

An Algorithm to Search for a Neutral Kaon Decay, $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$

Je Wou KO · Jong-Kwan WOO* · Liu DONG

Department of Physics, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

(Received 17 September 2015 : revised 27 October 2015 : accepted 29 October 2015)

A neutral kaon decays via the reaction $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$, which produces two π^0 s and one gamma. Each of the π^0 s generate two gammas. In total, 5 gammas are emitted in the end. This sequence is calculated by using the Standard Model. For instance, chiral perturbation theory (ChPT), which relates to the strong interaction in the low-energy region, explains the neutral kaon decay reaction, $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$, well. In this paper, we report an algorithm for detecting the $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ decay reaction, more clearly by distinguishing it from background events such as other kaon decays. The main background event is $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ decay, which produces 6 gammas in the end. The signals of this mode can be misunderstood as those of the 5-gamma decay reaction in two way. Firstly, one of the six output gammas is missing. Secondly, two of the gammas from one of the π^0 s are detected as one gamma by the detector, so this can be mistaken as the detection of five gammas. This paper presents and explains an algorithm for distinguishing the decay modes, as well as the results obtained by using that algorithm. The probability that the $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ decay mode is mistaken as the $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ decay mode is found to be about 0.84%.

PACS numbers: 14.40.Df, 13.20.Eb

Keywords: Neutral kaon, 5-gamma, Chiral perturbation theory, Decay mode

5개의 감마선을 방출하는 중성 케이온 붕괴, $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$, 사건을 재구성하는 방법에 대한 연구

고재우 · 우종관* · Liu Dong

제주대학교 물리학과, 제주 63243

(2015년 9월 17일 받음, 2015년 10월 27일 수정본 받음, 2015년 10월 29일 게재 확정)

중성 케이온의 한 붕괴과정인 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 에서 생성된 각각의 π^0 는 곧 2개씩의 감마선으로 붕괴되어서 총 5개의 감마선을 방출한다. 이 붕괴과정은 표준모형으로 잘 계산된다. 한 예로 표준모형에서 말하는 강한 상호작용에서 저 에너지 영역을 잘 설명하는 카이랄 섭동 이론이 (chiral perturbation theory, ChPT)이 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 의 붕괴율을 잘 설명한다. 이 논문에서는 중성 케이온이 5개의 감마선으로 붕괴되는 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 과정과 혼동되는 배경사상의 제거 방법을 소개한다. $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma \rightarrow 5\gamma$ 의 붕괴와 혼동되는 5γ 가 관측될 수 있는 주요 배경사상은 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 붕괴과정인데, 첫째는 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 가 발생하는 6γ 가운데 1개의 γ를 검출하지 못해서 5개의 γ로 인식하는 경우와 둘째는 2γ가 1γ로 오인 검출되어 5γ로 인식 되는 경우이다. 이번 연구에서는 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 붕괴과정으로부터 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 붕괴과정을 구별하는 알고리즘과 그 결과를 언급 할 것이다. 중성 케이온이 5γ로



관측되는 사건 가운데 $K_L^0 \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$ 사건이 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma \rightarrow 5\gamma$ 사건으로 오인되는 경우는 약 0.84%로 계산되었다.

PACS numbers: 14.40.Df, 13.20.Eb

Keywords: 중성케이온, 5-gamma, 카이랄 섭동 이론, 붕괴과정

I. 서론

중성 케이온은, K_L^0 , $K^0(d\bar{s})$ 와 $\bar{K}^0(\bar{d}s)$ 의 선형결합으로 나타나는 4개의 상태가운데 비교적 강하게 결합된 삼중항 상태인 $K_S^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 + \bar{K}^0)$ 로 상대적으로 약하게 결합된 $K_L^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(K^0 - \bar{K}^0)$ 보다 수명이 긴 중간자이다. K_L^0 은 여러 가지 붕괴 과정들을 갖는데 Table 1이 K_L^0 의 여러 가지 붕괴과정을 보여준다. 여러 가지 붕괴과정 가운데 우리가 관심 있는 붕괴과정은 중성 케이온이 2개의 중성 파이온(π^0)과 1개의 감마선(γ)으로 붕괴하는 과정이다. 표준모형 (standard model, SM)으로 Seghal이 계산한 붕괴과정 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 의 갈래비는 $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$ 의 갈래비인 2.9×10^{-5} 와 비교하여 1×10^{-8} 로 예측하였다 [2]. $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma \rightarrow 5\gamma$ 의 붕괴과정의 갈래비가 2~3개의 γ 를 발생하는 주요한 다른 붕괴과정 들보다는 갈래비가 작지만 최종적으로 5개의 감마선을 방출하기 때문에 실험적으로 특징하기가 상대적으로 쉬어서 표준모형 등의 이론들을 검증하기가 용이하다. 우리는 중성 케이온의 붕괴 가운데 최종적으로 5개의 광자를 발생하는 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma \rightarrow 5\gamma$ 사건들을 5 γ (5 gamma event)사건이라고 부른다.

