석사학위 논문

Belle II 몬테카를로 데이터를 이용한 $D^0 \to \pi^+\pi^-$ 채널과 $D^0 \to K^+K^-$ 채널의 time-integrated CP 대칭성 깨짐의 측정

Measurement of time-integrated CP asymmetry in $D^0 \to \pi^+\pi^-$ and $D^0 \to K^+K^-$ with Belle II Monte Carlo data

2020년 6월

숭실대학교 대학원

물리학과

김 재 연

석사학위 논문

Belle II 몬테카를로 데이터를 이용한 $D^0 \to \pi^+\pi^-$ 채널과 $D^0 \to K^+K^-$ 채널의 time-integrated CP 대칭성 깨짐의 측정

Measurement of time-integrated CP asymmetry in $D^0 \to \pi^+\pi^-$ and $D^0 \to K^+K^-$ with Belle II Monte Carlo data

2020년 6월

숭실대학교 대학원

물리학과

김 재 연

석사학위 논문

Measurement of time-integrated CP asymmetry in $D^0 \to \pi^+\pi^-$ and $D^0 \to K^+K^-$ with Belle II Monte Carlo data

지도교수 김 양 수

이 논문을 석사학위 논문으로 제출함

2020년 6월

숭실대학교 대학원

물리학과

김 재 연

김재연의 석사학위 논문을 인준함

심 사 위 원 장 이 태 훈 인

심 사 위 원 김 양 수 인

심 사 위 원 최 수 경 인

2020년 6월

숭실대학교 대학원

목 차

국문초록 ····· v

영문초록 ····· vi

제 1 장 서론 ····· 1

1.1 Belle II 실험 ····· 1

1.1.1 KEKB/Belle 실험 ····· 1

1.1.2 SuperKEKB/Belle II 실험 ····· 2

1.2 Belle II detector ····· 2

1.2.1 Belle II detector를 이용한 연구 방식 ····· 3

1.3 연구의 의의 ····· 4

제 2 장 본론 ····· 5

2.1 연구에 이용한 MC data ····· 5

2.1.1 Event selection ····· 5

2.2 Time-integrated CP asymmetry(A_{CP})의 측정 방법 ····· 6

2.2.1 A_{rec} 계산 ····· 6

2.2.2 A_{ϵ}^{π} 계산 ····· 7

2.2.3 A_{CP} 추출 ····· 7

2.3 A_{CP} 계산 ····· 8

2.3.1 Signal fitting ····· 8

2.3.2 A_{CP} fitting ····· 18

제 3 장 결론 22

참고문헌 23

표 목 차

[표 2-1] reconstruction을 위해 설정한 selection cut ····· 5
[표 2-2] 각 채널의 entry number ····· 31
[표 3-1] 계산된 A_{CP} ····· 22

그 림 목 차

[그림 1-1] SuperKEKB 가속기와 Belle II detector ····· 1
[그림 1-2] Belle II 검출기의 구조 ····· 3
[그림 2-1] 각 Decay channel의 D^0 mass histogram ····· 9
[그림 2-2] 각 Decay channel의 D^0 mass fitting ····· 14
[그림 2-3] $D^0 \to \pi^+\pi^-$와 $D^0 \to K^+K^-$의 $A_{CP}(|\cos\theta|)$ plot ····· 19

국문초록

Belle II 몬테카를로 데이터를 이용한 $D^0 \to \pi^+\pi^-$ 채널과 $D^0 \to K^+K^-$ 채널의 time-integrated CP 대칭성 깨짐의 측정

김재연

물리학과

숭실대학교 대학원

표준 모형에서 Charm particle의 Time-integrated CP asymmetry (A_{CP})는 1/1000 정도거나 더 작다. A_{CP}를 이보다 더 나은 정밀도로 측정할 수 있다면 New Physics의 발견을 기대해 볼 수 있다. 그 중에서 $D^0 \to \pi^+\pi^-$와 $D^0 \to K^+K^-$ 채널의 A_{CP}는 Belle collaboration의 $976 fb^{-1}$ data sample을 이용한 선행 연구에서 각각 $A_{CP}^{\pi\pi} = (+0.55 \pm 0.36 \pm 0.09)\%$, $A_{CP}^{KK} = (-0.32 \pm 0.21 \pm 0.09)\%$로 측정된 바가 있다.[1] 본 연구에서는 Belle II 실험 데이터의 본격적인 축적에 앞서, M. Staric와 유사한 방법을 이용해 Belle II Monte-Carlo data로 $D^0 \to \pi^+\pi^-$ 채널과 $D^0 \to K^+K^-$ 채널의 A_{CP}를 측정한다.

ABSTRACT

Measurement of time-integrated CP asymmetry in $D^0 \to \pi^+\pi^-$ and $D^0 \to K^+K^-$ with Belle II Monte Carlo data

KIM, JAE-YEON

Department of Physics

Graduate School of Soongsil University

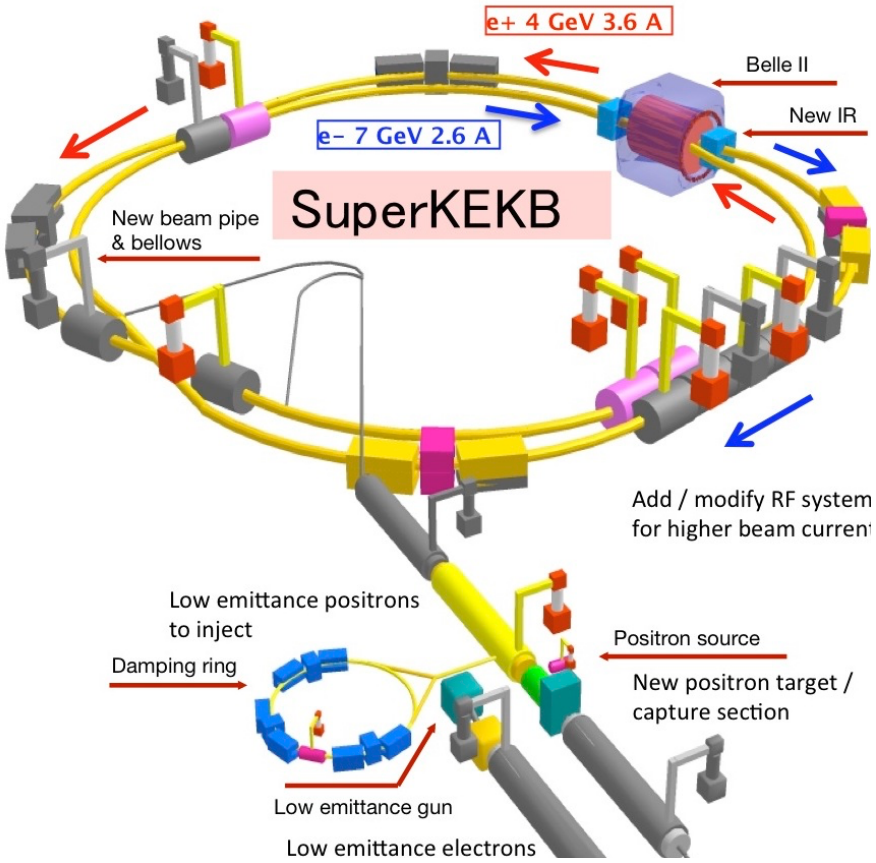
It could be the key of the new physics to measure Time-integrated CP asymmetry(A_{CP}) of Charm particles. This is because the order of A_{CP} is small($\sim O(10^{-3})$) in Standard Model. Among many charm decay channels, Belle collaboration measured A_{CP} of $D^0 \to \pi^+\pi^-$ channel and $D^0 \to K^+K^-$ using $976 fb^{-1}$ experiment data[1] whose result is $A_{CP}^{\pi\pi} = (+0.55 \pm 0.36 \pm 0.09)\%$ and $A_{CP}^{KK} = (-0.32 \pm 0.21 \pm 0.09)\%$. We calculated A_{CP} of $D^0 \to \pi^+\pi^-$ and $D^0 \to K^+K^-$ with Belle II Monte-Carlo data using the method of Staric's, before the data size of Belle II experiment data reaches to $50 ab^{-1}$.

