

# Tachyon에 관한 研究

—“Transcendent Tachyon과 因果律—

玄 南 奎

## A Study on Tachyon

—Transcendent Tachyon and Causality—

*Hyun, Nam-gyu*

### Summary

I considered in this paper that classical tachyons may be kinematically allowed to be the carriers of mutual interaction between elementary particles. Especially in the center of mass system, infinite speed tachyons can mediate the elastic-scattering interactions.

### 序 論

Despande 및 Sudarshan과 Feinberg가 초광속입자의 존재 가능성의 문제를 다시 제기한(Bilaniuk, *et al.* 1962; Feinberg, 1967) 이래 이에 대한 수많은 논의가 거듭되었으나 아직도 완전한 해결을 보지 못한 상태에 있다.

양자장론에 의하면 모든 상호작용들은 소립자들의 교환을 통하여 이루어지는데 교환되는 가입자(virtual particle)들이 운동학적으로 볼 때 tachyon적인 특성을 가지고 있음을 보이며, 특히 탄성충돌 과정에서는 이러한 가입자들의 방출과 흡수 과정이 명확히 구분될 수 없어 결과가 원인보다 앞서 나타날 수 있다는 인과율 위배 문제가 파생된다. 본 논문에서

는, 만약 black box 내부를 기술한다면, 인과율 조건을 고려치 않는 대신 tachyon을 도입해야 할 필요성을 논하고자 한다.

### “Transcendent” Tachyon과 因果律

일찍부터 원격작용과 접촉작용에 대하여 많은 논의가 있었다. Newton 이전의 시대에서는 서로 멀리 떨어진 어떤 물체에다 영향을 미치기 위해서는 끈으로 그것을 연결시켜 당기거나 막대로 미는 등 접촉작용에 의하여 모든 상호작용을 설명하려 했다. 그러나 태양은 멀리 떨어져 있으면서 볼 수 있는 끈이나 막대가 없이도 지구의 운동에 영향을 주는 것처럼

럼 보이기 때문에 뉴턴의 중력이론은 이러한 신념을 변화시켰다고 볼 수 있다.

그런데, 場이란 생각은 중력, 전자기력 등에서 접촉에 의한 상호작용설을 다시 복귀시키기 위해서 도입되어 졌다고 볼 수 있는데(Sudarshan and Mukunda, 1974), 이러한 場들은 물질적 입자들이 공간을 차지하는 성질이며 또한 상호작용하는 입자들 사이에서 볼 수 없는 끈의 역할을 한다고 볼 수 있으나 정적인 현상을 기술하기 위해서까지도 필수 불가결한 것은 아니다. 즉, 고전적으로는 거리가 주어질 멀리 떨어진 곳에서의 상호작용은 어떤 입자로 인한 다른 입자에 작용하는 potential이나 場에 의하여 보통 기술되나 양자장론에서는 특별한 형의 상호작용과 관련지워서 특별한 양자(보존)의 교환에

의해서 모든 상호작용이 기술된다고 볼 수 있는데 특히 전자기적 상호작용에서 교환된 소립자들은 가광자라 한다.

양자역학적으로 전하들 사이의 힘은 운동량  $p$ 인 가광자들의 교환에 의해서 기술된다. 상수  $c$ 를 빛의 속력이라 한다면, 거리  $r$ 떨어진 전하들 사이의 가광자의 교환은 시간  $t=r/c$  동안에 운동량  $p$ 의 이송을 말하므로,

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\hbar/r}{r/c} = \frac{\hbar c}{r^2}$$

인 관계식에서 보여주듯이 하전입자들이 가광자를 방출하거나 흡수할 때 그것의 운동량의 변화가 힘의 원인이 된다.

