

# 양자 텔레포테이션(Quantum Teleportation)

노재우 · 김기식

인하대학교 물리학과  
인천광역시 남구 용현동 253

## 1. 서 론

텔레포테이션이란 원래 공상과학 영화나 소설에 나오는 가상적인 이야기로 물체나 사람을 우주의 한 장소에서 사라지게 한 후 멀리 떨어진 다른 장소에 나타나게 하는 이동수단, 또는 공간을 뛰어 넘는 물체 이동 그 자체를 말한다. 구체적으로는 대개의 경우 한 장소에서 물체나 사람을 기계장치를 통해 스캔하면서 분해하며 이 때 얻은 그 물체나 사람에 대한 모든 정보를 전자기파 등의 수단을 통해 다른 장소로 전달한 후 이 정보에 의해 그 물체나 사람의 완벽한 복제를 만들어 내는 것을 말한다. 여기에서, 세상의 모든 물체는 궁극적으로 원자로 구성되어 있으므로 원래의 물체를 구성하고 있던 재료(원자)를 전송시킬 필요는 없으며 다른 장소에 있는 재료(원자)를 통해 그 물체를 재구성할 수 있다는 것이 텔레포테이션의 기본적인 생각이다. 이러한 일종의 전송수단은 팩스나 전화 등과 비교할 수 있는데, 팩스의 경우에는 종이 면에 있는 글자 등의 정보를 스캔하여 이를 전기신호로 전송하고 이 정보를 받은 팩스 기계에서 종이를 탄소가루를 이용하여 복제품을 만들어 내는 것이며, 전화의 경우에는 소리(말하는 사람 쪽 공기의 진동)를 전기신호로 바꾸어 전달하고 이 신호를 받은 전화기에서 다시 소리(듣는 사람 쪽 공기의 진동)로 복제하는 것이라 볼 수 있다. 텔레포테이션은 3차원의 물체를 완벽하게 복제하는 것이며 원래의 물체는 스캔하는 과정에서 파괴된다는 점에서 팩스와 다르다. 물론 어떤 공상소설에서는 원래의 사람이 그대로 남아있고 다른 곳에 복제인간이 만들어지는 경우 생기는 복잡한 문제를 다루기도 하고, 또 이런 텔레포테이션 과정에서 그 사람의 정신이나 영혼이 변질되는 문제를 다루기도 하는 등 여러 가지 공상적인 이야기가 있지만, 과학적인 관점에서 팩스나 전화기 등과 비교하여 볼 때 물체를 텔레포트하는 것이 원리적으로 가능한가를 질문해 보는 것은 매우 흥미 있는 일이다.

이 질문에 대한 대답은, 몇 년 전까지는 당연히 “불가능하다”였으며, 그 이유로 두 가지를 들 수 있다. 첫 째는 사람과

같이 복잡하고 큰 물체의 경우 사람을 구성하는 각각의 원자에 대한 정보를 모두 알아내려면 최소한  $10^{32}$ 비트 이상의 정보가 필요하고 또한 사람을 구성하는 모든 원자를 스캔하면서 분해하려면 거의 무한대의 에너지가 필요하다는 것이다. 즉 실제적으로는 실현 불가능하다는 것이다. 그러나 원자 수준의 아주 작고 단순한 물체의 경우 이 논의는 적용되지 않는다. 두 번째는 보다 더 근본적으로 중요한 이유로, 텔레포테이션은 양자역학의 불확정성 원리에 위배된다는 것이다. 어떤 원자의 상태를 정확하게 알기 위해서는 그 상태를 나타내는 물리량들(위치, 운동량 등)을 모두 측정해야 하는데, 불확정성 원리에 의해 하나의 물리량을 정확하게 측정하면 그에 관계된 다른 물리량의 값이 완전히 불확실해지므로 결국 원자의 상태에 대한 모든 정보를 다 정확하게 알 수는 없다는 것이다. 다른 표현으로, 원자의 상태를 정확하게 복제하려면 일단 그 원자의 파동함수를 정확하게 알아야 되겠지만, 한 물리량을 측정하는 순간 파동함수는 변화하기 때문에(wavefunction reduction) 다른 물리량에 대한 정보를 잃어버리게 된다는 것이다. 또한 두 개의 상보적 물리량을 동시에 측정하는 것은 가능하지만 이 경우에는 필연적으로 측정 과정에서 불확실도가 증가하므로<sup>[1]</sup> 결국 원래의 원자 상태에 대한 모든 정보를 정확하게 알아내는 것은 원리적으로 불가능하다는 것이다.

이러한 논의를 통해서 두 가지 사실을 알 수 있다. 첫째로 텔레포테이션을 위해서 물체를 스캔하는 경우 이 물체의 상태는 측정에 의해 변화하므로 원자와 같은 단순한 물체의 경우에도 스캔 후 물체는 원래의 양자상태와 다른 상태에 놓이게 된다 - 즉 원래의 상태가 파괴된다는 것이다. 둘째로 측정할 때 생기는 불확실도의 증가에 의해서 복제된 물체는 원래의 물체와 완벽하게 같을 수 없다는 것이다. 그러나 팩스의 경우에도 전송된 문서는 보통 원래의 문서보다 질이 떨어지므로 이러한 질의 감소를 감수한다면 텔레포테이션은 가능하다고 볼 수도 있다. 다만 텔레포테이션의 원칙적인 한계로, 불확정성 원리 때문에 아무리 단순한 단일 입자라고 해도 완벽한 복제는 불가능하다는 것이다. 이 두 가지 사실에 대해서는 양자 텔레포테이션에

대한 논의에서 다시 언급될 것이다.