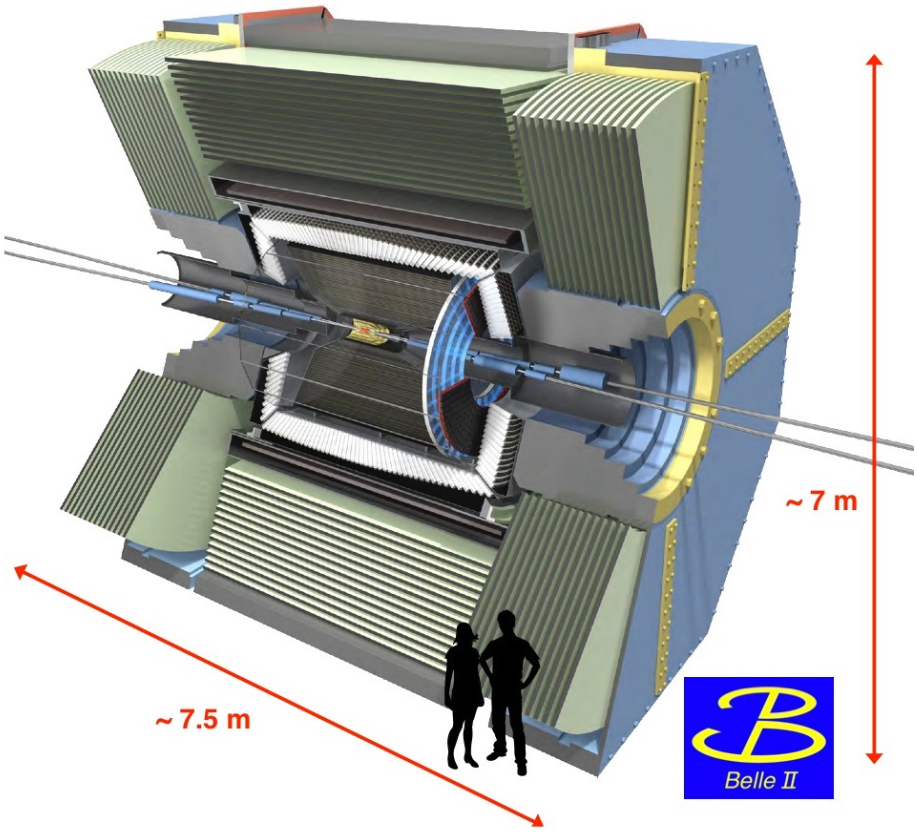
제 1 장 서 론

1.1 Belle II 실험

1.1.1 KEKB/Belle 실험

Belle 실험은 일본 이바라키현 쓰쿠바시에 위치한 고에너지 가속기연구기구(KEK)의 KEKB 가속기와 Belle detector를 이용하여 B meson의 CP 대칭성 깨짐을 측정하는 실험이다. 1998년부터 가동하기 시작하여 2010년에 데이터 측정이 종료되었으며, 2009년을 기준으로 세계 최대의 luminosity인 $2.11 \times 10^{34} cm^{-2} s^{-1}$에 도달하였다. [2]





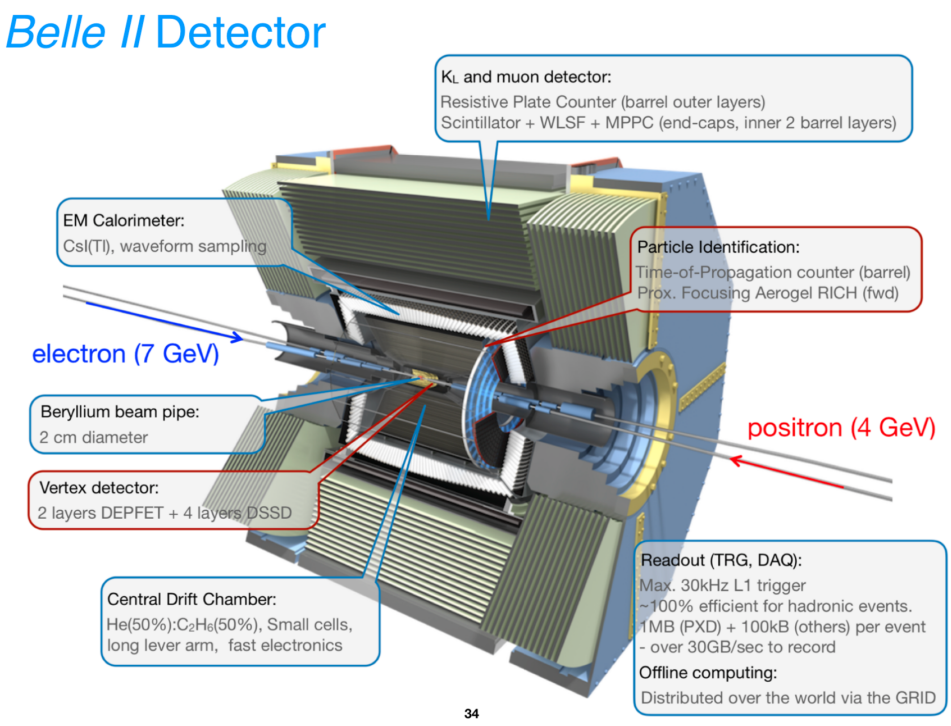
[그림 1-1] SuperKEKB 가속기와 Belle II detector

1.1.2 SuperKEKB/Belle II 실험

Belle 실험 이후 실험의 luminosity를 높여 CP 대칭성 깨짐을 보다 정밀하게 측정하기 위한 계획이 진행되었고, 성능 향상을 위해 가속기와 검출기를 개량하였다. ([그림1-1])[3] 실험의 목표 integrated luminosity는 $50ab^{-1}$이며, 2020년 현재 Phase1와 Phase2를 거쳐 Phase3에 돌입하여 본격적으로 데이터를 얻기 시작했다.

1.2 Belle II detector

KEKB 가속기가 SuperKEKB로 업그레이드되면서, Belle detector 역시 Belle II detector로 업그레이드되었다. SVD(Silicon Vertex Detector)와 PXD(Pixel Vertex Detector)가 새롭게 디자인되었고 ARICH detector와 TOP detector를 비롯한 Particle ID system도 완전히 일신했다. KEKB 당시 대비 더 작아진 빔 다발과 향상된 입자 검출 성능, 목표치인 $50ab^{-1}$의 데이터량으로 New physics를 발견할 수 있을 것으로 기대된다.[4]



[그림 1-2] Belle II 검출기의 구조(BELLE2-TALK-CONF-2019-047)

1.2.1 Belle II detector를 이용한 연구 방식

[그림 1-2]에는 Belle II detector의 구성 요소가 나와 있다. Beam pipe를 지나 충돌한 e^+와 e^-는 다양한 입자로 붕괴하고, B meson이나 D

meson 같은 불안정한 입자들은 안정한 final state particle로 다시 붕괴한다. 안정한 final state particle들은 가장 먼저 VXD(Vertex Detector)와 CDC(Central Drift Chamber)를 지나며 운동량이 측정된다. 그 후 ARICH(Aerogel RICH)와 TOP(Time of Propagation counter)를 지나며 어떤 입자인지 식별되고(PID), ECL(Electromagnetic Calorimeter)를 통해 에너지가 측정되고, KLM(K-Long and Muon detector)에서 Long-lived particle인 K_L와 μ를 검출한다.

검출기의 각 부분에서는 final state particle들의 정보만을 얻을 수 있으므로, 분석 대상인 mother particle들의 정보를 얻기 위해서는 final state particle의 정보를 모아 재구성(reconstruction)을 해야 한다. Belle II 실험에서 분석을 하는 과정에서는 BASF2(Belle II Analysis Software Framework)를 이용하고 있다.

1.3 연구의 의의

표준 모형에서 D meson의 CP violation의 크기는, $O(10^{-3})$ 정도로 작은 것으로 예측된다.[5] Belle II 실험에서 D meson CP asymmetry의 측정 정확도는 $O(10^{-4})$에 도달할 예정이므로[6], 목표치인 $50ab^{-1}$의 데이터가 축적된다면 D meson의 CP 대칭성이 유의미한 수준에서 깨져 있는지를 확인할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 실험 데이터 양이 본격적으로 늘어나기 전에, Belle 실험의 M. Staric *et al.*의 방법을 응용하여 D meson의 CP time-integrated asymmetry를 구하였다.

제 2 장 본 론

2.1 연구에 이용한 MC data

본 연구에서는 Belle II 실험의 MC12 data를 이용하였다. 총 데이터의 양은 $500fb^{-1}$이고, mixed부터 charged, uubar, ddbar, ssbar, ccbar, taupair까지 모든 샘플이 포함되어 있다. reconstruction 단계에서는 skim이 된 데이터가 사용되었으며, Beam background가 포함된 데이터(BGx0)와 Beam background가 포함되지 않은 데이터(BGx1)에 대해 각각 CP asymmetry를 계산했다.

