

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ**

539.107.33

АНАЛИЗ ДАННЫХ С ПУЗЫРЬКОВЫХ КАМЕР*)**А. Розенфельд, У. Хамфри****СОДЕРЖАНИЕ**

Введение	141
1. Описание системы, функционирующей в настоящее время в Беркли	142
2. Анализ физических результатов экспериментов	151
3. Вопросы экономики	160
4. Автоматизация процессов измерений и просмотра	162
Цитированная литература	172

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время введено в действие несколько различных систем по обработке данных с пузырьковых камер; большинство из них выполняют во многом совпадающие функции и имеют общие истоки. Все эти системы описаны на двух конференциях, состоявшихся в 1962 г., а именно, на конференции по приборам для физики высоких энергий в ЦЕРНе ¹ и на неофициальной конференции, последовавшей за ней ². В этой статье не проводится подробного сравнения различных действующих сейчас систем по обработке данных с камер; скорее, мы попытались написать ее для студентов-выпускников или физика-экспериментатора, намеревающегося впервые поставить эксперимент с использованием пузырьковой камеры. Выбор системы обработки, которую он будет использовать (например, одну из систем, существующих в Беркли, Брукхейвене или Иейле, ЦЕРНе или Париже и т. д.), обычно уже определен местом работы и всем предшествующим развитием, так как этот экспериментатор будет заинтересован в использовании наиболее доступной системы обработки, какой бы она ни была, чтобы получить достоверные физические результаты. Поэтому мы сосредоточим основное внимание на одной из существующих систем обработки пленки, с которой мы более знакомы, а именно, на системе, созданной в группе Л. Альвареса в Беркли. В конце статьи, где мы поднимаем вопрос о различных новых системах автоматического просмотра и автоматических измерений, мы постараемся произвести сравнение различных конкурирующих подходов.

Касаясь вопроса цитируемой в библиографии литературы, мы хотели бы подчеркнуть, что в работе ¹ содержится около 100 страниц информации о современных методах анализа данных в области физики высоких энергий, и мы не можем даже пытаться обобщить здесь все материалы, имеющие отношение к анализу данных с пузырьковой камеры. Далее, работа ³, содержащаяся в сборнике ¹, часто упоминается в связи с методами обработки снимков с пузырьковой камеры в группе Альвареса в Беркли. Мы предпочтем также ссылаться на эту работу, чтобы не добавлять к библиографии этой статьи список из 20 сообщений и докладов.

Следующее ниже общее обсуждение стоимости обработки пленки с помощью существующих и будущих систем взято из обзора Миллера и Фулбрайта ⁴.

*) Arthur H. Rosenfeld and William E. Humphrey, Analysis of Bubble Chamber Data, Ann. Rev. Nucl. Sci. 13, 103 (1963). Перевод А. М. Моисеева.

1. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ В БЕРКЛИ

Мы остановимся здесь на системе обработки пленки 182-см водородной пузырьковой камеры в Беркли, в которой измерения координат трека производятся на микроскопах со слежением по треку и автоматическим цифровым отсчетом, названных «франкенштейнами»⁵, и опишем эту систему обработки с некоторыми подробностями. В течение 12 месяцев, предшествующих остановке беватрона в 1962 г., на камере было получено около миллиона «триад» (так называются три стереоснимка камеры, сделанных разными объективами).

В течение примерно этого же периода времени около 100 человек (физиков и технического персонала) нашли около 200 000 «интересных событий», из которых были измерены и обсчитаны около 100 000.

Ниже мы описываем использованную при этом процедуру обработки. Подробности, касающиеся этой системы и истории ее создания, можно найти в работе³. (Нижеследующее описание будет касаться только одной из двух основных систем обработки пленки, принятых в Беркли. Кроме описываемой системы Альвареса, там же еще имеется хорошо известная система обработки пленки, называемая FOG-Cloudy-Fair, развитая Уайтом, которая изложена в работе^{6*}).

1.1. Организация просмотра пленки и измерений

Та часть анализа данных с пузырьковых камер, в которой непосредственно используются снимки с пузырьковой камеры, до сих пор состояла из двух этапов. Первый этап заключается в просмотре пленки, целью которого является составление каталога (архивного списка) интересных событий, которые могут быть впоследствии вызваны с помощью номеров пленки и кадра, занесенных в этот каталог во время просмотра. Просмотр производится на специальных просмотревых проекторах высокого качества, которые оборудованы лентопротяжным механизмом. Просмотрщик регистрирует события на специальном просмотревом бланке, согласно инструкциям, соответствующим производимому эксперименту, и перфораторицы переносят информацию с просмотревых бланков на перфокарту. Окончательно данные с просмотревых бланков объединяются на магнитной ленте, которая служит архивным списком для всего эксперимента.

Вторым этапом операций над пленкой является процесс измерения. Экспериментатор определяет класс событий, которые нужно измерить. Положение этих случаев на пленке узнается из архивного списка и заносится на измерительный бланк и измерительную контрольную карту. На этой стадии пленка устанавливается на один из «франкенштейнов». Событие выставляется для измерения путем ручной установки нужного кадра, взятого из измерительного бланка, или (в более автоматизированных образцах «франкенштейна») с помощью специального прибора, который может контролировать положение пленки, читая вставляемые в него контрольные измерительные карты. Эти карты содержат также информацию, используемую для автоматического выставления вершины события, которое надлежит измерить. При измерении пленка перемещается вместе с массивным измерительным столиком микроскопа, движение которого в двух ортогональных направлениях (координаты x и y) регистрируется отсчетным кодирующим устройством с «шагом» в 2,54 мк. Оператору «франкенштейна» видны два различных изображения одного стереокадра. Одно из них представляет общий вид кадра, а другое, с перекрестием посередине, — увеличенное изображение части кадра. Область пленки в окрестности перекрестия на увеличенном изображении также просматривается электронной схемой, связанной с сервоприводом. Оператор начинает измерение трека, двигая измерительный столик микроскопа до попадания перекрестия на трек. После этого сервосистема способна контролировать движение измерительного столика таким образом, что трек может перемещаться по касательной к перекрестию, оставаясь в то же время центрированным с точностью до отсчетной ячейки. Оператор периодически, через несколько миллиметров по длине трека, производит отсчеты координат x и y , регистрируемые на магнитной или бумажной ленте. Некоторые специальные точки, такие как реперные точки или вершины взаимодействий, могут измеряться при ручном наведении перекрестия на экране с большим увеличением. «Франкенштейн» содержит много устройств, облегчающих работу оператора. Например, измерительные контрольные карты содержат данные о приблизительном положении вершины взаимодействия, которое нужно измерить. «Франкенштейн» может с их

*) Дословный перевод названий большинства программ интереса не представляет, поэтому для их обозначения в переводе будет сохранена оригинальная терминология. В нужных случаях пояснения к названию отдельных программ будут даваться в примечаниях. (Прим. перев.)

помощью автоматически приблизительно выставлять вершины взаимодействий в заданной последовательности, и подобным образом автоматически могут выставляться реперные точки. Обеспечена также автоматическая смена стереокадров. Обмеряются все три стереопроекции трека, причем каждая совокупность треков обмеряется последовательно на всех стереоснимках в порядке их нумерации. (Недавние изменения в программах анализа треков позволяют исключить измерения треков на одном стереоснимке, если они не нужны для анализа.)

В зависимости от типа измерительного проектора результаты измерений могут быть записаны (в определенном коде) на бумажной ленте, магнитной ленте или перфокартах.

Последняя операция измерительного процесса заключается в обработке данных, выдаваемых всеми измерительными проекторами на электронной вычислительной машине по программе PANAL, которая распределяет данные по отдельным зонам на

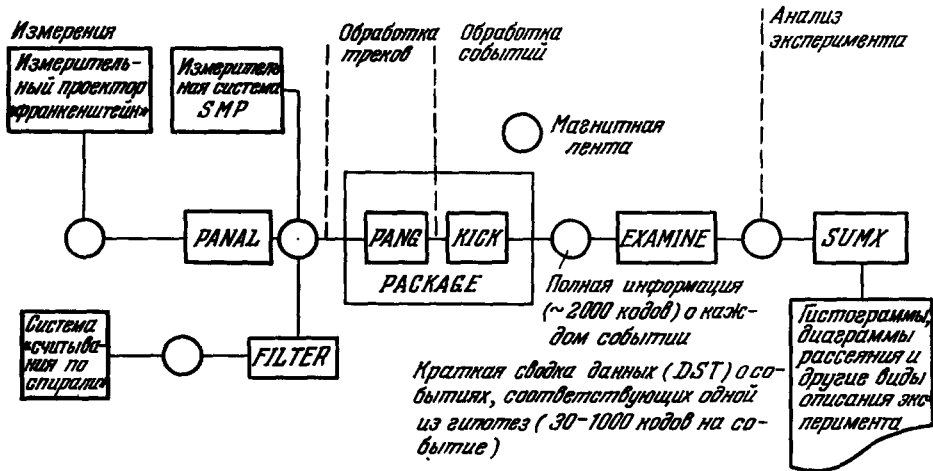


Рис. 1. На диаграмме показан нормальный порядок прохождения данных через систему обработки пленки в группе Альвареса.

Библиотечная программа LINGO на этой диаграмме для простоты не показана. Программа LINGO использует информацию на этапах обработки трека, события и на уровне всего эксперимента, чтобы регистрировать текущее состояние дел в эксперименте.

магнитной ленте. Программа PANAL выполняет некоторые простые тесты, цель которых состоит в отбрасывании событий, непригодных для обработки по последующим программам, и собирает все данные для целого события в отдельную зону на магнитной ленте *). Эта программа используется также, чтобы распределить и соединить магнитные ленты в определенной последовательности (согласно номерам рулонов пленки и номерам кадров) в единый набор. На 735-метровой магнитной ленте с плотностью записи 315 знаков на сантиметр может быть накоплено около 12 000 событий (в форме выдачи программы PANAL). Роль программы PANAL и следующих программ проиллюстрирована на рис. 1. В табл. I приведены все ее характеристики.

Примечания к табл. I. 1) Дальнейшие подробности относительно времени счета в реальном эксперименте см. в табл. IV.

*) Мы придерживаемся следующей терминологии. Вершиной называется точка пространства, в которой входящая частица или взаимодействие, или распадается, давая начало одной или большему числу вторичных частиц. Событием называется одна вершина или целая последовательность вершин (заснятых на двух или более стереокадрах). Например, это может быть

$$\begin{aligned}
 K^- p &\rightarrow \Lambda \pi^+ \pi^-, \quad \Lambda \rightarrow \pi^- p \text{ или} \\
 &\rightarrow K^0 p \pi, \quad K_1 \rightarrow \pi^- \pi^+, \\
 &\rightarrow \Sigma^0 \pi^+ \pi^-, \quad \Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma, \quad \Lambda \rightarrow \pi^- p,
 \end{aligned}$$

которые можно изобразить как двухлучевую звезду со смотрящей в нее вилкой. Мы называем такую топологию (V—2)-событием, задавая тем самым время обработки и размер выдачи.

Таблица I

Программы, применяемые в группе Л. Альвареца

Название программы	Функции	Вид кодирования	Приблизительное время счета на IBM-7090 ¹⁾ , сек	Приблизительное количество кодов и объем памяти для данных	Средняя выдача, коды/события, события/магнитная лента ²⁾
PANAL	Проверка, формирование, сортировка, соединение, отбор	9 AP ³⁾	3,0/событие ⁴⁾	15 000 17 000	250 14 000
PANG	Пространственное восстановление треков	9 AP	0,2/трек	8 000 2 000	} см. PACKAGE
KICK	Кинематическая обработка	9 AP	1,0/вершина	11 000 5 000	
PACKAGE	Объединенные PANG и KICK	9 AP	см. выше (обычно —6,0)	19 000 7 000	2 000 1 200
EPC	Печать выдачи программы PACKAGE	FORTTRAN	3,0/событие	11 000 16 000	Печать на бумажной ленте
EXAMINE	Анализ выдачи программы KICK	FORTTRAN	2,0/событие	5 000 19 000	30—1000 3000—10000
SUMX	Анализ всего эксперимента	FORTPAN	см. ⁵⁾	14 000 11 000	Печать на бумажной ленте
LINGO	Библиотечная система Суммарно	9 AP	3/событие 12/событие	20 000 12 000	40 100 000
QUEST	Обработка сложных событий	9 AP	см. PACKAGE	21 000 9 000	см. PACKAGE и EXAMINE
SIMULATE	Монте-Карло-генератор измерений треков	FORTTRAN	1/трек	10 000 8 000	
FAKE	Монте-Карло-генератор целых событий	FORTTRAN	3/событие	16 000 3 000	
MINFUN	Минимизация методом «оврагов»	FORTTRAN	⁶⁾	9 000 ⁷⁾ 5 000	

2) Мы обычно используем рулоны магнитной ленты длиной 610 м с плотностью записи 315 знаков/см. Таким образом, мы можем записать на одном рулоне 3,2 миллиона 36-разрядных кодов.

3) LC9AP — условный машинный язык, подобный FAP. Большая часть из наших программ, записанных на 9 AP, переписана на FAP.

4) Эта программа также используется для соединения и упорядочения рулонов магнитных лент. Это и приводит к большим затратам времени программой PANAL.

5) Обычно большое число распределений строится во время чтения одной ленты краткой сводки данных, поскольку у программы SUMX скорость ввода ограничена. Затраты времени можно оценить на основе типичного обьсчета 2500 событий, во время которого было построено 125 распределений (одномерные и двумерные гистограммы и диаграммы рассеяния), причем за 7,6 минуты было прочитано шесть лент с краткой сводкой данных.

6) Это время сильно зависит от характера минимизируемой функции.

7) Эта программа имеет арифметическую часть, вписываемую на языке FORTRAN пользователем. Оценки размеров программы не включают этой части.

1.2. Пространственное восстановление

Действительный физический анализ снимков с пузырьковых камер начинается с восстановления треков в пространстве пузырьковой камеры. Информация для этих расчетов, полученная на измерительном устройстве, включает указание положения измеренных треков (номер кадра, номер стереоснимка и т. д.), координаты точек вдоль трека на нескольких стереоснимках и координаты реперных точек на пленке (которые используются для установления общей системы отсчета измерений координат треков). Измерения треков могут также содержать дополнительную информацию, например, указание, остановился ли след в камере или нет, и данные о плотности пузырьков трека. В результате геометрического восстановления обычно получают сведения о положении вершины, импульсе и ориентации концов каждого трека и оценки ошибок полученных величин. Процесс пространственного восстановления можно в свою очередь подразделить на два этапа: геометрическое восстановление точек следа и описание полученных в пространстве камеры точек подходящей кривой. Существует несколько подходов к каждой из этих проблем. Первоначальное их решение положено в основу действующих сейчас программ PANG, FOG и TRED³, 6.

В программе пространственного восстановления PANG предполагается, что если известно положение данного пузырька трека на двух стереоснимках, то обратное восстановление световых лучей с двух стереоснимков через промежуточную оптическую среду в пространство камеры приведет к их пересечению в месте расположения реального пузырька. На самом же деле измерения на каждом кадре делаются не для соответствующих точек, и поэтому необходимо получить искусственные соответствующие точки на одном из стереокадров путем интерполяции между двумя измеренными точками. Эта интерполяция проста в случае идеальной оптической системы с бездисторсионными объективами, но для обычной оптики проблема сильно усложняется. К числу эффектов, которые необходимо учесть, относятся дисторсии объективов, усадка пленки, наклон зеркал*), влияние толстых защитных стекол и коэффициента преломления жидкости в камере. Вследствие этого соответствующие точки отыскиваются с помощью итерационного процесса, после того как найдены приблизительно соответствующие точки, отвечающие случаю идеальной оптики. Эта операция производится для каждой измеренной точки на одном из стереоснимков, чтобы затем получить координаты цепочки точек, лежащих вдоль трека в пространстве камеры. Эти точки описываются некоторой кривой с помощью метода наименьших квадратов (МНК). Программа PANG использует два независимых степенных ряда, чтобы получить следующее параметрическое представление пространственной кривой:

$$y = y(x, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3),$$

$$z = z(x, \alpha_4, \alpha_5),$$

$$x = x.$$

На форму этих подгоняемых кривых налагается требование учета изменения величины и направления магнитного поля, а также изменений кривизны трека из-за потерь энергии. Эти ограничения выражаются с помощью включения в степенные ряды поправочных членов. Первая трехпараметрическая кривая содержит члены вплоть до четвертого порядка (в нее включены кубичный и квадратичный поправочные члены) и используется для описания проекции трека на плоскость, примерно перпендикулярную к магнитному полю. Вторая кривая третьей степени с двумя параметрами (включены квадратичный и кубичный поправочные члены) подгоняется к проекции трека на плоскость, которая образована хордой трека и вектором напряженности магнитного поля. Окончательные значения углов и импульсов на каждом конце трека находятся по параметрам этих кривых. Поправки, учитывающие потерю энергии, включают массу частицы, поэтому параметры рассчитываемого трека зависят от массы оставшей его частицы. Если трек однозначно идентифицировать нельзя, обычно часть вычислений, включающих массу частицы, повторяют несколько раз, выдвигая различные гипотезы о величине массы.

