

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**МЕЗОНЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ЦИКЛОТРОНЕ *)*****Е. Гарднер, В. Баркас, Ф. Смит и Г. Браднер***

Природа сил, удерживающих протоны и нейтроны в атомном ядре, привлекает внимание физиков в течение уже многих лет. Очевидно, что эти силы отличны от электростатических сил, обычно демонстрируемых с помощью заряженных шариков. Так как протоны заряжены положительно, то согласно законам электростатики они должны отталкивать друг друга и ядро должно распадаться. В действительности, протоны и нейтроны настолько крепко связаны друг с другом в ядре, что для выбивания одного из них из ядра требуется энергия в миллионы электрон-вольт. Истинная природа ядерных сил до сих пор точно не установлена. Попытка решения этой задачи была сделана с помощью мезонной теории ядерных сил, предложенной в 1935 г. Юкава⁸³. Согласно этой теории каждый нейтрон или протон связан с «мезонным облаком». Предполагается, что мезоны представляют собой нечто вроде квантов электромагнитного поля с той разницей, что они обладают зарядом и конечной массой покоя. Ядерные силы объясняются как взаимодействие протонов и нейтронов с мезонным облаком, а не как силы «дальнодействия». При некоторых условиях возможно вывести мезон из ядра и исследовать его как самостоятельную частицу. Мезонная составляющая космического излучения образуется при столкновениях частиц большой энергии с атомными ядрами в атмосфере.

В процессе рождения мезона падающая частица теряет некоторое количество кинетической энергии. Эта энергия затем проявляется в форме энергии, связанной с массой покоя мезона.

Таким же способом, т. е. бомбардировкой мишени протонами, α -частицами или нейтронами, мезоны получают на циклотроне. На синхротроне мезоны образуются при бомбардировке мишени

*) Science 111, 2878 (1950). Перевод с английского В. А. Троицкой.

γ -лучами большой энергии. Основные процессы образования и распада мезонов были обнаружены при исследовании космического излучения³, однако в настоящее время начинают поступать дополнительные сведения, полученные в опытах с мезонами, полученными в циклотронах и синхротронах. В настоящей статье мы опишем ряд методов, использованных для обнаружения мезонов, а также приведём некоторые результаты, полученные с протонами большой энергии, созданными в 184-дюймовом циклотроне в Беркли⁴. Было с определённой уверенностью установлено существование двух видов мезонов — π и μ , свойства которых были тщательно исследованы. Оба они являются нестабильными частицами, с массами, промежуточными между массой электрона и массой протона. Обычно они исследуются на одной и той же установке и часто встречаются в одном и том же опыте. Однако, несмотря на это, они в действительности являются весьма различными типами частиц. Наиболее заметным отличием их друг от друга является то, что π -мезоны сильно взаимодействуют с ядрами, тогда как μ -мезоны взаимодействуют с ядрами слабо. Согласно современным представлениям, π -мезоны являются первичными частицами, создаваемыми при ядерных столкновениях, происходящих в космическом излучении и в ускорителях. По всей вероятности все μ -мезоны, наблюдаемые на циклотроне, являются вторичными по своей природе частицами, возникающими в результате распада π -мезонов. Таким образом возможно, что ядерные силы обусловлены π -мезонами. Существуют как положительно, так и отрицательно заряженные π -мезоны. Возможно также, что существуют нейтральные мезоны^{4, 15, 19}, однако в настоящей статье мы не будем их рассматривать. Когда π^+ - и π^- -мезоны распадаются в свободном пространстве, то в результате их распада возникают μ^+ - и μ^- -мезоны соответственно. Этот процесс, известный под названием $(\pi \rightarrow \mu)$ -распада, будет рассмотрен в одном из следующих разделов. При распаде μ^+ - или μ^- -мезонов в свободном пространстве они испускают позитрон или электрон. Энергии, которыми обладают позитрон и электрон, указывают, что при каждом расщеплении μ -мезона испускаются также два нейтрино¹⁸. Если π -мезоны останавливаются в веществе, то они поглощаются ядром и исчезают. При этом их энергия покоя превращается в энергию возбуждения ядра. Это явление наблюдается на фотопластинках в звёздах, возникающих на концах следов π^- -мезонов. Следы, исходящие из центра звезды, принадлежат заряженным частицам, выбрасываемым из возбуждённых ядер. μ^- -мезоны редко, а возможно и никогда не образуют таких звёзд⁹. Проникновению в ядра медленных π^+ - и μ^+ -мезонов препятствуют электростатические силы. Таким образом, когда положительно заряженные мезоны останавливаются в веществе, они распадаются так же, как они распадаются в свободном пространстве.

