

Інститут ядерних досліджень НАН України
Національної академії наук України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЧЕРНИШЕНКО СЕРГІЙ БОРИСОВИЧ

УДК 539.171+539.172, 539.1.08

ДИСЕРТАЦІЯ
**КОНЦЕПЦІЯ ФІКСОВАНОЇ МЕТАЛЕВОЇ МІКРОМІШЕНІ
ТА СПОСІБ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ В ЕКСПЕРИМЕНТІ ЛНСЬ (ЦЕРН)**

Спеціальність 104 – фізика та астрономія

Галузь знань 10 – природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії у галузі природничих наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ С.Б. Чернишенко

Науковий керівник:

Пугач Валерій Михайлович

Член-кореспондент НАН України, доктор

фізико-математичних наук, професор

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Чернишенко С.Б. КОНЦЕПЦІЯ ФІКСОВАНОЇ МЕТАЛЕВОЇ МІКРОМІШЕНІ ТА СПОСІБ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ В ЕКСПЕРИМЕНТІ ЛНСЬ (ЦЕРН). – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі природничих наук за спеціальністю 104 – фізика та астрономія. – Інститут ядерних досліджень НАН України. Київ, 2024.

Фізичні цілі експерименту ЛНСь (ЦЕРН) триваючих та наступних серій вимірів стосуються властивостей еволюції матерія-антиматерія, закономірностей універсальності лептонних ароматів та рідкісних мод розпаду важких ароматів, тощо. Для досягнення статистичної точності даних, достатньої для спостереження можливих сигналів Нової фізики (за межами Стандартної Моделі), передбачається суттєве підвищення миттєвій світності. Експеримент був модернізований UPGRADE I (2019 – 2021 р.р.) з метою проведення подальших досліджень фізики важких ароматів на Великому Адронному Колайдері (БАК) при енергії до 14 TeV ($p - p$ с.ц.м.) та миттєвої світності до $2 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Після завершення третьої та четвертої серії фізичних вимірів (RUN 3: 2022 – 2026 р.р., RUN 4: 2029 – 2033 р.р.) буде здійснено наступну модернізацію (UPGRADE II) для забезпечення функціонування вимірювальних систем експерименту в епоху високої світності БАК (HL-LHC) в п'ятій та шостій серії фізичних вимірів (RUN 5: 2036 – 2040, RUN 6: 2043 – 2047 р.р.) з миттєвою світністю до $1.2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Програма цієї модернізації включає також можливу реалізацію режиму фіксованої металевої мікромішені.

Дисертаційна робота присвячена розробці концепції фіксованої металевої мікромішені та способу її реалізації в експерименті ЛНСь. В рамках підготовки наступної модернізації експерименту (UPGRADE II, 2034 – 2035 р.р.) розвинуто ідею впровадження режиму фіксованої металевої мікро-мішені на

основі технології металевих мікро-стріпових детекторів, створеної в ІЯД НАН України.

Обґрунтовано доцільність такого режиму експерименту з точки зору розширення кола фізичних цілей, які, зокрема, включають оригінальну ідею реалізації потрійних ядерних зіткнень для дослідження властивостей матерії в нових умовах фазової діаграми квантової хромодинаміки при надвисоких густинах та температурах речовини. Широкий асортимент металевих мішеней надасть можливість раніше недосяжних досліджень закономірностей еволюції матерії в залежності від індивідуальних властивостей ядер (деформація, спін та ізоспін, наявність нейтронного гало, тощо).

Наведено результати оцінки нових можливостей та переваг фізичних досліджень в такому режимі в порівнянні та на доповнення існуючої програми досліджень зіткнень релятивістських важких ядер з використанням газової мішені SMOG2, реалізованої наразі на ВАК лише в умовах експерименту ЛНСб. Зокрема, для вперше запропонованого пошуку потрійних зіткнень ядер наводиться оцінка залежності умов спостереження цього нового фізичного явища від товщини мікро-мішені в реакціях $p+C+p$ та $Pb+Pb+Pb$. Представлено дизайн конструкції мішенної системи та її очікувані функціональні характеристики, необхідні для управління мікромішенню та стабілізації частоти взаємодії її ядер із прискореними ядрами пучка ВАК. Такий режим забезпечить прецизійну локалізацією області зіткнень ядер мішені із пучком ВАК.

Представлено різні прототипи мішенної системи, функціонуючої в гало пучка ВАК в умовах ультрависокого вакууму із субмікронною точністю позиціонування. Розроблено конструкцію першого мішенного пристрою на основі п'єзоелектричних мікроелектромеханічних (MEMS) пристроїв для дослідження їх функціональних характеристик на тестових пучках в ЦЕРН.

Управління мікромішенним комплексом буде здійснено функціонуючою системою моніторингу умов та безпеки експерименту RMS-R3. Функціональні

характеристики системи RMS-R3 орієнтовані на забезпечення ефективних фізичних вимірів у третій серії накопичення даних (RUN3, 2022-2026 р.р.). Флуктуації вихідної частоти детекторних модулів не перевищують 5 Гц при частоті їх відгуку 100 кГц при номінальній світності експерименту в $p - p$ зіткненнях $2.0 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Нижня межа чутливості RMS-R3 становить величину $\sim 10^{26} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Система має лінійну реакцію на миттєву світність в діапазоні від 10 Гц до 1.2 МГц. Її дані дозволяють відстежувати еволюцію світності, також область її локалізації та їх відновлюваність. Радіаційна толерантність системи RMS-R3 забезпечена її виготовленням за оригінальною технологією радіаційно стійких металевих фольгових детекторів ІЯД НАН України.

Оригінальним розширенням функціональних можливостей RMS-R3, здійсненим в дисертаційній роботі, є розробка та застосування методу асиметрій відгуку сенсорів RMS-R3 для моніторингу стабільності локалізації області світності експерименту та створення програмного забезпечення у середовищах WinCC та MONET у для відображення даних системи у режимі реального часу.

У **першому розділі** представлено детальний опис експерименту LHCb на Великому Адронному Колайдері і його модернізації для третьої серії вимірів. Головними цілями LHCb є фізика ароматів та пошук нової фізики поза Стандартною Моделлю через високоточні виміри процесів з важкими адронами. Описано ключові компоненти модернізованого детектора LHCb: вершинний трекер VELO, треки UT і SciFi, системи RICH, калориметри, мюонний детектор, а також онлайн-системи зчитування, тригерів, керування та моніторингу, контролю світності. Представлено основні оновлення всіх підсистем LHCb. Описано введення нової внутрішньої газової мішені SMOG2 для режиму фіксованої мішені.

Представлено теоретичні основи явища вторинної електронної емісії (ВЕЕ) та його застосування в металевих-фольгових детекторах (МФД). Описано

процес ВЕЕ, коефіцієнт вторинної емісії та його залежність від різних факторів. Наведено залежності коефіцієнта ВЕЕ для міді, золота та алюмінію, що мають практичне значення для конструювання МФД.

У **другому розділі** розглянута можливість реалізації режиму фіксованої металеві мікромішені на Великому Адронному Колайдері (ВАК) в експерименті LHCb. Концепція фіксованої металеві надтонкої мішені дозволяє проводити пошуки нової фізики в експериментах з надвисокими енергіями і світностями. Розвинуто ідею впровадження режиму фіксованої металеві мікромішені на основі технології металевих мікροстріпових детекторів, створеної в ІЯД НАН України. Обґрунтовано доцільність такого режиму експерименту з точки зору розширення кола фізичних цілей, які, зокрема, включають оригінальну ідею реалізації потрійних ядерних зіткнень для дослідження властивостей матерії в нових умовах фазової діаграми квантової хромодинаміки при надвисоких густинах речовини. Розглянуто можливість раніше недосяжних досліджень закономірностей еволюції матерії в залежності від індивідуальних властивостей ядер (деформація, спіні та ізоспіні, наявність нейтронного гало, тощо).

У **третьому розділі** описано конструкцію прототипу мішенного комплексу, включаючи систему позиціонування мішеней та моніторингу пучка. Проведені розрахунки та Монте-Карло симуляції для визначення оптимальних розмірів та положення мішеней для можливої реалізації потрійних ядерних зіткнень. Розглянуто різні дизайни та системи управління положенням мішеней з високою точністю з використанням MEMS технологій та крокових двигунів для точного позиціонування мікромішеней в гало пучка ВАК.

У **четвертому розділі** розглянуто управління мікромішенним комплексом системою RMS-R4, що основана на функціонуючій системі моніторингу умов та безпеки експерименту RMS-R3. Функціональні характеристики системи RMS-R3 орієнтовані на забезпечення ефективних фізичних вимірів у третій

серії накопичення даних (RUN3, 2022-2026 р.р.). Розглянуто принципи моніторингу безпеки, ефективності та якості функціонування детекторних підсистем експерименту LHCb. Описано використання систем WinCC та "Monet" для моніторингу потоку даних та забезпечення якості даних. Наголошено на важливості відстеження положення області взаємодії як для колайдерного так і для режиму фіксованої мішені. Висвітлено питання контролю світності за допомогою різних підсистем LHCb та LHC, а також необхідність вирівнювання світності для оптимальної роботи колайдера. Зазначено важливість чутливості та точності систем, що відстежують світність.

Описано здійснене автором дисертації розширення функціональних можливостей RMS-R3 розробкою та застосуванням методу асиметрій відгуку сенсорів RMS-R3 для моніторингу стабільності локалізації області світності експерименту. Наведено опис створеного програмного забезпечення у середовищах WinCC та MONET для відображення даних системи в режимі реального часу.

Описано розроблену систему зчитування даних з високочутливих зарядових інтеграторів 32-бітними лічильниками та платою VLDB. Описано інтеграцію даних RMS-R3 в структуру експерименту та відображення їх у середовищах WinCC та MONET. Виконаний автором аналіз даних демонструє унікальну стабільність та чутливість системи RMS-R3 у вимірюванні асиметрій відгуків сенсорів під час експерименту LHCb у 2022-2024 роках. Доведено, що метод асиметрій дозволяє спостерігати локалізацію області світності та розрізняти різні умови експерименту. Показано, що це стало можливим завдяки високій стабільності траєкторій пучків ВАК, високій чутливості та стабільності відгуку RMS-R3.

У п'ятому розділі представлено дизайн різних прототипів мішенної системи, функціонуючої в гало пучка ВАК в умовах ультрависокого вакууму із субмікронною точністю позиціонування. Описано конструкцію першого

мішенного пристрою на основі п'єзоелектричних мікроелектромеханічних пристроїв (MEMS) для дослідження їх функціональних характеристик на тестових пучках SPS та PS в ЦЕРН.

Ключові слова: експеримент LHCb, моніторинг світності та фону, в епоху HL-LHC, режим фіксованої мішені, металеві-фольгові детектори, металеві мікροстріпові сенсори, метод асиметрій, моніторинг області світності, потрібні ядерні зіткнення.

ABSTRACT

Chernyshenko S.B. The concept of a fixed metal microtarget and its implementation in the LHCb experiment (CERN). – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in field of Natural Sciences, specialty 104 - Physics and Astronomy. - Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv, 2024.

The physical goals of the ongoing and upcoming measurement series of the LHCb experiment (CERN) concern the properties of matter-antimatter evolution, patterns of lepton flavour universality, and rare decay modes of heavy flavours, among others. To achieve statistical data precision sufficient for observing possible New Physics signals (beyond the Standard Model), a significant increase in instantaneous luminosity is anticipated. The experiment underwent an UPGRADE I (2019-2021) to enable further studies of heavy flavour physics at the Large Hadron Collider (LHC) at energies up to 14 TeV (p-p centre of mass) and instantaneous luminosity up to $2 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. After the completion of the third and fourth series of physical measurements (RUN 3 2022-2026, RUN 4 2029-2033), a subsequent upgrade (UPGRADE II) will be implemented to ensure the functioning of the experiment's measurement systems in the era of high-luminosity LHC (HL-LHC) during the fifth and sixth series of physical measurements (RUN 5, 6) 2036-2040, 2043-2047) with instantaneous luminosity up to $1.2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The program for this upgrade also includes the possible implementation of a fixed metal microtarget mode.

The dissertation is devoted to developing the concept of a fixed metal microtarget and a method for its implementation in the LHCb experiment. As part of the preparation for the next experiment upgrade (UPGRADE II, 2034-2035), the idea of introducing a fixed metal microtarget mode based on the technology of metal micro-strip detectors, developed at the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, has been advanced.

The feasibility of such an experimental mode is justified in terms of expanding the range of physical goals, which include an original idea of implementing triple nuclear collisions to study matter properties under new conditions of the quantum chromodynamics phase diagram at ultra-high densities and temperatures. A wide assortment of metal targets will provide opportunities for previously unattainable studies of matter evolution patterns depending on individual nuclear properties (deformation, spin and isospin, presence of neutron halo, etc.).

Results of evaluating new possibilities and advantages of physical research in this mode are presented, in comparison and as a complement to the existing program of relativistic heavy nuclei collision studies using the SMOG2 gas target, currently implemented at the LHC only in the LHCb experiment. In particular, for the first-ever proposed search for triple nuclear collisions, an assessment of the dependence of observation conditions for this new physical phenomenon on microtarget thickness in p+C+p and Pb+Pb+Pb reactions is provided. The design of the target system and its expected functional characteristics necessary for microtarget control and stabilization of the interaction frequency between its nuclei and the accelerated LHC beam nuclei are presented. This mode will ensure precise localization of the collision area between target nuclei and the LHC beam.

Various prototypes of the target system functioning in the LHC beam halo under ultra-high vacuum conditions with submicron positioning accuracy are presented. The design of the first target device based on piezoelectric microelectromechanical (MEMS) devices has been developed to study their functional characteristics on test beams at CERN.

The micro-target complex will be managed by the functioning RMS-R3 experimental conditions and safety monitoring system. The functional characteristics of the RMS-R3 system are oriented towards ensuring effective physical measurements in the third data collection series (RUN3, 2022-2026). Fluctuations in the output frequency of detector modules do not exceed 5 Hz at their

response frequency of 100 kHz at the nominal luminosity of the experiment in p-p collisions of $2.0 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The lower sensitivity limit of RMS-R3 is approximately $10^{26} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The system has a linear response to instantaneous luminosity in the range from 10 to 1.2 MHz. Its data allows tracking the evolution of luminosity, as well as its localization area and their reproducibility. The radiation tolerance of the RMS-R3 system is ensured by its manufacture using the original technology of radiation-resistant metal foil detectors developed at the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine.

An original expansion of the RMS-R3 functional capabilities, implemented in the dissertation, is the development and application of the RMS-R3 sensor response asymmetry method for monitoring the stability of the experiment's luminosity area localization and the creation of software in WinCC and MONET environments for real-time display of system data.

In the **first chapter**, a detailed description of the LHCb experiment at the Large Hadron Collider and its upgrade for the third series of measurements is presented. The main goals of LHCb are flavour physics and the search for new physics beyond the Standard Model through high-precision measurements with heavy hadrons. Key components of the upgraded LHCb detector are described: the VELO vertex tracker, UT and SciFi trackers, RICH systems, calorimeters, muon detector, as well as online readout systems, triggers, control and monitoring, and luminosity control. The main updates of all LHCb subsystems are presented. The introduction of the new internal gas target SMOG2 for the fixed target mode is described.

The theoretical foundations of the secondary electron emission (SEE) phenomenon and its application in metal-foil detectors (MFD) are presented. The SEE process, secondary emission coefficient, and its dependence on various factors are described. The dependencies of the SEE coefficient for copper, gold, and aluminium, which have practical significance for MFD design, are given.

The **second chapter** considers the possibility of implementing a fixed metal microtarget mode at the Large Hadron Collider (LHC) in the LHCb experiment. The concept of a fixed metal ultrathin target allows for searches of new physics in experiments with ultra-high energies and luminosity. The idea of introducing a fixed metal microtarget mode based on the technology of metal micro-strip detectors, created at the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, is developed. The feasibility of such an experimental mode is justified in terms of expanding the range of physical goals, which include an original idea of implementing triple nuclear collisions to study matter properties under new conditions of the quantum chromodynamics phase diagram at ultra-high matter densities. The possibility of previously unattainable studies of matter evolution patterns depending on individual nuclear properties (deformation, spin and isospin, presence of neutron halo, etc.) is considered.

The **third chapter** describes the design of the target complex prototype, including the target positioning system and beam monitoring. Calculations and Monte Carlo simulations were carried out to determine the optimal size and position of targets for the possible implementation of triple nuclear collisions. Various designs and control systems for high-precision target positioning using MEMS technologies and stepper motors for precise positioning of microtargets in the LHC beam halo are considered.

The **fourth chapter** discusses the management of the micro-target complex by the RMS-R4 system, which is based on the functioning RMS-R3 experimental conditions and safety monitoring system. The functional characteristics of the RMS-R3 system are oriented towards ensuring effective physical measurements in the third data collection series (RUN3, 2022-2026). The principles of monitoring safety, efficiency, and quality of functioning of LHCb detector subsystems are considered. The use of WinCC and "Monet" systems for monitoring data flow and ensuring data quality is described. The importance of tracking the interaction region position for both collider and fixed target modes is emphasized. Issues of luminosity control

using various LHCb and LHC subsystems are highlighted, as well as the need for luminosity leveling for optimal collider operation. The importance of sensitivity and accuracy of luminosity tracking systems is noted.

The author's expansion of RMS-R3 functional capabilities through the development and application of the RMS-R3 sensor response asymmetry method for monitoring the stability of the experiment's luminosity area localization is described. A description of the created software in WinCC and MONET environments for real-time display of system data is provided.

The developed data readout system with highly sensitive charge integrators, 32-bit counters, and VLDB board is described. The integration of RMS-R3 data into the experiment structure and its display in WinCC and MONET environments is explained. The author's data analysis demonstrates the unique stability and sensitivity of the RMS-R3 system in measuring sensor response asymmetry during the LHCb experiment in 2022-2024. It is proved that the asymmetry method allows observing the localization of the luminosity area and distinguishing different experimental conditions. This became possible due to the high stability of LHC beam trajectories, high sensitivity, and stability of RMS-R3 response.

The **fifth chapter** presents the design of various prototypes of the target system functioning in the LHC beam halo under ultra-high vacuum conditions with submicron positioning accuracy. The design of the first target device based on piezoelectric micro-electro-mechanical devices (MEMS) for studying their functional characteristics on SPS and PS test beams at CERN is described.

Keywords: LHCb experiment, luminosity, beam and background monitoring, HL-LHC, fixed target mode, metal-foil detectors, metal micro-strip sensors, asymmetry method, luminosity region monitoring, triple nuclear collisions

Список публікацій здобувача

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. S.B. Chernyshenko et al. RMS-R3 – the system for monitoring region of luminosity and background at the LHCb experiment (CERN). Nuclear Physics and Atomic Energy, 24(2) (2023) 154-161

(Q4, <https://doi.org/10.15407/jnpae2023.02.0148>, фахове видання України, SCOPUS.

Внесок здобувача: відповідальний автор, проаналізовані та інтерпретовані дані, що отримані методом асиметрій для відгуків сенсорів RMS-R3, виміряна залежність відгуку системі від середньої кількості видимих pp взаємодій на один банч пучка).

2. Oleksandr V. Vitiuk, ..., Sergiy B. Chernyshenko et al. Colliding and Fixed Target Mode in a Single Experiment—A Novel Approach to Study the Matter under New Extreme Conditions, Particles 5 (2022) 245–264

(Q3, <https://doi.org/10.3390/particles5030022>, SCOPUS.

Внесок здобувача: зроблені розрахунки товщини мішеней для $p+C+p$ та $Pb+Pb+Pb$. Дана оцінка кількості подій для зіткнення 2х пучків на мішенях. Розглянуто використання та концепція різних типів мішеней).

3. С. Чернишенко, В. Добішук, В. Пугач. Функціональні характеристики системи RMS-R3 в третій серії фізичних вимірів в експерименті LHCb. Nuclear Physics and Atomic Energy, 25(2) (2024) 188–193

(Q4, <https://doi.org/10.15407/jnpae2024.02.188>, фахове видання України.

Внесок здобувача: відповідальний автор, пророблений аналіз даних методом асиметрій для зіткнень пучків та пучка з фіксованою мішенню).

4. С.Б. Чернишенко, В.М. Добішук, В.М. Пугач. Концепція надтонкої твердотільної фіксованої мікромішені для експеримента LHCb (CERN). Наука і техніка сьогодні, №6(34) (2024) 1116-1128

(Q4, фахове видання України, [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6\(34\)-1116-1128](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6(34)-1116-1128).

Внесок здобувача: відповідальний автор, розроблена концепція фіксованої твердотільної мікροстріпової мікромішені, концепція мішенного комплексу, Монте-Карло симуляції, постановка експерименту з мікромішенню на SPS та PS у ЦЕРН).

5. R. Aaji, ..., S. Chernyshenko et al. The LHCb upgrade I. Journal of Instrumentation, 19(05):P05065 (2024) 1-211

(Q1, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/05/P05065>).

Внесок здобувача: опис призначення та роботи RMS-R3 у експерименті LHCb).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

1. С.Б. Чернишенко, В. М. Пугач, О. Ю. Охріменко. Розробка надтонкої мікροстріпової мішені для експерименту LHCb (CERN). XXVI Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: постерна доповідь (Київ, 8 - 12 квітня 2019 року). – Київ, Інститут ядерних досліджень НАН України, 2019. – 203 с. – с. 74. URL: <http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/>. eprint: http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/Book_of_Abstracts_2019.pdf

2. Пугач В. М., Чернишенко С. Б., Охріменко О. Ю., Добішук В. М., Кива В. О., Сторожик Д. І., Міліція В. М., Кшиванський О.О. Оновлення Системи Радіаційного Моніторингу для експерименту LHCb CERN до Run 3. XXVII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 21 - 25 вересня 2020 року (відеоконференція)). – Київ, Інститут ядерних досліджень НАН України, 2020. – 335 с. – с. 105. URL: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2020/abstracts.html. eprint: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2020/pdf/book%20of%20abstracts_2020.pdf

3. В. М. Пугач, С. Б. Чернишенко, В. М. Добішук. Надтонка фіксована мікромішень з використанням MEMS у RUN4 в експерименті LHCb. XXVIII

Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей ((Київ, 27 вересня - 1 жовтня 2021 року (відеоконференція)). – Київ, Інститут ядерних досліджень НАН України, 2021. – 245 с. – с. 89. URL: http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2021/2021/Book_of_Abstracts_2021.pdf eprint: http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2021/Book_of_Abstracts_2021.pdf

4. Chernyshenko S., Pugatch V., Dobishuk V. The superthin fixed target for the LHCb experiment in Run4. Offshell-2021 The virtual HEP conference on Run4@LHC – 2021. – №. Poster-2021-1050. URL: <https://cds.cern.ch/record/2775325>

5. В. Пугач, С. Чернишенко, В. Добішук, О. Ковальчук, В. Аушев, О. Кшиванський, О. Скоренок. Розробка надтонкої фіксованої твердотільної мішені в експерименті LHCb (CERN). XIX конференція з фізики високих енергій і ядерної фізики: тези доповідей (Харків, 23-26 березня 2021 р.). — Харків: ІФВЕЯФ ННЦ ХФТІ, 2021. — 107 с. – с. 35. URL: <https://www.kipt.kharkov.ua/conferences/ihepnp/2021/> eprint: <https://www.kipt.kharkov.ua/conferences/ihepnp/2021/tezis.pdf>

6. С. Б. Чернишенко, В. М. Добішук, В. О. Кива, О. Ю. Охріменко, В. М. Пугач, Ф. Алессіо, Г. Корті, Х. Шіндлер. RMS-R3 – система контролю області світимості та фону у експерименті LHCb (CERN). XXIX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 26–30 вересня 2022 року (відеоконференція)). — Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2022. — 239 с. — с. 91. URL: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2022/abstracts.html. eprint: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2022/pdf/book_of_abstracts_2022.pdf.

7. В. Добішук, В. Пугач, С. Чернишенко, К. Гаспар, П. Роуб, Л. Гранато Кардоса, Н. Нойфельд. Використання системи контролю області взаємодії і фону RMS-R3 для відображення двовимірних асиметрій на пульті управління

експерименту LHCb. XXX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 25–29 вересня 2023 року (відеоконференція)). — Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2023. — 248 с. — с. 52. URL: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2023/index.html. Eprint: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2023/book%20of%20abstracts_2023.pdf

8. С. Чернишенко, В. Добішук, В. Пугач, В. Кива, О. Охріменко. моніторингова система RMS-R3 у експерименті LHCb для колайдерного режиму та режиму фіксованої мішені. XXXI Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 27–31 травня 2024 року (відеоконференція)). Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2024. URL: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2024a/index.html

9. С.Б. Чернишенко, В.М. Добішук, В.О. Кива, О.Ю. Охріменко, В.М. Пугач. RMS-R3 - система контролю світності та фону експерименту LHCb (CERN). Міжнародна конференція "Ядерна фізика на Закарпатті" (до 55-річчя відділу фотоядерних процесів ІЕФ НАН України): тези доповідей (Ужгород, 21–23 травня 2024 року (змішана конференція)). Ужгород: Інститут електронної фізики НАН України. URL: <http://www.iep.org.ua/content/conferenc/55nuklear/index.html> Eprint: http://www.iep.org.ua/content/conferenc/55nuklear/files/Book_of_abstracts_nuklear-2024.pdf

10. Vasyl Dobishuk, Federico Alessio, Serhii Chernyshenko, Oleksandr Okhrimenko and Valery Pugatch. LHCb RMS-R3, new radiation hard system for on-line monitoring of beam and background conditions in Run 3 2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2374 012005

(Q4, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2374/1/012005>, SCOPUS. Внесок здобувача: опис системи, виконання калібровки системи, представлення графіків).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. V. Dobishuk, S. Chernyshenko, O. Okhrimenko and V. Pugatch. Installation of the Radiation Monitoring System RMS-R3. Tech. report. CERN 2021. Report № EDMS-2430186. URL: <https://edms.cern.ch/document/2430186/2> (restricted access).

Зміст

АНОТАЦІЯ	1
ABSTRACT	8
Список публікацій здобувача	13
Перелік умовних скорочень.....	20
Вступ	23
Розділ 1. Експеримент LHCb:.....	32
§1. Розбудова та головні цілі LHCb.....	32
1.1 Задачі експерименту.....	32
1.2 Детекторна установка LHCb	34
§2 Концепція МФД, ВЕЕ.....	68
Висновки до розділу 1	76
Розділ 2. Основні ідеї розробки фіксованої металевої мікромішені. Фізична мотивація.....	77
§1 Режим фіксованої мікροстріпової мішені на LHC	77
§2. Оцінки частот потрійних ядерних зіткнень	90
Висновки до розділу 2	96
Розділ 3. Монте-Карло симуляції для встановлення мішенного комплексу.....	97
§1 Прототип мішенного вузла.....	97
§2 Монте-Карло симуляції та розрахунки температури для мішені в гало пучка LHC	102
§3 Монте-Карло симуляції порівнянь зіткнень протонних пучків з зіткненнями протонного пучка з фіксованою мішенню в експерименті LHCb.....	116
Висновки до розділу 3	120
Розділ 4 Системні характеристика RMS-R3 як основа для системи управління мішенним комплексом RMS-R4. Метод асиметрій	121
§1 Моделювання функціональних характеристик RMS-R3	121
§2 Дизайн конструкцій RMS-R3	124
2.1 Зарядові інтегратори та лічильники	126
2.2 Монтаж RMS-R3 у експерименті LHCb.....	131
§3 Метод асиметрій. Відокремлення пучка від фону	135
§4 Результати використання методу асиметрій в експерименті LHCb.....	139
§5 Зчитувальна система RMS-R3. Програмне забезпечення	150
Висновки до розділу 4	157
Розділ 5 Фіксована мікροстріпова мікромішень. Система управління експериментом.....	158
§1 Концептуальне бачення різних видів фіксованих металічних мікромішеней для LHC.....	158
§2 Система управління експериментом в режимі надтонкої фіксованої металевої мішені. Постановка майбутнього експерименту	162
Висновки до розділу 5	167
Висновки	169

Література	174
ДОДАТОК 1	193
ДОДАТОК 2	203
ДОДАТОК 3	210
ДОДАТОК 4	221
ДОДАТОК 5	227

Перелік умовних скорочень

ALICE - A Large Ion Collider Experiment LHC

ASIC - application-specific integrated circuit (інтегральна схема для специфічного застосування)

BCM – Beam condition monitor (Монітор стану пучка)

CP – charge purity symmetry (симетрія заряду та парності)

DAQ – data acquisition system (система збору даних)

DIM – Distributed Information Management System (розподілена система управління інформацією)

ECAL – electromagnetic calorimeter (електромагнітний калориметер)

ECS – Experiment control system (система контролю експерименту)

FE – frontend (фроненд)

GBT - GigaBit Transceiver project

HCAL – hadron calorimeter (адронний калориметер)

HERA-B - Hadron–Electron Ring Accelerator beauty

HL-LHC – High luminosity Large Hadron Collider

HLT – high level trigger (тригер вищого рівня)

HPD – hybrid photon detectors (гібридні детектори фотонів)

IT – inner tracker (внутрішній трекер)

JCOP – Java Card OpenPlatform

LHCb – Large Hadron Collider beauty

MaPMT – multi-anode photomultiplier tubes (багатоанодні фотоелектронні помножувачі)

MEMS – microelectromechanical system (мікроелектромеханічні системи)

MWPC - Multi wire proportional chamber (багатопроволочка пропорційна камера)

nSBS – нова система сервісних плат

PLUME – Probe for luminosity measurements

PS – proton synchrotron (протонний синхротрон)

PV – primary vertex (первинна вершина)

RICH – LHCb Ring Imaging Cherenkov (детектор черенковських кілець LHCb)

RMS-R3 – Radiation monitoring system for Run3 (система радіаційного моніторингу для Run3)

RMS-R4 – Radiation monitoring system for Run4 (система радіаційного моніторингу для Run4)

RUN – серія набору даних

SciFi – Scintillator fibers (сцинтиляційний волоконний трекер)

SFT – solid fixed target (твердотільна фіксована мішень)

SiPM – silicon photomultiplier (кремнієві ФЕП)

SMOG – System for Measuring Overlap With Gas

SOFIT – solid fixed target node (вузол фіксованої твердої мішені)

SPS – super proton synchrotron (суперпротонний синхротрон)

STM - STMicroelectronics

UT – Upstream tracker

VELO – Vertex Locator (вершинний детектор)

VLDB - The Versatile Link Demo Board

АЦП – аналогово цифровий перетворювач

ВАК (LHC) – Великий адронний колайдер (Large Hadron Collider)

ВЕЕ – вторинна електронна емісія

ЕК – елементарна комірка

ЗІ – зарядовий інтегратор

ККМ – матриця Кабібо-Кабаяші Масакава

КХД – квантова хромодинаміка

МК – Монте-Карло

ММД – Металеві мікстріпові детектори

НАН – Національна академія наук

ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій

ПЛІС (FPGA) – Програмована логічна інтегральна схема (field-programmable gate array)

ПЯЗ (TNC) – потрійні ядерні зіткнення (triple nuclear collisions)

СМ (SM) – Стандартна модель (Standard Model)

СЦМ – система центру мас

УВВ – ультрависокий вакуум

ФЕП – фотоелектронний помножувач

ЦЕРН (CERN) – Європейська організація з ядерних досліджень (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)

Вступ

Актуальність роботи.

Одним з найважливіших досягнень колаборації LHCb протягом останніх десяти років стало створення на найвищому світовому рівні детекторного комплексу [1], який придатний не лише для запланованих досліджень закономірностей збудження, розпаду та осциляцій В-мезонів та інших рідкісних процесів в протон-протонних зіткненнях, а й для експериментів із важкими іонами [2]. Використовуючи режим фіксованої (газової) мішені одночасно з колайдерним режимом колаборація LHCb продемонструвала унікальну можливість накопичення фізичних даних. Після завершення тривалої зупинки Великого Адронного Колайдера (ВАК) для його модернізації та встановлених на ньому експериментальних методик протягом 2019-2022 рр. (Long Shutdown 2) оновлена (Upgrade I) техніка експерименту LHCb забезпечує проведення досліджень ядро-ядерних зіткнень в широкому діапазоні енергій [3] від $\sim 0,1$ TeV в режимі фіксованої газової мішені (SMOG2, з підвищеною на два порядки частотою ядерних зіткнень) до 13.6 TeV у колайдерному режимі (при п'ятикратно збільшеній миттєвій світності $2 \times 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$). Огляд основних результатів Колаборації LHCb представлено в роботі [4].

Головні цілі експерименту LHCb у третій і четвертій серіях набору даних – фізика ароматів, фізика за межами сектору ароматів в межах Стандартної моделі та пошук нової фізики поза межами Стандартної Моделі [5]. Наприкінці цього десятиліття планується підвищення світності для великого адронного колайдера (ВАК), відоме як HL-LHC [6], окрім того планується друга модернізація експерименту LHCb, відома як Upgrade II [7, 8]. Робоча група в ЦЕРН “Фізика поза колайдерами” (Physics beyond colliders) вивчає проведення запропонованих експериментів з фіксованою мішенню на ВАК останні 10 років. Зокрема, ініціатива Fixed Target Panel (FitPAN) розглядає та систематизує різні види фіксованих мішеней.

В дисертації розглянута та обґрунтована концептуальна ідея впровадження режиму фіксованої металевої мікромішені на основі технології металевих мікростріпових детекторів, створеної в ІЯД НАН України. Розглянуті способи управління такого комплексу та способи введення фіксованих мікростріпових мішеней до гало пучка. Розглянуті варіанти мішеней дадуть можливість спостерігати нову фізику і підтверджувати або спростовувати Стандартну Модель. Одним із варіантів є пошук кварк-глюонної плазми при потрійних ядерних зіткненнях. Наведено результати оцінки нових можливостей та переваг фізичних досліджень в такому режимі в порівнянні та на доповнення існуючої програми досліджень зіткнень релятивістських важких ядер з використанням газової мішені SMOG2, реалізованої наразі на ВАК лише в умовах експерименту LHCb. Зокрема, для вперше запропонованого пошуку потрійних зіткнень ядер наводиться оцінка залежності умов спостереження цього нового фізичного явища від товщини мікромішені в реакціях $p+C+p$ та $Pb+Pb+Pb$. Представлено дизайн конструкції мішенної системи та її очікувані функціональні характеристики, необхідні для управління мікромішенню та стабілізації частоти взаємодії її ядер із прискореними ядрами пучка ВАК.

Управління мікромішенним комплексом буде здійснено функціонуючою системою моніторингу умов та безпеки експерименту RMS-R4, що базується на поточній системі RMS-R3, яка функціонує в експерименті LHCb з 2021 року як система протікання умов та безпеки експерименту [9]. Функціональні характеристики системи RMS-R3 орієнтовані на забезпечення ефективних фізичних вимірів у третій серії накопичення даних (RUN3, 2022-2026 р.р.). Оригінальним розширенням функціональних можливостей RMS-R3, здійсненим в дисертаційній роботі, є розробка та застосування методу асиметрій відгуку сенсорів RMS-R3 для моніторингу стабільності локалізації області світності експерименту та створення програмного забезпечення у

середовищах WinCC та MONET у для відображення даних системи режимі реального часу.

Мета і задачі дослідження.

Метою дослідження є

1. Розробка концепції мікροстріпових надтонкої фіксованої мішені. Планування тестувань та експерименту з мікροстріповою надтонкою фіксованою мішенню.
2. Розробка дизайну прототипу мішенного вузла із декількома незалежними мікромішенями з використанням крокових двигунів та MEMS технологій.
3. Розробка концепції RMS-R4, по-перше, як покращеної версії RMS-R3 для експерименту LHCb з піднятою на порядок світністю, по-друге, як системи для управління мікροстріповою надтонкої фіксованої мішені.
4. Розробка та застосування методу асиметрій відгуку сенсорів RMS-R3 для спостереження локалізації області ядерних взаємодій в експерименті. Створення програмного забезпечення у середовищах WinCC та MONET для відображення даних RMS-R3.

Досягнення поставленої мети потребує виконання наступних завдань:

- створення концепцій фіксованих мікροстріпових надтонких мішеней, створення концепції системи управління такими мішенями;
- проведення Монте-Карло симуляцій для режиму фіксованої металевої мікромішені із застосуванням надтонких металевих мікροстріпових детекторів;
- розроблений дизайн прототипу лінійної моделі мікромішені, керованої за допомогою п'єзокристалічного MEMS та крокового двигуна;

- оцінка залежності спостережених характеристик цього нового фізичного явища від товщини мікромішені в реакціях $p+C+p$ та $Pb+Pb+Pb$. Оцінка часу життя мікροстріпової мішені в гало пучка;
- розробка та застосування методу асиметрій відгуку сенсорів RMS-R3;
- проведення Монте-Карло симуляції для введення фіксованих мікροстріпових надтонких мішеней до гало пучка та до пучка LHC.

Об'єкт дослідження – фіксована мікροстріпова надтонка мішень, концепція RMS-R4, контроль області взаємодій методом асиметрій відгуків сенсорів RMS-R3.

Предмет дослідження – використання даних отриманих методом асиметрій для відслідковування умов протікання експерименту LHCb, концепції фіксованих мікροстріпових надтонких мішеней і методів їх вводу до пучка, результати Монте-Карло симуляцій взаємодії фіксованих мікροстріпових надтонких мішеней з пучком, концепції RMS-R4.

Методи дослідження – Autodesk Autocad для створення деяких креслень прототипів RMS-R4 і креслень мікροстріпових мішеней та систем їх керування, джерела іонізуючого випромінювання для тестування прототипів RMS-R4. Використання оригінальних програм CERN та LHCb: Gauss, Boole, Brunel, Moore, ROOT, DaVinci. Використання глід Ganga. Використання методу асиметрій для ля відслідковування умов протікання експерименту LHCb. Використання WinCC та веб-додатку Monet на основі python для виводу даних RMS-R3.

Наукова новизна отриманих результатів.

- вперше на експериментах LHC застосовано метод асиметрій, який дозволяє моніторувати умови протікання експерименту та відновлення цих умов, надає інформацію про зміну положення області взаємодій;

- зроблені оцінки залежності кількості подій від товщини мішеней при потрібних ядерних зіткненнях $p+C+p$ та $Pb+Pb+Pb$ для номінальних умов експерименту LHCb;
- розроблений концепт мікροстріпової металеві надтонкої мішені з використанням MEMS систем та крокових двигунів;
- розроблений концепт RMS-R4 для керування мішенним комплексом;
- розроблено програмне забезпечення для візуалізації даних RMS-R3 на пульті управління експериментом LHCb.

Практичне значення одержаних результатів.

Система RMS-R3 є оригінальною розробкою ІЯД НАН України, що встановлена в експерименті LHCb. Для неї написано програмне забезпечення для відображення даних у режимі онлайн у CERN для гарантування безпечного функціонування і проведення експерименту.

Концепція фіксованої металеві надтонкої мішені дозволяє проводити пошуки нової фізики в експериментах з надвисокими енергіями і світностями. Пропонується застосування потрібних ядерних зіткнень для пошуків кварк-глюонної плазми та нової фізики поза Стандартною Моделлю.

Концепції RMS-R4 та схожих систем на основі RMS-R3 розглядаються для використання в інших експериментах, наприклад у CBM, FAIR.

Особистий внесок здобувача.

Автор брав участь у всіх етапах наукового дослідження: у постановці мети та завдань досліджень, аналізі літературних джерел, виконанні всього спектру робіт, інтерпретації та узагальненні основних положень дослідження, підготовці статей та тез доповідей до публікації.

Автором був запроваджено, удосконалено та розвинуто використання методу асиметрій в експерименті LHCb на основі отриманих відгуків сенсорів модулів RMS-R3. Автором використано метод асиметрій для відслідковування умов проведення експерименту, умов відновлення експерименту,

відслідковування зміни положення області взаємодій. Автором інтерпретовано результати використання методу асиметрій для відслідковування умов проведення експерименту наступним чином: можливість відслідковування середньої кількості видимих протон-протонних зіткнень на один банч пучка, інжектування фіксованої газової мішені різних газів, відстеження стану вершинного детектора (розведений, зведений), відстеження зіткнень у колайдерному режимі або режимі фіксованої мішені.

Автором розроблено віртуальний монітор контролю асиметрій для пульта управління експериментом LHCb, що дозволяє черговим операторам стежити за умовами протікання експерименту, а також автором започаткований віртуальний монітор відстеження асиметрій та відгуку сенсорів RMS-R3 у он-лайн середовищі Monet.

Автором розроблена концепція фіксованої твердотільної мікροстріпової мікромішені, аргументовано використання мікροп'єзоелектромеханічних систем (MEMS) та крокових електродвигунів для управління мішенями. Автором розглянуті різні варіанти реалізації фіксованих мікροстріпових мікромішеней, в тому числі використання нерухомих, що обертаються, струменевих мікροпорошкових та кільцевих мікромішеней. Автором виконано оцінки можливих умов спостереження явища потрійних ядерних зіткнень для енергій ВАК з використанням фіксованих твердотільних мікροстріпових мікромішеней в реакціях $p+C+p$ та $Pb+Pb+Pb$. Автором проведені Монте-Карло симуляції для стріпових мішеней, які знаходяться на відстані 250 мкм від осі пучка та безпосередньо в центрі пучка, пророблені розрахунки на час життя мішену, що знаходиться у центрі пучка. Автором підготовлену схему виконання експерименту з фіксованою мікροстріповою мікромішенню на лініях тестового пучка у SPS ті PS (ЦЕРН). Для дослідження техніки точного позиціонування та моніторингу потоку зарядів від мішені автором розроблена концепція RMS-R4 – покращеної версії RMS-R3, що спрямована на роботу з

мішенями та мішенними комплексами. Автором створено тестове програмне забезпечення для управління кроковими мікродвигунами.

Результати ефективної роботи системи RMS-R3 в експерименті LHCb Run 3 були представлені автором на робочих і наукових засіданнях у ЦЕРНі, ІЯД НАНУ, а також на міжнародних та українських конференціях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота була виконана в рамках держбюджетних тем, грантових угод та робіт за міжнародними угодами. Дослідження, що висвітлені у даній дисертаційній роботі, виконані в межах таких науково-дослідних тем, в яких безпосередньо приймав участь автор:

1. Дослідження в експерименті LHCb генерації важких адронів в ядроядерних зіткненнях. / Цільова програма наукових досліджень НАН України “Фундаментальні дослідження з фізики високих енергій та ядерної фізики (міжнародна співпраця)” на 2018 – 2020 рр.
2. Властивості взаємодії при високих температурах та густинах ядерної матерії. Етапи 2-5. / Тематичний план науково-дослідних робіт ІЯД НАН України у 2017 – 2021 рр. за відомчою тематикою НАН України КПКВК 6541030, фундаментальні дослідження
3. Фізико-технічні основи дослідження властивостей дивних адронів в експерименті CBM (FAIR/GSI). Етап 1-3. Тематичний план науково-дослідних робіт ІЯД НАН України у 2021 – 2023 рр. за відомчою тематикою НАН України КПКВК 6541030, фундаментальні дослідження
4. Режим фіксованої твердотільної мішені в експерименті LHCb (CERN) і пошук екстремальних станів матерії в зіткненнях важких ядер на Великому Адронному Колайдері. Грант НФДУ для реалізації проекту

2020.02/0257 із виконання наукових досліджень і розробок у 2020 -2021 рр.

5. Адронізація кваркових станів в ядро-ядерних зіткненнях на Великому Адронному Колайдері при енергіях до 14 ТеВ. Етап 1-2. Тематичний план науково-дослідних робіт ІЯД НАН України у 2022 – 2026 рр. за відомчою тематикою НАН України КПКВК 6541030, фундаментальні дослідження

Апробації результатів дисертації

Результати дисертаційної роботи були представлені на наступних конференціях: XXVI Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 2019), XXVII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 2020), XXVIII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 2021), XXIX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 2022), XXX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 2023), XXXI Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 2024), Offshell-2021 The virtual NEP conference on Run4@LHC (CERN, Geneva, 2021), XIX конференція з фізики високих енергій і ядерної фізики (Харків, 2021), Міжнародна конференція "Ядерна фізика на Закарпатті" (до 55-річчя відділу фотоядерних процесів ІЕФ НАН України) (Ужгород, 2024). Матеріали дослідження були представлені здобувачем на регулярних наукових семінарах відділу фізики високих енергій ІЯД НАН України, на засіданнях робочих груп в межах експерименту LHCb, таких як IFT WG (LHCb Ion Physics and Fixed Target WG): <https://indico.cern.ch/category/8659/>, Luminosity WG: <https://indico.cern.ch/category/13026/>, , а також на численних нарадах із оперативного контролю та планування роботи експерименту LHCb (LHCb Run meeting): <https://indico.cern.ch/category/669/>.

Публікації.

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових праць, з них 2 статті у реферованих наукових виданнях України, проіндексованих в наукометричній базі даних Scopus (Q4), 1 стаття у фахових періодичних виданнях України, 1 стаття як робота конференції у реферованому науковому виданні, проіндексованому в наукометричній базі даних Scopus (Q4), 2 статті у реферованому науковому виданні, проіндексованому в наукометричній базі даних Scopus (Q1-Q3), 7 тез/презентації доповідей на наукових конференціях в Україні, 2 тези/презентації доповідей на міжнародних конференціях, 1 технічно-інженерний звіт LHCb (CERN). Дисертант є співавтором 14 національних звітів про виконання НДДКР.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, - основна частина, списку використаних джерел, подяк, п'яти додатків; викладена на 235 сторінці комп'ютерного тексту (основна частина – 149 сторінок), містить 87 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел складається з 172 найменування вітчизняних та зарубіжних авторів (19 сторінок).

Розділ 1. Експеримент LHCb

§1. Розбудова та головні цілі LHCb.

1.1 Задачі експерименту

Основною метою експерименту LHCb є пошук нової фізики шляхом високоточного сканування важкого сектору Стандартної моделі. Очікується, що жорсткі умови тесту будуть забезпечені комбінацією точних вимірювань порушення CP у B-системах. Унітарність матриці ККМ передбачає зв'язки між елементами матриці, які можна графічно представити у вигляді так званих трикутників унітарності (Рис. 1.1) [10].

Великий вибух створив рівну кількість матерії та антиматерії, проте сьогоdnішній Всесвіт майже повністю складається з матерії, а антиматерії не спостерігається. Слабка сила Стандартної моделі фізики елементарних частинок спричиняє відмінності в поведінці матерії та антиматерії - порушення CP-симетрії - при розпаді частинок, що містять кварки. Але ці відмінності, або асиметрії, важко виміряти і їх недостатньо для пояснення дисбалансу матерії та антиматерії в сучасному Всесвіті, що спонукає фізиків як точно вимірювати відомі відмінності, так і шукати нові.

Експеримент має широку фізичну програму, що охоплює багато важливих аспектів важкого аромату (як краси, так і чарівності), електрослабкої та квантової хромодинаміки (КХД) фізики. Було визначено шість ключових вимірювань за участю B-мезонів. Вони описані в документі "Дорожня карта" [10], який сформував основну фізичну програму для першого набору даних ВАК. Вони включають:

- вимірювання коефіцієнта розгалуження рідкісного розпаду $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$;
- вимірювання прямої та зворотної асиметрії пари мюонів у нейтральному струмі зі зміною смаку $B_d \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ розпаду. Такий нейтральний струм зі зміною смаку не може виникнути на рівні дерева в стандартній моделі фізики елементарних частинок, а

відбувається лише в коробкових і петльових діаграмах Фейнмана; властивості розпаду можуть бути сильно модифіковані за допомогою нової фізики;

- вимірювання CP порушує фазу в розпаді $B_s \rightarrow J/\psi \phi$, спричинену інтерференцією між розпадами з осциляціями B_s і без них. Ця фаза є однією зі спостережуваних фаз КП з найменшою теоретичною невизначеністю в Стандартній моделі, і може бути суттєво модифікована за допомогою нової фізики;
- вимірювання властивостей випромінювальних В-розпадів, тобто розпадів В-мезона з фотонами в кінцевих станах. Зокрема, це знову ж таки розпади з нейтральним струмом, що змінюють смак;
- деревоподібне визначення кута трикутника унітарності γ ;
- безчастинні заряджені двочастинні В-розпади;
- еволюції матерія-антиматерія. Пошуки порушень CP симетрії.

Новим викликом для експерименту LHCb стали пошуки нової фізики, зокрема пошук темної матерії, нової фізики бозонів Хіггса та фізики за межами Стандартної моделі.

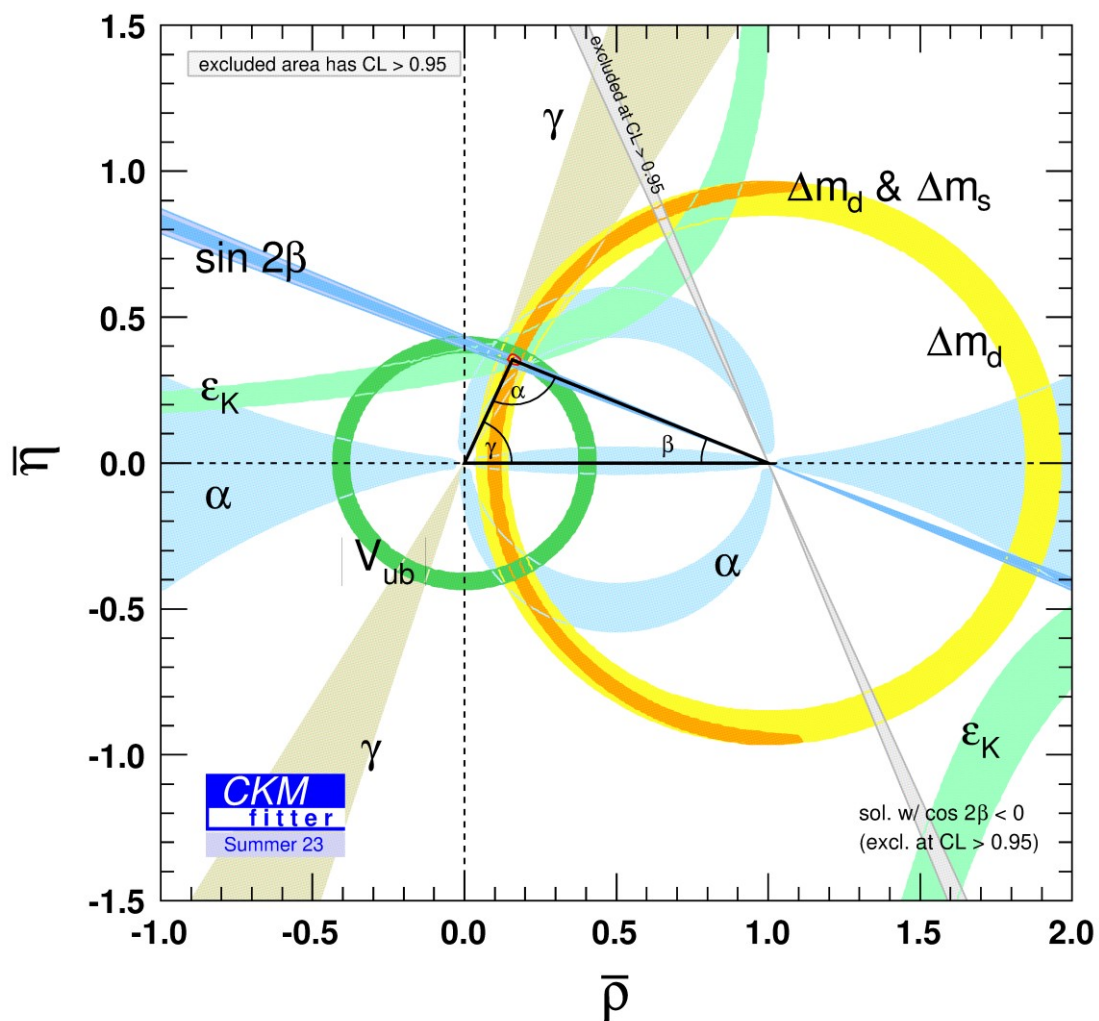


Рис. 1.1 Трикутник унітарності. На цьому рисунку, створеного CKMFitter [11], експериментальні вимірювання та їх невизначеності представлені у вигляді смуг на комплексній площині, в якій накреслено трикутник унітарності. Якщо експериментальні вимірювання узгоджуються, то один вибір вершини трикутника буде відповідати всім обмеженням - графічно кажучи, всі кольорові смуги будуть перетинатися в одній точці. Рисунок взято з [11].

1.2 Детекторна установка LHCb

LHCb - це форвардний спектрометр (рис. 1.2), що охоплює діапазон псевдорапідиті $2 < \eta < 5$, розташований у точці взаємодії номер 8 (IP8) на кільці

великого адронного колайдера (БАК) [12]. На рисунку 1.2 показано компонування модернізованого детектора [13]. Система координат має початок у номінальній точці взаємодії pp , вісь Z вздовж пучка спрямована в бік мюонної системи, вісь Y спрямована вертикально вгору, а вісь X визначає праву систему координат. Більшість елементів субдетектора (за винятком вершинного детектора і черенковських детекторів) розділені на дві механічно незалежні половини (сторона доступу або сторона А при $x > 0$ і криогенна сторона або сторона С при $x < 0$), які можуть відкриватися для обслуговування і забезпечення доступу до пучкової труби. Загальний схематичний вигляд всього експерименту LHCb показано на рисунку 1.3.

Система стеження за частинками складається з масиву кремнієвих піксельних детекторів – вершинний трекер (VELO), що оточує область взаємодії – об'єм, в якому відбуваються зіткнення пучків або пучка з фіксованою мішенню, кремнієвої смуги перед дипольним магнітом з великою апертурою (UT) і трьох сцинтиляційних волоконних трекерів (SciFi Tracker), розташованих за магнітом. Всі три підсистеми були розроблені з урахуванням архітектури зчитування даних на частоті 40 МГц і для вирішення проблем, пов'язаних з підвищеною світністю. Ідентифікація частинок (PID) забезпечується двома кільцевими черенковськими детекторами (RICH1 і RICH2), що використовують гази C_4F_{10} і CF_4 як випромінювачі, електромагнітним калориметром (ECAL) пашликової форми, адронним калориметром (HCAL) із залізним сцинтилятором і чотирма станціями мюонних камер (M2-5), що чергуються із залізним екраном.

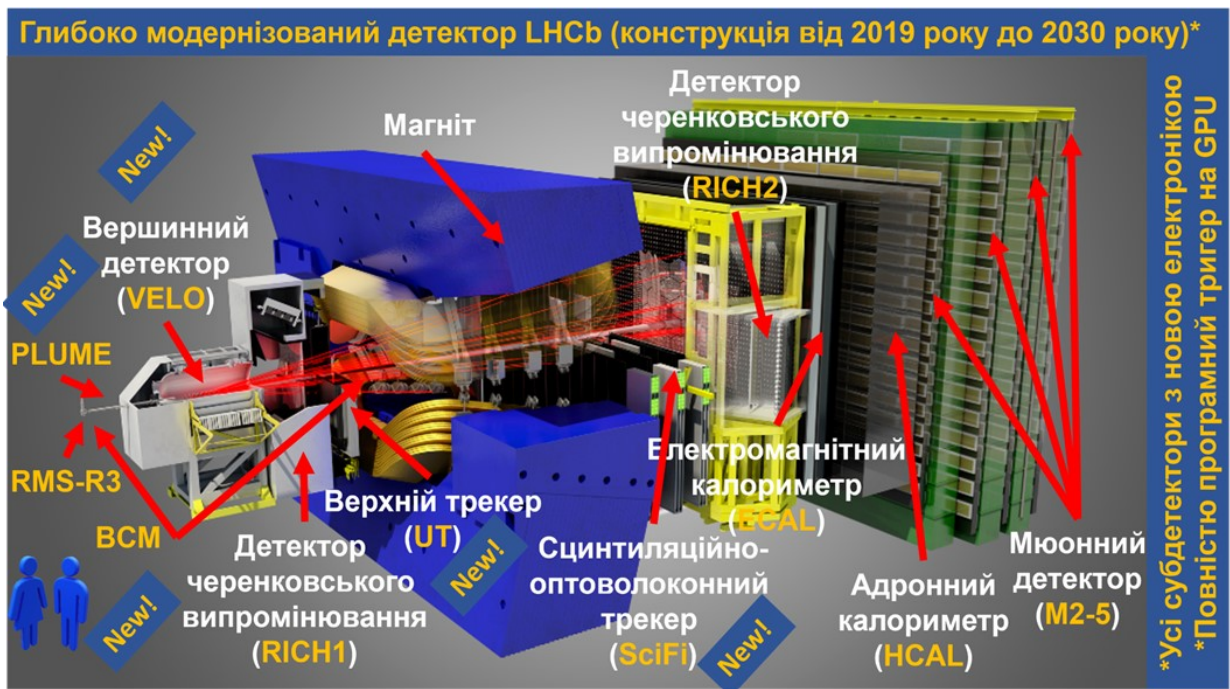


Рис. 1.2 Схематичне зображення детектора LHCb з усіма піддетекторними системами. Системи контролю світності на безпеки експерименту встановлено у задній напівсфері (на малюнку зліва): RMS-R3, PLUME, BCM. Область зіткнення пучків знаходиться у вершинному детекторі (VELO).

Вакуумний іонопровід і його опорна конструкція були оптимізовані для зменшення фонового навантаження на розташовані поблизу детектори [14, 15]. Конічна форма іонопроводу в LHCb призводить до виникнення незбалансованих сил в осьовому напрямі через атмосферний тиск, які мають бути врівноважені механічними обмежувачами. В апертурі дипольного магніту була встановлена опорна система, яка спочатку складалася з восьми дротів і стрижнів з нержавіючої сталі, що забезпечувало достатню жорсткість у всіх поперечних напрямках. Дві дротяні системи були прикріплені до алюмінієвих хомутів, з'єднаних з трубою пучка за допомогою армованих графітом пластикових кілець на основі полііміду.

Під час першого запуску ця опорна система була визначена як значне джерело розсіяння в експерименті і була перероблена в рамках програми

модернізації вакуумної системи ВАК LHCb. Вдосконалену систему опор було встановлено у 2014 році під час тривалої зупинки ВАК 1 (LS1).

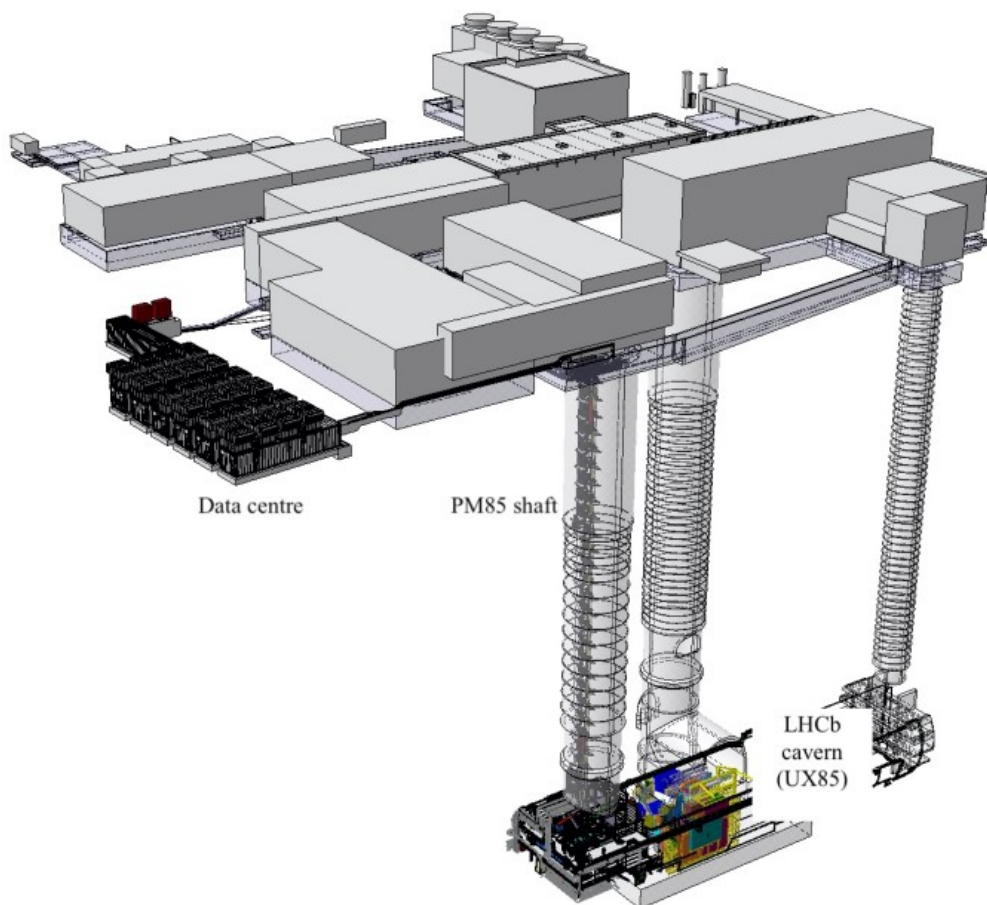


Рис. 1.3 Схематичне зображення каверну модернізованого детектора LHCb та комплексу експерименту над детектором. Система зчитування, розташована в модульному центрі обробки даних, і фронтенд електроніка в підземному каверні з'єднані між собою за допомогою оптичних волокон, встановлених у шахті PM85, довжина котрої більша за 100 метрів. Рисунок взято з [13].

У новій опорній системі зменшено об'єм манжет і для всіх компонентів обрано матеріали з більшою довжиною пробігу випромінювання. Пластикові трубки, армовані вуглецевим волокном, і синтетичні троси замінили стрижні та кабелі з нержавіючої сталі. Це призвело до значного збільшення прозорості матеріалу цих компонентів більш ніж на 90% при збереженні достатньої жорсткості. Алюмінієві комірці були перероблені і виготовлені з

використанням берилію, що призвело до покращення прозорості матеріалу більш ніж на 85% [16]. Було обрано низку інноваційних матеріалів: арамід для канатів, термореактивні вуглецеві високомодульні волокна для трубок і полібензімідазол для інтерфейсних кілець. Вакуумна група ЦЕРН провела ретельну перевірку цих матеріалів на механічну міцність, повзучість і стійкість до радіації.

1.2.1 Вершинний трекер

Вершинний трекер (VELO) є найважливішим компонентом детектора LHCb, призначеним для виявлення треків іонізуючих частинок, що виходять з області зіткнення пучків, і таким чином визначає розташування первинних вершин взаємодій пучків, зміщених вершин розпаду і відстані між ними (рис. 1.4). Треки VELO використовуються в алгоритмі реконструкції спектрометра LHCb і надають дискримінаційну інформацію для відбору подій. VELO був перероблений [17], щоб бути сумісним зі збільшенням світності і вимогою безтригерного зчитування на 40 МГц в оновленому експерименті LHCb. Основною технологією нового VELO є піксельні гібридні кремнієві детектори, які скомпоновані в модулі і охолоджуються кремнієвим мікроканалним охолоджувачем. З механічних конструкцій від версії, що експлуатувалася до 2018 року, залишилися лише основна вакуумна камера і служби руху. Зокрема, радіочастотні бокси, корпуси, які з'єднують детектор з пучками ВАК, були повністю перероблені, що дозволило зменшити як матеріал, так і внутрішній радіус VELO вздовж лінії пучка. Крім того, безпосередньо перед детектором VELO у вакуумі пучка встановлено нову конструкцію - комірку для зберігання.

Основною технологією нового VELO є піксельні гібридні кремнієві детектори, що змонтовані в модулі і охолоджуються кремнієвим мікроканалним охолоджувачем. Конструкція VELO має на меті досягти роздільної здатності параметрів удару і ефективності пошуку треків, щонайменше, не гіршої, ніж у попередника, незважаючи на вищу миттєву світність. Основні вимоги включають зменшення матеріального бюджету,

меншу відстань до першої вимірюваної точки та покращену стійкість до випромінювання, щоб витримувати більшу частоту влучень та дози випромінювання.

VELO складається з 52 ідентичних модулів, кожен з яких має чотири кремнієві піксельні сенсорні сенсори і три ASIC VeloPix для зчитування на кожний сенсор. Модулі розташовані у двох рухомих половинах (сторона А і сторона С), по 26 модулів у кожній, перпендикулярно до пучка. Модулі встановлені на опорних конструкціях з вуглецевого волокна, з мікроканальним охолоджувачем в основі, що забезпечує двофазне охолодження CO₂. Радіочастотні бокси, тонкостінні гофровані корпуси, з'єднують половинки VELO з променями ВАК, що дозволяє зменшити внутрішній радіус до 3,5 мм від лінії пучка.

VeloPix ASIC [18], заснована на мікросхемі Timerix3 [19], забезпечує обробку аналогового сигналу, оцифрування і зчитування з придушенням нуля для кремнієвих піксельних детекторів. Кремнієві сенсори мають товщину 200 мкм, розмір пікселя 55 мкм × 55 мкм і витримують дозу опромінення у нейтронному еквіваленті до $8 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Мікроканальні охолоджувачі [20] з інтегрованими мікроканалами для двофазного потоку CO₂ є основою кожного модуля, забезпечуючи ефективне охолодження і контроль температури.

У VELO використовується передова електроніка [21], включаючи гібриди, високошвидкісні послідовні кабелі, вакуумні вводи, а також опто- і силова плата (OPB). Використовуються різні системи моніторингу температури і напруги, а також компоненти системи керування експериментом (ECS) і збору даних (DAQ).

Механічна конструкція VELO зберігає концепцію двох рухомих половин, з новими радіочастотними боксами і вакуумною системою безпеки для зменшення ризиків.

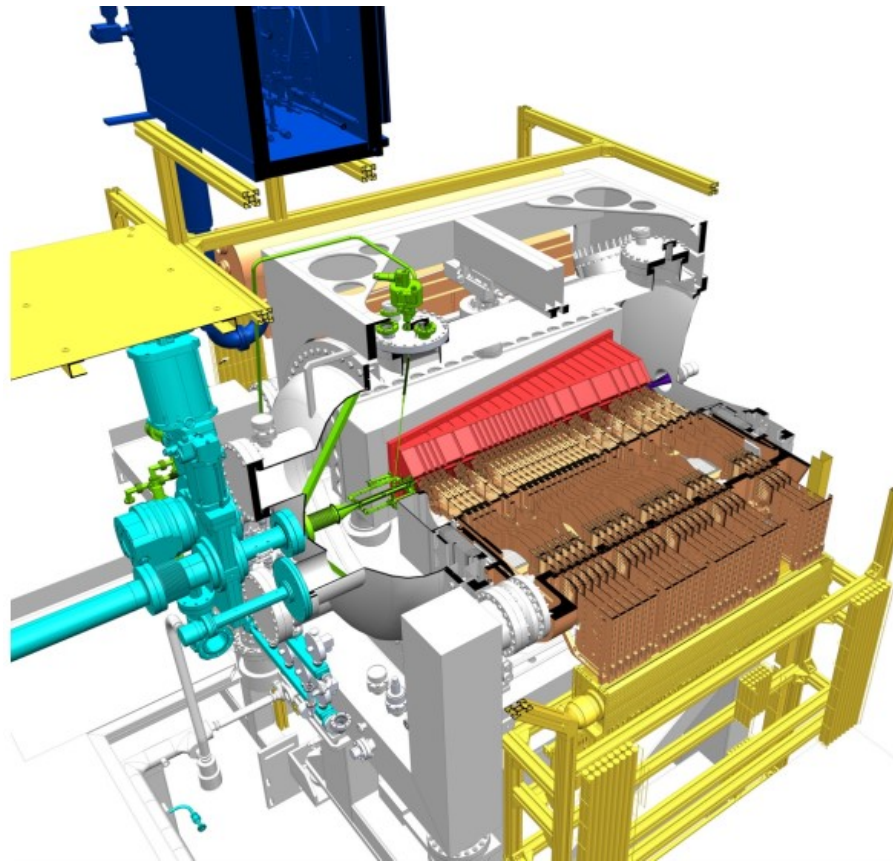


Рис. 1.4 3D-видял модернізованого VELO у розрізі. Деякі з новинок виділені, піксельні модулі Side C і електроніка зчитування (коричневий), радіочастотний блок Side A (червоний), внутрішня система газової мішені з коміркою для зберігання (зелений), передній променевий трубопровід з секторним клапаном (блакитний). Рисунок взято з [13].

Активні елементи VELO та їхні сервіси зібрані в серії ідентичних модулів, заповнених піксельними ASIC, що розташовані перпендикулярно до лінії пучка. Рішення використовувати однакові модулі значно спрощує виробничий процес і контроль якості. Розподіл модулів має покривати повну псевдорapidіті LHCb ($2 < \eta < 5$) і гарантувати, що більшість треків з області взаємодії перетинають щонайменше чотири піксельні сенсори для всіх азимутальних напрямків [22]. При вибраному розташуванні сенсорів, показаному на рис. 1.5 (ліворуч), для задоволення цих вимог необхідно 52 модулі, включно з модулями, розміщеними перед областю взаємодії, метою яких є покращення незміщених вимірювань первинних вершин. Модулі складаються з двох

рухомих половин, сторона С і сторона А. За винятком зсуву, розподіл по z (паралельно лінії променю) є ідентичним для обох сторін.

Мінімальна номінальна відстань між модулями становить 25 мм, а модулі сторони А зміщені по осі z на +12,5 мм відносно модулів сторони С, щоб забезпечити повне азимутальне перекриття обох сторін у закритому стані.

Прямокутні піксельні детектори розташовані у формі оберненої літери "L", як показано на рис. 1.5 (праворуч). Мета повороту на 45° навколо осі z полягає в тому, щоб мінімізувати будь-який ризик того, що сенсори зачіпають радіочастотну коробку під час встановлення.

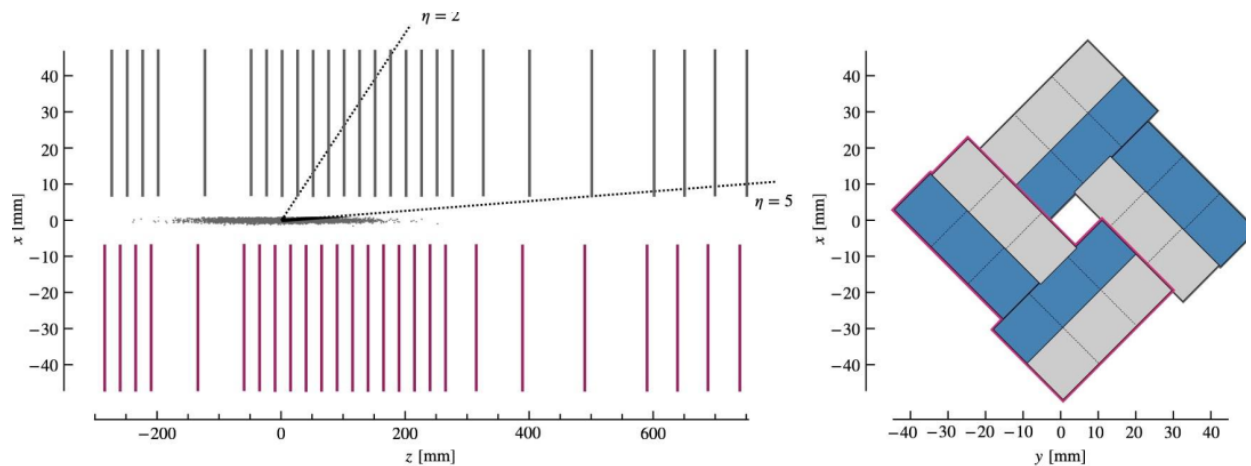


Рис. 1.5 Зліва: схематичний вид зверху на площину z - x при $y = 0$ (ліворуч) з ілюстрацією z -екстензії світної області і номінальним допуском псевдорapidіті LHCб, $2 < \eta < 5$. Праворуч: ескіз, що показує номінальне розташування ASIC навколо осі z в закритій VELO-конфігурації. [13]

1.2.2 Внутрішня газова мішень

В експерименті LHCб було вперше розташовано на LHC режим роботи фіксованої мішені під час Run 2 завдяки наявності внутрішньої газової мішені. Для впорскування легкого інертного газу у вакуумну камеру VELO використовували систему впорскування газу, яка називається SMOG (System for Measuring Overlap with Gas - система вимірювання перекриття з газом) (рис. 1.6) [23], спочатку задуману і реалізовану для точного калібрування світності

пучків, що зіштовхуються, а потім - для впорскування легкого інертного газу в вакуумну камеру VELO. Це спричинило тимчасовий локальний стрибок тиску, що досягав приблизно 10^{-7} мбар по всій довжині посудини (близько 1 м) і спадав до фонового рівня ВАК ($\sim 10^{-9}$ мбар) на 20-метрових ділянках пучкової труби LHCb по обидва боки від точки взаємодії. Результуюча взаємодія пучка з газом була використана для точної візуалізації профілів пучка [24].

Під час Run 2 SMOG використовували для інжекції легких інертних газів (He, Ne, Ar) у вакуумну камеру VELO, створюючи локалізовану газову мішень, яка уможлиблювала зіткнення пучка з ядрами фіксованої мішені з пучками ВАК на енергіях в системі центра мас до 115 GeV. Перед Run3 було запропоновано і реалізовано модернізацію SMOG (так звану SMOG2) [25]. Основна ідея модернізації SMOG полягає в тому, щоб інжектувати газ безпосередньо в так звану комірку для зберігання і отримати вигоду від збільшення площової густини при ідентичному інжектованому потоці, як це було зроблено в минулому на інших прискорювачах [26].

Модернізація SMOG запроваджує інші важливі покращення. По-перше, визначення густини мішені (і світності пучка-газу) значно точніше, оскільки мішень обмежена коміркою, провідність якої добре відома і може бути поєднана з точним вимірюванням витрати газу, що інжектуються з ГПС. По-друге, можна буде вибирати між кількома видами газу без втручання (включаючи неблагородні гази, такі як H₂, D₂, O, тощо.). Нарешті, область взаємодії пучка з газом набагато краще визначена і добре відокремлена від області зіткнення пучка з променем, що також відкриває можливість одночасного зіткнення пучка з газом і пучка з променем.

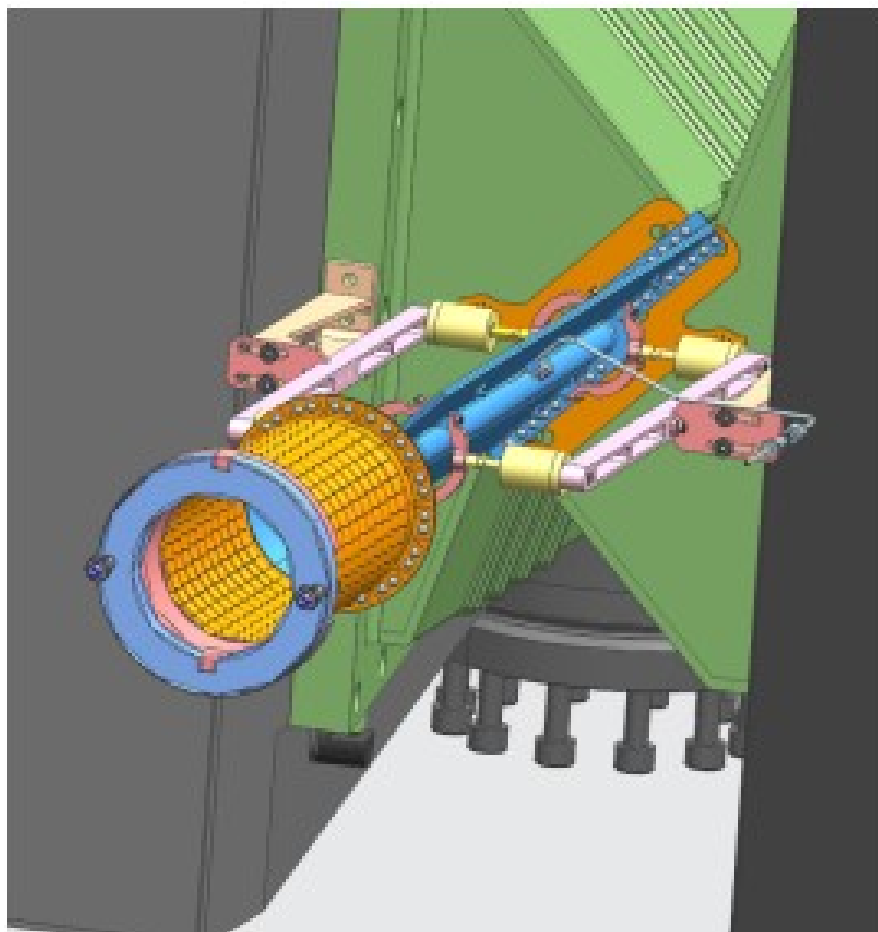


Рис. 1.6 Вигляд накопичувача (синім кольором), що підтримується фланцями радіочастотної коробки VELO (зеленим кольором) у закритому положенні VELO. Два гнучкі пригнічувачі слабого поля (помаранчеві) забезпечують електричну безперервність. Рисунок взято з [25].

