약한 측정과 양자정보

DOI: 10.3938/PhiT.22.019

이종찬·임향택·홍강희·김윤호

Weak Quantum Measurement and Quantum Information

Jong-Chan LEE, Hyang-Tag LIM, Kang-Hee HONG and Yoon-Ho KIM

Practical realizations of many interesting and potentially important applications and ideas in quantum information science are strongly tied to our ability to manage the decoherence problem. In this article, we give a rather pictorial description of the quantum weak measurement and its interesting properties. We then show how the weak quantum measurement can be used to suppress decoherence and, hence, to protect quantum states (even entanglement) from decoherence.

고전역학적 관점에서 물리량은 정확한 수치로 실재(實在)하는 것이고 측정은 그러한 물리량에 대한 단순한 관측이다. 즉, 고전역학에서는 명백히 실재하는 물리량에 대한 측정이 그 물리량의 값과는 독립적으로 이루어지고, 만약 관측 결과에 불확정성이 있다면 그것은 물리량의 문제가 아니라 측정기구 또는 측정방법의 부정확성 때문이다.

저자약력

이종찬은 포항공과대학교에서 물리학 학사 학위(2009년)를 취득하였다. 2009년부터 포항공과대학교에서 약한 측정과 원자-광자 상호작용에 대한 연구를 하고 있다.

임향택은 포항공과대학교에서 물리학 학사 학위(2008년)를 취득하였다. 2008년부터 포항공과대학교에서 Structural Physical Approximation과 약한 측정에 대한 연구를 하고 있다.

홍강희는 포항공과대학교에서 물리학 학사 학위(2012년)를 취득하였다. 2012년부터 포항공과대학교에서 약한 측정에 대한 연구를 하고 있다.

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 재직 중이다.
(yoonho@postech.ac.kr)

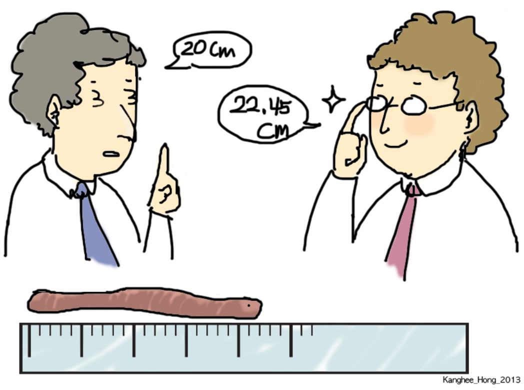


Fig. 1. “If you want to do a good measurement, you’d better get a pair of eyeglasses.”

그림 1과 같이 지렁이의 길이를 측정하는 경우를 생각해 보자. 같은 지렁이를 놓고, 눈이 나쁜 사람은 그 길이를 20 cm로 읽고 있고, 안경을 쓴 사람은 22.45 cm로 측정하고 있다. 지렁이의 길이를 측정하는 자의 눈금이 충분히 촘촘하다면, 측정하는 사람이 눈금을 얼마나 자세히 읽을 수 있느냐에 따라 지렁이의 길이의 불확정성이 결정된다. 이때 지렁이의 길이는 무한히 정확한 값으로 실재하며, 이것은 사람들의 측정과는 무관하게 존재한다.

고전역학에서 지렁이의 길이를 결정론적으로 실재하는 값으로 생각하는 것과 달리 양자역학에서는 “지렁이”가 여러 가지의 길이로 “동시에” 존재할 수 있다. 또 지렁이의 물리량에 대한 측정은 지렁이의 상태를 그 물리량 연산자에 대한 고유상태 중 하나로 변화시킨다 [Box 1].

즉, 고전역학에서 위치(길이)와 운동량 등의 물리량이 정확한 수치로 존재하는 것과 달리, 양자역학에서는 측정 도구의 정확도와 관계없이 지렁이의 길이와 운동량 사이에는 본질적인 불확정성 관계가 존재한다. 이것이 하이젠베르크의 불확정성 원리이다.

이러한 양자역학의 가설들과 양자 측정의 원리들을 가장 단

Box 1 양자측정 vs 고전측정

양자역학은 고전역학에서 암묵적으로 동의해 온 가설들에 대한 도전이었으며, 완전히 새로운 종류의 가설들에 바탕하고 있다. 양자역학과 고전역학들의 가설들은 어떻게 다르며 측정은 어떻게 정의되고 이해되는가?

