681 142+53

МАШИННАЯ ГРАФИКА. ДИСПЛЕЙ *)

Дж. Майкл

Один рисунок может стоить тысячи слов. Физики осваивают графические возможности вычислительных машин для постановки и решения задач.

Сущность машинной графики определяется по-разному. Однако правильнее всего относиться к ней как к эффективному (возможно даже, как к самому эффективному) средству обмена информацией между машиной и человеком. В данной статье мы рассмотрим применение машинной графики в физике: современную технику, ее сильные и слабые стороны.

Подбирая примеры из физики, я намеревался руководствоваться мнением самих физиков. Поэтому я обратился к ним, но их мнения (чего, по-видимому, и следовало ожидать) оказались мало похожими одно на другое. Мне кажется, это, по крайней мере отчасти, произошло из-за их приверженности к слишком старомодному определению физики как науки. В наше время к ней больше всего подходит определение, данное Р. Фейнманом: «Физика — это то, чем физик занимается поздно ночью». Я предоставляю самому читателю решать, имеют или нет приведенные здесь примеры какое-нибудь отношение к физике. Во всяком случае, возможности машинной графики они иллюстрируют.

МАТЕРИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ **)

Мы рассмотрим только ту материальную часть, которая имеет отношение либо к устройствам ввода, либо к устройствам вывода. Устройство вывода предназначается для построения графиков в соответствии с той информацией, которая закладывается в машину. Устройство ввода имеет почти обратное назначение: заданный рисунок оно должно преобразовать в числа, над которыми машина может производить действия. Обсуждение устройства ввода лучше всего отложить до того момента, когда мы подойдем к проблеме опознавания.

Графопостроители

Одним из элементов вывода может быть самопишущее перо — графопостроитель. Графопостроитель обычно работает в дискретном режиме и применяется в вычислительных центрах чаще всего. С его помощью можно рисовать только самые простые линии: ($\pm X$), ($\pm Y$) и ($|X| = |Y|$); линии же с иным наклоном, отличным от 0, ± 90 и $\pm 45°$, приходится строить, комбинируя дозволенные элементы. Обычный графопостроитель может перемещаться со скоростью 300 шагов в секунду или с эффективной скоростью 3 дюйма в секунду, если один шаг составляет 0,01 дюйма ***). Некоторые модели способны развивать скорость 2000 ша-

---

*) George A. Michael, Computer Display Systems, Phys. Today **23** (7), 30 (1970). Перевод В. К. Игнатовича.

Джордж А. Майкл — физик, сотрудник Радиационной лаборатории им. Лоуренса в Ливерморе (Калифорния).

**) Более полные сведения можно найти в работах [1-3]. Обзоры новейших достижений в этой области выпускаются «Key Data Corporations» [4].

***) 1 дюйм = 2,54 *см*. (*Прим. перев.*)

гов в секунду, величина же шага изменяется от 0,01 до 0,00125 дюйма. Существуют также аналоговые графопостроители, величина шага которых определяется величиной приложенного напряжения.

Разумеется, рисовать можно не только пером, но и ножом, и лампой, и не обязательно делать это на бумаге. Графопостроители обладают тем преимуществом, что они, как правило, очень аккуратны и позволяют

