돌림률(measurement reversibility)이라고 한다. 측정 후 상태벡터가 완전히 붕괴되는 투영 또는 폰 노이만 측정의 되돌림률은 0이며 측정장치와 대상의 상호작용이 약해질수록 이 되돌림률이 커지게 된다.

약한 측정의 되돌림이 가능하다는 사실로부터, 한 가지 오해가 생길 수 있다. 준비되어 있는 양자 상태를 아주 약하게 측정하고 되돌리기를 여러 번 반복하면 관찰자가 양자 상태를 전혀 교란 (disturbance) 없이 측정하고 그 정보를 알 수 있게 되리라는 것이다. 언뜻 생각하면 그럴 듯도 하다. 하지만, 이러한 상황을 정보이론의 관점에서 보면, 양자상태에 입력된 정보가 소멸되지 않고 복사가 된 상황과 같다고 볼 수 있는데, W. K. Wootters와 W. H. Zurek에 의해서 증명된 양자상태는 복사가 불가능하다는 정리(No cloning theorem)^[12]와 충돌이 일어난다. 과연 그럼 양자 정보처리와 양자 암호(quantum cryptography) 분야의 핵심이 되는 이 정리가 과연 틀렸을까? 아니면 교란 없는 양자 정보의 유출이 불가능하다는 사실을 어떻게 알 수 있을까?

최근 필자 등은 이러한 약한 측정과 되돌림을 반복해도 양자 상태의 정보가 유출될 수가 없다는 사실을 증명하였다.^[11] 증명에 따르면 약한 측정으로 얻은 정보는 되돌림 측정을 통해 양자 상태가 원 상태로 회복되면서 지워지게 된다. 그렇다면 혹자는 ‘측정으로 얻은 정보를 노트나 믿을 만한 저장공간에 보관하거나 아니면 내 좋은 기억력으로 충분하지 않나?’라고 생각할지도 모른다. 자, 그럼 내 머릿속 혹은 어떤 저장장치에 저장된 정보가 어떻게 지워지게 되는지 살펴보자.

관찰자는 임의의 중첩된 상태 $|\varphi\rangle$ 에 있는 입자에 우선 연산자 $\hat{A}_1, \hat{A}_2$ 로 이루어진 측정을 가하여 정보를 얻었다. 이때, 관찰

Fig. 3. Information balance in weak measurement.

자는 결과값에 대응하는 연산자의 측정 기저들 중 가장 큰 계수를 갖는 기저 상태로 예측되는 입자의 정보를 얻게 된다. 예를 들어, 그림 3에 정의된 측정 연산자들의 경우 결과값 1이 나왔을 경우 입자의 상태를 $|0\rangle$, 결과값 2가 나왔을 경우는 $|1\rangle$ 로 예측을 하게 된다. 그래서 관찰자는 결과값 2가 나오자 $|1\rangle$ 으로 예측되는 입자의 정보를 측정 노트에 기록하였다. 이 관찰자는 다시 연이은 측정으로 입자의 상태를 원 상태로 되돌리려고 한다. 두 번째 측정은 연산자 $\hat{B}_1, \hat{B}_2$ 로 표현되며 $\hat{B}_1$ 이 $\hat{A}_2$ 에 대응하는 되돌림 연산자로 준비되었다. 즉, 결과값 1이 나오면 되돌림 성공이 된다. 그래서 관찰자는 두 번째 측정 뒤 결과가 1인 경우의 입자들을 보관하였다. 자, 이제 관찰자는 입자에 대한 정보와 원래 상태가 유지된 입자를 동시에 얻게 된 것일까? 답은, 물론 ‘그렇지 않다’이다. 위에서 간과한 중요한 사실은 되돌림을 위한 측정결과 또한 입자의 정보를 담고 있다는 것이다. 두 번째 측정에서 결과값이 1인 경우 되돌림은 성공했지만, 이 결과로 우리는 입자에 대해서 상태가 $|0\rangle$ 으로 예측되는 정보를 추가로 얻게 되었다. 이 정보는 앞선 결과와 상충되는 결과이다. 아무리 노트에 적었던 정보라고 해도 정보에 대한 불확실성이 최대값으로 늘어나게 된다. 즉, 약한 측정으로 얻었던 정보가 사라지게 되었다.

이 성질은 우리가 약한 측정을 통해서 얻을 수 있는 평균 정보의 양과 되돌림률 값이 상호 균형(trade-off) 관계에 있다는 사실로 정량화될 수 있다.^[11] 측정과 되돌림에서 정보가 유출되는 경우는 이 균형 관계식이 깨지게 되는데, 이는 양자 정보 처리와 양자 암호기술의 응용에 있어서 중요한 결과라고 할 수 있다.

