



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

СЗУ.1  
с-603

М.И. Соловьев

1701

ПРОПАНОВЫЕ ПУЗЫРЬКОВЫЕ КАМЕРЫ  
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических  
наук

Дубна 1984

М.И. Соловьев

С344.1

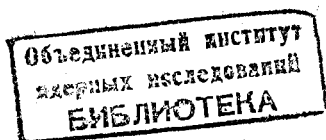
С-603

1701

ПРОПАНОВЫЕ ПУЗЫРЬКОВЫЕ КАМЕРЫ  
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических  
наук.

211 вф



Дубна 1964

Успехи физики высоких энергий за последнее десятилетие во многом были обеспечены применением пузырьковых камер. Среди приборов, используемых для изучения процессов взаимодействия быстрых частиц с протонами, нейтронами и ядрами, пузырьковым камерам принадлежит особое место. Это объясняется целым рядом преимуществ, которыми обладают пузырьковые камеры по сравнению с другими методами регистрации частиц, получаемых от ускорителей. Пузырьковые камеры удачно сочетают в себе положительные качества ядерных фотоэмульсий и камер Вильсона: по плотности рабочего вещества пузырьковые камеры приближаются к ядерным фотоэмульсиям, а по размерам превосходят камеры Вильсона. Они превосходят их также по частоте повторения рабочих циклов. Пузырьковые камеры могут работать с частотой в сотни и даже тысячи раз превышающей частоту рабочих циклов камер Вильсона.

Водородные пузырьковые камеры являются идеальными приборами для изучения взаимодействий с протонами. Среди жидкостей, применяемых в пузырьковых камерах, наиболее широкое распространение получили водород, дейтерий, гелий, пропан, ксенон. Возможно использование также других жидкостей и смесей.

В пузырьковых камерах удачно сочетаются свойства очень эффективных детекторов ионизирующих частиц и ядерных мишеней. Важнейшим преимуществом пузырьковых камер является их способность регистрировать все заряженные продукты ядерных реакций (кроме ядер отдачи с малыми пробегами), а при значительном объеме и наполнении тяжелыми жидкостями — также почти все  $\gamma$ -кванты. Для большинства жидкостей применение магнитного поля в десять-тридцать тысяч эрстед позволяет производить измерения импульсов заряженных частиц с высокой точностью. Все это создает новые возможности для более глубокого изучения природы взаимодействий элементарных частиц.

Эти и ряд других положительных качеств пузырьковых камер по сравнению с ядерными фотоэмульсиями, камерами Вильсона и другими приборами стимулировали их быстрое развитие за прошедшие 10 лет. Основным результатом этого развития явилось колоссальное увеличение размеров камер. Первые камеры имели объем в несколько кубических сантиметров. В настоящее время уже работают камеры с рабочими объемами в сотни литров. Проектируются камеры с размерами рабочей области в несколько тысяч литров.

Применение пузырьковых камер в экспериментах, проводимых на ускорителях, постоянно расширяется. Совершенствуются методы обработки получаемых на них сте-

реофотографий. Развитие вычислительной техники оказывает большое влияние на автоматизацию измерений. Все это позволяет сократить сроки получения физических результатов и делает пузырьковые камеры для ряда физических задач (генерация и детектирование редких событий, резонансы и т.д.) незаменимыми приборами в экспериментах, проводимых на ускорителях.

Настоящая диссертация является обобщением опыта ее автора по созданию пропановых пузырьковых камер ЛВЭ ОИЯИ и применению их в экспериментах по изучению взаимодействий частиц при больших энергиях.

В диссертации обсуждается широкий круг вопросов как методического, так и экспериментального характера. Большинство экспериментальных результатов получено впервые.

Среди различных типов пузырьковых камер очень широкое применение нашли пропановые пузырьковые камеры. Жидкий пропан при рабочей температуре имеет плотность  $0,43 \text{ г/см}^3$ . Плотность свободного водорода в рабочих условиях пропановых пузырьковых камер на 30% выше плотности жидкого водорода в водородных пузырьковых камерах. Такая большая плотность водорода позволяет изучать взаимодействия частиц с протонами. Пузырьковые камеры, наполняемые жидкостями, состоящими из смеси сложных ядер, уступают по своим качествам пузырьковым камерам, наполняемым чистыми жидкостями (водород, дейтерий, гелий и т.д.). Наличие углерода в молекуле пропана несколько затрудняет отбор чисто водородных взаимодействий. В то же время сравнительно высокая плотность жидкого пропана делает его пригодным для изучения процессов с испусканием  $\gamma$ -квантов. Радиационная длина в пропане 110 см. Присутствие углерода затрудняет определение импульсов заряженных частиц по измерениям кривизн треков, обусловленных магнитным полем. Вносимая ошибка из-за многократного кулоновского рассеяния может быть снижена применением магнитных полей повышенной напряженности. Увеличение размеров камер также дает возможность увеличить точности измерений.

В первой главе дано описание пропановых пузырьковых камер ЛВЭ<sup>1-5/</sup> с рабочими объемами от  $600 \text{ см}^3$  до 500 литров. Первая пропановая пузырьковая камера<sup>1/</sup> была сконструирована в 1955 году. Камера предназначалась для испытания материалов, отработки конструкций отдельных узлов, изучения рабочих характеристик жидкостей и выбора оптимальных термодинамических условий, а также приобретения опыта работы на ускорителе и решения вопросов обработки стереофотографий<sup>1/8/</sup>. На этой камере проверялась также возможность работы с вынесенной на расстояние системой расширения, использованием разных промежуточных жидкостей для передачи давления, с горизонтальным расположением стекол и т.д.

В конструкции другой камеры с таким же рабочим объемом<sup>1/2/</sup> проводилось испытание расширителя, сильфонного типа, а также изучались различные смеси газов и жидкостей для использования в пузырьковых камерах.

На основе экспериментов с пузырьковыми камерами маленького объема в 1957 году была сконструирована и изготовлена пропановая пузырьковая камера с рабочим объемом 24 литра ( $550 \times 280 \times 140 \text{ мм}^3$ ) для работы в постоянном магнитном поле магнитов СП-40 и СП-41<sup>1/3,4/</sup>. Камера выполнена с двумя вариантами системы расширения - сильфонной и мембранной. Продолжительное время камера работает с мембранной системой расширения. Конструкция камеры и ее расположение в магните СП-40 показаны на рис. 1.

В этой камере для получения однородного магнитного поля и более эффективного использования магнитного зазора имеется одно большое стекло, через которое производится фотографирование. Камера стоит на нижнем полюсном блоке магнита СП-40. Рабочий объем камеры расположен ниже средней плоскости магнитного зазора, так что влияние отверстия в верхнем полюсе на однородность поля незначительно. При таком расположении камеры в магните СП-40 получена напряженность поля  $13,7 \text{ э.с.}$  неоднородностью для всего рабочего объема не более  $\pm 3\%$ .

