

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

На правах рукопису

Дослідження чутливості експерименту Belle II до магнітних монополів

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

Кваліфікаційна робота магістра
студента 2 року навчання
Ігоря ПРУДІЄВА

Науковий керівник:
доктор фіз.-мат. наук, проф.
Володимир АУШЕВ

Робота заслухана на засіданні кафедри _____
та рекомендована до захисту на ЕК, протокол № _____ від _____ 2022 р.

Завідувач кафедри

проф. Ігор КАДЕНКО

Київ – 2022

ВИТЯГ

з протоколу № _____

засідання Екзаменаційної комісії

Визнати, що студент _____ виконав та захистив
кваліфікаційну роботу бакалавра(магістра) з оцінкою _____.

Голова ЕК _____

«____» _____ 2022 р.

АНОТАЦІЯ

Ігор ПРУДІЄВ. Дослідження чутливості експерименту Belle II до магнітних монополів.

Кваліфікаційна робота магістра 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: доктор фізико-математичних наук Володимир АУШЕВ, професор кафедри ядерної фізики.

Досліджено можливість пошуку магнітних монополів в колайдерному експерименті Belle II зі значенням магнітного заряду $68.5e$ в діапазоні мас 50 – 4600 MeV. Отримано значення довжин прольоту магнітних монополів різних мас та детально досліджено ефективність триггеру першого рівня для реєстрації магнітних монополів. Визначено інтервал мас магнітних монополів із прийнятою ефективністю тригерної системи першого рівня. Знайдено маси монополів, які можна спостерігати детекторними системами Belle II.

Ключові слова: магнітні монополі, довжина прольоту, тригер першого рівня, ефективність реєстрації, Belle II.

SUMMARY

Ihor PRUDIIIEV. Investigation of Belle II Experiment Sensitivity to Magnetic Monopoles.

Master's qualification work in specialty 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. of Physics and Mathematics, Volodymyr AUSHEV, Professor of Department of Nuclear Physics.

The possibility of searching for magnetic monopoles with a magnetic charge value of $68.5e$ in the mass range 50 – 4600 MeV in the Belle II collider experiment was investigated. The values of the flight lengths of magnetic monopoles of different masses are obtained, the efficiency of the level one trigger for the registration of magnetic monopoles is investigated in detail. The mass interval of magnetic monopoles with the acceptable efficiency of the level one trigger system is determined. Masses of monopoles that can be observed in the Belle II detector systems have been found.

Key words: magnetic monopoles, flight length, level one trigger, registration efficiency, Belle II.

Зміст

1. Вступ	1
2. Оглядова частина	3
2.1. Стандартна Модель	3
2.2. Експеримент Belle II.....	3
2.2.1. Електрон-позитронний колайдер SuperKEKB.....	4
2.2.2. Детектор Belle II	5
2.2.3. Тригерна система.....	6
2.2.4. Система координат	7
2.3. Магнітні монополі	7
2.4. basf2.....	12
3. Минулі та поточні пошуки	13
4. Результати.....	16
4.1. Аналіз довжин прольоту магнітних монополів.....	17
4.2. Ефективність спрацювання тригеру першого рівня	22
4.3. Дослідження окремих бітів спрацювання тригеру першого рівня.	26
4.4. Ефективність реєстрації одного магнітного монополя	27
5. Висновки.....	29
Список літератури.....	31

1. Вступ

Магнітні монополі були запропоновані П. А. М. Діраком [1] у 1931 році, при цьому їх існування пояснювало б квантованість електричного заряду. В 1970-х роках пошуки магнітних монополів набули активного розвитку через те, що незалежно Г. 'т Гофт [2] та О. Поляков [3] запропонували їх існування у Теорії Великого Об'єднання. Експериментально існування магнітних монополів підтверджено не було. У 2017 році М. К. Салліван та Д. Фрайбергер [4] висунули пропозицію провести пошук магнітно заряджених частинок на електрон-позитронному колайдері SuperKEKB в експерименті Belle II при енергії $\Upsilon(4S)$ резонансу. В роботі зазначено, що цей експеримент повинен мати надзвичайну чутливість до детектування магнітних монополів. Народжені при анігіляції e^+e^- пари монополів мали спостерігатися трековою системою детектора, маючи особливу форму треків в магнітному полі, на відміну від спіральної форми треку для звичайних електрично заряджених частинок. Також магнітні монополі повинні відрізнятися великими питомими енергетичними втратами при проходженні матеріалу складових частин експериментальної установки.

Дана кваліфікаційна робота магістра направлена на пошуки магнітних монополів в колайдерному експерименті. Метою цієї роботи є дослідження ефективності реєстрації класичних магнітних монополів в експерименті Belle II. Дослідження виконувалось методом проведення симуляцій утворення пар магнітних монополів в результаті реакції взаємодії e^+e^- з подальшим аналізом довжин прольоту монополів та відгуку тригерної системи експерименту Belle II.

Для досягнення мети роботи необхідно дослідити довжини прольоту магнітних монополів в залежності від різних параметрів з оцінкою можливості їх реєстрації. Для цього автору потрібно було написати власні програмні коди для моделювання магнітних монополів зі значенням магнітного заряду $68.5e$ з використанням фреймворку basf2 та програмні коди з використанням

фреймворків basf2 та ROOT для аналізу отриманих даних. Було заплановано розглянути діапазон мас магнітних монополів від 50 MeV до 4.6 GeV та дослідити можливість детектування таких частинок в експерименті. Серед поставлених задач також було використання триггеру першого рівня (L1) для селекції подій під час симуляції та проведення аналізу ефективності реєстрації пар магнітних монополів. Також завданням передбачалось дослідити окремо магнітні монополи з додатнім або від'ємним значенням магнітного заряду з використанням триггеру L1. Також малось на меті проведення аналізу окремих ліній (або бітів) спрацювання триггеру L1 і дослідження умов, яким найбільше задовольняють магнітні монополи.

Робота може бути використана в майбутньому в якості фізичної мотивації для дослідження магнітних монополів за допомогою лише даних з піксельного детектора. Для спостереження магнітних монополів більш загальноприйнятими методами потребується вдосконалення тригерної системи та алгоритмів реконструкції в експерименті Belle II.

Робота виконувалась у співпраці із фахівцями з Гессенського університету (Justus Liebig University Giessen, Німеччина).

2. Оглядова частина

2.1. Стандартна Модель

Стандартна Модель (СМ) – теорія, що описує електромагнітну, слабку та сильну взаємодії. Таким чином, СМ описує три з чотирьох фундаментальних взаємодій. Стандартна Модель є загальноприйнятою теорією в фізиці елементарних частинок і експериментально підтверджена в широкому діапазоні мас від кількох еВ до багатьох ТеВ.

В рамках СМ всі частинки поділяються на бозони та ферміони. Вся видима речовина складається з дванадцяти фундаментальних частинок – ферміонів: шести лептонів (електрон, мюон, тау, три типи нейтрино) та шести кварків (u, c, t, d, s, b). Кожна частинка-ферміон має партнера, що називається античастинкою і має заряд протилежного знаку. Бозони є переносниками взаємодії. Переносниками сильної взаємодії є вісім глюонів, переносниками слабкої – три важкі калібрувальні бозони (Z^0 , W^+ , W^-), переносником електромагнітної взаємодії є фотон. Маса частинок пояснюється їх взаємодією з полем Хігса.

Стандартна Модель не описує гравітаційну взаємодію та деякі феномени такі як ненульові маси нейтрино, темну матерію, темну енергію та не передбачає існування невідомих нині частинок. Пошук фізики поза межами СМ є фізичною мотивацією для багатьох сучасних експериментів.

2.2. Експеримент Belle II

Belle II – колайдерний експеримент з фізики елементарних частинок на e^+e^- зіткненнях з рекордною світимістю $8 \cdot 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Експеримент розташований у прискорювальному комплексі SuperKEKB.

Прискорювач SuperKEKB являє собою асиметричний електронно-позитронний колайдер, розташований в КЕК (High Energy Accelerator Research Organisation) в Цукубі (Японія).

Метою Belle II є дослідження фізики частинок з акцентом на точні вимірювання рідкісних процесів через високу інтенсивність, що доповнює широко застосовний високоенергетичний підхід. Відповідно, Belle II дуже чутливий до нової фізики, що проявляється через невеликі відхилення від прогнозів СМ.

Основною задачею експерименту є вивчення фізики В-мезонів. Серед основних напрямків дослідження: пошук частинок поза межами СМ у розпадах В-мезонів, дослідження порушення СР-інваріантності, пошук фізики поза СМ у розпадах τ -лептонів, чармонієва спектроскопія тощо.

Експеримент працює на $\Upsilon(4S)$ резонансі.

2.2.1. Електрон-позитронний колайдер SuperKEKB

SuperKEKB – асиметричний електрон-позитронний колайдер з енергією 10.58 GeV в центрі мас та світимістю $8 \cdot 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Є прямим покращенням прискорювача КЕКВ [5], робота якого була зупинена в 2010 році. У порівнянні з КЕКВ, світимість на SuperKEKB в 40 разів більша.

На рис. 2.1 наведене схематичне зображення SuperKEKB. Прискорювач має два основні накопичувальні кільця для електронів та позитронів. Електрони прискорюються до енергії 7 GeV, а позитрони – до 4 GeV.

Зіткнення частинок відбувається в точці взаємодії, оточеної детектором Belle II. Асиметрія енергій електронів та позитронів спричиняє буст (boost) в лабораторній системі [6] для покращення визначення вершин розпаду короткоживучих частинок. Енергія в центрі мас вибрана таким чином, щоб

збігалася з масою $\Upsilon(4S)$ резонансу, що розпадається майже ексклюзивно на пару В-мезонів [7].