Для 3-го запуску SMOG було модернізовано до SMOG2, яка впорскує газ безпосередньо в трубчасту "комірку для зберігання", а не в повний вакуумний корпус. Ця комірка складається з двох циліндричних половинок, які кріпляться до передніх кінців боксів детекторів VELO і рухаються разом з ними (рис. 1.7). У закритому стані вони утворюють відкриту трубку, коаксіальну з променем, що обмежує газову мішень.

До ключових переваг SMOG2 відносяться:

- вища ефективна щільність мішені (до 10 разів вища для He) завдяки утриманню в накопичувальній комірці;

- більш точне визначення густини мішені на основі виміряного потоку газу і геометрії комірки;
- можливість використання більш широкого спектру газів, включаючи неблагородні гази;
- чітко визначена область взаємодії пучка з газом, відокремлена від зіткнень між пучками.

Система накопичувальних комірок має конічну секцію для переходу від 56-міліметрової пучкової труби до труби діаметром 10 мм і довжиною 20 см, в яку газ вводиться через центральний капіляр. Поверхні комірок є провідними для запобігання накопиченню заряду. Температурні датчики дозволяють здійснювати моніторинг і розраховувати щільність [27].

Система подачі газу забезпечує точний контроль і моніторинг виду газу, що вводиться, і швидкості потоку за допомогою серії манометрів і клапанів. Моделювання показує, що цільова густина може бути визначена з систематичною похибкою 2-3%.

SMOG2 уможлиблює багату фізичну програму з фіксованою мішенню на LHCb під час 3-го запуску і далі, доповнюючи дані колайдера. Він дозволяє досліджувати КХД, структуру нуклонів та інші теми з різноманітними ядерними мішенями від водню до важких іонів.

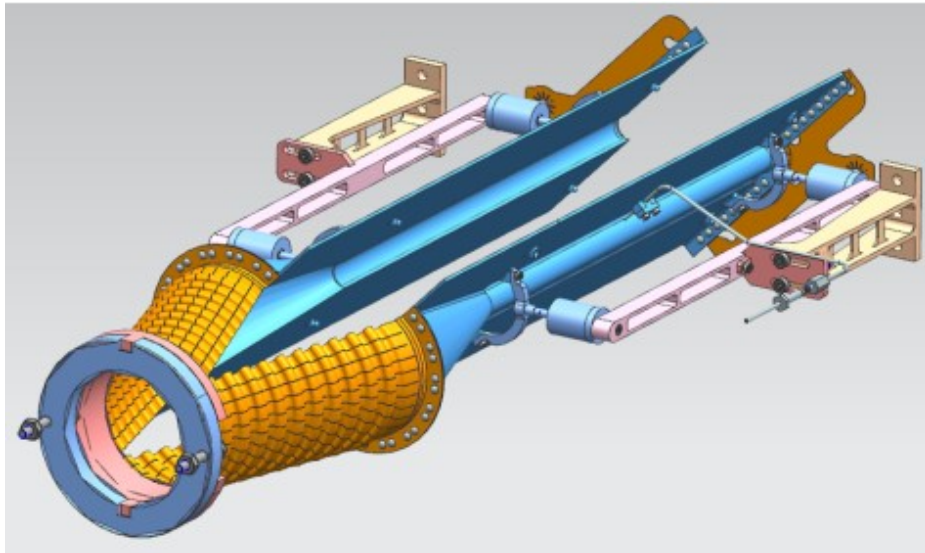


Рис. 1.7 Комірка зберігання у відкритому положенні (без відображення елементів VELO). Блідо жовтим позначена система впорскування газу у комірку. Рисунок взято з [25].

1.2.3 Магніт

Дипольний магніт спектрометра залишився незмінним порівняно з експериментом у RUN 1-2. Він забезпечує вертикальне магнітне поле з магнітною індукцією 4 Тл. Магніт складається з двох однакових сідлоподібних котушок, які симетрично встановлені всередині віконної рами. Для узгодження приймання детектора зазор між полюсами збільшується як по вертикалі, так і по горизонталі в напрямку до наступних станцій стеження. Детальний опис конструкції магніту можна знайти в роботах [28-30].

Кожна котушка виготовлена з п'яти потрійних алюмінієвих млинців і підтримується литими алюмінієвими затискачами, закріпленими на ярмі. Початкова карта магнітного поля була визначена на основі набору вимірювальних кампаній (до Запуску 1), доповнених моделюванням методом скінченних елементів. Наступні вимірювання для обмежених ділянок всередині магніту проводилися в 2011, 2014 і 2021 роках і використовувалися для внесення поправок до карти поля. Під час збору даних полярність магніту

регулярно змінювалася (кожні кілька тижнів), щоб зібрати набори даних приблизно однакового розміру з двома конфігураціями поля.

1.2.4 UT

Upstream tracker (UT) - це кремнієвий мікросмужковий детектор, розташований між детектором RICH1 і дипольним магнітом (рис. 1.8). Він відіграє вирішальну роль у тригері LHCb, надаючи швидкі оцінки імпульсу і заряду для треків заряджених частинок. Дані UT об'єднуються з інформацією від VELO, щоб на першому етапі програмного тригера можна було швидко реконструювати треки і зіставити їх зі спостереженнями в наступному SciFi Tracker [31].

Основними вимогами до детектора є

- повне покриття приймача LHCb без пропусків;
- 99% ефективність при однократному попаданні для треків, що перетинають щонайменше 3 площини;
- низька заповнюваність (<кілька %) завдяки використанню більш тонкої сегментації поблизу лінії променю;
- радіаційна стійкість до 50 fb⁻¹, витримує флюенси у нейтронному еквіваленті до 4x10¹⁴ см⁻² поблизу іонопроводу;
- <1% X0 бюджет матеріалу для мінімізації багаторазового розсіювання.

UT складається з чотирьох площин, організованих у дві станції з геометрією x-u і v-x, де u/v - стереопари під кутом +/- 5°. Кожна площина складається зі стрижнів, розташованих півколом навколо лінії іонопроводу, загалом 68 стрижнів. В них використовуються кремнієві мікросмужкові сенсори з кроком смужок 93,5-187,5 мкм, з вищою грануляцією на внутрішніх радіусах.

Основним будівельним блоком є стрижень, сендвіч-структура з вуглецевого волокна довжиною ~1,4 м, що містить титанову охолоджувальну трубку. Кремнієві сенсорні модулі встановлені з обох боків у шаховому

порядку. Існує чотири типи сенсорів (А, В, С, D) з довжиною 51-99 мм і різними конфігураціями смужок, оптимізованими для розміщення. Модулі також містять гібридну друковану плату, на якій розміщені зчитувальні мікросхеми.

Спеціальна 128-канальна мікросхема SALT ASIC [32] зчитує дані з кремнієвих стрічок. Дані сенсора SALT надходять від модулів через пасивні мідні гнучкі кабелі (dataflex) до периферійної електроніки поза приймальним пристроєм (блоки PEPI). Дані подаються в тригерну систему LHCb через оптичні волокна.

UT охолоджується випаровуванням CO₂ [33], що циркулює у вбудованих титанових трубках, для відведення ~4 кВт потужності і підтримання робочої температури датчиків на рівні -5°C, навіть після радіаційного пошкодження.

Прототипи всіх чотирьох типів сенсорів були оцінені в тестових пучках, досягнувши S/N ~12 (неопромінені) і >10 (опромінені до максимальної флюєнсності UT). Не було помічено жодних втрат ефективності в таких ділянках, як вбудований адаптер кроку або вирізи [34].

Отже, трекер LHCb Upstream Tracker - це високочерниста, радіаційно стійка кремнієва мікросмужкова система, призначена для забезпечення швидкого відстежування входу на програмний тригер протягом усього процесу приймання LHCb. Його успішна робота має вирішальне значення для забезпечення реконструкції в реальному часі, необхідної для роботи LHCb.

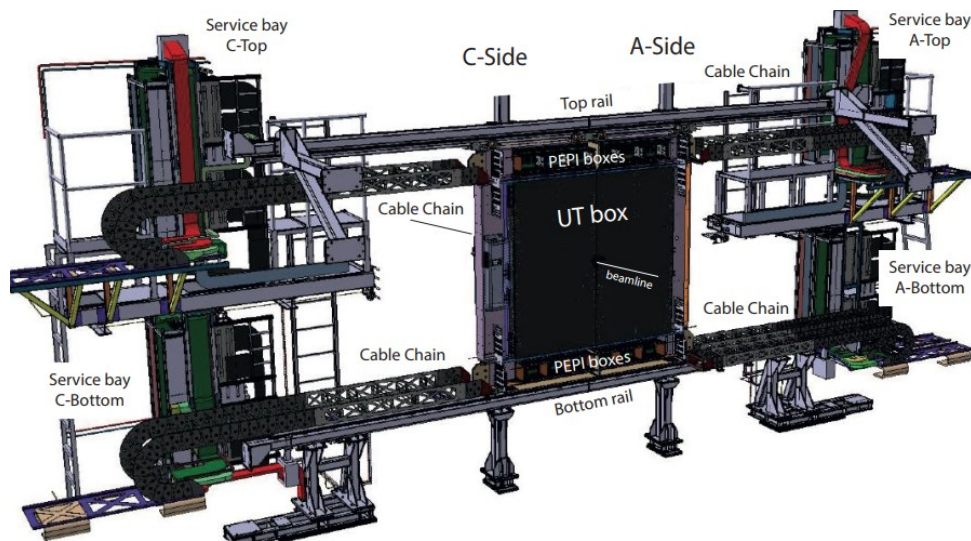


Рис. 1.8 3D-вид системи UT. Стрижні укладені в теплоізолюючий, легкий і герметичний бокс, який облягає іонопровід. Секція іонопроводу пучка UT обгорнута легким теплоізоляційним захистом. Охолоджувальний колектор розподіляє охолоджуючу рідину CO₂ до тросів. Сухий газ продувається через коробку, щоб запобігти утворенню конденсату на компонентах тросів. Рисунок взято з [13].

1.2.5 SciFi

Сцинтиляційний волоконний трекер (SciFi Tracker) - це важливий компонент модернізації детектора LHCb [31], який відповідає за відстеження заряджених частинок і вимірювання їхнього імпульсу після дипольного магніту (рис. 1.9). У цьому параграфі подано короткий огляд трекеру SciFi Tracker, включно з його конструкцією, технологією та робочими характеристиками.

Трекер SciFi Tracker розташований за дипольним магнітом LHCb і займає площу приблизно 6 м × 5 м у площині XY. Він має відповідати кільком ключовим вимогам:

- продуктивність. Забезпечити роздільну здатність визначення положення одного влучання краще ніж 100 мкм у площині згинання магніту і ефективність реконструкції одного влучання краще ніж 99%;

- жорсткість. Забезпечити механічну стабільність, при цьому положення елементів детектора має бути стабільним в межах 50 мкм (x) і 300 мкм (z), а прямолінійність по довжині - в межах 50 мкм;
- бюджет матеріалів. Кожен з 12 детекторних шарів повинен вносити не більше 1% довжини випромінювання, щоб обмежити багаторазове розсіювання і утворення вторинних частинок;
- радіаційна жорсткість. Працювати з бажаною продуктивністю протягом усього часу експерименту, з очікуваною інтегральною світністю 50 фб^{-1} ;
- гранулярність. Підтримувати низьке заповнення для збереження ефективності влучання при миттєвій світності до $2 \times 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. [35, 36]

Щоб задовольнити ці вимоги, було обрано конструкцію на основі технології сцинтиляційного волокна з кремнієвим фотопомножувачем (SiPM) для зчитування.

Зона акцептанту SciFi Tracker коливається від приблизно 20 мм від краю променевої труби до відстаней $\pm 3186 \text{ мм}$ і $\pm 2425 \text{ мм}$ у горизонтальному і вертикальному напрямках відповідно. Він складається з 12 площин виявлення, розташованих на 3 станціях (T1, T2, T3), кожна з яких має 4 шари в конфігурації X-U-V-X. X-шар має вертикально орієнтовані волокна для визначення відхилення, викликаного магнітним полем. Внутрішні два стереошари, U і V, мають волокна, повернуті на $\pm 5^\circ$ для реконструкції вертикального положення колії. Кожна станція складається з чотирьох незалежно рухомих C-образних рам, по дві з кожного боку променевої труби. C-образні рами побудовані з ідентичних модулів SciFi, шириною приблизно 52 см і охоплюють всю висоту, окрім зони біля променевої труби. Модулі детектора складаються з сендвіча з сот і вуглецевого волокна, що містить вісім SciFi матів довжиною $\sim 2,4 \text{ м}$ і шириною $\sim 13 \text{ см}$, виготовлених з шести розташованих у шаховому порядку шарів пластикових сцинтиляційних волокон діаметром 250 мкм. Тонке дзеркало приклеєне до кінця волокна, щоб відбивати додаткове світло назад на сторону зчитування [37]. Оптичні сигнали

від сцинтиляційних волокон детектуються 128-канальними масивами SiPM з кроком каналу 250 мкм. Загалом в SciFi Tracker використовується 524 288 каналів SiPM, реалізованих у вигляді 4 096 128-канальних масивів.

Фронтенд електроніка (FE) SciFi трекеру складається з трьох типів плат: PACIFIC, кластеризації та головної плати. Плата PACIFIC виконує оцифрування аналогових сигналів з SiPM, в той час як плата Clusterisation виконує придушення нуля і кластеризацію сигналів. Головна плата виконує кілька функцій, включаючи розподіл сигналів керування і тактової частоти, моніторинг, розподіл низької напруги і зсуву SiPM. Потік даних починається з того, що лавинні імпульси SiPM обробляються і оцифровуються в PACIFIC ASIC. Потім дані обробляються кластеризаційною ПЛІС, яка групує сусідні канали в кластери і обчислює положення кластера. Кластеризовані дані серіалізуються за допомогою ASIC GBTx на головній платі і передаються через оптичні волокна до системи збору даних TELL40 (DAQ). Загалом, SciFi Tracker передає приблизно 20 Тбіт/с даних на внутрішню частину (BE) через 4096 каналів передачі даних.

C-образні рами SciFi Tracker підвішені до рейок колишнього моста зовнішнього трекеру LHCb, нижче за течією від магніту. Система регулювальних гвинтів дозволяє точно позиціонувати і регулювати C-образні рами [38]. Онлайнна 3D-метрологічна система, заснована на тріангуляційних вимірюваннях 24 камер BCAM [39], постійно контролює положення однієї площини виявлення на кожній станції для вивчення геометричної еволюції і перевірки вирівнювання автономного трекінгу. SiPMs з'єднані з модулями SciFi всередині холодних боксів і охолоджуються за допомогою однофазного теплоносія, що циркулює по вакуумно-ізольованих лініях. Охолодження опромінених SiPMs до -40°C зменшує швидкість підрахунку темних ділянок у 100 разів, що є важливим для підтримання необхідної продуктивності детектора.

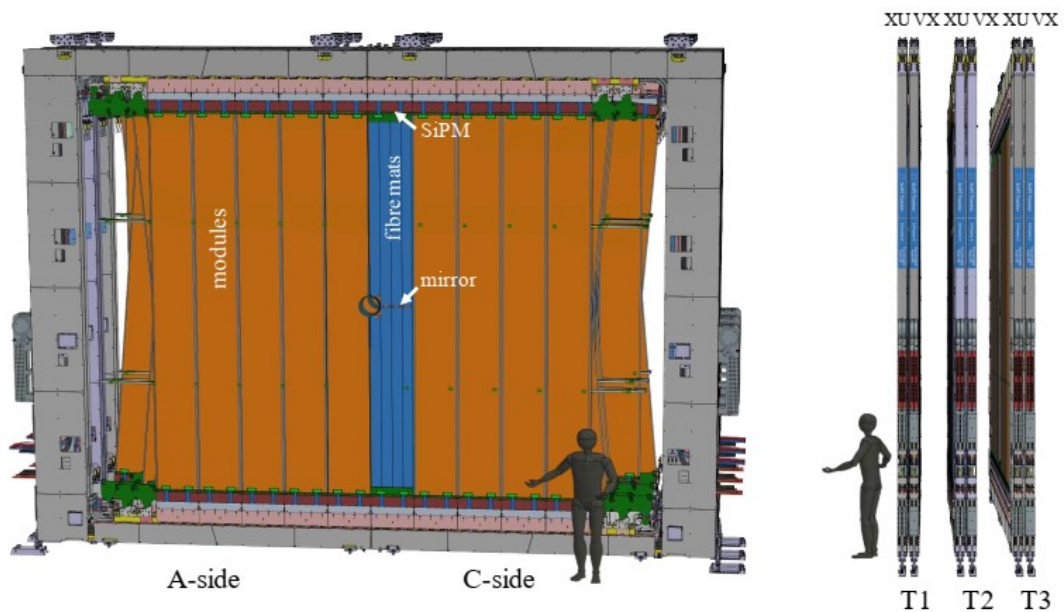


Рис. 1.9 Вигляд спереду та збоку 3D-моделі детектора SciFi Tracker. 12 площин детектора розташовані на 3 станціях (T1, T2, T3) з 4 шарами кожна в конфігурації X - U - V - X. У шарах X волокна орієнтовані вертикально і використовуються для визначення відхилення треків заряджених частинок. Внутрішні два стереошари, U і V, мають волокна, що повернуті на $\pm 5^\circ$ у площині шару для реконструкції вертикального положення треку, що потрапив у нього. Рисунок взято з [13].

Отже, SciFi Tracker - це надсучасний детектор, який відіграє вирішальну роль у модернізації LHCb, забезпечуючи точне відстеження заряджених частинок та вимірювання їхнього імпульсу. Його інноваційна конструкція, передові технології та ретельне тестування гарантують, що він відповідатиме суворим вимогам модернізованого експерименту LHCb.

1.2.6 RICH

Система LHCb Ring Imaging Cherenkov (RICH) забезпечує ідентифікацію заряджених адронів у широкому діапазоні імпульсів 2,6-100 GeV/c, що має вирішальне значення для зменшення комбінаторного фону у фізичній програмі LHCb (рис.1.10).

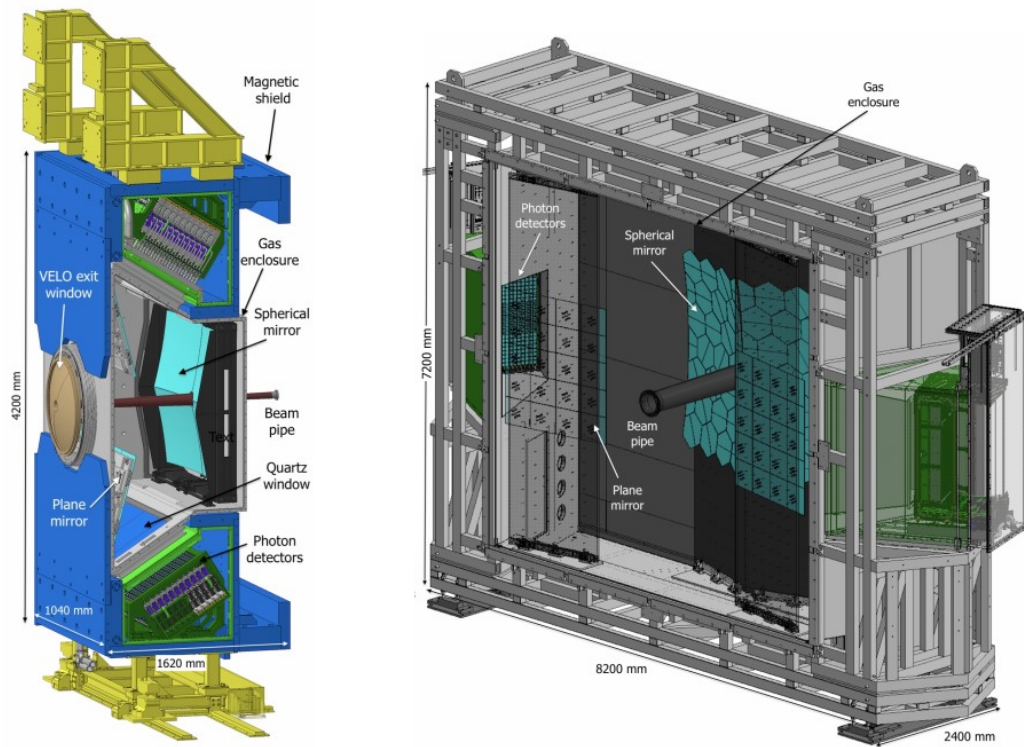


Рис. 1.10 Схематичне зображення (ліворуч) детектора RICH1 і (праворуч) RICH2. RICH1 охоплює кутову область від 25 до 300 мрад в площині вигину магніту і від 25 до 250 мрад у вертикальному напрямку. Площини фотонних детекторів розташовані вище і нижче пучкової труби, де залишкове магнітне поле мінімальне. RICH2 розташований нижче дипольного магніту, покриваючи кутову область від 15 до 120 мрад в площині вигину магніту і від 15 до 100 мрад у вертикальному напрямку. Рисунок взято з [13].

Загальна компоновка і концепція системи RICH залишилася незмінною порівняно з RUN 1-2 [40-43], але були потрібні критичні модифікації, щоб уможливити роботу при більшій світності пуску 3, зберігаючи при цьому відмінну продуктивність. Найважливіші зміни полягають у наступному:

1. Заміна повного ланцюга детектування фотонів як в RICH1, так і в RICH2.

Попередні гібридні детектори фотонів (HPD) [44] були замінені на багатоанодні фотоелектронні помножувачі (MaPMT), з'єднані зі спеціальною передньою електронікою зчитування. Матриці MaPMT мають 64 пікселі,

розташовані у вигляді масиву 8x8 з фотокатодами з високою квантовою ефективністю. Кожен піксель зчитується каналом фронтенд електроніки ASIC CLARO [45], призначеної для роботи з високою частотою влучень до 10 МГц на піксель, що очікується в RICH1.

2. Редизайн оптики RICH1 для зменшення пікових навантажень.

Завдяки збільшеній у 5 разів миттєвій світності оптичну схему RICH1 було модифіковано, щоб удвічі зменшити пікове заповнення в центральній області. Цього було досягнуто за рахунок збільшення фокусної відстані сферичних дзеркал на $\sim \sqrt{2}$, зменшення аберацій дзеркал і покращення роздільної здатності кута Черенкова. Як наслідок, нові площини фотонних детекторів довелося винести назовні від лінії пучка на ~ 270 мм.

Основні характеристики RICH1:

- оптика перероблена зі збільшеною фокусною відстанню сферичного дзеркала;
- фотонні детектори винесено назовні від пучка;
- 1888 1-дюймовий MaPMT;
- вміщено в новий газовий корпус, що містить радіаційний газ C4F10.

Основні характеристики RICH2:

- оптична система без змін;
- комбінація з 768 1-дюймових MaPMT у центральному регіоні та 384 2-дюймових MaPMT у зовнішньому регіоні;
- нові опорні конструкції для розміщення MaPMTs.

MaPMT і фронтенд електроніка розміщені в елементарних комірках (ЕК), встановлених на жорстких опорних колонах. Існує два типи ЕК - R-типу для 1-дюймових МДПТ і H-типу для 2-дюймових. ЕК підключаються до цифрових плат модулів фотонних детекторів (PDMDB), які форматують цифровий вихід і передають його по оптичних лініях зв'язку.

Опис широких досліджень для оцінки продуктивності компонентів в умовах високих рівнів радіації, які очікуються в середовищі RICH, приведені у [46, 47]. Це призвело до таких конструктивних змін, як вибірково загартовані конфігураційні регістри в ASIC CLARO [48, 49] та логіка потрібного резервування в ПЛІС PDMDB [50].

Підсумовуючи, можна сказати, що, зберігаючи концепцію детектора RICH, було проведено повну модернізацію системи виявлення фотонів, щоб уможливити її роботу при більшій світності ВАК LHCb, і водночас було вжито заходів для забезпечення стійкості до рівнів радіації. Очікується, що модернізована система забезпечить чудову ідентифікацію заряджених частинок для підтримки фізичної програми LHCb.

1.2.7 Calo

Калориметрична система LHCb складається з електромагнітного калориметра (ECAL) і адронного калориметра (HCAL). Основне призначення калориметрів - ідентифікувати і вимірювати енергію електронів, фотонів і адронів для використання в програмному тригері. Щоб впоратися з новою схемою зчитування LHCb для модернізації, передня панель (FE) і електроніка зчитування обох калориметрів були повністю перероблені і замінені [51].

Електромагнітний калориметр (ECAL) (рис. 1.11) [51, 52] розташований на відстані 12,5 м від точки взаємодії, має шашликову структуру з чергуванням шарів сцинтилятора (4 мм) і свинцю (2 мм). Має сегментовану на внутрішню, середню і зовнішню області з різними розмірами комірок для підтримки рівномірної швидкості частинок, всього 6016 комірок, розташованих проекційно відносно точки взаємодії.

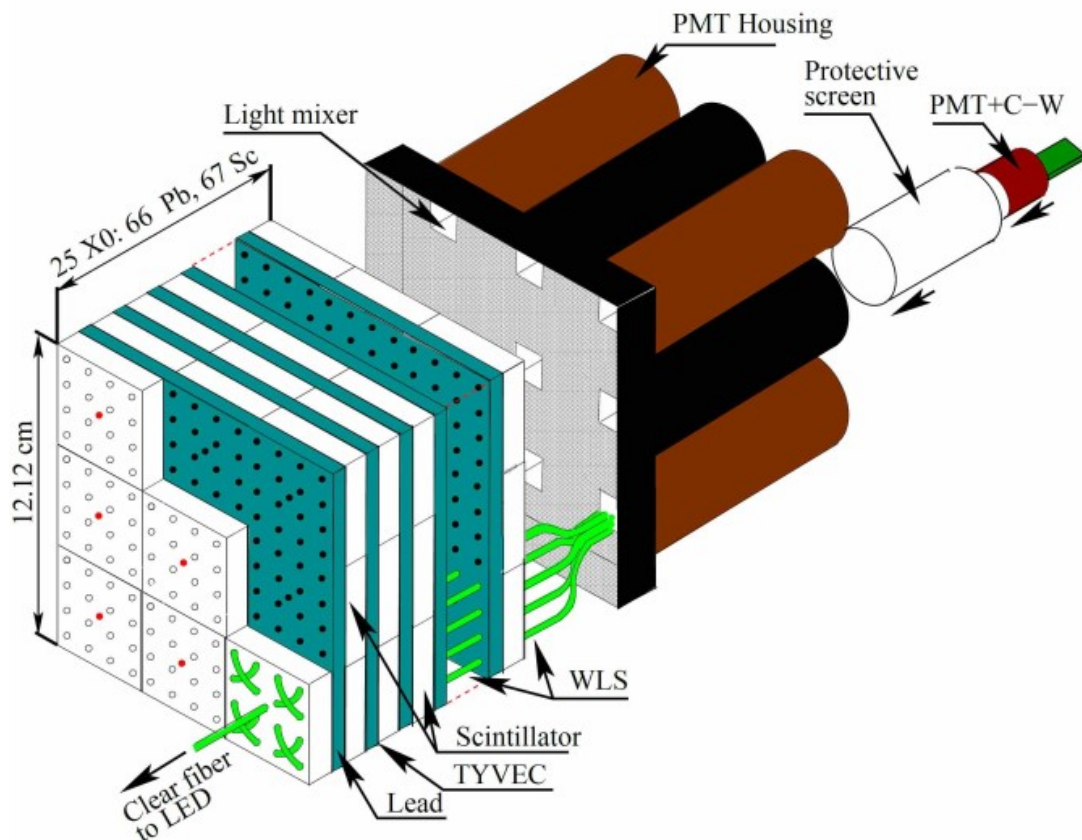


Рис. 1.11 Схема клітини ECAL. Продемонстрована шашлична структура, з чергуванням шарів сцинтилятора (4 мм) і свинцю (2 мм). Зчитування сцинтиляційного світла здійснюється за допомогою спеціальних фототрубок PMTs. Загальна кількість комірок - 6016. Рисунок взято з [13].

Адронний калориметр (HCAL) (рис. 1.12) [53, 54] розташований за ECAL, з товщиною 5,6 довжин взаємодії. Має пробовідбірник з розташованими в шаховому порядку залізними і пластиковими сцинтиляторними плитками, та сегментовану на внутрішню і зовнішню області з квадратними комітками різного розміру, всього 1488 комірок, розташованих проекційно відносно точки взаємодії.

Фронтенд плата (FEB) [55, 56] була перероблена для роботи на частоті зчитування 40 МГц. Кожна плата обробляє 32 канали від фотоелектронних помножувачів (ФЕП). Сигнали підсилюються, формуються та оцифровуються за допомогою мікросхем ICECAL ASIC та АЦП. Дані формуються та

надсилаються до внутрішньої електроніки через GBT-зв'язок. Плата виконує низькорівневу тригерну обробку (LLT), включаючи пошук кластерів і підсумовування енергії.

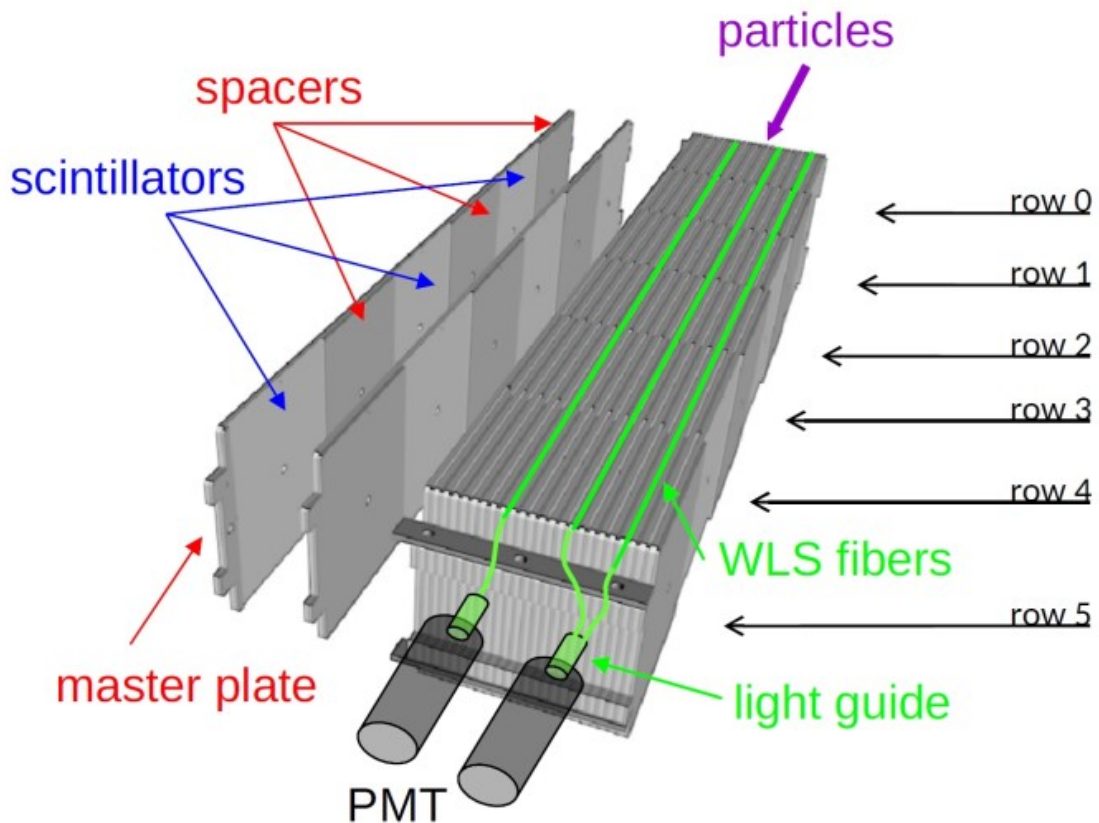


Рис. 1.12 Схема клітини HCAL. Структура зразка складається з розташованих у шаховому порядку залізних і пластикових сцинтиляційних плиток, встановлених паралельно до осі пучка для покращення збору світла. Для зчитування використовується той самий тип PMT, що і в inECAL. HCAL має загалом 1488 комірок. Рисунок взято з [13].

Системи моніторингу та калібрування [51, 57-60] складається з світлодіодної системи моніторингу для відстеження стабільності підсилення PMT під час збору даних, системи високої напруги (HV) для зсуву PMT, системи калібрування HCAL з використанням радіоактивного джерела ^{137}Cs .

Загалом калориметрична система LHCb зазнала значної модернізації електроніки та систем зчитування, щоб впоратися з вищими вимогами до

освітленості та зчитування, які висуваються до модернізованого експерименту LHCb. Нова конструкція зберігає існуючу структуру детектора, водночас забезпечуючи покращену продуктивність і толерантність до радіації протягом усього терміну експерименту.

1.2.8 Muon

Мюонний детектор LHCb успішно експлуатувався під час Run 1 і 2 ВАК [61, 62]. Мюонний детектор складається з чотирьох станцій (M2 - M5), що містять 1104 багатопровідні пропорційні камери (MWPC) загальною площею 385 м² (рис. 1.13). Мюонна система також включала станцію M1 під час пуску 1-2, яку було демонтовано для модернізації. Чотири станції з M2 по M5 обладнані MWPC і чергуються з залізними поглиначами для фільтрації низькоенергетичних частинок [63-65].

Фроненд електроніка (FE), включаючи підсилювачі-формувачі-дискримінатори ASIC [66] і мікросхеми цифрової логіки DIALOG [67], що є стійкими до радіації і може бути збережена під час модернізації. Було проведено повну заміну електроніки зчитування, що є основною модернізацією мюонної системи. Нові плати позадетекторної електроніки (nODE) замінили попередні плати позадетекторної електроніки (ODE). Плати nODE приймають сигнали від електроніки FE, синхронізують їх з тактовим генератором LHCb, виконують придушення нуля і надсилають дані до наступних плат зчитування TELL40 через високошвидкісні оптичні лінії зв'язку. Ключовим компонентом нової електроніки зчитування є мікросхема nSYNC [68] - радіаційно-стійка ASIC, яка інтегрує різні функції, такі як синхронізація годинника, вирівнювання при перетині пучків, створення карти влучень, вимірювання часу, можливість побудови гістограм і буферизація. Нова система сервісних плат (nSBS) була розроблена для управління і розподілу інформації про синхронізацію і керування електронікою ФЕ, замінивши попередню систему сервісних плат. Для оптимізації кількості міжміських оптичних ліній зв'язку і плат TELL40 [69] у прошивці мюонного

зчитувача TELL40 реалізовано спеціальний блок обробки даних з алгоритмом придушення нуля. Цей алгоритм розшифровує дані цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) і відповідно форматує вихідні дані.

Додаткове вольфрамове екранування було встановлено навколо пучкової труби перед станцією M2, щоб зменшити потік частинок у внутрішній області [70]. Нові детектори з підвищеною деталізацією були запропоновані для найвіддаленіших ділянок, щоб зменшити неефективність, спричинену мертвим часом. Деталізація логічних каналів була збільшена шляхом заміни деяких проміжних плат на плати вузлів в регіонах з особливо високими швидкостями [71].

Очікується, що MWPC експлуатуватимуться протягом усього терміну служби LHCb із загальною інтегральною світністю близько 50 fb^{-1} . Особливу увагу було приділено обмеженню серйозних пошкоджень дротяних камер і розробці стратегій ремонту і відновлення MWPC, які демонструють експлуатаційні проблеми, такі як іскріння або високі струми [72].

Було розроблено і застосовано до проблемних проміжків неінвазійний метод відновлення, що включає високовольтні тренувальні цикли, які проводяться в присутності пучків, що зіштовхуються, і які застосовуються до проблемних проміжків. Крім того, був досліджений і показав свою ефективність метод прискореного відновлення з використанням невеликої кількості кисню в газовій суміші.

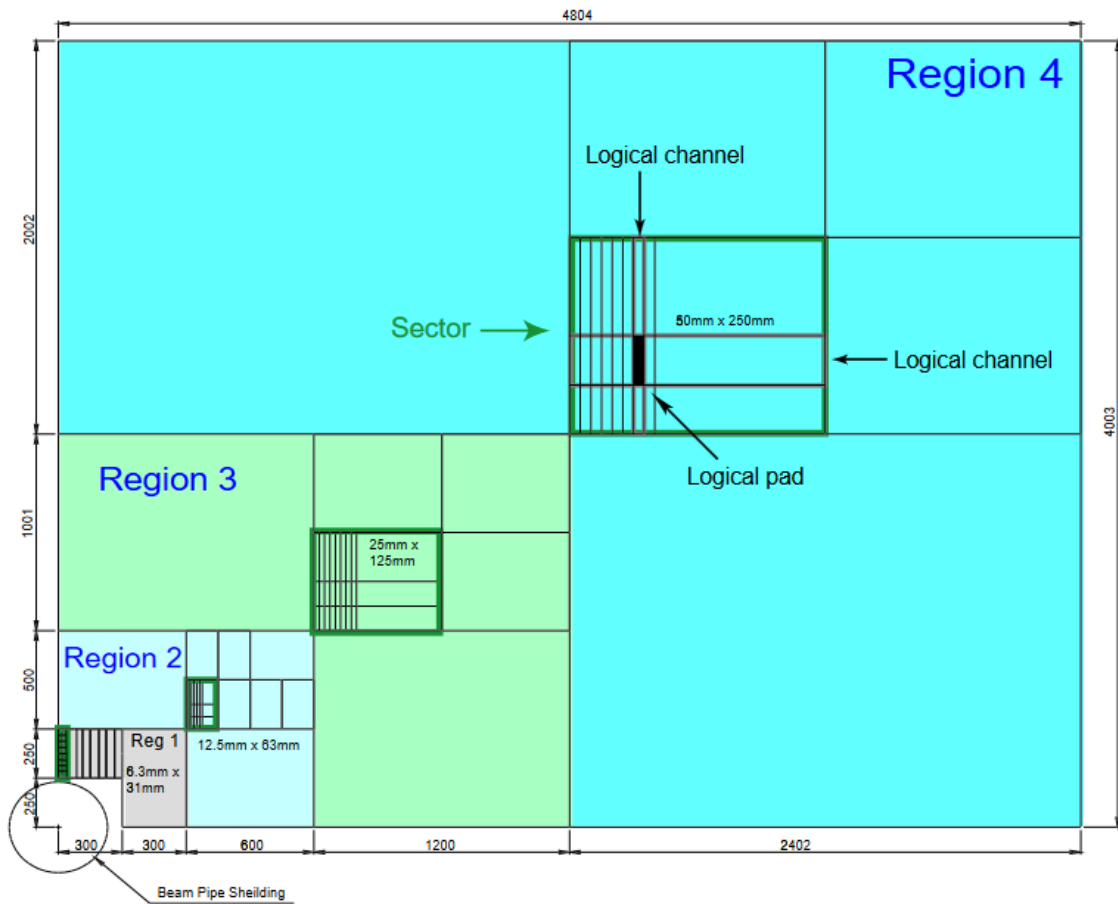


Рис. 1.13 Вид спереду одного з квадрантів мюонної станції 2, де показано розміри областей. Всередині кожної області показано сектор, який визначається розміром горизонтальної та вертикальної смуг. Точка перетину горизонтальної і вертикальної смужок, що відповідають логічним каналам, є логічними площадками. Розміри областей та каналів масштабуються в два рази від однієї області до іншої. Рисунок взято з [63].

1.2.9 Online

Нижче описана модернізована онлайн-систему для експерименту LHCb під час третього набору даних і після нього. Модернізована онлайн-система складається з продовження і розвитку успішної системи керування експериментом, створеної під час Run 1 і Run 2 [73], нової системи синхронізації і швидкого керування сигналами для синхронізації, розподілу

синхронних і асинхронних команд для зчитування без тригера, а також значно вдосконаленої системи збору даних (рис. 1.14).

Система збору даних використовує синхронне зчитування, коли вся фронтенд електроніка надсилає дані для кожного перетину пучка після нульового придушення. Електроніка зчитування згрупована в розділи, які можуть зчитуватися незалежно для введення в експлуатацію/тестування Лінії зв'язку DAQ використовують напівдуплексні багатомодові волокна від сенсорів до плат зчитування TELL40 з використанням протоколу GBT. Плати TELL40 передають дані в пам'ять серверів формування подій (event builder - EB). Завершені події передаються на високорівневий тригер 1 (HLT1), що працює на графічних процесорах серверів EB. Прийняті події HLT1 зберігаються і зчитуються HLT2 для остаточного відбору перед постійним зберіганням.

Загальна плата зчитування TELL40/PCIe40 є спеціальною платою FPGA, що використовується для DAQ, управління та зчитування в різних конфігураціях прошивки. Базується на ПЛІС Intel Arria 10 з 48 двонаправленими оптичними лініями до 10 Гбіт/с. Має різне завантаження мікропрограми для TELL40 (зчитування даних), SOL40 (інтерфейс керування) та інших конфігурацій. Спільний фреймворк прошивки використовується в LHCb для зменшення зусиль на розробку.

Побудова подій відбувається наступним чином. Після TELL40 всі вузли EB з'єднані між собою високопродуктивною мережею HDR InfiniBand зі швидкістю 200 Гбіт/с. Кожен сервер EB циклічно діє як джерело/приймач даних, отримуючи дані від усіх інших для побудови повних подій. Використовується 162 сервери з до 3 картами PCIe40 кожен.

Синхронізація та швидке керування (TFC) [74 – 76] розподіляє тактовий генератор ВАК, синхронні команди, команди калібрування за допомогою системи TFC, базується на платах PCIe40 як TFC Master (SODIN) та TFC

мережевих інтерфейсів (SOL40), синхронізує зчитування, забезпечує внутрішні тригери, контролює частоту спрацьовування на основі дроселів. Синхронізація і швидке керування розподілені через двонаправлені оптичні лінії до субдетекторів з використанням протоколу GBT.

Система керування експериментом (ECS) еволюціонувала з системи Run 1/2, вона забезпечує інтегровану конфігурацію, управління, моніторинг. Має ієрархічну архітектуру з вузлами пристроїв/блоків керування на основі SCADA/SMI++, керує високовольтними, газовими, низьковольтними системами, а також конфігурацією і моніторингом DAQ/HLT. Інтерфейси до зовнішніх плат розроблені з використанням системи GBT через плати SOL40. ECS для модернізованого детектора є розвитком поточної системи, описаної в [73]. Вона все ще розробляється в контексті спільного проекту управління (JCOF) [77], спільної розробки чотирьох експериментів ВАК і ЦЕРН. Проект визначив спільну архітектуру і фреймворк, які будуть використовуватися експериментами для побудови своїх систем керування детекторами.

У широкому розумінні моніторинг працює з двома категоріями вхідних даних. Перша категорія представлена гістограмами та лічильниками, які створюються алгоритмами відбору та іншими процесами в системі. Вони збираються так званими процесами додавання, які накопичують кількості та гістограми, характерні для розділів (див. розділ 10.2), і ідентифікуються за номером запуску та заповнення. Інтерактивний аналіз цих величин здійснюється за допомогою веб-додатку Monet [78]. Дані отримують і публікують за допомогою стандартної системи публікації-передплати LHCb, протоколу системи розподіленого управління інформацією (DIM) [79]. Автоматизовані алгоритми можуть отримувати доступ до даних за допомогою цього ж механізму для генерування сигналів тривоги в системі керування експериментом. Друга категорія складається з повністю зібраних подій, отриманих після побудови подій, які призначені для моніторингу шляхом випадкового відбору або за допомогою тригерних процесів. Ці події тегуються

для моніторингу, коли вони стають доступними у спільній пам'яті окремих процесорних вузлів. Події з тегами моніторингу дублюються і підхоплюються стандартною обробкою даних, а також надсилаються до ферми моніторингу через окрему мережу. У фермі моніторингу вони спочатку надходять на рівень розподільчого програмного забезпечення, реалізованого з використанням тієї ж архітектури спільної пам'яті, що і решта системи.

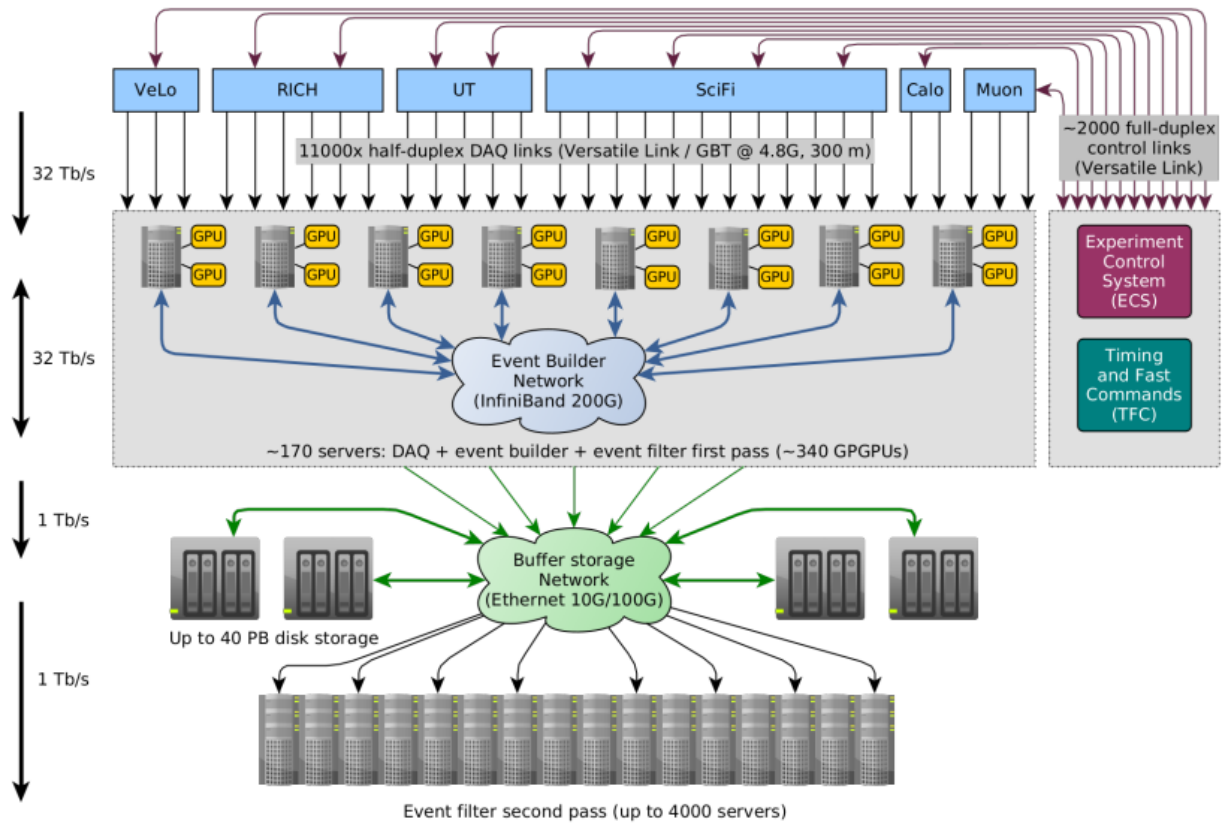


Рис. 1.14 Модернізована онлайн-система LHCb. Всі компоненти системи під'єднані до ECS, зображеної праворуч, хоча ці з'єднання не показані на рисунку для наочності. Рисунок взято з [13].

Вирівнювання/калібрування відбувається з використанням зразків вихідних подій HLT1 для швидкого розрахунку констант. Константи HLT1 оновлюються за лічені хвилини, константи HLT2 доступні протягом 1 години. HLT2, калібрування/вирівнювання виконується на фермі з >3000 процесорних серверів (ферма фільтрів подій). Сервери є щільними обчислювальними

вузлами, з'єднаними через мережу Ethernet і працюють у квазі-хмарній моделі, що дозволяє використовувати гетерогенне обладнання.

Архітектура онлайн-системи дозволяє гнучко розбивати систему на розділи і вводити її в експлуатацію, забезпечуючи при цьому достатню продуктивність зчитування і формування подій для обробки високих швидкостей передачі даних, які очікуються під час 3-го запуску і в подальшому на ВАК. Вона інтегрує різні системи запуску, контролю, моніторингу та калібрування, необхідні для когерентного збору даних на ЛНСь.

1.2.10 Triggers

Метою системи тригерів є зменшення швидкості передачі даних з 4 ТБ/с до приблизно 10 ГБ/с, які можна записати для аналізу в автономному режимі. Такий великий коефіцієнт зменшення в 400 є складним завданням через високу частоту потенційно цікавих сигналів, що містять красиві і чарівні адрони, які можуть бути частково реконструйовані під час приймання детектором [80].

Традиційна інклюзивна стратегія запуску, що полягає в ідентифікації подій з цікавими сигналами за допомогою невеликого набору загальних сигнатур, є нездійсненною. Натомість у ЛНСь використовується стратегія реконструкції та відбору в реальному часі (рис. 1.15) для максимізації ефективності відбору для широкого діапазону кінцевих станів [81].

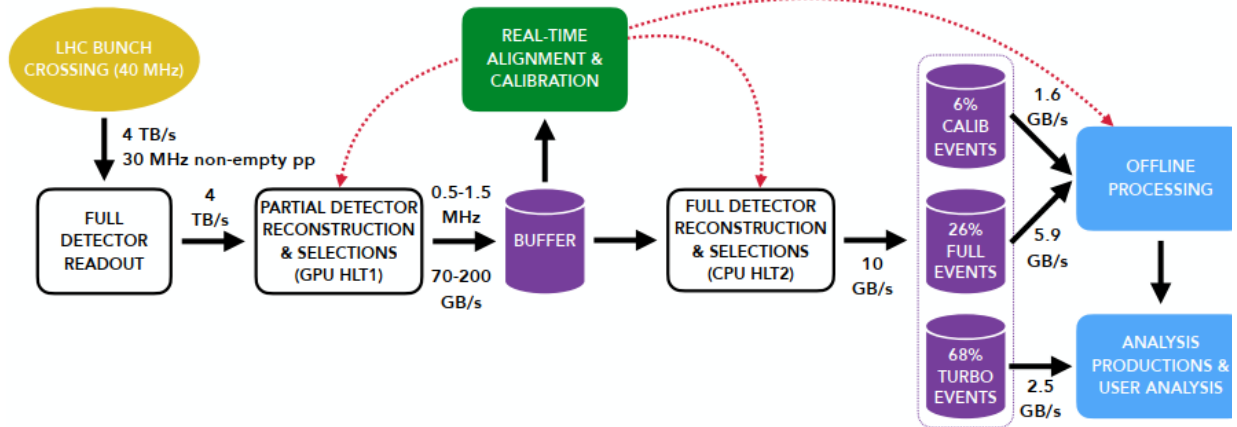


Рис. 1.15 Потік онлайн даних в експерименті LHCb. Обробка даних починається з повного зчитування даних детектора зі швидкістю 4 ТБ/с, після чого відбувається двоетапний процес відбору подій з використанням графічних і центральних процесорів, що знижує швидкість передачі даних до 10 ГБ/с. Відібрані події поділяються на три потоки: TURBO (кандидати на сигнал), FULL (повністю реконструйовані об'єкти) і CALIB (калібрувальні дані), з відповідними швидкостями передачі даних перед офлайн обробкою. Рисунок взято з [82].

Тригер має два рівні. Перший рівень (HLT1) [83, 84] працює на графічних процесорах і виконує часткову реконструкцію для побудови інклюзивних ліній-кандидатів, таких як топологічні лінії зі значним зміщенням від первинної вершини. Події відбираються за критерієм наявності однієї або більше таких ліній-кандидатів. HLT1 знижує частоту до 1 МГц. Другий рівень (HLT2) [85] працює на фермі процесорів і виконує повну реконструкцію подій для побудови ексклюзивних кандидатів на кінцевий стан, таких як розпади $B \rightarrow J/\psi K^+$. Суміш інклюзивних та ексклюзивних алгоритмів відбору використовується для зменшення кінцевої швидкості до 10 ГБ/с. Між HLT1 і HLT2 та після запуску HLT2 дані тимчасово зберігаються в буферах, з яких спеціальні задачі моніторингу, калібрування та вирівнювання отримують

доступ до зразків подій для виконання життєво важливих завдань забезпечення якості та контролю.

Задачі калібрування та вирівнювання використовують ферму фільтрів подій для швидкої ітерації над великими вибірками подій і обчислення необхідних констант калібрування та вирівнювання детектора, які передаються назад в задачі HLT, коли доступні оновлені значення [86]. Моніторингові програми мають доступ до повністю створених подій, виділених для цілей моніторингу, для виконання низки завдань валідації та моніторингу шляхом перевірки реконструйованих об'єктів і відстеження продуктивності, серед інших метрик.

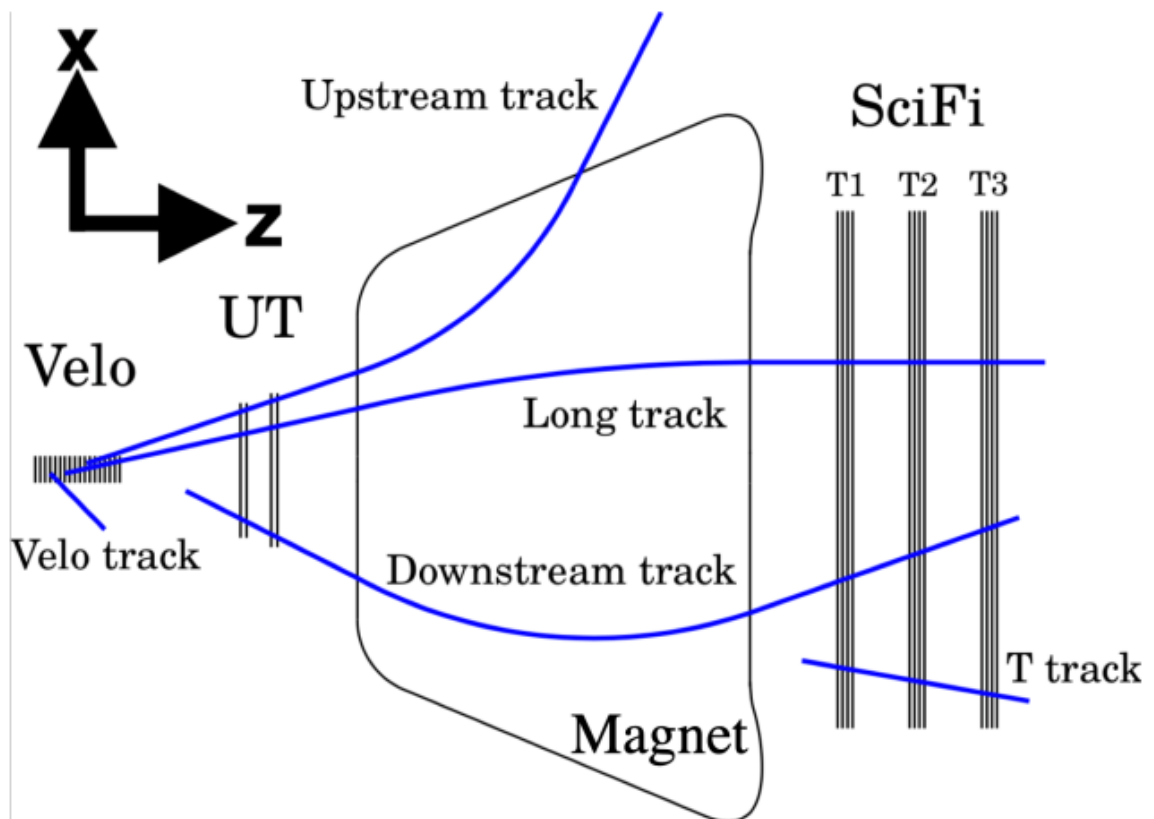


Рис. 1.16 Типи треків у площині згинання детектора LHCb. В алгоритмі розпізнавання треків приймають участь вершинний детектор (VELO), UT та сцинтиляційний волоконний трекер. За допомогою комбінації даних від цих підсистем в режимі онлайн виконується процедура трекінгу. Рисунок взято з [87].

Модель аналізу в реальному часі, що включає часткову реконструкцію на HLT1, тимчасове зберігання і буферизацію, повну реконструкцію на HLT2, а також спеціальні завдання калібрування/вирівнювання і моніторингу, уможливленні створенням подій і буферизацію, представляє нову парадигму збору даних без тригера порівняно з попередніми експериментами (рис. 1.16).

1.2.11 Lumi monitors

Для моніторингу контролю умов протікання експерименту навколо точки взаємодії і вимірювання миттєвої світності, що надходить до LHCb, розроблено набір детекторів. Моніторинг світності і фонових умов пучка має важливе значення для оптимізації зіткнень, зменшення систематичних невизначеностей і забезпечення безпечної роботи детектора шляхом швидкого виявлення аномальних умов пучка, які можуть зашкодити експерименту.

PLUME (зонд для вимірювання світності) [88] - це люменометр, що вимірює черенковське світло, яке створюється зарядженими частинками, що перетинають кварцові випромінювачі. Він складається з двох станцій, розташованих перед областю взаємодії, кожна з яких має 24 модулі фотоелектронних помножувачів (ФЕП), розташованих навколо променевої труби. ФЕП мають кварцові входні вікна товщиною 1,2 мм і використовують 5-міліметрові кварцові таблетки як випромінювачі для генерації черенковського світла. Модулі ФЕП розташовані на радіальних відстанях 157-276 мм від лінії променя, що охоплює діапазон псевдорapidіті $2,4 < \eta < 3,1$. Передня електроніка розташована на відстані 20 м від ПМТ для зменшення радіаційного впливу.

PLUME забезпечує вимірювання миттєвої світності в реальному часі з використанням методу "logZero" [89], який пов'язує середню кількість видимих взаємодій на перетин пачки з імовірністю того, що активність не буде виявлена. Розрахунок світності в режимі онлайн виконується у вбудованому

програмному забезпеченні внутрішньої електроніки. Система моніторингу світності регулярно калібрується. Деградація кварцових волокон внаслідок радіаційного пошкодження відстежується за допомогою спеціальних волокон зі зворотним зв'язком. Для перехресної перевірки надійності калібрування використовуються рефлектограми, реконструйовані на попередніх станціях VELO. Висока напруга, що подається на ФЕП, регулюється з кроком 0,5 В ($\approx 2\%$ зміни підсилення) на основі світлодіодного моніторингу для підтримки стабільної роботи.

Система моніторингу стану пучка (BCM) [90] складається з двох станцій з 8 полікристалічними алмазними сенсорами кожна, розташованих вище і нижче точки взаємодії. Вона контролює фон, індукований пучком, вимірюючи середній струм, інтегрований за 40 мкс в кожному алмазному сенсорі. Система блокування ВАК подає запит на переривання пучка, якщо три сусідні сенсори протягом двох послідовних періодів показують струм, що перевищує поріг близько 30 нА. Крім того, обчислюються біжучі суми для 32 послідовних вимірювань тривалістю 40 мкс, і скидання пучка спрацьовує, якщо середнє значення цих біжучих сум на одній станції перевищує адаптивний поріг, що базується на поточних умовах пучка. Алмазні сенсори були замінені, а опорні конструкції перебудовані з низьким матеріальним бюджетом під час LS2, щоб зменшити фонові перешкоди. Внутрішня електроніка використовує поширені плати PCIe40, інтегровані в систему LHCb DAQ.

Модернізована система радіаційного моніторингу (RMS) складається з чотирьох модулів, розташованих перед точкою взаємодії, кожен з яких містить два сенсори з п'яти шарів мідної фольги по 50 мкм, а центральна фольга виконує роль сенсора. RMS використовує явище вторинної електронної емісії з приповерхневого шару металеві фольги, коли заряджені частинки проходять через неї. Струм, що виникає при цьому, вимірюється і перетворюється на частоту на передній панелі електроніки, розташованій на відстані 80 м у доступній частині каверну LHCb. RMS забезпечує лише відносний моніторинг

потокa заряджених частинок. Більш детально про будову та функціонування системи написано в розділах 3 та 4.

Також слід згадати процедуру вирівнювання світності, яка використовує зворотний зв'язок від PLUME для регулювання зсуву пучків і підтримання постійної миттєвої світності під час збору фізичних даних. У розділі підкреслено, що ці системи детекторів повністю інтегровані в системи збору даних, керування експериментом, синхронізації і швидкого керування, а також у системи керування ВАК, що уможлиблює їхню критично важливу роль в оптимізації світності і захисті від пошкодження пучка.

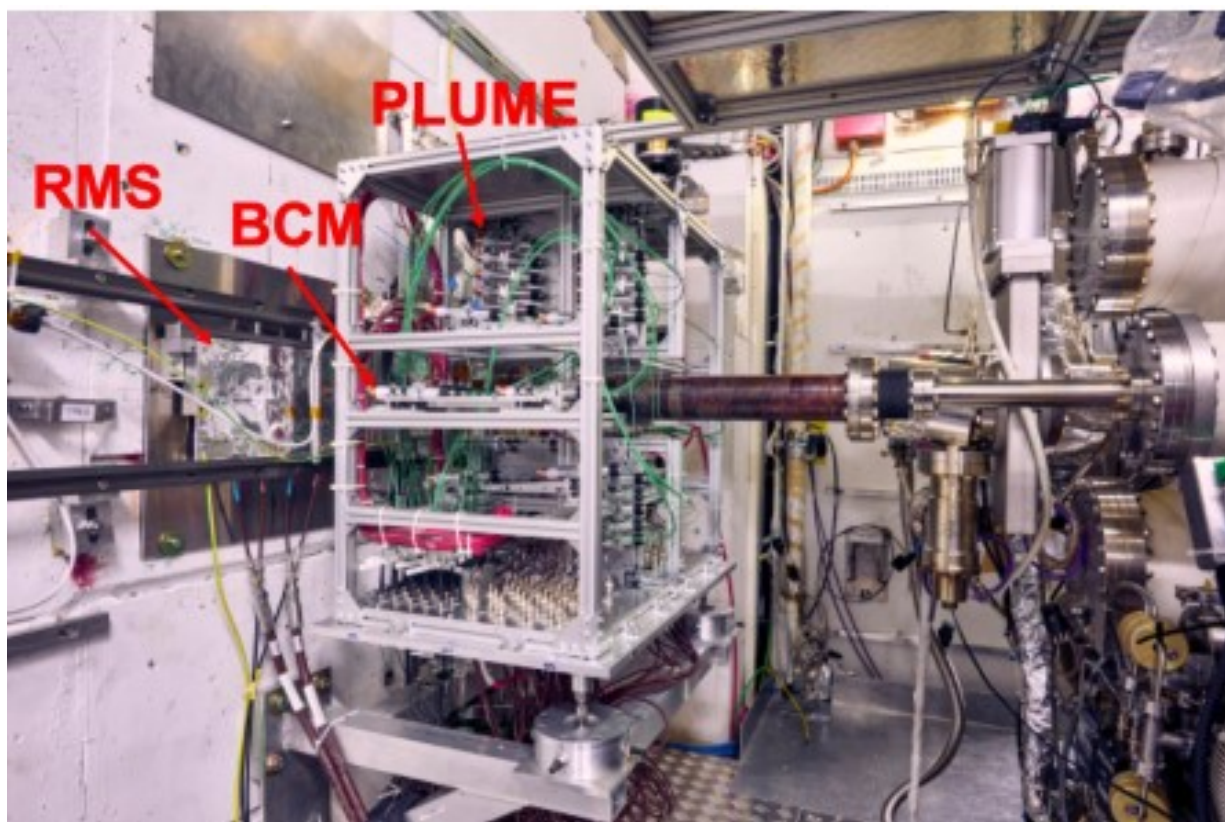


Рис. 1.17 Системи контролю світності розташовані навколо іонопроводу у каверні експерименту LHCb: RMS-R3, BCM та PLUME

§2 Концепція МФД, ВЕЕ

Явище вторинної електронної емісії - це процес, під час якого електрони вилітають з поверхні твердого тіла під дією бомбардування цієї поверхні іншими частинками, такими як електрони, іони або фотони. Цей процес

відбувається внаслідок передачі енергії від падаючих частинок до електронів, що знаходяться в приповерхневих шарах твердого тіла [91].

Сам процес відбувається наступним чином: йде бомбардування поверхні первинними частинками (електронами, іонами або фотонами). Далі відбувається передача енергії від первинних частинок до електронів у твердому тілі через пружне та непружне розсіяння, що призводить до руху збуджених електронів у твердому тілі та їх взаємодія з атомами та іншими електронами. Якщо електрони мають достатню енергію для подолання поверхневого бар'єру то на виході ми маємо такі електрони на виході з твердого тіла.

Енергія для вторинних електронів складає від електрон-вольта до енергій налітаючої частинки. На рис. 1.18 показано криву розподілу для срібної мішені; по осі ординат - кількість електронів з енергією від E до $E + dA$, по осі абсцис - енергія в еВ. Максимум 'S' відображає енергію вторинних електронів. Максимум 'R' походить від пружно розсіяних первинних електронів. Відстань між максимумами U і R не залежить від енергії первинних електронів, максимуми 'U' спричинений первинними електронами, які втратили певну кількість енергії, тобто були пружно розсіяні.

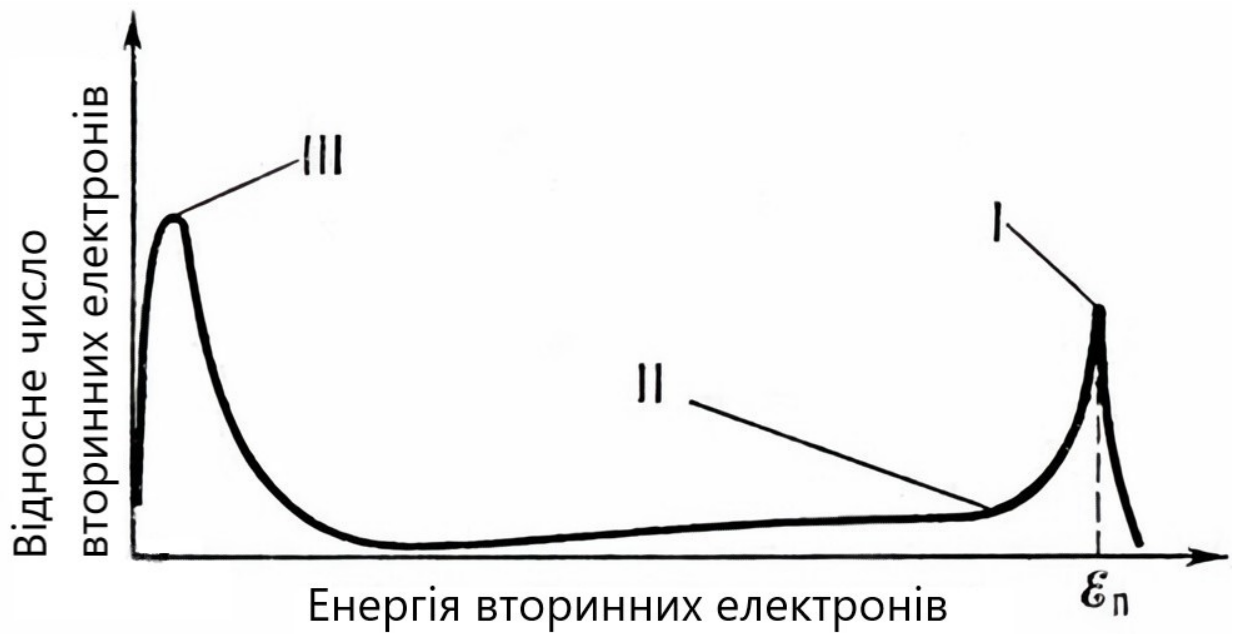


Рис. 1.18 Енергетичний розподіл вторинних електронів, випромінюваних сріблом за Рудбергом [92, 93] Позначення: I – пік пружно відбитих первинних електронів, II — спектр непружно відбитих первинних електронів, III — вторинні електрони. Рисунок взято з [91].

Вторинні електрони, що утворюються в металах, мають малу ймовірність виходу через велику щільність провідності. Ймовірність виходу вторинних електронів для діелектриків є більшою через малу концентрація електронів провідності. Ймовірність виходу електронів залежить від висоти потенційного бар'єру на поверхні. У тонких плівках ВЕЕ можна спостерігати як із бомбардуємої поверхні (емісія на віддзеркалення, рис. 1.19, а), так і із протилежної поверхні (емісія на простріл, рис. 1.19, б)

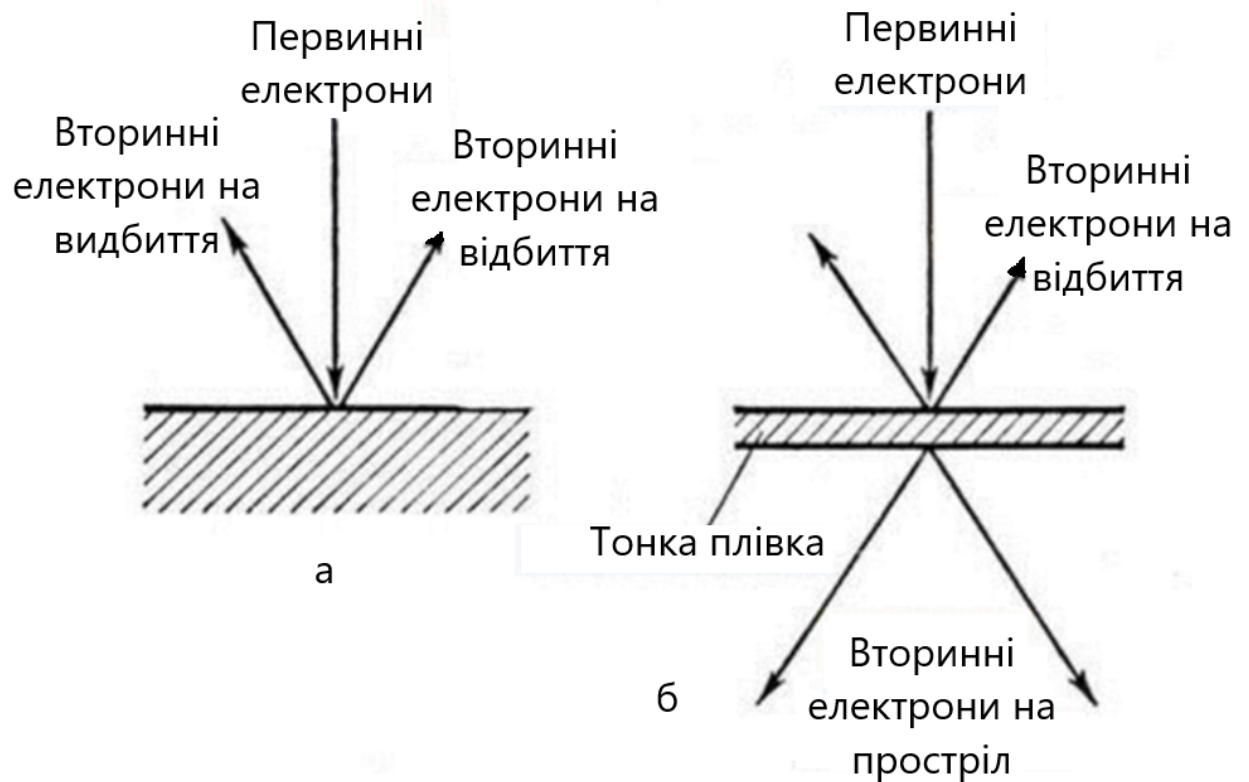


Рис. 1.19 Вторинна електронна емісія на віддзеркалення (а) і на простріл (б) через тонку плівку завтовшки декілька десятків нм.

В основі технології металево-фольгових детекторів (МФД) лежить явище вторинної електронної емісії. Потіки бомбардуючих заряджених частинок спричиняють вторинну електронну емісію (ВВЕ) з приповерхневого шару сенсорної металеві фольги (10-50 нм). Позитивний заряд виникає в ізольованій металевій фользі (сенсорі). На рис.1.20 показана робота такого сенсора у вакуумі.

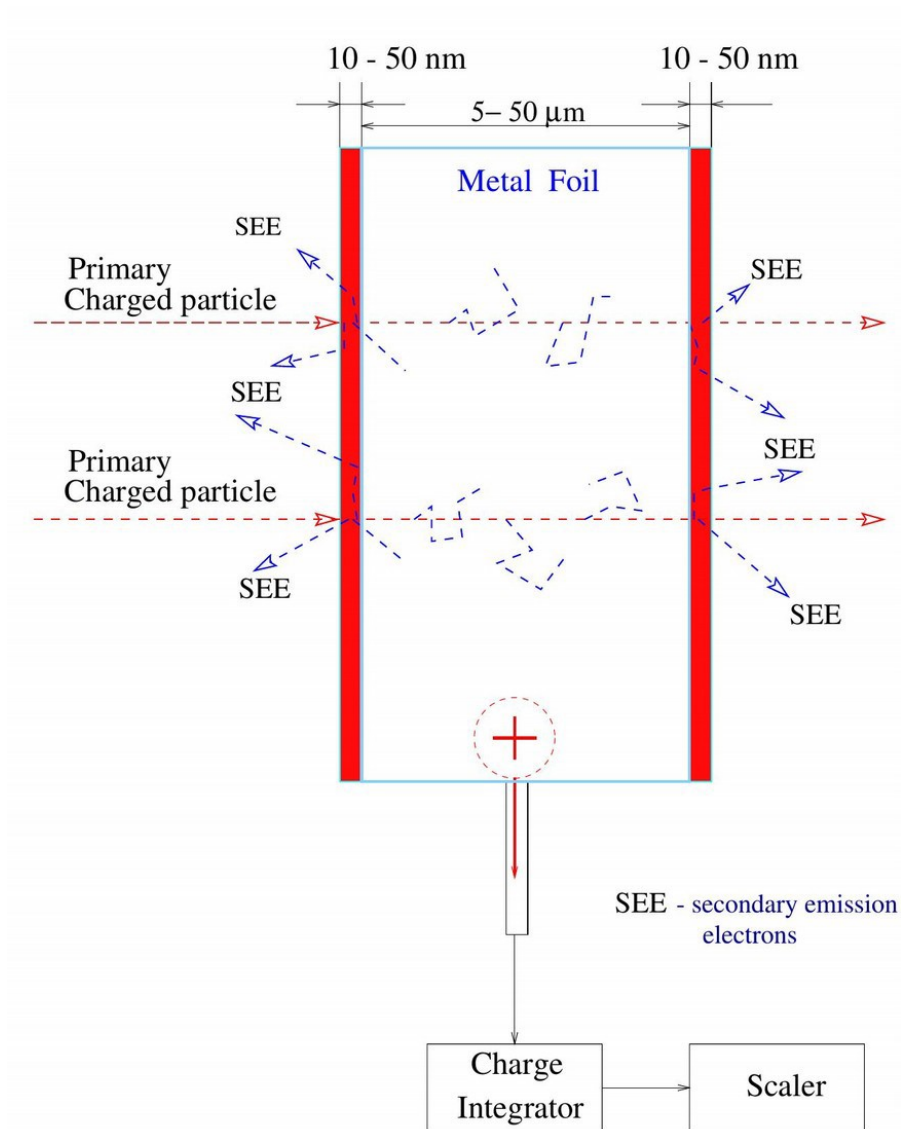


Рис. 1.20 Схема протікання фізичного явища ВЕЕ на приповерхневому шарі фольгових сенсорів (позначено червоним, 10-20 нм). Первинно заряджені частинки викликають вторинну електронну емісію на фользі, після чого накопичений заряд збирається зарядовими інтеграторами і підраховується лічильником.

