

Доклад по теме:
Национальная ускорительная лаборатория
им. Энрико Ферми (Fermilab)

Булгаков Александр
113М группа
alexandrbulgakov2014@gmail.com

Ноябрь 2021

Предисловие

В данном реферате будет представлен обзор ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми, более известной под сокращенным названием Фермилаб. Я немного расскажу про историю лаборатории, про её основные исследовательские установки, проводимые эксперименты и значимые открытия в областях физики элементарных частиц и физики высоких энергий, которые там были сделаны.

Фермилаб расположен в городе Батавия (штат Иллинойс, США) и наряду с ещё 16 национальными лабораториями (Jlab, SLAC, Brookhaven и др.) находится под юрисдикцией Министерства энергетики США.



Рис. 1: Вид на территорию Фермилаба с воздуха.

История и текущее положение вещей

Решение о постройке Национальной ускорительной лаборатории было принято в 1967 году президентом Линдоном Джонсоном. В 1974 году лаборатория была названа в честь Энрико Ферми. Первым директором Фермилаба был Роберт Р. Уилсон, известный физик и участник Манхеттенского проекта. Главной приписываемой ему заслугой было окончание строительства лаборатории раньше запланированного времени и в рамках выделенного бюджета. Главное здание лаборатории, имеющее уникальную форму, названо в честь Уилсона (рис. 2).



Рис. 2: Главное здание лаборатории.

В 1978 году Уилсон покинул пост директора лаборатории в знак протеста из-за проблем с финансированием лаборатории и его место занял Леон Ледерман. Под его началом был предложен проект преобразования первоначального большого ускорителя Фермилаба в коллайдер Теватрон. Во время директорства Ледермана этот ускоритель был запущен. В 1988 году Ледерман оставил свой пост и в настоящее время является почётным директором лаборатории в отставке. Образовательный центр Фермилаба был назван в его честь.

Фермилаб является одним из возможных мест постройки следующего за ЛНС коллайдера — ИЛС. Однако вследствие проблем с финансированием физики высоких энергий в США в 2008 году все работы по этому проекту были временно заморожены, и судьба ИЛС остаётся неопределённой.

За последние несколько лет рост бюджета Фермилаба был постоянно

ниже уровня инфляции и лаборатория была вынуждена пойти на сокращение персонала. В настоящее время основным проектом нового директора и администрации лаборатории является разработка и, в дальнейшем, строительство электрон-позитронного коллайдера ILС в Фермилабе. Однако, решением Конгресса США в 2008 году финансирование проекта ILС в США было урезано в 4 раза от запланированного. Это серьёзно уменьшает шансы Фермилаба построить этот ускоритель у себя. В 2008 году финансовое состояние лаборатории резко ухудшилось, и директор был вынужден объявить о предстоящем сокращении 10 % персонала.

В 2009 году Теватрон перестал быть самым высокоэнергетичным коллайдером в мире, так как был запущен Большой адронный коллайдер (LHC) в европейской лаборатории CERN в Женеве (Швейцария). Этот ускоритель частиц имеет большие размеры по сравнению с Теватроном (его длина составляет 27 км) и может ускорять протоны до энергии 7 ТэВ. Это соответствует энергии столкновения 14 ТэВ, то есть более чем в 7 раз выше, чем у Теватрона. Хотя Фермилаб продолжает играть важную роль в будущем развитии физики высоких энергий, но уступил почётное звание лидирующей лаборатории в этой области науки.

Исследовательские установки Фермилаба

В настоящее время основной исследовательской установкой Фермилаба является коллайдер Теватрон, расположенный в подземном кольцевом туннеле длиной 6,28 км. На 1 января 2007 года этот коллайдер являлся ускорителем с самой большой в мире энергией пучков частиц и светимостью, уступив первенство Большому адронному коллайдеру в 2009 году. Тэватрон — синхротрон, позволявший ускорять заряженные частицы — протоны и антипротоны в подземном кольце до энергии 980 ГэВ (~ 1 ТэВ), отсюда машина получила своё имя — Тэватрон.

Ускорение частиц в Тэватроне происходит в несколько этапов. На первой стадии 750-КэВный предускоритель (электростатический ускоритель на генераторе Кокрофта — Уолтона (рис. 3)) ускоряет отрицательно заряженные ионы водорода. Затем ионы пролетают 150-метровый линейный ускоритель (линак), ускоряющий частицы с помощью переменного электрического поля до энергии 400 МэВ. Затем ионы проходят через углеродную фольгу, полностью теряя электроны, но сохраняя кинетическую энергию; прошедшие сквозь фольгу протоны поступают в бустер.



