1951 г. Февраль *Т. XLIII, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАМЕР ВИЛЬСОНА С ПУЛЬСИРУЮЩИМИ УСКОРИТЕЛЯМИ

Э. Хэйвард *)

В течение нескольких последних лет камеры Вильсона использовались совместно с пульсирующими ускорителями. Целью этой статьи является обсуждение некоторой специальной техники, используемой при этих условиях, и выяснение достоинств и недостатков, которыми она обладает по сравнению с обычной техникой камеры Вильсона, применяемой, например, при исследованиях космических лучей.

До настоящего времени камеры Вильсона успешно работали в пучках γ-лучей от синхротронов и бетатронов и в нейтронных пучках от циклотронов. Пучок γ-лучей от бетатрона или синхроциклотрона можно получить, если направить движущийся по окружности пучок электронов на внутреннюю мишень. Электроны будут излучать, и возникнет пучок, состоящий из квантов всех энергий вплоть до максимальной энергии электронов. Циклотроны обычно ускоряют дейтероны или протоны. Эти частицы, падая на мишень, создают пучки нейтронов. В обоих случаях полученные пучки непосредственно не ионизуют. Однако при взаимодействии этих пучков с веществом возникают вторичные интенсивно ионизующие частицы. Такие условия являются идеальными для камеры Вильсона. Если поместить камеру Вильсона в пучок γ-квантов или нейтронов, то из нескольких тысяч γ-квантов или нейтронов, пересекших камеру, будут зарегистрированы только те, которые взаимодействуют с веществом.

Наиболее замечательной особенностью использования камеры Вильсона с ускорителем является то, что экспериментатор может контролировать момент поступления импульса от ускорителя. При измерении кривизны в магнитном поле траектории должны быть свободными от искажений и возможно более резкими. Для этого

*) E. Hayward, Science 111, 349 (1950). Сокращённый перевод В. А. Троицкой.

желательно ввести пучок в конце расширения, после того как движение газа прекратилось, но до того, как тепловой градиент, существующий между газом и стенками камеры, сможет вызвать конвекционные токи. Так как ионы почти не диффундируют до того, как на них сконденсируются капельки, этим достигается уменьшение искажений и увеличение резкости траекторий. Следует заметить, что в большинстве опытов по космическим лучам имеет место обратное положение, так как в этих опытах камера Вильсона запускается импульсом от счётчиков, после того как через неё прошла частица. При этом любые нерегулярности в движении газа в камере во время расширения влияют на траектории. Кроме того, имеет место медленная диффузия ионов в интервале времени между прохождением частицы и началом конденсации капелек на ионах. Тот факт, что экспериментаторы имеют возможность регулировать момент появления импульса, имеет большое значение в тех случаях, когда камера должна работать в магнитном поле. При этом нет необходимости, чтобы магнит был включён всё время. Достаточно включать его импульсами, которые должны быть синхронизированы с периодом работы камеры таким образом, чтобы поле достигало максимального значения в момент прохождения частиц через камеру. Такой способ работы уменьшает нагревание магнита и тем самым позволяет использовать большие импульсы тока для создания магнитного поля. При обычной работе камеры Вильсона в ней создаётся электрическое поле, предназначенное для удаления ионов, возникших между расширениями. Затем перед быстрым расширением это поле выключается. После быстрого расширения капельки движутся по направлению ко дну камеры и некоторые из них частично испаряются по пути. Частично испарившись, капельки остаются плавать в газе, так как они всё ещё слишком велики, чтобы очищающее поле могло бы их удалить. Они являются центрами конденсации при последующих расширениях. Обычно для их удаления необходимо произвести одно или несколько медленных расширений, при которых на них снова конденсируется пар и они выпадают. На медленное расширение уходит очень много времени, так как после каждого расширения температура газа должна сравняться с температурой стенок камеры. Гертнер и Иетер[1] весьма успешно устранили необходимость в медленных расширениях. Они сильно повышают давление в камере Вильсона сразу же после фотографирования. При этом газ нагревается, и заряженные капли испаряются, делаясь достаточно лёгкими, чтобы быть удалёнными сильным очищающим полем. Эта техника была развита в такой степени, что оказалось возможным снимать фотографии через каждые пять секунд. Так как обычный период работы камеры Вильсона длится минуту или больше, это усовершенствование имеет большое значение для опытов, в которых камера Вильсона используется совместно с ускорителями.

