



Из истории науки

ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ t -КВАРКА

К.В. Астрелина

В контексте истории становления и развития Стандартной модели воссоздана история открытия t -кварка. Описаны эксперименты по его поиску.

Ключевые слова: Стандартная модель, кварк, эксперимент, теория, история

Зарождение и развитие Стандартной модели

Как известно сейчас, окружающее нас вещество и мы сами построены из атомов, состоящих из электронов и ядер, а последние, в свою очередь, состоят из протонов и нейтронов. Протоны и нейтроны принадлежат к классу участвующих в сильном взаимодействии частиц, называемых адронами. Не участвующий в сильном взаимодействии электрон входит в группу лептонов.

Представление о строении материи и физике элементарных частиц существенно изменилось за последнее столетие. В 1928 г., когда П. Дирак предложил знаменитое уравнение для электрона, науке были известны только следующие частицы: электроны, протоны и фотоны. Д.Ж. Максвелл к этому времени уже сформулировал уравнения, описывающие движение фотона. Теорией распространения света в разное время занимались А. Эйнштейн, Ш. Бозе и др., пока в 1927 г. П. Джордан и В. Паули не предложили математическую схему для описания движения свободных фотонов в соответствии с теорией Максвелла о квантовании свободного поля. Более того, протон, так же как и электрон, по видимому, достаточно хорошо описывался уравнением Дирака. Электромагнитное взаимодействие, характеризующее влияние фотонов на протоны и электроны, отлично укладывалось в калибровочное уравнение Дирака. Тогда же, в 1927 г., Дирак начал формулировать теорию, описы-

вающую взаимодействие электронов (или протонов) с фотонами (так называемую квантовую электродинамику). Таким образом, в руках у физиков уже имелись основные инструменты для описания всех известных элементарных частиц и их наиболее явных взаимодействий.

В это же время ученые начали осознать, что если бы дираковские протоны и электроны, взаимодействующие с помощью электромагнетизма, были единственной составляющей атомов, включая атомные ядра, то все известные нуклоны, кроме ядра водорода, состоящего из единственного протона, моментально бы развалились из-за электростатического расталкивания положительных зарядов, преобладающих в ядре. Следовательно, должно существовать некое очень *сильное* взаимодействие, притягивающее друг к другу составляющие атомного ядра и удерживающее их вместе. Открытие нейтрона в 1932 г. показало, что популярная в то время протонно-электронная модель для ядер требует переосмысления. А радиоактивность, известная со времен опытов А. Беккереля над ураном, оказалась результатом действия еще одного типа взаимодействия – слабого [1].

Открытие в 1935–1950 гг. все новых и новых элементарных частиц – нейтрино, мюонов, пионов и многих других – требовало создания схемы, систематизирующей все известные частицы и их взаимодействия. Первыми шагами к созданию Стандартной модели, помимо наблюдения и предсказания новых элементарных частиц и измерения новых констант, стали создание Р. Фейнманом, Д. Швингером и С. Томаногой ковариантной квантовой электродинамической теории (1948 г.), идея Б. Понтекорво и аналогичный вывод Дж. Уилера, Д. Ли, М. Розенблута и Ч. Янга об универсальности слабых взаимодействий в процессах радиоактивного распада и радиоактивного захвата (1947–1949 гг.); демонстрация Ч. Янгом и Р. Миллсом изотопической калибровочной инвариантности в квантовой теории поля (1954 г.) и еще ряд открытий [2].

В 1954 г. Дж. Фридман и В. Телегди обнаружили нарушение CP -четности в слабых распадах. В 1957 г. Д. Швингером, а также Д. Ли и Ч. Янгом была предложена идея о существовании векторного бозона – переносчика слабых взаимодействий, а в 1961 г. Ш. Глэшоу предположил существование еще и нейтрального бозона [3]. Благодаря введению понятия нейтральных и векторных бозонов как переносчиков слабого взаимодействия стало возможным объединить слабые взаимодействия с электромагнетизмом [4].

В 1963 г. Н. Кабиббо ввел в обиход понятия нейтральных токов и угла Кабиббо [5]. В 1964 г. М. Гелл-Манн и Дж. Цвейг впервые ввели

понятие кварка как элементарной частицы, входящей в состав тяжелых частиц – адронов (названия «адроны» и «лептоны» для двух классов фундаментальных частиц были предложены в 1948 г. Л. Розенфельдом [6]). На тот момент было известно о существовании трех кварков: u – верхнего, d – нижнего и s – странного. Дж. Бьоркен и Ш. Глэшоу в том же году выдвинули гипотезу о существовании четвертого кварка – c . Этот четвертый кварк симметрично вписывается в модель, содержащую четыре кварка (u, d, s, c) и четыре лептона (e^-, ν_e, μ^-, e_μ), и позволяет объединить ее с *GIM*-механизмом.