REFERENCES

- [10] A. N. Korotkov and A. N. Jordan, Phys. Rev. Lett. **97**, 166805 (2006); A. N. Jordan and A. N. Korotkov, Contemp. Phys. **51**, 125 (2010).
- [11] Y. W. Cheong and S.-W. Lee, Phys. Rev. Lett. **109**, 150402 (2012).
- [12] W. K. Wootters and W. H. Zurek, Nature **299**, 802 (1982).

양자 제어 기술과 약한 측정의 응용

양자 제어(quantum control)란 양자 논리연산 장치들을 구현하거나 특정한 임무를 잘 수행하게 하며, 동시에 환경의 영향으로부터 연산을 보호하기 위해 양자 시스템이나 주변 환경을 조작하는 기술을 말한다.

양자 정보처리에 있어서 가장 기본이 되는 논리연산은 한 개의 큐비트(qubit)를 제어하는 뒤집기 연산(Pauli X), 위상 변이 연산(Pauli Z), 그리고 하다마드 연산(Hadamard)과 두 개의 큐비트를 동시에 제어하는 CNOT (또는 CZ) 연산이 있다. 이 네 가지가 양자 컴퓨터를 구현하는데 기본적으로 필요한 연산이다.

이 연산을 구현하기 위한 다양한 접근 방법이 있는데, 빛을 이용한 방법들을 우선 살펴보면, 2001년 E. Knill 등은 광자의 편광과 선형 광학만을 이용하여 제어하는 획기적인 양자 컴퓨터 연산 방법을 고안하였다.^[13] 단일 광자를 이용한 이 접근 방법은 결맞음(decoherence)에 상대적으로 강하다는 장점이 있는 반면, 두 개의 큐비트를 제어하는 CNOT 또는 CZ 연산이 어렵다는 단점이 있다. 한편, 빛의 결맞는 상태(coherent state)를 이용한 접근 방법이 서울대 정형석, 영국 임페리얼 컬리지 김명식 교수 등에 의해서 제안되었다.^[14] 결맞는 상태의 큐비트는 벨 상태 측정(Bell-state measurement)이 확정적으로 가능해서 두 큐비트의 연산에 큰 장점이 있지만, 기저 벡터가 서로 직교(orthogonal)가 아니며, 위상 변이(Pauli Z) 연산이 어렵다는 단점을 갖고 있다.

최근 필자와 서울대 정형석 교수가 함께 제안한 빛의 하이브리드(hybrid) 양자정보처리^[15] 편광과 결맞는 상태의 얽힘과 선형광학을 이용한 방식으로, 기존에 알려진 다른 방법들의 단점들을 동시에 보완하고 원리적으로 확정적 연산이 가능한 방식이다. 특히, 양자 컴퓨터의 구현에 있어서 중요한 환경 요인이나 연산의 에러에 대한 결함 허용(fault-tolerance) 한계 수치와 연산에 필요한 자원(resource)의 사용률이 기존 방법들보다 뛰어나다는 시뮬레이션 결과를 보여 주었다. 실험적인 구현을 위해서는 하이브리드 얽힘 상태의 생산과 광자수 측정기의 효율성의 향상 등의 넘어야 할 산들이 있지만, 가까운 미래에 이 방법을 이용한 효율적인 양자 전송(quantum teleportation)과 정보처리가 가능할 것으로 기대된다.

빛을 이용한 방식 이외에도 원자나 이온의 포획, 양자점이나 초전도체, 그리고 핵자기공명(NMR) 등을 이용한 큐비트의 생성과 제어가 구현되어 왔다. 각각의 방식들은 정보의 저장, 전달, 연산 등의 목적에 따라서 장단점을 갖고 있다. 예를 들어, 정보의 원거리 전달을 위해서는 빛을 이용한 방식이 유리하고, 많은 수의 얽혀있는 큐비트의 생성과 제어는 이온덫(ion trapping) 방식이 유리하다고 알려져 있다. 이러한 성과로 2012년 기초적인 큐비트의 양자 제어를 구현한 (여러 과학자 중에서) D. J. Wineland와 S. Haroche 박사에게 노벨상 수상의 영광

이 돌아가기도 하였다. 최근에는 이렇게 기초적인 연산의 구현에서 더 나아가 많은 수의 큐비트를 얽힘 상태로 만들고 또 한꺼번에 제어하는 기술이 개발되고 발전하고 있다.^[16]

자 그럼 이제 고전 컴퓨터가 따라올 수 없는 연산 능력을 가진 양자정보처리 장치를 보게 되는 건 시간 문제일까? 사실 아직 그렇게 낙관할 수는 없다. 여전히 어려운 문제 중의 하나가 바로 환경에 의한 결맞음 또는 흩어짐(dissipation) 현상이다. 이러한 효과는 우리가 원하는 결과에 도달하기 전에 양자 상태의 중첩과 얽힘을 잃어버리게 하는데, 정보 처리장치의 크기가 커질수록 문제가 더 심각해진다. 그러므로 앞으로의 양자정보처리 연구가 해결해야 할 가장 큰 숙제는, '어떻게 하면 환경의 영향을 최소화하면서 원하는 연산을 효율적으로 수행하게 할 것인가?'이며, 이것이 최근 활발한 양자 제어 연구의 핵심이다.