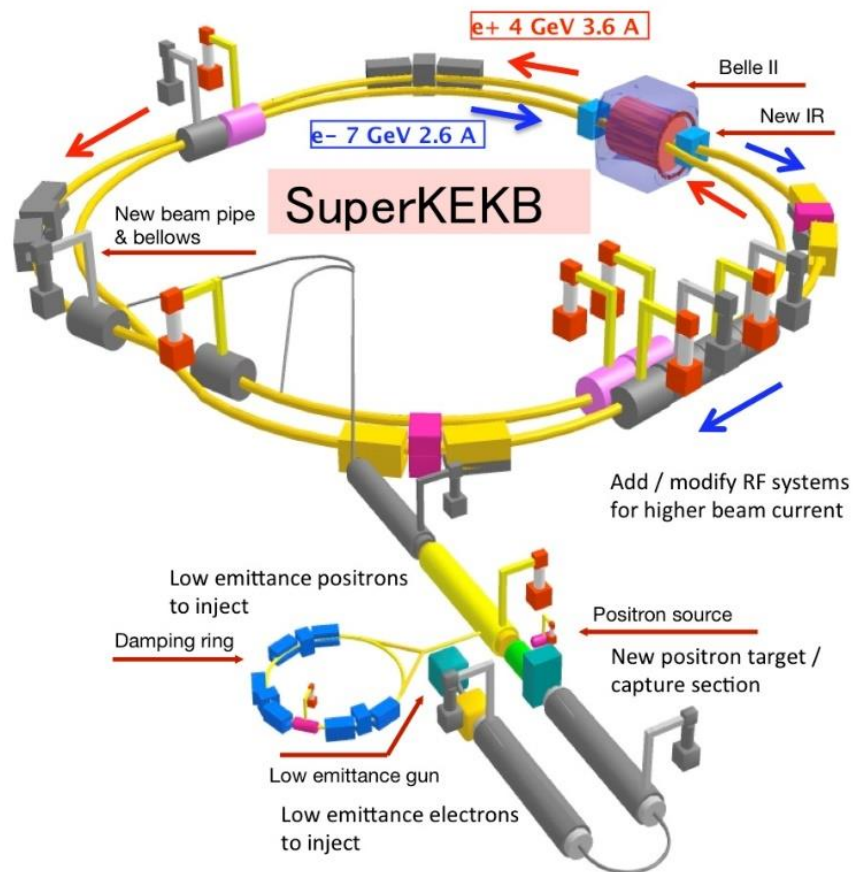


Рисунок 2.1. Схема прискорювача SuperKEKB. [8]

2.2.2. Детектор Belle II

Детектор загального призначення Belle II оточує точку взаємодії прискорювача SuperKEKB. Схема детектора Belle II наведена на рис. 2.2.

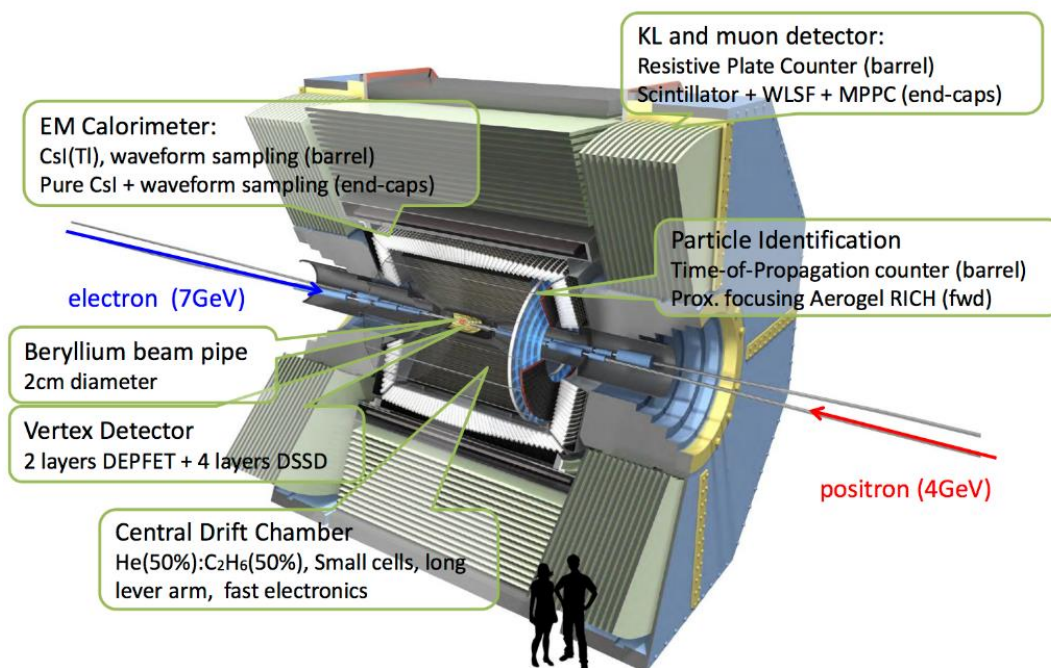


Рисунок 2.2. Схема детектора Belle II з назвами відповідних частин детектора.

[9]

Основні складові частини детектора Belle II:

- Піксельний вершинний детектор (PXD)
- Силіконовий вершинний детектор (SVD)
- Центральна дрейфова камера (CDC)
- Черенковські детектори (TOP та ARICH)
- Електромагнітний калориметр (ECL)
- Детектор мюонів та K_L (KLM)

Усі складові детектору, окрім KLM, оточені надпровідним магнітом, що створює постійне магнітне поле величиною 1.5 Тл.

2.2.3. Тригерна система

Тригерна система першого рівня (L1) – система, заснована на програмованих користувачем вентильних матрицях (ПКВМ), яка призначена для

відсікання нерелевантних подій, що дозволяє зменшити потік даних для обробки тригерами вищого рівня, та кількість нецікавих для експерименту подій загалом.

Перше рішення тригерної системи відбувається на апаратному рівні, використовуючи інформацію від декількох детекторних підсистем. На цільовій світимості L1 тригер має працювати з частотою 30 кГц.

Після спрацювання тригеру, всі дані, що відповідають одному зіткненню, збираються в одну подію. Після реконструкції події, програмний тригер вищого рівня (HLT) приймає рішення щодо збереження чи відкидання події.

2.2.4. Система координат

Для детектору Belle II вибрана правостороння декартова система координат. Початок координат знаходиться в точці взаємодії. Вісь z паралельна до іонопроводу та спрямована до передньої частини детектора. Вісь y напрямлена до верху детектора, а вісь x напрямлена від кільця [10]. Враховуючи форму детектора, доцільно переходити в циліндричну систему координат і розглядати поперечну складову фізичних величин.

2.3. Магнітні монополі

Класичний електромагнетизм, а також взаємодія зарядженого та електромагнітного полів повністю описуються рівняннями Максвелла в поєднанні із силовим законом Лоренца та рівняннями руху Ньютона. Невелика асиметрія рівнянь Максвелла наявна через існування електричних, але відсутність магнітних зарядів і не відповідає жодному базовому принципу, крім емпіричних доказів. Проте експериментально існування магнітних монополів також досі не доведене.

З припущенням, що магнітні заряди існують, рівняння Максвелла приймають вигляд:

$$\begin{aligned}\nabla \mathbf{D} &= 4\pi\rho_e \\ \nabla \mathbf{B} &= 4\pi\rho_m \\ -\nabla \times \mathbf{E} &= \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_m \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_e,\end{aligned}$$

де

- \mathbf{D} — електрична індукція
- \mathbf{B} — магнітна індукція
- \mathbf{E} — напруженість електричного поля
- \mathbf{H} — напруженість магнітного поля
- $\mathbf{j}_e, \mathbf{j}_m$ — густина струму (електричного/ магнітного)
- ρ_e, ρ_m — густина заряду (електричного/ магнітного) [11]

Вперше існування магнітних монополів запропонував Поль Дірак. Магнітні монополі, запропоновані Діраком, мають назву класичних або діраковських. Згідно з Діраком, існування магнітних монополів передбачає квантування електричного заряду. При цьому було виявлено, що магнітний монопол має магнітний заряд $68.5e$. У теорії Дірака груба оцінка маси монополя дає значення приблизно 2 ГеВ. Оцінка заснована на припущенні, що класичний радіус електрона дорівнює класичному радіусу монополя [1].

Умова Дірака на квантування заряду формулюється таким чином:

$$eg = \frac{n\hbar c}{2},$$

де e - електричний заряд, g - магнітний заряд, n - довільне ціле число, більше за нуль, \hbar - зведена стала Планка, c - швидкість світла.

Таким чином, для $n = 1$, маємо, що $g_D = \hbar c / 2e \approx 137e/2 = 68.5e$. В СГС розмірність електричного і магнітного заряду збігаються.

Існують інші припущення по масі магнітних монополів. Наприклад 'т Гофт [2] та Поляков [3] запропонували існування магнітних монополів в Теорії Великого Об'єднання, що виникають при спонтанному порушенні симетрії. Маса таких монополів оцінюється $m \gtrsim 10^{17}$ ГеВ. Деякі теорії суперсиметрії включають магнітні монополі, маса яких знаходиться в діапазоні $m \sim 10^5 - 10^{12}$ ГеВ [11]. Монополі менших мас $m \sim 3 - 7$ ГеВ пропонуються в теорії електрослабких взаємодій [12].

Через наявність магнітного заряду, магнітні монополі відчують прискорення в магнітному полі, тому їх траєкторія набуває параболічної форми [4]. У цій роботі магнітний монополь, або північний магнітний полюс визначається як магнітно заряджена частинка, яка прискорюється паралельно лініям магнітного поля і має додатній магнітний заряд. Магнітний антимоніполь, або південний полюс визначається як частинка, що прискорюється антипаралельно до ліній магнітного поля та має від'ємний магнітний заряд. Порівняння траєкторій частинок з магнітним та електричним зарядом наведено на рис. 2.3.

Закон Лоренца для магнітних зарядів виглядає наступним чином:

$$\mathbf{F}_m = g(\mathbf{B} - \boldsymbol{\beta} \times \mathbf{E}),$$

де g – магнітний заряд, $\boldsymbol{\beta}$ – швидкість, поділена на швидкість світла.