그러나 이와 같은 이유로 완벽한 텔레포테이션은 불가능하다는 일반적인 생각을 뒤집어 놓는 일이 수 년 전에 일어났다. Charles H. Bennett을 포함한 6명의 과학자들이 Physical Review Letter에 발표한 양자 텔레포테이션에 대한 논문이 그 발단인데 이 논문에서 이들은 원래의 물체가 파괴되며 완벽한 복제를 만드는 텔레포테이션이 양자역학적으로 가능하다는 것을 밝혀낸 것이다<sup>[2]</sup>. 이들의 제안은 양자역학 이론에서 잘 알려져 있는 Einstein-Podolsky-Rosen(EPR) 효과를 이용하는 것이다. 이들의 제안을 바탕으로 양자 텔레포테이션에 대해 간단히 설명하면, 먼저 입자 1의 양자상태를 다른 곳으로 텔레포테이션하기 위해서 얽힘상태(entangled state)에 있는 다른 두 입자(2와 3)를 사용한다. 입자 2와 입자 3은 완벽한 양자적 상관관계(quantum correlation)를 갖고 있다. 이 경우 두 입자의 상태는 하나의 파동함수로 표현된다. 이제 텔레포테이션을 위해서 사람 A는 입자 1을 입자 2와 상호작용 하게 한 후에 하나의 물리량을 측정한다. 이 과정에서 물체 1의 상태는 파괴된다. 이 측정결과는 전기신호 전달 등의 고전적인 방법을 통하여 다른 장소에 있는 사람 B에게 전달된다. 한편 입자 1과 입자 2의 상호작용 결과에 대한 정보는 입자 2와 얽힘상태에 있는 입자 3 의해 사람 B의 위치로 전달된다. 사람 B는 측정결과에 대한 정보를 가지고 자신이 받은 입자 3에 적절한 작용을 가한다. 그 결과 입자 3은 입자 1의 원래 양자상태와 같은 양자상태에 놓이게 된다. 물론 입자 1과 입자 3은 같은 물리량(예를 들면 스핀)들로 그 상태가 결정되는 입자들이어야 하며 원래 입자 1의 양자상태가 정확하게 입자 3에 복제되는 것이다. 그림 1에 이와 같은 과정을 간단히 나타내었다. 그림에 나타난 것처럼 양자 텔레포테이션을 위해서는 사람 A의 측정결과를 전달하는 고전적인 정보전달 채널과 얽힘상태를 이용해 상호작용의 결과에 대한 양자적 정보를 전달하는 양자적 채널이 필요하다.

## 2. EPR 효과와 얽힘상태

양자 텔레포테이션을 이해하기 위해서는 먼저 양자적 채널을 가능하게 하는 EPR 효과에 대한 지식이 필요하다. 아인슈타인과 그의 동료들은 1935년에 양자역학 이론이 불완전하다는 것을 보이기 위한 목적으로 하나의 사고실험을 제안했는데<sup>[3]</sup>, 예를 들어 두 개의 입자가 스핀 단일항상태(singlet state)로 생성되어 서로 반대방향으로 진행하는 경우 두 입자의 스핀은 서로 반대방향을 갖는 것으로 측정된다(그림 2a). 양자역학의 원리에 의하면 측정되기 전에 한 입자의 스핀 상태는 정확히 결정되어 있지 않다. 다만 스핀 값에 대한 확률만이 있을 뿐

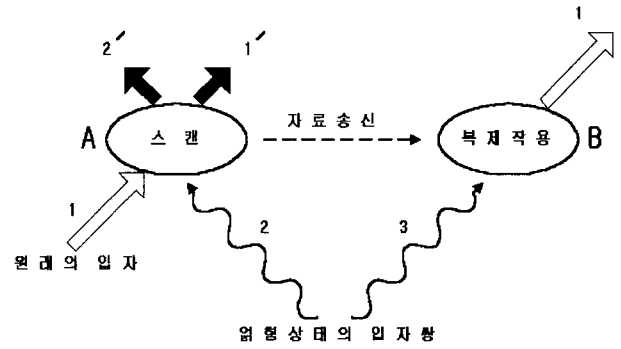


그림 1. 양자 텔레포테이션의 기본 아이디어에 대한 간단한 설명.

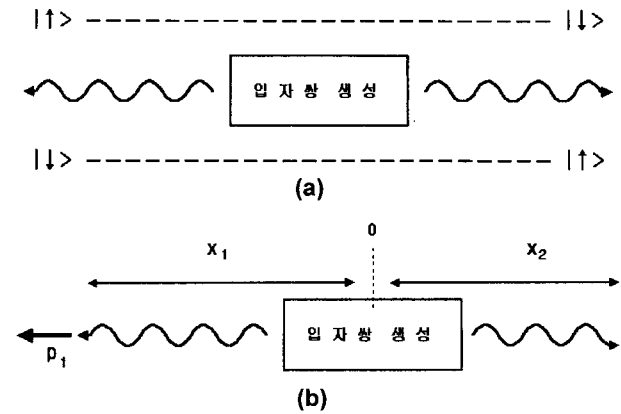


그림 2. EPR 효과에 대한 설명.

- (a) 한 입자의 스핀 상태가 위 또는 아래 상태인 경우 얽힘 상태에 있는 다른 입자의 상태는 아래 또는 위 상태이다.
- (b) 한 입자의 위치, 운동량은 얽힘 상태에 있는 다른 입자의 위치, 운동량과 크기가 같고 방향이 반대이다.

이다. 그러나 한 입자의 스핀을 측정하여 만약  $+1/2\hbar$ 의 값을 얻었다고 하면 이 순간과 그 이후에 이 입자의 스핀 상태는 위(up)상태로 결정된다. 이 때 공간적으로 멀리 떨어져 있는 다른 입자의 스핀상태는 그 순간  $-1/2\hbar$ 의 스핀 값을 갖는 아래(down)상태로 결정되어야 한다. 아인슈타인과 그 동료들의 질문은 어떻게 공간적으로 멀리 떨어진 다른 입자에게 한 입자의 스핀이 측정되어 결정되었다는 정보가 순간적으로 전달될 수 있는가 하는 것이다. 이는 물리적인 정보의 전달이 빛의 속도보다 빠를 수 없다는 상대성원리에 위반되며 따라서 양자역학 이론이 불완전하다는 근거라고 아인슈타인과 그 동료들은 주장하였다. 이를 EPR 역설이라고도 한다.

