

681.142+539.126

## ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ \*)

*М. Кройц*

*Экспериментаторы, работающие в области физики элементарных частиц, уже давно рассматривают компьютеры как важную составную часть своей аппаратуры; теперь же и теоретики приходят к выводу, что заметный прогресс в некоторых областях физики может быть достигнут только с применением ЭВМ.*

Физики, работающие в области элементарных частиц, уже давно являются одними из основных потребителей машинного времени. Современные



Рис. 1. Дисплеи ЭВМ преобладают в интерьере передвижной части контрольной комнаты для E734, большого эксперимента по рассеянию нейтрино на синхротроне с переменным градиентом в Брукхейвене. (Фотография любезно предоставлена группой E734.)

сложные эксперименты порождают огромный объем необработанных данных, который требует нескольких часов счета для их приведения к форме, понятной человеку. Как видно на рис. 1, множество телевизионных экранов и дисплеев наполняют контрольную комнату современного детектора. Экспериментаторы, занимающиеся физикой высоких энергий, обязательно имеют помещение, в котором установлены сильно шумящие печатающие устрой-

\*) *Creutz M. High-energy Physics.— Phys. Today, 1983, v. 36, No. 5, pp. 35—42.— Перевод А. А. Быкова.*

Майкл Кройц — физик, работающий в Брукхейвенской Национальной лаборатории, Аптон, шт. Нью-Йорк, США.

ства и диски с магнитными лентами, вызывающие у пользователя образ компьютерной «дробилки».

С другой стороны, теоретики, изучающие элементарные частицы, придерживаются традиционно сложившихся совершенно иных взглядов. Любая задача, требующая для своего решения применения ЭВМ, рассматривается ими как слишком «приземленная» для возвышенного интеллекта. Теоретиков, осмелившихся сесть за терминал, окрестили «феноменологами».

Хотя экспериментаторы и по сей день остаются основными пользователями ЭВМ, в последние несколько лет обнаружилось скрытое проникновение вычислительной техники даже в те круги физиков, которые занимаются наиболее абстрактными проблемами. В некоторых случаях результаты выглядели весьма эффектно. Эта «революция» происходит главным образом потому, что компьютеры, говоря словами лозунга, становятся «другом пользователя». Прогресс в теории зависит от множества зачастую «безумных» идей, из которых только некоторые обретают права на дальнейшее существование. Теоретики лишь недавно поняли, что современные системы взаимосвязанных компьютеров позволяют изучать события, происходящие в любом интересующем их масштабе времени. Если экспериментаторы рассматривают компьютеры как важную часть своей аппаратуры, то теоретики сегодня знакомятся с ними как с новым инструментом, обладающим еще невыясненными возможностями.

Для того чтобы оказать помощь физикам, работающим в области элементарных частиц, будущие поколения суперкомпьютеров, как мы вскоре убедимся, должны будут обладать мощностью, на несколько порядков превосходящей мощность современных ЭВМ. Малогабаритные индивидуальные процессоры смогут взять на себя большинство текущих вычислений. С другой стороны, специализированные системы открывают волнующие перспективы для физики элементарных частиц, потребности которой мы рассматриваем в этой статье.

#### НУЖДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАТОРОВ

Экспериментальная физика элементарных частиц требует проведения численных расчетов на нескольких уровнях, высший из которых заключается в окончательном восстановлении событий по экспериментальным данным. Анализ одного соударения между сталкивающимися частицами, регистрируемого сложным набором детекторов, может требовать до  $10^7$  машинных операций, что занимает около 1 с. компьютерного времени при использовании мощных систем CDC-7600 или IBM-3081. Для медленных процессов вроде нейтринных экспериментов или экспериментов на электрон-позитронных коллайдерах типа PETRA или PEP такое время обработки не порождает серьезных проблем. Однако оно становится недопустимо большим, когда в эксперименте происходит несколько миллионов событий. Во многих экспериментах с фиксированной адронной мишенью, подобных проводимым в Фермилабе, или в экспериментах на накопительных кольцах с большой светимостью вроде ISR в ЦЕРНе или строящемся в Брукхейвене СВА, могут регистрироваться порядка десяти интересных событий в секунду. Для таких экспериментов анализ данных, накопленных за несколько месяцев работы, проводимый на системе с эквивалентной мощностью, равной мощности нескольких ЭВМ CDC-7600, может занять больше года. Соответствующие требования накладываются не только на время счета, в действительности одни лишь данные являются весьма объемистыми. В результате проведения эксперимента возникают необработанные данные объемом в несколько  $10^{12}$  байт, для хранения которых требуются тысячи магнитных лет.

Эти требования являются, до некоторой степени, следствием того, что экспериментаторы определяют как реальный предел вычислительных мощностей. Частота фундаментальных взаимодействий в адронных эксперимен-

тах, как правило, существенно выше, чем их количество, которое может быть записано для последующего анализа. Например, на ISR бывают рабочие циклы со скоростью соударений до 5 миллионов в секунду, а на СВА число соударений будет превышать 50 миллионов в секунду. Только после внимательного отбора интересующих нас классов событий эта скорость может быть снижена до выполнимых 10 Гц. Как правило, наиболее богатая новая физика проявлялась в редких событиях. Подходящим примером является недавнее обнаружение W-бозона в ЦЕРНе, основанное на выделении пяти определенных событий из  $10^9$  протон-антипротонных соударений. На рис. 2