Зазвичай рівняння руху монополів розв'язуються чисельними методами. Аналітичний розв'язок доступний для частинного випадку, коли магнітно заряджена частинка знаходиться у однорідному магнітному полі і має початкову швидкість у напрямку, перпендикулярному до цього поля [13]. Якщо магнітне

поле напрямлене вздовж осі z , а частинка починає рухатися вздовж осі x в час $t = 0$, еволюція позиції частинки описується наступним рівнянням:

$$\mathbf{r}(t) = \frac{p_0}{gB_0} \left(\sinh^{-1} \left(\frac{gB_0(t + \Delta t)}{E_0} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{gB_0\Delta t}{E_0} \right) \right) \mathbf{z} + \frac{E_0}{gB_0} \left(\sqrt{1 + \frac{(gB_0(t + \Delta t))^2}{E_0^2}} - \sqrt{1 + \frac{(gB_0\Delta t)^2}{E_0^2}} \right) \mathbf{x},$$

де p_0, E_0 – початкові імпульс та енергія відповідно, B_0 – індукція магнітного поля. Δt відображає нескінченно малу зміну в часі.

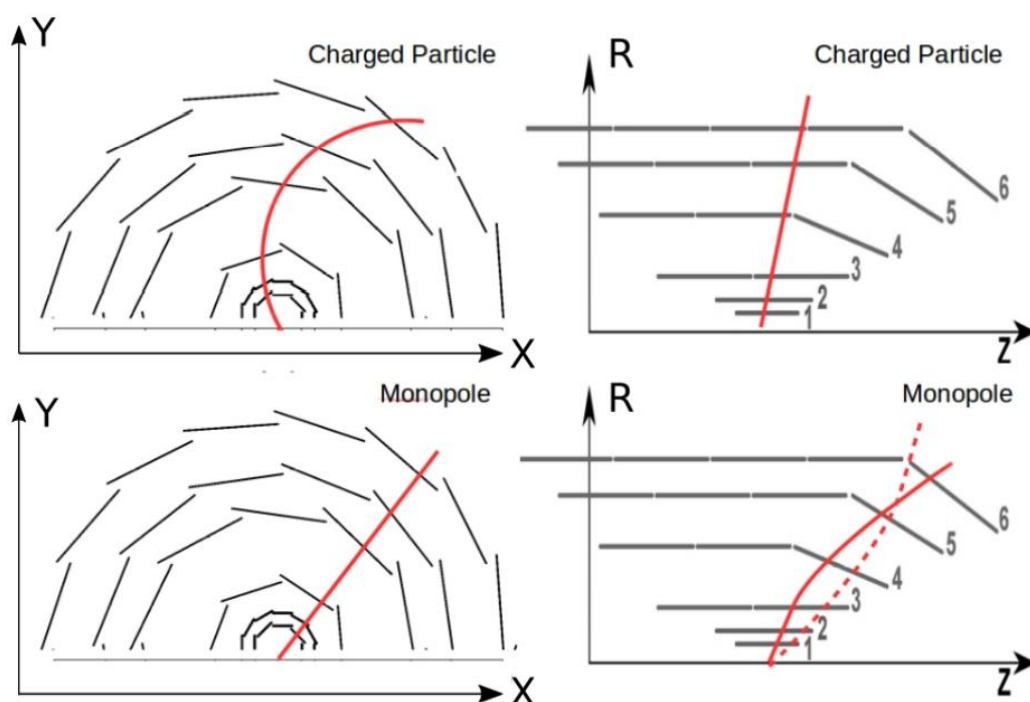


Рисунок 2.3. Траєкторії електрично (зверху) і магнітно (знизу) заряджених частинок в однорідному магнітному полі, паралельному напрямку z . У площині перпендикулярно до магнітного поля - площині xy - (ліва сторона) електрично заряджені частинки згинаються, а магнітні монополі поширюються по прямій лінії. У площині rz (права сторона) монополі мають траєкторію параболи, а електрично заряджені частинки - пряму лінію. [14]

Магнітні монополи є сильно іонізуючими частинками та їх іонізаційні втрати описуються модифікованою формулою Бете-Блоха [15]. Графіки порівняння іонізаційних втрат для електрично та магнітно заряджених частинок наведені на рис. 2.4.

В цій роботі досліджуються саме магнітні монополи з класичної теорії Дірака, що мають значення магнітного заряду $68.5e$.

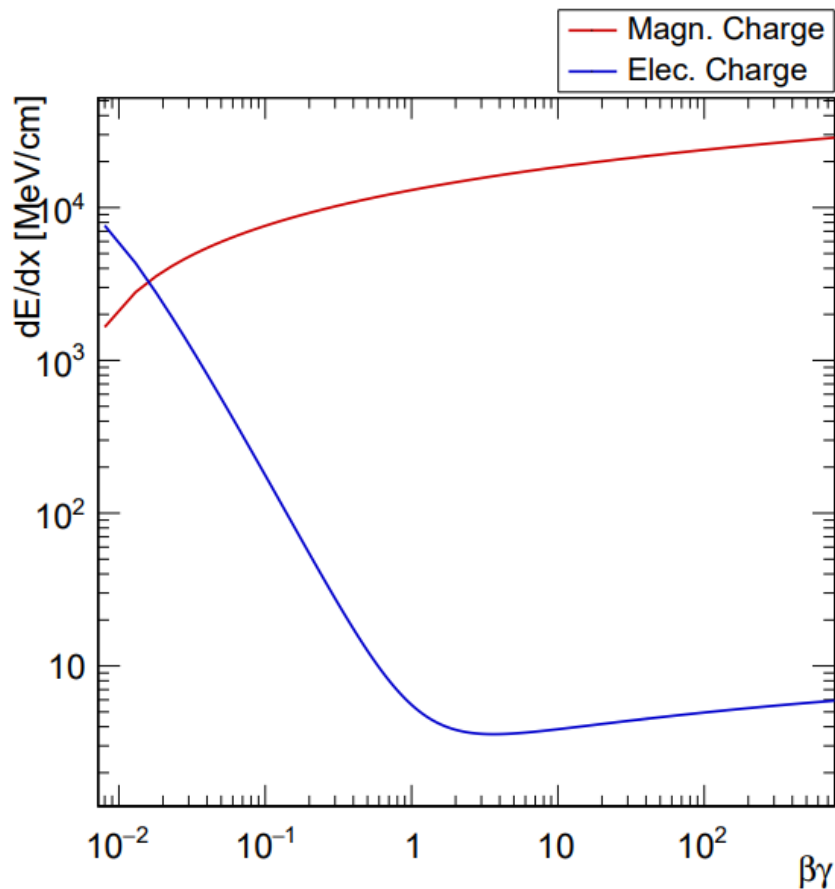


Рисунок 2.4. Розраховані іонізаційні втрати для магнітного монополя (червона крива) та електрично зарядженої частинки (синя крива). Обидві частинки мають масу $m = 1$ GeV і одиничний заряд. [16]

Використовуючи Монте-Карло генератор для моделювання частинок з магнітним зарядом і відстежуючи ці події за допомогою спрощеної моделі детектора Belle II, було виявлено, що центральна дрейфова камера Belle II має

надзвичайно високу ефективність для реєстрації треків частинок з магнітним зарядом [4].

2.4. basf2

Програмне забезпечення Belle II називається basf2, скорочено від Belle II Analysis Software Framework.

basf2 використовується у всіх аспектах ланцюга обробки даних у Belle II:

- генерація змодельованих даних
- розпакування реальних необроблених даних,
- реконструкція (відстеження, кластеризація, тощо) [17]

basf2 складається з 41 пакета, які складають майже все програмне забезпечення, що потребує експеримент: від інтерпретації сигналів від детектора до перевірки продуктивності високого рівня.

Фреймворк написаний на C++ з інтерфейсом користувача Python.

3. Минулі та поточні пошуки

В цьому розділі наведені деякі з найбільш релевантних поточних та минулих пошуків класичних магнітних монополів.

Існують спеціальні техніки для детектування магнітно заряджених частинок. Серед них Induction Technique in Superconductive Coils [18], що застосовується з використанням Superconducting Quantum Interferometer Device (SQUID). Якщо магнітний монополі проходить через надпровідне середовище, то виникає зміна струму, що відповідає одній одиниці кванта потоку надпровідності. SQUID також використовуються для пошуку магнітних монополів, зупинених матерією. Колаборація HERA використовувала SQUID магнітометри щоб досліджувати іонопровід для пошуку магнітних монополів в e^+p зіткненнях [19].

Інші експерименти використовують світловихід у сцинтиляторах та/або іонізацію в газових детекторах для виявлення характерних втрат енергії монополів та/або їх руху в магнітному полі [20]. Наприклад, ядерні трекові детектори (ЯТД) є популярним методом виявлення сильно іонізуючих частинок. Частинки, відкладаючи енергію в ЯТД, залишають слід у середовищі. Після хімічного травлення матеріалу ЯТД трек можна розглянути під мікроскопом. Ці експерименти спираються або на астрофізичне джерело для магнітних монополів, або вони проводяться на колайдерах частинок.

Багато колайдерних експериментів на e^+e^- , e^+p , pp та $p\bar{p}$ зіткненнях були задіяні в пошуках магнітних монополів [21, 22]. На рис. 3.1 зображено простір параметрів, перевірений на даний момент. Пошуки в електрон-позитронних зіткненнях сфокусовані на пошуках в області менших мас. Високоенергетичні пошуки за допомогою e^+e^- зіткнень були проведені з енергією 206.3 GeV в центрі мас детектором OPAL на LEP [23]. В своєму аналізі вони фокусувалися високому енерговиділенні в трекових камерах. TRISTAN на KEK [24], PETRA в

DESY [25], PEP у SLAC [26], а також експеримент MODAL на LEP [27] намагалися знайти докази існування монополів за допомогою ЯТД.