중성 케이온의 붕괴과정들 가운데 최종적으로 2~3개의 감마선을 발생하는 다른 붕괴과정들은 5 γ 사건, $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma \rightarrow 5\gamma$, 보다 검출기가 오인할 가능성이 높다. 그렇지만 5 γ 사건의 배경사상이 없는 것은 아니다. 5 γ 사건이 5개의 감마선이 방출되는 특이한 사건이긴 하지만 이와 유사하게 검출기가 5개의 감마선을 검출하는 경우가 발생한다. 중성 케이온의 또 다른 붕괴과정인 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0 \rightarrow 6\gamma$ 는 5 γ 사건의 주요한 배경사상이다. $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0 \rightarrow 6\gamma$ 붕괴가 5 γ 사건의 배경사상이 되는데 크게 2가지 과정이 있는데, 첫째는 하나의 감마선이 중앙의 빔홀을 통과하여 빔홀 주변에 배치된 CsI 검출기가 1개의 감마를 검출하지 못하는 경우도 둘째는 두 개의 감마선이 1개의 CsI 섬광계에 동시에 입사하여 2개의 γ 를 1개의 γ 로 오인하는 경우이다.

이번 연구에서는 5 γ 사건의 주 배경사건인 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0 \rightarrow 6\gamma$ 사건이 5 γ 사건으로 오인되는 확률을 GEANT4 전산모사를 통해서 계산하고 배경사건을 5 γ 사건으로 오인하는 확률을 줄이는 방법을 찾아보고자 한다.

1. $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma \rightarrow 5\gamma$ 의 생성과정 설명

$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 붕괴과정은 최소 2개의 각운동량에 대한 단위가 있어야 파이온 쌍을 가지지 않는다. 즉 다시 말하면 전체 각운동량의 크기는 1이고 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 붕괴과정에서 감마선은 스핀 1을 갖는다. 그러므로 다음과 같이 표현 된다. $|0, 0\rangle \rightarrow L^{\pi\pi}, L_z^{\pi\pi} \rangle, L^\gamma, L_z^\gamma \rangle$. 이 식에서 $L_z^\gamma = -L_z^{\pi\pi}$ 이 되고, 값은 0이 아니므로 $|L^{\pi\pi}| \geq 1$ 이 된다. 만약 $L^{\pi\pi} = 1$ 이면 행렬요소는 2개의 파이온의 비대칭 교환으로 이루어져 있을 것이다. 여기에서 나온 행렬요소는 보즈 통계 (Bose Statistics)에 의해 파이온이 2개의 루프항으로 이루어져 있고, 감마선은 최소한 4중항으로 되어있다. 그러므로 6차항 이상의 값을 측정할 수 있을 것이라 본다 [2].

2. J-PARC E14(KOTO) 소개

E14 (KOTO) 실험의 주목적인 중성 K_L^0 이 붕괴과정 중 하나인, $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 과정에서 발생한 π^0 가 2개의 γ 로 붕괴 하는데, 이 2개의 γ 를 전자기열량계인 CsI 섬광계로 검출해서 붕괴율을 측정하는 것이다. J-PARC에서 공급하는 양성자 (proton)가 표적 핵(Pt 또는 Ni)에 충돌하여 생성된 케이온을 통과시켜 빔의 크기를 조절해주는 첫 번째 조준기 (collimator)를 지나 두 번째 조준기로 후광 중성자를 제거해 주고 하전입자는 첫 번째 조준기와 두 번째 조준기 사이에 설치된 쌍극자 자석 (dipole magnet)을 이용하여 제거해 주고 나서 케이온을 입사방향에서 16도 편향된 중성 빔라인 (neutral beamline) 상에 위치한 E14 검출기로 유도한다. 표적 핵에 의해 생성된 하전입자들은 빔라인 상에 있는 쌍극자 자석으로 배제시킨다. 표적 핵에 의해 생성된 γ 는 빔라인 상에 있는 납에 의해서 흡수 되지만 일부는 통과 하게 된다. 하지만 중성자의 경우는 대부분이 통과하게 된다 [3]. 우리는 먼저 GEANT4를 이용하여 J-PARC E14 검출기로 입사하는 중성 케이온이 갖는 붕괴과정 중 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 붕괴로 발생한 5개의 감마선이 CsI 섬광계에 검출되는 과정을 재현했다.