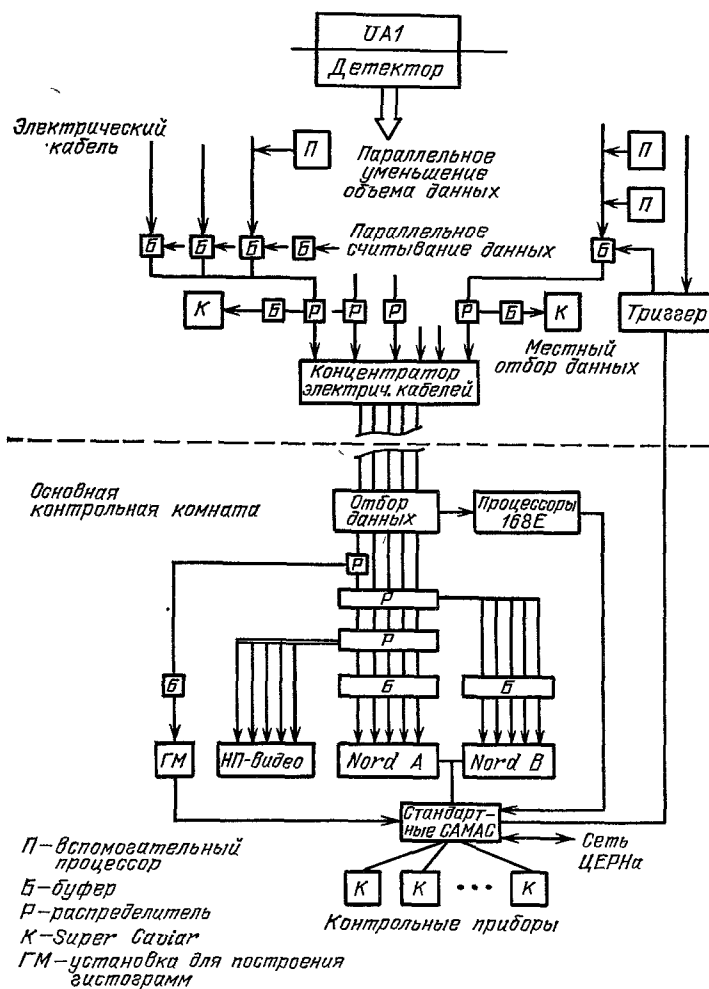


Рис. 2. Система распознавания данных на установке UA1, большом детекторе SPS-коллайдера в ЦЕРНе.

Несколько микрокомпьютеров «Caviar» и «Super Caviar» контролируют и управляют работой отдельных частей системы. ЭВМ Nord-100/500 образуют систему общего входного вычислительного обеспечения. Система распознавания данных содержит несколько процессоров 168E, «соперников» IBM-168. (Схема любезно предоставлена мне S. Cittolin, UA1-группа.)

представлена группа диаграмм, отражающих структуру системы распознавания данных, применяемой в этом эксперименте.

Предварительное и окончательное выделение событий само по себе представляет другой аспект вычислений, проводимых в физике элементарных частиц. Входной сигнал от различных триггерных счетчиков должен быть немедленно обработан, чтобы определить, нужно ли приводить в действие все оборудование и регистрировать событие. Принятие таких решений все в большей степени облегчается микропроцессорами, которые являются неотъемлемой частью экспериментального оборудования. Эти приборы могут быть либо набором электронных устройств, связываемых между собой самим экспериментатором (см. следующую статью Т. Нэша), либо производиться

промышленностью и соединяться с различными детекторами. Если имеется входной компьютер, он может быть также использован для решения других задач, например для предварительного анализа данных. В этой роли компьютер уменьшает окончательно записанный объем данных и допускает непрерывное управление работой системы. Так как компьютер стал частью его аппаратуры, физик вынужден действовать в роли программиста. Он обязан разработать программное и машинное обеспечение, необходимое для связи его с экспериментальной установкой так, чтобы средства связи были достаточно быстродействующими и позволяли бы выделить интересующее его событие из огромного потока данных. Экспериментальный прогресс, таким образом, связан с разработкой и объединением быстродействующей электроники в сложную совокупность детекторов.

Потребность экспериментаторов в проведении вычислений в действительности возникает гораздо раньше, чем происходит выполнение и анализ эксперимента. Прежде чем поместить детектор в систему, его надо сконструировать и определить полученные характеристики. Моделирование существующих или планируемых детекторов требует детального численного анализа. Влетающая частица имеет определенную вероятность попадания в данную камеру, некоторую вероятность рассеяния при прохождении через другие составные части детектора и т. д. В розыгрыше по Монте-Карло множество гипотетических частиц пускается на вход детектора, и их дальнейшее распространение прослеживается стохастически с использованием генератора псевдослучайных чисел. Розыгрыш по Монте-Карло на сегодня является единственным практическим методом, применяемым для калибровки сложных систем.

Для того чтобы создать детектор, полезно иметь некоторые предсказания о различных особенностях потенциально интересных событий. Это требование порождает новую область вычислений в физике элементарных частиц, лежащую между экспериментом и теорией. Генерация гипотетических событий, являющихся либо типичными, либо редкими и интересными, весьма ценна при определении конфигурации детектора, а также при сравнении окончательных экспериментальных результатов с теоретическими моделями. Метод Монте-Карло также используется для розыгрыша этого типа событий. Кварк-глюонная картина строения частиц предсказывает, что составные части падающих на мишень частиц могут сначала испытать жесткое рассеяние, а затем «одеться» в обычные адроны путем испускания мягких глюонов или рождения дополнительных кварк-антикварковых пар. Задавшись определенной моделью, мы используем стохастические методы для моделирования эволюции возникшего каскада.