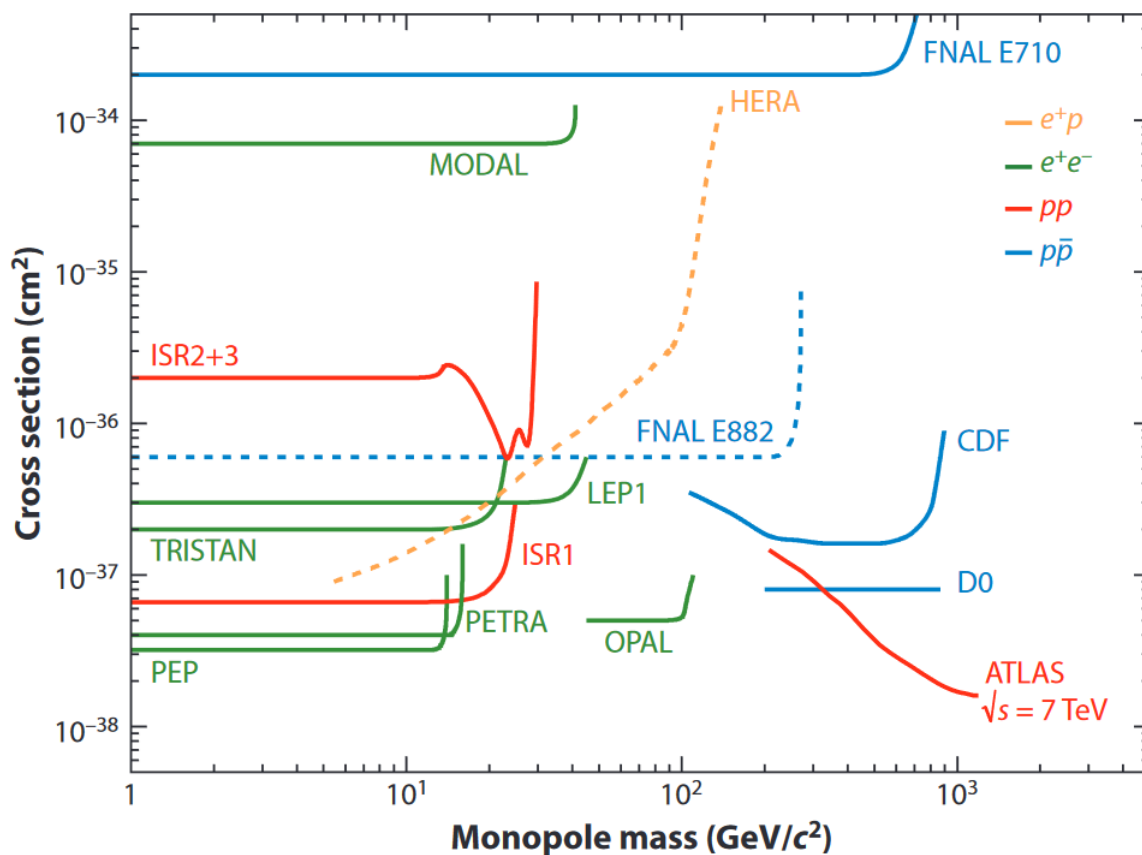


Рисунок 3.1. Верхні ліміти на перерізи утворення магнітних монополів в колайдерних експериментах. Усі експерименти мають довірчий інтервал 95%, окрім FNAL E882, що має довірчий інтервал 90%. Штрих пунктирні лінії відповідають непрямим пошукам магнітних монополів, захоплених іонопроводом чи детекторними матеріалами. Електрон-позитронні колайдери особливо чутливі до області меншої маси. [21]

Оскільки Belle II є електрон-позитронним колайдером, очікується чутливість детектора до монополів невеликих мас. Проте ідентифікація сильно іонізуючих частинок (НІР) ускладнена через те, що калібрація детектора зазвичай проводиться за допомогою мінімально іонізуючих частинок (МІР).

Тому відгук детектора на НІР мало досліджений. Також, невелика довжина прольоту НІР означає що лише обмежена кількість детекторних підсистем може спостерігати частинку. Це може призвести до неправильної ідентифікації або повної втрати інформації про частинку. Існує пропозиція щодо детектування НІР за допомогою лише найближчого до іонопровада детектора, PXD, що вирішило б цю проблему. До того ж, траєкторія магнітно заряджених частинок відрізняється від траєкторії електрично заряджених, через що для магнітних монополів мають бути розроблені додаткові спеціальні алгоритми реконструкції. Спеціальні алгоритми трекінгу для ідентифікації магнітно заряджених частинок зараз розробляються в Belle II [28].

4. Результати

Автором роботи було написано коди для моделювання утворення пар магнітних монополів в геометрії детектора Belle II за допомогою фреймворку basf2. Для подальшого аналізу даних, аналізу та візуалізації гістограм було написано програмні коди з використанням фреймворків basf2 та ROOT. Зразок змодельованої події наведено на рис. 4.1.

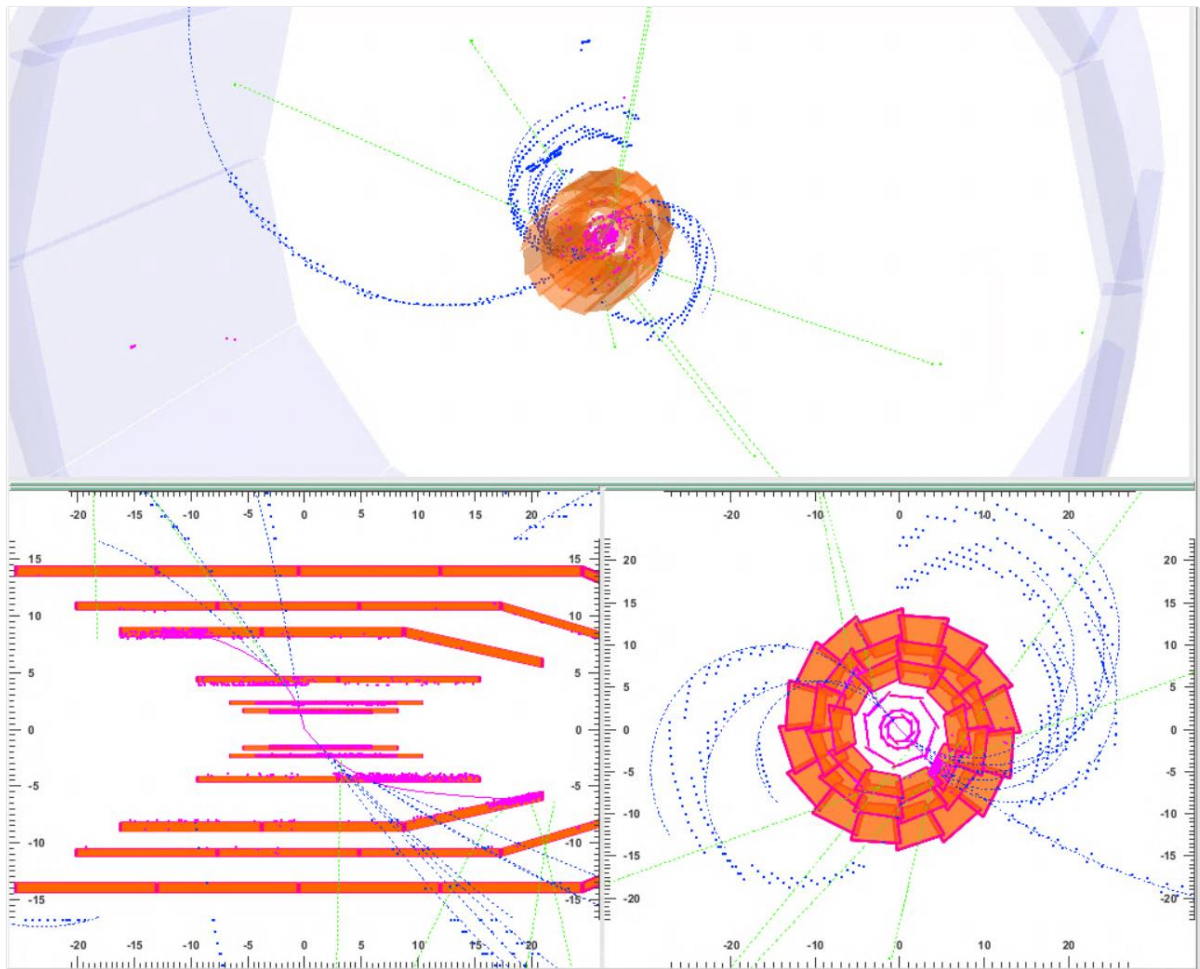


Рисунок 4.1. Змодельована за допомогою фреймворку basf2 подія з утворенням пар монополів маси 55 MeV в геометрії детектора Belle II. Треки рожевого кольору відповідають магнітним монополям, синього – електронам, зелені штрих пунктирні лінії відповідають гамма-квантам.

4.1. Аналіз довжин прольоту магнітних монополів

На рис. 4.2 наведено гістограми поперечних довжин прольоту змодельованих магнітних монополів в залежності від маси. У табл. 4.1 наведені відстані від точки взаємодії у поперечному напрямку на яких було втрачено 90% частинок. Різні довжини прольоту для монополів та антимонаполів однакової маси пояснюються асиметрією енергії пучків, через що одна частинка з пари прискорюється в напрямку переважного вильоту продуктів реакції, в той час, як інша відчуває від'ємне прискорення. А також через великі іонізаційні втрати монополів, внесок в різну довжину прольоту різних типів частинок дає асиметрія детектора відносно площини $xу$, тобто нахилена частина детекторної системи SVD, в яку потрапляють прискорені монополі.