Коефіцієнт вторинної електронної емісії (δ) визначається як відношення кількості вторинних електронів, що вилітають з поверхні, до кількості первинних частинок, що бомбардують цю поверхню. Він залежить від багатьох факторів, зокрема:

- енергії первинних частинок: зазвичай існує максимум кривої $\delta(E)$ при певній енергії первинних частинок;
- кута падіння первинних частинок;
- матеріалу та стану поверхні твердого тіла (чистота, шорсткість, наявність окислів тощо).

У більшості випадків коефіцієнт δ зростає зі збільшенням енергії первинних частинок до певного максимуму, а потім поступово зменшується. Положення та величина цього максимуму залежать від матеріалу мішені та її стану.

Кількісно ВЕЕ характеризується коефіцієнтом ВЕЕ (формули 1.1 та 1.2).

$$\delta = \frac{i_{BT}}{i_{\Pi}} \quad (1.1)$$

де i_{BT} — струм, утворений вторинними електронами,
 i_{Π} — струм первинних електронів.

Тоді δ_{true} можна записати як:

$$\delta_{true} = \frac{i_s - i_{refl}}{i_p - i_{refl}} \quad (1.2)$$

де i_s — сумарний вторинний електронний струм,
 i_{refl} — струм пружно розсіяних електронів,
 i_p — первинний струм.

Нижче розглянуто залежність коефіцієнта ВЕЕ для різних металів, які використовувались в роботі. На рис. 1.21 - 1.23 наведено повний огляд виходу вторинної емісії для V_p між 0 і 1500 В для міді [94, 95], золота [94-96] та алюмінію [97], що розглядалися для створення RMS-R3. Як бачимо з рисунків

вихід електронів для міді значно вище ніж для алюмінію, який використовувався в RMS для ІТ [98]. Додатково бачимо, що для золота є ще більший вихід електронів, ніж для міді, тому використання золотих або позолочених фольг розглядається при дизайні RMS-R4 – удосконаленої RMS-R3 для майбутніх цілей (див. Розділ 4).

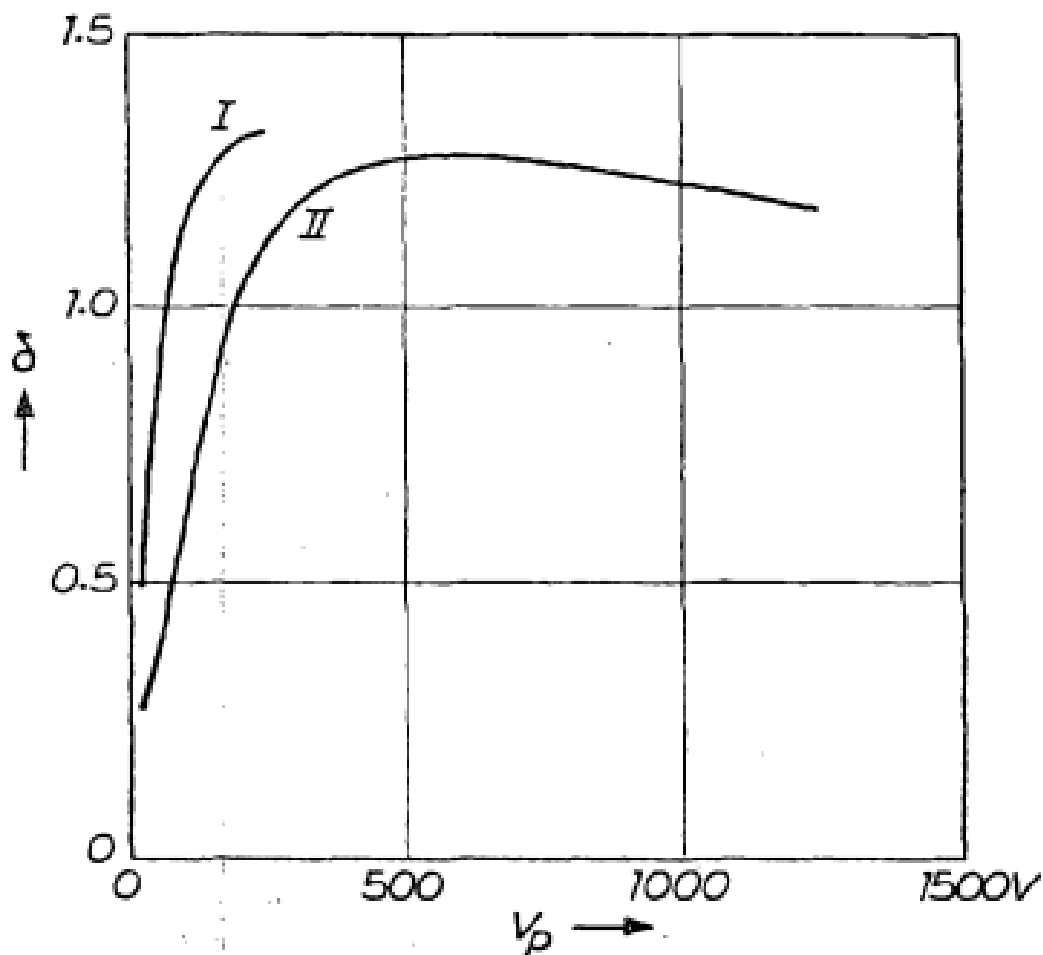


Рис. 1.21 Вихід вторинної електронної емісії міді; Рисунок взято з [91] за даними [94, 95].

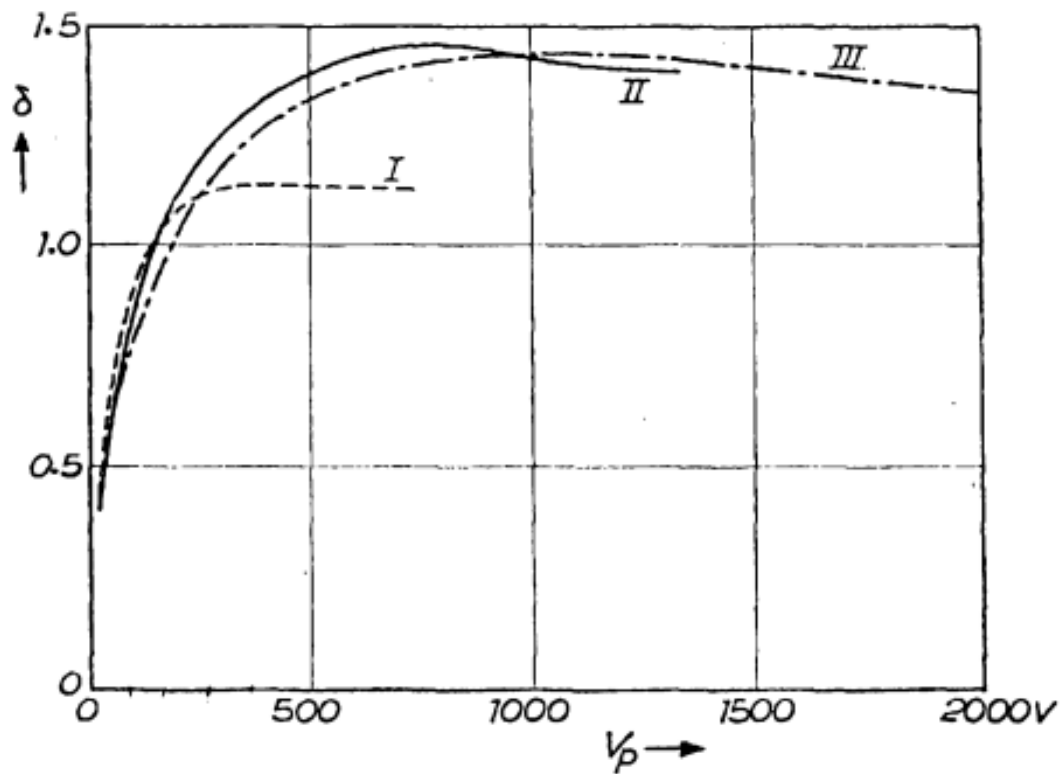


Рис. 1.22 Вихід вторинної електронної емісії золота; Рисунок взято з [91] за даними [94–96].

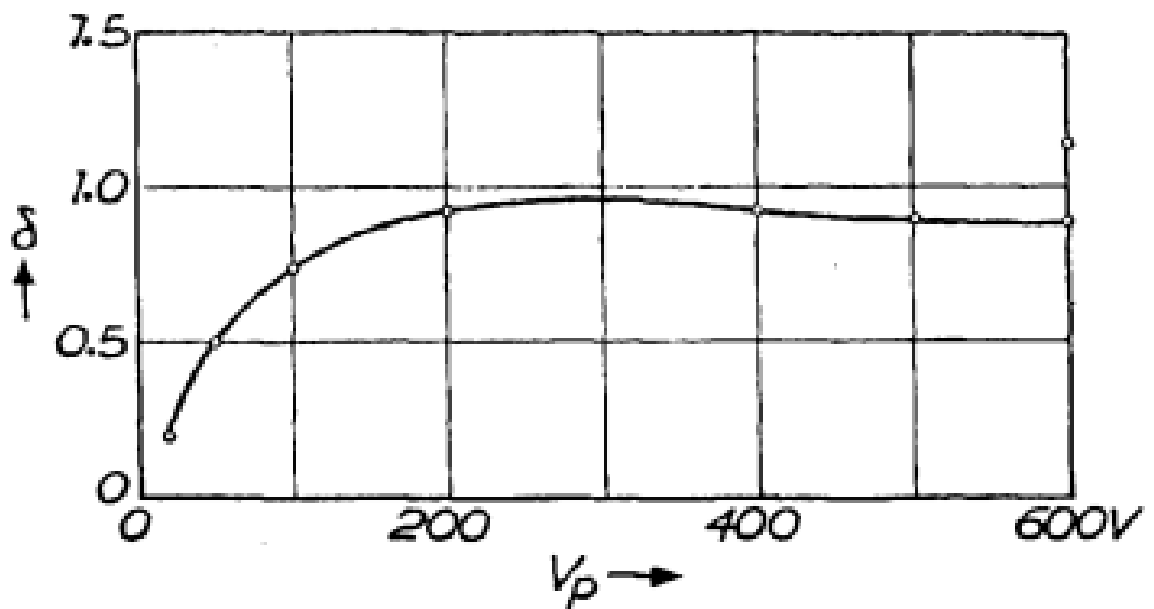


Рис. 1.23 Вихід вторинної електронної емісії алюмінію; Рисунок взято з [91] за даними [97].

Висновки до розділу 1

У першій частині дисертації представлено детальний опис експерименту LHCb на Великому Адронному Колайдері і його модернізації для третьої серії вимірів. Головними цілями LHCb є фізика ароматів та пошук нової фізики поза Стандартною Моделлю через високоточні виміри з важкими адронами. Описано ключові компоненти модернізованого детектора LHCb: вершинний трекер VELO, треки UT і SciFi, системи RICH, калориметри, мюонний детектор, а також онлайн-системи зчитування, тригерів, керування та моніторингу, контролю світності. Значні оновлення були зроблені для всіх підсистем, щоб впоратися з вищими інтенсивностями пучків і частотами зчитування, забезпечуючи при цьому необхідну продуктивність та радіаційну стійкість. Описано введення нової внутрішньої газової мішені SMOG2 для режиму фіксованої мішені. Модернізований детектор LHCb забезпечить потужні можливості для майбутніх досліджень фізики за межами Стандартної моделі.

Представлено теоретичні основи явища вторинної електронної емісії (ВЕЕ) та його застосування в металевих-фольгових детекторах (МФД). Описано процес ВЕЕ, коефіцієнт вторинної емісії та його залежність від різних факторів. Наведено залежності коефіцієнта ВЕЕ для міді, золота та алюмінію, що мають практичне значення для конструювання МФД.

Розділ 2. Основні ідеї розробки фіксованої металевої мікромішені. Фізична мотивація

§1 Режим фіксованої мікростріпової мішені на LHC

Наразі у світі є декілька експериментів у фізиці високих енергій, що використовують (LHCb), використовували (HERA-B) або намагаються використовувати (ALICE) фіксовані мішені як один з режимів роботи колайдера. Але мова йде лише про газову фіксовану мішень. І якщо говорити про застосування твердотільних мікростріпових мішеней, у яких є свої переваги, то після HERA-B експеримент LHCb може стати першим експериментом з надвисокими енергіями пучків і світностями, де будуть використані такі технології.

Застосування мікростріпових мішеней суттєво розширить коло досліджуваних ядер, наразі обмежене лише ядрами інертних газів при використанні режиму фіксованої газової мішені (SMOG2), унікального режиму на ВАК, здійсненому лише в експерименті LHCb.

З фізичної точки зору це надає можливість досліджувати явища, які не можуть бути спричинені в зіткненнях зі сферичними ядрами інертних газів. Наприклад, динаміка процесів зіткнення ядер може залежати від характеристик основного стану ядра-мішені, як-то деформація, спіні, наявність нейтронного гало [99] тощо. Не можна виключити вплив на початкову динаміку і еволюцію процесу зіткнення навіть атомно-молекулярної структури мішені. Про роль кристалічної будови мішені свідчить відоме явище викривлення траєкторій високоенергетичних іонів, що розповсюджуються у вигнутому кристалі. Нами розглянуто можливість реалізації багатократних ультрапериферичних зіткнень налітаючого ядра з мішенними ядрами, вишикуваними впродовж осі кристала. Інше унікальне фізичне явище, потрібні ядерні зіткнення, також можуть бути реалізовані лише в режимі фіксованої мікростріпової мішені.

Наприклад, досягнення потрібних ядерних зіткнень розглядались саме твердотільної нерухомої мішені (SFT). Використання SFT для досліджень потрібних ядерних зіткнень (ПЯЗ) дозволяє вводити в експеримент різноманітні ядра, а також ретельно підбирати широкий спектр параметрів ядер, таких як деформація форми ядер, надлишок нейтронів, спіні і парність, для точного вивчення сильно взаємодіючої матерії, що утворюється при зіткненнях ядер.

З технічної точки зору, режим SFT може також забезпечити низку таких переваг, як надзвичайно точне позиціонування первинних вершин, відповідне налаштування швидкості взаємодії і проста зміна мішені. Однак найвища частота ПЯЗ, що дається рівнянням (2.1) для нетрадиційного розташування мішеней [100], може створювати інші проблеми, навіть у тому випадку, коли велика енергія, що виділяється двома пучками високої світності на мішені, вирішується швидким обертанням мішені.

$$\begin{aligned} \frac{dN_{p+C+p}}{dt} &= 2.0 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1} \\ \frac{dN_{Pb+Pb+Pb}}{dt} &= 3.4 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1} \end{aligned} \tag{2.1}$$

Вся справа в тому, що величезні потоки випромінювання можуть спричинити раптову втрату надпровідності надпровідних магнітів, а також, можливо, викликати незворотні радіаційні пошкодження елементів детектора. Отже, треба знайти рішення в налаштуванні експериментальних характеристик, які були б придатні для спостережень на ПЯЗ, але були б толерантними для інших систем. Одним з очевидних шляхів є покращення характеристик пучків: краще фокусування пучків для досягнення субмікронного значення радіуса ядра пучка може зменшити радіаційне навантаження і збільшити світність; зменшення довжини пучка і синхронізація в пікосекундній або навіть фемтосекундній області.

При теоретичному обрахунку частот ПЯЗ розглядалися чотири концепції SFT. Перша концепція - надтонка SFT, виготовлена з графенового шару товщиною $l_g \ll 3,32$ мкм. Для графена частота ПЯЗ складає $l_g / 2R \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ для $p+C+p$.

Друга концепція - SFT, що обертається і відновлюється. В оцінках частоти реакції для традиційної збірки мішені припускалось [100], що геометрична товщина мішені становить $l_g = 3,32$ мкм. Однак, аналіз енергетичного внеску мішені показує, що геометрична товщина мішені l_g може бути збільшена в 30 або навіть 100 разів, тобто можна використовувати $l_g \in 100 - 332$ мкм, якщо вона обертається з лінійною швидкістю 30 - 100 м/с. У цьому випадку можна очікувати додаткового збільшення частоти реакції в 30-100 разів, що в сумі дає значне збільшення частоти реакції в 3000-10 000 разів. Остання оцінка видається прийнятною для виявлення ПЯЗ, причому не тільки для реакцій $p+C+p$, але й для $Pb+Pb+Pb$. Однак для експериментів з ПЯЗ з важкими ядрами, мабуть, реалістичніше розглядати міцнішу мішень, виготовлену з вісмуту (Bi) або вольфраму (W). Крім того, зрозуміло, що для першої і другої концепцій SFT необхідно забезпечити достатньо тривалий час роботи мішені. Відновлювані мішені можуть бути розроблені з використанням технології мікроелектромеханічних систем (MEMS).

Третя концепція - струменева мікропорошкова (гранульована) мішень успішно працювала на кільці накопичувача електронів [101], при цьому товщина мішені для мікропорошкових частинок нікелю, діаметром приблизно 1 мкм становила приблизно $t_{Ni} = 10^{16}$ атомів·см⁻² [102]. можна сподіватися, що такі мішені будуть переглянуті зі значно збільшеною щільністю струменевого мікропорошку для частинок Pb, Wі або W. Крім того, можливо, сучасні струменеві мікропорошкові мішені зможуть забезпечити достатньо високу швидкість потоку частинок, щоб суттєво зменшити енергетичні ефекти, що можуть привести до порушення надпровідності магнітів, про які йшлося вище.

Четверта концепція - побудова (вертикально орієнтованого) накопичувального кільця з високоінтенсивним іонним пучком, сфокусованим на область взаємодії двох пучків колайдера з субмікронними розмірами і подібною точністю позиціонування. Очікувана густина іонного пучка 10^{21} іонів/см³ може бути використана для експериментів на ПЯЗ у найближчому майбутньому, хоча можна сподіватися, що через кілька років цю густину іонів у пучку вдасться збільшити ще більше.

Можна зробити однозначний висновок, що експерименти SFT, які використовуються для генерації ПЯЗ, - це не теоретичні мрії сьогодення, а технологічна реальність завтрашнього дня, що мають конкретні фізичні переваги над існуючими режимами фіксованої мішені і над колайдерними режимами.

Крім згаданих деяких фізичних переваг, режим фіксованої мішені має також суттєві технічні переваги. Перш за все, це прецизійна локалізація точки зіткнення ядер, або первинних вершин, реконструйованих фізичних подій. Навіть у випадку звичайного колайдерного режиму точка зіткнень ядер може трапитись впродовж довжини банчів пучка іонів ВАК, яка перевищує 20 см (див. рис. 2.1).

На рисунку 2.1 на гістограмі наведено розрахункові дані (Монте Карло симуляція) щодо розподілу точки зіткнення (primary vertex, PV) ядер вздовж осі пучка (z-coordinate, mm) в експерименті LHCb. Широкий пік з максимумом при $z = 0$ мм відповідає подіям (p-p) зіткнення протонів з двох пучків ВАК у колайдерному режимі. У випадку фіксованої газової мішені ця точка може бути в околі понад 40 см, що обумовлено подовжнім розміром газонакопичувальної комірки (storage cell) системи SMOG2. На рисунку 1.2 відповідний розподіл первинних вершин, реконструйованих вершинним детектором VELO, відображає пік з максимумом в районі $z = -400$ мм, який відповідає зіткненням пучка протонів з ядрами газової мішені (p-gas).

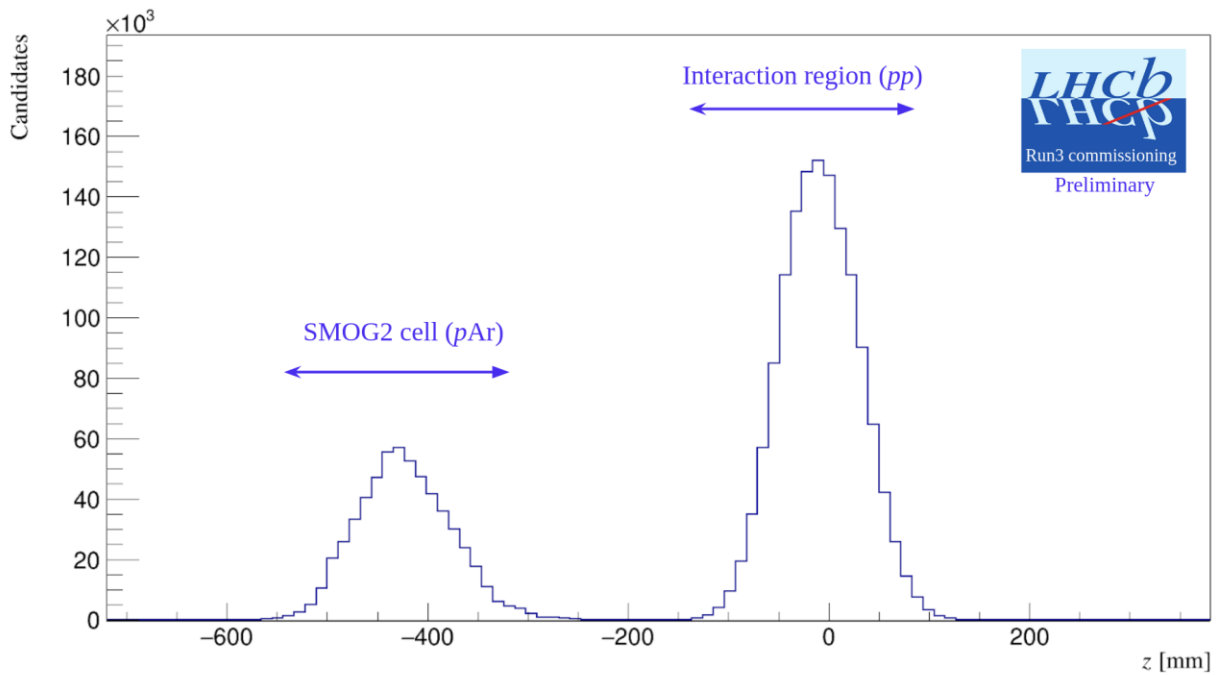


Рис. 2.1 – Монте Карло симуляція розподілу точки зіткнення (primary vertex, PV) ядер в експерименті LHCb [103]. Справа – протон-протонні (p-p) зіткнення в колайдерному режимі, зліва – зіткнення протонів з ядрами газу (p-gas) в режимі фіксованої мішені. Рисунок взято з [103].

Металева мікростріпова мішень локалізує точку зіткнення в своїй товщині, тобто 0.0005 см! Це створює зовсім нові межі точності обробки даних, відокремлення фізичних подій від фонових тощо.

Нижче представлено основні фізико-технічні принципи реалізації режиму фіксованої мікростріпової мішені в гало пучка ВАК [104], [105].

На рисунку 2.2 схематично представлено досяжні енергії та акцептант детектора для колайдерного режиму та режиму фіксованої мішені. Для ядра-мішені середньої ваги при розсіянні на ньому прискорених до 7 TeV протонів енергія в с.ц.м. пари нуклонів становить величину біля 100 GeV. При розсіянні ядер свинцю з енергією 2,76 TeV енергія в с.ц.м. пари нуклонів становить величину біля 40 GeV. Область акцептанта детектора покриває рапідиті від + 1 до - 2,5.

Розглянемо деякі можливі варіанти створення такого режиму на накопичувальному кільці з високоенергетичними ядрами. Найближчим до існуючого матеріального забезпечення з газовою мішенню можна запропонувати оновлену до сучасного стану конструкцію супертонкої мікропорошкової струменевої мішені, що була застосована на накопичувальному кільці електронів НЕР-200 в ІЯФ АН СРСР (м. Новосибірськ) [101]. Застосовуючи металеві мікропорошинки діаметром біля одного мікрона, досягли ефективну товщину мішені біля $7,0 \times 10^{14}$ атомів/см² та світність експерименту в районі 10^{31} см⁻²с⁻¹. Складність полягає в необхідності потужної системи диференційної відкачки газу-носія, а також можливого забруднення іонопроводу. Більш прямолінійний підхід застосовують у розвитку режиму фіксованої металевої мішені в Брукгейвенській національній лабораторії на кільці RHIC [107]. В дослідженнях, що вже тривають кілька років, на золоту мішень товщиною 1 мм, спрямовують прискорені ядра золота, які спеціальними пристроями (beam kickers) виводяться на периферію пучка, в його гало. За повідомленнями минулого року, хоча і вдається реалізувати зіткнення ядер золота в режимі фіксованої мішені в гало основного пучка, довготривалої стабільної роботи поки-що не вдалося досягти [108].

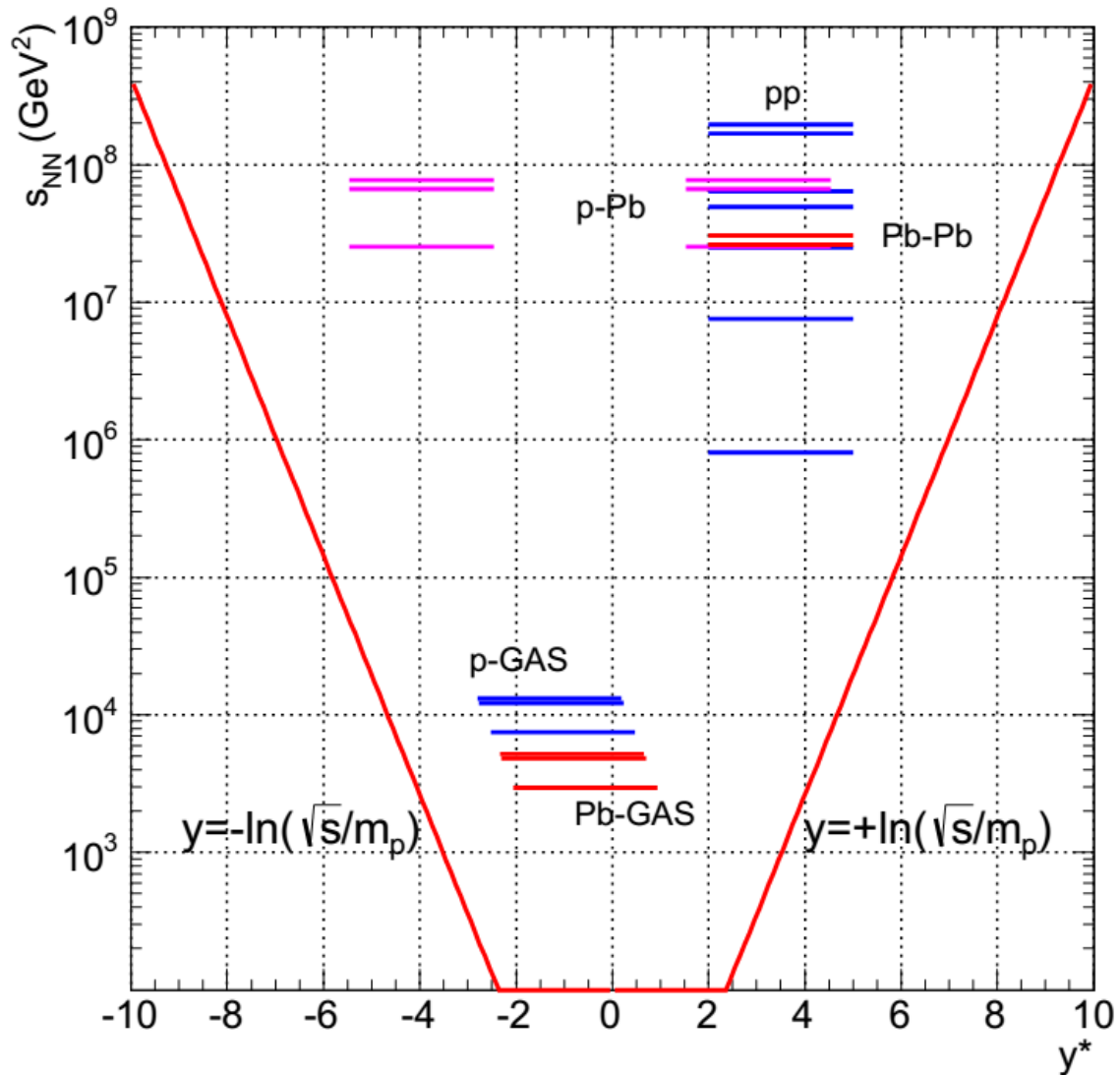


Рис. 2.2 – Енергії та акцептант детектора для колайдерного режиму та режиму фіксованої мішені. Червоні лінії (суцільні) – границі акцептанту детектора. Червоні лінії (короткі) – зіткнення ядер свинцю з газовою фіксованою мішенню, ярко сині лінії – зіткнення протонів з газовою фіксованою мішенню. Рожеві лінії – зіткнення p-Pb, сині лінії – зіткнення pp, бордові лінії – зіткнення Pb-Pb. По осі X – псевдорapidітти, по Y – енергія у системі центра мас. Рисунок взято з [106].

Найбільш ефективний режим фіксованої мішені в накопичувальному кільці було здійснено в експерименті HERA-B [109]. Спеціально

сконструйований мішенний комплекс забезпечував довготривале підтримування до восьми мішеней одночасно в гало пучка протонів з енергією 0,92 TeV [110]. Зазначимо суттєву рису успіху цього експерименту – творча співпраця фізиків і фахівців прискорювального комплексу HERA (DESY, Hamburg). Окрім багаторічної продуктивної роботи над створенням самого мішенного комплексу (наукові групи: м. Хайдельберг, м. Дортмунд, м. Київ), значний внесок був зроблений фахівцями прискорювального комплексу HERA, щоб сформувати профіль протонного пучка, подібний до зображеного на рисунку 2.3.

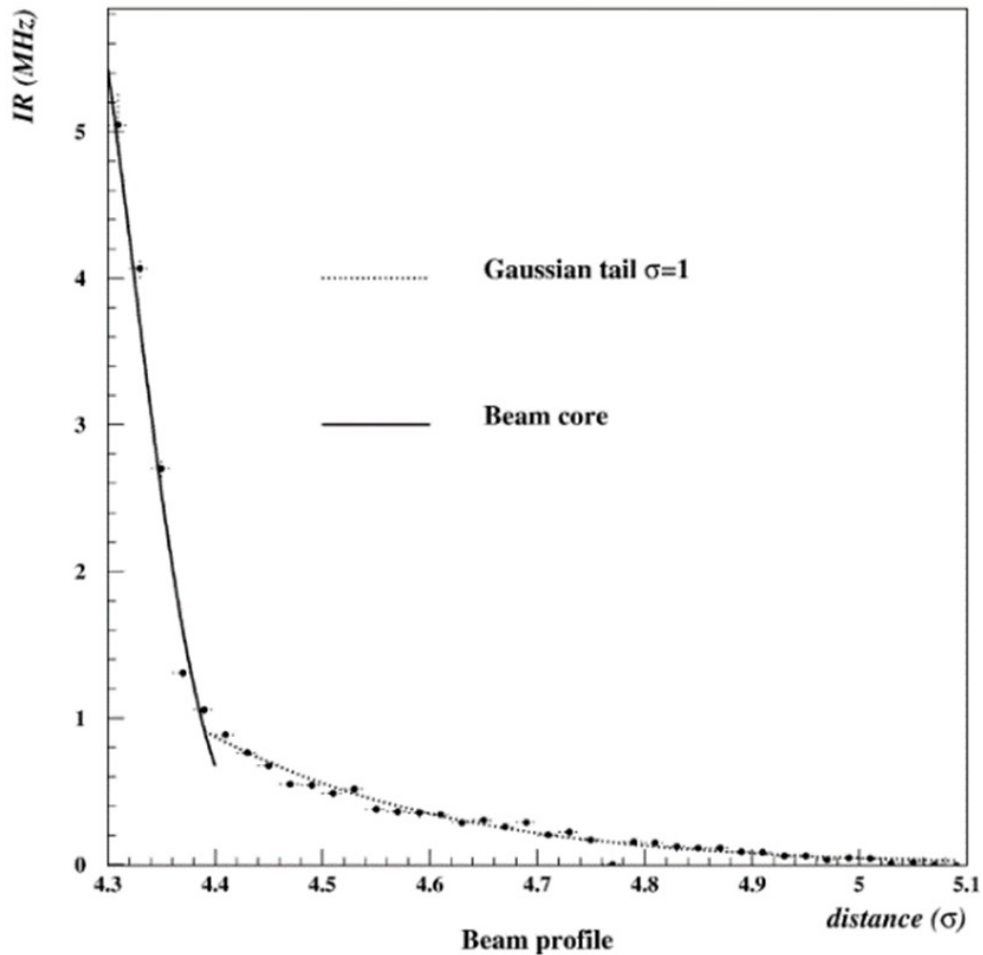


Рис. 2.3 – Профіль пучка протонів з енергією 0,92 TeV, вимірний в області його взаємодії з ядрами фіксованої мішені експерименту HERA-B [111]. По осі X – відстань під центру пучка, по Y – відгук на пучок протонів. Рисунок взято з [112].

Важливо відзначити, що саме застосовуючи спеціальний режим формування пучка (квадрупольні лінзи, beam kickers, бета-функцію з параметром $\lambda = 5$ м тощо) дозволили одержати просторовий розподіл інтенсивності протонів з двома компонентами. Перша його частина, кор пучка, зображена прямою лінією, відображує різке зростання інтенсивності для відстаней менших за $4,4\sigma$ розподілу Гауса ($\sigma = 500$ мкм).

Очевидно, що в цій частині пучкового простору важко забезпечити стабільність частоти ядерних взаємодій, номінальне значення якої було встановлено на рівні $(10 \pm 0,5)$ МГц. Інша справа – область відстаней більших за $4,4\sigma$, область сформованого гало пучка. Саме в цій області й розташовувались внутрішні мішені у вигляді металевих стрічок з розміром 50 мкм \times 500 мкм (500 мкм вздовж напрямку пучка, 50 мкм – перпендикулярно до його осі). Стабільна робота підтримувалась протягом повного циклу заповнення протонами кільця HERA (8 -12 годин).

Схожий принцип розробляється і в рамках даного проекту з різними модифікаціями мішенного вузла. Принциповою відмінністю пропонованого нами режиму фіксованої мішені є використання в якості внутрішніх мішеней надтонких (від 1 мкм до 5 мкм) металевих мікростріпових детекторів, виготовлених за унікальною технологією ІЯД НАН України [112].

Розглянуто декілька варіантів практичної реалізації мішенного комплексу. Перший з них – це повна аналогія установки, яка була створена для експерименту HERA-B. На рисунку 5 схематично представлено принцип та реалізація мішенного комплексу, а також ілюстрація його функціонування в режимі фіксованої мішені з 8-ма металевими мішенями, одночасно введеними в гало пучка.

Зліва на рисунку 2.4 представлено схематичне зображення розташування мішеней в гало циркулюючого пучка протонів з енергією $0,92$ ТеВ. Посередині – схема поперечного розрізу високовакуумної камери вершинного детектора, в правій частині якої розташовано власне мішенний комплекс із механічними

приводами для введення восьми мішеней в гало пучка кроковими двигунами з точністю біля 0,1 мкм. Справа – зображення густини розподілу первинних вершин, реконструйованих вершинним детектором в експозиції з 8-ми мішенями, введеними в гало пучка одночасно.

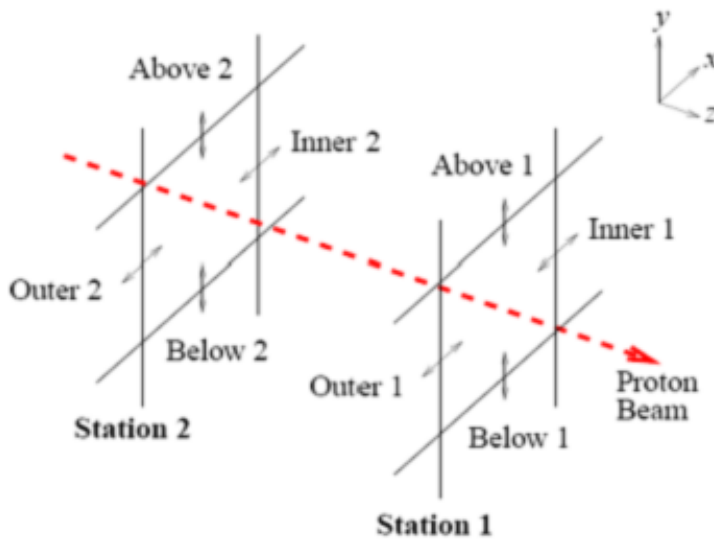
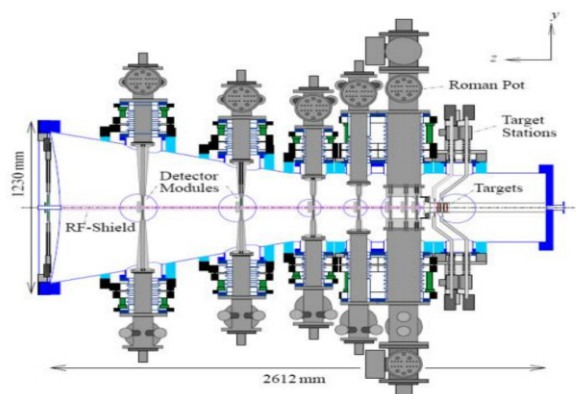


Рис. 2.4а – Схематична реалізація мішенного комплексу за дизайном експерименту HERA-B. На перпендикулярних площинах до осі пучка розташовані фіксовані мішені.



HERA-B Vertex Detector System – 8 Targets setup. Physics @ Techniques
[C. Hast](#), [K. Ehret](#), [W. Hofmann](#), [S. Khan](#), [K.T. Knöpfle](#), [M. Reber](#), [J. Rielling](#), [M. Spahn](#), [J. Spengler](#), [T. Lohse](#), [V. Pugatch](#),
 NIM A354 (1995), p.224-248

Рис. 2.4б – Схема встановлення мішенного комплексу в експерименті HERA-B. На рисунку безпосередньо сам HERA-B та зображення станції фіксованих мішеней та зображення мішеней навколо пучка.

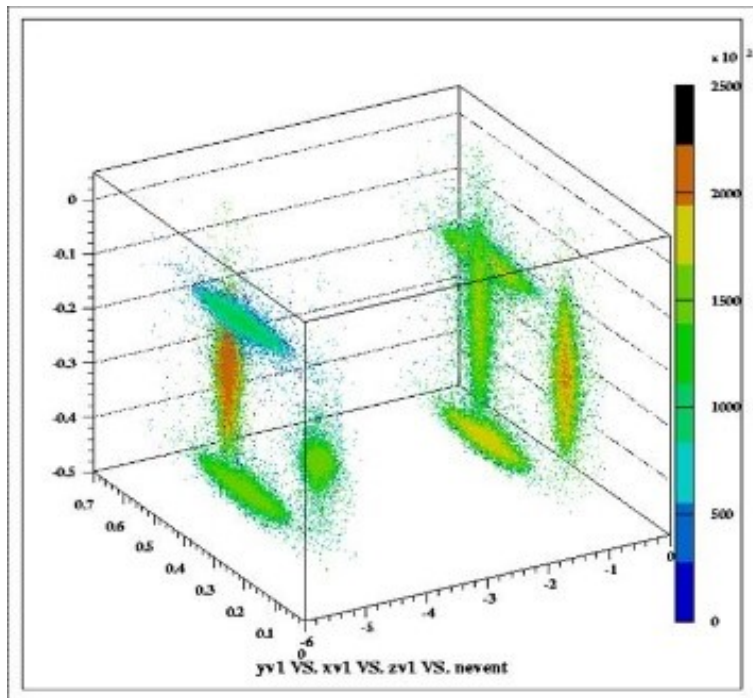


Рис. 2.4в Результати зіткнення протонного пучка з фікованими мішенями в експерименті HERA-B. По осям X, Y, Z – координати простору, кольором – кількість зіткнень протонного пучка з мішенями. Рисунки взято з [110].

Як можна бачити з рисунка 4.20, це складна технічна споруда, до сих пір єдина в світі, яка забезпечила успішне виконання досліджень ядро-ядерних зіткнень в режимі фіксованої мішені (одночасно на 8-ми мішенях) в експерименті HERA-B протягом 1998-2003 рр. Над її створенням працювало понад 20 інженерів і техніків, а її експлуатацію забезпечувала так звана “мішенна група” в складі 8 фахівців (троє з них – з ІЯД НАН України).

Для експерименту LHCb ми розглядаємо можливість створення набагато компактнішої системи з використання найвищих досягнень у техніці високовакуумних механічних пристроїв для маніпуляцій з мішенями у вигляді мікροстріпових металевих детекторів.

Як варіант для обговорення та узгодження у Раді Технічної координації LHCb пропонується встановити механічні пристрої для руху мішеней в області 4-5 станцій вершинного детектора VELO (див. рис. 2.5).

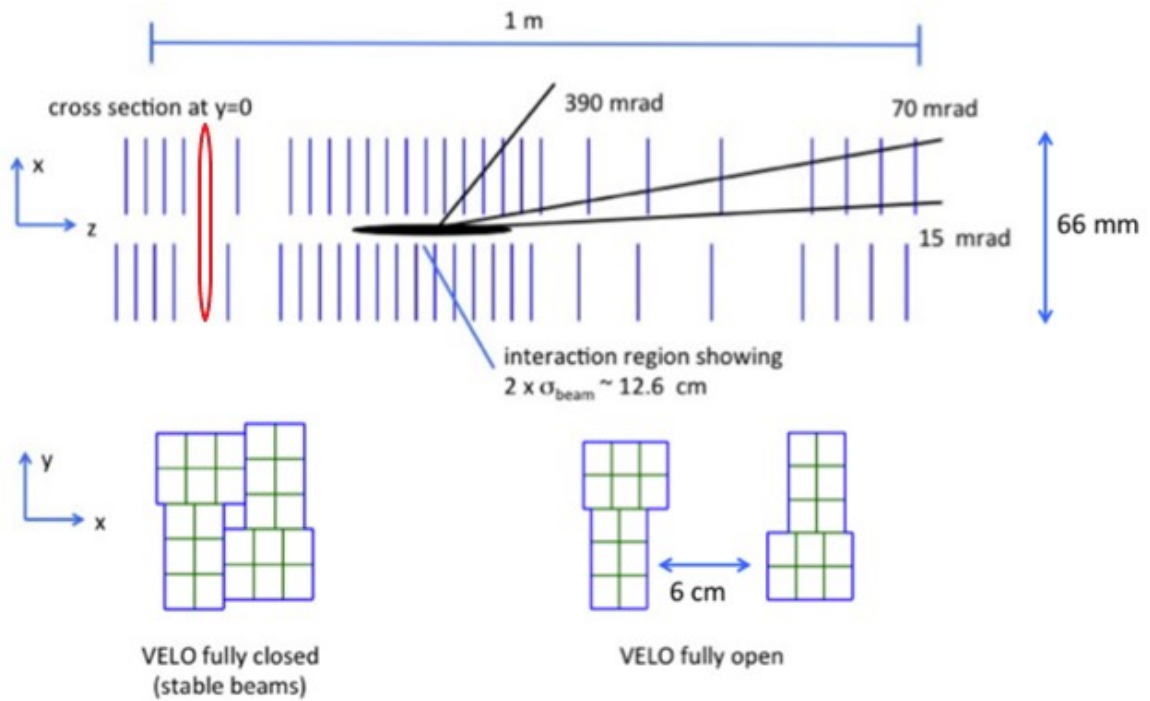


Рис. 2.5 – Схема оновленого для серії експериментів RUN3 (2021-2024) дизайну вершинного детектора VELO з використанням мікропиксельних детекторів. Пропонується встановлення механічних пристроїв з мішенями в районі після 4х станцій VELO зліва (позначено червоним овалом). Рисунок взято з [113].

Вигідним рішенням інтеграції мішенного комплексу може бути застосування існуючих в конструкції VELO рухомих платформ із закріпленням на них кремнієвих пластин, які підтримують зроблені на їх поверхні металеві мікροстріпові сенсори. Рисунок 2.6 ілюструє таку конструкцію мішенного елемента з металевим мікροстріповим сенсором зі змінним кроком металевих (нікель) стріпів товщиною 2 мкм (відстань між сусідніми стріпами змінюється від 2 мкм до 100 мкм). Наявність стріпів зі змінним кроком дозволяє здійснити калібровку просторової роздільної здатності VELO детекторного комплексу.

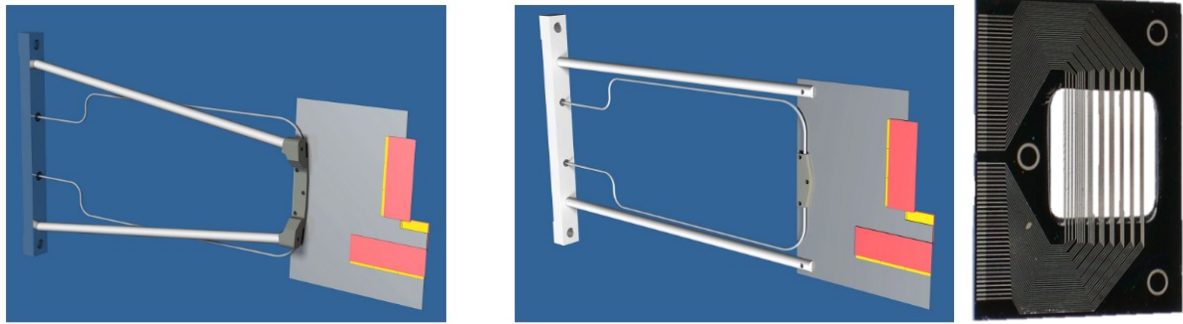


Рис. 2.6 – Варіант встановлення мікстріпового металевго сенсора (вставка справа) на існуючій рухомій платформі VELO в області 3-ї, 4-ї станції. Сенсор кріпиться на тримачі, що будуть управлятися за допомогою крокових двигунів.

Елегантним було б розташування мініатюрних металевих мікстріпових сенсорів на поверхні захисного корпусу VELO. Введення металевих стрічок в гало пучка можна здійснювати мініатюрним кроковим двигуном, придатним для функціонування в умовах над високого вакууму. Один із таких крокових двигунів (HR4-U) [114] має високі характеристики (швидкість руху – 250 мм/с, роздільна здатність кроків – 100 нм, функціонує в умовах надвисокого вакууму UHV – 10^{-10} мбар). Ми плануємо застосувати його в прототипі мішенного комплексу для режиму фіксованої мішені LHCb в пілотному експерименті в ЦЕРН, на накопичувальному кільці SPS в рамках наступного етапу робіт за проектом HFDU.

У ЦЕРН розглядається кілька проектів створення режиму фіксованої мішені, серед них, схожий із нашим проектом варіант AFTER (AFixedTargetExperiment), запропонований для експерименту ALICE [115]. За висновком авторів проєкт AFTER потребує значних зусиль для розміщення необхідної техніки і потребує значних фінансових витрат.

Визначено оптимальні характеристики режиму фіксованої твердотільної мікстріпової мішені, що мають задовольняти умови досягнення номінального значення миттєвої світності оновленого експерименту LHCb

порядку $10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ при прийнятному часі життя (8-16 годин) пучка Великого Адронного Колайдера. Використання в якості мішені ММД дозволяє забезпечити високу стабільність миттєвої світності експерименту, застосувавши їх сигнали для системи управління кроковими двигунами динамічної підтримки мішені в гало пучка. Додаткові сигнали управління положенням мішені в гало пучка будуть надходити від спеціально створеної системи (RMS-R4) моніторингу положення пучка та фону від коліматорів ВАК. Перш за все, ця система призначена для запобігання аварійному підвищенню радіаційних навантажень на детекторні підсистеми та надпровідні магніти ВАК. Функціонально сигнали RMS-R4 в залежності від їх величини можуть спричинити поступове виведення мішені на безпечну відстань від осі пучка ВАК або подати команду на миттєве знищення мішені. Система RMS-R4 буде розроблена за технологією металевих фольгових детекторів, створеної в ІЯД НАН України, застосованої нещодавно для виготовлення оновленої системи радіаційного моніторингу RMS-R3 для наступної серії експериментів на ВАК (RUN3, 2022-2024 pp.). Для забезпечення довготривалої стабільності відгуку і підвищеної чутливості завдяки збільшеному виходу вторинних електронів у порівнянні із міддю сенсори системи RMS-R4 буде виготовлено із позолоченої мідної фольги товщиною 50 мкм.

§2. Оцінки частот потрійних ядерних зіткнень

Для попередніх оцінок розглянемо ідеалізовану систему з неплаваючою мішенню. Крім того, припустимо, що досягнуті швидкості взаємодії не насичують детектор і не впливають на надпровідні магніти. Номінальну миттєву світність двох протонних пучків ВАК взято як $L = 10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для енергії зіткнень $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$, що є значенням, яке очікується досягти як першочергова мета колаборацій ATLAS та CMS колаборацій на ВАК [116]. Згідно з [116, 117], число протонів на пучок $n_b = 2.2 \cdot 10^{11}$ 1/пучок, число пучків

у пучку $N_{\text{bunch}} = 2.8 \cdot 10^3$ при частоті обертання $n = 1.1245 \cdot 10^4$ Гц, номінальному коефіцієнті зменшення світності $S = 0.835$ і поперечному розмірі пучка (гаусове стандартне відхилення розміру пучка) $R \sim 7$ мкм. Тут ми будемо вважати, що радіуси і всі інші властивості кожного пучка однакові. Далі можна визначити поздовжній розмір $|AD|$ зони взаємодії пучків А і В (див. рисунок 2.7) за допомогою наведених вище оцінок для R . Наближено можна отримати

$$|BC| = \frac{2R}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \sim 2R, \quad (2.2)$$

$$|AB| = |BD| = \frac{2R}{\sin(\alpha)} \sim \frac{2R}{\alpha}, \quad (2.3)$$

$$|AD| = \frac{2R}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \sim \frac{4R}{\alpha} = 2|AB|, \quad (2.4)$$

оскільки стандартний кут перетину пучка для ВАК $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$ рад малий [117]. Оцінюючи ці вирази, отримуємо $|AD| \sim 5.6$ см і $|AB| = |AC| = |CD| \sim 2.8$ см.

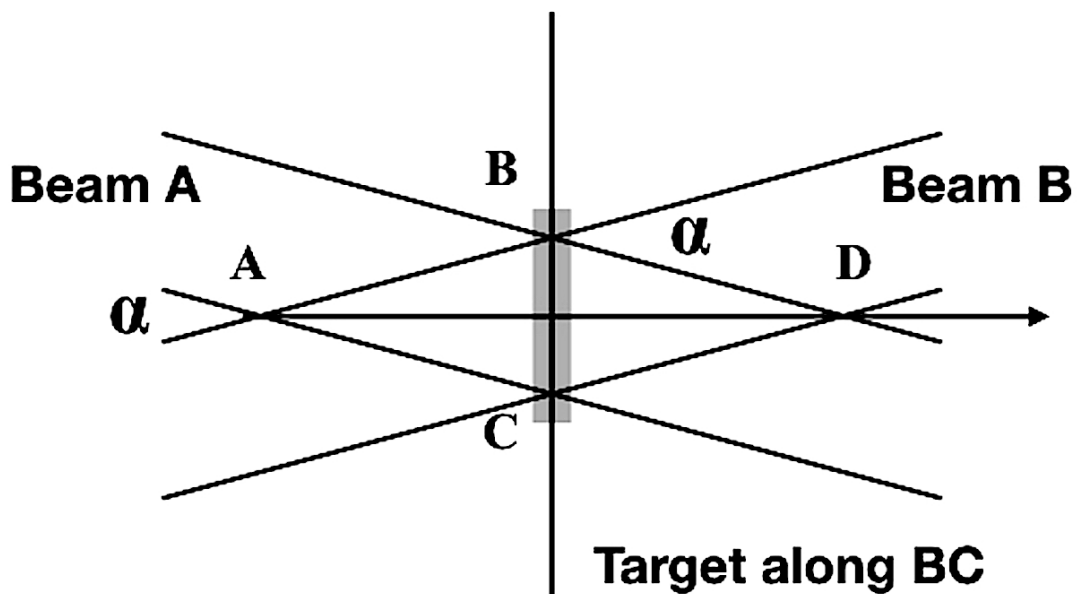


Рис. 2.7. Схематичне зображення об'єму взаємодії (перетину) двох однакових променів А і В радіуса R . Кут між променями $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$ рад [117] і $|BC| \sim 2R$. В середині цього об'єму стовпчиками показано традиційне розташування мішеней, про яке йтиметься нижче.

Для повноти викладу розглянемо вуглецеву мішень з густиною $\rho = 2.2 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, як показано на рисунку 2.7, яка розташована перпендикулярно до об'єму взаємодії двох пучків, що зіштовхуються, з геометричною товщиною l_g в декілька мкм, яку ми вимірюємо вздовж лінії $|AD|$. Загальна кількість протонів, випромінюваних обома пучками, що потрапляють на мішень за одну секунду, становить $\frac{dN_p}{dt} \sim 2n_b N_{bunch} v = 1.4 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1}$

Оскільки молярна маса вуглецю M дорівнює 12 г/моль , а N_A позначає число Авогадро, то для мішені з геометричною товщиною $l_g = 3,32 \text{ мкм}$ знаходимо, що товщина мішені становить $t_c \sim l_g \cdot \rho \cdot N_A / M \sim 3,65 \cdot 10^{19} \text{ атомів} \cdot \text{см}^{-2}$. Отже, кількість бінарних $p+C$ зіткнень за секунду, що їх створюють два пучки протонів, дорівнює

$$\frac{dN_{p+C}}{dt} \sim \frac{dN_p}{dt} t_c \sigma_{p+C} \sim 5.1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1} \quad (2.5)$$

де для типових енергій ВАК непружний переріз $p+C$ зіткнення приймаємо рівним $\sigma_{p+C} \sim 100 \text{ мб} \sim 10^{-25} \text{ см}^2$. Слід зазначити, що наше припущення про вибраний непружний переріз $\sigma_{p+C} \sim 100 \text{ мб}$ узгоджується з геометричною оцінкою для перерізу

$$\sigma_{A+T} \sim \sigma_{p+C} \left[\frac{A^{\frac{1}{3}} + T^{\frac{1}{3}}}{1^{\frac{1}{3}} + 12^{\frac{1}{3}}} \right]^2 \quad (2.6)$$

яка є спрощеною версією геометричних формул [118], що описують зіткнення $p+p$, $p+A$ та $A+B$. Дійсно, використовуючи рівняння (2.6) для $A = 1$ і $T = 1$ і приймаючи непружний переріз $p+p$ як $\sigma_{p+p} \sim 35 \text{ мб}$ при енергії зіткнення $\sqrt{s_{pp}} \sim 63 \text{ ГеВ}$ [119], можна отримати $\sigma_{p+C} \sim 2.7 \sigma_{p+p} \sim 94.5 \text{ мб}$, що приблизно відповідає енергії протонного пучка для експерименту з нерухомою мішенню.

Припускаючи, що протони з пучків А і В наближаються до ядра мішені Т і один до одного, як показано на рисунку 2.8, розглянемо потрібні ядерні зіткнення $p+C+p$ як $p+r$ зіткнення, що відбуваються всередині вуглецевої мішені з часовою затримкою $t_{del} \leq 10$ фм/с і позначимо відстані протонів А і В від поверхні ядра Т як λ_A і $t_{del} - \lambda_A$, відповідно. Згідно з розрахунками, така затримка не призведе до суттєвої різниці в кінцевому стані порівняно з одночасним ПЯЗ. Для заданої затримки можна знайти середню відстань між частинками пучків А і В: $D_{AB} = 2R_T + t_{del}/2$, змінюючи відстань λ_A в межах від 0 до t_{del} з однаковою ймовірністю. Очевидно, ту саму середню відстань $D_{AB} = 2R_T + t_{del}/2$ між частинками пучків А і В можна отримати, якщо усереднити положення ядра В за тих самих умов.

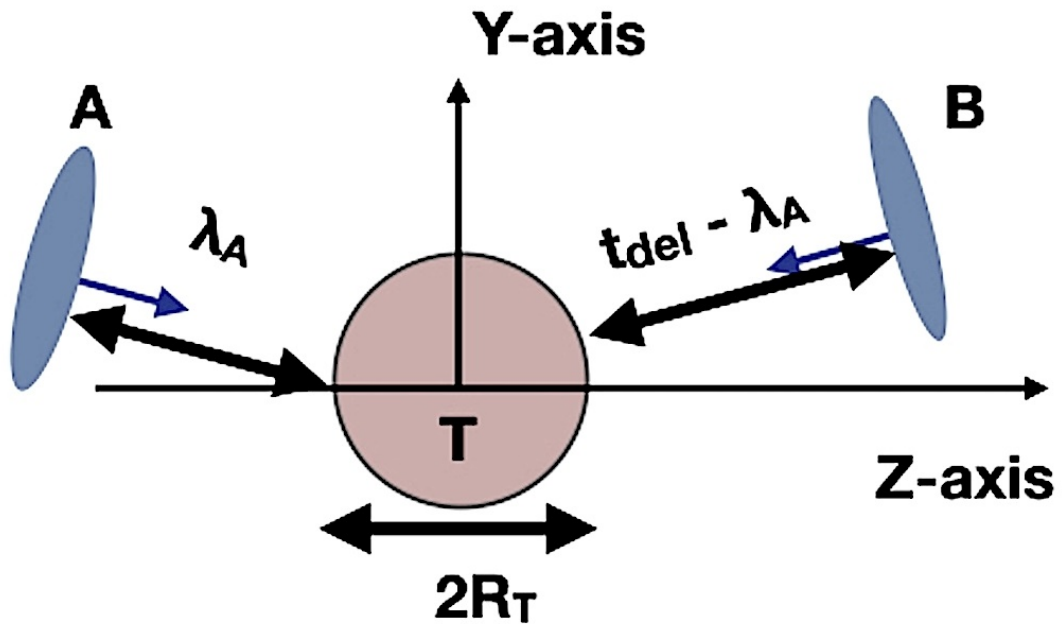


Рис. 2.8. Схема процесу взаємодії двох ядер А і В, що зіштовхуються, з ядром мішені Т з геометричними радіусами R_A , R_B і R_T відповідно. Об'єм взаємодії $V_{T \in A+B}^{int}$ визначається відстанню між поверхнями ядер А і В, яка дорівнює $2R_T + t_{del}$, та максимальними геометричними розмірами ядер А і Т. Для такої конфігурації ядер ПЯЗ відбудеться з імовірністю, що дорівнює 1. Середнє значення для $V_{T \in A+B}^{int}$ отримано усередненням за відстанню λ_A між поверхнями ядра А і мішені Т. Аналогічне усереднення за положенням ядра В також виконується відповідно.

З рисунка 2.8 видно, що ПЯЗ $p+C+p$ з часовою затримкою $t_{del} \leq 10$ фм може відбутися у випадку деякого ненульового числа ядер-мішеней, присутніх в об'ємі взаємодії трьох ядер $V_{T \in A+B}^{int} \sim \pi [(\max\{R_A; R_T\})^2 + (\max\{R_B; R_T\})^2] \cdot D_{AB}$. Для заданої густини мішені ρ_T можна отримати кількість ядер мішені, що входять у взаємодіючий об'єм $V_{T \in A+B}^{int}$, як $N_{T \in A+B}^{int} = \rho_T V_{T \in A+B}^{int}$. Звідси, очікувана частота ПЯЗ має вигляд

$$\frac{dN_{A+T+B}}{dt} \sim L \sigma_T \rho_T V_{T \in A+B}^{int} \frac{V_T^{irad}}{V_{beams}} \quad (2.7)$$

де перші два множники в правій частині відповідають стандартній швидкості подвійних зіткнень $A+B$. Необхідно підкреслити, що рівняння (2.7) дає частоту ПЯЗ для розташування мішені, показаного на рисунку А1, тобто для розташування вздовж лінії $|BC|$ на рисунку А1. Об'єм мішені, опроміненої пучками, дорівнює $V_T^{irad} \sim \pi R^2 l_g$, тоді як об'єм взаємодії двох пучків дорівнює $V_{beams} \sim \pi R^2 |AD| \sim 4\pi R^3 \sin^{-1}(\alpha)$. Зменшувальний множник $\frac{V_T^{irad}}{V_{beams}}$ у рівнянні (2.7) враховує той факт, що лише частина подвійних реакцій між частинками пучка відбувається всередині мішені. Для спрощення розрахунків вважається об'єм взаємодії пучків циліндром радіусом R і висотою $|AD|$. Для геометричної товщини мішені $l_g = 3.34$ мкм отримуємо наступний результат

$$\frac{V_T^{irad}}{V_{beams}} \sim \frac{l_g \sin(\alpha)}{4R} = 0.57 \cdot 10^5 \quad (2.8)$$

Приймаючи радіус ядра A нуклонів рівним $R_A \sim 1.25 - A^{1/3}$ фм [120], для традиційного розташування мішені можна отримати частоту ПЯЗ $p+C+p$ як

$$\frac{dN_{p+C+p}}{dt} \sim 4.8 \cdot 10^{-9} c^{-1}, \quad (2.9)$$

де непружний переріз $p+p$ BC приймався рівним $\sigma_{pp} = 35$ мб [119], а $\rho_C V_{C \in p+p}^{int} \sim 6 \cdot 10^4$ нукл.

Хоча результат рівняння (2.9) відповідає низькій швидкості зіткнень, а, отже, недостатній кількості подій за одиницю часу, можна побачити, що через кілька років вона може бути значно покращена, якщо використовувати нові типи мішеней (Розділ 3).

Наприклад, найпростіший спосіб збільшити частоту реакції ПЯЗ - розташувати мішень у такий нетрадиційний спосіб, щоб вона повністю заповнювала об'єм взаємодії двох пучків, що зіштовхуються (на рисунку 2.1 вона має бути розташована вздовж лінії |AD|). У цьому випадку для її геометричної товщини $l_g = |BC| \sim 3.34$ мкм коефіцієнт $\frac{V_T^{irad}}{V_{beams}} = 1$ не пригнічує частоту реакції і замість рівняння (2.9) знаходимо

$$\frac{dN_{p+c+p}}{dt} \sim 2 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}, \quad (2.10)$$

що є суттєво вищим порівняно з результатом рівняння (2.9). Цей результат є більш оптимістичним, оскільки проліт частинок пучка в такому випадку становить $\lambda_p \sim |AC| \sim 2.8$ см і, отже, товщина мішені стає $t_c \sim l_g \cdot r_c \cdot N_A/M \sim 3,1 \cdot 10^{31}$ атомів \cdot см².

Тепер розглянемо загальний тип зіткнень А+Т+В. Геометрично, непружний переріз зіткнень А+Т можна приблизно виразити через переріз р+С згідно з рівнянням (2.6). Слід зазначити, що це спрощена версія геометричних перерізів, які пов'язують р+р, р+А і А+В зіткнення, наведених у роботі [118]. Приймаючи значення світності Рб пучків $L = 10^{28}$ см⁻²с⁻¹, можна отримати частоту ПЯЗ Рb+Рb+Рb з рівнянь (2.6) і (2.7) у вигляді

$$\frac{dN_{3Pb}}{dt} \sim 10^{28} \cdot 1.3 \cdot 10^{-24} \cdot 2.25 \cdot 10^{-13} \frac{V_T^{irad}}{V_{beams}} \sim 2.4 \cdot 10^{-11} \text{ c}^{-1} \quad (2.11)$$

$$\frac{dN_{3Pb}}{dt} \sim 10^{28} \cdot 1.3 \cdot 10^{-24} \cdot 2.25 \cdot 10^{-13} \frac{V_T^{irad}}{V_{beams}} \sim 3.4 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1} \quad (2.12)$$

Де 2.11 для традиційного розташування мішені, 2.12 – для нетрадиційного. Значення геометричної товщини свинцевої мішені $l = 3,34$ мкм, $\sigma_{Pb+Pb} \sim 1,3 \cdot 10^{-24}$ см² і густини свинцю $\rho_{Pb} \sim 11,4$ г/см³, а відношення об'ємів $\frac{V_T^{irad}}{V_{beams}}$ взято з рівняння (2.8) для традиційного розташування мішені (як показано на рисунку 2.1) і $\frac{V_T^{irad}}{V_{beams}} = 1$ для нетрадиційного способу розташування мішені (уздовж лінії |AD| на рисунку 2.8.).

Висновки до розділу 2

Отримані результати, що були представлені в цьому розділі, були описані в публікаціях [100].

У цьому розділі розглянуто ключові аспекти розробки фіксованої металевої мікромішені для експериментів з фізики високих енергій. Проаналізовано переваги використання твердотільних мікростріпових мішеней порівняно з газовими, зокрема можливість дослідження ширшого кола ядер та унікальних фізичних явищ. Розглянуто різні концепції реалізації режиму фіксованої мішені, включаючи надтонкі графенові мішені, обертові мішені та струменеві мікропорошкові мішені. Запропоновано використання металевих мікростріпових детекторів як мішеней. Проведено оцінки частот потрібних ядерних зіткнень для різних конфігурацій мішеней та пучків. Показано, що нетрадиційне розташування мішені вздовж об'єму взаємодії пучків може суттєво підвищити частоту зіткнень. Розглянуто технічні аспекти інтеграції мішенного комплексу в існуючі детекторні системи. Загалом, представлено комплексний аналіз фізичних та технічних аспектів реалізації режиму фіксованої металевої мікромішені для експериментів на прискорювачах.

Розділ 3. Монте-Карло симуляції для встановлення мішенного комплексу

§1 Прототип мішенного вузла

Нижче представлена ідея прототипу мішенного вузла – мішенного комплексу із надтонкими мікростріповими мікромішенями із застосуванням MEMS (мікроелектромеханічна система) технологій, що забезпечуватимуть мікронний рух з нанометровою точністю, та крокових двигунів, що забезпечуватимуть міліметровий рух з мікронною точністю. На рис. 3.1 MEMS технологія представлена п'єзоелектричним кристалом, який може розширюватись на 5-10 мікрон/вольт з нанометровою точністю. На кінець MEMS прикріплюється тримач, на якому розташовуються мішені у вигляді мікростріпових мішеней товщиною та шириною 1 мікромметр та довжиною до 1 сантиметру. Надтонкі мікростріпові мішені базуються на технології металевих мікростріпових детекторів (ММД) [101, 104, 105].

Принцип управління мішенню представлений на рис. 3.1. Система керується за допомогою крокових двигунів та MEMS приводів, і при цьому система радіаційного моніторингу RMS-R4 у лінії зворотнього зв'язку відіграватиме роль сенсора руху мікромішені у гало пучка. Окрім вказаних вище вимог щодо мішенного пристрою, крокові двигуни повинні задовольняти таким вимогам:

- підходять для використання при тиску нижче 1×10^{-10} мбар ($7,5 \times 10^{-11}$ торр);
- безперервна робота у вакуумі з високим крутним моментом і частотою кроків;
- кут кроку $1,8^\circ$;
- допуск на кут кроку $\pm 5\%$;
- діапазон робочих температур від -65°C до $+175^\circ \text{C}$;
- вбудована термопара або датчик PT100;
- відкриті гібридні керамічні підшипники, змащені УВВ-мастилом;

- доступна опція криогенної розширеної робочої температури, діапазоном від -196°C до $+175^{\circ}\text{C}$;
- доступні версії з гамма-випромінюванням 1×10^6 Гр;
- доступна опція з керамічних підшипників із сухим змащенням (дисульфід вольфраму) з гібридом нітриду кремнію;
- доступні індивідуальні модифікації валів.

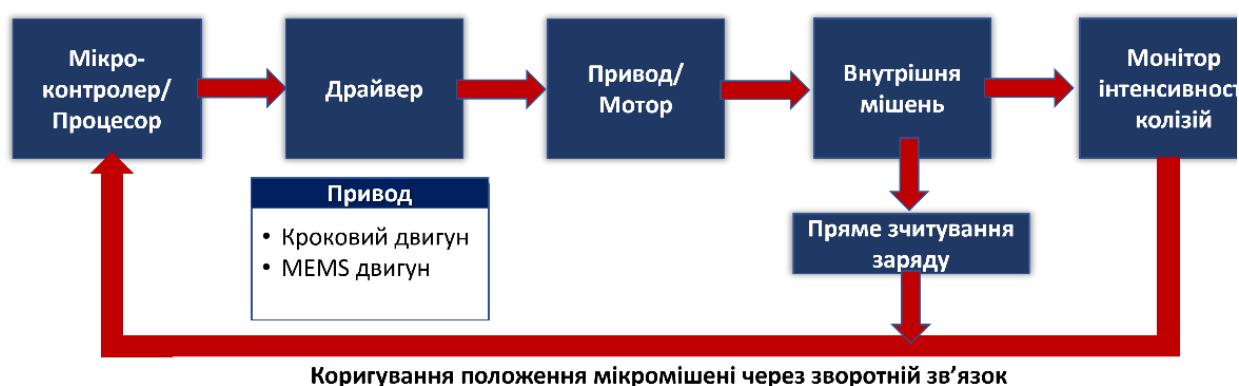


Рис. 3.1 – Загальний принцип до системи управління мікромішенню. Мікроконтролер зчитує дані заряду та дані від монітору інтенсивності зіткнень (RMS-R4), вирішує яку кількість струму передавати управляючому елементу, який контролює мотор або MEMS привод та рухає мішень і збільшує/зменшує кількість вихідного заряду.

Вивчаючи детальніше використання крокових двигунів у систем позиціонування, було виконано одну з перших лінійних моделей, зображеної на рис. 3.2, де кроковий двигун загальними розмірами до 10 см відповідав за рух виделки з мішенями до кору пучка. При такій конструкції розміри мішеней (довжина до 1 см при ширині та товщині 1×1 мкм) значно перевищують розміри пучка (десятки мікрон). Однак лише система з кроковими двигунами не може забезпечити надвисоку (нанометрову) точність руху, тому було вирішено використовувати гібридну систему з MEMS технологіями та кроковими двигунами.

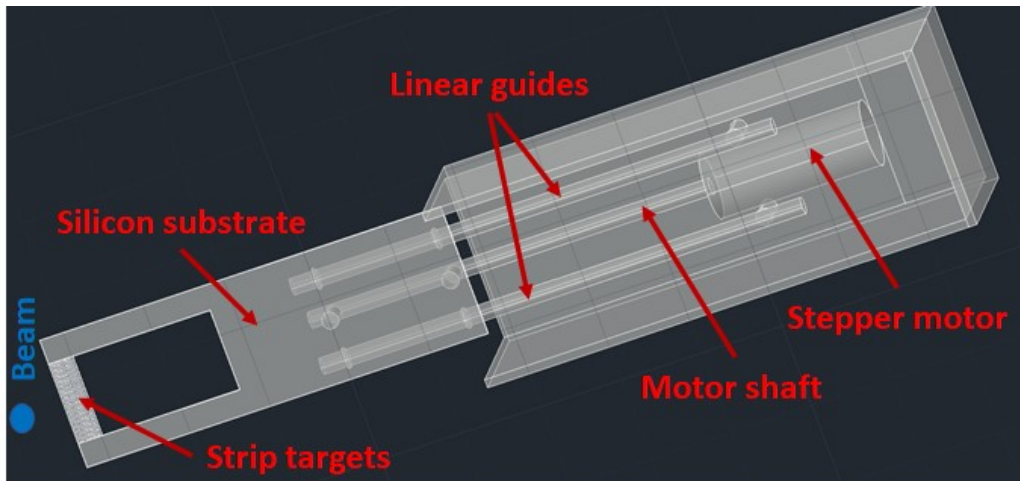


Рис. 3.2 – Ілюстрація дизайну лінійної моделі мішенного пристрою. Містить кроковий двигун, що рухає кремнієву підкладинку з мікростріпами на її кінці до кору пучка. Розмір конструкції до 5 см, що не більше за розмірами коробка з сірниками.

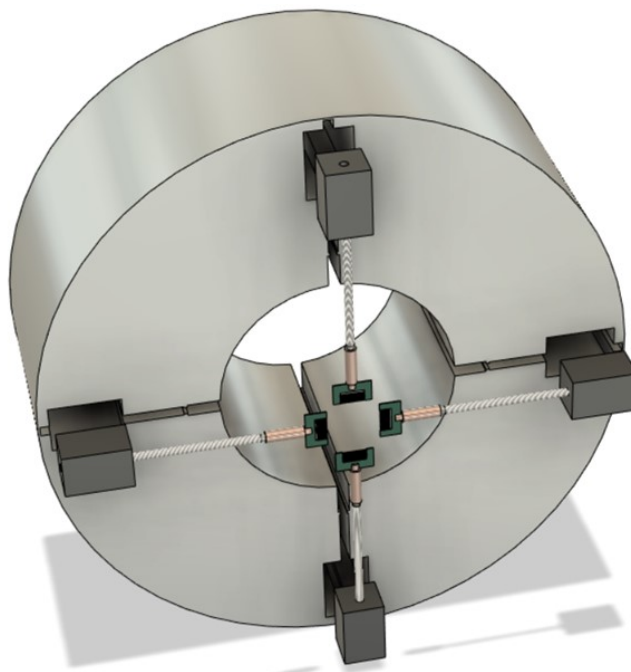


Рис. 3.3 – Модель компактного багатомішенного вузла SOFIT1 (Solid Fixed Target). На рисунку зображена частина, що імплантується до іонопроводу. По краям – мікродвигуни, що з 4х сторін рухають кремнієві підкладинки з напаяними мікростріповими мішеннями до пучка.

Дизайн прототипу мішенного вузла із декількома незалежними мікромішенями з гібридною системою лінійного механічного приводу на основі мініатюрних крокових двигунів та MEMS двигунів на основі п'єзокристалів представлено на рис. 3.3. Мікростріпові мішені базуються на технології металевих мікростріпових детекторів (ММД), створеної в ІЯД НАН України [101, 102, 115]. Розглядається встановлення компактного пристрою в іонопровід ВАК як його конструкційний елемент або його продовження у вакуумній камері вершинного детектора LHCb VELO на виході накопичувальної циліндричної комірки газової мішені (SMOG2) (рис. 3.4).

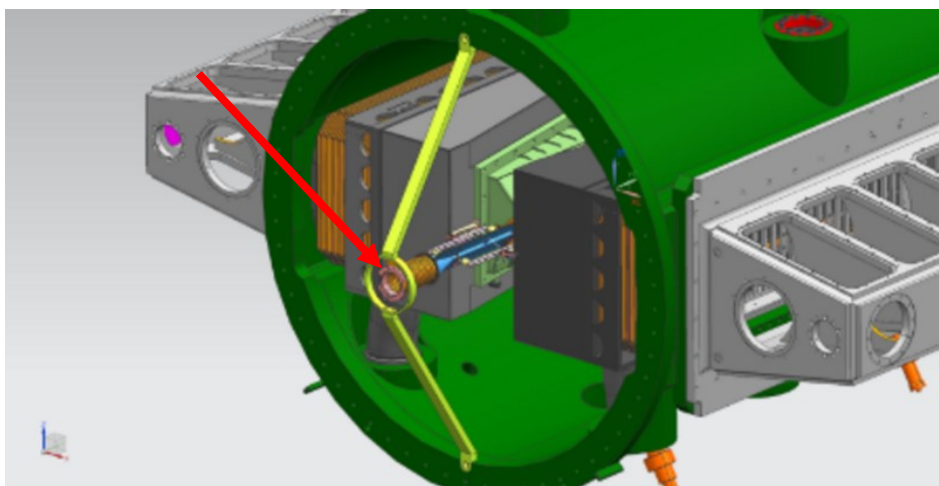


Рис. 3.4 – Вхід у вакуумну камеру VELO (стрілкою показано SMOG2) [110]. Сегмент іонопроводу планується встановити біля комірки SMOG2, куди показує стрілка. Рисунок взято з [121].

