1967 г. Май *Том 92, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

530.145

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

НАПРАВЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ И ВНЕШНИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ *)

Ф. Моррисон

Виллард Гиббс писал: «Представим себе цилиндрическую массу (непрерывной) жидкости, один прямоугольный сектор которой черного цвета, а остальная часть белая. Пусть эта масса вращается вокруг цилиндрической оси с угловой скоростью, зависящей от радиуса. Тогда с течением времени черная и белая части вытянутся в тонкие ленты, спирально закручивающиеся вокруг оси. Толщина этих лент будет неограниченно уменьшаться, и жидкость в пределе станет идеальной смесью белой и черной частей. Иными словами, соотношение черного и белого должно приближаться к предельному значению 1 : 3 в каждом элементе жидкости. Тем не менее после конечного интервала времени весь объем еще можно будет разделять на две части — только белую и только черную»[1].

По-видимому, именно из этого наглядного аргумента Гиббса в статистической механике произошло понятие «крупнозернистой» плотности распределения в фазовом пространстве. Ибо нам ясно, как это было ясно и самому Гиббсу, что равновесная однородность, которая устанавливается в фазовом пространстве из-за перемешивания, аналогичного упомянутому, есть однородность условия; любой фиксированной степени перемешивания соответствует некоторая точность наблюдения, обнаруживающего полную неоднородность. С другой стороны, если доступная информация о плотности распределения ограничена заданной точностью метода наблюдения, то регистрироваться будет только усредненная, т. е. крупнозернистая, плотность, которая со временем становится идеально однородной. Хотя существует обширная литература, посвященная этой проблеме (и было бы глупо претендовать на ее исчерпывающее описание), все же общей чертой всех [2] исследований по установлению равновесия, т. е. направлению времени, по-видимому, является нечто эквивалентное идее Гиббса о «крупнозернистости»— идет ли речь о «постулате числа столкновений» (Stosszahlansatz) или о приближении случайных фаз [3]. Однако субъективный элемент, присущий этому способу описания, несколько тревожит. Если даже говорить о классических и идеализированных случаях, то не сохраняются ли и при равновесии неуловимые корреляции? Не является ли направление времени всего лишь иллюзией?

Данная статья написана с целью дать уверенный ответ, что направление времени реально, а не субъективно, что это направление определяется не особыми космологическими законами, а является неизбежным следствием всех физических законов.

*) P. Morrison, Time's Arrow and External Perturbations, «Preludes in Theoretical Physics» in honour of V. F. Weisskopf, Amsterdam, 1966, pp. 347—351. Перевод В. А. Белоконя.

Начнем с конкретной аналогии [4]. По стене моего кабинета (на физическом факультете Массачусетского технического института) простирается пятиметровое выводное устройство вычислительной машины. На этой машине проводится «вычислительный эксперимент»: поведение нескольких сот маленьких жестких шариков, довольно плотно упакованных в плоскую коробку, прослеживается за время, в течение которого они испытывают пару тысяч столкновений. В начале эксперимента шарики расположены в виде регулярной квадратной решетки. Затем каждый шарик получает случайные значения взаимно перпендикулярных составляющих $v_{x_i}(0)$ и $v_{y_i}(0)$ скорости, полное значение которой для каждого шарика, однако, одинаково. При этом каждый шарик сдвигается со своего начального положения в узле решетки и когда один шарик в среднем испытает несколько столкновений, решетка беспорядочно перемещается. По нашему желанию вычислительная машина печатает «мгновенные снимки» расположения шариков. В некоторый момент времени t_R движение шариков прекращается и компоненты скоростей всех шариков меняются на обратные: $v_{x_i}(t_R)$ на $-v_{x_i}(t_R)$ и $v_{y_i}(t_R)$ на $-v_{y_i}(t_R)$. Теперь движение прослеживается вспять по дико усложненным траекториям шариков и после соответствующего числа (обратных) столкновений плюс соответствующий интервал времени без столкновений, достигается время $t = 0$, предшествовавшее первому столкновению. В этот момент машина должна была бы словно по волшебству восстанавливать регулярную решетку, однако обратимость достигается при этом не наверняка, ибо обращение процесса зависит от знаний программиста; обратимость всегда будет нарушаться неизбежными ошибками округления результатов решения уравнений движения, которые машина выдает с точностью только до конечного числа десятичных знаков (она не может выйти, так сказать, из поля рациональных чисел). В результате этого при возвращении к моменту времени $t = 0$ сохраняется хаос, который установился к моменту t_R. Таким образом, расчет на машине включает в себя нечто аналогичное гиббсовому «укрупнению зерен» фазового пространства. Из-за конечной точности вычислений, т. е. ограниченного знания, машина приносит почти неуловимые искажения в сами классические (дифференциальные *) *) уравнения движения, которые могли бы давать идеально точные ответы, если бы соответствующие аналитические расчеты могли быть проведены. Но это недостижимо.