ОБНАРУЖЕНИЕ МЕЗОНОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ЦИКЛОТРОНЕ

Задача обнаружения мезонов, созданных в циклотроне, состоит в нахождении небольшого количества мезонов, образованных наряду со значительно большим количеством протонов и других тяжёлых частиц. Если мезоны создаются при бомбардировке мишени протонами с энергией 345 Мэв, то число этих частиц «фона» в тысячи раз больше числа мезонов. При решении этой задачи удобно использовать два типа детекторов, а именно: камеры Вильсона и фотографические пластинки. Заряженные частицы в обоих этих методах изучаются по оставленным ими следам. Если фон нежелательных следов велик, то для обнаружения следа интересующей исследователя частицы приходится просматривать большое количество посторонних следов. Однако если след найден, то присутствие других следов мало влияет на измерения, производимые вдоль этого следа. Обнаружение мезонов, полученных на циклотроне, производилось с помощью фотографических пластинок¹², а также с помощью камеры Вильсона¹³. Большая часть работ по исследованию мезонов, полученных на циклотроне, производилась с фотографическими пластинками. Это обстоятельство частично объясняется тем, что первые работы производились внутри циклотрона, где осуществить управление камерой Вильсона чрезвычайно трудно. Недавно Альварец и его сотрудники разработали метод обнаружения положительных мезонов, полученных на циклотроне, с помощью сцинтилляционных счётчиков.

Этот метод позволяет в значительной мере сэкономить время и силы и весьма вероятно, что эти счётчики заменят фотографические пластинки при многих исследованиях мезонов. Хотя фотографические пластинки используются в качестве детекторов заряженных частиц уже очень давно⁵, однако фотопластинки, широко используемые в настоящее время, были созданы лишь за последние три-четыре года. Некоторые из этих пластинок изготавливаются самими исследователями.

Эти специальные пластинки, используемые для обнаружения заряженных частиц, обладают большей плотностью бромистого серебра, чем обычные фотографические пластинки, и слой эмульсии на них толще. Если заряженная частица проходит через эмульсию, то она оставляет за собой след в виде поддающихся проявлению зёрен серебра. После проявления пластинки под микроскопом видна линия, состоящая из зёрен серебра, которая показывает путь заряженной частицы.

Диаметр зёрен серебра равен 0,2—0,4 микрона, поэтому след изучается под микроскопом с увеличением от 100 до 2000, в зависимости от требований решаемой задачи.

Одним из преимуществ метода обнаружения заряженных частиц с помощью фотографических пластинок является наличие в нашем

распоряжении пластинок с почти любой желаемой чувствительностью. Это означает, что для исследования сильно-ионизирующих