*E-mail: w00jk@jejunu.ac.kr

Table 1. Kaon Decay Modes [1].

K_L^0 decay modes		
Mode	Fraction(Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level
Semileptonic modes		
$\Gamma_1 \pi^\pm e^\mp v_e$ Called K_{e3}^0 .	[a] $(40.55 \pm 0.11)\%$	S = 1.7
$\Gamma_2 \pi^\pm e^\mp v_e$ Called K_{e3}^0 .	[a] $(27.04 \pm 1.7)\%$	S = 1.1
$\Gamma_3 (\pi \mu \text{ atom})v$	$(1.05 \pm 0.11) \times 10^{-7}$	
$\Gamma_4 \pi^0 \pi^\pm e^\mp v$	[a] $(5.20 \pm 0.11) \times 10^{-5}$	
$\Gamma_5 \pi^\pm e^\mp v e^+ e^-$	[a] $(1.26 \pm 0.04) \times 10^{-5}$	
Hadronic modes, including Charge conjugation $\times$ Parity Violating (CPV) modes		
$\Gamma_6 3\pi^0$	$(19.52 \pm 0.12)\%$	S = 1.6
$\Gamma_7 \pi^+ \pi^- \pi^0$	$(12.54 \pm 0.05)\%$	
$\Gamma_8 \pi^+ \pi^-$	CPV [a] $(1.967 \pm 0.010) \times 10^{-3}$	S = 1.5
$\Gamma_9 \pi^0 \pi^0$	CPV $(8.64 \pm 0.06) \times 10^{-4}$	S = 1.8
Semileptonic modes with photons		
$\Gamma_{10} \pi^\pm e^\mp v_e \gamma$	[a,c,d] $(3.79 \pm 0.06) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{11} \pi^\pm \mu^\mp v_\mu \gamma$	$(5.65 \pm 0.23) \times 10^{-4}$	
Hadronic modes with photons or $l\bar{l}$ pairs		
$\Gamma_{12} \pi^0 \pi^0 \gamma$	$< 2.43 \times 10^{-7}$	CL = 90%
$\Gamma_{13} \pi^+ \pi^- \gamma$	[c,d] $(4.15 \pm 0.15) \times 10^{-5}$	S = 2.8
$\Gamma_{14} \pi^+ \pi^- \gamma (DE)$	$(2.84 \pm 0.11) \times 10^{-5}$	S = 2.0
$\Gamma_{15} \pi^0 2\gamma$	[c] $(1.273 \pm 0.033) \times 10^{-6}$	
$\Gamma_{16} \pi^0 \gamma e^+ e^-$	$(1.62 \pm 0.17) \times 10^{-8}$	
Other modes with photons or $l\bar{l}$ pairs		
$\Gamma_{17} 2\gamma$	$(5.47 \pm 0.04) \times 10^{-4}$	S = 1.1
$\Gamma_{18} 3\gamma$	$< 7.4 \times 10^{-8}$	CL = 90%
$\Gamma_{19} e^+ e^- \gamma$	$(9.4 \pm 0.4) \times 10^{-6}$	S = 2.0
$\Gamma_{20} \mu^+ \mu^- \gamma$	$(3.59 \pm 0.11) \times 10^{-7}$	S = 1.3
$\Gamma_{21} e^+ e^- \gamma \gamma$	[c] $(5.95 \pm 0.33) \times 10^{-7}$	
$\Gamma_{22} \mu^+ \mu^- \gamma \gamma$	[c] $(1.0_{-0.6}^{+0.8}) \times 10^{-8}$	
Charge conjugation $\times$ Parity (CP) or Lepton Family number (LF) Violating modes, or $\Delta S = 1$ weak neutral current ($S1$) modes		
$\Gamma_{23} \mu^+ \mu^-$	$(6.84 \pm 0.11) \times 10^{-9}$	
$\Gamma_{24} e^+ e^-$	$(9_{-4}^{+6}) \times 10^{-12}$	
$\Gamma_{25} \pi^+ \pi^- e^+ e^-$	[c] $(3.11 \pm 0.19) \times 10^{-7}$	
$\Gamma_{26} \pi^0 \pi^0 e^+ e^-$	$< 6.6 \times 10^{-9}$	CL = 90%
$\Gamma_{27} \pi^0 \pi^0 \mu^+ \mu^-$	$< 9.2 \times 10^{-11}$	CL = 90%
$\Gamma_{28} \mu^+ \mu^- e^+ e^-$	$(2.69 \pm 0.27) \times 10^{-9}$	
$\Gamma_{29} e^+ e^- e^+ e^-$	$(3.56 \pm 0.21) \times 10^{-8}$	
$\Gamma_{30} \pi^0 \mu^+ \mu^-$	[e] $< 3.8 \times 10^{-10}$	CL = 90%
$\Gamma_{31} \pi^0 e^+ e^-$	[e] $< 2.8 \times 10^{-10}$	CL = 90%
$\Gamma_{32} \pi^0 \nu \bar{\nu}$	[f] $< 2.6 \times 10^{-8}$	CL = 90%
$\Gamma_{33} \pi^0 \pi^0 \nu \bar{\nu}$	$< 8.1 \times 10^{-7}$	CL = 90%
$\Gamma_{34} e^\pm \mu^\mp$	[a] $< 4.7 \times 10^{-12}$	CL = 90%
$\Gamma_{35} \mu^\pm \mu^\pm e^\mp e^\mp$	[a] $< 4.12 \times 10^{-11}$	CL = 90%
$\Gamma_{36} \pi^0 \mu^\pm e^\mp$	[a] $< 7.6 \times 10^{-11}$	CL = 90%
$\Gamma_{37} \pi^0 \pi^0 \mu^\pm e^\mp$	$< 1.7 \times 10^{-10}$	CL = 90%