고전역학에서, 어떤 시간에서 입자의 상태는 그 시간에서 입자의 위치와 운동량으로 기술되며, 그 상태는 2차원 위상공간의 점으로 표현될 수 있다. 입자가 고전적으로 잘 정의된 위치와 운동량을 가질 때, 입자가 가진 물리량은 그 입자의 위치와 운동량의 함수로 측정되며, 입자의 상태는 측정한 직후에도 그대로 유지된다. 즉, 고전역학에서 입자의 상태는 측정과 무관하게 정의된다.

한편 양자역학에서 고전역학에 대응하는 입자의 상태는 2차원 힐버트 공간에서의 벡터 $|\psi\rangle$로 표현된다. 고전역학의 위치와 운동량은, 양자역학에서 위치 연산자(position operator)와 운동량 연산자(momentum operator)로 대치된다. 입자가 가진 물리량은 위치 연산자와 운동량 연산자의 함수로 정의되며 물리량에 대한 측정 또한 연산자로 정의된다. 양자역학에서 측정 Ω는 확률적으로 측정 연산자(measurement operator)의 고유 값(eigenvalue)들 중 하나(ω)의 결과를 주며, 이때의 확률은 $P(\omega)=|\langle\omega|\psi\rangle|^2$로 주어진다. 이 측정으로 인해 입자의 상태는 원래 상태인 $|\psi\rangle$에서 $|\omega\rangle$로 변화한다.[1]

순화해서 보여주는 사례가 바로 '슈뢰딩거의 고양이'이다 (그림 2). 상자 안에는 고양이가 들어있고, 시간에 따라 붕괴되는 확률을 가진 방사선 동위원소가 들어있다. 이 방사선 동위원소가 붕괴되면 독극물이 들어있는 병을 작동시켜 고양이는 죽게 되고, 방사선 동위원소가 붕괴되지 않으면 고양이는 살아있다. 이때 반감기만큼의 시간이 지났을 때의 고양이의 상태를 기술하면 다음과 같다.

$$|cat\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(|dead\rangle+|alive\rangle).$$

즉, 박스 안의 고양이의 상태는 살아있는 상태와 죽어있는 상태의 중첩 상태로 존재한다. 다시 말해 고전적 결정론과는 달리, 상자를 열어 고양이의 상태를 확인하기(즉 측정을 하기) 전에는 고양이가 살아있는 상태와 죽어있는 상태가 "동시에" 존재한다. 상자를 열어 고양이의 상태를 확인하면, 고양이의 상태는 산 상태 혹은 죽은 상태 중 하나로 변화하게 된다.

Fig. 2. The Schroedinger's cat is alive and dead at the same time.

이렇게 고전역학과 양자역학은 서로 다른 가설들에 기반하고 있으며, 또한 고전측정과 양자 측정은 완전히 다른 특성을 가지고 있다. 그렇다면 "약한 측정"이란 무엇일까? 측정을 "약하게" 한다는 것은 무슨 뜻일까?

어떠한 물리량이 정확한 값으로 존재하고 그것을 변화시키지 않고 측정한다는 고전역학적인 측정의 관점에서 보면, 그 물리량의 값을 무한한 정확도로 알 수 있는 측정이 "이상적인 측정"이다. 이러한 이상적인 측정에 대한 반대 개념으로 "약한 측정"을 상상해보자. 그렇다면 그림 1과 같이 일부러 성긴 눈금의 자를 이용하여 지렁이의 길이를 측정하는 것을 약한 측정이라고 부를 수도 있을 것이다. 혹은 그림 3과 같이, 다이어트를 하는 많은 사람들이 한번쯤은 해 보았던 것처럼 실제의 물리량 (몸무게)보다 적은 물리량을 측정하는 것이 약한 측정으로 생각될 수도 있을 것이다. 그러나 이러한 측정은 제대로 된 의미의 약한 측정이 아니며, 사실 고전역학에는 약한 측정이라는 개념이 존재하지 않는다. 그 이유는 고전역학에서 측정이라는 행위가 하는 역할이 어떤 (알려지지 않은) 실제 값을 측정 장치를 이용해 작은 오류로 알아내는 것이기 때문이다. 즉, 고전역학에서는 측정이라는 행위가 입자의 상태를 변화시키지 않는 것을 가정하기 때문에 실재 값에는 변화가 생기지 않는다. 따라서 고전역학에서는 오직 좋은 측정[1)]과 나쁜 측정[2)]이 있을 뿐이다.

