

ЭКСПЕРИМЕНТ SHiP, ПРОБЛЕМА МНОГОМЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ МЮОННОЙ ЗАЩИТЫ

Е. О. Курбатов^{1,2,*}, *Ф. Д. Ратников*^{1,2,**}, *Э. Д. Урсов*^{3,***}

¹ Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва

² Yandex School of Data Analysis, Москва

³ Humboldt University of Berlin, Berlin

SHiP (Search for Hidden Particles) — это новый эксперимент общего назначения на кольце SPS в ЦЕРН, в задачи которого входит поиск скрытых частиц, предложенных многочисленными теориями вне Стандартной модели, потенциально объясняющими темную материю, нейтринные осцилляции, барионную асимметрию Вселенной. SHiP заявлен как эксперимент с нулевым фоном. Ключевым элементом для достижения этого является мюонная защита. С одной стороны, она должна обеспечивать хорошее подавление фона, а с другой — не быть слишком тяжелой. Представлены результаты получения конфигураций мюонной защиты с помощью байесовской оптимизации. Это позволило снизить уровень фона в 2,5 раза при сохранении массы защиты на прежнем уровне.

SHiP (Search for Hidden Particles) is a new general-purpose experiment proposed at the CERN SPS to search for “hidden” particles as predicted by a very large number of recently elaborated models of Hidden Sectors which are capable of accommodating dark matter, neutrino oscillations, and the origin of the full baryon asymmetry in the Universe. SHiP is declared as an experiment with zero background. The Muon Shield is the key element to do this. So, on the one hand, it has to provide a good background suppression, and on the other hand, not to be too heavy. We present the results of obtaining new Muon Shield shape using the Bayesian Optimization. This allowed reducing the background rate by a factor of 2.5, while keeping the weight of the shield at the same level.

PACS: 95.35.+d

ВВЕДЕНИЕ

Search for Hidden Particles (SHiP) [1] является новым экспериментом с фиксированной мишенью, который будет проводиться на Super Proton Synchrotron (SPS) в ЦЕРН. Рабочая энергия SPS — 400 ГэВ. Целью эксперимента является поиск скрытых частиц, предсказанных многочис-

* E-mail: kurbatov.phys@gmail.com

** E-mail: fedor.ratnikov@gmail.com

*** E-mail: ursovharleey@mail.ru

ленными моделями Скрытого сектора, способными описать распределение темной материи во Вселенной, нейтринные осцилляции и барионную асимметрию во Вселенной. Эксперимент направлен на поиск новой физики. Высокая чувствительность эксперимента к сигналам, связанным с частицами вне Стандартной модели (СМ), достигается благодаря высокой светимости SPS и большим потокам рождающихся очарованных мезонов и фотонов, направленных на детекторную систему за счет фиксированной мишени.

В 2022 г. новый вариант SHiP предложили укоротить на 10 м и сузить в поперечных размерах, чтобы поместить его в помещение SPS ECN3 [2], в котором в данный момент находится эксперимент NA62 [3]. Это неизбежно привело к проблеме поиска новой конфигурации мюонной защиты с целью сохранения уровня фона на приемлемом уровне.

ЭКСПЕРИМЕНТ SHiP

Стандартная модель элементарных частиц доказала свою успешность в теоретическом предсказании экспериментальных наблюдений в физике высоких энергий [4]. Однако она имеет ряд недостатков, связанных с существованием темной материи и барионной асимметрии Вселенной [5]. В связи с этим активно развиваются модели Скрытого сектора (за пределами СМ), в которых вводятся новые слабо взаимодействующие частицы, с помощью которых можно решить эти проблемы. С учетом отсутствия сигналов от новых частиц в диапазоне масс ГэВ–ТэВ многочисленные эксперименты были направлены на поиск долгоживущих слабо взаимодействующих частиц (FIPs) в масштабе ГэВ. Наилучший физический потенциал показали тяжелые нейтральные лептоны (HNL), темные фотоны (DP), темные скаляры (DS), аксиоподобные частицы (ALP), легкая темная материя (LDM) [6, 7].

Основной целью разрабатываемого в настоящее время эксперимента SHiP с фиксированной мишенью на установке SPS (энергия пучка протонов 400 ГэВ) в ЦЕРН является поиск частиц скрытого сектора [1, 8]. Для этого в SHiP будет реализована детекторная система, регистрирующая возможные продукты распада, или прямой сигнал от новых частиц.