Рис. 3: Умножитель напряжения Кокрофта — Уолтона.

Бустер — небольшой кольцевой магнитный ускоритель. Протоны пролетают около 20 000 кругов в этом ускорителе и приобретают энергию около 8 ГэВ. Из бустера частицы поступают в главный инжектор, выполняющий несколько задач. Он ускоряет протоны до энергии 150 ГэВ, производит протоны энергии 120 ГэВ для рождения антипротонов и ускоряет антипротоны также до 150 ГэВ. Последняя его задача — инжекция протонов и антипротонов в главное ускорительное кольцо Тэватрона. Антипротоны рождаются в так называемом антипротонном источнике, где протоны энергии 120 ГэВ бомбардируют неподвижную никелевую мишень. В результате рождается огромное число частиц разных типов, включая антипротоны, которые накапливаются и охлаждаются в накопительном кольце. Затем антипротоны инжектируются в главный инжектор.

Тэватрон ускоряет протоны и антипротоны до энергии 980 ГэВ, которая в 1000 раз больше, чем их масса, а скорость при этом очень мало отличается от скорости света. Тэватрон — машина коллайдерного типа. Это означает, что протоны и антипротоны летят в противоположных направлениях и сталкиваются в нескольких точках ускорительного кольца, где располагаются детекторы частиц. Всего в туннеле Тэватрона установлено 2 детектора — CDF и D0. Для того, чтобы удерживать частицы в

канале ускорителя, используются сверхпроводящие дипольные магниты, охлажденные до температуры жидкого гелия. Магниты создают магнитное поле напряженностью 4,2 Тесла.



Рис. 4: Теватрон.

Также заслуживает внимания установка, с помощью которой был проведен эксперимент Муон g-2. Для этого из Брукхевена в Фермилаб перевезли кольцо сверхпроводящего магнита (рис. 5).

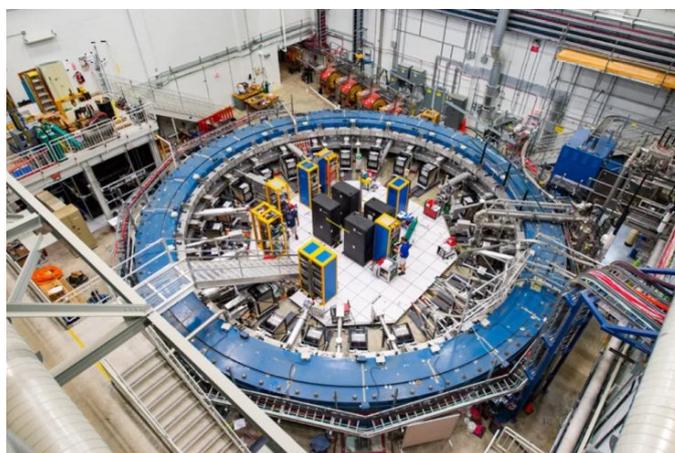


Рис. 5: Экспериментальная установка Муон g – 2.

Эксперименты Фермилаба и самые громкие открытия

Основными научными достижениями Фермилаба считают открытие тяжёлых b и t кварков. Существование третьего поколения кварков, включающего b - и t -кварки, было предсказано в 1973 году Макото Кобаяси и Тосихидэ Маскавой для объяснения явления нарушения CP -симметрии. Экспериментальное подтверждение данного предсказания получило в 1977 году в лаборатории Фермилаб коллаборацией Колумбия—Фермилаб—Стони Брук (руководитель — Леон Ледерман): в этом эксперименте была открыта Иpsilon-частица — векторный Υ -мезон, образованный b -кварком и b -антикварком. Почти сразу же последовало открытие возбуждённых состояний системы $b\bar{b}$: мезонных резонансов Υ' , Υ'' , Υ''' .

Поиски топ-кварка продолжались около 20 лет. Он был открыт в 1994—1995 годах в экспериментах на коллайдере Тэватрон в коллаборациями CDF и D0.

До запуска Большого адронного коллайдера Тэватрон был единственным в мире экспериментальным комплексом, где могла родиться пара t -кварков. Энергия сталкивающейся протон-антипротонной пары в системе центра масс на этом ускорителе равна 1,96 ТэВ. При такой энергии пары t -кварк + t -антикварк рождаются с сечением около 7 пикобарн, что совпадает с предсказанием Стандартной Модели (6,7—7,5 пикобарн для массы t -кварка 175 ГэВ).