Впервые в практике создания пузырьковых камер применено освещение под углом  $90^\circ$  к оси фотографирования. Освещение производится через маленькие иллюминаторы восьмью лампами ИФК-120, расположенными близко к стеклам иллюминаторов. Такое расположение обеспечивает большой угол расходимости света и хорошую освещенность всего рабочего объема.

Верхнее стекло камеры закрыто защитным кожухом, в котором находится углекислый газ под давлением 15 атм. Это давление снимает часть нагрузки на большое стекло.

Фотографирование производится фотоаппаратом с базой  $300 \text{ мм}$ <sup>1/7/</sup>, высота съемки - 646 мм от передней узловой точки объективов до пропана с редукцией преломляющих сред (стекло, углекислый газ) к воздуху при нормальном давлении. Используются объективы "Руссар-Плазмат" с углом зрения  $60^\circ$ . Объективы отъюстированы для фотографирования с постоянного расстояния. Расстояние от задней узловой точки объективов до пленки 67,35 мм. Для средней плоскости камеры фотографирование ведется с уменьшением 1:10.

В конструкции камеры магнитный клапан вынесен в зону слабого рассеянного магнитного поля и защищен стальным экраном. Экран одновременно является стабилизатором давления, до которого производится выхлоп газа из расширителя, и глушителем звука.

В этой же главе подробно описываются другие узлы и системы 24-литровой пропановой пузырьковой камеры, синхронизация ее работы с ускорителем, система блокировок, меры безопасности при работе с камерой и т.д.

24-литровая пропановая пузырьковая камера сделала более миллиона циклов расширения. На ней получено более полумиллиона рабочих фотографий в разных пучках. В диссертации обсуждается только некоторая часть экспериментальных работ, выполненных на 100 000 фотографий, полученных в пучках отрицательных пионов с импульсом 7-8 Гэв/с. Эксперименты по изучению процессов с образованием странных частиц по изучению резонансов, по генерации редких событий и т.д. показали, что желательно иметь камеру большего размера. В этой же главе диссертации дается описание пропановой пузырьковой камеры с рабочим объемом 500 литров<sup>15/</sup> (2100x850x400 мм<sup>3</sup>). На рис. 2 показана схема двухметровой пропановой пузырьковой камеры. Камера изготовлена и находится в наладке.

Во второй главе диссертации обсуждаются вопросы вывода частиц и формирования пучков отрицательных пионов для работы с пузырьковыми камерами. Подробно описываются условия вывода, связанные со спецификой постановки эксперимента и особенностями устройства ускорителя<sup>14/</sup>. Например, для экспериментов с пузырьковыми камерами очень важно иметь короткий сброс частиц на мишень. Чем короче сброс, тем меньше разница в размерах пузырьков, образованных первой и последней частицами, прошедшими через камеру, и тем лучше условия для измерения ионизации.

Положение мишени для вывода вторичных частиц с заданным импульсом и под заданным углом определялось путем расчетов. В диссертации дается подробное изложение метода расчета положения мишени в вакуумной камере ускорителя в момент сброса частиц на мишень с учетом поправок на рассеянное магнитное поле вне ускорителя. Это поле изменяет направление траектории вылетающих частиц, что равносильно изменению положения источника. Для обеспечения лучшей фокусировки пучка квадрупольными линзами проведено определение положения мнимого источника в горизонтальной и вертикальной плоскостях для импульсов вторичных  $\pi^-$ -мезонов 4 и 7 Гэв/с и мишени с размерами 115x50x20 мм<sup>3</sup>.

Формирование пучка производилось с помощью четырех квадрупольных линз МЛ-7, поворотного магнита СП-40 и четырех коллиматоров. Расположение аппаратуры показано на рис. 3. Подробнее с расчетами вывода пучка можно ознакомиться в отчете<sup>14/</sup>, а с описанием формирования пучка и его параметров - в докладе на Международной конференции по ускорителям и приборам в Женеве в 1958 году<sup>18/</sup>.

Состав пучка определялся расчетным путем. Пучок пионов с импульсом 7 Гэв/с имел почти максимально возможный импульс, поэтому антипротонов среди  $\pi^-$ -ме-

зонов не было. Не было и  $K^-$ -мезонов, так как сечение их образования с очень большими импульсами весьма мало и они имеют короткое время жизни и распадаются на пути в камеру. Основной примесью могла быть только примесь  $\mu^-$ -мезонов. Оценка этой примеси делалась из геометрии канала, импульсного спектра пучка, среднего времени жизни пионов и напряженности поля в поворотном магните. Найденная таким образом примесь  $\mu^-$ -мезонов составляет  $(5 \pm 2)\%$ <sup>19/</sup>. Возможная примесь электронов не учитывалась.

В третьей главе диссертации излагается метод восстановления пространственных координат точек по измерениям их изображений на стереоснимках, исследуются возможные ошибки и определяются точности, с которыми могут быть получены такие характеристики как импульсы, углы, пробеги и т.д. для первичных и вторичных частиц.

До 1958 года пространственное восстановление координат точек в пузырьковых камерах по измерениям их координат на стереоснимках для случая фотографирования в среде с показателем преломления больше единицы с близкого расстояния в литературе не рассматривалось. Этот метод изложен нами на Совещании по камерам Вильсона, диффузионным и пузырьковым камерам, которое проходило в ОИЯИ в ноябре 1957 года<sup>16/</sup>. В последующие годы аналогичный подход к обработке стереофотографий развивался в ряде лабораторий. Успех метода математической реконструкции треков был обеспечен развитием вычислительной техники. Суть метода может быть легко уяснена из рис. 4, на котором показан ход световых лучей, проектирующих точку на пленку через преломляющие среды. Математическое выражение координат X, Y, Z точки M в пространстве через измеренные координаты  $x_1, y_1, x_2, y_2$  на пленке и параметры системы фотографирования дается следующими формулами:

$$X = \frac{Bx_1}{x_1 - x_2 \frac{y_1}{y_2}}$$

$$Y = \frac{By_1}{x_1 - x_2 \frac{y_1}{y_2}}$$

$$Z = H_0 + d + \left[ \frac{Bv}{x_1 - x_2 \frac{y_1}{y_2}} - (H_0 + d) \sqrt{n_3^2 + (n_3^2 - 1) \frac{x_1^2 + y_1^2}{v^2}} + \frac{d \sqrt{n_3^2 + (n_3^2 - 1) \frac{x_1^2 + y_1^2}{v^2}}}{\sqrt{n_3^2 + (n_3^2 - 1) \frac{x_1^2 + y_1^2}{v^2}}} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{n_3^2 + (n_3^2 - 1) \frac{x_1^2 + y_1^2}{v^2}}} \right) \right]$$

Начало координат связано с левой системой фотографирования. Оси объективов параллельны друг другу и перпендикулярны плоскости камеры.

- $x_1, y_1$  - координаты точки  $M$  на левом кадре,
- $x_2, y_2$  - координаты точки  $M$  на правом кадре,
- $H_0$  - высота фотографирования,
- $d$  - толщина стекла,
- $v$  - расстояние от задней узловой точки объектива до пленки,
- $B$  - база, расстояние между оптическими центрами,
- $n_1 = 1$  - показатель преломления воздуха,
- $n_2$  - показатель преломления стекла,
- $n_3$  - показатель преломления пропана.