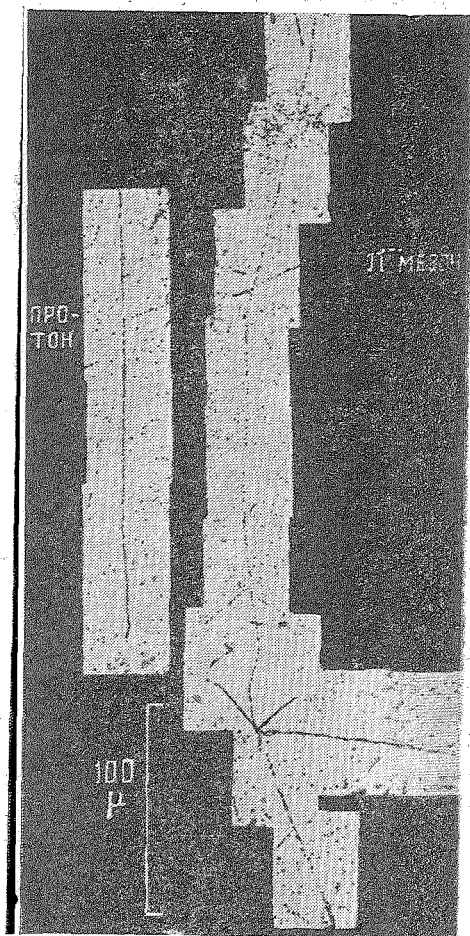


Рис. 1. Справа: микрофотография следа π^- -мезона. Этот мезон остановился в эмульсии и возбудил звезду с четырьмя следами.

Слева: след протона, приведённый для сравнения.

наблюдается некоторое рассеяние, но не такое заметное, как вдоль следа мезона. Кроме того, плотность зёрен вдоль следа мезона изменяется незначительно.

частиц, как, например, частиц малой энергии или осколков, образующихся при делении, можно взять такие нечувствительные пластинки, которые будут регистрировать только сильно ионизирующие частицы, и наблюдателю не придётся просматривать следы электронов или других слабо ионизирующих частиц. С другой стороны, существуют пластинки с такой чувствительностью, которая позволяет регистрировать следы совсем слабо ионизирующих частиц.

Для быстрого опознавания следов мезонов используют пластинки, подобные пластинкам Илфорд С-2, чувствительность которых такова, что плотность зёрен в следе мезона заметно меняется на последних нескольких сотнях микронов пробега мезона. Это придаёт следам мезонов характерный вид, позволяющий легко отличить их от всех других следов. Следы мезона опознаются также по извилистости, связанной с рассеянием на малые углы. Это изменение плотности зёрен и извилистость следа видны на фотографии, приведённой на рис. 1.

Для сравнения на рис. 1 приведён след протона. Вдоль следа протона также

π^- -мезон, след которого показан на рисунке, двигался сверху вниз. После того, как он замедлился и остановился в эмульсии, он проник в ядро, и его энергия покоя превратилась в энергию возбуждения ядра. Затем из возбуждённого ядра вылетели четыре ионизирующих частицы, которые образовали четыре следа, отчётливо видимые на фотографии. Явления такого типа называются «звёздами».

Поиски следов мезонов весьма трудоёмки и поэтому при экспозиции фотопластинок принимаются все меры для того, чтобы отношение числа следов мезонов к числу следов фона было бы как можно выше.

На рис. 2 и 3 показаны два способа экспозиции фотографических пластинок, предназначенных для изучения мезонов. Фото-

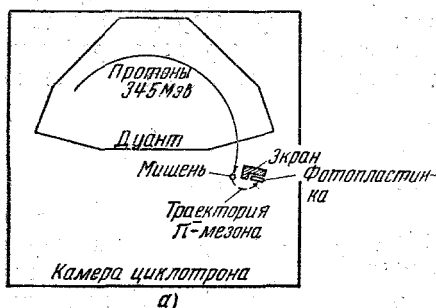


Рис. 2. Эскиз циклотрона с установкой для исследования π^- -мезонов. (Масштаб не выдержан.)

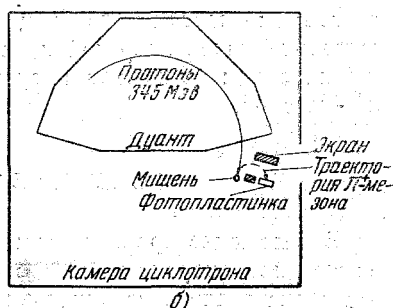


Рис. 3. Эскиз циклотрона с установкой для исследования π^- -мезонов. (Масштаб не выдержан.)