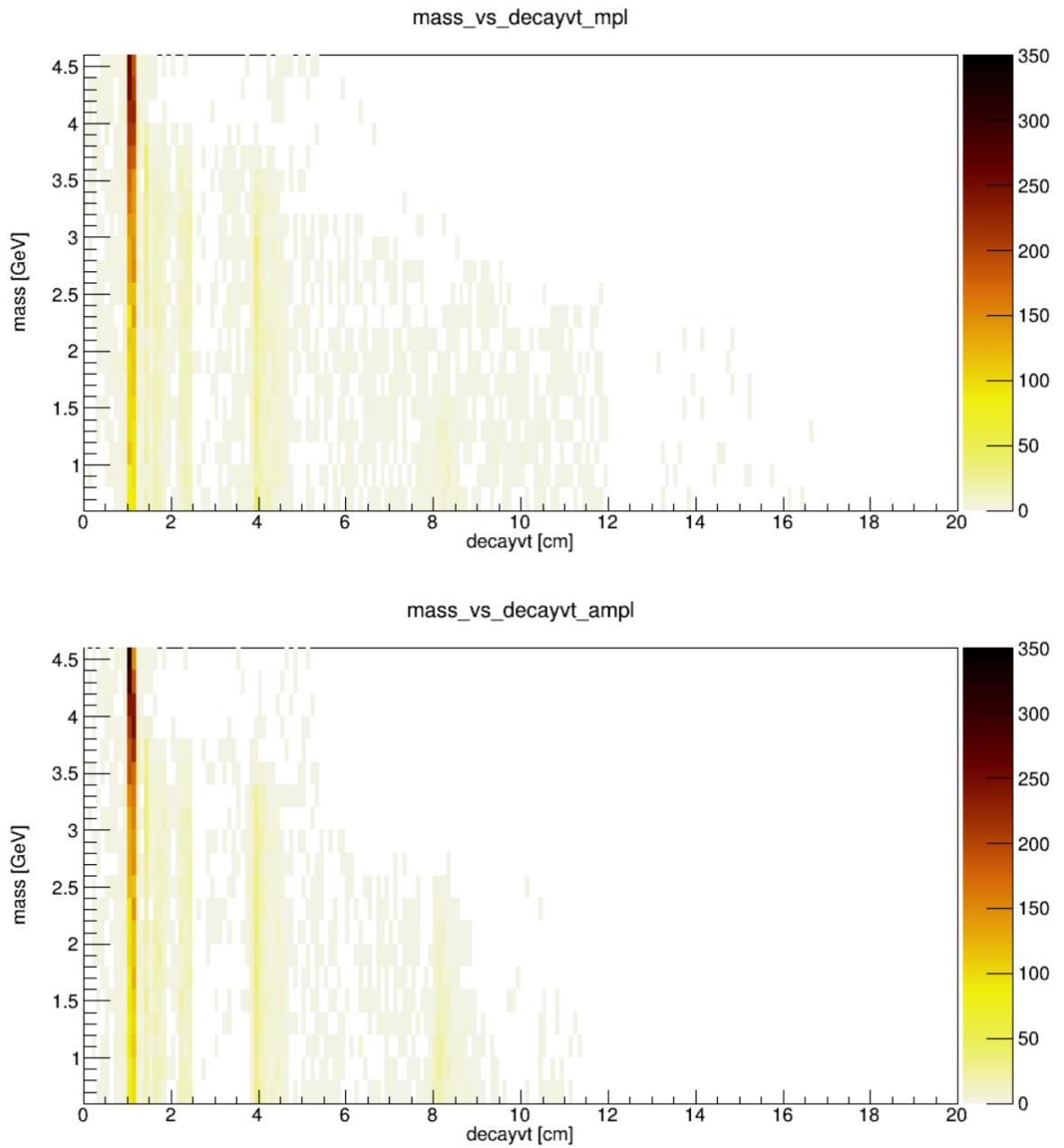


Рисунок 4.2. На гістограмах зображено залежність тангенційної складової довжини розпаду від маси (0.6 – 4.6 Гев) для монополів (зверху) та антимонopolів (знизу).

Таблиця 4.1. Поперечна довжина прольоту, на якій було втрачено 90% частинок,
в залежності від маси.

Маса	Поперечна довжина прольоту монополів	Поперечна довжина прольоту антимонаполів
0.6 GeV	8.4 см	8.2 см
0.8 GeV	8.4 см	8.2 см
1.0 GeV	8.4 см	8.2 см
1.2 GeV	8.5 см	8.2 см
1.4 GeV	8.2 см	8.1 см
1.6 GeV	8.1 см	7.3 см
1.8 GeV	7 см	6.8 см
2.0 GeV	7 см	5.8 см
2.2 GeV	4.6 см	4.5 см
2.4 GeV	4.4 см	4.2 см
2.6 GeV	4.1 см	4 см
2.8 GeV	4.1 см	4.1 см
3.0 GeV	4 см	4 см
3.2 GeV	4 см	4 см
3.4 GeV	2.5 см	1.9 см
3.6 GeV	2 см	1.5 см
3.8 GeV	1.3 см	1.2 см
4.0 GeV	1.2 см	1.2 см
4.2 GeV	1.2 см	1.2 см
4.4 GeV	1.2 см	1.2 см
4.6 GeV	1.2 см	1.2 см

Оскільки магніті монополі мають великі іонізаційні втрати, вони залишають унікальну сигнатуру в PXD у вигляді великих кластерів активованих пікселів з великим енерговиділенням [16]. Кількість частинок, що проходять обидва шари PXD залежить від їх маси, через що відсоток таких частинок зростатиме зі зменшенням маси. Верхні межі маси монополів, які досягають певного відсоткового порогу по їх кількості для проходження обох шарів PXD, наведено на табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Верхня межа маси монополів для певного відсотка частинок, які проходять обидва шари PXD.

Відсоток монополів, що проходять обидва шари PXD	10%	25%	50%
Верхня межа маси	3.4 GeV	2.8 GeV	0.6 GeV

Також в ході роботи було отримано інші розподіли для дослідження довжин прольоту монополів, для дослідження різних ефектів. Наприклад, на рис. 4.3 зображено порівняння поперечних довжин прольоту монополів та антимонаполів в залежності від тангенційної складової імпульсу для мас 1, 2, 3 GeV. При цьому було виявлено, що для монополів цих мас існує поріг по поперечній складовій імпульсу, щоб вийти з трубки прискорювача. Невелика кількість частинок з малим поперечним імпульсом, що мають довжину прольоту більшу за ширину трубки прискорювача, мають невеликі кути і долітають до області, де трубка прискорювача розширюється [29], та втрачаються уже в тій області. З усіх змодельованих частинок до 60% мають достатній поперечний імпульс, щоб вийти з іонопровода прискорювача. Також, недостатня довжина прольоту та кінетична енергія не дозволяє викликати спрацювання триггеру для монополів цих мас. Через це, надалі в роботі розглядалися монополі менших мас

для аналізу ефективності тригерної системи для реєстрування магнітних монополів.

На розподілах, наведених на рис. 4.2, 4.3, помітно, що при деяких сталих значеннях поперечної довжини прольоту відбувається втрата великої кількості частинок, що відповідає їх великим іонізаційним втратам у шарах PXD та SVD і узгоджується їх фізичним розташуванням, наведеним у табл. 4.3, 4.4.

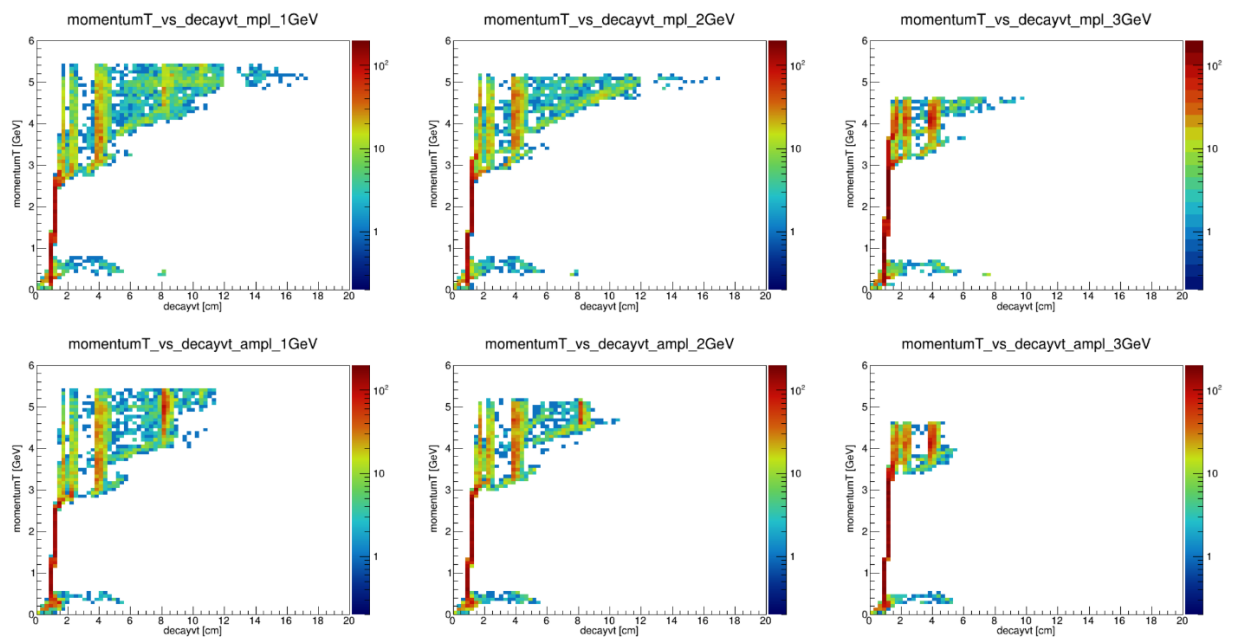


Рисунок 4.3. Залежність поперечної довжини прольоту монополів (зверху) та антимонаполів (знизу) для мас 1, 2, 3 ГеВ (зліва направо, відповідно) від поперечної складової імпульсу.