Открытие t -кварка, многие свойства которого были предсказаны Стандартной Моделью, окончательно подтвердило реальность кварков.

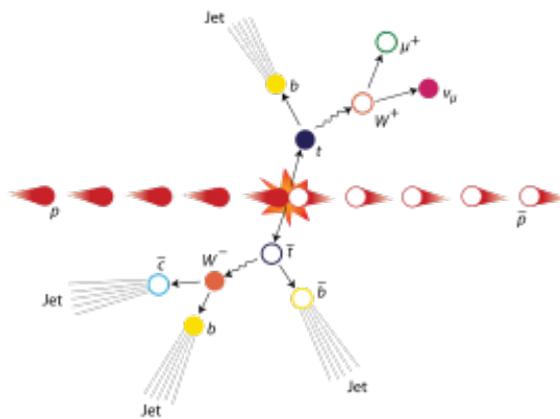


Рис. 6: Схема рождения $t\bar{t}$ пары в протон-антипротонном столкновении.

В 2000 году коллаборацией DONUT Фермилаба было заявлено о прямом наблюдении тау-нейтрино, что подтвердило существование последнего лептона, предсказанного Стандартной Моделью. В эксперименте DONUT протоны, ускоренные Тэватроном, использовались для образования тау-нейтрино посредством распада очарованных мезонов. После устранения как можно большего количества нежелательных фоновых частиц с помощью системы магнитов и объемного вещества (в основном железа и бетона) луч прошел через несколько слоев ядерной эмульсии. В очень редких случаях одно из нейтрино могло взаимодействовать в детекторе, создавая электрически заряженные частицы, которые оставляли видимые следы в эмульсии и могли быть зарегистрированы электронным способом с помощью системы сцинтилляторов и дрейфовых камер.

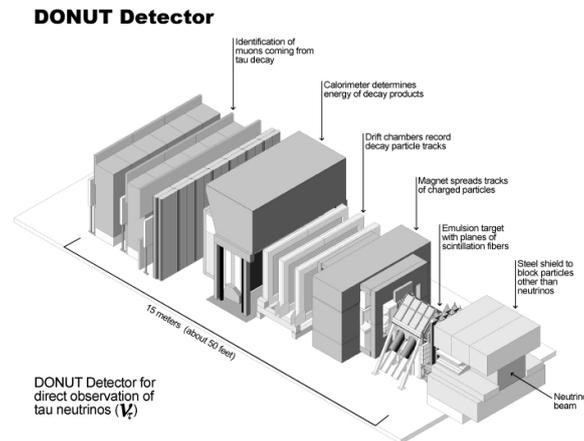


Рис. 7: Схема детектора DONUT

Недавно нашумевший эксперимент Muon g-2 увидел отклонения от Стандартной модели в измерениях магнитного момента мюона. Эксперимент Muon g-2 в Фермилаб, который должен с высокой точностью измерить значение аномального магнитного момента мюона, представил первые результаты в апреле этого года. Полученное значение совпало с результатами аналогичного эксперимента в Брукхейвенской национальной лаборатории, а вместе два измерения отличаются от предсказаний Стандартной модели со статистической точностью в $4,2\sigma$ (рис. 8). Такое отклонение от теории при дальнейшем уменьшении погрешности измерений может указать на существование еще не открытых частиц или сил в рамках Новой физики. Ученые рассказали о первых результатах на семинаре, а статья с подробным описанием эксперимента опубликована в журнале Physical Review Letters.

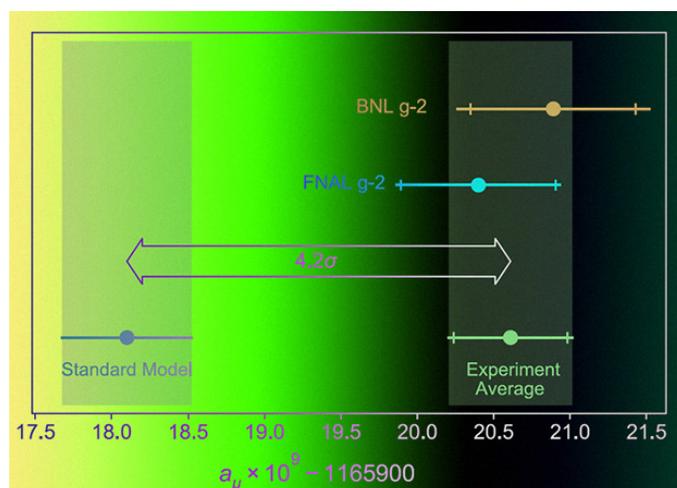


Рис. 8: Отклонение результатов Фермилаба и Брукхевена от СМ.

