

---

---

# ФИЗИКА ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

---

## ATOMIC NUCLEUS AND ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS

---

---

УДК 539.12

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕКЕРА НА ОСНОВЕ СТРОУ-ТРУБОК ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА СОМЕТ

*Д. В. ШЁЛКОВЫЙ<sup>1)</sup>, А. В. ЛЕОНОВ<sup>2)</sup>, И. Д. ФЕРАНЧУК<sup>2)</sup>,  
В. М. АНИЩИК<sup>2)</sup>, В. В. ПОНАРЯДОВ<sup>2)</sup>, П. Г. ЕВТУХОВИЧ<sup>3)</sup>*

<sup>1)</sup>Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

<sup>3)</sup>Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри, 6, 141980, г. Дубна, Московская область, Россия

На основе технической документации эксперимента СОМЕТ реализована параметрическая модель модуля строу-трекера данного эксперимента в инструментарии Geant4 с возможностью гибкой вариации диаметра и толщины стенок пленки и изменения смеси газов. Для изучения отклика строу-детектора на прохождение заряженных

---

#### Образец цитирования:

Шёлковий Д. В., Леонов А. В., Феранчук И. Д., Анищик В. М., Понарядов В. В., Евтухович П. Г. Моделирование трекера на основе строу-трубок для эксперимента СОМЕТ // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 2. С. 41–49.

#### For citation:

Shoukavy D. V., Leonau A. U., Feranchuk I. D., Anishchik V. M., Ponariadov V. V., Evtoukhovitch P. G. Modeling of the straw tube tracker for the COMET experiment. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 2. P. 41–49 (in Russ.).

---

#### Авторы:

**Дмитрий Викторович Шёлковий** – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической физики.

**Александр Владимирович Леонов** – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры теоретической физики и астрофизики физического факультета.

**Илья Давыдович Феранчук** – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой теоретической физики и астрофизики физического факультета.

**Виктор Михайлович Анищик** – доктор физико-математических наук, профессор; декан физического факультета.

**Владимир Васильевич Понарядов** – кандидат физико-математических наук, доцент; заместитель декана физического факультета.

**Петр Георгиевич Евтухович** – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник лаборатории ядерных проблем имени В. П. Джелепова.

#### Authors:

**Dzmitry Shoukavy**, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of theoretical physics.

*shoukavy@ifanbel.bas-net.by*

**Aliaksandr Leonau**, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of theoretical physics and astrophysics, faculty of physics.

*leonov.bsu@gmail.com*

**Ilya Feranchuk**, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of theoretical physics and astrophysics, faculty of physics.

*iferanchuk@gmail.com*

**Victor Anishchik**, doctor of science (physics and mathematics), full professor; dean of the faculty of physics.

*dean@bsu.by*

**Vladimir Ponariadov**, PhD (physics and mathematics), docent; vice-dean of the faculty of physics.

*ponariadov@bsu.by*

**Petr Evtoukhovitch**, PhD (physics and mathematics); senior researcher at the Dzelepov laboratory of nuclear problems.

*evtpg@jinr.ru*

частиц создан физический лист, соответствующий условиям эксперимента COMET, т. е. задана совокупность всех процессов для всех частиц, определяющая моделирование физических взаимодействий в Geant4. Показано, что невозможно добиться высокой точности идентификации частиц на основе данных, полученных исключительно в строу-трекере, так как в зависимости от выбора пороговой энергии возникает вероятность ложной идентификации, когда мюон или пион принимается за электрон. Проведен поиск оптимальной газовой смеси для использования в строу-трекере в условиях фазы-II настоящего эксперимента на основе моделирования методом Монте-Карло прохождения заряженных частиц (электроны, пионы и мюоны) с импульсом 105 МэВ/с через систему из пяти строу-модулей. Показано, что из возможных вариантов газовой смеси ( $\text{Ar} - \text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{He} - \text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{Xe} - \text{C}_2\text{H}_6$  в пропорции 50 : 50) наиболее эффективной с точки зрения погрешности при реконструкции импульса является  $\text{He} - \text{C}_2\text{H}_6$ .

**Ключевые слова:** стандартная модель; «новая физика»;  $\mu - e$ -конверсия; COMET; строу-трубка.

## MODELING OF THE STRAW TUBE TRACKER FOR THE COMET EXPERIMENT

*D. V. SHOUKAVY<sup>a</sup>, A. U. LEONAU<sup>b</sup>, I. D. FERANCHUK<sup>b</sup>,  
V. M. ANISHCHIK<sup>b</sup>, V. V. PONARIADOV<sup>b</sup>, P. G. EVTOUKHOVITCH<sup>c</sup>*

<sup>a</sup>*B. I. Stepanov Institute of Physics of National Academy of Sciences of Belarus,  
Nezavisimosti avenue, 68, 220072, Minsk, Belarus*

<sup>b</sup>*Belarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Belarus*

<sup>c</sup>*Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie street, 6, 141980, Dubna, Moscow region, Russia*

*Corresponding author: leonov.bsu@gmail.com*

In the present paper a parametric model of a straw tracker is implemented on the basis of technical design report of the COMET experiment within the Geant4 toolkit. This model allows one to smoothly tailor both the diameter and width of the film and to vary the gas mixture. In order to investigate the response of the straw detector to the propagation of the charged particles, a «physical sheet» corresponding to the COMET conditions (i. e. a set of all possible processes for all participating particles defining the interaction in the Geant4) is created. We show that it is impossible to reach high accuracy in identification of the particles solely on the basis of the data obtained within the straw tracker because, depending on the threshold energy, false identification is liable when a muon or pion is treated as an electron. The optimum mixture of gases for the straw tracker within the conditions of the Phase-II of the COMET experiment is obtained on the basis of Monte-Carlo modeling for the propagation of charged particles (electrons, pions and muons) with 105 MeV/c momentum through a system of 5 straw modules. It is shown that, as regards the momentum reconstruction error, the mixture  $\text{He} - \text{C}_2\text{H}_6$  is an optimum mixture of gases among all the candidates possible ( $\text{Ar} - \text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{He} - \text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{Xe} - \text{C}_2\text{H}_6$  in the proportion 50 : 50).