Эти предсказания важны по двум причинам, которые выходят за рамки простого конструирования оборудования. Во-первых, мы можем проверить различные основополагающие предположения, вкладываемые в модель, и, возможно, таким образом понять фундаментальную динамику взаимодействий. Такой подход был центральным в анализе адронных струй. Во-вторых, мы получаем предсказания о сечениях рассеяния в неисследованной до сих пор кинематической области, которые, в свою очередь, дают полезную информацию о том, где искать интересующее нас явление. Например, из моделирования такого типа мы можем извлечь информацию о рождении в будущих экспериментах новых частиц, подобных тяжелым векторным бозонам, переносящим слабые взаимодействия.

#### ИНТЕРЕС СО СТОРОНЫ ТЕОРЕТИКОВ

Как мы уже упоминали, вычислительная техника ранее играла роль всего лишь фона в развитии теории элементарных частиц. Поколения теоретиков, известных под названием «феноменологов», использовали вычислительные схемы (которые поначалу основывались на теории Редже, а теперь

базируются на популярной кварк-партоновой картине адронов) и получали числовые результаты, пригодные для прямого сопоставления с измеряемыми сечениями рассеяния. Более церемонный теоретик не выходит за рамки вычислений интеграла, который он не может взять аналитически, или дифференциального уравнения, требующего численного решения. В этом заключаются традиционные формы использования компьютеров теоретиками, и если рассматриваемая задача не совпадает с этими формами, то часто численное решение такой проблемы отклоняется.

Около 15 лет назад теоретики начали использовать компьютеры иначе. Теоретическое вычисление сложных фейнмановских диаграмм часто сопровождается громоздкой работой с матрицами Дирака. Такие прямые, но утомительные выкладки могут, в принципе, быть выполнены на ЭВМ. Для этого были разработаны программы алгебраических вычислений, например, REDUCE, SCHOONSCHIP, MACSYMA и более поздняя SMP. Эти программы представляют собой совершенно не традиционное использование ЭВМ, исходно разрабатываемых для обработки данных. Вместо чисел они оперируют со строками букв и дают набор правил для алгебраических подстановок. Программа даже может содержать таблицы общих интегралов, что позволяет избежать нудной тяжелой работы в процессе вычислений. Таким образом, становятся возможными вычисления все возрастающей сложности, и в действительности названные программы являются важным инструментом для проведения вычислений в высших порядках теории возмущений в квантовой электродинамике или неабелевых калибровочных теориях.

Только за последние несколько лет вторая форма использования компьютеров получила широкое распространение, что проявляется в увеличении времени, необходимого теоретикам для выполнения их расчетов. Розыгрыш по Монте-Карло стал мощным методом изучения решений квантово-полевых теорий со взаимодействием. Эти вычисления проводятся, в основном, для калибровочной теории сильных взаимодействий (основанной на картине кварков, обменивающихся глюонами в калибровочной теории Янга — Миллса). Основной результат заключается в том, что мы теперь имеем неопровержимые численные свидетельства того, что данная теория одновременно приводит к явлению удержания кварков (т. е. <sup>к</sup>одиночный изолированный кварк имеет бесконечно большую энергию) и асимптотической свободе (взаимодействие между кварками ослабевает, когда они сближаются).

Этот способ розыгрыша по Монте-Карло был заимствован непосредственно из физики твердого тела. В самом деле, применение его к физике элементарных частиц подчеркивает глубокую математическую связь между ними. Это наиболее ярко проявляется в формулировке квантовой механики на языке интегралов по траекториям, развитой Фейнманом. С точки зрения математики интегралы по траекториям эквивалентны функции распределения в статистической физике; т. е. квантовая теория поля в четырехмерном пространстве-времени эквивалентна классической статистической механике гипотетической термодинамической системы с четырьмя пространственными координатами. (В такой аналогии константа связи в квантовой теории поля играет роль обратной температуры.)

Теоретики, работающие в области конденсированных сред, долгое время использовали метод Монте-Карло для изучения классических статистических систем с произвольно выбранным гамильтонианом. Память ЭВМ содержала численные значения степеней свободы — например, направления спинов в модели магнетика. Генератор случайных чисел, взвешенных с болцмановским весом фактором, затем вызывал изменения этих значений, имитируя термодинамическое развитие системы и флуктуации в ней. Выделяя различные особенности динамики, физики достигли понимания таких явлений, как фазовые переходы.

Теоретики, работающие в области физики элементарных частиц, используют метод Монте-Карло как численный метод оценки фейнмановских интегра-

лов по траекториям. Таким способом они могут изучать свои излюбленные полевые теории. Прежде чем приняться за достижение этой цели, теоретики должны понять осложнения, связанные с ультрафиолетовыми расходимостями, непременно возникающими в теории поля. Если интеграл математически плохо определен, то попытка вычислить его на ЭВМ заранее обречена на неудачу! Конечно, бесконечности — старый объект в физике элементарных частиц, и для их устранения развито множество схем регуляризации и перенормировок. Однако большинство из этих процедур базируется на теории возмущений — основе замечательного успеха квантовой электродинамики. Мы начинаем вычисление процесса рассеяния с фейнмановских диаграмм, и затем, обнаруживая бесконечности, обрезаем соответствующие интегралы. Численные расчеты, с другой стороны, *независимы от теории возмущений*. Следовательно, нельзя непосредственно применять большинство традиционных регуляризационных процедур типа регуляризации, впервые использованной Вольфгангом Паули и Феликсом Вилларсом, или размерной регуляризации. Поэтому все численные расчеты на сегодня используют «решеточное обрезание», введенное Кеннетом Вильсоном — сотрудником Корнеллского университета. В этой схеме все интегралы по непрерывному пространству-времени заменяются суммами по дискретным пространственно-временным точкам решетки.

