

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Фізичний факультет
Кафедра ядерної фізики

На правах рукопису

**Напів-інклюзивні моди розпадів $B \rightarrow D_s h X$ на електрон-
позитронному колайдері SuperKEKB**

Галузь знань: 10 Природничі науки
Спеціальність: 104 Фізика та астрономія
Освітня програма: Фізика
Спеціалізація: Фізика високих енергій

Кваліфікаційна робота бакалавра
студентки 4 курсу
Маслова Надія Олегівна

Науковий керівник:
Dr. Olga Werbytska
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej
Akademii Nauk,
Prof. Andrzej Bozek,
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej
Akademii Nauk

Куратор від кафедри:
канд. фіз.-мат. наук, доц.
Оніщук Ю.М.

Робота заслухана на засіданні кафедри ядерної фізики
та рекомендована до захисту на ЕК, протокол № 18 від 12 червня 2020 р.

Завідувач кафедри



проф. І.М.Каденко

Київ – 2020

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	5
1.1 Кабіббо-Кобаяші-Маскава матриця.....	5
1.2 Розпади B мезонів	5
2 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	7
2.1 Експеримент Belle II	7
2.2 Метод аналізу даних Belle II.....	9
2.3 Програмне забезпечення BASF2 (Belle II Analysis Software Framework)	9
3 МЕТОДИКА	11
3.1 Ексклюзивний підхід до реконструкції.....	11
3.2 Діаграми Далітца.....	11
3.3 Напів-інклюзивна реконструкція. FEI.....	12
4. РЕЗУЛЬТАТИ.....	14
4.1 Напів-інклюзивна реконструкція B_{tag}	14
4.2 Ексклюзивні моди.....	16
ВИСНОВКИ.....	22

АНОТАЦІЯ

Маслова Н.О. Напів-інклюзивні $B \rightarrow D_{(s)} h X$ на електрон-позитронному колайдері SuperKEKB

Кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 104 — Фізика та астрономія, освітня програма “Фізика високих енергій” - Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра ядерної фізики. - Київ 2020

Науковий керівник: Dr. Olga Werbytska, Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk, Prof. Andrzej Bozek, Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk

Куратор від кафедри: канд. фіз.-мат. наук, доц. Ю.М.Оніщук

Набори даних в розпадах $B \rightarrow D_{(s)} h X$ у Belle II детекторі були просимульовані за допомогою basf2. FEI алгоритм був застосований до реконструкції адронних мод сторони тагу в розпадах $Y(4S)$. Резонансні та нерезонансні моди були інклюзивно реконструйовані і розглянуті у діаграмах Далітца

Ключові слова: Belle II експеримент, адронні розпади B мезонів, FEI, діаграми Далітца.

ABSTRACT

Maslova N.O. Semi-inclusive $B \rightarrow D_{(s)} h X$ decay modes at the electron-positron collider SuperKEKB

Bachelor qualification work in speciality 104 Physics and astronomy, educational program “High energy physics” - Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Department of Nuclear Physics. - Kyiv — 2020.

Research supervisor: Dr. Olga Werbytska, Institute of Nuclear Physics Polish Academy of Sciences, Prof. Andrzej Bozek, Institute of Nuclear Physics Polish Academy of Sciences

Department research supervisor: Dr. Yuri Onishchuk

Samples of $B \rightarrow D_{(s)} h X$ decay modes in Belle II detector were simulated using BASF2. FEI algorithm of BASF2 was used to reconstruct hadronic tagging side of the $Y(4S)$ decay. Resonant and non-resonant modes were inclusively reconstructed and analyzed via Dalitz plots.

Key words: Belle II experiment, hadronic B decays, FEI, Dalitz plot.

ВСТУП

Вивчення розпадів B мезонів відіграє виняткову роль в уточненні параметрів Стандартної Моделі та пошуку ефектів поза її межами, оскільки такі процеси є чутливими до значень параметрів СКМ-матриці, що описує змішування кварків в слабкому секторі, а також до порушення CP-парності.

З метою проведення експериментів із народженням великої кількості B мезонів будують так звані B -фабрики, що являють собою асиметричні електрон-позитронні колайдери. Одним з таким експериментів був Belle, що проводився на прискорювачі KEKB у період з 2003 по 2010 роки. За цей час було спостережено велике порушення CP-парності у системі нейтральних B , виміряно елементи $|V_{ub}|$ та $|V_{cb}|$ СКМ-матриці та знайдено декілька нових частинок.

У 2018 році розпочався збір даних в експерименті Belle II, що є наступником Belle. Очікується, що на Belle II вдасться досягти в близько 50 разів більшу інтегральну світність. Завдяки цьому відкриваються більші можливості для дослідження рідкісних розпадів.

Ключова особливість B -фабрик полягає у тому, що у більш ніж 95 % подій $Y(4S)$ розпадається на пару B мезонів. Таким чином, реконструюючи один з B мезонів, можна отримати кінематичні обмеження на другий B . Ця ідея застосована у алгоритмі Full Event Interpretation (FEI) програмного забезпечення BASF2.

Завданням даної роботи є ознайомлення з інструментами, що використовуються в експерименті Belle II, дослідження можливості використання FEI для тагування подій з розпадами $B \rightarrow D_{(s)} h X$ в експерименті Belle II та опису сигнальної сторони із використанням діаграм Далітца.

1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Кабіббо-Кобаяші-Маскава матриця

У Стандартній Моделі інформація про слабку взаємодію, що змінює аромат кварка, міститься в елементах матриці Кабіббо-Кобаяші-Маскава (ККМ). Ця матриця пов'язує стани кварків у масовому базисі із станами кварків, що беруть участь у слабкій взаємодії. ККМ матриця є унітарною, з одним вільним параметром — фазою, що є джерелом порушення CP-парності [1].

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad (1)$$

1.2 Розпади B мезонів

B мезоном називають частинку, що складається з b кварка та u , s або d кварка, зв'язаних між собою сильною взаємодією. Час життя B мезонів становить порядку 10^{-12} с, та їхні розпади зумовлені здебільшого слабкими процесами. Усі можливі моди розпаду поділяють на напівлептонні та адронні, залежно від типу продуктів розпаду [2].

Через великий доступний фазовий простір, існують сотні можливих адронних мод розпаду, типові імовірності каналів складають декілька десятих відсотка. На противагу великих можливостей експериментального дослідження таких розпадів, теоретичний опис значно ускладнюється взаємодією адронів у кінцевих станах [3].

Найпростішою діаграмою Фейнмана для опису розпаду B є перехід $b \rightarrow c$. Так розпад $B^+ \rightarrow \text{anti-}D^0 \pi^+$ може відбуватися двома шляхами (Рис.1 а, б). Причому така діаграма як на Рис.1 б є пригніченою (англ. suppressed), оскільки утворені мезони мають бути нейтральними за кольором.