Оценки ошибок вычисленных значений переменных, описывающих трек, представляют одну из наиболее трудных проблем в программах пространственного восстановления. Существуют три основные причины, обуславливающие суммарную неопределенность в определении трековых переменных. Первая из них возникает из-за неточностей, вносимых измерительным прибором; вторым источником, дающим вклад в ошибки, является многократное кулоновское рассеяние; третий источник неопределенностей соответствует несостоятельности измерений из-за общих «непредсказуемых» эффектов, таких, как незначительные ошибки в оптических константах, однократное рассеяние на значительный угол или турбулентности в камере. Как применяемая в Беркли

*) На 182-см водородной камере Альвареса изображение переносится от картинной плоскости объективов на расположенную перпендикулярно к ней пленку с помощью системы зеркал. (Прим. перев.)

программа PANG, так и геометрическая программа ЦЕРНА THRESH⁹ используют в основном одинаковую процедуру оценки ошибок трековых переменных. В ней предполагается, что измерительные устройства вносят на плоскости пленки, перпендикулярно к треку, некоторую известную измерительную ошибку. Эта ошибка, приводящая к рассеянию измеренных точек около трека, считается характеристикой измерительного устройства, не меняющейся от трека к треку. Подобная известная неточность в положении измеренных точек в плоскости пленки («внешняя» ошибка) затем проводится через все расчеты по пространственному восстановлению, образуя первый вклад в суммарную ошибку трековых переменных. Практически оказывается удобно включить некоторые «непредсказуемые» ошибки в разброс измеренных точек относительно трека, поэтому используемая для них величина примерно в два раза больше, чем истинные ошибки измерений. Для каждого отдельного трека возможно произвести проверку разброса точек, проведя через измеренные на пленке точки некоторую гладкую кривую, и полученную при этом оценку разброса точек («внутреннюю» ошибку) можно сравнить с «внешней» ошибкой. Если обнаруживается «плохая» точка, вызывающая чрезмерно большую «внутреннюю» ошибку, то производится выбрасывание или этой точки, или всего трека на данном стереоснимке. «Внутренние» ошибки в последующих программах для оценки ошибок трековых переменных не используются, поскольку они подвержены статистическим флуктуациям от трека к треку. Ошибки, вносимые многократным кулоновским рассеянием, комбинируются с ошибками, вызываемыми неточностью измерений, после окончания процедуры пространственного восстановления, когда уже известны значения импульса частицы и ее массы. Наконец, мы накладываем на рассчитываемую величину ошибок трековых переменных нижний предел, чтобы они не могли быть меньше некоторых значений, которые представляются реалистическими, исходя из наших сведений об оптике пузырьковых камер и т. д.

Переменные, принятые для описания трека, слегка отличаются в программах PANG и THRESH. В дополнение к двум обычным углам (азимутальному и полярному), программа PANG рассчитывает проективную кривизну трека ($\cos \lambda/p$), тогда как THRESH рассчитывает обратный импульс ($1/p$). Для большинства треков эти переменные почти эквивалентны, и, по-видимому, нет особых оснований предпочесть какую-либо из них. Кривизну удобней выбирать в качестве переменной потому, что есть основания считать, что для большинства треков (точнее, для неостанавливающихся треков) кривизны следуют нормальному распределению точнее, чем импульсы.

Хотя описанная выше программа пространственного восстановления PANG еще широко используется, все яснее проявляется ряд ее недостатков. Например, кри-

Таблица II

Систематические ошибки в расчетах программы PANG *)

	Начальный импульс, Мэв/с	Длина, см	Азимутальный угол начала трека, град	Азимутальный угол конца трека, град	Отклонение, град
Введенные значения . .	200,0	25,00	00,00	39,32	0,00
Рассчитанные программой PANG	200,1	24,98	00,03	39,30	0,00
Введенные значения . .	200,0	50,00	00,00	80,59	0,00
Рассчитанные программой PANG	201,3	49,59	00,78	79,57	0,00
Введенные значения . .	500,0	83,00	00,00	52,13	30,00
Рассчитанные программой PANG	500,2	82,84	00,09	51,99	30,09
Введенные значения . .	500,0	41,00	00,00	25,47	60,00
Рассчитанные программой PANG	500,1	40,99	00,00	25,47	60,00

*) Введенные данные имеют форму генерированных программой SIMULATE точек трека π -мезона в 182-см водородной камере с однородным магнитным полем 17,9 кэс. Учитывались только потери энергии; кулоновское рассеяние и ошибки измерения введены не были.

вая, описывающая трек, по существу является разложением около прямой линии. В табл. II показаны результаты таких расчетов, из которых видна их ограниченная пригодность для треков, наклоненных под значительными углами. Так как размеры камер все увеличиваются и магнитные поля возрастают, в качестве более подходящей первой аппроксимации траектории частицы нужно брать спираль⁸. Треки, отклоняющиеся на очень большой угол, представляют также серьезную проблему для метода пространственного восстановления по соответствующим точкам. Поэтому в более новых программах пространственного восстановления^{9,10} все больше проявляется тенденция решить эти проблемы путем подгонки спирали к совокупности лучей, восстановленных из всех точек на каждом стереоснимке через промежуточные среды в пространстве камеры. К примеру, в программе THRESH пространственное восстановление трека протекает по следующим этапам: во-первых, производится проверка измерений путем описания окружности через измеренные на пленке точки для каждого стереоснимка; затем определяются все коэффициенты в уравнениях световых лучей, исходящих из измеренных точек и пересекающих треки в объеме камеры; далее находится первое приближение для спирали еще без применения МНК с использованием только некоторых из световых лучей, и, наконец, с помощью МНК находится наиболее вероятная форма спирали, учитывающая все измерения на всех стереоснимках (измерения делаются не более чем на четырех стереоснимках).

Альтернативный, но родственный метод пространственного восстановления состоит в проецировании спирали из пространства камеры на пленку и минимизации отклонений измеренных точек от проекции спирали¹¹. Этот подход к проблеме пространственного восстановления позволяет непосредственно связать ошибки измерения на пленке с неопределенностями в оценках переменных, описывающих трек *).

1.3. Кинематическая проверка гипотез

Большая часть программ пространственного восстановления не касается свойств события как целого, а скорее имеет дело только с данными о каждом треке отдельно. Вследствие этого оценки импульсов и углов всех треков в вершине не согласуются с законами сохранения энергии и импульса для любой гипотезы относительно вида взаимодействия, происшедшего в этой вершине. Эти законы сохранения могут наложить на переменные треков, исходящих из данной вершины, до четырех дополнительных уравнений связи (equations of constraint). Когда используются все четыре уравнения связи, мы говорим о 4C-варианте; если не измерен один из импульсов (как это имеет место в случае V-события), мы говорим о 3C и так далее вплоть до 0C, который является обычным решением без использования МНК (рис. 2).

Кинематическая проверка гипотезы достигает двух различных результатов: а) большую часть времени программа проверки тратит на попытки удовлетворить неправильные гипотезы, которые в конце концов отбрасываются; б) выбрав правильную гипотезу, программа с помощью нескольких итераций находит минимальное значение χ^2 и выдает для дальнейшей обработки новые значения переменных трека, наилучшим образом удовлетворяющие гипотезе.

Программа группы Альвареса, которая выполняет проверку гипотез, называется KICK. Эта программа уточняет переменные треков на основе двух следующих критериев.

Во-первых, для предполагаемого вида взаимодействия должны выполняться законы сохранения энергии и импульса, и, во-вторых, значения трековых переменных должны изменяться при этом как можно меньше. Это второе, довольно неясно сформулированное условие более точно выражается с помощью функционала МНК следующего вида:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - x_i^m)^2}{\sigma_i^2},$$

где N — число измеренных переменных в вершине, x_i — «подогнанное» значение трековой переменной, x_i^m — измеренное значение трековой переменной, σ_i — ошибка в определении первой трековой переменной, оцененная на основе экспериментальных ошибок. Реальная программа содержит более общее матричное выражение, которое учитывает корреляции между трековыми переменными, но в последующем изложении мы просто игнорируем этот факт. Следует отметить, что для простоты расчетов

*) Подобный подход был независимо использован Н. Н. Говоруном и др.³⁰ для решения сложной задачи пространственного восстановления в камере Вильсона треков протонов отдачи малой энергии. Учет неоднородности магнитного поля и энергетических потерь позволил определить импульс протона отдачи в вершине взаимодействия с точностью до $\sim 1\%$. (Прим. перев.)

и экономии времени предполагается, что все измеренные переменные следуют распределению Гаусса. Однако многократное кулоновское рассеяние, например, приводит к отклонению от предполагаемого нормального распределения, что вызывает неожиданно большие значения χ^2 , как это будет показано в разделе 2.2. Имеется несколько способов минимизации выражения χ^2 с учетом требования выполнения в вершине законов сохранения. В программе KICK используется метод лагранжевых множителей *).

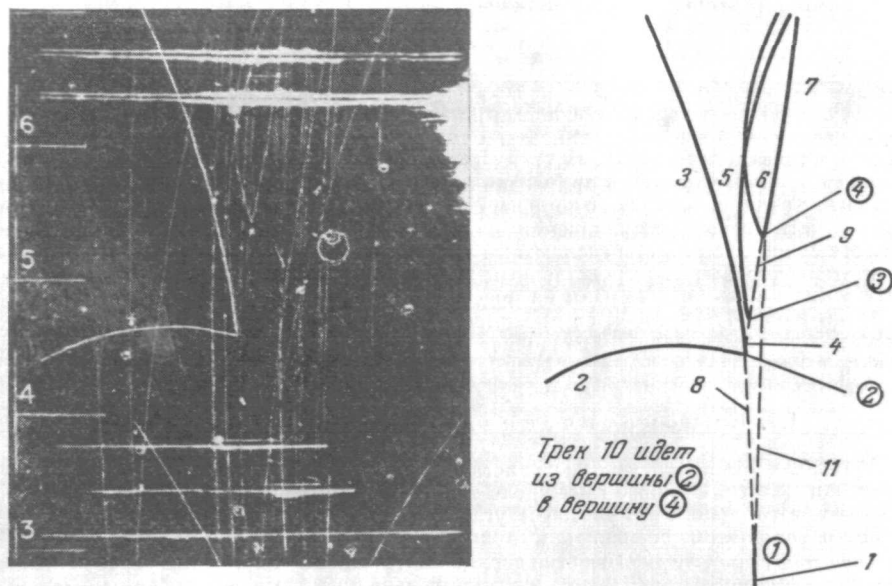


Рис. 2. Пример использования системы QUEST, взятый из работы ²⁵.

На фотографии и соответствующей схеме показано необычное событие, найденное в K-эксперименте. Имеют место следующие реакции (в скобках — номера треков): вершина 1: $K^- (1) + p \rightarrow \Xi^0 (8) + K^0 (11)$; вершина 2: $\Xi^0 (8) + p \rightarrow \pi^+ (2) + p (3) + \Xi^- (4)$; вершина 3: $\Xi^- (4) \rightarrow \pi^- (5) + \Lambda (9)$; вершина 4: $\Lambda (9) \rightarrow \pi^- (6) + p (7)$. Треки (1) — (7) измерены, параметры нейтральных треков (8) — (11) определены программой из других измерений в соответствующих вершинах. Основной операцией, выполняемой системой QUEST, является кинематическая проверка гипотез в вершинах. Когда оператор печатает указание под рубрикой «VERTEX» (вершина), машина подготавливается к нормальному обсчету вершины. Оператор может напечатать команду VERTXX, в результате чего перед обчетом первичный трек будет удлинен на величину среднего промежутка между пузырьками, или команду VERTMM, которая приведет к вычислению недостающей массы. Далее, оператор идентифицирует треки, которые должны фигурировать в обчете. Окончательно вычислительная машина возвращает заголовки, за которыми следует информация, относящаяся к результатам кинематического обчета.

Законы сохранения в этом случае можно записать в виде неявных функций связи между переменными треков

$$F_j(x_1, \dots, x_N) = 0 \quad \text{для } j = 1, \dots, C,$$

где C — число связей, наложенное на переменные в одной вершине **). Затем можно

*) Подробное изложение этого метода можно найти в книге ¹², где он называется «методом уравнивания с помощью коррелят». (Прим. перев.)

**) Программа кинематического анализа KICK (сокращение от K- Interaction Complannerisation and Kinematics), как следует из ее названия, была первоначально создана для анализа узкого класса событий, образующихся при взаимодействии K-мезонов с водородом. Однако то обстоятельство, что был выбран метод минимизации, позволяющий задавать законы сохранения в виде неявных функций от минимизируемых параметров, позволило в дальнейшем легко расширить эту программу на взаимодействия других частиц, а затем и создать на ее основе очень общую программу кинематического анализа многовершинных взаимодействий. Альтернативный подход — когда для каждого вида взаимодействий, решая законы сохранения, часть (измеренных) параметров можно выразить в явной форме через другие параметры, которые затем оцениваются обычными методами регрессионного анализа, — представляется в этом смысле менее общим. (Прим. перев.)

произвести минимизацию выражения

$$\chi^2(x_1, \dots, x_n, a_1, \dots, a_e) = \sum_i^N \frac{(x_i - x_i^m)^2}{\sigma_i^2} + 2 \sum_{j=1}^C \alpha_j F_j(x_1, \dots, x_n).$$

Эта задача весьма проста в том случае, если функции F_j можно считать линейными относительно параметров x_i , так как при этом задача сводится к решению системы C линейных уравнений относительно параметров α . После этого каждая переменная x_i получается путем подстановки параметров α в простое линейное выражение, содержащее только члены, включающие α . В действительности же функции F_j нелинейны и необходим итерационный процесс для получения правильных значений коэффициентов в линейном разложении каждой функции F_j по переменным x_i .

Впоследствии программа была расширена, чтобы обеспечить общую обработку таких наиболее часто встречающихся двухвершинных конфигураций, как рождение и распад Σ -гиперонов (как Σ^\pm , так и Σ^0 -гиперонов). Более редкие типы многовершинных взаимодействий можно было часто обрабатывать путем последовательного обхода отдельных вершин, причем при обходе каждой новой вершины последовательно использовалась уточненная информация относительно треков, исходящих из уже обчитанных вершин. Эта процедура была связана с двумя следующими недостатками: а) введенная экспериментальная информация учитывалась в полном объеме только при обходе последней вершины, поэтому обработанные вершины следовало пересчитывать, чтобы получить лучшие уточненные значения переменных и полный χ^2 , что очень неэкономно; б) существуют виды многовершинных взаимодействий, у которых некоторые вершины, взятые в отдельности, недоопределены, хотя случай в целом является переопределенным. В таком случае «цепочка» последовательных обходов отдельных вершин может не пройти, так как первые вершины недоопределены. Кинематическая программа GRIND, написанная Бёком¹³ и используемая в ЦЕРНе, имеет более новую и общую логическую схему, которая позволяет преодолеть эти трудности путем обработки сначала отдельных вершин, а затем, автоматически, всего события в целом. Этот подход к обработке многовершинных событий обеспечивает хорошо определенный χ^2 -тест для всей проверяемой гипотезы одновременно с отбором наилучшей гипотезы для каждой вершины события.

Другой полезной особенностью (впервые предложенной Ф. Солмитцем) у этой программы является ее способность автоматически различать точность измерения вводимых переменных. Переменные классифицируются этой программой на хорошо измеренные, плохо измеренные, неизмеренные и фиксированные (для масс, например, выбор вариантов ограничен двумя последними). Эти различия позволяют избежать некоторых математических трудностей при обращении матриц в процессе расчетов на вычислительной машине.