Таблиця 4.3. Специфікація PXD у Belle II. [30]

Layer	Radius (mm)	Ladders	Sensors	Pixels/Sensor $u \times v$	Pitch $u \times v$ ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)
1	14	8	16	250×768	50 × (55 to 60)
2	22	12	24	250×768	50 × (70 to 85)
Sum		20	40	7 680 000	

Таблиця 4.4. Специфікація SVD у Belle II. [30]

Layer	Radius (mm)	Ladders	Sensors	Strips/Sensor u, v	Pitch u, v ($\mu\text{m}, \mu\text{m}$)
3	39	7	14	768, 768	50, 160
4	80	10	30	768, 512	75 to 50, 240
5	104	12	48	768, 512	75 to 50, 240
6	135	16	80	768, 512	75 to 50, 240
Sum		35	172	132 096, 91 648	

4.2. Ефективність спрацювання тригеру першого рівня

Також в ході роботи було проведено аналіз ефективності спрацювання тригеру першого рівня для пар монополів різних мас. Ефективність визначена як відношення кількості подій, що задовольняють умовам тригеру першого рівня до загальної кількості змодельованих подій. Загальна ефективність тригеру L1 у двох версіях фреймворку basf2 (5-02-17 та 3-01-01) наведена на рис. 4.4. У табл. 4.5 наведено ефективність спрацювання тригеру першого рівня для різних мас для 10 000 та 1000 змодельованих подій у basf2 версії 5-02-17. На даний момент неможлива симуляція великої кількості подій з монополями з масами менше 55 MeV. Це спричинено тим, що присутня імовірність утворення нескінченної події для монополів легкої маси. Така подія не оброблюється

правильно, та симуляція зупиняється. З аналізу слідує, що тригерна система експерименту Belle II чутлива до реєстрації монополів з масами менше 300 MeV.

L1 trigger efficiency vs monopole mass

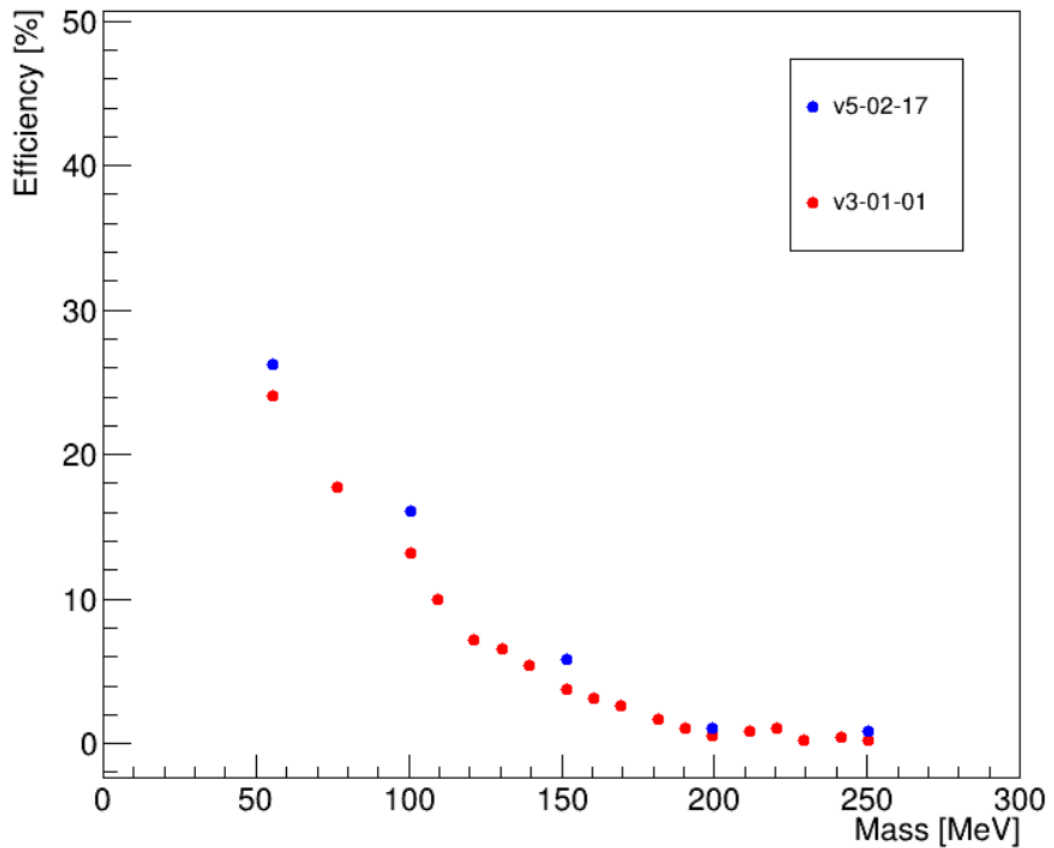


Рисунок 4.4. Загальна ефективність спрацювання тригеру першого рівня для пар монополів з масами 55-250 MeV в двох різних версіях фреймворку. Кількість змодельованих подій для кожного значення маси – 1000.

Таблиця 4.5. Ефективність спрацювання тригера першого рівня для монополів різних мас для різної кількості змодельованих подій у basf2 версії 5-02-17.

Маса	Ефективність 10000 подій	Ефективність 1000 подій
300 MeV	0.02%	0%
250 MeV	0.6%	0.8%
200 MeV	1.8%	1.1%
150 MeV	6.03%	5.8%
100 MeV	14.56%	16.1%
55 MeV	--	26.2%

Оскільки аналітичного вигляду рівняння для ефективності спрацювання тригера першого рівня як функції від маси не існує, для апроксимації значень ефективності та можливості подальшої екстраполяції, було вибрано експоненційну функцію з трьома параметрами: $y = y_0 + A \cdot e^{-k \cdot x}$. Апроксимовано значення ефективності спрацювання тригера першого рівня в залежності від маси, для 10 000 змодельованих подій. Графік апроксимації наведено на рис. 4.5. $\chi^2/ndf = 2.86$ для цього випадку, де ndf – кількість ступенів свободи. Параметри апроксимації:

- $y_0 = -0.0035 \pm 9E - 4$
- $A = 0.95 \pm 0.12$
- $k = 0.0184 \pm 0.0011 \frac{1}{\text{MeV}}$

Параметр y_0 не дорівнює 0, як очікується з фізичних міркувань.

Екстраполюючи отриману залежність в область легших мас, отримано значення ефективності $34.3 \pm 4.9\%$ для маси 55 MeV. Порівнюючи отримане значення зі значенням, отриманим при симуляції 1000 подій для цієї маси, 26.2%, маємо, що дана залежність переоцінює ефективність в області

менших мас. Функція прийнятна для оцінки ефективності на межі спрацювання триггеру першого рівня та для інтерполяції в використаній області.

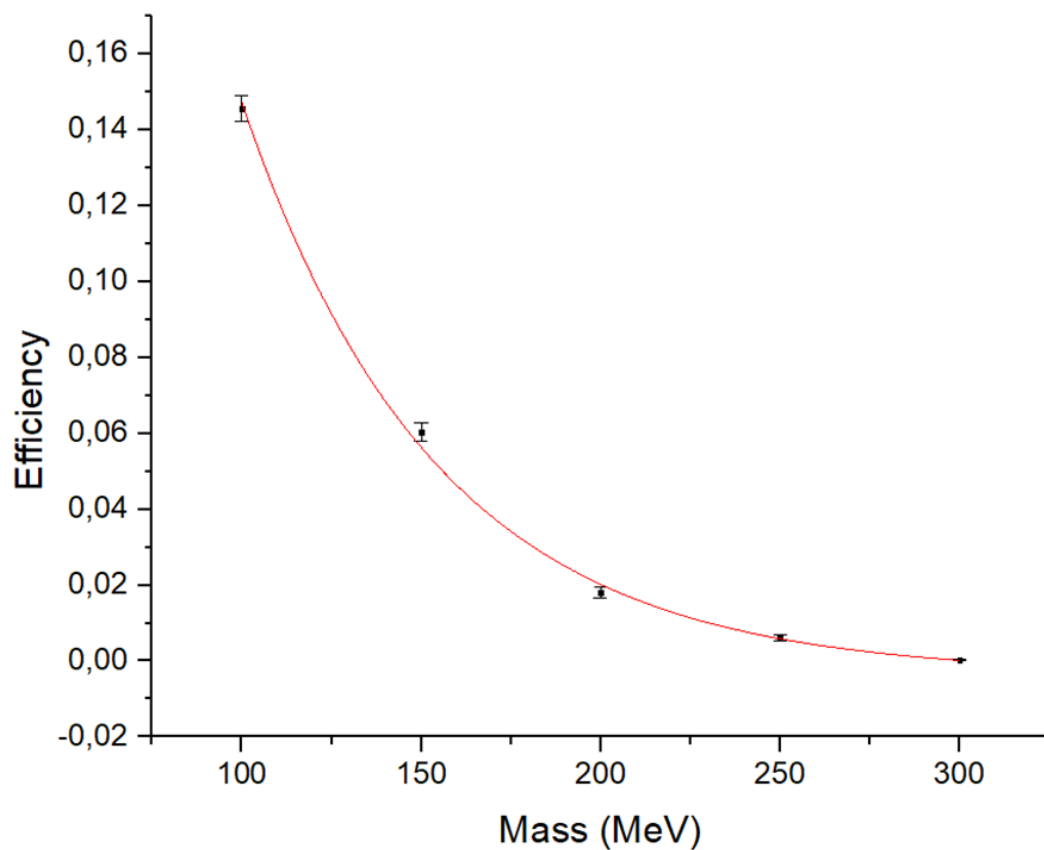


Рисунок 4.5. Графік апроксимації ефективності спрацювання триггеру першого рівня для монополів в залежності від значень їх маси. Кількість змодельованих подій для кожного значення маси – 10 000.

4.3. Дослідження окремих бітів спрацювання триггеру першого рівня

З аналізу окремих ліній спрацювання триггеру було вибрано події, що відповідають окремим умовам спрацювання триггеру і було виявлено, що повний внесок у спрацювання триггеру мають дочірні частинки (наприклад, дельта-електрони), а не власне магнітні монополі.