графические пластинки экспонируются либо завернутыми в чёрную бумагу, либо при затемнении помещения циклотрона.

Как показано на этих рисунках, мезоны образуются при ударе пучка протонов с энергией 345 МэВ о мишень, расположенную внутри циклотрона. На рис. 2 показано устройство для обнаружения π^- -мезонов. π^- -мезоны, покидающие мишень в направлении движения пучка, отклоняются магнитным полем и выходят из пространства, ограниченного пучком протонов большой энергии. Протоны и более тяжёлые осколки ядер, также образованные в мишени и движущиеся в направлении пучка, обладают противоположным зарядом, вследствие чего отклоняются к центру циклотрона и не попадают на фотографическую пластинку.

Нейтроны, возникающие в мишени и в других частях циклотрона, сталкиваются с ядрами в эмульсии и на пластинке образуют фон из протонов отдачи, α -частиц и ядерных осколков. До настоящего времени, при наиболее удачных экспозициях, отношение числа следов мезонов к числу следов фона равнялось примерно $1/50$.

Пластины располагают таким образом, что мезоны, возникающие в мишени, входят в пластины через верхнюю поверхность эмульсии, причём их траектории составляют с плоскостью эмульсии угол примерно в 5° . При 10-секундной экспозиции на фотографической пластинке размерами 2,5 см на 7,5 см наблюдается 1000 следов π^- -мезонов. Один из методов, использованных для обнаружения π^+ -мезонов, показан на рис. 3. Это устройство похоже на то, которое было использовано для исследования π^- -мезонов, с той разницей, что в этом случае регистрируются π^+ -мезоны, которые покидают мишень в направлении, противоположном направлению движения пучка. При этом протоны и другие положительно заряженные частицы, вылетающие из мишени, могут двигаться по тем же самым траекториям, что и π^+ -мезоны, однако тяжёлые частицы, движущиеся по этим траекториям, обладают настолько малой энергией и, соответственно, коротким пробегом, что их следы не являются существенной помехой при изучении π^+ -мезонов.

ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ МЕЗОНОВ

В настоящее время в нашей лаборатории проводится серия опытов по измерению масс π - и μ -мезонов. Используемая нами установка аналогична установке, разработанной Броже⁷ и другими в связи с измерением масс мезонов космического излучения. Используя установку, показанную на рис. 2 и 3, мы можем измерить импульс и пробег мезона. Знания этих двух величин достаточно для определения массы мезона.

Если магнитное поле было бы однородным, то траектория представляла бы собой часть окружности и импульс можно было бы найти из напряжённости магнитного поля и радиуса кривизны траектории мезона. Радиус кривизны траектории можно определить, зная координату точки, в которой мезон ударяется о фотографическую пластинку, положение мишени и угол, образуемый следом с краем пластинки. В действительности магнитное поле 181-дюймового циклотрона по мере возрастания радиуса слегка убывает и, следовательно, траектория мезона не является в точности окружностью. В этом случае импульс находят путём вычисления учитывающего это изменение поля⁸. Пробег мезона в эмульсии определяется измерением длины следа под микроскопом. Точная формула, дающая зависимость между кинетической энергией мезона и радиусом окружности, по которой он движется в магнитном поле, имеет следующий вид:

$$E \left(1 + \frac{E}{2mc^2} \right) = \frac{e^2}{2mc^2} (B\rho)^2, \quad (1)$$

где E — кинетическая энергия мезонов (в эргах), m — масса покоя мезонов (в граммах), e — заряд мезона, принятый равным заряду электрона ($CGSE$), c — скорость света ($см/сек$), B — магнитная индукция (в гауссах), ρ — радиус кривизны траектории (в $см$).

Пробег R и кинетическая энергия мезона связаны между собой эмпирической формулой, которая, как было найдено⁶, даёт достаточно хорошее представление о соотношении пробег — энергия в исследуемой нами области энергий:

$$E = km^{1-n}R^n, \quad (2)$$

где E — кинетическая энергия мезона (в $Мэв$), m — масса покоя мезона (в массах протона), k, n — постоянные, определяемые из опыта. Численные значения этих постоянных равны: $k=0,250$; $n=0,581$.