После того как установлен набор параметров, соответствующих минимальному значению χ^2 , встает вопрос о единственности этого минимума. Опыт показывает, что для случаев, когда переопределение выражается двумя или большим числом уравнений связи (т. е. $\geq 2C$), проблема ложных минимумов обычно не возникает, однако для варианта 1C всегда существует опасность неоднозначности минимума, которую мы можем более понятно показать, рассматривая случай отсутствия условий связи, который просто соответствует решению квадратного уравнения с двумя корнями. В случае 1C каждый из этих корней может стать основой минимума, и если одна из переменных, входящих в функционал, плохо измерена, эти два минимума трудно разделить. Эта особенность программы была рассмотрена Тафтом, который предложил метод отыскания обоих минимумов, начиная их поиски в программе KICK с каждого возможного решения 0C как нулевого приближения.

По своей структуре кинематическая программа KICK в основном представляет набор подпрограмм, которые вызываются рядом коротких управляющих программ-обращений (кодов типа события) и выполняют операции по кинематической проверке событий различных типов. Наиболее важной из этих подпрограмм является GUTS²⁴, которая и выполняет действительную проверку гипотезы с помощью МНК, как это было описано в предыдущих параграфах. Остальные функции программы KICK состоят во вводе и выдаче данных, в операции «плавания», т. е. в преобразовании переменных (включая матрицы ошибок) от одного трека к другому, и в подготовке треков для обработки по МНК. Предполагаемый вид взаимодействия в каждой вершине и порядок проверки гипотез полностью зависят от поставленного эксперимента и топологии каждого события. Для каждого нового эксперимента обычно требуется новый набор кодов типа события. Поэтому были затрачены большие усилия на упрощение и укорочение обращений к подпрограммам путем включения в логику программы KICK как можно большей части программирования. Чтобы исключить промежуточную выдачу информации программой PANG и ввод ее в программу KICK, две эти программы были объединены в единую программу (названную PACKAGE), состоящую из 19 000 кодов (не считая подпрограмм типов событий).

Выдача программы PACKAGE составляет около 2000 кодов на событие, но сейчас мы подключили обсчет по новой программе, названной WRING, с помощью которой удалось снизить выдачу до 600 кодов на случай путем отбора только «удавшихся» гипотез (т. е. результатов успешного обсчета переопределенной гипотезы и некоторых недоопределенных гипотез, таких, как нахождение недостающей массы). Программа WRING может выдавать также уточненные значения переменных с матрицами ошибок, и она будет нашим первичным источником по этому вопросу.

1.4. Сводная обработка экспериментальных данных

Следующая программа, названная EXAMIN, использует выдачу программ PACKAGE/WRING и рассчитывает для каждого события все интересные физические переменные, которые физики хотят иметь на сводной выдаче. Этими переменными являются такие величины, как направляющие косинусы и их ошибки, инвариантные массы групп частиц и их ошибки. Обычно эта информация составляет 300 кодов на событие.

В ЦЕРНе используются свои версии программ WRING и EXAMIN, которые называются там BAKE и SLICE.

Последней основной программой является программа SUMX, используемая как в ЦЕРНе, так и в Беркли. Эта программа проверяет сводную выдачу и производит построение большого числа распределений. Эта особая программа совершенно не зависит от характера предыдущего этапа обработки, вплоть до сводной выдачи результатов; она может использоваться любым физиком, желающим с ее помощью обработать определенную категорию данных. Программа SUMX имеет подпрограмму, позволяющую легко определять последовательность логических тестов для отбора нужных случаев. Эта программа позволяет получать на связанном с вычислительной машиной осциллооскопе диаграммы рассеяния; другими видами выдачи результатов могут быть печать на бумажной ленте и (иногда) сокращенная форма сводной выдачи результатов.

Осциллоскоп чаще всего используется для построения диаграмм Далитца. Наиболее распространенными видами печатной выдачи являются гистограммы, идеограммы, «функции разрешения», двумерные гистограммы и т. д. В гл. 2 мы рассмотрим некоторые физические проблемы, для которых нужна такая форма выдачи.

1.5. «Библиотечная» программа

Обычная форма записей данных в тетрадах становится нерациональной, когда число обрабатываемых событий превышает несколько сотен. При столь большом числе событий важной частью в системе обработки становится программа, предназначенная для автоматизации работы с каталогом событий.

Примером такого подхода является библиотечная программа LINGO¹⁴. Эта программа работает параллельно с системой программ по обработке данных, собирая информацию на всех этапах анализа событий. Основой для работы этой программы служит каталог событий (архивный список), в котором содержатся все сведения о событиях на каждом этапе эксперимента. Практически каталог событий представляет магнитную ленту, содержащую информацию о большом числе событий, доходящем до 100 000. В случае необходимости этот каталог обновляется новой просмотрной информацией, требованиями повторных измерений, модификациями или результатами. Этот каталог используется для выдачи информации различного вида о текущем положении эксперимента.

1.6. Система QUEST

Уникальным средством анализа данных, используемым в настоящее время в Беркли, является система QUEST, представляющая комбинацию вычислительной машины со вспомогательным оборудованием для обмена с ней информацией. Эта система создана для анализа небольшого числа трудно обрабатываемых или необычных событий, обсчет которых не обеспечивается программой PACKAGE. Обмен информацией между оператором и вычислительной машиной IBM-709 производится с помощью непосредственно связанной с ней печатной машинки. Кроме того, написана специальная версия программ PACKAGE, позволяющая управлять процедурой кинематической проверки гипотезы на вычислительной машине путем засылки команд с пишущей машинки *). Результаты кинематической проверки гипотезы в каждой отдельной

*) Структура подпрограмм в программе PACKAGE оказалась очень хорошо приспособляемой для нужд программы QUEST. Опыт, полученный в Беркли, показывает, что число команд для QUEST (около 200 кодов) сравнимо с длиной кодов типов событий для PACKAGE для большинства экспериментов. Следовательно, в любой лаборатории, имеющей программы, эквивалентные PACKAGE (т. е. объединенную программу пространственного восстановления и кинематической проверки гипотез), возможна замена управляющей программы типа события на подпрограмму QUEST.

вершине выдаются вычислительной машиной с помощью той же печатной машинки через несколько секунд после окончания расчетов. После этого оператор может продолжать анализ события или на основе информации, выданной печатной машинкой, попытаться подогнать другую гипотезу.

Система QUEST может работать также в полуавтоматическом режиме. Последовательность операций, выполненных при анализе какого-либо отдельного события, может быть сохранена в оперативной памяти машины. Тогда любые другие события, требующие той же последовательности обработки, могут обсчитываться в режиме, когда программа QUEST работает согласно хранящейся в памяти машины информации. Если подобный «тип события» может потребоваться и в дальнейшем, то запасенная в оперативной памяти машины последовательность обсчета может быть перенесена на перфокарты и сохраняться в течение длительного времени. Другая особенность программы QUEST состоит в том, что данные, полученные при измерении, могут модифицироваться по желанию оператора. Часть измеренных точек трека может отбрасываться, начиная с какой-нибудь точки, если возникают подозрения, что в этой точке произошло рассеяние на малый угол или коллинеарный распад, влияющие на кинематическую проверку гипотезы.

К основному оборудованию системы QUEST был добавлен один измерительный проектор «франкенштейн», что позволило быстро перемерять треки, относительно которых на основе информации о результатах кинематического обсчета возникают подозрения, что они являются источником затруднений. Однако в Беркли такая процедура гораздо менее распространена, чем прямое управление с помощью печатной машинки с использованием в качестве входной информации измерений координат событий, записанных на магнитной ленте *). Когда вычислительная машина работает по программе QUEST, могут возникать различные совмещения операций. Иногда вычислительная машина используется во время работы программы QUEST для выдачи результатов на печать. Более сложные задачи могут решаться при работе системы QUEST во время обдумывания оператором результатов, выданных на печатной машинке, при этом счет по ее программам прерывается и начинаются считаться другие очередные программы.

2. АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. Д и а г р а м м ы Д а л и т ц а

Многие свойства конечного состояния трех тел можно представить с помощью диаграммы рассеяния, откладывая по осям координат

$$T_i \text{ и } T_j \text{ или } m_{ij}^2 \text{ и } m_{jk}^2,$$

где T_i — кинетическая энергия i -й частицы в системе центра масс трех тел и m_{ij}^2 — инвариантная масса комбинаций двух частиц ij , т. е.

$$m_{ij}^2 = (E_i + E_j)^2 - (P_i + P_j)^2.$$

Можно показать, что единица площади такой диаграммы ($dT_i dT_j$, $dm_{ij}^2 dm_{jk}^2$ и т. д.) пропорциональна лоренц-инвариантному фазовому объему **). Из двух этих

*) В последнее время, однако, все большее распространение получает непосредственный контроль качества измерений, производимых на обычных измерительных проекторах, осуществляемый непосредственно во время измерения. Это достигается путем соединения измерительных проекторов с вычислительными машинами небольшой мощности (например, PDP-1), которые по мере поступления в них данных с отсчетных устройств измерительных проекторов производят их первичную обработку с целью обнаружения плохих измерений, связанных с ошибками оператора или неполадками автоматических отсчетно-кодирующих устройств. При этом критерии, гарантирующие пригодность измерений для дальнейшей обработки на быстродействующих вычислительных машинах, могут налагаться непосредственно как на измерения на пленке ^{15, 16}, так и на треки, восстановленные в пространстве камеры ¹⁷. Считается, что подобная система контроля измерений приводит к значительной экономии времени быстродействующих вычислительных машин и сокращает общее время, затрачиваемое на обработку данного количества пленки, за счет ликвидации очень трудоемких повторных измерений. (Прим. перев.)

**) Доказательство этого для случая, когда по осям откладываются T_i и T_j , дано в работе ¹⁸, приложение С. Так как T_i , M_{ij}^2 и $\cos \theta$ связаны линейно, это доказательство в равной мере применимо для других комбинаций переменных. Дальнейшие детали см. в работе ¹⁹.

переменных m^2 представляется более универсальной, поскольку резонансы и другие особенности в различных экспериментах или в отдельном эксперименте со значительным разбросом импульса пучка

в случае этой переменной будут появляться на том же самом месте, как это показано на рис. 3.

Иногда требуется изучить свойства двух частиц не только трехчастичного конечного состояния (для этого случая, как мы уже говорили, удобнее всего откладывать по осям координат переменные m_{ij}^2), а полного конечного состояния (например, изобразить графически распады θ -или η -мезонов или какого-либо широкого резонанса). В этом случае разумно «нормировать» координаты таким образом, чтобы оболочки (envelopes) каждого случая совпадали по возможности более полно. За более подробным, чем здесь, обсуждением этого вопроса следует обратиться к работе ²⁰. Нормированная диаграмма Далицца тогда отчетливо демонстрирует поведение матричного элемента около оболочки (envelope), которая описывает коллинеарные распады.

Отметим, что в диаграммах Далицца не содержится никакой информации о направлении первичного пучка, если данные не отобраны так, чтобы соответствовать определенному поддиапазону (subset) углов рождения

Рис. 3. Диаграмма Далицца, изображенная на квадратной лучевой трубке в координатах m_{ij}^2 , построенная программой SUMX для облучения с разбросом первичного импульса $\pm 3\%$.

«Оболочки» соответствуют импульсу пучка 1,51 Гэв/с плюс 3% и 1,51 Гэв/с минус 3%. Внутри области перекрытия оболочек заселение должно было бы быть однородным, если бы оно следовало лоренц-инвариантному фазовому объему. Вместо этого мы видим две резонансных полосы. Оболочки изображаются автоматически с помощью специальной подпрограммы, входящей в SUMX.

В заключение нашего краткого рассмотрения состояний трех тел мы хотим предупредить, что нормальное распределение для β -распада не пропорционально элементу лоренц-инвариантного фазового пространства ($dn_{\pi, \eta} \propto d^3p_1 d^3p_2 / E_1 E_2 E_3$), а следует «старомодному» пространству трех импульсов ($dn_{\beta} \propto d^3p_1 d^3p_2$) (см. ²¹). Таким образом, оказывается, что на диаграмме Далицца β -распад имеет матричный элемент, пропорциональный $E_1 E_2 E_3$ ²¹.

2.2. Конечное состояние четырех тел. Треугольные диаграммы

Для изображения конечного состояния четырех тел нет метода, равноценного диаграммам Далицца, но один из полезных методов группировки данных показан на рис. 4. На рис. 5 показана треугольная диаграмма для каждого такого парного объединения ²². Это название диаграммы вызвано тем, что границы распределения образуют правый треугольник, как это сразу видно из рисунка. Плотность лоренц-инвариантного фазового объема внутри треугольника, к сожалению, теперь больше не однородна ^{18, 23}, а выражается через переменные, показанные на рис. 3, формулой

$$dn = \frac{4\pi^3}{M} p_{12} p_{13} p \, dm_{12} \, dm_{34},$$

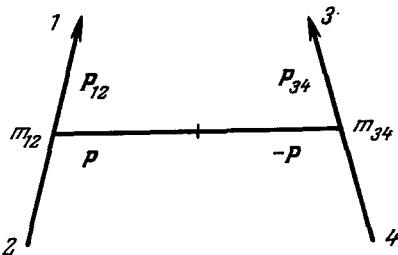


Рис. 4. Переменные, используемые для построения треугольной диаграммы конечного состояния четырех тел.

где

$$p_{12} = \frac{1}{2} |p_1 - p_2|, \quad p_{34} = \frac{1}{2} |p_3 - p_4|,$$

импульс p в системе центра масс выражается как

$$p = |p_1 + p_2| = |p_3 + p_4|,$$

а M — инвариантная полная масса.

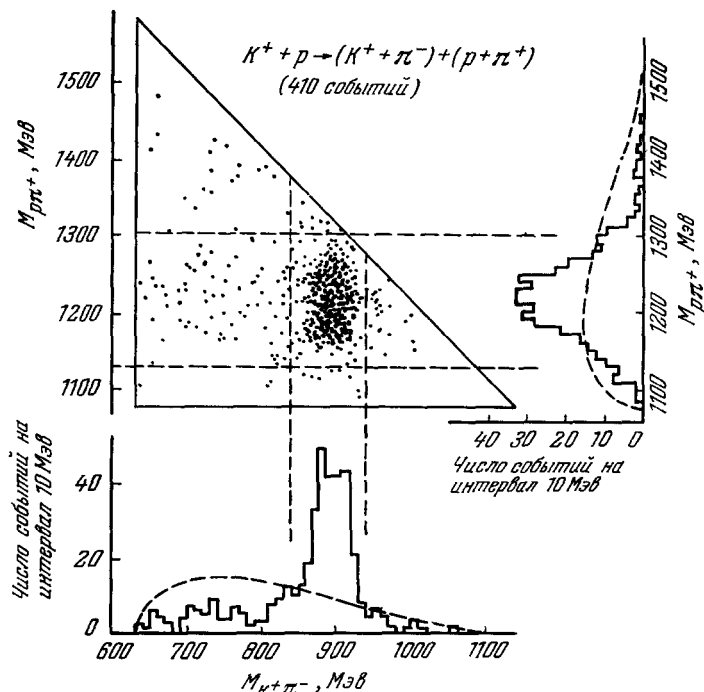


Рис. 5. Диаграмма рассеяния для реакции $K^+ + p \rightarrow K^+ + \pi^- + p + \pi^+$ (по осям координат откладываются $M_{p\pi^+}$ и $M_{K^+\pi^-}$).

Границы треугольника соответствуют кинематическим пределам. Гладкие кривые, проведенные на проекциях, представляют ожидаемую форму распределения при отсутствии динамических эффектов. На проекции распределения на ось $M_{p\pi^+}$ отчетливо виден максимум, соответствующий рождению изобары N_{33}^* . На проекции распределения на ось $K^+\pi^-$ — отчетливый максимум, обусловленный рождением K^* -мезона.

2.3. Функции разрешения

Прежде чем рассмотреть функции разрешения, нужно обсудить, что мы называем «гистограммой» и «идеограммой» и какая между ними существует разница. Рассмотрим совокупность чисел m_i , каждое из которых имеет ошибку δm_i . Для того чтобы построить гистограмму, нужно выбрать ячейки подходящего размера Δm и просто построить график «заселенности» каждой из них. Чтобы построить гауссову идеограмму, каждому событию нужно приписать вероятность, описываемую нормированным гауссовым распределением со средним значением m_i и стандартной ошибкой δm_i , и затем сложить все эти вероятности.

В разделе 2.4 мы рассмотрим, почему широкое применение идеограмм для описания экспериментальных данных во многом не оправдано; пока же будет только показана возможность их применения для вычисления «функции разрешения».