Сама детекторная система состоит из двух подсистем: Scattering Neutrino Detector (SND) и Hidden Sector Detector, с помощью которых возможно регистрировать сигналы от скрытых частиц как через их распад на частицы СМ, так и с помощью поиска сигнала от электронов или ядер отдачи, на которых рассеялись частицы Скрытого сектора. На рис. 1 показана схема эксперимента на 2019 г. С момента выхода первых работ, в которых рассматриваются основные научные цели и оборудование эксперимента SHiP [1], эксперимент претерпел существенные изменения в детекторной системе. В докладе 2019 г. был представлен Comprehensive Design Study (CDS) [8], в котором была переработана большая часть

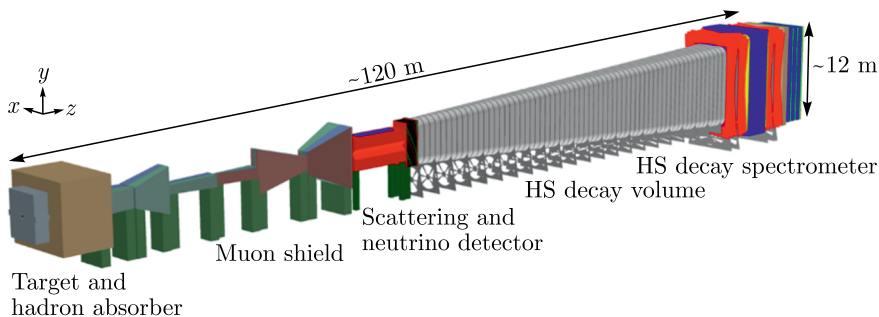


Рис. 1. Схема эксперимента SHiP. Comprehensive Design Study, 2019

детекторной системы: были изменены геометрические параметры распадного объема, убраны некоторые системы veto. Конструкция электромагнитного калориметра, изначально основанного на системе «шашлык», заменена.

BEAM DUMP FACILITY

Beam Dump Facility (BDF) объединяет в себе область выведения пучка и мишень вместе с адронным поглотителем. Ожидаемое количество столкновений налетающих протонов с мишенью за 5 лет работы $2 \cdot 10^{20}$, $4 \cdot 10^{13}$ протонов в секунду работы эксперимента. Мишень является гибридной и состоит из блоков, сделанных из сплава молибдена, легированного титаном и цирконием (58 см), за которыми идет 58 см чистого вольфрама. Выбор таких материалов обусловлен тем, что в результате столкновения пучка с мишенью рождается большое количество короткоживущих резонансов, пионов и каонов, распад которых создает огромный поток мюонов и нейтрино. Мишень должна быть сделана из материала с очень короткой длиной взаимодействия, такой, что эти адроны не успевают бы распасться и останавливались бы в ней. Общие размеры мишени составляют 1,2 м в длину с поперечными размерами 30×30 см. За мишенью идет несколько метров железа для поглощения адронов и электромагнитного излучения от столкновения пучка с мишенью.

В результате ожидаемый поток тяжелых мезонов составит $1,6 \cdot 10^{18}$ D -мезонов и $1 \cdot 10^{14}$ B -мезонов.

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРОГРАММА

Эффективное исследование пространства параметров моделей, в которых вводятся FIPs, возможно только в том случае, если фоны хорошо контролируются и снижаются до пренебрежимо малых уровней. Сигналы от FIPs, к которым чувствителен эксперимент SHiP, можно разделить на две основные категории: полностью и частично реконструированные