С помощью (1) и (2) можно исключить E и решить полученное уравнение относительно массы мезона m .

В этом методе измерения мезонных масс мы используем тот факт, что траектории мезонов начинаются у мишени. Таким образом, этот метод применим для измерений масс π^+ - и π^- -мезонов, так как эти мезоны образуются у мишени. В результате распада π^+ -мезонов, останавливающихся в мишени, образуются μ^+ -мезоны. Следовательно, мишень является источником мезонов, которые могут быть использованы для измерения массы μ^+ -мезона. π^- -мезоны, останавливающиеся на мишени, захватываются ядрами и, следовательно, мишень не является источником μ^- -мезонов и поэтому наш метод не может быть применим для измерения массы μ^- -мезона.

С точностью, определяемой нашими ошибками измерений, мы не обнаружили разницы в массах π^+ - и π^- -мезонов. Предварительные значения масс, полученные нами, равны²⁹:

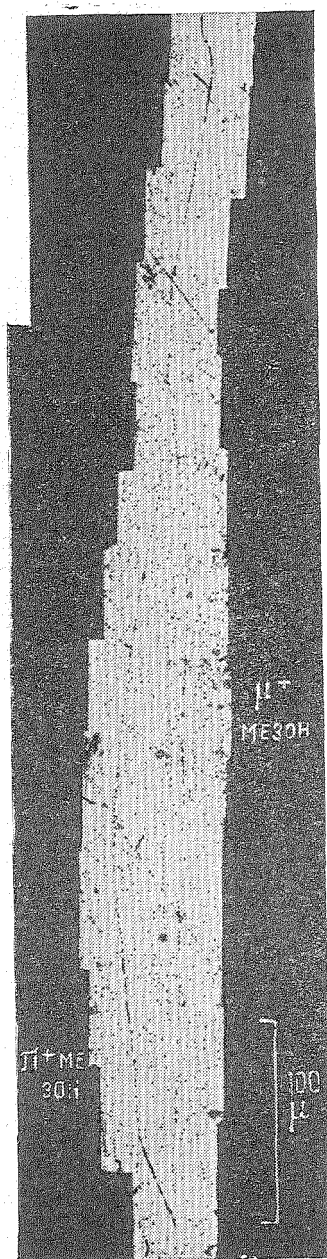
$$m_\pi = (276 \pm 6)m_e, \\ m_{\mu^+} = (210 \pm 4)m_e,$$

где m_e — масса электрона. Эти значения были найдены с помощью формул (1) и (2) описанным выше способом.

В настоящее время производятся новые измерения, в которых массы мезонов определяются путём сравнения с массами протонов. По всей вероятности, этот метод даст более точные значения. К настоящему времени, однако, результаты ещё неизвестны.

($\pi - \mu$)-РАСПАД

Одним из наиболее интересных фактов, связанных с процессом распада мезонов, является то, что все μ^+ -мезоны, образующиеся при распаде остановившихся π^+ -мезонов, повидимому, обладают одинаковой энергией, равной примерно $4 Мэв$.



Впервые это было обнаружено в опытах по изучению космического излучения и подтверждено затем в опытах на циклотроне⁸. Если следы π^+ -мезонов оканчиваются в пластинках Илфорд или пластинках с большей чувствительностью, то всегда видно, что из конца следа π^+ -мезона начинается след μ^+ -мезона.