2.1.1 Event selection

[표 2-1] reconstruction을 위해 설정한 selection cut

Particle	Criteria
K, π	$\lvert d_0\rvert < 1cm, \lvert z_0\rvert < 3cm$ $0.296706 < \theta < 2.61799$ pionID > 0.5 for π kaonID > 0.5 for K
D^0	$1.80 < M(D_0) < 1.93$ ($D^0 \to K^+K^-$, $D^0 \to K^-\pi^+$) (GeV/c^2) $1.81 < M(D_0) < 1.93$ ($D^0 \to \pi^+\pi^-$) (GeV/c^2) $p_{CMS} > 2.2$ (GeV/c)
D^{*+}	$0 < Q < 0.018$ (GeV)

[표 2-1]에는 reconstruction 과정에서 참여하는 입자들에 대한

selection cut이 나와 있다. final state particle(K, π)은 particle identification에 일반적으로 이용되는 track 정보와, 측정된 particle ID 값을 criteria로 설정하였다. D^0와 D^{*+}에는 flavor tagging을 위해 각각 CMS momentum과 Q-value criteria를 주었고, D^0의 mass cut도 주었다. D^0 mass는 $D^0 \to \pi^+\pi^-$ 채널에서 $1.81 < M(D_0) < 1.93$, 그 외의 채널에서 $1.80 < M(D_0) < 1.93$인데, $D^0 \to \pi^+\pi^-$의 mass 범위가 더 좁은 것은 high mass tail의 영향을 줄여 signal fitting을 용이하게 만들기 위함이다.

2.2 Time-integrated CP asymmetry(A_{CP})의 측정 방법

$D^0 \to \pi^+\pi^-$와 $D^0 \to K^+K^-$의 Time-integrated A_{CP}를 계산하는 방법으로는 M. Staric *et al.*[7]와 B. Aubert *et al.*[8]의 방법을 변형시킨 방법을 이용하였다.

2.2.1 A_{rec} 계산

CP asymmetry를 계산하기 위해서는, 우선 final state particle ($h = \pi, K$)들로 D^0 meson을 재구성하여 만들어진 D^0와 $\overline{D^0}$ 개수의 asymmetry(A_{rec})를 구한다.

$$A_{rec} = \frac{N(D^0 \to h^+h^-) - N(\overline{D^0} \to h^+h^-)}{N(D^0 \to h^+h^-) + N(\overline{D^0} \to h^+h^-)}$$

D^0 meson을 재구성하는 과정에서는 flavor tagging을 위해 $D^{*+} \to D^0\pi_s^+$ 모드를 재구성하여 Slow pion의 전하로 D^0인지 $\overline{D^0}$인지를 체크하는데, 이러한 이유로 A_{rec}는 A_{CP}, A_{FB}, A_ϵ^π가 충분히 작을 경우 다음과 같이 3가지 asymmetry의 합으로 나타낼 수 있다.

$$A_{rec} = A_{CP} + A_{FB} + A_{\epsilon}^{\pi}$$

이 때, A_{CP}와 A_{FB}, A_{ϵ}^{π}의 의미는 다음과 같다.

$A_{CP} = \frac{\Gamma(D^0 \to h^+h^-) - \Gamma(\overline{D^0} \to h^+h^-)}{\Gamma(D^0 \to h^+h^-) + \Gamma(\overline{D^0} \to h^+h^-)}$ …… D^0와 $\overline{D^0}$의 순수한 CP asymmetry

A_{FB} …… 검출기의 Forward-Backward asymmetry

A_{ϵ}^{π} …… Slow pion의 charge에 따른 Detection asymmetry

2.2.2 A_{ϵ}^{π} 계산

D^0의 Flavor tagging에 포함되는 $\pi_s^{\pm}$은 charge에 따라 detection efficiency에 차이가 있다. 따라서 전체 Asymmetry에서 A_{ϵ}^{π}의 기여도를 보정해줄 필요가 있는데, A_{ϵ}^{π}는 $D^0 \to K^-\pi^+$와 같은 Cabibbo-favored D^0 decay channel에 대해 Flavor tagging을 했을 때의 A_{rec}와 Flavor tagging을 하지 않았을 때의 A_{rec}의 차로 구할 수 있다.

$$A_{rec}^{untagged} = A_{CP}^{K\pi} + A_{FB}^{D^0} + A_{\epsilon}^{K\pi}$$

$$A_{rec}^{tagged} = A_{CP}^{K\pi} + A_{FB}^{D^{*+}} + A_{\epsilon}^{K\pi} + A_{\epsilon}^{\pi_s}$$

$$A_{\epsilon}^{\pi_s} = A_{rec}^{tagged} - A_{rec}^{untagged}$$

2.2.3 A_{CP} 추출

A_{rec}에서 A_{ϵ}^{π} correction을 한 asymmetry A_{rec}^{cor}는 $A_{rec}^{cor} = A_{CP} + A_{FB}$로 나타낼 수 있다. D^0의 A_{FB}는 정의 상 D^0의 CMS polar angle($\cos\theta$)에 대해 anti-symmetric이고, A_{CP}는 symmetric이기 때문에 A_{rec}^{cor}에서 A_{FB}와 A_{CP}를 다음과 같이 분리할 수 있다.

$$A_{CP} = \frac{A_{rec}^{cor}(\cos\theta) + A_{rec}^{cor}(-\cos\theta)}{2}$$

$$A_{FB} = \frac{A_{rec}^{cor}(\cos\theta) - A_{rec}^{cor}(-\cos\theta)}{2}$$

2.3 A_{CP} 계산

A_{CP}는 다음과 같은 순서로 계산하였다.

①$D^0 \to K^-\pi^+$ untagged, $D^0 \to K^-\pi^+$ tagged, $D^0 \to \pi^+\pi^-$, $D^0 \to K^+K^-$ 모든 채널에 대해 D^0 mass로 signal과 background를 fitting

②모든 D^0 mass bin에 대해 $\frac{N(signal)}{N(signal)+N(background)}$의 weight를 부여

③D^0 histogram을 일정한 크기의 $\cos\theta$ bin으로 나누어 bin마다 A_{rec}를 계산

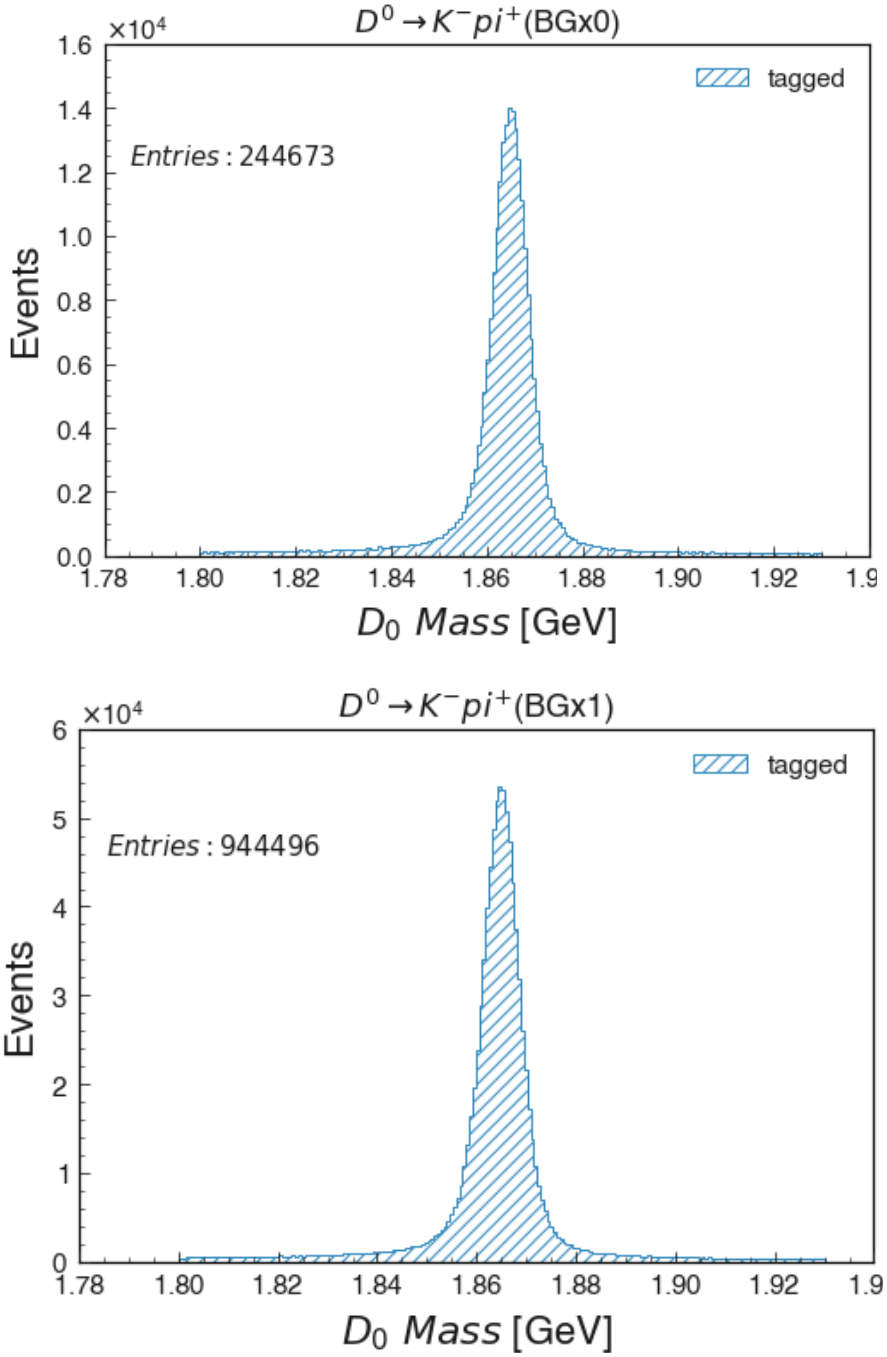
④$D^0 \to K^-\pi^+$ untagged 채널과 $D^0 \to K^-\pi^+$ tagged 채널의 A_{rec}를 이용하여 $\cos\theta$에 따른 A_ϵ^π를 계산

