

학사학위 논문

$D^+ \rightarrow K^+ \pi^0$ 모드의 branching
fraction 측정을 위한 reconstruction
efficiency 계산

2021 년 12 월

송실대학교 자연과학대학

물리학과

황해연

지도교수 김양수 인

황해연의 학사학위 논문을 인준함

국문초록

황해연

물리학과

송실대학교 자연과학대학

D 중간자 희귀 붕괴 모드의 갈래비를 측정하는 것은 표준 모형의 이론 계산을 검증하는 데 중요하다. 이 연구는 Belle II 실험에서 D 중간자 희귀 붕괴 모드인 $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ 모드의 갈래비 측정에 필요한 재구성 효율 계산을 목표로 한다. 이 과정에서 Belle II 검출기에 대하여 시뮬레이션한 신호 MC 시뮬레이션 데이터를 이용했다. 이 데이터를 재구성 한 후 figure of merit 이 최대가 되는 선택 조건을 찾았고, 조건에 해당하는 재구성 효율을 계산했다. 계산 결과 $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ 모드의 재구성 효율은 $7.35 \pm 0.1232\%$, $D^- \rightarrow K^-\pi^0$ 의 재구성 효율은 $7.05 \pm 0.1161\%$, $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ 의 재구성 효율은 $11.686 \pm 0.0439\%$, $D^- \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ 의 재구성 효율은 $11.838 \pm 0.0444\%$ 이다. 이 연구에서 사용한 MC 시뮬레이션 데이터에서 배경 사건은 beam background 만을 포함하기 때문에 유의미한 선택 조건을 찾을 수 없었다. 유의미한 선택 조건을 찾고, 그 조건에 대응하는 재구성 효율을 계산하는 연구가 진행되어야 한다.

목차

국문 초록	2
1.서론	5
1.1 이론적 배경	5
1.1.1 연구 동기	5
1.1.2 D 중간자(D mesons)	6
1.1.3 갈래비(branching fraction)의 측정	7
1.2 실험설계	8
1.2.1 supper KEKB	8
1.2.2 Belle2 검출기	10
1.3 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션	13
2.본론	14
2.1 연구에 이용한 MC	14
2.2 재구성	15
2.2.1 사건 선택	15
2.2.2 조건 최적화	17
2.3 Data fitting	20
3.결론	22
3.1 결과 정리	22
3.2 한계점 및 앞으로의 연구	22
감사의 글	23
참고문헌	23

그림 목차

그림 1 표준모형의 기본입자	5
그림 2 Belle2 검출기 평면도	9
그림 3 Cherenkov angle detector 의 원리	11
그림 4 입자의 종류에 따른 shower shape	12
그림 5 조건에 따른 figure of merit 과 신호사건, 배경사건의 분포	18
그림 6 K^+ 의 PID 에 대한 히스토그램	19
그림 7 신호모드 피팅 결과 $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ (좌), $D^- \rightarrow K^-\pi^0$ (우)	20
그림 8 신호모드 피팅 결과 $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ (좌), $D^- \rightarrow K^+\pi^-\pi^-$ (우)	20

표 목차

표 1 D 중간자 목록 (PDG)	6
표 2 $D^{*\pm}$ 의 붕괴 모드, 각 값은 PDG 에서 가져옴	7
표 3 Signal MC request	14
표 4 $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ 모드의 사건 선택 조건	16
표 5 최적화된 선택 조건	21
표 6 조건을 적용 시킨 재구성 효율	21
표 7 재구성 효율 결과 정리	22

제 1 장 서론

1.1 이론적 배경

1.1.1 연구 동기

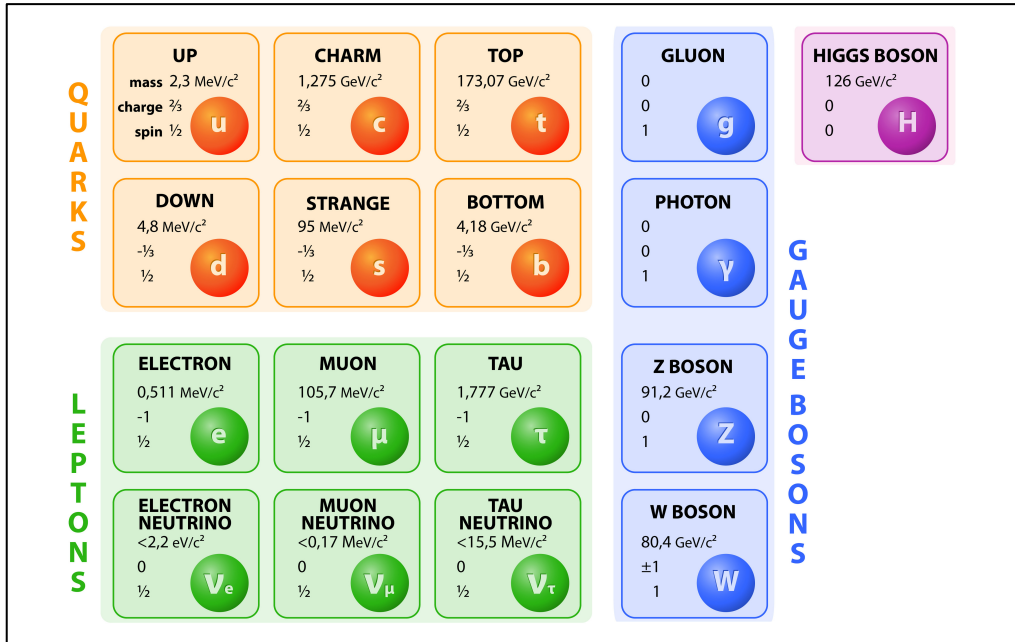


그림 1 표준모형의 기본 입자

이 세상은 무엇으로 이루어져 있는가? 이 오래된 질문에 대하여 현대물리학은 표준 모형이라는 답을 제시했다. 표준 모형은 물질을 이루는 12 개의 입자와 그 입자들의 상호작용에 대응하는 5 개의 입자로 우주의 기본 법칙을 설명하는 이론이다. 표준 모형에서 이야기하는 기본 입자들의 상호작용을 연구하는 방법 중 하나로, 고 에너지 물리학이 있다. 고 에너지 물리학은 높은 에너지의 입자의 충돌을 통해 발생한 입자들을 분석하여 원자보다 작은 세상에서 일어나는 현상들을 탐구한다. 이 논문의 연구는 Belle2 실험에서 발생하는 $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ 의 붕괴 과정을 다룬다. 이 모드는 희귀한 붕괴 모드로, D 메존 희귀 붕괴 모드의 갈래비(branching fraction)측정은 c 쿼크의 약한상호작용, SU(3) 맛깔 대칭성 깨짐(flavor symmetry breaking) 등 표준모형의 이론적 연구에 활용될 수 있다. [2] 이 논문의 연구는 $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ 의 갈래비를 계산하는데 필요한 값인 재구성 효율(reconstruction efficiency)를 계산하는 것을 목표로 한다.