В результате начала формироваться картина мира, которую впоследствии назвали Стандартной моделью и в которой вещество представлено двумя наборами фундаментальных частиц-фермионов, именуемых лептонами и кварками. Отдельную группу составляют переносчики взаимодействий (электромагнитного, слабого, сильного) в виде набора бозонов (фотон, бозоны W^+, W^-, Z^0 , глюон).

В 1973 г. М. Кобаяси и Т. Маскава предсказали существование третьего поколения кварков, чтобы объяснить нарушение *CP*-симметрии при распаде каона K [7]. Новые гипотетические кварки получают названия *top* и *bottom* – в пару к кваркам первого поколения *up* и *down*.

Эксперименты по поиску t -кварка

В 1977 г. пятый кварк – b -кварк (боттом-кварк, донный кварк либо прелестный, красивый кварк – от англ. beauty) был открыт в эксперименте E288, проводимом в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (Фермилаб, Батавия, США) группой физиков под руководством Л. Ледермана. Масса покоя новой частицы составила 4,7 ГэВ [8]. Из того, что первые два поколения насчитывают по паре кварков, можно было предположить существование еще одного кварка третьего поколения, которое к тому же было уже предсказано.

В 1978 г. был открыт t -лептон – фундаментальная частица Стандартной модели, принадлежащая к третьему поколению лептонов [9].

Описание стандартного эксперимента по поиску пары t -кварков. Наиболее естественный способ получения t -кварка (t -кварк либо истинный кварк – от англ. true) состоит в том, чтобы сосредоточить на малом участке пространства большое количество энергии с помощью соударения двух заряженных частиц. В месте соударения образуются высокоэнергетические фотоны, которые могут, в свою очередь, распадаться на адроны:

$$p^+ p^- \rightarrow (\gamma) \rightarrow \text{hadrons}$$

Из сохранения заряда и ряда других параметров следует, что топ-кварк образуется не сам по себе, а вместе с антитоп-кварком – частицей противоположного заряда. Мезон, состоящий из пары tt -кварков, называется топнием.

Топ- и антитоп-кварки распадаются практически мгновенно, их время жизни составляет порядка 10^{-24} с. Согласно предсказаниям Стандартной модели топ-кварк, если он имеет достаточно большую массу, почти всегда распадается на W -бозон и b -кварк. Пара tt -кварков, таким образом, образует два W -бозона и пару bb -кварков. Ни W -бозон, ни b -кварки также не имеют достаточного времени жизни, чтобы их можно было пронаблюдать напрямую.

Надо сказать, что кварки по отдельности вообще ненаблюдаемы. Сильное взаимодействие, которое удерживает кварки вместе, гарантирует, что их можно экспериментально наблюдать только в виде пар и троек – мезонов и барионов соответственно. Если в процессе соударения встречных пучков рождается кварк, то он непременно будет окружен облаком из других кварков или антикварков. Наблюдаемым объектом является так называемый направленный ток – пучок, состоящий из набора частиц, движущихся в том же направлении, что и исходный кварк.

В случае t -кварка это не совсем верно. Его время жизни составляет 10^{-25} с, что в 20 раз меньше временной шкалы сильного взаимодействия. Ввиду короткого времени жизни t -кварк не успевает после возникновения адронизоваться (стать частью адрона) и ведет себя как «голый» кварк. Таким образом, не существует адронов, содержащих валентный t -кварк (но виртуальные t -кварки, строго говоря, присутствуют в любом адроне).

При распаде W -бозона на кварк и антикварк на детекторе наблюдается два направленных тока. Кроме того, W -бозон может распасться по лептонному механизму – на пару лептонов, принадлежащих к одному поколению: заряженную частицу и нейтрино. Электрон и мюон можно наблюдать на детекторе напрямую, τ -лептон быстро распадается, затрудняя идентификацию события, а нейтрино регистрируются детектором только по тому признаку, что уносят с собой из системы часть импульса. Таким образом, при обработке данных необходимо учитывать все возможные каналы распада t -кварка.

Основную, хотя и типичную, проблему представляло то, что масса нового кварка была неизвестна, за исключением того, что она должна

быть больше массы b -кварка. Поиск новой частицы требовал сканирования энергетического диапазона выше 4,7 ГэВ [10].

Первые попытки поиска t -кварка в эксперименте. Эксперименты по поиску t -кварка впервые были начаты в Национальной ускорительной лаборатории SLAC (Стэнфорд, США) и исследовательском центре DESY (Гамбург, Германия).