Для иллюстрации проделанной до настоящего времени работы мы попытались собрать примеры различных явлений, созданных с помощью пульсирующих ускорителей. Первые восемь фотографий относятся к явлениям, созданным нейтронами [2, 3, 4, 5], а последние четыре — γ-лучами [6, 7, 8, 9] (см. вклейку в конце выпуска). Каждая фотография соответствует явлениям, возникшим после одиночного импульса от ускорителя. Зафиксированные на ней явления произошли при прохождении через камеру нескольких сотен и даже тысяч нейтронов или γ-квантов (рис. 1). Мы изучали явления, возникающие при столкновении частиц с большой энергией с атомными ядрами. На фотографии видны шесть ядерных расщеплений, или «звёзд», возникших при прохождении через камеру Вильсона импульса нейтронов от циклотрона с энергией 90 *Мэв* (около 30 000 нейтронов). Камера наполнялась водородом и насыщалась смесью паров спирта и воды. Так как ядра водорода состоят из одного протона, то их столкновение с нейтроном приводит к появлению одиночного следа. Случаи, зарегистрированные на фотографии, соответствуют поэтому полному распаду ядер углерода и кислорода, присутствующих в паре. Это означает, что в большинстве расщеплений по меньшей мере один осколок остаётся незамеченным, так как наблюдения ведутся только над заряженными частицами. Так как нейтрон не имеет заряда, он не создаёт ионов и не оставляет следа в камере Вильсона. Наиболее распространённые атомы углерода и кислорода имеют ядра, состоящие из равного числа протонов и нейтронов (шести и восьми соответственно). Так как наблюдения ведутся только над заряженными частицами, то интерпретация обычно трудна, а часто просто невозможна. На фотографии видны шесть звёзд, состоящих, если перечислять в направлении сверху вниз, из трёх, четырёх, пяти, двух, трёх и четырёх ветвей. Прежде всего следует отметить, что все эти траектории являются дугами окружностей. Это является, разумеется, результатом действия на движущуюся заряженную частицу силы, возникающей в магнитном поле. Так как все частицы заряжены положительно, они закручиваются в одном направлении, а именно по часовой стрелке. Заметим также, что траектории более тяжёлых частиц вблизи конца пробега обнаруживают значительные отклонения от правильной окружности. Так как они движутся сравнительно медленно и многократно заряжены, то столкновения, которые они испытывают с ядрами газа, достаточны для того, чтобы вызвать большие отклонения этих частиц. Поэтому измерения кривизны, производимые для таких траекторий, не имеют смысла. Тонкие следы скорее всего принадлежат однократно заряженным частицам, повидимому протонам. Четвёртая звезда принадлежит к наиболее обычному типу. Она состоит из одного следа очень быстрого протона, двигавшегося вперёд, и небольшой области заряженных капель, созданной ядром отдачи. Последняя звезда

внизу фотографии создана четырьмя двукратно заряженными частицами. Повидимому, в этом случае имеет место полное расщепление восьмикратно заряженного ядра кислорода, и вполне вероятно, что все четыре следа принадлежат α-частицам, так как последние являются одними из наиболее стабильных ядерных образований. Образование таких звёзд может быть понято с той точки зрения, что быстрый нейтрон, ударяющийся о ядро, выбивает быструю частицу, движущуюся в направлении движения нейтрона, и оставляет ядро в возбуждённом состоянии. Возбуждённое ядро через очень короткое время взрывается, испуская во все стороны частицы небольших энергий. Если быстрой частицы, движущейся вперёд, не наблюдается, это может означать, что она является нейтроном, не оставляющим следа в газе камеры.

Рис. 2 получен[8] при исследовании быстрых частиц, движущихся в направлении пучка быстрых нейтронов, когда последние сталкиваются с ядрами. Вместо того, чтобы использовать газ камеры в качестве мишени, в камере помещают небольшую пластинку углерода, о которую ударяются нейтроны. Эта мишень испускает большое количество частиц, и некоторые из них достаточно долго остаются в поле зрения, чтобы пройти через поглотитель из стекла, расположенный по диаметру камеры. Этот поглотитель помогает в определении типа частиц. Простое измерение кривизны даёт только импульс частицы. Однако, если кривизна частицы измерена по обе стороны от поглотителя известной толщины, то это даёт возможность оценить массу частицы с точностью, по крайней мере достаточной для того, чтобы указать, что это за частица. Два следа, указанные стрелками, обладают примерно одинаковыми радиусами при выходе из мишени до попадания в поглотитель, однако по выходе из поглотителя один из них имеет значительно меньший радиус и заметно возросшую ионизацию. Другая частица не обнаруживает заметного изменения этих величин. Первая частица является дейтероном, а вторая — протоном.

