ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И АСТРОФИЗИКА СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Элдор Эшбобоевич Дустмуродов[1,2],
Г.Ш.Султанходжаева[1],
М.Ю.Мансурова[1],
Д.Х.Махмудова[1],
Ш.Х.Аллакулиева[1],
З.А.Явкачева[1],
М.М.Сулаймонов[1],
Ф.Н.Эрназаров[1],
Ш.С.Сайдалиева[1],
Ж.Ж.Хурсанжонов[1].

[1]*Ташкентский Государственный Транспортный Университет.*
[2]*Институт ядерной физики (ИЯФ) АН Республики Узбекистан.*
eldordustmurodov@tstu.uz

Аннотация. Текущие исследовательские программы в CERN на Large Hadron Collider (LHC), в США в Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL), а также другие направления деятельности кратко рассматриваются. Особое внимание уделяется программам, связанным с космическими лучами, которые служат связующим звеном между сообществом исследователей космических лучей и сообществом ускорителей частиц. Также отмечается спутниковая программа AMS-02.

Ключевые слова: *Standard Model, Лазерная интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория (LIGO), Dark Energy, Dark Matter.*

Abstract. An overview of ongoing research programs at the CERN Large Hadron Collider (LHC), the U.S. Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL), and associated activities is presented. Emphasis is placed on studies related to cosmic-ray physics that establish connections between the cosmic-ray and accelerator-based research communities. The AMS-02 satellite mission is also highlighted.

Key words: *Standard Model, aser Interferometer Gravity Wave Observatory, Dark Energy, Dark Matter.*

1. **Введение.**

Что мы знаем и в чём заключаются наши проблемы? Недавно на CERN был открыт Higgs Boson, что вызвало широкое признание и энтузиазм во всём мире. «Standard Model» элементарных частиц в настоящее время хорошо установлена и (по крайней мере, с точки зрения теоретиков) хорошо понята. Гравитационные волны теперь наблюдены в LIGO (Лазерной интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории), которая фактически состоит из двух детекторов: один расположен в штате Вашингтон, а другой — в штате Луизиана. В настоящее время известно, что нейтрино имеет три «аромата» (типа) и три различные массы, и оно осциллирует между этими состояниями. Тёмная материя остаётся загадкой. Наличие тёмной материи необходимо для объяснения орбит звёзд в галактиках, а также искривления световых лучей, например, света от удалённых астрономических объектов, проходящего вблизи галактики. В настоящее время нет никаких указаний на природу тёмной материи. Популярная гипотеза заключается в том, что она состоит из потока массивных и очень слабо взаимодействующих элементарных частиц, однако до сих пор не получено экспериментальных подтверждений существования таких частиц. Вопрос тёмной энергии представляется ещё более загадочным. Галактики во Вселенной, по-видимому, разлетаются с ускорением, как будто некая сила их разгоняет, однако природа этой силы остаётся неизвестной. Более важным вопросом для данного симпозиума является происхождение космических лучей: откуда они приходят и какие механизмы их ускоряют? Очевидно, что взрывы, столкновения или другие необычные явления в центрах галактик являются хорошими кандидатами, однако многое ещё предстоит выяснить. Следует отметить, что в последнее время в США и Европе прошло несколько значимых конференций и встреч. В начале августа в Чикаго состоялась конференция «ICHEP 2016» — 38-я Международная конференция по физике высоких энергий. Также недавно прошла встреча в Мичигане — «Cosmo-16», на которой активно обсуждались такие темы, как тёмная материя и тёмная энергия. В июне 2016 года состоялось ежегодное собрание организации пользователей Fermilab (FNAL), где лекции дали хорошее представление о текущей деятельности лаборатории. Недавний выпуск журнала «CERN Courier» содержит полезные обзоры исследовательских программ четырёх основных

экспериментов на Large Hadron Collider: CMS, ATLAS, LHCb и ALICE.