В Германии эксперимент по поиску топ-кварка производился на PETRA – электрон-позитронном ускорителе с энергией сталкивающихся пучков до 19 ГэВ, а также на ускорителях DORIS и ARGUS. Однако поиск новой частицы в доступном диапазоне энергии до 36,74 ГэВ результатов не дал. При обработке данных эксперимента было предложено несколько моделей, объясняющих, почему t -кварк не был обнаружен. Выводы можно было разделить на две основные группы:

- 1) Масса t -кварка больше. В некоторых моделях содержались оценки, предсказывающие порог рождения топ-кварка в районе 38 ГэВ;
- 2) Топ-кварка не существует. В предложенных моделях b -кварк представлял собой слабый изоспинный синглет (или триплет), распадающийся под действием нейтральных токов на кварк с зарядом $-1/3e$ и пару фермион – антифермион [11].

Эксперимент, проведенный на электрон-позитронном коллайдере TRISTAN в Национальной лаборатории физики высоких энергий – KEK (Япония), установил нижний предел массы t -кварка в 30,7 ГэВ [12], эксперимент на детекторе CLEO (Корнелл, США) – в 50 ГэВ [13].

В Стэнфордском центре линейного ускорения (SLAC, так прежде называлась Национальная ускорительная лаборатория) также шел поиск нового кварка. Основу эксперимента, осуществленного в SLAC, составляет линейный ускоритель электронов и позитронов на 50 ГэВ. Эксперимент на встречных пучках проводился на ускорителе SLC (Стэнфордский линейный коллайдер), сталкивающим электроны и позитроны с энергией 90 ГэВ в системе центра масс. Поиск кварка производился с расчетом на то, что верна гипотеза, согласно которой масса t -кварка достаточно мала, для того чтобы он мог получаться из распада Z - или W -бозона на пару tt . Масса t -кварка оценивалась в 40 ГэВ [14].

Эксперимент «Mark II» в 1989 г. также завершился без положительного результата. Нижний предел массы топ-кварка был установлен на 40 ГэВ [15].

Аналогичные исследования проводились на ряде других ускорителей, все с большими энергиями частиц, но без особого успеха.

Эксперимент на синхротроне SPS в ЦЕРНе. В 1978 г. в ЦЕРНе была принята новая программа эксперимента по столкновению протонов с антипротонами на ускорителе SPS (Super Proton Synchrotron). В эксперименте планировалось использование антипротонного источника со стохастическим охлаждением.

SPS был запущен в 1976 г. Проект синхротрона предполагал работу с протонными пучками на энергии 300 ГэВ, но большая часть экспериментов проводилась на энергии 400 ГэВ. В 1981 г. на SPS стартовал эксперимент UA1 (сокращения от Underground Area). В 1983–1985 гг. нижний предел массы t -кварка был определен в 41 ГэВ [16].

В результате работы SPS в 1983 г. в столкновениях протонов и антипротонов на энергиях свыше 315 ГэВ были получены две новые частицы: W - и Z -бозон. В то время как кварки и лептоны образуют материю, бозоны служат для передачи взаимодействий, в первую очередь слабого взаимодействия, отвечающего за некоторые виды ра-

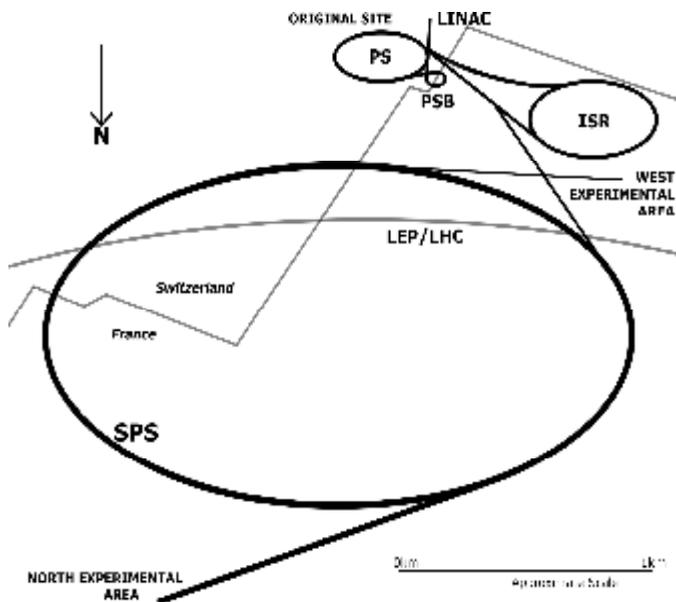


Рис. 1. Схема размещения ускорителей ЦЕРНа

диоактивного распада. Это открытие послужило очередным подтверждением Стандартной модели, предсказавшей массы бозонов. Ожидалось, что именно в ЦЕРНе должно произойти в скором времени открытие топ-кварка.