**Key words:** standard model; «new physics»;  $\mu - e$  conversion; COMET; straw tube tracker.

### Введение

Стандартная модель (СМ) – это единая теория, описывающая электрослабое и сильное взаимодействия элементарных частиц, в основе которой лежит принцип локальной калибровочной инвариантности, т. е. инвариантности уравнений движения по отношению к произвольным преобразованиям координат пространства-времени [1]. Эта теория позволяет с высокой точностью описать большинство полученных к настоящему времени экспериментальных данных в физике элементарных частиц. Однако, несмотря на существенный прорыв, связанный с экспериментальным обнаружением бозона Хиггса [2; 3], СМ нельзя считать полностью завершенной схемой, так как ряд фундаментальных вопросов по-прежнему остаются открытыми. Например, в рамках СМ отсутствует объяснение следующих явлений: наличие именно трех поколений фундаментальных фермионов; численные значения параметров модели; причина, по которой масса  $t$ -кварка в 100 тыс. раз превышает массу  $u$ -кварка и т. д. Кроме того, СМ не описывает и некоторые экспериментально наблюдаемые явления. Например, в 1998 г. было показано, что у нейтрино есть небольшие массы покоя. Поэтому нейтрино из разных поколений могут, смешиваясь, осциллировать, т. е. превращаться друг в друга, в то время как в рамках СМ нейтрино с самого начала предполагаются безмассовыми. В СМ также отсутствуют кандидаты на роль темной материи и темной энергии, плотность которых, согласно физическим и астрофизическим данным, составляет почти 23 и 73 % плотности массы всей Вселенной соответственно. Эта теория не может дать объяснения наблюдаемой асимметрии вещества и антивещества, а также в ней отсутствует гравитационное

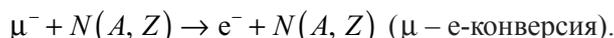
взаимодействие. Таким образом, несмотря на все успехи СМ, актуальным остается вопрос о создании единой калибровочной теории, отвечающей на поставленные фундаментальные вопросы и описывающей все известные в природе взаимодействия.

Для преодоления внутренних проблем СМ был предложен целый ряд ее расширений, таких как суперсимметричные теории, теории великого объединения, модели с дополнительными измерениями пространства-времени и др. Такие теории, выходящие за рамки СМ, называют физикой за пределами СМ или новой физикой, а поиск явлений и процессов, выходящих за рамки СМ, представляет собой одну из главных задач современной физики. Такой поиск возможен и в высокоэнергетичных экспериментах, таких как ATLAS и CMS, на Большом адронном коллайдере, и в прецизионных экспериментах, осуществляемых при относительно низких энергиях. При этом оба класса экспериментов дают взаимно дополняющую информацию.

### Эксперимент COMET

В то время как СМ не содержит механизмов нарушения закона сохранения лептонных квантовых чисел, подобные механизмы естественным образом возникают практически во всех теориях, выходящих за рамки СМ. Поэтому одной из наиболее актуальных задач при проведении прецизионных экспериментов является обнаружение процессов, которые проходят с нарушением таких законов. Однако, несмотря на множество теоретических предсказаний существования переходов, сопровождающихся нарушением закона сохранения лептонного квантового числа ( $\mu \rightarrow e\gamma$ ,  $\mu \rightarrow eee$ ,  $\tau \rightarrow e\gamma/\mu\gamma$ ,  $\tau \rightarrow 3$  лептона, когерентный  $\mu \rightarrow e$  в поле ядра и др.), поиск таких процессов в различных экспериментах в пределах их точности пока не увенчался успехом [4–6]. На рис. 1 приведена временная зависимость повышения точности существующих и планируемых экспериментов по поиску процессов, проходящих с нарушением закона сохранения лептонного аромата (одного из квантовых чисел) в мюонных распадах.