Если пробег μ^+ -мезона полностью заканчивается в эмульсии, то длина его следа всегда равна примерно 600 микронам (если не считать некоторых колебаний в длине следа, связанных с изменениями, вызванными статистической природой процесса потери энергии. Из формулы (2) следует, что этот пробег соответствует энергии порядка 4 Мэв. Пример ($\pi \rightarrow \mu$)-распада, зарегистрированный в эмульсии Илфорд С-2, показан на рис. 4. То, что μ^+ -мезоны, образующиеся при ($\pi \rightarrow \mu$)-распаде, всегда обладают одной и той же кинетической энергией, является убедительным доказательством возникновения при этом распаде только двух частиц. Вторая частица не оставляет заметного следа даже в самой чувствительной эмульсии, так что, повидимому, эта частица электрически нейтральна.

Из значений масс, приведённых в предыдущем разделе, мы видим, что μ -мезон примерно на 66 элект-

Рис. 4. Микрофотография, показывающая след π^+ -мезона, замедлившегося и остановившегося в эмульсии и затем распавшегося с образованием μ^+ -мезона. μ^+ -мезон в свою очередь замедляется и останавливается в эмульсии. След μ^+ -мезона обладает характерной длиной, равной примерно 600 микронам.

ронных масс легче, чем π -мезон. Эта разница в массе эквивалентна примерно 34 $M_{\text{эв}}$ энергии, из которых 4 $M_{\text{эв}}$ проявляются в виде кинетической энергии мезона. Предполагают, что нейтральная частица уносит остающиеся 30 $M_{\text{эв}}$ энергии, и импульс её достаточен для того, чтобы сбалансировать импульс, полученный μ^+ -мезоном. Вычисления показывают, что эти условия удовлетворяются, если масса покоя нейтральной частицы равна нулю.

ВРЕМЯ ЖИЗНИ π -МЕЗОНА

Время жизни π -мезона настолько мало, что часть π -мезонов испытывают ($\pi \rightarrow \mu$)-распад прежде, чем они достигнут места установки пластинок, показанного на рис. 2 и 3. Если бы пластины не преграждали путь мезонам и они могли бы продолжать движение по приблизительно круговым орбитам, то, в среднем, до своего распада, мезоны могли бы совершать примерно два оборота. Ричардсон²⁷ и Мартинелли и Пановский²¹ измерили время жизни мезона, наблюдая, какое количество мезонов исчезает из некоторой группы мезонов за время, необходимое этой группе для совершения одного оборота.

Схематический эскиз установки приведен на рис. 5. Одна группа мезонов (А) движется по спирали вверх и попадает в верхнюю фотографическую пластинку после того, как она совершит пол оборота. Вторая группа (В) движется по спирали вниз и совершает полтора оборота прежде, чем попасть на нижнюю пластинку. Соответствующая экранировка (не показанная на рисунке) препятствует попаданию на пластинки мезонов, движущихся по любым другим путям, кроме показанных.

Число мезонов, попавших на пластинки, определяется подсчётом числа следов мезонов после проявления пластинок.

После введения соответствующих геометрических поправок, время жизни мезонов находится по числу мезонов, потерянных из группы (В) за время, необходимое для совершения лишнего оборота.

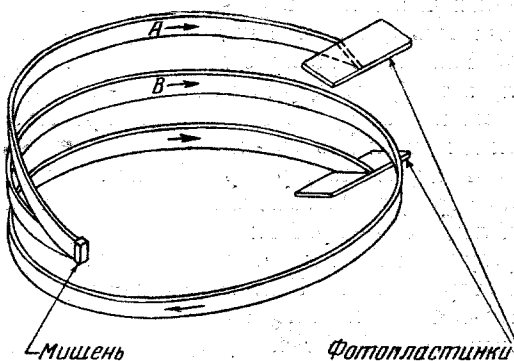


Рис. 5. Схема расположения мишени и пластин, при которой одна группа мезонов (А) проходит пол оборота, а другая группа мезонов (В) проходит полтора оборота. (Масштаб не выдержан.)