⑤$A_\epsilon^\pi(\cos\theta)$를 통해 $D^0 \to \pi^+\pi^-$와 $D^0 \to K^+K^-$의 $A_{rec}(\cos\theta)$를 correction

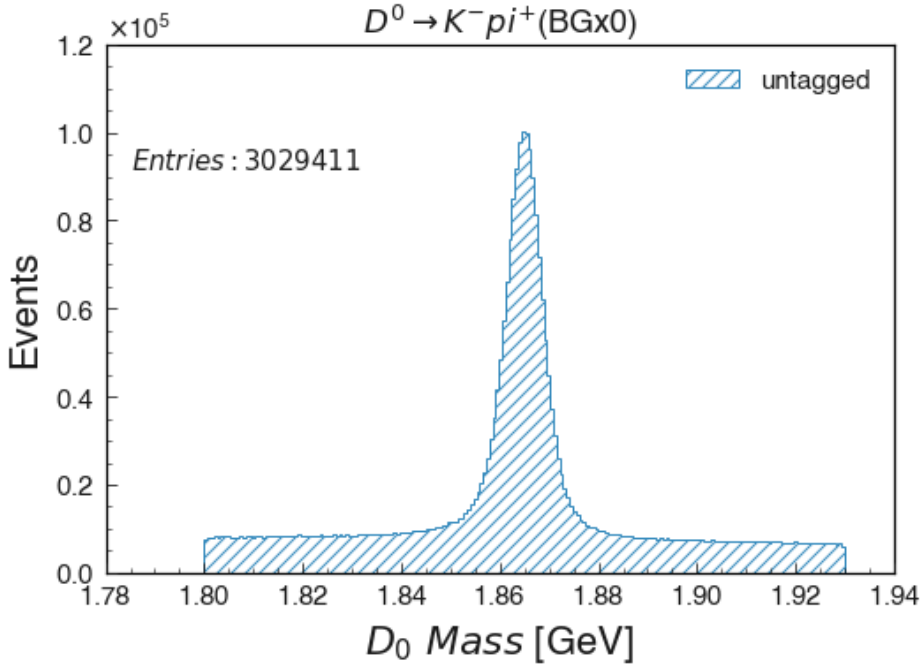
⑥식 $A_{CP} = \frac{A_{rec}^{cor}(\cos\theta) + A_{rec}^{cor}(-\cos\theta)}{2}$를 이용하여 $D^0 \to \pi^+\pi^-$와 $D^0 \to K^+K^-$의 모든 $|\cos\theta|$ bin에 대해 A_{CP}를 계산

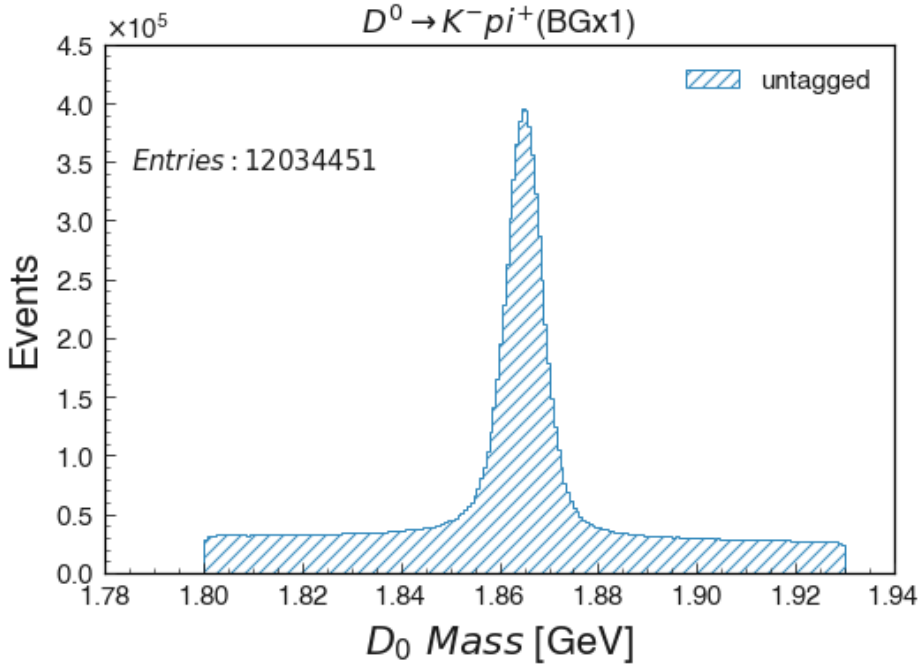
2.3.1 Signal fitting

fitting에 앞서 D^0 mass histogram을 그렸고([그림 2-1]), 각 채널의 entry number는 [표 2-2]와 같다.