Проект COMET (от англ. COherent Muon to Electron Transition) [7] является одним из прецизионных экспериментов, исследующих расширенную теорию физики элементарных частиц. Главная задача проекта – экспериментальное обнаружение процесса, протекающего с несохранением аромата заряженных лептонов. В частности, в рамках проекта COMET планируется осуществить поиск когерентной безнейтринной конверсии мюона в электрон:



Такой переход нарушает закон сохранения числа лептонных ароматов на одну единицу, при этом общее количество лептонов не изменяется. Цель эксперимента – достижение рекордной чувствительности к единичному событию до уровня  $10^{-17}$ , что на четыре порядка улучшает современное экспериментальное ограничение на вероятность такого процесса [6] (см. рис. 1). Основным преимуществом

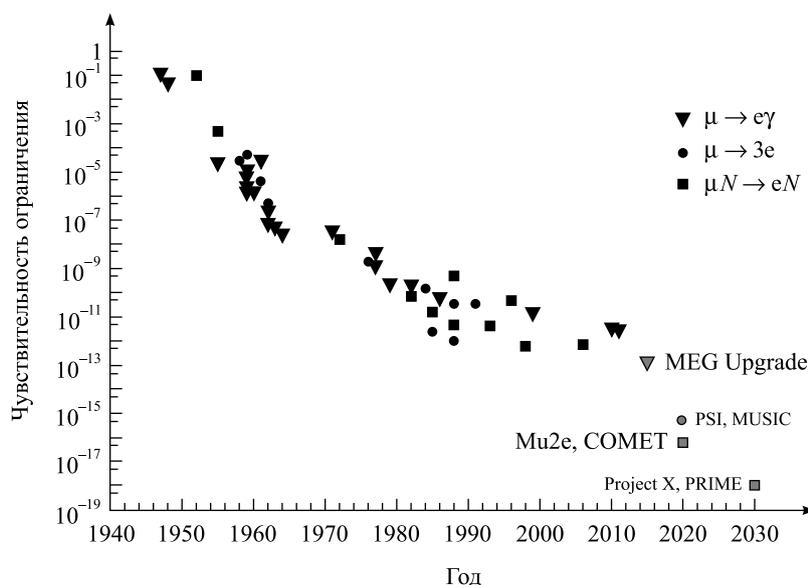


Рис. 1. История повышения точности существующих и планируемых экспериментов по поиску процессов, проходящих с нарушением закона сохранения лептонного аромата в мюонных распадах

Fig. 1. Time evolution of the accuracy increasing of the existing and prospective experiments searching for the processes with lepton flavour conservation violation in the muonic decays

при проведении когерентной  $\mu - e$ -конверсии в поле ядра является то обстоятельство, что на выходе этой реакции возникает всего лишь одна частица, которую необходимо детектировать, – электрон. Энергия электрона, появившегося в результате возможной конверсии, будет строго определена и равна массе покоя мюона за вычетом мюонной энергии связи. В других похожих реакциях, например  $\mu \rightarrow e\gamma$ , энергия и импульс системы распределяются между двумя частицами – электроном и фотоном, что требует одновременного детектирования двух частиц и приводит к дополнительному фону.

Процесс  $\mu - e$ -конверсии проходит в несколько этапов: 1) медленный мюон останавливается в веществе (в случае эксперимента COMET таким веществом является алюминий); 2) мюон захватывается атомом вещества, в результате чего образуется мюонный атом; 3) мюон теряет энергию, опускаясь по энергетическим уровням атома, и в случае, когда он опускается до самого нижнего уровня, конверсия является когерентной; 4) дальнейшая эволюция мюона идет по одному из следующих каналов:

а) распад мюона на орбите:  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$ ;

б) захват мюона ядром с образованием нового ядра:  $\mu^- + N(A, Z) \rightarrow \nu_\mu + N(A, Z - 1)$ ;

в) безнейтринная конверсия мюона в электрон, предсказываемая теорией за рамками СМ, регистрация которой и является основной целью эксперимента COMET.

Эксперимент COMET планируется провести на ускорительном комплексе J-PARC (Япония). В ходе эксперимента предполагается использовать протонный пучок мощностью 56 кВт и с временной задержкой 1,17 нс между сгустками длительностью 100 нс. Для того чтобы наблюдать мюон-электронную конверсию, необходимо достичь высокого уровня чувствительности к единичному событию, используя интенсивный пучок мюонов. С этой целью протоны с энергией 8 ГэВ из ускорительного кольца попадают на графитовую мишень, где в результате столкновений протонов с атомами углерода образуются пионы. Далее, отбирают только те пионы, импульс которых направлен противоположно направлению полета протонов в пучке, что обеспечивает их наименьшую возможную энергию. Такой выбор обусловлен следующими обстоятельствами: во-первых, необходимо уменьшить количество рождающихся антипротонов, интенсивность возникновения которых значительно увеличивается при энергиях протонов свыше 10 ГэВ; во-вторых, необходимо максимально увеличить скорость поглощения «блуждающих» протонов между протонными сгустками (банчами), которые вносят вклад в фон детектируемого процесса. Пионы, попадая в транспортную систему, распадаются на мюоны. Эти мюоны направляются в С-образную транспортную систему (что соответствует постепенному повороту транспортируемых частиц на  $180^\circ$ ), в результате чего улучшается точность отбора частиц по электрическому заряду и импульсу. Это позволяет снизить фон от паразитных процессов, в которых мюоны с ненулевыми импульсами также могут привести к образованию электронов с сигналами, близкими к электронам от  $\mu - e$ -конверсии. Выбором оптимального значения импульса достигается наибольшая вероятность остановки мюона в алюминиевой мишени, где и может произойти  $\mu - e$ -конверсия. Электроны, вылетевшие из мишени, попадают в спектрометр с дугообразным соленоидом, обеспечивающим их транспортировку и отбор в необходимом диапазоне импульсов, и далее направляются в детекторную область. Принцип работы спектрометра основан на зависимости радиуса дрейфа заряженной частицы в магнитном поле от ее импульса. В целях уменьшения фона спектрометр настроен на отбор электронов с импульсом более 80 МэВ/с, так как электроны с меньшим импульсом преимущественно рождаются в стоп-мишени в результате распада мюона на орбите атома.