EPR 역설에 대한 다른 표현으로, 스핀과 같이 불연속적인 값을 갖는 물리량이 아니라 연속적인 값을 갖는 위치와 운동량에 대한 측정에 대해서 살펴보자. 그림 2b는 두 개의 입자가 총운동량이 0인 상태로 출발하여 서로 반대방향으로 등속도운동을 하고 있는 상황을 나타낸다. 두 입자의 질량이 같은 경우 두 입자의 상관관계를 식으로 나타내면

$$x_1 + x_2 = 0, \quad p_1 - p_2 = 0 \quad (1)$$

이다. 따라서 어떤 순간  $t$ 에 왼쪽 입자의 위치를 정확히 측정하면 그 순간 오른쪽 입자의 위치를 계산할 수 있다. 또한 같은 순간에 오른쪽 입자의 운동량을 정확히 측정하면 그 순간 왼쪽 입자의 운동량을 계산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 어떤 한 순간에 한 입자의 위치와 운동량을 모두 정확히 알 수 있다면 이는 양자역학의 불확정성 원리에 위반된다. 그러나 이러한 논의는 한 입자에 대한 측정결과가 다른 입자에게 영향을 미치지 않는다는 가정 하에서 성립된다. 양자역학의 이론에 의하면 위와 같은 상관관계를 갖는 두 입자는 하나의 양자적 상태 즉 얽힘상태를 형성하며 이 때 두 입자의 양자적 상태는 하나의 파동함수로 결정된다. 두 입자가 공간적으로 멀리 떨어져도 마찬가지이다. 따라서 얽힘상태에 있는 한 입자의 위치와 다른 입자의 운동량을 동시에 측정한다는 것은 한 입자의 위치와 운동량을 동시에 측정하는 것과 같다. 결국 EPR 역설에 대한 문제는 측정에 대한 인과관계(causality)와 국소성(locality)의 문제로 귀착된다. 즉 공간적으로 멀리 떨어진 두 입자의 상태가 하나의 파동함수로 기술된다면 어떤 한 순간에 측정에 의해서 한 입자의 상태가 결정될 때 다른 입자의 상태도 동시에 결정되어야 한다는 것이 양자역학의 이론이고, 이는 아인슈타인 등이 주장하는 것처럼 물체간의 상호작용(측정)은 국소적으로 일어나고 그 결과에 대한 정보는 빛의 속도보다 빠르게 전달될 수 없다는 생각과 정면으로 반대되는 것이다. 이 문제는 지난 60여 년 동안 많은 물리학자들의 관심 대상이었으며 1964년 J. S. Bell에 의해 벨의 부등식이 발표된 후에 EPR 역설에 대한 직접적인 실험이 가능하다는 것이 알려졌고<sup>[4]</sup>, 최근에 와서 양자광학을 이용한 여러 실험결과들이 발표되었다. 결과적으로 여러 실험결과들은 양자역학 이론이 옳다는 것을 입증하였다. 양자역학은 위의 논의에 따르면 비국소적(nonlocal) 이론이다. 어떤 입자들의 상태가 양자적 상관관계를 갖는 얽힘상태로 만들어진 경우 측정이나 다른 물체와의 상호작용에 의해서 한 입자의 상태가 결정되면 얽힘상태에 있는 다른 입자의 상태는 그와 동시에 결정된다. 즉 다른 입자는 상호작용을 한 입자의 정보를 갖게 되는 것이다. 이를 EPR 효과라고 한다. 이 것은 더 이상 역설이 아닌, 실험으로 증명된 효과인 것이다. 얽힘상태에 있는 두 입자는 광매개하향변환(optical parametric down conversion) 등에 의해 생성할 수 있다.

### 3. 스핀의 양자 텔레포테이션

스핀 상태의 양자 텔레포테이션의 이론을 구체적으로 알아

보자. 사람 A는 양자상태  $|\phi\rangle$ 에 있는 한 입자를 갖고 있으며 이 입자에 대한 모든 정보를 사람 B에게 전달하려 한다. 입자 자체를 보내는 것이 가장 쉬운 방법이지만 그 것이 가능하지 않다면, 다른 방법으로 먼저 초기에 양자상태  $|a_0\rangle$ 에 있던 다른 보조적인 물리계(전달자, 또는 ancilla)와 이 입자를 유니타리 상호작용 하게 한다. 양자상태  $|a_0\rangle$ 는 이미 알고 있는 고유상태로 가정한다. 상호작용 이후에 입자의 상태는 어떤 고유상태  $|\phi_0\rangle$ 에 있게 되고 전달자는 알 수 없는 상태  $|a\rangle$ 에 놓이며, 상호작용의 결과로 이 전달자는 원래 입자의 상태  $|\phi\rangle$ 에 대한 정보를 갖고 있게 된다. 사람 A는 이 전달자를 사람 B에게 보내면서 전달자의 초기상태  $|a_0\rangle$ 와 이 전달자가 거친 상호작용의 내용 등의 정보를 사람 B에게 다른 방법으로 알려준다. 사람 B는 이에 따라 사람 A가 하였던 유니타리 상호작용의 역작용을 가한다. 그 결과 사람 B는 사람 A가 갖고 있던 입자의 상태를 복제하게 된다. 사람 A가 갖고 있던 입자의 최종상태  $|\phi_0\rangle$ 를 알기 위해 다시 측정을 해야 한다면, 그리고 어떤 측정을 해야 할 지를 미리 알 수 없다면 이와 같은 방법은 불완전하다. 그러나 이 방법은 실제적인 스핀계에서 스핀교환측정에 해당되는 설명이며<sup>[5]</sup> 양자적 정보의 전달에 대한 기본적인 사실을 보여준다. 즉, 양자적 정보는 고전적 정보(팩스 기계에서 스캔한 데이터)처럼 저장하거나 여러 번 복제하는 것이 가능하지 않으며 또한 정보전달과정에서 원래 입자의 상태가 변화하기 때문에 원래의 입자를 남겨둔 상태의 복제(copy 또는 cloning)가 아니라는 것이다.