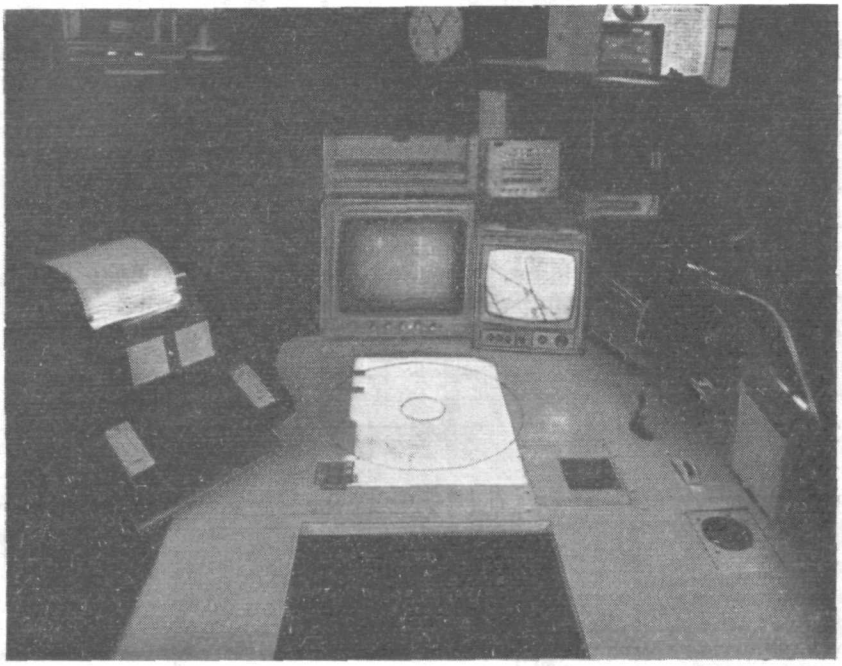

Рис. 1. Пульт оператора спирального измерителя, который позволяет исследовать многолучевые события. Зеркало вверху направляет изображение пленки на поверхность стола. На телевизионном экране в центре (справа) возникает изображение области, заключенной внутри маленького, указывающего цель, кружка. ЭЛТ (в центре слева) показывает цифровые результаты сканирования и измерения. Источником света служит мощная лампа [11].

получать великолепное многократное воспроизведение чертежей. В дискретном режиме работы добиться этих качеств воспроизведения не очень трудно. Еще одно преимущество графопостроителей по сравнению с другими устройствами вывода состоит в том, что они позволяют применять бумагу большого формата.

Микрофильм

В микрофильмовом выводе запись производится с экрана электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), который проектируется на пленку с помощью системы линз. Перемещение пленки и контроль за электроникой ЭЛТ осуществляются с помощью сигналов, вырабатываемых ЭВМ. В некоторых устройствах запись с ЭВМ производится сначала на магнитофон, а затем с магнитофона снимается микрофильм.

Выпускаемые промышленностью микрофильмовые устройства вывода поступают в продажу обычно в комплекте с малой ЭВМ. Такая комбинация очень удобна в работе. Во многих случаях оказывается дешевле приобрести целиком такой комплект, чем конструировать специальные

приспособления. Многие микрофильмовые устройства вывода позволяют получать также копии изображения на бумаге.

Много изобретательности потребовалось для того, чтобы рисунки, получаемые с микрофильмовых устройств, были высокого качества. Хотя в некоторых исследованиях, где применяется микрофильм, пленка бывает нужна только для однократного просмотра, тем не менее часто требуется получить и отпечаток. В связи с этой задачей в настоящее время созданы надежные и достаточно удобные в обращении средства, позволяющие проявлять пленку или карточки микрофильма (70 × 105 *мм*^{2}) и отыскивать на них нужные кадры.

Некоторые современные микрофильмовые устройства вывода, по существу, призваны заменить построчную печать, которая в большой мере тормозит процесс вывода информации из ЭВМ. При построчной печати никогда не надеялись достичь скоростей больше 4000 строк в минуту; практически же самые быстрые печатающие устройства работают со скоростью 3000 строк в минуту. Микрофильмовые устройства позволяют производить запись с ЭЛТ со скоростью свыше 12 000 строк в минуту. Наиболее серьезные ограничения, которые возникают здесь, связаны с тем, насколько быстро удается протягивать пленку. Частота кадров варьируется примерно от 2 до 30 кадров в секунду при ширине пленки 16 или 35 *мм*. Некоторые новейшие устройства позволяют применять 105 *мм*-пленку.

