

Tachyon에 관한 研究

—因果律과 緣起—

玄 南 奎

A Study on Tachyon
—Causality and Pratīya-Samutpāda—

Hyun Nam-gyu

Summary

The equation of motion in the classical charged particles caused unphysical problem of the violation of causality. Though Wheeler and Feynmann proposed absorber theory to solve this problem, it remains to be unsolved. So I discussed the problem in the case of tachyon.

Sudarshan and Feinberg suggested the reinterpretation principle to solve the violation of causality in tachyon, but it raised the chronological order of cause and effect problem: emission of a tachyon may be viewed as absorption by another observer.

In this paper I have compared the concept of causality with that of Mahayana Buddhism, therefore it seems that I may substitute "causality" by "pratīya-samutpāda in the case of interaction.

序 論

日常經驗을 통하여 볼 때 어떤 事件이든시간에 결과는 원인 없이는 발생되지 않는다는 사실을 알 수 있으며 또한 그러하리란 신념을 누구나 갖고 있을 것으로 본다. 많은 결과들로부터 원인들을 추

측하고 이것들을 일반화하여 사물간의 인과관계를 명백히 하고 체계화 시키는 學問의 한 분야로서의 物理學에서도 因果律은 매우 중요한 원리이다. 그런데 고전 전자기학에서도 에너지-운동량 보존법칙을 고려하여 복사파를 방출하는 하전 입자의 운동을 정확히 기술하는 과정에서 인과율 위배 문제

1. 理工大學 專任講師

가 제기되나 이에 대한 만족할만한 해답을 얻지 못하고 있는 상태이다.

이 논문에서는 因果律의 경험적 사실들에 기초한 인과율의 개념이, 果先因後 현상이 나타나기 때문에 인과율 위배 문제가 주된 논쟁점인 타키온에 있어서의 時順과 因果의 문제를 相互作用이란 관점에서 논의하여, 미시세계에서도 인과율이 필연적으로 적용되어야 하는지를 논하고자 한다.

1. 因果律의 概念

계속되는 두 事件이 인과관계에 속할 때에 先者를 原因이라 하고 後者를 結果라고 부른다. 인과의 관계란 한 사물현상이 他의 결정 要因이 되는 것 즉, 어떠한 事件이 만족되면 항상 무엇이 된다는 등의 原因과 結果의 함축의 관계를 나타내는 것을 말하며 先事件과 後事件의 연결관계가 論理, 定義나 意思에 지배받는 것이 아니고 객관적인 事物의 연결관계를 경험하는 데서 알게 되므로 因果關係는 경험에 의하여 分明히 된다고 볼 수 있다. 여기서 原因이라는 말은 일반적인 효과를 發生시키는 힘의 뜻으로 사용되나, 科學에 있어서는 原因이라는 말 대신에 條件이라는 말을 쓰고 있으며 인과관계가 함수관계로 표현된다. 原因이 되는 현상의 量的 규정 u 를 독립변수로 하고 결과가 되는 현상의 양적 규정 W 의 이에 대한 함수관계 $W=f(u)$ 가 인과관계를 나타내는 공식이 되는데 物理學에서는 量的 규정 Z 를 시간 t 의 함수로 생각하여 因果의 法則을 $Z=f(t)$ 로써 표시한다(金, 1966).

Rohrlich(1965)는 古典物理學에 있어서 세 가지 다른 의미의 因果律에 대하여 다음과 같이 論하고 있다. 첫째는 Newton 因果律이라 하는 것으로서 未來의 운동이 예측 가능하다는 것이며, 둘째는 신호의 속도가 빛의 속도보다 빠르지 않다($v \leq c$)는 제한이고, 셋째는 유한한 전파 속도를 가진 場의 先行效果(advanced effect)가 없다는 것이다.

Csonka(1969)는 이와 같이 어떠한 결과도 원인보다 앞설 수 없다는 사건들의 時間的인연쇄와 因果의 인연쇄의 개념으로서의 遲延因果律(retarded causality)은 비록 오늘날에는 매우 널리 퍼져있지만 그 원리

가 만들어 진 것은 비교적 최근의 일이다. 즉, 고대 사상가들은 原因을 과거의 원인과 미래의 원인인 두 종류의 원인으로 구분하였으나 未來의 原因은 현대 과학의 초창기에 실험적 증거가 없다는 이유로 버려졌으며 오늘날의 자연 인과율의 개념이 생겨났다고 논하고 있다. 이러한 개념이 잡힌 因果律이 古典的으로 묘사할 수 있는 계들에서 오랫동안 쌓은 경험에 의하여 결정되어 졌으나, 양자역학에서 믿음만한 실험이 이러한 개념들의 변화를 필요로 한다면, 이러한 변화가 생겨서는 안된다는 근본적인 이유가 없다(Bohm, 1951). 즉, 物理學에서는 일반적으로 관측하나마나 유한하고 제어할 수 없는 교란이 따라다니게 마련이므로 두 개의 양자론적 물리량의 값이 일정한 확률을 갖고 통계적으로 결부되어야 된다는 가정을 할 수 있다. 측정 장치와 피관측계 사이의 관련성의 통계적 성질은 측정 장치가 피관측계에 미치는 영향을 피관측계의 여러 부분 사이의 相互作用과는 다르게 취급한다는 사실을 기본으로 삼고 있다. 이러한 불확정성을 피하기 위해서는 측정기기까지도 계 안에 포함시켜 생각할 수 있는 데, 우리들의 눈과 같은 것까지도 계 안에 넣어야만 할 것이므로, 결국 전 우주를 그 속에 넣는다면 그 때에는 원인과 결과의 상관관계를 정량적으로 다룰 수 있을 것이다(Heisenberg, 1973).

이와같이 양자역학에서는 실험의 결과와 예측이 통계적이어서 엄격한 의미의 因果性的의 개념이 적용되지 못한다. 그리하여 因果性에 대치된 개념이 확률성의 개념이다. 따라서 원인은 통계적인 경향만을 결정하므로 주어진 원인은 결과쪽으로는 어떠한 경향만을 낳는다고 생각되어야 한다는 사상으로 대치되어야 함을 알 수 있다. 따라서 고전적인 수준에서 과거가 미래의 원인이라고 말할 수 있다고 하더라도 양자론의 관점에서 보면 그 관계가 成立한다는 보장이 없음을 알 수 있다.

순간적으로 생멸하는 가입자들의 교환에 의하여 설명이 되는 相互作用 영역 내부등의 초미시적인 비경험적 사실을 논함에 있어서도 경험적 사실들에 의하여 형성된 인과율을 엄격히 적용시켜야 할 필연적인 이유는 없다고 생각되므로, 다음 절에서

하전 입자의 운동과 타키온 운동학에서 이에 대한 구체적인 논의를 하고자 한다.

2. 荷電粒子的 운동에 있어서의 因果律 위배 문제

가속되는 荷電粒子로부터 방출된 복사파는 에너지, 운동량 및 각운동량을 수반하므로 粒子的의 다음 운동에 영향을 미치게 된다. 따라서 하전 입자의 운동을 정확하게 다루려면 Source의 운동에 복사 반작용을 포함시켜야 한다.