Чтобы продемонстрировать использование «функции разрешения», предположим, что в распределении эффективных масс виден резонанс с кажущейся полной шириной 10 Мэв. Предположим далее, что каждый случай, попадающий в этот пик, имеет расчитанную кинематическую программой ошибку δm_i , которая может меняться от нескольких Мэв до нескольких десятков Мэв. Тогда возникает вопрос: если истинная

ширина резонанса была бы равна нулю, то какова должна быть ширина гистограммы резонанса, обусловленная этими экспериментальными ошибками? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно просто построить идеограмму всех случаев, откладывая каждую точку у одного и того же произвольного значения массы, но правильно учитывая ошибку δm_i . Полученное распределение и будет «функцией разрешения». Если «функция разрешения» уже, чем наблюдаемая величина резонанса, эта разница может быть обусловлена его реальной физической шириной.

Отметим, что наблюдаемая величина резонанса наиболее прямо находится из гистограммы, а не из идеограммы и «функцию разрешения» нужно сравнивать с экспериментальной гистограммой, а не идеограммой. Эквивалентная идеограмма будет шире примерно на величину около $\sqrt{2}$; в силу худшего разрешения идеограммы не очень полезны для поисков резонансов. Если известно, что χ^2 -распределение событий для рассматриваемого эксперимента несколько шире (с коэффициентом α^2), чем ему следовало быть (как это обычно и есть на самом деле; см. гл. 4), то при отсутствии каких-либо детальных сведений о причинах этого расширения, прежде чем строить «функцию разрешения», все рассчитанные ошибки следует увеличить на коэффициент α .

Укажем в заключение полезное правило, гласящее, что полная ширина Γ на высоте идеограммы составляет примерно $4/3$ средней ошибки δm_i .

2.4. Гистограммы и идеограммы

Мы уже описали разницу между двумя этими распределениями в разделе 2.3. Здесь мы хотим рассмотреть вопрос, оправдано ли вообще употребление идеограмм.

Мы признаем, что представлять данные в форме одних идеограмм необдуманно и неразумно. Но часто представляет интерес одни и те же данные представить на одном рисунке одновременно и в виде идеограммы, и в виде гистограммы.

Использование идеограмм встречает возражение, потому что: а) они мало чувствительны к статистическим флуктуациям; б) не позволяют объединять результаты различных экспериментов; в) являются весьма неэффективным методом изображения резонансов, так как при этом пик имеет большую ширину, чем его суммарная (истинная плюс экспериментальная) ширина, представляемая гистограммой (см. раздел 2.3).

Наиболее полезным применением идеограммы является проверка статистической надежности пика на гистограмме, который может и не быть действительным резонансом. Если вызывающий сомнения «пичок» отвечает действительности, на идеограмме он будет только незначительно шире, чем на гистограмме; если же на идеограмме он очень уширяется, это дает основание предположить, что «пичок» был флуктуацией*).

2.5. Масштабный коэффициент χ^2 -распределения

В большей части камерных групп установлено, что χ^2 -распределения кинематически «подогнанных» случаев слишком широки и это уширение можно описать коэффициентом α^2 , не большим двух. Этот коэффициент, по-видимому, зависит от размера камеры и ее конструкции, однако какой-нибудь простой зависимости его от количества уравнений связи (определенных в разделе 1.3) не установлено. Это означает, что занижение ошибок некоторых или всех переменных трека произошло в программах пространственного восстановления. Частично такой эффект ожидался, так как в действительности кулоновское рассеяние имеет хвост (обусловленный многократным (plural) рассеянием), который не удается правильно учесть. Но основное занижение ошибок происходит из-за множества плохо исследованных эффектов, таких, как турбулентция, оптические дисторсии и неточности в оптических константах, фигурирующих в программах пространственного восстановления. Значение этих малых эффектов увеличивается при более высоких импульсах, когда стрела прогиба становится относительно малой.

Мы пытались связать коэффициент α^2 с некоторыми отдельными переменными, описывающими трек, такими, как кривизна, угол подъема или азимутальный угол, но установить такие корреляции не удалось. Эту проверку легко сделать, рассматривая распределение «нормированных отклонений» между подогнанными и измеренными значениями переменных, полученными с помощью программы KICK (см. ²⁴). Если все вводимые значения переменных правильны **, после кинематических расчетов распределение нормированных отклонений должно быть гауссовым с нулевым средним значе-

*) Статистические свойства идеограмм подробно рассмотрены в работе М. И. Подгорецкого ³². (Прим. перев.)

**) Мы подразумеваем под этим, что переменные нормально распределены, не смещены и имеют правильные оценки ошибок.

нием и единичной шириной. Однако если ошибки переменной одного вида оценены неправильно (а другие ошибки все еще оценены правильно), ожидалось, что распределение для этой переменной должно быть шире, чем для переменных с правильными оценками ошибок. (Это предположение неприменимо для условий связи вида $1C$; см. ²⁴.) Экспериментально же мы обнаружили, что обычно распределения «нормированных отклонений» всех измеренных переменных после кинематической программы уширены приблизительно с одинаковым коэффициентом α (это тот же коэффициент α , квадрат которого входит масштабным множителем в χ^2 -распределение). Имеются, однако, исключения, которые позволяют нам определить слабые места в нашей технике обчета информации. Например, распределения «нормированных отклонений» для пучковых треков, коротких треков с несколькими измеренными точками и останавливающихся треков более неравномерны, чем в других случаях.

Весь опыт по обработке данных с пузырьковых камер указывает как будто, что если масштаб χ^2 -распределений увеличивать на α^2 , они будут принимать почти теоретическую форму, причем в «хвосте» распределения будет не больше 5—20% событий*). Мы также пришли к выводу, что необходимо наложить нижние границы для ошибок углов (в случае длинных треков рассчитанные для углов ошибки слишком малы и не согласуются с нашими представлениями о точностях, допускаемых оптикой). Этот нижний предел взят равным $(1/4)^\circ$ для угла подъема и $(1/16)^\circ$ для азимутального угла. Некоторые типичные значения коэффициентов α^2 , найденные при обработке взаимодействий K^- -мезонов с импульсом 1,5 Гэв/с в 182-см водородной камере, для различных видов уравнений связи равны: $\alpha^2(1C)=1,76$, $\alpha^2(2C)=1,58$, $\alpha^2(3C)=1,71$, $\alpha^2(4C)=1,66$ для 1800 случаев распада Λ -частиц или $\alpha^2(4C)=1,76$ для 1500 случаев K_L^0 -распада.

Каким образом правильнее трактовать эти коэффициенты α^2 ? В идеальном случае нужно затратить некоторое время и разобраться, какие ошибки занижены, чтобы потом исправить уравнения для расчета этих ошибок. В большинстве групп эта работа не проделана, а закрыть эту проблему за счет необоснованного увеличения ошибок не очень желательно. Поэтому, прежде чем определять уровень достоверности для подогнанных событий, мы просто вводим в χ^2 масштабный коэффициент α^2 . При построении функции разрешения мы предполагаем, что все исходные ошибки одинаково занижены на величину α , и поэтому все конечные ошибки считаем также заниженными и умножаем их на тот же коэффициент α .

2.6. Сравнение распределений по массам и квадратам масс

Рассматривая диаграммы Далитца (раздел 2.1), мы указывали, что удобнее по осям координат откладывать квадраты масс m_{ij} , а не просто массы m_{ij} , так как в первом случае единица площади пропорциональна элементу лоренц-инвариантного фазового пространства. В этом разделе мы хотим показать, что пики в массовом спектре, лежащие при малых значениях массы (например, пики в спектре недостающей массы, соответствующие π^0 -мезонам или γ -квантам), имеют гауссову форму, когда в качестве переменной взят квадрат массы m^2 , и их форма искажена, если они построены в зависимости от m (и конечно, если значение m^2 отрицательно, недостающая масса становится мнимой). Это положение проиллюстрировано на рис. 6, причем предположено, что распределение по m^2 имеет форму гауссова распределения. Тогда в силу условия $d(m^2) = 2m dm$ распределение по m должно быть отклонено в сторону на коэффициент $1/m$. Величина этого отклонения может быть выражена в виде сдвига положения центра пика m^* по оси m относительно его истинного значения. Для малых сдвигов величина m^* может быть выражена в виде

$$m^* = m + \frac{\sigma^2}{4m^2},$$

где m — истинная величина массы частицы (центр пика в распределении по m^2) и σ — ширина этого пика по шкале m^2 (σ^2 имеет размерность (энергия)⁴). Имеются две причины, заставляющие предположить, что нормальным будет распределение по m^2 , а не по m . Одна из них — эмпирическая: экспериментальные гистограммы соответствуют положению, изображенному на рис. 6. Однако действительную причину можно понять

*) Простейший способ определения коэффициента α^2 состоит в откладывании экспериментальных значений χ^2 на шкале вероятностей χ^2 -распределения (для уравнений связи вида $4C$, $3C$, $2C$ и $1C$ эти шкалы приведены в отчете ⁵⁷). Масштаб этих шкал выбирается таким, что правильное χ^2 -распределение ложится на прямую линию с единичным наклоном. Однако экспериментальные значения всегда имеют тенденцию ложиться на другую прямую линию с наклоном α^{-2} . Таблицы теоретических χ^2 -распределений для S уравнений связи можно найти в любой книге по математической статистике или в Handbook of Chemistry and Physics, где S называются «степенями свободы».

из диаграммы рис.7. Предположим, что единственные экспериментальные ошибки связаны с неточностями измерения импульсов p_i ($i = 0, 1, 2$), которые следуют гауссову распределению с близкими ширинами. Найдем небаланс энергии (т. е. недостающую

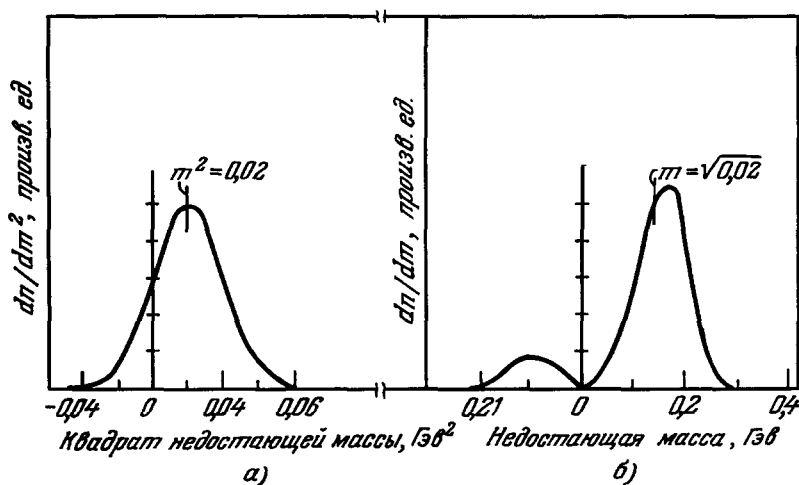


Рис. 6. а) Распределение недостающей массы m^2 для случая испускания π^0 -мезонов. Предполагается, что оно следует гауссову распределению с центром при $m_{\pi^0}^2 = 0,02$ ($\text{Гэв}/c$)² и экспериментальной шириной, тоже равной $0,02$ ($\text{Гэв}/c$)². б) Соответствующее распределение в шкале m . Оно искажилось так, что максимум сдвинулся на 33 Мэв вправо. Мнимые значения m (соответствующие $m^2 < 0$) отложены слева от начала координат.

энергию E) и недостающий импульс p_j ; с их помощью недостающую массу можно записать как

$$m^2 = E^2 - p^2 = (E_0 - E_1 - E_2)^2 - (p_0 - p_1 - p_2)^2.$$

Если бы функция $m^2(p_i)$ была линейной относительно p_i , она тоже имела бы гауссово распределение. Однако ясно видно, что она не линейна, но мы можем разложить m^2 относительно величины p_i по формуле Тейлора:

$$m^2 = m^2_{\text{ист}} + \sum_i \frac{\partial m^2}{\partial p_i} \delta p_i + \frac{1}{2} \sum_{ij} \frac{\partial^2 m^2}{\partial p_i \partial p_j} \delta_i \delta_j + \dots$$

Читатель может легко убедиться, что члены порядка δ^2 и выше становятся малыми, так что m^2 хорошо аппроксимируется линейной зависимостью от p_i и поэтому распределение m^2 будет приблизительно гауссовым, что мы и хотели показать.

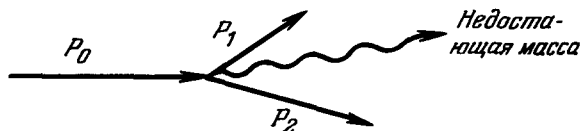


Рис. 7. Переменные, фигурирующие в расчетах недостающей массы.

проверить и эту возможность, нужно произвести кинематическую проверку всех возможных взаимодействий без испускания нейтральной частицы, но это требует значительных затрат времени на вычислительной машине. Мы нашли, что быстрее с помощью программы КИСК вычислять величину, названную χ^2 (Уп 3), т. е. производить χ^2 -тест на отсутствие небаланса вектора импульса²⁶. Эта величина не зависит особенно сильно от гипотез относительно масс частиц, которые могут быть ошибочными или неоднозначными, и эти простые вычисления помогают исключить бесполезную проверку многих гипотез.

При исследовании событий с малой недостающей массой нет никаких спорных проблем, если только твердо известно, что это событие не относится к числу «упругих», в которых вообще не испускается нейтральных частиц. Чтобы

2.7. Применение метода Монте-Карло

На некоторой стадии развития систем для обработки снимков с пузырьковых камер необходимо поискать, не допущено ли в процессе расчета по этим программам систематических упущений, и составить общее представление о свойствах и пределах возможности таких систем анализа. Часто каждый частный эксперимент имеет особые причины возникновения статистической недостоверности, которые требуют исследования. Для таких целей полезно иметь возможность генерировать большие образцовые группы измерений событий, отличающихся друг от друга в пределах измерительных ошибок и ошибок, связанных с кулоновским рассеянием, но имеющих правильные средние значения трековых переменных. Обработка такой группы событий покажет поведение анализирующей системы при обчете образца с известными свойствами. Ниже приводится несколько примеров применения метода Монте-Карло.

Искусственное воспроизведение трековых измерений употребляется для:

- а) проверки вновь составленных программ;
- б) подбора ошибок параметров;
- в) оценок искажений из-за статистической недостоверности в программах счета и аппроксимирования;
- г) определения пределов применимости программ;
- д) изучения корреляций между переменными;
- е) изучения формы распределений трековых переменных.

Искусственное воспроизведение измерений событий применяется для:

- ж) оценки искажений результатов эксперимента из-за примеси фоновых событий, неотделимых на основе кинематических критериев.

Генерация совокупности событий (экспериментов) производится для:

- з) анализа возможностей ошибочных заключений из-за статистических флуктуаций;
- и) оценки числа событий, необходимых для задуманного эксперимента.

2.8. Программа SIMULATE

(генерация трековых переменных методом Монте-Карло)

Для исследования первых этапов обработки данных иногда бывает необходимо генерировать методом Монте-Карло группы чисел, которые максимально правдоподобно воспроизводят измерения точек на треках. Одна из таких программ написана Бёком и Шапиро в ЦЕРНе; в Беркли подобная программа, составленная Хамфри, называется SIMULATE. Вводя в программы обработки искусственные измерения, генерированные этой программой, можно исследовать распределения оценок параметров на любой стадии анализа, зная при этом, какой вид должны иметь правильные оценки и распределения.

Первый этап генерации таких измерений состоит в воспроизведении орбиты частицы в камере. Программа SIMULATE начинает с выбора определенной точки в пространстве камеры, задается определенной ориентацией, импульсом и массой частицы и переходит к построению (в направлении увеличения или уменьшения импульса) трека определенной длины (если частица, конечно, не останавливается раньше). Трек воссоздается в пространстве камеры путем наращивания к имеющемуся отрезку коротких сегментов, причем после каждого шага переопределяются импульс и магнитное поле и вводится изменение направления трека за счет кулоновского рассеяния. Рассчитанные вдоль трека точки переносятся для каждого из нескольких объективов через оптическую систему из камеры на пленку. К этим спроецированным на пленку точкам добавляются измерительные ошибки, характерные для «франкенштейна», и, таким образом, получается подобие измеренных точек трека. Аналогично, к координатам реперных точек добавляются ошибки, согласующиеся с неточностями их измерения на пленке. Все такое «событие» записывается в стандартной форме, требуемой программой PACKAGE.

Кулоновское рассеяние или измерительные ошибки можно в таких «событиях» исключить, обращая в нуль соответствующие параметры. В табл. II (см. раздел 1.2) содержатся примеры событий, обработанных по программе PANG в приближении, не учитывающем кулоновское рассеяние и измерительные ошибки.