양자정보에서 쓰이는 "약한 측정"의 개념은 양자역학적 측정의 관점에서 제대로 이해할 수 있다. 양자역학에서의 측정에 대해 좀 더 자세히 알아보자(Box 2). 양자역학에서 측정 연산자의 기댓값은 확률이기 때문에, 양자역학의 측정이 반드시 만

1) 좋은 측정: 측정값들이 실재 값과 가깝고 측정값들의 편차가 작은 측정.
2) 나쁜 측정: 측정값들이 실재 값과 멀리 떨어져 있거나 측정값들의 편차가 큰 측정.

REFERENCES

[1] R. Shankar, *Principles of Quantum Mechanics* (2nd Ed) (Springer, 1994).

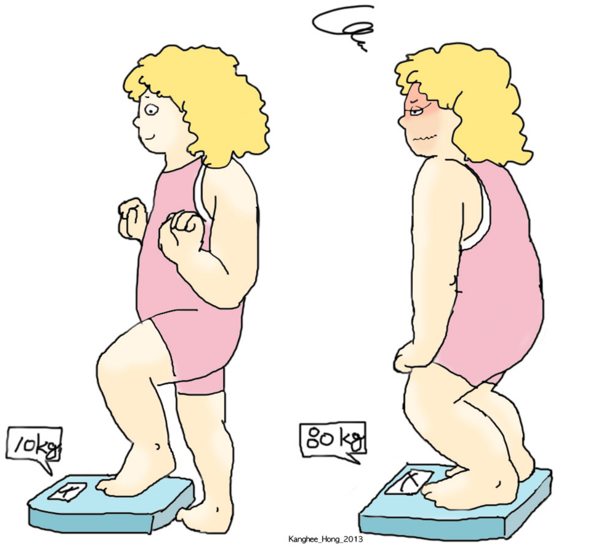


Fig. 3. "If I can just weakly measure my weight..." Unfortunately, in classical mechanics, weak measurement does not exist.

Box 2 투영 측정 vs 일반적인 측정

양자역학적 측정 ($\hat{E}_m = \hat{M}_m^{\dagger}\hat{M}_m$)이 실재하기 위해서 만족해야 하는 조건들이 있다. 양자역학에서는 측정에 대한 기대값이 '확률'이며, 이는 측정 가능한 물리량이므로 측정 연산자는 Hermiticity를 만족해야 한다 ($\hat{E}_m^{\dagger} = \hat{E}_m$). 또한 확률이 가지는 특성에 의해, 측정에 대한 기댓값은 항상 0과 같거나 혹은 0보다 큰 양수가 되어야 하고 ($\langle\psi|\hat{E}_m|\psi\rangle \geq 0$), 모든 확률의 합은 1이 되도록 측정은 Complete set이 되어야 한다 ($\sum_m \hat{E}_m = I$).[2]

이러한 조건을 만족하는 측정은 측정이 존재하기 위해 가져야 할 최소한의 조건들만 규정하기 때문에 일반적인 측정(generalized measurement)이다. 반면 양자역학적 투영 측정(projection measurement)은 각각의 측정이 서로에 대하여 수직한 특성을 가진다 ($\hat{M}_m^{\dagger} = \hat{M}_m$이고 $\hat{M}_m\hat{M}_n = 0$ if $m \neq n$).[3]

족해야 하는 조건들이 있다. 그 조건들은 측정의 기댓값, 즉 확률이 실수이며, 음수가 아니며, 그 합이 1이어야 한다는 것이다. 이러한 조건을 만족하는 측정을 일반적인 측정(generalized measurement)이라고 부른다.

그리고 이러한 일반적인 측정 중에 측정 연산자들이 서로 수직인 측정을 양자역학의 투영 측정(projection measurement)이라 하며, 투영 측정은 계의 양자상태를 반드시 측정 연산자의 서로 수직한 고유 상태 중 하나로 투영시킨다. 투영 측정을 통하면 계의 양자상태가 측정 연산자의 수직한 고유