Рис. 3 получен[2] при изучении углового распределения протонов, рассеявшихся в результате упругих столкновений с нейтронами с энергией 90 *Мэв*. Такого рода опыты по рассеянию дают очень важные сведения о силах взаимодействия между элементарными частицами. Мы видим на фотографии следы шести протонов, возникшие в газе (H_2) после столкновения протонов с невидимыми, но весьма быстрыми нейтронами. Энергия нейтронов может быть получена с помощью законов упругих столкновений и простых измерений кривизны траектории протона, а также угла между направлением его движения и направлением нейтронного пучка.

Рис. 4 получен в аналогичных опытах[5], в которых использовались 13-*Мэв* нейтроны. В этом случае камера наполнялась метаном до давления в 22 атмосферы, так что протоны отдачи могли

возникать и останавливаться в газе. Так как их энергии могли быть получены из их пробегов, не было необходимости в использовании магнитного поля.

Мезоны являются самыми новыми частицами в ядерной физике. Этим названием объединяются все частицы, масса которых лежит между массами протона и электрона. К настоящему времени мы хорошо знакомы с двумя сортами мезонов: π-мезонами и μ-мезонами.

π-мезоны имеют массу, равную 276 электронным массам, несут либо положительный, либо отрицательный заряд и сильно взаимодействуют с ядрами. Они вызывают весьма большой интерес, так как предполагается, что именно они ответственны за силы, связывающие атомное ядро. Мезон может быть испущен при столкновении, при котором существует избыток энергии, эквивалентный его массе; он может явиться одним из осколков звезды, созданной частицей с очень большой энергией. На рис. 5 зафиксирован именно такой случай. Эта фотография была получена в пучке нейтронов, возникшем при облучении мишении 350-*Мэв* протонами. Звезда, состоящая из четырёх ветвей, возникла при расщеплении ядра аргона. Один из осколков отклоняется магнитным полем в направлении, обратном отклонению других осколков. Поэтому ему следует приписать отрицательный заряд. Предполагают, что в данном случае мы имеем пример возникновения отрицательного π-мезона. Его энергия равна 60 *Мэв*. Хотя мы не можем измерить ионизацию этого следа, его плотность согласуется с таким предположением.

Когда положительный π-мезон останавливается, то он распадается на μ-мезон (210 электронных масс) и некоторую нейтральную частицу. Возникший при этом μ-мезон всегда имеет энергию около 4 *Мэв* и, останавливаясь, распадается на электрон и два нейтрино. Энергия, заключённая в массе π-мезона, распределяется между энергиями покоя и кинетическими энергиями этих трёх частиц. Из законов сохранения следует, что максимальная энергия, которая может быть передана электрону, равна 55 *Мэв*, хотя он может иметь и любые энергии, меньшие этой.

На рис. 6 виден π-мезон, входящий в поглотитель и распавшийся в нём. Он признан π-мезоном потому, что его траектория имеет подходящую кривизну и ионизацию, чтобы он мог остановиться в поглотителе; μ-мезон с такой же кривизной прошёл бы через поглотитель.

μ-мезон, являющийся продуктом его распада, также тормозится в поглотителе. Электрон, тонкий след которого виден в углу камеры Вильсона, возник при распаде μ-мезона.

Если отрицательный π-мезон останавливается в веществе, то он захватывается ядром. При этом ядро получает некоторую избыточную энергию, которая вызывает его расщепление. На рис. 7

показан след отрицательного π-мезона, на котором видно уменьшение радиуса кривизны по мере возрастания его ионизации. Затормозившийся мезон захватывается ядром атома. Возникшая при этом звезда состоит из одного следа, созданного ядром отдачи; повидимому, при этом были ещё испущены и нейтроны.

Рис. 8 приведён для иллюстрации того, как траектория мезона с небольшой энергией может быть обнаружена среди весьма большого фона ядерных осколков по её кривизне и ионизации. Плотность ионизации вдоль следа, обозначенного стрелкой, значительно больше плотности вдоль электронного следа. В то же время этот след не может принадлежать протону, так как протоны, движущиеся по столь малой окружности, всегда остановятся, не совершив полного оборота. След принадлежит мезону, но установить, принадлежит ли он π- или μ-мезону, невозможно. Весьма важно изучать возникновение мезонов, их распад и способы их взаимодействия с различными ядрами.