2.9. Генерация событий методом Монте-Карло (программа FAKE)

Для оценки статистических искажений данных, возможных из-за ошибок при кинематическом разделении конкурирующих гипотез, обычно не требуется детального воспроизведения событий, обеспечиваемого программой SIMULATE. Для этой цели гораздо проще и быстрее генерировать искусственные результаты, соответствующие

более поздним ступеням анализа, например, выдачу программы KICK. Программа FAKE³, написанная на языке FORTRAN, генерирует, согласно предписанию, методом Монте-Карло события в пузырьковой камере в форме, соответствующей выдаче программы пространственного восстановления PANG. Программа FAKE генерирует события определенного типа в рамках фазового объема или каких-либо других возможных распределений. Для правильного определения распределения событий в камере иногда бывает более удобно использовать группы искусственных событий, точно удовлетворяющих кинематике (например, для определения вероятности «присчета» фоновых событий). Программа FAKE распределяет эти события в камере, принимая во внимание вторичные взаимодействия, рассчитывая ошибки, которые получились бы после расчета по программам пространственного восстановления для соответствующих измеренных переменных. Затем программа изменяет все измеримые переменные в пределах этих ошибок. Окончательно программа FAKE выдает эту информацию в форме, которая может быть использована программами кинематической проверки гипотез, такими, как KICK или PACKAGE.

Развитие программы FAKE было в основном вызвано желанием исследовать проблемы неидентифицированных случаев, чтобы лучше разобраться в природе и методах идентификации сомнительных случаев, встречающихся при анализе данных с пузырьковых камер. Это может пролить свет на такие проблемы, как вероятность того, что реакцию $\bar{p} + p \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^0$ можно принять за реакцию $\bar{p} + p \rightarrow \pi^+ + \pi^-$, Σ^0 -гиперон — за Λ -гиперон, или как часто лептонный распад Λ -гиперона «подделывается» под двухчастичный распад. Таким образом, программа FAKE *) соответствует своему названию по двум причинам: а) она «подделывает» выдачу программы PANG и б) предназначается для исследования таких случаев, когда один тип события «подделывается» под другой.

Поскольку программа FAKE генерирует каждое событие в отдельности, с ее помощью можно воспроизвести данные, для которых экспериментальное разрешение введено более реалистично, чем любым другим методом. Поэтому эту программу можно, например, использовать для того, чтобы исследовать, как данное распределение в системе центра масс выглядело бы в лабораторной системе. Программа FAKE может также иметь выдачу в форме «сводной выдачи» (одно событие на формат). Хотя такую форму выдачи нельзя использовать для проверки гипотез, она очень полезна при «разыгрывании» эксперимента методом Монте-Карло в целях проектирования самого эксперимента, расчета эффективности просмотра или для других целей.

Одна из подпрограмм, используемых в программе FAKE, называемая GENPCM, работает изолированно от основной программы и может быть использована для генерирования событий с n -частицами ($3 \leq n \leq 10$), распределенными согласно фазовому объему. С помощью подпрограммы GENPCM можно с помощью незначительного дополнительного программирования рассчитать фазовый объем для любой величины. Более того, вычисления можно модифицировать так, чтобы учесть множители для любого вида матричного элемента.

2.10. Воспроизведение экспериментальных распределений методом Монте-Карло. Программа GAME

Другая небольшая программа, использующая метод Монте-Карло (GAME), полезна для оценки экспериментальных распределений³. Эта программа генерирует много независимых экспериментальных распределений согласно любому заданному уравнению и для определенного числа событий, а также строит их в виде гистограммы. Это помогает понять, какую статистическую значимость следует приписать определенному отклонению распределения от предполагаемого вида.

2.11. Программы минимизации

Существует широкий класс специальных проблем, требующих оптимизации параметров. Круг этих проблем простирается от обработки отдельных измерений (типа описания магнитного поля эмпирическими функциями) до анализа результатов целых экспериментов (например, определение фазовых сдвигов или длин рассеяния, описание угловых распределений; см., например, работы^{27, 28}). Для определения оптимальных значений обычно используется или метод максимального правдоподобия, или метод наименьших квадратов. Оба эти метода отыскивают набор параметров, который соответствует экстремуму некоторой функции. Поэтому проблему оптимизации можно свести к отысканию минимума функции некоторого общего вида от нескольких параметров. (Метод максимального правдоподобия требует отыскания максимума, но если изменить знак функции правдоподобия, проблему можно свести к минимизации.)

*) Буквальный перевод «FAKE» — подделка (Прим. перев.)

Различные способы нахождения параметров, соответствующих минимуму ²⁹, обычно можно разделить на два класса, а именно на методы, с помощью которых минимум пробуют достичь прямо за один шаг путем повторных попыток (итерационный процесс), и методы, в которых приближение к минимуму происходит путем ряда шагов, обычно уменьшающейся длины (метод спуска). Оба метода имеют свои области применения. Итерационный процесс, в частности, применим в случае достаточно простых проблем, когда легко оценить первую производную (а иногда и вторую производную) функции относительно всех искоемых параметров. Например, если известны первые и вторые производные, для решения проблемы можно использовать метод Ньютона. В этом случае исследуемая функция может быть аппроксимирована разложением

$$f(x) = \text{const} + \sum_i \frac{f_{ij}}{2} (x_i - x_i^0) (x_j - x_j^0),$$

где x_i^0 — значения параметров в минимуме. Далее легко показать, что минимум функции $f(x)$ будет находиться при

$$x^0 = x - \nabla f (f'')^{-1},$$

где ∇f — вектор градиента функции $f(x)$ в точке x , а f'' — матрица вторых производных с компонентами f''_{ij} , оцененная в точке x . Это выражение будет точным решением, если функция $f(x)$ содержит параметры в степени не выше четвертой, но большая часть проблем требует, чтобы процедура была повторена с заменой x на x^0 . Входящая в это решение операция оборачивания матриц хорошо разработана; она может быть легко запрограммирована на языке FORTRAN с помощью нескольких команд.

Хотя итерационный процесс пригоден для большинства проблем, в некоторых случаях итерационное приближение к решению может привести к многочисленным тщетным попыткам и нерациональному использованию вычислительной машины. Если задача содержит искоемые параметры в более запутанном виде и природа функции, подлежащей минимизации, ожидается сложной (т. е. будут ложные минимумы, запрещенные области для параметров и т. д.), для достижения минимума более практично будет использовать процедуру «спуска». При этом может потребоваться численная оценка градиента такой сложной функции. При итерационном процессе, когда величина «шага» зависит от значения первой и второй производных в пространстве параметров и от значения градиента, плохая точность дифференциальных расчетов приведет к очень большой ошибке шага. При использовании же метода «спуска» в худшем случае будет только один плохой «шаг». Метод «спуска» позволяет также вычислить все промежуточные точки между начальным и конечным значениями. Иногда полезно убедиться, что вдоль линии спуска между определенной начальной, обычно выбираемой на основе предыдущих экспериментов, и конечной точками не лежит других минимумов. Для поисков минимума методом «оврагов» *) была недавно написана на языке FORTRAN программа MINFUN. Положенный в основу программы метод до сих пор оказывался весьма полезным для решения нескольких проблем, но только дальнейший опыт позволит определить действительную область применимости этой программы. Фактически использованный в программе MINFUN метод поиска минимума лучше всего можно проиллюстрировать на гипотетической функции двух переменных $f(x, y)$.

На рис. 8 показаны «контурные линии» этой функции (т. е. геометрические места точек, на которых функция имеет одинаковые значения). Процесс поиска минимума состоит из последовательной серии «шагов» в двух направлениях: сначала делается

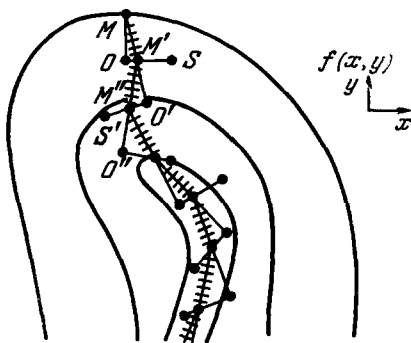


Рис. 8. Графическая иллюстрация метода «оврагов», применяемого в программе MINFUN, для функции двух переменных.

Поиск начинается из точки M ; новые минимумы, M' и M'' , обозначены точками на линии с поперечными штрихами, проходящей по дну «оврага». Значения функции высчитываются не только в минимумах, но и в точках O, O', \dots и S, S' . Производные вычисляются только в O . Пояснения к процедуре поиска и обозначения см. в тексте.

*) Степень подобия этого метода методу «оврагов», доложенному А. А. Тяпкиным ³³, точно не известна. Программа MINFUN создана на основе описания русской программы, полученного из вторых рук. (Речь идет о методе «оврагов» для нелокального поиска функций многих параметров, разработанном М. Гельфандом (см., например, ³¹). (Прим. перев.))

шаг вперед до точки O и затем «боковой» шаг до точки S с последующим нахождением минимума вдоль линии OS ; далее этот цикл повторяется, т. е. из точки предыдущего минимума делается шаг в точку O' и т. д. Подробнее: процесс поиска минимума начинается из точки M ; начальное направление берется по градиенту, вдоль этого направления делается шаг фиксированного размера в «разведочную» точку O , где рассчитывается значение функции и ее градиент. Затем делается шаг, перпендикулярный к линии MO , из точки O в точку S . В точке S снова рассчитывается значение функции $f(x, y)$. По информации, полученной в точках O и S , находится точка M' , соответствующая минимуму функции $f(x, y)$ на линии OS (в предположении о квадратичном изменении функции вдоль этой линии). Для проверки этого в M' снова рассчитывается значение функции $f(x, y)$. (В том случае, если точка M' не дает минимума относительно O и S , берется меньший шаг.) В завершение цикла делается шаг по направлению линии MM' в точку O' , и затем операции следуют в том же порядке, как после шага в точку O . В том виде, как он описан здесь, процесс поиска не останавливается в минимуме и продолжается по дну «оврага». Польза такого рода операции заключается в том, что она позволяет узнать, какие наборы параметров приводят к росту функции около минимума. Подобный процесс поиска приводит к прохождению «оврага» до точки, в которой минимальный радиус контурной линии становится больше величины шага, после чего поиск обычно продолжается в обратном порядке. Истинное положение минимума находится с помощью изменения описанного выше процесса таким образом, что после каждого шага, приводящего к увеличению значения $f(x, y)$, происходит уменьшение величины шага и обращение направления поиска *).

3. ВОПРОСЫ ЭКОНОМИКИ

3.1. Персонал и оборудование

Система обработки, подобная описанной выше, требует большого обслуживающего персонала; ни одно из изложений общепринятых методов анализа данных не будет полным без рассмотрения проблем персонала и количества используемого оборудования. В группе Л. Альвареса работает (включая временно работающих сотрудников других лабораторий) почти по 20 человек физиков, дипломников и персонала вычислительной машины. Эти цифры не включают лиц, занимавшихся созданием и обслуживанием пузырьковых камер и разработкой аппаратуры для анализа данных. На просмотре и измерениях пленок со 182-см камеры дополнительно занято, кроме того, 60 человек технического персонала; 20 человек занято эксплуатацией аппаратуры. У нас имеется четыре «франкенштейна» для измерения пленки со 182-см камеры и 12 просмотровых проекторов. В течение первой половины 1963 г. каждый из четырех «франкенштейнов» обмерял около шести событий за час, работая 120 часов в неделю; таким образом, годовая продукция составляла около 140 000 событий. Обработка этих 140 000 событий занимала 70 часов в неделю на вычислительной машине IBM-7090, из которых 50 часов расчет велся по программам, приведенным в верхней части табл. IV, а 20 часов тратились на физические расчеты, расчеты по программам, использующим метод Монте-Карло, и на отработку новых программ.

Системы QUEST и SMP (см. раздел 4.2) делят время работы на вычислительной машине IBM-709, предоставленной фирмой IBM почти полностью в распоряжение лаборатории, чтобы помочь разработать системы, непосредственно связанные с вычислительной машиной.

3.2. Стоимость обработки

Основные составные части стоимости эксперимента с пузырьковой камерой приведены в табл. III. Эти расходы включают зарплату персонала, накладные и эксплуатационные расходы, амортизацию и т. д. за десять лет (более точную сводку стоимости см. в работе ³⁵). Просмотр, измерение и обсчет событий (пункты 3—5 табл. III) требуют специальных пояснений.

Как нами установлено, практически по тем или другим причинам пленка обычно просматривается по крайней мере дважды. Подобным же образом только около половины измеренных событий входят в опубликованные работы. (Неиспользованная половина состоит из событий, которые были плохо измерены и подлежат перемеру, событий, лежащих вне эффективного объема пузырьковой камеры, или событий, отброшенных потому, что они не являются случаями ни одной из интересующих реакций.) В результате для реальной оценки стоимости этих видов работ при современном положении дел при-

*) В настоящее время для минимизации широкого класса нелинейных функций в ВЦ ОИЯИ успешно используется метод линеаризации, предложенный С. Соколовым и И. Силиным (см. ³⁴). (Прим. перев.)

Таблица III

Стоимость отдельных этапов эксперимента
с пузырьковыми камерами

Вид операции	Оцениваемая единица	Приблизительная затрата времени	Стоимость единицы (в долларах)
1. Работа ускорителя	Не оценивалась		
2. Работа пузырьковой камеры и фотообработка пленки	1 экспозиция («триада»)		1,20
3. Просмотр пленки	1 триада	1 мин	0,10
4. Измерения на пленке	1 событие	10 мин	2,0
5. Обработка измерений на вычислительной машине	1 событие	12—60 сек (IBM-7090)	~1,00

веденные цифры нужно по крайней мере умножить на два. Стоимость расчетов на вычислительной машине, отмеченная в табл. III, не включает стоимости специальных расчетов, требуемых для эксперимента в целом. Более детальная классификация этапов расчетов дана в табл. IV.

В табл. IV производится сравнение времени, действительно затрачиваемого на вычислительной машине, с теоретическими оценками, взятыми из табл. I, которые

Таблица IV

Затраты времени на вычислительной машине IBM-7090
для обработки типичного эксперимента (50 000 событий)
по системе программ PANAL—LINGO

Программа	Затраты часов/месяц	Затраты времени на IBM-7090 (в сек на одно событие)	
		найденные из общих затрат времени за месяц *)	взятые из табл. I
PANAL	} 8	6	3
SELECT			
PACKAGE		19	6
EPC	2 **)	1,4	3
EXAMINE	} 17	12	2
SUMX			
LINGO	35	25	3
Прочие программы	8	—	—
Суммарно	100	60	12

*) За время одного месяца 1963 г., на основе работы в течение которого составлялась таблица, было измерено 5000 новых событий, однако среди обрабатываемых событий только часть была новых. Например, программы SUMX и LINGO в основном затрачивали время на обработку 50 000 измеренных ранее событий. Тем не менее для сравнения с табл. I мы рассчитали затраты в секундах на одно измеренное событие, просто разделив затраты в часах за месяц на 5000 событий/месяц и умножив на 3600 сек/час.

**) Выдача программы PACKAGE для большинства событий не печатается.

сделаны в предположении, что каждое событие обсчитывается только один раз и все операции, касающиеся эксперимента как целого, выполняемые программами LINGO, SUMX и т. д., выполняются только после того, как обсчитаны все события. Эти предположения, конечно, нереальны. Например, у нас все события сначала обсчитываются по программе PACKAGE в предположении самой простой гипотезы (пренебрегая возможностью редких видов распада) и затем пересчитываются все те случаи, которые не удовлетворяют простым гипотезам, или начинают проверяться другие интересные нас гипотезы.

Пересчитываемые события обрабатываются по значительно более сложным вариантам программ PACKAGE, EXAMIN и т. д. Наша разбивка времени работы вычислительной машины IBM-7090 весьма ненадежна (обсчет по всей последовательности программ зачастую может быть сведен к первой программе), но мы попытались восстановить типичное разделение времени на вычислительной машине IBM-7090, чтобы спланировать новый эксперимент (K-72), который начался в первой половине 1963 г. Как мы упоминали в списке к табл. IV, определять количество секунд, затрачиваемое вычислительной машиной IBM-7090 на событие, фактически бессмысленно, но мы тем не менее сделали это, чтобы произвести сравнение с табл. I. Число обращений к программам не зависит линейно от количества обрабатываемых за месяц событий, а зависит более непосредственно от числа событий в эксперименте и значительно растет с увеличением числа физиков, принимающих участие в эксперименте, особенно если некоторые из них обладают нетерпеливым характером.