Для отримання окремих ліній спрацювання триггеру першого рівня, що відповідають тим, що зараз використовуються в експерименті, необхідно використовувати сучасну версію фреймворку basf2. Через неможливість виконати симуляцію пар магнітних монополів в сучасній версії фреймворку (5-02-17), без втручання у вихідний код програмного забезпечення, для моделювання в сучасній версії basf2 були використані лише дочірні частинки, характеристики яких отримано з симуляцій на більш застарілій версії (3-01-01). Доцільність такого підходу для дослідження тригерної системи обґрунтована тим, що опис іонізаційних втрат та траєкторії магнітних монополів залишився незмінним, а спрацювання тригерної системи викликають саме дочірні частинки.

Автор розглянув окремі лінії спрацювання триггеру першого рівня в пошуках домінуючої умови реєстрації монополів чи їх кластерів, для пропозицій щодо подальшого покращення тригерної системи з урахуванням можливості реєстрації монополів. Окремі лінії спрацювання триггеру наведено на рис. 4.6 для пар монополів мас 100, 150, 200, 250 MeV. Для монополів маси 100 MeV (та менше), домінуючим є біт 32 тригерної системи, що відповідає повній енергії більше 1 GeV в калориметрі. Проте, цей біт не є домінуючим для всіх наведених випадків. Група бітів 17-19, 22-24 (біт 21 позначений як непрацюючий для версій 5-2-xx) спрацьовує для всіх присутніх випадків, що відповідають певним умовам реєстрації за допомогою CDC. Ці та інші означення бітів наведено у [31].

Events of trigger bits (bit right to the number)

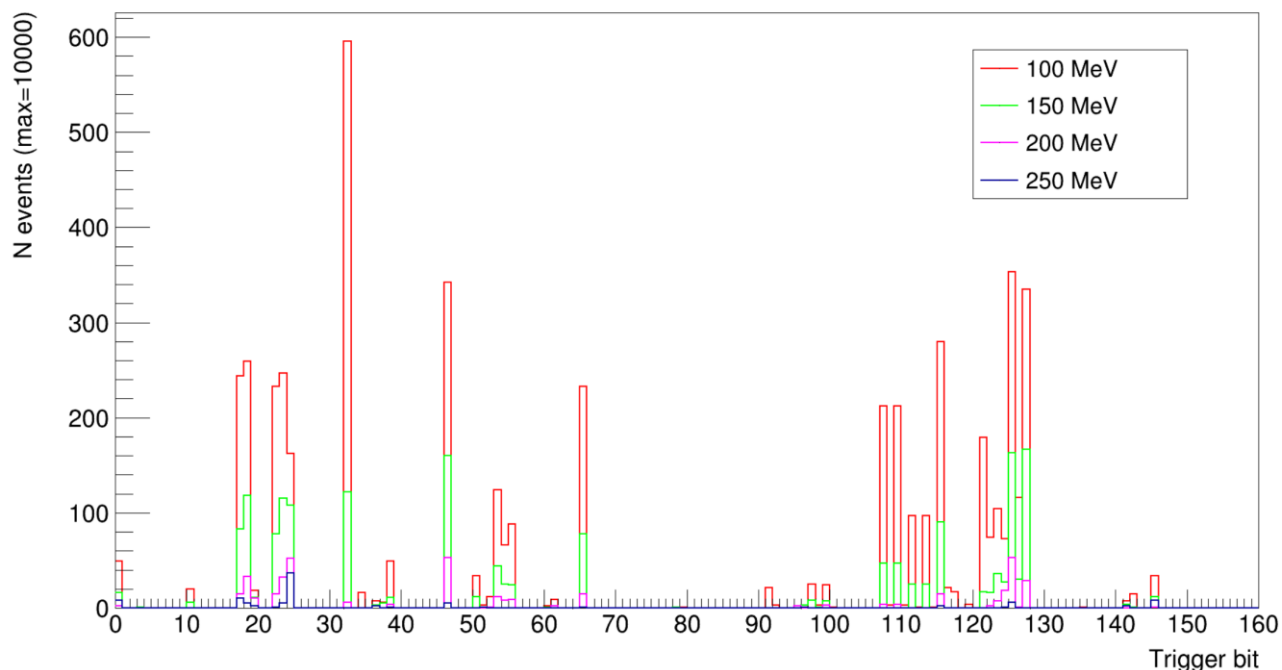


Рисунок 4.6. Кількість подій, що задовольняє певній лінії спрацювання триггеру першого рівня для монополів мас 100, 150, 200, 250 MeV. В гістограмі присутнє подвійне врахування (Кількість подій в кожному біні відповідає кількості подій, що задовольняє окрему лінію триггеру, не враховуючи умову, чи ця подія задовольняє іншій лінії триггеру. Це призводить до того, що кількість подій на зображеній гістограмі більша за кількість подій, що вибирається тригером).

4.4. Ефективність реєстрації одного магнітного монополя

Через різницю в поведінці частинок з різними магнітними зарядами в магнітному полі доцільно подивитися на ефективність реєстрації окремих монополів. Було отримано, що для магнітних монополів з масою 100 MeV, загальна ефективність спрацювання триггеру дорівнює 16.1%. При цьому, ефективність реєстрації окремо монополів складає 5.5%, а антимонаполів – 5.3%. Кількість подій, що задовольняють окрему з 168 ліній триггеру першого рівня для цього випадку наведена на рис. 4.7. Схожа ефективність реєстрації для цього випадку є випадковою, бо з аналізу різних умов спрацювання триггеру

видно, що кількість та номери задоволених умов різні, але сумарно збіглися до схожого значення. Сума ефективності спрацювання триггеру окремо монополів та антимонаполів не збігається зі значенням для пар, оскільки при реєстрації одного типу частинки втрачаються парні ефекти. З рис. 4.7 видно, що деякі лінії спрацювання триггеру залишаються задіяними навіть при реєстрації лише одного з монополів. Збільшення кількості подій в певних лініях триггеру при реєстрації одного монополя, у порівнянні з реєстрацією пар, знаходиться в межах статистичних флуктуацій.

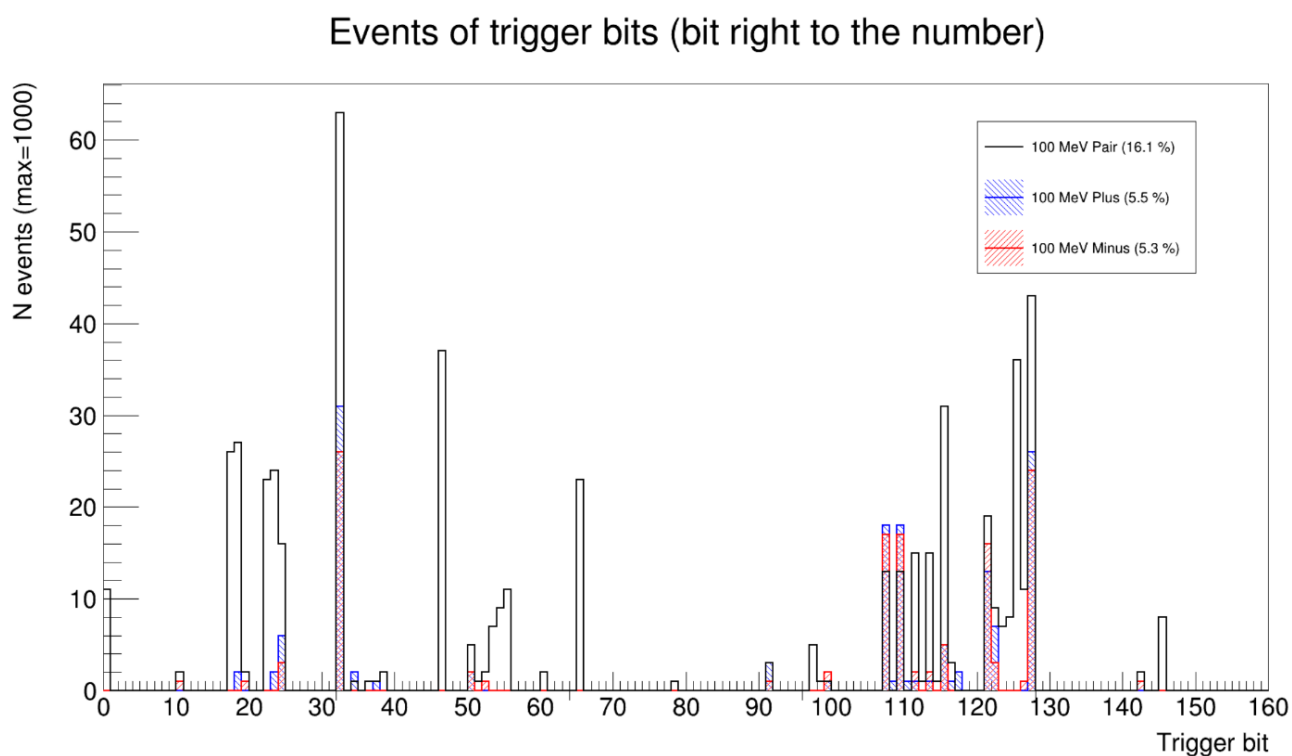


Рисунок 4.7. Кількість подій, що задовольняє певній лінії спрацювання триггеру першого рівня, порівняння для монополів, антимонаполів та пар магнітних монополів масою 100 MeV. В гістограмі присутнє подвійне врахування (Кількість подій в кожному біні відповідає кількості подій, що задовольняє окрему лінію триггеру, не враховуючи умову, чи ця подія задовольняє іншій лінії триггеру. Це призводить до того, що кількість подій на зображеній гістограмі більша за кількість подій, що вибирається тригером).

