

Абсолютное значение ускорение точки M определяются по зависимости:

$$a_M = \sqrt{(z_2^*)_{\xi}^2 + (z_2^*)_{\eta}^2}.$$

Способ анализа сложного движения точки, основанный на использовании комплексных чисел, является более компактным.

Компактность достигается тем, что комплексное число z , отвечающее точке M на плоскости комплексных чисел, для рассматриваемой задачи имеет вид $z = z^* e^{i\varphi}$, где множитель $z^* = (b + i\eta)$ соответствует вектору z^* на комплексной плоскости, связанной с подвижной системой координатных осей $\xi - \eta$.

Применение комплексных чисел позволило осуществить решение задачи без применения теоремы сложения скоростей и теоремы Кориолиса.

Л и т е р а т у р а

1. Толстошеин, А. О. Применение комплексных чисел / А. О. Толстошеин // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания – 2013. – № 19. – С. 126–131.
2. Анципорович, П. П. Применение комплексных чисел в теории и машинах / П. П. Анципорович, В. К. Акулич, Е. М. Дубовская // Наука – образование, производство, экономика : материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ, 2018. – Т. 2. – С. 429.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАННЫХ ДЛЯ КОСВЕННОГО ПОИСКА Z' -БОЗОНА НА БУДУЩЕМ МЮОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

Д. В. Синегрибов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины», Республика Беларусь

Научные руководители: В. В. Андреев, И. А. Серенкова

Рассмотрена методология косвенного поиска дополнительного нейтрального калибровочного бозона (Z') на проектируемом мюонном коллайдере (МиС). Обсуждены преимущества мюонных пучков для достижения многоТэВных энергий и «чистоты» эксперимента. Основное внимание уделено роли статистического моделирования данных в условиях отсутствия прямого сигнала «новой» физики.

Ключевые слова: Z' -бозон, мюонный коллайдер, «новая» физика, статистическое моделирование, косвенные поиски.

Несмотря на успех Стандартной модели (СМ), такие проблемы, как барионная асимметрия Вселенной, природа темной материи и другие, указывают на существование физики за ее пределами. Одним из наиболее ожидаемых проявлений «новой» физики является дополнительный нейтральный калибровочный Z' -бозон, возникающий во многих моделях с расширенной калибровочной группой (например, E_6 , лево-право-симметричные модели LR и ALR, Little Higgs модели LH, USLH, AFSLH и др.) [1]. В целом современная феноменология указывает на много-ТэВную область допустимых масс Z' -бозона. Наиболее жесткие ограничения на массу Z' -бозона в настоящее время получены в прямых поисках на LHC и составляют 3–5 ТэВ в зави-

симости от модели. Кроме того, отсутствие в последние годы убедительных указаний на «новую» физику в прямых поисках на LHC повысило необходимость косвенной проверки расширений СМ, основанной на прецизионных измерениях при энергиях порядка ТэВ.

Будущий мюонный коллайдер (MuC [2]) представляет собой уникальную установку, сочетающую преимущества электрон-позитронных и адронных коллайдеров. Благодаря большой массе мюона потери на синхротронное излучение подавлены 10^9 раз по сравнению с электронами, что позволяет ускорять частицы до энергий 3–10 ТэВ в компактной кольцевой конфигурации коллайдера [3]. При таких энергиях MuC – идеальный инструмент для косвенного поиска Z' -бозона: даже если энергия столкновения s значительно меньше массы Z' , присутствие последнего проявляется через виртуальный обмен и интерференцию с фотоном и Z -бозоном СМ.

Роль и задачи статистического моделирования. В условиях, когда прямое рождение новой частицы недоступно, ее вклад проявляется не в виде резонансного пика, а через малые отклонения наблюдаемых процесса от предсказаний СМ, остающиеся в пределах ожидаемых неопределенностей. В настоящей работе для этого используется линейная параметризация отклонений сечения через эффективные параметры ΔQ_i , которые аккумулируют вклады от «новой» физики в угловых бинах [4].