Lorentz는 전하가 구대칭으로 분포된 電子 모형 을 써서 粒子和 場의 혼합 이론인 전기를 띤 粒子에 대한 비상대론적인 다음과 같은 Lorentz운동 방정식을 세웠다(Jackson, 1962).

$$F_{ext} = \frac{4}{3} m_e \frac{dV}{dt} - \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} \frac{d^2v}{dt^2}$$

여기서 $m_e = U/c^2$, $U = \frac{1}{2} \int d^3x' \int d^3x \frac{\rho(x)\rho(x')}{R}$, $R = |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|$ 이고 c 는 빛의 속도이며 $\rho(x)$ 는 입자에 정지한 좌표에서의 전하 e 의 밀도이다. 또한 Dirac은 전자를 극한으로서 점과 같은 입자로 보고 지연장(retarded field)과 선행장(advanced field)을 써서 Lorentz 변환에 대해 불변인 相對論的인 운동방정식을 세웠다(Dirac, 1938).

$$m a^\mu - \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} \ddot{a}^\mu + \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^5} \dot{a}^\lambda \dot{a}_\lambda v^\mu = \frac{e}{c} F_{in}^{\mu\nu} v_\nu$$

여기서 $Z^\mu(\tau)$ 를 4차원에서의 전자의 세계선이라 했을 때, $v^\mu(\tau)/d\tau$ 이고 $F_{in}^{\mu\nu}$ 은 in field의 전자기장이다.

荷電粒子的의 운동방정식에는 가속도의 시간에 대한 미분에 비례하는 복사 반작용을 나타내는 항(schott항)이 들어 있는데, 이로 인하여 도망가는 해(runaway solution), 선행가속(preacceleration), 인과율 위배 등의 문제가 야기된다(Rohrlich, 1965; Plass, 1961). 그들 중에 도망가는 해의 문제는 적절한 접근조건을 사용하여 해결할 수 있으나(Rohrlich, 1965), 선행가속의 문제는 복사 반작용과 관련하여 아직 만족할만한 해답을 얻지 못한 상태이

다. Sorg(1974)는 유한한 부피를 갖는 전자 모형을 사용하고 지연장만을 사용하여 비국소적 Lorentz-Dirac 방정식을 유도하였는데, 이 방정식의 해는 도망가는 해(Sorg, 1976b)나 선행가속 효과를 포함하지 않아(Sorg, 1976a) 국소적 Lorentz-Dirac 방정식보다 개량된 형태이긴 하나 일정한 힘의 作用이 끝나는 순간이 가까워 질 때마다 들뜬 자체진동의 형태로서 인과율 위배 현상이 나타난다(Sorg, 1977). 이러한 인과율 위배의 문제는 Schott항이라 부르는 복사 반작용 항 $\frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} \ddot{a}^\mu$ 에 연유하므로(Sorg, 1976c) 이항의 기원이 어디에 있는가의 문제와 직결된다고 볼 수 있으나 아직은 적절한 해석이 되지 않고 있다.

3. Tachyon 교환을 통한 두 물체의 相互作用에서의 因果律 위배 문제

1) Tachyon 운동학과 假粒子的의 특성

Tachyon의 因果律 위배 문제에 관하여 논하기 전에 공간 2차원(y,z)을 무시하고 관찰자 S를 공간 x와 시간 ct의 직교축으로 나타낸 Figure 1을 생각해 보자. 여기서 45°, 135° 각도의 점선은 빛의 세계선이고 x', ct' 좌표축들은 좌표계 S(x,ct)에 대

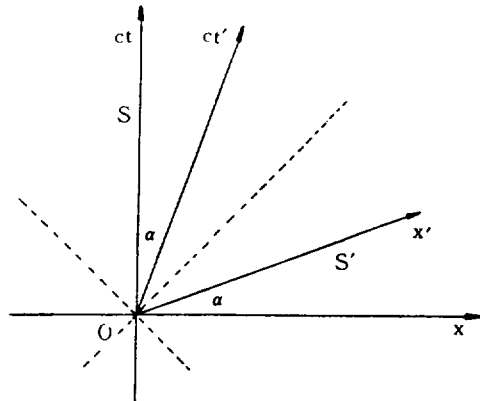


Figure 1. A Minkowski diagram in which two space dimensions are ignored. The angle is such that $\tan \alpha = v/c$, if v is the velocity of the frame S' relative to S .

하여 V의 속도로 x축의 양의 방향으로 움직이고 있는 S'(x', ct') 좌표계를 말한다.

Figure 2는 S계에서 볼 때, 어떤 정보의 전달인 신호 P가 v < c로써 t=0에서의 위치 O지점에서부터 시각 t 때의 위치인 A지점까지의 움직임을 나타내며, A점의 ct 좌표는 양수이므로 P는 t=0인 시각에 O를 떠나서 미래에 A에 도착한다고 말할 수 있다. 그러나 S' 좌표계에서는 A가 x' 좌표축 아래에 있으므로 O와 A의 ct' 좌표는 각각 0과 음수이다. 따라서 S'에 있는 관찰자는 P가 현재인 O지점에서부터 과거인 A지점까지 진행한다고 관찰한다(Newton, 1970). 이는 과거로 가는 신호로 인하여 果先因後 사건도 가능함을 말해 주기 때문에 이러한 난점을 회피하기 위하여 《미래로 진행되는 음의 에너지의 입자나 物體는 存在하지 않는다.》(Pavšič and Recami, 1976; Recami, 1978)는 특수 상대론의 세번째 가설을 부정함으로써 자연 인과율의 개념을 상대론의 가설 속에 포함시킬 수 있는데, 이 가설은 근본적으로 Dirac, Stückelberg와 Feynmann에 의한 《재해석 원리(reinterpretation principle)》과 근본적으로 동일하다(Pavšič and Recami, 1976a). 이에 대한 구체적인 논의를 하기 위해 운동학적으로 가능한 모든 상대속도에 대하여 두 물체 A, B 사이에서의 타키온 교환 관계를 분석해 보자(Maccarrone and Recami, 1980; Recami, 1985).

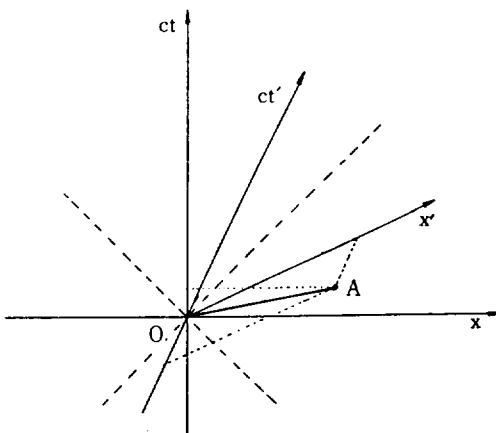


Figure 2. OA is the world line of a point moving faster than light.