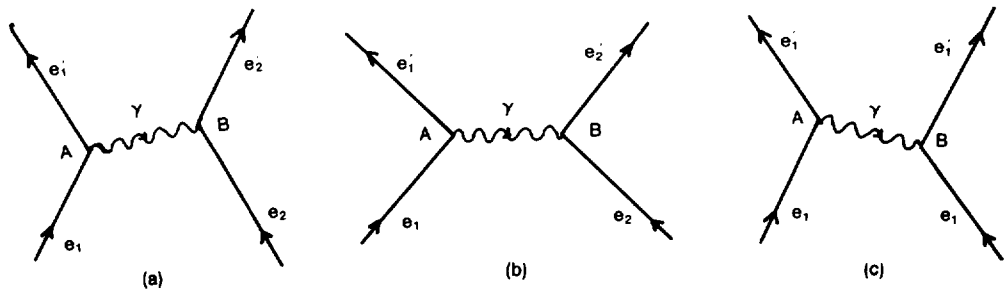


Figure 1. The elastic scattering of electrons by electrons.  
(a), (c) in the laboratory frame and (b) in the center of momentum frame

• 위 Figure 1.(a)는 서로 접근하면서 상호 작용하는 두 개의 전자를 나타내고 있다. 즉, 한 전자  $e_1$ 은 점 A에서 가광자  $\gamma$ 를 방출하고 다른 전자  $e_2$ 는 점 B에서 그것을 흡수한다. 처음에 가광자를 방출한 전자  $e_1$ 은 운동량을 변화시켜  $e_1'$ 이 되고 전자  $e_2$ 가 그 가광자를 흡수하여  $e_2'$ 이 될 때도 역시 그러하다. 결국 두 전자는 가광자의 교환을 통하여 상호 작용하고 나서 반발하여 서로 빛나가게 된다. Figure 1(b)는 질량중심계에서 전자  $e_1$ 과 전자  $e_2$ 의 탄성산란(elastic scattering)을 보여주고 있다. 들어가거나 나오는 전자들은 각각 같은 에너지를 가지나 반대 방향의 운동량을 갖는데, 결과적으로 가광자의 에너지, 운동량은 다음과 같이 주어진다.

$$E_\gamma = E_c - E_c' = 0$$

$$p_\gamma = p_1 - p_1' = 2p_1$$

에너지, 운동량 및 질량 사이의 관계식  $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$ 으로부터 교환된 가광자에 대하여 mass를 정의하면,

$$(mc^2)^2 = E^2 - (p_1 c)^2 = -(2p_1 c)^2 < 0$$

이다. 이 때에 가광자는 오직 운동량만을 가지며, 질량의 제곱이 음수이므로 space-like photon이라고 부른다.

또한 핵자들도 강한 핵력을 통하여 상호작용 하는데, 그것은 중간자(meson)라고 부르는 새로운 종류의 소립자들의 교환으로부터 나타난다. 질량을 가진 소립자의 생성은 그 질량에 상응되는 에너지가 제공될 때에만 가능하다. 강한 상호작용의 경우에는 이러한 에너지가 항상 있는 것은 아니다. 그러므로 이

경우에 질량을 가진 중간자의 교환은 가능할 수가 없을 것이나 중간자들이 매우 짧은 시간 동안에 생성되므로 에너지의 불확실성은 그것들을 생성시킬 수 있을 만큼 충분하다. 단지 이들은 불확정성 원리에 의하여 허용되는 시간 동안만 존재할 수 있기 때문에 충돌작용에서 생겨난 실제의 중간자들과는 구별되어 假粒子(virtual particle)라고 불린다.

강상호작용하는 場에 있어도 가입자들이 음의 제곱 운동량( $p^2c^2 = E^2 - m^2c^4 < 0$ )을 갖는다는 사실을 보게 되는데 이는 소립자들이 고전적으로 tachyon이라 불리는 입자들을 교환함으로써 상호작용할 수 있음을 보여준다(Recami, 1978)

Tachyon에 대하여 논하기 전에 우선 로렌츠 변환 하에서의 속도 가법을 고려해 보자.