Хотя для предварительных оценок чувствительности часто используется аналитический Asimov-сценарий (предполагающий идеальное согласие будущих данных со СМ), статистическое моделирование методом псевдоэкспериментов (Toy Monte Carlo [5]) – необходимо по ряду фундаментальных соображений:

– *проверка асимптотической нормальности.* Аналитические методы опираются на предположение того, что при большой статистике распределение оценок параметров подчиняется нормальному распределению;

– *учет статистических флуктуаций.* В реальном эксперименте данные в угловых бинах подвержены пуассоновским флуктуациям. Моделирование ансамбля из необходимого числа реализаций («псевдоэкспериментов» или «псевдоданных») позволяет построить реалистичное распределение функции χ^2 и корректно определить доверительные границы (например, 95 % C.L.). Это критически важно для минимизации вероятности ложноположительного обнаружения;

– *моделирования систематических неопределенностей.* В отличие от теоретических уравнений, статистическое моделирование позволяет заложить неопределенность светимости, степени поляризации пучков и эффективности детектирования конечных фермионов. Эти факторы порождают корреляции между угловыми бинами. Моделирование позволяет построить полную ковариационную матрицу, учитывающую перечисленные связи, что делает прогнозы и оценки параметров более точными и обоснованными;

– *оптимизация конфигурации эксперимента.* Статистическое моделирование позволяет «проиграть» различные сценарии работы коллайдера для достижения максимального выигрыша в чувствительности.

Для получения псевдоданных и их последующей обработки (фитирования параметров ΔQ_i) применяется схема многократного генерирования псевдоэкспериментов, основанная на алгоритме:

1. *Генерация полного числа событий.* На основе теоретического сечения СМ (σ^{SM}) и проектных параметров коллайдера (интегральная светимость и эффективность регистрации) вычисляется ожидаемое среднее число событий N_{total} . Далее из

распределения Пуассона генерируется K независимых реализаций полного числа событий N_k ($k = 1, \dots, K$).

2. *Биннирование данных.* Весь угловой диапазон детектора делится на n угловых интервалов, которые называются бинами. Для каждой реализации N_k события распределяются по бинам согласно мультиномиальному распределению с вероятностями $p_i = \sigma_i^{SM} / \sigma^{SM}$, где σ_i^{SM} – сечение в i -м бине. В результате формируется ансамбль из K гистограмм «псевдоэкспериментальных» чисел событий.

3. *Построение ковариационной матрицы.* По полученному ансамблю гистограмм вычисляется усредненная гистограмма и полная ковариационная матрица V размерности $n \times n$. Без учета систематики, она диагональна, однако моделирование позволяет включить в нее корреляции между бинами, возникающие из-за неопределенностей светимости, поляризации и эффективности детектирования конечных фермионов.

Данная схема позволяет избежать упрощений, характерных для асимптотических методов. Во-первых, она наглядно демонстрирует влияние статистических флуктуаций. Во-вторых, она позволяет корректно учитывать корреляции между угловыми бинами, что важно для реалистичной оценки чувствительности MuC.

Статистическое моделирование будущих данных на MuC необходимо для подготовки физической программы коллайдера и позволяет учесть корреляцию между угловыми бинами, обусловленную неопределенностями светимости, поляризации и эффективности детектирования конечных фермионов.

Литература

1. Review of particle physics [Particle Data Group Collaboration] / S. Navas [et al.] // Phys. Rev. D. – 2024. – Vol. 110, N 3. – 030001. – URL: <https://pdg.lbl.gov> (date of access: 20.03.2026).
2. The physics case of a 3 TeV muon collider stage / de Blas Jorge and others // FERMILAB-CONF-22-317-AD-ND-PPD-SCD-TD. – 2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/2203.07261> (date of access: 21.03.2026).
3. Accelerators for Electroweak Physics and Higgs Boson Studies / Faus-Golfe A. [et. al.] – 2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/2209.05827> (date of access: 22.03.2026).
4. Sinegribov D. V., Andreev V. V., Serenkova I. A., Analysis of the indirect manifestation of extra Z' -boson at ILC and CLIC // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2025. – Vol. 22. – N 5. – P. 1111–1114.
5. Statistical Methods in Experimental Physics (2nd Edition) / W. Eadie, D. Drijard, F. James, M. Roos, B. Sadoulet // Journal of the American Statistical Association. – 2013. – P. 1–341. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/243672952> (date of access: 28.08.2025).

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОПОГРАФИИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Д. И. Зеленковский

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель О. А. Лапко

*Рассмотрено математическое моделирование операций механической обработки,
достоинства и недостатки, область применения.*

Ключевые слова: топография, обработанная поверхность, торцовое фрезерование, имитационный подход, моделирование резания.