우선 질량 M인 물체 A는 -그것의 정지 좌표계에서 -질량이 m이고 4-운동량이 $P=(E_T, \mathbf{P})$ 이며 x방향으로 V인 속도로 진행하는 타키온 T를 물체 B를 향해서 방출한다고 하자. 자연 단위(natural unit)에서 4-운동량 보존이 요구되므로 다음 식과 같이 될 수 있다.

$$(1) M = \sqrt{\mathbf{P}^2 - m^2} + \sqrt{\mathbf{V}^2 + M'^2} \quad (\text{정지좌표계})$$

$$(2) 2M |\mathbf{P}| = \sqrt{[m^2 + (M'^2 - M^2)] + 4m^2 M^2}$$

여기서 물체 A는 정지 질량 M이 M'으로 줄어들지 않으면 어떤 타키온 T(질량 m에 관계없이)를 방출할 수 없다. $E_T = \sqrt{\mathbf{P}^2 - m^2}$ 에 대하여 (2)식은

$$(3) \Delta \equiv M'^2 - M^2 = -m^2 - 2M E_T \quad (\text{방출})$$

이 되고 다음 관계식이 성립한다.

$$(4) -M^2 < \Delta \leq -\mathbf{P}^2 \leq -m^2 \quad (\text{방출})$$

또한 $V = |\mathbf{P}|/E_T$ 인 관계식을 사용하면 (2)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(5) V = \sqrt{1 + 4m^2 M^2 / (m^2 + \Delta)^2}$$

특히, 무한 속도인 타키온 T는 에너지 E_T 가 0이고 운동량 $|\mathbf{P}| = mc$ 이므로 물체 A는 정지질량이 줄어들지 않고서는 어떠한 transcendent tachyon도 방출시킬 수가 없다. 이 경우는 (3)식에서 $E_T = 0$ 을 대입시키면

$$(6) \Delta = -m^2 \quad (V = \infty, E_T = 0)$$

이다. 재해석 원리에 의하면 transcendent tachyon(antitachyon)의 방출은 transcendent anti tachyon(tachyon)의 흡수와 동등하므로 (6)식은 tachyon을 흡수하는 극한적인 경우로 볼 수 있다.

다음으로 이와 유사하게 정지 좌표계에서 타키온 T를 흡수하는 경우에도 4-운동량 보존 법칙으로부터

$$(7) M + \sqrt{\mathbf{P}^2 - m^2} = \sqrt{\mathbf{P}^2 + M'^2}$$

이 성립하며 $\Delta = M'^2 - M^2$ 는

$$(8) \Delta = -m^2 + 2M E_T$$

즉,

$$(9) -m^2 \leq \Delta < \infty \quad (\text{흡수})$$

이 되어서 Δ 는 0이거나 양이 될 수 있다. 특히, 무한 속도 타키온을 흡수하는 경우에는 $E_T = 0$ 이므로 (8)식으로부터 $\Delta = -m^2 (V = \infty)$ 가 성립한다.

이와같은 관계에서부터 $\Delta \leq -m^2$ 이면 고유 흡수; $\Delta \geq -m^2$ 이면 고유 방출의 경우에 해당함을 알 수

있다.

물체 B의 A에 대한 상대속도를 u 라 하고, 타키온의 속도를 V 라 하면, $u \cdot V < c^2$ 일 때 물체 A, B가 tachyon(또는 antitachyon) T를 교환하는 경우를 생각하자. A가 T를 방출하는 경우 A지점에서 4-운동량 보존 법칙을 생각하면, A에 정지한 좌표계에서 (1), (3)식으로부터 다음 식들이 성립한다.

$$(10) \quad \Delta_A \equiv M_A'^2 - M_A^2 = -m^2 - 2M_A E_T$$

$$(11) \quad -M_A^2 < \Delta_A \leq -m^2$$

그리고 M_B 와 $P_B = (E_B, \vec{P}_B)$ 를 각각 물체 B이 정지질량과 4-운동량이라 하면, T는 B에 흡수되어야 하고 다음식이 성립한다.

$$(12) \quad \sqrt{E_B^2 + M_B^2} + \sqrt{P^2 - m^2} = \sqrt{(P_B + P)^2 + M^2}$$

여기서 M_B' 은 B의 최종 상태의 정지질량이다. $\Delta_B = M_B'^2 - M_B^2$ 라 하면,

$$(13) \quad \Delta_B = -m^2 + 2m\tilde{M}_B(1 - uV \cos \alpha)$$

가 성립하는데, 여기서 $\tilde{m} = E_T$, $\tilde{M}_B \equiv E_B = \sqrt{P^2 + M^2}$ 는 각각 T와 B의 상대론적 질량이며 $\alpha \equiv \hat{u} \cdot \hat{V}$ 는 u 와 V 사이의 각이다. 이 때에도

$$(14) \quad -m^2 \leq \Delta_B < \infty$$

이므로 Δ_B 는 음이거나 양 또는 0의 값을 갖는다고 가정할 수 있다.

이와같이 $u \cdot V < c^2$ 인 경우에 있어서 A에 정지한 좌표계에서는 타키온 T를 방출시키는 경우에 대하여 동시에 다음 식들이 만족된다.

$$(15) \quad \begin{cases} \Delta_A = -m^2 - 2M_A E_T & (-M_A^2 < \Delta_A \leq -m^2) \\ \Delta_B = -m^2 + 2E_T E_B(1 - \hat{u} \cdot \hat{V}) & (\Delta_B \geq -m^2) \end{cases}$$

이와 유사하게 A에 정지한 좌표계에서 $u \cdot V < c^2$ 에 대하여 타키온 T를 흡수하는 경우에는 다음 식들이 동시에 만족되어야 한다.

$$(16) \quad \begin{cases} \Delta_A = -m^2 + 2M_A E_T & (\Delta_A \geq -m^2) \\ \Delta_B = -m^2 - 2E_T E_B(1 - \hat{u} \cdot \hat{V}) & (-M^2 < \Delta_B \leq -m^2) \end{cases}$$

또한 $u \cdot V \geq c^2$ 인 경우에 대하여서는 물체 A가 T를 방출하고 B가 이를 흡수하는 경우에, A에 정

지한 좌표계에서는 B가 T를 흡수하므로 다음 식이 성립한다.

$$\frac{\sqrt{P_B^2 + M_B^2} + \sqrt{P^2 - m^2}}{M^2} = \sqrt{(P_B + P)^2 + M^2}$$

이에 대하여 (12)-(15)식과 비슷한 계산 과정을 거치면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$(17) \quad \begin{cases} \Delta_A = -m^2 - 2M_A E_T & (\Delta_A \leq -m^2) \\ \Delta_B = -m^2 + 2E_T E_B(1 - \hat{u} \cdot \hat{V}) & (\Delta_B \leq -m^2) \end{cases}$$

이는 $u \cdot V \geq c^2$ 이라면 A에 정지한 좌표계에서 P_B 와 P 가 동일 직선상에 있는 경우에 대하여 $P_B \parallel P$ 이어야 하므로 서로 멀어져 가는 경우이어야 하며, A에 정지한 좌표계에서 봤을 때에는 타키온 T가 운동량 P 를 가지고 방출되는 경우를 B에 정지한 좌표계에서 봤을 때에도 역시 반타키온 \bar{T} 가 운동량 $-P$ 를 가지고 방출되는 것처럼 보인다.