Тем не менее задача оставалась непростой. При столкновении протонов и антипротонов высоких энергий взаимодействие фактически происходит между их кварками и глюонами. Каждый кварк содержит только небольшую долю полной энергии протона или антипротона, а соударение должно быть достаточно сильным, чтобы было возможным рождение топ-кварка. Такие столкновения достаточно редки, и чем выше требуемая энергия взаимодействия, тем они реже.

Осуществленные в 1987 г. реконструкция антипротонного источника и добавление накопительного кольца АСОЛ позволили увеличить светимость SPS в 6 раз. Тем не менее в диапазоне энергий до 61 ГэВ (эксперимент UA1) и до 67 ГэВ (эксперимент UA2) t -кварк обнаружен не был, хотя наблюдаемые в экспериментах события с участием изолированных мюонов в очередной раз подтвердили правильность оценок, полученных на основе стандартной модели.

К 1989 г. топ-кварк в ЦЕРНе так и не был обнаружен. Нижний предел массы t -кварка был установлен на энергии покоя 41 ГэВ. В то же время вышел на полную проектную мощность Теватрон – ускорительный комплекс Фермилаба.

Проект и строительство ускорительного комплекса Теватрон.

После того как в 1977 г. был открыт b -кварк, в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми произошел ряд изменений, и в частности сменилось руководство – пост директора занял Л. Ледерман, сменивший Р. Уилсона. Было принято решение о масштабной реконструкции ускорительного комплекса для новых экспериментов.

На тот момент основные эксперименты в Фермилабе проводились на столкновении протонного пучка с неподвижной мишенью. В состав ускорительного комплекса входили источник протонов, линейный ускоритель на 200 МэВ, бустер, синхротрон Main Ring (основное кольцо) с радиусом 1 км для накопления и ускорения протонов до энергии 200 ГэВ и перепускные каналы, направляющие ускоренные протоны на мишени.

В 1978 г. было принято решение о создании ускорителя-дублера, который будет располагаться в том же туннеле, что и основное кольцо. Использование сверхпроводящих магнитов позволило увеличить энергию протонов вдвое – до 400 ГэВ, а новое кольцо получило название накопителя-удвоителя энергии (Energy Saver/Doubler).

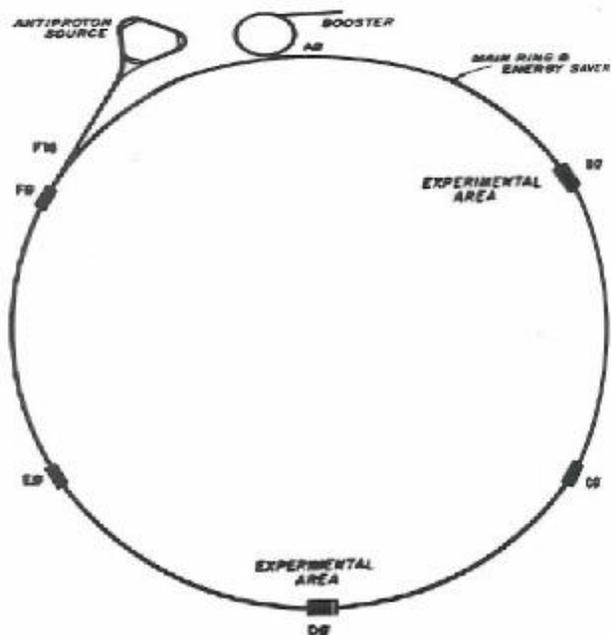


Рис. 2. Схема эксперимента на Теватроне-1

В 1981 г. был выдвинут на обсуждение проект Теватрона-1, разработанный Д. Янгом и Ф. Миллсом, где было предложено сталкивать пучки протонов с антипротонами в кольце-дублере на энергии 1,8 ТэВ в системе центра масс. Требовалось разработать специальный антипротонный источник – систему линейных и циклических ускорителей для производства, накопления античастиц и формирования пучка с параметрами, пригодными для использования этого пучка в коллайдере. Для регистрации элементарных частиц, образующихся при соударениях встречных пучков, была начата разработка проекта детектора CDF (Collider Detector Facility).