При некоторых разумных предположениях об определенных условиях фотографирования формулы могут быть упрощены<sup>/8,10/</sup>. Измерения производились относительно оптических центров, расчеты - на электронно-счетной машине. При измерениях на автоматах расчетные формулы были несколько изменены<sup>/11/</sup>.

На точность определения координат точек в камере, импульсов заряженных частиц по измерениям координат точек на треках, углов между следами заряженных и нейтральных частиц и другие параметры событий оказывают влияние:

1. возможные искажения оптической системы;
2. искажения из-за деформации пленки;
3. искажения из-за движения жидкости и изменения показателя преломления в рабочем объеме из-за неоднородного нагрева;
4. многократное кулоновское рассеяние частиц в пропане;
5. неоднородность магнитного поля;
6. разброс пузырьков на следе;
7. разброс отсчетов (точность измерений);
8. расчет по приближенным формулам;
9. потери энергии при прохождении частиц в пропане и неопределенность в кривой пробег-импульс.

В диссертации подробно обсуждается каждая из этих причин. На экспериментальном материале по изучению образования  $\Lambda$ -гиперонов и  $K^0$ -мезонов отрицательными пионами на водороде и углероде сделана оценка точностей измерений и показано, что оптическая система 24-литровой пропановой пузырьковой камеры обеспечивает достаточную точность измерений для широкого круга задач<sup>/10/</sup>.

В четвертой главе диссертации излагаются некоторые эксперименты, выполненные с помощью пропановых пузырьковых камер.

1. Одной из первых задач, которые решались автором диссертации, была задача по изучению взаимодействий  $\pi^+$ -мезонов с ядрами углерода при энергии

250-270 Мэв<sup>/12/</sup>. Использовалась камера с объемом рабочей области 600 см<sup>3</sup>. Цель этой задачи в 1956-57 годах состояла в приобретении опыта работы с пузырьковыми камерами в пучках частиц от ускорителей и решения проблемы обработки стереофотографий<sup>/6/</sup>. Наличие экспериментальных результатов в близких интервалах энергий позволяло сравнить наши данные с данными других авторов и тем самым проверить качества новой методики. Все ранние работы<sup>/13-18/</sup> были выполнены либо с камерами Вильсона, либо с помощью сцинтилляционных счетчиков. Применение пропановых пузырьковых камер для изучения  $\pi^+$ - $C$ -взаимодействий дает то преимущество, по сравнению с другими методами, что ядро углерода находится в самой рабочей жидкости и хорошо определяется точка взаимодействия. К недостаткам пропана для этого эксперимента следует отнести довольно большую плотность. Следы ядер отдачи совершенно не видны в камере.

Полученные результаты по упругому и неупругому рассеяниям хорошо согласуются с результатами других авторов<sup>/13-18/</sup>:

$$\begin{aligned} \sigma_{el} &= (192 \pm 18,5) \text{ мбн}, & \sigma_{in} &= (120 \begin{smallmatrix} + 38 \\ - 19 \end{smallmatrix}) \text{ мбн}, \\ \sigma_a + \sigma_{oh} &= (185 \begin{smallmatrix} + 34 \\ - 22 \end{smallmatrix}) \text{ мбн}, & \sigma_{in, tot} &= (296 \begin{smallmatrix} + 35 \\ - 28 \end{smallmatrix}) \text{ мбн}. \end{aligned}$$

2. Первой работой в пучке отрицательных пионов с импульсом 7 Гэв/с был эксперимент по изучению упругого рассеяния пионов на водороде. Результаты этой работы доложены В.И. Векслером на Киевской конференции в 1959 году<sup>/19/</sup>. В диссертации подробно излагаются методические вопросы обработки: поиск, анализ и идентификация случаев упругого рассеяния. Из 550 отобранных и обработанных случаев только 218 удовлетворяли критериям кинематики упругого рассеяния. По 201 случаю в эффективной области камеры получено сечение упругого рассеяния для углов в с.д.м. больше  $6^\circ$

$$\sigma_{el} = (3,75 \begin{smallmatrix} + 0,25 \\ - 0,55 \end{smallmatrix}) \text{ мбн.}$$

Полное сечение взаимодействия отрицательных пионов с водородом при импульсе 6,8 Гэв/с найдено равным  $\sigma_{tot} = (30 \pm 5) \text{ мбн}$ . Эти результаты сравнивались с расчетами по оптической модели<sup>/20,21/</sup>. Лучшее согласие получено при следующих параметрах:

$$\begin{aligned} R &= 1,05 \cdot 10^{-13} \text{ см (радиус сферы рассеяния)}, \\ K &= 0,71 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1} \text{ (коэффициент поглощения нуклона)}, \\ k_1 &= 0 \text{ (изменение действительной части волнового числа)}, \\ \sigma_d &= 5,5 \text{ мбн (дифракционное рассеяние)}, \\ \sigma_{in} &= 21,0 \text{ мбн (сечение неупругого взаимодействия)}. \end{aligned}$$

Проведено сравнение с результатами эксперимента при импульсе  $\pi^-$ -мезонов

1,44 ГэВ/с<sup>/22/</sup>, а также с данными при других энергиях. Из сравнения результатов при 8,8 и 1,44 ГэВ/с для зависимости  $\lambda^2 \frac{d\sigma}{d\Omega}$  от  $(\sin \theta^*/\pi)/\lambda$  следует, что несмотря на большое различие в энергиях результаты в пределах ошибок совпадают. Это свидетельствует в пользу постоянства поперечного импульса при упругом рассеянии, что равносильно постоянству эффективного параметра удара, определяющего величину сечения взаимодействия пионов с нуклонами.

3. Далее в диссертации излагаются результаты изучения образования каскадных гиперонов. Впервые каскадные гипероны были обнаружены в космических лучах<sup>/23/</sup>. Хотя порог генерации  $\Xi^-$ -гиперонов отрицательными пионами всего 2,19 ГэВ, все же их долгое время не удавалось генерировать в лабораторных условиях на ускорителях. Первые два  $\Xi^-$ -гиперона были получены при импульсе  $\pi^-$ -мезонов 5,5 ГэВ/с<sup>/24/</sup>. Даже в настоящее время зарегистрировано всего несколько десятков случаев рождения  $\Xi^-$ -гиперонов отрицательными пионами. В диссертации подробно описываются методы отбора и идентификации  $\Xi^-$ -гиперонов. На 27000 фотографиях с импульсом  $\pi^-$ -мезонов 8,8 ГэВ/с получен всего один  $\Xi^-$ -гиперон, а на 75000 фотографиях с импульсом  $\pi^-$ -мезонов  $\sim 8$  ГэВ/с найдено 10 случаев образования и распада  $\Xi^-$ -гиперонов<sup>/25,28/</sup>. По этим 11 случаям определена масса  $\Xi^-$ -гиперона, оказавшаяся равной  $(1317,0 \pm 2,2)$  МэВ, и среднее время жизни этих частиц, равное  $2,2 \cdot 10^{-10}$  сек. Эти результаты подтверждаются новейшими данными.