Экран дисплея*)

Некоторые устройства вывода позволяют непосредственно наблюдать изображение на экране ЭЛТ. Мы рассмотрим устройства, которые позволяют выводить на экран как рисунок, так и текст. Диаметр экрана дисплея (12 дюймов и выше) обычно превосходит диаметр ЭЛТ (5—7 дюймов), применяемых для записи на микрофильм. Есть немало способов задержать изображение на экране: изображение можно закодировать, записать в памяти машины и выводить непрерывными циклами на дисплей; его можно записать в памяти и самого дисплея, если таковая имеется; можно воспользоваться ЭЛТ с экраном самозапоминающего типа.

Рисунок на экране дисплея конструируется только из тех элементов, которые есть в активе дисплея. Этими элементами являются: точки, символы и линии. Обычно они отмечаются световыми вспышками на экране ЭЛТ, но могут быть и невидимыми: например, в том случае, когда нужно изменить положение электронного луча, на экране проводится невидимая линия, а когда нужно разделить два слова, на экране вычерчивается невидимый символ пробела. Все операции выполняются одинаковым образом из любой точки экрана. Например, провести линию в заданную точку (X, Y) можно из любой точки, в которой находится в данный момент электронный луч.

Экран ЭЛТ можно представить себе покрытым двумерной декартовой сеткой, которая выделяет на экране множество дискретных точек. Обычно число этих точек равно $2^{10} \times 2^{10}$, но иногда оно достигает $2^{12} \times 2^{12}$. Оператор может разместить на сетке дисплея информацию и большего объема, если воспользуется тем или иным законом отображения. Кроме того, он может контролировать яркость изображения и текстуру линий (пунктир). Для выполнения этих операций требуется от 2 до 60 *мксек*. Некоторые системы дисплея позволяют строить перспективное изображение трехмерных объектов.

---

*) Дисплеем принято называть управляемую вычислительной машиной ЭЛТ, на экране которой можно непосредственно наблюдать изображение (*Прим. перев.*)

ЭЛТ прямого наблюдения является частью канала двусторонней связи, который позволяет вычислительной машине следить за своими действиями. Другую часть составляют клавиатура, световой карандаш