В первоначальном проекте предполагалась следующая схема эксперимента. Пучок протонов из бустера, состоящий из 13 сгустков, запускается в основное кольцо для ускорения до энергии 80 ГэВ, затем направляется на мишень. Полученные антипротоны проходят две стадии охлаждения – стохастическое охлаждение, а затем электронное в отдельном 200-метровом кольце, где происходит накопление анти-

частиц, а затем их ускорение до 8 ГэВ. Далее пучок антипротонов снова направляется в основное кольцо, где ускоряется до энергии 150 ГэВ, а потом перепускается в накопитель-дублер (теперь – протон-антипротонный коллайдер Теватрон), где происходит дальнейшее ускорение до 900 ГэВ, необходимых для эксперимента. Предполагаемое число антипротонов в сгустке составляло 10^{11} частиц, время накопления – около 13 часов, а пиковая светимость – $10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

При рассмотрении проекта протонного источника он был признан соответствующим заявленным параметрам накопления и светимости, но сами эти параметры – заниженными. В итоге был принят предложенный Л. Ледерманом альтернативный проект антипротонного источника, в котором сгусток антипротонов сначала попадал в дебанчер со стохастическим охлаждением, а затем в аккумулятор, где адиабатическое уменьшение температуры происходило во время накопления частиц в пучке, что позволило уменьшить время накопления [17].

Строительство Теватрона было завершено в 1983 г., а в 1985 г. в эксперименте на CDF начался сбор данных, получаемых из столкновений протонов и антипротонов. Детектор CDF состоял из магнитного спектрометра, вокруг которого были расположены калориметр и мюонная камера. Для измерения импульса заряженных частиц использовалась центральная трековая камера (СТС), помещенная внутри сверхпроводящего соленоидального магнита с полем 1,4 Тл. За пределами СТС электромагнитный и адронный калориметры отслеживали процессы в области с псевдобыстротой $\eta < 4,2$ для регистрации нейтральных токов и электронов. Калориметры использовались также для измерения недостающей поперечной энергии, которая может указывать на присутствие незарегистрированных нейтрино. Дрейфовая камера за пределами калориметров использовалась для идентификации мюонов [18].

К 1988 г. Теватрон уже достиг проектной светимости $10^{31} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на энергии 900 ГэВ и включился в соревнование по обнаружению t -кварка с SPS. Независимая интенсивная работа двух групп – из ЦЕРНа и из Фермилаба к концу 1970-х годов так и не принесла положительного результата. По совокупным результатам была установлена новая нижняя граница для рождения t -кварка – 77 ГэВ [19].

Тем временем SPS достиг своих предельных возможностей по энергии и выбыл из гонки. В то время как Теватрон продолжал наращивать энергию столкновений, в ЦЕРНе уже не было возможностей создать топ-кварк с энергией больше, чем 77 ГэВ. Тогда же руково-

дство Фермилаба пришло к выводу, что на Теватроне необходимо создать второй детектор.

В 1990–1992 гг. Теватрон был остановлен и реконструирован. За это время на нем был построен еще один детектор – D0 (DZero), получивший свое название по сектору по сектору коллайдера, в котором он расположен. CDF был дополнен кремниевым вершинным детектором, разработанным и собранным в Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли (США) [20].

В то же самое время ряду изменений подвергся и сам Теватрон. В кольце коллайдера с помощью электростатических сепараторов равновесная орбита циркулирующих пучков была заменена на спиральную, и таким образом число мест встречи было уменьшено с двенадцати до двух (в детекторах). В двух оставшихся местах встречи были добавлены специальные вставки для лучшего согласования бета-функций. Энергия линейного ускорителя была поднята с 200 до 400 МэВ. Кроме того, был сделан ряд улучшений в управлении и средствах диагностики ускорителя [21].

Работа обновленного Теватрона-1b была продолжена в 1992 г. Теперь гонка за первенством в открытии топ-кварка продолжилась между двумя группами одной лаборатории, поскольку коллаборации CDF и D0 работали независимо. Польза от подобного дружеского соревнования была двойная: во-первых, оно способствовало ускоренному получению результата в условиях конкуренции, а во-вторых, дополняющие друг друга эксперименты позволяли избежать получения ложных результатов. Преимущество детектора CDF – способность тщательно фиксировать треки отдельных частиц в магнитном поле с помощью кремниевого вершинного детектора SVL, что позволяет измерить их импульсы, а детектора D0 – наличие сегментированного калориметра, который позволяет измерять энергию соударения с высокой точностью.

Обработка данных с детекторов Теватрона

В августе 1992 г., когда Теватрон был запущен вновь и стали поступать первые данные с D0, нижний предел массы t -кварка был поднят до 91 ГэВ. Данный факт, помимо всего прочего, подтвердил, что единственный способ образования t -кварка – рождение пары tt из высокоэнергетических фотонов. Если бы масса топ-кварка оказалась меньше 75 ГэВ, то он мог бы образовываться в результате распада W -бозона.