1. ФЕРМИЛАБ и CERN: текущая деятельность и проекты. После завершения работы коллайдера Tevatron (антипротон-протонного коллайдера с энергией в системе центра масс 2 ТэВ), который в течение нескольких десятилетий обеспечивал выдающиеся научные результаты, Fermilab сосредоточил свою деятельность на физике мюонов и нейтрино. Тем не менее физики продолжают получать важные научные результаты на основе обширных данных, собранных на Теватроне. Кроме того, многие физики Фермилаб активно участвуют в экспериментах на Large Hadron Collider в CERN, в частности в эксперименте CMS, для которого в Фермилаб действует крупная программа анализа данных и соответствующая вычислительная инфраструктура. Сотрудники Фермилаб также активно участвуют в программах по изучению космических лучей, таких как эксперимент Pierre Auger Observatory в Аргентине, а также в поисках тёмной материи и тёмной энергии. Хотя лаборатория управляется и финансируется Министерством энергетики США, в её деятельности участвует множество физиков из других стран. Одной из программ со значительным участием российских учёных является эксперимент SeaQuest. В нём используется протонный пучок с энергией 120 ГэВ, а для исследования антикварковой структуры нуклонов мишени применяется процесс Дрелла–Яна. Измеряется асимметрия между антикварками $\bar{d}$ и $\bar{u}$ в «море» нуклона при использовании мишеней из жидкого водорода и жидкого дейтерия, а также других материалов. Один из проектов, реализуемых на этой установке, направлен на получение поляризованного протонного пучка для изучения спиновых эффектов. Однако генерация поляризованного пучка при высоких энергиях представляет собой серьёзную проблему. На низких энергиях протонный пучок можно легко поляризовать, но в кольцевом ускорителе с энергиями в несколько ГэВ сохранить поляризацию трудно. При многократном обращении протонов по кольцу с чередующимся градиентом поляризация теряется. В 1978 году Ya. S. Derbenev и A. M. Kondratenko (в то время работавшие в Новосибирске) предложили способ сохранения поляризации. Решение заключается в повороте спина протонов на 180 градусов дважды за один оборот. Следует отметить, что в горизонтальном ускорителе спины ориентированы вертикально, параллельно основному магнитному полю. Дербенев показал, что вращение спинов может быть осуществлено с помощью тороидального магнита, и

при использовании таких магнитов поляризация сохраняется в процессе ускорения. Ernest Courant назвал такие магниты «сибирскими змеями» (Siberian Snakes).

1.1. Программа CERN LHC. Large Hadron Collider в CERN сталкивает протонные пучки с энергией до 7,5 ТэВ, что приводит к столкновениям с энергией в системе центра масс около 13 ТэВ. Это эквивалентно взаимодействию космических протонов с энергией порядка 100 ПэВ со стационарными протонами. На установке работают четыре основных эксперимента. Эксперимент CMS является крупнейшим среди экспериментов LHC. В рамках этого сотрудничества ведётся поиск более массивных аналогов W- и Z-бозонов, а также более тяжёлых частиц с целым спином, соответствующих шести известным кваркам. Эксперимент LHCb занимается детальным изучением b-кварков и других тяжёлых кварков. Несмотря на планируемую модернизацию детектора, исследования будут продолжены с ещё большей точностью и сложностью на обновлённом LHC. Эксперимент ATLAS также представляет собой очень крупный детектор, аналогичный CMS, регистрирующий конечные состояния почти во всём телесном угле (порядка 4π стерадиан). Одной из его текущих задач является поиск свидетельств существования тёмной материи. Астрономические наблюдения подтверждают наличие тёмной материи, однако её природа остаётся неизвестной. Если предположить, что тёмная материя состоит из слабо взаимодействующих частиц с массой покоя, доступной для LHC, то данные ATLAS позволяют искать признаки их рождения. Эксперимент ALICE ориентирован прежде всего на изучение столкновений протонов с ядрами свинца (p–Pb) и их сравнение со столкновениями протон–протон (p–p) по распределениям продуктов реакции, струй частиц и другим характеристикам. Как и в случае LHCb, детектор ALICE охватывает меньший телесный угол по сравнению с ATLAS и CMS, однако получаемые результаты являются важными и представляют значительный интерес.

2. Физика мюонов. Одним из направлений исследований, которым в настоящее время занимается Fermilab, является физика мюонов. Протоны, ускоренные до энергии порядка 120 ГэВ, при взаимодействии с неподвижной мишенью рождают пионы; эти пионы со средним временем жизни около 28 наносекунд распадаются на лету в мюоны, имеющие время жизни около 2,2 микросекунды. Полученный поток мюонов можно захватывать, контролировать и использовать в

экспериментах. Например, в настоящее время в Фермилаб реализуется программа по более точному измерению величины «g–2» (гиромагнитного отношения мюона минус 2,000). Хотя такие измерения уже проводились в Brookhaven National Laboratory, а также в CERN начиная с 1960-х годов, в Фермилаб возможно достичь более высокой точности. Постоянный магнит накопительного кольца из Брукхейвена был перевезён в Фермилаб и будет использоваться — как и ранее — для проведения этих измерений. Среди других перспективных направлений физики мюонов обсуждается возможность создания «мюонного коллайдера». Положительные и отрицательные мюоны будут накапливаться и инжектироваться в накопительное кольцо, где они будут циркулировать в противоположных направлениях, а свойства их взаимодействий будут подробно изучаться. Подобно электрон-позитронным коллайдерам, в таких столкновениях будут рождаться и исследоваться интересные тяжёлые мезоны.