$u$ 와  $v$ 를 두 관찰자  $O_1$ 과  $O_2$ 에 의하여 측정된 입자의 속도라 하고 두 관찰자의 상대속도를  $w$ 라 하면,  $u$ 와  $v$ 의 관계식은 다음과 같다.

$$v = \frac{u+w}{1+uw/c^2}$$

이러한 일반적인 결과들을  $u < c$ ,  $u = c$ ,  $u > c$ 인 세 가지 경우에 대하여  $v$ 를  $w$ 의 함수로써 다음 그림과 같이 나타낼 수 있다.

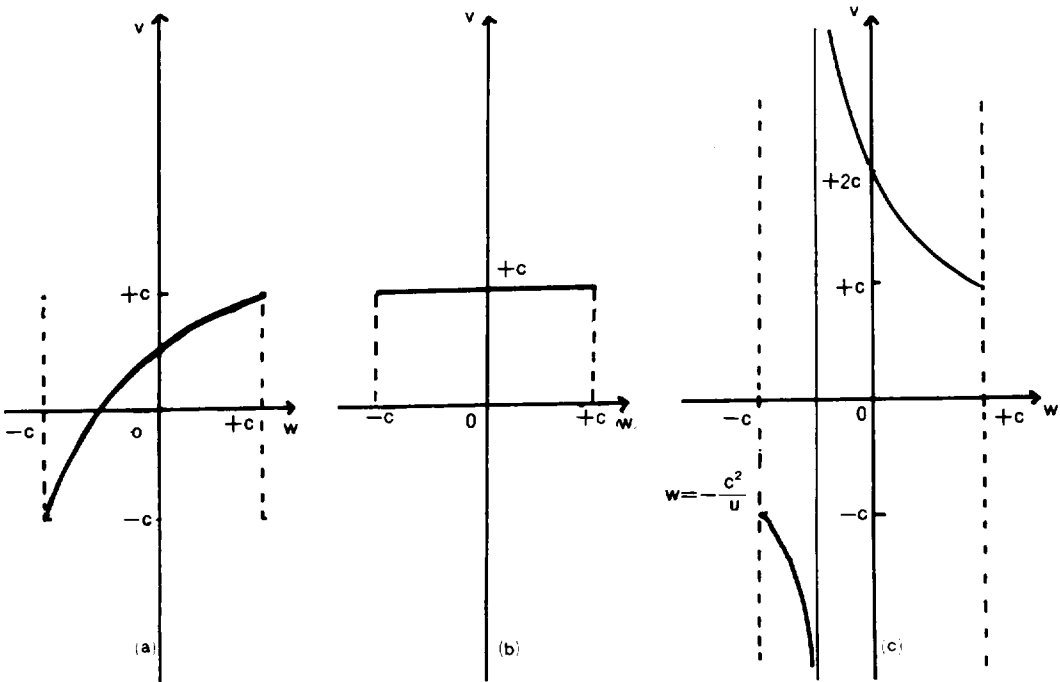


Figure 2. graphical representation of the assumption that the relativistic velocity addition  $v = (u+w)/(1+uw/c^2)$  holds for (a) class I particle, (b) class II particles, (c) class III particles [참고문헌 (Bilaniuk, et al, 1962)에서 인용]

이에 따라서 물체를 다음과 같이 세 가지 부류로 구분할 수 있는데, 속력이 항상  $c$ 보다 작으면 "bradyon"(Class I particles),  $c$ 와 같으면 "luxon"(Class II particles),  $c$ 보다 크며 항상 초광속으로만

달려야 한다면 "tachyon"(Class III particles)이라고 부른다. Figure 2 (a)는 bradyon, (b)는 luxon, (c)는 tachyon의 경우에 해당하는데,  $u$ 를 실험실 기준계에 서의 입자의 속도이라면  $v$ 는 실험실 기준계에 대하

여  $w$ 의 속도로써 움직이는 관찰자에 의하여 측정된 동일한 입자의 속도이다. 모든 관찰자는 역시 bradyon에 속하므로  $w < c$ 인 경우에만 제한시켜서 그 때문에 나타나게 된다.