Спустя три месяца, в октябре 1992 г., на CDF было зафиксировано первое событие – кандидат на рождение t -кварковой пары. Вскоре аналогичное событие было замечено и на D0.

Одиночного события недостаточно для открытия, потому что вероятность того, что оно может оказаться фоновым, недопустимо велика. Так что наблюдения продолжились, а обработке полученных данных было уделено еще более пристальное внимание. Для обработки событий было задействовано три группы экспериментаторов – по числу вероятных каналов распада t - t .

Еще один год спустя в исследованиях на CDF предел массы t -кварка был поднят до 108 ГэВ, а на D0 – до 133 ГэВ. В июне 1993 г. была предпринята первая попытка объединить результаты трех разных анализов, сделанных на CDF. Неоднозначные по отдельности, вместе они составляли убедительное доказательство того, что наблюдаемые события действительно связаны с рождением кварковой пары. Было изолировано 12 событий из более чем 10^{12} соударений в детекторе. Масса t -кварка, вычисленная на основе реконструкции процессов, составила приблизительно 175 ГэВ, а вероятность того, что события являются фоновыми, – $1/400$. Полученный результат был опубликован как предварительный в 1994 г.

В то же время в результатах, представленных группой, работавшей на D0, было зафиксировано только одно, самое первое событие. Поэтому при представлении в 1994 г. результатов, касающихся поиска топ-кварка, команда LHC ограничилась докладом о новом значении нижнего предела масс в 131 ГэВ [22]. Впоследствии обнаружилось, что группа, обрабатывающая данные, производила расчеты, предполагая меньшую массу t -кварка [23].

Меньше чем через год, 2 марта 1995 г., после получения дополнительных данных и более тщательной обработки уже полученных данных обе команды – работавшие на CDF и на D0 представили результаты, в которых было объявлено об открытии t -кварка с достоверностью 99,9998%. По уточненным расчетам, масса новой частицы составила 175,6 ГэВ.

Т-физика после открытия кварка. Эксперименты с t -кварком и изучение так называемой t -физики на Теватроне продолжались. До введения в эксплуатацию в 2009 г. Большого адронного коллайдера Теватрон оставался единственным в мире ускорителем, способным производить t -кварки. В 1996 г. программа «Теватрон-1» была завершена, а работа комплекса остановлена. За четыре года коллайдер набрал 100 pb^{-1} интегральной светимости.

После остановки комплекса была проведена еще одна масштабная его модификация, результатом которой стал запуск новой исследовательской программы «Теватрон-2». Теперь предварительное ускорение протонов и антипротонов до 150 ГэВ стало производиться не в основном кольце, а в новом кольце основного инжектора (Main Injector) с периметром 3,3 км, выполняющем эту задачу более эффективно. В 1997 г. основное кольцо было окончательно выключено, а магниты демонтированы. В его туннеле остался только один ускоритель – протон-антипротонный коллайдер Теватрон [24].

Была добавлена третья стадия охлаждения пучка в кольце рециркулятора (Recycler) с помощью стохастического и электронного охладителей. Энергия в системе центра масс сталкивающихся пучков была поднята с 1,8 до 2 ГэВ. В марте 2001 г. Теватрон-2 начал работу.

За время работы Теватрона-2 с t -кварками были уточнены масса кварка и сечения реакций распада, исследованы уширение массы и поляризация. При изучении поляризованных продуктов распада t -кварка был обнаружен ряд расхождений со Стандартной моделью [25].

В 2009 г. был открыт одиночный t -кварк. До этого момента наблюдаемые топ-кварки образовывались за счет сильного взаимодействия ядер, что приводило к получению в результате реакции пары кварков tt . Образование одиночного t -кварка – результат действия слабых ядерных сил, и реакцию с участием одиночного кварка труднее иденти-



Рис. 3. Теватрон-2 (после реконструкции 1996–2000 гг.)

фицировать. Поэтому обнаружение одиночного t -кварка произошло через 14 лет после открытия самого кварка [26].

По крайней мере еще один интересный результат получен при изучении t -кварков. Согласно Стандартной модели после столкновения протона и антипротона и образования пары кварков $t\bar{t}$ продукты распада кварка и антикварка должны разлетаться на 180° в направлении движения протона и антипротона соответственно. На практике, как обнаружилось после обработки примерно 1200 событий, связанных с образованием кварковых пар, существует небольшой угол, на который направления разлета отличаются от противоположных. Данный угол, как оказалось, отличается от рассчитанного на основе Стандартной модели более чем на две величины стандартного отклонения, что свидетельствует об асимметрии материи и антиматерии, выходящей за пределы Стандартной модели. И данный эффект растет при увеличении энергии столкновения встречных пучков. На настоящий момент имеется гипотеза, что на асимметрию разлета влияет некая тяжелая, но пока не открытая частица [27].