5. Висновки

Виконаний в даній кваліфікаційній роботі магістра аналіз направлений на пошук магнітних монополів в колайдерному експерименті Belle II (КЕК, Японія) в реакції взаємодії електронів з позитронами при енергії в системі центру мас 10.58 ГеВ. Автором проведено дослідження довжин прольоту магнітних монополів в залежності від різних параметрів і виконано детальний аналіз ефективності реєстрації магнітних монополів за допомогою тригерної системи L1 в даному експерименті.

В ході виконання роботи було опрацьовано академічну та технічну літературу, потрібну для виконання поставлених задач, яка стосувалася теорії магнітних монополів та особливості роботи трекової і детекторної систем. Моделювання подій і аналізу використовувалися фреймворки basf2 та ROOT. В роботі розглядалися діраковські магнітні монополі зі значенням магнітного заряду $68.5e$ в діапазоні мас від 50 МеВ до 4.6 ГеВ.

1. Отримано змодельовані дані та досліджено довжини прольоту магнітних монополів використовуючи написаний автором даної роботи код для симуляцій. З аналізу довжин прольоту виявлено, що більше 50% утворених монополів з масами більше 1 ГеВ мають можливість пройти стінки берилієвої труби іонопроводу та пройти до п'яти шарів трекової системи в залежності від маси. Це дозволить бачити сигнал на Belle II.
2. Проведено аналіз ефективності реєстрації магнітних монополів з використанням триггеру першого рівня (L1). Монополі з масами менше 300 МеВ викликають спрацювання триггеру з мінімально необхідною ефективністю, на відміну від більш важких монополів. Відносно невелика довжина прольоту не дозволяє використовувати існуючу тригерну систему в нинішньому вигляді для розкриття повного потенціалу реєстрації магнітних монополів в діапазоні мас

більше 1 GeV. Причиною цього є відносно мала кількість спрацювань шарів вершинного детектору SVD для відбору події.

3. Виявлено, що 10% магнітних монополів маси 3.4 GeV мають можливість пройти обидва шари піксельного детектора PXD, що в перспективі дозволяє реєструвати їх, використовуючи лише дані з PXD, та зареєструвати їх за характерним великим енерговиділенням.
4. Розглянуто можливість детектування окремо одного монополя з двох утворених, що має від'ємне або додатне значення магнітного заряду. При цьому виявлено, що спрацювання триггеру першого рівня можливе для однієї частинки. Довжини прольоту для монополів з додатнім знаком будуть більшими, ніж для від'ємних через асиметрію енергій електронних та позитронних пучків при даній конфігурації магнітного поля.
5. Виявлено, що для монополів мас, менших за 300 MeV, тригер спрацьовує з більшою ефективністю при наявності кількох високоенергетичних кластерів у калориметрі, при наявності сигналу з CDC детектора.

Результати, отримані в даній роботі, можуть бути використані у майбутніх пошуках магнітних монополів на колайдерах та для вдосконалення тригерної системи і алгоритмів реконструкції в експерименті Belle II.

Результати неодноразово представлялися на семінарах в Гессенському університеті (Justus Liebig University Giessen), на студентських семінарах в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка та на семінарах колаборації Belle II.

Робота виконувалась у співпраці із фахівцями в цій області з Гессенського університету Justus Liebig University Giessen (Німеччина), зокрема, з Prof. Jens Sören Lange та Dr. Katharina Dort.

Список літератури

- [1] Dirac P. A. M. Quantised singularities in the electromagnetic field. *Proc. R. Soc. Lond. A*. 1931. Vol. 133, N 821. P. 60-72.
- [2] 't Hooft G. Magnetic monopoles in unified theories. *Nucl. Phys. B*. 1974. Vol. 79. P. 276-284.
- [3] Polyakov A. *JETP Lett.*, 1974. Vol. 20, P. 194.
- [4] Sullivan M. K., Fryberger D. Magnetic charge search for the Belle II detector, 2017. (Preprint arXiv:1707.05295).
- [5] Branchini P. The Belle II. Experiment: Status and Prospects. *Universe*. 2018. Vol. 4, N 10. P. 101.
- [6] Accelerator design at SuperKEKB /Y. Ohnishi, T. Abe, T. Adachi [et al.]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*. 2013. Vol. 2013, N 3.
- [7] Review of particle physics / M. Tanabashi, K. Hagiwara, K. Hikasa [et al.]. *Physical Review D*. 2018. Vol. 98, N 3. P. 030001.
- [8] SuperKEKB and Belle II [https://www.belle2.org/project/super_ kekb_and_belle_ii](https://www.belle2.org/project/super_kekb_and_belle_ii).
- [9] Matvienko D. The Belle II experiment: status and physics program. *EPJ Web of Conferences*. 2018. 191. 02010. 0.1051/epjconf/201819102010.
- [10] Moll A. Comprehensive study of the background for the Pixel Vertex Detector at Belle II. Dissertation, LMU München: Faculty of Physics, 2015. P. 48. DOI: 10.5282/edoc.19106
- [11] Milton K. A. Theoretical and experimental status of magnetic monopoles. *Reports on Progress in Physics*. 2006. Vol. 69, N 6. P. 1637.
- [12] Yang Y. Dually charged particle-like solutions in the Weinberg–Salam theory. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1998. Vol. 454. P. 155–178.
- [13] Mulhearn M. J. A direct search for Dirac magnetic monopoles: PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [14] Lange J.S. PXD readout and rescue system for new physics. B2GM, Oct. 2017.

- [15] Ahlen S., Kinoshita K. Calculation of the stopping power of very-low velocity magnetic monopoles. *Physical Review D*. 1982. Vol. 26, N. 9. P. 2347.
- [16] Dort K., Lange J. S., Lautenbach K. Search for Highly Ionizing Particles with the Pixel Detector at Belle II. 12 Jun 2019. P. 2-5. arXiv:1906.04942v1
- [17] The Belle II core software / T. Kuhr, C. Pulvermacher, M. Ritter [et al.]. *Comput Softw Big Sci*. 2019. Vol. 3. Article 1.
- [18] Giorgio G., Werner N., Qaisar S. Theory And Detection Of Magnetic Monopoles In Gauge Theories (A Collected Set Of Lecture Notes). World Scientific Publishing Company, 1986.
- [19] Collaboration H. A direct search for stable magnetic monopoles produced in positron-proton collisions at HERA. *The European Physical Journal C-Particles and Fields*. 2005. Vol. 41, N 2. P. 133–141.
- [20] Energy losses of magnetic monopoles and dyons in scintillators, streamer tubes and nuclear track detectors / J. Derkaoui, G. Giacomelli, T. Lari [et al.]. *Astroparticle Physics*. 1999. Vol. 10, N 4. P. 339–352.
- [21] Patrizii L., Spurio M. Status of searches for magnetic monopoles. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*. 2015. Vol. 65. P. 279–302.
- [22] Stable massive particles at colliders / M. Fairbairn, A. Kraan, D. Milstead [et al.]. *Physics Reports*. 2007. Vol. 438, N 1, P. 1– 63.
- [23] Search for Dirac magnetic monopoles in e^+e^- collisions with the OPAL detector at LEP2 / G. Abbiendi, C. Ainsley, P. Åkesson [et al.]. *Physics Letters B*. 2008. Vol. 663, N 1-2. P. 37–42.
- [24] Search for highly ionizing particles in e^+e^- annihilations at $\sqrt{s}= 50- 60.8$ GeV / K. Kinoshita, M. Fujii, K. Nakajima [et al.]. *Physics Letters B*. 1989. Vol. 228, N 4, P. 543–547.
- [25] Musset P., Price M., Lohrmann E. Search for magnetic monopoles in electron-positron collisions at 34 GeV cm energy. *Physics Letters B*. 1983. Vol. 128, N 5. P. 333–335.

- [26] Search for highly ionizing particles in e^+e^- collisions at $\sqrt{s} = 29$ GeV / D. Fryberger, T. Coan, K. Kinoshita [et al.]. *Physical Review D*. 1984. Vol. 29, N 7. P. 1524.
- [27] A Search for highly ionizing particles produced at the OPAL intersection point at LEP / J. Pinfeld, R. Du, K. Kinoshita [et al.]. *Physics Letters B*. 1993. Vol. 316, N 2-3. P. 407–411.
- [28] Neverov D. Dark sector physics with Belle II. *XXXIX International Conference on High Energy Physics*, 2018.
- [29] Tanaka S. Beampipe status and plan+ VXD installation 3rd PXD/SVD workshop.
- [30] Belle II Tracking Group. Track Finding at Belle II. *Comput.Phys.Commun.* 259. 2021. 107610. P. 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2020.107610>
- [31] Trigger Bit Table for exp 12 physics runs. 2022.
<https://confluence.desy.de/display/BI/Trigger+Bit+Table+for+exp+12+physics+runs>

Подяки

Я хочу подякувати всім людям, які посприяли успіху цієї дипломної роботи. Дякую за поради та натхнення. Я надзвичайно вдячний за зусилля всіх людей, які допомагали мені протягом усього часу. Зокрема, я хотів би висловити глибоку вдячність наступним особам:

По-перше, я хочу подякувати своєму науковому керівнику, Аушеву Володимиру Єгоровичу за численні поради, допомогу та підтримку упродовж багатьох років. Також дякую за підключення мене до великої кількості цікавих проєктів і за можливість працювати в багатьох галузях фізики високих енергій. Я надзвичайно вдячний за все, що ви для мене зробили!

Моя глибока вдячність також адресована співкерівникам цієї роботи, професору Jens Sören Lange та Katharina Dort з Гессенського університету, які відповідали на мої численні запитання, давали поради щодо виконання роботи, та підтримували мене упродовж всього періоду нашої співпраці. Дякую!

Величезна подяка всьому викладацькому складу фізичного факультету, а особливо, кафедри ядерної фізики. Дякую за натхнення і мотивацію упродовж усіх років мого навчання в університеті. Без вашого величезного внеску я б не став тим, ким я є зараз. Дякую, що навчили мене бути вченим.

Окрема подяка Бондаренко Тетяні Іванівні, що підтримувала мене як під час, так і до навчання на фізичному факультеті. Дякую за поради та допомогу.