Эксперимент COMET планируется провести в два этапа (фаза-I и фаза-II). Первая часть эксперимента (фаза-I) будет проходить без использования соленоида для транспортировки электронов (его добавляют только в фазе-II). Основная цель фазы-I эксперимента COMET – наиболее полное и точное измерение фона от всех возможных процессов, препятствующих прецизионным измерениям в дальнейшем. Однако даже в этой части эксперимента возможно наблюдение  $\mu - e$ -конверсии с чувствительностью  $10^{-15}$ , что на два порядка превышает современное экспериментальное ограничение.

Детекторная часть эксперимента COMET состоит из пяти станций строу-трекера (координатный детектор на основе тонкостенных дрейфовых трубок) и электромагнитного калориметра. Данная система детекторов необходима для идентификации частиц и измерения их импульсов и энергий. Для минимизации множественного рассеяния, ухудшающего разрешение детекторов, вся детектирующая система помещается в вакуум.

### Моделирование отклика строу-трекера

Цель настоящей работы – изучение отклика строу-детектора на основе созданной нами модели Монте-Карло строу-трекера на прохождение заряженных частиц (электроны, пионы и мюоны) в зависимости от их угла влета. Преимущество нашего подхода по сравнению с существующими моделями обусловлено возможностью гибкой вариации диаметра и толщины стенок тонкостенных дрейфовых

трубок и изменения состава смеси газов, что позволяет определить наиболее эффективную газовую смесь для идентификации частиц по ионизационным потерям. В настоящей работе для моделирования отклика строу-трекера был использован инструментарий Geant4 [8].

Строу-трекер будет состоять из пяти станций строу-камер, расположенных в вакуумной трубе, окруженной соленоидом, и создающих магнитное поле силой 0,8–1,1 Тл вдоль оси  $z$ . В настоящее время при проектировании новых установок для экспериментов на ускорителях данный тип координатных газонаполненных проволочных детекторов успешно конкурирует с такими традиционными детекторами, как многопроволочные пропорциональные и дрейфовые камеры. Это определено их способностью работать в условиях экстремально высоких потоков частиц, хорошей радиационной стойкостью и пространственным разрешением около 100 мкм. Кроме того, радиационная толщина этих детекторов меньше, а цилиндрическая геометрия для каждого канала регистрации обеспечивает оптимальный временной сбор дрейфующих электронов ионизации к анодам.

Каждая строу-камера представляет собой алюминиевую опору в виде кольца с внешним радиусом 78 см и внутренним – 68 см. В эту конструкцию монтируются четыре ряда тонкостенных дрейфовых трубок: два ряда в вертикальной плоскости и два – в горизонтальной [9], в результате чего две плоскости измеряют координату по оси  $x$  и две – по оси  $y$ . При этом плоскости, которые измеряют координату по одной и той же оси, смещены на половину диаметра трубки для наилучшего позиционирования.

Основное предназначение строу-трекера в фазе-I эксперимента заключается в предоставлении данных о вымирании протонного пучка и количестве рожденных сторонних частиц в зависимости от энергии пучка. Для измерения импульса, а также идентификации частицы используется информация о  $dE/dx$  (при этом электромагнитный калориметр будет предоставлять информацию о  $E/p$ ). В фазе-II эксперимента строу-трекер в связке с электромагнитным калориметром будет осуществлять детектирование электрона с импульсом 105 МэВ/с, появление которого может быть сигналом о произошедшей  $\mu - e$ -конверсии. Таким образом, главной задачей при проведении фазы-II эксперимента COMET является наиболее точное восстановление импульса частиц.

В фазе-I будут использованы тонкостенные дрейфовые трубки из металлизированного майлара толщиной 20 мкм и диаметром 9,75 мм, заполненные смесью газов  $Ar - C_2H_6$  в пропорции 50 : 50. В настоящее время для фазы-II эксперимента оптимальная газовая смесь пока не определена. При этом наряду с  $Ar - C_2H_6$  в качестве возможных вариантов рассматриваются такие газовые смеси, как  $Ne - C_2H_6$  и  $Xe - C_2H_6$  в соотношении 50 : 50, и ведется разработка трекера на основе строу-трубок диаметром 4,875 мм и толщиной 12 или 8 мкм для уменьшения ионизационных потерь.

Для моделирования нами использовались следующие входные параметры: начальная частица –  $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\pi^-$ ; начальный импульс частицы – 105 МэВ/с; количество начальных событий – 1 млн; магнитное поле – 1 Тл ( $B_x = 0$  Тл,  $B_y = 0$  Тл,  $B_z = 1$  Тл); угол влета частицы – 0; 11,3; 21,8; 30,9; 38,6; 45,0°. При этом использованы следующие параметры строу-трубок: 1) диаметр – 9,75 мм, толщина стенки – 20 мкм; 2) диаметр – 4,88 мм, толщина стенки – 20 мкм; 3) диаметр – 4,88 мм, толщина стенки – 12 мкм; 4) диаметр – 4,88 мм, толщина стенки – 8 мкм. Применялись газовые смеси: а)  $Ar - C_2H_6$ ; б)  $Ne - C_2H_6$ ; в)  $Xe - C_2H_6$ . Схематическое изображение параметрической модели строу-трекера, созданной в инструментарии Geant4, приведено на рис. 2.