Ще одним прототипом мішенного вузла із декількома незалежними мікромішенями з гібридною системою лінійного механічного приводу на основі мініатюрних крокових двигунів та MEMS двигунів на основі п'єзокристалів є модель мішеней голко-подібного типу (Рис. 3.5). Металеві «голки» можуть рухатись «до осі» або «від осі» пучка індивідуальними

п'єзоелектричними (MEMS) мікро-двигунами для підтримки заданої частоти ядерних взаємодій відповідної мішені з пучком ВАК.

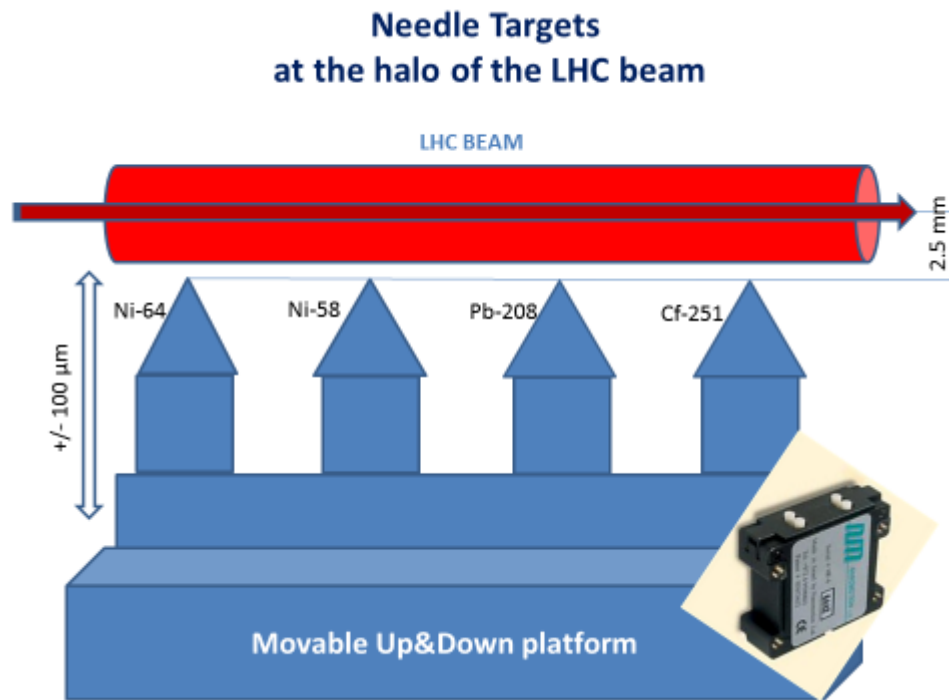


Рис. 3.5. Ілюстрація дизайну лінійної моделі мішенного пристрою з мішенями голко-подібного типу (в правому нижньому кутку – фото крокового двигуна, придатного для роботи в умовах надвисокого вакууму [109]. Металеві «голки» можуть рухатись «до осі» або «від осі» пучка індивідуальними п'єзоелектричними (MEMS) мікро-двигунами для підтримки заданої частоти ядерних взаємодій відповідної мішені з пучком ВАК.

Металеві «голки» можуть рухатись «до осі» або «від осі» пучка в залежності від величини заряду, спричиненого емісією вторинних електронів, вимірюваного високочутливими зарядовими інтеграторами для підтримки заданої частоти ядерних взаємодій відповідної мішені [110]. Така композиція мішеней націлена на дослідження в зіткненнях з ядрами пучка ВАК залежності спостережуваних величин (еліптичні потоки, мульти-диференційні поперечні

перерізи) від деформації початкових станів ядер, їх ізоспіну, наявності нейтронного гало тощо [104, 122].

§2 Монте-Карло симуляції та розрахунки температури для мішені в гало пучка ЛНС

Для розглядання перспектив застосування твердотільної стріпової(их) мішені(ей) в експерименті ЛНСб треба дослідити такі фізико-технічні характеристики нікелевої мікростріпової мішені (геометрія, положення відносно кору пучка), при котрих можлива її ефективна експлуатація в експерименті ЛНСб. З цією метою виконано теоретичний розрахунок світності в експерименті ЛНСб в режимі протон-протонних зіткнень (колайдерний режим) та в режимі протон-нікелевих зіткнень (режим фіксованої мішені). Оцінки порядку величини досягнутої світності порівнюються із Монте Карло симуляціями відповідних колізій.

Для кількісної оцінки роботи колайдерів застосовують таку характеристику як миттєва світність [123, 124]. Це величина, що вимірює здатність колайдера продукувати необхідну кількість взаємодій. Із формули (3.1) видно, що миттєва світність, \mathcal{L}_{inst} , є фактором пропорційності між інтенсивністю реакцій, $\frac{dR}{dt}$, або кількістю взаємодій (подій) за 1 с, та перерізом реакцій, σ_p :

$$\frac{dR}{dt} = \mathcal{L}_{inst} \cdot \sigma_p, \quad (3.1)$$

де \mathcal{L}_{inst} – миттєва світність або просто світність, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$;

σ_p – поперечний переріз реакції, см^2 .

Враховуючи, що розподіл протонів у банчі пучка характеризується нормальним розподілом, тоді за умови, що налітаючі пучки однакові ($\sigma_{1x} = \sigma_{2x}, \sigma_{1y} = \sigma_{2y}$, як показано на рис. 3.6 та рис. 3.7 та зазнають

центральної колізії, миттєва світність для колайдерного режиму розраховується за формулою (3.2):

$$\mathcal{L}_{inst} = \frac{N_1 N_2 f_{rev} N_b}{4\pi\sigma_x\sigma_y}, \quad (3.2)$$

де N_1, N_2 – кількість протонів (ядер) в одному банчі пучка 1 та 2;

$f_{rev} = 11,245$ кГц – частота обертання пучка в кільці ЛНС, c^{-1} ;

N_b – кількість банчів у пучку;

σ_x, σ_y – сигми профілів (проекцій) розподілу пучків, cm^2 .

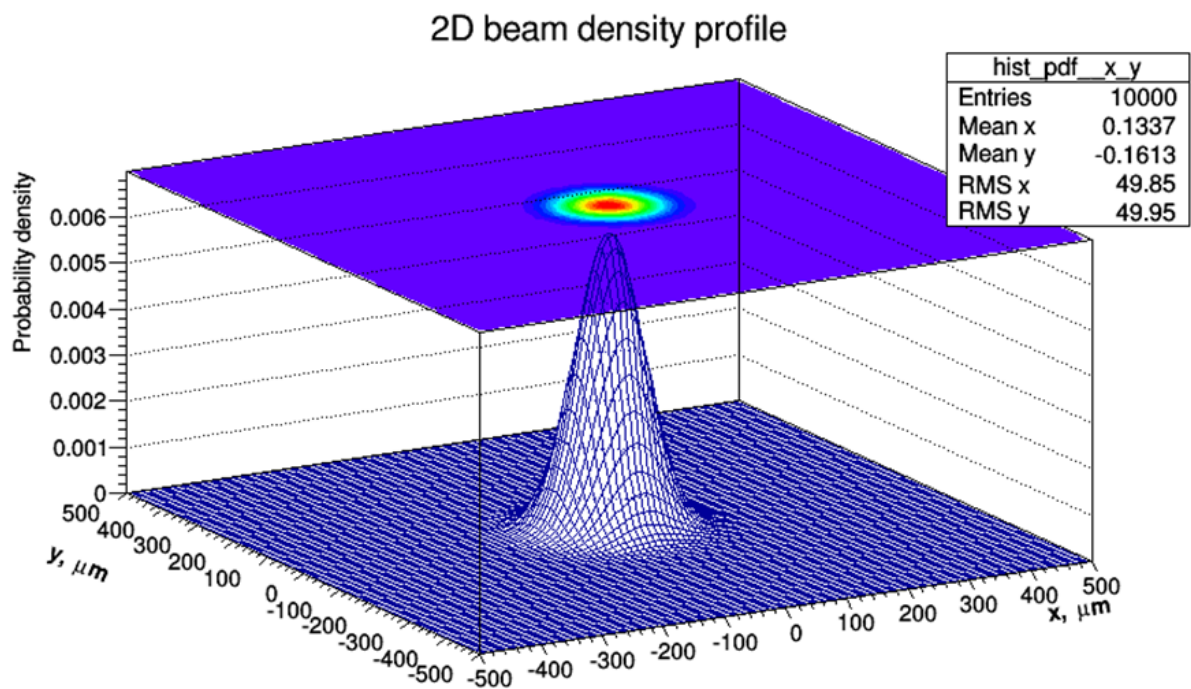


Рис. 3.6 – Функція густини ймовірності заповнення частинками банча пучка (модель). По осям X, Y – відстань у просторі у мкм, по Z – густина ймовірності. Зверху 2D версія цього графіку (проектування осі Z у колір).

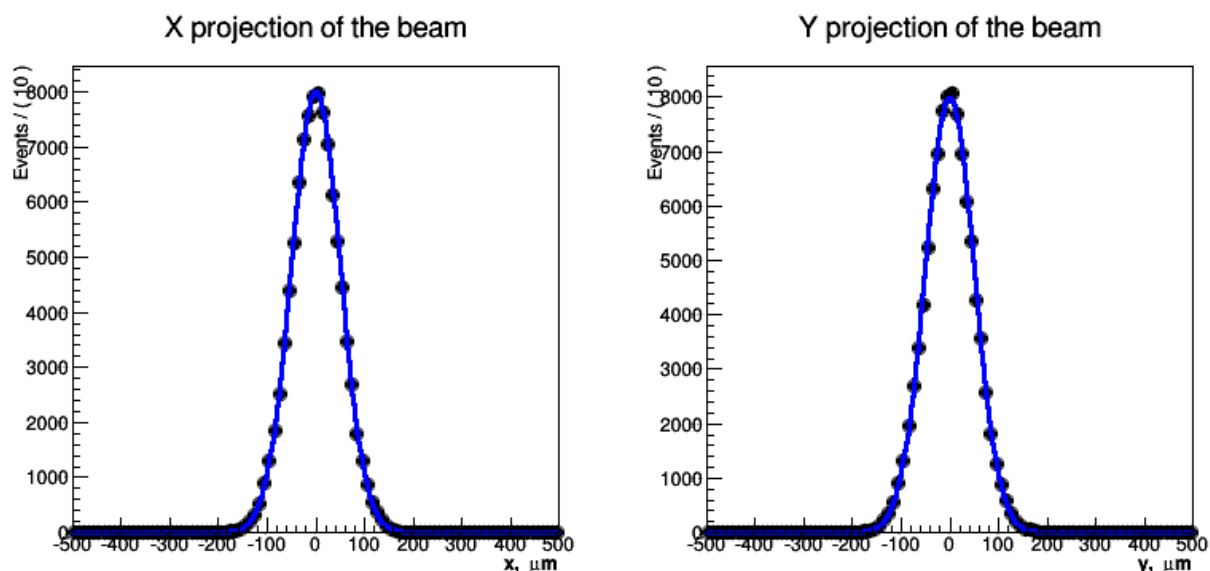


Рис. 3.7 –Профілі пучка на вісь x та y (модель). Сигми пучка по осі x та y взято близько 50 мкм. По осі X – відстані, по осі Y – кількість подій.

Натомість у режимі фіксованої мішені миттєва світність розраховується за формулою (3.3):

$$\mathcal{L}_{inst} = \Phi \cdot N_{target} = N_p N_b f_{rev} \Delta \cdot \frac{\rho V N_A}{M}, \quad (3.3)$$

де Φ – потік бомбардуючих мішень протонів (ядер), [част.] см⁻²с⁻¹;

N_{target} – кількість ядер у сегменті мішені, що взаємодіє з пучком;

N_p – кількість протонів (ядер) в одному банчі пучка;

N_b – кількість банчів у пучку;

f_{rev} – частота обертання пучка в кільці ЛНС, с⁻¹;

Δ – корекційний фактор для потоку у випадку надтонкої мішені;

ρ – густина мішені, г/см³;

V – ефективний об’єм мішені, що взаємодіє з пучком, см^2 ;

N_A – стала Авогадро, моль^{-1} ;

M – молярна маса для ядра мішені, г/моль .

Отже, підставляючи у формулу (3.2) такі параметри, як: $N_1 = N_2 = 1,15 \cdot 10^{11}$ (протонів), $f_{rev} = 11,245$ кГц, $N_b = 3557$ (банчів), $\sigma_x = \sigma_y = 50$ мкм, – отримуємо номінальну світність для центральних колізій:

$$\mathcal{L}_{inst}^{pp} \approx 1,7 \times 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \quad (3.4)$$

Розглянемо тонку нікелеву мішень (стріп) розмірами $1 \text{ мм} \times 2 \text{ мкм} \times 2 \text{ мкм}$ (довжина, ширина, товщина), поміщену в точці взаємодії експерименту LHCb (IP8) (рис. 3.9) в площині XY симетрично відносно на осі z пучка 1 LHC (див. рис. 4). За формулою (3.3) оцінимо максимально досяжну світність у такому режимі, беручи $N_p = 1,15 \cdot 10^8$ (протонів), $f_{rev} = 11,245$ кГц, $N_b = 1000$ (банчів), $\Delta = 0,02417$ (стандартні відхилення розподілу пучка $\sigma_x = \sigma_y = 50$ мкм), $V = 4 \times 10^{-9} \text{ см}^3$. Маємо:

$$\mathcal{L}_{inst}^{pNi} \approx 1,1 \times 10^{28} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \quad (3.5)$$

Порівняємо оцінки миттєвої світності, отриманого з Монте Карло симульованих даних, для колайдерного та фіксованого режимів.

Пучки ядер LHC мають певну структуру заповнення (організації) у кільці колайдера: попередньо прискорені у банчах ядра інжектуються до нього порціями у вигляді поїздів із вагонами. Тому в експерименті LHCb виділяють чотири типи зіткнення пучків: пучок-пучок (beam-beam), пучок-пустий вагон (beam-empty), пустий вагон-пучок (empty-beam), пустий вагон-пустий вагон (empty-empty). Рисунок 3.8 ілюструє, які фізичні події реєструються в субдетекторі VELO для таких типів колізій. VELO включає дві так звані Pile-Up станції, зображені ліворуч. Широкі стрілки (синя та червона) вказують напрямок зустрічних пучків LHC, що зіштовхуються у точці взаємодії

експерименту LHCb (IP8, позначено жовтою зіркою), а вузькі – можливий напрямок розльоту продуктів реакції колізій пучок-газ (зліва та справа) та пучок-пучок (всередині).

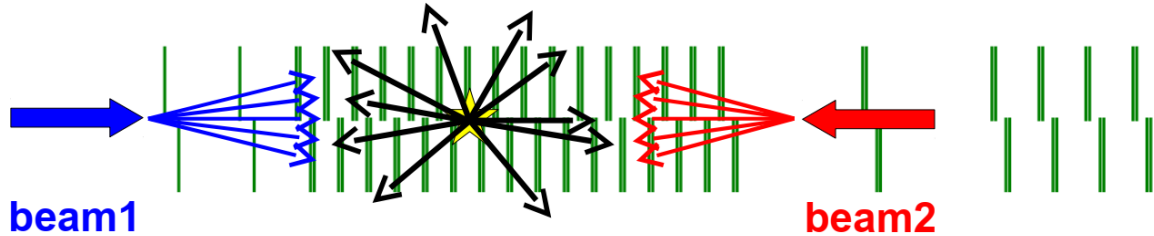


Рис. 3.8 – Схема вершинного субдетектора VELO експерименту LHCb [123]. Синіми та червоними лініями позначені пучки та напрями прольоту протонів або ядер свинця у пучках, зірочкою – область зіткнення пучків, чорними лініями – виліт продуктів зіткнення пучків. Зелені лінії – станції детектора VELO.

Використовуючи методи Монте Карло симуляцій, розроблених Колаборацією LHCb, було згенеровано по 10^4 фізичних подій для таких двох конфігурації колізій ядер:

- p-p:
 - при енергії в СЦМ двох нуклонів, $\sqrt{s_{NN}} = 14 \text{ TeV}$;
 - повний переріз p-p реакцій, $\sigma_{pp} = 101,5 \text{ mb}^{-1}$;
- p-Ni:
 - нікелева мішень (стріп) розмірами $1 \text{ мм} \times 2 \text{ мкм} \times 2 \text{ мкм}$ (довжина, ширина, товщина), розміщена в площині XY симетрично відносно на осі пучка LHC (осі z);
 - енергія протонів $E_p = 7 \text{ TeV}$, $\sqrt{s_{NN}} \approx 114 \text{ GeV}$;
 - повний переріз p-Ni реакцій, $\sigma_{pNi} = 155 \text{ mb}^{-1}$;
 - стандартні відхилення розподілу пучка $\sigma_x = \sigma_y = 33 \text{ мкм}$.

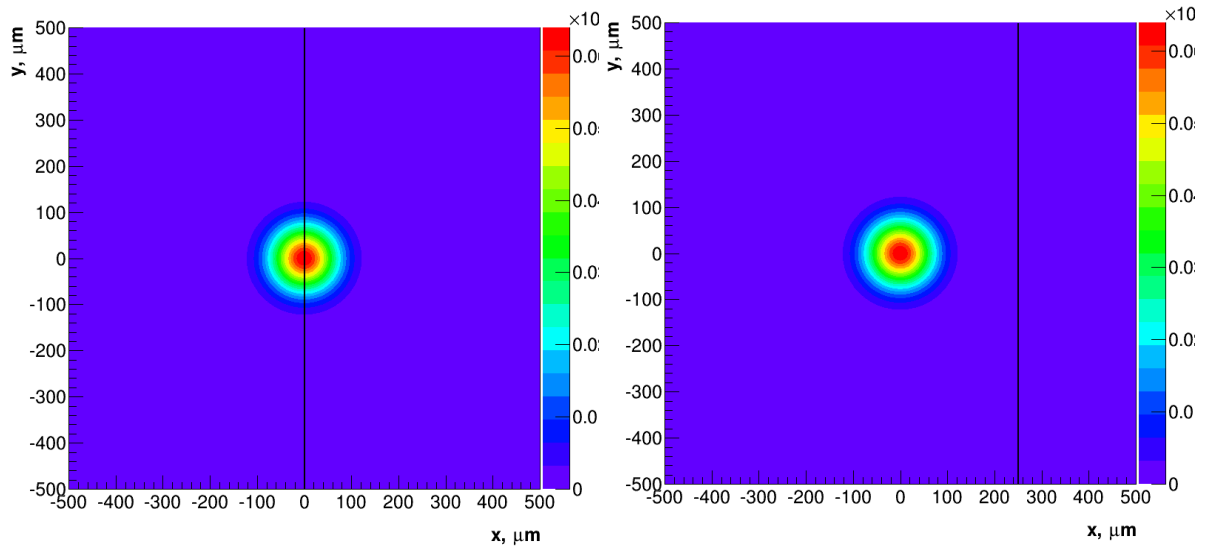


Рис. 3.9 – Модель розташування мішені в вигляді стріпа відносно пучка. Ліворуч – мішень по центру пучка, праворуч – мішень на відстані 5σ (~ 250 мкм) від кору пучка. По осям X та Y – відстань у мкм, кольором зображена інтенсивність пучка з розподілом по гаусу.

На рисунку 3.9 металева мішень зображена у вигляді тонкого стріпа по центру кору (зліва) та в гало (справа) пучка на відстані 5σ від центра кору (250 мкм) для виконаних Монте Карло симуляцій та теоретичних оцінок. Припускається, що профіль пучка у цьому випадку характеризується нормальним розподілом.

В експерименті LHCb величина μ може визначатися за допомогою методу нульової лічби (zero-count method), що ґрунтується на підрахунку кількості точок взаємодії у так звані Pile-Up станції або за кількістю треків у всьому вершинному детекторі VELO. За умов відсутності фону μ визначається з частки порожніх колізій пучок-пучок за формулою (3.6):

$$\mu = -\ln P_0^{bb}, \quad (3.6)$$

де P_0^{bb} – ймовірність знайти порожню подію для колізій пучок-пучок, тобто таку, для якої кількість точок взаємодії у Pile-Up станції менше двох або кількість треків у VELO менше двох.

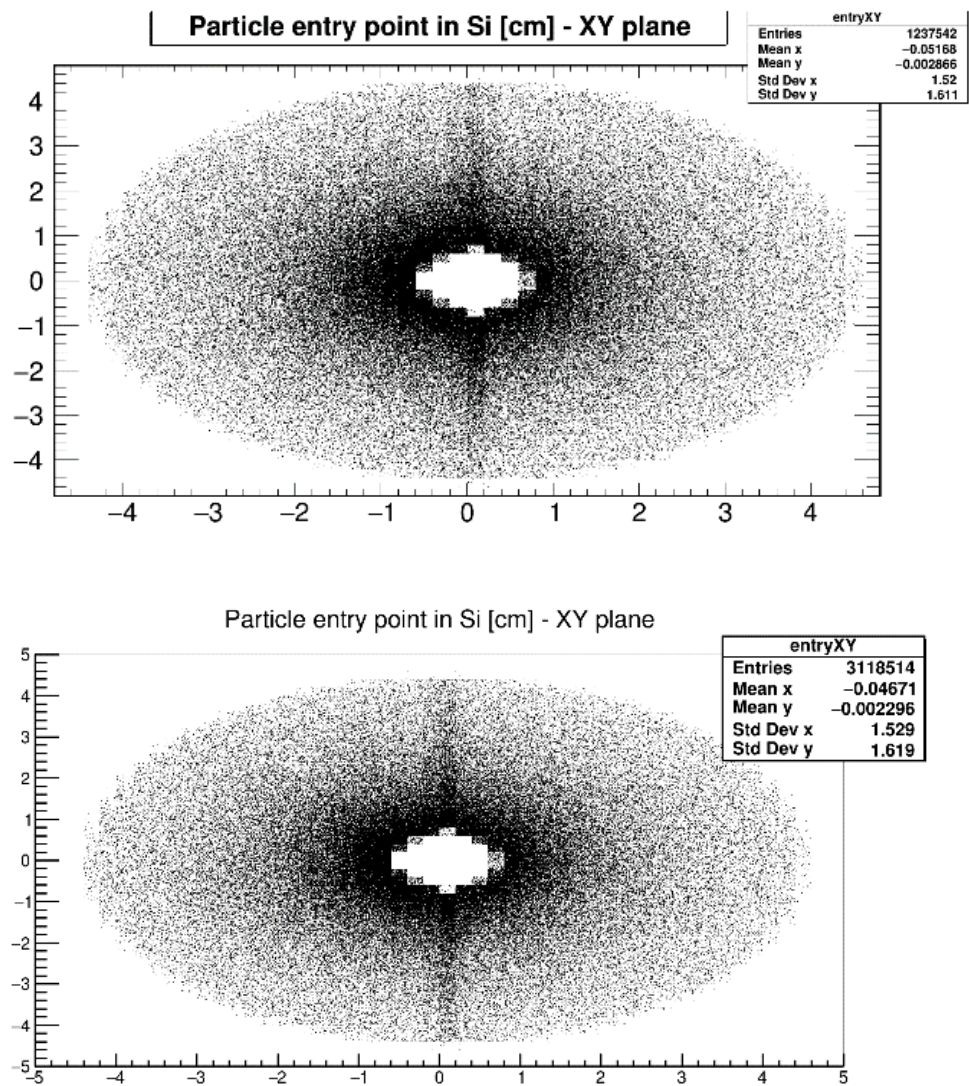


Рис. 3.10 – Монте Карло симульований розподіл точок взаємодій у VELO детекторі для протон-протонних (зверху) та протон нікелевих (знизу) зіткнень (вигляд у площині XY). По осях – відстань у см.

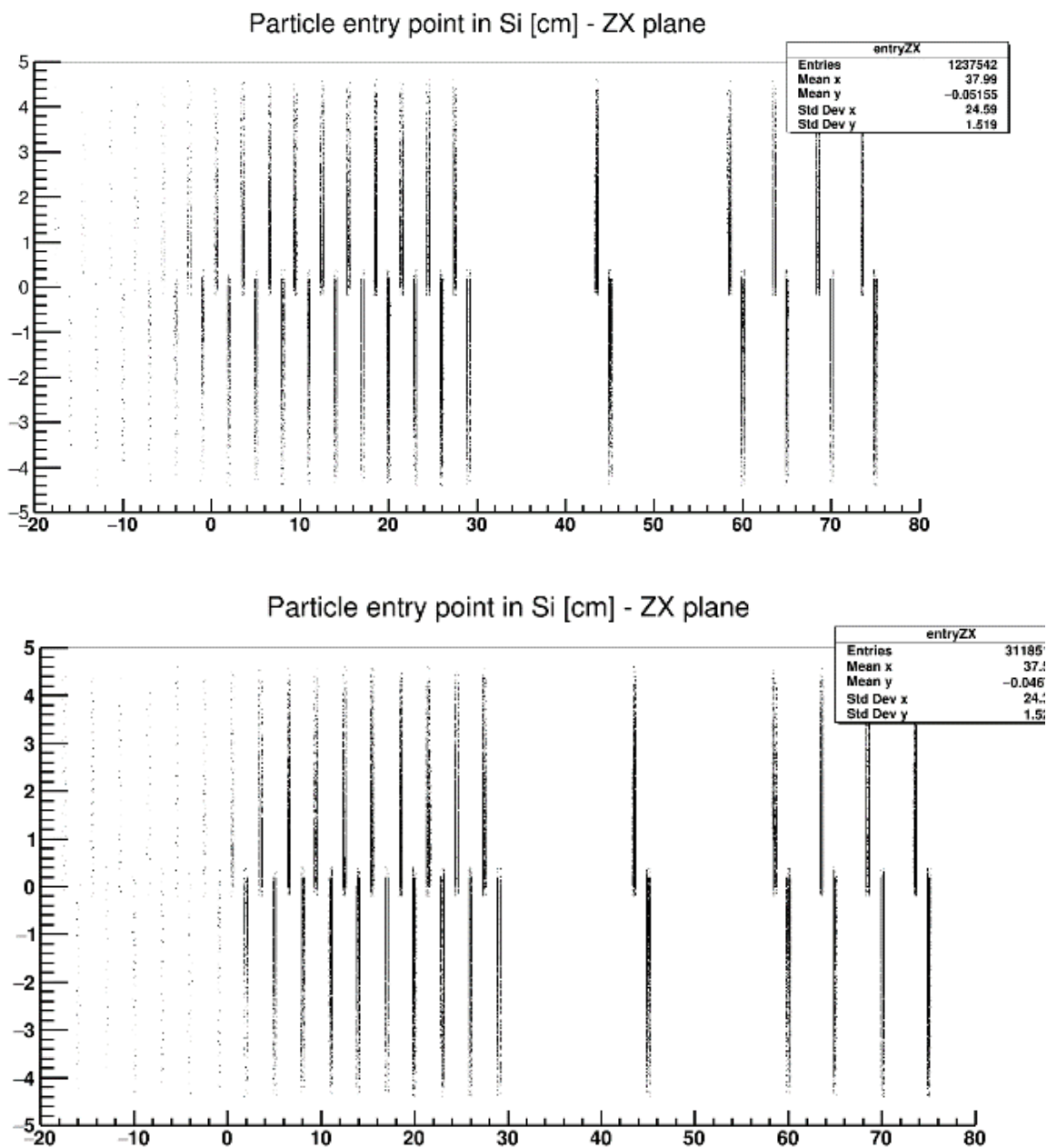


Рис. 3.11 – Монте Карло симульовані розподіли точок взаємодій у VELO детекторі для протон-протонних (зверху) та протон-нікелевих (знизу) зіткнень (вигляд у площині XZ). ПО осях – відстань у см.

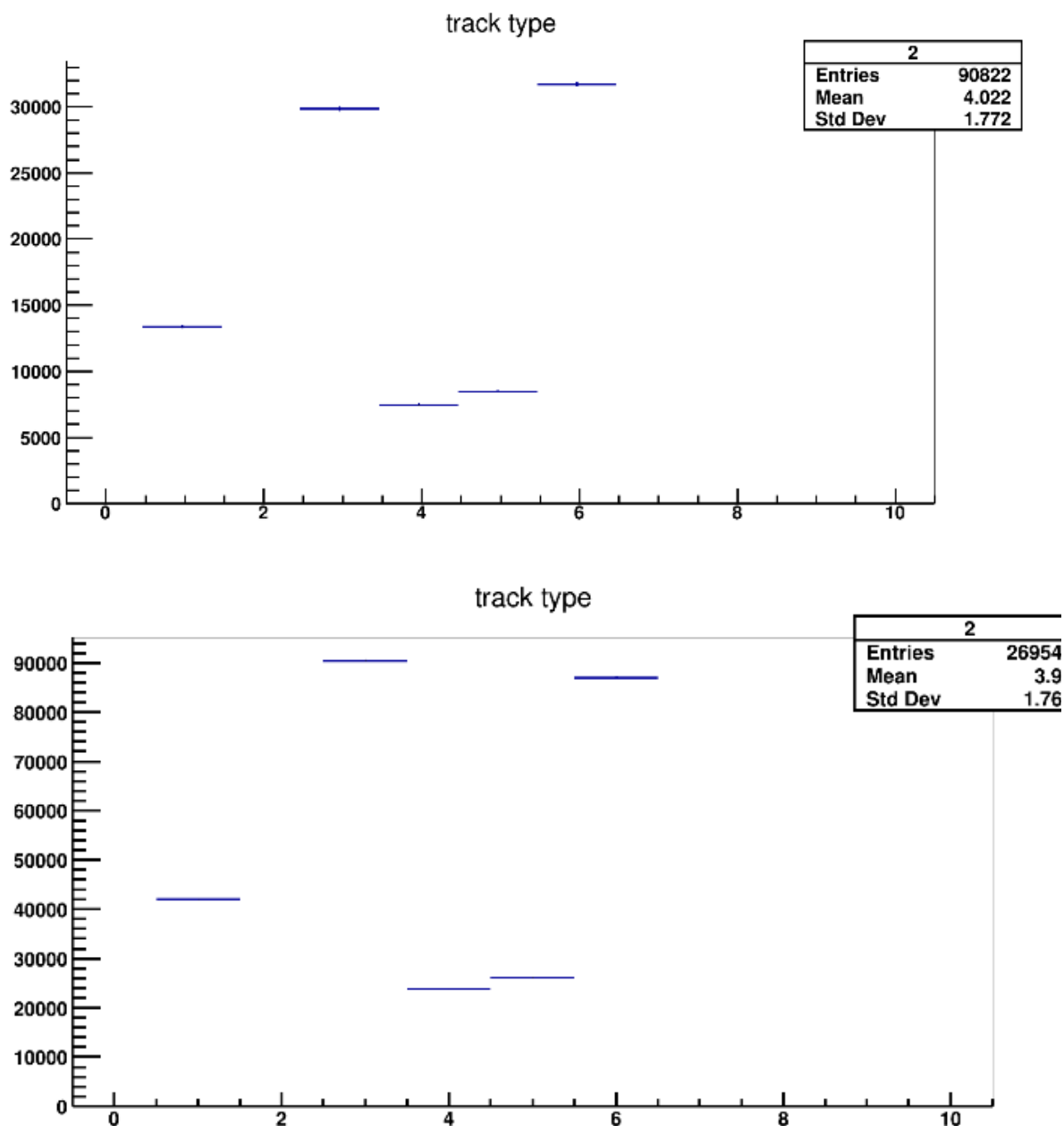
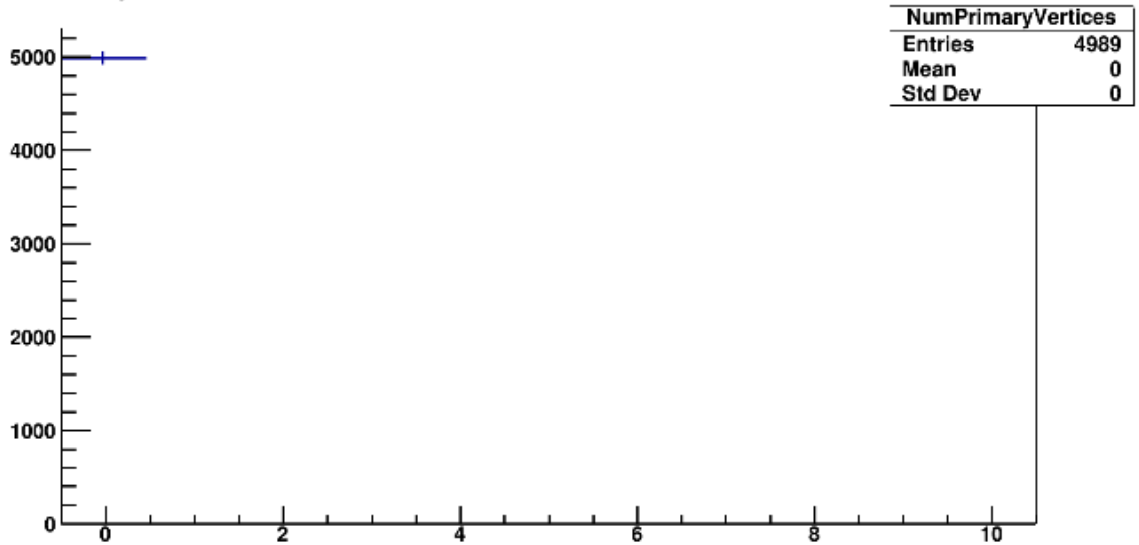


Рис. 3.12 – Монте Карло симульовані розподіли треків, реконструйованих у VЕLO детекторі, для протон-протонних (зверху) та протон-нікелевих (знизу) колізій. По осі Х – Тип треків: velo track, upstream track, long track, downstream track, T-track (докладніше – Розділ 1, рис.1.16). По осу Y – кількість подій для відповідних треків.

NumPrimaryVertices



NumPrimaryVertices

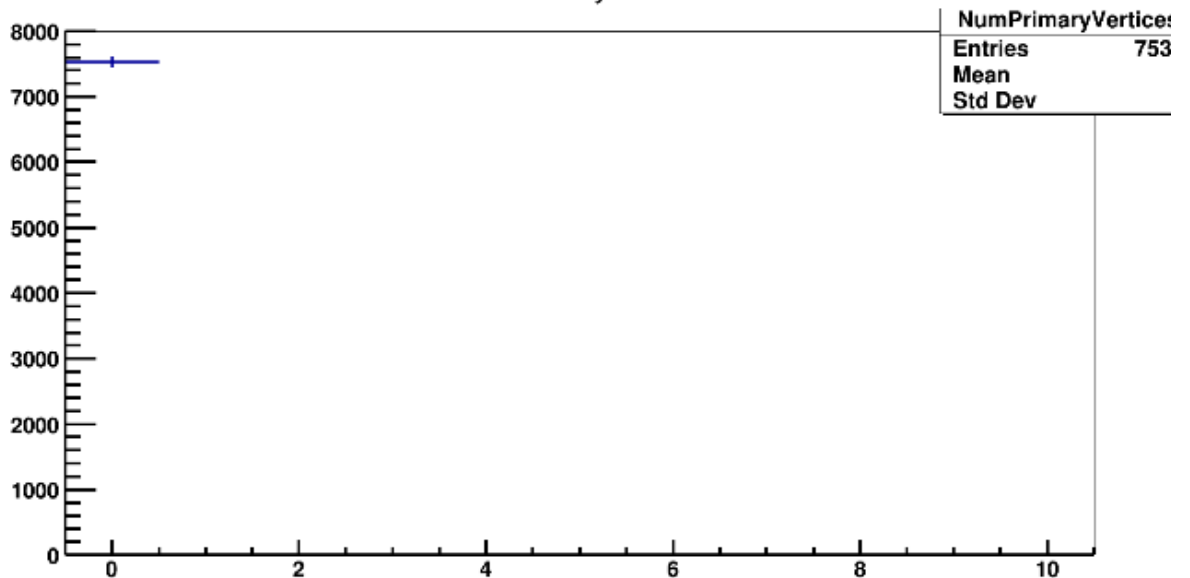


Рис. 3.13 – Монте Карло симульовані розподіли первинних вершин, реконструйованих у VELO детекторі, для протон-протонних (зверху) та протон-нікелевих (знизу) зіткнень. По осі X – тип вершин (первинні), по осі Y – кількість первинних вершин.

Обчислимо значення миттєвої світності за формулою (3.7), розрахувавши μ за кількістю реконструйованих треків у вершинному детекторі VELO (рис. 3.10, 3.11), отриманих для Монте Карло симуляцій. Для цього нам знадобиться знайти частку подій із усієї вибірки Монте Карло даних, для яких кількість

треків рівна нулеві або одиниці. З рисунка 3.12 видно, що це 4989 подій та 7533 подій для p-p та p-Ni зіткнень відповідно. Водночас із рисунка 3.13 маємо, що загальна кількість згенерованих подій становить 90822 та 269540 для p-p та p-Ni зіткнень відповідно.

$$\mathcal{L}_{inst} = \frac{\mu f_{rev} N_b}{\sigma_p}, \quad (3.7)$$

де μ – середнє число видимих (непружних) зіткнень пучка(ів) для одного перетину пучків;
 f_{rev} – частота обертання пучка в кільці ЛНС, c^{-1} ;
 N_p – кількість протонів (ядер) в одному банчі пучка;
 σ_p – поперечний переріз реакції, cm^2 .

Отже, підставивши у формулу (3.8) $\mu \approx 2,89$, $f_{rev} N_b = 40$ МГц, $f_{rev} = 11,245$ кГц, $\sigma_{pp} = 101,5$ mb^{-1} , а у формулу (3.9) $\mu \approx 3,58$, $f_{rev} N_b = 11,245$ МГц, $f_{rev} = 11,245$ кГц, $\sigma_{pNi} = 155$ mb^{-1} , отримуємо:

$$\mathcal{L}_{inst,MC}^{pp} = -\ln P_0^{bb} \cdot f_{rev} N_b / \sigma_{pp}, \quad (3.8)$$

$$\mathcal{L}_{inst,MC}^{pp} \approx 1,1 \times 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}, \quad (3.9)$$

$$\mathcal{L}_{inst,MC}^{pNi} = -\ln P_0^{bt} \cdot f_{rev} N_b / \sigma_{pNi} \quad (3.10)$$

$$\mathcal{L}_{inst,MC}^{pNi} \approx 2,6 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}. \quad (3.11)$$

Оцінимо часу функціонування мішені у гало пучка у першому наближенні [125].

Для вимірювання температури мішені використаємо термодинамічну формулу (3.12):

$$\Delta Q = mC\Delta T = \rho Sd \cdot C\Delta T, \quad (3.12)$$

де m – маса мішені;

C – питома теплоємність мішені, Дж/(кг·К);

ΔT – зміна температури, К;

ρ – густина мішені, г/см³;

S – площа мішені, см²;

d – товщина мішені, см.

Для отримання фактору корекції, Δ , кількості налітаючих протонів на мішень, розміщеної у гало пучка (див. рис. 3.9), візьмемо двовимірний інтеграл від функції розподілу густини пучка (добуток двох Гаусів) по площі стріпа:

$$\Delta = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\right)^2 \int_{5\sigma-1}^{5\sigma+1} e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)} dx \int_{-100\sigma}^{100\sigma} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma^2}\right)} dy, \quad (3.13)$$

де σ – сигма пучка(ів), см²;

x, dx – координата по осі x та її нескінченно малий приріст, см;

y, dy – координата по осі y та її нескінченно малий приріст, см.

Кількість тепла, яку отримує мішень, коли знаходиться під пучком, залежить від середньої енергії, яку отримає мішень від пучка, кількості частинок (протонів) у банчі пучка, частоти циркулювання пучка в кільці ВАК, кількості банчів та фактора корекції кількості налітаючих протонів на мішень у гало пучка.

$$\Delta Q = \overline{\Delta E} N_p f_{rev} N_b \Delta, \quad (3.14)$$

де $\overline{\Delta E}$ – середні енергетичні втрати, що йдуть на нагрівання мішені, еВ;
 N_p – кількість протонів (ядер) в одному банчі пучка;
 f_{rev} – частота обертання пучка в кільці ЛНС, с⁻¹;
 N_b – кількість банчів у пучку;
 Δ - фактор корекції.

Вважаючи, що енергія іонізаційних та радіаційних втрат, яку можна отримати з формули Бете-Блоха для проходження протона крізь нікелеву мішень розмірами (1 мм, 2 мкм, 2 мкм) (довжина, ширина, товщина) повністю іде на нагрівання мішені,

$$\overline{\Delta E} = \frac{dE}{dx} \rho dx, \quad (3.15)$$

де $\frac{dE}{dx}$ – енергія іонізаційних та радіаційних втрат, яка визначається з формули Бете-Блоха, еВ·г⁻¹·см⁻²;
 ρ – густина мішені, г/см³;
 dx – товщина мішені, см;
 $\overline{\Delta E} \approx 4,094$ кеВ

Розглядаючи високоенергетичний протон мінімально іонізуючою частинкою по до надтонкої нікелевої мішені, отримуємо таку оцінку середніх енергетичних втрат $\overline{\Delta E} \approx 1,246$ кеВ,

ми можемо записати формулу для приросту температури за одиницю часу для нікелевої мішені, що знаходиться на відстані 5σ від центра кору пучка, як показано на рисунку 3.9:

$$\Delta T = \frac{\overline{\Delta E} N_p N_b f_{rev} \Delta}{\rho S d C}, \quad (3.16)$$

де $\overline{\Delta E}$ – середні енергетичні втрати, що йдуть на нагрівання мішені;

N_p – кількість протонів (ядер) в одному банчі пучка;

N_b – кількість банчів у пучку;

f_{rev} – частота обертання пучка в кільці LHC, s^{-1}

Δ - фактор корекції;

ρ – густина мішені, g/cm^3 ;

S – ефективна площа мішені, cm^2 ;

d – товщина мішені, cm ;

C – питома теплоємність, $Dж \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

При $N_p = 1.15 \times 10^8$ (протонів), $N_b = 10^3$ (банчів), $f_{rev} = 11,245$ кГц, $\Delta = 2,83 \times 10^{-8}$, $\rho = 8,902$ g/cm^3 , $S = 330$ cm^2 , $d = 1$ cm , $C = 460$ $\frac{Dж}{kg \cdot K}$ підставимо чисельні значення та отримаємо наступний результат:

$$\Rightarrow \Delta T \approx 1,5435 \frac{K}{сек} \quad (3.17)$$

Отже, виходячи з отриманого розрахунку та вважаючи, що температура плавлення нікелю складає 1726 K, можна зробити висновок, про збереження цілісності стріпової мішені, що знаходиться на відстані 5σ (250 μm) від центра кору пучка, протягом близько 20 хв, якщо не враховувати охолодження мішені.

Розташування фіксованої металічної мікромішені дозволить розвивати та перевіряти фізику, що виникає при потрійних ядерних зіткненнях. Концепція потрійних ядерних зіткнень є лише розширенням звичайного високоенергетичного ядерного зіткнення пари ядер ($A+A$), коли третє ядро розташоване у нерухомій мішені в області взаємодії двох пучків, що зіштовхуються.

§3 Монте-Карло симуляції порівнянь зіткнень протонних пучків з зіткненнями протонного пучка з фіксованою мішенню в експерименті LHCb

Оскільки в ЦЕРН є експеримент LHCb з фіксованою газовою мішенню [121], стає питання о перевагах фіксованих мікростріпових мішеней над газовими. Запропонована концепція мікростріпових мішеней має на увазі, що такі мішені локалізують область зіткнень і дозволяють використовувати багато мішеней з різних матеріалів. Для більш детального пояснення переваг використання мікростріпових мішеней слід розглянути Монте-Карло симуляції лише з 1 стріпом мішенню для експеримента LHCb.

Проведені Монте Карло симуляції для Run 3 (з відповідними параметрами пучків та геометрією) для зіткнень протон-протонних пучків, а також пучка протонів з нікелевими мішенями у вигляді надтонкої мембрани (2 мкм), стріпу (2 мкм), розташованого у центрі пучка, та стріпу на відстані 5σ (250 мкм) від кору пучка. При проведенні Монте Карло симуляцій для стріпової мішені бралися до уваги попередні розрахунки. Мішені розташовані по центру пучка та на відстані у 250 мкм від кору пучка (рис 3.9).

Також представлені дані по кількості та розподілам первинних вершин у VELO трекері у площинах X, Y, Z для pp та pNi зіткнень з відповідними ілюстраціями (рис. 3.14-3.16). Для фіксованої мікромішені точки взаємодій в X та Z площинах локалізовані на 2-х мікрометрах, що є відповідною товщиною мішені, коли для протон-протонних зіткнень в нас є гаусоподібний розподіл на декілька сотень мкм. В Y площині мішень довжиною 2 см, тому ми бачимо засипку подій на всі 2 см.

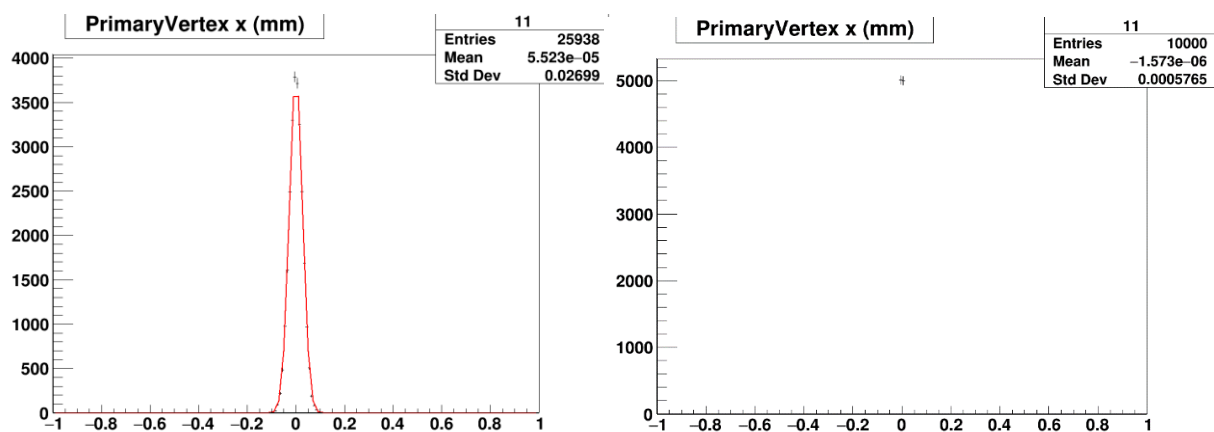


Рис. 3.14 – Розподіл первинних вершин по X в МК симуляціях для pp та pNi у VELO. По осі X – відстань у см, по Y – кількість первинних вершин. Зліва – розподіл первинних вершин для pp зіткнень, справа – фактично точковий розподіл первинних вершин для зіткнень пучка протонів з нікелевою фіксованою твердою мішенню.

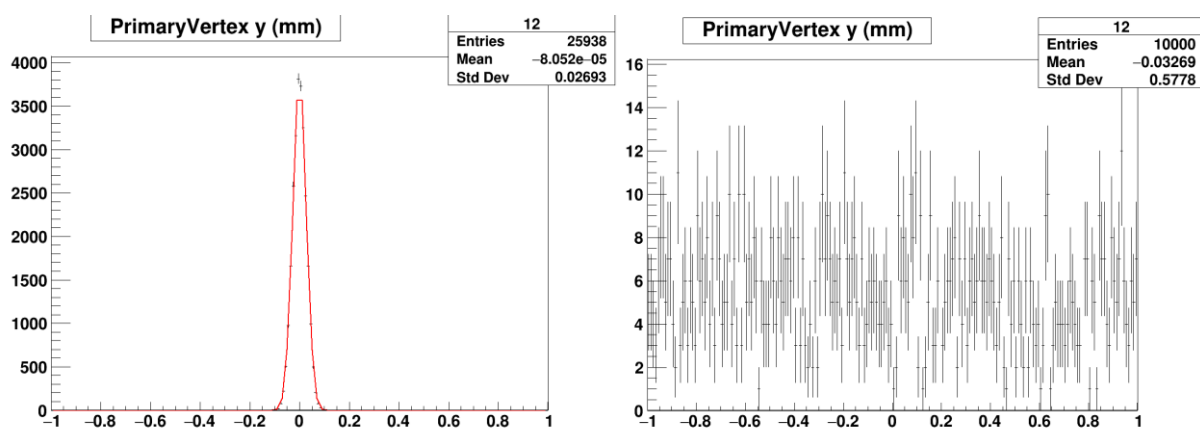


Рис. 3.15 – Розподіл первинних вершин по Y в МК симуляціях для pp та pNi у VELO. По осі X – відстань у см, по Y – кількість первинних вершин. Зліва – розподіл первинних вершин для pp зіткнень, справа – розподіл первинних вершин для зіткнень пучка протонів з нікелевою фіксованою твердою мішенню (довжина мішені 2 см від -1 см до 1 см).

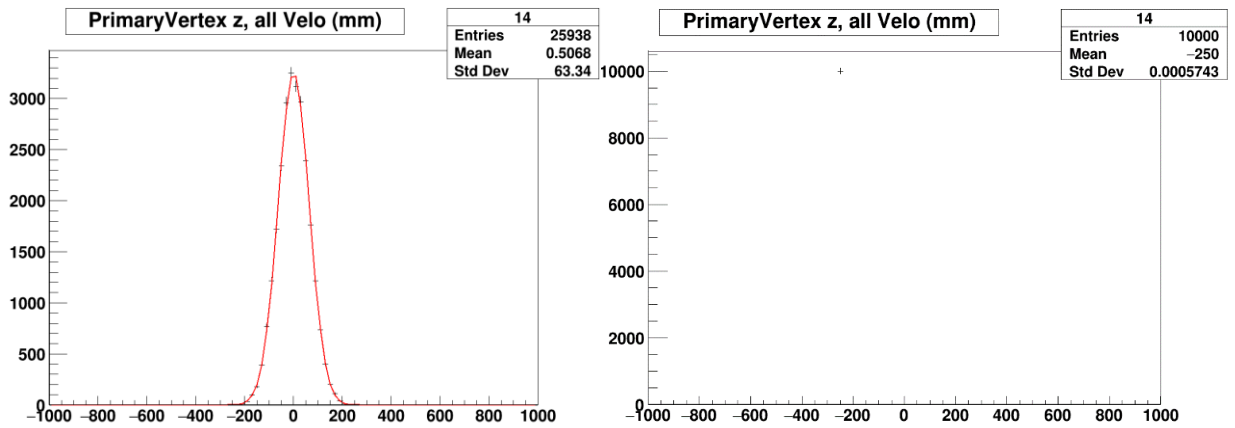


Рис. 3.16 – Розподіл первинних вершин по Z в МК симуляціях для pp та pNi у VELO. По осі X – відстань у см, по Y – кількість первинних вершин. Зліва – розподіл первинних вершин для pp зіткнень, справа – фактично точковий розподіл первинних вершин для зіткнень пучка протонів з нікелевою фіксованою твердою мішенню.

Однією з переваг надтонкої мікροстріпової мішені в порівняння з іншими типами мішеней є локалізація точки взаємодії мішені з пучком. На рис. 3.17 – 3.19 відображені первинні вершини при p - p зіткненнях та при зіткненнях p пучків з нікелевою мішенню в межах VELO трекеру. Як бачимо, замість розтягнення області взаємодії на 40 см у протон-протонних зіткнень пропонується дуже точна локалізація первинних вершин на двох см у довжину та 2 мкм у ширину, завтовшки до декількох мкм. Це приводить до полегшення встановлення первинних вершин при взаємодії з мішенню як протонного пучка, так і у в потрібних ядерних зіткненнях. НА рисунку 3.17 можна побачити на краях збільшення подій, що можна пояснити дивлячись на рис. 3.19: оскільки мішень занадто довга, то її кінці в Монте-Карла залізли в область площин детектора VELO, що спричинило “перевипромінення” в МК та дало результат, де область перекриття мішені і площин детектора має більше подій, ніж область мішені в іонопроводі (центральна частина мішені).

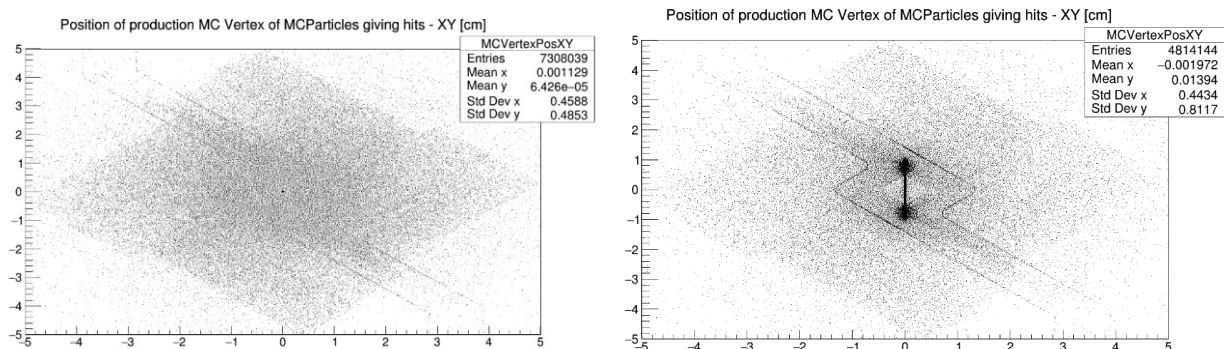


Рис. 3.17 – Монте Карло симуляції зіткнень pp (ліворуч) та пучка протонів з нікелевою мішенню (праворуч). Первинні вершини у площині XY. По осям координати у см. Зліва бачимо невелику область з подіями (вигляд пучків позаду), справа область подій для мішені довжиною 2 см та шириною 2 мкм.

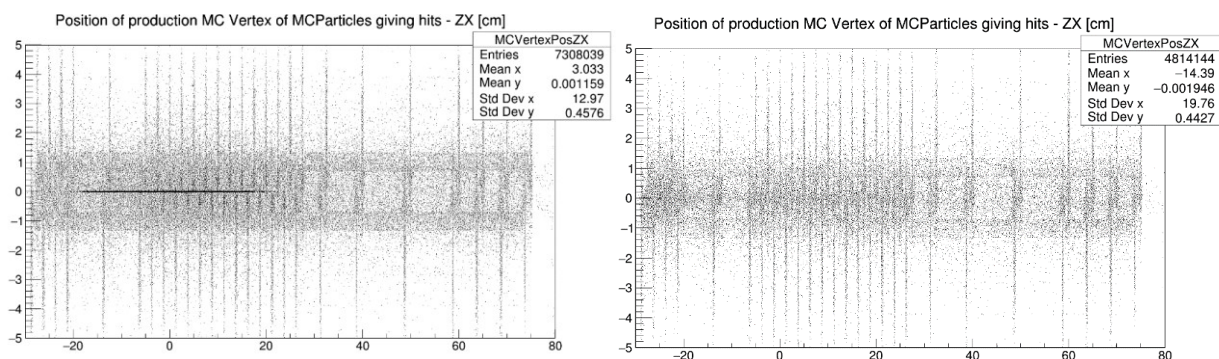


Рис. 3.18 Монте Карло симуляції зіткнень pp (ліворуч) та пучка протонів з нікелевою мішенню (праворуч). Первинні вершини у площині ZX. Первинні вершини у площині XY. По осям координати у см. Зліва – область зіткнень пучків (до 40 см), справа – область взаємодії пучка і мішені (2 мкм).

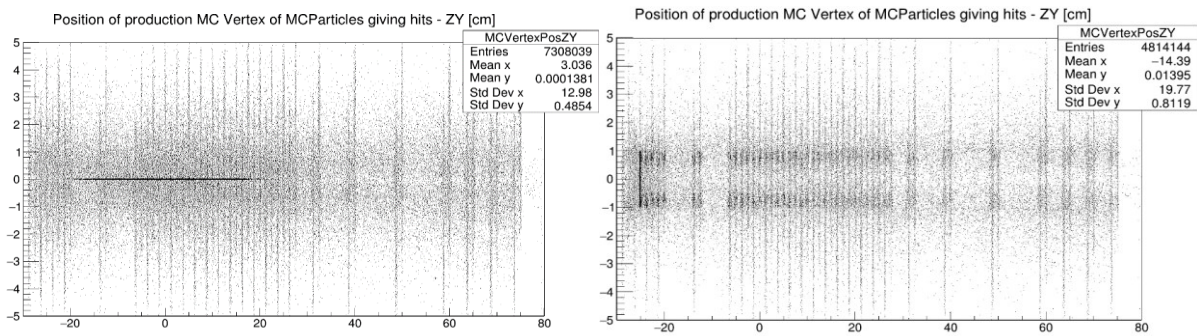


Рис. 3.19 – Монте Карло симуляції зіткнень pp (ліворуч) та пучка протонів з нікелевою мішенню (праворуч). Первинні вершини у площині ZY. Первинні вершини у площині ZX. Первинні вершини у площині XY. По осям координати у см. Зліва – область зіткнень пучків (до 40 см), справа – область взаємодії пучка і мішені (товщина 2 мкм, довжина 2 см).

Висновки до розділу 3

Отримані результати, що були представлені в цьому розділі, були описані в публікаціях [126, 127].

У цьому розділі представлено концепцію та прототипи мішенного вузла для експериментів з фіксованою мішенню на прискорювачі LHC. Розроблено прототип з використанням надтонких мікростріпових мішеней та гібридної системи позиціонування на основі MEMS технологій і крокових двигунів. Створено моделі компактного багатомішенного вузла SOFIT1 та мішеней голко-подібного типу для встановлення в іонопровід ВАК. Проведено Монте-Карло симуляції, які продемонстрували переваги мікростріпових мішеней, зокрема високу локалізацію області взаємодії (2 мкм по ширині та товщині) порівняно з протон-протонними зіткненнями. Аналіз розподілів первинних вершин у детекторі VELO для різних конфігурацій мішеней підтвердив ефективність запропонованої концепції. Зроблені розрахунки для визначення температури мішені в залежності від положення у гало пучка. Ці результати свідчать про перспективність використання твердих мікростріпових мішеней для майбутніх експериментів на LHC.

Розділ 4 Системні характеристики RMS-R3 як основа для системи управління мішенним комплексом RMS-R4. Метод асиметрій

§1 Моделювання функціональних характеристик RMS-R3

Для забезпечення надійного та безпечного функціонування експерименту LHCb треба було розробити систему, що була би встановлена в задній напівсфері експерименту поблизу точки взаємодії IP8. Для отримання точних та надійних результатів, треба було визначити декілька речей: на якій відстані по осі Z та від кору пучка буде встановлена система, розмір сенсорів для кожного модуля, кількість сенсорів. Для цих задач краще за все підійдуть симуляції методами Монте-Карло за допомогою програмного забезпечення LHCb: Gauss, Boole, Brunel, Moore, DaVinci [128], з використанням ґрид Ganga [129], та оброблялось за допомогою ROOT CERN [130].

По осі Z було запропоновано розташувати модулі нової систем на відстані 2.2 метри на залізобетонній стіні у задній напівсфері LHCb. Для визначення розташування системи на площині XY потрібно було виходити від максимального відгуку у 1.3 МГц, що зумовлено конструкцією зарядових інтеграторів (див. параграф 4.2.1). Тому розташування визначалось для 10% від максимального значення частоти зарядових інтеграторів $\pm 5\%$.

На рис. 4.1 та 4.2 продемонстровані Монте-Карло відгуків сенсорів розмірами 9x9. Майже така площа була у сенсорів Системи радіаційного моніторингу RMS [131-133] у Run1-2. З Монте-Карло симуляцій визначається приблизна мінімальна відстань від осі пучка до краю сенсора, а саме: 25-30 см для задоволення основних вимог до системи.

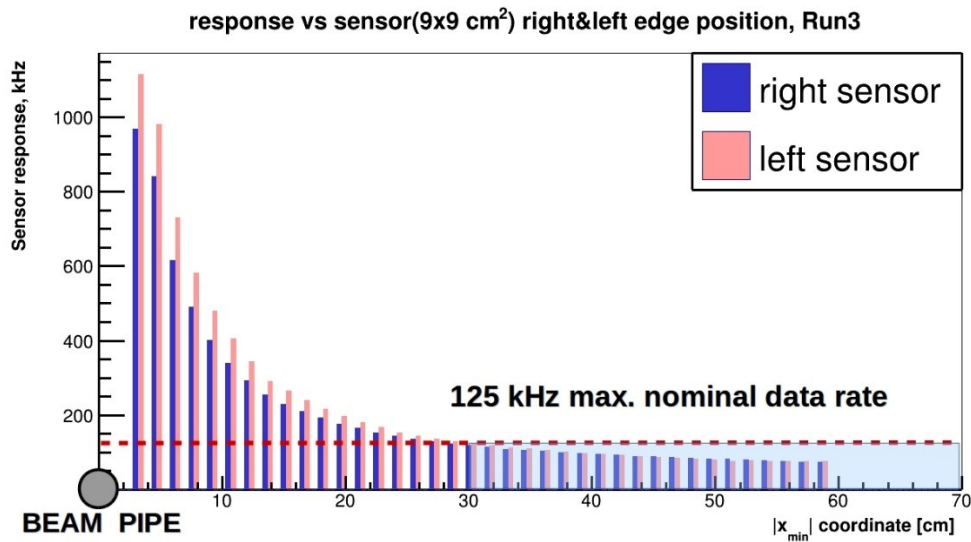


Рис. 4.1 Монте-Карло симуляції відгуку RMS R3 у Run 3 для сенсорів із розмірами $9 \times 9 \text{ cm}^2$, що розташовані горизонтально (зліва та справа) на площині XY перпендикулярної до осі пучка. По осі X – координатна відстань у см від осі пучка, по Y – очікуваний відгук сенсорів. Середня загрузка сенсорів у 125 кГц прогнозується на відстані 30 см центра сенсора від пучка.

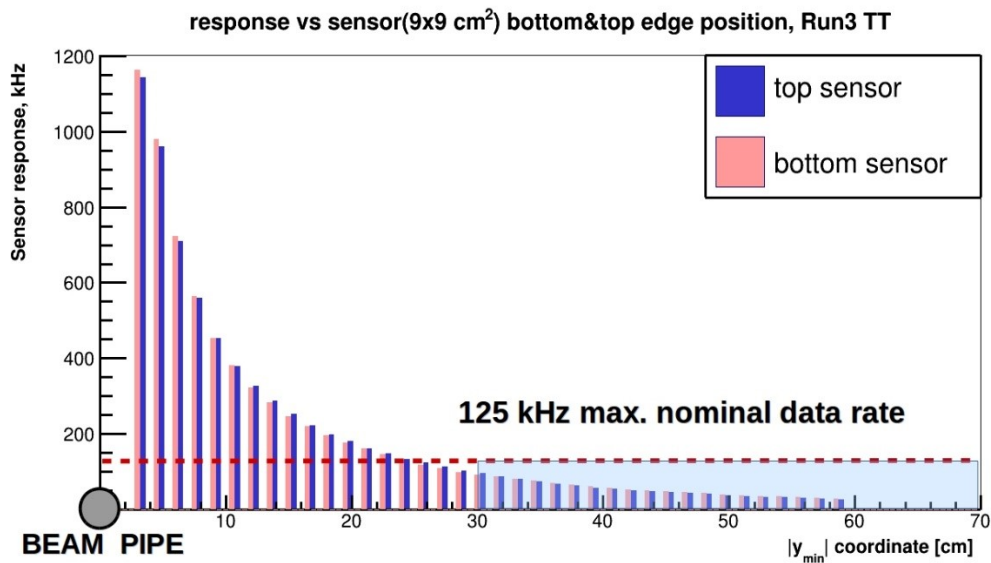


Рис. 4.2 Монте-Карло симуляції відгуку RMS R3 у Run 3 для сенсорів із розмірами $9 \times 9 \text{ cm}^2$, що розташовані вертикально (зверху і знизу) на площині XY перпендикулярно до осі пучка. По осі X – координатна відстань у см від осі пучка, по Y – очікуваний відгук сенсорів. Середня загрузка сенсорів у 125 кГц прогнозується на відстані 30 см центра сенсора від пучка.

Окрім того були пророблені Монте-Карло симуляції для інших розмірів сенсорів окрім 9x9: 6x9 (рис. 4.3, 4.4), 12x6 (див. додаток), 6x6 та 12x12. Такі сенсори, площа яких менше 80 см² було вирішено не використовувати, оскільки їх площа так мала, що відгук від відстані змінювався дуже швидко, а на відстанях 25-30 см було недостатньо відгуку, щоб робити надійні висновки про проведення експерименту. Тобто, зменшення площини сенсорів вело до погіршення отримання інформації про світність та стабільність роботи ЛНСь при малих відгуках цих сенсорів. Сенсори розмірами 12x12 навпаки давали дуже великий відгук, окрім цього їх виробництво було складнішим через складнощі в конструюванні, наприклад фольги сенсорів могли просідати та згодом торкатися одна одної. Для запобігання такої проблеми йшла мова про збільшення вартості виробництва сенсорів.

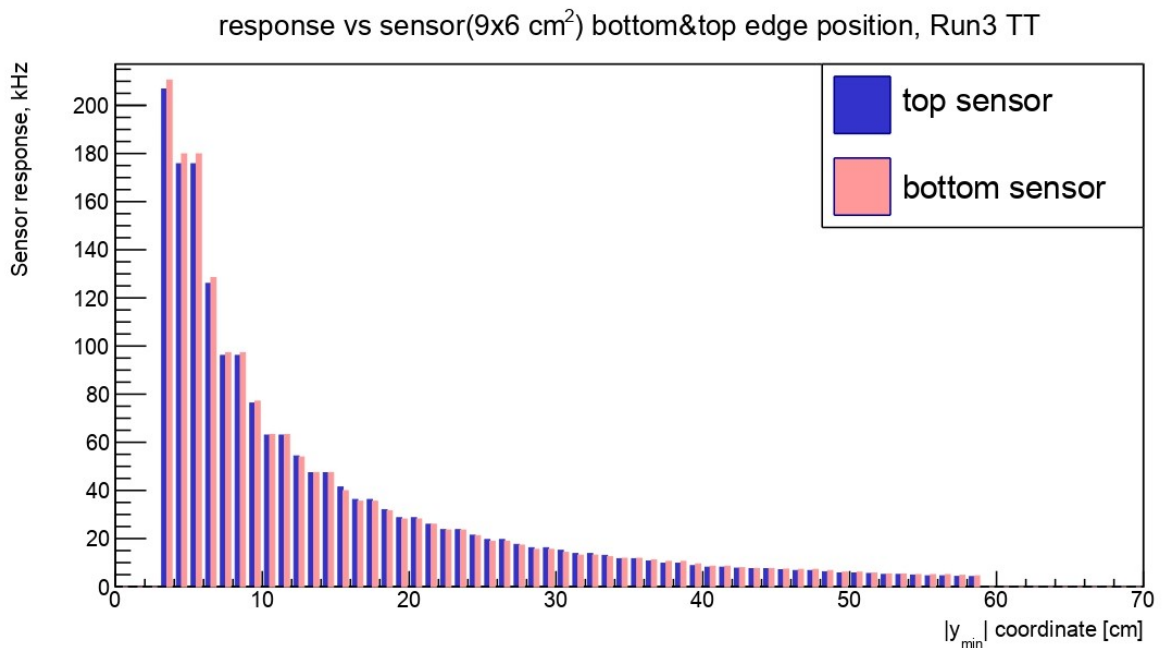


Рис. 4.3 Монте-Карло симуляції відгуку RMS R3 у Run 3 для сенсорів із розмірами 9 x 6 см², що розташовані горизонтально на площині XY перпендикулярно до осі пучка. По осі X – координатна відстань у см від осі пучка, по Y – очікуваний відгук сенсорів. Сенсори є менш чутливими ніж сенсори розмірами 9 x 9 см².

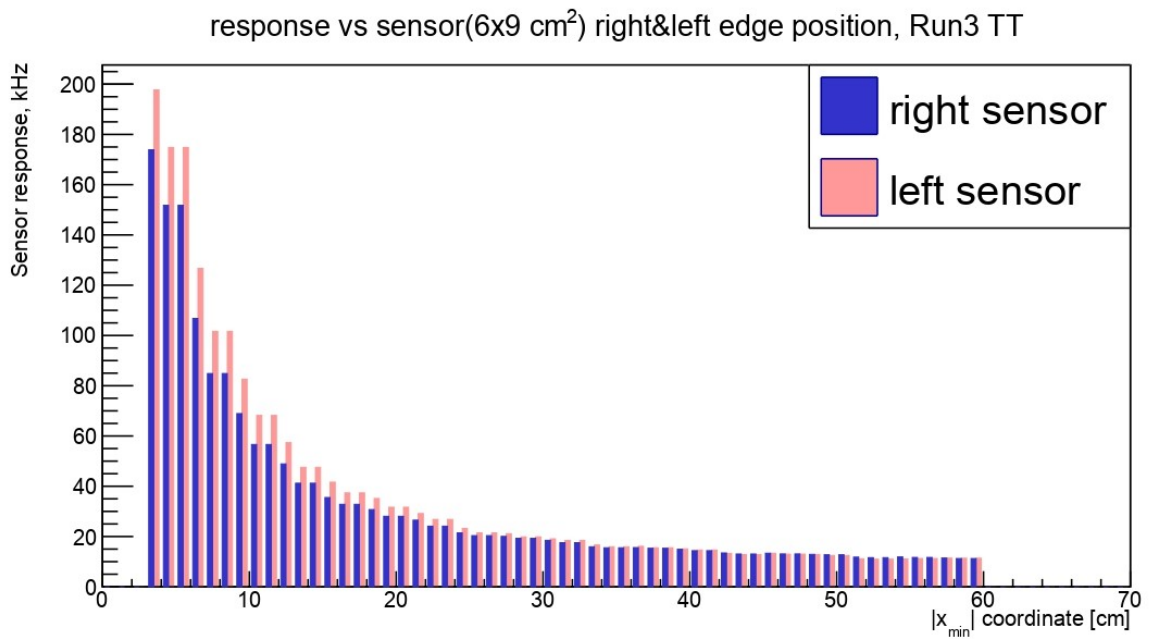


Рис. 4.4 Монте-Карло симуляції відгуку RMS R3 у Run 3 для сенсорів із розмірами 9 x 6 см², що розташовані вертикально на площині XY перпендикулярно до осі пучка. По осі X – координатна відстань у см від осі пучка, по Y – очікуваний відгук сенсорів. Сенсори є менш чутливими ніж сенсори розмірами 9 x 9 см².

Остаточно була прийнята наступна геометрія: відстань по осі Z – 220 см, відстань від осі пучка до центру 1-го сенсора становить ~345 мм, до 2-го - 465 мм і 405 мм до центру модуля відповідно (див. параграф 3.3 про конструкцію модулів RMS-R3). Всі модулі знаходяться приблизно на однаковій відстані з субміліметровою точністю.

§2 Дизайн конструкцій RMS-R3

RMS-R3 як і її попередник RMS LHCb [131-136] базується на технології металево-фольгових детекторів [137], що є оригінальною розробкою Інституту ядерних досліджень НАН України, а також на явище вторинної електронної емісії.

Тонкі металеві фольги, товщиною 5 ÷ 50 мкм кріпляться до ізолюючих несучих рамок (наприклад, скло-текстолітних плит товщиною 0,5 мм). В явищі

ВЕЕ (див. розділ 1, пар. 2) головну роль відіграє тонкий шар металу (сенсорна фольга) завтовшки 50 мкм(рис. 4.5). Допоміжні фольги (тобто дві прискорювальні фольги HV та дві екрануючі фольги) закривають сенсор з обох сторін і тим самим стабілізують вихід ВЕЕ: прискорювальні фольги HV, до яких підводиться позитивна напруга, дають змогу збирати емітовані з сенсора електрони, а дві зовнішні заземлені фольги забезпечують захист всієї системи від електромагнітних шумів та наводок. Прикладаючи невелику напругу (10 ÷ 30 В), збирають практично всі вторинні електрони, що емітуються сенсорною фольгою. Позитивний заряд, що накопичується на сенсорній фользі, вимірюється у чутливому зарядовому інтегратору[138, 139].

Кілька переваг МФД, які визначили їх вибір для створення на їх основі системи радіаційного моніторингу в експерименті LHCb для внутрішнього трекеру IT RMS (RUN 1, 2. 2009 2018 р.р.), а також для модернізації такої системи для умов суттєво підвищеної світності експерименту (RUN 3, 2021-2024 р.р.) [140]:

- висока радіаційна толерантність;
- можливість забезпечити надзвичайно малу конструкційну масу;
- проста структура будь-якої форми та розміру;
- низька робоча напруга;
- довготривала робота з мінімальним обслуговуванням;
- низька вартість.

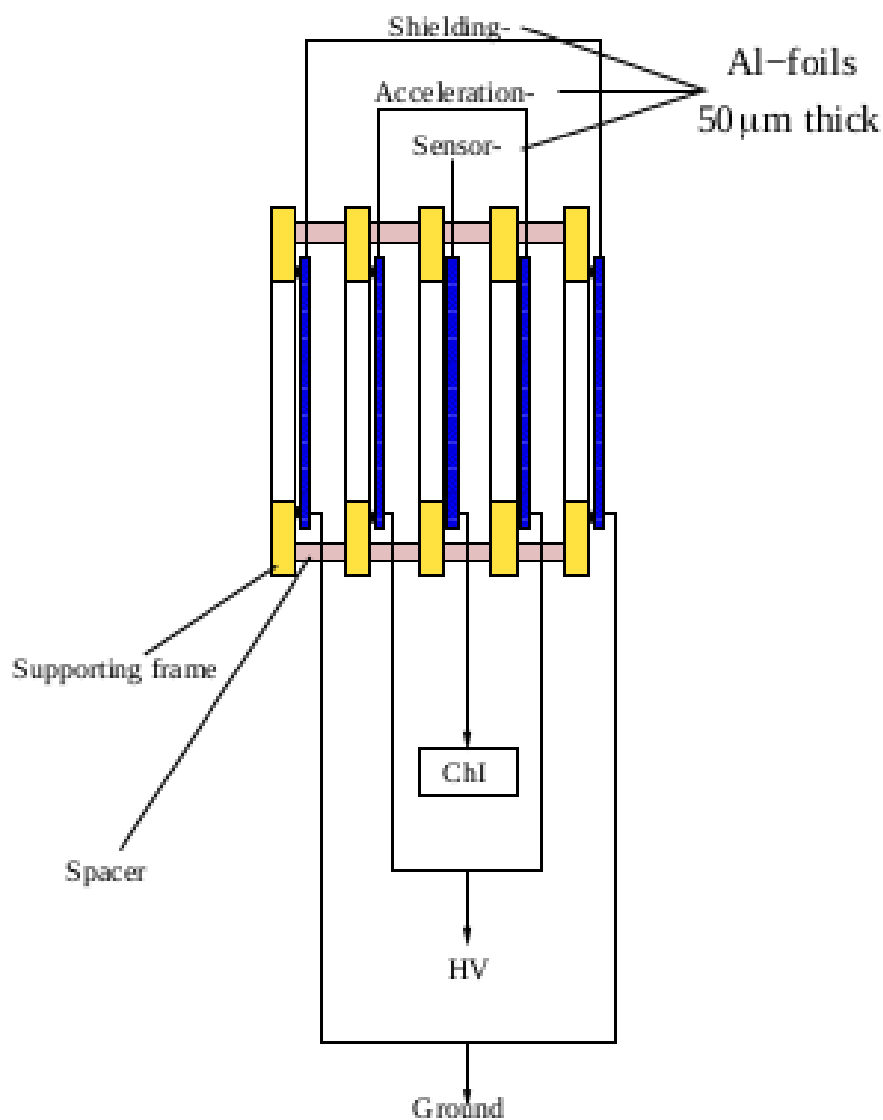


Рис. 4.5 Схематичне зображення метало-фольгового детектора. Детектор складається з двох екрануючих фольг, що є заземленими, двох прискорювальних фольг, на які подається напруга до 30В, і центральної сенсорної фольги, що збирає вторинні електрони. Всі фольги товщиною 50 мкм.

2.1 Зарядові інтегратори та лічильники

Окремим елементом, який можна віднести до електронної частини RMS-R3, є зарядові інтегратори (рис. 4.6). Зарядовий інтегратор — це високочутливий вимірювальний пристрій із класу аналого-цифрових перетворювачів. Принцип дії ЗІ полягає у перетворенні вхідного заряду у

послідовність вихідних імпульсів, частота котрих пропорційна вхідному струму.