1.1.2 D 중간자(D mesons)

중간자란 쿼크와 반쿼크가 같은 개수로 결합한 입자이다. D 중간자는 charm 쿼크 (c 쿼크)가 포함된 중간자들 가운데 질량이 가벼운 입자들로, c 쿼크와 u, d, s 의 반쿼크 또는 c 의 반쿼크와 u, d, s 쿼크가 결합된 중간자이다. 이러한 쿼크 구성으로 인해 D 중간자는 c 쿼크가 다른 쿼크로 변하는 방식으로 붕괴한다. c 쿼크는 W^\pm 보손을 교환하며, 같은 세대의 쿼크인 s 쿼크로 변화하는 경향을 보이며, 이에 따라 D 중간자는 높은 확률로 케이온과 파이온으로 붕괴한다. [8] 아래의 표는 D 중간자의 목록과 성질을 적은 표이다.

입자 (반입자)	쿼크구성	질량(MeV/c^2)	공명너비	$I (J^P)$	평균수명($10^{-15}s$)
$D^+(D^-)$	$c\bar{d}(d\bar{c})$	1869.02 ± 0.2	.	$\frac{1}{2} (0^-)$	1040 ± 7
$D^0(\bar{D}^0)$	$c\bar{u}(u\bar{c})$	1864.85 ± 0.17	.	$\frac{1}{2} (0^-)$	410.1 ± 1.5
$D_s^+(D_s^-)$	$c\bar{s}(s\bar{c})$	1968.47 ± 0.33	.	$0 (0^-)$	500 ± 7
$D^{*+}(D^{*-})$	$c\bar{d}(d\bar{c})$	2010.26 ± 0.05	$< 2.1 MeV$	$\frac{1}{2} (1^-)$.
$D^{*0}(\bar{D}^{*0})$	$c\bar{u}(u\bar{c})$	2006.85 ± 0.05	$83.4 \pm 1.8 keV$	$\frac{1}{2} (1^-)$.

표 1 D중간자 목록 (PDG)[6]

입자의 이름 위에 붙은 선은 반 입자를 의미한다. 입자의 이름과 쿼크구성에서 괄호 안의 요소는 반입자에 해당하는 요소이다. 공명 너비(resonance width)는 질량의 공명 너비로, 불확정성 원리인 $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$ 과 연관 되어있다. 입자의 평균수명(Δt)이 작아질 수록 width(ΔE)는 증가한다.[7] I는 입자의 아이소스핀(isospin)이고, J는 총 각운동량이며, P 는 parity 대칭에 대한 고유 값(eigen value)이다. 점으로 표시한 값은 PDG Particle List 에 기록되지 않은 값이다.

1.1.3 갈래비(Branching fraction)의 측정[1]

D 중간자는 불안정한 입자로, 시간이 지나면 여러가지 다른 입자들로 붕괴한다. 어떤 불안정한 입자가 붕괴되는 각각의 경우를 붕괴 모드라고 한다.

붕괴 모드	갈래비
$D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+$	$67.7 \pm 0.5\%$
$D^{*+} \rightarrow D^+ \pi^0$	$30.7 \pm 0.5\%$
$D^{*+} \rightarrow D^+ \gamma$	$1.6 \pm 0.4\%$

표 2 D^{*+} 의 붕괴 모드, 각 값은 PDG에서 가져옴

위의 표는 D^{*+} 중간자가 붕괴하는 붕괴 모드를 나타낸 표다. D^{*+} 중간자는 $67.7 \pm 0.5\%$ 의 확률로 $D^0 \pi^+$ 로 붕괴하고, $30.7 \pm 0.5\%$ 의 확률로 $D^+ \pi^0$ 로 붕괴하며, $1.6 \pm 0.4\%$ 의 확률로 $D^+ \gamma$ 로 붕괴한다. 이때 각 모드로 붕괴할 확률을 갈래비(Branching fraction)이라고 한다. 이 논문에서 다룬 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0$ 모드는 희귀 붕괴 모드로, PDG에 기록된 갈래비는 $(2.08 \pm 0.21) \times 10^{-4}\%$ 이다.

아래 식은 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0$ 의 갈래비를 식으로 표현한 것이다.

$$BF(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0) = \frac{N(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0)}{N(D^+)}$$

위 식의 우변에는 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0$ 모드가 일어난 개수가 있다. 그러나 분석에 사용 할 데이터는 재구성(reconstruction)과정을 거치기 때문에, 재구성 된 데이터 샘플에 포함된 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0$ 모드 개수와 $N(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0)$ 에는 차이가 있다. 따라서 갈래비 계산하기 위해 전체 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0$ 의 개수와 데이터 샘플에 포함된 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0$ 의 개수 비율을 알아내야 한다. 이 비율을 위 식에 적용한 식은 아래 식이다.

$$BF(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0) = \frac{N_{fit}(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0)}{N(D^+)} \frac{N(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0)}{N_{fit}(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0)}$$

$\frac{N_{fit}(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0)}{N(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0)}$ 를 재구성 효율(reconstruction efficiency), $\epsilon_{D^+ \rightarrow K^+ \pi^0}$ 로 정의하면 위 식은 아래의 식으로 정리된다.

$$BF(D^+ \rightarrow K^+\pi^0) = \frac{N_{fit}(D^+ \rightarrow K^+\pi^0)}{\epsilon_{D^+ \rightarrow K^+\pi^0} N(D^+)}$$

위 식에서 $N(D^+)$ 를 직접 계산하는 것은 큰 계통 오차(systematic error)를 만들어 내기 때문에 $N(D^+)$ 를 직접 계산하는 대신 비교적 잘 측정된 $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ 모드와 비교하여 branching fraction 을 계산한다. $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ 모드는 신호 모드(signal mode), $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ 모드는 기준 모드(reference mode)라 부른다.

$$BF(D^+ \rightarrow K^+\pi^0) = \frac{N_{fit}(D^+ \rightarrow K^+\pi^0)}{N_{fit}(D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+)} \times \frac{\epsilon_{D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+}}{\epsilon_{D^+ \rightarrow K^+\pi^0}} \times BF(D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+)$$

우변에서 첫번째 항은 실험 데이터 분석을 통해 계산해야 하는 값이고, 두번째 항은 몬테카를로(Monte Carlo)데이터 분석을 통해 측정하는 값이고, 세번째 항은 잘 측정되어 있는 기준 모드의 갈래비다. 이 논문의 연구주제는 두번째 항인 재구성 효율을 계산하는 것이다.

1.2 실험 설계

1.2.1 Supper KEKB

KEKB 의 belle 과 PEP-II 의 BarBar 는 B-factory 실험으로 분류된다. 이 두개의 B-factory 실험은 B 중간자에서의 CPV(물질-반물질 비대칭)을 관측했다. 이 결과는 CPV 에 대한 Kobayashi 와 Maskawa 의 가설이 옳다는 것을 검증했고, 2008 년 노벨 물리학상을 수상했다. Belle II 는 약한 핵 상호작용의 매개변수들을 정밀하게 측정하여 표준 모형으로 설명 할 수 없는 새로운 물리현상을 찾기 위해 설계되었다. supper KEKB 는 e^-e^+ 입자 충돌기로, $2.4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 광도(luminosity)로 세계 기록을 갱신했다. [4] e^- 의 에너지는 대략 7GeV, e^+ 의 에너지는 대략 4GeV 로, 비대칭 적으로 충돌한다.