Обсуждаются характеристики образования и сечение генерации каскадных гиперонов в зависимости от энергии. Показывается, что с ростом энергии  $\pi^-$ -мезонов намечается значительный рост сечения генерации  $\Xi^-$ -гиперонов.

Впервые результаты этого эксперимента сообщались на конференции по физике частиц высоких энергий в Рочестере в 1960 году<sup>/25/</sup>.

4. Одним из важных результатов, приводимых в диссертации, является обнаружение множественного рождения странных частиц<sup>/25/</sup>. В диссертации дан подробный анализ нескольких событий, которые имеют более двух хорошо идентифицированных странных частиц. На рис. 5 дается фотография образования  $\Lambda^-$ -гиперона, двух  $K^0$ - и одного  $K^+$ -мезонов на водороде. Это было первое прямое экспериментальное наблюдение множественного образования  $K^-$ -мезонов с ростом энергии первичных пионов<sup>/25/</sup>.

5. Как уже было отмечено, пропановая пузырьковая камера позволяет проводить изучение нейтральных пионов. Их распады на  $\gamma$ -кванты хорошо регистрируются по  $e^+e^-$ -парам. В диссертации сообщаются результаты изучения нейтральных пионов образующихся в одном акте взаимодействия совместно со странными частицами<sup>/25-28/</sup>.

Эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов в 24-литровой пропановой пузырьковой камере с учетом эффективности регистрации нейтральных странных частиц равна  $(9 \pm 1)\%$ .

На основе 188 случаев образования нейтральных странных частиц, сопровождающихся хотя бы одной  $e^+e^-$ -парой, зарегистрированной в камере, делается анализ угловых и энергетических распределений  $\gamma$ -квантов. Угловые и энергетические распределения  $\gamma$ -квантов при наших энергиях повторяют с некоторым размытием распределения  $\pi^0$ -мезонов и близки к угловым и импульсным распределениям  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов из процессов с образованием странных частиц.

При описании элементарных частиц все современные теории поля используют СРТ-теорему<sup>/29/</sup>. Эта теорема утверждает, что для любой частицы должна существовать античастица, которая может быть или не быть идентичной самой частице. В течение довольно длительного времени этот общий закон симметрии барионов не имел экспериментального подтверждения, пока в 1955 году Сегре, Чемберлен и др.<sup>/30/</sup> открыли антипротон, а затем и антинейтрон. Однако и после этих открытий большой интерес представляло дальнейшее подтверждение принципа симметрии. В 1958 году был обнаружен  $\bar{\Lambda}$ -гиперон<sup>/31/</sup>. Первый заряженный антигиперон был обнаружен в Дубне, в марте 1960 года на фотографиях 24-литровой пропановой пузырьковой камеры<sup>/32/</sup>. В настоящее время антигипероны генерируются антипротонами, т.е. в реакциях, где принимают участие антибарионы. Изучение образования антибарионов отрицательными пионами продолжает представлять большой интерес для выяснения процессов генерации  $\bar{B}\bar{B}$ -пары и изучения свойств антибарионов.

В 24-литровой пропановой пузырьковой камере впервые наблюдалось образование антипротонов отрицательными пионами. Об этих результатах было сообщено на конференции в Киеве в 1959 году<sup>/33/</sup>. Характеристики двух антипротонов<sup>/34/</sup>, образовавшихся при взаимодействии  $\pi^-$ -мезонов с нуклонами, подробно описаны в диссертации.

В пучке отрицательных пионов изучалось также образование  $\bar{\Lambda}$ -гиперонов<sup>/35/</sup>. Сделана оценка сечения образования этих частиц при наших энергиях и дается сравнение с результатами других авторов, использовавших пучки пионов с энергиями выше нашей.

Таким образом с помощью 24-литровой пропановой пузырьковой камеры при работе ее в пучках пионов больших энергий образовалось и было зарегистрировано большинство частиц и античастиц;

$\gamma, e^+e^-, \mu^+\mu^-, \pi^+\pi^-, \pi^0\pi^0, K^0K^0, K^+K^-, pp, \bar{p}\bar{p}, \Lambda, \bar{\Lambda}, \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \bar{\Sigma}^+, \bar{\Sigma}^0, \bar{\Sigma}^-.$

- $x_1, y_1$  - координаты точки  $M$  на левом кадре,
- $x_2, y_2$  - координаты точки  $M$  на правом кадре,
- $H_0$  - высота фотографирования,
- $d$  - толщина стекла,
- $v$  - расстояние от задней узловой точки объектива до пленки,
- $B$  - база, расстояние между оптическими центрами,
- $n_1 = 1$  - показатель преломления воздуха,
- $n_2$  - показатель преломления стекла,
- $n_3$  - показатель преломления пропана.

При некоторых разумных предположениях об определенных условиях фотографирования формулы могут быть упрощены /8,10/. Измерения производились относительно оптических центров, расчеты - на электронно-счетной машине. При измерениях на автоматах расчетные формулы были несколько изменены /11/.

На точность определения координат точек в камере, импульсов заряженных частиц по измерениям координат точек на треках, углов между следами заряженных и нейтральных частиц и другие параметры событий оказывают влияние:

1. возможные искажения оптической системы;
2. искажения из-за деформации пленки;
3. искажения из-за движения жидкости и изменения показателя преломления в рабочем объеме из-за неоднородного нагрева;
4. многократное кулоновское рассеяние частиц в пропане;
5. неоднородность магнитного поля;
6. разброс пузырьков на следе;
7. разброс отсчетов (точность измерений);
8. расчет по приближенным формулам;
9. потери энергии при прохождении частиц в пропане и неопределенность в кривой пробег-импульс.

В диссертации подробно обсуждается каждая из этих причин. На экспериментальном материале по изучению образования  $\Lambda$ -гиперонов и  $K^0$ -мезонов отрицательными пионами на водороде и углероде сделана оценка точностей измерений и показано, что оптическая система 24-литровой пропановой пузырьковой камеры обеспечивает достаточную точность измерений для широкого круга задач /10/.

В четвертой главе диссертации излагаются некоторые эксперименты, выполненные с помощью пропановых пузырьковых камер.

1. Одной из первых задач, которые решались автором диссертации, была задача по изучению взаимодействий  $\pi^+$ -мезонов с ядрами углерода при энергии

250-270 Мэв /12/. Использовалась камера с объемом рабочей области 600 см<sup>3</sup>. Цель этой задачи в 1956-57 годах состояла в приобретении опыта работы с пузырьковыми камерами в пучках частиц от ускорителей и решения проблемы обработки стереофотографий /8/. Наличие экспериментальных результатов в близких интервалах энергий позволяло сравнить наши данные с данными других авторов и тем самым проверить качества новой методики. Все ранние работы /13-18/ были выполнены либо с камерами Вильсона, либо с помощью сцинтилляционных счетчиков. Применение пропановых пузырьковых камер для изучения  $\pi^+$ -C взаимодействий дает то преимущество, по сравнению с другими методами, что ядро углерода находится в самой рабочей жидкости и хорошо определяется точка взаимодействия. К недостаткам пропана для этого эксперимента следует отнести довольно большую плотность. Следы ядер отдачи совершенно не видны в камере.