3. Физика нейтрино. Согласно современным исследованиям, существует три «аромата» нейтрино: электронные, мюонные и тау-нейтрино. Также имеются три массы нейтрино (каждая менее примерно 2 эВ), причём массовые состояния и ароматические состояния не совпадают. Нейтрино осциллируют между различными состояниями: например, нейтрино, возникающие в ядерных реакциях на Солнце, являются электронными нейтрино, однако при регистрации на Земле лишь около трети солнечного потока составляют электронные нейтрино; также наблюдаются сопоставимые количества мюонных и тау-нейтрино. Понимание сложной связи между тремя массовыми и тремя ароматическими состояниями нейтрино представляет собой необычную и сложную задачу. Цель современных нейтринных экспериментов — объяснить эту структуру и механизмы осцилляций. Существует два нейтринных эксперимента, в которых Fermilab выступает источником нейтрино. Эксперимент NOvA использует мюонные нейтрино, образующиеся при распадах пионов, которые, в свою очередь, возникают при взаимодействии протонного пучка с энергией 120 ГэВ. Нейтрино проходят через детектор массой около 300 тонн на территории Фермилаб и направляются к детектору массой 14 000 тонн, расположенному в шахте на севере штата Миннесота, на расстоянии 810 км. Детекторы используют ПВХ-ячейки размером 4×6 см, заполненные жидким сцинтиллятором. Если детектор в Фермилаб регистрирует почти

исключительно мюонные нейтрино, то в Миннесоте наблюдается смесь всех трёх ароматов. Данные NOvA позволяют уточнять параметры матриц, связывающих массовые и ароматические состояния нейтрино. Продолжением развития подводных нейтринных детекторов стал эксперимент IceCube — массив фотодетекторов объёмом около одного кубического километра во льдах Антарктиды (вблизи Южного полюса). Детектор представляет собой матрицу из 5160 фотодетекторов, каждый из которых является сферическим модулем с несколькими фотоумножителями. Они размещены в толще льда на глубине от 1,5 до 2,5 км. Хотя регистрируются нейтрино, возникающие при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли, основной целью является наблюдение космических нейтрино, приходящих непосредственно от своих источников — единственной компоненты космических лучей, которая не отклоняется галактическими магнитными полями и не поглощается в ядерных взаимодействиях. С 2012 года IceCube зарегистрировал 54 нейтринных события (по мюонам и электронным каскадам) в диапазоне энергий от 30 до 2000 ТэВ. Одним из обсуждаемых ранее явлений было возможное существование «стерильного нейтрино» — нейтрино, не обладающего ароматом, как три известных типа, и не участвующего в осцилляциях. Ряд экспериментов пытался обнаружить такие нейтрино, однако убедительных подтверждений получено не было. Недавние результаты IceCube дают серьёзные отрицательные свидетельства в отношении их существования.

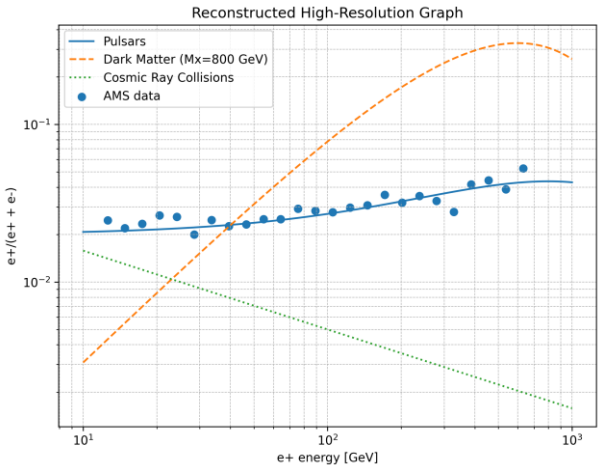


Рисунок 1. *Доля позитронов, e+/(e−+e+)e^+/(e^- + e^+)e+/(e−+e+), в суммарном потоке электронов и позитронов в диапазоне энергий от 10 до 1000 ГэВ.*

