

## 6. ПУЗЫРЬКОВАЯ КАМЕРА

Пузырьковая камера. Емкость заполнена хорошо очищенной жидкостью. Центры образования пара в жидкости отсутствуют, поэтому ее можно перегреть выше точки кипения. Но проходящая частица оставляет за собой ионизованный след, вдоль которого жидкость вскипает, отмечая траекторию цепочкой пузырьков. В современных камерах используются жидкие газы – пропан, гелий, водород, ксенон, неон и др. На снимке: пузырьковая камера, сконструированная в ФИАНе. 1955–1956 годы.



Пузырьковая камера – трековый детектор элементарных заряженных частиц, в котором трек (след) частицы образует цепочка пузырьков пара вдоль траектории её движения., т.е. действие детектора основано на вскипании перегретой жидкости вдоль траектории частицы. Изобретена А.Глэзером в 1952 г. (Нобелевская премия 1960 г.).

Рис. 14. Внешний вид пузырьковой камеры.

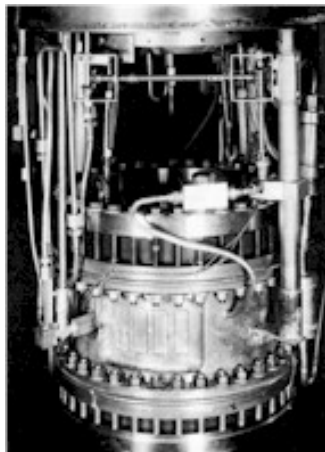


Рис. 15. Схема водородной пузырьковой камеры; корпус камеры заполнен жидким водородом ( $H_2$ ); расширение производится с помощью поршня П; освещение камеры на просвет осуществляется импульсным источником света Л через стеклянные иллюминаторы И и конденсатор К; свет, рассеянный пузырьками, фиксируется с помощью фотографических объективов  $O_1$  и  $O_2$  на фотопленках  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ .

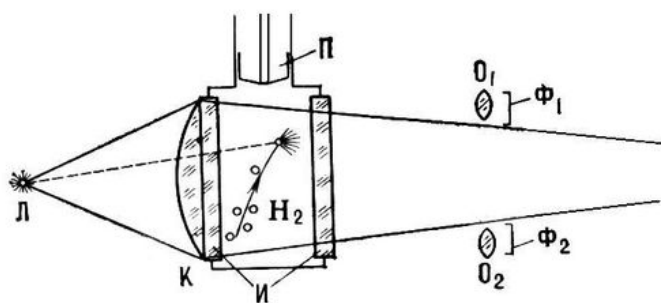
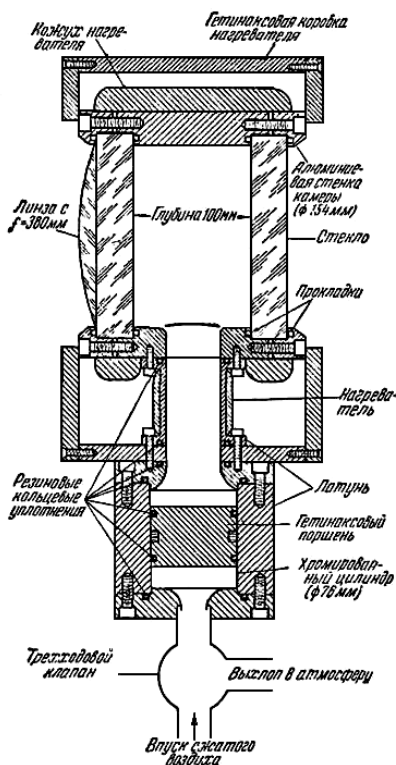


Рис. 16. Пузырьковая камера с жидким пропаном.

Для образования сверхкритического пузырька необходимо выделение энергии  $\sim$  (порядка) нескольких сот эв в объёме радиусом  $\sim 10^{-6}$  см за время  $\sim 10^{-6}$  сек. Эта энергия выделяется при торможении электронов, выбиваемых из атомов жидкости регистрируемой частицей ( $\delta$ -электронов).

Перегретое состояние достигается быстрым (5-20 мс) уменьшением внешнего давления. (Время роста пузырьков до размеров, пригодных для фотографирования (0,1—0,3 мм), для разных пузырьковых камер колеблется в пределах от нескольких мсек до десятков мсек). На несколько миллисекунд камера становится чувствительной и способна зарегистрировать заряженную частицу. После фотографирования треков давление поднимается до прежней величины, пузырьки «схлопываются» и камера вновь готова к работе. Цикл работы большой пузырьковой камеры  $\approx 1$  с (т. е. значительно меньше, чем у камеры Вильсона), что позволяет использовать её в экспериментах на импульсных ускорителях. Небольшие пузырьковые камеры могут работать в значительно более быстром режиме – 10-100 расширений в секунду. Моменты возникновения фазы чувствительности пузырьковой камеры синхронизуют с моментами попадания в камеру частиц от ускорителя.