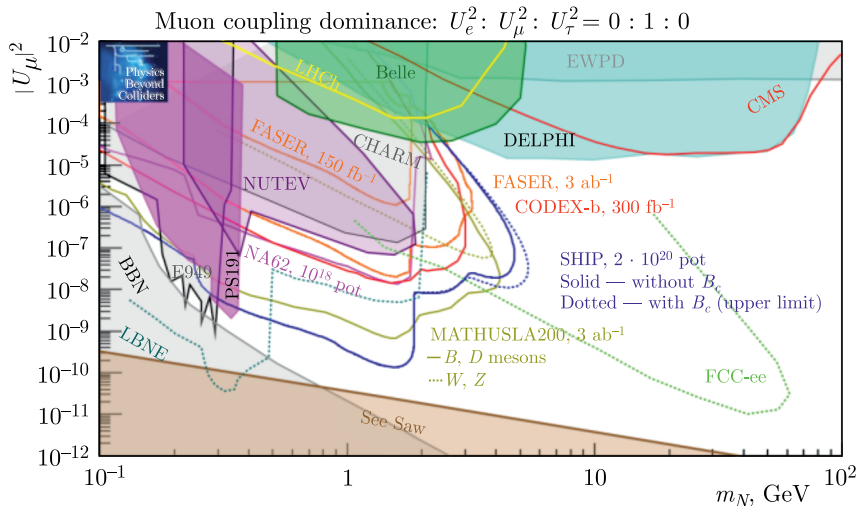


Рис. 2. Чувствительность к HNL с учетом только $|U_\mu|^2$. Залитые границы обозначают исключенные имеющимися экспериментальными данными области. Сплошные линии показывают возможные области покрытия будущих экспериментов. График построен с 90%-м уровнем достоверности согласно гипотезе о нулевом фоне экспериментов [7]

распады. Первая категория относится к распадам, при которых есть как минимум две заряженные частицы, которые могут быть зарегистрированы в детекторах (заряженные), и нет невидимых частиц (нейтрино), которые могут унести импульс. Примерами являются $DP \rightarrow \mu^\pm \mu^\mp$ и $HNL \rightarrow \mu^\pm \pi^\mp$. Последняя категория относится к распадам по крайней мере с двумя заряженными частицами и хотя бы с одной невидимой частицей в конечном состоянии, например $HNL \rightarrow \mu^\pm \mu^\mp \nu$. Во всех случаях экспериментальной сигнатурой является реконструируемая вершина распада FIP внутри распадного объема и его импульса.

В качестве примера можно привести график чувствительности эксперимента к регистрации HNL с учетом всех каналов распада (рис. 2). В предположении о нулевом фоне эксперимента SHiP сможет покрыть большую область в пространстве параметров HNL.

МЮОННАЯ ЗАЩИТА

SHiP заявлен как эксперимент с нулевым фоном. После попадания пучка в мишень образуется множество вторичных частиц. Большинство из них следует каким-то образом удалить до того, как они попадут в распадный объем. Адронный абсорбер служит для поглощения частиц с большими сечениями взаимодействия. Мюонная защита является ключевым элементом для удаления мюонов как основного источника фона.

Цель состоит в том, чтобы уменьшить поток в $\sim 10^{11}$ мюонов на спилл на 6 порядков величины. Таким образом, с одной стороны, защита должна обеспечивать хорошее подавление фона, с другой стороны, не должна быть слишком тяжелой или дорогой.

Для численного определения качества мюонного щита используется симуляция эксперимента на базе Geant4 с фиксированным сгенерированным взвешенным мюонным сэмплом. В качестве основной метрики качества используется число взвешенных мюонных треков, зарегистрированных в трековых камерах. Чтобы избежать возможных проблем с алгоритмами реконструкции треков, мы рассматривали как «реконструированные треки» набор из хитов хотя бы в 3 из 4 трековых станциях. Первая и последняя станции являются обязательными. Помимо качества экранирования важной численной характеристикой защиты является ее масса. Существуют определенные ограничения на то, насколько тяжелой может быть вся установка. Кроме того, цена материала составляет большую часть общей стоимости защиты.