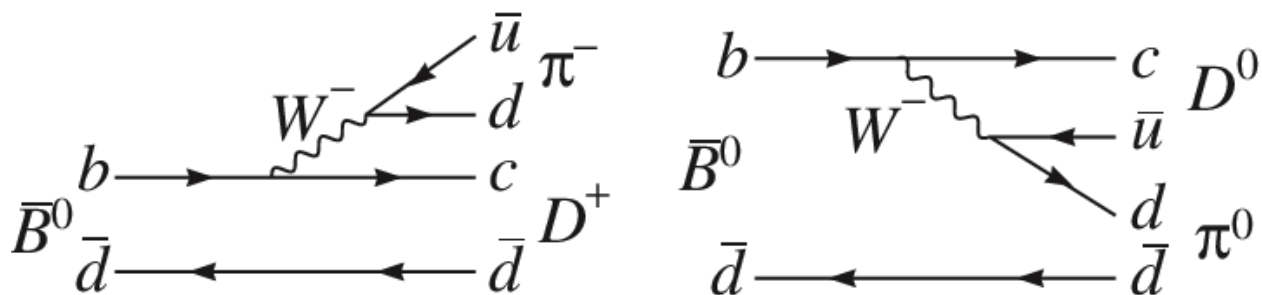


Рис. 1 – Діаграма Фейнмана з переходом $b \rightarrow c$

Так само можна описати перехід $b \rightarrow ccs$, що призводить до розпадів типу $B \rightarrow D D$ та $B \rightarrow D D_s$ з двома чарівними кварками. Оскільки в кінцевих станах присутні кварки з ароматом та анти-ароматом, то внесок в амплітуду імовірності мають також так звані пінгвін-діаграми (Рис. 2 б).

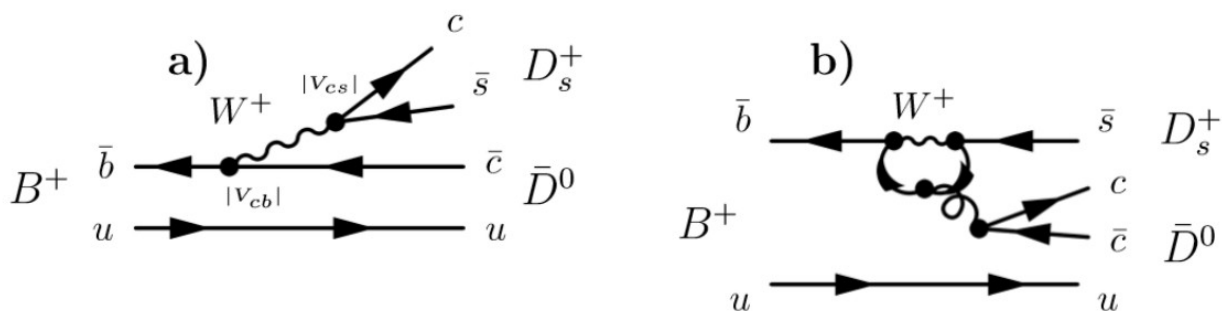


Рис. 2 – Діаграми Фейнмана розпаду B з утворенням $D D_s$

2. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Експеримент BELLE II

Експеримент Belle II проводиться на асиметричному електрон-позитронному прискорювачі SuperKEKB, що розташований у науково-дослідному центрі КЕК у Цукубі, Японія. Збір даних почався у 2018 році [4].

Як і інші В-фабрики (Belle, BaBar), експеримент Belle II, спроектований для дослідження В-мезонних пар, що походять з розпаду резонансу $\Upsilon(4S)$.

Прискорювач SuperKEKB є вдосконаленою версією прискорювача КЕКВ, на якому проводився експеримент Belle з 2003 по 2010 роки. Після закінчення цього експерименту в 2010 році були внесені зміни у схему прискорювача та детекторної системи, що дозволило підвищити світність до $8 \cdot 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, що в 40 разів більше ніж в експерименті Belle. Однією з найважливіших змін стало застосування схеми Nano-Beam, що дозволяє зменшити кут між пучками електронів та позитронів у точці взаємодії. Також змінені енергії пучків порівняно з Belle — 7 GeV та 4 GeV для пучків електронів та позитронів відповідно замість 3.5 GeV та 8 GeV. Таким чином, можливість розділення вершин розпадів В-мезонів є меншою, але цей ефект нівелюється за рахунок меншого перерізу пучків.

У той самий час суттєве збільшення світності призводить до підвищення кількості фонових подій, пов'язаних з взаємодією частинок всередині пучка та з різних пучків, а також з частинками невеликої кількості газу, що залишається у вакуумній камері. Тому до детектора Belle II з'являються вимоги можливості прецизійних вимірів при меншому лоренцевому бусті та більшій кількості фонових подій, а також вища радіаційна стійкість [5].

На Рис. 3 зображено основні складові оновленого детектора Belle II [6].