Рис. 4.6 Зарядовий інтегратор, який використовується в RMS-R3. На рисунку видно всі 5 каналів зарядового інтегратора і його компоненти, що складається у каскади, які і перетворюють струм у частоту.

Система зчитування ММД повинна мати високу чутливість та радіаційну стійкість. В даній роботі використано зарядовий інтегратор (ЗІ) розроблений в ІЯД НАНУ (м. Київ) сумісно із науковцями MPIfK (м. Хайдельберг). Зарядовий інтегратор забезпечує пропорційне перетворення вхідного заряду у вихідну частоту.

Характеристики ЗІ[141]:

- чутливість ЗІ: 1КГц на 1 пА вхідного струму;
- діапазон інтегрування: в межах від ~ 10 фА до 4 нА (~ 10 Гц – 4 МГц);

- флуктуації на виході не перевищують декількох Гц;
- час інтегрування: 1 с;
- нелінійність: $< 0,02\%$;
- нестабільність у часі: $< \pm 2.5 \%$ /добу;
- температурна нестабільність: $< 0.3 \%$ /1 °С;
- радіаційна стійкість: 2-3 кРад.

Щоб досягти високої чутливості, лінійності та радіаційної стійкості для побудови ЗІ були використані спеціальні компоненти, які відповідають поставленим вимогам [142, 143].

У якості лічильника використовується плата мікроконтролера STM32F407CGT6 Discovery [144-147]. STM32F407VGT6 (рис. 4.7) – мікроконтролер на базі 32х бітного ядра Arm Cortex-M4 з лічильниками зовнішнього тактування, 1 Мб флеш-пам'яті та 192 кб ОЗП. Компанія STM поставляє програмне забезпечення для програмування і налаштування мікроконтролера.

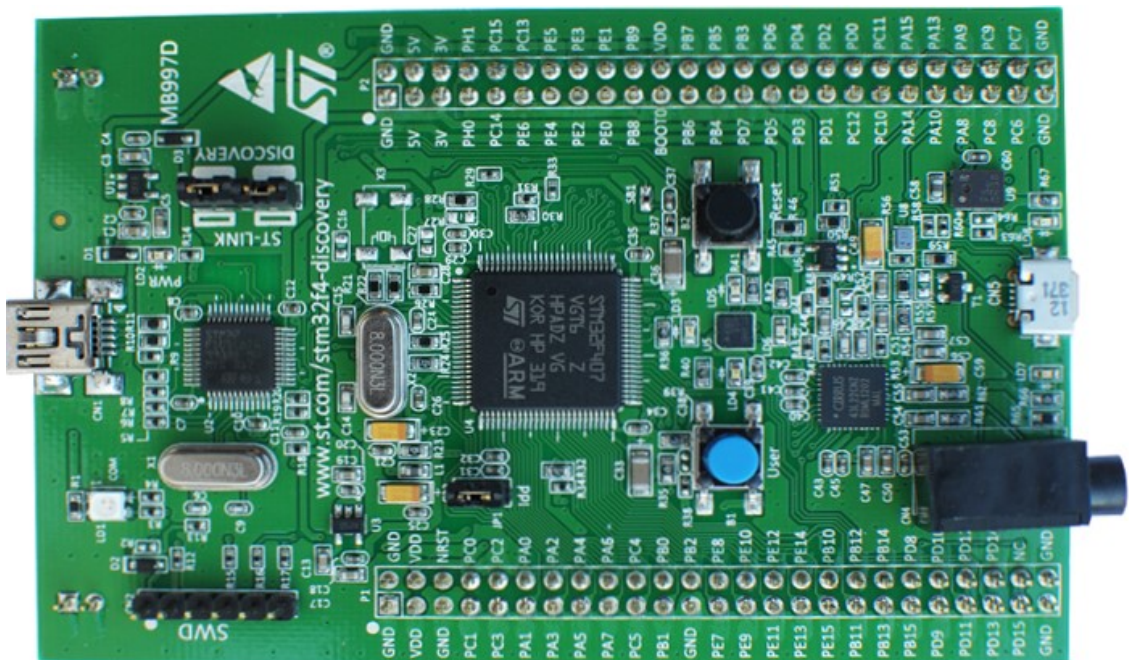


Рис. 4.7 Плата мікроконтролера STM32F407VGT6 [144], що використовуються як лічильник частоти. Після підрахунку дані передаються методом I2C через піни плати. Рисунок взято з [145].

Базові лінії зарядових інтеграторів створюються інжекцією струмів (250 пА) від високостабільного джерела на вхід каналів зарядового інтегратора. Для подальших досліджень потрібно було визначити базову лінію для кожного з каналів (рис. 4.8) для їх вирахування із відгуків сенсорів RMS-R3 при зіткненнях.

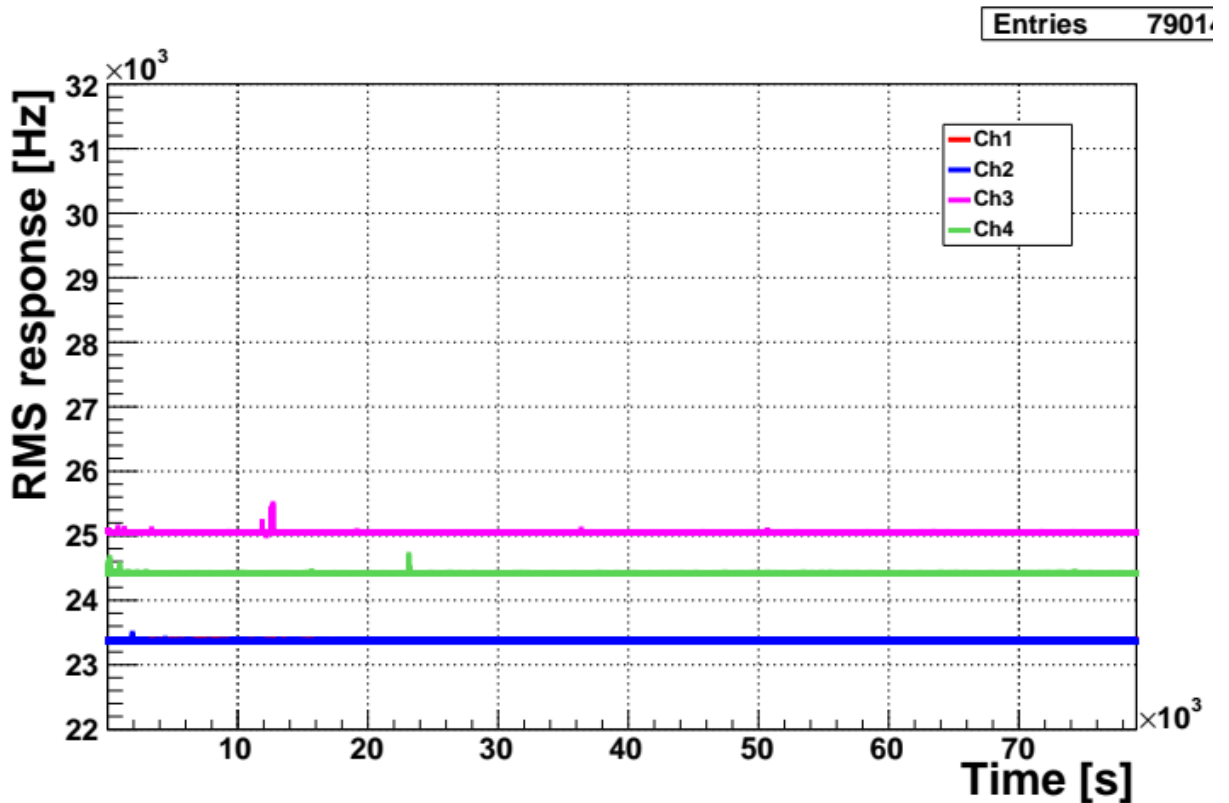


Рис. 4.8 Базова лінія 4х каналів зарядового інтегратора. Кожна лінія відповідає одному з каналів зарядового інтегратора, 5й канал не використовується. Червона лінія має такі ж значення, що і синя. По осі X – час у секундах, по осі Y – відгук на калібрувальний струм (базова лінія).

Для визначення середніх значень базових ліній зарядових інтеграторів будуються проекції базових ліній, після чого використовується апроксимація методом Гауса. Значення базової лінії зарядових інтеграторів були вибрані такими, що приблизно відповідають очікуваному відгуку RMS-R3 при номінальній світності експерименту LHCb в умовах Run3.

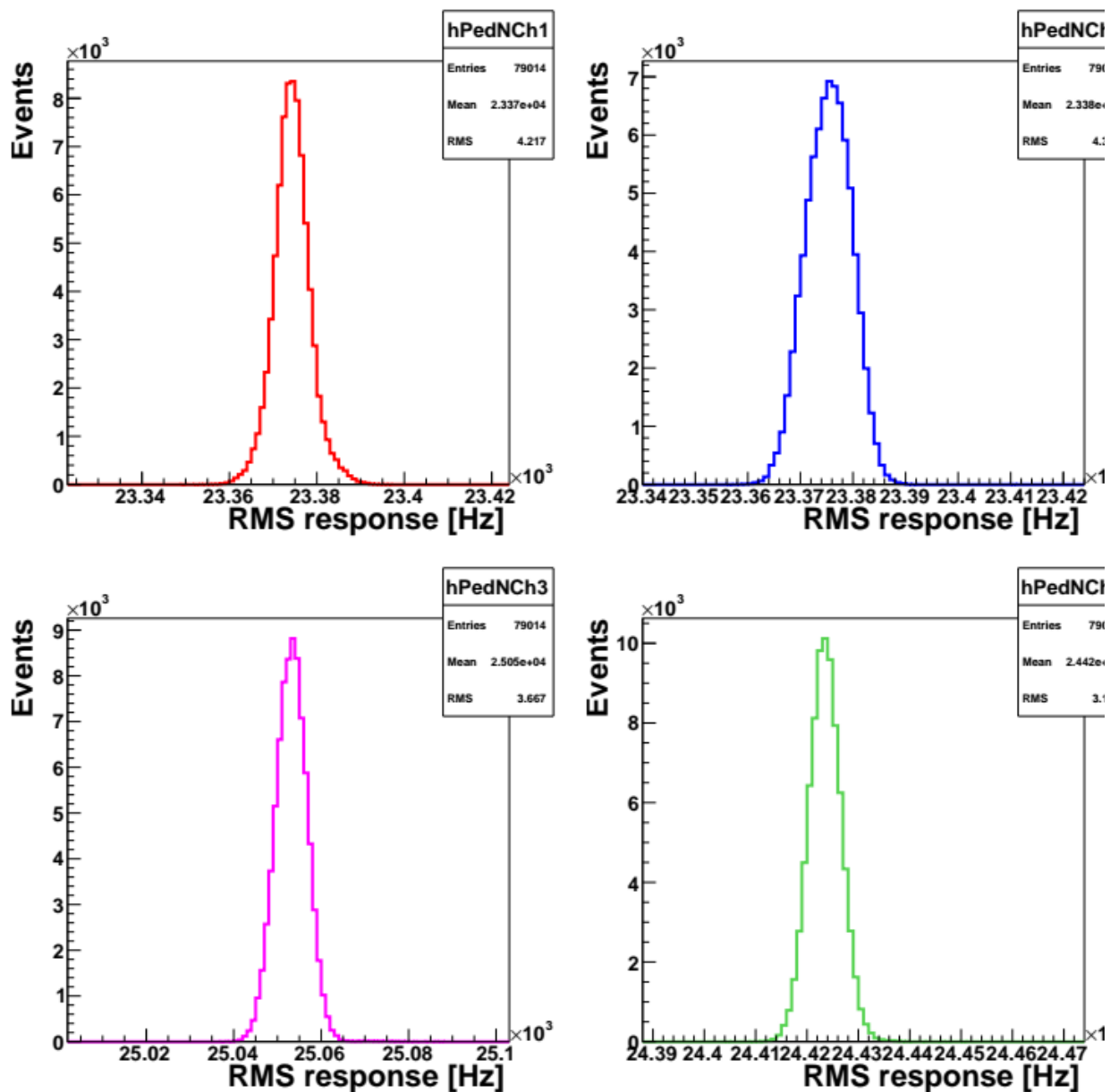


Рис. 4.9 Проекції базових ліній для 4х каналів зарядового інтегратора. Проектування виконано на ось Y основного графіка. По осі X – відгук сенсорів, по Y – кількість подій, що відповідають такій кількості відгуків. Розбіновка ROOT: 1 біну відповідає 1 Гц.

Остаточні значення базових ліній для кожного з каналів RMS-R3

Access ch1 = $21.5612 \text{ кГц} \pm 4.2 \text{ Гц}$;

Access ch2 = $21.3102 \text{ кГц} \pm 4.2 \text{ Гц}$;

Bottom ch1 = $21.6482 \text{ кГц} \pm 3.7 \text{ Гц}$;

Bottom ch2 = $21.6482 \text{ кГц} \pm 3.7 \text{ Гц}$;

Cryo ch1 = $21.4541 \text{ кГц} \pm 4.3 \text{ Гц}$;

Cryo ch2 = 21.5201 кГц ± 4.3 Гц;

Top ch1 = 21.7435 кГц ± 3.2 Гц;

Top ch2 = 21.7435 кГц ± 3.2 Гц.

2.2 Монтаж RMS-R3 у експерименті LHCb

Було виконано монтаж детекторних модулів RMS-R3 в експериментальному приміщенні експерименту LHCb в ЦЕРН, відповідно до розробленого технічного завдання на вхідній захисній бетонній стіні. Ці роботи виконувались інженерно-технічним персоналом ЦЕРН при дистанційному супроводі розробників системи (автор дисертації є одним із розробників системи RMS-R3) за попередньо узгодженим планом. Опорні конструкції сконструйовано таким чином, що кожен детектор можна було модифікувати/демонтувати незалежно від інших. Кожна з них представлена металевим кронштейном, що надійно кріпиться у важком бетоні стіни, та монтажної п-подібної планки, на якій безпосередньо фіксується модуль. Необхідно було забезпечити при цьому прецизійне позиціонування чотирьох детекторних модулів симетрично навкруги іонопроводу ВАК. Така сумлінна робота обумовлена технічними критеріями методу асиметрій для моніторингу положення точки взаємодії пучків ВАК IP8. Монтаж системи RMS-R3 проведено до початку встановлення системи вимірювання світності експерименту (PLUME, *Probe for LUmInosity MEasurement*). Ця система дуже громізка і встановлена саме між вхідною стіною і вершинним детектором VELO, повністю блокуючи доступ до RMS-R3. Більш детальний опис відстаней від осі пучка до модулів вказано в таблиці 4.1 та на рис. 4.10.

Таблиця 4.1. Відстані від осі пучка та точки взаємодії до кожного модуля RMS-R3. Назви точок вказані на рисунку 4.10

ID	Xphys	Yphys	Zphys	Comment
	[m]	[m]	[m]	
RMS-C-TC	-0.56765	0.00003	-2.12166	Measured

RMS-C-BC	-0.56768	-0.03396	-2.12164	Measured
RMS-C-BA	-0.24151	-0.03405	-2.12168	Measured
RMS-C-TA	-0.24157	-0.00001	-2.12167	Measured
RMS-C-SA	-0.22842	0.05297	-2.12228	Measured
RMS-C-SC	-0.58157	0.05296	-2.12203	Measured
RMS-T-BC	-0.00070	0.23980	-2.12118	Measured
RMS-T-BA	0.03331	0.23982	-2.12130	Measured
RMS-T-TA	0.03336	0.56582	-2.12146	Measured
RMS-T-TC	-0.00060	0.56586	-2.12143	Measured
RMS-T-ST	-0.05341	0.57948	-2.12167	Measured
RMS-T-SB	-0.05380	0.22623	-2.12192	Measured
RMS-B-TA	0.03149	-0.23944	-2.12134	Measured
RMS-B-TC	-0.00256	-0.23952	-2.12137	Measured
RMS-B-BC	-0.00257	-0.56559	-2.12136	Extrapolated
RMS-B-BA	0.03144	-0.56557	-2.12148	Extrapolated
RMS-B-SB	-0.05567	-0.57916	-2.12210	Extrapolated
RMS-B-ST	-0.05525	-0.22555	-2.12168	Measured
RMS-B-V1	-0.09445	-0.22928	-2.12333	Measured
RMS-B-V2	-0.09438	-0.49945	-2.12352	Measured
RMS-A-TC	0.24145	-0.00022	-2.12037	Measured
RMS-A-BC	0.24149	-0.03420	-2.12035	Measured
RMS-A-BA	0.56752	-0.03391	-2.12045	Measured
RMS-A-TA	0.56746	0.00009	-2.12032	Measured
RMS-A-SA	0.58088	0.05309	-2.12017	Measured
RMS-A-SC	0.22772	0.05289	-2.12098	Measured

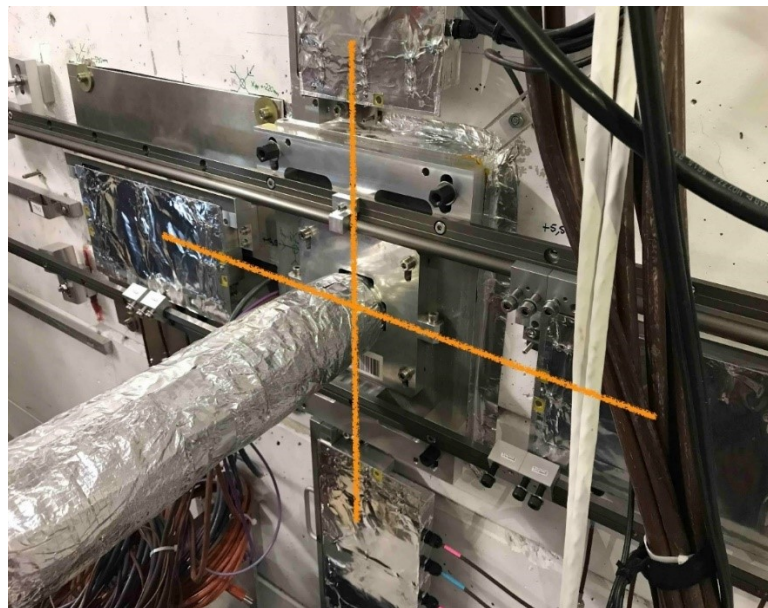
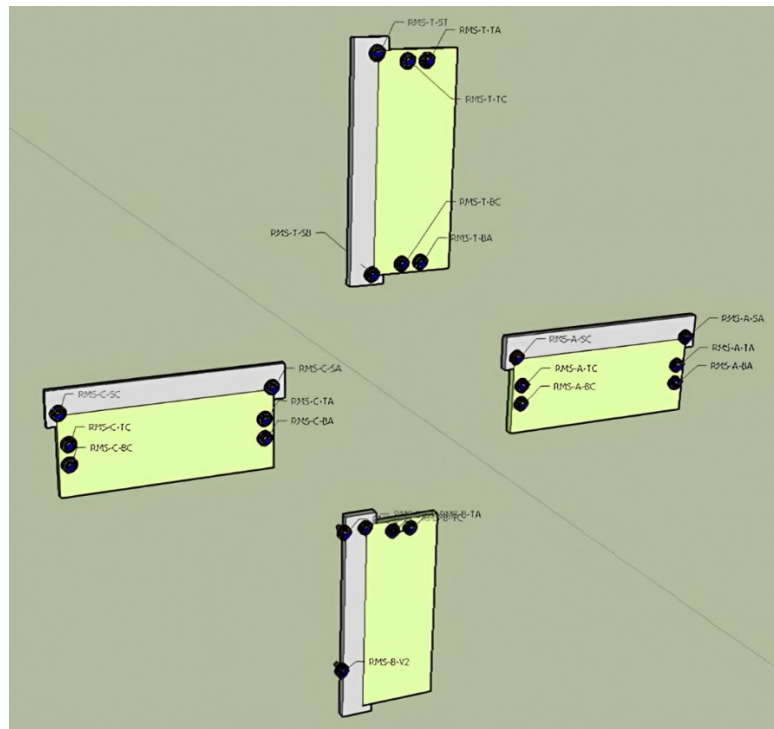


Рис. 4.10 Зверху - CAD креслення кріплення детекторної частини системи RMS-R3, що включає чотири модулі, на захисній стіні перед вершинним детектором VELO, з позначенням точок до яких виміряні відстані від осі пучка та точки взаємодії. Знизу – вигляд детекторної частини системи, що встановлена біля іонопроводу.

На рис. 4.11 показано фото інсталюваної детекторної системи RMS-R3 на захисній стіні в експериментальному приміщенні LHCb у номінальному

робочому положенні приблизно на відстані 2,2 м від точки взаємодії IP8. Дані системи включаються в загальну систему накопичення фізичних даних та відображення на пульті управління експерименту.

Дизайн та функціональні характеристики RMS-R3 демонструє високу чутливість та прецизійність, що є необхідними характеристиками для системи управління мішенним комплексом RMS-R4.

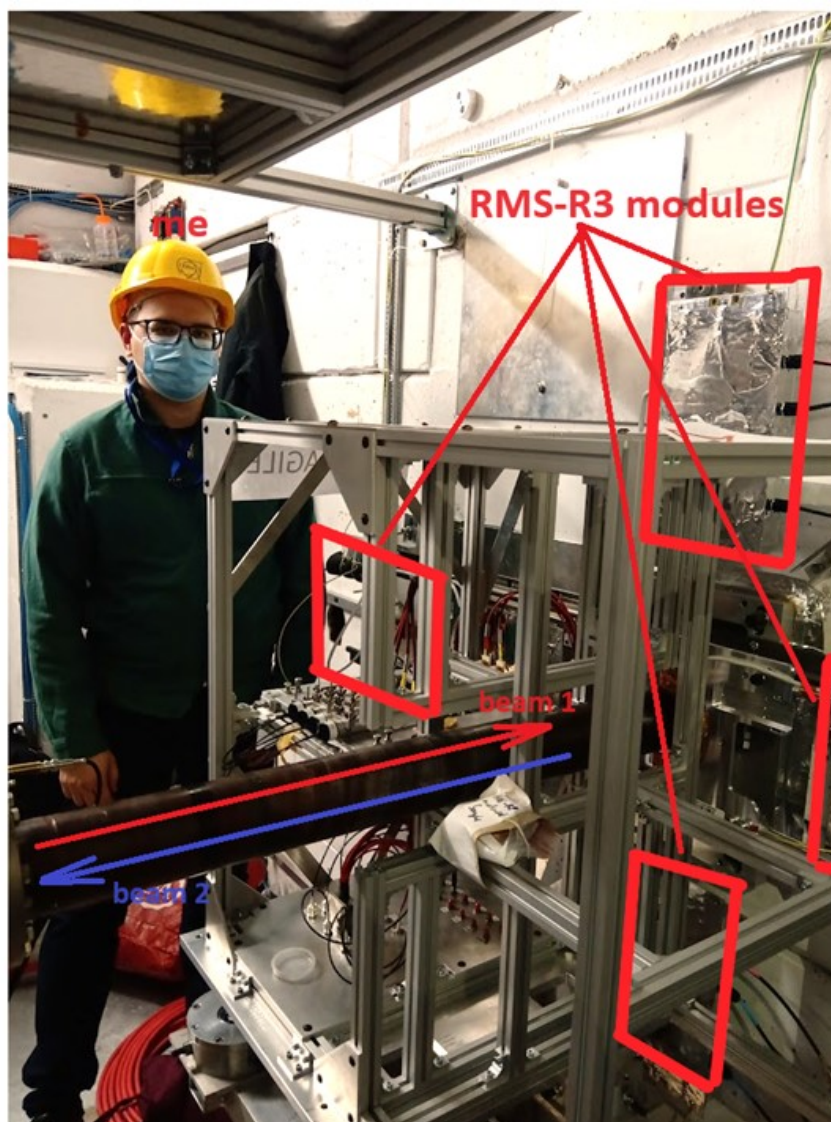


Рис. 4.11 Фото (липень 2021 р.) змонтованої детекторної системи RMS-R3, що включає чотири модулі, на захисній стіні перед вершинним детектором VELO та CAD модель (зліва, для наочного порівняння) і дисертант власною персоною!

§3 Метод асиметрій. Відокремлення пучка від фону

Геометричне розташування модулів детекторів RMS-R3 було спроектовано таким чином (Рис. 4.12), щоб застосувати метод аналізу даних, відомий як метод асиметрій [148]. Цей метод передбачає розрахунок асиметрії відгуків детекторів "лівий-правий" та "верхній-нижній". Асиметрії розраховуються за формулою (4.1):

$$\alpha_{ij} = \frac{R_i - R_j}{R_i + R_j} \quad (4.1),$$

де R_i та R_j – частота відгуку сенсору i та j відповідно, що відповідають парам модулів детекторів.

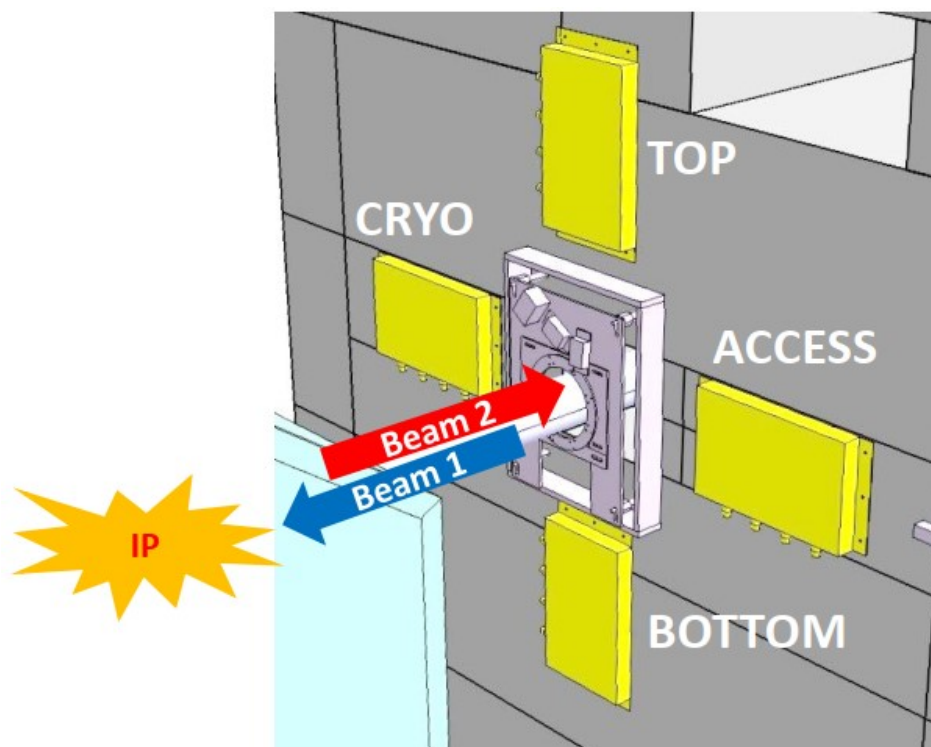


Рис. 4.12 Геометричне розташування модулів RMS-R3 навколо іонопроводу. Модулі RMS-R3 кріпляться на стіну, що є перпендикулярною до осі пучка. Область зіткнення пучків знаходиться на відстані більше 2.2 м по осі Z.

Метод є високо прецизійний, оскільки на площині від -1 до 1 забезпечує спостереження зміщення локалізації фізичних подій відгуку сенсорів на потоки заряджених частинок до $1 \cdot 10^{-3}$ одиниць асиметрії (рис. 4.13). Для

зручності презентації даних позначимо асиметрії для лівого-правого детекторів як $\alpha_{\text{horizontal}}$, а для верхнього-нижнього – α_{vertical} . Ці дані були отримані протягом серії вимірів в експерименті LHCb у 2023 році.

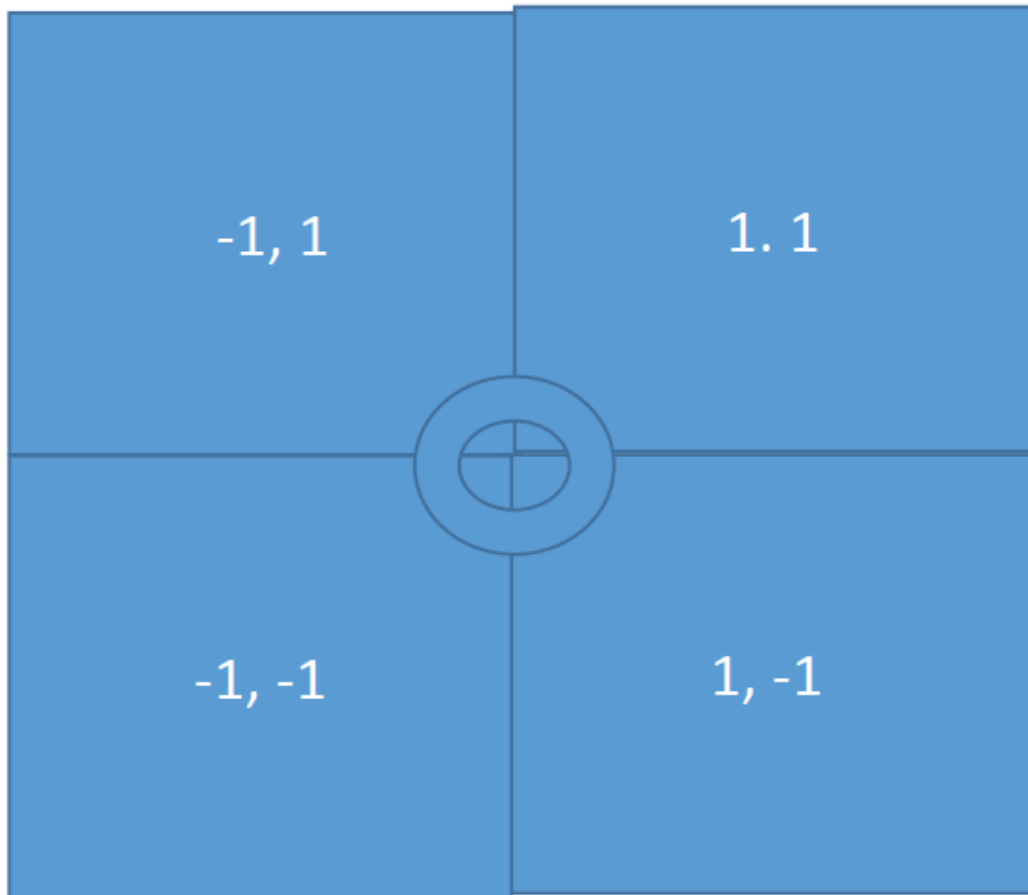
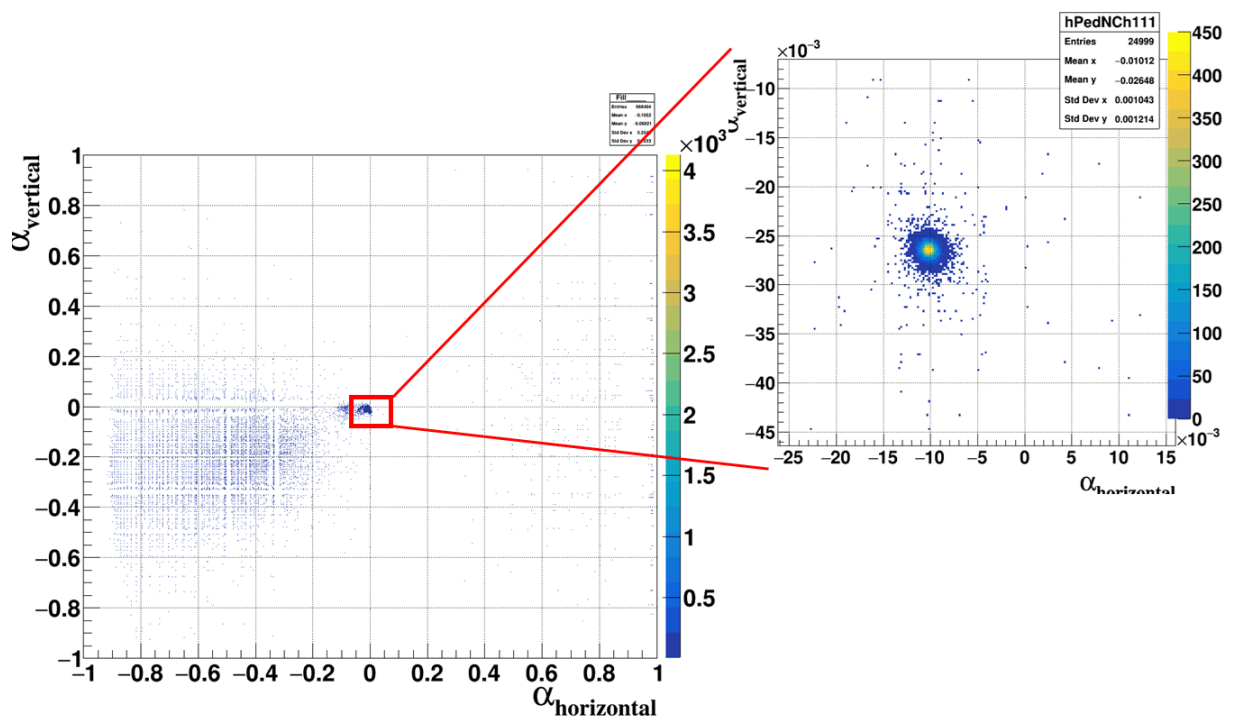


Рис. 4.13 Площина асиметрій RMS-R3. Завдяки методу асиметрій, площину від -1 до 1 по осі X та Y можна умовно поділити на 4 сектори. Якщо модулі встановлені на однакових відстанях і пучок направлений рівно по координаті 0, то локуси асиметрій будуть мати центроїду $(0;0)$ та будуть підпорядковуватись закону Гауса. Можна інтерпретувати зміщення локусу на такій площині як зміщення області взаємодії в неабсолютних координатах асиметрій.

В усіх подібних рисунках по осям X та Y – координати асиметрій, кольором або по Z – кількість подій на бін.

Метод асиметрій дозволяє відрізнити різні умови проведення експерименту від інжекції пучків до їх скидання (рис. 4.14). Для зручності відображення даних використовується розбіновка поля на 10000 бінів по осу X та, відповідно, на 10000 бінів по осі Y. Для розрахунку та відображення даних використовується спеціальний написаний програмний код для програмного пакету ROOT CERN [149].

Відгуки детекторів залежать від перерізу, полярних та азимутальних кутів розташування сенсорів, їх тілесних кутів, миттєвої світності та параметрів пучків і мішенної системи (SMOG2). Примітною особливістю величини асиметрії A_{ij} є те, що вона не залежить ні від світності, ні від тілесного кута детекторів, оскільки вони присутні в чисельнику і знаменнику у формулі 4.1, тобто метод асиметрій дозволяє уникнути більшості систематичних похибок. Очевидно, що будь-яка зміна положення області взаємодії або внеску фону змінить значення A_{ij} . Двовимірні розподіли A_{ij} («left-right» та «top-bottom») дають більш виразну та репрезентативну інформацію. Нижче наводиться кілька прикладів, що ілюструють потужність методу.



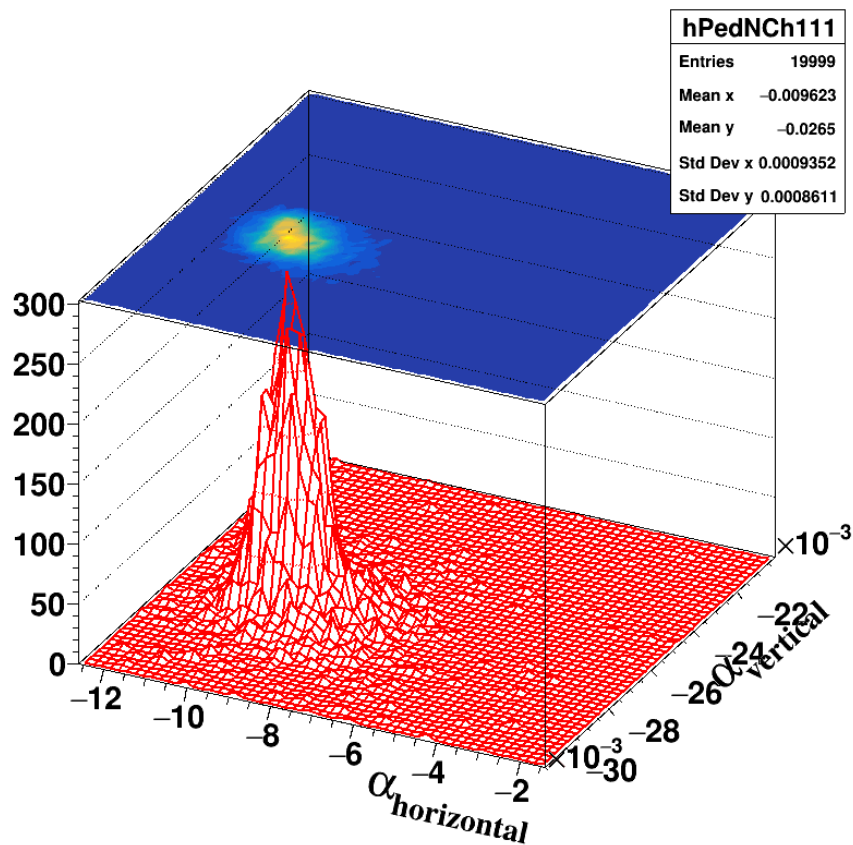


Рис. 4.14 Зверху: Відображення область локалізації фізичних подій RMS-R3 в координатах асиметрій на площині асиметрій відгуку сенсорів RMS-R3 (у вертикальній та горизонтальній площині). На площині асиметрій від -1 до 1 “діаметри” локалізації фізичних подів (локусів) складають $\sim 5-20 \cdot 10^{-3}$ од. ас., а зміщення локусів до $1 \cdot 10^{-3}$. Використання методу відображення COLZ. Знизу: аналогічне відображення даних з використанням об’ємної осі Z, що відповідає за кількість подій у бінах.

По осям X та Y – координати асиметрій, кольором або по Z – кількість подій на бін. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій.

Горизонтальна та вертикальна осі відкладені в одиницях асиметрії відгуків сенсорів "лівий-правий" ($\alpha_{horizontal}$) та "верхній-нижній" ($\alpha_{vertical}$), відповідно. Відповідно до формули 1 фізичні події можуть заповнювати двовимірну площину асиметрій від -1 до 1 у горизонтальному та вертикальному напрямках. Як видно на рис. 4.14, спостерігається добре виражена концентрація подій (локус) з деяким значенням центру ваги. Ці

значення дуже малі. Ці результати вимірів стали можливими завдяки унікальній стабільності траєкторій пучків ВАК та високій чутливості і стабільному функціонуванню RMS-R3». Значення масштабів асиметрії RMS-R3 на представлених ілюстраціях збільшено у 1000 разів. Тобто на площині асиметрій від -1 до 1 “діаметри” локусів складають $\sim 5-20 * 10^{-3}$.

§4 Результати використання методу асиметрій в експерименті LHCb

Перейдемо безпосередньо до результатів застосування методу асиметрій до даних RMS-R3 у експерименті LHCb. На рис. 4.15 показано збільшене зображення розподілу асиметрій, що спостерігається при стабільному заповненні p-p зіткненнями при 6.8 TeV.

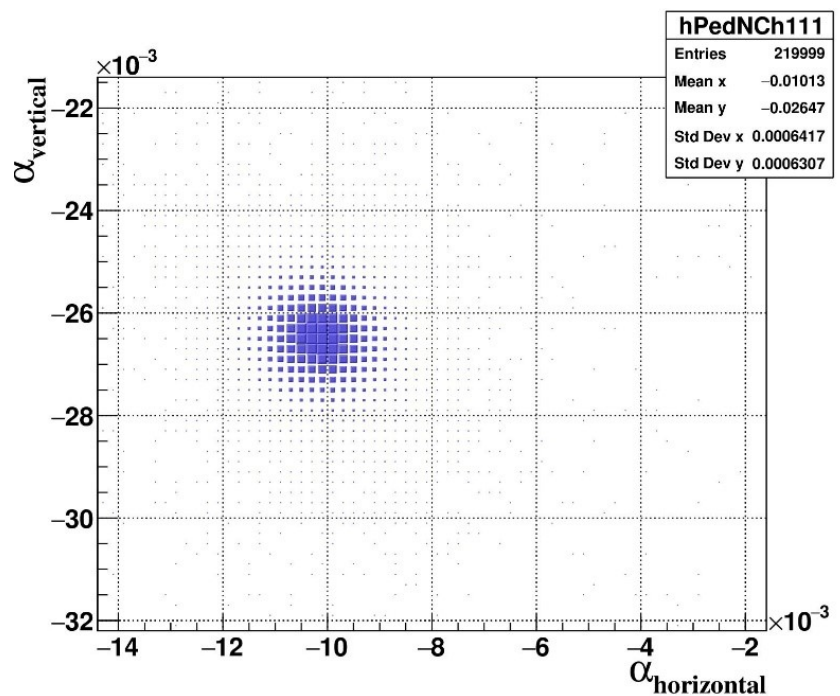


Рис. 4.15 Збільшене зображення двовимірного розподілу асиметрій: “Top-Bottom” (α_{vertical}) vs “Left-Right” ($\alpha_{\text{horizontal}}$), що спостерігається при стабільному заповненні p-p зіткненнями при 6.8 TeV. Для відображення використовувався метод SQUARE. По осям X та Y – координати асиметрій, кольором або по Z – кількість подій на бін. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій.

Як бачимо, існує добре виражена концентрація подій (локус) зі значенням центру ваги (ц.в.) для асиметрій при $\alpha_{\text{вертикальній}} = -25.90 \times 10^{-3}$ та $\alpha_{\text{горизонтальній}} = -9.85 \times 10^{-3}$. Ці значення дуже малі (для плоскої асиметрії зі значеннями від -1 до 1) і є вимірюваними завдяки надзвичайно стабільній роботі системи RMS-R3.

Приклад, що демонструє чутливість розподілу асиметрій до зміни умов експерименту, наведено на рис. 4.16, де спостерігаються дві добре розділені локалізації подій.

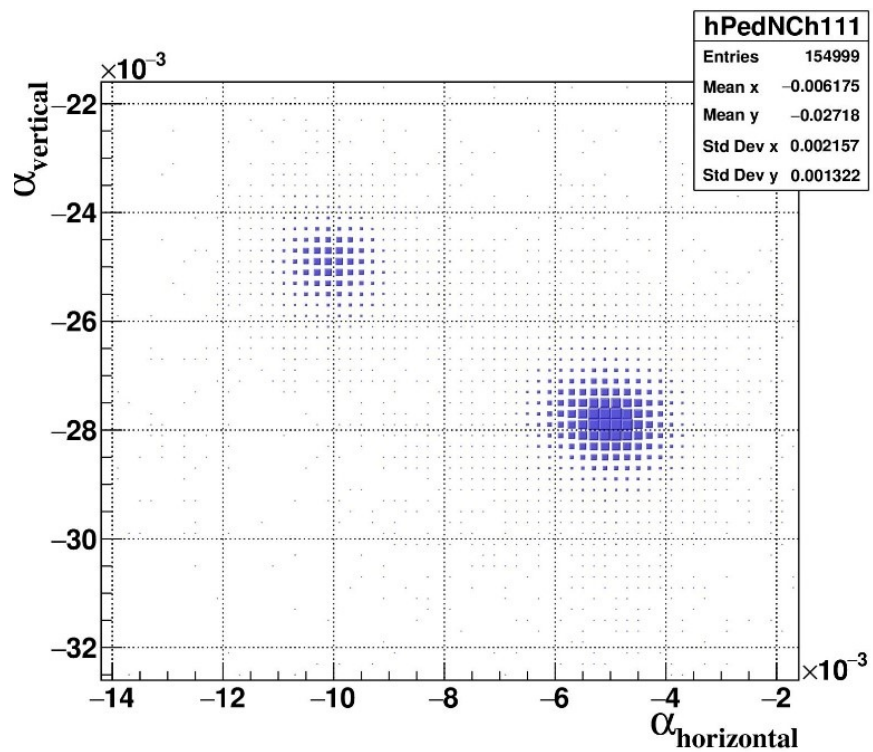


Рис. 4.16. Збільшене зображення двовимірного розподілу асиметрій: «верх-низ» (α_{вертикаль}) vs «лівий-правий» (α_{горизонталь}), що спостерігається при стабільному заповненні p-p зіткненнями при 6.8 TeV. Два локуси відповідають випадкам з VELO OPEN: α_{вертикальній} = $(-27.75 \pm 0.05) \times 10^{-3}$ та α_{горизонтальній} = $(-4.95 \pm 0.05) \times 10^{-3}$ та VELO CLOSED: α_{вертикальна} = $(-24,95 \pm 0,05) \times 10^{-3}$ та α_{горизонтальна} = $(-9,85 \pm 0,05) \times 10^{-3}$. По осям X та Y – координати асиметрій, кольором або по Z – кількість подій на бін. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій.

Локус зі значенням центру ваги для асиметрій при авертикальній = $-27,75 \pm 0,05$) і агоризонтальній = $-4,95 \pm 0,05$ відповідає випадку знімання даних у період часу, коли частини вершинного детектора були виведені з лінії протонного пучка (VELO OPEN). Інший локус зі значенням с.ц.м. для асиметрій авертикальна = $-24,95 \pm 0,05$ і агоризонтальна = $-9,85 \pm 0,05$ відповідає випадку, коли частини вершинного детектора розташовувалися на номінальній відстані від лінії пучка (VELO CLOSED).

Рис. 4.17 ілюструє процедуру визначення значень центроїдів локусів, що спостерігаються на двовимірному розподілі асиметрій швидкості детектора. Як приклад використано дані з рис. 4.15, отримані при стабільному заповненні р-р зіткненнями на енергії 6,8 GeV, при цьому вершинні частини детектора послідовно утримувалися в двох положеннях: VELO OPEN і VELO CLOSED (відповідні локуси описано в підписі до рис. 4.16).

Зсув локусу асиметрії в стані «VELO CLOSE» може свідчити про внесок гало розсіювання променя на ВЧ екрані системи VELO. Це тема для подальших досліджень.

Два піки на рис. 4.17 відповідають проекції даних з двох локусів, представлених на рис. 4.16. Суцільні лінії показують їхню гаусову підгонку, яку використано для вилучення значень центроїдів локусів, а також пов'язаних з ними похибок. Деякі додаткові результати вимірювань асиметрії для р-р зіткнень і зіткнень пучка протонів з ядрами газової мішені (режим фіксованої мішені) наведено в табл. 4.2.

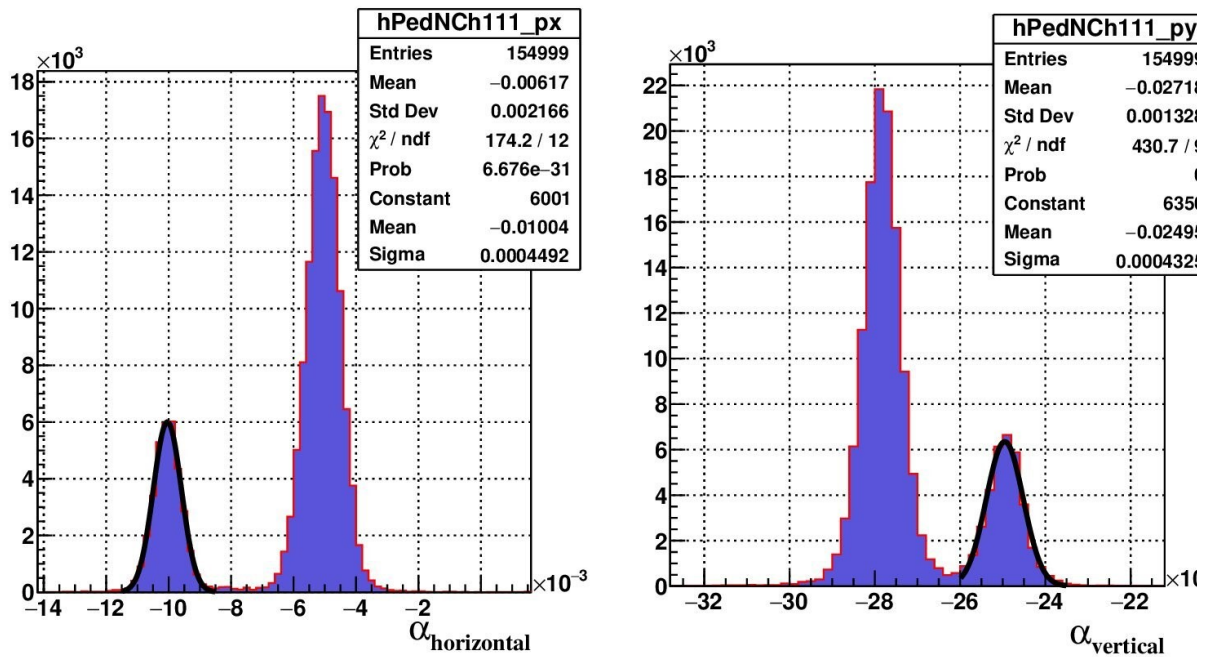


Рис. 4.17. Проекції двовимірного розподілу асиметрій, що спостерігаються при стабільному заповненні р-р зіткненнями при 6.8 TeV (див. рис. 4.6), на горизонтальну (ліва панель) і вертикальну (права панель) осі. По осі X – проекції одиниці асиметрій на осі, по Y – кількість подій. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій.

Таблиця 4.2. Координати центроїда локусу асиметрій для р-р зіткнень і взаємодії пучка протонів з нерухомим (газовим) ядром мішені. Для зіткнень пучок-газ верхинний детектор завжди закритий (VELO CLOSED)

Зіткнення	Центроїди координат локусів асиметрій $\alpha_{\text{horizontal}}$; α_{vertical} (обидва, помножені на 10^{-3})
<i>p-p</i> (VELO CLOSED)	(-9.85 ± 0.05) ; (-24.95 ± 0.05)
<i>p-p</i> (VELO OPEN)	(-4.95 ± 0.05) ; (-27.75 ± 0.05)
<i>p-Ar</i> (gas target)	(-3.45 ± 0.05) ; (-26.65 ± 0.05)
<i>p-He</i> (gas target)	(-9.75 ± 0.05) ; (-24.55 ± 0.05)
<i>p-H2</i> (gas target)	(-9.55 ± 0.05) ; (-25.45 ± 0.05)

Дані таблиці 4.2 показано, що середні значення асиметрій, вимірених на RMS-R3, дуже близькі до нуля, як і слід було очікувати з точки зору його

симетричної геометричної компоновки і прецизійного монтажу детекторів відносно лінії пучка. З іншого боку, дані, наведені на рисунках 4.15 і 4.16 (а також аналогічні для багатьох інших заповнень пучків ВАК), демонструють однозначну впевненість у можливості чіткого спостереження руху локусів при зміні як положення області взаємодії, так і умов проведення експерименту. Це можливо завдяки високій стабільності характеристик RMS-R3, що дозволяє вимірювати різницю швидкостей детекторів з точністю до кількох Гц у діапазоні частот 100 кГц.

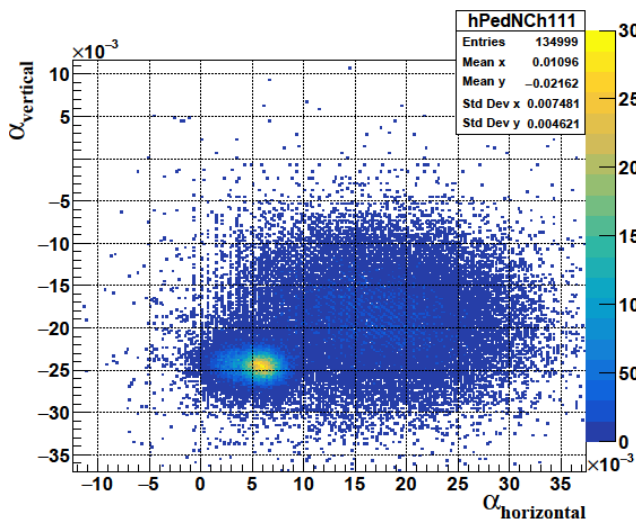


Рис. 4.18. Залежність асиметрії відгуків сенсорів RMS-R3 від параметра зіткнень ядерних пучків, μ . Серія зіткнень №8685 (Fill 8685). Енергія 6800 ГеВ. Горизонтальна вісь – асиметрія відгуку сенсорів «Лівий-Правий,» Вертикальна вісь – асиметрія відгуку сенсорів «Верхній-Нижній». Для малоінтенсивного локусу (зліва) $\mu = 1.1$, Для потужнішого локусу (справа) $\mu = 0.1$ По осям X та Y – координати асиметрій, кольором або по Z – кількість подій на бін. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій.

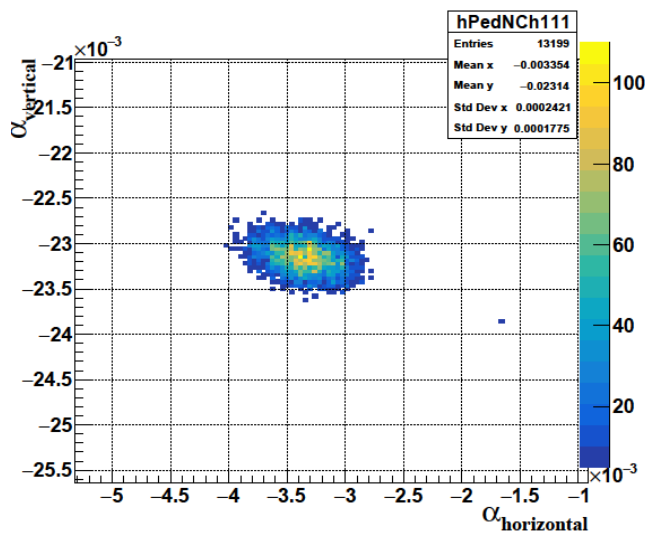


Рис. 4.19 Асиметрії відгуків сенсорів RMS-R3 при значенні параметра зіткнень ядерних пучків, $\mu = 10$. (Позначення осей, як на рис. 3.). Серія зіткнень №8782 (Fill 8782). Енергія 6800 ГеВ. По осям X та Y – координати асиметрій, кольором або по Z – кількість подій на бін. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій.

Аналіз отриманих експериментальних даних RMS-R3 продемонстрував її надійне функціонування з високими характеристиками чутливості та стабільності відгуку на потоки заряджених частинок. Використання оригінальних методів ідентифікації та оцінки стабільності експериментальних умов (метод асиметрії) дозволяє спостерігати зміщення області взаємодій пучків ВАК, або взаємодії пучка ВАК із ядрами фіксованої мішені SMOG2 при нормальних умовах та інжекції пучків та/або газу “a la SMOG1” (тобто без використання накопичувально-концентруючої комірки SMOG2), а також оцінити зміну області взаємодії при варіації параметру μ , середньої кількості протон-протонних взаємодій на перетин в одному банчі пучків. Ця функціональна характеристика RMS-R3 ілюструється нижче даними двовимірних розподілів асиметрій для різних значень параметру μ - середньої кількості протон-протонних взаємодій на один перетин пучків, що прямо пропорційно змінює миттєву світність експерименту (рис. 4.18, 4.19).

Двовимірні розподіли асиметрій відгуку сенсорів RMS-R3 (рис. 4.18 та 4.19) дозволили визначити положення центрів локалізації фізичних подій з наступними координатами:

$$\mu = 10 \quad \alpha_{\text{vertical}} = (-23,25 \pm 0,05) * 10^{-3} \text{ та } \alpha_{\text{horizontal}} = (-3,35 \pm 0,05) * 10^{-3}$$

$$\mu = 1.0 \quad \alpha_{\text{vertical}} = (-24,75 \pm 0,05) * 10^{-3} \text{ та } \alpha_{\text{horizontal}} = (6,25 \pm 0,05) * 10^{-3}$$

$$\mu = 0.1 \quad \alpha_{\text{vertical}} = (-19,5 \pm 0,05) * 10^{-3} \text{ та } \alpha_{\text{horizontal}} = (18,85 \pm 0,05) * 10^{-3}$$

Метод асиметрій для відгуків RMS-R3, отриманих у 2023 році, дозволяє також відрізнити різні умови проведення експерименту, таких як зміна стану (відкритий-закритий) Вершинного детектора VELO (рис. 4.20) або зіткнення протонних пучків із різними інжекттованими газами системи SMOG2: Ar (рис. 4.21) або декількох газів протягом одного прогону пучків (рис. 4.21).

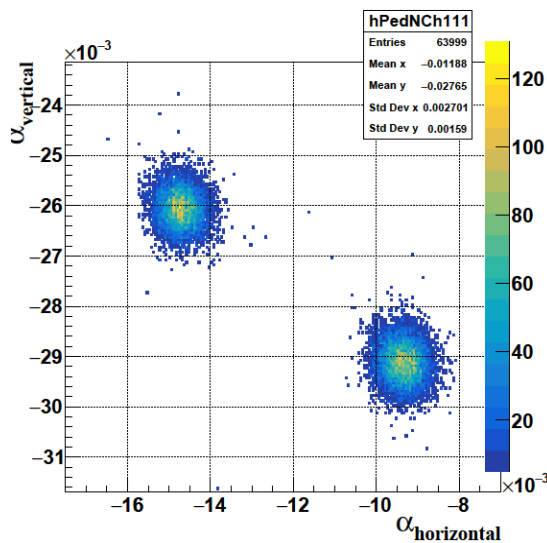


Рис. 4.20. Збільшене зображення двовимірного розподілу асиметрій даних відгуку сенсорів RMS-R3, що спостерігаються при протон-протонних зіткненнях при 6.8 TeV. Серія зіткнень №8387 (Fill 8387). Два локуси відповідають випадкам закритого стану VELO: $\alpha_{\text{vertical}} = (-26.1 \pm 0.05) * 10^{-3}$ і $\alpha_{\text{horizontal}} = (-14.75 \pm 0.05) * 10^{-3}$ і відкритого стану VELO: $\alpha_{\text{vertical}} = (-29,15 \pm 0,05) * 10^{-3}$ та $\alpha_{\text{horizontal}} = (-9,35 \pm 0,05) * 10^{-3}$. По осям X та Y – координати асиметрій, кольором або по Z – кількість подій на бін. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій.

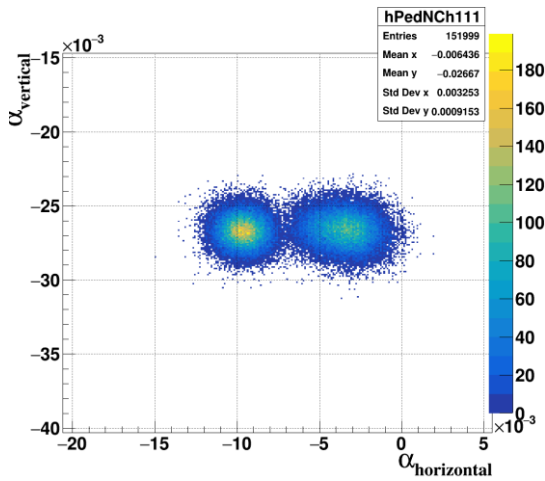


Рис. 4.21 Локус асиметрій відгуків сенсорів RMS-R3 для протон-протонних взаємодій (зліва) та локус взаємодій пучка з фіксованою газовою мішенню Аргону SMOG2 (справа). Серія зіткнень №7963 (Fill 7963). Енергія 6800 ГеВ. По осям X та Y – координати асиметрій, кольором або по Z – кількість подій на бін. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій.

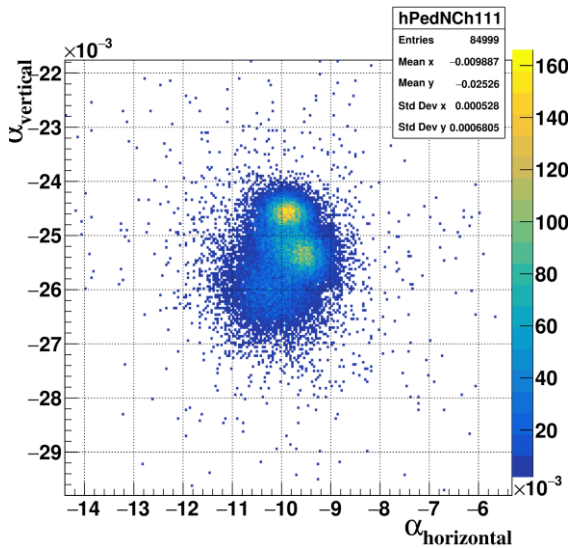


Рис. 4.22. Локуси асиметрій відгуків сенсорів RMS-R3 для протон-протонних зіткнень (великий локус в центрі), зіткнень пучка протонів з гелієм (маленький локус справа) та H2 (маленький локус зліва). Серія зіткнень №8474 (Fill 8474). Енергія 6800 ГеВ. По осям X та Y – координати асиметрій, кольором або по Z – кількість подій на бін. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій.

Окремо розглянемо і порівняємо результати для енергій до 13,6 ТеВ та світності до $2 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для протон-протонних зіткнень (Рис. 4.23) та при зменшеній світності на 6-7 порядків для свинцево-свинцевих зіткнень та для зіткнень пучка з ядер свинця з фіксованою газовою мішенню SMOG2 у Run 3. Отримані результати свідчать про чутливість системи до зіткнень пучка з ядер

свинця та ядер газової фіксованої мішені. Зокрема дані для свинцево-свинцевих зіткнень дозволяють зробити висновки щодо поведінки області взаємодії відносно протон-протонних зіткнень.

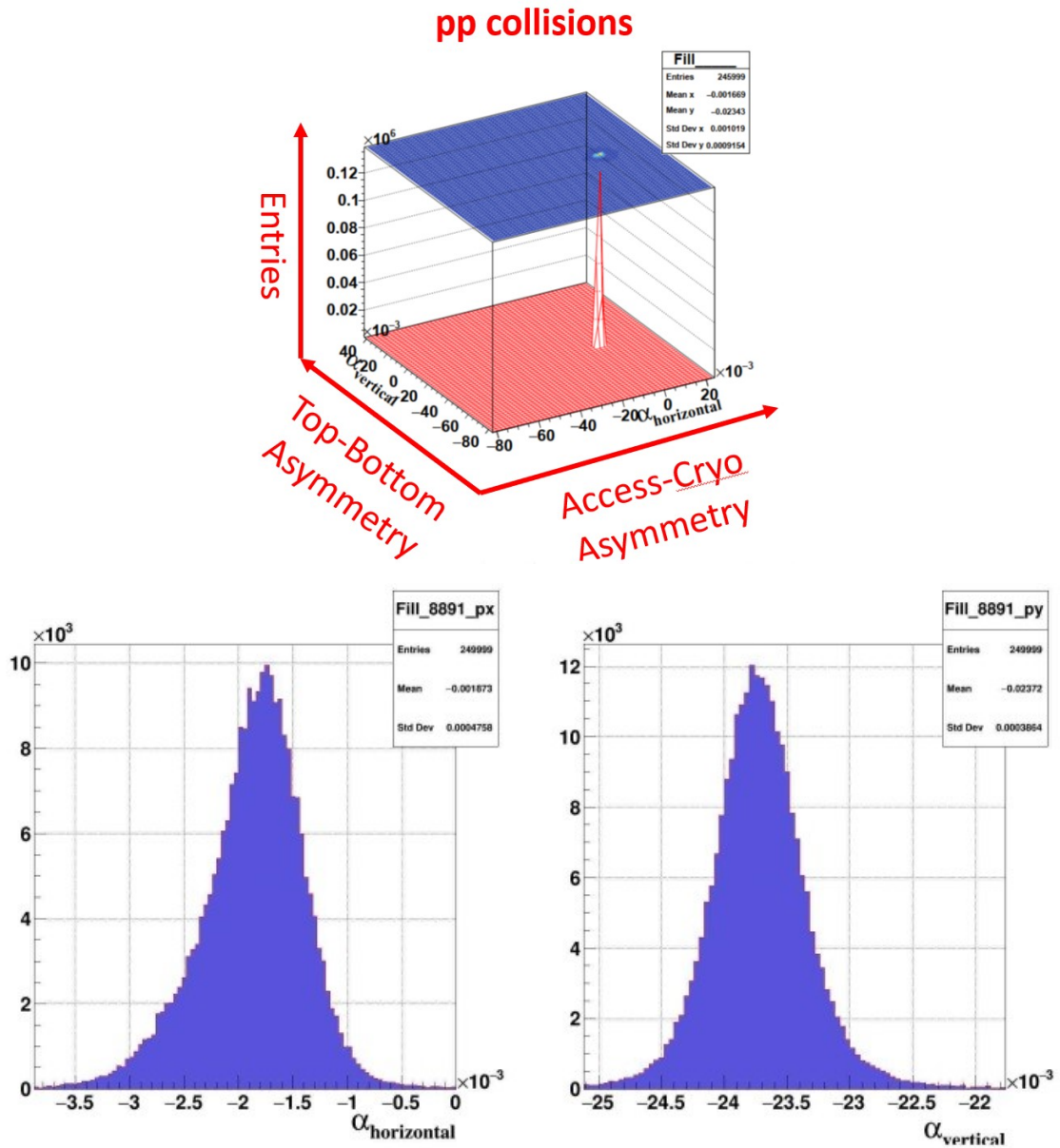


Рис. 4.23 Локус асиметрій відгуків сенсорів RMS-R3 для протон-протонних зіткнень для Fill 8891 та його проєкції. Для верхнього рисунку: По осям X та Y – координати асиметрій, кольором або по Z – кількість подій на бін. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій. Для нижніх рисунків: По осі X – проєкції одиниці асиметрій на осі, по Y – кількість подій. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій.

Для асиметрій відгуку сенсорів RMS-R3 для протон-протонних зіткнень маємо наступні особливості: $\mu \approx 4$, координати центроїди локусу ($-1.7 \cdot 10^{-3}$; $-23.7 \cdot 10^{-3}$), середньоквадратичне відхилення $\sim 0.43 \cdot 10^{-3}$. Свинцево-свинцеві зіткнення відбувались при енергії $\sqrt{s_{NN}} = 5,36$ TeV для світностей до 9×10^{26} $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Координати центроїди локусу $\sim -21 \cdot 10^{-3}$; $-30 \cdot 10^{-3}$, середньоквадратичне відхилення $\sim 14,4 \cdot 10^{-3}$ (Рис. 4.24).

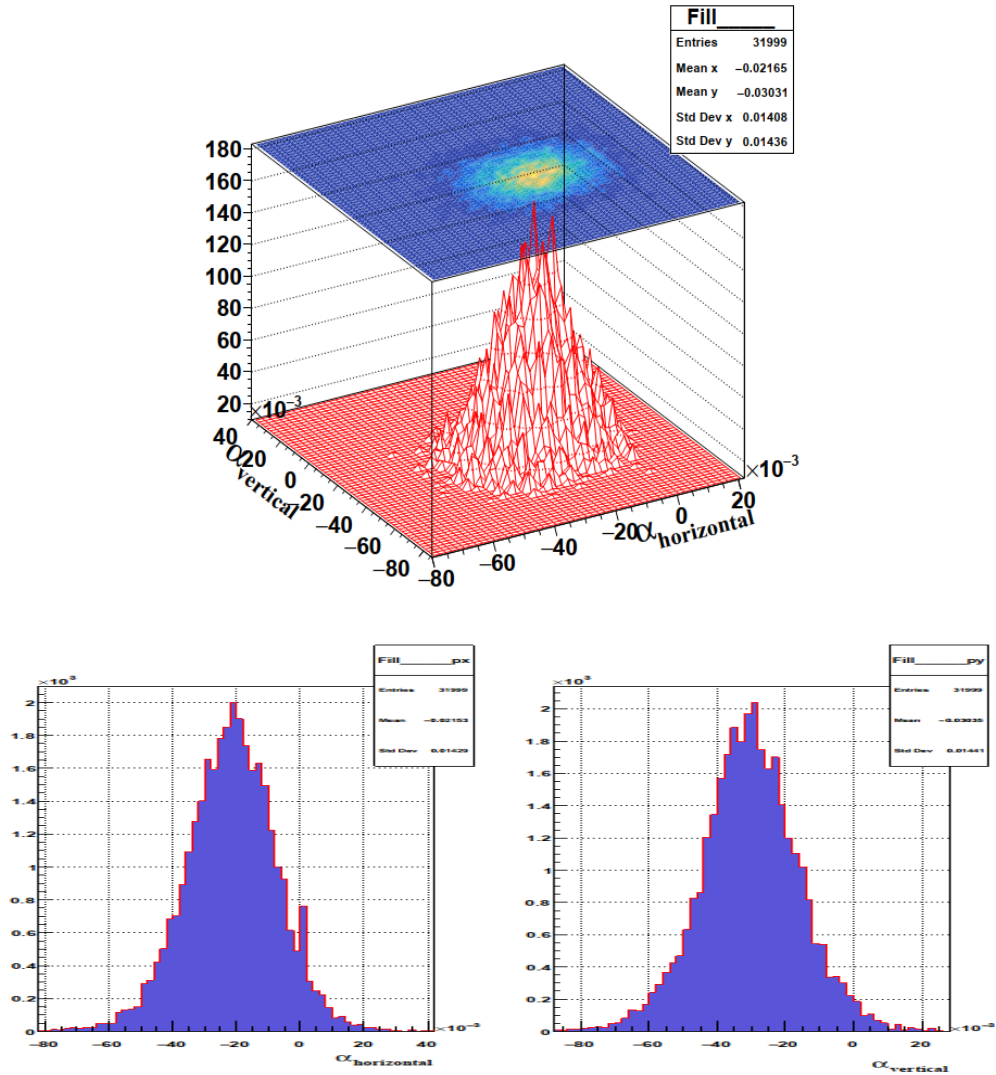


Рис. 4.24 Локус асиметрій відгуків сенсорів RMS-R3 для свинцево-свинцевих зіткнень. Fill 9200. Для верхнього рисунку: По осям X та Y – координати асиметрій, кольором або по Z – кількість подій на бін. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій. Для нижніх рисунків: По осі X – проекції одиниці асиметрій на осі, по Y – кількість подій. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій.

При свинцево-свинцевих зіткненнях були інжекції газу аргон методом SMOG, тобто інжектування відбувалось в область зіткнення пучків (Рис. 4.25). Координати центроїди локус $\sim -4 \cdot 10^{-3}$; $-30 \cdot 10^{-3}$, середньоквадратичне відхилення $\sim 9,3 \cdot 10^{-3}$.

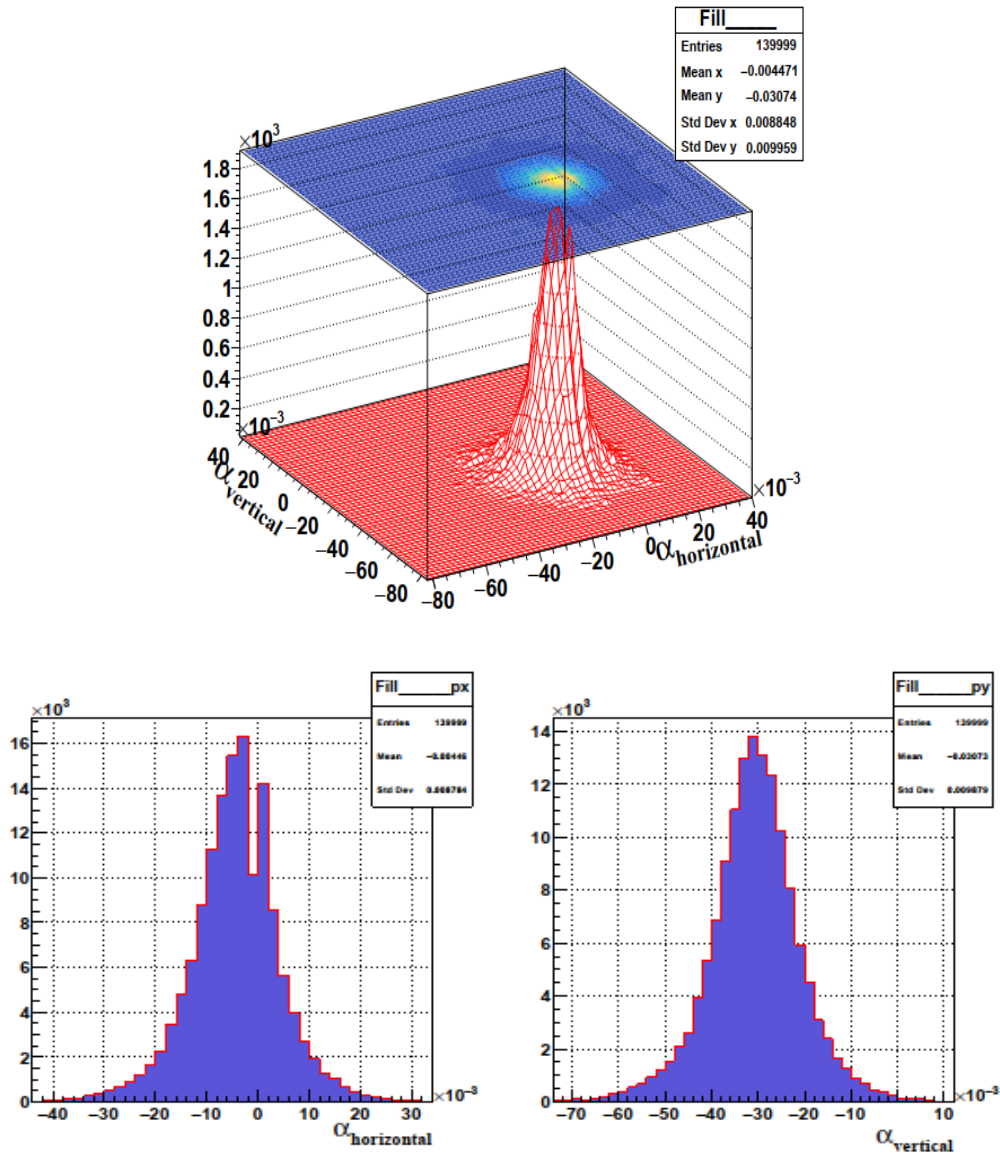


Рис. 4.25 Локус асиметрій відгуків сенсорів RMS-R3 для свинцево-свинцевих зіткнень та зіткнень пучка ядер свинця з ядрами фіксованої газової аргонної мішені. Fill 9220. Для верхнього рисунку: По осям X та Y – координати асиметрій, кольором або по Z – кількість подій на бін. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій. Для нижніх рисунків: По осі X – проєкції одиниці асиметрій на осі, по Y – кількість подій. Розбіновка ROOT: 1 бін – 10^{-4} одиниць асиметрій.

З отриманих даних можна зробити висновок, що хоча RMS-R3 за допомогою методу асиметрій бачить не область зіткнень, а її відображення у координатах асиметрій, RMS-R3 може відслідковувати зміну області взаємодій, таким чином відслідковувати умови проведення та умови відновлення експерименту LHCb.

§5 Зчитувальна система RMS-R3. Програмне забезпечення

Система зчитування включає чутливі зарядові інтегратори, лічильники частоти і плату VLDB [150]. Вихідна частота зарядових інтеграторів пропорційна потоку заряджених частинок, що проходять через зону сенсора, а їх відгук вимірюється в широкому динамічному діапазоні 10^3 - 10^9 МІЧ/с/сенсор.

Частота вимірюється 32-бітними лічильниками, побудованими на платі STM32F4DISCOVERY (STM32F407VGT6) з мікроконтролером за допомогою внутрішнього високошвидкісного кварцового генератора. Мікроконтролер забезпечує щосекундний моніторинг і дозволяє працювати RMS-R3 як в автономному режимі збору даних, так і інтегрувати його в центральну систему моніторингу LHCb.

Плата VLDB забезпечує передачу даних, з'єднуючи передню (FE) і задню (BE) електроніку RMS-R3. Вона об'єднує чотири модулі: GBTx, GBT-SCA, VTRx/VTTx, FeastMP. Набір GBT-SCA дозволяє зчитувати дані з плати STM32F407DISCOVERY за допомогою інтерфейсу I2C.