좀 더 발전된 방법으로, EPR 효과를 이용하기 위해서 스핀이 1/2인 두 입자를 단일항상태로 만들어 낸 경우를 생각하자. 이 때 두 입자의 상태는

$$|\Psi_{23}^{\pm}\rangle = \sqrt{\frac{1}{2}} (|\uparrow_2\rangle |\downarrow_3\rangle - |\downarrow_2\rangle |\uparrow_3\rangle). \quad (2)$$

로 표시된다. 여기에서 2와 3은 얽힘상태에 있는 각각의 스핀이 1/2인 입자를 나타내며 입자 2는 사람 A에게 전달되고 입자 3은 사람 B에게 전달된다. 사람 A가 갖고 있는 같은 종류의 스핀이 1/2인 입자 1과 이 단일항상태의 입자들은 상호작용을 하기 전에는 서로 독립적인 상태에 있다. 따라서 세 입자의 전체 상태는  $|\phi_1\rangle |\Psi_{23}^{\pm}\rangle$ 이며 상호작용이 있기 전에는 입자 1의 정보가 입자 2나 3에 전달되지 않는다. 이제 상호작용을 일으키기 위해서 사람 A는 입자 1과 입자 2의 스핀에 대한 결합측정(joint measurement)을 가한다<sup>[6]</sup>. 이 측정은 벨 연산자를 통한 측정이며<sup>[7]</sup> 측정 연산자에 대한 고유상태, 즉 측정결과를 다음의 네 가지 상태중 하나이다.

$$|\Psi_{12}^{\pm}\rangle = \sqrt{\frac{1}{2}} (|\uparrow_1\rangle |\downarrow_2\rangle \pm |\downarrow_1\rangle |\uparrow_2\rangle), \quad (3a)$$

$$|\Phi_{12}^{(\pm)}\rangle = \sqrt{\frac{1}{2}} (|\uparrow_1\rangle|\uparrow_2\rangle \pm |\downarrow_1\rangle|\downarrow_2\rangle). \quad (3b)$$

이 네 가지 상태는 입자 1과 입자 2에 대한 완전한 직교맞춤 기저(orthonormal basis)를 형성한다.

편의상 입자 1의 원래 상태를 다음과 같이 표시한다.

$$|\phi_1\rangle = a|\uparrow_1\rangle + b|\downarrow_1\rangle. \quad (4)$$

여기에서  $|a|^2 + |b|^2 = 1$ 이다. 이에 따라 측정 전의 세 입자 1, 2, 3의 상태는 다음과 같다.

$$|\Psi_{123}\rangle = \frac{a}{\sqrt{2}} (|\uparrow_1\rangle|\uparrow_2\rangle|\downarrow_3\rangle - |\uparrow_1\rangle|\downarrow_2\rangle|\uparrow_3\rangle) + \frac{b}{\sqrt{2}} (|\downarrow_1\rangle|\uparrow_2\rangle|\downarrow_3\rangle - |\downarrow_1\rangle|\downarrow_2\rangle|\uparrow_3\rangle). \quad (5)$$

이제 (3)식을 이용하여 (5)식을 바꾸어 쓰면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$|\Psi_{123}\rangle = \frac{1}{2} [ |\Psi_{12}^{(+)}\rangle(-a|\uparrow_3\rangle - b|\downarrow_3\rangle) + |\Psi_{12}^{(-)}\rangle(-a|\uparrow_3\rangle + b|\downarrow_3\rangle) + |\Phi_{12}^{(+)}\rangle(a|\downarrow_3\rangle + b|\uparrow_3\rangle) + |\Phi_{12}^{(-)}\rangle(a|\downarrow_3\rangle - b|\uparrow_3\rangle) ]. \quad (6)$$

이 결과가 의미하는 것은, 입자 1의 원래 상태에 관계없이 벨 연산자를 이용한 네 가지 측정의 결과는 같은 확률 1/4을 갖는다는 것이다. 또한 측정결과에 따라 입자 3의 상태는 (6)식에서 ( ) 안에 있는 네 가지 순수상태 중 하나로 결정된다는 것이다. 이는 물론 EPR 효과에 의한 것이며 양자 텔레포테이션의 중요한 원리이다.

이 네 가지 상태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$|\phi_3\rangle \equiv \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = a|\uparrow_3\rangle + b|\downarrow_3\rangle \text{로 정의할 때}$$

$$-|\phi_3\rangle, \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}|\phi_3\rangle, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}|\phi_3\rangle, \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}|\phi_3\rangle. \quad (7)$$

이 네 가지의 상태는 모두 사람 A가 갖고 있던 입자의 상태  $|\phi_1\rangle$ 과 단순한 유니타리 변환 관계를 갖는다. 따라서 사람 B는 사람 A의 측정결과를 고전적인 채널을 통해 전달받은 후 이에 따라 적절한 작용을 입자 3에 가하면 사람 A가 갖고 있던 입자 1의 상태를 얻을 수 있다. 만약 사람 A의 측정결과가  $|\Psi_{12}^{(-)}\rangle$ 였다면 사람 B는 아무 일도 할 필요가 없다. 파동함수의 -부호는  $\pi$ 의 위상에 해당하며 파동함수의 위상은 물리적

으로는 의미가 없기 때문이다. 다른 세 결과에 대해서는 사람 B는 각각의 경우에 해당하는 유니타리 역변환을 해주면 된다. 이 변환은 각각 z, x, 그리고 y 축에 대한  $180^\circ$  회전에 해당되는 변환이다. 사람 B는 이 결과 사람 A가 갖고 있던 입자의 복제를 얻게 되며 사람 A는 결합측정의 결과로 입자 1과 입자 2가  $|\Psi_{12}^{(\pm)}\rangle$ , 또는  $|\Phi_{12}^{(\pm)}\rangle$ 의 상태에 있게 되어 원래의 입자 1의 상태를 완전히 잃어버리게 된다.