Рис. 5, 6 и 7 являются лучшими фотографиями искусственно созданных мезонов, полученными в камере Вильсона до настоящего времени, а рис. 8 показывает, почему эти случаи так редки.

При столкновении движущегося по окружности пучка электронов с мишенью, расположенной внутри бетатрона или синхротрона, возникают пучки квантов. Электроны замедляются в поле ядер мишени, в результате чего испускаются кванты, которые могут обладать любой энергией вплоть до полной энергии падающего электрона. Таким образом, пучок состоит из квантов с непрерывным спектром энергий. Если квант обладает энергией, большей одного миллиона электрон-вольт, то он может, столкнувшись с ядром, создать пару — электрон и позитрон. На создание этой пары идёт примерно 1 *Мэв*; остальная энергия превращается в кинетическую энергию электрона и позитрона.

На рис. 9 виден случай образования пары. Эта фотография получена для вышеуказанного случая, когда очищение камеры происходит с помощью создания избыточного давления, в камере, помещённой в пучок квантов от 100-*Мэв* бетатрона. Превращение кванта в пару происходит в свинцовой пластинке, расположенной перпендикулярно к направлению пучка. Электрон и позитрон отклоняются магнитным полем в противоположные стороны. Измерение кривизны траектории пары позволяет установить, что энергия кванта равна 25 *Мэв*.

Рис. 10 получен в работе [9], посвящённой исследованию энергетического спектра фотонов от 20-*Мэв* бетатрона. Пара, которая видна на фотографии, создана в поле ядра аргона. Траектории электронов с малой энергией не являются правильными окружностями, так как такие электроны рассеиваются в газе.

Если электрон или позитрон движется в среде из тяжёлых ядер, он излучает кванты, которые в свою очередь образуют

новые пары. Этот процесс продолжается до тех пор, пока средняя энергия квантов и электронов не уменьшится в такой степени, что они не смогут терять энергию на образование пар и излучение квантов так же эффективно, как они теряют её на другие процессы. После этого электроны поглощаются благодаря ионизации, а кванты — благодаря столкновениям с электронами, которые в свою очередь теряют энергию на ионизацию. Лучший способ наблюдать такие явления, называемые ливнями, заключается в помещении ряда свинцовых пластин в камеру Вильсона, облучаемую пучком γ-лучей (рис. 11). Эта камера Вильсона находилась в пучке, созданном 335-*Мэв* электронами, падающими на внутреннюю мишень. Ливень создан несколькими сотнями фотонов, возникшими в одном импульсе синхротрона. На фотографии заметно быстрое возрастание числа электронов с толщиной вплоть до максимума под четвёртой пластиной свинца (толщина каждой пластины около 33 *мм*), после которого число электронов медленно уменьшается по мере поглощения электронов с меньшей энергией. Заметно рассеяние электронов с малой энергией в газе (аргон).

На рис. 12 видна звезда, созданная фотоном от 100-*Мэв* бетатрона[7]. Это явление аналогично звёздам, создаваемым быстрыми нейтронами, но оно более редкое. Звезда, повидимому, образована расщеплением ядра азота, так как камера была наполнена воздухом. Заметно большое число электронов и позитронов, образующих фон. Их присутствие достаточно для того, чтобы показать, что квант гораздо легче образует пару, чем вызывает ядерное расщепление.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. E. K. Gaertther and M. L. Jeater, Rev. sci. Instr. **20**, 588 (1949).
2. K. Brueckher и др., Phys. Rev. **75**, 555 (1949).
3. K. Brueckher and W. M. Pocodl, Phys. Rev. **75**, 1274 (1949).
4. W. Hartsough и др., Phys. Rev. **35**, 905 (1949).
5. J. S. Langhlin and P. G. Kruger, Phys. Rev. **73**, 197 (1948).
6. G. C. Baldwin and G. S. Klaiber, Phys. Rev. **70**, 259 (1946).
7. То же **73**, 1156 (1948).
8. G. S. Klaiber и др., Phys. Rev. **71**, 649 (1947).
9. H. W. Koch and R. E. Carter, Phys. Rev. **75**, 1950 (1949).