Полученные результаты по упругому и неупругому рассеяниям хорошо согласуются с результатами других авторов /13-18/:

$$\begin{aligned} \sigma_{el} &= (192 \pm 18,5) \text{ мбн}, & \sigma_{in} &= (120 \pm 38) \text{ мбн}, \\ \sigma_s + \sigma_{oh} &= (165 \pm 34) \text{ мбн}, & \sigma_{in, tot} &= (298 \pm 35) \text{ мбн}. \end{aligned}$$

2. Первой работой в пучке отрицательных пионов с импульсом 7 Гэв/с был эксперимент по изучению упругого рассеяния пионов на водороде. Результаты этой работы доложены В.И. Векслером на Киевской конференции в 1959 году /19/. В диссертации подробно излагаются методические вопросы обработки: поиск, анализ и идентификация случаев упругого рассеяния. Из 550 отобранных и обработанных случаев только 218 удовлетворяли критериям кинематики упругого рассеяния. По 201 случаю в эффективной области камеры получено сечение упругого рассеяния для углов в с.д.м. больше  $6^\circ$

$$\sigma_{el} = (3,75 \pm 0,25) \text{ мбн}.$$

Полное сечение взаимодействия отрицательных пионов с водородом при импульсе 6,8 Гэв/с найдено равным  $\sigma_{tot} = (30 \pm 5) \text{ мбн}$ . Эти результаты сравнивались с расчетами по оптической модели /20,21/. Лучшее согласие получено при следующих параметрах:

$$\begin{aligned} R &= 1,05 \cdot 10^{-13} \text{ см (радиус сферы рассеяния)}, \\ K &= 0,71 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1} \text{ (коэффициент поглощения нуклона)}, \\ k_1 &= 0 \text{ (изменение действительной части волнового числа)}, \\ \sigma_d &= 5,5 \text{ мбн (дифракционное рассеяние)}, \\ \sigma_{in} &= 21,0 \text{ мбн (сечение неупругого взаимодействия)}. \end{aligned}$$

Проведено сравнение с результатами эксперимента при импульсе  $\pi^-$ -мезонов



С помощью этой камеры проводится также изучение резонансов и механизма образования обычных и странных частиц.

#### Основные выводы диссертации

1. Разработан большой комплекс аппаратуры, включающий несколько пропановых пузырьковых камер с рабочими объемами 0,6, 24 и 500 литров.

2. Получены формулы для воспроизведения пространственных координат точки, находящейся в средах с различными показателями преломления, по измерениям координат на стереоснимках.

3. Дан подробный анализ возможных ошибок при работе с пропановыми пузырьковыми камерами. На основе анализа большого экспериментального материала определены точности при работе с фотографиями, полученными на 24-литровой пропановой пузырьковой камере.

4. Проведено изучение взаимодействий положительных пионов с углеродом при энергии 250 и 270 Мэв с помощью методики пузырьковых камер. Показано, что новая методика по сравнению с электроникой и камерами Вильсона позволяет получать больше сведений о процессах взаимодействий.

5. Изложен опыт работы камер на пучках от синхрофазотрона, включая расчет положения мишени для вывода отрицательных частиц и формирования пучков пионов высоких энергий.

6. Изучено упругое рассеяние отрицательных пионов с импульсом 6,8 Гэв/с на водороде. Полученные данные были первыми результатами в этой области энергий. Найдено, что поперечный импульс частиц не изменяется с изменением энергии первичного пиона.

7. Исследовано образование каскадных гиперонов отрицательными пионами. Определены масса, время жизни, а также угловые и импульсные характеристики образования этих частиц. Сделаны заключения о ходе сечения генерации отрицательных каскадных гиперонов с ростом энергии первичных пионов.

8. Впервые экспериментально доказано, что с ростом энергии налетающих отрицательных пионов растет не только сечение образования  $K^-$ -мезонов на водороде, но также их множественность.

9. Проведено изучение генерации  $\pi^0$ -мезонов из процессов с образованием

$\Lambda^-$ -гиперонов и  $K^0$ -мезонов в  $\pi^-p$ - и  $\pi^-C$ -взаимодействиях при энергиях 7-8 Гэв.

10. Зарегистрированы случаи образования антибарионов  $\pi^-$ -мезонами с энергией 7-8 Гэв. Даны основные характеристики их образования в лабораторной системе и в с.д.м. пион-нуклон.

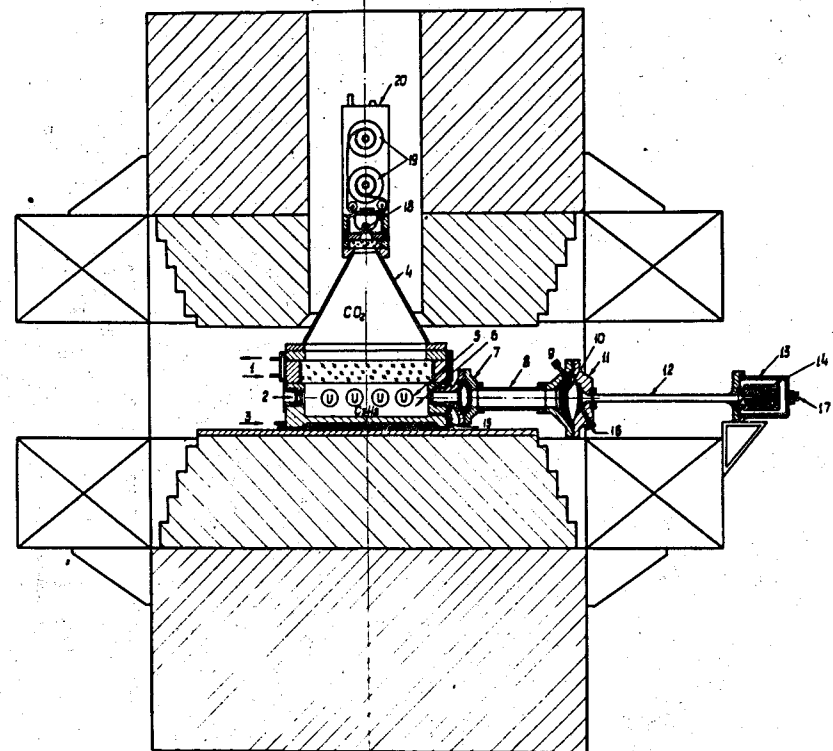
Основные результаты диссертации опубликованы в работах /3,5,6,8,9,12,25,26,32,34,35/