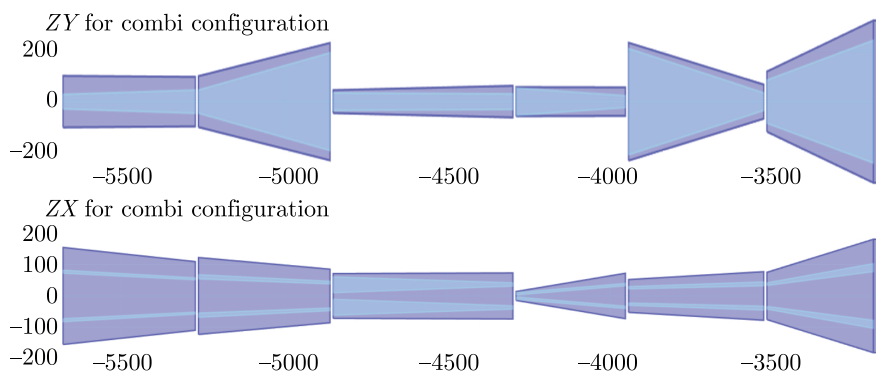


Рис. 3. Схема мюонной защиты

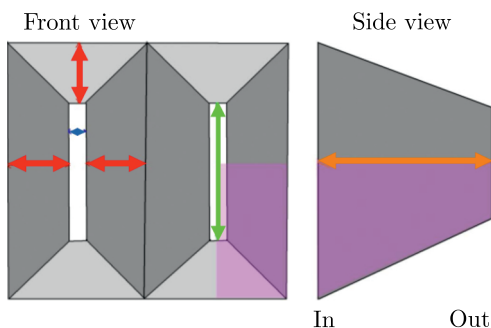


Рис. 4. Схема параметризации мюонной защиты

Мюонная защита состоит из 6 магнитов с одинаковой параметризацией и магнитным полем 1,7 Тл. Направления поля противоположны для первой и второй половин защиты. Идея заключается в том, чтобы мюоны высоких энергий отклонялись из зоны акцептанса в первых трех магнитах внутри сердечника, в последующих — внутри ярма.

Для задания формы одного магнита требуется 7 параметров: 3 параметра для входной плоскости, 3 параметра для выходной и длина магнита. При 6 магнитах с фиксированными зазорами между ними мы получим 42 параметра для фиксации формы защиты (рис. 4)

ОПТИМИЗАЦИЯ МЮОННОЙ ЗАЩИТЫ

За прошедший год эксперимент SHiP претерпел ряд изменений, связанных с рассмотрением новых возможных мест его расположения. Одним из таковых является уменьшение длины мюонной защиты с 35 до 30 м. Ранее использовавшаяся конфигурация была получена в ходе тонкой оптимизации, и любые изменения неизбежно приводят к значительному падению защитных качеств.

На первом этапе стояла задача сокращения общей длины защиты с 35 до 30 м. В качестве начального приближения была выбрана методика однородного уменьшения длины каждого из магнитов, что привело к увеличению потока прошедших через защиту мюонов в 4 раза. При детальном исследовании были обнаружены 2 четких пятна от мюонных треков в трековых камерах. Они соответствовали трекам мюонов с высокими энергиями, которые недостаточно отклонились в первой половине защиты и попали в зазор между сердечником и ярмом магнита № 4.

Во избежание этого эффекта была предложена конфигурация, где уменьшению длины подвергались только последние 3 магнита (comb), это позволило значительно сократить мюонный фон, но все еще без достижения желаемых показателей.

Наконец, был проведен полноценный цикл байесовской оптимизации защиты. Выбор целевой функции представлен формулой

$$F_{\text{cost}} = \left(1 + \exp \left(\frac{10(M - M^*)}{M^*} \right) \right) \left(1 + \Sigma \sqrt{\frac{400 - (x + 200)}{400}} \right),$$

где M — масса щита; M^* — некоторая константа, а x — координата опадания мюона на чувствительную плоскость. Первая половина функции не позволяет защите стать слишком большой, а вторая приводит к уменьшению потока мюонов. Нелинейная функция координаты щита вместо прямого подсчета мюонов выбрана для повышения чувствительности оптимизации к незначительным изменениям потока.

При оценке функции потерь для той или иной конфигурации использовались результаты МК-моделирования со специальным мюонным сэмплом в качестве входных данных. Оптимизационный сэмпл был создан

на основе базового сэмпла для 1 спилл данных путем удаления весов этапа генерации и ограничения размера выборки для более быстрого завершения моделирования.

Наиболее простой суррогатной моделью для байесовской оптимизации являются гауссовские процессы (GP). К сожалению, обыкновенный GP имеет $\mathcal{O}(n^3)$ -сложность вычисления и $\mathcal{O}(n^2)$ -сложность по памяти. Это не позволяет получить устойчивый результат для задач оптимизации высокой размерности. Для устранения этих проблем был использован подход Bayesian Optimization with Sparse Axis-Aligned Subspaces (SAASBO) [9] и Variational Nearest Neighbor Gaussian Process (VNNGP) [10]. Это позволило достигать нескольких тысяч итераций в оптимизации. Расчеты выполнялись на инфраструктуре Yandex Cloud [11].