Більша частина системи зчитування розміщена в Counting Room LHCb (рис. 4.26) та живиться джерелом, яке видає напругу у 24 В, -24 В, 6 В та -6 В.

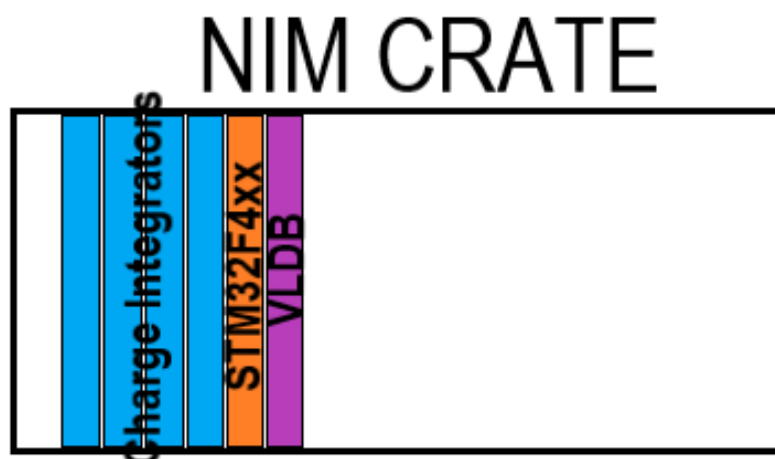


Рис. 4.26 Зверху – схематичне зображення розташування зарядових інтеграторів, лічильників та плати VLDB у NIM CRATE у Counting Room. Знизу – фото NIM CRATE з усіма компонентами зчитувальної системи RMS-R3.

Централізований набір первинних даних із RMS-R3 виконує WinCC сервер [151, 152], що одночасно записує їх в базу даних OracleDB. Виміряні RMS-R3 дані надходять із бази даних в центральну систему контролю LHCb (акронім ECS) для онлайн моніторингу, генерації сповіщень та зв'язку з іншими системами, а також в загальну структуру моніторингу LHCb (акронім MONET) для генерування черговими в центрі керування експериментом LHCb

автоматичних звітів, графіків та перегляду виміряних або розрахованих в реальному часі величин.

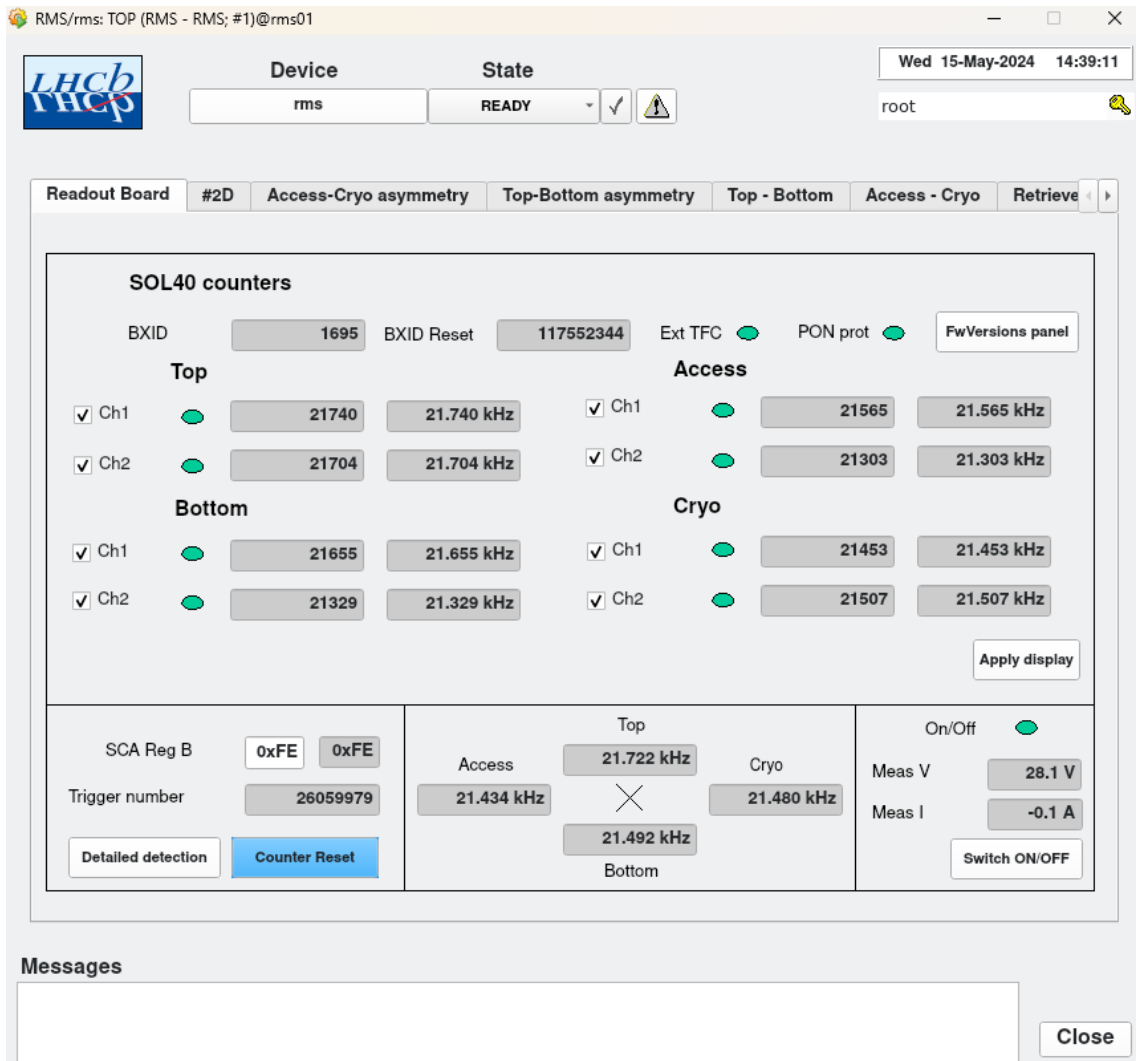


Рис. 4.27 Вікно проекту візуалізації даних RMS-R3 середовищі WinCC. Наразі вікно RMS-R3 має 7 вкладинок: 1шавкладка про стан системи, відгук кожного сенсора, середня значення відгуку для модулів, напруга та струм, що подається до зарядових інтеграторів та деякі інші дані, 2га вкладка для 2D асиметрій, 3тя та 4та – для 1D асиметрій, 5та та бта – для відгуку сенсорів, 7ма – для завантаження даних через інтерфейс WinCC.

Вивід даних RMS-R3 представлено у вигляді проекту в середовищі WinCC (рис. 4.27), де є можливість знайти інформацію про стан роботи RMS-

R3, відгук сенсорів з кожного модуля системи, подивитись інформацію про напругу та струм джерела, що питає систему. Наразі у проекті візуалізації даних RMS-R3 представлені вікна з візуалізацією усереднених відгуків для кожного модуля, а також візуалізація асиметрій у виді проєкцій для кожної пари сенсорів (детальніше у Розділі 4, §2).

Дані RMS-R3 інтегруються в структуру експерименту ECS, архівуються та виводяться онлайн у середовищі MONET, де відображаються необроблені відгуки сенсорів, світність LHCb на базі відгуків RMS-R3 та графіки асиметрій сенсорів RMS-R3.

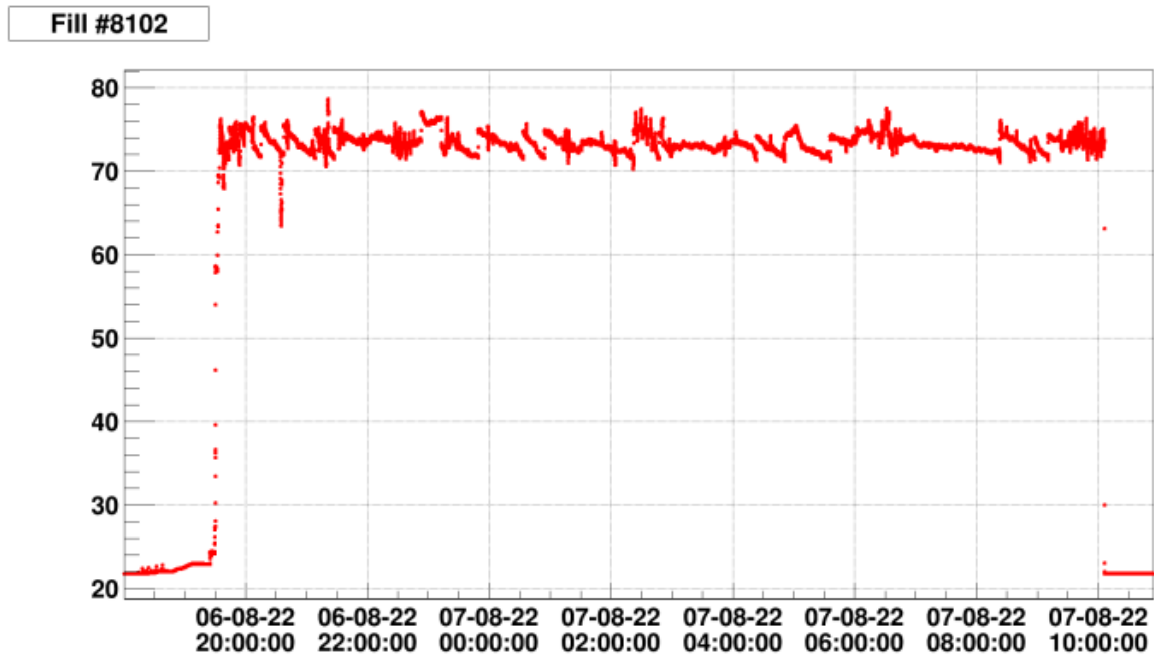
Основним експериментальним і фізичним завданням є отримання репрезентативних, високоточних даних. Дані мають бути виміряні в якомога стабільніших, однорідних умовах протягом усієї кампанії RUN3. Основним завданням системи RMS-R3 є надання онлайн інформації про прийнятні пучкові і фонові умови, пов'язані з пучково-пучковою або пучково-газовою взаємодією ВАК в області взаємодій експерименту LHCb. Дані RMS-R3 мають гарантувати, що ці умови добре відтворюються пучками ВАК від заповнення до заповнення. Надійність даних RMS-R3 визначається їхньою високою лінійністю і часовою стабільністю відгуку, незалежною від накопиченої флюенси радіаційного навантаження.

На рис. 4.28 показано еволюцію швидкостей RMS-R3 і даних системи вимірювання світності PLUME [153], виміряних під час заповнення 8891 (протон-протонних зіткнень з енергією пучка 6.8 TeV), у середовищі Monet. Оскільки застосовується абсолютне калібрування за допомогою системи PLUME (використовується калібрувальний множник), можна зробити висновок про повну відповідність обох вимірювань і надійність RMS-R3 як додаткового лічильника світності.

PLUME - це абсолютно новий детектор [153] для вимірювання світності та стану пучка в точці взаємодії в експерименті LHCb. PLUME базується на

реєстрації черенковського випромінювання, яке генерується в кварцовому матеріалі частинками з області взаємодії.

Фоновий внесок може бути спричинений розсіюванням пучка і гало пучка на краях коліматорів. Радіочастотна фольга VELO та вхідні частини системи SMOG2. Важливо відрізнити «погані» фонові умови від оптимальних як під час роботи в режимі онлайн, так і на етапі аналізу даних (офлайн-процес). У наступному параграфі детально описано ефективну методику оцінки та візуалізації асиметрій (умов експерименту).



LHCb Luminosity Fill #8102

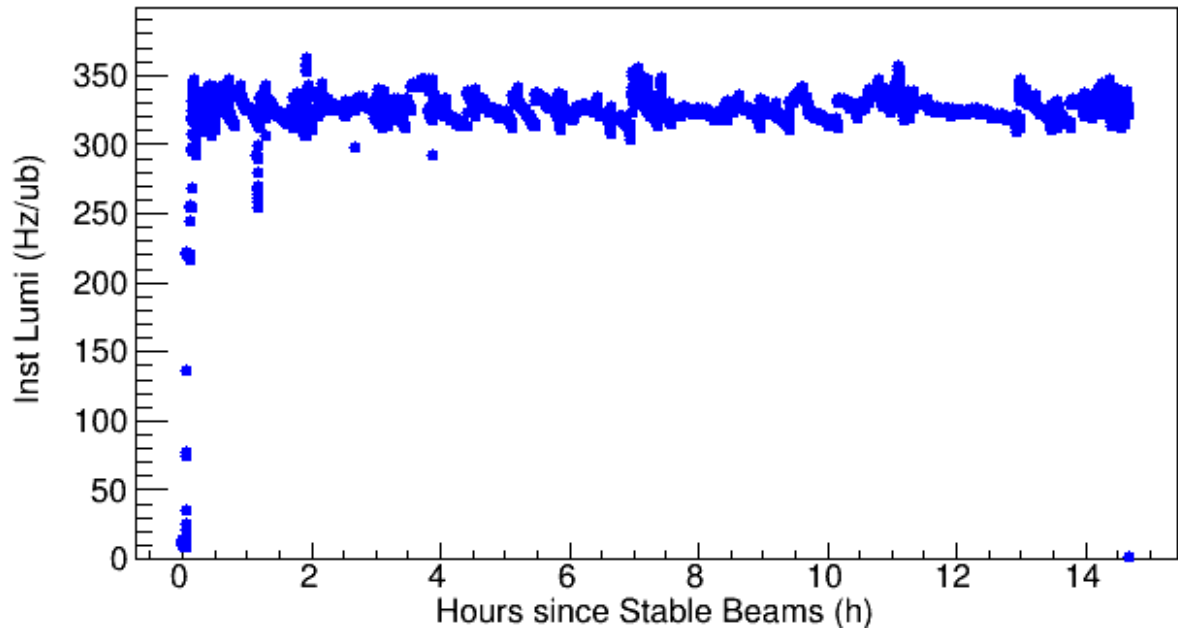


Рис. 4.28. Відгук RMS-R3 (верхній рисунок) у порівнянні з абсолютною світністю, виміряною системою PLUME під час заповнення 8891 (середня світність $1.06 \cdot 10^{33}$, протон-протонні зіткнення) у середовищі Monet. Відгук RMS-R3 (нижній рисунок) у порівнянні з абсолютною світністю, виміряною системою PLUME під час заповнення 9200 (середня світність $4.53 \cdot 10^{26}$, свинцево-свинцеві зіткнення). По осі X – час набору даних з моменту стабільних пучків, Y – відгук RMS-R3 (зверху), миттєва світність (знизу)ю
Рисунки взято із середовища Monet.

Такі стабільні умови знімання даних забезпечують ефективне використання високовартісної роботи ВАК. Відповідна інтегральна світність отримується шляхом інтегрування миттєвої світності як функції часу протягом заданого часового інтервалу. Вища точність виміряної світності призводить до більш точного вимірювання перерізу процесу або значення, яке може бути отримане з нього.

Важливою частиною калібрування детекторів в експерименті LHCb є метод μ -сканування. За визначенням, μ - це середня кількість видимих р-р взаємодій на перетин пучка [154]. Миттєва світність прямо пропорційна μ .

Суть методу полягає в обчисленні калібрувальної константи. Константу отримують з апроксимації відгуку детектора на світність. Оскільки μ прямо пропорційна освітленості в експерименті, ми маємо залежність частоти спрацьовування детектора від μ . Залежність є лінійною і дозволяє оцінити надійність детектора.

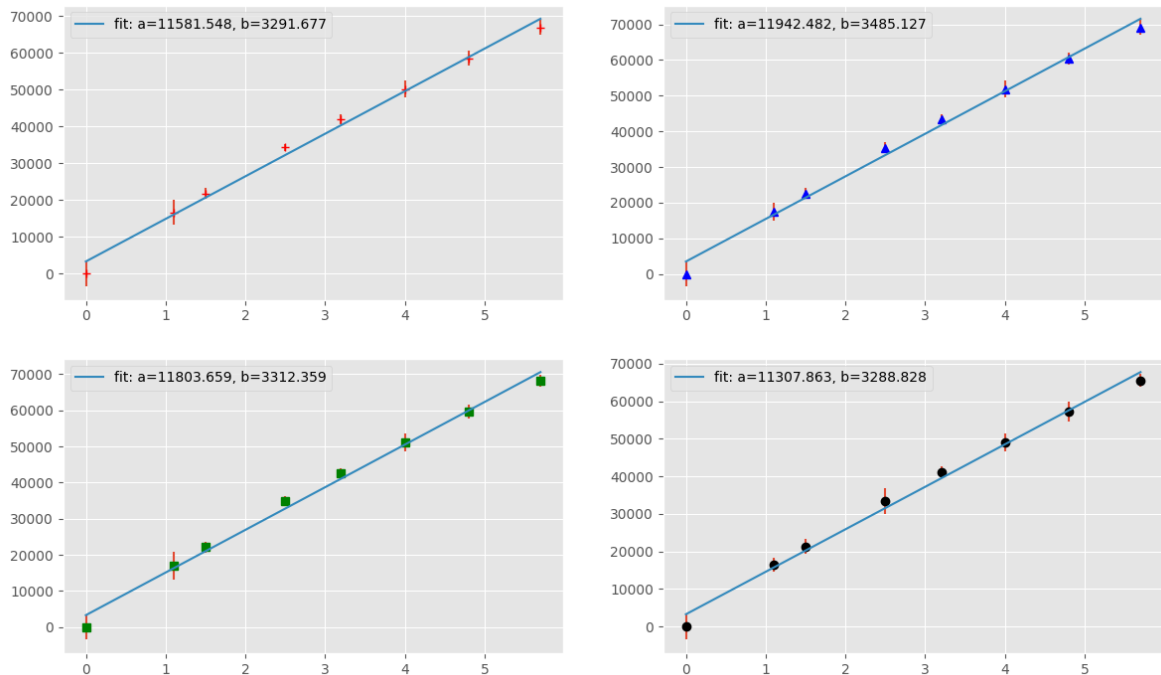


Рис. 4.29 Залежність відгуків модулів детектора від μ – середньої кількості видимих протон-протонних зіткнень на один банч пучка (для похибки 5σ). По осі X - μ , по Y – усереднений відгук модулів RMS-R3. Використана підгонка лінійною функцією. Модулі: TOP (верхній лівий рисунок), BOTTOM (верхній правий рисунок), LEFT (лівий нижній рисунок) і RIGHT (правий нижній рисунок).

На рис. 4.29 показано швидкість відгуку кожного з модулів детекторів RMS-R3 (середнє значення суми відгуків двох сенсорів всередині кожного модуля) як функцію μ . Номінальна миттєва світність LHCb $2 \times 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1}$ досягається при $\mu = 4$. Беручи до уваги той факт, що при $\mu=0$, відгук RMS-R3 також має дорівнювати 0, що дозволяє оцінити лінійність відгуку RMS-R3 з мінімальним впливом фону на відгук RMS-R3. Дані RMS-R3 демонструють його ідеальну лінійну реакцію (з похибкою 5σ) на збільшення освітленості.

Крім того, його динамічний діапазон дозволяє надійно знімати дані при збільшенні світності на порядок, що важливо з точки зору аварійного випадку раптового збільшення світності та посмертної оцінки спричиненого радіаційного навантаження на детектор LHCb.

Висновки до розділу 4

Отримані результати, що були представлені в цьому розділі, були описані в публікаціях [13, 155-163].

Розглянуто функціональні характеристики системи RMS-R3 орієнтовані на забезпечення ефективних фізичних вимірів у третій серії накопичення даних (RUN3, 2022-2026 р.р.) як основи для побудови концепту системи для контролю мішенного комплексу RMS-R4. Розглянуто принципи моніторингу безпеки, ефективності та якості функціонування детекторних підсистем експерименту LHCb. Описано використання систем WinCC та "Monet" для моніторингу потоку даних та забезпечення якості даних.

Система RMS-R3 продемонструвала унікальну стабільність та чутливість у вимірюванні асиметрії відгуків сенсорів під час експерименту LHCb протягом 2021-2023 років. Метод асиметрій дозволяє спостерігати зміщення області взаємодій пучків та відрізняти різні експериментальні умови. Це стало можливим завдяки високій стабільності траєкторій пучків ВАК, високій чутливості та стабільності відгуку RMS-R3.

Розділ 5 Фіксована мікροстріпова мікромішень. Система управління експериментом

§1 Концептуальне бачення різних видів фіксованих металічних мікромішеней для ЛНС

На додаток до основних вимог до внутрішньої мікροстріпової мішені, пов'язаних з безпечною експлуатацією ВАК, а також вимог щодо експериментів, визначених в [164], зокрема таких, як: вплив на колімацію та захист машини, вплив на імпеданс машини, вплив на вакуум машини, сумісність кожного виду мішені з умовами ВАК, сумісність елементів управління та блокування пучка, фон, індукований у основному експерименті, — необхідно досліджувати такі аспекти: досягнення світності, що не перевищує номінального значення в колайдерному режимі за прийнятний термін роботи мішені, швидка і точна система управління положенням мішені, портативність пристрою та сумісність з існуючою інфраструктурою або з мінімальними змінами до неї тощо.

Мішень повинна бути легкою (~ 10 г), тонкою (кілька мкм), сумісною з ультрависоким вакуумом. Також важливими є характеристики системи управління мішенню. По-перше, вона має забезпечити номінальне (робоче, у гало пучка, $\approx 5\sigma$) і безпечне (вихідне, за 50-100 мм від осі пучка) положення мішені. По-друге, рух мішені повинен виконуватися із прецизійною точністю (~ 100 нм) та достатньо швидко контрольованим (~ 1 мс) і динамічно регульованим. Також система управління має бути придатною для багатомішенного режиму роботи та бути сумісною із ультрависоким вакуумом.

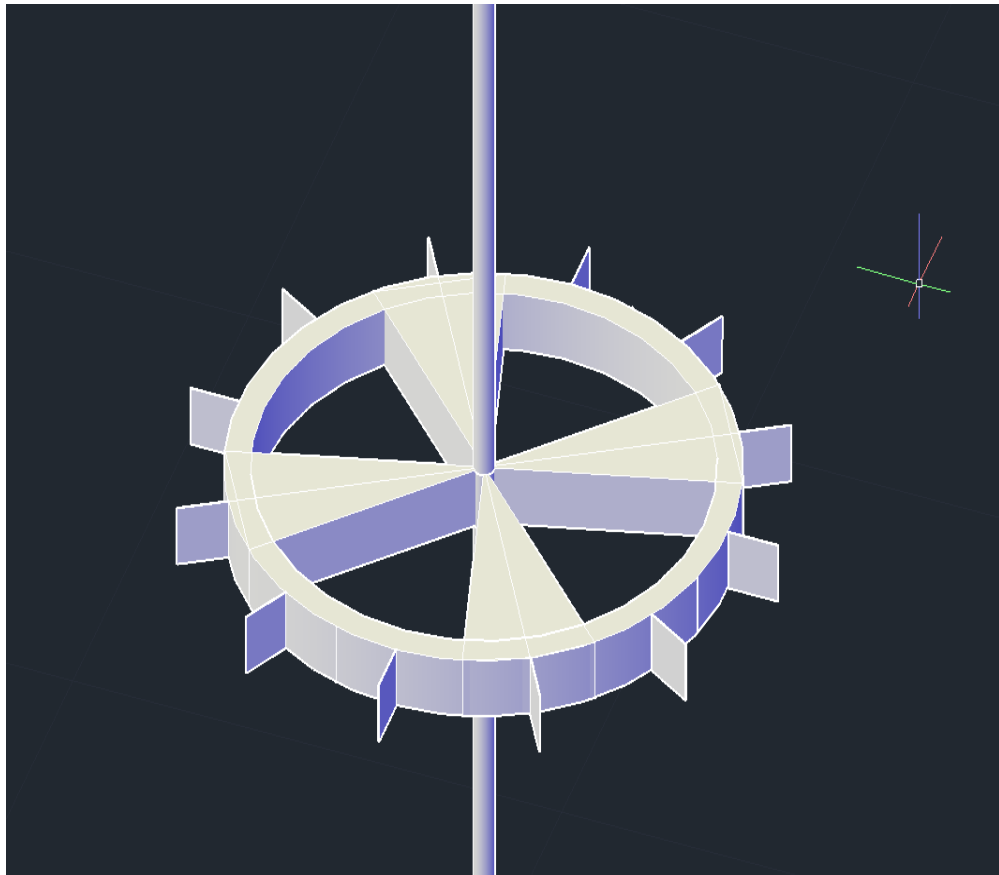


Рис. 5.1 – Модель “водяного млина” з мішенями, що обертається. В центрі – тримач, що обертає млин з мішенями (коло), по краям 12 площин с гіпотетичним розположенням металічних або мікростріпових мішеней. Коло обертається як млин, дозволяючи змінюватись мішеням, які входять в гало пучка з однієї сторони кола.

Як прототип мікромішені розглядалась модель “водяного млина”, що обертається (рис. 5.1). На краю такого кільця кріпилися мішені мікронної товщини. На один стрижень додавалися декілька кілець для представлення мішеней з різних матеріалів. Рух такої системи забезпечувався кроковими двигунами, що знаходились на відстані 10 см від кільця та управляли їм через головний стрижень. Обертання дозволяло мішеням не згорати при взаємодій з гало пучка через швидку заміну однієї мішені іншою; швидкість обертання такої системи повинна складати 1 м/с.

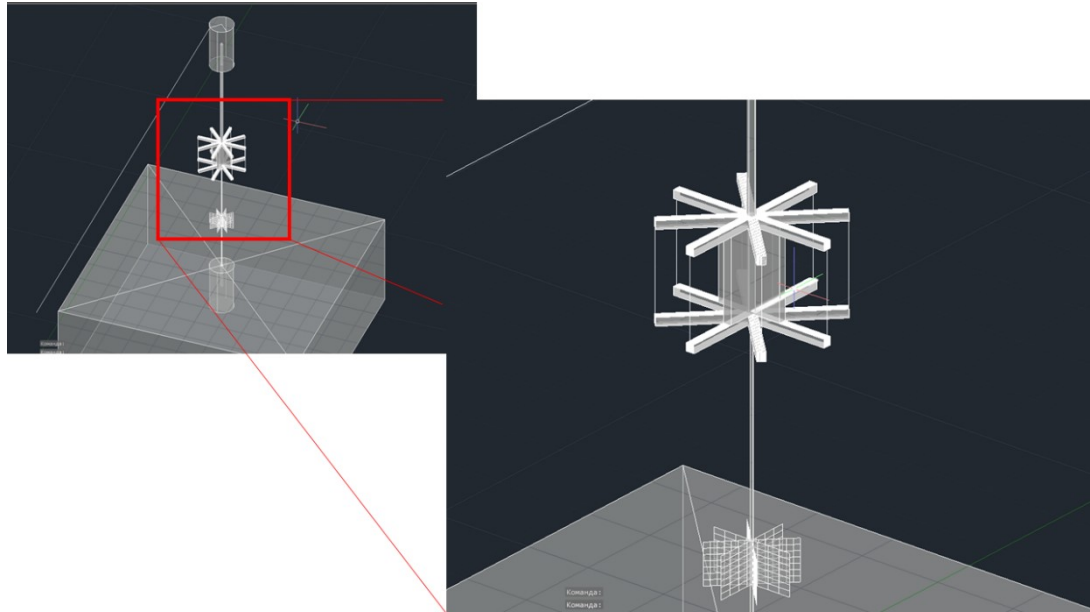


Рис. 5.2 – Модель “вітряка” (справа зображена несуча конструкція для мікростріпових мішеней, знизу конструкція — для обертання за допомогою лазера). Конструкції з’єднані стрижнем, на нижню конструкцію світить лазер, що обертає її. На кінці верхньої конструкції прикріплені мікростріпові мішені (тонкі смужки), що обертаючись входять і виходять до гало пучка.

Іншим варіант мішені, що розглядався, — модель “вітряка” (рис. 5.2). Мішені представлені у вигляді надтонких стріпів (товщиною до 1 мкм), які фіксувались між двох поперечок з титану або карбону. Управління такої системи розглядалось як із допомогою крокових двигунів, так із допомогою лазера, що світив на спеціальну обертальну площину, та обертав головну вісь разом із несучою конструкцією для мішеней. Оскільки для досягнення обертання такої конструкції потрібен потужний лазер до 500-1000 мВт, гостро стає питання накопичення тепла у конструкції та його відведення, інакше, вочевидь, обертальна площина згорала би з часом.

Вищеописані підходи є дуже складними та потребують багато теоретичних розрахунків і моделювань. Поки що нами було вирішено використовувати MEMS (мікроелектромеханічна система) технології для

управління фіксованою мікромішенню. Розглядають основні чотири види MEMS приводів (MEMS actuators): електростатичні, електромагнетичні, п'єзоелектричні та термальні. Через середню напругу роботи, високоточний відгук та високоточні зміщення (точність порядку 1 нм) було обрано п'єзоелектричні MEMS. Саме мішені, керовані такими MEMS технологіями буде розглянуто далі.

Звичайно, для експерименту треба розглядати декілька різних матеріалів. Переваги та недоліки кожного з матеріалів є окремою темою обговорення та не розглядається у цій статті. Але важливо розглянути спосіб реалізації, де одночасно будуть працювати декілька фіксованих мішеней, як це було, наприклад, у експерименті HERA-B [110]. Для цього розглянута концепцію прототипу мішенного вузла.

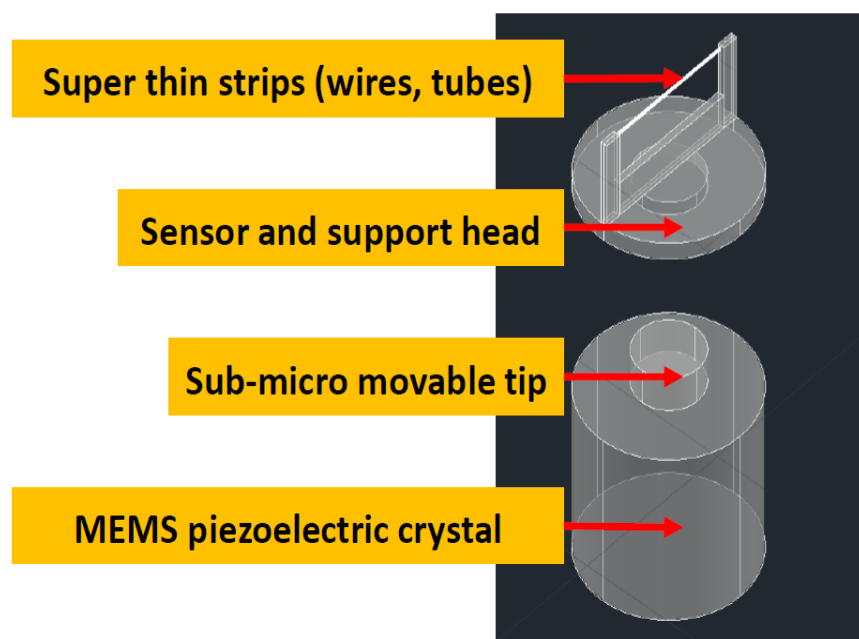


Рис. 5.3 – П'єзоелектричний MEMS двигун, тримач мішеней та самі мішені. Нижній кристал розширюється або зменшується під дією напруги, вводячи чи виводячи тримач з мікростріпами до гало пучка.

§2 Система управління експериментом в режимі надтонкої фіксованої металевої мішені. Постановка майбутнього експерименту

Застосування мікростріпової мікромішені, поперечні розміри якої значно менші, ніж поперечні розміри прискореного пучка заряджених частинок, як показано на рисунку 5.4, вимагає в експериментальній практиці забезпечення стабільної світності та її безпечної роботи [110]. Таких умов можливо досягти завдяки управлінню динамічним положенням мішені у галі пучка колайдера із субмікронною точністю за час порядку 1 мс, контролюючи таким чином інтенсивність ядерних зіткнень на допустимому рівні.

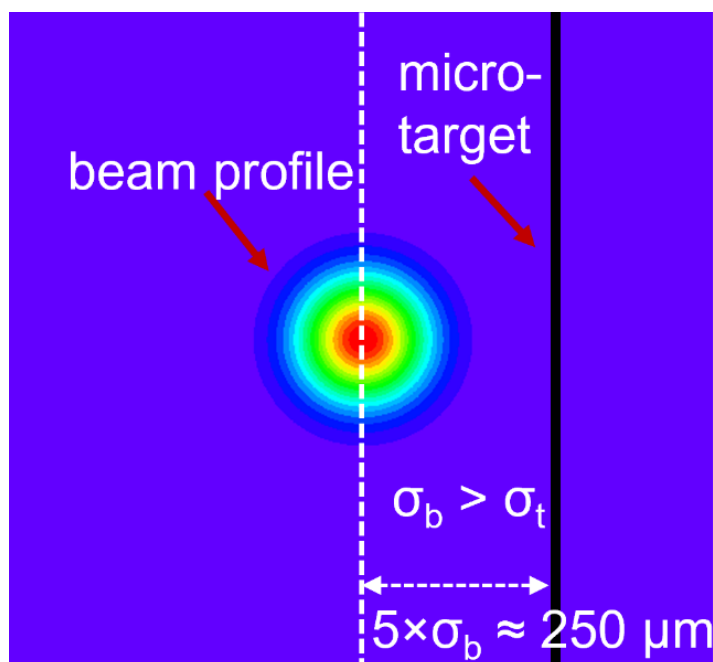


Рис 5.4 – Схематичний вигляд профілю пучка та мікромішені. Розглядається варіант мішені в корі пучка на відстані 5σ (~ 250 мкм) від центру пучка, мікромішень довжиною 2 см, товщиною декілька мкм.

Моніторинг відносної світності режиму фіксованої мішені включає методи прямого зчитування сигналу (заряду) із мікромішені у вигляді стріпа (провідника або голки тощо), що ґрунтується на вторинній електронній емісії

[165], та методи детектування первинних (вторинних) частинок-продуктів реакцій [166]. Ефективність методики керування мікромішенню у гало пучка під час роботи прискорювача забезпечується методом асиметрій відгуків окремих сенсорів та визнається величиною порогу чутливості, часу інтегрування заряду тощо, що накладають відповідні обмеження для зчитувальної електроніки. Високі рівні флюенсу частинок в робочій області навколо іонопроводу зумовлюють вибір технології із надвисокою радіаційною стійкістю детекторів, адже поглинута доза може сягати порядку 0,1-1 МГр за час їхньої роботи [153].

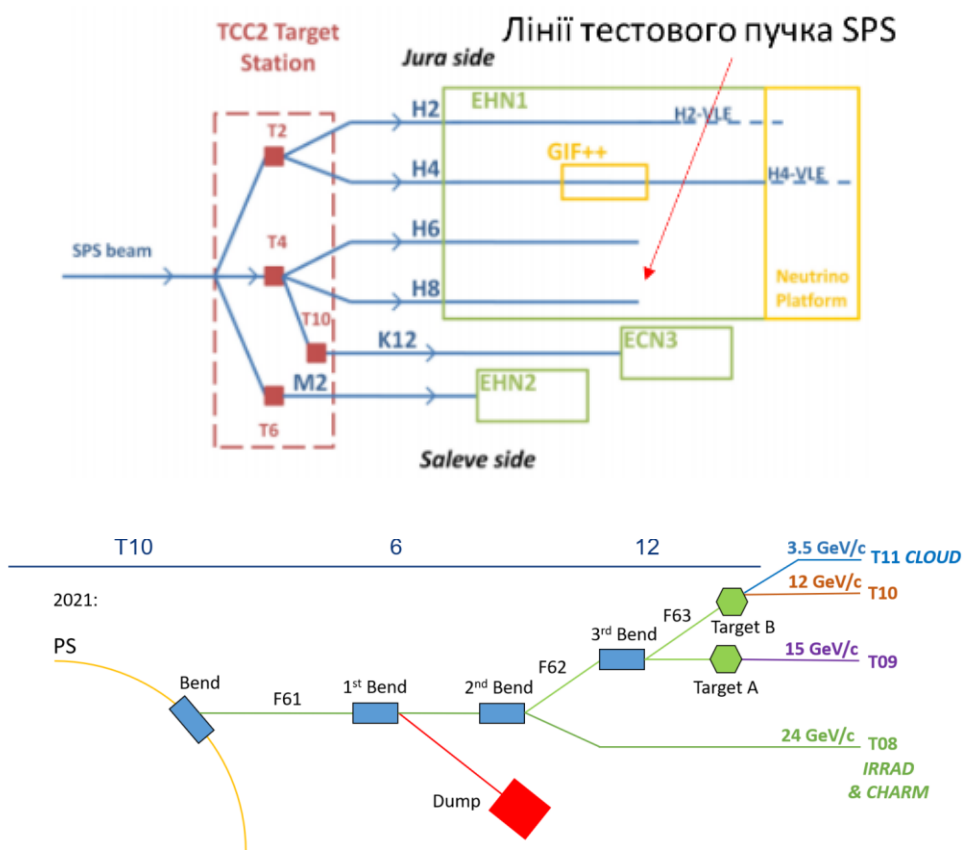


Рис. 5.5 – Схема наявних тестових ліній пучків на SPS (зверху) та PS (знизу) в ЦЕРНі. На SPS розглядається варіант встановлення мікροстріпової фіксованої мікромішені на лінію H8 (куди показує красна стрілка). На PS

розглядається встановлення мішені для тестування на лінію T08 (позначена зеленим кольором). Рисунки взято з [167].

Розглянемо тестування прототипу лінійної мішені LHCb-MEMS-target, керованої за допомогою п'єзокристалічного MEMS та крокового двигуна, на базі однієї з експериментальних установок для тестових пучків SPS (протонний суперсинхротрон) та/або PS (протонний синхротрон) в ЦЕРНі. Для проведення експерименту пропонуються такі лінії тестових пучків: лінія SPS NA H8 (пучок первинних протонів з інтенсивністю максимально до 10^7 /період та енергією 400 GeV), PS EA T8 (пучок первинних протонів з інтенсивністю максимально до 5×10^{11} /період та енергією 24 GeV) (Рис. 5.5). Також не зайвою буде розглянути можливість тестування мішенного прототипу на пучкові протонів з SPS на експериментальній установці HiRadMat. Тут максимально доступна інтенсивність протонного пучка становить $3,46 \times 10^{13}$, а енергія — 440 GeV. Профіль пучка добре колімований ($\sim 0,5 \text{ мм}^2$).

На Рис. 5.6 представлено схему пропонованого експерименту з лінійною мішенню. У вакуумній камері розміщується мішень(i) разом із системою гібридного механічного приводу з використанням п'єзокристалічного MEMS мотора(iv) та крокових двигуна(iv). Поступове введення мішені в пучок відбувається за допомогою цього приводу, сумісного з високим або надвисоким вакуумом. Безперервний моніторинг кількості взаємодії та забезпечення зворотного зв'язку для управління положенням мішені здійснюється за допомогою моніторів інтенсивності та за рахунок прямого зчитування заряду з мішені, як показано на рис. 5.5. Профілометр пучка забезпечує вимірювання його положення та просторового розподілу.

Цілі та завдання включають: експериментальну перевірку та дослідження методу динамічного управління рухом внутрішньої мішені під її опроміненням за допомогою гібридної системи приводу (MEMS та кроковий двигун для

точного та грубого регулювання положення); тестування та вивчення моніторингу заряду безпосередньо з внутрішньої мішені та/або потоку частинок, що генерується в наслідок зіткнень пучка з (мікро) мішенню, залежно від положення внутрішньої мішені щодо осі пучка.

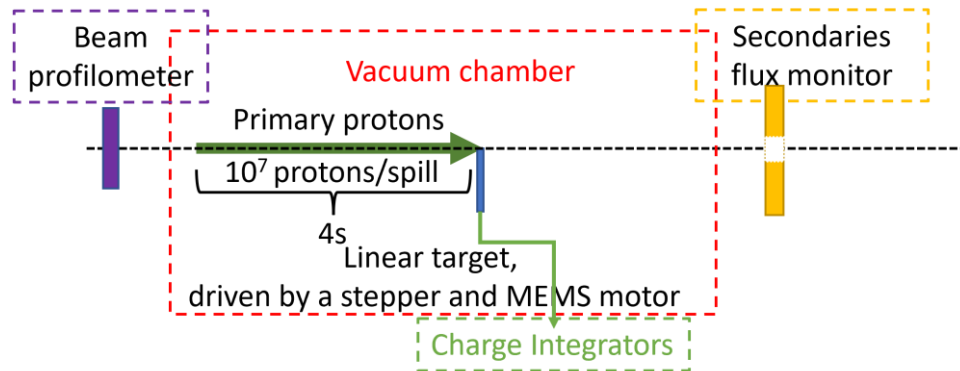


Рис. 5.6 – Схема організації тестування мішені LHCb-MEMS-target на тестових пучках SPS/PS в ЦЕРНі. У вакуумній камері, де проходять зіткнення з протонним пучком, встановлюється конструкція мікромішені, що включає саму фіксовану мікромішень, шагові двигуни і MEMS технології, вихід струму йде на зарядові інтегратори.

Також розглядається конструювання такого монітора за технологією радіаційно стійких металевих детекторів, розробленої в ІЯД НАН України, як інтегрального елемента системи управління позиціонуванням пропонованого комплексу внутрішньої мікростріпової мішені на ВАК в експерименті LHCb [168].

Таке технічне рішення базується на сегментованих позолочених фольгових сенсорах. Така особливість дозволить запобігти можливій деградації відгуку системи протягом тривалого режиму роботи, що є критично важливим для досягнення високої точності відтворюваності відгуку та високої часової стабільності при невпинному удосконаленні та ускладненні методик ядерно-фізичних експериментів на ВАК. Прототипом модульного монітора є модернізована детекторна система RMS-R3, що призначена для моніторингу

умов зіткнення пучків ВАК та фону в експерименті LHCb протягом наступного періоду набору даних, Run 3 [169]. На Рисунку 5.7 зображено САД модель (комп'ютерне проектування) монітора інтенсивності колізій пучка із мікромішенню LHCb-MEMS-target.

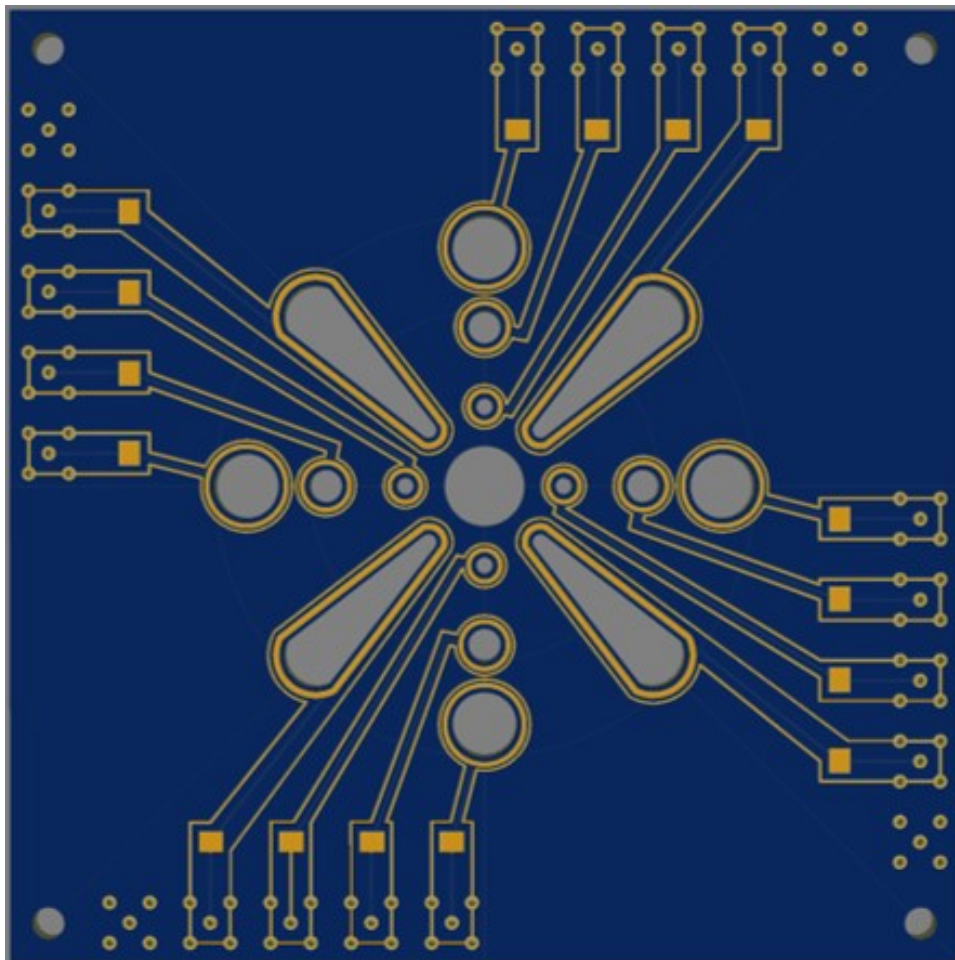


Рис. 5.7 – САД модель монітора інтенсивності на основі сегментованих фольгових сенсорів.

Ще одним варіантом є конструювання монітору подібного до мішенного вузла за своїм дизайном. Основною ідеєю є відслідковування зміни відгуку системи по всій площини, перпендикулярній до осі іонопроводу. В такій системі використовуються позолочені фольги на сенсорах, що мають форму круга для запобігання накопичення струмів наведення на кутах прямокутних сенсорів та забезпечення покращення відгуку сенсорів. Було розглянуто

створення в такій конфігурації всього від 10 до 36 сенсорів на двох модулях RMS-R4, що охоплює іонопровід (рис.5.8). Зчитувальна електроніка складається з зарядових інтеграторів, лічильника, системи контролю мішені у вигляді плати мікроконтролера, який керує мікродвигунами та MEMS мікροстріпових мішеней.

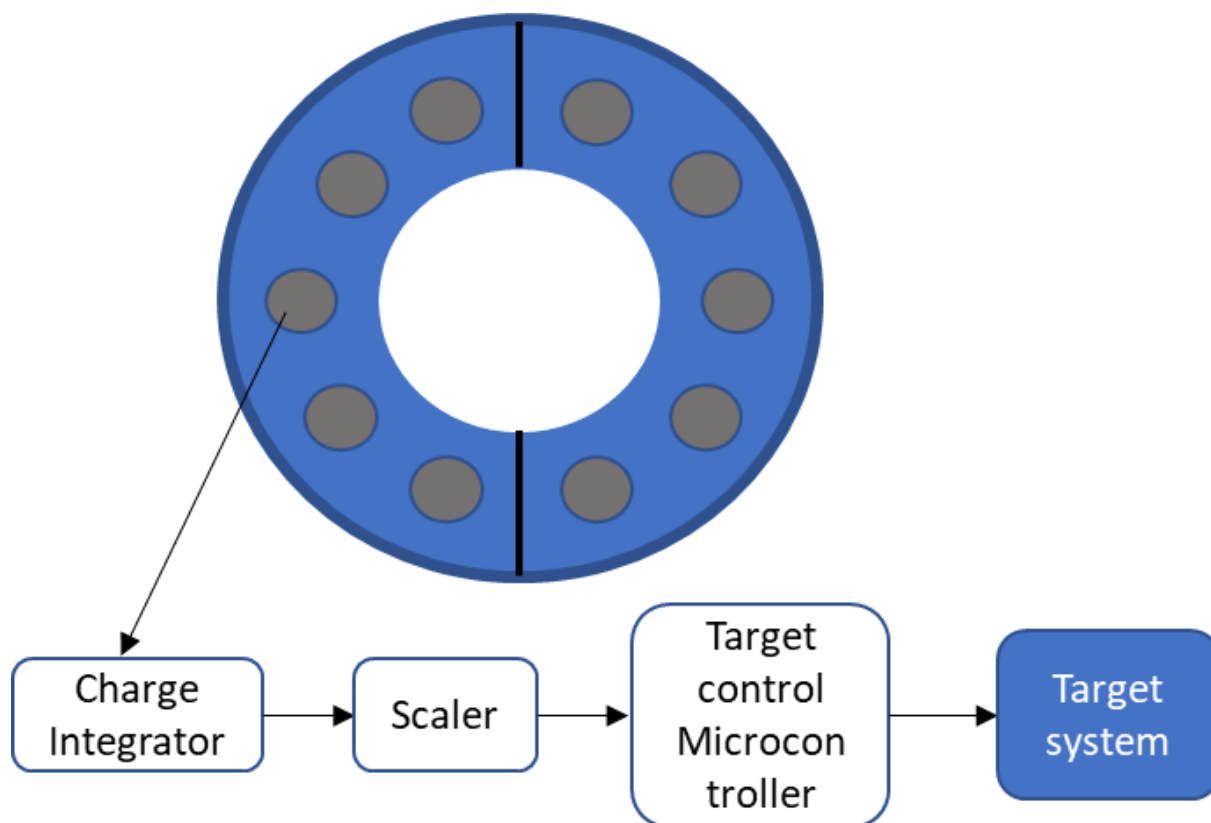


Рис. 5.8 Концепція RMS-R4 з коловими сенсорами. Встановлення модулів як частини комплексу іонопроводу.

Висновки до розділу 5

Отримані результати, що були представлені в цьому розділі, були описані в публікаціях [126, 170-172].

Розглянута можливість реалізації режиму фіксованої тверdotільної мішені на Великому Адронному Колайдері (ВАК) в експерименті LHCb. Запропоновано використовувати надтонкі металеві мікροстріпові детектори як

внутрішні мішені в гало пучка, що дозволить досліджувати нові фізичні явища та забезпечить точну локалізацію точки зіткнення. Це розширить можливості експерименту та дозволить досягти високої світності.

Розглянуто різні дизайни та системи управління положенням мішеней з високою точністю. Запропоновано використання MEMS технологій та крокових двигунів для точного позиціонування мікромішеней відносно пучка. Запропонований опис проведення експерименту з встановленням прототипу для тестування на пучках SPS та PS у ЦЕРН.

Висновки

В дисертаційній роботі розглядається створення мішеного комплексу з використанням фіксованих мікροстріпових мішеней для експерименту LHCb, який після завершення третьої та четвертої серії фізичних вимірів (RUN 3 2022 - 2026 , RUN 4 2029 - 2033 р.р) буде модернізовано вдруге (UPGRADE II) для забезпечення функціонування вимірювальних систем експерименту в епоху високої світності ВАК (HL-LHC) в п'ятій (RUN 5, 2036 - 2040) та шостій RUN 6, 2043 – 2047 р.р.) серіях фізичних досліджень, з миттєвою світністю до $1.2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

У дисертації розглядається явище потрійних ядерних зіткнень для розширення фізичних цілей експерименту LHCb (ЦЕРН), що стосуються властивостей еволюції матерія-антиматерія, закономірностей універсальності лептонних ароматів та рідкісних мод розпаду важких ароматів, тощо.

У дисертаційній роботі представлено результати застосування методу асиметрій відгуків сенсорів RMS-R3 у експерименті LHCb.

1. Програма другої модернізації LHCb включає можливу реалізацію режиму фіксованої металеві мікромішені. В дисертації розроблено концепцію фіксованої металеві мікромішені та способу її реалізації в експерименті LHCb.
2. Результати Монте-Карло симуляції демонструють можливість реалізації режиму фіксованої металеві мікромішені із застосуванням надтонких металевих мікροстріпових детекторів (ММД, товщиною 1 - 2 мкм), виготовлених за технологією ІЯД НАН України.
3. Розроблено дизайн прототипу мішенного вузла із декількома незалежними мікромішенями. Обґрунтовано застосування технології мікроелектромеханічної системи (MEMS) для управління прецизійним позиціонуванням мікροстріпових мішеней товщиною та шириною 1 мікрометр і довжиною до 1 сантиметру.

4. Обґрунтовано доцільність режиму експерименту з фіксованою мікстостріповою мішенню з точки зору розширення кола фізичних цілей, які, зокрема, включають оригінальну ідею реалізації потрібних ядерних зіткнень для дослідження властивостей матерії в нових умовах фазової діаграми квантової хромодинаміки при надвисоких густинах речовини. Широкий асортимент металевих мішеней надасть можливість виконання раніше недосяжних досліджень закономірностей еволюції матерії в залежності від індивідуальних властивостей ядер (деформація, спин та ізоспін, наявність нейтронного гало, тощо).
5. Наведено результати оцінки нових можливостей та переваг фізичних досліджень в режимі фіксованої мікстостріпової мішені в порівнянні та на доповнення до існуючої програми досліджень зіткнень релятивістських ядер з використанням газової мішені SMOG2, реалізованої наразі на ВАК лише в умовах експерименту LHCb. Зокрема, для вперше запропонованого пошуку потрібних зіткнень ядер наводиться оцінка залежності спостережених характеристик цього нового фізичного явища від товщини мікромішені в реакціях $p+C+p$ та $Pb+Pb+Pb$.
6. Представлено дизайн конструкції мішенної системи та її очікувані функціональні характеристики, необхідні для управління мікромішенню та стабілізації частоти взаємодії її ядер із прискореними ядрами пучка ВАК. Такий режим забезпечить прецизійну локалізацію області зіткнень ядер мішені із пучком ВАК, що є важливим фактором зменшення комбінаторіального фону, а отже підвищення чутливості до рідкісних процесів та їх покращеній селекції завдяки надзвичайно точному визначенню первинних вершин в одномікронній області мікромішені.
7. Розглянуто застосування нині успішно функціонуючої системи RMS-R3 в якості прототипу системи моніторингу умов експерименту та управління рухом металевих мікромішеней для стабілізації частоти їх ядерних взаємодій з пучком ВАК, з перспективою розробки RMS-R4, призначеної для роботи в умовах високої світності до $1.2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Виконано

комп'ютерне проектування системи вимірювання потоків заряджених частинок, що генеруються при взаємодії ядер металевих мікромішеней з пучком ВАК. Ця система на основі металево-фольгових детекторів призначена для управління позиціонуванням металевих мікромішеней в гало пучка ВАК для підтримки стабільної частоти ядерних взаємодій.

8. Оригінальним розширенням функціональних можливостей RMS-R3, здійсненим в дисертаційній роботі, є розробка та застосування методу асиметрій відгуку сенсорів RMS-R3 для спостереження локалізації області ядерних взаємодій в експерименті (масштаб виміряних асиметрій становить біля 1%). Це надає можливість ідентифікувати відновлюваність умов експерименту при виконанні вимірів з окремими мішенями, що послідовно вводяться в гало пучка ВАК. Аналіз даних за методом асиметрій відгуку сенсорів RMS-R3 забезпечує прецизійне визначення відновлення умов експерименту. RMS-R3 дозволяє розрізнити умови експерименту для ядро-ядерних зіткнень пучків LHC або ядер пучка LHC з ядрами фіксованої газової мішені.
9. Розроблено віртуальний монітор контролю асиметрій для пульта управління експериментом LHCb, що дозволяє черговим операторам стежити за умовами протікання експерименту. Для відображення даних системи RMS-R3 (в перспективі RMS-R4) в режимі реального часу створено основу програмного забезпечення у середовищах WinCC та MONET .
10. Розроблений дизайн прототипу лінійної моделі мікромішені, керованої за допомогою п'єзокристалічного MEMS та крокового двигуна. Створено тестове програмне забезпечення для управління кроковими мікродвигунами. З метою експериментальної перевірки та дослідження розробленої техніки точного позиціонування та моніторингу потоків заряджених частинок підготовлено схему виконання експерименту з прототипом металевої мікромішені на основі технології MEMS на лінії тестового пучка протонів на прискорювальному комплексі SPS/PS (ЦЕРН).

ПОДЯКА

Автор дисертації висловлює щирю вдячність науковцям з Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України та Європейської організації ядерних досліджень (ЦЕРН), з якими мав честь співпрацювати під час виконання наукового дослідження "КОНЦЕПЦІЯ ФІКСОВАНОЇ МЕТАЛЕВОЇ МІКРОМІШЕНІ ТА СПОСІБ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ В ЕКСПЕРИМЕНТІ LHCb (ЦЕРН)" у галузі природничих наук за спеціальністю 104 – фізика та астрономія.

Особлива подяка науковому керівнику, Пугачу Валерію Михайловичу, за плідне та чуйне керівництво, генерацію різноманітних ідей, контроль якості виконання роботи та неоціненну допомогу в підготовці наукових публікацій.

Висловлюю глибоку вдячність колегам з ІЯД НАН України: Добішуку Василю Миколайовичу, Охріменку Олександрю Юрійовичу, Киві Володимирю Олексійовичу, Міліції Віктору Михайловичу та Сторожику Дмитру Івановичу за їхню підтримку та співпрацю.

Окрема безпосередня подяка співробітникам ЦЕРН, які зробили значний внесок у реалізацію мого проекту: Федеріко Алессіо (Federico Alessio), Гайнріху Шиндлеру (Heinrich Schindler), Люісу Гранадо Кардосо (Luis Granado Cardoso), Кларі Гаспар (Clara Gaspar), Глорії Корті (Gloria Corti) та Вінченцо Ваньоні (Vincenzo Vagnoni).

Автор висловлює вдячність за грантову підтримку проекту EU #3014 "RMS beam and background online monitoring system in the LHCb experimental environment" стипендіальної програми EURIZON (грантова угода № 871072 з Європейською Комісією), а також Національному фонду досліджень України за фінансову підтримку в рамках конкурсного проекту 2020.02/0257.

Ця робота стала можливою завдяки плідній співпраці між Інститутом ядерних досліджень НАН України та експериментом LHCb у ЦЕРН, що дозволило досягти вагомих результатів у галузі фізики високих енергій.

Література

- [1] LHCb Collaboration. LHCb detector performance //International Journal of Modern Physics A. – 2015. – Т. 30. – №. 07. – С. 1530022.
- [2] Bursche A. et al. Physics opportunities with the fixed-target program of the LHCb experiment using an unpolarized gas target. – 2018. – №. LHCb-PUB-2018-015.
- [3] Bruce R. et al. Performance and luminosity models for heavy-ion operation at the CERN Large Hadron Collider //The European Physical Journal Plus. – 2021. – Т. 136. – №. 7. – С. 745.
- [4] Pugatch V. Heavy-ion and fixed-target physics in LHCb //Ukrainian journal of physics. – 2019. – Т. 64. – №. 7. – С. 619-619.
- [5] LHCb Collaboration et al. Implications of LHCb measurements and future prospects //European Physical Journal C. – 2013. – Т. 73. – №. 4. – С. 2373.
- [6] Apollinari G., Rossi L., Brüning O. High luminosity LHC project description. – 2014. – №. CERN-ACC-2014-0321.
- [7] Bediaga I. et al. Physics case for an LHCb Upgrade II-Opportunities in flavour physics, and beyond, in the HL-LHC era //arXiv preprint arXiv:1808.08865. – 2018.
- [8] Albrecht J. et al. Luminosity scenarios for LHCb Upgrade II. – 2019. – №. LHCb-PUB-2019-001.
- [9] В. М. Добішук. Утворення чармонію в ультрапериферичних зіткненнях ядер ^{208}Pb за умов експерименту LHCb та спосіб їх моніторингу. Режим доступу – он-лайн: URL:
https://kinr.kyiv.ua/aspirant/docs/zakhysty/dobishuk/Dobishuk-Dissertation-ISR-NAS-of-Ukraine-2024_pdfa_compressed.pdf
- [10] Adeva B. et al. Roadmap for selected key measurements of LHCb //arXiv preprint arXiv:0912.4179. – 2009.

- [11] Preliminary results as of Summer 2023 (CKM 2023 workshop). URL: http://ckmfitter.in2p3.fr/www/results/plots_summer23/ckm_res_summer23.html
- [12] LHCb Collaboration. LHCb detector performance //International Journal of Modern Physics A. – 2015. – T. 30. – №. 07. – C. 1530022.
- [13] LHCb Collaboration et al. 5. R. Aaji, ..., S. Chernyshenko et al. The LHCb upgrade I //Journal of Instrumentation. 19(05):P05065 (2024) 1-211. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/05/P05065>
- [14] LHCb collaboration, A. A. Alves Jr. et al., The LHCb detector at the LHC //JINST 3 (2008) S08005.
- [15] LHCb collaboration, LHCb reoptimized detector design and performance: Technical Design Report //CERN-LHCC-2003-030, CERN, Geneva, 2003
- [16] L. Leduc, G. Corti, and R. Veness, Design of a highly optimised vacuum chambersupport for the LHCb experiment //LHCb-PROC-2011-048, CERN-ATS-2011-262, CERN, 2011.
- [17] LHCb collaboration, LHCb VELO upgrade: Technical Design Report //CERN-LHCC-2013-021, CERN, Geneva, 2013
- [18] M. van Beuzekom et al., VeloPix ASIC development for LHCb VELO upgrade //Nucl. Instrum. Meth. A731 (2013) 92, PIXEL 2012
- [19] V. Gromov et al., Development and applications of the Timepix3 readout chip, 046 //20th Anniversary International Workshop on Vertex Detectors, Rust (Austria), 19 - 24 June 2011, 2011.
- [20] O. A. de Aguiar Francisco et al., Microchannel cooling for the LHCb VELO upgrade I //Nucl. Instrum. Meth. A1039 (2022) 166874.
- [21] T. Poikela et al., VeloPix: the pixel ASIC for the LHCb upgrade // JINST 10 (2015) C01057.

- [22] T. Bird, Flavour studies with LHCb: b-meson mixing, lepton-flavour violation and the velo upgrade, PhD thesis, University of Manchester, 2015.
- [23] C. Barschel, Precision luminosity measurement at LHCb with beam-gas imaging,
PhD thesis, RWTH, Aachen University, 2014.
- [24] LHCb collaboration, R. Aaij et al., Precision luminosity measurements at LHCb //JINST 9 (2014) P12005, arXiv:1410.0149.
- [25] LHCb collaboration, LHCb SMOG upgrade //CERN-LHCC-2019-005, CERN, Geneva, 2019
- [26] E. Steffens and W. Haeberli, Polarized gas targets, Reports on Progress in Physics 66 (2003) R02.
- [27] C. Boscolo Meneguolo et al., Calculation of the allowed aperture for a gas storage cell in IP8, CERN-PBC-Notes-2018-008, CERN, 2018.
- [28] LHCb Collaboration, LHCb magnet: Technical Design Report //CERN-LHCC-2000-007. LHCb-TDR-1, CERN, Geneva, 2000.
- [29] J. Andre et al., Status of the LHCb magnet system //IEEE Trans. Appl. Supercond.12 (2002) 366.
- [30] J. Andre et al., Status of the LHCb dipole magnet //IEEE Trans. Appl. Supercond. 14 (2004) 509.
- [31] LHCb collaboration, LHCb Tracker Upgrade Technical Design Report //CERN-LHCC-388 2014-001, 2014.
- [32] M. Firlej et al., SALT3 chip documentation, See392 https://twiki.cern.ch/twiki/pub/LHCb/StripAsic/salt_v5_spec.pdf.
- [33] S. Coelli, Development and test of the CO₂ evaporative cooling system for the LHCb UT tracker upgrade, JINST 12 (2017) C03087.

- [34] A. Abba et al., Testbeam studies of pre-prototype silicon strip sensors for the LHCb UT upgrade project, Nucl. Instrum. Meth. A806 (2016) 244.
- [35] D. van Eijk et al., Radiation hardness of the LHCb Outer Tracker, Nucl. Instrum. Meth. A685 (2012) 62 LHCb-DP-2012-001.
- [36] LHCb collaboration, LHCb tracker upgrade: Technical Design Report, CERN-LHCC-2014-001, LHCb-TDR-015, CERN, Geneva, 2014.
- [37] C. Joram et al., Irradiation test of mirror samples for the LHCb SciFi tracker, LHCb-PUB-2016-006, CERN-LHCb-PUB-2016-006, CERN, Geneva, 2016.
- [38] P. Sainvitu, A. Zemanek, K. Nikolitsas, and N. Witold, LHCb - SCIFI assembly survey and photogrammetry measurement, EDMS 2652340, CERN, 2021.
- [39] K. S. Hashemi and J. Bensinger, The BCAM camera, ATL-MUON-2000-024, CERN, Geneva, 2000.
- [40] M. Adinolfi et al., Performance of the LHCb RICH detector at the LHC, Eur. Phys. J. C73 (2013) 2431, arXiv:1211.6759.
- [41] R. Calabrese et al., Performance of the LHCb RICH detectors during LHC Run 2, JINST 17 (2022) P07013
- [42] C. D'Ambrosio, S. Easo, C. Frei, and A. Petrolini, RICH2019: a proposal for the LHCb RICH upgrade, LHCb-PUB-2013-011, CERN-LHCb-PUB-2013-011, CERN, Geneva, 2013.
- [43] LHCb collaboration, LHCb PID upgrade: Technical Design Report CERN-LHCC-2013-022, CERN, Geneva, 2013
- [44] M. Alemi et al., First operation of a hybrid photon detector prototype with electrostatic cross-focussing and integrated silicon pixel readout, Nucl. Instrum. Meth. A449 (2000) 48.
- [45] M. Baszczyk et al., CLARO: an ASIC for high-rate single photon counting with multi-anode photomultipliers, JINST 12 (2017) P08019.

- [46] M. Andreotti et al., A fast and radiation-hard single-photon counting ASIC for the upgrade of the LHCb RICH detector at CERN, in 2017 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), 1 {4}, 2017.
- [47] T. Blake et al., Quenching the scintillation in CF₄ Cherenkov gas radiator, Nucl. Instrum. Meth. A 791 (2015) 27
- [48] J. Ramos-Martos et al., Radiation characterization of the austriamicrosystems 0.35 μm CMOS technology, in 2011 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, 806-811, 2011
- [49] J. Ramos et al., SEE characterization of the AMS 0.35 μm CMOS technology, in 2013 14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), 1-4, 2013.
- [50] V. M. Placinta, Complex integrated circuits in the radiation environment at the
- [51] LHCb high energy physics experiment and extrapolation to the case of space-based experiments, PhD thesis, Bucharest, Polytechnic Inst. , 2020, Presented 24 Sep LHCb collaboration, LHCb calorimeters: Technical Design Report, CERN-LHCC-2000-036, CERN, Geneva, 2000.
- [52] S. Barsuk et al., Design and construction of electromagnetic calorimeter for LHCb experiment, LHCb-2000-043, CERN, Geneva, 2000.
- [53] R. Djeliadine, O. Iouchtchenko, and V. F. Obraztsov, LHCb hadron trigger and HCAL cell size and length optimization, LHCb-99-035, CERN, Geneva, 1999.
- [54] C. Abell'an Beteta et al., Calibration and performance of the LHCb calorimeters in Run 1 and 2 at the LHC, CERN-LHCb-DP-2020-001, CERN, 2020.
- [55] E. Picatoste et al., Low noise front end ICECAL ASIC for the upgrade of the LHCb calorimeter, JINST 7 (2012) C01080.
- [56] Beigbeder-Beau, C and Bernier, R and Breton, D and Cac'eres, T and Callot, O and Cros, P and Delcourt, B and De Vivie de R'egie, J B and Falleau, I and Hrisoho,

A and Jeanmarie, B and Lefrançois, J and Tocut, V and Truong, K D and Videau, I, The front-end electronics for LHCb calorimeters; 1st ed., LHCb-2000-028, CERN, Geneva, 2000.

[57] Y. Gilitsky et al., LHCb calorimeters high voltage system, Nucl. Instrum. Meth. A571 (2006) 294.

[58] A. Konoplyannikov, Electronics of lhcb calorimeter monitoring system, in Proceedings of the Topical Workshop on Electronics for Particle Physics (TWEPP-08), 392 {396, 2008.

[59] Y. Guz et al., Design and integration of HV, LED monitoring and radioactive-source system for HCAL, LHCb-2003-005, CERN, Geneva, 2003.

[60] D. Breton and D. Charlet, Using the SPECS in LHCb, LHCb-2003-005, CERN, Geneva, 2003.

[61] A. A. Alves Jr. et al., Performance of the LHCb muon system, JINST 8 (2013) P02022, arXiv:1211.1346.

[62] F. Archilli et al., Performance of the muon identification at LHCb, JINST 8 (2013) P10020, arXiv:1306.0249.

[63] LHCb collaboration, LHCb muon system: Technical Design Report, CERN-LHCC- 2001-010, CERN, Geneva, 2001.

[64] LHCb collaboration, LHCb: Addendum to the muon system Technical Design Report, CERN-LHCC-2003-002, CERN, Geneva, 2003.

[65] LHCb collaboration, LHCb: Second addendum to the muon system Technical Design Report, CERN-LHCC-2005-012, CERN, Geneva, 2005.

[66] W. Bonivento *et al.*, *Development of the CARIOCA front-end chip for the LHCb muon detector*, Nucl. Instrum. Meth. **A491** (2002) 233.

[67] S. Cadeddu, C. Deplano, and A. Lai, *The dialog chip in the front-end electronics of the lhcb muon detector*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **52** (2006) 2726.

- [68] S. Cadeddu *et al.*, *The nSYNC ASIC for the new readout electronics of the LHCb Muon Detector upgrade*, Nucl. Instrum. Meth. **A936** (2019) 378.
- [69] F. Alessio *et al.*, *Readout protocol for TELL40*, EDMS 1606939, CERN, Geneva, 2016.
- [70] D. Pinci, *Performance of the muon MWPC in high luminosity runs*, LHCb-PUB-2013-005, CERN-LHCb-PUB-2013-005, CERN, Geneva, 2013.
- [71] N. Bondar, D. Ilin, and O. Maev, Proposal on application of the multi-wire proportional chambers of the LHCb MUON detector at very high rates for the future upgrades, JINST **15** (2020) C07001.
- [72] P. Albicocco *et al.*, Long-term operation of the multi-wire proportional-chambers of the LHCb muon system, JINST **14** (2019) P11031, arXiv:1908.02178.
- [73] LHCb collaboration, LHCb online system, data acquisition and experiment control: Technical Design Report, CERN-LHCC-2001-040, CERN, Geneva, 2001.
- [74] F. Alessio and R. Jacobsson, System-level specifications of the timing and fast control system for the LHCb upgrade, LHCb-PUB-2012-001, CERN, 2012.
- [75] F. Alessio *et al.*, A generic firmware core to drive the front-end GBT-SCAs for the LHCb upgrade, JINST **10** (2015) C02013. 10 p.
- [76] J. Viana Barbosa, F. Alessio, and C. Gaspar, the new version of the LHCb SOL40-SCA core to drive front-end GBT-SCAs for the LHCb upgrade, PoS TWEPP-17 (2018) 006.
- [77] D. R. Myers *et al.*, The LHC experiments joint controls project, JCOP, in Proc. Int. Conf. on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (Trieste) Italy, 1999, 1999.
- [78] M. Adinolfi *et al.*, LHCb data quality monitoring, J. Phys. Conf. Ser. **898** (2017) 092027.

- [79] C. Gaspar, M. Dönszelmann, and P. Charpentier, Dim, a portable, light weight package for information publishing, data transfer and inter-process communication, *Comput. Phys. Commun.* 140 (2001) 102, CHEP2000.
- [80] LHCb collaboration, LHCb trigger and online upgrade Technical Design Report, CERN-LHCC-2014-016, CERN, Geneva, 2014
- [81] V. V. Gligorov, Conceptualization, implementation, and commissioning of real-time analysis in the High-Level Trigger of the LHCb experiment, PhD thesis, Paris U., VI-VII, 2018,
- [82] LHCb collaboration, RTA and DPA dataflow diagrams for Run 1, Run 2, and the upgraded LHCb detector, LHCb-FIGURE-2020-016, CERN, 2020.
- [83] R. Aaij et al., A comprehensive real-time analysis model at the LHCb experiment, *JINST* 14 (2019) P04006, arXiv:1903.01360.
- [84] R. Aaij et al., Tesla: an application for real-time data analysis in high energy physics, *Comput. Phys. Commun.* 208 (2016) 35, arXiv:1604.05596.
- [85] LHCb collaboration, *LHCb upgrade GPU High Level Trigger: Technical Design Report*, CERN-LHCC-2020-006, CERN, Geneva, 2020.
- [86] S. Borghi, Novel real-time alignment and calibration of the LHCb detector and its performance, *Nucl. Instrum. Meth. A* 845 (2017) 560, Proceedings of the Vienna Conference on Instrumentation 2016.
- [87] V. V. Gligorov. LHCb GPU First Level Trigger status and prospects. //LPNHE/CNRS SCF meeting, 22.10.2020
- [88] Parkes C. et al. LHCb PLUME: Probe for LUMinosity MEasurement. – 2021.
- [89] Spedicato E. LHCb-Luminosity measurements and PLUME detector at LHCb //Conference-12th LHC students poster session, CERN, Geneva. – 2022. – №. Poster-2022-1093.

- [90] Ilgner C. et al. The beam conditions monitor of the LHCb experiment //arXiv preprint arXiv:1001.2487. – 2010.
- [91] Bruining H. Physics and Applications of Secondary Electron Emission: Pergamon Science Series: Electronics and Waves—a Series of Monographs. – Elsevier, 2016.
- [92] E. Budberg; Characteristic energy losses of electrons scattered from incandescent solids. *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **A127**, 111.
- [93] E. Rudberg; Inelastic scattering of electrons from metals. *Phys. Rev.*, **45**, 764
- [94] R. L. Petby; Secondary electron emission from tungsten, copper and gold. *Phys. Rev.*, **28**, 362.
- [95] R. Wabnecke; Emission secondaire des metaux purs. *J. Phys. Radium*, **7**, 270
- [96] P. L. Copeland; Secondary emission of electrons of complex targets. *Phys. Rev.*, **48**, 96.
- [97] H. Bruining & J. H. de Boer; Secondary electron emission, Part I. Secondary electron emission of metals. *Physica, Haag*, **5**, 17.
- [98] V. Pugatch et al. Radiation Monitoring System for LHCb Inner Tracker. *Ukr. J. Phys.* **54**(4) (2009) 418
- [99] V.M. Pugach, O.F. Nemets. Neutron nuclei and the possibility to identify them in correlation experiments. Exotic Nuclei. International Conference: Proceedings, Foros, Crimea. 1-5 Oct. 1991, World Scientific, p. 149-157; О возможности идентификации нейтронных ядер в процессах трехчастичного развала ядер // Изв. АН СССР, сер.физ. 1984, т. 48, с. 1930-1935.
- [100] Oleksandr V. Vitiuk, ..., Sergiy B. Chernyshenko et al. Colliding and Fixed Target Mode in a Single Experiment—A Novel Approach to Study the Matter under New Extreme Conditions, *Particles* **5** (2022) 245–264.
<https://doi.org/10.3390/particles5030022>

- [102] Pugatch, V.; Sivtsov, G.; Glushko, A.; Pitatelev, G.; Popov, S.; Voitsechovsky, B.; Toporkov, D. Laser diagnostics system for a super-thin internal target for storage rings. *Hyperfine Interaction. Hyperfine Interact.* 1992, 74, 314. [CrossRef]
- [103] LHCb Collaboration. Smog2 VELO tracking efficiency [Electronic resource] // LHCb-FIGURE-2019-007. – 2019. – 4. – Mode of access: URL: https://cds.cern.ch/record/2688875/files/LHCb-FIGURE-2019-007_2.pdf. – Date of access: 13.12.2020.
- [104] Pugatch, V. Physics and Techniques of the Fixed Metal Microstrip Target for the LHCb Experiment. International Conference “CERN-Ukraine co-operation: current state and prospects”: proceedings. – Kharkiv. 15-May-2018. – Mode of access: URL: https://drive.google.com/drive/folders/1O4592-WohIPrDLAmWpx1l3vZxL81xK_V, LHCb-TALK-2018-557. – Mode of access: URL: <https://cds.cern.ch/record/2658000>. – Date of access: 13.12.2020.
- [105] Valery Pugatch, Vasyl Dobishuk, Serhii Koliiev, Oleksandr Kot, Serhii Chernyshenko, Volodymyr Aushev, Oleksandr Kshyvanskyi, Oleksandr Skorenok, Margarita Sliusarenko, Laszlo Jenkovsky. METAL FIXED TARGET. Proposal for RUN4 LHCb Upgrade. LHCb IFT WG ZOOM Meeting. 09 – Dec-2020.
- [106] Hadjidakis C. et al. A fixed-target programme at the LHC: physics case and projected performances for heavy-ion, hadron, spin and astroparticle studies // *Physics Reports*. – 2021. – T. 911. – C. 1-83.
- [107] Montag, C. First operational experience with an internal halo target at RHIC. WEOCA02 Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea.
- [108] Liu, C. Fixed target operation at RHIC in 2019. North American Particle Accelerator Conference (NAPAC2019) Conference.
- [109] C. Hast, K. Ehret, W. Hofmann, S. Khan, K.T. Knöpfle, M. Reber, J. Rieling, M. Spahn, J. Spengler, T. Lohse, V. Pugatch // *NIM A354* (1995), 224-248.