3. GEANT4에서 중성 K_L^0 붕괴율 측정 방법

E14 검출기로 유도된 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 붕괴 결과로 발생된 5γ 를 E14 검출기의 주 전자기 열량 검출기인 CsI 고

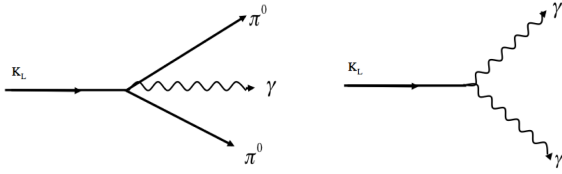


Fig. 1. (Color online) The Feynman diagram for $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ and $K_L^0 \rightarrow \gamma \gamma$.

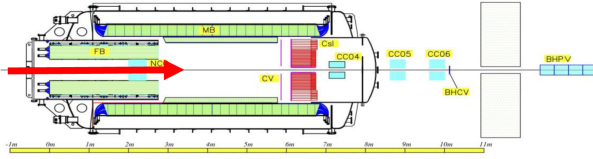


Fig. 2. E14 detector [5].

체 섬광계로 검출해서 사건을 측정한다. Fig. 2는 π^0 가 2개의 γ 로 붕괴한 후에 CsI 섬광계로 입사하는 과정을 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 오른쪽 사각형은 CsI로 구성된 열량계의 표면을 나타낸 그림이고, 왼쪽에서부터 케이온이 입사하여 붕괴할 때 생성된 π^0 가 2개의 γ 가 각 φ 를 가지고 붕괴하였을 때 거리가 d_1 과 d_2 이고, E_1 과 E_2 는 CsI 표면에 입사된 γ 를 나타낸다. 이때 케이온이 CsI 방향으로 입사 하였을 때 붕괴하는 지점에서부터 CsI 표면에 수직이 되는 방향으로 평행선을 그었을 때의 연장선 길이를 dz 라 하고 연장선에 의해 예측되

는 위치에서 2개의 γ 로부터 입사된 위치 E_1 과 E_2 로부터의 거리를 각각 r_1 와 r_2 라고 정의한다. 감마선의 에너지와 위치만이 CsI를 통해서 기록된다. 이 정보들 중 붕괴시간이 거의 같고, 에너지 분포가 작은 5개의 감마선으로 이루어진 사건을 고른다. 이렇게 선별한 CsI 섬광계에 입사된 5개의 감마선의 에너지와 위치의 정보를 가지고, 파이온의 붕괴 위치를 계산하고 재구성 시킨다. 파이온의 위치를 재구성한 후 얻은 값들을 평균해서 입사한 중성 케이온 K_L^0 을 재구성한다.

