§ 1.2. ФИНАЛИЗМ И КАУЗАЛЬНОСТЬ

Прежде чем перейти к обсуждению физических основ жизненных явлений, остановимся на важной их особенности, обычно воспринимаемой как противоречащая физике.

В биологии естественно возникает финалистическая трактовка изучаемых явлений. Развитие зиготы во взрослый организм можно описывать, пользуясь понятием цели: целью развития является создание организма. Его структура целесообразна, она соответствует условиям существования. Уже на ранней стадии эмбриогенеза определенные группы клеток предназначены для развития в определенный орган, и этим задается их функциональность на всех уровнях вплоть до молекулярного. Также описывается и филогенез — эволюционное развитие. Оно направлено в сторону наибольшей приспособленности популяции — элементарной эволюционирующей системы — к внешним условиям.

В этом смысле организм подобен машине, построенной по плану для достижения определенной цели. Конечно, научная биология далека от телеологического рассмотрения процессов развития. Достижение цели в онтогенезе и филогенезе является следствием реальных причин (естественного отбора и т. д.). Подчеркивая наличие некоторого плана развития, Моно вводит понятие телеономии [14], имея в виду причинную обусловленность (каузальность) развития. Исключительная сложность и историчность филогенетического и онтогенетического развития организма — живой машины — определяют его финалистическое описание, не свойственное обычной физике и химии. Очевидна бессодержательность такого, например, утверждения: «Ионы натрия и хлора взаимодействуют друг с другом с тем, чтобы построить кубический кристалл». Напротив, утверждение «...по той причине, что ионы Na и Cl имеют такие-то заряды и радиусы, кристалл NaCl должен быть кубическим» имеет ясный смысл.

Физики обычно спрашивают «почему?», в биологии часто ставится вопрос «для чего?».

Понятие целесообразности тесно связано с понятием оптимальности. Оптимальность означает достижение некоторого результата («цели») ценою наименьшей затраты энергии, времени возникновения системы, наилучшим образом выполняющей определенные функции и т. д.

Биологический финализм выражает, с одной стороны, сложность биологических явлений и структур, препятствующую их каузальному объяснению на атомно-молекулярном уровне. С другой стороны, финализм характеризует необратимость и «антиэнтропийность» развития, реализующего план, программу, инструктирующее действие информации (стр. 37).

В действительности нет противоречия между финализмом и каузальностью и нет противоречия между физикой и биологией в этом аспекте. В сущности финализм возникает в физике всякий раз, когда ее принцип формулируется как вариационный. Приведем примеры.

Состояние устойчивого движения сохраняется при малых возмущениях. Возмущение не может его изменить. Отсюда следует финалистическая формулировка — система стремится сохранить свое состояние. Напротив, неустойчивое состояние при малом возмущении необратимо изменяется — система стремится перейти в другое состояние (рис. 1.1, переход маятника из состояния *2* в состояние *1*).

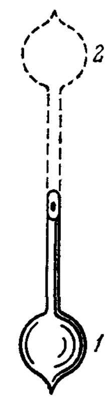

Рис. 1.1. Устойчивое (*1*) и неустойчивое (*2*) равновесия физического маятника.

Весьма общая формулировка закона движения механических систем заключена в принципе наименьшего действия Гамильтона. Функция Лагранжа системы, зависящая от обобщенных координат q, скоростей $\dot{q}$ и времени t $L(q, \dot{q}, t)$, удовлетворяет условию

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t)\, dt = \text{мин.} \qquad (1,4)$$

Иными словами, вариация δS равна нулю. Действие S, выражаемое интегралом, минимально (т. е. система движется между двумя наборами координат $q^{(1)}$, $q^{(2)}$ и скоростей $\dot{q}^{(1)}$, $\dot{q}^{(2)}$, отвечающих моментам времени t_1 и t_2, таким образом, чтобы S имело минимальное значение). «Цель механической системы состоит в ее наименьшем действии». Движение системы в этом смысле оптимально.

Но выражение (1,4) эквивалентно уравнениям движения Лагранжа

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0. \qquad (1,5)$$

Функция Лагранжа L равна разности кинетической и потенциальной энергий системы

$$L = \sum_a {}^1/_2 m_a v_a^2 - U(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \ldots), \qquad (1,6)$$

где m_a — масса, $\mathbf{r}_a$ — радиус-вектор, v_a — скорость a-й материальной точки. Уравнения (1,4) и (1,5) можно переписать в виде уравнений движения Ньютона

$$m_a \frac{d^2\mathbf{r}_a}{dt^2} = -\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}_a}. \qquad (1,7)$$

Финалистическое выражение (1,4) сводится к каузальным уравнениям (1,7), описывающим движение как результат действия сил. Другие примеры финалистически формулируемых законов физики: принцип Ферма в оптике, принцип Ле Шателье в термодинамике, правило Ленца в электродинамике. Число таких примеров в сущности неограниченно.

Уравнения движения (1,7) механики обратимы, так как они содержат лишь вторые производные по времени и, следовательно, не изменяются при замене знака времени на противоположный, т. е. при $t \to -t$. Однако эти уравнения имеют решения, отвечающие как устойчивым, так и неустойчивым равновесиям и движениям. Так, оба состояния равновесия маятника, изображенные на рис. 1.1, не противоречат статике. Но состояние *1* устойчиво, а состояние *2* неустойчиво. Малые силы и малые отклонения от начального состояния материальной системы обязательно существуют и возмущают равновесия и движения. В состоянии *1* эти возмущения несущественны, напротив, состояние *2* резко изменяется под их влиянием. Равновесия и движения, слабо изменяющиеся при возмущениях, устойчивы, сильно изменяющиеся — неустойчивы.