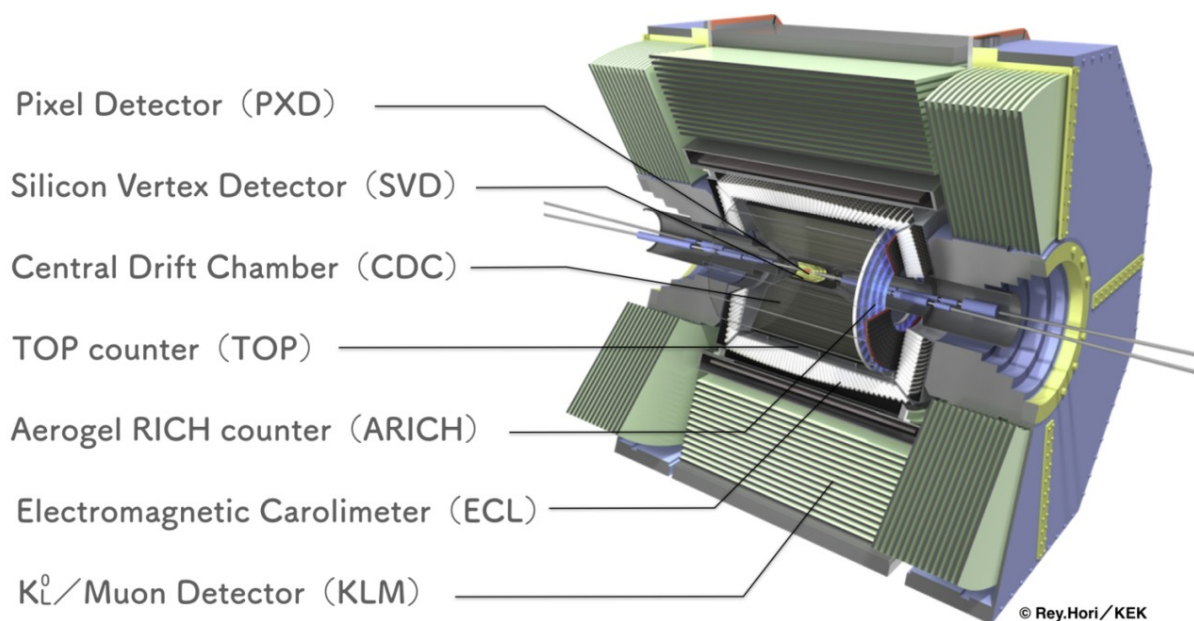


Рис.3 - Конструкція детектора Belle II

Найближче до точки взаємодії розташований Піксельний Детектор (PXD — Pixel Detector). На відстані 14 мм від нього розташований вершинний детектор SVD (Silicon Vertex Detector), що складається з шарів з кремнієвих стрічок. Разом з дрифтовою камерою Central Drift Chamber (CDC), ці три детектори призначені для визначення вершин розпадів та визначення треків заряджених частинок.

Для ідентифікації частинок застосовують лічильники TOP (Time-Of-Propagation та черенковський детектор ARICH (Aerogel Ring-Imaging Cherenkov detector).

Електромагнітний калориметр ECL (Electromagnetic Calorimeter) здатний детектувати фотони та інші нейтральні частинки, які не детектуються ніякими іншими детекторами, визначати їхні енергії та кутові координати. Загалом ECL складається з 8736 сцинтиляторних кристалів, виготовлених з CsI(Tl).

Найбільш віддаленим від точки взаємодії є мюонний детектор KLM (K-Long and Muon Detector), створений для детектування та ідентифікації мюонів та довгоживучих каонів.

2.2 Метод аналізу даних Belle II

Для реконструкції кінематики розпадів $\Upsilon(4S)$ використовують той факт, що в більшості випадків утворюється пара B — мезонів (загальна схема розпаду показана на Рис. 4). [7]

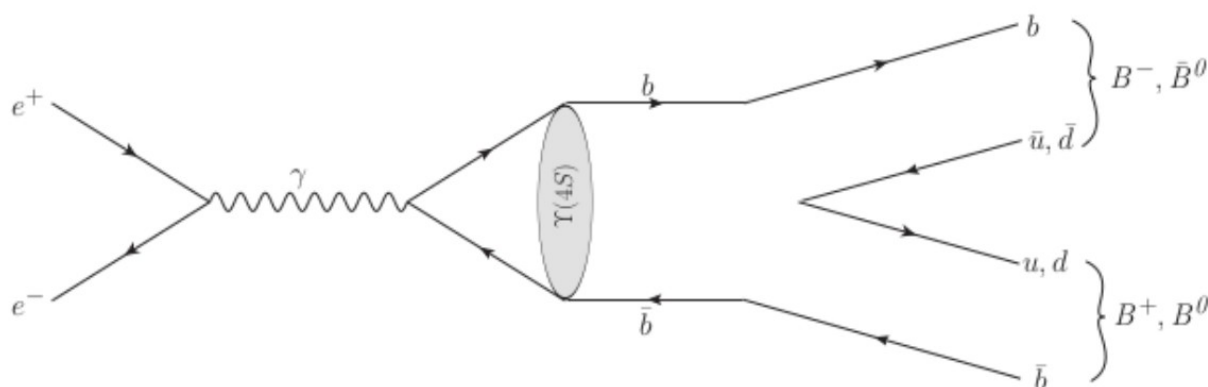


Рис.4 – Схема розпаду $\Upsilon(4S)$

У зв'язку з цим вводять такі змінні:

$$\Delta E = E_{rec} - E_{beam}$$

де E_{rec} — енергія зреструйованого B , E_{beam} — енергія пучка.

$$M_{bc} = \sqrt{E_{beam}^2 - p_{rec}^2}$$

де p_{rec} — імпульс зреструйованого B .

В ідеальній ситуації значення різниці енергії ΔE має бути близьким до нуля, а маси M_{bc} — близьким до маси B за PDG[2].

2.3 Програмне забезпечення BASF2 (Belle II Analysis Software Framework)

BASF2 (Belle II Analysis Software Framework) — програмне забезпечення колаборації Belle II, що застосовується як для генерації і симуляції даних, так і для аналізу. BASF2 організовано у вигляді так званих модулів, написаних мовою C++, кожен з яких виконує певну функцію. Інтерфейс з роботи з ним реалізований мовою Python [8].

У `BASF2` можливо виконати генерацію і симуляцію даних, які є цікавими для конкретного аналізу. Для генерації використовують пакет модулів `EvtGen` [9]. Завдяки цьому генератору можна задати необхідні канали розпадів, теоретичні моделі, які описують ці канали, та відповідні вхідні параметри. Етап генерації є незалежним від детектора. Наступним етапом є симуляція проходження утворених частинок через детектор, реалізована у пакеті `Geant4` [10]. Вихідними даними є просимульовані кластери нейтральних частинок в `ECL` та `KLM` субдетекторах та треки заряджених частинок.

Найважливіші методи для аналізу містяться в модулі `ModularAnalysis`. Так, наприклад, за допомогою методу `reconstructDecay()` можна реконструювати частинку за окремою модою розпаду. Метод `MatchMCTruth` дозволяє встановити відповідність між згенерованими і просимульованими частинками.

Для більш складного аналізу існують такі пакети модулів, як `TreeFitter` (методи, що дозволяють виконувати фітування координат вершин розпаду), `FlavorTagger` (накладання обмежень на дозволені аромати частинок в розпадах), `RestOfEvent` (побудова колекції частинок, що не були реконструйовані у даній події), `FullEventInterpretation` (ексклюзивне тагування методами машинного навчання), `ContinuumSuppression` (пригнічення подій, що походять не з резонансу $Y(4S)$), тощо. [11]

3. МЕТОДИКА

3.1 Ексклюзивний підхід до реконструкції

В ексклюзивному підході реконструюються всі частинки з певної моди розпаду, що є цікавими для конкретного аналізу. Найпершою ланкою є визначення треків заряджених частинок та нейтральних кластерів, що є продуктами в даній події, далі поступово їх комбінують згідно зі схемою розпаду. Це дозволяє прослідкувати увесь шлях розпаду, проте ефективність реконструкції може потерпати від впливу комбінаторного та фізичного фонів [12].