마지막으로 $u \cdot V \geq c^2$ 에 대하여 물체 A에 정지한 좌표계에서 A가 타키온 T를 흡수하는 경우에 물체 B는 타키온 T를 방출하는 것으로 관찰되므로 다음 관계식이 성립한다.

$$(18) \quad \frac{\sqrt{P_B^2 + M_B^2} + \sqrt{P^2 - m^2}}{M^2} = \sqrt{(P_B - P)^2 + M^2}$$

이 경우에도 (17)식과 유사한 결과를 다음식과 같이 얻는다.

$$(19) \quad \begin{cases} \Delta_A = -m^2 + 2M_A E_T & (\Delta_A \geq -m^2) \\ \Delta_B = -m^2 - 2E_T E_B(1 - \hat{u} \cdot \hat{V}) & (\Delta_B \geq -m^2) \end{cases}$$

이는 $u \cdot V \geq c^2$ 이라면, P_B 와 P 가 동일 직선상에 있는 경우에 대하여 $P_B \parallel P$ 인 경우 즉, 서로 접근하는 경우에만 가능하며 물체 A에 정지한 좌표계에서 봤을 때 타키온 T의 흡수가 B에 정지한 좌표계에서 봤을 때에도 역시 A에서 방출된 반타키온 \bar{T} 를 B가 흡수하는 것으로 관찰된다. 특히 이 경우에 있어서 Δ_A 나 Δ_B 는 동시에 0이 될 수 있으며 그 때 $\Delta_A = 0$ 이면 $2M_A E_T = m^2$ 이고, $\Delta_B = 0$ 이면 $2E_T E_B(u \cdot V - 1) = m^2$ 가 성립한다.

다시 말하면, 실험실 계에서 x방향을 따라서 속도 $+V$ 로서 Source A에서부터 detector B까지 이르는 타키온 T를 생각할 때, 속력이 $u \equiv u_x - c^2/V$

인 관찰자는 타키온 T가 무한의 속도를 갖는 것으로 볼 것이며, 속력이 $u > c^2/V$ 인 어떤 관찰자는 음의 에너지를 갖고 과거로 가는 T를 볼 것이다. 이는 속력 $c^2/V < u < c$ 인 양의 x 방향을 따라 움직이는 관찰자를 생각할 때 새로운 관찰자 S'은 재해석 원리 때문에 반타키온 \bar{T} 가 Source B에서 방출되어 detector A에 의하여 흡수되고 양의 에너지를 가지고 미래로 진행하는 것을 보게 될 것인데 이를 Figure 3과 같이 나타낼 수 있다.

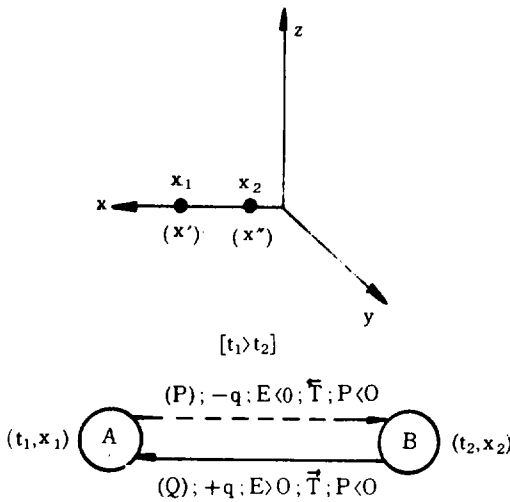


Figure 3. The figure represents the exchange from A to B of a particle P with negative energy (and charges) and traveling backwards in time ($t_2 < t_1$). For subluminal observer moving along the positive x-direction with speed $c^2/v < c$, such a process appears as the exchange from B to A of a particle Q endowed with positive energy (and charges) and moving forward in time: particle Q result then to be antiparticle of the initial particle: $Q = \bar{P}$.

이와 같이 Sudarshan등(Bilaniuk and Sudarshan, 1969, Bilaniuk, et al., 1962)과 Feinberg

(1967)는 재해석 원리를 적용시키면 인과율 위배 현상을 적절히 회피할 수 있다고 주장하였으나 재해석 원리만으로는 인과율 위배 문제를 완전히 해결하지 못했다는 논의에 주목할 필요가 있다. 즉, Benford(Benford, et al., 1970) 등은 한 개의 초광속 입자를 주고 받는 경우에는 재해석이 가능하지만 여러개를 적당히 조절할 경우에는 재해석이 불가능함을 보였으며, Pirani(1970)는 양의 에너지 초광속입자만이 관측되는 예를 들어 인과율 모순을 지적하였고, Rolinck(1969)는 한 사람 이상의 관찰자를 포함하는 인과의 순환이 논리적인 모순을 내포하므로 재해석 원리의 적용을 배제하였다. Yoshikawa와 De Witt(Bilaniuk, et al., 1969)는 Figure 4와 같이, 만약 사건 A가 과거 시간에 같은 지점의 사건 C의 원인이 된다면 미래에 대한 자신의 정보를 미리 갖게 되므로 재해석 원리가 적용될 수 없음을 논하였다. (단, Figure 4에서 $A'B//x'$ 축이다).

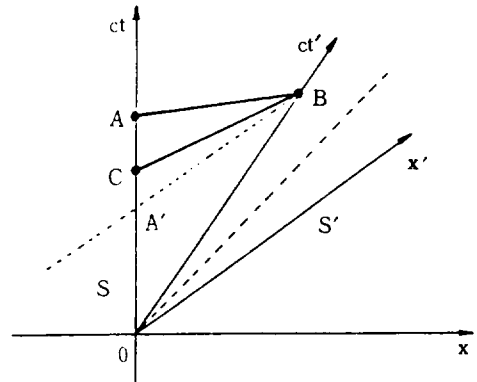


Figure 4. Effect in frame S(x,ct) appears to precede cause in S'(x', ct').

그러나 타키온이 假粒子로서밖에 존재하지 않는다면 이러한 역설은 피할 수 있을 것 같다고 De Witt는 주장하며, 타키온이 멀리 가지 않는다는 조건을 준다면 인과율 위배는 짧은 시간 간격동안 일어날 것이므로 이를 받아드릴 수 있을지도 모른다고 Thoules(1969)는 말하고 있지만, 재해석 원리만으로는 인과율 위배 현상에 대한 완전한 해석

을 하였다고는 볼 수 없을 것이다.

그러나 실험적인 재 검증이 요구되기는 하나 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 의 실험 결과의 분석에 의하여 ν_μ 의 4-운동량 제곱이 음일지도 모른다는 제안 Chodos, et al., (1984) 및 이를 이론적인 면에서 보완시키고 (Eecami, et al., 1986), neutrino oscillation과 관련시켜 검증 가능한 실험의 예측을 제시한(Gianetto, et al., 1986) 사실들은 주목할 만하다.