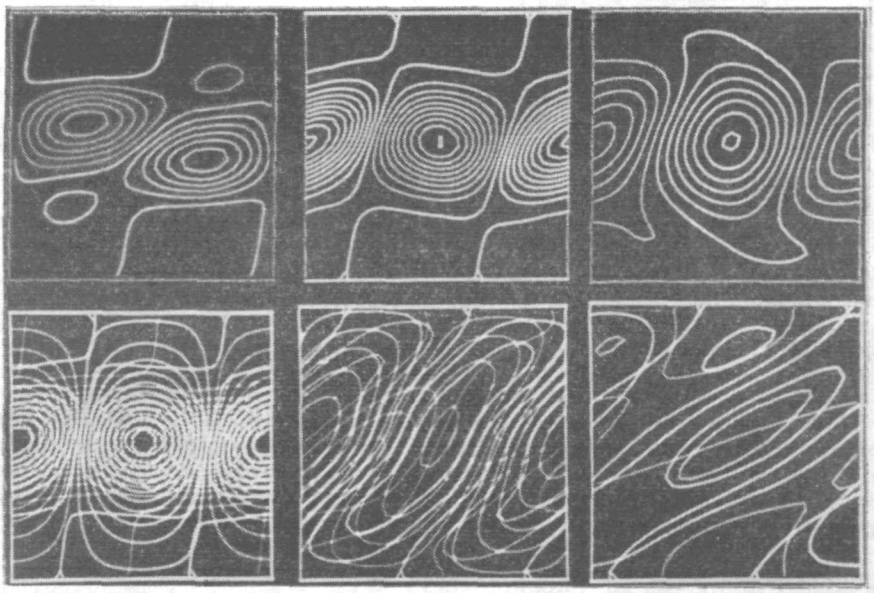

Рис. 2. Кинофильм о слоистом потоке в стабильной вязкой жидкости, полученный на ЭВМ. Шесть кадров показывают эволюцию конечного возмущения температуры с учетом гравитации при наличии градиентов средней температуры и скорости. Решается система нелинейных уравнений для вихрей и температуры. Начальное возмущение создается горячим пятном слева и холодным пятном справа (левый верхний кадр). После нескольких циклов вычислений поднимающееся теплое пятно и опускающееся холодное пятно индуцируют поле скоростей; следующие два кадра (вверху в центре и справа) показывают функцию тока и интенсивность вихрей, соответствующие этому полю; на оставшихся кадрах показана совокупность этих трех полей. (Фильм цветной, так что поля легко отличить друг от друга.) Через некоторое время горячее и холодное пятна меняются местами (в центре); затем они возвращаются на свои места (справа). Корреляция между интенсивностью вихрей и функцией тока, заметная на трех последних кадрах, показывает экспериментатору, что нелинейной адвекцией в уравнении для вихрей можно пренебречь [12, 13].

и т. п. Эти средства дают возможность общаться с ЭВМ во время выполнения заложенной в нее программы и включаются либо вручную, самим оператором, либо автоматически в заранее запрограммированном режиме, что делает средства особенно удобными в обращении.

ОБЩЕНИЕ С ЭВМ

Общаясь с ЭВМ, человек должен уметь объяснять ей, как он воспринимает те или иные объекты. К сожалению, проблема человеческого восприятия еще слишком далека от своего разрешения, несмотря на многочисленные попытки, предпринимаемые в этом направлении. Однако в большинстве случаев эту проблему можно обойти. Мы не обязаны объяснять ЭВМ, что такое рисунок, мы можем обращаться с ней как с беспрекословным слугой, который точно исполняет все наши приказания, хотя и не всегда понимает то, что мы при этом подразумеваем.

Любая задача, вообще говоря, состоит из двух частей: одну из них, как нам думается, мы в состоянии строго сформулировать и сообщить

ЭВМ; другая же полностью относится к компетенции человека. Слова «строго сформулировать» означают — сопоставить вычислительный алгоритм. Примером могут служить дифференциальные уравнения. Вообще говоря, ЭВМ решать их не может, однако она может решать приближенные уравнения в конечных разностях, используя приближенную арифметику с округлением. Рассмотрим теперь те приемы, которые помогают ЭВМ решать «строго сформулированную» часть задачи.

Списки

Обращение к ЭВМ чаще всего состоит из цифрового списка элементов рисунка. Список указывает, как нужно строить изображение. В нем имеется *заголовок*, содержащий относительную информацию, и *главная часть*, которая несет основную информацию. Информация, касающаяся самого изображения, как правило, вносится в сам список, а заголовок содержит указатели к другим спискам, обозначения составных частей и другие данные, предназначенные для обработки.

Большую роль в построении изображения играет последовательность элементов в списке. Например, четырехугольник задается пятью парами чисел, обозначающих вершины четырехугольника A, B, C, D, A, причем первая и последняя пары равны друг другу. Процедура построения изображения состоит в следующем: «Провести невидимую линию к A, прочертить видимую линию к B, затем к C, затем к D, затем к A». Для эффективности обработки необходимо добиться, чтобы все списки имели похожую структуру. При правильной постановке дела один элемент списка может использоваться многократно. Методы обработки списков развивались главным образом в связи с изучением формальной логики доказательств теорем, моделированием рассуждений и, частично, в связи с анализом языка, однако они оказались чрезвычайно полезными и в машинной графике *).

Процедура обработки списков не является обязательным элементом машинной графики. Иногда вычисление необходимых данных выгоднее возложить на саму ЭВМ. Это имеет место, например, в том случае, когда оператору нужно найти с помощью ЭВМ числа, характеризующие координаты кривых некоторого семейства, или проследить за эволюцией характеристик заданного процесса при изменении определенного параметра. Если оперативная память ЭВМ не в состоянии вместить в себя сразу все выводимые данные, а оператор обладает достаточным резервом времени, то необходимые данные можно вычислять по мере надобности.