1.2.2 Belle2 검출기[3]

그림 2는 Belle2 검출기의 평면도이다. 원통 대칭의 검출기의 단면을 그린 그림이다. Belle2 검출기는 꼭지점 검출기(Vertex Detector, VXD), 중앙 표류 상자(Central Drift Chamber, CDC), 확인 시스템(PID system), 전자기 열량계(Electromagnetic Calorimeter, ECL), 수명이 긴 케이온-뮤온 검출기(K-Long and Muon detector, KLM)로 구성되어 있다. 아래는 각 검출기의 구조에 대한 설명이다

a) 꼭지점 검출기(Vertex Detector, VXD)

이 절에서 꼭지점(Vertex)이란 어떤 입자가 붕괴 또는 생성되는 분기점을 의미한다. 꼭지점 검출기는 상호작용 지점(Interaction Point, IP)에서 가까운 Vertex의 위치를 정밀하게 측정할 수 있는 검출기이다. VXD는 픽셀 검출기(PiXel Detector, PXD)와 실리콘 꼭지점 검출기(Silicon Vertex Detector, SVD)로 이루어져 있다. PXD $50 \times 55 \mu\text{m}^2$ 크기의 DEPFET 실리콘 센서 픽셀 800 만개로 이루어져 있다. 이 각각의 픽셀들은 두 겹으로 IP를 감싸는 형태로 설치된다. 각각 반지름 14mm, 22mm 떨어져 있다. PXD는 입자가 이 검출기를 지나는 위치를 정확하게 측정할 수 있다. 서로 다른 입자들이 검출기를 지나는 위치를 결합하여 vertex의 위치를 측정할 수 있다. SVD는 폭 $50 \mu\text{m}$ 의 실리콘 스트립으로 이루어져 있다. 이 스트립은 2차원 위치를 측정하기 위해 두개의 수직인 방향으로 설치되어 있다.

b) 중앙 표류 상자(Central Drift Chamber, CDC)

CDC는 입자의 궤적을 추적할 수 있는 검출기이다. 헬륨-에테인($\text{He} - \text{C}_2\text{H}_6$) 기체로 채워진 통 안에 전자기적 변화를 측정할 수 있는 센서 와이어가 설치된 실린더 형태의 검출기이다. 실린더의 안쪽 반경은 160mm이고, 바깥 반경은 1130mm이다. 센서와이어의 지름은 $30 \mu\text{m}$ 이다. 이 와이어에 높은 전압이 걸려있고, 와이어 주변에 강한 전기장이 유도된다. 전하를 띤 입자가 CDC를 지날 때, 기체 원자와 입자의 충돌로 인해 기체 원자는 전자를 방출하고 양이온이 된다. 방출된 전자는 강한 전기장에 의해 와이어 방향으로 이동한다. 전자가 와이어로 이동하며 기체 원자를 추가로 이온화 시켜 신호가 증폭된다. CDC 내부에 배치된 14336개의 와이어의 신호를 분석하여 CDC 내부 입자의 궤적을 추적한다. 전하를 띠지 않은 입자는 CDC에서 검출되지 않는다.

c) PID 시스템(Particle Identification system)

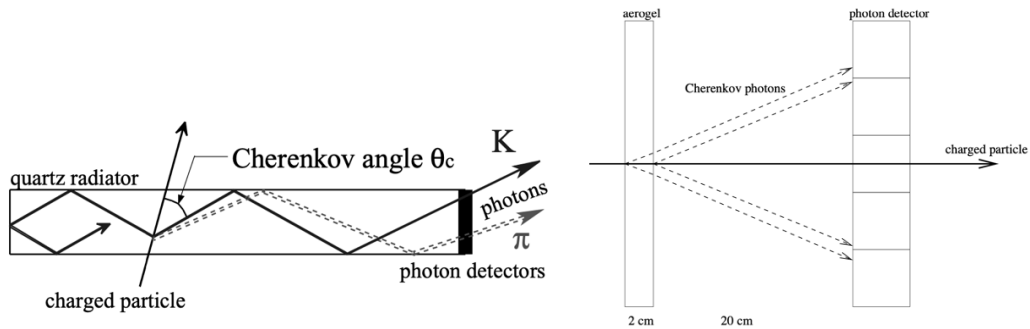


그림 3 Cherenkov angle detector의 원리[3]

PID 시스템은 입자가 물질 속으로 진행할 때, 그 물질에서의 빛의 속도보다 빠르게 진행하면 방출하는 체렌코프 복사(Cherenkov radiation)의 각도를 측정하는 장치이다. 이때 이 복사가 방출되는 방향과 입자의 진행 방향 사이의 각도를 체렌코프 각도(Cherenkov angle)라 한다. 고정된 운동량에 대해서 체렌코프 각도는 입자의 질량에 의존하기 때문에 이 검출기는 입자의 종류를 알아내는 과정인 PID(Particle Identification)에 사용된다. 전파 시간 측정기(Time of Propagation, TOP)는 원통의 옆면 부분(barrel region)에 설치되는 검출기이다. 얇은 판 형태의 수정을 입자가 지나면 체렌코프 광자(Cherenkov photon)를 방출한다. 이후 수정 내부에서 전반사를 통해 전파되어 수정 판 한쪽 끝에 있는 센서에 도달하게 된다. 체렌코프 각도에 따라 빛이 진행하는 경로가 달라진다. 빛이 도달한 센서의 위치와 빛이 수정 내부에서 전파한 시간을 이용해서 체렌코프 각도를 계산한다. 그림 3의 왼쪽은 TOP의 측정 원리를 그림으로 표현한 것이다. 에어로젤 고리 상 체렌코프 검출기(Aerogel Ring-Image Cherenkov detector, ARICH)는 원통의 밀면 부분(end-cap region)에 위치한 체렌코프 각도 검출기로, 입자가 에어로젤 물질을 통과하며 방출한 체렌코프 복사의 고리 모양 상을 이용하여 체렌코프 각도를 측정한다. 에어로젤로부터 20cm 떨어진 센서에 맺힌 고리 모양 상의 반지름을 측정하여 체렌코프 각도를 측정한다. 그림 3의 오른쪽은 ARICH의 측정 원리를 나타낸 그림이다. ARICH는 Belle2 검출기의 앞쪽에만 설치되어 있는데, 이는 e^-e^+ 의 에너지가 비대칭적이기 때문이다.

d) 전자기 열량계(Electromagnetic Calorimeter, ECL)

ECL 은 광자, 전자와 상호작용하며 방출하는 에너지를 측정하기 위해 설계된 검출기이다. 8736 개의 CsI(Tl) 결정으로 이루어져 있고, 광자의 에너지와 각 위치를 정확하게 측정한다, 입자가 ECL 에 에너지를 방출하면 CsI(Tl)결정에서 섬광 현상이 발생하는데, 이때 섬광의 에너지는 입자가 ECL 에 방출한 에너지와 비례한다. 따라서 섬광의 에너지를 측정하여 입자가 ECL 에 방출한 에너지를 측정 한다. 입자에 따라 ECL 결정에 에너지를 방출하는 패턴이 다르다. 이 패턴을 소나기 모양(shower shape)이라고 부른다.