#### Л и т е р а т у р а

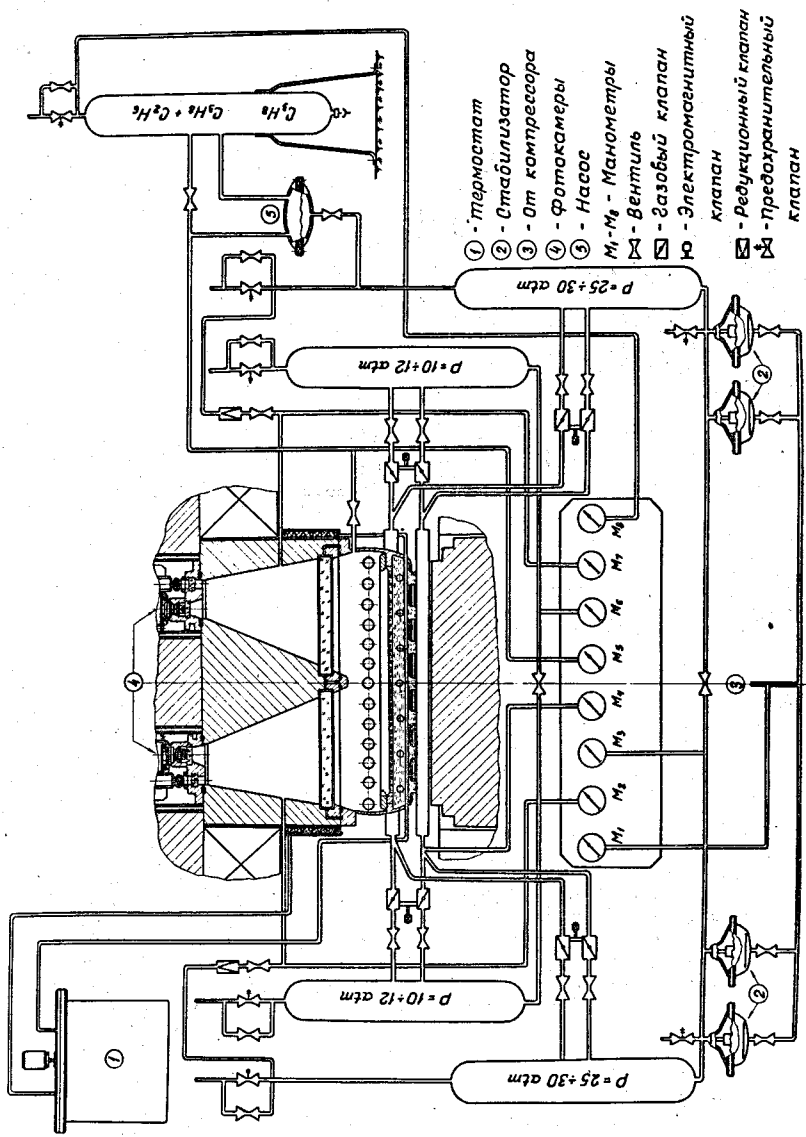
1. М.И. Соловьев, Е.Н. Кладницкая, Н.А. Смирнов, ОИИИ, Б-1-827.(1958).
2. Э.М. Мальцев, Дипломная работа, ОИЯИ (1957).
3. Ван Ган-чан, М.И. Соловьев, Ю.Н. Шкобин, ОИИИ, Р-230, 120-137 (1958), ПТЭ, 1, 41(1959).
4. Ван Ган-чан, Ван Цу-цзен, Дин Да-цао, А.В. Никитин, Нгуен Дин Ты, Е.Н.Кладницкая, М.И. Соловьев, ОИИИ, Б-2-829 (1958).
5. М.П. Баландин, Н.Г. Борисов, Ван Юн-чан, Р.П. Кухарева, В.А. Мойсенко, В.И. Снятков, М.И. Соловьев, И.В. Чувило, Nucl. Instrum., 20, 110 (1963).
6. Ван Ган-чан, Ван Цу-цзен, Дин Да-цао, Е.Н. Кладницкая, М.И. Соловьев, Материалы Совещания по камерам Вильсона, диффузионным и пузырьковым камерам, ноябрь 1957 года, выпуск V, ОИЯИ Р-284, 101 (1959).
7. Э.М. Лившиц, Материалы Совещания по камерам Вильсона, диффузионным и пузырьковым камерам, ноябрь 1957 года, ОИИИ Р-257, 110, (1958).
8. Wang Tso-tsiang, Ding Da-tsai, V.G.Ivanov, E.N.Kladnitskaya, Nguen Dinh Tu, M.I.Soloviev, M.D.Shafranov, Intern. Conf. on High Energy Accelerators and Instrum., CERN, 1959, p.412.
9. Ван Ган-чан, Е.Н. Кладницкая, Л.А. Кулюкина, Нгуен Дин Ты, А.В.Никитин, С.З. Отвиновский, М.И. Соловьев, Р. Сосновский, М.Д. Шафранов, ЖЭТФ, 38, 426 (1960).
10. В.И. Векслер, Н.М. Вирясов, И. Врана, Ким Хи Ин, Е.Н. Кладницкая, А.А.Кузнецов, Нгуен Дин Ты, М.И. Соловьев, Т. Хофмоэль, ОИИИ, Б-2-1133, (1961).
11. Е.Н. Кладницкая, Материалы Совещания по методике пузырьковых камер. ОИЯИ, 796 (1961).
12. Ван Ган-чан, Ван Цу-цзен, Дин Да-цао, Л.Н. Дубровский, Е.Н. Кладницкая, М.И. Соловьев. ЖЭТФ, 35, 899 (1958).
13. H.Byfield, J.Kessler, L.Ledemann, Phys. Rev., 86, 17 (1952).
14. J.Kessler, L.Ledemann, Phys. Rev., 90, 344(1953); 94, 689(1954).
15. A.Shapiro, Phys. Rev., 84, 1063(1951).
16. В.П. Джелелов, В.Г. Иванов, М.С. Козодаев, В.Т. Осипенков, В.А. Русаков, ЖЭТФ, 31, 823 (1953).
17. А.Е. Игнатенко, А.И. Мухин, Е.Б. Озеров, Б.М. Понтекорво, ДАН СССР, 103, 395(1955); ЖЭТФ, 31, 545(1956).