Использование пространственно-временной решетки как регуляризационной процедуры имеет следующие преимущества:

— Она обеспечивает обрезание ультрафиолетовых расходимостей. Непрерывное пространство-время заменяется набором точек, разделенных минимальным отрезком  $a$ , что, в свою очередь, порождает максимальное значение для импульса и энергии порядка  $\hbar/a$ . Мировая линия кварков аппроксимируется последовательностью шагов между ближайшими соседними участками решетки, как показано на рис. 3. Конечно же, это искусственный математический прием, и в конце всех вычислений мы должны перейти к непрерывному пределу, устремив расстояние между узлами решетки к нулю.

— Численная обработка решеточных переменных производится непосредственно. Поля становятся просто массивами, записанными в памяти машины. В вычислениях на решетке аналогии со статистической физикой становятся еще более яркими. Мы работаем с четырехмерным кристаллом, и калибровочные переменные имеют внешнее сходство со спинами в модели магнетика.

Нетеорвозмущенческая природа метода Монте-Карло на самом деле существенна для проблемы удержания кварков. Из ренормгруппового подхода ясно, что удерживающая часть межкваркового потенциала не раскладывается в ряд по степеням константы связи. Этот факт отражает наличие существенной особенности, исчезающей быстрее, чем любая степень, при стремлении константы связи к нулю. В этом проявляется нетеорвозмущенческая природа конфайнмента, что делает решеточную регуляризацию важной самой по себе, безотносительно к выполнению численных расчетов.

На этом пути достигнуты важные результаты. Мы не только имеем неопровержимое свидетельство удержания кварков в неабелевой калибро-

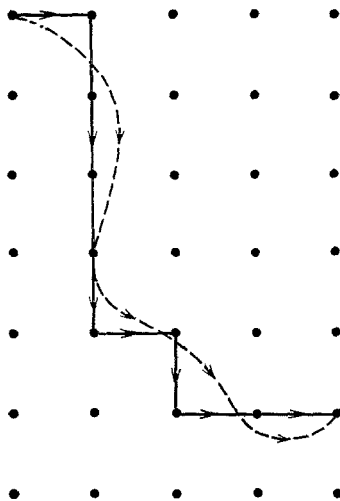


Рис. 3. В калибровочной теории на решетке мировые линии кварков аппроксимируются последовательностью шагов между соседними участками решетки.

Затем результаты экстраполируются к непрерывному пределу, когда размер ячейки стремится к нулю.

вочной теории сильных взаимодействий, но также можем вычислять некоторые наблюдаемые величины, характеризующие решения теории. Одной из таких величин является относительная сила потенциала взаимодействия на больших и на малых расстояниях. Полученные результаты находятся в хорошем согласии со значениями, найденными из феноменологического описания адронной спектроскопии и процессов неупругого рассеяния. Дальнейшие вычисления свидетельствуют о богатом спектре связанных состояний глюонов (глюболов) с массами в области 1—2 ГэВ. По-видимому, должен существовать фазовый переход в область деконфайнмента при физической температуре около 200 МэВ, вероятно, достижимой в высокоэнергетических соударениях тяжелых ионов. Все это является нетеоретическими результатами, которые всего несколько лет назад считались безнадежно трудными для того, чтобы их можно было получить хотя бы на качественном уровне.

Наиболее надежные результаты вычислений по Монте-Карло относятся к квантовой динамике глюонных полей, где кварки рассматриваются лишь как статические источники. Вычисления, включающие полную релятивистскую динамику кварков, представляют собой весьма активную область исследований; в самом деле, на этом пути существует несколько препятствий, которые необходимо преодолеть. До сих пор не ясно, связаны ли трудности включения в эту схему кварков главным образом с неадекватной численной обработкой, или с нашими упущениями в теоретической формулировке проблемы. Известно, что при наличии достаточных компьютерных мощностей можно работать с квантованными кварковыми полями. Однако такие вычисления требуют проведения повторных оценок определителей чрезвычайно больших матриц. Некоторые решительные теоретики принимают за такой лобовой подход. Для того чтобы выполнить вычисления, они придумывают различные уловки, использующие тот факт, что соответствующие матрицы содержат большое число нулевых элементов, и на любом этапе вычислений изменяются только несколько оставшихся элементов. Результаты этих усилий с нетерпением ждут!

Существует интересное упрощение задачи, позволяющее получить несколько важных результатов по адронной спектроскопии. Это «валентное» или «подавленное» приближение, которое заключается во введении на решетку небольшого числа распространяющихся и взаимодействующих с калибровочными полями динамических кварков. При этом пренебрегают вероятностью рождения других кварк-антикварковых пар из вакуума. Изначально вводятся только кварки, окружающие данный кварк. Эти вычисления приводят к значениям адронных масс, качественно совпадающим с экспериментально наблюдаемыми массами. В частности получается, что пион заметно легче всех остальных адронов. Этот результат, теоретически связанный с проявлением киральной симметрии, был заведомо недостижим в простых кварковых моделях. Внимательное изучение такого приближения выявило некоторые его недостатки — нуклоны, например, получаются на несколько сот МэВ тяжелее, чем должны быть. Тем не менее замечательно, что такое грубое приближение хорошо работает. Что касается недостатков, то может быть в этом и нет ничего загадочного: в самом деле, почему простая модель «валентных» кварков должна работать всюду?