결국 양자 텔레포테이션은 사람 A의 스핀 결합측정 결과를 전달하는 고전적인 채널과 EPR 효과에 의한 양자적 정보전달 채널의 두 채널에 의해 완성된다. 여기에서 주목할 점은 입자 1의 상태를 텔레포트하는 과정에서 입자 1의 상태를 직접적으로 측정하지 않는다는 점이다. 사람 A는 입자 1과 입자 2에 대한 결합측정결과를 알게 될 뿐이며 측정결과 입자 1과 입자 2는 (3)식에 나타난 중첩상태 중 하나의 상태에 놓이게 된다. 즉, 다른 말로 표현하면 입자 1의 양자상태에 대한 직접적인 측정을 하지 않음으로 해서 불확정성 원리에 의한 입자 1의 상태의 파괴를 회피하며 양자적인 채널을 통해 입자 1의 상태가 전달될 수 있는 것이라고 볼 수 있다. 중요한 사실은 이와 같은 과정을 통해서 스핀 상태의 완벽한 복제, 즉 완전한 텔레포테이션이 가능하다는 것이다. 이와 같은 양자 텔레포테이션은 순수상태의 스핀이 아닌 혼합상태의 스핀에 대해서도 가능하며 텔레포테이션의 부산물로 저장이나 여러 번 복사가 가능한 고전적인 2 비트의 정보가 남게 된다<sup>[2]</sup>.

#### 4. 연속적인 양자변수의 텔레포테이션

만약 양자 텔레포테이션이 스핀 1/2을 갖는 단순한 물체에 대해서만 가능하다면 학문적으로는 흥미로울지 모르나 실제적인 응용가능성은 매우 제한될 것이다. 또한 금속덩어리나 화초 같은 물체의 텔레포테이션은 또 다른 문제로 남아있게 될 것이다. 그러나 최근 몇 년 사이에 입자의 위치와 운동량 등의 연속적인 값을 갖는 양자 변수에 대한 양자 텔레포테이션이 가능하다는 사실이 밝혀짐으로 해서<sup>[8,9]</sup> 이 분야의 연구는 급속히 활발해졌으며 여러 실험 연구결과도 발표되고 있다.

연속적인 변수인 위치나 운동량의 텔레포테이션을 쉽게 이해하기 위해서 (1)식과 같은 형태의 상관관계를 갖는 두 입자를 생각해 보자. 위치, 운동량의 경우에도 결국 중요한 것은 얽힘상태에 있는 두 입자 사이에는 비국소적인 상관관계가 존재하므로 한 입자의 물리량에 대한 측정이 다른 입자에게 바로 영향을 미친다는 사실(EPR 효과)이다. 따라서 연속적인 값을 갖는 위치와 운동량의 경우에도 양자 텔레포테이션이 가능함을 쉽게 짐작할 수 있다. 그림 3에 연속적인 변수의 양자 텔레

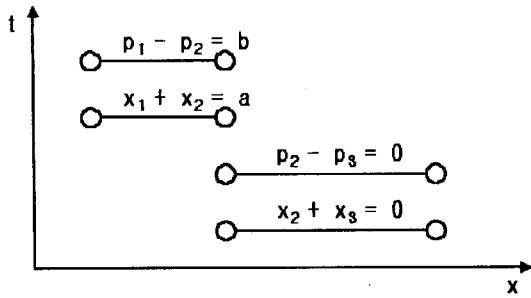


그림 3. 연속적인 변수의 양자 텔레포테이션. 입자 1과 입자 2에 대한 결합측정은 입자 2와 얽힘 상태에 있는 입자 3의 상태에 영향을 미친다.

포테이션에 대한 상황을 나타내었다<sup>[8]</sup>. 입자 2와 입자 3은 얽힘상태로 만들어지며 두 입자 사이의 상관관계는 다음과 같다.

$$x_2 + x_3 = 0, \quad p_2 - p_3 = 0. \quad (8)$$

이제 사람 A가 입자 1과 입자 2에 대한 위치와 운동량의 결합 측정을 연속적으로 시행하여 다음과 같은 결과를 얻었다고 하자.

$$x_1 + x_2 = a, \quad p_1 - p_2 = b. \quad (9)$$

(참고로, 운동량은 시간적 간격을 두고 연속적으로 입자의 위치를 측정하여 알 수 있다<sup>[10]</sup>. 즉  $x_1(t_2) - x_1(t_1) = (p_1/m_1)(t_2 - t_1)$ .)

이러한 측정의 결과는 입자 2와 얽힘상태에 있는 입자 3의 위치와 운동량에 변화를 일으킨다. (8)식과 (9)식을 통하여 연계 되는 입자 3의 위치와 운동량은 다음과 같다.

$$x_3 = x_1 - a, \quad p_3 = p_1 - b. \quad (10)$$

따라서, 만약 입자 1의 처음 양자상태가  $\Psi(x_1)$ 이었다면 사람 A가 측정한 후 입자 3의 상태는 다음과 같다<sup>[8]</sup>.

$$\Psi(x_3) = \exp(ibx_3) \Psi(x_1 + a). \quad (11)$$

사람 B는 위치와 운동량에 대한 적절한 역변환을 (back shift) 하여 입자 1의 상태를 얻을 수 있다.