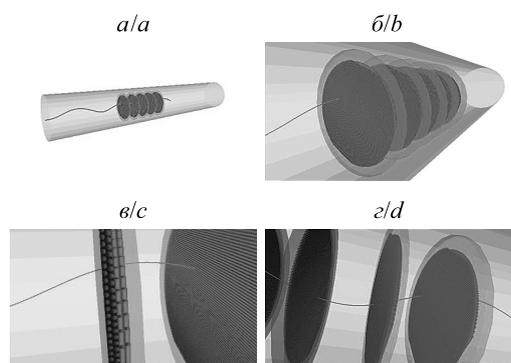


Рис. 2. Параметрическая модель строу-трекера в инструментарии Geant4:

- $a$  – общий вид строу-трекера сверху (программный масштаб 1 : 1);
  - $b$  – продольный вид вдоль оси  $z$  (1 : 7);
  - $в$  – детализированная структура камеры строу-трекера (1 : 100);
  - $z$  – пример прохождения электроном станций строу-трекера (1 : 10)
- Fig. 2. Parametric model of a straw tracker used in the Geant4 toolkit:  
 $a$  – general view from above (software magnification 1 : 1);  
 $b$  – longitudinal view along  $z$ -axis (1 : 7);  
 $c$  – detailed structure of a station of the straw tracker (1 : 100);  
 $d$  – example of an electron passing through the straw tracker (1 : 10)

В выходной файл в формате данных ROOT [10] записывались следующие параметры: 1) номер камер строу-трубок; 2) номера сборки строу-трубок; 3) номер строу-трубки; 4) начальные координаты и проекции импульса частиц, влетающих в детектирующую часть; 5) выделенная энергия в стенках и газе строу-трубок. Полученные данные обрабатывались в рамках авторской программы с использованием библиотек программного пакета ROOT.

Таким образом, изучены потери энергии при прохождении заряженных частиц через пять камер строу-трекера в зависимости от начального угла влета и параметров строу-трубок. Результаты данного моделирования для электронов, мюонов и пионов с импульсом 105 МэВ/с и для смеси газов He – C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> представлены на рис. 3 (для других смесей газов наблюдается аналогичная зависимость). Как следует из рис. 3, при увеличении начального угла влета частицы ее ионизационные потери повышаются, что обусловлено ростом эффективного пути через вещество строу-трубки. Можно сделать вывод о нецелесообразности перестраивания производства строу-трубок для фазы-I с диаметром 9,78 мм и толщиной пленки 20 мкм на диаметр 4,88 мм без изменения толщины пленки, так как потери энергии в материале строу-трубки превышают потери в газовой смеси.