Комбінаторним фоном називають випадок, коли із правильно вибраних продуктів реакції створюється невірна комбінація материнської частинки. З іншого боку, фон може мати зовсім іншу природу — як-то частинки, що походять з пари легкого кварка та анти-кварка, що утворилась замість $b\bar{b}$.

3.2 Діаграми Далітца

Діаграми Далітца є потужним інструментом для ексклюзивного аналізу розпадів на три частинки. Вперше ця техніка була запропонована у 1953 році Річардом Далітцем для опису розпаду зарядженого каону на три піони.

У розпадах на три частинки маємо дві степені вільності, тоді амплітуда розпаду може бути представлена як залежність від двох деяких параметрів. Традиційно у фізиці мезонів у якості цих параметрів обирають інваріантні маси двох пар частинок. Двовимірну залежність одного з цих параметрів від іншого і називають діаграмою Далітца [13].

Часто розпад на три частинки відбувається із утворенням проміжних короткоживучих станів — резонансів. Безпосереднє спостереження резонансів може бути досить складним, проте їх можна вивчати за допомогою діаграм Далітца. Залежно від власного оберտального моменту, резонанси будуть проявлятися на діаграмі як вузькі лінії або більш складні структури.

Для параметризації імовірності розпаду користуються так званою ізобарною моделлю. У цьому підході амплітуда імовірності певного резонансу представляється у вигляді $A = F_p \times F_r \times T_r \times W_r$, де T_r — релятивістський розподіл Брейта-Вігнера, F_p та F_r — форм-фактори відповідно материнської частинки та резонансу, а функція W — описує кутовий розподіл. Якщо материнська та дочірні частинка є скалярами, то для резонансу зі спіном S функція W є пропорційною до полінома Лежандра із відповідним індексом S . Ті області на діаграмі, де накладаються різні лінії, будуть чутливими до різниці фаз резонансів [3].

3.3 Напів-інклюзивна реконструкція. FEI

У випадку дослідження рідкісних процесів та процесів з утворенням нейтрино в кінцевих станах ексклюзивна реконструкція частинок стає неможливою. Тоді використовують напів-інклюзивний підхід: реконструюють лише частину сигнального розпаду [14]. В розпадах B мезонів додаткову інформацію можна отримати із реконструкції другого мезону (B_{tag}) із розпаду $\Upsilon(4S)$ — цей метод дістав назву аналізу з тагуванням. Принцип тагування проілюстрований на Рис.5

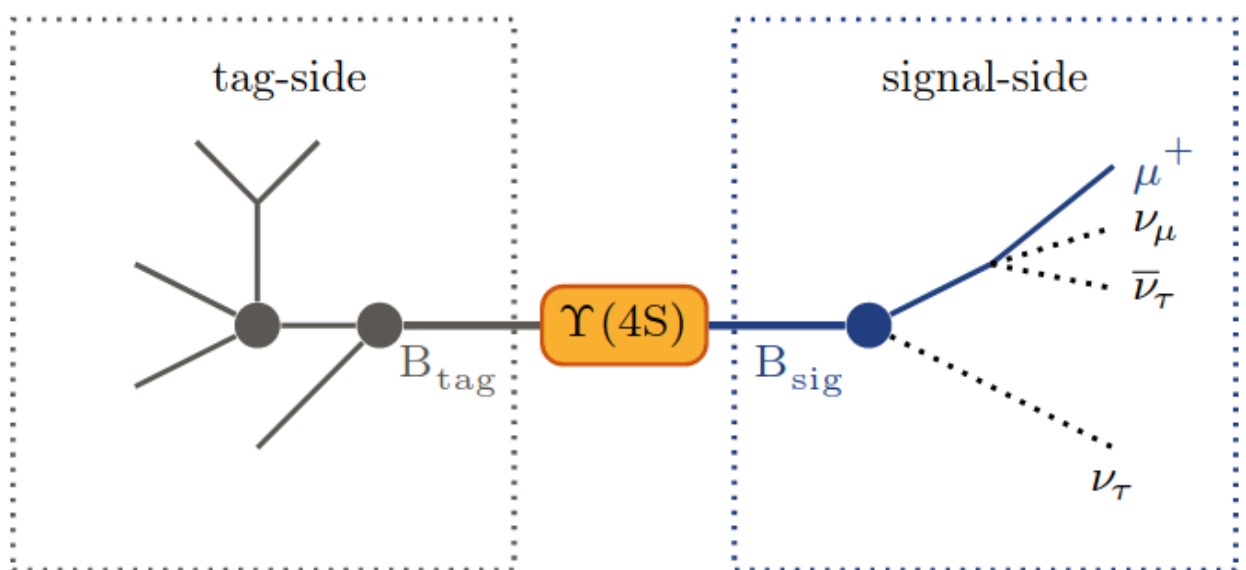


Рис. 5 – Загальна схема розпаду $\Upsilon(4S)$ з розділенням на сторони тагу та сигналу

В експерименті Belle II для аналізу з тагуванням використовується алгоритм FEI, вбудований у BASF2. FEI є алгоритмом ексклюзивного тагування. Відповідно частка тагованих подій з правильною стороною тагу (purity) є високою, однак низькою є ефективність тагування через велику кількість можливих каналів розпаду. При тагуванні по адронних модах розпаду типовими є імовірності $O(10^{-3})$

В FEI в мультिवаріативному аналізі застосовується ієрархічний принцип, згідно з яким реконструкція відбувається у шість послідовних кроків [15].

Фінальні заряджені кандидати створюються із треків різних гіпотез щодо частинок, в той час як нейтральні частинки кандидати створюються із кластерів ECL, KLM та V0 об'єктів. Кожна утворена частинка характеризується імовірністю, того що реконструкція є правильною. Відповідно, ці імовірності, а також кінематичні змінні і інформація щодо положень вершин розпадів, є вхідними характеристиками для наступного кроку — комбінування фінальних частинок у проміжні стани.

4. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

4.1 Непів-інклюзивна реконструкція

Для перевірки ефективності реконструкції було сгенеровано набір з 50000 подій. В мезони зі сторони тагу розпадались генерично (за всіма можливими розпадами згідно з PDG [2]). Для реконструкції було використано стандартну конфігурацію тренування FEI, версія FEIv4_2019_MC12_release_03_01_01 [15].

На рис. зображено розподіл маси M_{bc} .

Інформація про імовірність того, що кандидат є правильно реконструйованою частинкою, зберігається у змінній $SigProb$. Для зручності для кожного кандидата було записано змінну B_rank , яка вказує на те, яким за пріоритетом, встановленим за змінною $SigProb$, є даний кандидат. Іншими словами, для правильно реконструйованого B мезона змінна B_rank має значення 1.