## ПЕРСПЕКТИВЫ

Вычислительная техника совершенствуется с поразительной быстротой. Какие соображения можно высказать о влиянии вычислительной техники на физику элементарных частиц? Несомненно, что мы еще даже не мечтаем о наиболее важных применениях компьютеров в будущем. Десять лет назад никто не представлял себе возможностей метода Монте-Карло примени-

тельно к теории поля. Конечно, в дополнение к рассуждениям мы должны непрерывно строить определенные планы на будущее о том, как наши вычисления совершенствуют существующую технологию, и о том, какие еще более высокие требования к процессу обработки данных обещают поставить перед нами будущие ускорители.

Существует несколько направлений, по которым физики, работающие в области элементарных частиц, могут встретиться с необходимостью выполнения численных расчетов. Существенное снижение стоимости машинного обеспечения сделает довольно хорошую вычислительную машину доступной одному ученому. Микрокомпьютеры теперь обеспечивают значительную часть возможностей, предоставляемых вычислительными комплексами средних размеров, устраняя при этом неприятности, связанные с непредсказуемыми очередями и системными сбоями. Индивидуальные компьютеры будут, вероятно, действовать как весьма совершенные калькуляторы, выполняя многие утомительные численные вклады как для теоретиков, так и для экспериментаторов. Однако, когда физики будут знать больше, чем смогут сделать, они неизбежно встретятся с вычислениями, слишком громоздкими, чтобы имело смысл проводить их на индивидуальных ЭВМ.

Несколько увеличивающиеся в размерах, достаточно хорошие средние системы, такие как VAX11-780, сейчас по цене вполне доступны небольшой группе физиков. Что касается индивидуальных компьютеров, то главное преимущество группы, имеющей свою собственную ЭВМ, заключается в повышенной реализуемости программ и в отсутствии бюрократического тумана, окутывающего большие вычислительные центры. Если программа требует длительного счета, уходя вечером домой, мы оставляем компьютер включенным. В действительности многие из длительных расчетов по Монте-Карло в калибровочных теориях на решетке были выполнены в свободные часы на VAX'ах. И хотя эти же вычисления могли бы быть проведены в десятки раз быстрее на CDC-7600, стоимость таких расчетов стала бы недопустимо высокой. Мы замечаем, что большие вычислительные комплексы, представляющие выигрыш в скорости счета и объеме памяти над малыми машинами в 10 раз, тем не менее обладают для физика пониженной ценностью. Однако гибкость обеспечит выживание компьютерного центра, который будет преимущественно работать как узел широкой сети, предназначенной для программного обеспечения и информационного управления. Множество местных компьютеров, на которых проводятся исследования, будут использовать эту сеть для получения доступа в наиболее поздние издания общих программных библиотек. Для основных вычислений, однако, емкость памяти больших компьютеров необходимо увеличить на несколько порядков. Преимущественно такие ЭВМ будут использоваться для сложного моделирования или других вычислений, требующих больших машинных времен. И хотя электроника сама по себе станет более быстродействующей, основные надежды на требуемое огромное увеличение мощности компьютеров возлагаются на развитие систем с большим числом параллельно работающих процессоров. Сочетание многих умело расположенных взаимосвязанных микропроцессоров является нетривиальным вопросом компьютерной структуры и программного обеспечения и представляет собой в настоящее время предмет активных исследований в кибернетике.

Для проблем, требующих громоздких вычислительных операций с малым объемом входных и выходных данных, многопроцессорная система может обеспечить низкую стоимость предварительного решения задачи. Эти машины используют эффективную «пересылку операций по трубопроводному принципу», что позволяет сохранять различные обрабатываемые величины долгое время в доступной форме. Они соединяются с обычными большими вычислительными комплексами, через которые передается вся входная и выходная информация. Хотя некоторые из этих машин уже эксплуатируются теоретиками, главным образом в Корнеллском университете, программное обеспе-



чение, которое позволило бы сделать их простыми в эксплуатации, еще только разрабатывается.

Резкое падение стоимости электронного оборудования откроет другой путь к удешевлению компьютерных систем. За несколько тысяч долларов, вносимых по частям, можно будет приобрести систему, способную «конкурировать» с процессором стандартного вычислительного комплекса (см. статью Т. Нэша), т. е. заданный набор машинных операций «соперник» выполнит с тем же самым результатом, бит за битом, как и ЭВМ, которую он имитирует, причем она сделала бы это гораздо медленнее. Такая система удобна, если мы хотим применить один и тот же алгоритм к большому числу «событий». Мы сначала используем оптимизированный компьютер на базе соответствующего вычислительного комплекса для создания эффективного машинного кода, а затем передаем задачу набору нескольких «соперников», каждый из которых работает над отдельным событием. В экспериментальных работах в качестве события могут выступать необработанные данные от приборов, а в теории это может быть заданное значение константы связи. В некоторых современных экспериментах эффективно используют такие системы «соперников».

Когда электроника будет дешевле и совершенней, станет возможным создавать машины, специально предназначенные для отдельных задач. Не требуя универсальности, мы можем создать ЭВМ, которая была бы проще и быстрее действенной, чем большие общецелевые машины. Эти системы могут быть связаны с обычными компьютерами, которые, таким образом, приобретают дополнительную часть, предназначенную для решения специальных задач. Например, теоретики из Колумбийского университета построили умножитель для SU(3)-матриц. Будучи соединенной с обычным малым компьютером, эта система работает со скоростями много большими, чем машины для Монте-Карло вычислений. Доводя идею специализированных процессоров до крайней формы, мы приходим к развиваемым уже сегодня концепциям «компьютера из песчинок», т. е. компьютера составляющего большие связанные циклические задачи, единственное назначение которых — решать заданный тип проблем.