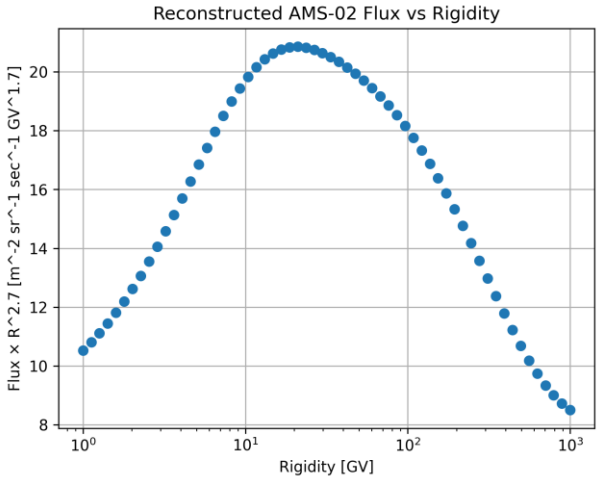


Рисунок 2. *Прецизионное измерение потока протонов в первичных космических лучах в*

диапазоне жёсткости от 1 ГэВ до 1,8 ТэВ, основанное на анализе 300 миллионов событий.

5. Тёмная материя. Несомненно, одной из главных загадок современной физики частиц и космологии является природа Dark Matter. Существование тёмной материи следует из наблюдений звёздной динамики галактик: орбитальные скорости звёзд во внешних областях галактик требуют большей галактической массы, чем та, которая наблюдается напрямую. Кроме того, искривление световых лучей от более удалённых объектов, проходящих вблизи галактики, также указывает на наличие массы, превышающей видимую. Эту «недостающую» массу наиболее просто объяснить наличием популяции массивных, но слабо взаимодействующих частиц. Будучи слабо взаимодействующими и не имея сильного или электромагнитного взаимодействия (подобно neutrino), такие частицы могли бы влиять на динамику галактик, но при этом не обладали бы легко наблюдаемыми свойствами. Однако если эти частицы участвуют хотя бы в слабых взаимодействиях, то, подобно нейтрино, они должны изредка вызывать наблюдаемые акты взаимодействия. Именно на этом основаны современные поиски тёмной материи, проводимые физиками элементарных частиц.

6. AMS-02. Одной из интересных программ, не включённых непосредственно в доклады данного симпозиума, является эксперимент AMS-02, установленный на борту International Space Station. Это крупный научный проект, возглавляемый профессором Samuel Ting из MIT. Изначальная цель Тинга заключалась в исследовании вопроса о том, содержат ли тяжёлые ядра (с большим атомным номером A) равные доли вещества и антивещества. Наблюдения электромагнитного излучения (свет, рентгеновское излучение, инфракрасное, радиоволны и т.д.) не позволяют различить, является ли источник веществом или антивеществом. Тинг предположил, что, поскольку галактики разделены значительными расстояниями, возможно, что часть из них состоит из антивещества. В этом случае изучение высокоэнергичных ядер космических лучей с определением их заряда и массы позволило бы обнаружить первичное антивещество. Сообщество исследователей космических лучей отнеслось к этой идее скептически, указывая, что галактики не настолько удалены друг от друга, чтобы не наблюдались эффекты аннигиляции вещества и антивещества. Такие процессы должны были бы проявляться, например, в виде

источников интенсивного гамма-излучения. Безусловно, проблема асимметрии вещества и антивещества во Вселенной остаётся нерешённой. Однако магнитный спектрометр космических лучей, предназначенный для измерения массы, энергии и электрического заряда ядер космических лучей, представляет собой эффективный инструмент для более глубокого понимания природы первичных космических лучей. Поэтому NASA одобрило концепцию, предложенную Тингом.

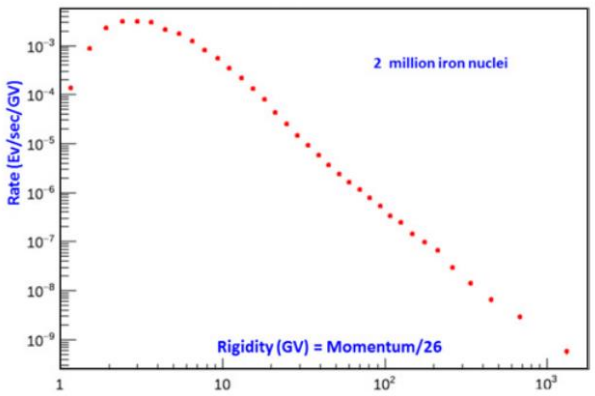


Рисунок 3. *Отношение потоков антипротонов к протонам в диапазоне энергий до 400 ГэВ.*