18. А.И. Мухин, Е.В. Озеров, Б.М. Понтехорво, ЖЭТФ, 31, 371 (1956).
19. V.I.Veksler, 9-Intern. Conf. on High Energy Phys. at Kiev, 1959, Moscow, 1960, p.211 - 261.
20. S.Fernbach, R.Serber, T.Taylor, Phys. Rev., 75, 1352 (1949).
21. В.Г. Гришин, И.С. Саитов, И.В. Чувило, ЖЭТФ, 38, 1221 (1958).
22. M.Chretien, J.Leitner, N.P.Samios, M.Schwartz, J.Steinberger, Phys. Rev., 108, 333 (1957).
23. C.Franzetti and G.Morpurgo, Suppl. Nuovo Cim., 6, 565 (1957).
24. W.B.Fowler, W.M.Powell, S.I.Shonle, Nuovo Cim., 11, 428 (1959).
25. M.I.Soloviev, Intern. Conf. on High-Energy Phys. at Rochester, 1960, p. 388.
26. Ван Ган-чан, Ван Цу-цзен, Н.М. Вирысов, Дин Да-цао Ким Хи Ин, Е.Н.Кладни-  
цкая, А.А. Кузнецов, А. Михул, Нгуен Дин Ты, А.В. Никитин, М.И.Со-  
ловьев, ЖЭТФ, 40, 734 (1961).
27. В.А. Беляков, Ван Юн-чан, Н.М. Вирысов, Ду Юань-пай, Ким Хи Ин, Е.Н.Клад-  
ницкая, А.А. Кузнецов, Нгуен Дин Ты, В.Н. Пенев, Е.С. Соколова,  
М.И. Соловьев, ЖЭТФ, 44, 84 (1963).
28. V.A.Belyakov, Wang Yung-chang, V.I.Veksler, N.M.Viryasov, I.Vrana, Du Yuan-cai, Kim Hi In,  
E.N.Kladnitskaya, A.A.Kusnetsov, A.Mihul, E.Mihul, Nguyen Dinh Tu, I.Patera, V.N.Penev, E.S.Soko-  
lova, M.I.Soloviev, T.Hofmohl, Tsen Lin-yen, M.Schneeberger, Intern. Conf. on High Energy Phys.  
at CERN, 1962, p. 252 - 265.
29. Г. Граверт, Г. Людерс, Г. Рольник, УФН, 71, 289 (1960).
30. O.Chamberlein, E.Segre, C.Wiegand, T.Ypsilantis, Phys. Rev., 100, 947 (1955).
31. M.Baldo-Geolin, J.L.Prowse, Nuovo Cim., 10, 635(1958).
32. Ван Ган-чан, Ван Цу-цзен, В.И. Векслер, Н.М. Вирысов, И. Врана, Дин Да-  
цао, Ким Хи Ин, Е.Н. Кладницкая, А.А. Кузнецов, А.Михул, Нгуен Дин  
Ты, А.В. Никитин, М.И. Соловьев. ОИИИ, Д-508(1960). ЖЭТФ, 38,  
1356 (1960).
33. Wang Kan-chang, 9-Intern. Conf. on High-Energy Phys. at Kiev, 1959, Moscow, 1960, p.207.
34. Ван Ган-чан, Ван Цу-цзен, Дин Да-цао, В.Г. Иванов, Е.Н. Кладницкая,  
А.А. Кузнецов, Нгуен Дин Ты, А.В. Никитин, С.З. Отвиновский, М.И.Со-  
ловьев, ЖЭТФ, 38, 1010 (1960).
35. В.А. Беляков, В.И. Векслер, Н.М. Вирысов, И. Врана, Ким Хи Ин, Е.Н. Клад-  
ницкая, А.А. Кузнецов, А. Михул, Нгуен Дин Ты, М.И. Соловьев,  
Т. Хофмокл, Чен Лин-ян, ЖЭТФ, 45, 88 (1963).

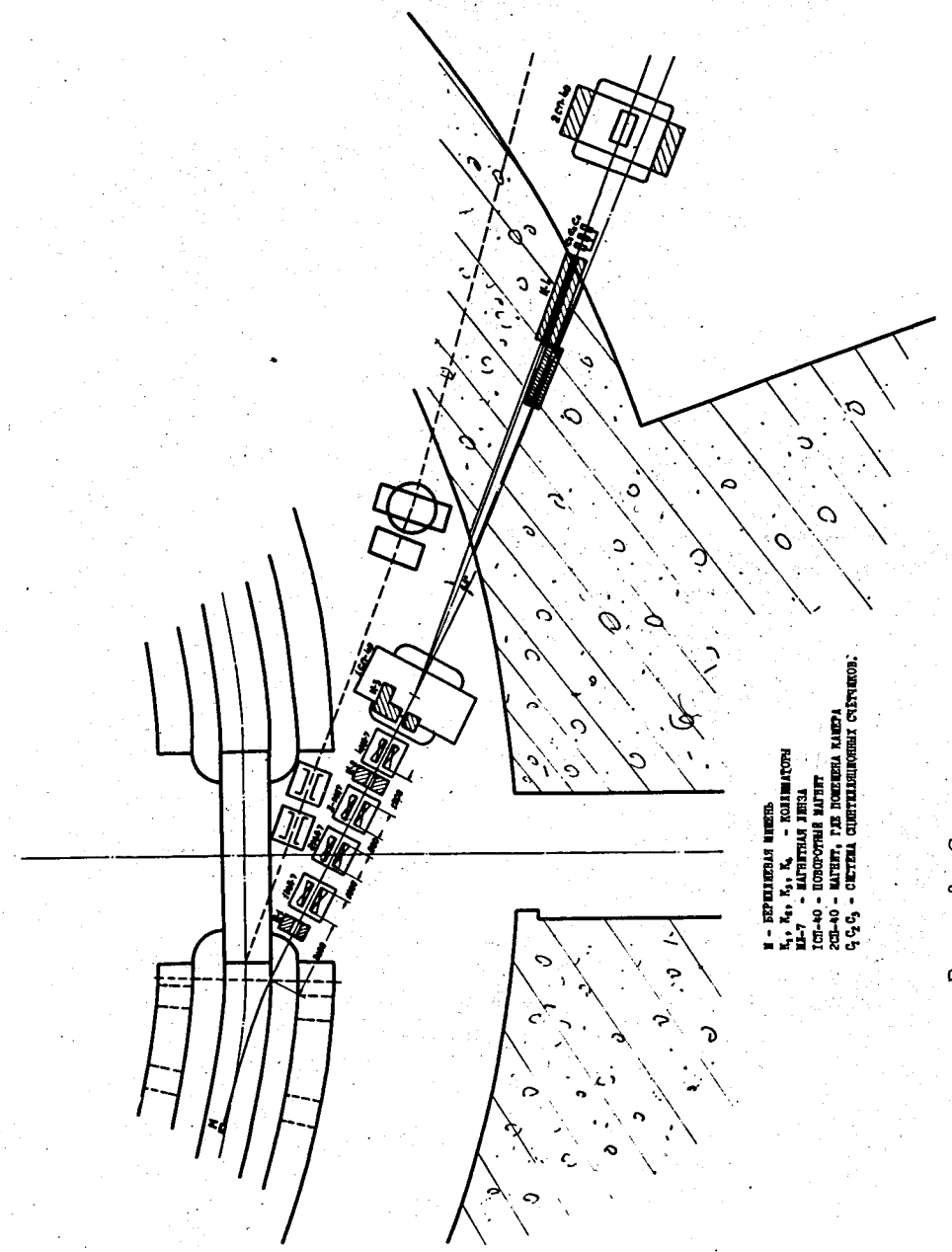
Рукопись поступила в издательский отдел  
11 июня 1964 г.