어떻든 간에 지금까지도 안정된 입자로서의 타키온은 실험적으로 찾지 못했으나 불안정한 타키온의 존재에 대해서는 아직 미결문제인 상태인데, Gleeson등(1972)은 tachyon의 질량에 있어서의 본질적인 퍼짐성이 본래 불안정한 입자이기 때문에 생기는 현상인지도 모른다고 제안하였다. 또한 Peres(1969)는 tachyon에 대해서 위치 operator가 self-adjoint하지 아니하므로 observable이 아니며 전혀 국소화 시킬 수가 없어서 《어디에 타키온이 있는가?》란 물음은 의미가 없다고 논한다. 따라서 tachyon이 신호를 전달하는데 사용 가능하게 된다면, 인과율 위배 현상이 일어날 수 있으므로 신호를 보내는데 타키온이 사용되어져서는 안되나, 타키온을 假粒子라고 가정할 수 있다면 인과율 효과는 더 이상 우리를 괴롭히지 않을 것이며 (주외홍, 1972) 假粒子로서의 타키온의 존재 가능성을 논박할 이유는 아직 없다고 Jue(1973)는 논하였다. 상호작용이란 관점에서 보면 신호의 전달 문제를 반드시 고려해야 할 이유가 없다고 볼 수 있을 것인바, Van Dam과 Wigner(1965)가 Lorentz-invariant하기 위해서 점입자들 사이의 相互作用이 빛보다 빠르지 않은 신호를 교환해야 한다는 견해는 수정되어야 하며, 《상호작용이 빛보다 빠른 속도로 전파될 수 없다고 믿어야만 할 이유가 없다》는 Wigner의 견해(Recami and Rodrigues, 1985)는 주목할 만하다. 그런데 타키온이 존재한다면 그러한 입자는 순 허수의 질량을 갖는다. 즉, baryon 주위를 도는 “구름들”을 구성하기 위해서는 운동학적인 이유들 때문에 가입자들은 일반적으로 음의 제곱 운동량을 가져야 한다: $p^2 = m^2 < 0$. 따라서 순허수의 정지질량은 형식상 역시 가입자에 해당하므로 가입자들은 빛보다 빠르

게 진행한다고 생각할지도 모른다. K 중간자의 교환에 의한 $\bar{P}-P$ 반응에 있어서의 R의 값은 “Kaon”의 Compton 파장보다 훨씬 크므로(Dar, 1964), 빛보다 빠른 속도로 진행되는 양성자 구름으로서의 假 Kaon이 존재한다고 생각하게 된다. 따라서 불안정한 입자의 “공명”(M*=M+i Γ) 상태는 bradyon과 tachyon의 혼합 상태인지도 모른다고 Recami(1968)가 가정했다. Sudarshan(1970)도 nucleon을 싸고 도는 중간자 雲과 baryon을 싸고 도는 tachyon 雲의 유사점과 다른점을 비교하였는데, 바꾸어서 假타키온 雲을 택함은 새로운 종류의 “renormalization”의 가능성에 해당하나, 그것은 (타키온 雲을 수반하는) 물리적인 입자의 재정의라는 것을 상기시켜야 된다고 주장했다. 이와 같이 상호작용을 매개하는 虛粒子로서의 classical tachyon을 방출하고 재흡수하는 hadron을 생각하자. 그것은 나가고 들어오는 tachyon의 구름으로 둘러싸여질 것이다.

$$I \propto \left| \frac{e^{imr}}{r} \right|^2$$

여기서 tachyon의 정지질량을 $m=i\mu$ 라 하면

$$I \propto \left| \frac{e^{-\mu r}}{r} \right|^2$$

이므로 정적인 극한의 경우에 Yukawa potential은 나가는 tachyon과 들어오는 반타키온의 연속적인 흐름을 기술한다고 생각되며(Castrorina and Recami, 1978), 이를 Figure 5에서와 같이 설명 가능하다. 즉 Tachyon들이 무한대의 속도에 이르르면 반대 방향으로 진행되는 반타키온으로 단순하게 보이기 시작하므로(Recami, 1977 Pavšič and Recami, 1977), 이는 hadron의 中心引力作用하에 있는 한 타키온 T가 t=0인 시각에 A에서 발생되어 spacelike 곡선 AP를 따라 P점에 이르러서 무한대의 속도가 되는 순간 반타키온이 되어 반대 방향으로 space-like 곡선 PB를 따라가서는 B점에 이르는 운동을 계속 반복할 수 있음(Recami, 1984) 보여주고 있다.

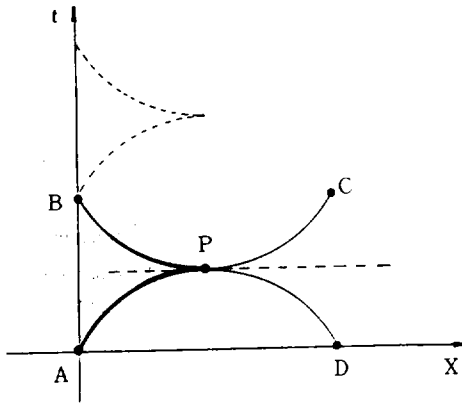


Figure 5. A tachyon T moving in space-time along the spacelike curved path AP, so to reach at P the zero energy state. According to the nature of the force fields acting on T, after P it can proceed along PB, or along PC, along PD.

2) 因果의 時順에 관한 논의

만약 타키온이 존재한다면 초래되는 한 중요한 결과는 한 관찰자에 대하여 흡수라고 할 수 있는 것은 다른 관찰자에 대해서는 자발 방출로 해석되는 원인과 결과의 時順의 뒤바뀐이다(Root and Trefil, 1970). 원인과 결과의 개념은 그 둘 사이의 불변의(또는 통제적인) 관제로서 정의되며, 발생과 비발생을 임의로 하는 즉, 독립성에 의하여 원인을 결과로부터 구분한다(Newton, 1967). 만약 사건 A와 B가 인과관계에 있다면, 先事件을 원인, 後事件을 결과로 정의한다. A와 B 사이의 인과관계를 검증하는 가장 실제적이고 매우 간단한 방법은 그 중 하나를 교란시키고 다른 것의 응답을 관찰하는 것인 바, 원인과 결과의 時順은 단지 관찰상의 사실로 볼 수 있다. 즉, A가 B의 원인이라는 것은 임의로 선택한 t_1, t_2, t_3, \dots 시간마다 반복하여 A 사건이 일어나게 했을 때 $t_1+T, t_2+T, t_3+T, \dots$ 시간마다 변함없이 B가 발생한다면 A는 B의 원인이라고 결론지을 것이나 B가 서로 다른 시간들에 나타난다면 다른 어떤 것이 B의 원인이라

고 말할 수 있을 것이다.