Сплошь и рядом случается так, что возможность графического вывода представляется при наличии уже готовой вычислительной программы. В такой ситуации оператор составляет общую программу, с помощью которой только осуществляет стратегическое руководство готовыми подпрограммами. При этом он может получить какое угодно изображение. Построить график, конечно, не представляет большого труда, но если постараться, можно получить даже одушевленную картинку.

Распознавание образов

В предыдущем разделе мы говорили о том, как получить изображение. Для этого либо сам оператор, либо составленная им программа должны описать элементы рисунка и порядок, в котором эти элементы следуют, т. е. рисунок должен быть закодирован. Рассмотрим теперь задачу

*) Описание некоторых языков для обработки списков см. в работах [5–7].

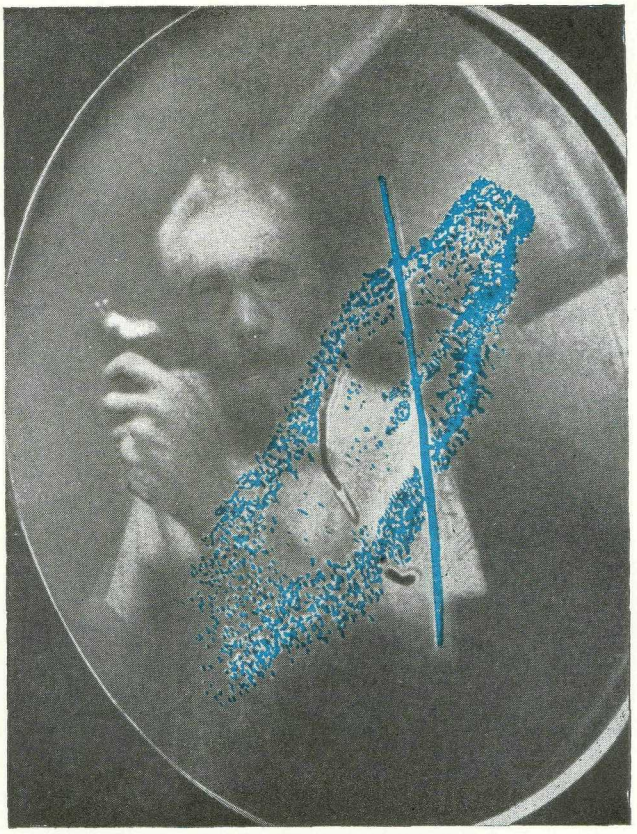

Рис. 3. Корреляционная карта звука «*OX*», полученная экспериментатором Дж. Оливером. Микрофон превращает звук в электрический сигнал, который меняется со временем. После того, как аналогово-цифровой преобразователь опробует сигнал 6000 раз в секунду, результирующие цифры сокращаются до девяти двоичных разрядов и запоминаются. На дисплей выдаются точки $(\alpha S_i, \beta S_{i+1})$, $i = 1, 2, \ldots, N$, где S_i образуют систему N результатов наблюдений, а α и β являются масштабными множителями. В тот момент, когда производится выдача на экран системы точек, из подсистемы координат y (βS_{i+1}) вырабатывается звуковой сигнал, который возвращается к оратору. Хотя визуальная форма звука может оказаться полезной для распознавания речи, тем не менее положительных результатов в этом эксперименте пока не получено.