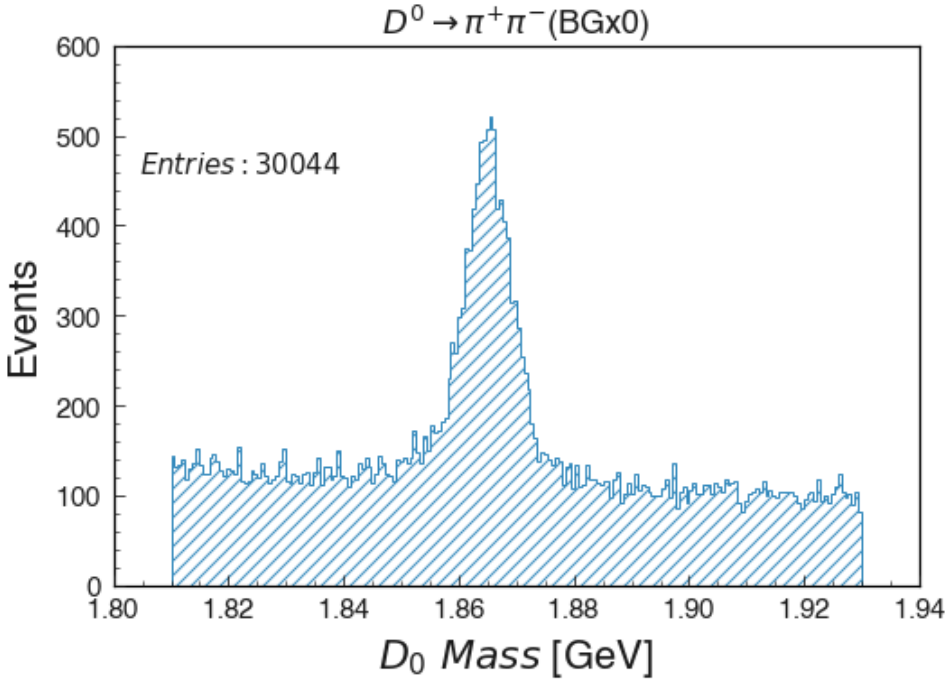


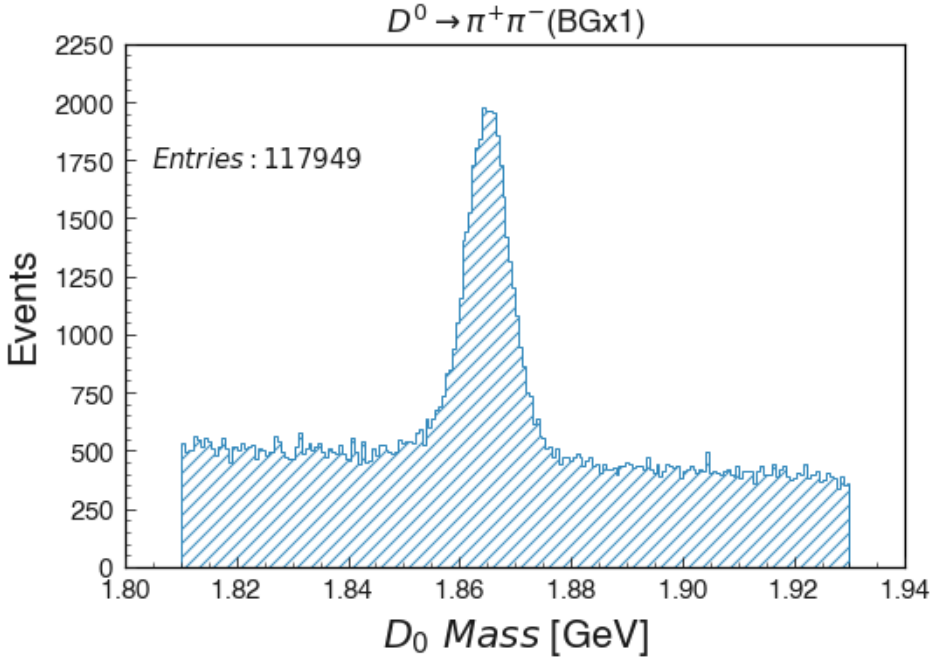
[그림 2-1(a)] $D^0 \to K^- \pi^+$ tagged의 D^0 mass histogram



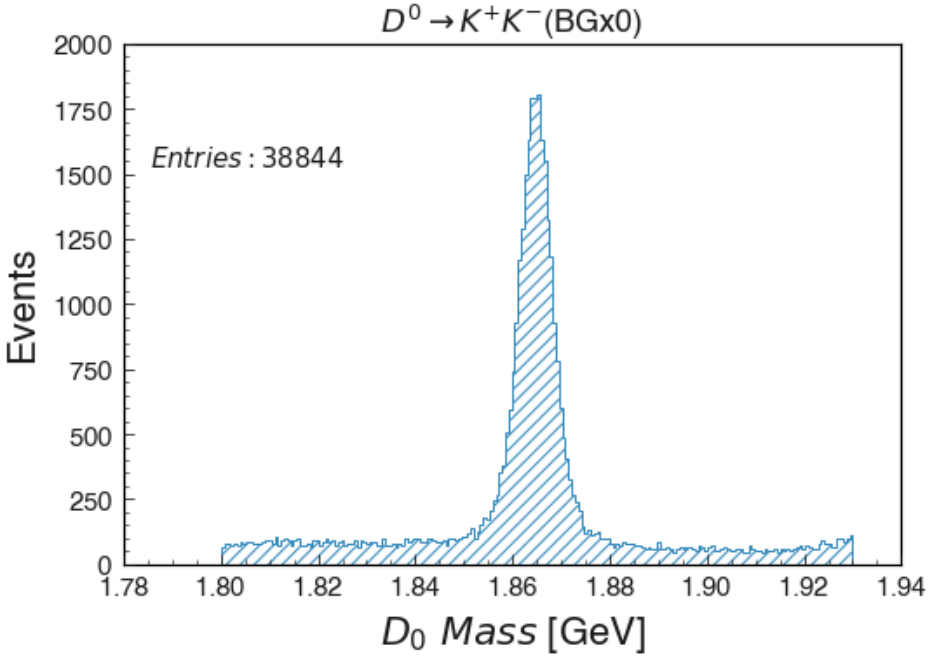


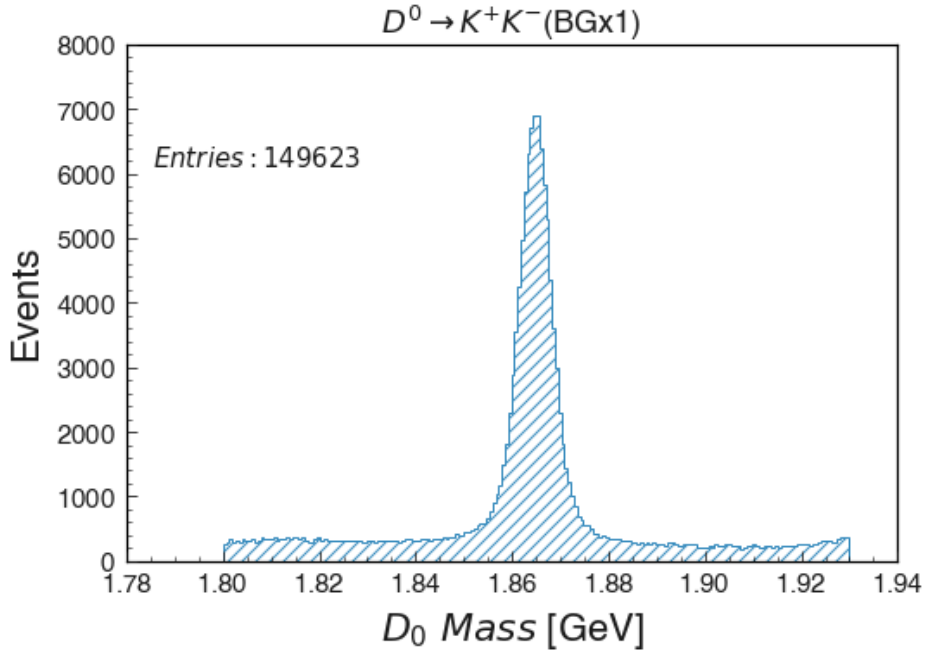
[그림 2-1(b)] $D^0 \to K^- \pi^+$ untagged의 D^0 mass histogram