이와 같이 원인과 결과에 관한 판결이 A가 B에 先行하거나 B가 A에 先行하는 것에는 무관하며 원리적으로 지연시간 T는 음이 될지도 모르더라도 A를 원인 B를 결과라고 해야된다. 따라서 時順이 원인과 결과 사이의 구별을 정의하는 일부분이 아니므로 결과가 원인에 先行하는 것도 논리적으로 모순이 아니다(Newton, 1970). 사실 독립적인 원인들은 미래뿐만 아니라 과거에서의 결과들을 초래케 할 수 있을 것 같으며, 인과율이 원인과 결과 사이의 통상적인 時順을 필요조건으로 함은 소립자들 사이의 相互作用의 상대론적인 이론(양자장론, 특히 S-matrix 이론) 구조에서는 대체로 무관제한 것처럼 보인다(Recami, 1970).

결과가 원인에 先行하지 않는다는 원리를 의미하는 개념으로서 “지연인과율”을 말한다면 이는 원인이 결과에 先行하지 않는다는 “先行因果律”과 대비된다. Csonka(1979a)는 지연인과율이 만족되는 이론에 의하여 타키온을 포함시키는 상호작용이 잘 설명될 수 없을지라도 그것이 타키온이 존재할 수 없음을 의미하는 것이 아니다. 만약 시간반전변환 대칭성이 있다면 꼭 같은 事件이 先行 인과율을 만족시키는 이론에 의해서도 설명될 것이므로 자기 모순없음이 모든 채택 가능한 이론들이 만족시켜야 할 조건이지만 지연 인과율보다 더 일반적인 인과율 원리가 자기 모순이라고만은 할 수 없을 것이라고 論하고 있다.

4. 因果律과 緣起

이상과 같은 논의에서 물체 A, B와 그리고 그들의 相互作用을 매개해주는 타키온 T를 가정했을 때, 통상적으로 T를 방출하는 A 사건이 먼저 발생되고 그것을 흡수하는 B 사건이 나중에 생겼다면 각각을 원인과 결과로 말할 수 있음을 보았다. 여기서 A에 대한 B와 T의 상대속도를 각각 u 와 V 라 하면 $u < c^2/V$ 의 조건에서는 A나 B의 좌표계에 무관하게 A는 원인이 되고 B는 결과가 된다. 특히 $u=c^2/V$ 인 조건에서는 因果가 구분되지 않으므로 동시 因果라 해야할 것이며, $u > c^2/V$ 일 때는 A에 정지한 관찰자가 볼 때는 A가 원인이 되어 T

를 방출시키고 B가 이것을 흡수한다. B에 정지한 관찰자가 보면 재해석 원리를 적용시킬 경우 B가 원인이 되어 반타키온 \bar{T} 를 방출시키고 A가 이를 흡수하는 결과가 생긴다. 따라서 前者는 A를 원인 B를 결과로 관찰했음에 반하며 後者는 B를 원인 A를 결과로 보았으므로 원인과 결과는 관찰자에 의존하는 현상을 초래하였다고 볼 수 있다. 그러나 재해석 원리를 적용시키지 않고 음의 질량의 입자가 존재한다고 가정하면 A는 과거로 T를 보내어 B가 이를 detect할 것이므로(Terletskii, 1978) 결과가 원인보다 먼저가 되어(果先因後) 명백한因果律 위배 현상이 나타난다.

Pavšič과 Recami(1976b)는 상대론에서 볼 때 《지연인과율》은 法則으로 볼 수 있으므로 불변하게 기술될 것이 요구되나 “원인”이나 “결과”라는 것은 편의상 그렇게 지정한 이름일 뿐이므로 원인과 결과라는 것이 관찰자에 무관하다는 판단에 대한 신념을 버릴 것을 강요하기도 하나, 그런 해석이 인과율 위배 현상을 완전히 설명하지는 못했다고 볼 수 있다.

Newton(1970)이나 Csoka(1970a,b)가 지적했듯이 필자는 (지연)인과율을 불변의 법칙으로 생각하는 것보다는 인과율 개념에 대한 다른 관점에서의 논의의 필요성을 느끼게 된다. 이에 대한 논의를 불교 교리를 발달사에 의거하여 보았을 때(Kalauphana, 1975), 果先因後 같은 인과율 위배 문제가 파생된 것은, 견고하며 파괴되지 않는 기본적인 입자라는 고전적 개념, 다시 말하면 자연은 소립자나 근본적인 장과 같은 기본적인 실체로 환원될 수 있다는 생각이 그 근원이 있을 것 같다. 따라서 그러한 근본적인 실체를 인정하지 않고 그 구성요소를 상호간이나 그 자체로도 어느쪽이나 모순되지 않는 자체 조화를 통해서만 이해되어야 한다는 데에 기초를 둔 Bootstrap 가설과 같은 자연관에 의거하여 인과율 위배에 관한 논의를 하는 것 즉, 인과율이란 개념 자체의 재정립을 검토해 볼 필요가 있다고 생각한다(玄, 1983; 金과 玄, 1985). 그런데 Bootstrap 가설은 다른 모든 자연의 모습과 함께 의식의 존재가 전체의 자기 일치를 위하여 필요하다고 암시한다. 모든 자연 현상은 궁

극적으로 서로 연결되어 있기 때문에 그들중의 하나를 설명하기 위해서는 나머지 모두를 이해해야만 하는데 이는 분명히 불가능하다. 하전 입자의 운동에 있어서 복사 반작용의 근원을 케기 위하여 Feynmann과 Wheeler가 제안한 흡수체 이론(Wheeler and Feynmann, 1945; 1949)을 Hogarth(1962), Hoyle과 Narlikar(1964), Davis(1972), Raju(1980) 등이 이 이론을 더욱 발전시켜 흡수체의 존재를 우주론의 입장에서 밝히려고 시도한다거나, Mach의 원리(Weinberg, 1973)의 응용으로서 Sachs(1969)가 어떤 양의 물질의 관성질량(그것이 미시적이거나 거시적이거나 천문학적인 크기이거나)은 사물의 고유의 성질이러기 보다는 연구되고 있는 물질의 양과 닫힌 물리계 내에 포함된 다른 모든 물질들과의 사이의 力動的인 결합에 그 근원이 있으므로 엄밀한 의미에 있어서의 연결이 되지 않는 자유로운 입자는 우주에는 없을 것이라는 논의들과 Bootstrap 가설은 상통하는 점이 있다고 볼 수 있다.