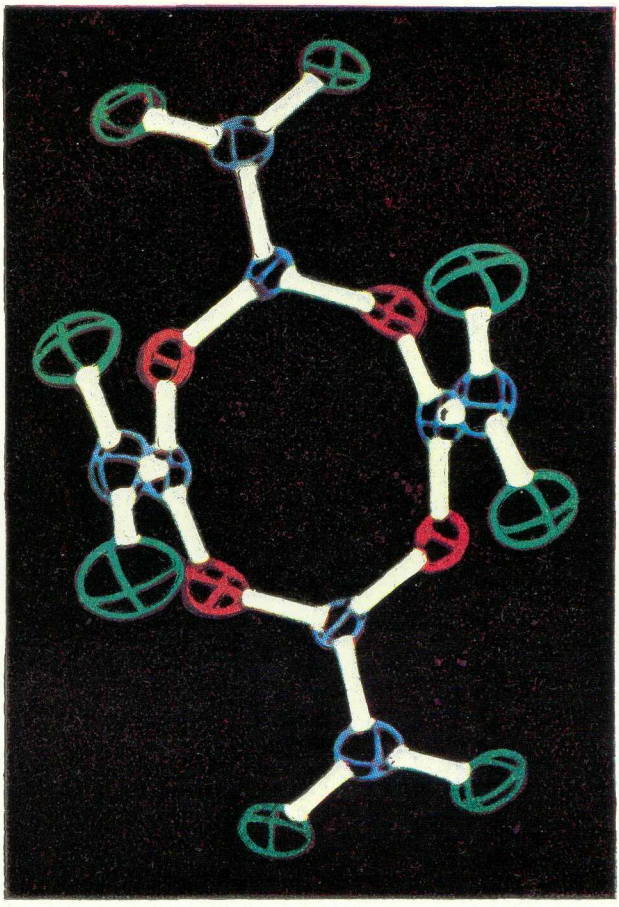

Рис. 4. Программы для изображения структуры. Кристаллограф задает двумерные данные и получает трехмерное изображение молекулы. Вещество, показанное на этой ЭЛТ, является окта-гидро-1,3,5,7-тетранитро-1,3,5-тетразоцином (зеленый — кислород, голубой — азот, а красный — CH_2). Эллипсоиды — поверхности вероятности, определяемые тепловым движением атомов. В цветном фильме, с которого сделан этот снимок, вся структура вращается, так что ее можно видеть под разными углами [14, 15].

о том, как передать изображение ЭВМ. Здесь мы сталкиваемся с проблемой, известной под названиями «распознавание образов», «обработка визуальных данных» и «обработка рисунка». Изображение можно охарактеризовать координатами отдельных имеющихся на нем объектов, однако это не всегда удается сделать достаточно точно. Важнейшие события, которые могут оказаться зафиксированными на снимках с водородной

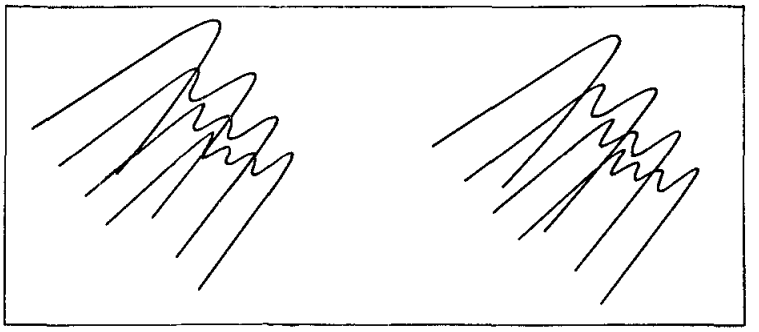

Рис. 5. Разложение Фурье ступенчатой функции (в парном стереоскопическом изображении). Каждое из четырех приближений включает один дополнительный член. Согласно условию Гиббса, сколько бы членов мы ни брали, всегда на концах будет превышение. На рисунках это ясно видно, и экспериментатор может заметить (прибавляя все большее число членов), что сходимость на концах ступеньки заметно не улучшается [3].

камеры на фотографиях звезд и спутников, осциллограммах, сейсмограммах, электроэнцефаллограммах и т. д., обычно завуалированы всевозможными фотографическими помехами, поэтому определить координаты отдельных объектов довольно трудно. Построчная передача рисунка является более точной.

Представление о том, какой огромный объем памяти может потребоваться для передачи изображения, можно составить из следующего рассмотрения: что, например, значит получить «точный» цифровой эквивалент обычной фотографии? Поскольку у нас нет никакой теории визуального восприятия, мы должны отказаться от попытки описать содержание рисунка путем перечисления имеющихся на нем образов. Однако если нам известна, в пределах разрешения, числовая величина фотографической плотности в каждой точке, то тем самым нам известно и все изображение.