이와 같은 이론은 상당히 추상적이다. 좀 더 실제적인 경우로, 광정보 통신 등에 응용 가능한 빛의 양자 텔레포테이션에 대한 이론이 발표되었다<sup>[9]</sup>. 이 경우 얽힘상태로는 빛의 쥘상태 (squeezed state)를 택하고 위치와 운동량에 해당되는 변수는 빛 신호의 두 진폭성분(quadrature amplitudes)이다<sup>[11]</sup>. 이 때 사람 A와 사람 B에게 전달되는 빛의 쥘상태는 다음과 같은 위그너함수로 기술된다<sup>[6]</sup>.

$$W_{EPR}(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{4}{\pi^2} \exp\{-e^{-2r} [(x_2 - x_3)^2 + (p_2 + p_3)^2]\}$$

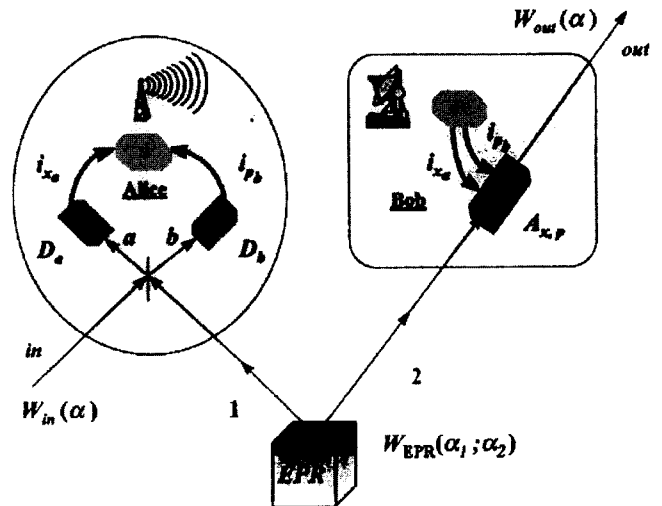


그림 4. Braunstein과 Kimble의 광신호 양자 텔레포테이션에 대한 제안. 실제로 이와 비슷한 형태의 실험장치를 통해 양자 텔레포테이션의 실험이 성공적으로 수행되었다<sup>[15]</sup>.

$$-e^{+2r} [(x_2 + x_3)^2 + (p_2 - p_3)^2] \\ \rightarrow C \delta(x_2 + x_3) \delta(p_2 - p_3), \quad r \rightarrow \infty. \quad (12)$$

여기에서  $\alpha_i = x_i + ip_i$ 이며  $x_i$ 와  $p_i$ 는 빛의 두 진폭성분이다. 쥘상태가 매우 강한 경우( $r \rightarrow \infty$ ), 위그너함수는 (8)식과 같은 형태의 완전한 양자적 상관관계가 성립함을 보여준다. 양자 텔레포테이션을 위해서 첫 단계로 사람 A는 위그너함수가  $W_{in}(\alpha)$ 인 신호 빛과 쥘상태의 빛을 50/50의 살다발 가르개 (beam splitter)를 이용해 중첩시킨다(그림 4). 이에 의해 중첩된 빛의 두 진폭성분인  $1/\sqrt{2}(x_{in} + x_2)$ 와  $1/\sqrt{2}(p_{in} + p_2)$ 의 측정이 가능하게 된다. 두 번째로 측정 방법은 통상적인 호모다인 검출방법을 사용하며 사람 A는 측정결과인 광 검출기의 출력 전류신호  $i_a$ 와  $i_b$ 를 사람 B에게 고전적인 채널을 통해 송신한다. 마지막 단계로 이 측정결과를 받은 사람 B는 자신이 받은 얽힘상태에 있는 빛에 적절한 선형 작용을 가하여 원래의 빛 신호를 복제해 낸다. 선형 작용은 광전자 소자 등을 이용하여 현재의 기술로 쉽게 할 수 있는 작용이다. 이러한 과정을 통하여 얻은 빛의 상태  $W_{out}(\alpha)$ 는 원래의 빛과 다음의 관계를 갖는다.

$$W_{out} = W_{in} \circ G_\sigma \quad (13)$$

여기에서  $\circ$ 은 포선(convolution)을 나타내며  $G_\sigma$ 는 분산  $\sigma = e^{-2r}$ 을 갖는 가우시안 함수이고 쥘상태 빛의 특성에 의해 결정되는 함수이다.  $r \rightarrow \infty$ 일 때 분산은 0이며 완벽한 양자 텔레포테이션이 가능하다.

이러한 방법에 대한 이론에서 몇 가지 흥미로운 결과를 볼 수 있다. 첫 째는 양자 텔레포테이션의 응용분야로 물체의 복제 뿐 아니라 빛 신호의 정확한 전달도 가능하다는 것이다. 이

는 서론에서 텔레포테이션과 전화에 의한 소리신호의 전달을 비교한 것을 생각하면 쉽게 이해된다. 두 번 째로 서론에서 언급한 완전하지 않은 텔레포테이션에 대한 정량적인 이론이 이 경우 자연스럽게 성립된다는 것이다. 쥘상태가 완전하지 않은 경우 텔레포테이션에 의한 빛 신호의 복제는 완전하지 않으며 그 정도는 분산  $\sigma$ 의 값에 따라 결정된다. 광 검출기의 양자효율을 포함한 보다 일반적인 경우 양자효율의 저하에 대한 효과는 (13)식에서 가우시안 함수의 분산 값의 증가로 나타난다. 신호복제의 충실도(fidelity) 역시 자연스러운 형태로 정의되며 충실도의 값은 원래의 빛 신호를 나타내는 특성함수와 이 가우시안 함수에 의해 결정된다. 세 번째로  $r \rightarrow 0$ 인 경우에는 쥘상태의 빛이 실현되지 않은 경우로 쥘상태의 빛이 아닌 고전적인 결맞음 빛을 사용하는 경우와 같다. 이 경우는 양자적 채널이 전혀 기능을 발휘하지 못하는 경우인데 이 때에도 사람 B가 얻는 출력의 상태  $W_{out}$ 은 원래 빛 신호의 상태  $W_{in}$ 과 닮은 형태를 보인다. 단 이 경우 출력의 상태는 측정과정 및 측정결과 전달과 이에 따른 사람 B의 선행변환의 과정에서 발생하는 두 가지의 잡음이 추가된 형태로 나타나게 된다. 이 이론은 양자 텔레포테이션을 광 통신 등에 응용할 수 있는 가능성을 보여준다. 통상적인 광통신의 경우 광 신호의 송신, 증폭, 재 송신 등의 과정을 거치는 동안 광 손실과 증폭에 수반되는 잡음이 불가피하게 광 신호에 영향을 미치게 된다. 이 이론의 결과는 고전적인 채널만을 이용하는 현재까지의 광통신 신호전달 방법에 비해 양자적 채널을 이용하는 양자 텔레포테이션의 방법이 쥘상태의 정도가 높지 않은 경우에도 더 우수하다는 것을 말해 준다.