그러나 과학이 그렇게 성공적일 수 있게한 것은 근사가 가능하다는 것을 발견한 때문이므로(Capra, 1974; Chew, 1970), 분명한 관측 개념이란 점에 비추어 봤을 때는 이 가설이 과학적이라고는 볼 수 없으나 과학적인 문맥 안에서 “부분적인 Bootstrap”이 정의될 수는 있다. 이러한 종류의 시도로서 광자, 경입자와 중력은 무시되었지만 hadron의 존재와 성질을 이해하는 방향으로 Bootstrap이 이용되고 있으며(Chew, 1968). Corben(1978)은 tachyon이 소립자들의 구조에 어떠한 역할을 할지도 모른다는 생각을 hadron들의 Lorentz변환에 대한 불변인 “Bootstap” 이론을 구성하는데 적용하였다. 여기에서 모든 hadron은 다른 hadron들의 구성 성분이 되나 어느것도 다른 hadron의 기본이 되지 않는다고 가정하므로(Chew, 1968) 우주는 어떤 근본적인 특성을 지닌 기본적인 실체로 구성되어 있는 것이 아니고 상호연결된 事件들의 力動的 그물로서 보여지게 되나 이 그물의 어느 부분의 특성도 근본적인 것이 아니다. 그것들은 모든 다른 부분들의 특성으로부터 이어져 나오는 것이므로 그것들 서로의 상호관계의 조화가 그 그물 전체의

구조를 결정짓는데, 이는 Bootstrap 가설이 물질의 본질적인 구성요소를 부정할 뿐만 아니라 근본적인 실체를 모두 인정하지 않음으로써 가능하게 된 것으로 볼 수 있다(Capra, 1975).

이러한 "Bootstrap" 가설과 Mach의 원리에 대한 철학적인 면은 「大方廣佛華嚴經」에 기초를 두고 있는 重重無盡緣起에 매우 잘 표현되어 있다고 보아진다(金과 玄, 1985).

이에 대한 이상과 같은 논의에 의하여 인과율 위배의 현상은 인과율이 因果律의 時順에 의하여 정의되는 한 그 모순성은 회피할 수 없으므로 인과율 개념 자체의 재정립이 요청된다고 할 수 있다. 아직은 충분히 연구되지는 않았지만 中論(Nagarjuna, 1979), 十二門論, 百論 등에서의 인과에 대한 논의(대한불교조계종역경위원회, 1972)에 주목하여 Tachyon에서의 인과율 문제를 논의해 본 결과 "인과율"을 "緣起"의 개념(현, 1986)으로 대체하여 인과율 위배 문제를 논해야 할 것으로 생각되었다.

結 論

고전 전자기학에서 복사파를 放出하는 하전입자의 운동을 정확히 기술하는 과정에서 因果律 위배 문제가 제기되었으므로 Wheeler와 Feynmann 등이 흡수체 이론을 제시하여 해결하려 하였으나 완전한 해결을 보지는 못하였다. 양자역학에서도 또한 因果律 문제는 매우 중요한 위치를 차지하고 있으나, 이 論文에서는 因果의 時順의 문제가 주된

논쟁점이 되어온 tachyon의 경우에 있어서의 因果律 위배 문제를 비교적 상세히 논하였다.

Sudarshan 등이나 Feinberg는 음의 에너지의 타키온이 과거로 가는 것을 양의 에너지의 반타키온이 미래로 가는 것이라고 재해석 가능하다고 하여 인과율 위배 문제의 해결책으로서 제시하였으나 이는 적지 않은 문제점을 내포하고 있었다. 따라서 인과율에 대한 근본적인 재검토가 요청되었으므로, 인과관계에 대한 대승불교의 논서등을 비교 검토해 본 결과 이러한 因果律 위배의 문제는 자연이 견고하고 파괴되지 않는 기본적인 실체로 구성되었을지도 모른다는 자연관에 그 근원이 있을 것 같다는 가정을 할 수 있었다. 그러므로 이러한 문제를 보다 잘 설명하기 위해서는 상호작용의 경우에 있어서, 因果律의 時順에 의하여 정의되는 인과율의 개념을 수정하고 "緣起"의 개념으로 대체하여 논하여야 할 필요성이 있음을 제시하였다. 상세한 논의는 연구 과제로 둔다.

摘 要

복사 반작용을 포함한 하전 입자의 운동에서 나타나는 인과율 위배문제나 타키온의 교환을 통한 두 물체의 상호작용에서의 인과율 위배 문제를 인과율에 대한 대승불교의 논서들에서의 논의와 비교 검토한 결과, 상호작용 과정에서는 因果律의 時順에 의하여 정의된 "인과율"의 개념을 "緣起"의 개념으로 대체하여 논할 필요성이 있음을 제시하였다.

參 考 文 獻

- Benford, G. A., Book, D. L. and Newcomb, W. A., 1970, The Tachyonic Antitelephone, *Phys. Rev.* 2; 263~265.
- Bilaniuk, O. M. P., Desphande, V. K. and Sudarshan, E. C. G., 1962. "Meta" Relativity, *Am. J. Phys.* 30; 718~723.
- Bilaniuk, O. M. P., Brown, S. L., Dewitt, B., Newcomb, W. A., Sachs, M., Sudarshan, E. C. G. and Yoshikawa, S., 1969. More about Tachyons, *Phys. Today*, 22; 47-52.
- Bilaniuk, O. M. P. and Sudarshan, E. C. G., 1969. Causality and Spaeek-like Signals, *Na-*

- ture* 223, 386~387.
- Bohn, D., 1951, Quantum Theory, pp.148~152, Prentice Hall Inc.
- Capra, F., 1974, Bootstrap and Buddhism. *Am. J. phy.* 42: 15~19.
- Capra, F., 1975, The Tao of Physics, p.286, Schambhala Pub. Co., Colorado.
- Castrorina, P. and Recami, E. Hadrons as Componds of Bradyon Particles and Tachyons. *Lett. Nuovo Cimento* 22: 195~201.
- Chew, G. F., 1968, "Bootstrap": A Scientific Idea? *Science*. 161: 762~765.
- Chew, G. F., 1970, Hadron bootstrap: triumph or frustration? *Phys. Today* 23: 23~28.
- Chodos, I., Hauser, A. I. and Kosteletsky, V. A., 1984, The Neutrino as a Tachyon. (preprint La-UR, New Mexico) [Phys. Lett. 150B (1985) 431]
- 주창근·홍한식, 1972, 초광속 입자와 인과율 경 복대논문집(자연과학) 16:13-18
- Corben, H. C., 1978, Tachyons, Monolpoles and Related Topics, ed. E. Recami: pp.31~41, North-Holland, Amsterdam.
- Csonka, P. L., 1969, Advanced Effects in Particle Physics. I. *Phys. Rev.* 180: 1,266~1,281.
- Csonka, P. L., 1970a, (letters). *Phys. Today* 23: 15~19.
- Csonka, P. L., 1970b, Causality and Faster than Light Particles. *Nuclear Phys.* B21: 436~44.
- 대한불교 조계종 역경위원회, 1972, 한글대장경 126(증관부1) pp.1~151. 동국대학교 부설 역경원, 서울.
- Dar, A., 1964, Effect of Absorptive Channels on the One-Particle Exchange Model. *Phys. Riv. Lett.* 13: 91~94.
- Davies, P. C. W., 1972. *J. Phys. A: Gen.* 13: 1722.
- Dirac, P. A. M., 1938, Classical Theory of Radiating Electrons *Proc. R. Soc. A* 167: 148~169.
- Feinberg, G., 1967, Possibility of Faster-Than-Light Particles. *Phys. Rev.* 159: 1089~1105.
- Giannetto, E. Maccarrone, G. D., Mignani, R. and Recami, R. 1986. Possible Consequences for Neutrino-Oscillations of a Tachyonic Muon-Neutrino. *Report. INFN/AE-86/8*(Frascati, Italy): 1~9.
- Gleeson, M. A., Gundzik, M. G. and Sudarshan, E. C. G., 1972, Phenomenology, based on Tachyon Exchange. *Phy. Rev. D6*, 807~813.
- Heisenberg, W. 著. 趙炳夏譯, 1973, 「量子論의 物理的 原理」 p.18, p.59~60. 光林社, 서울.
- Hogaith, J. E., 1962, Cosmological consideration of the Absorber Theory of Radiation, *Proc. R. Soc. A*267: 365~383.
- Hoyle, B. F. and Narlikar, J. V., 1964. *Proc. R. Soc. A* 277: 1.
- 玄南奎, 1983. 하전입자의 운동과 인과율. 부산대학교 이학석사 학위논문: 1~70.
- 玄南奎, 1986. Tachyon에 관한 연구. -Transcendent Tachyon과 因果律-. 제주대학교 논문집(자연과학) 22: 65~70.
- Jackson, J. D. 1962, Classical Electrodynamics, pp.780~791. John Wiley and Sons, New York.
- Jue, C., 1973, Soluble Tachyon Field Model and the Equivalence Theorem. *Phys. Rev.* D8: 1757~1763.
- Kalupahana, D. J., 1975, Causality: The Central Philosology of Buddhism: pp.1~82, Univ press of Hawaii, Hawaii.
- 金俊燮, 1966. 科學的 因果性的 現代的 意味에 관한 研究. 서울대 논문집(인문사회과학), 12.
- 金勝東, 玄南奎, 1985. 相互作用과 空性. 부산대학교 (인문논총) 27: 239~273.
- Maccarrone, G. D. and Recami, E., 1980, Two Body Interactions through Tachyon Exchange. *Nuovo Cimento* 57A: 85~101.
- Nāgārjuna 著, 黃山德譯解, 1979, 中論 頌, pp.1~213, 瑞文堂, 서울.