Помимо оптимизации базовой опции с 6 теплыми магнитами была проведена оптимизация альтернативной конфигурации защиты, где первые 3 магнита были заменены одним сверхпроводящим при сохранении общего интеграла магнитного поля. Все подходы к оптимизации были абсолютно идентичны для обоих случаев.

Результаты оптимизации представлены в таблице.

Результаты эффективности работы полученных конфигураций мюонной защиты

Защита	Загрузка, 10^3 мюонов/спилл	Длина, м
ECN4	45	35
ECN3 Combi	160	30
ECN3 Optimized	67	30
ECN3 SC	22	20

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

BDF/SHiP предоставляет отличную возможность обнаружить FIPs в распадах тяжелых кварков (или закрыть эту «тему» экспериментально). Это дополняет поиски FIP на HL-LHC и будущем e^+e^- -коллайдере (где FIP можно искать в распадах бозонов). Байесовская оптимизация мюонного щита превосходит ручную подстройку и дает результаты, удовлетворяющие физическим требованиям эксперимента. Разработанный подход показал свою эффективность как для варианта защиты на теплых магнитах, так и для сверхпроводящей конфигурации.

Благодарности. Авторы выражают благодарность компании Yandex за предоставленные вычислительные мощности. Исследования, приведшие к этим результатам, получили финансирование по программе Фонда фундаментальных исследований Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anelli M., Aoki S., Arduini G., Back J., Bagulya A., Baldini W., Baranov A., Barker G., Barsuk S., Battistin M. et al.* A Facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS. arXiv:1504.04956. 2015.
2. *Banerjee D., Bernhard J., Brugger M., Charitonidis N., Doble N., Gatignon L., Gerbershagen A.* The North Experimental Area at the CERN Super Proton Synchrotron. 2021. Dedicated to Giorgio Brianti on the 50th Anniversary of His Founding the SPS Experimental Areas Group of CERN-Lab II and Hence Initiating the Present Enterprise. <https://cds.cern.ch/record/2774716>.
3. *Gil E. C., Albarrán E. M., Minucci E., Nüssle G., Padolski S., Petrov P., Szilasi N., Velghe B., Georgiev G., Kozhuharov V. et al.* The Beam and Detector of the NA62 Experiment at CERN // *J. Instrum.* 2017. V. 12, No. 05. P. P05025.
4. *Buchmüller W., Lüdeling C.* Field Theory and Standard Model. 2006. 70 p.; <https://cds.cern.ch/record/984122>.
5. *Langacker P.* The Standard Model and Beyond. CRC Press, 2017. <https://doi.org/10.1201/b22175>.
6. *Agrawal P., Bauer M., Beacham J., Berlin A., Boyarsky A., Cebrian S., Cid-Vidal X., d'Enterria D., De Roeck A., Drewes M. et al.* Feebly-Interacting Particles: FIPs 2020 Workshop Report // *Eur. Phys. J. C.* 2021. V. 81, No. 11. P. 1–137.
7. *Beacham J., Burrage C., Curtin D., De Roeck A., Evans J., Feng J. L., Gatto C., Gninenko S., Hartin A., Irastorza I. et al.* Physics Beyond Colliders at CERN: Beyond the Standard Model Working Group Report // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2019. V. 47, No. 1. P. 010501.
8. *SHiP Collab.* SHiP Experiment — Comprehensive Design Study Report. Rep. CERN. Geneva, 2019; <https://cds.cern.ch/record/2704147>.
9. *Eriksson D., Jankowiak M.* High-Dimensional Bayesian Optimization with Sparse Axis-Aligned Subspaces // *Uncertainty in Artificial Intelligence. PMLR.* 2021. P. 493–503.
10. *Wu L., Pleiss G., Cunningham J. P.* Variational Nearest Neighbor Gaussian Process // *Intern. Conf. Machine Learning. PMLR.* 2022. P. 24114–24130.
11. Yandex Cloud. <https://cloud.yandex.ru/>.