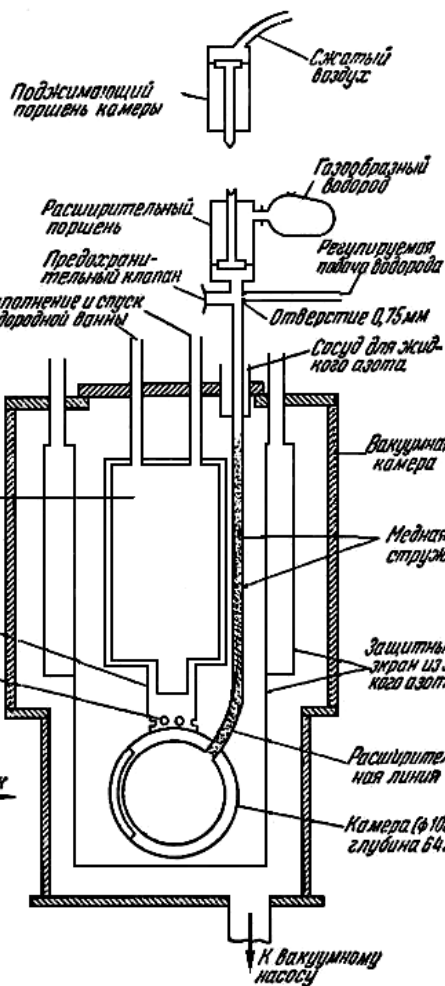


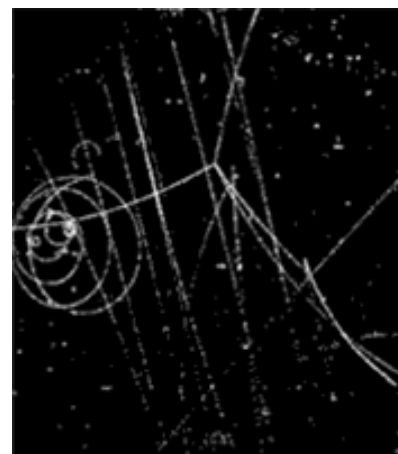
Рис. 17. Пузырьковая камера с жидким водородом.

Действие пузырьковой камеры объясняется образованием на пути частицы центров кипения - зародышевых пузырьков и их ростом до размеров, превышающих критическое значение:

$$r_{кр} = 2\sigma \left[ p_0 \exp\left(-\frac{V}{V'} \frac{p_0 - p_{кр}}{p}\right) - p \right]^{-1} \quad (1)$$

Здесь  $r_{кр}$  - критический радиус пузырька,  $\sigma$  - поверхностное натяжение жидкости,  $p_0$  — давление насыщенного пара,  $p_{кр}$  — критическое давление,  $p$  — давление пара в перегретой жидкости,  $V$  — удельный объём жидкости,  $V'$  — пара.

Рис. 18. Фотография некоторого процесса превращения элементарных частиц.



Важным преимуществом пузырьковой камеры по сравнению с камерой Вильсона и диффузионной камерой является то, что в качестве рабочей среды в ней

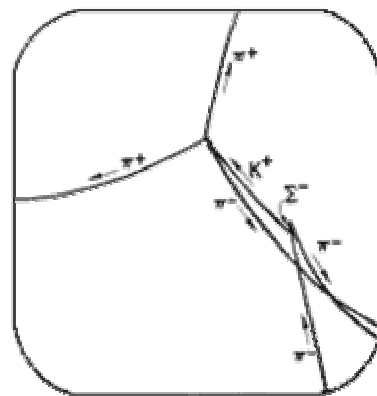
используется жидкость (жидкие водород, гелий, неон, ксенон, фреон, пропан и их смеси). Эти жидкости, являясь одновременно мишенью и детектирующей средой, обладают на 2-3 порядка большей плотностью, чем газы, что многократно увеличивает вероятность появления в них событий, достойных изучения, и позволяют целиком «уместить» в своём объёме треки высокоэнергичных частиц. Основное преимущество пузырьковой камеры - изотропная пространственная чувствительность к регистрации частиц и высокая точность измерения их импульсов.

Рис. 19. Расшифровка события, представленного на фотографии Рис. 18.

Пузырьковые камеры могут достигать очень больших размеров (до 40 м<sup>3</sup>). Их, как и камеры Вильсона, помещают в магнитное поле. Пространственное разрешение пузырьковых камер  $\approx 0.1$  мм.

Недостаток пузырьковой камеры - слабая управляемость, необходимая для отбора нужных актов взаимодействия частиц или их распада. Пузырьковую камеру невозможно (в отличие от камеры Вильсона) быстро «включить» по сигналам внешних детекторов, осуществляющих предварительный отбор событий, так как жидкость слишком инерционна и не поддается очень быстрому (за время  $\approx 1$  мкс) расширению. Поэтому пузырьковые камеры, будучи синхронизованы с работой ускорителя, регистрируют все события, инициируемые в камере пучком частиц. Значительная часть этих событий не представляет интереса.