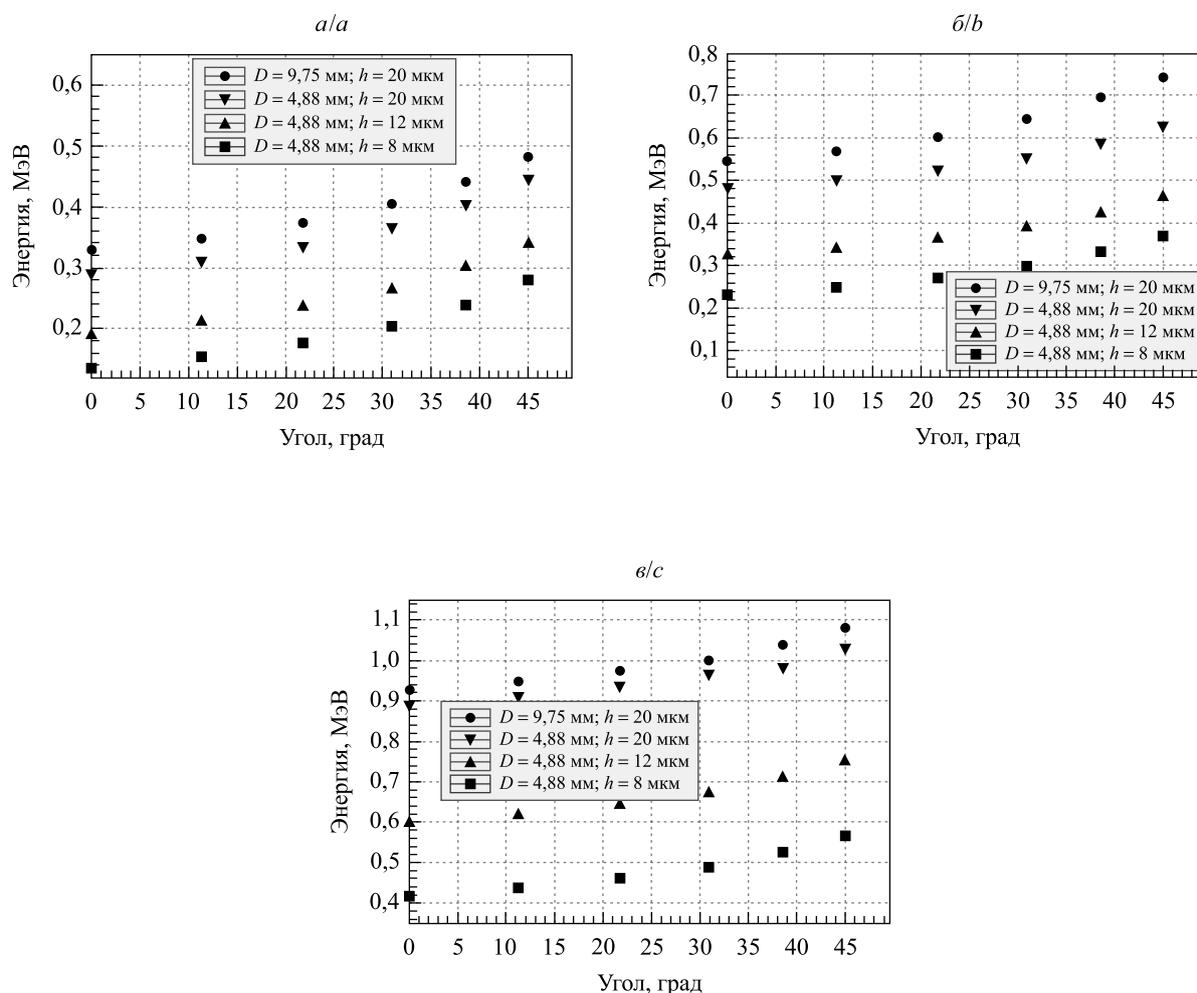


Рис. 3. Средняя энергия, оставленная при прохождении пучком электронов (а), мюонов (б), пионов (в) с импульсом 105 МэВ/с при разных углах влета для следующих параметров строу-трубок: диаметр ( $D$ ) – 9,75 мм, толщина ( $h$ ) – 20 мкм; диаметр – 4,88 мм, толщина – 20 мкм; диаметр – 4,88 мм, толщина – 12 мкм; диаметр – 4,88 мм, толщина – 8 мкм для смеси газов He – C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>

Fig. 3. The mean energy lost by the propagating beam of electrons (a), muons (b) and pions (c) with the momentum of 105 MeV/c for different incident angles and following parameters of the straw tube tracker: diameter – 9.75 mm, thickness – 20 μm; diameter – 4.88 mm, thickness – 20 μm; diameter – 4.88 mm, thickness – 12 μm; diameter – 4.88 mm, thickness – 8 μm and He – C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> gas mixture

Перед попаданием в строу-трекер заряженные частицы проходят через спектрометр, в котором происходит их отбор по импульсам. Частицы с разной массой при одинаковом импульсе будут обладать разной скоростью, влияющей на выделяемую ими энергию в рабочем объеме газоразрядных трубок. На основе данных об этой энергии можно проводить идентификацию частиц, т. е. определять тип зарегистрированной частицы (электрон, мюон или пион). На рис. 4 приведено распределение по сумме выделившейся энергии в рабочем объеме пяти станций строу-трекера для смеси газов Ar – C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> и строу-трубок диаметром 9,75 мм и толщиной 20 мкм для электрона, мюона и пиона.

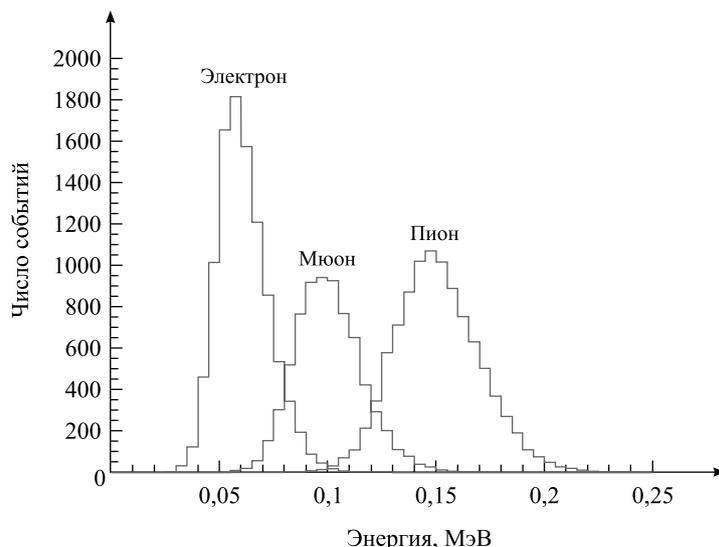


Рис. 4. Распределение по сумме выделившейся энергии в рабочем объеме пяти станций строу-трекера для смеси газов  $\text{Ar} - \text{C}_2\text{H}_6$  и строу-трубок диаметром 9,75 мм и толщиной 20 мкм для электрона, мюона и пиона

Fig. 4. Distribution of the energies released by the electron, muon and pion within the operational volume of the five stations of the straw tracker for the  $\text{Ar} - \text{C}_2\text{H}_6$  gas mixture and straw tube tracker with diameter 9.75 mm and thickness 20  $\mu\text{m}$

Анализ приведенных распределений позволяет сделать вывод о невозможности достижения высокой точности при идентификации частиц на основе информации, получаемой исключительно в строу-трекере. В зависимости от выбора пороговой энергии при идентификации появляется вероятность ложной идентификации, когда мюон или пион принимается за электрон. При этом самой эффективной будет идентификация частиц в газовой смеси  $\text{Xe} - \text{C}_2\text{H}_6$ , так как средняя поглощенная энергия для разных частиц в этом случае наибольшая (рис. 5).