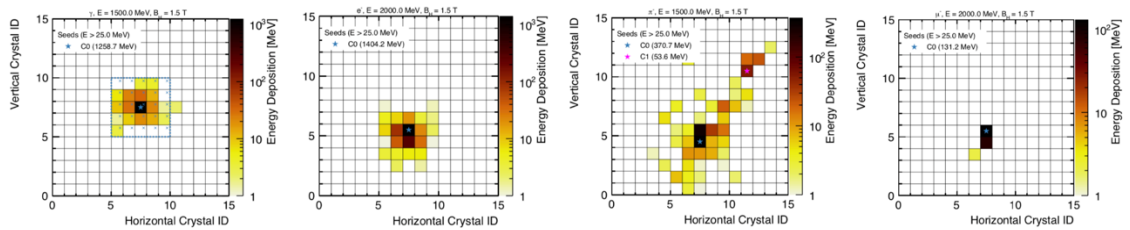


그림 4 입자의 종류에 따른 shower shape¹

그림 4 는 입자의 종류별로 ECL 결정 격자에서 소나기 모양을 표현한 그림이다. 왼쪽에서부터 γ , e^- , π^- , μ^- 이 방출하는 패턴이다. 입자가 방출한 에너지가 높은 격자일 수록 짙은 색으로 표시되어있다. γ 는 대체로 5X5 격자 안에서 에너지를 방출하며, 대칭적으로 분포한다. e^- 는 γ 과 비슷한 모양이지만 자기장과 Bremsstrahlung 복사의 영향으로 비교적 비대칭적이다. π^- 는 강입자로, 밀도가 높은 결정을 지날 때 강한 핵 상호작용에 의한 shower 를 발생시킨다. 이에 따라 넓고,비대칭적인 모양으로 에너지를 방출한다. Belle2 실험에서 방출되어 ECL 에 도달한 μ^- 는 최소 이온화 입자(Minimum Ionizing Particle, MIP)로, ECL 에 shower 를 많이 남기지 않고, 그림 4 와 같은 작은 흔적을 남긴다. 소나기 모양은 체렌코프 각도와 함께 PID 과정에 이용된다.

e) K_L^0 and Muon detector (KLM)

KLM 은 Belle2 detector 의 가장 바깥쪽에 있는 검출기이다. 이 검출기는 K_L^0 과 μ 을 구분하기 위해 만들어진 검출기이다. 4.7cm 두께의 철 판과 검출기 물질이 교대로 싸고 있는 형태의 검출기이다. 이 두께는 대략 3.9 상호작용 거리(interaction

¹Belle II Starter kit Workshop, KEK, January31st 2020 - Marco Milesi

length)로, K_L^0 이 강한 상호작용에 의한 소나기를 만들기 충분한 길이이다. 상호작용 거리는 주어진 물질과 입자에 대하여 입자가 물질을 통과할 때 핵반응을 일으키지 않고 진행 하는 평균 거리이다. ECL 의 두께는 K_L^0 의 상호작용거리의 0.8 이다. K_L^0 는 KLM 을 전부 통과하지는 못하지만 μ 는 통과한다.

1.3 Monte Carlo Simulation[3]

이 논문에서 reconstruction efficiency 를 계산하기 위해 Monte Carlo(MC)데이터를 이용한다. MC 데이터를 생성하는 과정은 사건 생성(Event generation), 시뮬레이션의 두 부분으로 나누어진다.

사건 생성은 e^- , e^+ 충돌의 초기 조건을 통해 연구에 필요한 입자들의 정보를 계산하는 과정이다. 이 과정에서 입자의 위치와 4-모멘텀을 계산한다. 분석에 필요한 붕괴 모드만 생성한 것을 신호 MC(signal MC)라 하고, 분석하고자 하는 모드를 제외하고 입자를 생성할 경우 배경 MC (background MC)라 부른다. 이 논문에서 재구성 효율을 구하기 위해 신호 MC 데이터를 사용한다. 재구성 효율과 함께 최적화된 조건(cut)을 찾는 과정을 수행하기 위해 beam background 가 포함된 데이터를 이용했다.

시뮬레이션은 생성된 초기 위치와 운동량을 갖는 입자와 Belle2 검출기와 상호작용을 계산한다. 실제 검출기에서는 입자가 검출기를 지날 때 검출기는 이온화, 섬광, Bremsstrahlung 복사, 쌍 생성, 체렌코프 복사 등의 현상을 일으키고, 검출기는 이 현상들을 측정한다. 이 현상들은 Geant4 라는 프로그램을 통해 시뮬레이션 된다. Geant4 란 물질을 지나는 입자에 대한 시뮬레이션을 할 수 있는 프로그램이다. 고 에너지 물리학, 핵 및 가속기 물리학, 우주과학, 의료 과학 등에 널리 사용되는 프로그램이다. Geant4 프로그램은 입자의 4-벡터와 가상의 Belle2 검출기의 정보를 입력 받고, 각 검출기와 입자의 상호작용을 계산하고, 실제 측정값과 같은 정보를 계산한다.

제 2 장 본 론

2.1 연구에 이용한 MC data

이 연구에 이용한 MC data 는 Belle II Data Production Group 에서 생성했다. 이 논문에서 $\epsilon_{D^+ \rightarrow K^+\pi^0}$ 와 $\epsilon_{D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+}$ 를 계산하기 위해 4 개의 신호 MC 데이터를 이용했다. $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ 모드와 $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ 모드, 그리고 두 모드의 전하가 반대로 된 모드인 $D^- \rightarrow K^-\pi^0$ 와 $D^- \rightarrow K^+\pi^-\pi^-$ 모드의 신호 MC 데이터를 분석했다. 각 데이터의 질량중심에서의 에너지(CM energy)는 $\Upsilon(4S)$ 의 질량인 10.579557GeV 이고, 검출기 구성(detector config)는 early phase 3 이다. 생성된 신호 사건(signal event)의 개수는 10^6 개 이고, beam background 도 함께 시뮬레이션 되었다. 아래 표는 신호 MC 생성을 요청 하기 위해 제출해야 하는 정보이다.