양자 제어 기술은 측정의 여부를 통해서 크게 두 가지로 분류된다. 첫 번째로 측정을 통해 상태의 정보를 관찰하고 적절한 피드백(feedback)을 수행하여 제어하는 방법이 있다. 이를 닫힌 루프 제어(closed-loop control) 또는 피드백 제어(feedback control)라고 한다. 이를 응용한 한 가지 재미있는 연구로는 최근 한양대 이진형 교수 연구팀의 양자 배움 기계(quantum learning machine) 시뮬레이션 등이 있다.^[17] 임의의 양자 연산을 위한 피드백 프로토콜을 확립한 장치가 스스로 연산의 효율을 높여가는 것이 목표라고 할 수 있다.

두 번째로는, 측정을 배제하여 상태의 정보를 교란시키지 않고 계획된 제어를 양자 상태에 가하여 원하는 최종 상태에 도달하게 하는 방식인데, 이를 열린 루프 제어(open-loop control)라고 한다. 1998년 L. Viola와 S. Lloyd는 펄스를 반복적으로 큐비트에 적용하면서 환경에 의한 결맞음을 억제(decoherence suppression)하는 기술을 제안하였다.^[18] 이를 뱅뱅(Bang-Bang) 프로토콜이라고 하는데, 이런 결맞음을 억제하는 열린 루프 제어를 일반적으로 동적 짝풀림(dynamic decoupling)이라고 부른다. 이런 동적 제어 방식은 펄스를 이용하여 스핀을 제어하는 핵자기 공명(NMR)에서 처

REFERENCES

- [13] E. Knill, R. Laflamme and G. J. Milburn, *Nature* **409**, 46 (2001).
- [14] H. Jeong, M. S. Kim and J. Lee, *Phys. Rev. A* **64**, 052308 (2001); S. J. van Enk and O. Hirota, *Phys. Rev. A* **64**, 022313 (2001); H. Jeong and M. S. Kim, *Quant. Inf. Comp.* **2**, 208 (2002).
- [15] S.-W. Lee and H. Jeong *Phys. Rev. A* **87**, 022326 (2013); arXiv:1304.1214 (2013).
- [16] C. Monroe and J. Kim, *Science* **339**, 1164 (2013).
- [17] J. Bang, J. Lim, M. S. Kim and J. Lee, arXiv:0803.2976 (2008); J. Bang, J. Ryu, S. Yoo, M. Pawłowski and J. Lee arXiv:1301.1132 (2013).
- [18] L. Viola and S. Lloyd, *Phys. Rev. A* **58**, 2733 (1998); L. Viola, E. Knill and S. Lloyd, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 2417 (1999).

Fig. 4. An experimental sequence for dynamic decoupling showing key procedures and designations of key times.^[21] (Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature 458: 996-1000, © 2009.)

음 발전해 왔으나, 뱅뱅 프로토콜의 제한 이후로는 큐비트의 결계집을 억제하기 위한 다양한 기술로 변형 발전되었다. 최근에는 펄스의 간격을 최적화하고 최소한의 펄스를 가해서 효율을 높이는 방법^[19] 또는 결계집을 억제하며 동시에 특정 연산을 가능하게 하는 방법(dynamically corrected gate)^[20] 등의 프로토콜이 제안되었으며, 이온덫이나 전자스핀 등의 다양한 물리계에서 실험적으로 구현이 되었다(그림 4).^[21] 하지만, 양자 정보처리의 실질적인 응용을 위해서는 여전히 해결할 문제들이 많이 남아있는데, 예를 들면, 양자 메모리(quantum memory)에 적합할 만큼 긴 시간 동안의 결계집 억제와 많은 큐비트를 효율적으로 동시에 제어하는 문제 등이다(현재 필자가 L. Viola와 함께 진행하는 연구의 방향이기도 하다).