Для измерения импульсов заряженных частиц пузырьковую камеру обычно помещают в магнитное поле. В качестве рабочей жидкости пузырьковой камеры наиболее часто применяют жидкие водород и дейтерий (криогенные камеры), а также пропан С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub>, различные фреоны, Хе, смесь Хе с пропаном (тяжеложидкостные камеры). Выбор рабочей жидкости в первую очередь зависит от требований эксперимента. Жидкий водород имеет то преимущество, что является идеальной мишенью для наблюдения элементарных столкновений. Однако плотность жидкого водорода сравнительно невелика, и для увеличения вероятности взаимодействия в объеме пузырьковой камеры приходится создавать камеры больших размеров. Для повышения эффективности регистрации частиц используют органические жидкости — пентан или пропан. Анализ взаимодействий в органических жидкостях затруднен тем обстоятельством, что в их состав

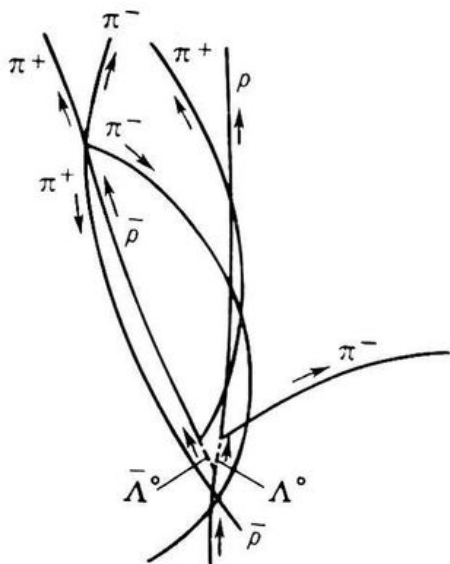


входит несколько химических элементов. Для регистрации  $\gamma$ -квантов используют жидкости с более высоким  $Z$ , например, жидкий ксенон.

**Табл. 2.** Характеристики жидкостей, наиболее часто используемых в пузырьковых камерах

Жидкости	Рабочие условия			Вероятность регистрации $\gamma$ -кванта с энергией 500 Мэв на длине 50 см	Вероятность регистрации нейтрона с энергией 1 Гэв на длине 50 см
	давление, атм	температура, °С	плотность, г/см <sup>3</sup>		
Водород	4,7	—246	0,07	0,046	0,1
Дейтерий	5,2	—240	0,13	0,055	0,185
Гелий	0,3	—270	0,124	0,053	0,113
Пропан	21	58	0,44	0,36	0,340
Ксенон	26	—19	2,2	1,00	0,950

Перегрев жидкости в пузырьковой камере достигается быстрым понижением давления от начального значения  $p_n > p_0$  до значения  $p < p_0$ . Понижение давления осуществляется за время 5-15 мсек перемещением поршня (в жидководородных камерах) либо сбросом внешнего давления из объёма, ограниченного гибкой мембраной (в тяжеложидкостных камерах). Частицы впускаются в пузырьковую камеру в момент её максимальной чувствительности. Спустя время, необходимое для достижения пузырьками достаточно больших размеров, камера освещается и следы фотографируются (стереофотосъёмка с помощью 2-4 объективов). После фотографирования давление поднимается до прежней величины, пузырьки исчезают, и пузырьковая камера снова оказывается готовой к действию.



**Рис. 20.** Регистрация в жидководородной камере ядерной реакции:  $\bar{p} + p \rightarrow \bar{\Lambda}^0 + \Lambda^0 \rightarrow \pi^- + p \rightarrow \pi^+ + \bar{p}$ . Антипротон  $\bar{p}$ , рожденный при распаде антилямбдагиперона  $\bar{\Lambda}^0$ , сталкивается с протоном  $p$  и аннигилирует в результате реакции:  $\bar{p} + p \rightarrow 2\pi^+ + 2\pi^-$ . (здесь  $\bar{\Lambda}^0$  - лямбдагиперон,  $\pi^-$  - и  $\pi^+$  - пионы).

Весь цикл работы пузырьковой камеры составляет величину менее 1 сек, время чувствительности  $\sim 10-40$  мсек. Пузырьковые камеры (кроме ксеноновых) размещаются в сильных магнитных полях. Это позволяет определить импульсы заряженных частиц по измерению радиусов кривизны  $r$  их траекторий:

$$kc = 300 H r / \cos j \quad (2)$$

Здесь  $j$  — угол между направлением магнитного поля  $H$  и импульсом  $k$  частицы,  $c$  — скорость света. Искажения следов в пузырьковой камере невелики и связаны главным образом с многократным рассеянием частиц. Используя прецизионную измерительную аппаратуру, можно определять пространственное положение следов и их кривизны с большей степенью точности.

Пузырьковые камеры, как правило, используются для регистрации актов взаимодействия частиц высоких энергий с ядрами рабочей жидкости или актов распада частиц. В первом случае рабочая жидкость исполняет роли и регистрирующей среды, и среды-мишени. Эффективность регистрации пузырьковой камерой различных процессов взаимодействия или распада определяется в основном размерами пузырьковой камеры. Регистрация нейтральных частиц ( $\gamma$ -квантов, нейтронов) производится по актам их взаимодействия с рабочей жидкостью (см. **Табл. 2**).