Развертка и слежение

Для того чтобы по фотографической плотности в каждой точке можно было воспроизвести изображение, необходимо упорядочить эти точки, например расположить их в таком порядке, в каком бы их «просматривал» луч, пробегающий экран телевизора. Этот способ упорядочения хорошо согласуется с принципами работы ЭВМ, но в результате получается слишком большой объем информации. Пленки, применяемы в научных исследованиях, могут разрешать в среднем 500 линий на миллиметр, и диапазон изменения фотографической плотности этих пленок может охватывать четыре порядка величины. На квадратной пластинке со стороной 25 *см* помещается 10^{10} элементов. Если плотность в каждой точке измерять с точностью до трех значащих цифр, то для описания одной фотографии потребуется около 10^{11} единиц машинной памяти, т. е. примерно столько, сколько имеется во всех запоминающих устройствах США

вместе взятых. Отсюда ясно, что мы вынуждены либо довольствоваться гораздо худшим разрешением, либо уменьшать размеры исследуемого участка. Иногда оказывается удобным сочетать грубую развертку с мелкой: первая позволяет получить общее представление о широком поле, а вторая — тщательно исследовать избранные участки.

Развертка не является единственным способом упорядочения точек. Если оператору нужно знать расположение цепочки сфотографированных пузырьков, следа на осциллографе или профиль плотности в заданном месте, то ему выгоднее воспользоваться методом «слежения»: при этом

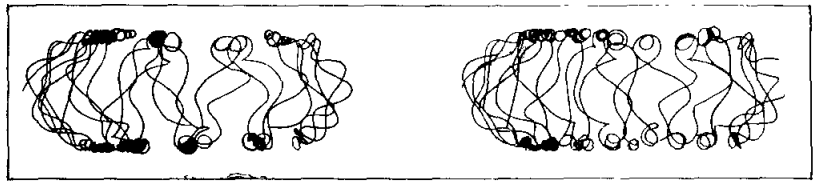

Рис. 6. Магнитное поле Земли, аппроксимированное магнитными брусками. Стереоскопическое изображение (Н. Харди) показывает трехмерные траектории захваченных заряженных частиц. Частицы «рыскают» от полюса к полюсу. Варьируя угол инжекции, можно получать разные результаты.

точки располагаются в естественном порядке, например, пузырек за пузырьком. Слежение позволяет непосредственно извлекать полезную информацию, в то время как при развертке полезную информацию можно извлечь только после соответствующей обработки цифровых данных.

Перевод изображения на язык цифр осуществляется с помощью устройства, в которое входят: источник света, держатель для документа, набор линз, детектор света и управляющая электроника. Большинство ЭВМ, используемых в исследованиях по физике высоких энергий, позволяет частично осуществлять программный контроль пучка [8]. Источником света служит либо ЭЛТ, либо мощная лампа (см. рис. 1).

Развертка часто применяется и для увеличения изображения. В этом случае оптическая плотность заданной системы точек преобразуется в соответствии с некоторым алгоритмом и далее используется либо для построения нового изображения [9], либо для опознавания [10]. Количество точек, которые нужно обследовать для получения увеличенного изображения, оказывается значительно меньшим полного числа точек, имеющихся на пленке, если оператор может воспользоваться методом слежения. Процесс считывания обычно контролирует сам оператор [8, 9, 11].