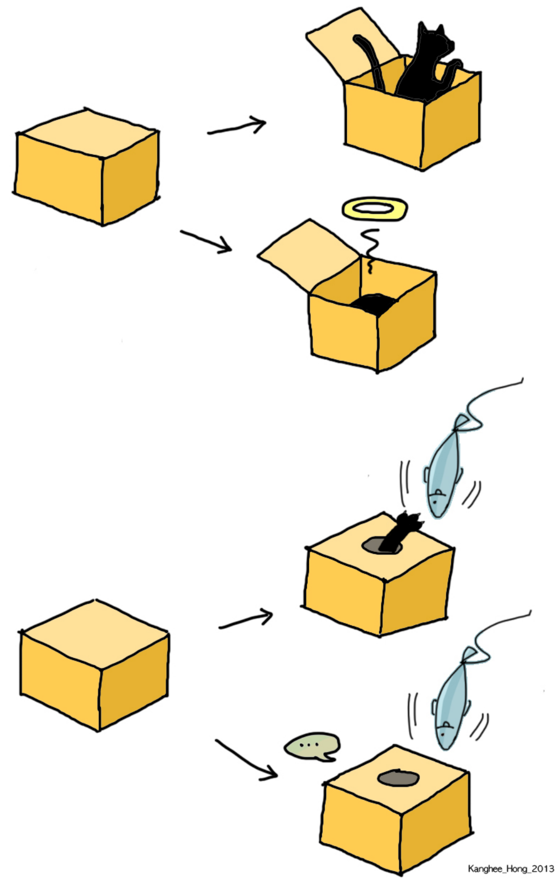


Fig. 4. Opening the Schroedinger cat box corresponds to the projection measurement. The outcomes are either the live cat or the dead cat. Waving the fish near the Schroedinger cat box corresponds to the weak measurement. One outcome is the live cat (projection measurement) but the other outcome (weak measurement) preserves the essence of the Schroedinger cat, the quantum superposition, as it is impossible to know whether the cat is dead or alive. Note that the weak quantum measurement can be reversed.

상태로 변화될 확률이 100%이기 때문에, 이를 강한 측정(strong measurement)이라 부른다.

그렇다면 측정 연산자의 어떤 고유 상태로 100%보다 낮은 확률로 양자상태를 변화시키는 측정, 즉 약한 측정은 어떤 특성을 가질까. 그림 2와 같은 단순한 슈뢰딩거의 고양이 상태를 가정하여 설명을 해 보자. 상자 안의 고양이는 살아있는 상태와 죽어있는 상태의 중첩으로 기술될 수 있다. 이때, 상자의 뚜껑을 열어본다면 (그림 4-위) 고양이가 살아있는 상태 혹은 죽어있는 상태로 완전히 투영되어 고양이의 생사를 100%

REFERENCES

[2] M. Nielsen and I. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge Univ. Press, 2000).

[3] S. M. Barnett and S. Croke, Adv. Opt. Photonics 1, 238 (2009).

확인할 수 있을 것이다. 즉 상자의 뚜껑을 여는 행위는 강한 측정에 해당된다.

한편, 고양이를 유혹하기 위해 생선을 상자 위에 흔들면 (그림 4-아래), 고양이가 손을 내밀 확률이 50%라고 하자. 그러면 생선을 흔드는 행위를 통해 두 가지 결과를 얻을 수 있다. 하나는 고양이가 손(또는 발)을 내미는 경우고 다른 하나는 손을 내밀지 않은 경우이다. 만일 고양이가 손을 내민다면, 관측자는 고양이가 살아있다고 100% 확신할 수 있다. 이 경우 삶과 죽음의 중첩 상태에 있던 고양이가 살아있는 고양이로 투영되었기 때문에 강한 측정 즉, 투영 측정에 해당한다.

그러나 고양이가 손을 내밀지 않는다면, 고양이가 죽어있을 가능성과 살아있지만 손을 내밀지 않을 가능성이 혼재하게 된다. 즉, 손을 내밀지 않은 경우 박스 안의 고양이는 죽어있는 상태와 살아있는 상태가 2:1 비율로 중첩된 상태로 변화한다. 이 경우 슈뢰딩거 고양이의 양자상태는 아래와 같이 적을 수 있다.

$$|cat'\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}(\sqrt{2}\,|dead\rangle + |alive\rangle).$$

이렇게 슈뢰딩거 고양이가 들어있는 상자에 생선을 흔들었을 때 고양이가 손을 내밀지 않은 경우와 같은 측정이 바로 약한 측정이다.

약한 측정은 일반적인 측정에 속하지만 측정 후 상태가 모두 수직한 고유상태로 가지 않기 때문에 투영 측정(강한 측정)은 아니다. 약한 측정의 수학적 정의와 보다 자세한 논의는 Box 3에 나타나 있다. 약한 측정은 여러 가지 흥미로운 특성들을 가지고 있으며 이러한 특성들이 약한 측정을 양자 정보에 이용할 수 있도록 만든다. 약한 측정의 여러 특성 중 매우 흥미로운 것은 약한 측정은 확률적으로 측정을 되돌릴 수 있다는 것이다.