Decay Mode	$D^+ \rightarrow K^+\pi^0$	$D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$	$D^- \rightarrow K^-\pi^0$	$D^- \rightarrow K^+\pi^-\pi^-$
CM energy	4S	4S	4S	4S
Decay Descriptor	[ccbar Dstp2DpPi0 Dp2KpPi0]	[ccbar Dstp2DpPi0 Dp2KmPipPip]	[ccbar Dstm2DmPi0 Dm2KmPi0]	[ccbar Dstm2DmPi0 Dm2KpPimPim]
Detector config	early phase 3	early phase 3	early phase 3	early phase 3
Event type	2613014004	2613032009	2613014005	2613032010
No. of Events	1M	1M	1M	1M
BGx0 / BGx1 ratio	0/1	0/1	0/1	0/1
decay file location	./2613014004.dec	./2613032009.dec	./2613014005.dec	./2613032010.dec

표 3 Signal MC request

CM energy 는 질량중심에서 에너지, Decay Descriptor 는 각 붕괴 모드의 정보를 문자열 형태로 나타낸 것, Detector config 는 시뮬레이션에 사용할 검출기의 버전, Event type 은 각 모드의 성질에 의해 결정되는 고유한 번호, No. of Events 는 시뮬레이션 되는 이벤트의 개수, BGx0/BGx1 ratio 는 Beam Background 가 포함된 데이터와 그렇지 않은 데이터의 비율, decay file location 은 signal MC 의 generating 에 필요한 정보를 담은 파일인 decay file 의 위치를 의미한다.

2.2 재구성(Reconstruction)

재구성(Reconstruction)이란 검출기에서 측정된 전기적인 신호를 분석할 수 있는 정보로 바꿔 주는 과정이다. 검출기의 전기 신호를 안정적인 최종 입자(final particle)의 정보로 바꾸고, 이후 모입자(mother particle)의 정보를 얻기 위해 거치는 모든 과정을 재구성 이라고 부른다. 이 연구에서 재구성은 Belle Analysis Software 2 (Baf2) 버전은 light-2104-poseido 를 이용해 진행 했다. Baf2 를 통해 재구성을 하기 위해서 Mini Data Summary Table(mDST)과 python 기반으로 작성된 steering file 이 필요하다. mDST 는 재구성을 진행할 데이터이고, steering file 은 baf2 에서 데이터를 처리하는 과정을 분석 목적에 맞게 조종하는 파일이다. Steering 은 직역하면 조종하다 라는 의미로, 실제 데이터는 파이썬 코드를 통해 처리 되는 것이 아니라, steering file 에 입력한 순서로 baf2 를 통해 처리된다.

선행 연구에서 많은 수의 combinatorial background 를 줄이기 위하여 $D^{*+} \rightarrow D^+\pi^0$ 과정에서 발생한 D^+ 만을 이용했다. 이 연구에 사용한 배경 사건은 Beam Background 만을 포함하기 때문에 combinatorial background 를 분석 할 수 없었다. π^0 는 재구성된 입자로 , 두개의 광자(photon)를 재구성한다. π^0 가 두개의 광자로 붕괴할 갈래비는 98.82%이다(PDG particle list). 이 과정에서 두개의 구분 되는 π^0 가 있는데, 하나는 $D^{*+} \rightarrow D^+\pi^0$ 에서 나온 π^0 이고, $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ 이다. 전자와 후자는 운동량의 크기를 통해 구분 할 수 있다. 전자는 운동량이 작으며, soft pion 이라고 부르고, 후자는 운동량이 크며, hard pion 이라고 부른다. 이러한 차이는 D^{*+} 와 D^+ 의 에너지 차이보다 D^+ 와 K^+ 의 에너지 차이가 더 크기 때문에 발생한다.

2.2.1 사건 선택(event selection)

Belle2 데이터에는 연구 주제와 연관되어 있는 신호 데이터(signal data) 이외에도 굉장히 많은 수의 배경 사건(background event)가 포함되어 있다. 배경 사건을 최소화 하기 위해 어떤 조건을 만족하는 데이터만 재구성에 사용하는데, 이 조건을 적용하는 과정을 사건 선택(event selection)이라고 한다. 재구성에 사용하는 조건은 비교적 느슨한 조건으로, 선행연구를 참조하여 조건을 정했다.[1] 아래 표는 $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ 모드에 적용한 조건을 정리한 표이다.

Basf2 version: light-2104-poseidon

$$D^{*+} \rightarrow [D^+ \rightarrow K^+[\pi_{\text{Hard}}^0 \rightarrow \gamma\gamma]] [\pi_{\text{Soft}}^0 \rightarrow \gamma\gamma]$$

- $D^{*+} : 0.12 < \Delta M < 0.155, xp > 0.4$
- $D^+ : 1.7 < M_{D^+} < 2.0, -0.9 < \cos \theta_{\text{Helicity}} < 0.9$
- $K^+, \pi^- : p_T > 0.1, p < 10, \text{nCDCHit} > 12, \text{dr} < 1.5, \text{dz} < 10$
- π^0 : two photons combined to π^0 using mass constraint fit, $0.115 < M < 0.15$
- $\pi_{\text{Hard}}^0 : p > 0.2$
- $\pi_{\text{Soft}}^0 : \text{useCMSFrame}(p) < 0.45$
- $\gamma : E > 0.03, 0 < p_{\text{lateral}} < 0.8$

$$D^{*+} \rightarrow [D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+][\pi_{\text{Soft}}^0 \rightarrow \gamma\gamma]$$

- $D^{*+} : 0.12 < \Delta M < 0.155, xp > 0.4$
- $D^+ : 1.7 < M_{D^+} < 2.0, -0.9 < \cos \theta_{\text{Helicity}} < 0.9$
- $K^+ : p_T > 0.1, p < 10, \text{nCDCHit} > 12, \text{dr} < 1.5, \text{dz} < 10$
- π^0 : two photons combined to π^0 using mass constraint fit, $0.115 < M < 0.15$
- $\pi_{\text{Soft}}^0 : \text{useCMSFrame}(p) < 0.45$
- $\gamma : E > 0.03, 0 < p_{\text{lateral}} < 0.8$

표 4 $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ 모드의 사건 선택 조건

useCMSFrame(p)는 질량 중심의 좌표계에서 측정된 운동량이고, xp 는 Normalized Momentum 으로, 해당 입자가 갖는 운동량과 가질 수 있는 최대 운동량에 대한 비율이다. D^+ 의 θ_{Helicity} 는 D^{*+} 의 진행방향과 K^+ 의 진행방향 사이의 각도이다. M 은 입자의 질량이고, ΔM 은 D^{*+} 의 질량과 D^+ 의 질량의 차이이다. nCDCHit 은 해당 트랙에 대한 CDC 히트 수이고, p는 운동량이고, p_T 는 수직방향 운동량(transverse momentum)이고, 트랙에서 상호작용지점(interaction point)까지 가장 가까운 수직방향 거리이고, dz 는 트랙에서 상호작용지점까지 가장 가까운 z 축 방향 거리이다. z 축의 방향은 충돌하는 e^-e^+ 빔의 방향이다.

Reconstruction 과정에서 vertex fitting 을 진행했다. Vertex fitting 이란 입자가 붕괴한 지점인 vertex 의 위치와, 그 위치에서 운동량을 계산하는 과정이다. 이 과정에서 사용한 모듈은 Tree Fitter 이다. Tree Fitter 는 연속적으로 일어나는 입자의 붕괴에 사용되는 vertex fitting 모듈로, 최종 입자의 PDG mass 와 측정된 운동량을 이용하여 붕괴 지점의 위치와, 붕괴 지점에서의 4-운동량을 계산한다. Mass constrained fit 이란 이 과정에서 입자의 질량을 PDG 에 기록된 값으로 고정하고 계산한 것을 의미한다. 위 표에서 질량, 에너지, 운동량의 단위는 GeV 이고, 각도의 단위는 rad 이다.