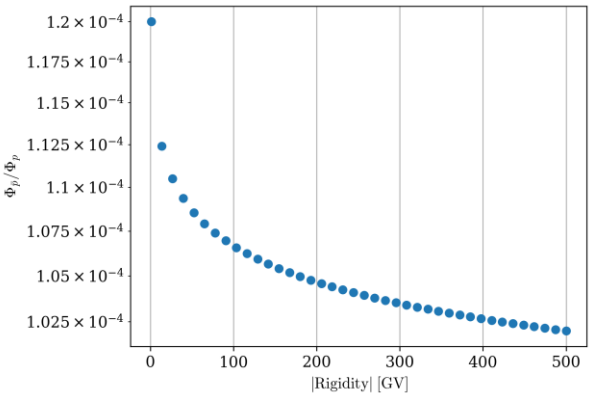


Рисунок 4. *Поток 2 миллионов ядер железа, измеренный в эксперименте AMS-02, в зависимости от энергии (импульса), делённой на заряд ядра Z=26, в диапазоне от 1 ГэВ до 1 ТэВ.*

Он приступил к созданию этого спектрометра, который должен был быть размещён на борту International Space Station — крупной орбитальной платформы, уже находившейся в космосе. Samuel Ting назвал свой детектор «Anti-Matter Spectrometer» (спектрометр антивещества), или AMS. Однако NASA не поддержало использование слова «Anti» в названии американской космической программы, и проект был переименован в «Alpha Magnetic Spectrometer» (при этом аббревиатура AMS сохранилась). Детектор представляет собой магнитный спектрометр, использующий постоянный магнит. Изначально рассматривалась возможность применения сверхпроводящего магнита, однако необходимость длительного (многолетнего) сбора данных сделала использование электромагнита непрактичным. Группа Тинга создала прототип — AMS-01, который был запущен ранее и продемонстрировал реализуемость проекта. Затем был создан и запущен AMS-02, который и по сей день работает на Международной космической станции, продолжая сбор данных. Размеры AMS-02 составляют примерно 3 × 4 × 5 м, а масса — около 7,5 тонн.

В состав детектора входят:

- детектор переходного излучения (Transition Radiation Detector),
- электромагнитный калориметр,
- кремниевый трекер,
- система измерения времени пролёта (Time of Flight),
- ринг-имиджинг черенковский детектор.

Общее число каналов детектирования составляет около 300 000. Обработка данных осуществляется 650 бортовыми компьютерами. Подробное описание установки AMS-02 приведено в статье журнала Physical Review Letters [1]. Следует отметить, что международная коллаборация AMS-02 включает более ста физиков, которые являются соавторами публикаций. Поэтому при ссылках на эти работы обычно указывается только имя Тинга как официального представителя проекта. Стоит также отметить, что, хотя основным местом работы Тинга является MIT, он давно тесно связан с CERN (Женева, Швейцария), где ранее был представителем эксперимента L3 на электрон-позитронном коллайдере LEP. В настоящее время на площадке CERN в Превессене имеется здание, занимаемое проектом AMS, где осуществляется сбор и анализ данных.

К данному тексту прилагаются рисунки 1–4, содержащие результаты эксперимента AMS-02: доля позитронов, спектр протонов, отношение потоков протонов и антипротонов, а также спектр ядер железа. Соответствующие публикации, в которых представлены эти и другие результаты, приведены в списке литературы [2,7].

Список литературы:

[1] S. C. C. Ting, Phys. Rev. Letters 110, 141102 (2013).

[2] Дустмуродов Э. Э. и др. КОМПЬЮТЕРНО-УПРАВЛЯЕМЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ //UNIVERSAL JOURNAL OF MATHEMATICAL THEORY AND COMPUTER SCIENCES. – 2025. – Т. 3. – №. 31. – С. 11-15.

[3] Hayrapetyan A. et al. Measurement of the production cross section of a Higgs boson with large transverse momentum in its decays to a pair of τ leptons in proton-proton collisions at s= 13TeV //Physics Letters B. – 2024. – Т. 857. – С. 138964.

[4] Дустмуродов Э. Э., Махмудова Д. Х., Файзиев Т. Б. ИССЛЕДОВАНИЕ АДРОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ //UNIVERSAL JOURNAL OF TECHNOLOGY AND INNOVATION. – 2025. – Т. 3. – №. 30. – С. 33-38.

[5] Дустмуродов Э. Э., Махмудова Д. Х., Юркевич Н. П. Образование частиц при релятивистском столкновении тяжелых ядер на LHC с помощью GEANT4. – 2023.

[6] Юлдашев Б. С. и др. Понимание бозона Хиггса с помощью LheC //SCIENTIFIC JOURNAL. – 2020.

[7] Dustmurodov E. et al. The concept of the FRITIOF (FTF) model //Science and innovation. – 2023. – Т. 2. – №. A5. – С. 51-53.