4. $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma \rightarrow 5\gamma$ 를 계산하는 이론적 배경

$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma \rightarrow 5\gamma$ 에 대한 파인만 다이어그램은 Fig. 1에서 왼쪽 그림으로 나타낸다. 이론은 Heliger 그리고 Sehgal이 정의 하였는데 다음과 같이 정의 한다.

$$A(K_L^0 \rightarrow \pi^0(p_1)\pi^0(p_2)\gamma(k)) = \frac{gE_2(p_1 - p_2) \cdot k}{M_K^4} (\varepsilon \cdot p_1 k \cdot p_2 - \varepsilon \cdot p_2 k \cdot p_1)$$

이 식에서 p_1, p_2 그리고 k 는 입사 입자의 운동량을 보여 준다. 그리고 ε 는 감마 선 분극을 나타낸다. 후에 이 행렬요소들을 제공한 후에 감마선 분극들을 다 더하여주면 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma \rightarrow 5\gamma$ 에 대한 붕괴비를 계산할 수 있고 다음과 같이 나타낸다 [2].

$$\frac{d^2\Omega}{dE_\gamma d\beta} = \frac{g_{E_2}^2 E_\gamma^4 |\vec{P}_1|^2 \sin(\beta^3)}{32\pi^3 \Lambda^4 M_K^7 E_1 E_2} ((E_1 - E_2) - (|\vec{P}_1|^2 \cos(\beta) - |\vec{P}_2|^2 \cos(\theta)))$$

이 식에서 E_1 그리고 E_2 는 2개의 파이온에 대한 에너지를 나타내고, β 는 γ 그리고 하나의 파이온 사잇각을 나타낸다. θ 는 감마와 하나의 파이온의 사잇각을 나타낸다 [3].

카이랄 섭동 이론 (χ^{PT})를 증명하는 붕괴과정 중 하나는 Fig. 1의 오른쪽 그림에서 보여주고 있는 $K_L^0 \rightarrow \gamma \gamma$ 이다. $K_L^0 \rightarrow \gamma \gamma$ 붕괴과정은 카이랄 섭동 이론을 이용하여 표준 모형의 유효 카이랄 라그랑지안 (effective chiral Lagrangian)을 운동량 (momentum)의 관점에서 $O(p^4)$ 항까지 전개하고 있다 [2]. $K_L^0 \rightarrow \gamma \gamma$ 붕괴과정은 카이랄 섭동 이에 의하면 $O(p^4)$ 까지 값이 0이다. Fig. 1의 왼쪽 그림인 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 붕괴과정의 경우 $K_L^0 \rightarrow \gamma \gamma$ 와 마찬가지로 $O(p^4)$ 까지 값이 0(zero)이 되어있다. 하지만

$O(p^5)$ 부터는 계산이 복잡해지나 $O(p^5)$ 항의 경우 중성미자 (neutrino)에 질량을 부여하는 항이라서 실험에서는 값을 0이라 하므로 사실상은 6차항부터 복잡해 지는 것이다. $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 붕괴과정의 경우 $O(p^6)$ 항의 계산은 $O(p^4)$ 까지 0이 되므로 직접적으로 측정할 수 있다. 그러나 $O(p^6)$ 항부터는 낮은 항들의 기여가 너무 크기 때문에 계산하기가 쉽지 않다 [2]. 이는 더 나아가 Fig. 1의 오른쪽 그림의 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \gamma \gamma$ 붕괴과정은 카이랄 섭동 이론의 $O(p^6)$ 항의 크기에 대한 이론적 불확실성에 대해서 답을 제공해 줄 필요가 있으며 이에 대한 답은 결국 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 e e$ 붕괴에서 CP가 보존이 되는 항의 크기에 대해서 기인을 한다. $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 붕괴과정은 언급한 바와 같이 CP (Charged-Parity)가 보존되는 항의 크기가

Table 2. Effective Chiral Lagrangian [4]

$L_{chiralorder}$ (Number of Low Energy Constant)	Loop order
$L_{p^2}(2) + L_{p^4}(10) + L_{p^6}(90)$	$L = 0$
Where $L_{p^2}(2) + L_{p^4}(10)$ is Lagrangians relate for Standard Model	$L \leq 1$
	$L \leq 2$

$O(p^4)$ 까지는 값이 0이므로 CP가 보존이 된다는 사실을 알고 있지만, 6차항 이상의 경우는 CP가 보존이 되는 항이 바뀔 수 있으므로 $K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ 의 붕괴과정의 측정이 필요하다. Table 2는 카이랄 섭동 이론의 각 항들에 대한 결과 값을 보여 주고 있다 [6,7].