[그림 2-1(c)] $D^0 \to \pi^+\pi^-$의 D^0 mass histogram



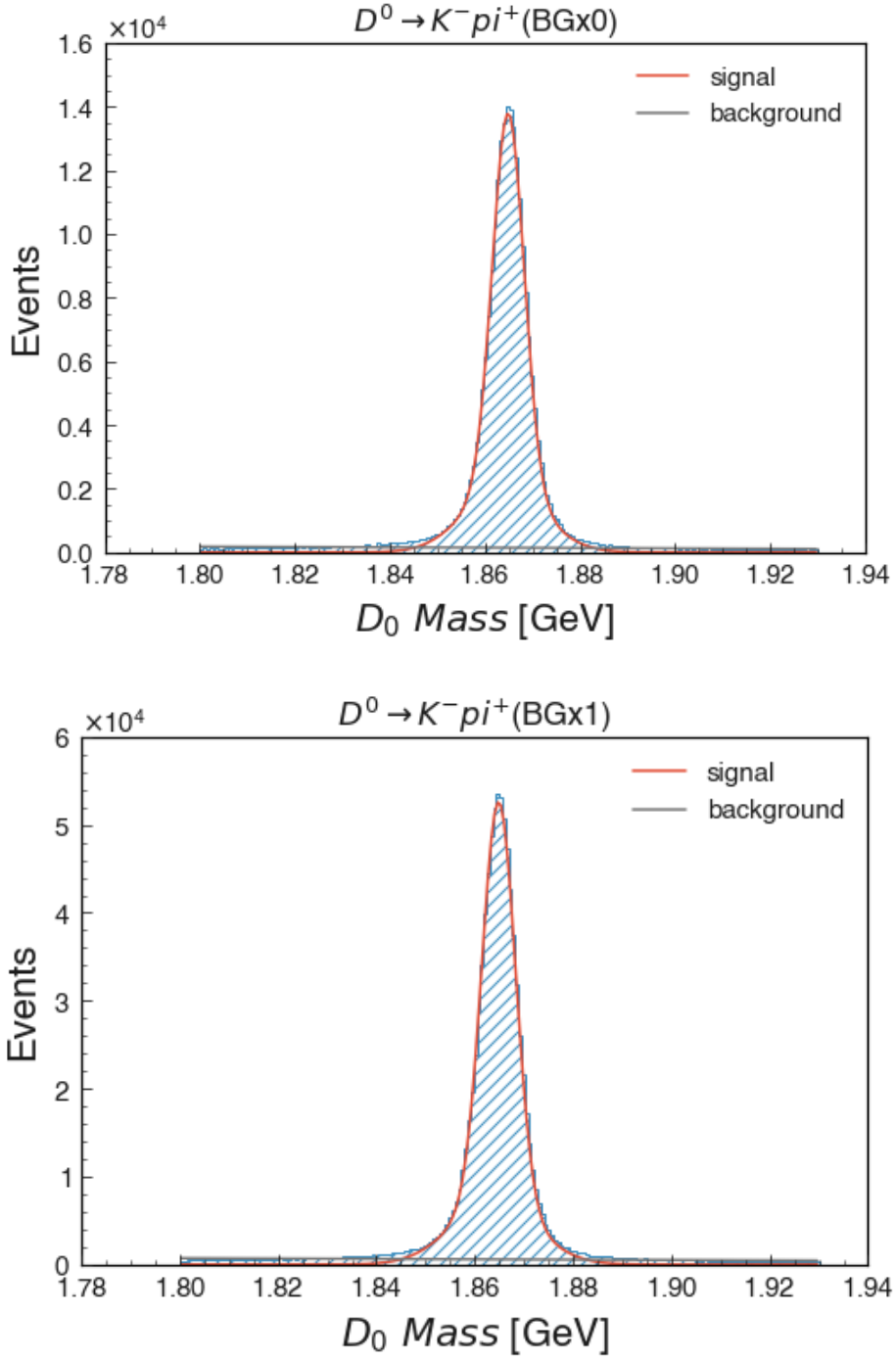


[그림 2-1(d)] $D^0 \to K^+K^-$의 D^0 mass histogram

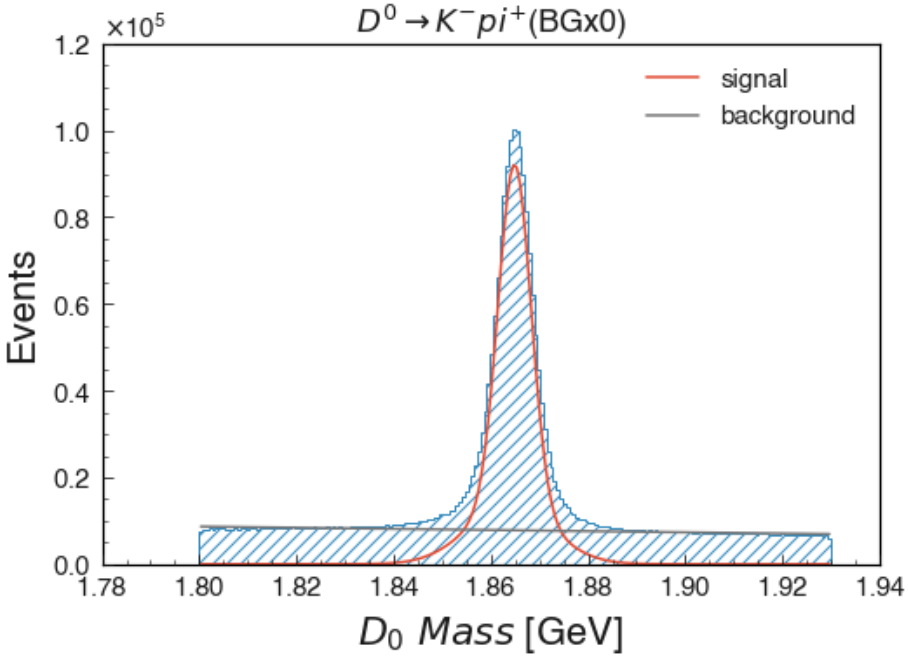
[표 2-2] 각 채널의 entry number

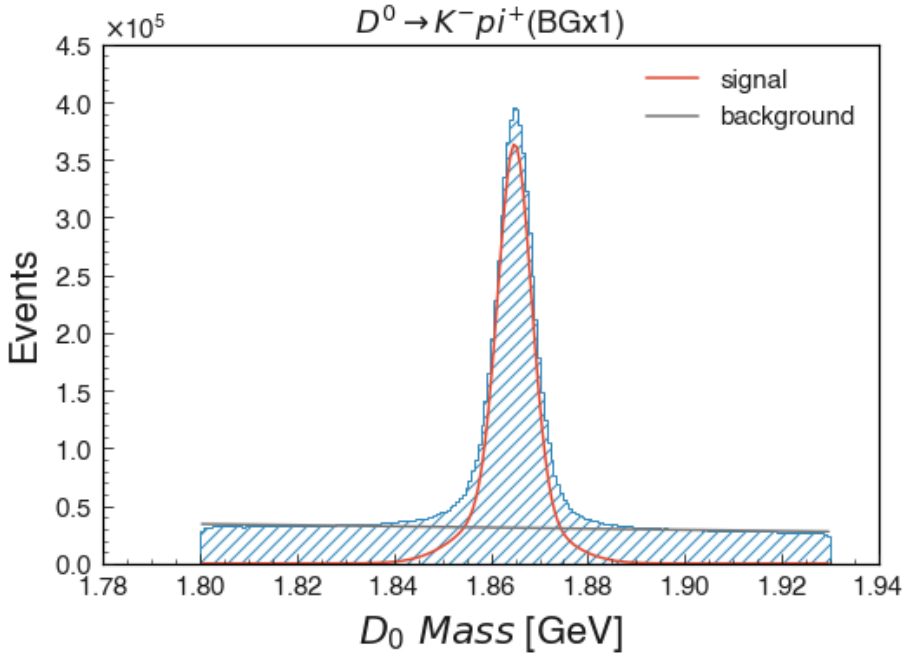
Background	Channel	Entries
BGx0	$D^0 \to K^-\pi^+$ tagged	244673
	$D^0 \to K^-\pi^+$ untagged	3029411
	$D^0 \to \pi^+\pi^-$	30044
	$D^0 \to K^+K^-$	38844
BGx1	$D^0 \to K^-\pi^+$ tagged	944496
	$D^0 \to K^-\pi^+$ untagged	12034451
	$D^0 \to \pi^+\pi^-$	117949
	$D^0 \to K^+K^-$	149623

$D^0 \to K^-\pi^+$ tagged, $D^0 \to K^-\pi^+$ untagged, $D^0 \to \pi^+\pi^-$, $D^0 \to K^+K^-$ 4개의 채널을 Probability density function을 linear function+triple gaussian으로 가정하고 fitting하였다.([그림 2-2]) Beam background가 포함된(BGx1) $D^0 \to \pi^+\pi^-$채널만 single gaussian signal+double gaussian and linear background로 fitting이 되었고, 나머지 데이터는 double gaussian signal+single gaussian and linear background로 fitting이 되었다.