2.2.2 조건 최적화

사건선택에서 선택 조건(selection criteria)는 느슨한 조건으로, 재구성된 데이터에는 많은 수의 배경 사건(Background event)가 포함되어 있다. 배경 사건을 최소화하기 위해 데이터 셋에 최적화된 조건을 적용해야 한다. 이 연구에서 아래 식과 같은 figure of merit 을 정의하여 이 값이 최대가 되는 조건을 적용 시켰다.

$$FOM = \frac{N_{SIG}}{\sqrt{N_{SIG} + N_{BG}}}$$

이 연구에 사용한 데이터 셋에는 beam background 만 포함되어 있으므로, 추가적인 연구가 필요하다. 이 연구에서는 D^{*+} 딸 입자 각도, π_{Hard}^0 운동량, π_{Soft}^0 운동량, π_{Soft}^0 질량에 대한 최적화를 진행했다. D^{*+} 딸 입자 각도는 D^{*+} 의 딸 입자인 D^+ 와 π_{Soft}^0 의 운동량 사이의 각도이다. 아래 그림의 왼쪽은 조건에 따른 figure of merit 을 나타낸 그래프이고, 오른쪽은 배경 사건과 신호 사건의 분포를 나타낸 히스토그램이다. 히스토그램의 빈은 100 개이다. 위에서부터 순서대로 D^{*+} 딸 입자 각도, π_{Hard}^0 운동량, π_{Soft}^0 운동량, π_{Soft}^0 질량에 대한 그림이다. 오른쪽 그림에서 검정 히스토그램은 배경 사건과 신호 사건을 모두 포함한 히스토그램이고, 빨간색 히스토그램은 배경사건만을 이용하여 그린 히스토그램이고, 초록색 히스토그램은 신호사건만을 이용하여 그린 히스토그램이다. 각 히스토그램에서 회색 세로선을 기준으로 조건을 적용할 때 figure of merit 이 최대가 되는 지점을 표시한 선이다. D^{*+} 딸 입자 각도는 회색 선보다 작은 사건을, π_{Hard}^0 운동량은 회색 선 보다 큰 사건을, π_{Soft}^0 는 회색 선 보다 큰 사건을, π_{Soft}^0 질량은 회색 선 보다 큰 사건을 이용하는 조건을 설정 했을 때 figure of merit 이 최대가 됐다. 결과를 정리 하면 아래와 같다.

- D^{*+} Daughter angle < 0.2505rad
- $p_{\pi_{Hard}^0} > 450$ MeV
- $p_{\pi_{Soft}^0} > 125$ MeV
- $M_{\pi_{Soft}^0} > 116.25$ MeV

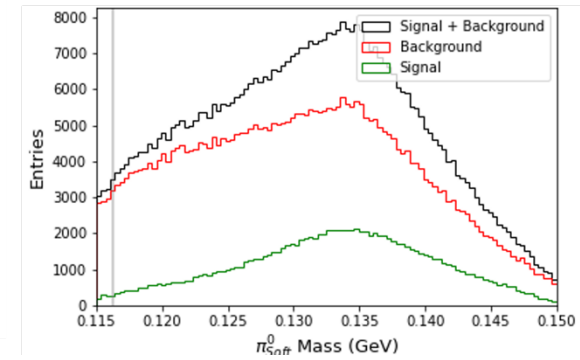
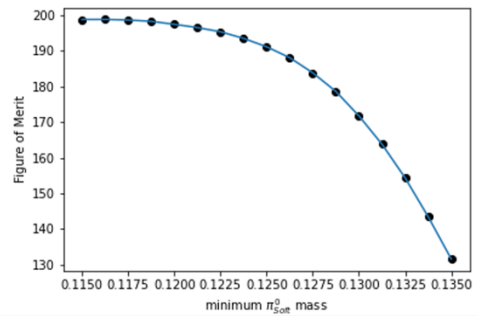
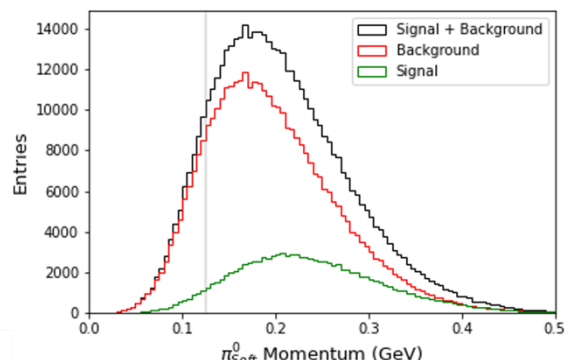
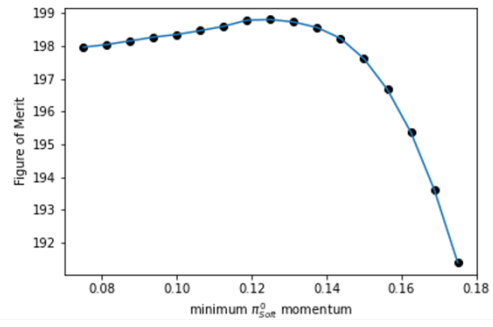
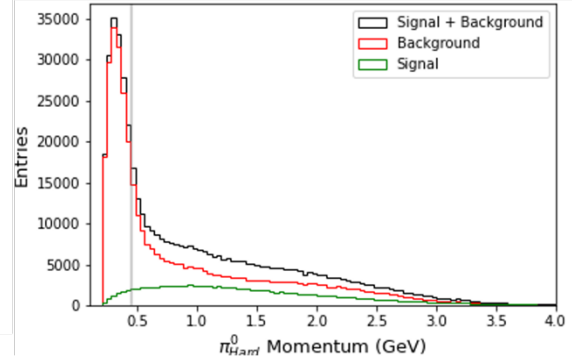
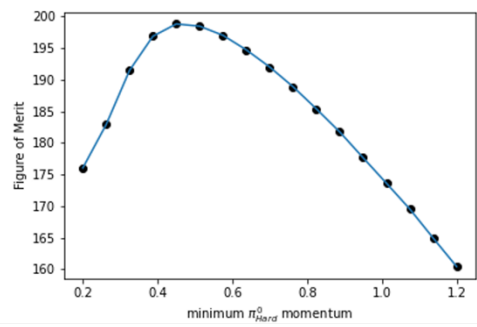
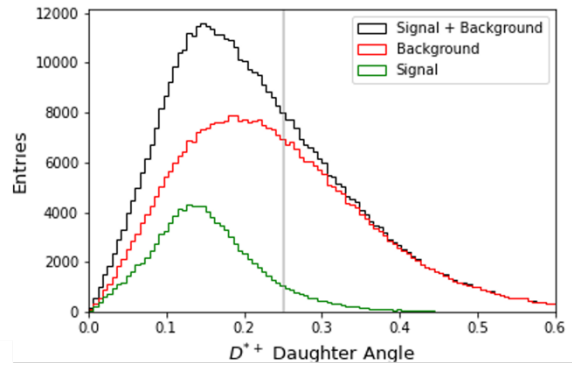
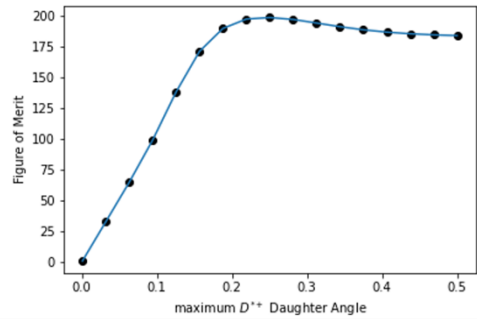