확률적으로 측정을 되돌린다는 것은 무슨 의미일까? 이를 설명하기 위해 다시 슈뢰딩거 고양이의 약한 측정으로 돌아가 보자. 생선 흔들기를 통해 슈뢰딩거 고양이의 살아있는 상태에 대한 약한 측정을 했을 때, 생선 흔들기에 반응하지 않은 슈뢰딩거 고양이의 상태가 또 다른 중첩 상태 $|cat'\rangle$로 변화했다. 그렇다면 슈뢰딩거 고양이의 죽어있는 상태를 50% 확률로 알려주는 측정 장치를 이용해 새로운 약한 측정을 $|cat'\rangle$ 상태에 한다면 어떨까. 고양이가 죽어있다면 50%의 확률로 측정 장치가 결과를 주지만, 측정 장치가 아무런 결과를 주지 않았다면 고양이의 상태는 새로운 중첩 상태로 변화할 것이다. 그 새로운 중첩 상태는 다음과 같다.

$$|cat''\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|dead\rangle + |alive\rangle).$$

Box 3 약한 측정과 측정 되돌림

양자역학적 투영 측정은 양자상태를 서로 수직한 고유상태로 투영시키며 양자상태가 각 고유상태로 투영될 확률을 준다. 예를 들어 처음의 양자상태가 $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$로 주어진다고 하면, $|0\rangle$과 $|1\rangle$ 상태로의 투영 측정은 $\boldsymbol{P} = \hat{P}_0, \hat{P}_1\}$로 나타낼 수 있다. 이때, $\hat{P}_0 = |0\rangle\langle 0| = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$, $\hat{P}_1 = |1\rangle\langle 1| = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$이다. 투영 측정은 초기 상태를 모든 확률로 서로 수직한 고유상태로 투영시키기 때문에 '강한' 측정이며, 같은 이유로 수학적인 역연산자가 존재하지 않는다. 한편 일반적인 측정 $\boldsymbol{M} = \{\hat{\mathrm{M}}_{\mathrm{r}}\}$은 밀도함수 ρ로 주어진 초기상태를 $P_r(\rho) = Tr[\hat{M}_m \rho \hat{M}_m^{\dagger}]$의 확률로 최종상태 $\tilde{\rho} = \frac{\hat{M}_m \rho \hat{M}_m^{\dagger}}{Tr[\hat{M}_m \rho \hat{M}_m^{\dagger}]}$로 변화시킨다. 이때, 일반적으로 역연산자를 정의할 수 있다 ($R_r = c_r \hat{M}_r^{-1}$).

특히, 강한 투영 측정 대신 하나의 고유상태로 낮은 확률로 투영시키게 되면, 이를 '약한 측정(weak measurement)'이라고 부른다. 처음의 양자상태를 $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$로 가정하면, 하나의 측정을 원래의 측정보다 약하게 $\hat{M}_1 = \sqrt{p}\,|1\rangle\langle 1| = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{p} \end{pmatrix}$로 정의할 수 있다 ($p \leqq 1$). 그러면 다른 하나의 측정 연산자는 $\sum_m \hat{E}_m = I$ 조건에 의해 $\hat{M}_2 = |0\rangle\langle 0| + \sqrt{1-p}\,|1\rangle\langle 1| = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{1-p} \end{pmatrix}$로 결정된다. $\hat{M}_2$ 연산자는 수학적으로 역연산자 $\hat{M}_2^{-1} = \frac{1}{\sqrt{1-p}} \begin{pmatrix} \sqrt{1-p} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$가 존재하며, 이 역연산자를 물리적으로 구현해 측정을 되돌릴 수 있다. 단 이 과정에서 확률적으로 $\hat{M}_1$으로 투영되어 측정을 되돌릴 수 없는 경우가 존재하므로 측정을 되돌려 원래 초기 상태를 회복하는 성공 확률은 1보다 작다.[4-6]

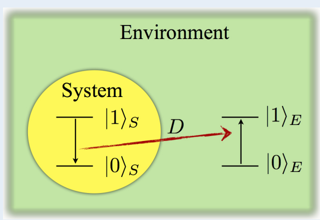
이 새로운 중첩상태는 놀랍게도 원래의 슈뢰딩거 고양이 상태와 같다! 조금만 더 생각을 해 본다면 독자들은 첫 약한 측정과 나중의 약한 측정 (이것을 되돌림 측정이라고 부른다)의 세기가 같았기 때문에 슈뢰딩거 고양이 상태가 원래대로 돌아왔다는 것을 눈치챌 수 있을 것이다. 또한, 이러한 측정 되돌림

REFERENCES

[4] M. Koashi and M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **82**, 2598 (1999).
[5] A. N. Korotkov and A. N. Jordan, Phys. Rev. Lett. **97**, 166805 (2006).
[6] Y.-S. Kim, Y.-W. Cho, Y.-S. Ra and Y.-H. Kim, Opt. Express **17**, 11978 (2009).