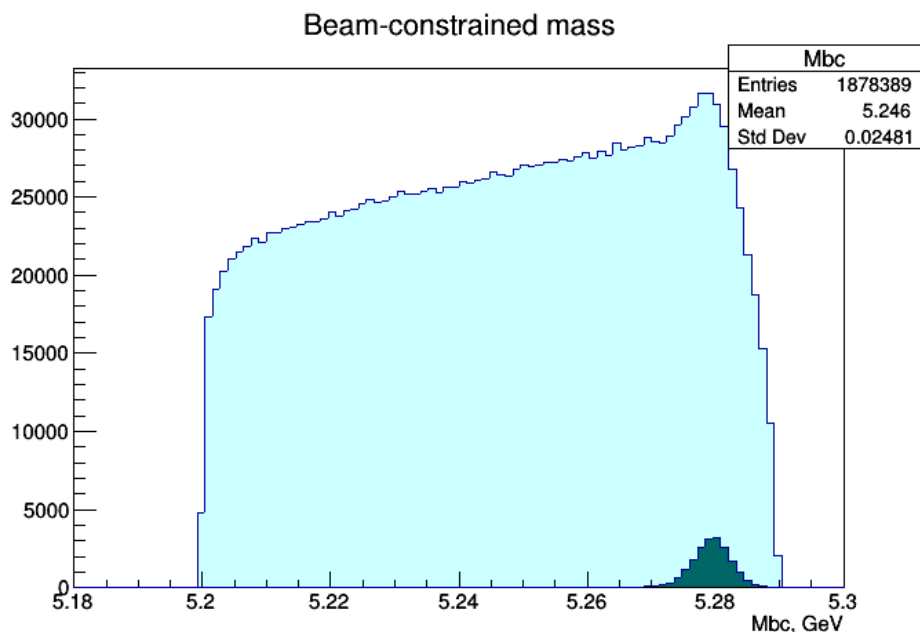


Рис.6 – Розподіли маси M_{bc} за умови $isSignal==1$ та без

Як бачимо з Рис 6., значна кількість кандидатів є насправді комбінаторним фоном, оскільки мають низьку імовірність SigProb та досить низький пріоритет B_rank .

Змінна $isSignal$ зберігає точну інформацію про те, чи співпадає реконструйований кандидат з частинкою, згенерованою у МК.

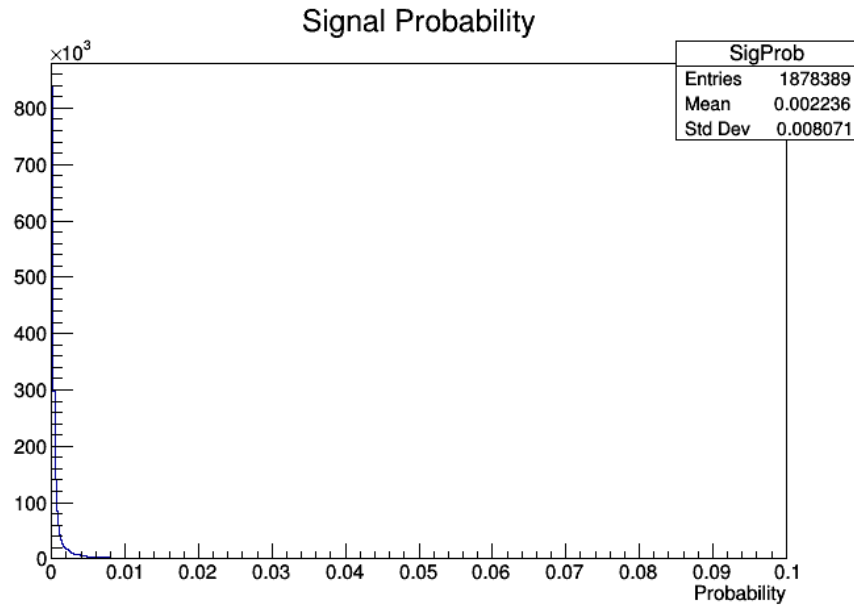


Рис. 7 – Розподіл імовірності правильності реконструкції B_{tag}

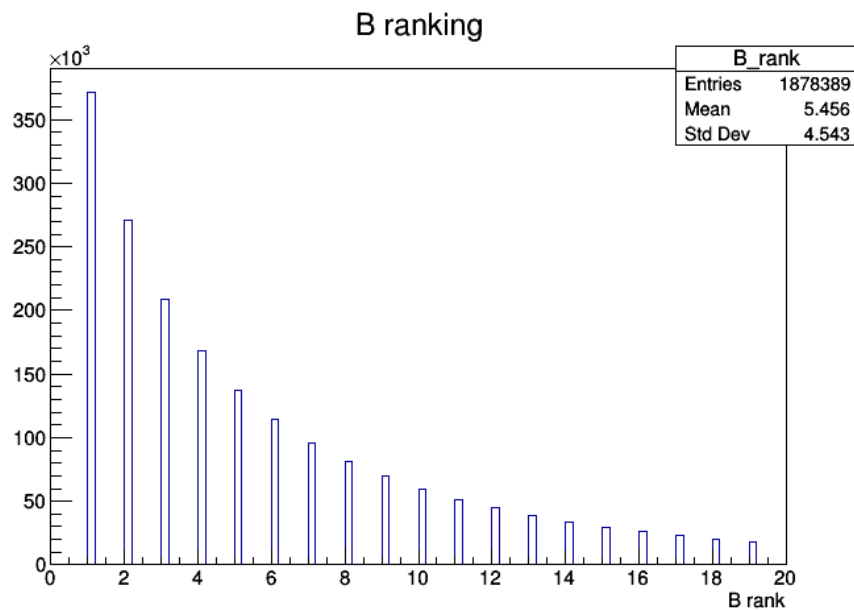


Рис.8 – Розподіл змінної B_rank

4.2 Ексклюзивна реконструкція

Для дослідження можливості ексклюзивної реконструкції було згенеровано 4 набори з 20000 подій з такими каналами розпаду сигнальної сторони:

1.

$$\begin{aligned}
 B^+ &\rightarrow \bar{D}^{*0} D_s^+ \\
 \bar{D}^{*0} &\rightarrow \bar{D}^0 \pi^0 \\
 \bar{D}^0 &\rightarrow K^+ \pi^- \\
 \bar{D}_s^+ &\rightarrow K_s^0 K^+
 \end{aligned}$$