특수 상대론에 의하면 정지(또는 고유) 질량이  $m_0$ 인 한 입자의 에너지는 다음 식과 같이 주어진다.

$$E = mc^2, \quad \text{단, } m = m_0[1 - v^2/c^2]^{-1/2}$$

이 식에서 에너지의 속도의 종성은 상대 질량의 표현 속에 포함되어 있다. 여기서 에너지  $E$ 가 측정 가능한 양이므로  $E$ 가 실수가 되기 위해서는  $m$ 이 실수가 되어야 하는데,  $v > c$ 이면  $[1 - v^2/c^2]^{-1/2}$ 이 허수가 되므로 결국  $m_0$ 이 허수가 되어야 한다. 따라서 tachyon의 에너지-운동량 4 vector는  $E^2 - p^2c^2 = m_0^2c^4 < 0$ 인 관계식을 만족시켜야 하므로 tachyon은 space-like 에너지-운동량 4 벡터를 갖는다고 볼 수 있다.

이와 같이 0의 질량을 갖는 luxon들과 마찬가지로 허수 질량을 갖는 tachyon들도 결코 정지 상태로 있을 수 없으며 에너지-운동량은 항상 실수이다.

두 관찰자들의 상대속도를  $w$ 라 할 때 로렌츠 변환 하에서 tachyon의 에너지  $E$ 와 운동량  $p$ 는 다음과 같은 법칙에 따라서 변한다.

$$E' = \frac{E - pw}{\sqrt{1 - w^2/c^2}}, \quad p' = \frac{p - Ew/c^2}{\sqrt{1 - w^2/c^2}}$$

좌표계의 상대 속도가  $w < c$ 이고,  $c^2p/E = u < c$  이라면

$$w_0 = -\frac{c^2}{u} = \frac{E}{p}$$

인 관계식을 만족시키는  $w_0$ 가 항상 존재하며 이 기준계에 대해서는

$$E' = 0, \quad P' = |m_0|c$$

인데, 이는 에너지는 가지지 않으나 무한의 속력을 가지고 달리는 tachyon의 "transcendent state"라고 볼 수 있다(Recami, 1978)

무한히 빠른 transcendent tachyon은 어디에서나

존재할 수 있는데 이는 양자역학적으로 정지한 입자, 즉 위치의 완전한 불확정성에 해당되며, 또한 여분의 에너지와 운동량을 갖고 있지 않기 때문에 검출하기가 어렵다. 에너지-운동량 보존에 관한 조건에 따라서 중성의 0의 에너지 tachyon 한개의 흡수는 한 물체와 무한한 질량을 갖는 물체간의 탄성 충돌의 경우와 매우 유사한 것 같이 보인다. 그 때 충돌하는 입자의 에너지는 변하지 않으나 운동의 방향은 갑자기 바뀌는데 이는 무한히 빠른 속력으로 운동량만이 이송되었기 때문으로 볼 수 있다(Bilaniuk and Sudarshan, 1969).

따라서 움직이는 두 물체 A, B가 transcendent tachyon을 교환한다면 무한한 속력으로 운동량이 이송됨으로 인한 A, B의 탄성 충돌 상호작용을 관찰하게 될 것이다(Recami, 1978).

이와 같은 논의로부터 소립자들이 고전적으로 tachyon이라 불리는 입자들을 교환함으로써 상호작용할 수 있다는 해석이 가능함을 보였으나, 아직도 입자 물리학의 입장에서 가입자로서의 tachyon의 존재를 전적으로 받아드리지 않는 것은 원인이 결과보다 시간적으로 앞설 수 있다는 인과율 위배 문제가 해결되지 못하고 있는 것에도 기인하다고도 볼 수 있으므로 다음은 이에 대해서 간단히 논하고자 한다.