Box 4 약한 측정과 측정 되돌림을 이용한 결어긋남 극복과 양자정보 보호

결어긋남(decoherence)은 양자계가 결맞음(coherence)을 잃어버리는 현상을 의미하며 결맞음이 완전히 없어진 양자계는 양자정보처리에 이용할 수 없다. 결어긋남 현상 중 자연계에서 흔히 발견할 수 있는 것은 진폭 감쇠(amplitude damping)이다. 원자의 자발 방출(spontaneous emission), 진공-단일광자 큐빗(Qubit)의 광자 손실, 초전도체 큐빗의 zero-temperature 에너지 감쇠 등을 진폭 감쇠의 예로 들 수 있다[2]. 진폭 감쇠의 특징 중 하나는 양자계의 여기상태가 진폭 감쇠의 영향을 받으며, 바닥상태는 그 영향을 받지 않는다는 것이다.



한편, 강한 측정이 초기상태를 고유상태로 강하게 투영하는데 반해 약한 측정의 경우 고유상태로 '약하게' 투영한다. 예를 들어 약한 측정연산자 $\widehat{M_2}=\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & \sqrt{1-p}\end{pmatrix}$의 경우 상태를 바닥상태인 $|0\rangle$ 상태에 가깝게 '약하게' 투영하며, 이러한 측정 연산은 역연산자가 존재한다는 특징이 있다. 이러한 특징을 이용하면 진폭 감쇠 결어긋남이 작용하기 전에 양자상태를 결어긋남으로부터 자유로운 바닥상태에 가깝게 변화시켰다가 결어긋남 이후에 원래 상태로 되돌리는 것이 가능하다. 약한 측정의 세기 p를 늘려서 양자상태를 바닥상태에 가깝게 할수록 결어긋남의 효과를 줄여 초기 상태에 가깝게 회복하는 것이 가능하지만 반면에 성공 확률은 p가 커짐에 따라 줄어든다.[7,8]

Box 5 약한 측정을 이용한 양자 정보 및 얽힘 보호

양자역학의 지배를 받는 양자계에 결어긋남(decoherence)이 작용하면 양자적 특성을 상실하고 고전계로 전이된다. 이렇게 양자물리 특성에서 고전물리 특성으로 전이되는 과정은 흔히 단조적이고(monotonic) 점근적인(asymptotic) 현상으로 이해되고 있다. 그러나 일반적으로 양자-전이 과정은 보다 복잡한 양상을 보일 수 있다. 특히 여러 개의 입자로 구성된 양자계의 경우 양자-고전 전이가 비단조적인 양상을 보이는 경우를 찾을 수 있으며,[9] 서로 얽혀있는 두 개의 양자계에 대해서 양자 얽힘이 비점근적으로 사라지는 경우도 존재한다[10-12](Entanglement Sudden Death, ESD).

특히 양자정보 분야에 필수적인 자원인 양자 얽힘이 결어긋남에 대해 취약하기 때문에, 양자 얽힘을 결어긋남으로부터 효과적으로 보호하는 방법이 요구된다. 이때, 약한 측정이 초기 상태를 결어긋남의 영향이 없는 바닥상태에 가깝게 변화시킬 수 있다는 점, 그리고 약한 측정은 되돌릴 수 있다는 점을 이용하면 결어긋남 이전과 이후에 약한 측정과 되돌림 측정을 통해 양자 얽힘을 보호할 수 있다. 실제로 약한 측정의 세기에 따라 원래의 양자 얽힘 수준까지도 보호할 수 있다. 반면에 양자 얽힘을 더 잘 보호하려 할수록 보호에 성공할 확률은 줄어들게 되는 교환 관계가 있다.[13]

이 모든 초기상태에 대해서 적용된다는 것도 쉽게 알 수 있다. 즉, 약한 측정을 통해 변화한 양자상태는 또 다른 약한 측정을 이용해 원래의 양자상태로 되돌릴 수 있다. 하지만 강한 측정, 즉 투영 측정의 경우 이러한 측정 되돌림이 불가능하다.