4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ПРОСМОТРА

4.1. Описание процедуры автоматических измерений (АИ)

Цифровые вычислительные машины использовались для анализа снимков с пузырьковых камер в течение многих лет, однако только в последние несколько лет отношение возможностей вычислительных машин к стоимости их использования улучшилось настолько, что стало экономически выгодно пытаться использовать их для контроля процесса измерений и даже просмотра снимков. В этом разделе мы рассмотрим три автоматические измерительные (АИ) системы, которые вступили в строй в течение 1963 г., и затем остановимся на двух системах автоматического просмотра и измерений (АПИ), опробование которых начнется в 1964 г. Однако предварительно мы должны подробнее объяснить, что мы подразумеваем под терминами АИ и АПИ. Затем мы опишем сами системы и в заключение в табл. V проведем их сравнение и сделаем некоторые общие замечания.

Слова «автоматический просмотр» полностью отвечают смыслу, однако термин «автоматическое измерение» (АИ) фактически является только обозначением процесса измерений, контролируемых вычислительной машиной, которые мы проиллюстрируем на конкретном примере. Примерами реальных систем АИ, описанных ниже, являются SMP*), система со считыванием по спирали (spiral reader) и FSD**) (работающие в режиме АИ); для прототипа, однако, мы продемонстрируем принцип работы систем АИ на приборе, которого реально не существует, а именно на «франкенштейне», работающем в режиме работы АИ. Такой «франкенштейн» не будет иметь следящих по треку сервосистем, а будет приспособлен для отсчета координат всех пузырьков, лежащих на спроектированном изображении трека в пределах «апертуры», простирающейся на несколько миллиметров по обе стороны от обычного перекрестия. Для измерения трека оператор стал бы двигать перекрестие вблизи от трека, перемещая его с такой скоростью, при которой возможно удерживать трек в пределах апертуры. Полоса вдоль трека, по ширине равная апертуре, называется «дорожкой», и первая половина процесса автоматического измерения состоит в сборе всех данных в пределах «дорожки» и накоплении их в памяти вычислительной машины. Вторая часть АИ выполняется «фильтрующей» программой, которая отбирает группы по 10—20 пузырьков и строит их распределения по оси, перпендикулярной к «дорожке». Таким образом, можно «отфильтровать» элементы трека от фона или от элементов другого трека и затем связать эти элементы в целый трек. Далее программа вычисляет координаты «средних точек» на каждом треке и записывает их на магнитную ленту в форме, подобной выдаче «франкенштейна» и пригодной для обычных программ анализа данных.

Оказывается, что для «фильтрации» одного типичного трека на одном кадре требуется от 0,1 до 0,25 сек на вычислительной машине IBM-7094, так что теперь более

*) Сокращение от Scanning and Measuring Projector — просмотрный и измерительный проектор (см. раздел 4.2). (Прим. перев.)

**) Сокращение от Flying Spot Digitizer — отсчетное устройство с бегущим лучом (см. раздел 4.4). (Прим. перев.)

экономично оказывается обойтись без следящих по треку сервосистем и перейти на «фильтрующие» программы. Измеритель может двигаться вдоль широкой «дорожки» в несколько раз быстрее, чем в случае аккуратного слежения по треку, как это было в системах с сервоприводами. Дополнительно в качестве подобного продукта получают измерения плотности ионизации.

Как уже упоминалось выше, имеются уже три различных образца приборов АИ. Эти системы описаны в работах ^{1,2}, и здесь мы дадим о них лишь краткие сведения.

4.2. Просмотровый и измерительный проектор SMP (см. ⁵⁹)

Этот прибор ³⁸ достаточно дешев (его стоимость в Беркли 32 000 долларов), так что каждая лаборатория может приобрести несколько экземпляров их для организации одновременного просмотра и измерения, что исключит неприятные проблемы многократного обращения к пленке. Все SMP обслуживаются одновременно одной небольшой вычислительной машиной. Возможность параллельного выполнения функций, не связанных с системами SMP (например, выполнение посторонних расчетов или печать результатов, не связанных с SMP), зависит от мощности вычислительной машины и числа обслуживаемых ею измерительных приборов. Каждый SMP подобен «франкенштейну» в том отношении, что в процессе измерений прибор управляется оператором. Измерительный стол SMP состоит из лентопротяжной системы и простой оптической системы, которая проектирует изображение на белый горизонтальный экран. Прибор внешне напоминает обычный просмотровый стол с верхним освещением, за двумя следующими исключениями. Во-первых, рядом со столом SMP находится печатающая машинка, которая обеспечивает двухстороннюю связь между оператором SMP и программой в вычислительной машине. Во-вторых, проекционный экран сделан из белых подвижных листов майлара, что позволяет передвигать измерительную апертуру диаметром 0,6 см, проделанную в экране, в любую точку проекции снимка пузырьковой камеры. В процессе работы оператор просматривает пленку обычным образом, регистрируя всю просмотровую информацию с помощью печатающей машинки на магнитную ленту. Когда находят, что случай нужно перебрать, маленькую подвижную апертуру на проекционном экране передвигают вдоль треков или реперных линий, подлежащих измерению, причем информация посылается прямо в вычислительную машину. Вычислительная машина управляет работой оператора в процессе измерения путем печатания коротких указаний на печатающей машинке и автоматически выполняет некоторые механические операции, такие, как переключение стереопроекций. Вычислительная машина способна определять некоторые ошибки в записи и измерениях и отвечать на них корректирующими указаниями оператору. Немедленное исправление ошибок приводит к существенной экономии времени, исключая в дальнейшем повторное обращение к пленкам для замеров.

Механическая и электрическая части SMP проще, чем во «франкенштейне», потому что для достижения точности SMP не требуется отсчетных микроскопных шкал или сверхточных сервосистем. Точность измерений на SMP достигается за счет того, что измерения производятся относительно системы отсчетных меток, очень точно нанесенных путем контактного фотографирования на стеклянную фотографическую пластину размером с измерительный стол. Эта пластина непрозрачная, за исключением прозрачных отсчетных меток диаметром 0,5 мм, расположенных через каждый сантиметр по осям x и y . Координаты вдоль трека измеряются относительно ближайшей отсчетной метки путем смещения сегмента трека на известное расстояние с помощью вращающейся перископной головки, делающей 1200 об/мин, который можно таким образом перемещать с места на место в плоскости изображения на столе (рис. 9). Когда смещенный сегмент трека проходит над отсчетной меткой, азимутальное положение перископа бывает отражено на магнитном материале, покрывающем внешнюю часть вращающегося барабана, в котором укреплена перископная головка. Эта информация посылается прямо в вычислительную машину совместно с информацией, необходимой для идентификации отсчетной точки, относительно которой сделано измерение. Вычислительная машина может восстановить положение точек трека, вычитая смещение, произведенное перископной головкой от точно известного положения отсчетной метки. Модель SMP, используемая сейчас в Беркли, измеряет положение приблизительно восьми точек на сантиметр проекции трека. Положение каждой точки отсчитывается с точностью 80 мк на измерительном столе SMP, что эквивалентно 5 мк на пленке. Поскольку вдоль трека оказывается измерено так много точек, производится усреднение по десяти точкам, чтобы свести количество точек примерно к тому, которое измеряется на «франкенштейне» (ошибка усредненных таким образом точек менее 2 мк). Измерения могут быть сделаны для любой части изображения, которая пройдет через 6-мм апертуру перископной головки; поэтому одна из задач вычислительной машины состоит в том, чтобы отфильтровать фоновые пузырьки или царапины, которые могут регистрироваться

вместе с нужными треками. Отсчет положения точки трека происходит только тогда, когда при движении перископной головки изображение пузырька трека наплывет

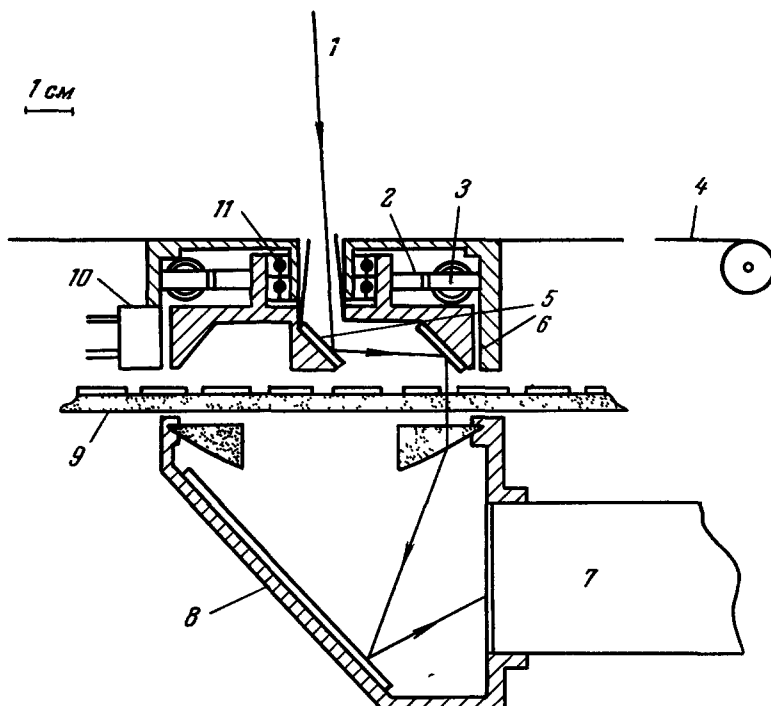


Рис 9 Поперечное сечение отсчетного устройства системы SMP

Основными его компонентами являются 1 — луч света падающий с проектора 2 — ротор мотора, 3 — статор мотора 4 — белый проекционный экран 5 — зеркала перископной головки 6 — вращающийся барабан с отсчетной «шкалой» на магнитном покрытии 7 — фотоумножитель 8 — система сбора света (движется вместе с перископной головкой) 9 — стеклянная пластина с отсчетными метками (нанесенными на слое фотоэмульсии) 10 — магнитная головка считывающая с барабана азимутальное положение перископной головки 11 — шарикоподшипники

на отсчетную метку. Если пузырька нет (разрыв трека), отсутствие отсчета несет информацию относительно плотности пузырьков на треке. Высокая плотность отсчетов вдоль трека делает такие оценки статистически значимыми *)

4.3 Система считывания по спирали (spiral reader)

Один из способов сокращения времени измерения события состоит в попытке определять положение всех треков, исходящих из вершины, за одну операцию. В Беркли для этой цели была разработана система «считывания по спирали»^{2,38}. В этом устройстве точки трека регистрируются в полярной системе координат, в центре которой лежит вершина измеряемого события.

Изображение события проектируется на радиальную щель, которая вращается вокруг начала координат, отбирая все треки, исходящие из вершины. Радиальное положение щели может изменяться на расстояние до 12,7 см (что эквивалентно 2,5 см на пленке или 38 см в пространстве 182 см камеры). По мере того как щель «раскручи-

*) В конце 1963 г. в Беркли на SMP начались рабочие измерения событий на пленках K-63 (облучение 182-см водородной камеры в пучке K-мезонов с импульсом 2,5—2,8 Гэв/с) и π -63 (облучение в пучке π -мезонов с импульсом 2—4 Гэв/с) в экспериментах. На системе из пяти SMP и вычислительной машины IBM 7090 к маю 1964 г. было обмерено около 40 000 событий. Как показал опыт, первоначально точность измерений ограничивалась некоторыми дефектами оптической проекционной системы. После улучшения оптической системы дисторсии проектирующей системы путем введения в расчеты поправочных членов были сведены до 1 мк по всему полю³⁷. Параллельно пленки с тех же экспериментов обмерялись на «франкенштейнах». Приводимая ниже

вается» по спирали из центра координат, ее радиальное и азимутальное положение определяется для тех моментов времени, когда через щель проходят сегменты трека, приводящие к уменьшению светового потока, попадающего на фотоумножители. Группы этих полярных координат накапливаются в буферной памяти и затем переводятся на магнитную ленту. Кроме точек трека, регистрируется и некоторое количество фона, не относящегося к трекам. В этом случае вычислительная машина опять может быть хорошо приспособлена для отсеивания фона. Выходные данные системы «считывания по спирали» обрабатываются программой FILTER, которая отфильтровывает фон и выдает данные в форме, пригодной для ввода в стандартные анализирующие программы (PACKAGE и др).

4.4. Отсчетное устройство с бегущим лучом FSD

Измерительное устройство с бегущим лучом известно почти во всем мире по имени его создателей как прибор Хафа — Пауэлла (HPD) *)^{1, 39}, однако в Радиационной лаборатории им. Лоуренса вся эта система была названа отсчетным устройством с бегущим лучом (FSD); это название мы и будем использовать (принося извинения создателям прибора) в этой статье ввиду его описательной точности.

Имеются два способа использования FSD. На первой фазе развития (AI) эта система позволяет производить автоматическое измерение треков, однако объект измерения FSD при этом еще определяется оператором. В таком режиме работы на FSD уже производятся рабочие измерения. На второй фазе (АПИ), описанной в разделе 4.6, прибор работает полностью автоматически. Работа FSD в режиме AI подробно описана в работе¹. Измерения проходят в два этапа. Первый этап, по существу, представляет обычный просмотр, за исключением того, что вдоль треков, которые в дальнейшем должны быть точно измерены, измеряются координаты нескольких точек в качестве «дорожных знаков». Отсчетное устройство малой точности, которым оборудован просмотровый стол, довольно просто и имеет шкалу с ценой деления 120 мк в плоскости проекции изображения. После того как такие измерения накоплены для большого числа событий, рулон пленки загружается в FSD и каждый трек, который был предварительно обмерен на просмотровом столе, автоматически обмеряется с точностью до 1 мк с помощью бегущего луча, который последовательно сканирует фильм, подобно тому как это происходит в телевизионной трубке. Координаты любого пузырька (в прямоугольной системе координат), пересекаемого бегущим лучом, регистрируются фотоумножителем и передаются в вычислительную машину, которая их обрабатывает, в то время как сканирование пленки продолжается. Сканирующий луч генерируется при прохождении света через быстро вращающийся диск с почти радиальными щелями, затем — через другую неподвижную щель и оптическую систему, проектирующую луч на пленку (рис. 10). Эта система обеспечивает быстрое линейное сканирование лучом размерами 20 мк (что меньше, чем размеры пузырька на пленке). Часть света сканирующего луча проектируется на дифракционную решетку, так что положение

таблица позволяет судить о сравнительной эффективности обеих измерительных систем³⁷.

	К-63		П-63	
	SMP	«Франкенштейн»	SMP	«Франкенштейн»
Число измеренных событий . .	26 145	15 589	11 197	17 936
Процент событий, отброшенных до или во время обмеров треков	13,4	16,3	4,7	7,7
Процент событий, не подошедших ни к одной проверенной гипотезе	14,1	10,4	2,4	14,3
Процент идентифицированных событий	72,5	73,3	92,9	78,0

(Прим. перев.)

*) HPD — сокращение от Hough Powell Device. (Прим. перев.)

луча на пленке можно определить по номеру линии решетки, по которой пробегает в это время луч. Развертка сканирования осуществляется с помощью равномерного движения измерительного столика, несущего пленку, перпендикулярно к направлению сканирования. Линии сканирования отстоят на расстоянии, равном примерно двум диаметрам пузырька.

Ведется разработка специальной развертки под углом 90° к нормальной развертке. Такое увеличение возможностей обеспечит импульсы хорошей формы от треков,

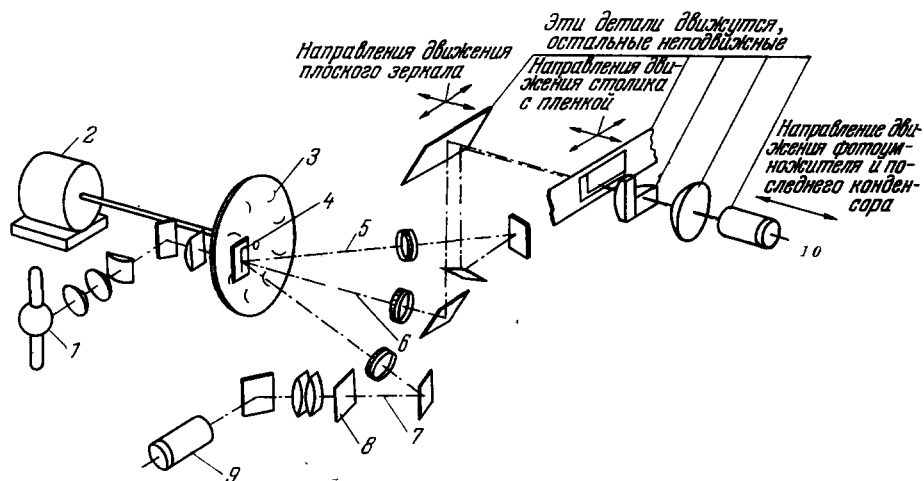


Рис. 10. Схематическое изображение оптической системы FSD.