사건들의 time sequence와 causal sequence 개념들은 과학에서 매우 중요하다. 이 둘 사이의 관계는 인과 법칙에 의해서 제한되는데 그에 따르면 어떠한 결과도 원인을 앞설 수가 없다. 즉, A가 B의 원인이라면 A는 B보다 일찍이거나 B와 동시에 일어나야만 한다는 것이다. 한 사건 A가 다른 사건 B의 원인이 된다면 그들 사이엔 어떤 물리적인 접촉 작용이 있어야 한다(만약 물리적인 접촉이 전혀 없다면 그 때 어떤 것은 다른 것의 원인이 될 수 없다). 그러나 이러한 물리적 작용이 빛보다 빠르게 전달되지만 않는다면, 인과 관계에 있는 어떤 두 사건들은 유일하고 분명한 시간 순서를 가진다. 다시 말하면, 만약 어떤 관찰자에 대하여 원인 A가 결과 B보다 먼저라면, 이 관계는 모든 관찰자들에 대해서도 유지된다. 따라서 원인이 먼저이고 결과가 나중이라는

순서는 불변하게 될 것이다.

그런데, 소립자들 사이의 상호작용은 오로지 그 시-공 도표가 일정한 방향에서— 예를 들면, 밑에서 위로— 임혀질 때에만 원인과 결과의 면으로 해석될 수 있으나, 粒子 상호작용들이 그 상호작용에 관련된 어떤 일정한 시간의 方向도 없이 4차원의 모형으로서 받아들여질 때엔 그곳엔 前後가 없게 되므로 인과율의 개념이 문제시 된다. 예를 들어 보이면, Figure 1(a)는 A지점에서  $\gamma$ 가 먼저 방출된 것이 원인이 되어서 B지점에서  $\gamma$ 가 나중에 흡수되는 결과가 초래되는 과정을 보여주고 있으나, 그 반대로 그림(c)는 A지점에서  $\gamma$ 가 나중에 방출되어 B지점에서 먼저 흡수되는 과정을 보여주고 있다. 그런데 특수 상대론에 의하면 관찰자에 무관하게 물리법칙은 form invariant해야 하므로 Figure 1 (a), (b), (c)는 근본적으로 동일한 사건을 나타내고 있다고 볼 수 있다. 특히 Figure 1.(b)에서는 가광자  $\gamma$ 가 A에서 B방향으로 이동되었다고 보는 것과 B에서 A방향으로 이동되었다고 보는 것은 대칭적이고 동등하며 또한 A와 B는 시간적으로 동시 사건이므로 그들 중에 어느 하나가 먼저 일어났다고 볼 수 없게 된다. 따라서 Figure 1.(b)에 대하여 time sequence와 causal sequence의 개념을 적용시킬 수 없을 것이므로 Figure 1.(a), (c)의 경우도 마찬가지로 논의가 가능하다. 이와 같이 만약 어떤 작용이 빛 보다 빨리 전달될 수 있다면 원인과 결과의 순서란 개념이 완전히 뒤섞이게 됨을 볼 수 있을 것이다(Bohm, 1964).

實粒子的 주고 받음에서는 방출과 흡수가 각각 독립적인 사건이어서 흡수가 안되는 경우도 방출은 가능하므로 이들 사이에는 엄격히 인과율이 적용되어야 한다고 볼 수 있다. 그러나, 가입자인 tachyon을 주고 받음은 분자 그대로 상호작용이므로 방출과 흡수를 별개의 사건으로 구분할 수 없다. 방출과 흡수는 동시에 일어나야 하므로 어느 한 쪽이 일어나지 않는다면 다른 한 쪽도 일어날 수 없는 것이다. 따라서 tachyon을 주고 받는 경우에 있어서 한 사건의 원인과 결과를 엄격히 분리하여 원인은 결과에 先行해야 한다는 인과율 조건을 적용시키는 것은 적절하다고 볼 수 없다. 다시 말하면, 인과율이 세