## 5. 양자 텔레포테이션에 대한 실험

양자 텔레포테이션에 대한 실험이 가능한가는 실용적인 측면에서 중요하다. 현재까지는 이 분야에 대한 실험은 초기 단계에 있으나 몇 가지의 중요한 실험결과가 최근에 발표되었다. 먼저, 완벽한 양자적 상관관계를 갖는 빛의 상태는 광매개하향 변환에 의해 비교적 쉽게 얻을 수 있으며 이를 이용하여 빛의 편광상태를 텔레포테이션하는 실험결과가 두 가지 발표되었다<sup>[12,13]</sup>. 이 실험들은 비교적 간단한 실험장치 구성에 의한 것들이며 빛의 편광상태의 전달이 양자적 채널에 의해 가능하다는 것을 보여주는 실험들이다. 즉 양자 텔레포테이션 원리에 대한 실험적 증명이라고 볼 수 있다. 이 실험들에서는 그러나 편광상태를 복제하는 과정이 완성되지는 않고 다만 원리의 확인 단계에서 머무른 결과를 보여준다. 그러나 이와 다른 하나의 최근 실험에서는 액체상태 핵자기공명을 이용하여 TCE

(Trichloroethylene) 분자를 구성하는 탄소 핵의 양자 상태를 수소 핵에 복제하는데 성공하였다<sup>[14]</sup>. 이 실험은 양자적 채널의 존재와 그 효과를 보여주는데 그치지 않고 적절한 역작용을 통해 복제가 완성되는 것을 보여준 실험으로 볼 수 있다. 단 이 경우 원래의 분자와 복제된 분자의 거리는 1 nm 이하이다. 따라서 이 실험결과 역시 양자 텔레포테이션의 원리 확인에 해당하는 실험이라고 볼 수밖에 없다.

양자 텔레포테이션에 대한 하나의 의문점으로 제기될 수 있는 것은 사람 A가 갖고 있던 입자 1의 원래 양자 상태를 정확히 알지 못한다면 텔레포테이션된 입자의 양자 상태가 원래의 양자 상태와 얼마나 가까운가를 어떻게 확인하는가 하는 점이다. 이미 언급한 것처럼 참고문헌 9에서는 텔레포테이션의 충실도를 이론적으로 제시하였다. 실험을 통해서 이를 확인하는 방법으로, 사람 C를 추가하여 사람 C가 먼저 사람 A에게 결맞음 상태의 빛을 제공하고 사람 A에게서 사람 B에게 이 빛을 텔레포테이션 한 다음, 이 빛을 다시 사람 C가 받아서 검사함으로써 충실도를 확인하는 실험이 수행되었다<sup>[15]</sup>. 실험의 방법으로는 광매개진동자(optical parametric oscillator)에서 생성되는 빛을 얽힘상태의 전달자로 사용하였으며 결맞음 빛의 진폭과 분산을 빛 신호로 설정하고 참고문헌 9에서 제시한 것처럼 호모다인 검출 결과를 이용해 양자 텔레포테이션을 수행하였다. 광매개진동자에서 생성되는 두 빛은 양자적 상관관계가 광매개하향변환에 의해 생성되는 빛의 경우보다 낮은 편이나 그 대신 mW 정도의 높은 빛 세기를 갖는다. 통상적인 광통신의 경우처럼 고전적인 채널만을 통하여 빛 신호를 전달하는 경우 빛 신호 복제의 충실도는 0.5를 넘을 수 없다. 이 실험의 결과 얻어진 충실도는  $0.58 \pm 0.02$ 였으며 광매개진동자에서 생성된 빛의 양자적 상관관계가 높지 못한 점을 감안한다면 훌륭한 결과로 볼 수 있다. 이 실험은 결국 원래의 빛 상태와 텔레포테이션된 빛 상태를 확인함으로써 양자 텔레포테이션 실험을 완전한 형태로 수행하였고 또한 얽힘상태의 전달자가 완벽하지 못해도 통상적인 광통신의 경우보다 우수한 빛 신호의 전송이 가능하다는 것을 보인 실험이다.

## 6. 앞으로의 전망 - 광통신과 양자정보 기술

4절에서 소개한 이론과 5절에 소개한 실험결과들에서 알 수 있듯이 양자 텔레포테이션은 단순한 물체의 이동 또는 양자상태 복제에 그치지 않고 빛 신호의 정확한 전달에 쓰일 수 있다. 양자 텔레포테이션을 빛 신호의 복제 기술로 이용하는 경우 최소한 현재까지의 고전적인 방법보다 우수한 결과를 얻을 수 있다는 것은 중요한 사실이다. 단 쥘상태 또는 다른 얽힘상태의

빛을 이용하는 경우 이러한 상태의 빛은 광섬유 등의 매질을 통과하는 동안에 일어나는 광손실에 의해 잡음이 추가되어 쉽게 그 상태가 파괴되므로 현실적인 응용에 어려움이 있다. 그러나 최근 세기침상대(intensity squeezed light)를 이용하는 방안이나<sup>[16]</sup> 잡음이 추가된 얽힘상태의 빛의 경우 양자 텔레포테이션의 충실도를 높이는 방안<sup>[17]</sup> 등이 계속 활발하게 진행되고 있으며 양자 광통신에서 양자 반복기(quantum repeater)에 대한 연구가 발표되는 등<sup>[18]</sup> 다방면으로 연구가 진행되고 있다.