Основными компонентами являются: 1 — источник света; 2 — мотор; 3 — девять закругленных щелей на вращающемся диске; 4 — неподвижная щель; 5 — ход луча для ортогонального сканирования; 6 — ход луча для нормального сканирования; 7 — ход луча на отсчетные дифракционные пластинки; 8 — дифракционные пластинки; 9 — фотопластинка, связанный с дифракционными пластинками; 10 — фотомультипликатор, регистрирующий трек.

имеющих на пленке любую ориентацию. Сканирующая система FSD достаточно точна, чтобы дать оценку числа разрывов треков. Попытки использовать FSD в режиме автоматического просмотра и измерений описаны в разделе 4.6 *).

4.5. Система для автоматического просмотра и измерений (АПИ)

В настоящее время существуют три основных проекта систем, включающих программы узнавания событий для обычных вычислительных машин, соединенных со специальной аппаратурой, цель которых состоит в автоматизации просмотра пленок с пузырьковой камеры. Так как «узнавание событий» представляет весьма обширную и серьезную область исследований, мы будем использовать более точное и менее претенциозное название — «автоматический просмотр». Эта проблема значительно более трудна для решения, чем автоматизация измерений, которая была осуществлена в 1963 г.; тем не менее теперь уже обрисовалось несколько полных схем таких устройств, и мы предполагаем, что через несколько лет миллионы «триад» будут ежегодно просматриваться и измеряться полностью автоматически.

*) В первой половине 1964 г. в Беркли на FSD (режим АИ) было обмерено 80 000 событий на пленках, снятых в π^- -пучке с импульсом $3,6-4$ Гэв/с. В день измерялось около 700 событий; на это тратилось шесть часов на вычислительной машине IBM-7094, кроме того, 1,5 часа в день тратилось на этой машине для геометрических и кинематических расчетов. Из измеренных событий 70% было пригодно для полной обработки; после перемера «плохих» событий общее число отброшенных событий составило 9%.

В Брукхейвене на HPD обмерено около 10 000 случаев π^- — p -взаимодействия (при импульсе падающих π^- -мезонов $3,6$ Гэв/с). Скорость измерения составила 65 событий/час на прибор. После перемера «плохих» событий число отброшенных событий среди двухлучевых звезд составило $(2,6 \pm 0,2)\%$, среди четырехлучевых звезд $(10 \pm 2)\%$ и среди одельных V-событий $(25 \pm 7)\%$ ⁴⁰. (Прим. перев.)

Практически, по двум различным причинам, все усилия, описанные ниже, направлены на создание систем автоматического просмотра плюс измерений (АПИ) Эти причины следующие:

а) Современные вычислительные машины еще сравнительно плохо конкурируют с людьми в области распознавания типов событий, но они гораздо лучше соревнуются в производстве измерений и составлении каталогов. Поэтому системы, которые смогли бы просматривать снимки и делать грубые измерения вдоль треков, определенно должны позаимствовать достижения уже разработанной техники автоматических измерений

б) Автоматический просмотр включает некоторые трудные проблемы проверки вершин и треков на трех стереоснимках. Чем точнее измерения, тем легче логические проблемы распутывания близко расположенных и запутанных вершин и треков.

Три основные попытки создать системы АПИ сделаны на основе FSD, PEPR *) и IIIac-III. Экспериментальные запуски первых двух из этих устройств проведены в 1964 г., и мы расскажем о них ниже.

IIIac-III представляет собой более отдаленный и общий проект, который в достаточной степени описан Мак-Кормиком ⁴¹⁻⁴⁵. В дальнейшем этот проект упоминаться нами не будет.

4.6. FSD в режиме (АПИ)

С самого начала было, конечно, задумано, что FSD в конце концов будут работать как системы АПИ. Этот переход не потребует изменения в оборудовании; наоборот, он приведет к замене восьми просмотровых столов с отсчетными устройствами и их обслуживающего персонала 40—80 дополнительными часами на вычислительной машине IBM-7094.

В 1961 г. Паста, Марр и Рабинович начали работать над программой PMR ⁴⁸ для машины IBM-7090, предназначенной для сортировки данных с выходного буфера FSD по мере их поступления на него (от 10 000 до 20 000 за секунду). Программа устанавливает «банки» треков и предсказывает, где должен быть найден следующий пузырек трека. Когда с измерительного устройства приходят новые отсчеты, они быстро сравниваются с этим предсказанием. Если проверка проходит, точка запасается в существующий «банк», если нет, инициируется новый сегмент трека.

В Радиационной лаборатории Уайт ⁴⁹ также работает над такой программой, которую он назвал DAPR. Он оценил, что вычислительная машина IBM-7094 с помощью этой программы может обрабатывать 18 000 отсчетов в секунду, что соответствует скорости измерений FSD в Радиационной лаборатории. Он нашел, что сканирование одного типичного стереоснимка 182-см водородной камеры Альвареса приводит примерно к 72 000 отсчетов, так что такой просмотр займет 4 сек работы программы DAPR. Далее мы должны добавить 50% от этого времени на «ортогональное сканирование», так что каждый стереокадр потребует 6 сек, а вся триада 18 сек.

Выдачей программ PMR/DAPR будет «печать данных с одного стереокадра», содержащая несколько сотен кодов, в основном представляющих усредненные координаты точек вдоль треков (около десяти точек на трек), за исключением тех треков, которые проходят через камеру не взаимодействуя. «Печать данных с одного стереокадра» у программ PEPR и DAPR будет одинакова, а их последующая обработка почти идентична ⁵⁰. Программы этой последующей обработки, названные TRIAD и SCAN, рассмотрим ниже, в разделе, посвященном программе PEPR.

4.7. Система точной кодировки и распознавания событий (PEPR), использующая осциллоскоп

Эта система, предназначенная для автоматического просмотра и измерения снимков с пузырьковых камер, объединяет как цифровую, так и аналоговую технику**). Эта идея выдвинута Плессом из Массачусетского технологического института, и все основное оборудование было построено там; Йейлский университет и Радиационная лаборатория им. Лоуренса принимали в основном участие в составлении программ для вычислительных машин. В системе PEPR светящееся «пятно» с экрана катодно-лучевой трубки с произвольной выборкой проектируется на пленку; вся система управляется небольшой специализированной вычислительной машиной. Само «пятно» имеет пере-

*) PEPR — сокращение от Precision Encoding and Pattern Recognizing Oscilloscope. (Прим. перев.).

**) По PEPR до сих пор опубликовано мало материалов. Конструкция оборудования описана И. Плессом в отчете Массачусетского технологического института (МТИ) комиссии USAEC (февраль 1962 г.). Последние обзоры по этой системе сделаны Розенфельдом и Тафтом ^{35, 36}. Группами специалистов, работающими над PEPR в МТИ и Беркли, написан ряд отчетов.

менную форму, изменяясь от кружка диаметром 25 мк до линии с отношением длины к ширине, доходящим до 80 (25 мк и 2 мм), которая может иметь любую ориентацию. В основной системе PEPR состоит из трех частей. Первой из них является оборудование, в которое входит катодно-лучевая трубка высокой точности, оптическая система, детектор элементов трека, система дифракционных решеток и узел транспортировки пленки; в целом оно стоит около 100 000 долларов. Это оборудование контролируется с помощью специализированного цифрового вычислительного устройства, названного «контролером», стоимостью около 100 000 долларов. «Контролер» работает совместно с небольшой вычислительной машиной общего назначения PDP-1, которая стоит около 200 000 долларов. Значительная часть этой аппаратуры сейчас уже работает.

«Пятно» в виде линии с переменным направлением особенно хорошо подходит для распознавания треков. Возможности, обеспечиваемые такой схемой, позволяют подойти к проблеме просмотра — измерения в три этапа.

а) Сначала выполняется полное сканирование площади всей пленки с помощью различно ориентированной линии (т. е. электронного луча катодно-лучевой трубки, сфокусированного в линию) длиной 2 мм. Кадр разделяется при этом на квадратичные ячейки 2×2 мм²; положение и ориентация элементов трека, обнаруженных в каждой ячейке, записываются в памяти вычислительной машины. Направление линии известно с точностью до одного градуса и положение ее — с точностью 1/4000 от размеров трубки. Эта процедура закладывает запасы данных («банки») для каждого трека в памяти машины.

б) Следующий этап заключается в «прослеживании трека». Трек (или сегмент трека) в каждом «банке» прослеживается в обоих направлениях до конца или до соединения с другими треками, которые можно проследить таким же образом.

в) Окончательно, когда интересующие треки идентифицированы, «пятно» наименьшего размера используется для счета пузырьков и точной кодировки координат.

Следует отметить, что такой трехступенчатый подход почти идентичен с тем, который положен в основу программирования для Illiac-III⁴¹, за исключением того, что там сканирование 2-мм квадратной ячейки управляется цифровой, а не аналоговой вычислительной машиной.

Размеры и ориентация «линии» в системе PEPR, т. е. линии, образованной на экране катодно-лучевой трубки, контролируются подбором токов в «квадрупольной» фокусирующей линзе, действие которой на электронный пучок в катодной трубке аналогично действию на свет цилиндрической линзы с переменной ориентацией относительно пучка *). Точная кодировка положения объекта на пленке достигается тем, что часть светового луча от «пятна» на экране катодно-лучевой трубки с помощью дополнительной оптики фокусируется на две отсчетные решетки. У этих решеток 25-мк темные полосы чередуются с 25-мк открытыми щелями. Решетки расположены под прямым углом друг к другу; назовем одну из них *x*-решеткой, другую *y*-решеткой. При отсчете пузырьков луч движется в одном направлении *x*, а его положение по *y* корректируется сервосистемами. Положение по оси *x* тогда определяется с помощью таких же отсчетного устройства и интерполяционной счетной системы, как и в системе FSD**). Когда сканирующий луч пересекает пузырек, его *x*- и *y*-координаты запоминаются на регистре «контролера». Как и во всех подобных системах, в PEPR одновременно получается информация о плотности пузырьков вдоль следа.

Одна система PEPR могла бы обработать за год около миллиона триад, что совпадает с возможностями одной системы FSD. Главное различие между этими системами состоит в том, что в то время как стоимость оборудования FSD (вариант АПИ, т. е. без измерительных просмотровых столов), вероятно, меньше, чем стоимость PEPR, система FSD (АПИ) для обсчета измерений на отдельных стереокадрах должна использовать две или три смены на вычислительной машине IBM-7094, а для системы PEPR этого не нужно.

Выдача данных с «одного стереокадра» систем FSD или PEPR будет использоваться программой TRIAD, написанной для вычислительной машины IBM-7094, которая будет проверять вершины событий и треки на всех трех стереокадрах и производить первичную выдачу данных. Затем предполагается, что эта первичная выдача данных будет много раз прочитываться другой программой для машины IBM-7094, названной SCAN. Эта программа будет производить группы операций по анализу событий, легко вызываемые контрольными подпрограммами, или «программами типов событий», кото-

*) Простой квадруполь действует как цилиндрическая линза и поэтому может быть использован для превращения точки в линию вдоль некоторой оси, скажем, горизонтальной. Изменив направление тока, линию можно сделать вертикальной, но ее никак нельзя повернуть на 45°. Однако добавление четырех полюсов позволяет произвольно контролировать направление оси линии.

**) В настоящее время в системе PEPR описанная система с отсчетными решетками отклонена, так как найдено, что необходимая точность отсчета достигается с помощью измерения отклоняющих токов в аналоговых системах управления лучом⁴¹. (Прим. перев.)

рые будут заранее задавать критерии отбора, так что программа SCAN будет просматривать первичную выдачу во многом подобно тому, как сейчас люди просматривают пленку в поисках интересующих событий. Выдача программы SCAN будет аналогична обычной выдаче «франкенштейна» и сможет обрабатываться обычными анализирующими программами *).

4.8. Сравнение автоматических систем (табл. V)

В заключение этой главы мы дадим сводку основных параметров современных систем в табл. V. При составлении этой таблицы мы взяли некоторую гипотетическую большую пузырьковую камеру, дающую миллион «триад» в год, и предположили, что в этом миллионе «триад» будет миллион интересных событий. Это количество измеряемых событий на «триаду» завышено в несколько раз по сравнению с найденными в системе с «франкенштейном», но при автоматизации измерений, особенно при автоматизации просмотра и измерений, измерительные трудности значительно уменьшатся, и физики будут стремиться измерять даже самые заурядные типы событий.

При составлении табл. V считалось, что на всех просмотрных и измерительных устройствах работы ведутся в три смены (120 часов в неделю); в этом предположении персонал, занятый на обслуживании системы «франкенштейнов», составляет 99 человек, системы SMP — 36 человек и системы FSD (вариант АП) — 24 человека (плюс один

Таблица V

Системы, предназначенные для автоматического просмотра миллиона триад и измерения миллиона событий ежегодно

Система	Число измерительных устройств	Число просмотрных столов	Цена системы (в тыс. долларов)	Количество смен на IBM-7094		Количество измеряемых точек на 1 см трека на пленке 1)	Размеры шели или пятна на пленке, мм	Типичный наименьший отсчет на пленке, мм
				измерения	анализ			
«Франкенштейн»	30 (по 100 000 долларов каждый) ²⁾	3 ⁵⁾ (по 15 000 долларов каждый)	3045	0	1÷3 ⁹⁾	10	5×300	1—2,5 мм
SMP	12 (по 32 000 долларов каждый)		380	1/6 ⁷⁾ из 3 смен	1÷3 ⁹⁾	100	35 (пятно)	5/√n ¹⁰⁾
Spiral reader (АП)	6 ³⁾	3 (по 15 000 долларов каждый)	550	1,3	1÷3 ⁹⁾	15÷30	10××700	~5
FSD (АП)	1 ⁴⁾ (250 000 долларов)	8 (по 40 000 долларов каждый)	570	1/3 из 3 смен	1÷3 ⁹⁾	170	23 (пятно)	1/√n
FSD (АПИ)	«Тандем» ⁶⁾ (375 000 долларов)		375	2÷3	1÷3 ⁹⁾	170	23 (пятно)	~1/√n
PEPR (АПИ)	1 (400 000 долларов)		400	1/2 ⁸⁾	1÷3 ⁹⁾	100	25 (от 25 мм до 2 мм)	~5/√n

*) Полная отладка системы PEPR завершена к концу 1964 г. Поскольку найдено, что полное сканирование кадра занимает около одной секунды, пока будет сохранен предварительный просмотр пленки работающим персоналом, однако вся информация, подаваемая при этом в PEPR, будет ограничена указанием номера кадра и приблизительного положения вершины события. Система PEPR пригодна для рабочих измерений в таком режиме с начала 1965 г. ⁵² (Прим. перев.).

оператор на каждый FSD на смену). Чтобы обработать миллион триад, система REPR должна работать круглосуточно (один оператор на каждую из четырех смен, включая «уикэнд»), а FSD (в любом варианте) — по три смены (опять один оператор на смену).

Табл. V по горизонтали разделена на систему с «франкенштейнами» (которая приведена для сравнения с системами, следующими ниже), системы, в которых автоматизирован только процесс измерений (АИ), и системы, осуществляющие автоматический просмотр и измерения (АПИ). Первая строка этой таблицы показывает, что хотя каждый «франкенштейн» еще продуктивно измеряет от 30 до 40 тысяч событий в год, «войско» из 30 «франкенштейнов» уже не является наиболее экономичной системой для измерения миллиона событий.

Примечания к табл. V. 1) Это означает число отсчетов на один сантиметр трека с большой плотностью пузырьков, спроектированного (если потребуется) обратно на пленку.

2) Цена «франкенштейна» в Америке варьируется от 40 000 до 150 000 долларов, но 100 000 будет средней ценой прибора с системой автоматического слежения; однако SOM (Париж) продает за 50 000 долларов подобные приборы без системы слежения по треку, но с выводом сигнала со щели на КИТ и другой необходимой электроникой.

3) Подразумеваются одновершинные события.

4) В Радиационной лаборатории оценка стоимости произведена Дж. Франком и Г. Уайтом; Б. Пауэлл сообщил, что в ЦЕРНе FSD стоит 90 000 долларов. Детмар Вискотт утверждает, что стоимость дешевой модели просмотрного стола в ЦЕРНе составляет 13 000 долларов.

5) На практике, однако, требуются дополнительные просмотрные столы. Например, в группе Альвареца действительное отношение просмотрных и измерительных устройств составляет 3/1. Имеется две причины для введения дополнительного количества просмотрных столов: а) за последний год мы измеряли только одно событие на десять просмотренных кадров, а не одно событие на каждый просмотренный кадр, как предполагалось в таблице; б) мы пытались для каждого эксперимента делать двойной просмотр.