Теперь остается добавить мой главный аргумент, что в каждом классическом утверждении о законах природы для любой системы обязательно подразумевается пренебрежение малыми физическими возмущениями (энергии *), т. е. пренебрежение каким-то δH, которым принципиально нельзя пренебрегать для конечной системы и который фактически всегда достаточно велик, чтобы помешать идеальной реконструкции прошлого.

Данный аргумент элементарен и в своей основе не нов. Он является обращением аргумента Пуанкаре, который уже давно утверждал, что вероятность сама по себе иллюзорна и что колесо рулетки можно рассмотреть в принципе чисто детерминистически. Дело лишь в том, что предсказание «красной отметки» на этом колесе чрезвычайно неустойчиво по отношению к начальным данным! Эту мысль легко обобщить, сказав, что упомянутое предсказание неустойчиво также и по отношению к внешним возмущениям. Таким образом, детерминистическая классическая вселенная, вообще лишенная вероятностных законов, превращается в статистическую вселенную, как только мы переходим к рассмот-

---

*) * — так отмечены добавления переводчика.

рению систем, частично изолированных от окружения. Ибо в этом случае взаимодействия, пренебрежимо малые по своему вкладу в гамильтониан, нарушают предсказания механики и не позволяют в примере Гиббса сохранять молоко неразмешанным с чернилами. Куда бы ни были помещены границы рассматриваемой системы, всегда *что-нибудь* остается вне их, и за достаточное время, если система достаточно сложна, это «что-то» разрушит чрезвычайно чувствительные корреляции координат и скоростей, от которых, кстати, зависит и обратимость.

Приведем, наконец, простую оценку степени чувствительности к внешним возмущениям. Заметим, что возможна только одна система без каких-либо неизвестных внешних возмущений — вся вселенная. Любая теория не столь замкнутой системы должна допускать какое-то присутствие внешних возмущений. При соответствующем уровне этих возмущений любая система становится необратимой, несмотря на обратимость динамики. Суть дела в том, что запутанность «черных» волокон, пронизывающих фазовое пространство, становится столь значительной, что даже *динамически* пренебрежимые, неэкранируемые гравитационные возмущения способны вызвать полное фазовое перемешивание. Конечно, обращение времени и для системы и для возмущений дало бы полную обратимость. Но это означало бы расширение рассматриваемой системы. Ибо в таком случае эти возмущения должны быть известны и должны становиться частью рассматриваемой системы. Но останутся другие возмущения — внешние по отношению к новой системе. Отсюда видно, что *только вселенная в целом может*, как это и должно быть, избежать требований, подобных постулату о числе столкновений (Stosszahlansatz).

Рассмотрим систему многих частиц, фазовое пространство которой f-мерно. В этом пространстве система находится где-то в окрестности среднего значения компоненты импульса $\langle p \rangle$ и координаты $\langle q \rangle$ при неопределенности каждой компоненты импульса Δp, определяемой корнем квадратным из среднего квадратичного разброса этой компоненты, и неопределенности положения системы в координатном пространстве Δq, определяемой объемом, в который заключена система. Поскольку перемешивание в обычном пространстве считается полным, достаточно рассмотреть влияние столкновений между частицами на положение системы в импульсном пространстве. Число столкновений, равное числу молекул, вызывает такой сдвиг импульсных координат системы, который можно грубо оценить величиной Δp характерного разброса компонент импульса (который считается одинаковым для всех компонент *). За время $T = N\tau_{\text{столкн}}$, где N — число столкновений на одну частицу, а $\tau_{\text{столкн}}$ — среднее время столкновений, положение системы в импульсном гиперпространстве опишет самую дикую траекторию. Теперь рассмотрим проекцию фазовой траектории системы на плоскость $(p_q,\ q)$, где q — любая из f координат системы. Эта траектория пересечет N^m раз ось p, поскольку столкновения заставляют фазовую точку описывать случайные блуждания (около значения $\langle q \rangle = 0$) по некоторому закону, точный вид которого не влияет на нашу аргументацию (поскольку m может равняться 1/2, 1 или иному малому числу того же порядка). Средний промежуток между точками пересечения оси p можно оценить величиной $\Delta p/N^m$ (ибо по определению почти вся фазовая траектория укладывается в диапазоне Δp *). Тогда объем «типичного зернышка» импульсного пространства, пронизанного траекторией системы, составляет около $(\Delta p/N^m)^f$. Если же в течение некоторого времени T «пренебрежимая» внешняя сила сдвигает средний импульс $\langle p \rangle$ на величину δp, тогда объем импульсного простран-

ства, ограниченный новой траекторией и старой составляет (при $\delta p \ll \langle p \rangle^*$) примерно $\delta p \langle p \rangle^{f-1}$. Если при этом пустой фазовый объем почти равен непредсказуемому (из-за неконтролируемости возмущения) изменению фазового объема, то можно ожидать, что за интересующий нас интервал времени ошибка в знании новых начальных данных даст траекторию, совершенно отличную от предсказанной без учета возмущения. В таком случае, например, обратимость утрачивается, т. е. надежны лишь эргодические оценки. Однако это означает (при $\Delta p \approx \langle p \rangle$ *), что $\delta p \approx \Delta p / N^f$ (где $f' = Kf$, если K — число порядка единицы) и время фазового перемешивания $T_{\text{перемеш}} \approx \tau_{\text{столкн}} \ (\Delta p/\delta p)^{1/f'}$.