분자 수준의 양자 텔레포테이션에 대한 실험결과는 또 다른 방면에 대한 응용가능성을 제시한다. 실제 상황에서 직접적인 접근을 통해 측정이 가능하지 않은 원자나 분자의 상태를 측정하고자 할 때 만약 양자 텔레포테이션을 통해 이 원자나 분자의 상태를 다른 원자나 분자에게 복제할 수 있다면 이 복제품을 통해 원래 원자나 분자의 상태를 측정할 수 있다. 이와 같은 원격 측정은 응용분야가 매우 넓을 것으로 예상된다.

양자 컴퓨터와 양자 통신, 양자 암호전달 등에 대한 연구 결과도 꾸준히 발표되고 있는 최근의 추세를 볼 때 이러한 여러 연구들이 어떤 시점에서 상호 접목되어 양자 정보 기술이라는 새로운 학문 분야가 만들어지고 더 나아가서 하나의 첨단 기술 분야로 자리잡게 될 가능성도 보인다.

## 7. 맺음말

공상과학 소설과 과학기술의 발전에 대한 관계에 대해 말할 때 흔히 주을 베르너의 소설에서 예측한 달 여행과 현재의 우주과학기술의 발전을 비교한다. 소설이 발표될 당시 터무니없는 황당한 이야기로 받아들여지던 것이 현실화된 사실은 과학자들이 항상 열린 마음으로 새로운 발상을 받아들여야 한다는 것을 잘 보여준다. 모든 공상과학적 발상이 다 실현될 수는 없지만 텔레포테이션의 경우 원리적으로 불가능하다고 여겨지던 것이 사실상 가능성이 밝혀졌다는데 일단 그 의의가 크다.

물리학 원리적인 측면에서 양자 텔레포테이션의 이론은 우선 불확정성 원리에 대한 보다 발전되고 세련된 이해를 필요로 한다. 쥘상대 빛의 출현이 많은 일반 과학자들이 갖고 있던 최소 불확정도에 대한 단순한 이해를 보다 발전된 것으로 바꾸는데 어느 정도 공헌했다면 양자 텔레포테이션에 대한 이해는 양자역학의 기본원리인 비국소성, 상보성의 원리, 그리고 양자 정보 전달에 대한 기본원리의 이해에 충분한 기여를 할 것으로 보인다.

양자 텔레포테이션을 이용해 거시적인 물체를 이동하는 기

술은 가까운 장래에 실현되기 어려울 것이다. 그러나 가까운 장래에 광통신이나 원격 측정에 응용할 수 있는 가능성은 충분히 있다고 보인다. 최근 활발한 연구가 진행되고 급속한 발전이 이루어지고 있는 광자기술(photonics)은 근본적으로 양자광학을 기초로 하고 있으며, 최근 활발히 진행되고 있는 양자 텔레포테이션을 포함한 여러 가지 양자 광학 분야에 대한 연구가 수 년 내에 접목되어 새로운 학문 분야와 기술이 탄생할 것을 기대한다.

## 참고문헌

1. E. Arthurs and J. L. Kelly, Jr., *Bell. Syst. Tech. J.*, **44**, 725 (1965).
2. Charles H. Bennett, Gilles Brassard, Claude Crepeau, Richard Jozsa, Asher Peres and William K. Wothers, *Phys. Rev. Lett.*, **70**, 1895 (1993).
3. A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
4. J. S. Bell, *Physics* (Long Island City, N.Y.) **1**, 195 (1964).
5. J. L. Park, *Found. Phys.* **1**, 23 (1970).
6. J. S. Bell, "Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics" (Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, 1988).
7. S. L. Braunstein, A. Mann and M. Revzen, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 3259 (1992).
8. Lev Vaidman, *Phys. Rev. A* **49**, 1473 (1994).
9. S. L. Braunstein and H. J. Kimble, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 869 (1998).
10. Vladimir B. Braginsky and Farid Ya. Khalili, "Quantum Measurement" (Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, 1992).
11. 빛의 진폭성분과 위치, 운동량의 관계에 대해서는 대부분의 양자광학 교재에 잘 설명되어 있다. 예 : L. Mandel and E. Wolf, "Optical Coherence and Quantum Optics", (Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, 1995).
12. D. Bouwmeester, J. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter and A. Zeilinger, *Nature*, **390**, 575 (1997).
13. D. Boschi, S. Branca, F. De Martini, L. Hardy, and S. Popescu, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 1121 (1998).
14. M. A. Nielson, E. Knill and R. Laflamme, *Nature*, **396**, 52 (1998).
15. A. Furusawa, J. L. Sorensen, S. L. Braunstein, C. A. Fuchs, H. J. Kimble and E. S. Polzik, *Science*, **282**, 706 (1998).
16. T. C. Ralph and P. K. Lam, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5668 (1998).
17. C. H. Bennet, G. Brassard, S. Popescu, B. Schumacher, J. A. Smolin and W. K. Wothers, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 722 (1996).
18. H. -J. Briegel, W. Dur, J. I. Cirac and P. Zoller, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5932 (1998).

---

## 저자약력

성명 : 노재우

근무처 : 인하대학교 이과대학 물리학과

최종학력 : 1993년 University of Rochester 물리학 박사

주요경력 : 박사후 연구원 - JILA at Boulder Colorado

연구원 - 삼성반도체연구소

성명 : 김기식

현재 근무처 : 인하대학교 물리화학부 부교수

최종학력 : 1987년 로체스터 대학교 광학 박사

주요경력 : 한국원자력연구소 선임연구원 (1989-1991)

E-mail : kisik@inha.ac.kr