Ричардсон²⁷ производил измерения с π^- -мезонами и получил для среднего времени жизни значение $(1,11^{+0,31}_{-0,22}) \cdot 10^{-8}$ сек. Мартинелли и Пановский²¹, производившие измерения с π^+ -мезонами, нашли для среднего времени жизни величину $(1,97^{+0,14}_{-0,17}) \times 10^{-8}$ сек. Эти значения не находятся в согласии в пределах указанных ошибок. Однако такое расхождение в значениях мы не считаем доказательством того, что среднее время жизни π^- -мезона в действительности отлично от среднего времени жизни π^+ -мезона. Среднее время жизни π^- -мезона, по данным, полученным в опытах по исследованию космического излучения, примерно в сто раз больше среднего времени жизни μ^- -мезона. По данным Нересона и Росси²³, среднее время жизни μ^+ -мезона равно $(2,15 \pm 0,07) \cdot 10^{-6}$ сек.

ЗВЁЗДЫ, ВОЗБУЖДЁННЫЕ μ^- -МЕЗОНАМИ

Звёзды, возбуждаемые в эмульсии π^- -мезонами, весьма различны по своему виду. Они отличаются числом и направлением образующих их следов, а также типом и энергиями частиц, создающих эти следы. Распределение звёзд по числу следов в них представляет интерес, как способ исследования механизма отдачи π^- -мезоном своей энергии покоя ядру^{11, 20, 24} и как метод нахождения числа следов π^- -мезонов в множестве следов, среди которых есть небольшое число следов π^- -мезонов.

Как видно из приводимой ниже таблицы распределения по числу ветвей, некоторые следы π^- -мезонов не заканчиваются звёздами и поэтому не существует простого способа отличить эти следы от следов π^+ -мезонов.

Если, однако, распределение по числу ветвей известно, то число образующих звёзды мезонов может быть подсчитано и к нему должно быть прибавлено соответствующее число мезонов, не образующих звёзды. Этот метод был использован Мак Милланом, Петерсеном и Уайтом²² для определения отношения числа π^- -мезонов к числу π^+ -мезонов, созданных γ -лучами, полученными на 335-Мэв синхротроне в Беркли.

Для того чтобы найти распределение звёзд, возбуждённых мезонами, по числу следов, необходимо выделить группу π^- -мезонов, не находящихся в смеси с другими мезонами. В установке, показанной на рис. 2, фотографической пластинки могут достигнуть только мезоны с отрицательным зарядом. Однако в этом случае кроме π^- -мезонов в пучке мезонов будет присутствовать некоторое количество μ^- -мезонов, образовавшихся при распаде π^- -мезонов в воздухе. Применяя описанный метод, можно произвести измерение массы для каждого отдельного мезона. Измеренные значения масс π^- -мезонов образуют группу величин со средним значением, равным примерно 276 электронным массам,

а μ^- -мезоны, как правило, будут обладать такими пробегами и массами, что их нельзя спутать с этой группой.

Исследование распределения по числу ветвей может быть сделано с теми же мезонами, которые были использованы для измерений масс.

Распределение по числу ветвей, найденное из 512 звёзд, возбуждённых π^- -мезонами, по данным Адельмана и Джонса¹

Число следов, включая ядра отдачи	Процент звёзд, обладающих указанным числом следов
0	28,8
1	21,5
2	27,0
3	15,2
4	7,8
5	1,8
6 или больше	По результатам данного опыта не обнаружено

ВЫХОД π^- -МЕЗОНОВ КАК ФУНКЦИЯ ЭНЕРГИИ БОМБАРИДУЮЩИХ ЧАСТИЦ

Число мезонов, сбранных при бомбардировке мишени протонами, быстро возрастает по мере увеличения энергии протонов. Этот эффект удобно изучать, помещая мишень и пластинки, показанные на рис. 2 и 3, на орбиты различных радиусов. Таким способом можно наблюдать зависимость выхода мезонов от энергии протонов, начиная от сколь угодно малых энергий и до энергии в 345 Мэв, т. е. максимальной энергии протонов, которую можно получить на циклотроне. При использовании мишени из углерода интегральный ток протонного пучка можно определить, наблюдая позитронную активность C^{11} , образованного при реакции $C^{12}(p, pn)C^{11}$. Относительный выход мезонов при различной энергии определяется подсчётом числа следов мезонов на фотографических пластинках. При этом вводятся соответствующие поправки на интегральный ток пучка и величины относительных объёмов исследованных эмульсий.