물론 앞에서 언급한 바와 같이 약한 측정의 측정 되돌림 과정에서는 고양이가 생선에 반응하거나 측정 장치가 반응함으로 인해 측정 되돌림이 성공하지 못할 확률도 존재한다. 따라서 약한 측정의 되돌림은 확률적인 과정이다.

약한 측정의 또 다른 특성은 약한 측정이 초기 상태를 하나의 고유상태에 가까우면서도 결맞음이 유지되도록 변화시킨다는 사실이다. 슈뢰딩거 고양이의 $|cat'\rangle$ 상태를 보면, 초기상태보다 $|dead\rangle$ 상태에 가까우면서도 결맞음을 잘 유지하고 있는 상태이다.

이러한 약한 측정의 두 가지 특성을 이용하면 약한 측정을 양자 정보에 유용한 형태로 사용할 수 있다. 특히, 양자 정보가 구현되기 위해 반드시 극복해야 할 결어긋남 현상(decoherence)을 극복하는 데 약한 측정이 매우 효과적이다(Box 4). 결어긋남 현상 때문에 양자역학적 결맞음이 손상되면 양자역학적 특성들이 상실된다. 이렇게 양자 결맞음이 없는 물리계는 양자 정보학의 장점들이 없어지고 고전계와 같은 효과를 가지게 되기 때문

REFERENCES

[7] A. N. Korotkov and K. Keane, Phys. Rev. A **81**, 040103(R) (2010).
[8] J.-C. Lee, Y.-C. Jeong, Y.-S. Kim and Y.-H. Kim, Opt. Express **19**, 16309 (2011).
[9] Y.-S. Ra, M. C. Tichy, H.-T. Lim, O. Kwon, F. Mintert, A. Buchleitner and Y.-H. Kim, Proc. Natl. Acad. Sci. USA **110**, 1227 (2013).
[10] T. Yu and J. H. Eberly, Phys. Rev. Lett. **93**, 140404 (2004).
[11] T. Yu and J. H. Eberly, Science **323**, 598 (2009).
[12] M. P. Almeida, F. de Melo, M. Hor-Meyll, A. Salles, S. P. Walborn, P. H. Souto Ribeiro and L. Davidovich, Science **316**, 579 (2007).
[13] Y.-S. Kim, J.-C. Lee, O. Kwon and Y.-H. Kim, Nature Phys. **8**, 117 (2012).