Физикам было интересно измерить аномальный магнитный момент мюона (который определяется как разность g -фактора мюона и 2, деленная пополам), ведь отклонение измерений от теоретических предсказаний могло бы указать на то, что мюон взаимодействует с неизвестными Стандартной модели массивными частицами или посредством неизвестных этой теории сил. Таким образом, отклонение аномального магнитного момента мюона от ожидаемого значения фактически подтверждало бы существование Новой физики.

Эксперимент Muon $g-2$ начинается с пучка протонов. Примерно 12 раз в секунду ускорители Фермилаба разбивают пучок протонов, примерно 10^{12} частиц, в фиксированную цель, создавая различные типы частиц. Ученые эксперимента Мюон $g-2$ интересуются возникающими пионами, которые быстро распадаются на мюоны, чьи спины указывают в одном направлении. Магниты направляют пионы и образующиеся мюоны в туннель треугольной формы, называемый кольцом доставки мюонов, который ранее использовался как часть источника антипротонов Фермилаба. Когда частицы проходят сотни ярдов по кольцу, практически все пионы распадаются на мюоны. Этот пучок мюонов затем переносится в прецизионное накопительное кольцо эксперимента, которое также использовалось в эксперименте в Брукхейвене. Этот электромагнит диаметром 50 футов расположен в мюонном кампусе Фермилаба (рис. 5).

Сам эксперимент, как и его брукхевенский аналог, основан на том, что частица с аномальным магнитным моментом при попадании в магнитное поле начинает прецессировать. Причем частота этой прецессии непосредственно зависит от величины аномального магнитного момента

частицы. Сам мюон, в свою очередь, является нестабильной частицей, а в ходе его распада рождается электрон, причем направление его вылета зависит от ориентации мюона в пространстве. Этим и воспользовались экспериментаторы: они запускали поляризованные пучки мюонов с энергией в 3,1 ГэВ в кольцо с крайне стабильным магнитным полем в 1,45 Тл и измеряли распределения вылета электронов в ходе распада мюонов. За самим магнитным полем физики следили с помощью эффекта магнитного ядерного резонанса, наблюдая за поведением изолированных в водной защите протонов.

Также стоит кратко упомянуть и менее масштабные открытия, сделанные в Фермилабе:

- 18 ноября 1996 года было заявлено о получении 7 атомов антиводорода, впоследствии число полученных атомов возросло до нескольких сотен. Целью эксперимента является изучение спектра антиводорода и его сравнение со спектром водорода.
- 5 марта 1998 года было объявлено об открытии B_c^+ -мезона, состоящего из c и \bar{b} -кварков.
- 1 марта 1999 года было объявлено об открытии ещё одного вида нарушения CP-инвариантности при изучении распада нейтральных каонов (эксперимент KTeV).
- 17 марта 2009 года было объявлено о регистрации новой элементарной частицы $Y(4140)$, распад которой на J/Ψ -мезон и Φ -мезон не описывается в рамках Стандартной модели. 15 ноября 2012 года коллаборацией CMS, работающей на LHC, было объявлено о подтверждении наблюдения данной частицы со статистической значимостью более 5σ .

Интересное

- Небольшое стадо бизонов, заведенное во времена основания лаборатории, живёт на территории Фермилаба, символизируя связь между фронтиром современной физики в Фермилабе и фронтиром прошлого — прериями. Некоторые из местных жителей считают, что бизоны были завезены для использования в виде живого детектора радиации, если уровень радиации достигнет опасного уровня. Однако, Фермилаб объявил, что утверждения подобного рода не имеют под собой оснований.



Рис. 9: Талисман Фермилаба с детёнышем.

- Пруды вдоль колец Теватрона отводят тепло от ускорителей (рис. 10).



Рис. 10: Теватрон и пруды вокруг него.

- В честь Фермилаба был назван астероид 11998 Фермилаб.

Список литературы

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/Fermilab>
2. <https://kot.sh/statya/3389/fermilab-iznutri>
3. <https://en.wikipedia.org/wiki/Tevatron>
4. <https://nplus1.ru/news/2021/04/08/muon-g-2-first-results>