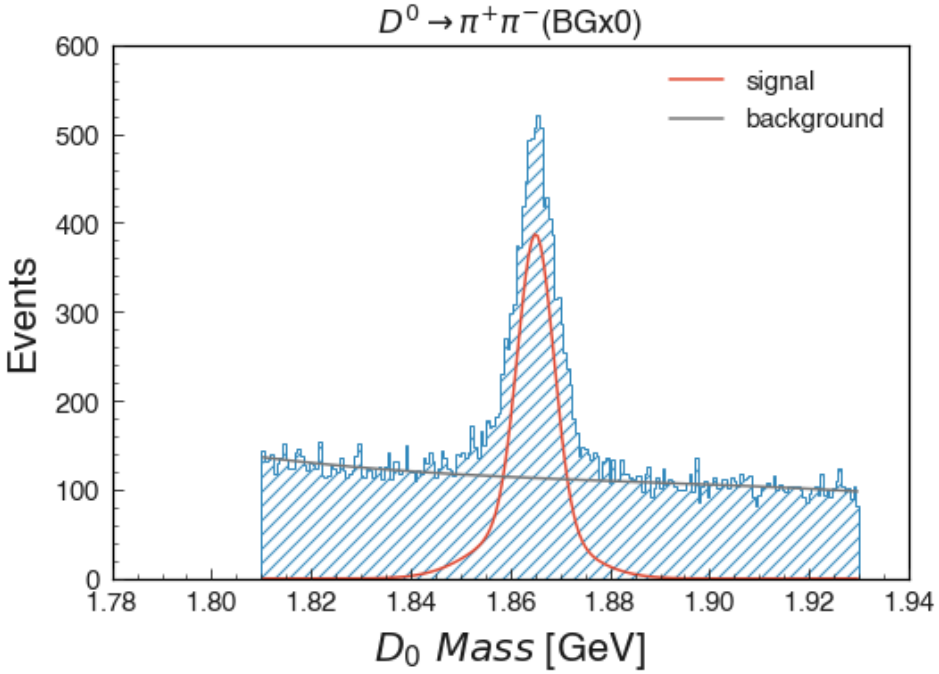


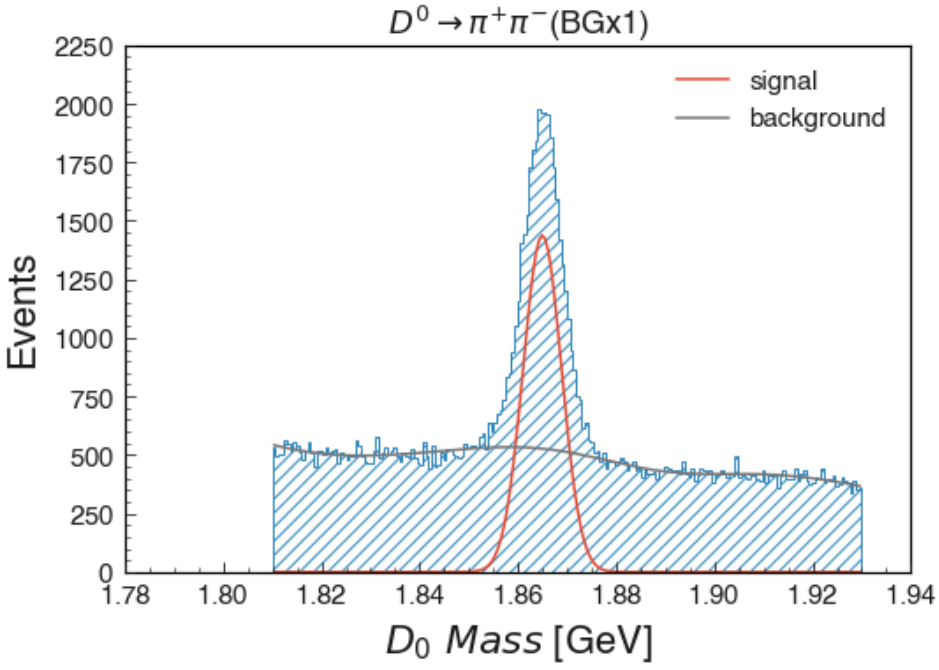
[그림 2-2(a)] $D^0 \to K^- \pi^+$ tagged의 D^0 mass fitting



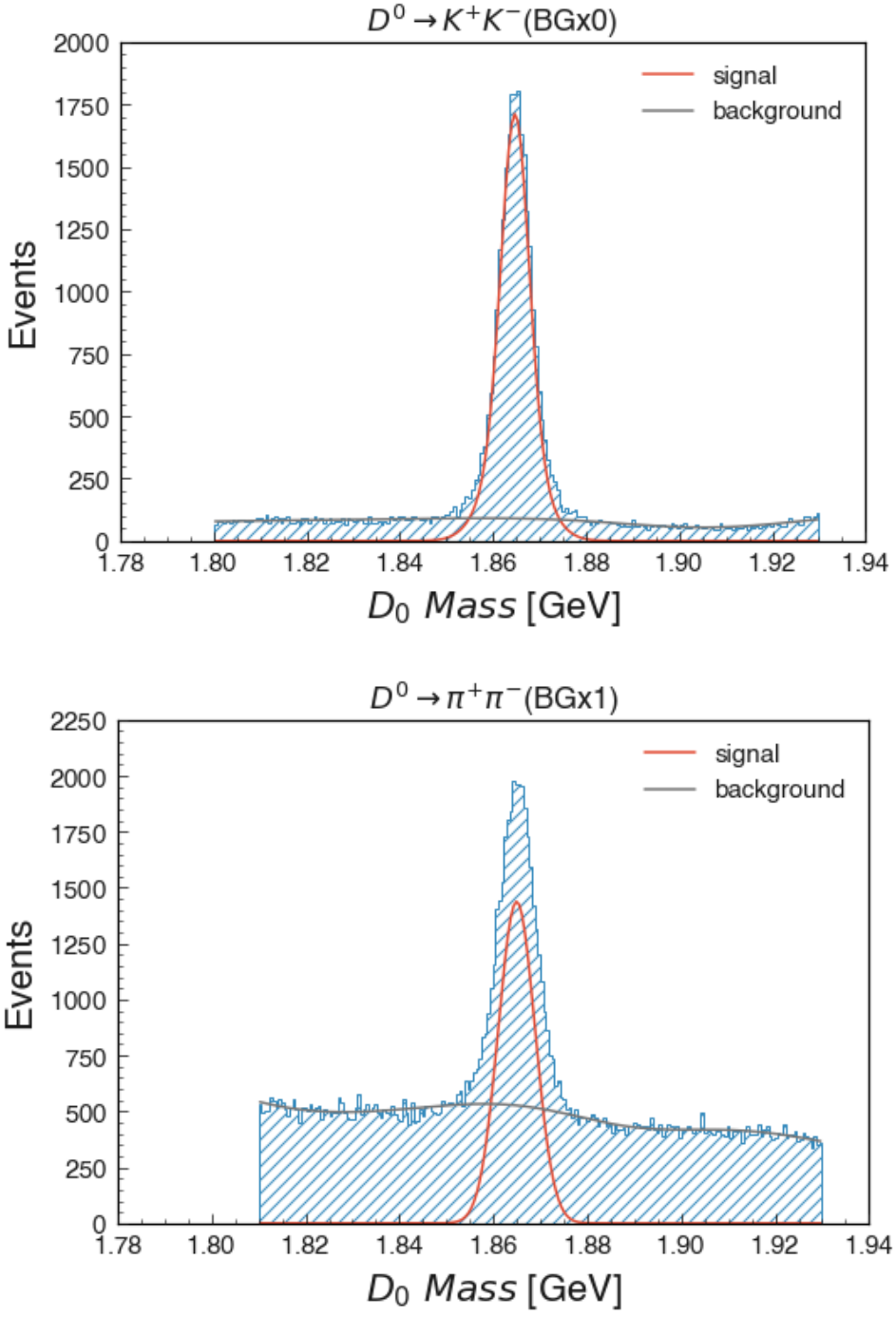


[그림 2-2(b)] $D^0 \to K^- \pi^+$ untagged의 D^0 mass fitting





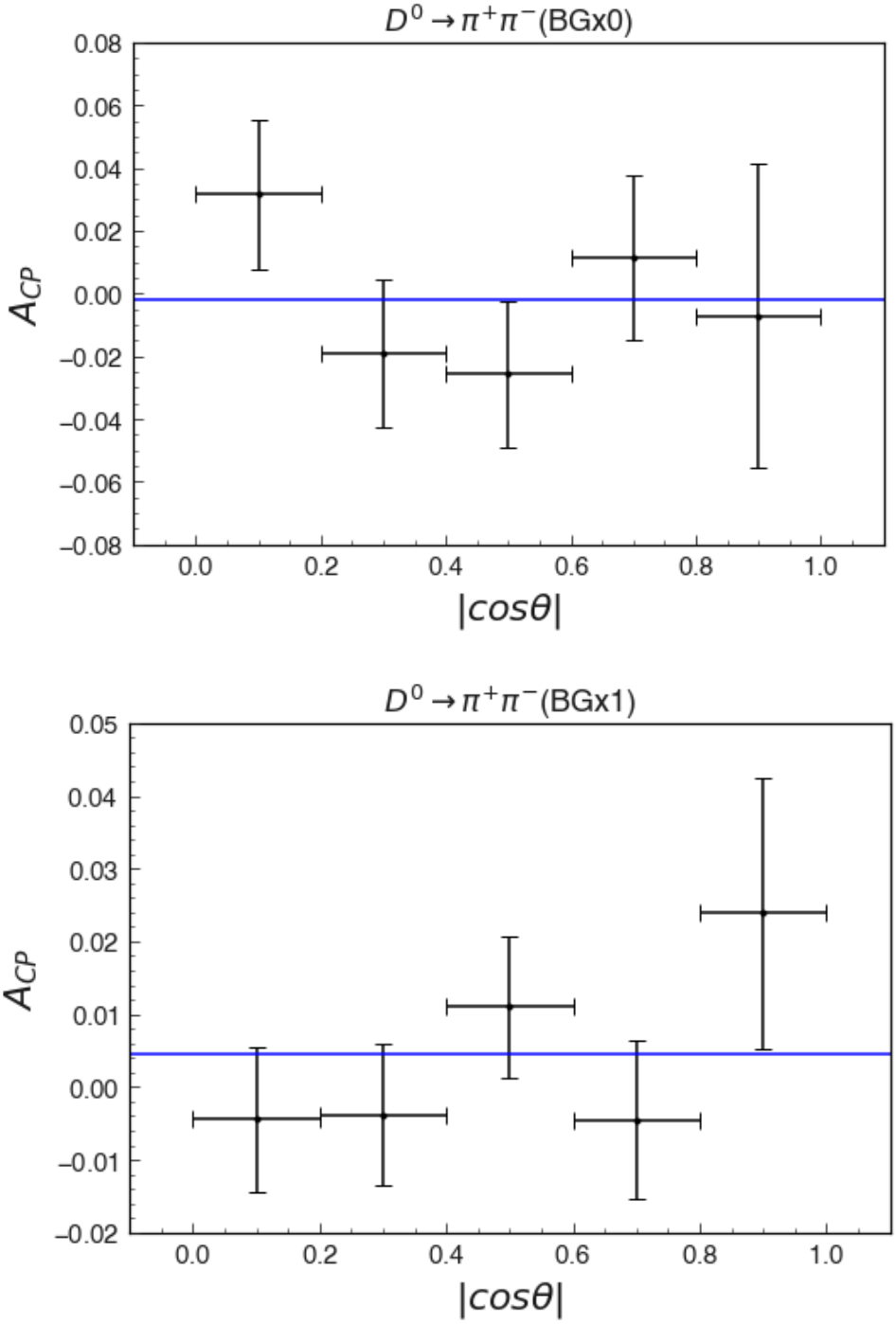
[그림 2-2(c)] $D^0 \to \pi^+\pi^-$의 D^0 mass fitting