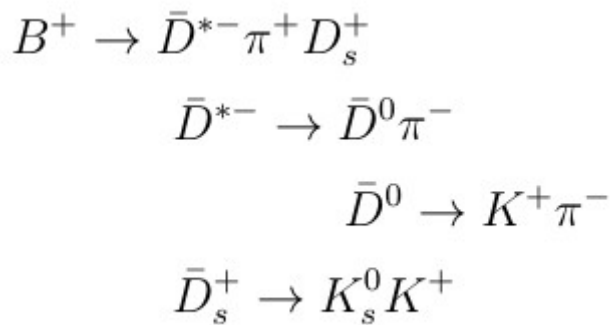
2.

$$\begin{aligned}
 B^+ &\rightarrow \bar{D}^0 \pi^0 D_s^+ \\
 \bar{D}^0 &\rightarrow K^+ \pi^- \\
 \bar{D}_s^+ &\rightarrow K_s^0 K^+
 \end{aligned}$$

3.

$$\begin{aligned}
 B^+ &\rightarrow \bar{D}_2^{*0} D_s^+ \\
 \bar{D}_2^{*0} &\rightarrow \bar{D}^{*-} \pi^+ \\
 \bar{D}^{*-} &\rightarrow \bar{D}^0 \pi^- \\
 \bar{D}^0 &\rightarrow K^+ \pi^- \\
 \bar{D}_s^+ &\rightarrow K_s^0 K^+
 \end{aligned}$$

4.



Файли, що використовувались для генерації подій, наведені у Додатку А.

Перший етап реконструкції: створення списків частинок – фінальних продуктів розпаду за допомогою методу fillParticleList. Частинки відбираються за такими критеріями:

- $K(K^+)$ - kaonID > 0.8, де kaonID — відносна імовірність ідентифікації частинки як зарядженого каону
- $\pi(\pi^+)$ - pionID > 0.8, де pionID — відносна імовірність ідентифікації частинки як зарядженого каону
- K_s^0 - 'K_S0:merged -> pi+ pi-', '0.3 < M < 0.7', де M — інваріантна маса в GeV.

Далі створюємо D^0 у діапазоні мас $1.8 < M < 1.89$ за допомогою методу reconstructDecay. Для селекції застосуємо методи модуля TreeFitter.

Для побудови діаграм Далітца зберігаємо значення інваріантних мас систем частинок $\text{anti-}D^0 \pi^0$ та $D_s^+ \pi^0$ для мод розпаду 1 і 2 і $D^{*-} \pi^+$ та $D_s^+ \pi^+$.

В результаті були отримані такі діаграми процесів:

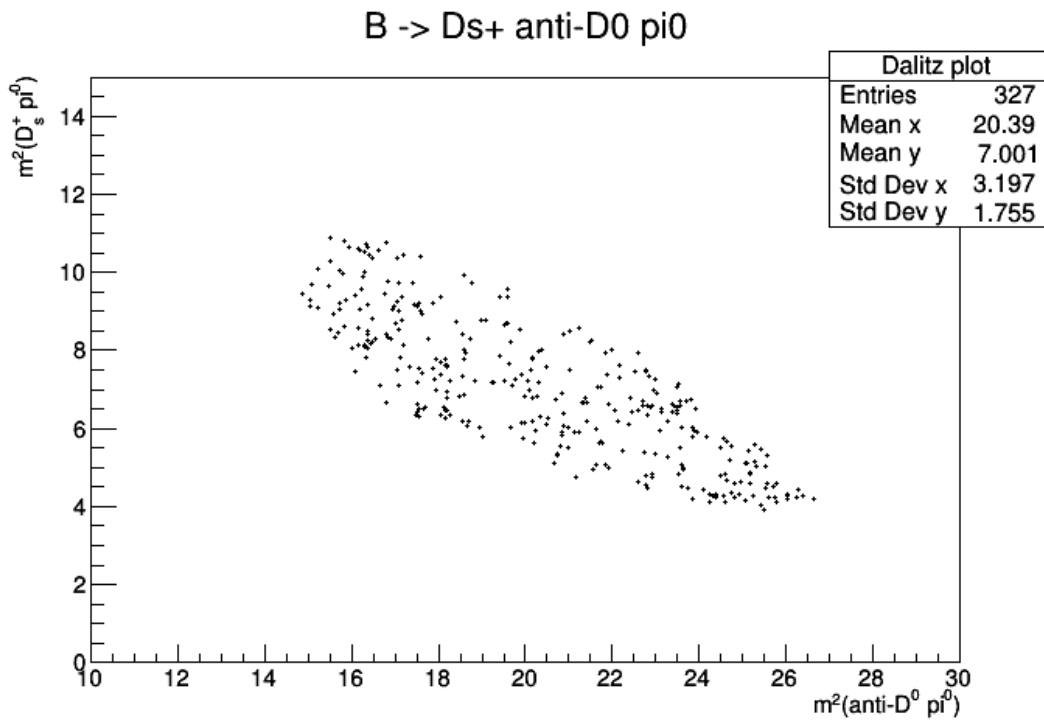


Рис. 9 – Діаграма для розпаду $B \rightarrow D_s^+ \text{ anti-}D^0 \pi^0$

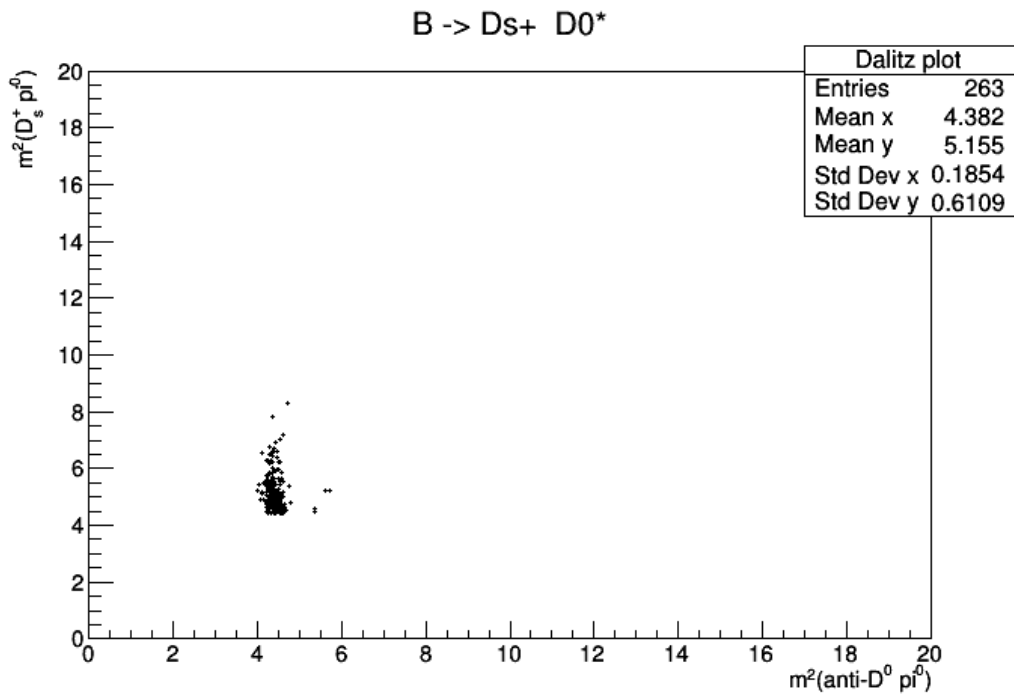
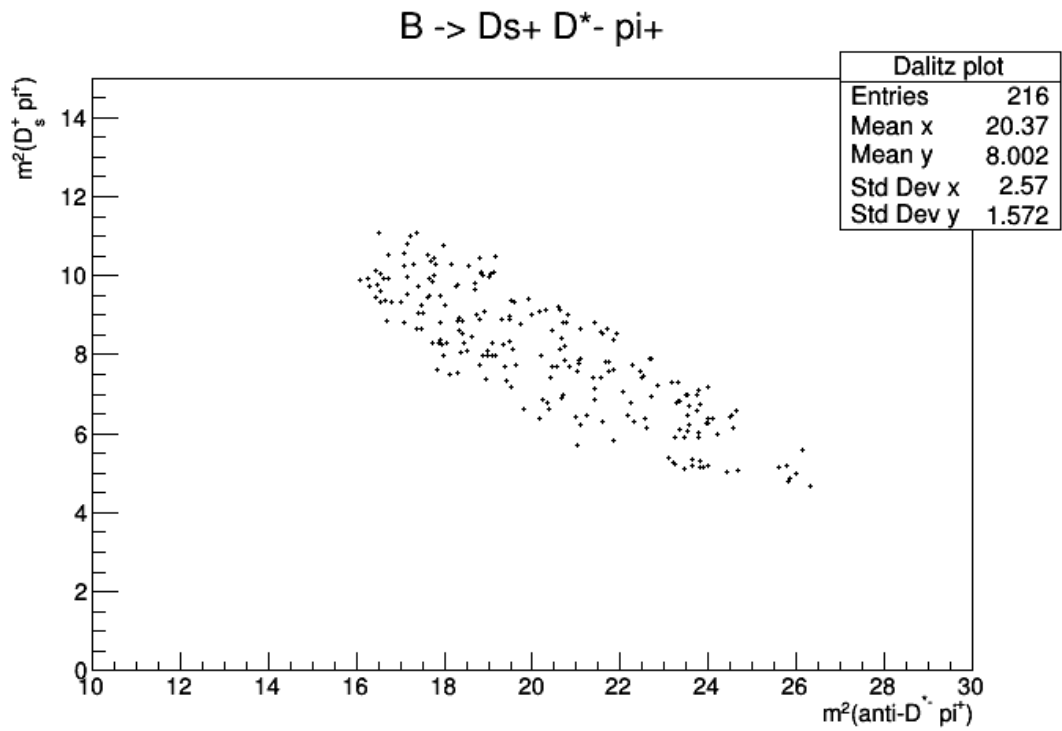
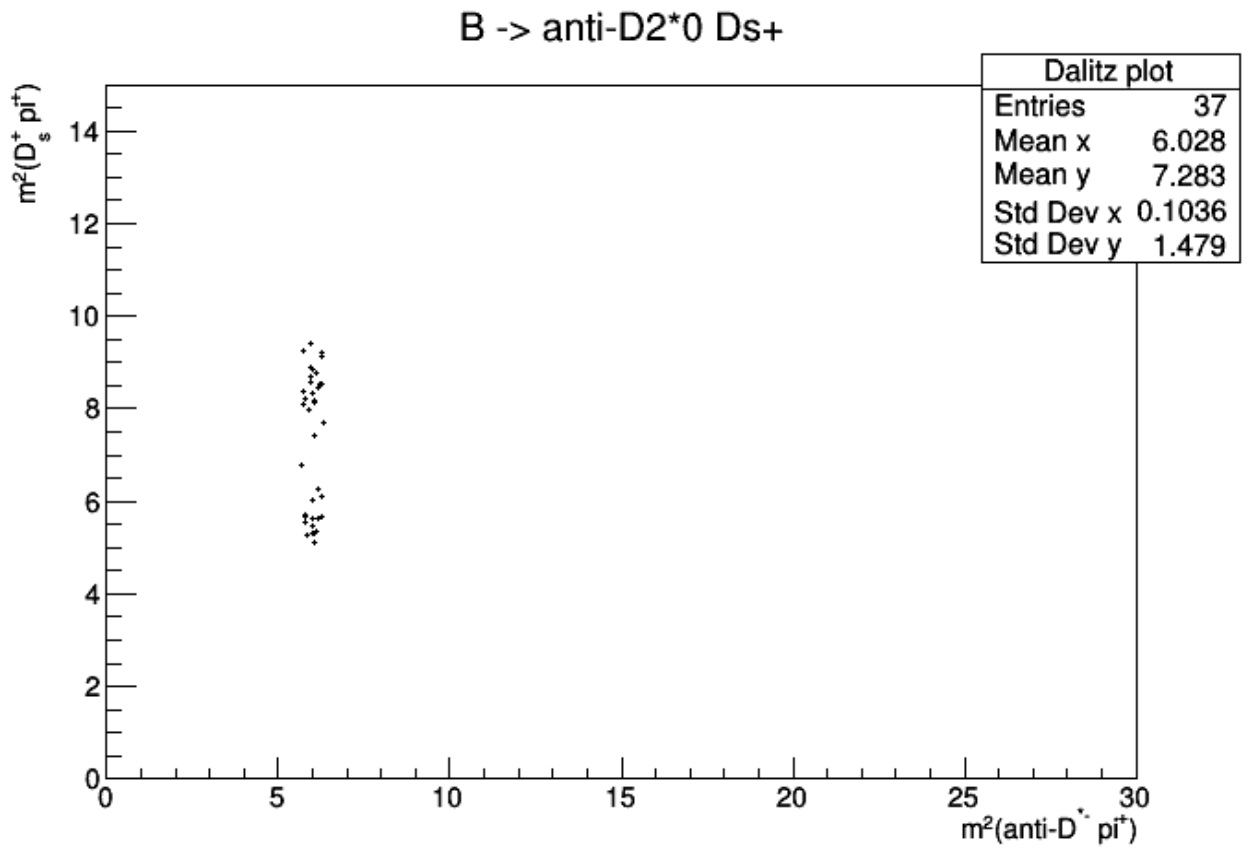


Рис. 10 – Діаграма для розпаду $B \rightarrow D_s^+ \text{ anti-}D^0 \pi^0$

Рис.11 – Діаграма для розпаду $B \rightarrow D_s^+ D^{*-} \pi^+$ Рис. 12 – Діаграма для розпаду $B \rightarrow D_s^+ \text{anti-}D_2^{*0}$

Як видно із Рис. 9 та 11, у нерезонансних модах увесь фазовий простір є доступним. У випадку розпадів з утворенням резонансу (Рис. 10, 12) спостерігаємо лінії, що відповідають станам $\text{anti-}D^{0*}$ та $\text{anti-}D^{0*}_2$ відповідно. Взагалі кажучи, ці лінії мають досить складну структуру, оскільки $\text{anti-}D^{0*}$ є векторною частинкою, а $\text{anti-}D^{0*}_2$ - тензорною, але для спостереження цієї структури необхідно аналізувати суттєво більші набори даних.