До настоящего времени измерялся выход мезонов с энергиями от 2 до 10 Мэв. В опыте Джонса и Уайта¹⁴ измерялся относительный выход мезонов, образованных при бомбардировке мишени из углерода (размерами $1/32$ дюйма или примерно 0,8 мм) протонами. Приводим их результаты.

Энергия протонов (Мэв)	345	305	270	235	200	165
Относительный выход	100%	47%	22%	8%	1%	0%

Эти результаты представляют интерес для лиц, конструирующих ускорители, которые предполагается использовать для создания мезонов.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. L. F. Adelman and B. Jones, Science 1950 (готовится к печати).
2. L. W. Alvarens и др. Bull. Amer. Phys. Soc. **24**, 20 (1949).
3. W. H. Barkas, Bull. Amer. Phys. Soc. **24**, 13 (1949).
4. R. Bjorklund и др. Phys. Rev. **77**, 213, (1950).
5. M. Blau, H. Wambacher, Nature, **140**, 585 (1937).
6. H. Bradner и др., Phys. Rev. (готовится к печати).
7. R. B. Brode, Rev. Mod. Phys. **21**, 37 (1949).
8. J. Burfening, E. Gardner and C. M. G. Lattes, Phys. Rev. **75**, 382 (1949).
9. W. Y. Chang, Rev. Mod. Phys. **21**, 166 (1949).
10. P. Demers, Science **110**, 380 (1949).
11. Y. Fujimoto, S. Hayakawa and Y. Yamaguchi, Prog. Theor. Phys. (в печати).
12. E. Gardner and C. M. G. Lattes, Science **107**, 270 (1948).
13. W. Hartsough, E. Hayward and W. M. Powell, Phys. Rev. **75**, 905 (1949).
14. S. B. Jones and R. S. White, Phys. Rev. **78**, 12, (1950).
15. M. F. Kaplan, B. Peters and H. L. Bradt, Phys. Rev. **76**, 1735 (1949).
16. Keller, M. Joseph, Amer. J. Phys. **17**, 356 (1949).
17. C. M. G. Lattes, P. S. Occhialini and C. F. Powell, Nature, **160**, 453, 486 (1947).
18. R. B. Leighton, C. D. Anderson and A. J. Seriff, Phys. Rev. **75**, 1432 (1949).
19. R. E. Marshak, Phys. Rev. **76**, 1736 (1949).
20. R. E. Marshak, Echo Lake Cosmic Ray Conference, June 22—28 (1949).
21. E. Martinelli and W. Panofsky, Phys. Rev. **77**, 465 (1950).
22. E. M. McMillan, J. Peterson and R. S. White, Science **110**, 579 (1949).
23. N. Nereson and B. Rossi, Phys. Rev. **64**, 199 (1943).
24. D. H. Perkins, Phil. Mag. **11**, 601 (1949).
25. C. F. Powell и др., J. Sci. Instr. **23**, 102 (1946).
26. К. Ф. Поуэлл и Г. П. С. Оккиаллини, УФН **35**, 213, 384 (1948).
27. J. R. Richardson, Phys. Rev. **74**, 1720 (1948).
28. M. M. Shapiro, Rev. Mod. Phys. **13**, 58 (1941).
29. F. M. Smith и др., Bull. Amer. Phys. Soc. **24**, 9 (1949).
30. J. Steinberger and A. S. Bishop, Bull. Amer. Phys. Soc. **25**, 11 (1950).
31. J. Tiomuo and J. A. Wheeler, Amer. Sci. **37**, 202, 417 (1949).
32. H. Jagoda, Radioactive measurements with nuclear emulsions. New York; John Wiley and Sons (1949).
33. H. Jukawa, Proc. phys. math. Soc. Japan **17**, 48 (1935).