6) Эта система не нуждается в просмотрных столах. Однако обычно кто-нибудь хочет поглядеть пленку, поэтому может потребоваться несколько стандартных просмотрных столов.

7) Обозначение (1/6 из трех смен) означает, что в течение трех смен требуется 1/6 вычислительной мощности IBM-7094. Например, предполагается, что системы SMP будут работать по три смены (120 часов в неделю), так что можно использовать или значительно меньшую вычислительную машину, чем IBM-7094, или работать на ней в режиме «разделения времени». «Разделение времени» может или предполагать для таких небольших вычислительных машин, как IBM-7044, параллельное выполнение простых операций, как дополнительную печать, или действительно одновременную работу по нескольким программам для больших вычислительных машин с записью на барабанах. Нагрузка от одного SMP определялась на основе требования времени 2 сек на IBM-7094 (30 сек на IBM-709) для управляющей программы и программы фильирования и не включает времени на программы PANG или KICK.

8) Программы, называемые TRIAD и SCAN, объединяют информацию с трех стереоснимков, составляют из нее «библиотеку» и просматривают ее в поисках интересных событий.

9) Одна смена — это недостижимый минимум. Оценки на основе наших современных методов предсказывают шесть смен; три смены, вероятно, будут разумным компромиссом.

10) Во время как «франкенштейн» и система «считывания по спирали» отсчитывают положение щели, которая усредняет несколько пузырьков, другие автоматические устройства отсчитывают положение отдельных пузырьков. Затем группы измеренных точек (примерно по 10) усредняются. Для бесконечного числа точек $\sigma_{av}^2 = 1/12\sigma_1^2$, для 10 точек $\sigma_{av}^2 \sim 1/10\sigma_1^2$.

Мы переходим теперь к автоматическим измерительным системам, все три из которых работают на физиков еще только несколько недель. Из-за этой ситуации точность наших оценок не лучше $\pm 50\%$, и поэтому трудно установить репающую разницу в стоимости их эксплуатации. Очевидно все же, что система считывания по спирали наиболее производительна в случае одновершинных событий, однако скорость ее измерений уменьшается на 15% на каждую дополнительную вершину, независимо от числа треков в ней. В организации измерений на SMP и FSD (вариант АИ) имеется существенная разница. Грубое измерение события на FSD требует почти таких же затрат времени и денег, как и его измерение на SMP, но данные с SMP после этого идут прямо на дальнейшую обработку с помощью обычных анализирующих программ; более того, при измерении на SMP выполняется так много проверок, что вероятность того, что данные с SMP окажутся ошибочными на стадии выполнения пространственного восстановления или кинематического обчета, весьма мала. Ценою, которой это окупается, является использование в процессе измерения вычислительной

машины. Может оказаться, что пять SMP, управляемых вычислительной машиной PDP-1*), более эффективны, чем пять просмотрово-измерительных столов для FSD и одна система FSD. Минимальная комбинация для системы SMP может состоять из трех SMP, соединенных с вычислительной машиной стоимостью около 230 000 долларов. Эта вычислительная машина могла бы использоваться для управления измерениями на SMP в течение некоторых смен и для физического анализа данных — в течение других смен. В различных лабораториях условия различны; например, имеются лаборатории, не загружающие полностью свои вычислительные машины, так что группа SMP могла бы производить измерения в то время, когда вычислительная машина все равно бы простаивала. Для небольших лабораторий, по-видимому, более выгодно иметь просмотрово-измерительные столы FSD и отсылать затем весь материал на измерительное устройство FSD, расположенное где-либо в другом месте. Не имея пока большого эксплуатационного опыта, трудно сказать, где провести линию между этими образцами измерительных устройств **). Много аргументов в пользу FSD и против SMP было приведено Хафом⁵⁴.

Далее мы переходим к еще более сложной проблеме сравнения систем для автоматического просмотра и измерений, которые пока даже еще не начали работать. Система PEPR (стоимость оборудования 400 000 долларов; требуется только эксплуатационный персонал плюс один оператор в смену), если она будет работать, как это рекламируется, окажется наиболее дешевой системой из всех приведенных в табл. V. Система FSD (вариант АПИ) использует несколько менее дорогое основное оборудование, но требует две или три смены на вычислительной машине IBM-7094. Стоимость работы на вычислительной машине в течение такого времени значительно различается в зависимости от типа машины, но в среднем для современных вычислительных машин составляет 500 000 долларов в год. Однако со времен вычислительных машин IBM-704 и IBM-709 стоимость расчетов на вычислительной машине сокращалась почти на 50% за год, и эта тенденция, по-видимому, сохранится. Следовательно, через несколько лет эта цифра в 500 000 долларов сократится до 200 000 или 100 000 долларов, и этот расход, сравнимый с затратами на покупку и фотообработку пленки для нашего гипотетического миллиона триад, не будет слишком обременительным. Но, с другой стороны, половину стоимости системы PEPR составляет малая вычислительная машина, которая тоже станет дешевле. Поэтому мы решили, что критерий стоимости не позволяет легко отдать предпочтение FSD или PEPR. Более того, по мере приобретения опыта работы с каждой из этих систем они будут быстро видоизменяться, так что АПИ системы в 1966 г. будут, вероятно, содержать лучшие элементы: большую управляющую вычислительную машину, чем имеет PEPR, и лучшую систему с бегущим лучом, чем имеющаяся сейчас у FSD.

4.9. «Фотографическая» память

Главным препятствием на пути массового анализа данных с пузырьковых камер был процесс измерений. Но с развитием автоматизации измерений количество информации возрастет, и, может быть, сейчас своевременно посмотреть, какие осложнения немедленно возникнут в результате возросшей производительности измерений на пленке. Уже сейчас видно, что устранимой проблемой является хранение данных и поиск нужных событий при повторном обращении к ним (как людьми, ищущими затерявшиеся рулоны магнитных лент, так и вычислительными машинами, пытающимися их прочесть). Рассмотрим, например, количество информации, которое должно быть накоплено в конце анализа каждого события. Выдачу программы PACKAGE можно сократить до 600 кодов на событие; тогда для системы, анализирующей миллион событий в год, эти данные займут 1/9 миллиона метров стандартной магнитной ленты (315 знаков на 1 см), что составит около 157 рулонов. Только для того, чтобы прочесть всю эту пленку, потребуется около 10 часов машинного времени. Хранение одной непосредственной выдачи систем PEPR или FSD потребует в два раза большей емкости. В добавлении к

*) SMP-программа (12 000 кодов) сейчас написана частично на языке FORTRAN, частично в командном коде вычислительной машины 709, поэтому для PDP-1 требуется перекодировка. Тем не менее для нашего примера мы выбрали PDP-1, так как эта вычислительная машина будет использоваться для управления контрольным оборудованием системы PEPR. Вопрос о применении малых вычислительных машин для систем SMP и PEPR рассмотрен Мансоном⁵³.

**) Опыт эксплуатации этих систем, накопленный на измерениях нескольких десятков тысяч событий, указывает, что в Беркли на каждом устройстве SMP за час измеряется около семи событий (без учета времени, затрачиваемого на просмотр пленки). В то же время каждое устройство FSD в Беркли обмеряет за час 120 событий, а каждый просмотровый стол FSD, на котором производятся грубые измерения, позволяет обмерить за смену от 100 до 150 событий. Однако эти цифры могут сильно меняться от лаборатории к лаборатории^{37, 40}. (Прим. перев.)

запасам входной и выходной информации программы PASCAGE имеется еще архивный список и краткая сводка данных, которые непрерывно обновляются и увеличиваются.

Системы записи на магнитную ленту в будущем, несомненно, будут улучшены, однако альтернативным решением проблемы накопления данных является фотографическая память^{55, 56}. Экспонируя точки на фотографической пластинке или пленке, возможно накопить гораздо больше данных в форме, которая быстро прочитывается вычислительной машиной. Например, если использовать устройство с катодно-лучевой трубкой и 35-мм пленкой, подобное описанному при изложении системы PEPR, то возможно достичь уменьшения длины ленты примерно в 600 раз по сравнению с эквивалентной магнитной лентой и сократить время считывания в 10 раз.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. «Instrumentation for High Energy Physics», Nucl. Instr. Methods **20**, 367 (1963).
2. Proc. Informal Meeting Track Data Processing, CERN, Geneva, 1962.
3. A. H. Rosenfeld, Nucl. Instr. Methods **20**, 422 (1963).
4. W. Miller, H. Fulbright, A Review of Data Analysis Systems for Nuclear and High Energy Physics in AEC Laboratories, Div. of Res. At. Energy Comm., Washington, 1962.
5. H. Bradner, Ann. Rev. Nucl. Sci. **10**, 109 (1960).
6. H. S. White, Lawrence Radiation Lab., Rept. UCRL-9475, Nov. 1960 (не опубликовано).
7. A. T. Thorndike, Data Reduction Computation, BNL Bubble Chamber Group Memo, F-3, Brookhaven Natl. Lab., 1958 (не опубликовано).
8. Proc. Informal Meeting on Track Data Processing, CERN, Geneva, 1962, стр. 5.
9. A. Moorhead, Programme for the Geometrical Reconstruction of Curved Tracks in a Bubble Chamber, CERN, Geneva, 1961, стр. 33.
10. I. W. Burren, I. Sparrow, The Geometrical Reconstruction of Bubble Chamber Tracks, Rutherford Lab. Rept. NIRL/R/14, 1963.
11. F. T. Solmitz, Helix Fit to Track Images, Ecole Polytechnique, Paris, 1960 (не опубликовано).
- 12*. Ю. В. Линник, Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений, М., Физматгиз, 1958 *).
13. R. Böck, GRIND Manual, DD/EXP/62/10, CERN, Geneva, 1962 (не опубликовано).
14. S. J. Penny, Alvarez Programmer Note P-8, Lawrence Radiation Lab., 1963 (не опубликовано).
- 15*. К. Деррик, Труды XII Международной конференции по физике высоких энергий, Дубна, 1964 (в печати).
- 16*. Н. Р. Бруггер, Р. Р. Миллер, Р. И. Плато, Труды XII Международной конференции по физике высоких энергий, Дубна, 1964 (в печати).
- 17*. Н. Д. Тафт, К. Мартин, Труды XII Международной конференции по физике высоких энергий, Дубна, 1964 (в печати).
18. M. Gell-Mann, A. H. Rosenfeld, Ann. Rev. Nucl. Sci. **7**, 407 (1957).
19. I. Kirz, Alvarez Memo 439, Lawrence Radiation Laboratory, 1963 (не опубликовано).
20. B. Maglic, L. Alvarez, A. H. Rosenfeld, M. L. Stevenson, Phys. Rev. Letts. **7**, 178 (1961).
21. I. M. Blatt, V. F. Weisskopf, Theoretical Nuclear Physics, Wiley, New York, 1952.
22. W. Chinowsky, G. Goldhaber, S. Goldhaber, W. Lee, T. O'Halloran, Phys. Rev. Letts. **9**, 330 (1962).
23. G. Goldhaber, Memo TG-7, Lawrence Radiation Lab., 1963 (не опубликовано).
24. I. P. Berge, F. T. Solmitz, H. D. Taft, Rev. Sci. Instr. **32**, 538 (1961).
25. M. Alston et al., Rev. Sci. Instr. **34**, 64 (1963).
26. Reference Manual for KICK, UCRL-9099, Lawrence Radiation Lab., 1961 (не опубликовано).
27. W. E. Humphrey, R. R. Ross, Phys. Rev. Letts. **127**, 1305 (1962).
28. M. B. Watson, M. Ferro-Luzzi, R. D. Tripp, UCRL-10542, Lawrence Radiation Lab., 1963 (будет опубликовано).
29. W. C. Davidson, ANL-5990 (обзор), Argonne Natl. Lab., 1959 (не опубликовано).
- 30*. Н. Н. Говорун и др., Труды XII Международной конференции по физике высоких энергий, Дубна (в печати).
- 31*. М. Гельфанд, Н. Цейтлин, ДАН СССР **137** (2), 295 (1961).
- 32*. М. И. Подгорецкий, Препринт ОИЯИ, P-1346, Дубна, 1963.

*) Литература, помеченная звездочкой, добавлена переводчиком. (Ред.)

33. А. А. Тяпкии, Proc. Ann. Intern. Conf. High Energy Phys., Rochester 10, 138 (1960).
- 34*. С. Соколов, И. Силин, Препринт ОИЯИ, Д-810, 1961.
35. А. Н. Rosenfeld, M. N. Alston, I. Munson, Alvarez Memo 429, Lawrence Radiation Lab., 1963 (не опубликовано).
36. L. W. Alvarez, P. Davey, R. Hulsizer, I. Snyder, A. I. Schwemin, R. Zane, UCRL-10109, Lawrence Radiation Lab., 1962 (не опубликовано).
- 37*. W. E. Humphrey, R. R. Ross, Труды XII Международной конференции по физике высоких энергий, Дубна, 1964 (в печати).
38. А. Н. Rosenfeld, H. D. Taft, Alvarez Memo 440, Lawrence Radiation Lab., 1963 (не опубликовано).
39. P. V. C. Hough, Progr. Rept., BNL FSD Analysis System, G-29, BСНР-03-О-Е, Brookhaven, National Lab., 1963 (не опубликовано).
- 40*. I. Goldschmidt-Clermont, Труды XII Международной конференции по физике высоких энергий, Дубна, 1964 (в печати).
41. R. Н. McCormick, R. Narasimhan, Proc. Informal Meeting on Track Data Processing, CERN, Geneva, 1962, стр. 401.
42. В. Н. Mayo, Bubble Chamber Scanning Programme, Syntax Tabbe for the Compilation Phase of the MAIN Programme, Digital Computer Lab., File No. 538, May 1963, Univ. of Illinois, Urbana.
43. R. Narasimhan, В. Н. Mayo, The Structure of a Programme for Scanning Bubble Chamber Negatives, Digital Computer Lab., File No. 507, February 1963, Univ. of Illinois, Urbana.
44. R. K. Rice, A preliminary Study of PAU Microlists in Bubble Chamber Photographs, Digital Computer Lab., File No. 506, February 1963, Univ. of Illinois, Urbana.
45. R. K. Rice, R. Narasimhan, Bubble Chamber Scanning Programme: 1) Label; 2) Search (Stage 1), Digital Computer Lab., File No. 542, June 1963, Univ. of Illinois, Urbana.
46. I. H. Stein, PAX, An IBM-7094 Programme to Simulate a General Purpose Pattern Recognition Computer, Digital Computer Lab., File No. 513, January 1963, Univ. of Illinois, Urbana.
47. R. A. Narasimhan, A Programming System for Scanning Digitized Bubble Chamber Negatives, Digital Computer Lab., Rept., No. 139, June 1963, Univ. of Illinois, Urbana.
48. R. B. Marr, I. R. Pasta, G. Rabinowitz, BNL, 6866 (AMD 312), Brookhaven National Lab., 1963 (не опубликовано).
49. C. R. Dickens, M. V. Downton, H. S. White, Software Development for FSD System, UCRL-10895, Lawrence Rad. Lab., June 10, 1963.
50. H. S. White, Roc. of Informal Meeting on Track Data Processing CERN, Geneva, 1962, стр. 33.
- 51*. I. Pless, L. Rosenson, P. Bastien, B. Wadsworth, T. Watts, R. Yamamoto, M. Alston, A. Rosenfeld, F. Solmitz, H. Taft, Труды XII Международной конференции по физике высоких энергий, Дубна, 1964 (в печати).
- 52*. H. D. Taft (частное сообщение).
53. I. H. Munson, Alvarez Memo (не опубликовано), 1963, стр. 453.
54. P. V. C. Hough, Comparison of Rapid Data Processing System G-32, BСНР-03-OF, Brookhaven Natl. Lab., 1963 (не опубликовано).
55. A proposal for a Trillion Bit Memory, International Business Machines, Yorktown Heights, New York, 1962.
56. I. A. Pless, A. Н. Rosenfeld, The Precision Encoding Memory (PEM) (MIT, PEPR engineering Note, Mass. Inst. of Technol. 1963) (не опубликовано).
57. I. Button-Shafer, A. Н. Rosenfeld, Alvarez Memo 240, Lawrence Radiation Laboratory, 1960 (не опубликовано).
58. R. I. Hulsizer, W. E. Humphrey, J. H. Munson, R. R. Ross, H. J. Schwemin, Rev. Sci. Instrum. 35 (9), 1134 (1964).