자 그럼 마지막으로, 어떻게 약한 측정이 이러한 양자제어 기술에 응용이 될지 생각해보자. 우선, 약한 측정의 응용을 크게 두 방향으로 분류해서 생각할 수 있다. 첫 번째는 약한 측정을 통해 정보를 얻고 결과에 따라서 적절한 제어를 하는 선택적 과정(selective process), 그리고 두 번째는 정보의 습득 없이 반복적으로 약한 측정을 가하는 비선택적 과정(non-selective process)이다. 이는 양자 제어의 분류에서 각각 닫힌 루프와 열린 루프 제어와 연관되어 있다. 우선, 선택적 제어 방식으로는 약한 측정과 되돌림의 과정을 응용할 수 있다. 예를 들어, 정보전달 또는 얽힘의 공유를 위해 원거리에 큐비트를 전송하는 경우, 전송되는 큐비트와 환경의 상호작용으로 결계집 현상이 일어날 수 있다. 이때, 전송 전후에 각각 약한 측정과 되돌림 측정을 가하여 전송 중 환경과의 상호 작용을 약하게 하는 방법이 있다. 최근 포항공대 김윤호 교수 연구팀의 약한 측정과 되돌림으로 얽힘을 보호하는 연구결과는 이런 선택적 제어의 좋은 예라고 할 수 있다.^[22] 한편, 폰 노이만 측정은 언제나 여러 개의 약한 측정으로 쪼개어질 수 있다는 사실로부터,^[23] 약한 측정의 비선택적 과정의 응용 또한 가능하다. 예를 들면, 투영 측정을 이용한 제노 효과(zeno effect)가 양자 상태를 환경으로부터 보호할 수 있다는 사실이 잘 알려

져 있는데,^[24] 약한 측정을 마찬가지로 이용할 수 있게 된다. 이러한 방향으로 최근 D. Lidar 그룹에서 약한 측정과 제노 효과를 이용한 양자 제어 방법이 제안되기도 하였다.^[25]

맺음말

양자 물리학이 탄생한 지 이미 100년이 지났고, 이미 많은 부분이 우리 삶 속에 직 간접적으로 영향을 주고 있다. 하지만, 우리는 양자 세계의 대부분이 아직 이해하기 힘들고 발견되지 않은 미지의 영역이라는 걸 인정할 수밖에 없다. 이미 알려진 양자적 현상 또한 앞으로 우리에게 어떻게 이로운 쓰임새가 있을지 모르고 있다. 이런 의미로 최근의 양자 물리학 연구는 큰 두 개의 물줄기로 흘러가고 있다.

첫 번째 물줄기는 양자 이론 자체에 대한 탐구이다. 양자 세계로부터 고전 물리학이 출현하는 경계에 대한 이해와 고전 물리학의 틀에서 발전되어온 물리와 양자 물리학의 통합은 여전히 답이 없는 수수께끼와도 같다. 그래서 양자 이론은 완전한 이론이지만 아직 완성된 이론은 아니라고 볼 수 있다.

두 번째 물줄기는 양자 정보 통신 기술의 개발과 구현이다. 2012년도의 노벨상 수상은 이 방향의 초석을 다진 선봉 연구자들의 성공을 나타내는 상징이지만, 지금까지의 성과를 냉정히 바라보면 지금의 정보통신 기술에 대비해서 진공관 정도를 구현한 수준이다. 그러므로 아직은 양자 정보 처리 구현의 첫 시작을 알린 것에 불과하며, 앞으로 갈 길이 멀다고 할 수 있다.

이 글에서 이야기한 약한 측정 그리고 양자 측정에 대한 연구는 두 큰 연구줄기에 있어서 모두 중요한 부분을 차지하고 있다. 또한, 향후 양자 제어 기술 발전의 필수요소이자 양자 물리학의 새로운 발견을 위한 핵심이기도 하다. 우리 모두에게 익숙해지기엔 아직 먼 미래의 이야기 같지만, 양자 물리학의 수수께끼 같은 현상에 대한 과학자들의 호기심과 언젠가 펼쳐질 양자 정보통신 세상을 위한 노력은 현재 진행형이다. 두 개의 큰 물줄기가 곧 바다를 만나게 될지도 모를 일이다.

REFERENCES

- [19] G. S. Uhrig, Phys. Rev. Lett. **98**, 100504 (2007).
- [20] K. Khodjasteh and L. Viola, Phys. Rev. Lett. **102**, 080501 (2009); Phys. Rev. A **80**, 032314 (2009).
- [21] M. J. Biercuk, H. Uys, A. P. VanDevender, N. Shiga, W. M. Itano and J. J. Bollinger, Nature **458**, 996 (2009); J. X. Rong, N. Zhao, Y. Wang, J. Yang and R. B. Liu, Nature **461**, 1265 (2009).
- [22] Y.-S. Kim, J.-C. Lee, O. Kwon and Y.-H. Kim, Nature Phys. **8**, 117 (2012).
- [23] O. Oreshkov and T. A. Brun, Phys. Rev. Lett. **95**, 110409 (2005).
- [24] P. Facchi and S. Pascazio, J. Phys. A **41**, 493001 (2008).
- [25] G. A. Paz-Silva, A. T. Rezakhani, J. M. Dominy and D. A. Lidar, Phys. Rev. Lett. **108**, 080501 (2012).