계에 관한 어떤 경험에 바탕을 두고 있는데 말하여 가입자들의 교환으로써 설명되는 상호작용은 경험할 수 없는 세계에 속한다고 볼 수 있으리요, 어떠한 결과도 원인에 앞서서 일어날 수는 없다. 즉 인과율이 성립 세계에서는 예외가 없는 법칙이라고 하더라도 가입자들 교환함으로써 상호작용을 설명하는 비정상적인 미시 구조에까지 그것이 적용되어야만 할 만한 충분한 이유는 없다고 본다.

만약 인과율을 만족시켜야 한다는 경계 조건을 두지 않는다면 물리학 이론이 매우 어려워지겠지만, 상호작용하는 영역 내부의 현상을 구태어 논한다면 그 영역 내부에선 인과율 조건을 두지 않는 대신 "이것이 있기 때문에 저것이 있고 이것이 일어나므로 저것이 일어난다"는 緣起說에 바탕을 둔 자연관을 재검토 해보아야 한다고 생각한다.

## 結 論

가입자들의 교환에 의하여 설명되는 상호작용 영역 내부의 현상을 論함에 있어서, 결과가 원인보다 앞설 수 없다는 인과율 조건을 적용하는 대신, 탄성 충돌 상호작용하는 경우에서 보았듯이 운동학적으로 볼 때 소립자들 사이의 상호작용을 매개하는 가입자들이 tachyon의 특성을 가진다고 할 수 있을 것으로 본다.

또한 핵자를 둘러싸는 중간자의 구름현상의 경우와 유사하게 빛보다 느린 속력으로 달리는 입자들에 결합된 tachyon 구름이란 구조를 택하였을 때(Recami and Maccarone, 1983) 새로운 형태의 renormalization을 야기시킨다거나(Sudarshan, 1970), Møller scattering 문제에 있어서 Covariant virtual photon에 관한 논의(Sakurai, 1970) 등에서 인과율 조건을 두지 않을 때 파생될 수 있는 문제에 관한 논의는 차후 연구 과제로 둔다.

## 摘 要

본 논문에서는 고전적으로 기술된 tachyon이 운동

학적으로 보았을 때에 입자들 사이의 상호작용의 매개체 역할을 할지도 모른다는 점, 특히, 질량 중심 좌표계에서 무한 속력을 갖는 tachyon은 탄성 충돌 상

호작용을 매개할 수도 있다는 가능성을 검토하여 보았다.

### 參 考 文 獻

- Bilaniuk, O. M. P., and V. K. Deshpande, E. C. G. Sudarshan, 1962. "Meta" relativity. *Am. J. Phys.*, 30: 718-723.
- Bilaniuk, O. M. P., and E. C. G. Sudarshan, 1969. Particles beyond the Light barrier. *Phys Today*, 22: 43-51.
- Bohm, D., 1964. The special theory of relativity. p.155. W. A. Benjamin, Inc., New York.
- Feinberg, G., 1967. Possibility of faster-than-light particles. *Phys. Rev.*, 159: 1089-1105.
- Recami, E. editor, 1978. Tachyons, monopoles and related topics. p.17-18, & p.43, North-Holland, Amsterdam.
- Recami, E., and G. D. Maccarrone, 1983. Are classical tachyons slower-than-light quantum particles. *Lett. Nuovo Cimento*, 37: 345-352.
- Sakurai, J. J., 1970. Advanced quantum mechanics. p.256. Addison-Wesley, London.
- Sudarshan, E. C. G., 1970, Tachyon cloud of a particle, *Phys. Rev. D*, 1: 2428
- Sudarshan, E. C. G., M. Mukunda, 1974, Classical dynamics; A modern perspective, p.564, John Wiley & Sons, New York.