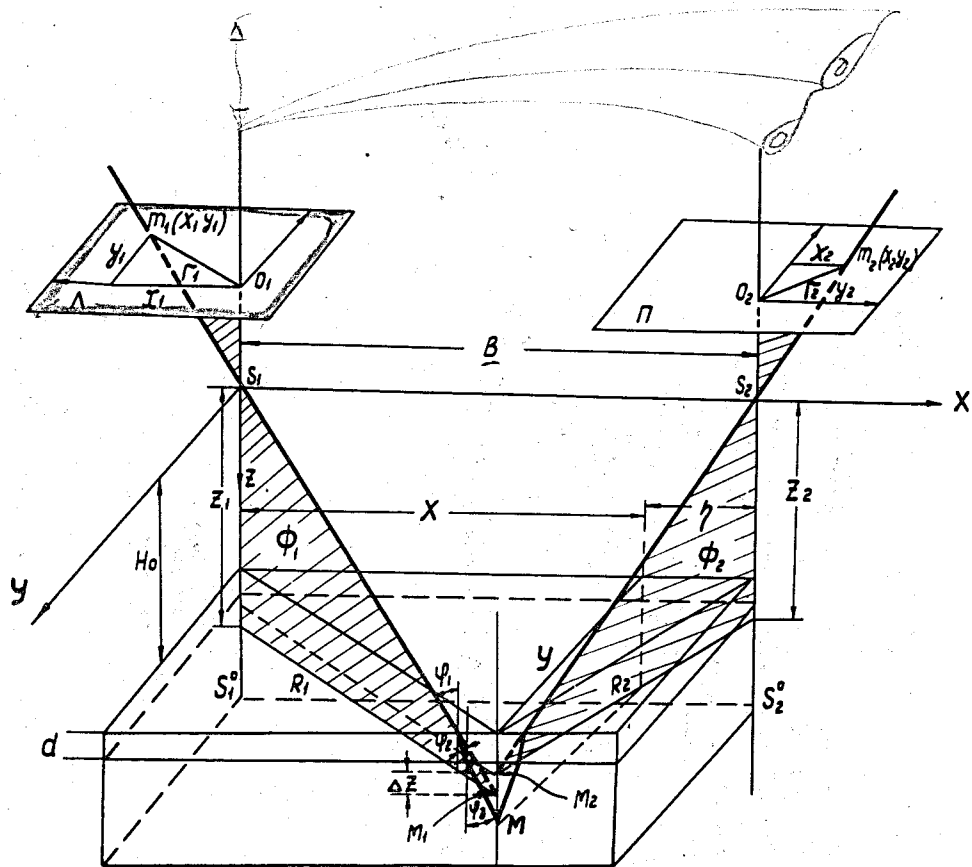
Р и с. 1. Схема расположения 24-литровой пропановой пузырьковой камеры в магните СП-40, 1-обогреватель верху камеры, 2-окно для пучка, 3-обогреватель дна камеры, 4-защитный кожух, 5-окна для освещения, 6-рабочий объем, 7-расширитель с мембраной, разделяющей пропан и воду, 8-труба с водой для передачи давления, 9-вентиль для наполнения водой, 10-мембрана, разделяющая воду и воздух, 11-расширитель, 12-выхлопная труба, 13- магнитный экран из стали, он же глушитель звука и стабилизатор нижнего давления, до которого производится расширение (12 - 15 атм), 14-электромагнитный клапан, 15-вентиль для наполнения пропаном, 16-трубка для подачи воздуха под давлением 24-26 атм., 17-вентиль для регулировки скорости выхода воздуха из стабилизатора, 18-объективы фотоаппарата, 19-кассеты для пленки, 20-корпус фотоаппарата.



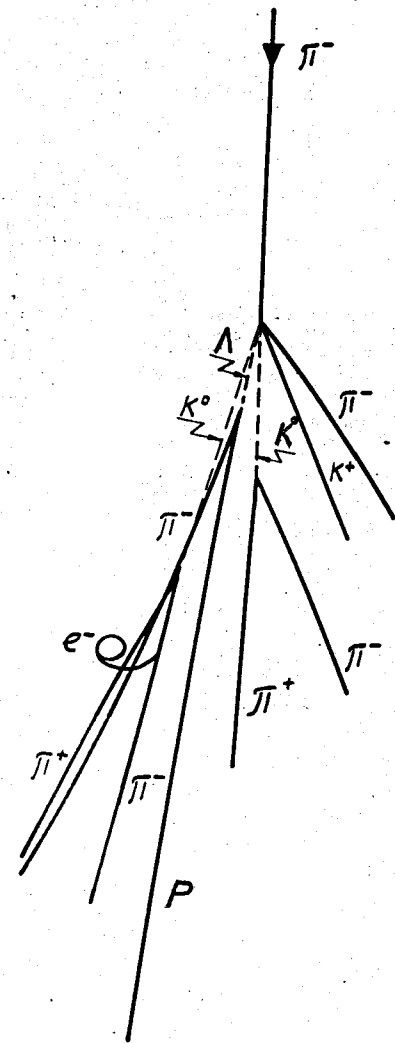
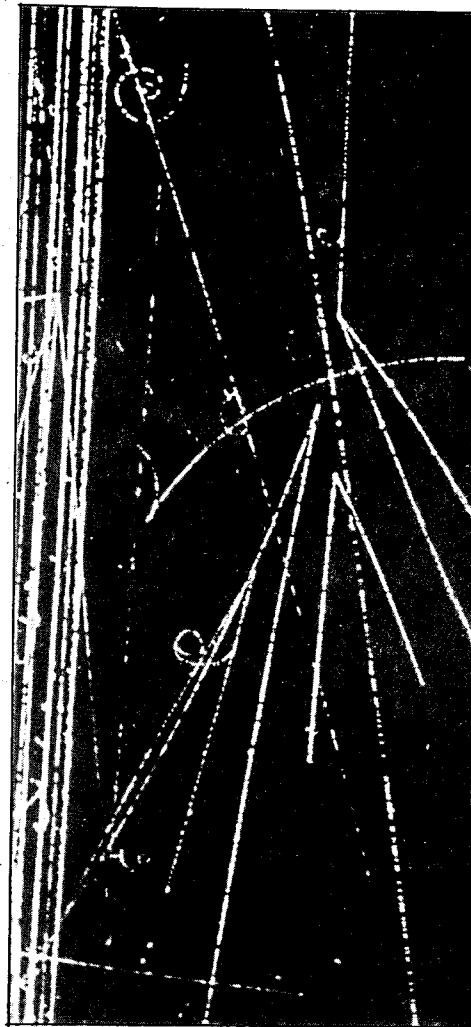
Р и с. 2. Схема 2-метровой пропановой пузырьковой камеры.



Р и с. 3. Схема расположения аппаратуры.



Р и с. 4. Схема фотографирования.



Р и с. 5. Образование четырех странных частиц в реакции  $\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0 + \bar{K}^0 + K^+ + \pi^-$ .