- [110] Vassiliev, Yu. et al. Multi-target operation at the HERA-B experiment. AIP Conf. Proc. 512, 359 (2000). – Mode of access: URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1291460>. – Date of access: 13.12.2020.
- [111] V. Pugatch, K.T. Knöpfle, Yu. Vassiliyev. Beam profile imaging target // Nuclear Physics A 701 (2002) 204. – p. 208.
- [112] O. Fedorovich, O. Kovalchuk, V. Pugatch, O. Okhrimenko, D. Storozhyk, V. Kyva. Metal micro-detectors: development of “transparent” position sensitive detector for beam diagnostics // Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki; ISSN562-6016; no.6-82/18. – p. 196-198.
- [113] T. Bird, Flavour studies with LHCb: b-meson mixing, lepton-flavour violation and the velo upgrade, PhD thesis, University of Manchester, 2015.
- [114] HR4 Nanomotion Motor [Electronic resources] / The official website of Johnson Electric Company “Nanomotion”. – Electronic data. – Mode of access: URL: <https://www.nanomotion.com/motion-product/hr4-nanomotion-motor/>. – Date of access: 13.12.2020.
- [115] L. Massacrier et al.. Physics perspectives with AFTER@LHC (A Fixed Target Experiment at LHC) [Electronic resources] // EPJ Web Conf. 171 (2018) 10001. – Mode of access: URL: doi:10.1051/epjconf/201817110001.
- [116] Shiltsev, V.; Zimmermann, F. Modern and Future Colliders. *Rev. Mod. Phys.* **2021**, *93*, 015006. [[CrossRef](#)]
- [117]. Herr, W.; Muratori, B. Contribution to: CERN Accelerator School and DESY Zeuthen, Germany; Brandt, D., Ed.; CERN: Geneva, Switzerland, 2003. [[CrossRef](#)]
- [118]. Iida, K.; Kohama, A.; Oyamatsu, K. Formula for Proton-Nucleus Reaction Cross Section at Intermediate Energies and Its Application. *J. Phys. Soc. Jpn.* **2007**, *76*, 044201. [[CrossRef](#)]

- [119]. Tanabashi, M. Particle Data Group. *Phys. Rev. D* **2018**, 98, 030001.
[CrossRef]
- [120]. Krane, K.S. *Introductory Nuclear Physics*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 1987.
- [121] The LHCb collaboration. LHCb SMOG Upgrade. CERN-LHCC-2019-005, LHCb-TDR-020, 8 May 2019. Mode of access: URL: <https://cds.cern.ch/record/2673690/files/LHCb-TDR-020.pdf>
- [122] Jean-Paul Blaizot. Imaging nuclei on "yoctosecond" time scale. " Apr 15 – 27, 2024. <https://indico.ihep.ac.cn/event/20877/timetable/>
- [123] W. Herr, B. Muratori, Concept of luminosity, in proceedings of CERN Accelerator School (2003) 361.
- [124] LHCb Collaboration. Absolute luminosity measurements with the LHCb detector at the LHC // JINST 7 P01010 (2012).
- [125] Pavlovich, Zarko, Osiecki, Thomas H, Kopp, Sacha E, and /Texas U. Studies of beam heating of proton beam profile monitor SEM's. United States: N. p., 2005. Web. doi:10.2172/15017051.
- [126] С.Б. Чернишенко, В.М. Добішук, В.М. Пугач. Концепція надтонкої твердотільної фіксованої мікромішені для експеримента LHCb (CERN). Наука і техніка сьогодні, №6(34) (2024) 1116-1128. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6\(34\)-1116-1128](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6(34)-1116-1128)
- [127] С.Б. Чернишенко, В. М. Пугач, О. Ю. Охріменко. Розробка надтонкої мікροстріпової мішені для експерименту LHCb (CERN). XXVI Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: постерна доповідь (Київ, 8 - 12 квітня 2019 року). – Київ, Інститут ядерних досліджень НАН України, 2019. – 203 с. – с. 74. URL: <http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/>. eprint: http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/Book_of_Abstracts_2019.pdf

- [128] Corti G. et al. How the Monte Carlo production of a wide variety of different samples is centrally handled in the LHCb experiment //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2015. – T. 664. – №. 7. – C. 072014.
- [129] Harrison K. et al. GANGA: a user-Grid interface for Atlas and LHCb //arXiv preprint cs/0306085. – 2003.
- [130] Antcheva I. et al. ROOT—A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization //Computer Physics Communications. – 2011. – T. 182. – №. 6. – C. 1384-1385.
- [131] M. Agari et al. Radiation Monitoring System for the LHCb Inner Tracker. LHCb Note 2007-062. 15 p. 7.
- [132] V. Pugatch et al. Radiation Monitoring System for LHCb Inner Tracker. Ukr. J. Phys. 54(4) (2009) 418
- [133] O. Okhrimenko et al. The Radiation Monitoring System for the LHCb Inner Tracker. In: ICALEPCS 2011. 13th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. Grenoble, France, 10 - 14 October 2011 (Grenoble, 2011) p. 147
- [134] .M. Iakovenko et al. Selected physics measurements for the LHCb experiment and the radiation monitoring system. Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy) 12(3) (2011) 225
- [135] O.Y. Okhrimenko, V.M. Iakovenko, V. M. Pugatch. The first LHC beam impact measured by the LHCb inner tracker radiation monitoring system. In: Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy. Proc. of the 3rd Int. Conf., Kyiv, Ukraine, June 7 - 12, 2010 (Kyiv, 2011) p. 639.
- [136] O. Okhrimenko et al. LHCb RMS status and operation at 13 TeV. In: Proceedings of the Third FrenchUkrainian Workshop on the Instrumentation Developments for HEP. Orsay, France, October 15 - 16, 2015, p. 61

- [137] V. Pugatch et al. Metal foil detectors and their applications. Nucl. Instrum. Meth. A 535(1-2) (2004) 566
- [138] N. M. Tkach та V. A. Kyva, «The linear six-decade integrating converter charge-to-frequency», Nucl. Phys. At. Energy, т. 2, № 4, с. 72—75, 2001. url: http://jnpr.kinr.kiev.ua/02.2/Articles%5C_PDF/jnpr-2001-02-2-072.pdf
- [139] E.J. Sternglass Phys.Rev. 108 (1957) 1
- [140] Okhrimenko, O (Kiev, INR) ; Iakovenko, V (Kiev, INR) ; Pugatch, V (Kiev, INR) ; Alessio, F (CERN) ; Corti, G (CERN). - The Radiation Monitoring System for the LHCb Inner Tracker. In: Conf. Proc. C111010 (2011) pp.WEPMU024
- [141] Ковальчук О. С., - Металеві мікро-детектори потоків іонізуючого випромінення, Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, 2019, - http://www.kinr.kiev.ua/Theses/Kovalchuk/Thesis_Kovalchuk.pdf
- [142] В.М. Пугач, В.Л. Перевертайло, О.А. Федорович та інш., Мікростріпові Металеві Детектори, Ядерна Фізика та Енергетика, 1 (117) (2006) 95- 101. - [http://jnpr.kinr.kiev.ua/17\(1\)/Articles_PDF/jnpr-2006-1\(17\)-0095-Pugatch.pdf](http://jnpr.kinr.kiev.ua/17(1)/Articles_PDF/jnpr-2006-1(17)-0095-Pugatch.pdf)
- [143] V.M. Pugatch, V.L. Perevertaylo, O.A. Fedorovich, A.G. Borisenko et al., Plasma technologies for manufacturing of microstrip metal detectors of ionizing radiation. Problems of Atomic Science and Technology. 2007, # 1. Series: Plasma Physics (13),
- [144] STMicroelectronics, «Reference manual RM0090. STM32F405/415, STM32F407/41 STM32F427/437 and STM32F429/439 advanced Arm-based 32-bit MCUs», тех. звіт., Overview and documentation relevant for the STM32F407/ 417 microcontroller series <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407-417.html>. eprint: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0090-stm32f405415-stm32f407417-stm32f427437-216and-stm32f429439-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf. url: <http://www.st.com>

- [145] STMicroelectronics, «User manual UM1472. Discovery kit with STM32F407VGMCU», tex. 3bit., Overview and documentation relevant for the STM32F407/417 microcontroller series <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407-417.html>. eprint: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1472-discovery-kit-with-stm32f407vg-mcu-stmicroelectronics.pdf. url: <http://www.st.com>
- [146] STMicroelectronics, «Application note AN4776. General-purpose timer cookbook for STM32 microcontrollers», tex. 3bit., Overview and documentation relevant for the STM32F407/417 microcontroller series <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407-417.html>. eprint: https://www.st.com/resource/en/application_note/an4776-generalpurpose-timer-cookbook-for-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf. url: <http://www.st.com>
- [147] STMicroelectronics, «User manual UM1725. Description of STM32F4 HAL and LL drivers», tex. 3bit., Overview and documentation relevant for the STM32F407/417 microcontroller series <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407-417.html>. eprint: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1725-description-of-stm32f4-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf. url: <http://www.st.com>
- [148] Okhrimenko O. Y. Advanced radiation monitoring system for the LHCb inner tracker: beam position control. – 2007.
- [149] Antcheva I. et al. ROOT—A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization //Computer Physics Communications. – 2011. – T. 182. – №. 6. – C. 1384-1385.
- [150] Martin Lesma, Raul (CERN; Madrid, CIEMAT) ; Alessio, F (CERN) ; Barbosa,J (CERN) ; Baron,S (CERN) ; Caplan,C (CERN ; Rio de Janeiro, CBPF) ; Leitao,P (CERN); Pecoraro,C (EPFL-IPEQ, Lausanne); Porret,D (CERN); Wyllie,K (CERN),- The Versatile Link Demo Board (VLDB) – Specifications 1.02, January 25, 2017. - <https://cds.cern.ch/record/2275133?ln=ru>

- [151] Cardoso L. et al. A Framework for Hardware Integration in the LHCb Experiment Control System. – 2015.
- [152] Barbosa J. et al. A monitoring system for the LHCb data flow //IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2017. – Т. 64. – №. 6. – С. 1191-1196.
- [153] The LHCb Collaboration. LHCb PLUME: Probe for LUMinosity MEasurement: Technical Design Report. CERN-LHCC-2021-002. LHCb-TDR-022 (Geneva: CERN, 2021) 63 p.
- [154] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCb/NuMuPileUp>
- [155] S.B. Chernyshenko et al. RMS-R3 – the system for monitoring region of luminosity and background at the LHCb experiment (CERN). Nuclear Physics and Atomic Energy, 24(2) (2023) 154-161.
<https://doi.org/10.15407/jnpae2023.02.0148>
- [156] Vasyly Dobishuk, Federico Alessio, Serhii Chernyshenko, Oleksandr Okhrimenko and Valery Pugatch. LHCb RMS-R3, new radiation hard system for on-line monitoring of beam and background conditions in Run 3 2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2374 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/2374/1/012005
- [157] С. Чернишенко, В. Добішук, В. Пугач. Функціональні характеристики системи RMS-R3 в третій серії фізичних вимірів в експерименті ЛHCб. Nuclear Physics and Atomic Energy, 25(2) (2024) 188–193.
<https://doi.org/10.15407/jnpae2024.02.188>
- [158] Пугач В. М., Чернишенко С. Б., Охріменко О. Ю., Добішук В. М., Кива В. О., Сторожик Д. І., Міліція В. М., Кшиванський О.О. Оновлення Системи Радіаційного Моніторингу для експерименту ЛHCб CERN до Run 3. XXVII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 21 - 25 вересня 2020 року (відеоконференція)). – Київ, Інститут ядерних досліджень НАН України, 2020. – 335 с. – с. 105. URL: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2020/abstracts.html. eprint:

http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2020/pdf/book%20of%20%20abstracts_2020.pdf

[159] С. Б. Чернишенко, В. М. Добішук, В. О. Кива, О. Ю. Охріменко, В. М. Пугач, Ф. Алессіо, Г. Корті, Х. Шіндлер. RMS-R3 – система контролю області світимості та фону у експерименті LHCb (CERN). XXIX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 26–30 вересня 2022 року (відеоконференція)). — Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2022. — 239 с. — с. 91. URL: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2022/abstracts.html. eprint: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2022/pdf/book_of_abstracts_2022.pdf.

[160] В. Добішук, В. Пугач, С. Чернишенко, К. Гаспар, П. Роуб, Л. Гранато Кардоса, Н. Нойфельд. Використання системи контролю області взаємодії і фону RMS-R3 для відображення двовимірних асиметрій на пульті управління експерименту LHCb. XXX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 25–29 вересня 2023 року (відеоконференція)). — Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2023. — 248 с. — с. 52. URL: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2023/index.html. Eprint: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2023/book%20of%20abstracts_2023.pdf

[161] С. Чернишенко, В. Добішук, В. Пугач, В. Кива, О. Охріменко. моніторингова система RMS-R3 у експерименті LHCb для колайдерного режиму та режиму фіксованої мішені. XXXI Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 27–31 травня 2024 року (відеоконференція)). Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2024. URL: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2024a/index.html

[162] С.Б. Чернишенко, В.М. Добішук, В.О. Кива, О.Ю. Охріменко, В.М. Пугач. RMS-R3 - система контролю світності та фону експерименту LHCb (CERN). Міжнародна конференція "Ядерна фізика на Закарпатті"

(до 55-річчя відділу фотоядерних процесів ІЕФ НАН України): тези доповідей (Ужгород, 21–23 травня 2024 року (змішана конференція)). Ужгород: Інститут електронної фізики НАН України. URL: <http://www.iep.org.ua/content/conferenc/55nuklear/index.html> Eprint: http://www.iep.org.ua/content/conferenc/55nuklear/files/Book_of_abstracts_nuklear-2024.pdf

[163] V. Dobishuk, S. Chernyshenko, O. Okhrimenko and V. Pugatch. Installation of the Radiation Monitoring System RMS-R3. Tech. report. CERN 2021. Report № EDMS-2430186. URL: <https://edms.cern.ch/document/2430186/2> (restricted access).

[164] The LHCb collaboration. LHCb SMOG Upgrade. CERN-LHCC-2019-005, LHCb-TDR-020, 8 May 2019. Mode of access: URL: <https://cds.cern.ch/record/2673690/files/LHCb-TDR-020.pdf>

[165] C. Hast et al., Nucl. Instr. Meth. A 354, 224 (1995).

[166] V. Pugatch et al, Ukr. J. Phys., 54 (4) (2009) 418; URL: <http://archive.ujp.bitp.kiev.ua/files/journals/54/4/540414p.pdf>.

[167] Bastien Raë. Overview over CERN test beam facilities and LS2 modifications // 8th Beam Telescopes and Test Beams Workshop. 27th – 31st January 2020. Tbilisi, Georgia

[168] S. Chernyshenko, V. Dobishuk, V. Pugatch. The superthin fixed target for the LHCb experiment in Run4. The virtual HEP conference on Run4@LHC (Offshell-2021): poster presentation (Geneva, Switzerland, 06 – 09 July 2021 (virtual)). URL: <https://indico.cern.ch/event/968055/contributions/4427226/>.

[169] V. Dobishuk, S. Chernyshenko, O. Okhrimenko, V. Pugatch. “Технічна специфікація RMS-R3”. Installation of the Radiation Monitoring System RMS-R3, Engineering Change Request Notice, EDMS №2430186. – Mode of access: URL: <https://edms.cern.ch/document/2430186/2>.

[170] В. М. Пугач, С. Б. Чернишенко, В. М. Добішук. Надтонка фіксована мікромішень з використанням MEMS у RUN4 в експерименті LHCb. XXVIII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей ((Київ, 27 вересня - 1 жовтня 2021 року (відеоконференція)). – Київ, Інститут ядерних досліджень НАН України, 2021. – 245 с. – с. 89. URL: <http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2021/> eprint: http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2021/Book_of_Abstracts_2021.pdf

[171] Chernyshenko S., Pugatch V., Dobishuk V. The superthin fixed target for the LHCb experiment in Run4. Offshell-2021 The virtual HEP conference on Run4@LHC – 2021. – №. Poster-2021-1050. URL: <https://cds.cern.ch/record/2775325>

[172] В. Пугач, С. Чернишенко, В. Добішук, О. Ковальчук, В. Аушев, О. Кшиванський, О. Скоренок. Розробка надтонкої фіксованої твердотільної мішені в експерименті LHCb (CERN). XIX конференція з фізики високих енергій і ядерної фізики: тези доповідей (Харків, 23-26 березня 2021 р.). — Харків: ІФВЕЯФ ННЦ ХФТІ, 2021. — С 35. URL: <https://www.kipt.kharkov.ua/conferences/ihepnp/2021/> eprint: <https://www.kipt.kharkov.ua/conferences/ihepnp/2021/tezis.pdf>

Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. S.B. Chernyshenko et al. RMS-R3 – the system for monitoring region of luminosity and background at the LHCb experiment (CERN). Nuclear Physics and Atomic Energy, 24(2) (2023) 154-161

(Q4, <https://doi.org/10.15407/jnpae2023.02.0148>, фахове видання України, SCOPUS.

Внесок здобувача: відповідальний автор, проаналізовані та інтерпретовані дані, що отримані методом асиметрій для відгуків сенсорів RMS-R3, виміряна залежність відгуку системі від середньої кількості видимих pp взаємодій на один банч пучка).

2. Oleksandr V. Vitiuk, ..., Sergiy B. Chernyshenko et al. Colliding and Fixed Target Mode in a Single Experiment—A Novel Approach to Study the Matter under New Extreme Conditions, Particles 5 (2022) 245–264

(Q3, <https://doi.org/10.3390/particles5030022>, SCOPUS.

Внесок здобувача: зроблені розрахунки товщини мішеней для $p+C+p$ та $Pb+Pb+Pb$. Дана оцінка кількості подій для зіткнення 2х пучків на мішенях. Розглянуто використання та концепція різних типів мішеней).

3. С. Чернишенко, В. Добішук, В. Пугач. Функціональні характеристики системи RMS-R3 в третій серії фізичних вимірів в експерименті LHCb. Nuclear Physics and Atomic Energy, 25(2) (2024) 188–193

(Q4, <https://doi.org/10.15407/jnpae2024.02.188>, фахове видання України.

Внесок здобувача: відповідальний автор, пророблений аналіз даних методом асиметрій для зіткнень пучків та пучка з фіксованою мішенню).

4. С.Б. Чернишенко, В.М. Добішук, В.М. Пугач. Концепція надтонкої твёрдотільної фіксованої мікромішені для експеримента LHCb (CERN). Наука і техніка сьогодні, №6(34) (2024) 1116-1128

(Q4, фахове видання України, [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6\(34\)-1116-1128](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6(34)-1116-1128)).

Внесок здобувача: відповідальний автор, розроблена концепція фіксованої твердотільної мікростріпової мікромішені, концепція мішенного комплексу, Монте-Карло симуляції, постановка експерименту з мікромішенню на SPS та PS у ЦЕРН).

5. R. Aaji, ..., S. Chernyshenko et al. The LHCb upgrade I. Journal of Instrumentation, 19(05):P05065 (2024) 1-211

(Q1, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/05/P05065>).

Внесок здобувача: опис призначення та роботи RMS-R3 у експерименті LHCb).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

1. С.Б. Чернишенко, В. М. Пугач, О. Ю. Охріменко. Розробка надтонкої мікростріпової мішені для експерименту LHCb (CERN). XXVI Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: постерна доповідь (Київ, 8 - 12 квітня 2019 року). – Київ, Інститут ядерних досліджень НАН України, 2019. – 203 с. – с. 74. URL: <http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/>. eprint: http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/Book_of_Abstracts_2019.pdf

2. Пугач В. М., Чернишенко С. Б., Охріменко О. Ю., Добішук В. М., Кива В. О., Сторожик Д. І., Міліція В. М., Кшиванський О.О. Оновлення Системи Радіаційного Моніторингу для експерименту LHCb CERN до Run 3. XXVII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 21 - 25 вересня 2020 року (відеоконференція)). – Київ, Інститут ядерних досліджень НАН України, 2020. – 335 с. – с. 105. URL: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2020/abstracts.html. eprint:

http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2020/pdf/book%20of%20%20abstracts_2020.pdf

3. В. М. Пугач, С. Б. Чернишенко, В. М. Добішук. Надтонка фіксована мікромішень з використанням MEMS у RUN4 в експерименті LHCb. XXVIII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей ((Київ, 27 вересня - 1 жовтня 2021 року (відеоконференція)). – Київ, Інститут ядерних досліджень НАН України, 2021. – 245 с. – с. 89. URL: <http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2021/> eprint: http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2021/Book_of_Abstracts_2021.pdf
4. Chernyshenko S., Pugatch V., Dobishuk V. The superthin fixed target for the LHCb experiment in Run4. Offshell-2021 The virtual HEP conference on Run4@LHC – 2021. – №. Poster-2021-1050. URL: <https://cds.cern.ch/record/2775325>
5. В. Пугач, С. Чернишенко, В. Добішук, О. Ковальчук, В. Аушев, О. Кшиванський, О. Скоренок. Розробка надтонкої фіксованої твердотільної мішені в експерименті LHCb (CERN). XIX конференція з фізики високих енергій і ядерної фізики: тези доповідей (Харків, 23-26 березня 2021 р.). — Харків: ІФВЕЯФ ННЦ ХФТІ, 2021. — 107 с. – с. 35. URL: <https://www.kipt.kharkov.ua/conferences/ihepnp/2021/> eprint: <https://www.kipt.kharkov.ua/conferences/ihepnp/2021/tezis.pdf>
6. С. Б. Чернишенко, В. М. Добішук, В. О. Кива, О. Ю. Охріменко, В. М. Пугач, Ф. Алессіо, Г. Корті, Х. Шіндлер. RMS-R3 – система контролю області світимості та фону у експерименті LHCb (CERN). XXIX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 26–30 вересня 2022 року (відеоконференція)). — Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2022. — 239 с. — с. 91. URL: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2022/abstracts.html. eprint:

http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2022/pdf/book_of_abstracts_2022.pdf.

7. В. Добішук, В. Пугач, С. Чернишенко, К. Гаспар, П. Роуб, Л. Гранато Кардоса, Н. Нойфельд. Використання системи контролю області взаємодії і фону RMS-R3 для відображення двовимірних асиметрій на пульті управління експерименту LHCb. XXX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 25–29 вересня 2023 року (відеоконференція)). — Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2023. — 248 с. — с. 52. URL: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2023/index.html. Eprint: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2023/book%20of%20abstracts_2023.pdf

8. С. Чернишенко, В. Добішук, В. Пугач, В. Кива, О. Охріменко. моніторингова система RMS-R3 у експерименті LHCb для колайдерного режиму та режиму фіксованої мішені. XXXI Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 27–31 травня 2024 року (відеоконференція)). Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2024. URL: http://www.kinr.kiev.ua/Annual_Conferences/KINR2024a/index.html

9. С.Б. Чернишенко, В.М. Добішук, В.О. Кива, О.Ю. Охріменко, В.М. Пугач. RMS-R3 - система контролю світності та фону експерименту LHCb (CERN). Міжнародна конференція "Ядерна фізика на Закарпатті" (до 55-річчя відділу фотоядерних процесів ІЕФ НАН України): тези доповідей (Ужгород, 21–23 травня 2024 року (змішана конференція)). Ужгород: Інститут електронної фізики НАН України. URL: <http://www.iep.org.ua/content/conferenc/55nuklear/index.html>. Eprint: http://www.iep.org.ua/content/conferenc/55nuklear/files/Book_of_abstracts_nuklear-2024.pdf

10. Vasyl Dobishuk, Federico Alessio, Serhii Chernyshenko, Oleksandr Okhrimenko and Valery Pugatch. LHCb RMS-R3, new radiation hard system for on-line monitoring of beam and background conditions in Run 3 2022 J. Phys.: Conf. Ser. 2374 012005

Q4, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2374/1/012005>, SCOPUS

Внесок здобувача: опис системи, виконання калібровки системи, представлення графіків.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. V. Dobishuk, S. Chernyshenko, O. Okhrimenko and V. Pugatch. Installation of the Radiation Monitoring System RMS-R3. Tech. report. CERN 2021. Report № EDMS-2430186. URL: <https://edms.cern.ch/document/2430186/2> (restricted access).
2. Дослідження в експерименті LHCb генерації важких адронів в ядро-ядерних зіткненнях. Етап 1. Дослідження генерації $J/\psi(nS)$ мезонів в ультрапериферичних ядро-ядерних зіткненнях. Виміри та аналіз даних Системи Радіаційного Моніторингу: звіт про НДР / Цільова програма наукових досліджень НАН України “Фундаментальні дослідження з фізики високих енергій та ядерної фізики (міжнародна співпраця)” на 2018 – 2020 рр. / ІЯД НАН України; керівн. член-кор. НАН України В.М. Пугач; відповід. викон. Охріменко О.Ю.; викон. Чернишенко С.Б. [та інші]. – Київ, 2018. – 22 с. – № 0118U006182, № 0219U000522. – Шифр теми № 03/341.
3. Дослідження в експерименті LHCb генерації важких адронів в ядро-ядерних зіткненнях. Етап 2. Аналіз фізичних даних 2017 – 2018 рр. по генерації дивних та чарівних адронів. Розробка модернізації СРМ: звіт про НДР / Цільова програма наукових досліджень НАН України “Фундаментальні

дослідження з фізики високих енергій та ядерної фізики (міжнародна співпраця)” на 2018 – 2020 рр. / ІЯД НАН України; керівн. член-кор. НАН України В.М. Пугач; відповід. викон. Охріменко О.Ю.; викон. Чернишенко С.Б. [та інші]. – Київ, 2019. – 24 с. – № 0118U006182, № 0220U000156. – Шифр теми № 03/341.

4. Властивості взаємодії при високих температурах та густинах ядерної матерії. Етап 2. Фізичні виміри на LHCb. Визначити поперечні перерізи генерації чарівних та дивних частинок в p -Pb зіткненнях. Розробка ТЗ багатомішенного комплексу для LHCb. Розробка алгоритмів реконструкції треків в реальному часі в експериментах CBM, PANDA.: звіт про НДР (2018 р., проміжний) / Тематичний план науково-дослідних робіт ІЯД НАН України у 2017 – 2021 рр. за відомчою тематикою НАН України КПКВК 6541030, фундаментальні дослідження / ІЯД НАН України; керівн. член-кор. НАН України В.М. Пугач; відповід. викон. канд. фіз.-мат. наук Обіход Т.В., канд. фіз.-мат. наук Борисова М.С., док. філос. Теклішин М.А. [та інші]; викон. Петренко Є.О., Пугач М.В., ..., Чернишенко С.Б. [та інші]. – Київ, 2022. – 31 с. – № 0116U002883, №0222U004075. – Шифр теми № 03/312.

5. Властивості взаємодії при високих температурах та густинах ядерної матерії. Етап 3. Обробка даних LHCb для рідкісних розпадів B -мезонів. Аналіз p - p та p - A даних при енергії біля 100 GeV. Розробка мікростріпових металевих мішеней-детекторів для LHCb. Тестування Кремнієвої Трекерної Системи (KTC) експерименту CBM (FAIR, Darmstadt).: звіт про НДР (2018 р., проміжний) / Тематичний план науково-дослідних робіт ІЯД НАН України у 2017 – 2021 рр. за відомчою тематикою НАН України КПКВК 6541030, фундаментальні дослідження / ІЯД НАН України; керівн. член-кор. НАН України В.М. Пугач; відповід. викон. канд. фіз.-мат. наук Обіход Т.В., канд. фіз.-мат. наук Борисова М.С., док. філос. Теклішин М.А. [та інші]; викон. Петренко Є.О., Пугач М.В., ..., Чернишенко С.Б. [та інші]. – Київ, 2022. – 31 с. – № 0116U002883, №0222U004100. – Шифр теми № 03/312.

6. Властивості взаємодії при високих температурах та густинах ядерної матерії. Етап 4. Аналіз даних LHCb з еволюції розпадів В-мезонів. Визначення з даних важко-іонних зіткнень в LHCb факторів ядерної модифікації. Участь в монтажі КТС експерименту CBM (FAIR, Darmstadt): звіт про НДР (2020 р., проміжний) / Тематичний план науково-дослідних робіт ІЯД НАН України у 2017 – 2021 рр. за відомчою тематикою НАН України КПКВК 6541030, фундаментальні дослідження / ІЯД НАН України; керівн. член-кор. НАН України В.М. Пугач; відповід. викон. канд. фіз.-мат. наук Обіход Т.В., канд. фіз.-мат. наук Борисова М.С., док. філос. Теклішин М.А. [та інші]; викон. Кива В.О., Малигіна Г.М.,..., Чернишенко С.Б. [та інші]. – Київ, 2022. – 25 с. – № 0116U002883, №0222U004099 – Шифр теми № 03/312.

7. Властивості взаємодії при високих температурах та густинах ядерної матерії. Етап 5. Порівняння результатів експерименту LHCb з теоретичними розрахунками. Участь в введенні в дію експерименту CBM. Підготовка публікацій та підсумкового звіту: звіт про НДР (2017 – 2021 р., заключний) / Тематичний план науково-дослідних робіт ІЯД НАН України у 2017 – 2021 рр. за відомчою тематикою НАН України КПКВК 6541030, фундаментальні дослідження / ІЯД НАН України; керівн. член-кор. НАН України В.М. Пугач; відповідальні викон. канд. фіз.-мат. наук Обіход Т.В., канд. фіз.-мат. наук Борисова М.С., док. філос. Теклішин М.А. [та інші]; викон. Кива В.О., Малигіна Г.М., ..., Чернишенко С.Б. [та інші]. – Київ, 2022. – 82 с. – № 0116U002883, № 0222U004098. – Шифр теми № 03/312

8. Фізико-технічні основи дослідження властивостей дивних адронів в експерименті CBM (FAIR/GSI). Етап 1. Тестування перших зібраних детекторних модулів КТС. Розробка алгоритмів ідентифікації дивних адронів. Звіт по НДР (проміжний). Тематичний план науково-дослідних робіт ІЯД НАН України у 2021 – 2023 рр. за відомчою тематикою НАН України КПКВК 6541030, фундаментальні дослідження / ІЯД НАН України; керівн. член-кор. НАН України В.М. Пугач; відповідальні виконавці: д.філос., М.А.Теклішин;

О.Ю. Охріменко; В.М. Добішук; С.Б. Чернишенко. – Київ, 2021. - №0121U113391. – Шифр теми №03/372.

9. Фізико-технічні основи дослідження властивостей дивних адронів в експерименті CBM (FAIR/GSI). Етап 2. Випробування двох станцій міні-КТС в експерименті mCBM. Визначення ефективності реконструкції треків дивних адронів. Звіт по НДР (проміжний). Тематичний план науково-дослідних робіт ІЯД НАН України у 2021 – 2023 рр. за відомчою тематикою НАН України КПКВК 6541030, фундаментальні дослідження / ІЯД НАН України; керівн. член-кор. НАН України В.М. Пугач; відповідальні виконавці: д.філос.,

М.А.Теклішин; О.Ю. Охріменко; В.М. Добішук; М.В. Пугач; С.Б. Чернишенко. – Київ, 2022. - №0121U113391. – Шифр теми №03/372.

10. Фізико-технічні основи дослідження властивостей дивних адронів в експерименті CBM (FAIR/GSI). Етап 3. Підготовка станцій КТС для монтажу в експериментальному приміщенні експерименту CBM. Монте Карло симуляції генерації дивних адронів. Публікація результатів. Заключний звіт. Звіт по НДР (заключний). Тематичний план науково-дослідних робіт ІЯД НАН України у 2021 – 2023 рр. за відомчою тематикою НАН України КПКВК 6541030, фундаментальні дослідження / ІЯД НАН України; керівн. член-кор. НАН України В.М. Пугач; відповідальні виконавці: д.філос.,

М.А.Теклішин; О.Ю. Охріменко; В.М. Добішук; М.В. Пугач; С.Б. Чернишенко. – Київ, 2023. - №0121U113391., №0223U005046. – Шифр теми №03/372.

11. Режим фіксованої твердотільної мішені в експерименті LHCb (CERN) і пошук екстремальних станів матерії в зіткненнях важких ядер на Великому Адронному Колайдері. Етап 1. Створення СРМ і важкі іони на ВАК. Тестування СРМ і фізика важких іонів: звіт про НДР / Грант НФДУ для реалізації проєкту 2020.02/0257 із виконання наукових досліджень і розробок у 2020 році / ІЯД НАН України; керівн. член-кор. НАН України В.М. Пугач;

відповід. викон. Чернишенко С.Б. [та інші]. – Київ, 2020. – 35 с. – № 0120U105298, № 0221U100363. – Шифр теми № 49/20.

12. Режим фіксованої твердотільної мішені в експерименті LHCb (CERN) і пошук екстремальних станів матерії в зіткненнях важких ядер на Великому Адронному Колайдері. Етап 1. Встановлення СРМ і фізика важких іонів. Початок вимірювань на пучку. Моделювання відгуку детектора: звіт про НДР / Грант НФДУ для реалізації проєкту 2020.02/0257 із виконання наукових досліджень і розробок у 2021 році / ІЯД НАН України; керівн. член-кор. НАН України В.М. Пугач; відповід. викон. Чернишенко С.Б. [та інші]. – Київ, 2021. – 40 с. – № 0120U105298, № 0222U000251. – Шифр теми № 47/21.

13. Режим фіксованої твердотільної мішені в експерименті LHCb (CERN) і пошук екстремальних станів матерії в зіткненнях важких ядер на Великому Адронному Колайдері. Етап 2. Аналіз експериментальних даних: звіт про НДР / Грант НФДУ для реалізації проєкту 2020.02/0257 із виконання наукових досліджень і розробок у 2021 році / ІЯД НАН України; керівн. членкор. НАН України В.М. Пугач; відповід. викон. Чернишенко С.Б. [та інші]. – Київ, 2021. – 25 с. – № 0120U105298, № 0222U000252. – Шифр теми № 47/21.

14. Адронізація кваркових станів в ядро-ядерних зіткненнях на Великому Адронному Колайдері при енергіях до 14 ТеВ. Етап 1 Калібрування RMS-R3. Фізичні виміри в експерименті LHCb. Теоретичні моделювання кваркових процесів при енергії p–p зіткнень 14 ТеВ: звіт про НДР (2022 р., проміжний) / Тематичний план науково-дослідних робіт ІЯД НАН України у 2022 – 2026 рр. за відомчою тематикою НАН України КПКВК 6541030, фундаментальні дослідження / ІЯД НАН України; керівн. член-кор. НАН України В.М. Пугач; відповід. викон. Добішук Василь Миколайович; Обіход Тетяна Вікторівна; Чернишенко Сергій Борисович; Ковальчук Олексій Сергійович; Кива Володимир Олексійович. – Київ, 2022. – № 0121U110762. – Шифр теми № 03/382.

15. Адронізація кваркових станів в ядро-ядерних зіткненнях на Великому Адронному Колайдері при енергіях до 14 ТеВ. Етап 2 Фізичні виміри на LHCb. Аналіз даних адронізації дивних і чарівних кварків в p-Pb зіткненнях при енергії 8 ТеВ. Реконструкція треків і фізичних подій в реальному часі: звіт про НДР (2022 р., проміжний) / Тематичний план науково-дослідних робіт ІЯД НАН України у 2022 – 2026 рр. за відомчою тематикою НАН України КПКВК 6541030, фундаментальні дослідження / ІЯД НАН України; керівн. член-кор. НАН України В.М. Пугач; відповід. викон. Борисова Марина Сергіївна; Кот Олександр Андрійович; Пугач Михайло Валерійович; Чернишенко Сергій Борисович; Теклішин Максим Андрійович; Костюк Ігор Олександрович. – Київ, 2023. – № 0121U110762. – Шифр теми № 03/382.

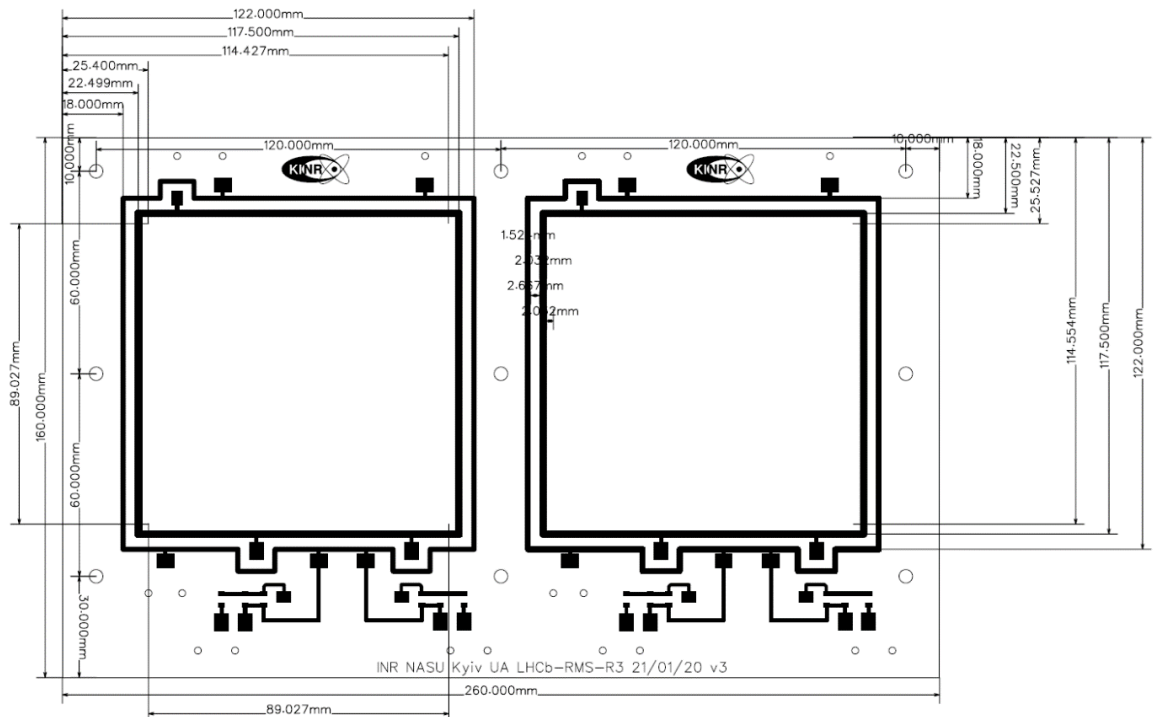


Рис. В1. Схематичне зображення площини модуля RMS-R3 зі всіма розмірами.

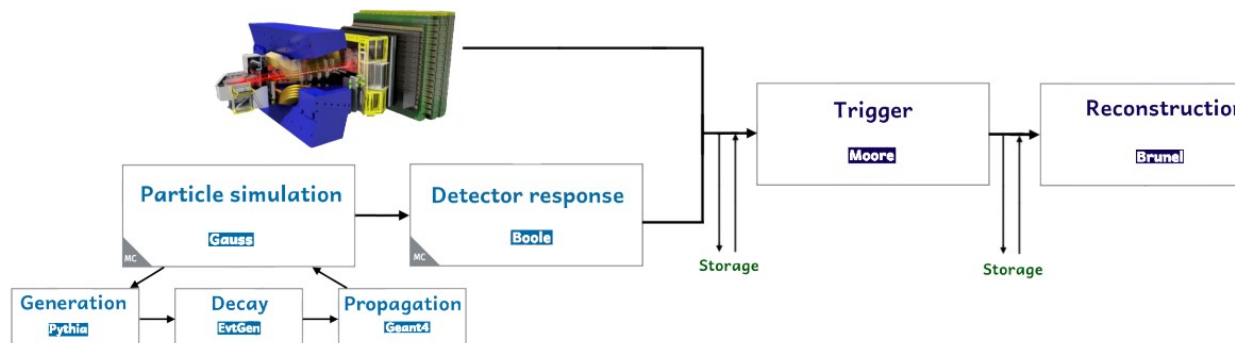


Рис. В2. Схема Монте-Карло симуляцій у експерименті LHCb

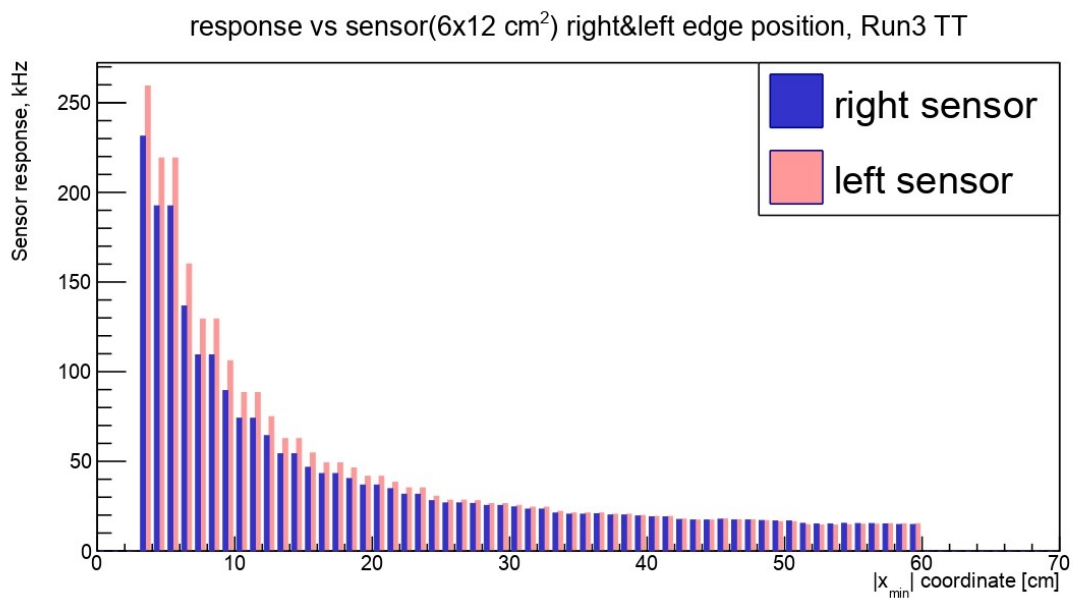
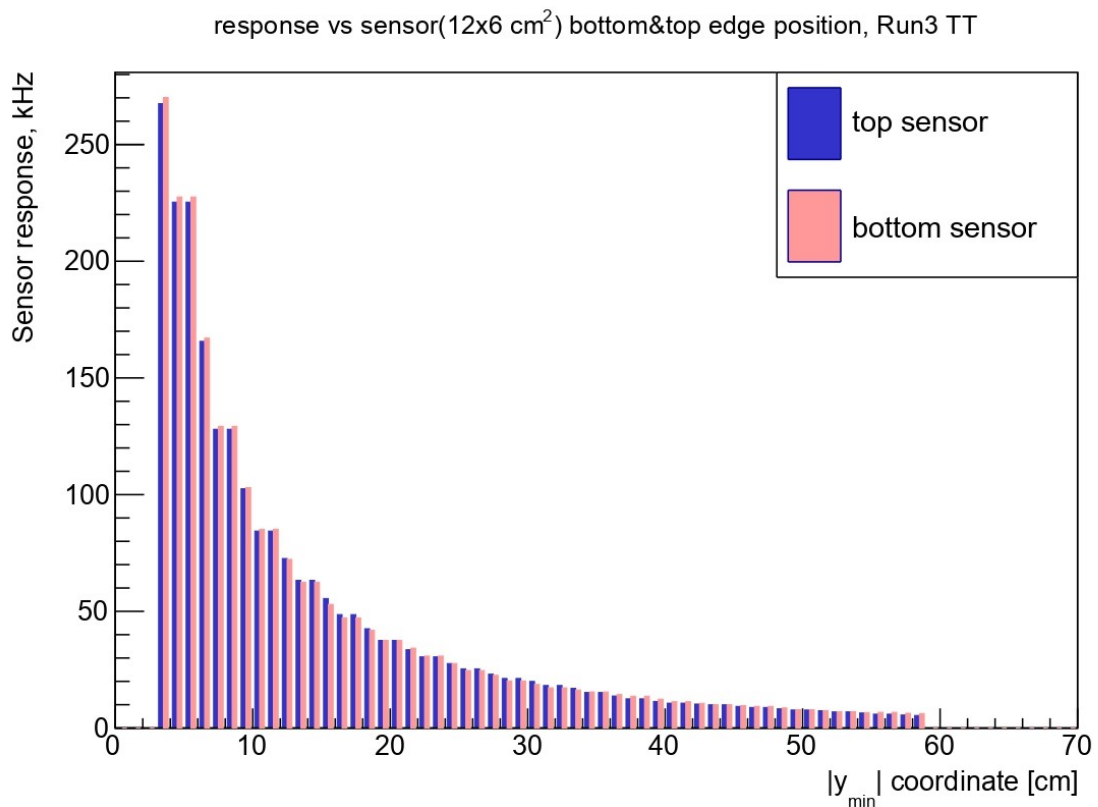


Рис. В3. Зверху - Монте-Карло симуляції відгуку RMS R3 у Run 3 для сенсорів із розмірами 12 x 6 см², що розташовані горизонтально (зліва та справа) на площині XY перпендикулярної до осі пучка. Знизу - Монте-Карло симуляції відгуку RMS R3 у Run 3 для сенсорів із розмірами 6 x 12 см², що розташовані горизонтально (зліва та справа) на площині XY перпендикулярної до осі пучка По осі X – координатна відстань у см від осі пучка, по Y – очікуваний відгук сенсорів

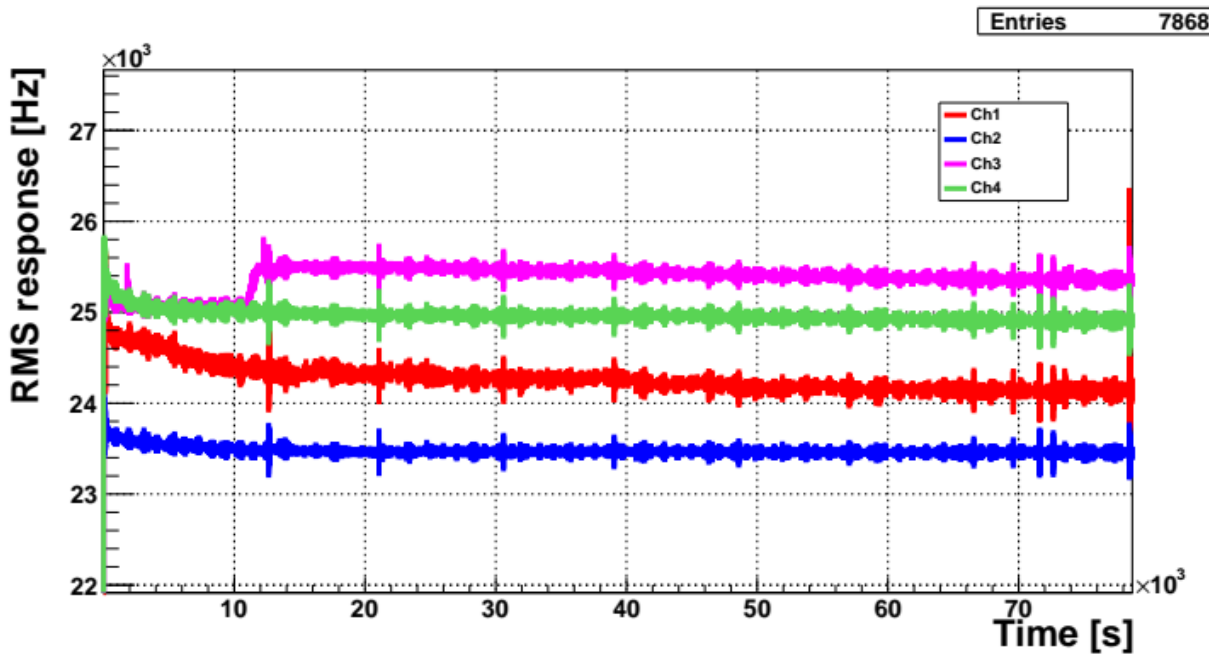
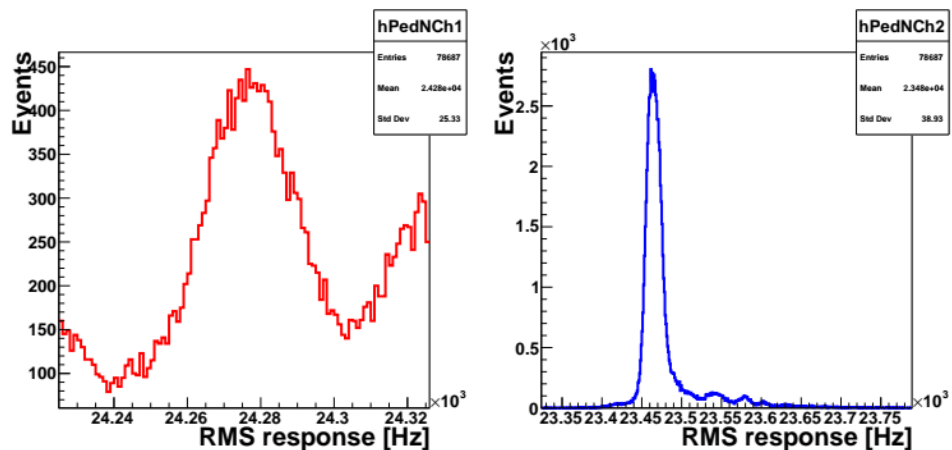


Рис. В4. Відгук прототипів сенсорів на калібрувальний струм (базова лінія), що був виміряний на Tandem генераторі в ІЯД НАНУ. Красна лінія – прототип 4, синя – прототип 6, рожева – прототип 5, зелена – прототип 3. По осі X – час набору даних, по Y - відгук прототипів у Гц



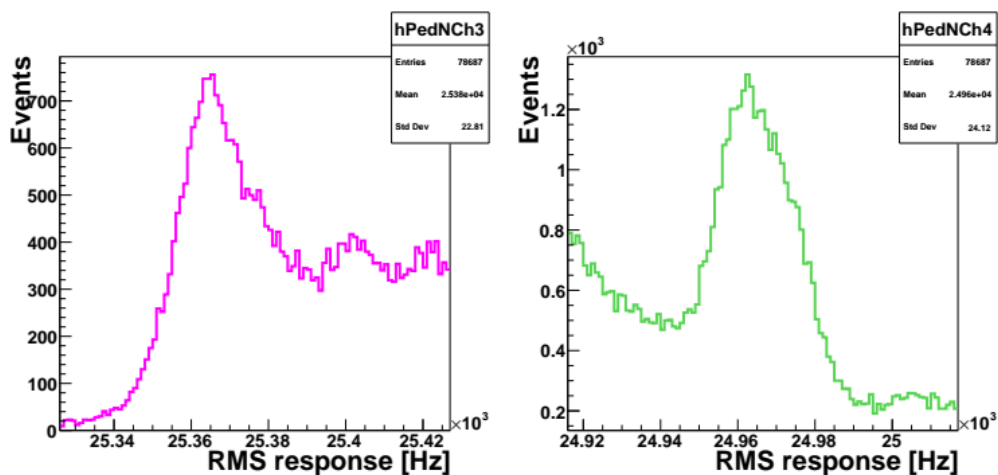


Рис. В5. Проекції відгуку до рис. В4. По осі X – відгук у Гц, по Y – кількість подій. Розбіновка ROOT: 1 бін- 1 Гц. Красна лінія – прототип 4, синя – прототип 6, рожева – прототип 5, зелена – прототип 3.

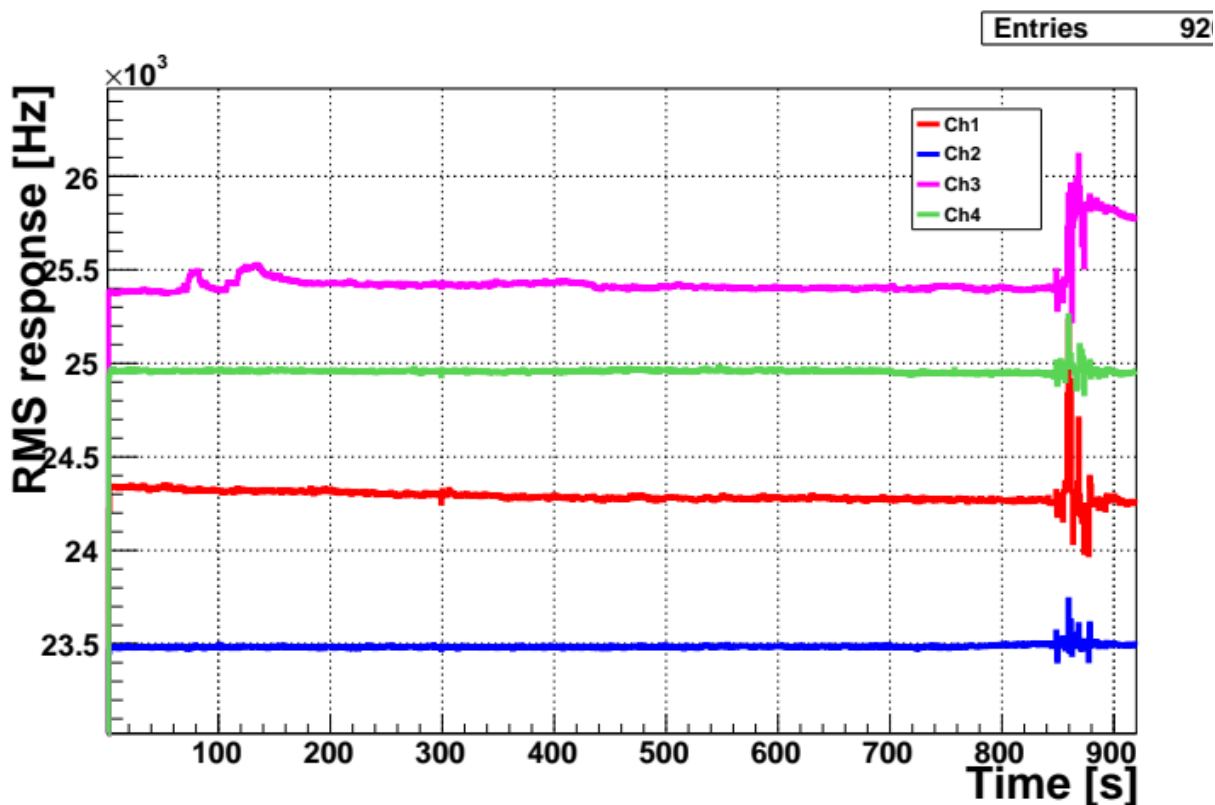


Рис. В6. Відгук прототипів сенсорів на зіткнення протонів, що був виміряний на Tandem генераторі в ІЯД НАНУ. Красна лінія – прототип 4, синя – прототип 6, рожева – прототип 5, зелена – прототип 3. По осі X – час набору даних, по Y - відгук прототипів у Гц

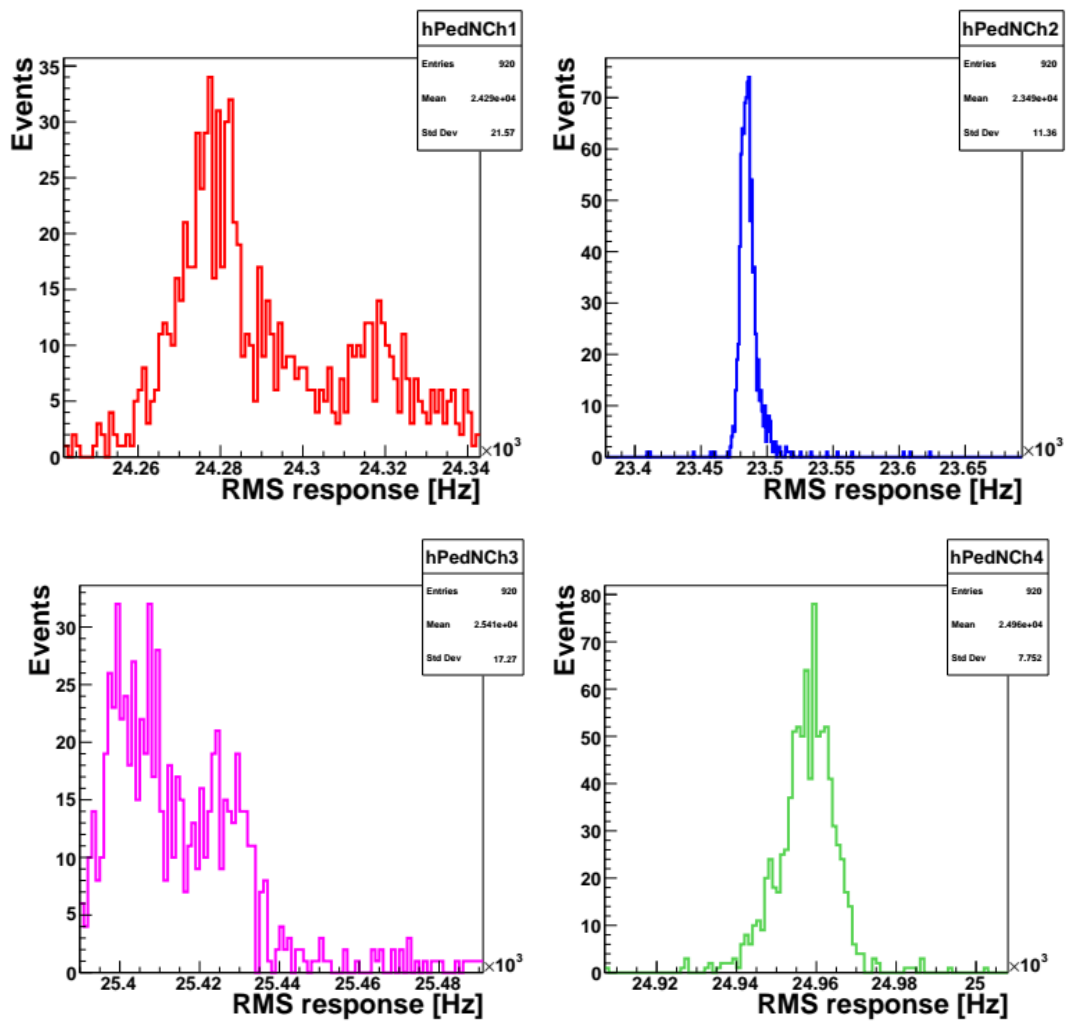


Рис. В7. Проекції відгуку до рис. В6. По осі X – відгук у Гц, по Y – кількість подій. Розбіновка ROOT: 1 бін- 1 Гц. Красна лінія – прототип 4, синя – прототип 6, рожева – прототип 5, зелена – прототип 3.

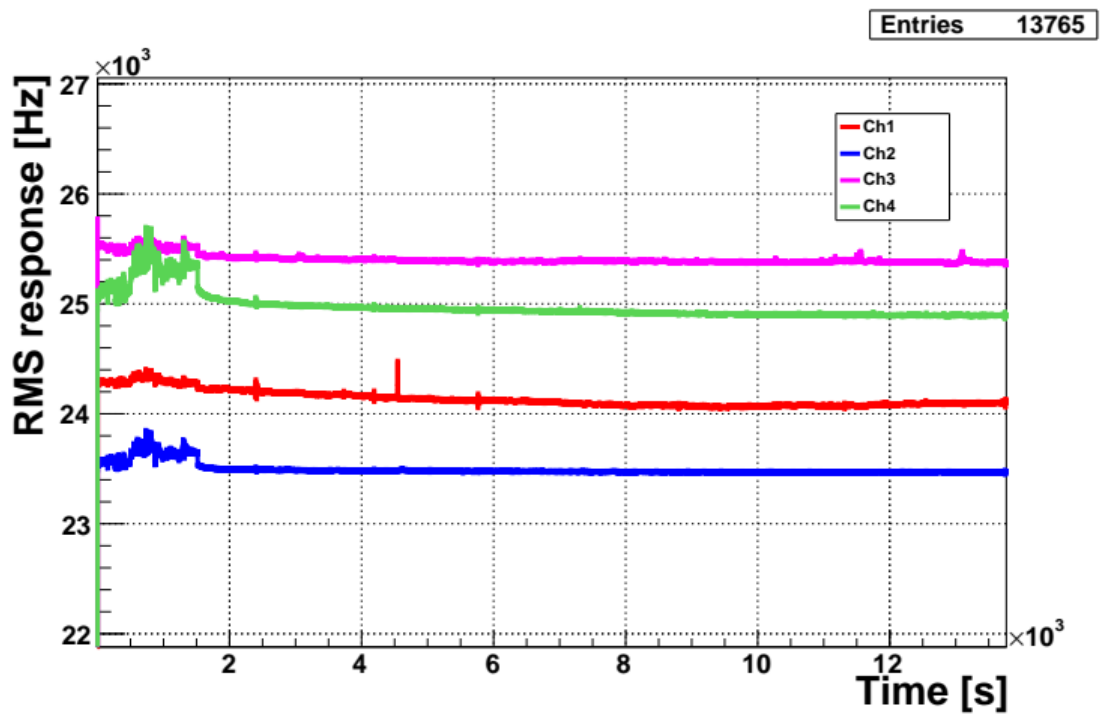
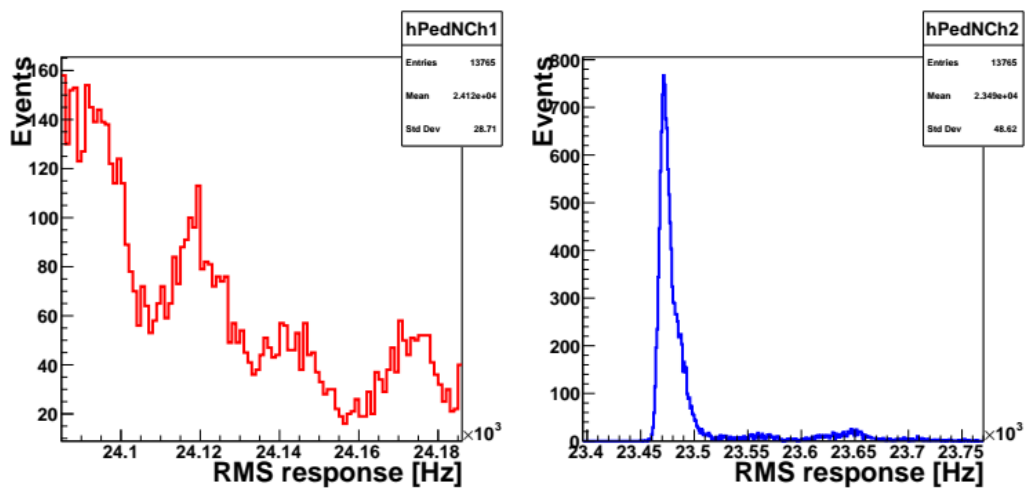


Рис. В8. Відгук прототипів сенсорів на зіткнення дейтронів, що був виміряний на Tandem генераторі в ІЯД НАНУ. Красна лінія – прототип 4, синя – прототип 6, рожева – прототип 5, зелена – прототип 3. По осі X – час набору даних, по Y - відгук прототипів у Гц



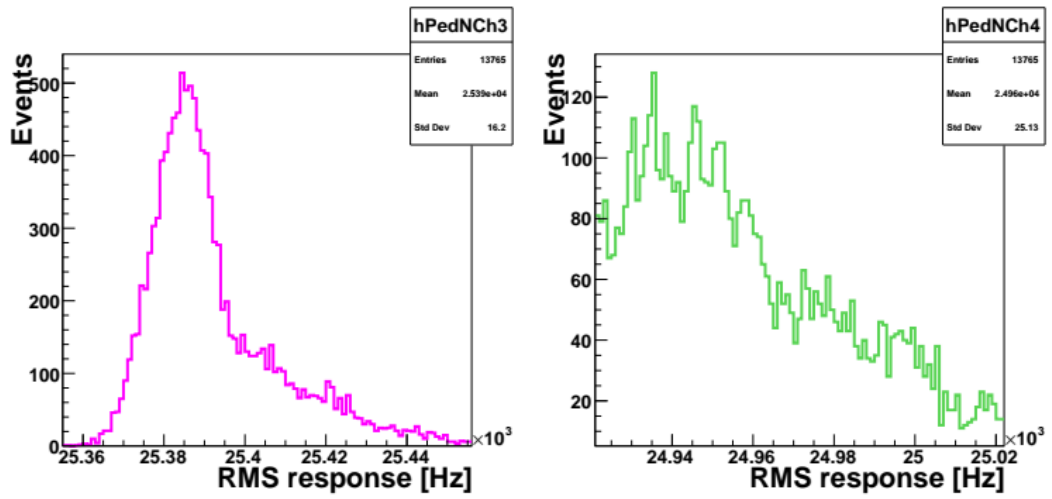


Рис. А9. Проекції відгуку до рис. В8. По осі X – відгук у Гц, по Y – кількість подій. Розбіновка ROOT: 1 бін- 1 Гц. Красна лінія – прототип 4, синя – прототип 6, рожева – прототип 5, зелена – прототип 3.

Виготовлення прототипів сенсорів і тестування їх характеристик.

Для того, щоб визначити основні характеристики для фінальної конструкції сенсорів RMS-R3 були виготовлені прототипи сенсорів. Перший робочий прототип сенсора RMS-prototype3 базувався на ідеях і конструкції системи радіаційного моніторингу для Run1-2, тобто розміри сенсорів були $11 \times 7.5 \text{ см}^2$, мали 5 мм зазор між HV та сенсором, але замість 7х сенсорів було вирішено зробити 2 сенсори на одній стеклотекстолітній платі (рис. С1). Результати тестування цього прототипу показували високу зашумленість відгуку прототипу, а також велику чутливість до зовнішніх вібрацій та струмів наведення. Прототип 3 надихнув на ідею створення модуля RMS-R3, в якому міститься 2 сенсори.

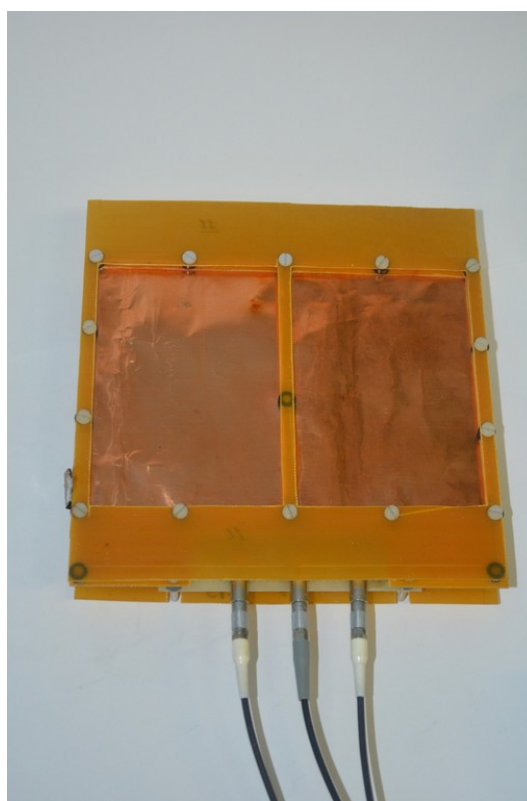


Рис. С1. Вигляд RMS-prototype3 з двома сенсорами розмірами $11 \times 7.5 \text{ см}^2$ і зазором 5 мм між шарами фольг

Наступний прототип RMS-prototype4 (рис. С2) в основі ніс ідею використання матеріалу лавсан, котрий слугував для збільшення опору між фольгами HV/сенсора та сенсора та текстоліту і запобігав перетокам струмів. Окрім того був зменшений зазор між HV та сенсором до 1 мм, розмір сенсора змінений до 9x9 см².



Рис. С2. Вигляд RMS-prototype4 з сенсорами 9x9 см² та використанням лавсану та зазором 1 мм між шарами фольг

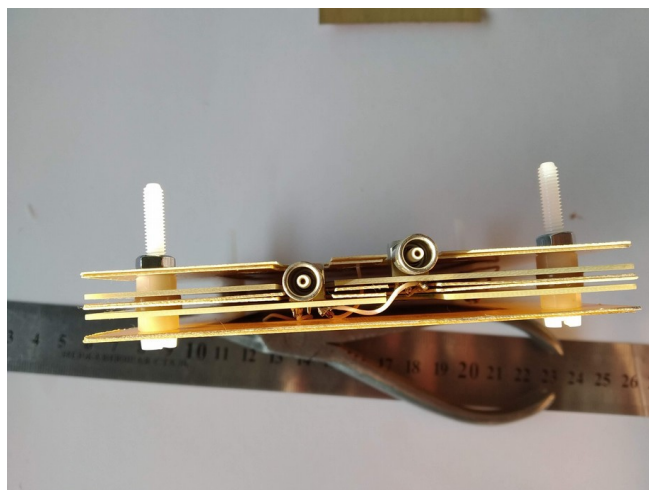


Рис. С3. Вигляд RMS-prototype5 з сенсорами 9x9 см² та використанням лавсану та зазором 2.5 мм між шарами фольг

RMS-prototype5 (рис. С3) був удосконаленою версією RMS-prototype4, в якій був збільшений зазор між HV та сенсором до 2.5 мм та використанням лавсану для фольг сенсора на обох HV.

Покращена версія двох попередніх прототипів - RMS-prototype6 (рис. С4) головною ціллю ставила зведення до 0 всіх струмів наводок. Для цього зазор між HV та сенсором був зроблений 2.5 мм. Площини HV та сенсора посаджені на різні болти та з'єднуються на площі екрану. LEMO-роз'єми посаджені на площини HV та сенсору для HV та сенсору відповідно. В площах HV та сенсору зроблені guard ring'и, підключені до землі для запобігання наводок через поверхню текстоліту.

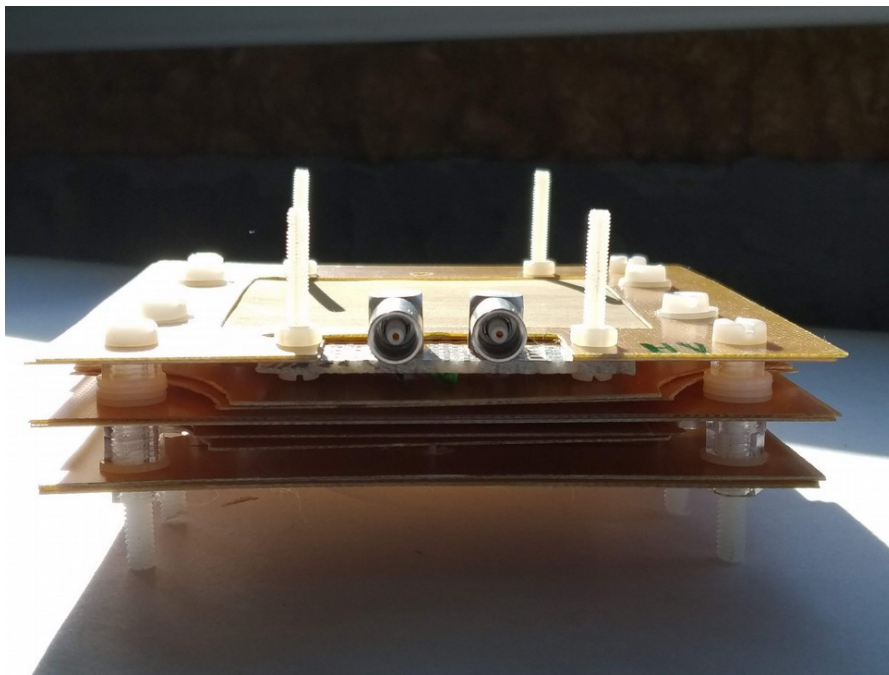


Рис. С4. Вигляд RMS-prototype6 з сенсорами 9×9 см², використанням технології guard ring, рознесенням роз'ємів та зазором 2.5 мм між шарами фольг

Ще одним прототип, що гідний згадки, є RMS-prototype7, в якому були з однієї сторони видалена екрануюча фольга, прискорювальна фольга з однієї сторони зроблена дротами з відстанню 3 - 5 мм один від одного (рис С5). Даний прототип зібраний спеціально для α -джерела.

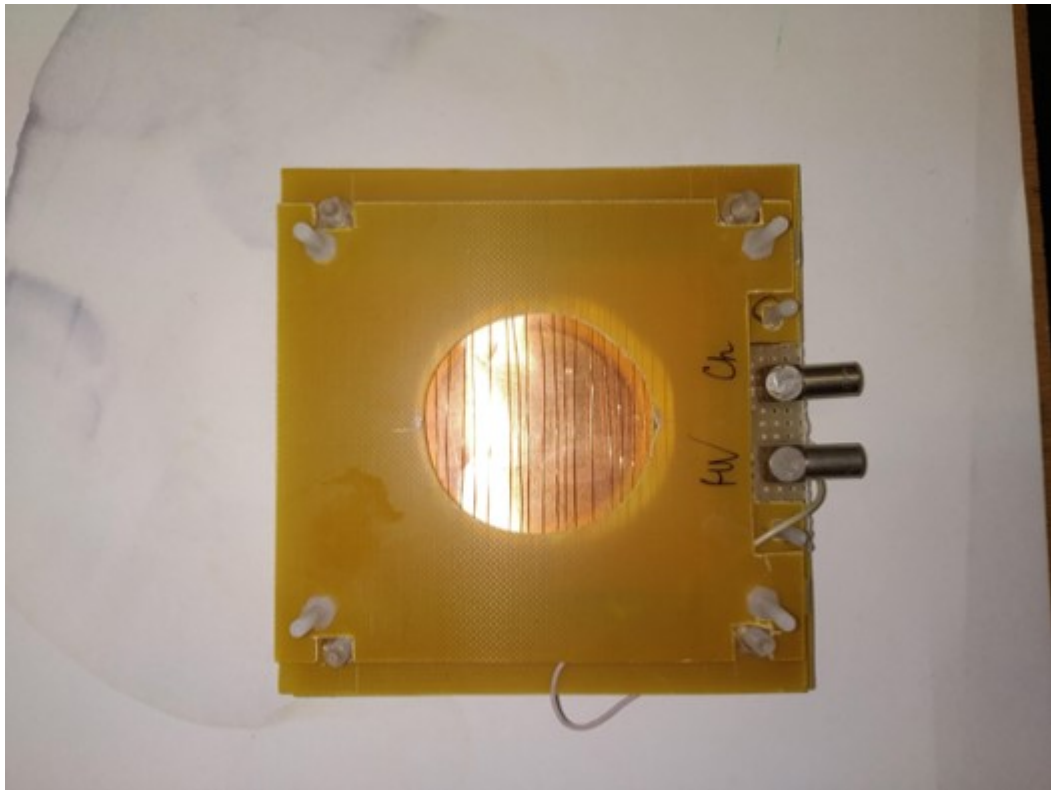


Рис. С5. Вигляд RMS-prototype7, сконструйованого для тестуванні на альфа-джерелі: відсутність однієї з екрануючих фольг, замість прискорювальної фольги – прискорювальні дроти на відстані 3-5 мм один від одного. Відстань між шарами приблизно 2.5 мм

Для тестування прототипів були залучені зарядові інтегратори і лічильник на базі плати мікроконтролеру STM32F407VGT6. Перше тестування було направлене на визначення поведінки відгуку прототипів сенсорів від напруги, що подавалась на прискорювальні фольги: напруга кожні ~ 1000 секунд збільшувалась на 10 В (рис С6). Тестування виявило, що невеликий зазор між фольгами сприяє нестабільній поведінці відгуку сенсорів. Крім того, найменші кути нахилу кривої залежності відгуку від напруги були виявлені у прототипів 5 та 6, що свідчило про їх більш стабільну роботу (рис. С7).