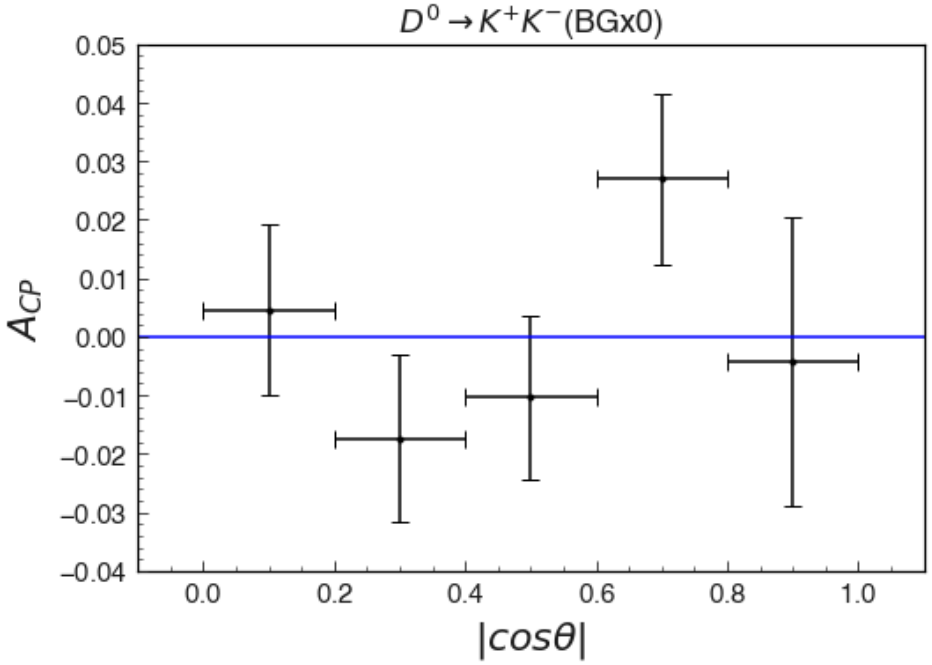
[그림 2-2(d)] $D^0 \to K^+K^-$의 D^0 mass fitting

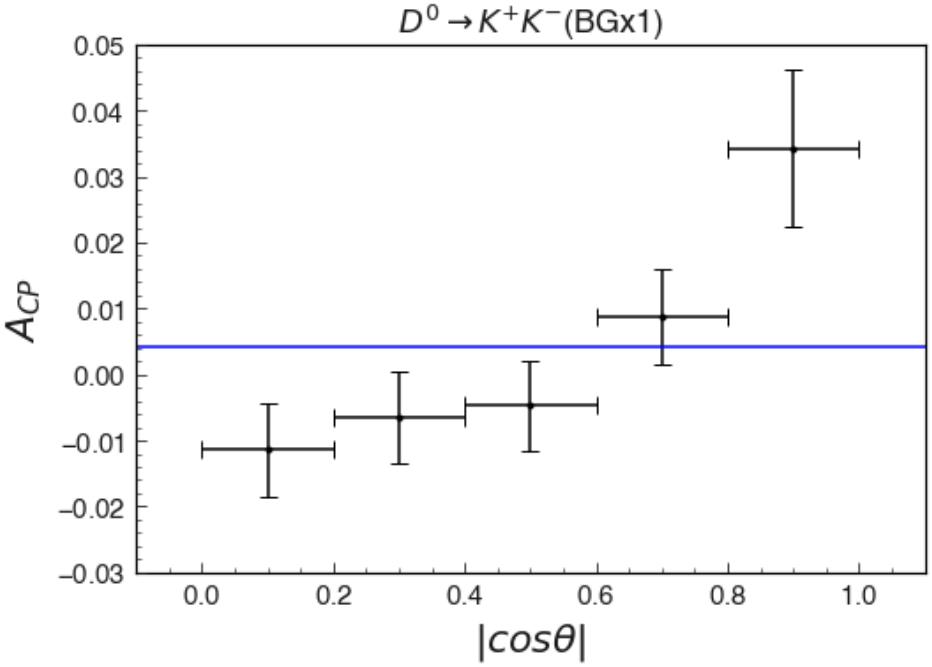
2.3.2 A_{CP} fitting

|cosθ|에 대한 A_{CP}를 구한 뒤, n개의 bin에 대한 n개의 A_{CP}를 fitting 해서 최종적으로 $A_{CP}^{hh}(h=\pi,K)$를 구한다. fitting에 사용하는 함수는 constant function이며, parameter 1개로 fitting하여 그 parameter를 A_{CP}^{hh}, fitting error를 statistical error로 취급한다. 이번 연구에서는 0부터 1까지의 |cosθ|를 5개로 나누어서 fitting하였다. 그 결과는 [그림 2-3]과 같다.



[그림 2-3(a)] $D^0 \to \pi^+\pi^-$의 A_{CP}





[그림 2-3(b)] $D^0 \to K^+K^-$의 A_{CP}

[그림 2-3]에서 세로 오차는 각 bin의 오차이며, 가로 오차는 bin size를 의미한다. 모든 event에 weight를 부여했으므로, bin 오차는 처음 A_{rec}를 계산할 때 weight를 고려한 오차인 $\sigma^2 = \sum w_i^2$(w_i는 bin 내의 i번째 이벤트의 weight)로 계산한 뒤 이후 계산 과정에서 error propagation을 적용하였다.

제 3 장 결 론

[표 3-1] 계산된 A_{CP}

Channel	Background	$A_{CP}(\%)$
$D^0 \to \pi^+\pi^-$	BGx0	-0.181 ± 1.04
	BGx1	$+0.443 \pm 0.569$
$D^0 \to K^+K^-$	BGx0	0.000 ± 0.769
	BGx1	$+0.409 \pm 0.824$

[표 3-1]은 최종적으로 계산된 A_{CP}들이다. $500fb^{-1}$의 Monte-carlo data로 계산한 결과, statistical error의 영향이 지배적이므로 $D^0 \to \pi^+\pi^-$ 채널과 $D^0 \to K^+K^-$ 채널의 Time-integrated CP asymmetry가 관측되었다고 보기는 어렵다. M. Staric에 따르면 $976fb^{-1}$의 Belle 실험 데이터로 계산하였을 때 $D^0 \to K^+K^-$의 A_{CP}는 $-0.32 \pm 0.32 \pm 0.09$, $D^0 \to \pi^+\pi^-$의 A_{CP}는 $+0.55 \pm 0.36 \pm 0.09$이었고, Belle II의 $50ab^{-1}$에서는 statistical error가 10분의 1로 줄어들 것으로 예측되므로[6], Belle II 실험 데이터가 충분히 쌓이면 A_{CP}를 관측할 수 있을 것이다. 또한, 데이터 축적에 대비하여 signal fitting 과정에 사용할 probability density function을 최적화할 필요가 있으며, 현재 systematic error 측정을 위한 후속 연구를 기획 중이다. 후속 연구에서 현재 얻은 결론을 다시 검토할 예정이며, 최적화 작업 후 fitted result가 바뀔 수 있다.

참고문헌

[1] M. Staric, 벨실험연구노트(BN)1261 (2012). (Belle internal note)

[2] Belle experiment website, (https://belle.kek.jp)

[3] Belle II experiment website, (https://www.belle2.org)

[4] T. Higuchi, Bファクトリー実験の成果とスーパーBファクトリーの可能性, 28pXA-7 (2009).

[5] Y. Grossman, A. L. Kagan and Y. Nir, Phys. Rev. D**75**, 036008 (2007).

[6] M. Staric, Direct CPV in charm decays at Belle and prospects for Belle II, The 8th International Workshop on the CKM Unitary Triangle (CKM 2014), 8-12 September 2014, Vienna, Austria.

[7] M. Staric *et al.* (Belle Coll.), Phys. Lett. B**670**, 190-195 (2008).

[8] B. Aubert *et al.* (BaBar Coll.), Phys. Rev. Lett. **100**, 061803 (2008).

[9] A. Schwartz and G. Casarosa, Charm physics at Belle II, Discovery Potential of Charm Physics Workshop (2014) 7-8 October 2014, Milano, Italy.