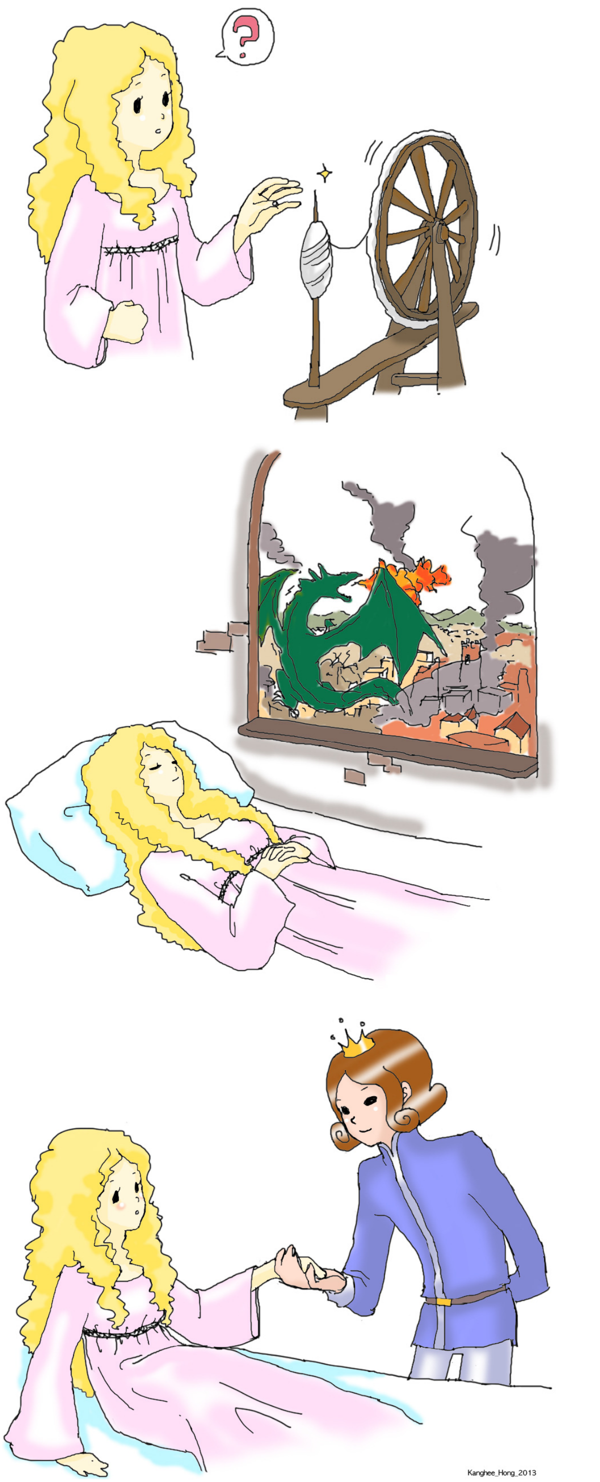


Fig. 5. The “sleeping beauty approach.” A beautiful princess (well, our quantum state) was lightly hurt (weak measurement) by the spindle, making her to fall asleep. She then sleeps through the disturbance (decoherence) without aging, after which she was awaken by a gentle kiss (reversing measurement) by a handsome prince.

에 결어긋남을 없애고 양자 결맞음을 유지하기 위한 연구들이 매우 중요한 분야로 발전하고 있다.

약한 측정의 특징들을 이용하면, 초기상태를 “결어긋남”과 같은 나쁜 효과가 잘 일어나지 않는 고유상태에 가깝게 변화시켜 ‘보관’ 했다가 나중에 측정 되돌림을 이용해 ‘되찾는’ 것이 가능하다. 이렇게 결어긋남 현상 전에 약한 측정을 하고, 이후에 되돌림 측정을 하면 약한 측정의 세기에 따라 원래의 초기 상태에 가깝게 회복할 수 있는 반면, 약한 측정의 확률적 특성에 의해 회복에 성공할 확률은 약한 측정의 세기에 따라 낮아진다.

특히 양자역학적 특성 중에 양자 정보학에 매우 중요하게 이용되는 ‘양자 얽힘’은 결어긋남에 매우 취약하다. 양자 얽힘은 때로 강하지 않은 결어긋남에 완전히 사라져버리는 특성을 보이기도 하며, 이를 양자 얽힘 급사(Entanglement sudden death, ESD)라고 부른다. 양자 얽힘 급사가 일어나 양자 얽힘이 사라지면 어떠한 국소적 작용을 통해서도 양자 얽힘을 회복할 수 없다. 하지만 약한 측정을 이용하면 양자 얽힘 급사 상황에서도 양자 얽힘을 보존할 수 있다(Box 5). 결어긋남이 작용하기 전에 약한 측정을 통해 결어긋남이 작동하지 않는 바닥상태에 가깝게 초기상태를 변화시킨 후, 결어긋남 이후에 되돌림 측정을 하여 원래의 초기상태를 회복하면 결어긋남의 효과를 줄여 양자 얽힘을 보존할 수 있다.

이렇게 약한 측정을 이용한 양자 상태 및 양자 얽힘 보존은 A. Korotkov가 Nature Physics지의 News and Views에 기고한 것과 같이[14] ‘잠자는 숲속의 공주’ 이야기를 생각하면 쉽게 이해할 수 있다 (그림 5). 잠자는 숲속의 공주 이야기에서 공주는 독이 발린 물레에 손이 찔려 오랜 잠에 들게 되는데, 나중에 왕자의 키스를 받고 잠에서 깨어난다. 마찬가지로 양자 상태(공주)는 약한 측정(물레)을 통해 바닥상태에 가까운 상태로(잠자는 상태) 변화해 결어긋남(괴물의 습격 혹은 노화?)에서 안전하게 보호되고, 이후에 되돌림 측정(왕자의 키스)을 통해 원래의 상태로 되돌아갈 수 있다!

이러한 양자 측정은 양자 정보 기술의 걸림돌인 결어긋남 현상으로부터 양자 얽힘이나 결맞음을 보호하는 새로운 방법이다. 흔히 양자 측정(강한 측정)은 양자 얽힘을 손상시키는 것으로 알려져 있는데, 보다 일반적인 측정을 이용하여 오히려 양자 얽힘을 보호하는 데 이용하는 발상의 전환이 새롭고 효과적인 방법을 낳았다. 약한 측정을 이용한 효율적인 양자 결맞음, 얽힘 보존 방법은 광자, 원자, 이온, 초전도체 등의 다양한 양자계에 적용가능하기 때문에 양자 통신이나 양자 컴퓨터 같은 양자 정보 과학에 높은 응용 가능성을 가지고 있다.

REFERENCES

[14] A. Korotkov, Nature Phys. 8, 107 (2012).