그림 5 조건에 따른 figure of merit과 신호사건, 배경사건의 분포

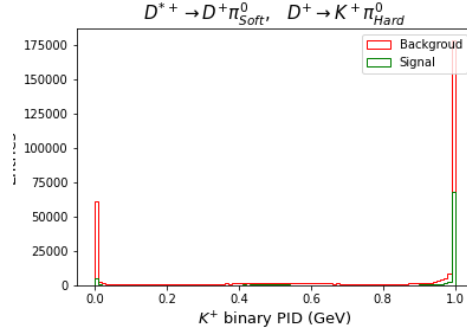


그림 6 K^+ 의 PID에 대한 히스토그램

그림 6은 K^+ 의 binary PID에 대하여 그린 히스토그램이다. 빨간 히스토그램은 배경 사건을 이용하여 그린 히스토그램이고, 초록 히스토그램은 신호 사건을 이용하여 그린 히스토그램이다. 히스토그램의 빈은 100개이다. K^+ 의 binary PID는 해당 트랙이 K^+ 일 가능성(Likelihood)과 다른 입자일 가능성을 비교한 것이다. 특별히 그림 0의 경우 케이온일 가능성과 파이온일 가능성을 비교한 값에 대하여 그린 히스토그램이다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$binary\ PID = \frac{\mathcal{L}_K}{\mathcal{L}_K + \mathcal{L}_\pi}$$

\mathcal{L}_K 는 트랙이 케이온일 가능성이고, \mathcal{L}_π 는 트랙이 파이온일 가능성이다. 이 연구에 사용한 데이터의 배경 사건은 beam background만 포함했기 때문에 대부분의 사건이 0과 1에 분포한다. 이 연구에서 binary PID은 최소 0.1이라는 조건을 적용했다. 최적화된 4개의 조건과 binary PID 조건을 적용한 뒤, 하나의 사건에 여러 개의 후보(candidate)가 있을 경우, CMS frame에서 D^{*+} 의 운동량이 가장 큰 후보만 남기고, 나머지는 삭제했다.

2.3 Data Fitting

재구성을 마친 데이터 셋은 D^+ 의 질량에 대하여 데이터 피팅 과정을 거쳤다. 피팅 이후 얻은 신호 사건의 개수를 이용하여 재구성 효율을 계산했다.

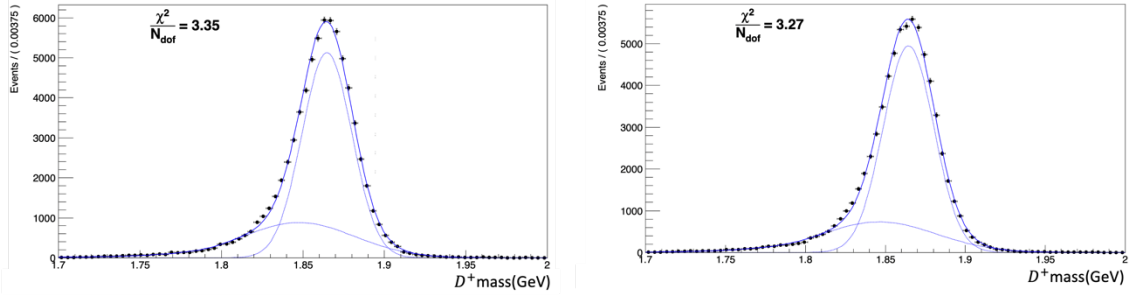


그림 7 신호모드 피팅 결과 $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ (좌), $D^- \rightarrow K^-\pi^0$ (우)

그림 7은 조건을 적용시킨 후 신호 사건만을 이용하여 80개의 빈으로 그린 히스토그램을 피팅한 것이다. 피팅 함수는 가우시안 확률분포함수와 크리스탈볼 확률분포 함수를 이용했다. 위 그림의 두개의 점선은 각각 가우시안 분포와 크리스탈볼 분포로, 신호모드의 비대칭적인 분포를 설명하기 위하여 두개의 확률분포를 더해서 피팅했다. D^+ 의 질량이 가운데보다 작은 사건이 많이 분포 하는데, 이는 D^\pm 의 딸 입자 중 전하가 있는 K^\pm 가 가속 운동 하며 에너지를 잃었기 때문이다. $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ 모드에 대하여 피팅 결과 가우시안 확률분포의 계수는 $52,508 \pm 862$, 크리스탈볼 확률 분포의 계수는 $20,991 \pm 862$ 로, 신호 사건의 개수는 $73,500 \pm 1232$ 이다. $D^- \rightarrow K^-\pi^0$ 모드에 대하여 피팅 결과 가우시안 확률분포의 계수는 $52,484 \pm 379$, 크리스탈볼 확률 분포의 계수는 $18,025 \pm 814$ 로, 신호 사건의 개수는 $70,509 \pm 1161$ 이다.

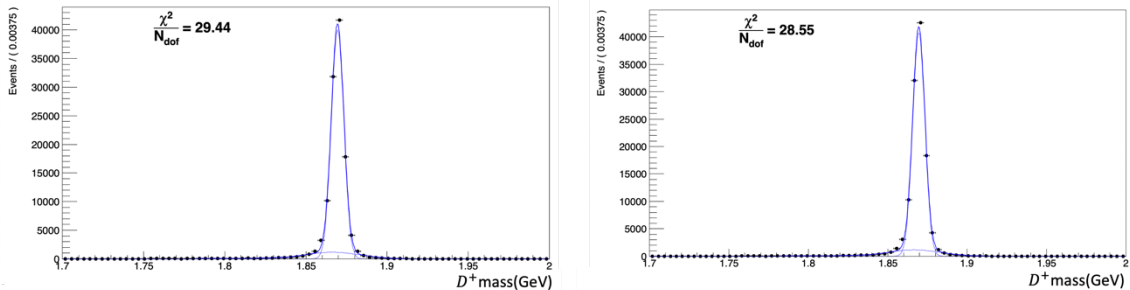


그림 8 신호모드 피팅 결과 $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ (좌), $D^- \rightarrow K^+\pi^-\pi^-$ (우)

그림 8 은 조건을 적용시킨 후 기준 사건만을 이용하여 80 개의 빈으로 그린 히스토그램을 피팅한 것이다. 피팅 함수는 가우시안 확률분포함수와 크리스탈 볼 확률분포 함수를 이용했다. $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ 모드에 대하여 피팅 결과 가우시안 확률분포의 계수는 $102,563 \pm 375$, 크리스탈볼 확률 분포의 계수는 $14,299 \pm 229$ 로, 신호 사건의 개수는 $116,862 \pm 439$ 이다. $D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-$ 모드에 대하여 피팅 결과 가우시안 확률분포의 계수는 104247 ± 379 , 크리스탈볼 확률 분포의 계수는 14133 ± 231 로, 신호 사건의 개수는 118380 ± 444 이다. 조건최적화와 재구성 효율 계산 결과를 정리하면 아래와 같다.