Есть гипотеза, что кроме t -кварка существует подобная ему частица, называемая t' -кварком, которая имеет те же свойства, что и сам t -кварк, но большую массу. Исследования, проведенные на CDF, на 95% исключили возможность существования t' -кварка с массой меньше 238 ГэВ [28].

Помимо t -физики новым объектом «охоты» для Фермилаба стала последняя не обнаруженная элементарная частица из Стандартной модели – бозон Хиггса. Принцип поиска новой частицы тот же, что применялся при поиске t -кварка – сканирование энергетического диапазона и исключение областей, в которых не обнаружено событий, указывающих на возможное рождение бозона Хиггса.

Параметры Теватрона позволяют производить поиск так называемого «легкого» бозона Хиггса. Результаты обработки данных, полученных с начала работы Теватрона-2, указывают на возможное наличие бозона Хиггса в области энергий от 158 до 173 ГэВ (результат, опубликованный в марте 2011 г., совокупные данные, полученные на D0 и CDF). Для сравнения: предыдущие эксперименты определили для бозона Хиггса промежуток от 114 до 185 ГэВ. Для увеличения точности результатов требуется обработка дополнительных данных [29].

При тех параметрах светимости Теватрона, которые имеются в настоящий момент, и если масса бозона Хиггса действительно находится в данном диапазоне, требуется в течение еще примерно трех лет наби-

рать статистику, чтобы достигнуть точности 99,9998%, которая соответствует достоверному результату и может быть представлена как открытие. Данное соображение послужило причиной того, что сотрудники Фермилаба подавали заявку на продление работы Теватрона еще на три года, хотя окончание программы эксперимента было запланировано на осень 2011 г. К сожалению, в продлении эксперимента было отказано.

В специальном обращении директора Фермилаба П. Оддона к сотрудникам лаборатории, опубликованном в январе 2011 г. [30], сообщалось, что Министерство энергетики США, финансирующее исследования в Фермилабе, не поддержало заявку физиков на продление работы коллайдера до 2014 г. Это означает, что ученые, за 20 лет работы на коллайдере получившие много интересных результатов и продолжающие ударными темпами наращивать статистику, не смогут сделать «финишный рывок» и открыть бозон Хиггса на каком-либо существенном уровне статистической значимости. Для лаборатории закрытие Теватрона будет означать, что приоритет в ближайшем будущем получат иные проекты Фермилаба: нейтринный эксперимент LBNE, разработка мюонного коллайдера, проект нового ускорителя высокой интенсивности Project X и др. Экспериментальная же физика элементарных частиц при сверхвысоких энергиях после остановки Теватрона всецело перейдет к LHC.

* * *

Среди открытых в настоящее время элементарных частиц t -кварк остается самой тяжелой, а время, прошедшее между его теоретическим открытием «на кончике пера» и экспериментальным обнаружением – 22 года – самым долгим. В поисках неуловимой элементарной частицы в разное время участвовали ведущие мировые исследовательские центры, поднимая планку области, называемой физикой высоких энергий, а техническая оснащенность и возможности ускорителей элементарных частиц выросли на порядки.

Точно так же развивалась физика детекторов: повышалась точность измерений, разрабатывались новые системы регистрации элементарных частиц.

Кроме того, исследование предполагаемых свойств t -кварка привело к обнаружению ряда интересных закономерностей, связанных со Стандартной моделью вообще, а также некоторых других элементарных частиц. В частности, за несколько лет, предшествовавших откры-

тию t -кварка, было обнаружено, что прецизионные измерения масс электрослабых векторных бозонов очень чувствительны по отношению к массе t -кварка. Этот эффект становится гораздо существеннее, если рассматривать более высокие значения массы t -кварка, и, следовательно, косвенно указывает на существование t -кварка, даже если бы его не удалось воспроизвести в эксперименте. Наиболее ярко эффект проявился при исследовании T -параметра, и в 1994 г. точность подобных косвенных измерений помогла сделать предсказание о массе t -кварка, указывающее промежуток между 145 и 185 ГэВ. Именно за развитие данной методики, которая позволила произвести столь точные измерения, Дж. Хуфт и М. Велтман получили в 1999 г. Нобелевскую премию [27]. А в 2008 г. Нобелевской премией наконец было отмечено открытие М. Кобаяси и Т. Маскавы – объяснение CP -нарушения существованием третьего поколения кварков, – с него, как мы помним, и был начат поиск двух самых тяжелых кварков из известных в настоящий момент.