II. 실험 방법

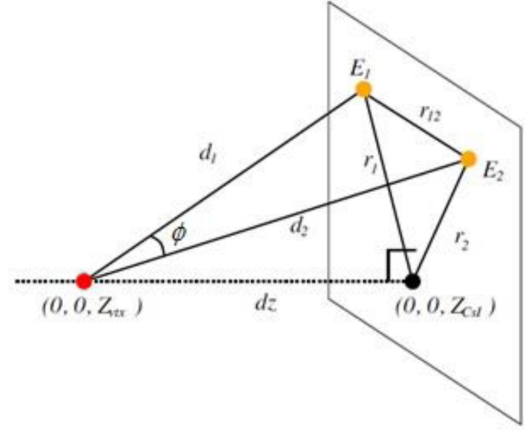
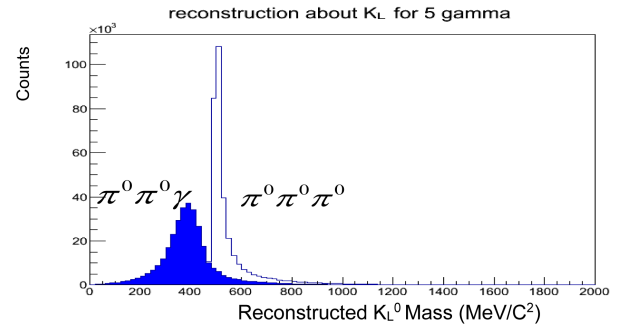
1. J-PARC E14(KOTO)의 중성 K_L^0 붕괴율 측정 방법

이번 실험의 주 목적은 중성 K_L^0 이 붕괴과정 중 하나인, $K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ 과정에서 발생한 π^0 가 2개의 γ 로 붕괴 하였을 때, 발생한 6개의 γ 중 하나가 검출이 안되었거나 2개의 γ 가 하나로 입사된 경우에 대해 GEANT4를 이용하여 측정하는 것이다.

Fig. 3은 E14 검출기의 단면도를 나타낸 그림이다. 전산모사의 설정은 다음과 같이 정했다. 운동에너지 1 GeV인 중성 케이온이 $K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0 \rightarrow 6\gamma$ 로 붕괴하여 CsI 열량계로 입사하는 것을 GEANT4로 재구성 했다. 이후 CsI 열량계에 입사된 감마선 정보를 가지고 입사한 중성 케이온 K_L^0 를 이를 통해서 생성된 6개의 감마선을 가지고 5개의 감마선으로 오인되는 경우를 재구성해 보았다. CsI 열량계에 입사된 감마선의 정보를 추출하여 입사한 중성 K_L^0 를 재구성하는 흐름도는 Fig. 7과 같다.

GEANT4를 이용한 전산모사에서는 개별의 코드를 사용하는데 기본적으로 Particle Data Group에서 제공하는 붕괴비를 이용한다. 전산모사에서 입사 입자로 사용한 여러 중성 케이온 붕괴과정중 $K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ 붕괴과정의 경우 붕괴가 갈래비 19.83 %로 설정되어 있고, 입사 에너지를 1 GeV로 하였다. 그 외 검출기의 구성은 실험과 동일하게 구성되어 있다. 전산모사의 결과는 고에너지 물리 분야에서 널리 쓰이는 분석 프로그램인 ROOT 파일로 저장이 된다.

5γ 로부터 K_L^0 을 재구성하는 알고리즘은 다음과 같다. 먼저 $K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ 붕괴과정을 전산모사를 통해 생성된

Fig. 3. (Color online) Schematic view of π^0 reconstruction.Fig. 4. (Color online) Reconstructed K_L^0 mass distribution from $K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ data

결과로부터 $K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$ 로 오인되는 결과를 재구성하기 위해 주된 배경사상이 되는 $K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$ 붕괴과정에서 2개의 π^0 를 재구성한 후, 나머지 2개의 감마선이 남게 되는데, 이중 검출기에 들어간 감마선을 감마선1이라 칭하고 다른 하나를 감마선2라고 칭하였고, 먼저 재구성한 π^0 의 정보를 고정한 후 감마선1과 감마선2를 번갈아 가면서 제거하며 5개의 감마선으로 구성이 된 중성 케이온을 재구성 하였다. 이렇게 재구성된 중성케이온 에너지를 입사한 중성 케이온의 에너지와 비교 분석했다.