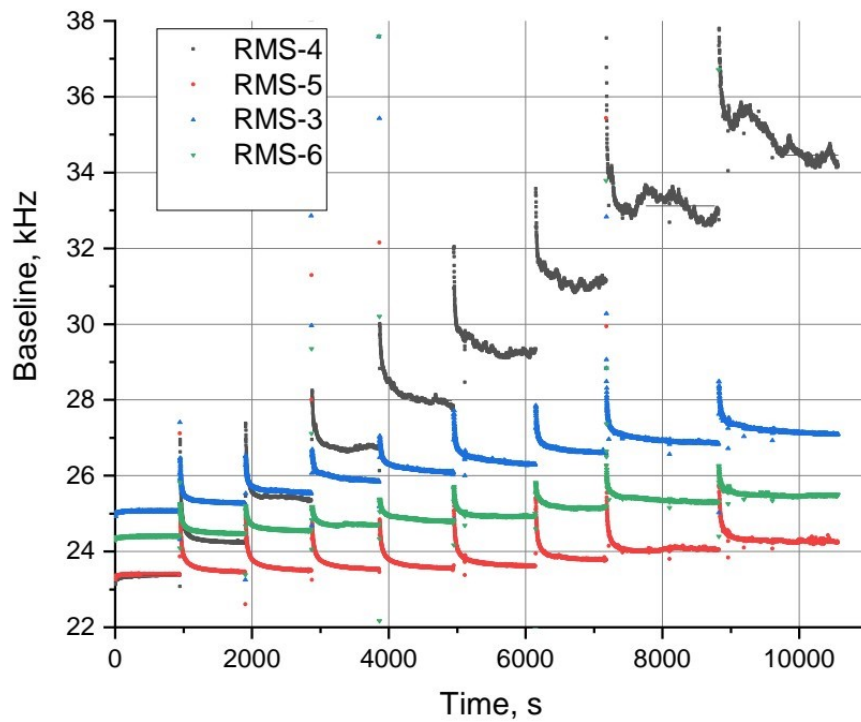


Рис. Сб. Тестування прототипів сенсорів при змінненні напруги, що подається на прискорювальні фольги. По осі X – час набору даних, по осі Y – відгук прототипів разом з базовою лінією. Чорний – прототип 4, червоний – прототип 5, синій – прототип 3, зелений – прототип 6

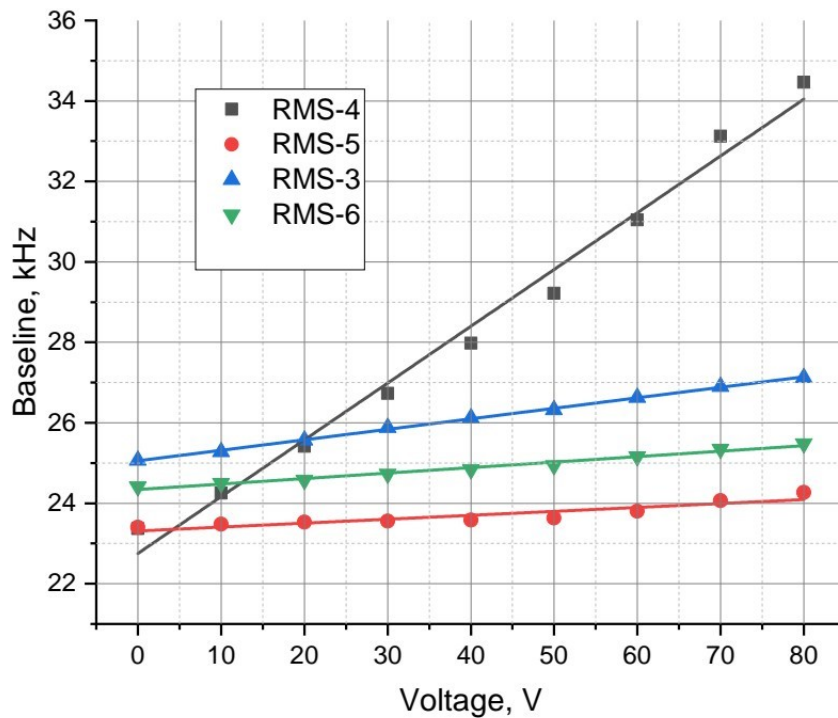


Рис. С7. Криві залежності відгуку прототипів сенсорів від напруги. По осі X – напруга, по осі Y – відгук прототипів з базовою лінією. Чорний – прототип 4, червоний – прототип 5, синій – прототип 3, зелений – прототип 6

Також інтерес складало тестування стабільності базової лінії з часом. Прототип 6 показав найбільшу стабільність до наведених струмів, шумів та зовнішніх вібрацій (рис. С8). Проекції відгуків сенсорів (рис. С9) дали наступні результати для ширини базової лінії: прототип 5 — 17 Гц, прототип 3 — 11 Гц, прототип 4 — 18 Гц, прототип 6 — 12 Гц

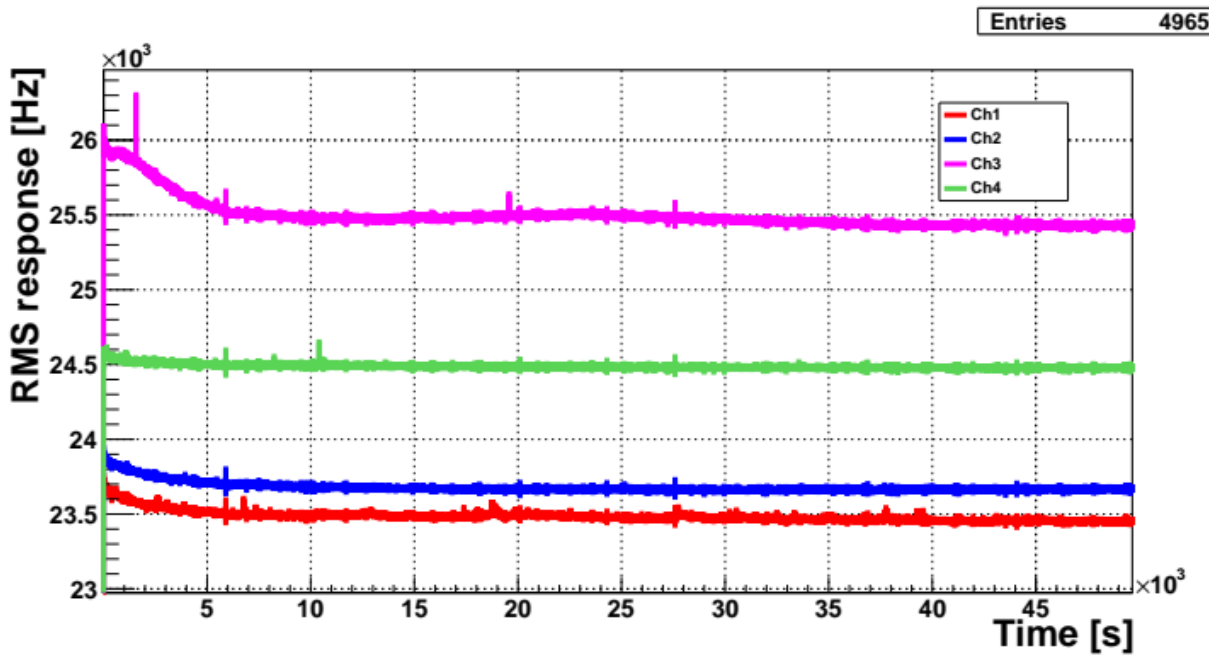
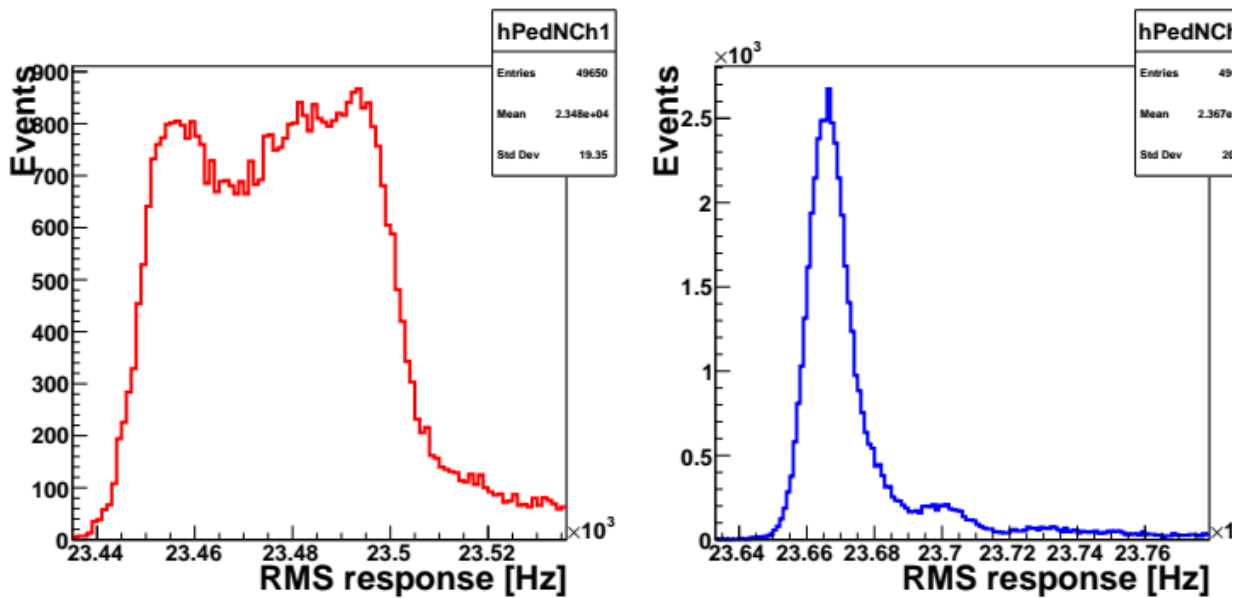


Рис. С8. Перевірка стабільності роботи прототипів RMS-R3. По осі X – час набору даних, по осі Y – відгук сенсорів з базовою лінією. Червона лінія — RMS- R3 - прототип 5, Синя — RMS- R3 прототип 3, Рожева — RMS- R3 прототип 4, Зелена — RMS- R3 прототип 6



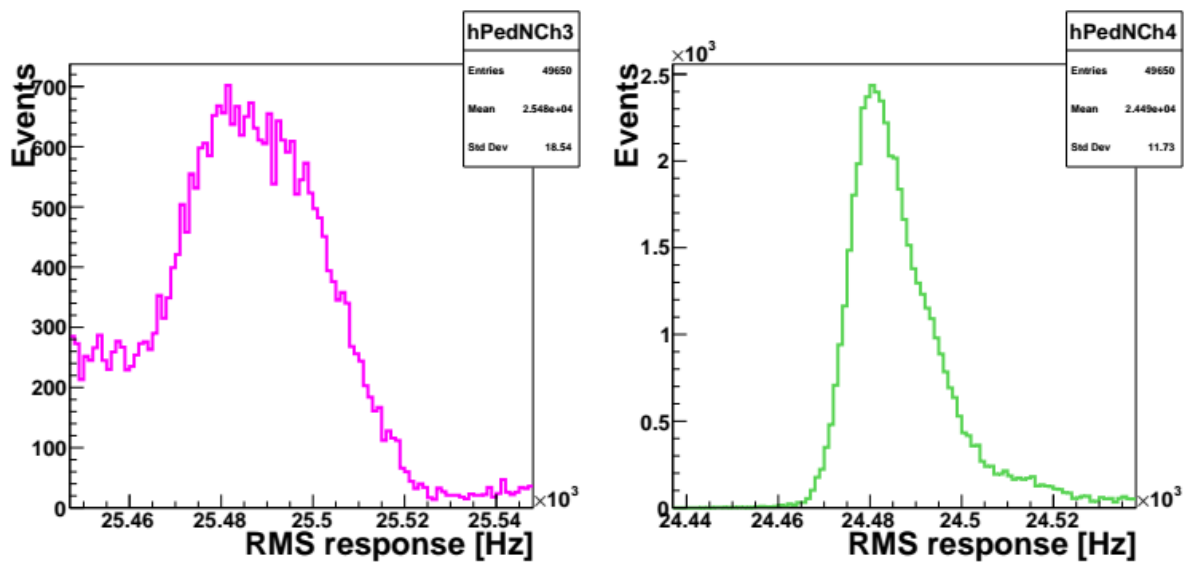


Рис. С9. Проекції відгуків прототипів разом з базовою лінією прототипів. По осі X – відгук у Гц, по Y – кількість подій відповідно до Гц. Розбіновка ROOT: 1 бін – 1 Гц Червоним — прототип 5, Синім прототип – 3, Рожевим — прототип 4, Зеленим — прототип 6

Окремо було виконане тестування прототипу 7 (рис. С10). Можна побачити велику зашумленість відгуку прототипу через відсутність екрануючої фольги та змінену прискорювальну фольгу (рис. С11). Тому для тестування на альфа-джерелі було вирішено помістити прототип у екранований бокс, в якому прототип сенсору 7 якнайменше відчував зовнішній вплив вібрацій.

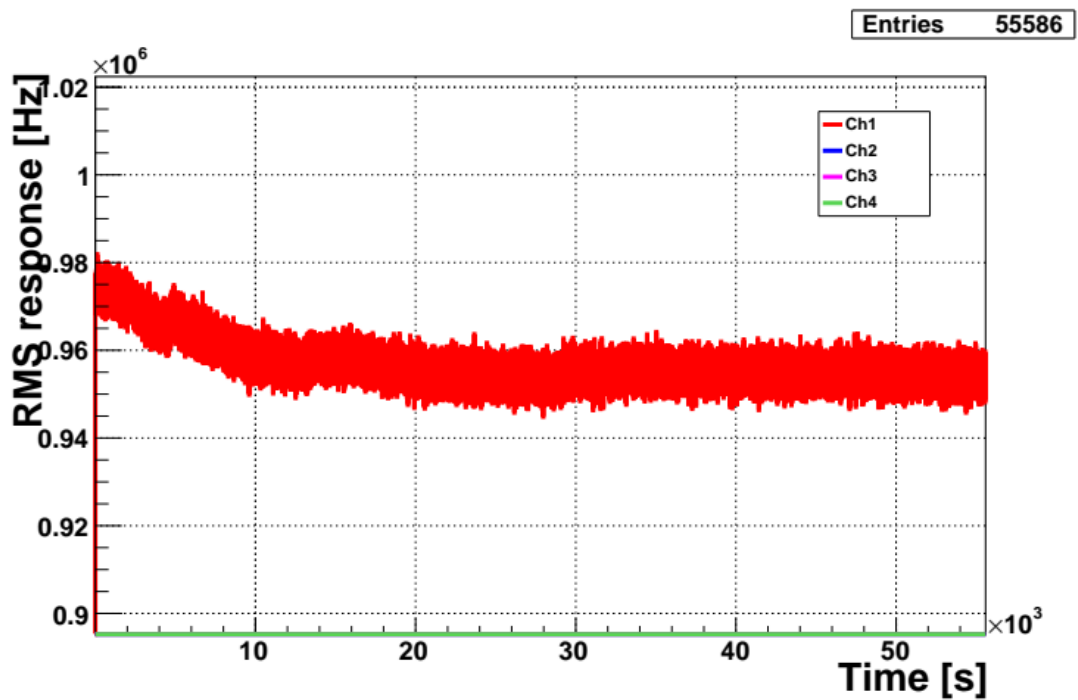


Рис. С10. Відгук прототипу RMS 7 разом з базовою лінією. По осі X – час набору даних, по Y – відгук прототипу в Гц. Спад на початку – результат релаксації сенсору після наведення напруги.

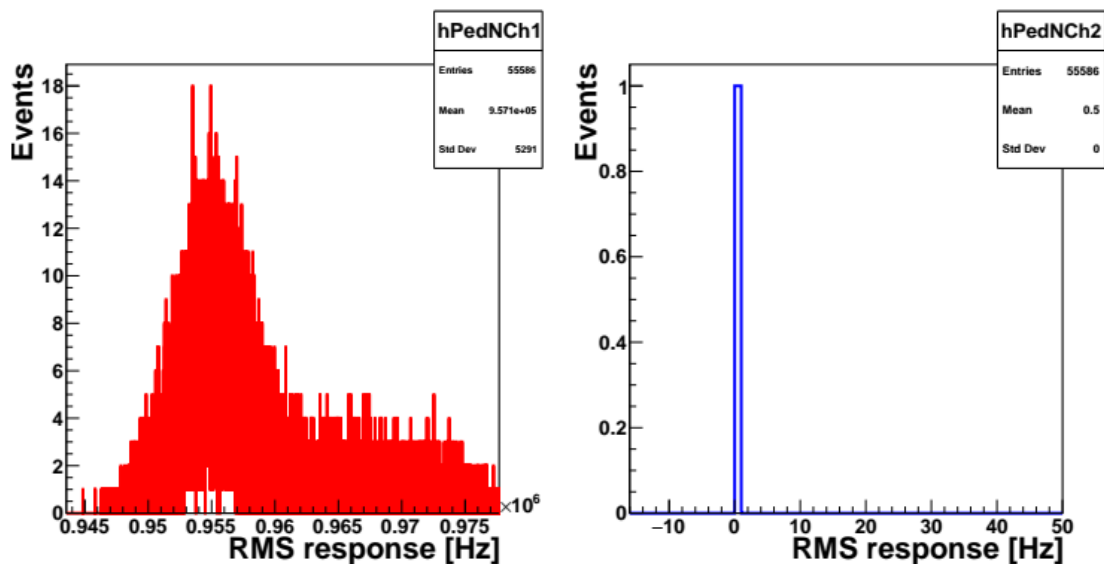


Рис. С11. Проекції відгуку прототипу 7 без базової лінії. По осі X – відгук у Гц, по Y - кількість подій, що відповідає кожному Гц, розбіновка ROOT: 1Гц – 1 бін. Красним – проекція базової лінії прототипу 7, синім – порожній канал зарядового інтегратора.

При тестуванні прототипу 7 на альфа-джерелі плутоній тестування проводилось при зміні напруги на прискорювальні фольги від 0 В до 80 В (рис. С12) шагом 10 В. Через альфа-джерело відгук системи збільшився ~ 10 разів у порівнянні з відгуками інших прототипів для базової лінії. На рис. С13 можна побачити, що при збільшенні напруги з 50 до 80 В відгук прототипу 7 росте лінійно, але не виходить на полицю.

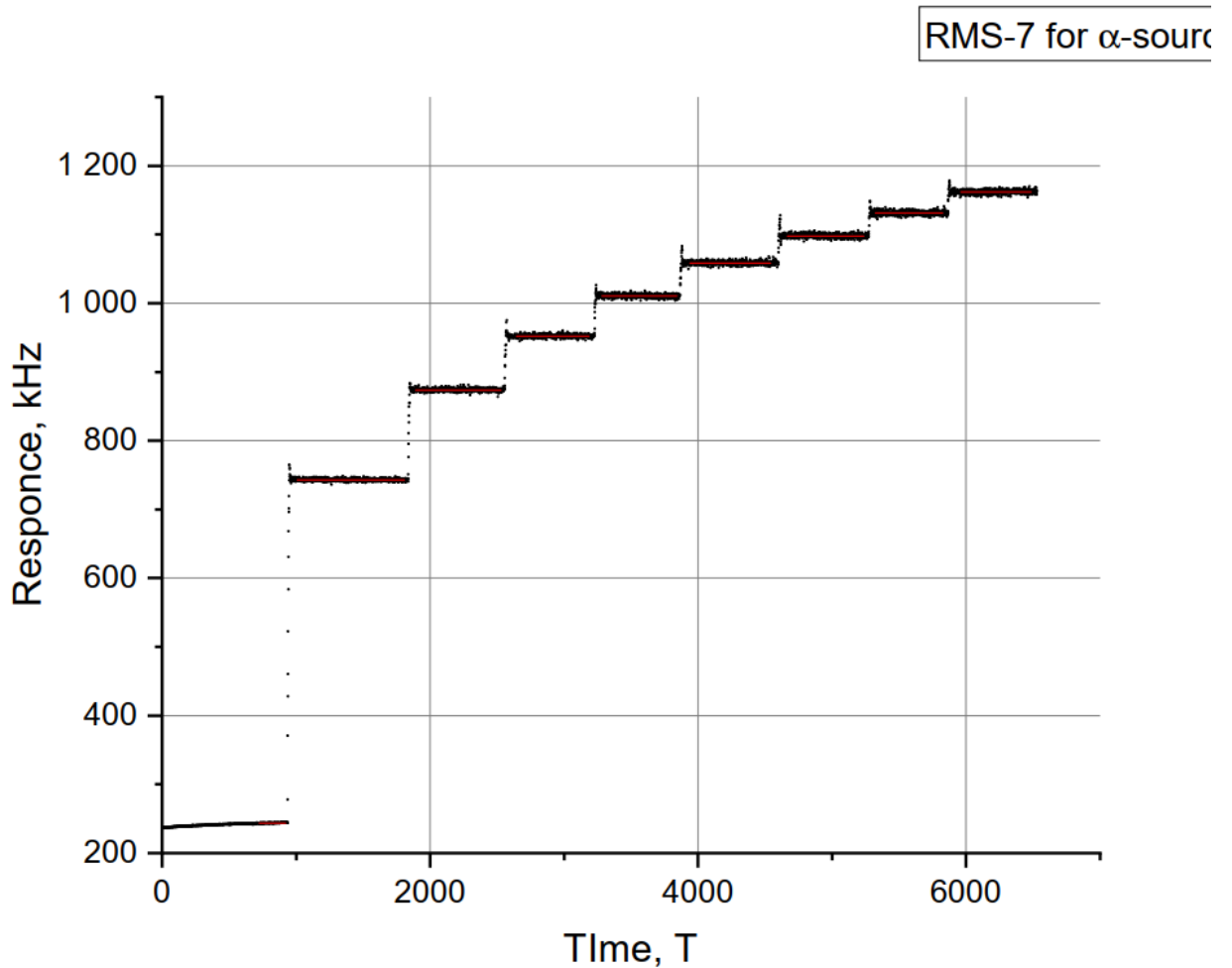


Рис. С12. Відгук прототипу сенсору 7 при тестуванні на альфа-джерелі плутонію для різних величин напруги від 0 В до 80 В з кроком по 10 В. По осі X – час набору, по Y – відгук прототипу, кожний стрибок відгуку – підвищення напруги.

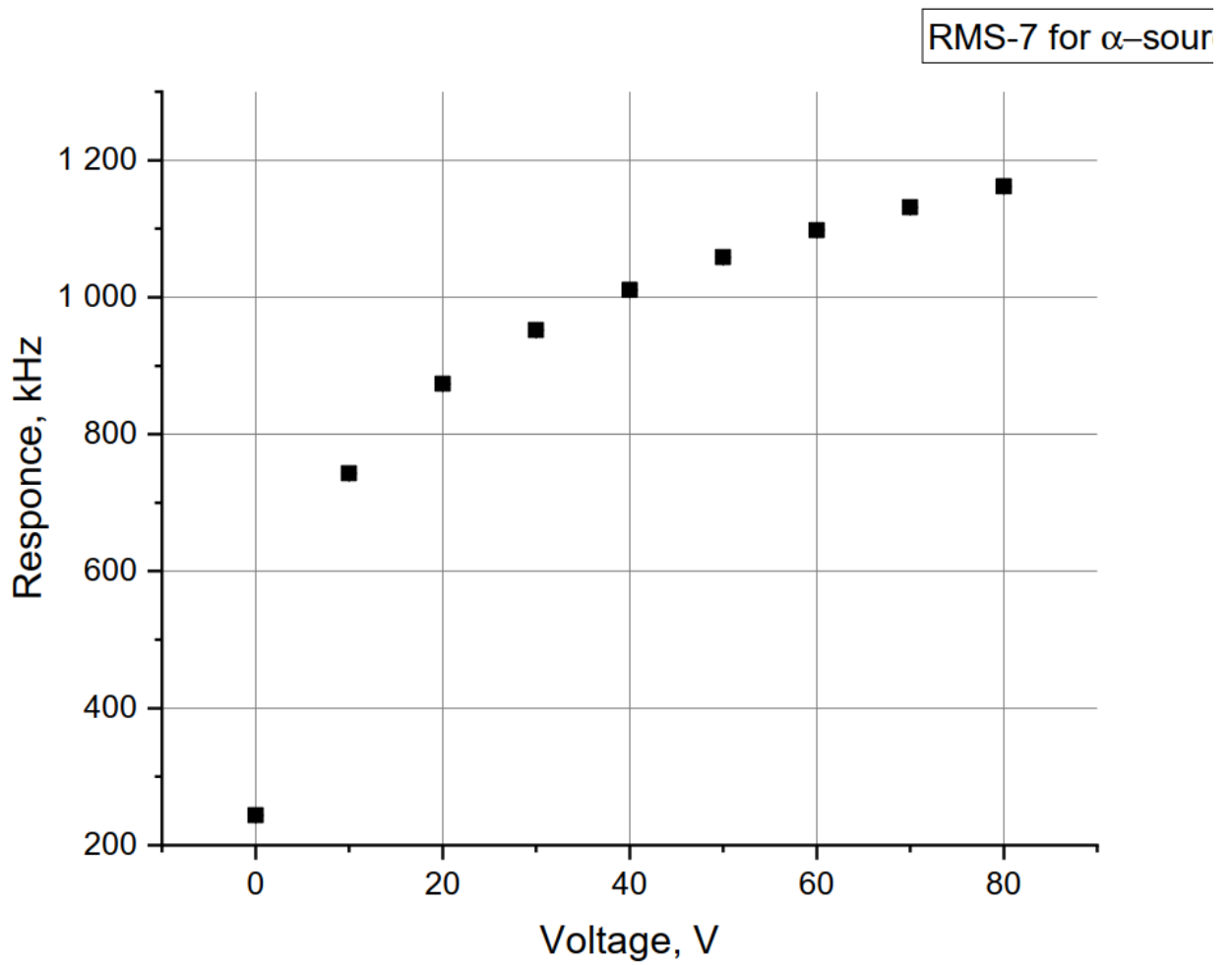


Рис. С13. Залежність відгуку від напруги для прототипу сенсору 7. По X – напруга у В, по Y – відгук прототипу 7.

Виготовлення прототипів модулів і тестування їх характеристик

Усі нароби та досягнення в попереднього параграфу були використані для розбудови першого прототипу модуля RMS-R3 (рис. D1). Основні особливості конструкції прототипу модуля: зазор між HV та сенсором - 2.5 мм, площини HV та сенсора посаджені на різні болти та з'єднувались на площі екрану, LEMO-роз'єми були посаджені на площини HV та сенсору для HV та сенсору відповідно, розміри сенсорів складали 9×9 см², 2 сенсори на модуль. В площах HV та сенсору зроблені guard ring'и, підключені до землі для запобігання наводок через поверхню склотекстоліту. Для виводу використовувались коаксіальні кабелі 50 Ом, типу C-50-30-1 (мідь, поліетилен, мідь з оловом, Al-PETP-Al, полііолефін, SCEM code 04.61.11.225.6) та LIMO конектори.

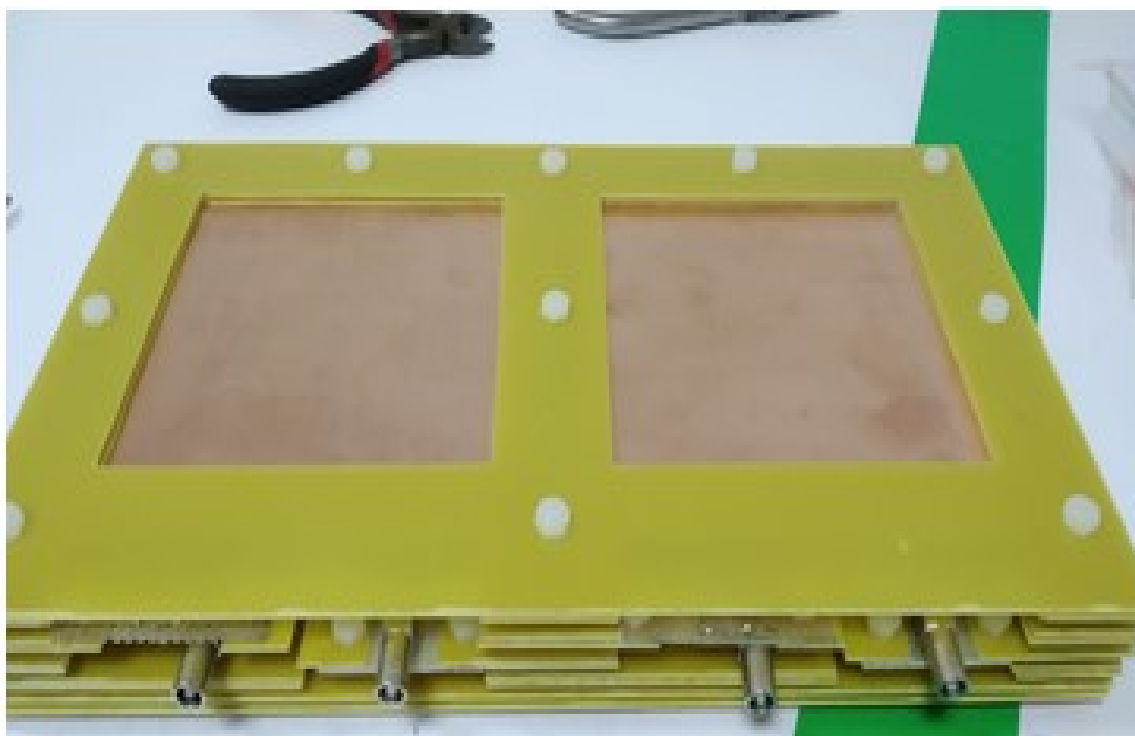


Рис. D1 Вигляд прототипу модуля RMS-R3, що складається з двох сенсорів, відстань між площинами модуля 2.5 см, розмір сенсорів 9×9 см².

На рисунку D2 зображено прототип RMS-R3: HV-RC фільтр для фільтрації частот до 1Гц з опором у 1 МОм та двома конденсаторами 1 мкф та

10 пф для попередження високочастотних наведень. Дані з прототипу модуля йдуть до зарядового інтегратора, а після інтегрування оцифровуються з-за допомогою лічильника (STM32F4-Discovery), після чого виводяться на персональний комп'ютер. Система живиться з зовнішнього джерела 24 В.

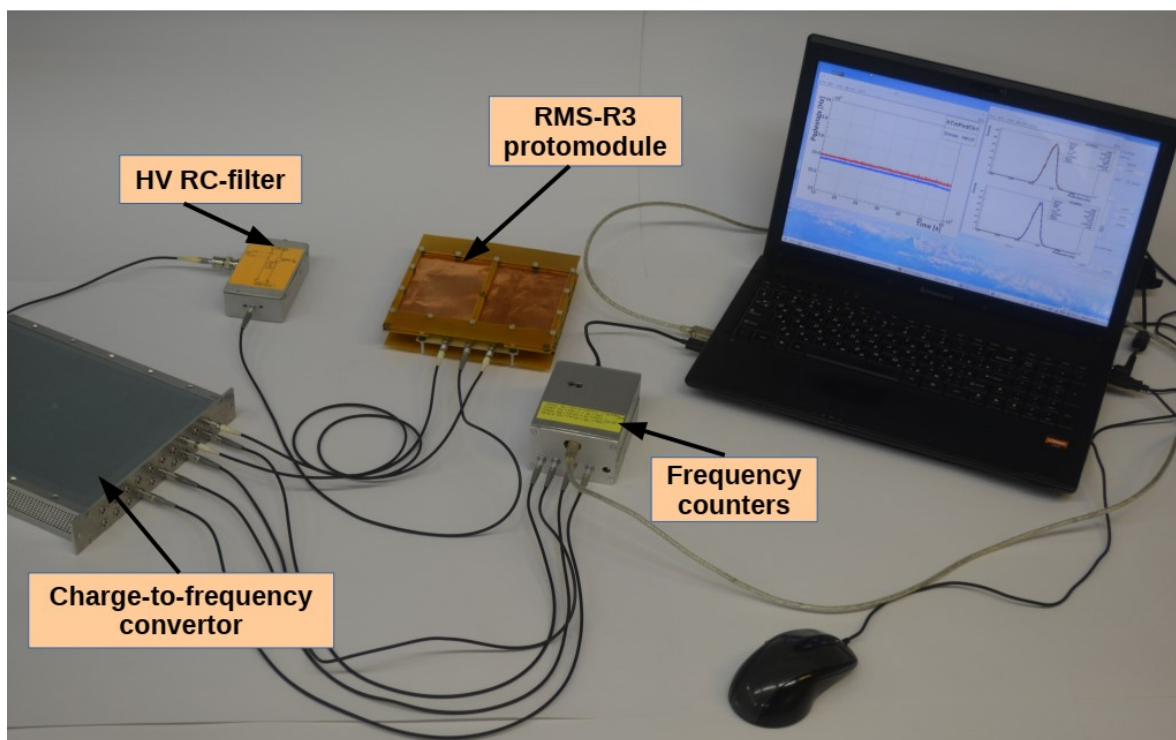


Рис. D2 Базова схема підключення прототипу RMS-R3 до ноутбука або ПК для подальшого тестування роботи модуля та інтегратора.

Як і для прототипів сенсорів, так і для прототипу модуля RMS-R3 була проміряна вольт-амперна характеристика. На рис. D3 можна побачити майже лінійну залежність зростання базової лінії від збільшення напруги на прискорювальні фольги. Напруга збільшувалась шагом 5 В від 0 до 80 В.

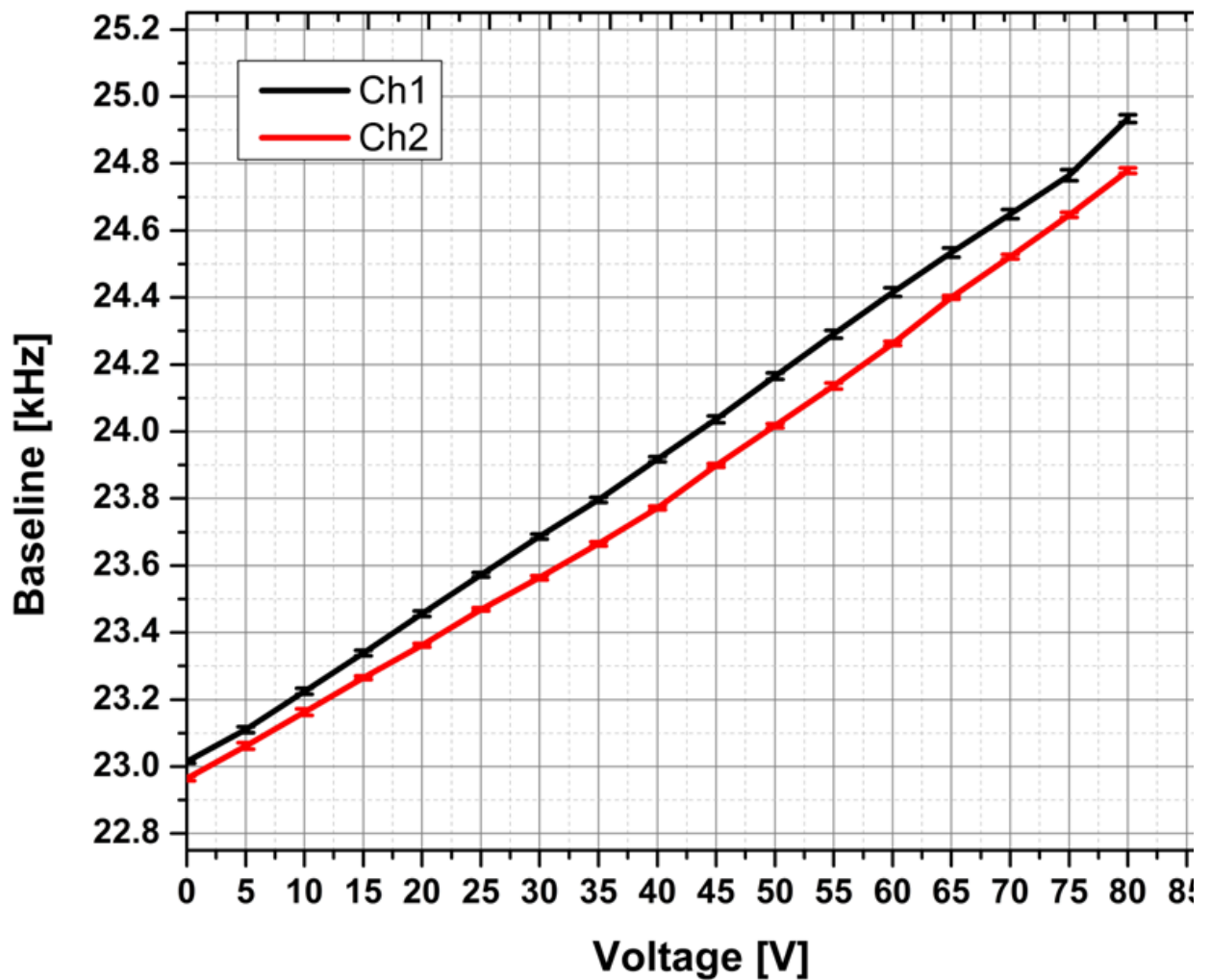


Рис. D3 Залежність відгуку від напруги для прискорювальних фольг прототипу модулю RMS-R3. По осі X – напруга, що подається на прискорювальні фольги, по Y – відгук сенсорів разом з базовою лінією.

Було виготовлено 2 прототипи модулів. Контрольний набір даних проводився протягом 70000 секунд (рис. D4), після чого з-за допомогою метода Гауса було визначено середнє відхилення на проекціях базових ліній (рис. D5).

ПШПВ проекцій базової лінії:

- RMS-модуль p1 Ch1— 3.8 Гц
- RMS-модуль p1 Ch2 — 7 Гц
- RMS-модуль p2 Ch1 — 5.7 Гц
- RMS-модуль p2 Ch2— 3.6 Гц

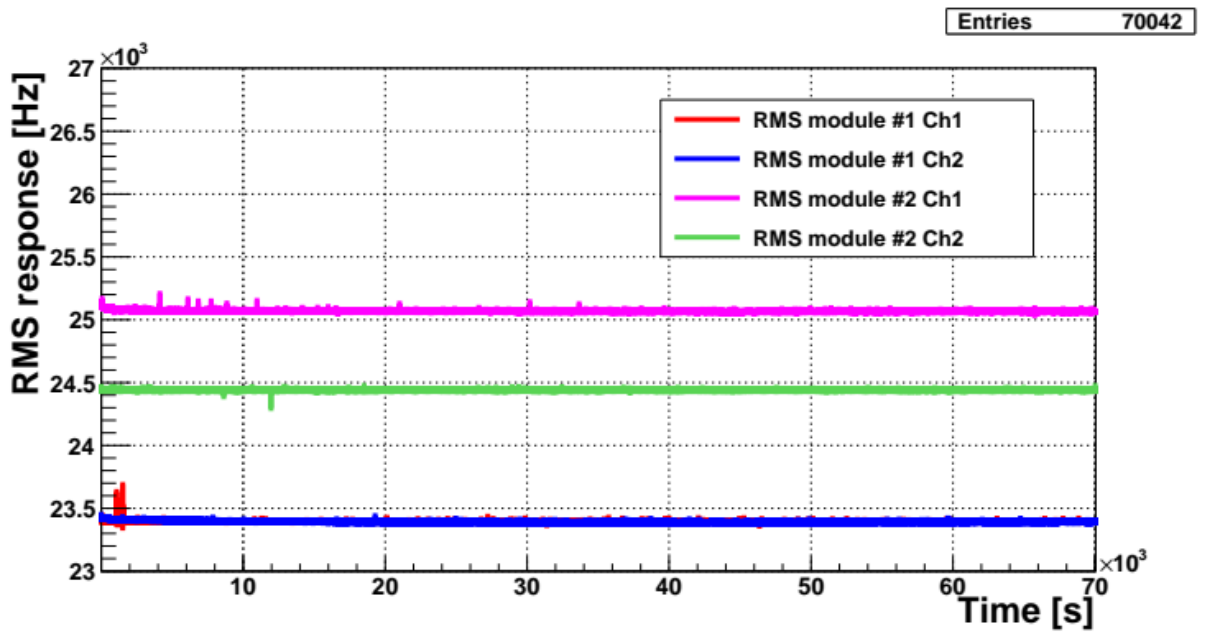
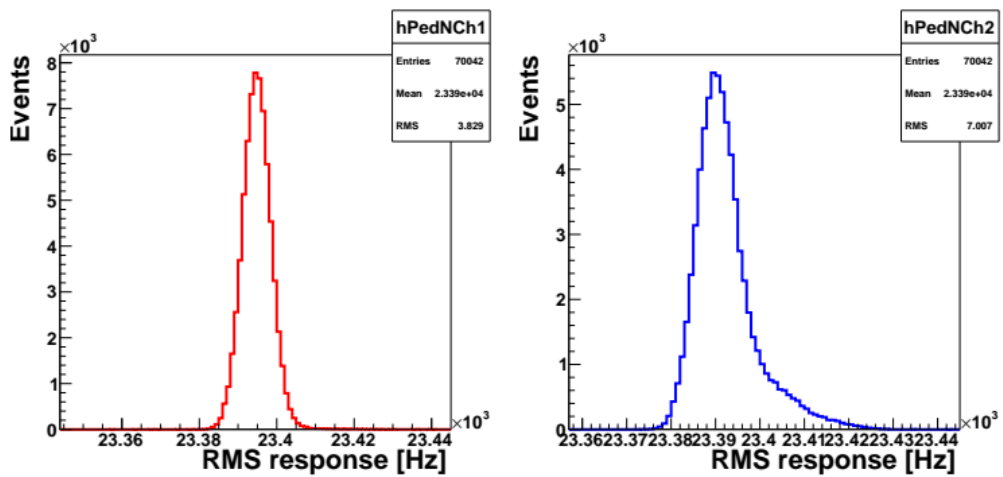


Рис. D4. Відгуки двох прототипів модулів RMS-R3 разом з базовою лінією. По осі X – час набору даних, по осі Y – відгук прототипів модулів на калібрувальний струм (базова лінія). Красна та синя лінії – 1й та 2й сенсор першого модуля, рожева та зелена лінії – 1й та 2й сенсор другого модуля



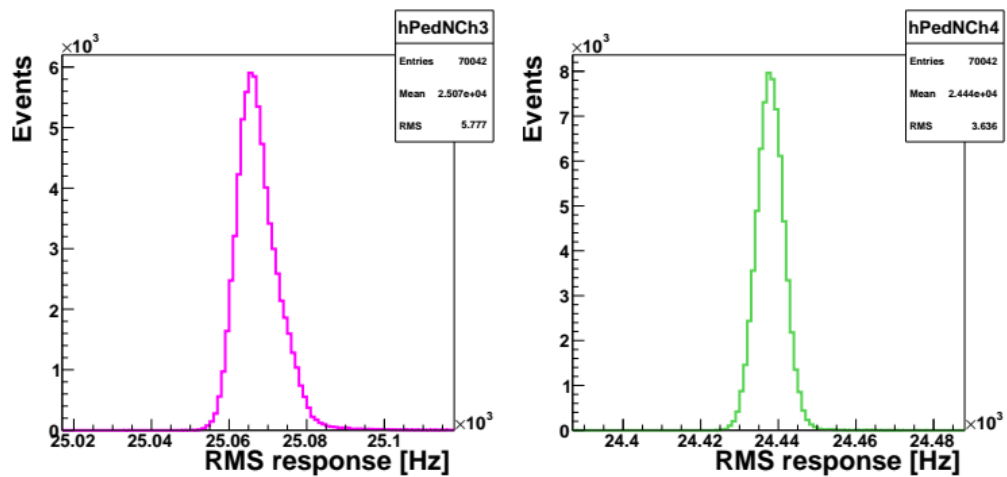


Рис. D5. Проекції відгуків прототипів модулів RMS-R3. Червоним та синім – відгук 1го та 2го сенсорів прототипу модуля №1, рожева та зелена – відгук 1го та 2го сенсорів прототипу модуля №2. По осі X – відгук, по Y – кількість подій, розбіновка ROOT: 1 бін – 1 Гц

Останнім тестом стало вимірювання залежностей відгуку прототипів модулів при використанні β -джерела Sr-90 (Y-90), 2.7 мКі або 108 Бк. Джерело знаходилось над центром першого сенсора. Після вирахування базовою лінії (рис. D6.) отримано наступний результат: при напрузі менше 4 В відгук інвертується і стає від’ємним, після 19 В відгук виходить на полицку. Середнє значення відгуку першого сенсора прототипу модуля $14 \text{ кГц} \pm 5 \text{ Гц}$, середнє значення відгуку другого сенсору прототипу модуля $9 \text{ кГц} \pm 5 \text{ Гц}$.

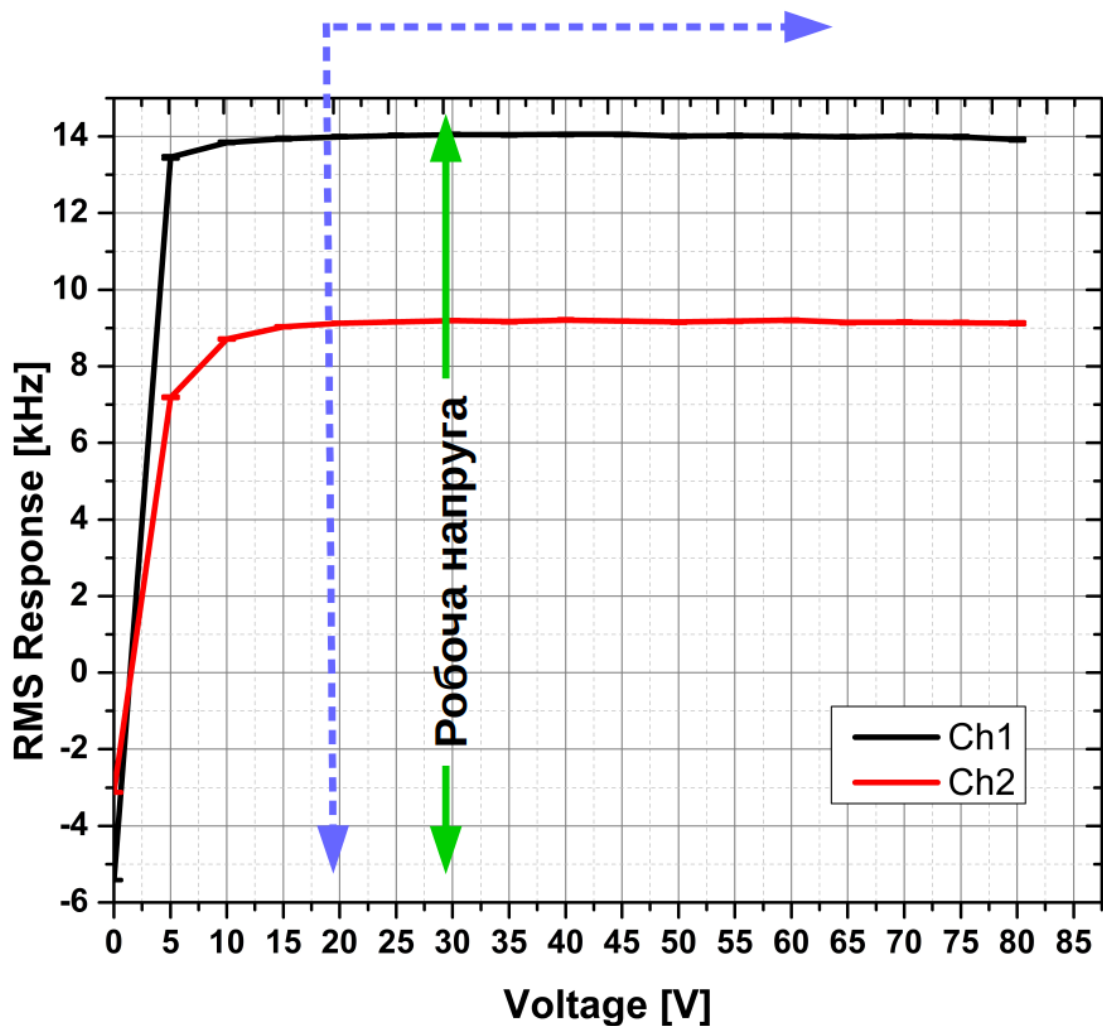


Рис. Д6. Залежність відгуку без базової лінії для прототипу модуля при вимірюваннях на бета-джерелі Sr-90 (Y-90) в залежності від напруги прискорювальних фольг. По осі X - напруга, що подається на прискорювальні фольги сенсорів прототипу модуля RMS-R3, у В. По осі Y – відгук сенсорів прототипу модуля RMS-R3. Чорна лінія – 1й сенсор прототипу модуля RMS-R3, червона – 2й. В межах 20-30 В відгук прототипу вийшов на полицку

Отримані дані свідчили про стабільність роботи прототипі модулів і прецензійну точність 3-10 Гц по відношенню до базової лінії 22-25 кГц. Подальшим шагом стала розробка фінальної конструкції модулів RMS-R3 та зчитувальної електроніки.

Розробка фінальної конструкції RMS-R3. Лінійність сенсорів

RMS-R3 складається з двох функціональних частин: детекторних модулів і системи зчитування (рис. E1). Першопочатковий задум був наступним: чотири модулі RMS-R3 розташовуються навколо іонопроводу на відстані по осі X та Y більше ніж 20 см, по осі Z на відстані від 2 м до 2.5 м. Необхідна інфраструктура включає кабелі що представлені вітою парою 2 x 0.22 мм довжиною 5м, живленням 24 В для зарядових інтеграторів та прискорювальних фольг модулів і 5 В для лічильника, зарядовими інтеграторами, лічильником STM32F4-Discovery та механічними опорами. Блок живлення і зчитувальна електроніка розміщені в кімнаті зчитування (Counting Room) D3 (стійка D3B06).

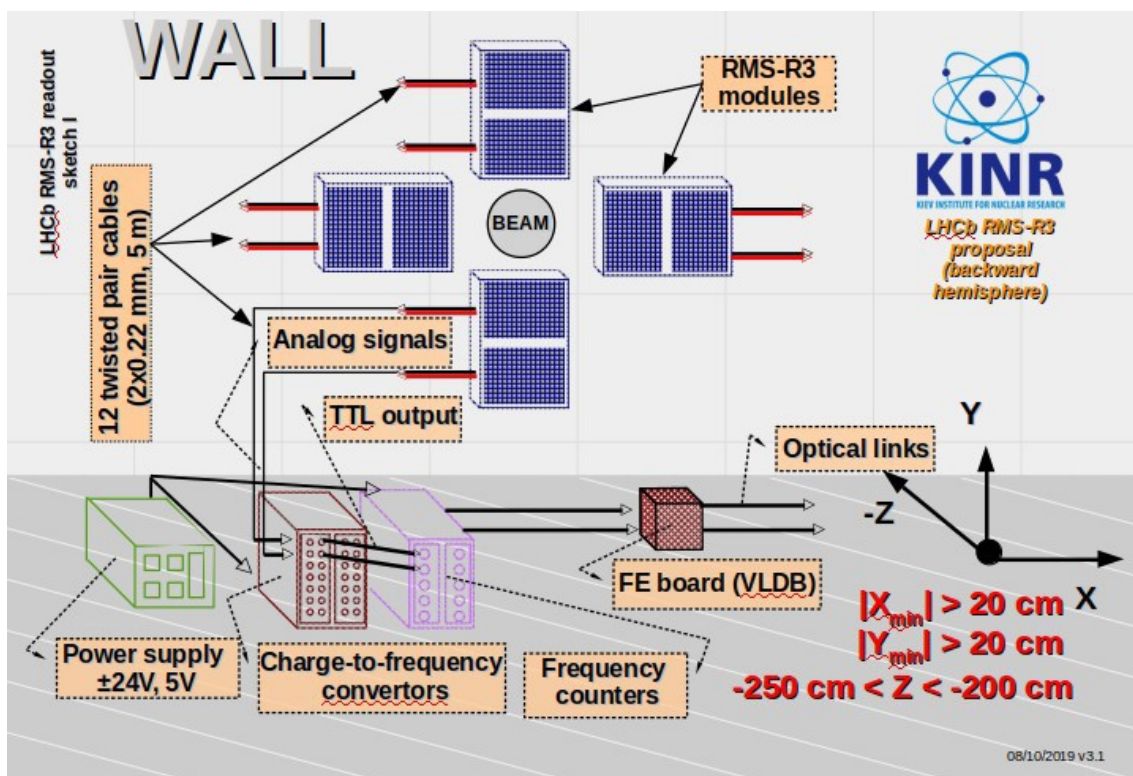


Рис. E1. Початкова схема RMS-R3 у експерименті ЛHCб, за якою планувалося встановлення системи та її використання у експерименті. Модулі RMS-R3 кріпляться на стіну, електроніка розташовується в Counting ROOM на відстані 100 м від стіни.

Оскільки RMS-R3 призначений для забезпечення онлайн-моніторингу умов пучка і фону (B&V) поблизу точки взаємодії (IP8) експерименту LHCb, модулі системи мають першорядне значення для ефективною роботи експерименту, особливо на різних етапах підготовки пучка до номінальної вирівняної миттєвої світності $2 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ у Run 3. Стає можливим відстеження стабільності просторового розташування області світіння IP8, а також просторового розподілу потоків заряджених частинок навколо пучкової труби.

Фінальна конструкція модулів RMS-R3 побудовано на схожій, але вдосконаленій концепції, яка використовувалась для побудови прототипів модулів. Розміри модуля складають 260 мм x 160 мм x 33 мм. Модульні рамки представлені друкованими платами (PCB) товщиною 1 мм, виготовленими зі склотекстоліту марки FR-4 з витравленими на них мідними контактними доріжками і площадками товщиною 36 мкм. Фінішне покриття контактних елементів виконано методом ENIG-RoHS (Ni + Au). Для елементів бортових RC-фільтрів на низькочастотних шарах розроблено спеціальні прокладки. Безпосередньо розміри чутливої зони сенсорів складають 89.027 мм x 89.027 мм, що розташовані на відстані 22.5 мм від краю модулів. Зазор між HV та сенсором - 5 мм, площини HV та сенсора посаджені на різні болти для зменшення струмів наводок. На відстані 4 мм по периметру сенсорів розташоване захисне кільце guard ring, що є заземленим і попереджує перетікання струму наводок на сенсори по поверхні склотекстолітної пластини.

Ще однією відзнакою модулів RMS-R3 (рис. E2) від прототипів модулів стало те, що RC-фільтр тепер став частиною модуля. Опір та два конденсатора паялися безпосередня на кожний модуль перед новими роз'ємами: Прямий кабельний роз'єм, тип 21_BNC-50-3-25/133_NE (мідно-берилієвий сплав, латунь, PFA/PTFE, мідь), код SCEM 09.46.11.720.0.

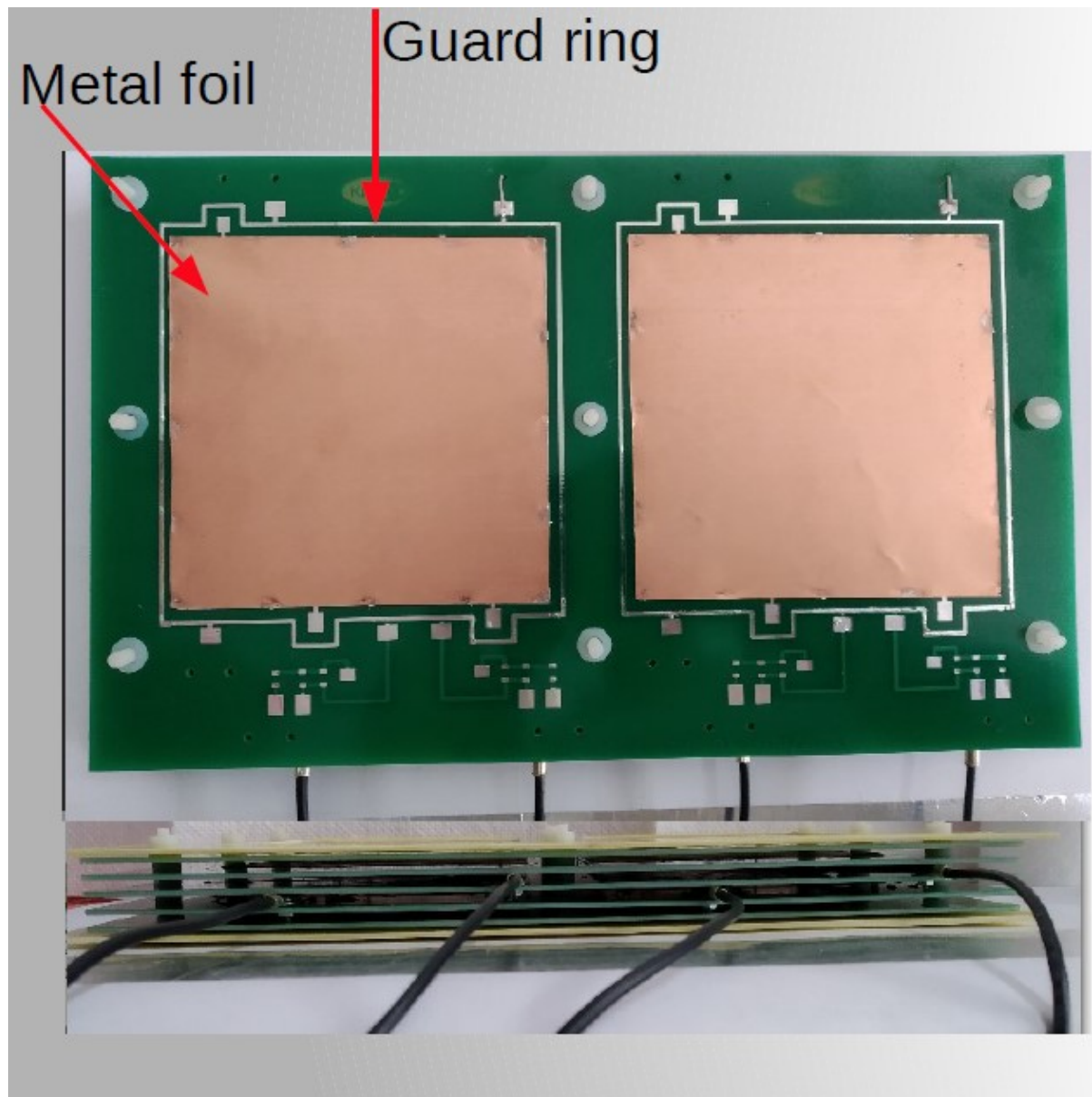


Рис. E2. Вигляд модулів RMS-R3 у реальному житті. Використані всі кращі наробки від прототипів.

Корпус модуля детектора (рис. E3) виготовлено з матеріалу G10 (склопластик, просочений епоксидно-фенольним зв'язуючим), покритого тонким алюмінієвим екраном. Зібрані модулі монтується в детекторні бокси (рис. D10), які слугують як механічним захистом, так і електромагнітним екрануванням. Встановлення модулів було виконано шляхом кріплення детекторних коробок шурупами до несучих конструкцій, що були змонтовані безпосередньо до стіни перед VELO.

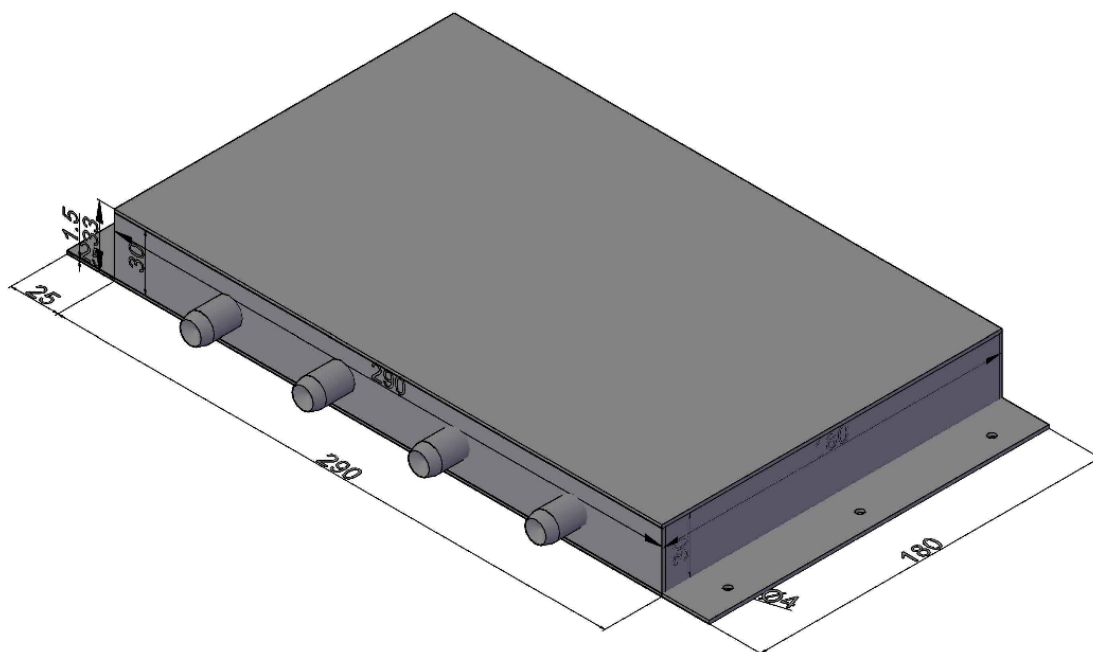


Рис. Е3. Корпус модуля детектора розмірами 180 x 340 x 33 мм³



Рис. Е4. Вигляд модуля RMS-R3 у корпусі, оберненого алюмінієвою фольгою, яка заземлюється

Остаточна схема встановлення RMS-R3 пропонується на рисунку Е5. Були змінені зв'язуючі кабелі (табл. Е1), розширений набір напруг від джерела та доданий елемент зменшення напруги від зарядових інтеграторів до лічильників.

Таблиця Е1 Перелік використаних кабелів схематично зображено на рисунку Е5 та Е6

#	Ціль	Тип	SCEM	Конектори	Qty	Стартова точка	Кінцева точка
---	------	-----	------	-----------	-----	----------------	---------------

1	Сигнальний	СК50	04.61.11.265. 8	N, BNC	8	RB84 стіна	D3B0 6
1a	Сигнальний	Соах 50 Ω		BNC, LEM O	8	D3B0 6	D3B0 6
2	LV	2×1.5 mm ²			1	RB84 стіна	D3B0 6
2a	LV			BNC	8	RB84 стіна	RB84 стіна
3	ECS	Optica 1 link			1	D3B0 6	T0A12
3a	ECS					T0A12	Дата центр

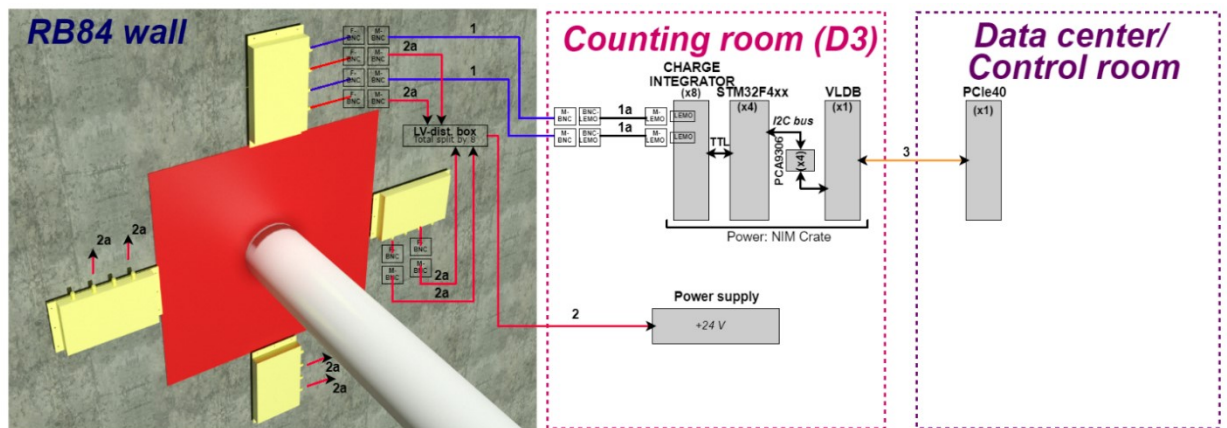


Рис. Е5. Схематичне зображення RMS-R3 у експерименті ЛНСь. Модулі RMS-R3 розташовуються на стіні, перпендикулярній до іонопроводу, та з'єднуються 100м кабелями з електронікою, що знаходиться у Counting Room, електроніка з'єднується з розрахунковим трактом ЛНСь через плату PCIe40 у кімнаті управління експериментом

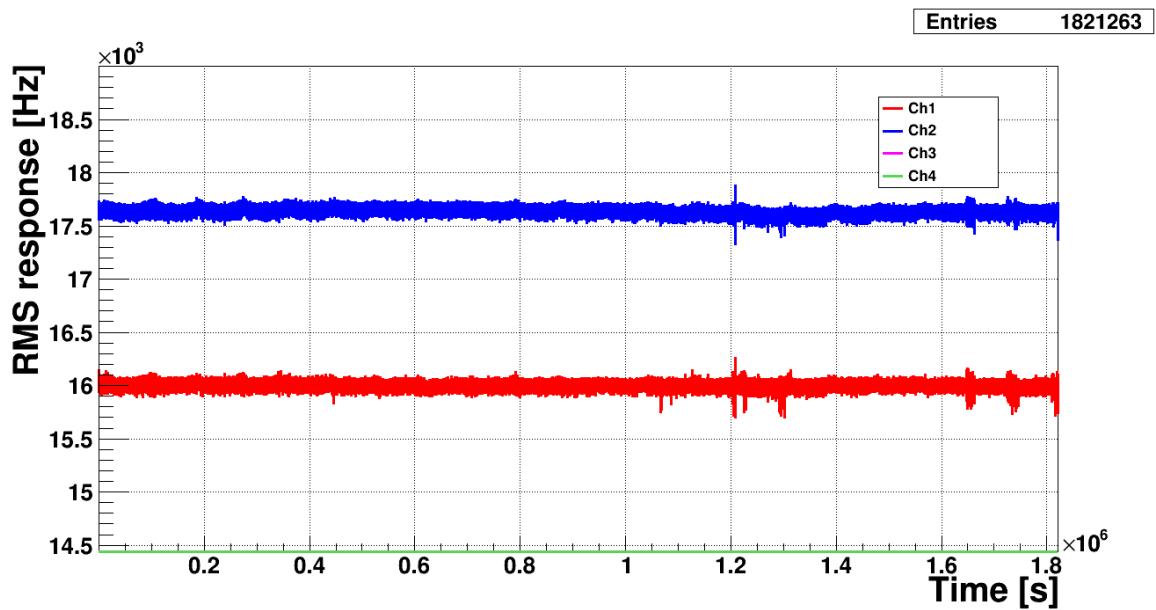


Рис. Е6. Тестування відгуку одного з модулів RMS-R3 на калібрувальний струм (базова лінія). По осі X – час набору, по Y – відгук сенсорів модуля. Червоним – відгук 1го сенсора, синім – 2го сенсора

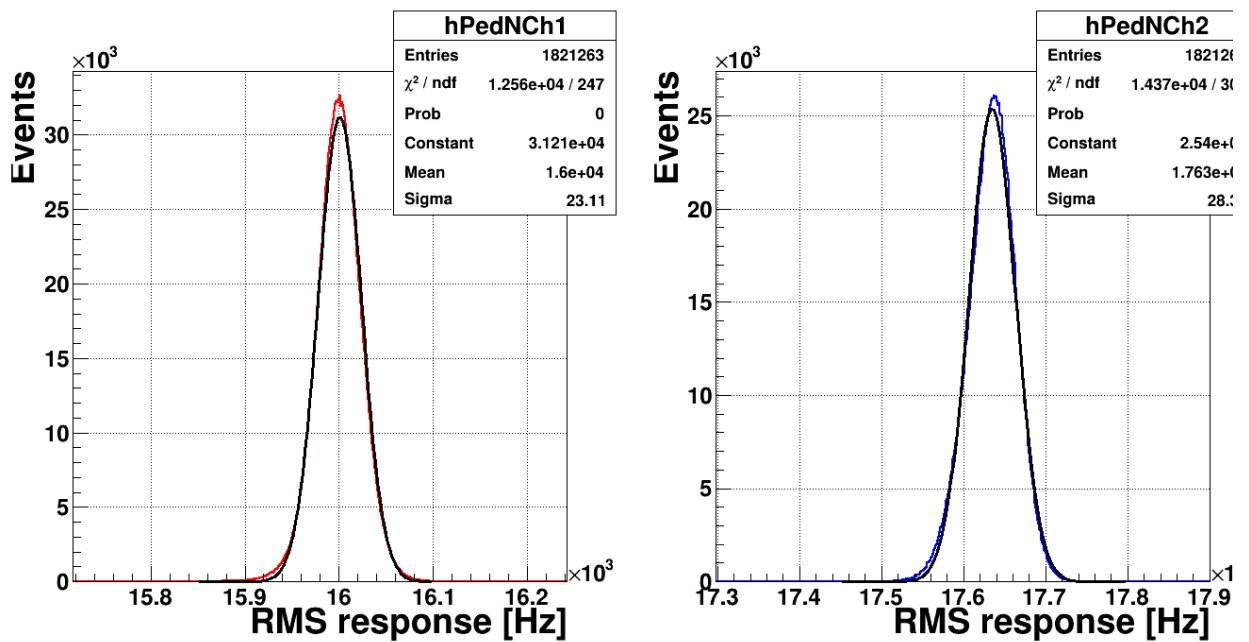
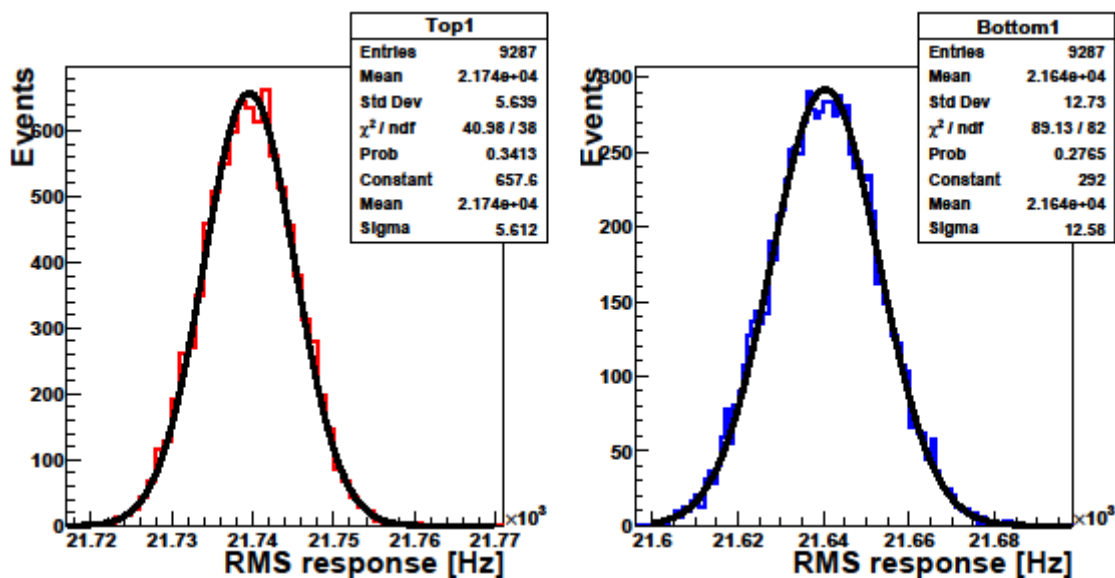


Рис. Е7. Проекція відгуку одного з модулів RMS-R3 (базової лінії). Зліва – перший сенсор, справа – другий сенсор. По осі X – відгук у Гц, по Y – кількість подій, розбіновка ROOT: 1бін – 1 Гц. Використовувалась підгонка Гаусом: середньоквадратичне відхилення для 1го сенсора 23.11 Гц, для 2го – 28.38 Гц

Безперервне тестування протягом 20 днів (рис. Е6) одного з зібраних модулів RMS-R3 дало наступні результати: стабільні Е7). Варто зазначити, проєкції базових ліній дуже точно описувались за допомогою апроксимації методом Гауса, крім того вимірювання проводились без додаткових захисних засобів з можливістю наводок.

Дослідження базової лінії були проведені (рис. Е8) у 2021 році перед офіційним стартом третього набору даних в LHC та у 2023 році після призупинення LHC та початком його роботи у 2023 році. Перевірка базової лінії ставила перед собою 2 цілі: по-перше дослідити збереження стабільності роботи модулів RMS-R3, по-друге з'ясувати чи мало місце збільшення базової лінії після 2х років радіаційних навантажень. Було виявлено, що зміни базової лінії якщо і були, то сягали значень приблизно рівних похибці. (табл. D2)



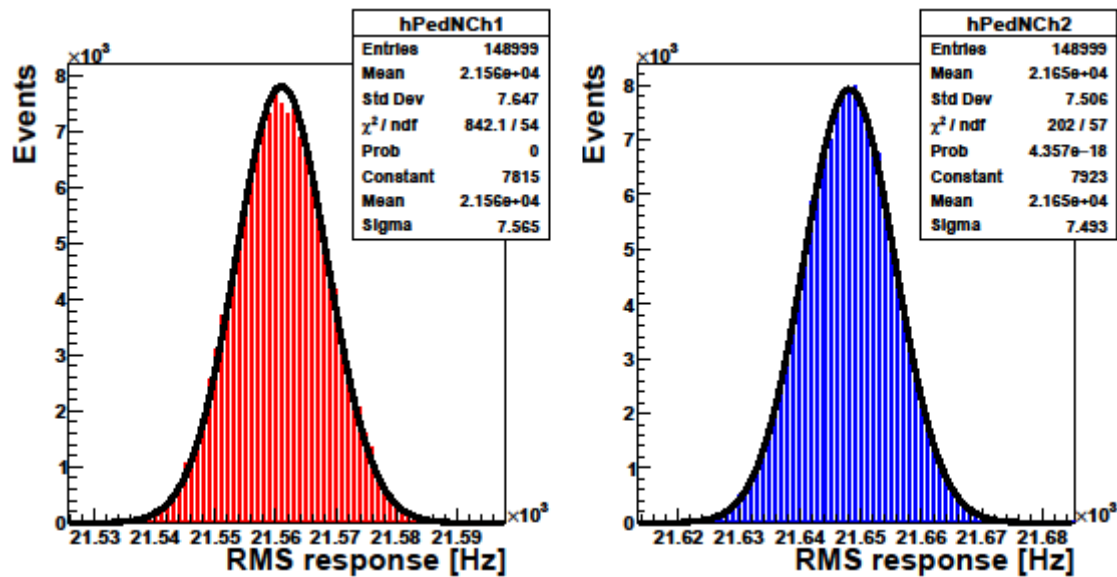


Рис. Е8 Проекції відгуків перших сенсорів різних модулів (top та bottom) RMS-R3 у 2021 році (зверху) та у 2023 році (знизу). По осі X – відгук у Гц, по Y – кількість подій, розбіновка ROOT: 1бін – 1 Гц. Використовувалась підгонка Гаусом.

Табл. Е2. Оцінка зміни базової лінії RMS-R3. Порівняння відгуків першого сенсора кожного з модулів у 2021 році та 2023 році

Модуль RMS-R3, сенсор 1	Базова лінія (2021 р.), кГц	Базова лінія (2023 р.), кГц	Зміна базової лінії, Гц
Access	21,5543 ± 0,0099	21,5611 ± 0,0076	6,8
Cryo	21,6431 ± 0,0094	21,6482 ± 0,0064	5,1
Bottom	21,4568 ± 0,0085	21,4541 ± 0,0075	7,0
Top	21,7415 ± 0,0078	21,7435 ± 0,0054	2,0