Но что означает «слабо» и «сильно»? Общая задача об устойчивости движения была решена в классической работе Ляпунова в 1892 г., сформулировавшего критерии устойчивости [15] (см. также [16]). *Если при сколь угодно малом* (но не равном нулю) возмущении величина рассматриваемой характеристики в возмущенном движении будет со временем все более и более отклоняться от ее величины в невозмущенном движении, то последнее неустойчиво по отношению к этой характеристике. Движение маятника при его малых отклонениях от положения равновесия *1* описывается уравнением

$$\ddot{\varphi} + \omega^2\varphi = 0, \tag{1,8}$$

где φ — угол отклонения, ω — круговая частота колебаний, равная

$$\omega = 2\pi\sqrt{g/l}, \tag{1,9}$$

g — ускорение силы тяжести, l — длина маятника. Решение уравнения (1,8):

$$\varphi \equiv x = A\cos(\omega t + \alpha), \quad \dot{\varphi} \equiv y = A\omega\sin(\omega t + \alpha) \tag{1,10}$$

(A — амплитуда колебания, $A\cos\alpha$ — начальное отклонение). Исключая время t из выражений для x и y, получаем набор траекторий движения на фазовой плоскости x, y, отличающихся друг от друга значениями A:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{A^2\omega^2} = 1. \tag{1,11}$$

Это уравнения эллипсов (рис. 1.2). Уравнение движения на фазовой плоскости, имеющее вид

$$\frac{dy}{dx} = -\omega^2 \frac{x}{y}, \tag{1,12}$$

есть уравнение интегральной кривой с особой точкой $x = 0$, $y = 0$, через которую ни одна интегральная кривая не проходит. Вблизи нее интегральные кривые замкнуты и не имеют особенностей. Такая точка называется центром. Движения вокруг центра — периодические.

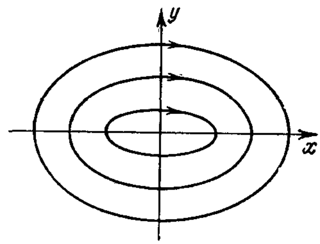

Рис. 1.2. Фазовые траектории маятника.

Состояние равновесия устойчиво, если для любой заданной области ε допустимых отклонений от состояния равновесия имеется область $\delta(\varepsilon)$, окружающая это состояние и обладающая тем свойством, что ни одно движение, начинающееся внутри δ, никогда не достигнет границы области ε. И, наоборот, состояние равновесия неустойчиво, если имеется область ε, для которой область $\delta(\varepsilon)$ не существует. В нашем примере условие устойчивости колебаний маятника имеет вид:

если для $t = 0$

$$|x(0)| < \delta \quad \text{и} \quad |y(0)| < \delta', \tag{1,13}$$

то для $0 < t < \infty$

$$|x(t)| < \varepsilon \quad \text{и} \quad |y(t) < \varepsilon'. \tag{1,14}$$

Особая точка типа центра соответствует устойчивому состоянию равновесия [17].

Вопросы устойчивости важны в теории автоматического регулирования, в теории колебательных движений и т. д. Очевидно, что проблема устойчивости динамического состояния биологической системы неизбежно возникает и в биофизике.

Идеальные уравнения механики обратимы, тогда как теория устойчивости встречается с необратимостью. Состояние устойчивого движения сохраняется при малых возмущениях. Возмущение не может его изменить. Отсюда следует финалистическая формулировка — система стремится сохранить свое состояние. Напротив, неустойчивое состояние при малом возмущении изменяется необратимо.

В общем случае состояние физической системы характеризуется не механическими, но термодинамическими условиями. Второе начало термодинамики — стремление энтропии изолированной системы к максимуму (финалистическая формулировка) — можно записать в вариационной форме:

$$(\delta S)_{eq} = 0, \tag{1,15}$$

где индекс eq относится к состоянию равновесия. Очевидно, что термодинамическая трактовка биологических явлений — прежде всего процессов развития — должна исходить из рассмотрения необратимых переходов в открытых системах. Финализм связан с неустойчивостью соответствующих состояний. Главные трудности определяются не статическим, но динамическим, «машинным», характером биологических систем. Это, однако, никоим образом не означает противоречия между биологией и физикой.

§ 1.3. ТЕРМОДИНАМИКА И БИОЛОГИЯ

Физическое рассмотрение любых систем — в том числе и живых — начинается с их феноменологического, термодинамического описания. Дальнейшее исследование дает такому описанию атомно-молекулярное содержание.

Главные термодинамические особенности живой системы состоят в том, что такие системы открыты и неравновесны. Соответственно необходима не термостатика, но термодинамика в истинном смысле этого слова, учитывающая изменения термодинамических величин во времени. Неравновесная термодинамика смыкается с кинетикой. Здесь мы ограничимся некоторыми основными положениями.

Общее изменение энтропии dS в открытой неравновесной системе складывается из изменения энтропии в результате ее продукции внутри системы d_iS и потока энтропии из внешней среды в систему и из системы в среду d_eS

$$dS = d_iS + d_eS. \tag{1,16}$$

Построим мысленно адиабатическую оболочку вокруг системы. Тогда $d_eS = 0$ и, согласно второму началу,

$$dS = d_iS > 0. \tag{1,17}$$

Если продукция энтропии определяется химическими реакциями, то

$$d_iS = -\frac{1}{T}\sum_k \mu_k\, dn_k, \tag{1,18}$$

где μ_k — химический потенциал k-й компоненты, dn_k — изменение ее молярного содержания.

Введем координату химической реакции ξ, выражающую степень прохождения реакции, определив ее уравнением

$$dn_k = \nu_k d\xi, \tag{1,19}$$