III. 실험결과 및 분석

중성 케이온이 붕괴과정, $K_L^0 \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$,을 확인하기 위해서는 CsI 섬광계로 검출된 감마선들로부터 케이온의 재구성 방법이 필요하다. 중성 케이온을 재구성하기 위해서는 먼저 2개의 감마선으로부터 1개의 π^0 를 재구성해야 한다. 재구성하는 방법은 Fig. 2를 보게 되면 검출

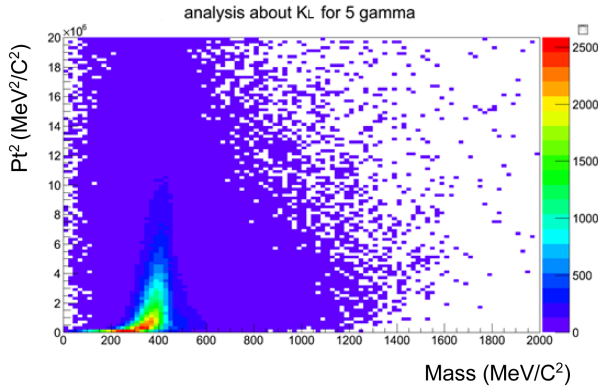


Fig. 5. (Color online) Reconstructed K_L mass distribution from $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ data.

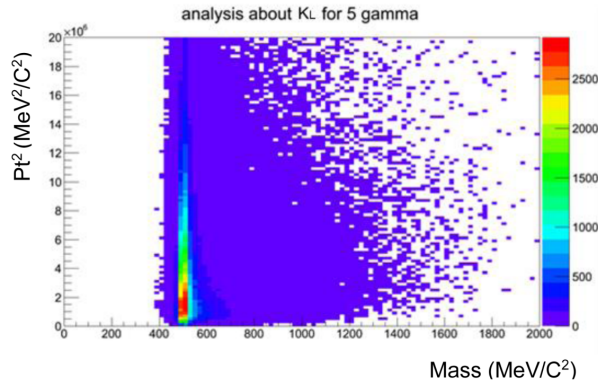


Fig. 6. (Color online) Reconstructed K_L mass distribution from $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ data.

기에 2개의 γ 가 검출기 되었을 때 식을 $\cos\theta = 1 - \frac{M_{\pi^0}^2}{2E_1 E_2}$, 이용해 하나의 π^0 의 붕괴지점을 구하고 다른 2개의 γ 로부터 두 번째 π^0 의 붕괴지점을 각각 구한 후에 두 π^0 붕괴지점의 평균값을 구한다.

그 다음에는 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 전산모사 결과로부터 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 의 재구성한 π^0 의 붕괴위치를 확인해야 한다. $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 붕괴과정에서 2개의 γ 가 검출기에 신호를 남길 때 하나의 γ 로 기록을 남기면 5 γ 사건으로 오인되기 때문이다. 따라서 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 의 전산모사 결과로 인해 생성이 될 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 붕괴과정과 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 의 붕괴과정의 비교가 필요하다. 이때 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 붕괴로부터 5개의 γ 로부터 2개의 γ 를 선택 가능한 조합은 10개이다. $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 붕괴로부터 생성된 2개의 γ 로부터 한 개의 π^0 를 확인한 후 붕괴위치를 확인하고 나서 중성 케이온의 질량을 재구성한다.

Fig. 4는 중성 케이온의 질량을 재구성한 도수분포표이다. 이 도수분포표는 3 π^0 데이터에서 2 $\pi^0 \gamma$ 붕괴로 오인되는 배경사상을 나타낸 그림과 3 π^0 를 보여주고 있는 그림으로 두 가지 사항을 발견할 수 있다. 하나는 3 π^0 로

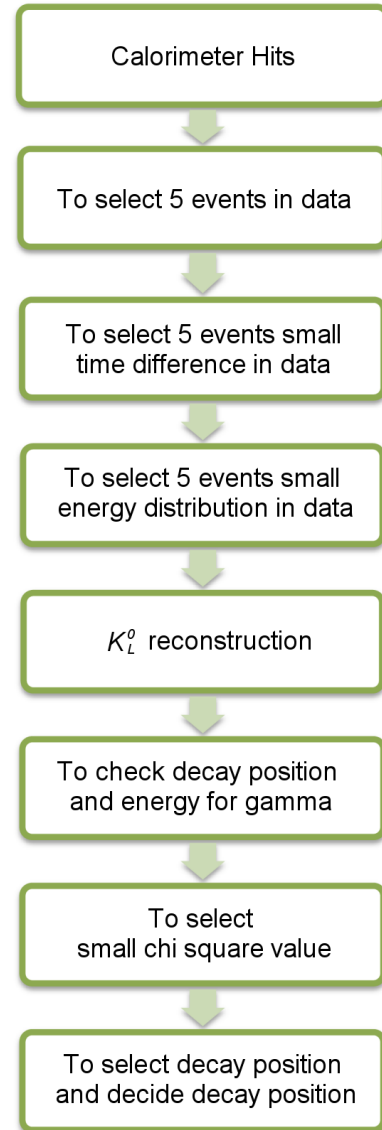


Fig. 7. (Color online) The sequence flow of a Neutral Kaon decay, $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$, reconstruction.