Какие из возможных направлений являются наиболее перспективными для физики элементарных частиц? Ответ, конечно же, не только неизвестен, но наверняка не связан с каким-то одним из них. Существуют, однако, очевидные различия между потребностями теории и эксперимента. Уменьшая скорость поступления данных об экспериментальном событии, компьютеры встречаются с дополнительными условиями из-за того, что детекторы могут возбуждаться сложным образом. Это накладывает на вычислительную машину высокие входные и выходные требования. Кроме того, если несколько миллионов событий должны быть введены в компьютер и связаны друг с другом, то вообще говоря, эти требования приводят к трудности или невозможности эффективного использования структур, включающих хорошо развитый векторный параллелизм. В частности неясно, что могут дать новые поколения суперкомпьютеров для обработки информации, требующей многочисленных действий и потоков данных. Поэтому экспериментаторы придают особое значение «не развитому» пока подходу, используемому многие независимые компьютеры типа «соперник». По тем же причинам входные и выходные ограничения снижают привлекательность применения в этой области сложных многопроцессорных систем. Однако экспериментаторы более оптимистично смотрят на возможности, предоставляемые полностью параллельными суперкомпьютерами, вроде суперкомпьютера в университете Нью-Йорка и НЕР из «Denelcor».

Интересы же теоретиков, с другой стороны, легко удовлетворяются многопроцессорными системами. Как и в различных моделях классических и статистических систем, развитие любой определенной степени свободы в большом объеме зависит непосредственно лишь от ее значений в ближай-

ших точках. Это означает, что несколько процессоров могут одновременно выполнять одинаковые вычисления для различных частей системы. Группа теоретиков Эдинбургского университета выполнила весьма плодотворные вычисления на решетке при помощи «Процессора с распределенными массивами», системы, содержащей 4096 связанных друг с другом микропроцессоров (см. ниже, статью Дж. Хирша и Д. Скалапино). К сожалению, подобно ускорителям частиц, структурные суперкомпьютеры с неизбежностью будут иметь приоритетный доступ. Поэтому их пригодность для проведения нерегулярных расчетов снижается, существенно ограничивая применимость таких машин для вычислений, которые не могут быть выполнены за разумное время на индивидуальных ЭВМ. Если в этой области не будет достигнут существенный прогресс, то Монте-Карло вычисления с динамическими кварками по необходимости будут выполняться на таких машинах. Для других целей, однако, важность больших комплексов понизится. Новое поколение малых ЭВМ возьмет на себя большую часть утомительных теоретических вычислений.

Благодаря более высоким допустимым нагрузкам и низкой стоимости вычислительных работ, многопроцессорные системы продолжают дразнить теоретиков ложными надеждами. Интересно проследить за тем, как теоретики набираются опыта работы с этими системами и как продолжает развиваться программное обеспечение. Несколько теоретических вычислений было выполнено на «соперниках», разработанных экспериментальными группами. В связи с этими попытками можно сделать интересные наблюдения об энтузиазме и психологических изменениях, испытываемых теоретиками, когда они получают возможность проводить большие вычислительные работы. Это стимулирует размышления над проблемами вычислений в направлениях, которые не будут рассматриваться по обычным каналам.

Специализированные ЭВМ для вычислений в теории элементарных частиц разрабатываются в Институте теоретической физики Калифорнийского университета в Санта-Барбара и теоретической группой Колумбийского университета. Некоторые более общецелевые многопроцессорные системы разрабатываются объединенной группой теоретиков, работающих в области физики элементарных частиц, и специалистов по ЭВМ в Калтехе. Потенциальные возможности таких систем огромны, однако мы сталкиваемся с опасностью, что пока эти машины будут созданы, интересы теории изменятся. Переменная позиция теоретиков может быть частично скомпенсирована гибкостью структуры машин. Новая технология снижает время разработки систем, и пионерские работы, проводимые в маленьких лабораториях, разовьются в широкое использование нового программного и машинного обеспечения.

Значение численных расчетов в теории элементарных частиц быстро изменяется, так что будущие направления остаются совершенно неопределенными.

Большинство результатов до сих пор были получены прямым и трудоемким образом на обычных базовых комплексах ЭВМ. Быстрое развитие технологии гарантирует, что в будущем значение численных методов в теории еще более возрастет и за несколько лет компьютеры смогут стать столь же важным инструментом теоретиков, каковым они сегодня являются для экспериментаторов.

В качестве примера непредсказуемых возможностей, открываемых большими компьютерными мощностями, мы можем с удивлением наблюдать, как простые манипуляции со строками битов способны оказать существенное влияние на наши исследования элементарных составляющих материи.

## СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ \*)

*Т. Нэш*

В ближайшем будущем новые эксперименты с интенсивными пучками частиц, рассеиваемых на фиксированной мишени, а также эксперименты со встречными пучками потребуют при анализе данных столь широкого использования компьютеров, что систем, имеющихся в торговой сети, окажется недостаточно для этих целей. Такое положение дел, установившееся некоторое время назад, привело к ряду попыток производства мощных специализированных процессоров. Все возрастающий широко распространенный интерес к этой теме отражается в увеличении числа рабочих совещаний и конференций, посвященных проблеме создания специализированных процессоров: ЦЕРН (май 1981), Падуя (Италия, март 1983 г.), Брукхейвен (май 1983 г.), Фермилаб (февраль 1983 г.), Мехико (январь 1984 г.). Интенсивные разработки ведутся в таких лабораториях, как СЛАК, «Невис» — Колумбийский университет, ЦЕРН и СИН в Швейцарии. В Фермилабе образована пользующаяся сильной поддержкой «Программа перспективных разработок и внедрения компьютеров», в рамках которой сосредоточены усилия по созданию специализированных вычислительных систем и осуществляется активная взаимосвязь суперкомпьютерных исследований, проводимых в университетских лабораториях и в промышленности.