Baf2 version: light-2104-poseidon	
$D^{*+} \rightarrow [D^+ \rightarrow K^+ [\pi_{Hard}^0 \rightarrow \gamma\gamma]] [\pi_{Soft}^0 \rightarrow \gamma\gamma]$ <ul style="list-style-type: none"> $D^{*+} : 0.12 < \Delta M < 0.155, xp > 0.4, \text{DaughterAngle} > 0.2505$ $D^+ : 1.7 < M_{D^+} < 2.0, -0.9 < \cos \theta_{Helicity} < 0.9$ $K^+, \pi^- : p_T > 0.1, p < 10, nCDCHit > 12, dr < 1.5, dz < 10, \text{Binary PID} > 0.1$ π^0: two photons combined to π^0 using mass constraint fit, $0.115 < M < 0.15$ $\pi_{Hard}^0 : p > 0.45$ $\pi_{Soft}^0 : \text{useCMSFrame}(p) < 0.45, p > 0.125, M > 0.11625$ $\gamma : E > 0.03, 0 < p_{lateral} < 0.8$ 	$D^{*-} \rightarrow [D^- \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+] [\pi_{Soft}^0 \rightarrow \gamma\gamma]$ <ul style="list-style-type: none"> $D^{*-} : 0.12 < \Delta M < 0.155, xp > 0.4, \text{DaughterAngle} > 0.2505$ $D^- : 1.7 < M_{D^-} < 2.0, -0.9 < \cos \theta_{Helicity} < 0.9$ $K^+ : p_T > 0.1, p < 10, nCDCHit > 12, dr < 1.5, dz < 10, \text{Binary PID} > 0.1$ π^0: two photons combined to π^0 using mass constraint fit, $0.115 < M < 0.15$ $\pi_{Soft}^0 : \text{useCMSFrame}(p) < 0.45, p > 0.125, M > 0.11625$ $\gamma : E > 0.03, 0 < p_{lateral} < 0.8$

표 5 최적화된 선택 조건

D^+ decay	D^- decay
<ul style="list-style-type: none"> Signal Mode $N(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0) = 10^6$ $N_{fit}(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0) = 73,500 \pm 1232$ $\epsilon_{D^+ \rightarrow K^+ \pi^0} = 7.35 \pm 0.1232\%$ Reference Mode $N(D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+) = 10^6$ $N_{fit}(D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+) = 116,862 \pm 439$ $\epsilon_{D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+} = 11.862 \pm 0.0439\%$ 	<ul style="list-style-type: none"> Signal Mode $N(D^- \rightarrow K^- \pi^0) = 10^6$ $N_{fit}(D^- \rightarrow K^- \pi^0) = 70,509 \pm 1161$ $\epsilon_{D^- \rightarrow K^- \pi^0} = 7.05 \pm 0.1161\%$ Reference Mode $N(D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-) = 10^6$ $N_{fit}(D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-) = 118,380 \pm 444$ $\epsilon_{D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-} = 11.380 \pm 0.0444\%$

표 6 조건을 적용 시킨 재구성 효율

제 3 장 결론

3.1 결과 정리

이 연구에서 $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ 모드의 갈래비측정에 필요한 재구성 효율을 계산했다. 신호 모드로 $D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ 모드와 전하가 반대로 된 모드(charge conjugated mode)에 대하여 계산했고, 기준 모드로 $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ 모드와 전하가 반대로 된 모드에 대하여 계산했다. 필요한 4 가지 모드에 대하여 신호 MC 데이터를 생성했다. 이후 최적화된 선택 조건을 찾고, 조건에 대한 재구성 효율을 계산했다. 아래 표는 결과를 정리한 표이다.

Mode	Reconstruction efficiency
$D^+ \rightarrow K^+\pi^0$	$7.35 \pm 0.1232\%$
$D^- \rightarrow K^-\pi^0$	$7.05 \pm 0.1161\%$
$D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$	$11.686 \pm 0.0439\%$
$D^- \rightarrow K^+\pi^-\pi^-$	$11.838 \pm 0.0444\%$

표 7 재구성 효율 결과 정리

전하가 반대로 된 모드에 대하여 서로 다른 재구성 효율을 계산했는데, 이는 Belle II 검출기가 전하에 따라 다르게 검출하는 것이 큰 요인으로 작용했을 것이다.

3.2 한계점 및 앞으로 연구

이 연구에 사용된 데이터 셋에 배경사건으로 Beam Background 만 포함되어 있다. 그러나 실제 실험에서는 전자-양전자 충돌에 의해 발생한 여러가지 사건들이 이 모드의 갈래비를 측정하는데 있어 배경사건으로 작용할 수 있다. 이러한 배경 사건을 포함하는 시뮬레이션인 generic MC 데이터를 생성하고, 이 데이터에 맞는 선택 조건을 찾아낸 뒤, 그 선택 조건에 대한 재구성효율을 계산하는 연구가 진행되어야 한다.

$D^+ \rightarrow K^+\pi^0$ 모드와 $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ 모드의 재구성 효율은 입자들의 운동량에 종속적이라고 알려져 있다. 각 모드들에 대하여 재구성효율과 운동량 사이의 관계에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구에서 많은 도움을 주신 김양수 교수님께 감사드립니다. 교수님 연구실의 학부연구생으로 참여할 기회를 주셔서 이 연구를 진행 할 수 있었습니다. 또한 잘 모르는 입자 물리 개념을 자세히 설명해주셨습니다.

연구 과정에서 나이정 석사님의 많은 도움을 받았습니다. 아주 기초적인 소프트웨어 지식에서부터 연구 전반에 필요한 내용을 알려주고, 도와준 것에 감사합니다.

연구에 활용된 시뮬레이션을 생성해준 Belle II Data Production Group 사람들에게 감사합니다.

참고문헌

- [1] Search for the Cabibbo-Suppressed D^+ Meson Decays $D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ and $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0$, Dirk Hufnagel, 2005
- [2] Measurement of the $D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ and $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0$ Branching Fractions BarBar Collaboration, 2006
- [3] Belle II Software webpage
<http://software.belle2.org/>
- [3] Belle II Technical Design Report, KEK Report October 2010
- [4] Belle II web page
<https://www.belle2.org>
- [6] Particle Data Group, Particle List
- [7] Concepts of Modern Physics 6th edition, Arthur Beiser, Wai Cheah
번역본: 현대물리학, 장준성, 이재형 옮김
- [8] D mesons
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/dmeson.html>