Натомість у напів-інклюзивному підході резонансні стани можна досліджувати без повної реконструкції однієї з частинок. Однак можливості цього методу є обмеженими через низьку ефективність тагування.

ВИСНОВКИ

У ході роботи було просимульовано розпади $B \rightarrow D^{(*)}D_s$ за допомогою генератора EvtGen, вбудованого у BASF2. За допомогою алгоритму FEI було реконструйовано сторону тагу розпаду $Y(4S)$ за адронними модами. Сигнальну сторону було ексклюзивно реконструйовано у резонансних та нерезонансних модах та показано утворення резонансів за допомогою діаграм Далітца.

Завдяки FEI можливо успішно використовувати діаграми Далітца для напів-інклюзивної реконструкції B в експерименті Belle II за умови збільшення кількості даних для аналізу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. M. Kobayashi, T. Maskawa, CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction, Progress of Theoretical Physics, Volume 49, Issue 2, 652–657, 1973.
2. M. Tanabashi et al., Particle Data Group, Phys. Rev. D 98, 030001, 2018.
3. Bevan, A. J. et al. The Physics of the B Factories. / Ed. A.J. Bevan, B. Golob, Th. Mannel, S. Prell, and B.D. Yabsley // The European Physical Journal - C74 (2014) 3026, SLAC-PUB-15968, KEK Preprint 2014-3. – 2014 – 928 pages - DOI:10.1140/epjc/s10052-014-3026-9 - <https://arxiv.org/abs/1406.6311>
4. E. Kou et al., Belle II Physics Book, Prog Theor Exp Phys (2019).
5. T. Abe et al., Belle II Technical Design Report, KEK Report 2010-1, arXiv:1011.0352 [physics.ins-det], 2010
7. O. Werbycka Badanie mezonów powabnych w rozpadach B w eksperymencie Belle / Doctoral Thesis – Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk Kraków, Polska – 2017 – 145 p. <http://rifj.ifj.edu.pl/handle/item/245>
8. T. Kuhr et al., The Belle II Core Software, arXiv:1809.04299 [physics.comp-ph], 2018.
9. A. Ryd et al., EvtGen: A Monte Carlo Generator for B-Physics, EVTGEN-V00-11-07, 2005
10. S. Agostinelli et al., Geant4 — a simulation toolkit, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 506, 250-303, 2003
11. Електронний ресурс: b2-master.belle2.org/software/development/sphinx
12. Електронний ресурс: slac.stanford.edu/slac/sass/talks/BrianL.pdf
13. T. Browder, B Mesons, Prog.Part.Nucl.Phys.35:81-220, 1995
14. link.springer.com/content/pdf/10.1007/s41781-019-0021-8.pdf
15. T. Keck, Machine learning algorithms for the Belle II experiment and their validation on Belle data, EKP-2017-00067, 2017

Додаток А

.dec файли для генерації подій у генераторі EvtGen

a) B -> Ds+ anti-D0 pi0

Decay Upsilon(4S)

0.5 B+sig B- VSS;

0.5 B+ B-sig VSS;

Enddecay

Decay B+sig

1.0 D_s+ anti-D0sig pi0 PHSP;

Enddecay

CDecay B-sig

Decay anti-D0sig

0.25 K+ pi- PHSP;

0.05 K_S0 pi0 PHSP;

0.7 K+ pi- pi0 D_DALITZ;

Enddecay

CDecay D0sig

Decay D_s+

1.0000 K_S0 K+ PHSP;

Enddecay

End

CDecay D_s-

End

6) B -> Ds+ anti-D0*

Decay Upsilon(4S)

0.5 B+sig B- VSS;

0.5 B+ B-sig VSS;

Enddecay

Decay B+sig

1.0000 anti-D*0sig D_s+ SVS;

Enddecay

CDecay B-sig

Decay anti-D*0sig

1.000000 anti-D0sig pi0 VSS;

Enddecay

CDecay D*0sig

Decay anti-D0sig

0.25 K+ pi- PHSP;

0.05 K_S0 pi0 PHSP;

0.7 K+ pi- pi0 D_DALITZ;

Enddecay

CDecay D0sig

Decay D_s+

1.0000 K_S0 K+ PHSP;

Enddecay

End

CDecay D_s-

End

B) B -> Ds+ anti-D_20*

Decay Upsilon(4S)

0.5 B+sig B- VSS;

0.5 B+ B-sig VSS;

Enddecay

Decay B+sig

1.0000 anti-D_2*0 D_s+ STS;

Enddecay

CDecay B-sig

Decay anti-D_2*0

1.000 D*-sig pi+ TVS_PWAVE 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0

0.0;

Enddecay

CDecay D_2*0

Decay D*-sig

1.000 anti-D0sig pi- VSS;

Enddecay

CDecay D*+sig

Decay anti-D0sig

0.25 K+ pi- PHSP;

0.05 K_S0 pi0 PHSP;

0.7 K+ pi- pi0 D_DALITZ;

Enddecay

CDecay D0sig

Decay D_s+

1.0000 K_S0 K+ PHSP;

Enddecay

End

CDecay D_s-

End

r) $B \rightarrow D_s^+ D^{*-} \pi^+$

Decay Upsilon(4S)

0.5 B+sig B- VSS;

0.5 B+ B-sig VSS;

Enddecay

Decay B+sig

1.0000 D*-sig pi+ D_s+ PHSP;

Enddecay

CDecay B-sig

Decay D*-sig

1.000000 anti-D0sig pi- VSS;

Enddecay

CDecay D*+sig

Decay anti-D0sig

0.25 K+ pi- PHSP;

0.05 K_S0 pi0 PHSP;

0.7 K+ pi- pi0

D_DALITZ;

Enddecay

CDecay D0sig

Decay D_s+

1.0000 K_S0 K+ PHSP;

Enddecay

End

CDecay D_s-

End