- Newton, R. G., 1967, Causality Effects of Particles That Travel Faster Than Light, *Phys. Rev.* 162: 1274.
- Newton, R. G., 1970, Particle That Travel Faster Than Light? *Science* 167, 1567~1574.
- Pavšič, M. and Recami, E., 1976a, Recovering Causality for Tachyons even in Macrophysics. *Lett. Nuovo Cimento* 17: 257~261.
- Pavšič, M. and Recami, E., 1976b, How to Recover Causality for Tachyons Even in Macrophysics. *Nuovo Cimento* 36A: 171~186.
- Pavšič, M. and Recami, E., 1977, Again about Causality for Tachyons in Macrophysics. *Lett. Nuovo Cimento* 18: 134~136.
- Peres, A., 1969, Where are Tachyons? *Lett. Nuovo Cimento* 1: 837.
- Pirani, F. A. E., 1970, Noncausal Behavior of Classical Tachyons. *Phys. Rev. D* 1: 3224~3225.
- Plass, G. N., 1961, Classical Electrodynamics Equations of Motion with Radiative Reaction. *Rev. of Mod. Phys.* 33: 37~62.
- Raju, C. K., 1980, Classical time-symmetric Electrodynamics *J. Phys. A: Math. Gen* 3: 3303~3317.
- Recami, E., 1968, Possible Causality Effects of Antiparticles and Comments on Tachyons, Virtual particles, Resonances, *Report IFUM-088/SM*(Milan Univ. Italy), 4~8.
- Recami, E., 1970, About (Anticausality) and Tachyons, *Lett. Nuovo Cimento* 4: 73~74.
- Recami, E., 1978, Tachyon, Monopoles and Related Topics, p.3, North-Holland, Amsterdam.
- Recami, E., 1984, Classical Tachyons and Possible Applications: A review. *Reprot INFN/AE-84/8* [Frascati, to appear in "Rivista Nuove Cimento" (1986): vol.9, No.6.] 11~78.
- Recami, E., 1985, Tachyon kinematics and Causality (A Systematic, Thorough Analysis), *Report INFN-85/6*(Frascati, Italy) 1~65.
- Recami, E. and W. A. Rodrigues, 1985, "Tachyons: May they have a role in elementary particle physics?" *Progress in Particle and Nuclear Physics* Vol.15, ed. by A Faessler, pp.499~517. Pergamon, Oxford.
- Recami, E. and Mignani, R. and Maccarrone, G. D., 1986, Are Muon Neutrinos Faster-than-Light particles? (Comment of Recent Paper by Chodos et al.) *Eeport INFN/AE-86/1* (Frascati, Italy); 1~9.
- Rohrlich, F., 1965, Classical Charged Particles. pp.50~224. Reading Mass: Addison Wesley.
- Rolnick, W. B., 1969, Implication of Causality for Faster-than-light Matter, *Phys. Rev.* 183: 1105~1108.
- Root, R. G. and Trefil, J. S., 1970, An Amusing Paradox Involving Tachyons. *Lett. Nuovo Cimento* 3: 412~414.
- Sachs, M., 1969, Space, Time and Elementary Interactions in Relativity. *Phys. Today*, Feb; 51~60.
- Sorg, M., 1974, Classical, Covariant Finite-size Model of the Radiating Electron. *Z. Naturforsch.* 29a: 1671~1684.
- Sorg, M., 1976a, Non-local Generalization of the Lorentz-Dirac Equation and the Problem of Runaway Solutions *Z. Naturforsch* 31a: 664~665.
- Sorg, M., 1976b, The Problem of Runaway solutions in the Lorentz-Dirac Theory. *Z. Naturforsch.* 31a: 683~689.
- Sorg, M., 1976c, A Problem Connected with the Schott Term in Classical Electrodynamics. *Z. Naturforsch* 31a; 1500~1506.
- Sorg, M., 1977, Causality Violation and Non-Local Generalization of the Lorentz-Dirac equation, *Z. Naturforsch.* 32a, 319~326.
- Sudarshan, E. C. G., 1970, Tachyon cloud of a particle *Phys. Rev. D* 1, 2428.
- Terletskii, Ya. P., 1978, Tachyon, Monopoles

- and related Topics ed. E. Recami, pp.47~48. North-Holland, Amsterdam.
- Thouless, D. J., 1969. Causality and Tachyons. *Nature*. 224; 506.
- Van Dam, H. and Wigner, E. P., 1965. Classical Relativistic Mechanics of Interacting Point Particles. *Phys. Rev.* 138: 1576-1582.
- Weinberg, S. 1972, Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity pp.16-17,. John Wiley & Sons. New York.
- Wheeler, J. A. and Feynmann, R. P., 1945. Interaction with the Absorber as the Mechanism of Radiation *Rev. Mod. Phys.* 17: 157-181.
- Wheeler, J. A. and Feynmann, R. P., 1949. Classical Electrodynamics in terms of Direct Interparticle Action *Rev. Mod. Phys.* 21: 425~433.