ПРИЛОЖЕНИЯ

Физические исследования подразделяются на теоретические и прикладные. В применении к ЭВМ уместно несколько иное деление: моделирование и обработка данных. Моделирование означает описание физической системы с помощью математики. Моделирование применяется со времени зарождения сознательной жизни на Земле, однако наибольшего расцвета оно достигло только после создания вычислительной техники, так как вычисление, как правило, является чрезвычайно трудоемким процессом. Следует различать два вида моделирования, при которых ЭВМ оказывает неоценимую помощь человеку: расчет на основе заданной системы уравнений и подгонка параметров. В первом случае мы можем проверять применимость наших уравнений и предсказывать новые явления, а во втором — делать выбор между различными формулировками физических

законов с целью создания наиболее удовлетворительной теории. И в том, и в другом случаях мы пользуемся процедурой вычислений и всегда можем извлечь из нее множество рисунков, которые позволяют проверить физические предпосылки, помогают интуиции и способствуют появлению новых идей.

Что же касается обработки данных, то здесь мы все еще должны делать то же, что и всегда, однако делать это с помощью ЭВМ становится (или может стать) значительно легче. Чтобы избежать процедуры перевода экспериментальных данных на понятный для ЭВМ язык, экспериментальные установки в настоящее время стараются прямо подключать к ЭВМ. Это позволяет и контролировать эксперимент, и автоматически упаковывать информацию [8, 9]. Добавление пульта дисплея позволяет экспериментатору воздействовать на эксперимент часто даже по ходу дела, что помогает ему получать данные более высокого качества и дает возможность сократить время измерения. Если экспериментальные результаты, как это имеет место в физике высоких энергий, получаются слишком быстро и ЭВМ не успевает их записать или если этих данных получается слишком много и ЭВМ не хватает памяти, чтобы их разместить, тогда эти результаты записываются на пленку и ввод их в ЭВМ осуществляется с помощью соответствующего читающего устройства.

Примеры, приведенные здесь, в разной степени иллюстрируют и моделирование и обработку данных. Рисунки представляют собой либо кадры из фильма, созданного ЭВМ, либо фотографии с дисплея. К сожалению, обыкновенные иллюстрации не могут донести до читателя ни ощущения плодотворности реального взаимодействия с ЭВМ, ни чувства внезапного озарения интуиции, возникающего во время наблюдения, однако намек на все это в них тем не менее есть.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. S. Davis, Computer Data Displays, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1969.
2. Recent Advances in Display Media, NASA, Washington, D. C. NASA SP-159 (1967).
3. G. Michael, R. Cralle, в сборнике «Computer Oriented Circuit Design» (F. Kuo, W. Magnuson, Eds.), Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1969.
4. Computer Display Review (J. Martell, Ed.), Key-Data Corp., Watertown, Mass., 1970.
5. K. Bertran, G. Michael, в сборнике «Computer Oriented Circuit Design» (F. Kuo, W. Magnuson, Eds.), Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1969.
6. Programming Systems and Languages (S. Rosen, Ed.), McGraw-Hill, New York, 1967.
7. D. Bobrow, B. Raphael, Comm. ACM 7, No. 4 (1964).
8. Methods of Computational Physics, Vol. 5. Nuclear Particle Kinematics (B. Alder, S. Fernbach, M. Rotenberg, Eds.), Academic Press, New York, 1966.
9. Pictorial Pattern Recognition (G. Cheng, R. Ledley et al., Eds.), Thompson Book Co., Washington, D. C., 1968.
10. Optical and Electro-Optical Information Processing (J. Tippett, D. Berkowitz et al., Eds.), MIT Press, Cambridge, Mass., 1965.
11. G. Lynch, Remarks on the Use of the Spiral Reader, UCRL-17328, Feb. 1967.
12. W. P. Crowley, G. M. Corcos, Numerical Calculations of Viscous, Incompressible Stratified Shear Flows, UCRL-50538, Nov. 1968.
13. H. E. Schwember, The Interaction of Buoyancy, Shear and Diffusion in Stratified Flows, PhD Thesis (Univ. of Calif., 1969).
14. Q. Johnson, G. McMillan, G. Smith, Stereo Movies of Crystal Structures, UCRL-14717 Abstract, Feb. 1966.
15. C. K. Johnson, ORTEP: A Fortran Thermal-Ellipsoid Plot Program for Crystal Structure Illustrations, ORNL-3794, June 1965.