Повышение нагрузок на компьютеры, возникающее при анализе экспериментальных результатов, обусловлено факторами, позволяющими изучать редкие сложные события в присутствии большого фона. Среди них высокие энергии и светимости, достигаемые на ускорителях, большой телесный угол и быстродействующая счетная электроника современных детекторов. Самым важным фактором является интерес физиков к сложным состояниям, возникающим при распаде массивных фундаментальных частиц, таких как тяжелые кварки и промежуточные векторные бозоны. Машинное время, требуемое для восстановления событий, резко возрастает с усложнением эксперимента, увеличением потока данных и числа обрабатываемых событий.

Специализированные системы, созданные на сегодняшний день в связи с возрастающими нагрузками на ЭВМ, возникающими при проведении современного эксперимента, являются весьма важными. В качестве примера требований, предъявляемых к большому современному эксперименту (хотя и меньшему, чем многие из запланированных на ближайшие годы), я рассмотрю некоторые приблизительные характеристики объема данных и скорости вычислений для одного проводимого в Фермилабе опыта.

В течение каждого впрыскивания пучка, длящегося 1 с и повторяющегося с интервалом в 10 с, происходит  $10^6$ — $10^7$  различных взаимодействий между частицами пучка и мишени. Таким образом, за 750 часов записи данных происходит около  $10^{12}$  взаимодействий, из которых триггеры выбирают свыше  $20 \cdot 10^6$  событий. Около полутора тысяч пронумерованных слов на каждое из этих событий записываются на одну из тысячи магнитных лент с высокой плотностью записи информации (6250 байт на дюйм). В типичном современном эксперименте используется многоуровневая схема отбора событий. Служащая для этого система состоит из больших блоков взаимосвязанных модулей, каждый из которых выполняет заданные функции параллельно со множеством других модулей. Электроника, используемая при этом, как правило, определяется промышленными стандартами — такими,

\*) Nash T. Specialized Computers for High-energy Experiments.— Phys. Today, 1983, v. 36, No. 5, pp. 36—37.— Перевод А. А. Быкова.

Томас Нэш — сотрудник Лаборатории им. Ферми, США.

как NIM или SAMAC, что обеспечивает совместное включение различных приборов. На первом уровне отбора событий обычно используют NIM-быстродействующую логику, выделяющую в течении 150 нс около 5 000 взаимодействий, происходящих за одно впрыскивание пучка, которые должны быть обработаны и временно накоплены. На этом уровне использовались десять блоков промышленных NIM-модулей, выполнявших операции простого совпадения, линейного суммирования и избирательный цикл. Тридцать установок SAMAC-электроники обрабатывали тысячи каналов, по которым поступали данные от фотоумножителей и проволочных камер. Модульный управляемый потоком данных триггерный процессор, описываемый ниже, действует как самый высокоуровневый триггер и выполняет тщательно разработанный набор операций по восстановлению части данных. Этот же процессор отбирает порядка 100 событий, которые должны быть записаны на магнитную ленту входным микрокомпьютером с целью дальнейшей обработки.

Окончательное преобразование записанного набора данных в физические параметры (углы, импульсы треков и т. д.) осуществляется в Фермилабе в трех кибернетических центрах по контролю за данными при помощи 175 компьютеров, а также IBM-3033 в Оттаве, шесть созданными в SLAC 168E «соперниками» (описываемыми ниже) в университете Торонто и тремя VAX-780 в U. S. Santa Barbara в университете Колорадо и Carleton University в Оттаве. В территориальной разбросанности компьютеров, производящих обработку данных, отражается описываемая здесь проблема.

Количество эквивалентных компьютерных операций с числами, представленными в форме с плавающей запятой, в этом примере головокружительно велико — требуется провести свыше  $10^{13}$  действий для окончательного восстановления протекающих процессов взаимодействия частиц. Сюда следует добавить вычисления, проводимые высокоуровневым триггерным процессором для миллиардов событий, что составляет  $3 \cdot 10^{14}$  операций, выполняемых еще до начала проведения окончательных расчетов.

Одним из первых и наиболее важных специализированных процессоров, предназначенных для применения в физике высоких энергий, явился разработанный в SLAC и введенный в строй в середине 1970 г. компьютер, первоначально предназначенный для восстановления данных, поступающих от SLAC-ЛЭСС-спектрометра. Эта система, известная под названием 168E, создана для «соперничества» с комплексом самой быстродействующей, самой мощной и широко распространенной ЭВМ IBM-370-168. «Соперник» обладает тем преимуществом, что может использовать IBM-370-168 со всеми присущими ей особенностями для отладки фортрановских программ, которые затем применяются на 168E для обработки большого объема данных с быстродействием, составляющим 2/3 от быстродействия IBM-370-168. При этом стоимость вычислительных работ снижается в десятки раз. ЭВМ 168E, например, использует меньшие по сравнению с базовой ЭВМ арифметические единицы, применяемые для микропрограммирования вычислительного комплекса «соперника». Они состоят из отдельных микропроцессоров и малогабаритных интегрирующих цепочек; отдельные микропроцессоры работают параллельно на маленьких участках длинного слова, каждый в отведенной ему области.