Точное динамическое решение должно быть столь филигранным и запутанным, что малейшее внешнее влияние быстро сдвигает такое решение на значения, которые являются характерными для деталей невозмущенного решения. Оценка показывает, что гравитационное возмущение, вызываемое падающим яблоком в секторе шириной 10^{-4} *рад*, способно на расстоянии 1 *км* перемешать траектории одного моля газа ($\approx 10^{24}$ молекул) за 1 *мсек* (10^{-3} *сек*). Эта оценка, признаться, чрезвычайно груба, однако я верю, что существенно не ошибся.

В случае менее сложной системы эффективность возмущений становится все более пренебрежимой: в то время как солнечную систему в целом, на которую действуют галактические силы, нельзя рассматривать как обратимую, систему Земля — Луна можно считать таковой, как в этом легко убедиться. Аналогично простым и обратимым является движение малого числа молекул в ящике.

Определяя каноническое распределение, сам Гиббс и многие его последователи подчеркивали важность включения в рассматриваемую систему большого (по количеству энергии *) термостата, сильно взаимодействующего (обменом сколь угодно больших порций энергии *) с подсистемой. Мне кажется, что для самого существования необратимости (*это не относится к обоснованию столь большой проблемы, как определение* времен релаксации) достаточно допустить малейшую степень подобного взаимодействия с вполне определенной динамической системой. Направление времени с этой точки зрения — необходимое следствие невозможности описать всю вселенную никакой физической теорией, за исключением, возможно, «окончательной теории». Представляется также ясным, что направление времени — в упомянутом выше смысле — не изменилось бы для человека, пребывающего в сжимающейся, а не в расширяющейся вселенной, при условии, что он смог бы — пусть в каком-то «супербомбоубежище» — *экспериментировать с физическими системами известного* нам сорта, временно изолированными от большого притока энергии извне (неизбежного в такой вселенной *). Утечка газов из клапанов его крепчайшего убежища должна быть необратимой (если нет подвода извне свободной энергии) из-за перемешивающего воздействия сил внешнего мира, каким бы ни было поведение этого мира в больших масштабах.

Несомненно, существуют и другие, более глубокие ответы на задачи, рассмотренные здесь элементарно и поверхностно. Однако стоило пытаться *говорить даже о столь трудных проблемах на простом физическом языке* с оценками порядков величин. Такой метод рассмотрения и учит и приносит удовольствие. Я сам постиг его, хотя и несовершенно, наблюдая с восхищением непревзойденный стиль Вайскопфа.

Physics Department, Massachusetts
Institute of Technology, Cambridge,
Massachusetts

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА *)

1. J. W. Gibbs, Elementary Principles in Statistical Mechanics, Yale University Press, New Haven, 1902. (Русский перевод: Дж. В. Гиббс, Основные принципы статистической механики, М., Гостехиздат, 1946.)
2. J. M. Blatt, Progr. Theor. Phys. 22, 745 (1959).
3. N. van Kampen, in «Fundamental Problems in Statistical Mechanics», North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1962.
4. Альдер (B. J. Alder) в Ливерморской лаборатории Калифорнийского университета исследует основания кинетической теории газов при помощи быстродействующей вычислительной машины; (см. также B. J. Alder в сборнике «The Many-Body Problem», ed. by I. K. Percus, Interscience, 1963).

Авторы следующих работ доказывают, что само существование необратимости зависит не от «сложности» системы или существования внешних возмущений, а от принципиальной невозможности контролировать положение системы в фазовом пространстве (т. е. от «крупнозернистости») и от вида гамильтониана. Они считают непринципиальным вопрос об источнике неконтролируемости. Моррисон же настаивает, что «объективная» неконтролируемость привносится только внешними причинами, хотя и не показывает принципиальной разницы между «внешней» и «внутренней» неконтролируемостью. Поэтому фактически он может претендовать лишь на то, что доказывает необратимость процессов, описываемых классической механикой, в случае полной контролируемости начальных условий в системе, но при неконтролируемых внешних возмущениях. По этому поводу см.:

5. R. C. Tolman, The Principles of the Statistical Mechanics, Oxford, University Press, 1938.
6. Н. С. Крылов, Работы по обоснованию статистической физики, М., Изд-во АН СССР, 1950.
7. М. Борн, Возможно ли предсказание в классической механике, УФН LXIX, 2 (1959).
8. Л. Бриллюэн, Научная неопределенность и информация, М., «Мир», 1966. См. также литературу, указанную в этих работах.

*) Литература 4—8 добавлена переводчиком.