Примечания

1. См.: *Penrose R.* The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe. – Vintage Books, 2004. – P. 635–655.
2. См.: *Novaes S.F.* Standard Model: An Introduction. Particle and Fields // Proceedings of the X J.A. Swieca Summer School. – Singapore: World Scientific, 2000.
3. Ibid.
4. См.: *Glashow S.L.* // Nucl. Phys. – 1961. – No.22. – P. 579.
5. *Cabibbo N.* // Phys. Rev. Lett. – 1963. – No.10. – P. 531.
6. См.: *Rosenfeld L.* Nuclear forces. – Interscience Publishers, 1948.
7. См.: *Kobayashi M., Maskawa T.* CP-violation in the renormalizable theory of Weak Interaction // Progress of Theoretical Physics. – 1973. – V. 49. – P. 652.
8. См.: Fermilab Press Release. Discoveries at Fermilab: Discovery of the Bottom Quark / August 5, 1977.
9. См.: *Perl M.L.* e.a. Evidence for anomalous lepton production in e^+e^- annihilation // Phys. Rev. Lett. – 1975. – V. 35. – P. 1489.
10. См.: *Liss T.M., Tipton P.L.* The discovery of the top quark // Sci. Am. j. – Sept., 1997. – P. 54–59.
11. См.: *Adeva B., Barber D.P.* e.a. Search for top quark and a test of models without top quark up to 389.54 GeV at PETRA // Phys. Rev. Let. – 1983. – V. 50, No.11. – P. 799–801.
12. См.: *Kimura Y.* From TRISTAN To B–Factory // KEK seminar, Japan.
13. См.: *Franzini P.J.* Phys. Rep. – 1989. – V. 173, No.1.
14. См.: *Porter F.* Finding the top quark at the SLAC Linear Collider with the Mark II experiment // Annals of the New York Academy of Sciences. – 1987. – V. 518. – P. 40–46.
15. См.: *Nir Y.* No Light Top Quark After All // SLAC-PUB-5144. – Nov. 1989.
16. См.: *Tuominiemi J.* Search for the top quark in UA1 and in the other hadron collider experiments // ACTA Physica Polonica. – 1990. – V. B21, No.4–5. – P. 327–343.

17. См.: *Peoples J.* The Tevatron Collider: A thirty year campaign / Fermilab colloquium. March 10, 2010.
18. См.: *Abe F.* e.a. (CDF Collaboration). Observation of top quark production in pp collisions with the Collider Detector at Fermilab // *Phys. Rev. Let.* – 1995. – V. 74. – P. 2626–2631.
19. См.: *Goldhaber J.* Tevatron Set to Resume Search for Top Quark. – May 15, 1992.
20. Ibid.
21. См.: *Peoples J.* The Tevatron Collider...
22. См.: *Abachi S.* e.a. (DØ Collaboration). Search for high mass top quark production in pp collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV // *Phys. Rev. Let.* – 1995. – V. 74. – P. 2422–2426.
23. См.: *Liss T.M., Tipton P.L.* The discovery of the top quark.
24. См.: «Hail and Farewell» to Historic Main Ring at Fermilab, Batavia, IL // Fermilab Press Release. – Sept. 11, 1997.
25. См.: *García-Bellido A.* Single top physics at the Tevatron // *Rencontres de Moriond QCD.* – March, 2010.
26. См.: Fermilab collider experiments discover rare single top quark / Fermilab Press Release. – March, 2009.
27. См.: Tevatron: top quarks may indicate new particle, need for new physics / Fermilab Press Release. – March, 2011.
28. См.: *Bassler U.* Top Physics at the Tevatron // *Seminar Freiburg.* – 24/01/07.
29. Fermilab experiments narrow allowed mass range for Higgs boson / Fermilab Press Release. – July 26, 2010.
30. Fermilab Today. Special Edition. Monday, Jan. 10, 2011. – URL: http://www.fnal.gov/pub/today/Special_Edition011011.html
31. The Nobel Prize in Physics 1999. The Nobel Foundation. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1999/index.html.

Дата поступления 20.05.2011

Институт ядерной физики
СО РАН, г. Новосибирск
ks.astrelina@gmail.com

***Astrelina, K.V.* The history of the discovery of t -quark**

In the context of formulation and development of the Standard Model, the author reconstructs the history of the discovery of t -quark. She describes experiments aimed at its search.

Keywords: the Standard Model, quark, experiment, theory, history