Благодаря высокой экономической эффективности и простоте в отладке программ, ЭВМ 168E получила статус универсальной рабочей вычислительной системы для экспериментов в области физики высоких энергий в SLAC, ЦЕРНе, Фермилабе и т. д. Популярность «соперника» привела к объединению усилий SLAC ~ ЦЕРН по разработке ЭВМ 3081E, новой и более мощной системы, основанной на комплексе IBM-3081.

Некоторые ЭВМ 168E были также использованы на входах высокоуровневых триггеров. Это оказалось возможным благодаря малости различий между входной высокоуровневой триггерной обработкой данных и про-

цессами восстановления событий. После того как скорость поступления данных существенно снижена, носитель записываемой на магнитную ленту информации можно поместить за процессором любого типа.

M7-процессор, впервые примененный в комплексе, предназначенном для восстановления треков, и являющийся его важнейшей составной частью, был создан в Фермилабе в 1977 г. Задуманная сначала как триггерный процессор, эта система, подобно ЭВМ 168E, вышла за отведенные ей рамки и продемонстрировала свою разностороннюю применимость на примере использования ее в процессах окончательного восстановления событий. ЭВМ M7 является устройством программного накопления и обладает особенностями компьютеров общего назначения. Структура и комплекс процессора M7 ориентированы на вычисления, характерные для задач восстановления треков. В единичном машинном цикле, длящемся 110 нс, ЭВМ M7 может выполнять действия вида  $E = A_i \cdot C \pm B_j \cdot P$  для любой последовательности переменных  $A_i$  и  $B_j$  с константами  $C$  и  $P$ ; память, состоящая из четырех «хранилищ», содержит в себе операнды, используемые при выполнении указанных действий.

Применение нового типа компьютерной структуры, т. е. внутренней операционной структуры ЭВМ, позволяет надеяться на достижение огромных вычислительных мощностей. Традиционная von Neumann-структура заключается в выполнении действий в порядке, определяемом записанной программой. Каждое операционное действие состоит в извлечении данных и занесении результата в регистр или память перед началом следующего действия. Новую же многообещающую структуру можно охарактеризовать как модульную и управляемую потоком данных: большое число модулей, работающих параллельно, обрабатывают информацию и вообще результаты операций, проводимых в других модулях, когда все требуемые для этого данные доступны; их входные результаты в свою очередь становятся доступными для других модулей. Каждый модуль ожидает поступления только тех данных, которые необходимы для его работы, — это позволяет минимизировать время вычислений. Процесс контролируется системой «Готовность уровней», проводимых в нем вычислений. Первый процессор такого типа был создан в Фермилабе в 1978 г. и назван ECL-SAMAC «Trigger Processor System». Эта система используется в нескольких экспериментах, один из которых в качестве примера описывается в этой статье. Некоторые модули такого комплекса уже поступили в торговую сеть.

Программирование этих процессоров осуществляется путем соединения входов и выходов модулей кабелями и передающими линиями. Намного более перспективной по сравнению с быстросействующей логикой является способность таких систем оперировать многобитовыми словами, находя треки, калибруя силу импульсов, вычисляя сложные функции. Единичное действие модуля ECL-SAMAC выполняется приблизительно за 50 нс. Эта система действует в высокоскоростном режиме, управляемом потоком данных, однако системные алгоритмы могут включать выполнение гнездовых циклов, условных отношений и подпрограмм, т. е. операций, обычно связанных с обработкой информации на серийных компьютерах.

Предполагается, что можно достигнуть заметного повышения экономической эффективности по сравнению с компьютерами обычного типа при использовании таких систем для проведения специализированных вычислений в ранее описанных экспериментах. ECL-SAMAC-процессор с полной стоимостью около 100 тыс. долларов выполняет единичный алгоритм за 7 мкс, на что у компьютера, стоящего 1,5 млн. долларов, уходит порядка 40 мс. Главным недостатком рассматриваемых систем является трудность их программирования и изменения операций, выполняемых такими процессорами.

Длительные разработки, проводимые в Колумбийском университете — («Nevis Laboratory»), привели к созданию базовой системы, управляемой

потоком данных. Основанные на систематическом, последовательном подходе, эти разработки объединяют в себе последние достижения в области ликвидации трудностей программирования, присущих модульным процессорам, управляемым потоком данных. Компьютер, принадлежащий к этому семейству, уже используется в Фермилабе; разработан план использования мощных процессоров в экспериментах, намеченных на ближайшее будущее в Брукхейвенской лаборатории и в Фермилабе. Замысел состоит в том, чтобы получить возможность восстанавливать современный многочастичный эксперимент за время, не превышающее 10 микросекунд. Это было бы важным достижением!

Как я уже упоминал, исследования в этой области в будущем будут проводиться еще шире. В рамках «Программы перспективных разработок и внедрения компьютеров» в Фермилабе в настоящее время изучаются подходы, сочетающие в себе простые в обращении 16- и 32-битовые микропроцессоры, программируемые на ФОРТРАНе, с возможностями, предоставляемыми новыми операционными структурами и специализированными комплексами.

Описанные нами специализированные компьютеры могут иметь важное применение для решения проблем, возникающих в других областях человеческой деятельности и требующих проведения больших численных расчетов. Неоднократно в прошлом разработки компьютерной и счетной электроники диктовались нуждами ядерной физики и физики элементарных частиц; мысль об их проведении возникла именно у физиков. После долгих колебаний стало очевидно, что экспериментаторы вновь вынуждены заняться этим делом, и мы надеемся, что в конечном счете от этого выиграют и физика и общество!