붕괴한 중성 케이온을 재구성한 질량은 약 500 MeV인 것을 확인할 수 있으며, 또 다른 하나는 5개의 γ 로 붕괴한 것으로 오인된 것 중 하나의 γ 는 검출기 중앙으로 빠져 나간 것으로 확인이 되는 것이다. 그 이유는 6개의 감마선을 생성해 내어 6개의 γ 로 조합을 하고 그 이후에 1개의 감마선을 제거해 보았더니 1개의 감마선이 사라져서 또 다른 감마선을 제거해도 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 가 CsI에 검출이 된 Fig. 4의 히스토그램의 결과와 동일한 결과를 보여주었다.

Fig. 5는 6개의 감마선을 생성해 내는 전산모사 결과에서 하나의 감마선을 뺀 에너지 영역이 약 400 MeV 부근인데, 이는 재구성된 하나의 π^0 가 없어서 그런 것이다.

반면 Fig. 6의 경우는 6개의 감마선을 생성해 내는 전산 모사 결과에서 하나의 감마선을 빼지 않고 재구성에 성공한 부분들이 모여있는 에너지 영역이 약 500 MeV에 있는 것으로 보아서 케이온이 6개의 감마선으로 최종 붕괴하는 과정에서 조합이 잘 안되었더라도 재구성은 되었다고 볼 수 있다.

IV. 요약 및 결론

중성 케이온의 하나의 붕괴과정인 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma \rightarrow 5\gamma$ 과정은 최종적으로 5개의 감마선을 방출하는 특색 있는 붕괴과정으로 감마선을 2-3개만 방출하는 다른 중성 케이온 붕괴과정들 보다는 특정하기가 상대적으로 용이한 과정이다. 5γ 사건이라 부르는 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma \rightarrow 5\gamma$ 붕괴 과정은 표준모형을 검증하고 나아가서 표준모형 이후의 모형에 대한 방향을 설정하는데 도움을 줄 것이다.

이 논문에서는 5γ 사건을 측정하는 실험을 소개 했으며, 5γ 사건을 재구성 하는 방향과 5γ 사건으로 오인되는 사건을 소개하고 오인 비율을 전산모사를 통해서 계산 했다. 이 연구에서는 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 붕괴과정을 전산모사로 재구성해서 KOTO 검출기의 CsI 열량계에 도달한 감마선을 재구성해서 6개의 광자중 일부가 CsI에 인식이 되지 않아서, 5개의 광자만 인식되는 상황을 살펴 보았다. 이들 붕괴는 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \gamma$ 붕괴가 아닌 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 붕괴 이들 붕괴비를 얻기 위해선 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$ 붕괴로부터 생성된 감마선의 정보를 분석 때 제거하는 방법이 중요하다. 이 방법은 5감마선을 식별하는 유용한 방법이기는 하지만 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0 \rightarrow 6\gamma$ 붕괴가 5γ 사건으로 오인되는 확률을 줄이기 위한 보다 정교한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 제주대학교 학술 연구지원 사업에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- [1] K. A. Olive, K. Agashe, C. Amsler, M. Antonelli and J.-F. Arguin *et al.* [Particle Data Group], Chin. Phys. C **38**, 090001 (2014).
- [2] D. E. Smith, Ph.D thesis, B.S., University of Oklahoma, 2001.
- [3] J. Comfort, J. Figgins, M. Bogdan, J. Ma and F. Tang *et al.* (E14 Collaboration), <http://j-parc.jp/NuclPart/Proposale.html> (accessed Apr., 28. 2006)..
- [4] G. Ecker, Nucl. Phys. B Proc. Suppl. **245**, 0920 (2013).
- [5] K. Shiomi, K. Y. Baek, J. Comfort, E. Iwai and N. Kawasaki *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **664**, 264 (2012).
- [6] E. Abouzaid, M. Arentom, A. R. Barger, L. Bellantoni and E. Blucher *et al.*, Phys. Rev D **78**, 032014 (2008).
- [7] S. Scherer, Adv. Nucl. Phys. **27**, 277 (2003).