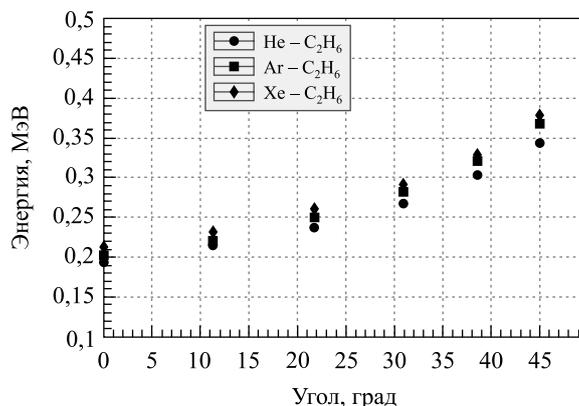


Рис. 5. Средняя поглощенная энергия в газовых смесях  $\text{He} - \text{C}_2\text{H}_6$ ;  $\text{Ar} - \text{C}_2\text{H}_6$  и  $\text{Xe} - \text{C}_2\text{H}_6$  при разных углах влета электрона с импульсом 105 МэВ/с для строу-трубки диаметром 4,88 мм и толщиной 12 мкм

Fig. 5. The mean energy absorbed in  $\text{He} - \text{C}_2\text{H}_6$ ;  $\text{Ar} - \text{C}_2\text{H}_6$  and  $\text{Xe} - \text{C}_2\text{H}_6$  gas mixtures for different incident angles of the electron with 105 MeV/c momentum and straw tube tracker with the diameter 4.88 mm and thickness 12  $\mu\text{m}$

Для оценки эффективности восстановления импульса заряженных частиц в разных газовых смесях использован алгоритм, восстанавливающий значение только поперечной (перпендикулярной оси симметрии детекторной секции) составляющей импульса электрона при прохождении строу-трекера (для восстановления продольной составляющей импульса необходима информация с электромагнитного калориметра). Принцип алгоритма восстановления этой составляющей импульса основан на том, что при полете в однородном магнитном поле заряженная частица имеет траекторию в виде спирали.

В плоскости, перпендикулярной вектору магнитного поля, траекторию электрона с хорошей точностью можно считать круговой. Для реконструкции поперечной составляющей импульса с пяти секций

строу-детектора были считаны порядковые номера строу-трубок, в которых происходила регистрация частицы и по которым восстанавливаются координаты  $x$  и  $y$  пролета частиц. Полученные координаты аппроксимировались уравнением окружности, по радиусу которой можно определить значение поперечной составляющей импульса следующим образом (рис. 6):

$$P_{\perp} = R \cdot B \cdot q,$$

где  $R$  – радиус траектории в плоскости  $x - y$ ;  $B$  – индукция магнитного поля;  $q$  – элементарный заряд.

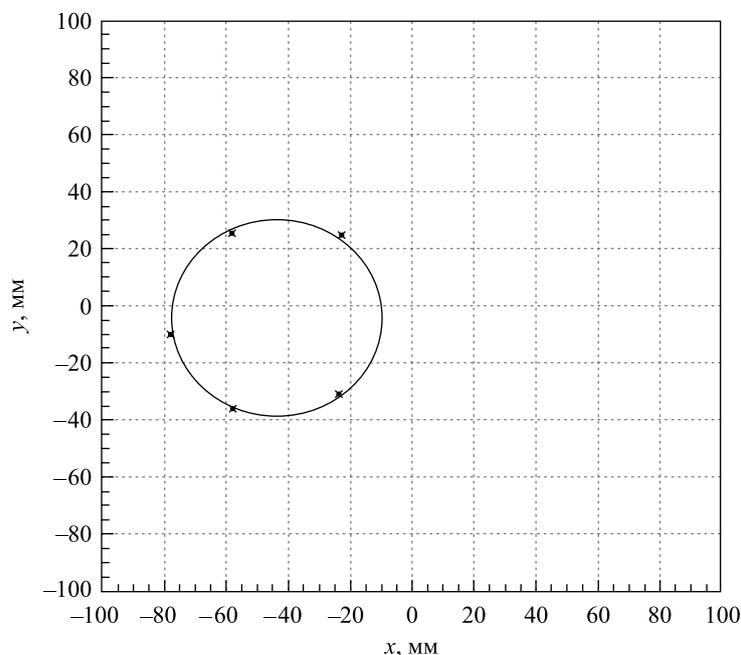


Рис. 6. Координаты точки пролета электрона в плоскости, поперечной к вектору магнитного поля, полученные с пяти секций строу-детектора, и результат аппроксимации этих точек окружностью

Fig. 6. Flight point coordinates of an electron in the plane transversal to the magnetic field acquired from the five sections of the straw tracker and resulting approximation of these points by a circle

Пример работы данного алгоритма для разных газовых смесей приведен в таблице.

**Результаты моделирования восстановления поперечной составляющей импульса электрона в строу-трекере при начальном поперечном импульсе 10 МэВ/с**

**Simulation results for reconstruction of the transversal component of the momentum of an electron in a straw tracker for the initial transversal momentum of 10 MeV/c**

Газовая смесь	Среднее значение, относительная погрешность	Параметры строу-трубок			
		$D = 9,75$ мм; $h = 20$ мкм	$D = 4,88$ мм; $h = 20$ мкм	$D = 4,88$ мм; $h = 12$ мкм	$D = 4,88$ мм; $h = 8$ мкм
Ar – C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$\langle P_{\perp} \rangle$ , МэВ/с	9,95	9,98	9,99	9,99
	$\sigma / \langle P_{\perp} \rangle$	0,058	0,051	0,041	0,036
He – C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$\langle P_{\perp} \rangle$ , МэВ/с	9,94	9,97	9,98	9,98
	$\sigma / \langle P_{\perp} \rangle$	0,051	0,048	0,037	0,03
Xe – C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$\langle P_{\perp} \rangle$ , МэВ/с	9,96	9,99	10,0	10,0
	$\sigma / \langle P_{\perp} \rangle$	0,085	0,071	0,063	0,059

### Заключение

В работе реализована параметрическая модель модуля строу-трекера с возможностью гибкой вариации диаметра и толщины стенок пленки и изменения смеси газов на основе технической документации эксперимента СОМЕТ. Анализ отклика строу-детектора на прохождение заряженных частиц

(электроны, мюоны и пионы) выполнен в инструментарии Geant4 на основе создания «физического листа» эксперимента. Показано, что данных, полученных исключительно в строу-трекере, недостаточно для достижения высокой точности идентификации частиц, так как в зависимости от выбора пороговой энергии возникает вероятность ложной идентификации, когда мюон или пион принимается за электрон. На основе моделирования методом Монте-Карло прохождения заряженных частиц (электроны, мюоны и пионы) с импульсом 105 МэВ/с через систему из пяти строу-модулей показано, что наиболее эффективной газовой смесью с точки зрения погрешности при реконструкции импульса в условиях фазы-II эксперимента COMET является He – C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> в пропорции 50 : 50.

### Библиографические ссылки

1. Емельянов В. М. Стандартная модель и ее расширения. М., 2007.
2. Aad G., Abajyan T., Abbott B., et al. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC // *Phys. Lett. B.* 2012. Vol. 716, № 1. P. 1–29.
3. Chatrchyan S., Khachatryan V., Sirunyan A. M., et al. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC // *Phys. Lett. B.* 2012. Vol. 716, № 1. P. 30–61.
4. Adam J., Bai X., Baldini A. M., et al. New Limit on the Lepton-Flavor-Violating Decay  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 107, issue 17. P. 171801.
5. Bellgard U., Otter G., Eichler R., et al. Search for the decay  $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$  // *Nucl. Phys. B.* 1988. Vol. 299, issue 1. P. 1–6.
6. Dohmen C., Groth K.-D., Heer B., et al. Test of lepton-flavour conservation in  $\mu \rightarrow e$  conversion on titanium // *Phys. Lett. B.* 1993. Vol. 317, issue 4. P. 631–636.
7. Kuno Y. A search for muon-to-electron conversion at J-PARC: the COMET experiment // *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2013. Vol. 2013, № 2. P. 022C01.
8. Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al. Geant4 – a simulation toolkit // *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2003. Vol. 506, № 3. P. 250–303.
9. Comet Collaboration COMET Phase-I [Electronic resource] // *Technical Des. Rep.* 2016. URL: [http://comet.kek.jp/Documents\\_files/PAC-TDR-2016/COMET-TDR-2016\\_v2.pdf](http://comet.kek.jp/Documents_files/PAC-TDR-2016/COMET-TDR-2016_v2.pdf) (date of access: 27.02.2017).
10. Antcheva I., Ballintijn M., Bellenot B., et al. ROOT – a C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization // *Comput. Phys. Commun.* 2009. Vol. 180, issue 12. P. 2499–2512.

### References

1. Emel'yanov V. M. Standartnaya model' i ee rasshireniya. Moscow, 2007 (in Russ.).
2. Aad G., Abajyan T., Abbott B., et al. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Phys. Lett. B.* 2012. Vol. 716, No. 1. P. 1–29. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.08.020.
3. Chatrchyan S., Khachatryan V., Sirunyan A. M., et al. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Phys. Lett. B.* 2012. Vol. 716, No. 1. P. 30–61. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.08.021.
4. Adam J., Bai X., Baldini A. M., et al. New Limit on the Lepton-Flavor-Violating Decay  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ . *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 107, issue 17. P. 171801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.171801.
5. Bellgard U., Otter G., Eichler R., et al. Search for the decay  $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ . *Nucl. Phys. B.* 1988. Vol. 299, issue 1. P. 1–6. DOI: 10.1016/0550-3213(88)90462-2.
6. Dohmen C., Groth K.-D., Heer B., et al. Test of lepton-flavour conservation in  $\mu \rightarrow e$  conversion on titanium. *Phys. Lett. B.* 1993. Vol. 317, issue 4. P. 631–636. DOI: 10.1016/0370-2693(93)91383-X.
7. Kuno Y. A search for muon-to-electron conversion at J-PARC: the COMET experiment. *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2013. Vol. 2013, No. 2. P. 022C01.
8. Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al. Geant4 – a simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2003. Vol. 506, No. 3. P. 250–303.
9. Comet Collaboration COMET Phase-I. *Technical Des. Rep.* 2016. URL: [http://comet.kek.jp/Documents\\_files/PAC-TDR-2016/COMET-TDR-2016\\_v2.pdf](http://comet.kek.jp/Documents_files/PAC-TDR-2016/COMET-TDR-2016_v2.pdf) (date of access: 27.02.2017).
10. Antcheva I., Ballintijn M., Bellenot B., et al. ROOT – a C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization. *Comput. Phys. Commun.* 2009. Vol. 180, issue 12. P. 2499–2512. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.08.005.

Статья поступила в редколлегию 16.02.2016.  
Received by editorial board 16.02.2016.