
ПРОБЛЕМЫ КИБЕРНЕТИКИ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
А. А. ЛЯПУНОВА

ВЫПУСК 2

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1959

В СОСТАВЛЕНИИ И РЕДАКТИРОВАНИИ
ПРИНИМАЛИ УЧАСТИЕ

О. Б. ЛУПАНОВ, Б. Ю. ПИЛЬЧАК, С. В. ЯБЛОНСКИЙ,
Ю. И. ЯНОВ

Сборник статей под редакцией *Алексея Андреевича Ляпунова.*

Редакторы *А. А. Коноплякин* и *М. Л. Смолянский.*

Технический редактор *С. Н. Ахламова.*

Корректор *А. О. Сигал.*

Сдано в набор 14/IV 1959 г. Подписано к печати 31/VII 1959 г. Бумага 70×108^{1/16}.
Физ. печ. л. 20,25. Условн. печ. л. 27,74. Уч.-изд. л. 25,58. Тираж 18 000 экз. Т-06340.
Цена книги 14 руб. 30 коп. Заказ № 961.

Государственное издательство физико-математической литературы
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

16-я типография Московского городского Совнархоза.
Москва, Трехпрудный пер., 9.

О СТАТИСТИЧНОСТИ И ПРИНЦИПЕ УСИЛИТЕЛЯ В БИОЛОГИИ*)

Н. В. ТИМОФЕЕВ-РЕСОВСКИЙ

(СВЕРДЛОВСК) и

Р. Р. РОМПЕ

(БЕРЛИН) **)

О Т Р Е Д А К Ц И И

Одним из важных вопросов кибернетики является изучение циркуляции наследственной информации от поколения к поколению и в процессе онтогенеза. Замечательно то, что при этом происходит далеко идущее изменение природы материальных носителей этой информации.

На уровне взрослого животного, выросшего в определенных условиях, эта информация кодируется его фенотипом. На уровне клетки—ее химизмом. На уровне клеточного ядра или гаметы—набором генов или особенностями строения небольшого числа молекул дезоксирибонуклеиновой кислоты. Следует обратить особое внимание на то, что в начальный момент развития организма индивидуальные особенности отдельных молекул играют определяющую роль в вопросе о формировании макроскопических свойств будущего организма.

Рассмотрение индивидуальных молекул требует учета статистических флуктуаций. При этом, с одной стороны, имеет значение уровень энергии молекулы, так как от этого уровня зависит вероятность перехода молекулы в новое устойчивое состояние, с другой стороны, в случае наличия достаточной энергии, имеет значение вероятность перехода в то или иное индивидуальное состояние.

Для изучения распределения молекул по уровням энергии достаточно методов классической физики. В то же время для суждения о возможности тех или иных индивидуальных переходов имеют значение законы квантовой механики. Наконец, для перекодирования наследственной информации в макроскопические свойства организма необходим специальный физический процесс—механизм «усилителя».

Впервые круг этих явлений подвергался экспериментальному изучению в 30-х годах в работах Н. В. Тимофеева-Ресовского, Ромпе, Дельбрюкка и др. В настоящее время дальнейшие исследования строения наследственной информации и способов ее кодирования в живом организме на биохимическом уровне ведутся Криком, Уотсоном и другими. Однако сводного изложения результатов, полученных в области физической генетики и их взаимодействия с эволюционной биологией в русской литературе до сих пор не было.

Публикуемая ниже работа Н. В. Тимофеева-Ресовского и Р. Р. Ромпе в значительной мере подытоживает комплекс работ, установивших тот рубеж, на котором элементарные биологические акты оказываются одновременно элементарными физическими актами, и проливает значительный свет на строение потоков информации, управляющих онтогенезом, и на те физические процессы, при помощи которых осуществляется перекодирование этой информации.

Таким образом, круг вопросов, рассмотренных в данной статье, представляет существенный интерес для развития современной кибернетики.

В заключение заметим, что изложенная в начале статьи трактовка основных принципов микрофизики встречала серьезные возражения со стороны ряда крупных

*) Доложено 16 XI 1956 г. на семинаре по кибернетике при механико-математическом факультете МГУ. В основу положен ряд соображений, возникших в связи с работой по физическому анализу механизма биологических действий излучений малой плотности; в разработке этих соображений принимал участие ряд наших сотрудников, в особенности же Ф. Меглих. За критический просмотр рукописи выражаем благодарность С. В. Вонсовскому, Г. А. Курсанову и А. А. Ляпунову.

***) Из биофизической лаборатории УФАИ (Свердловск) и Физического института Берлинского университета (ГДР).

физиков, в том числе таких корифеев, как А. Эйнштейн и Л. де Бройль. Однако эта критика касалась не столько самих принципов, сколько их истолкования. Внимательный читатель заметит, что та или другая интерпретация указанных принципов влияет лишь на форму изложения, а не на существо основных идей статьи.

1. Введение

Более четверти века назад Нильс Бор (1931—1933) указал на возможность использования в некоторых областях биологии новых общих принципов современной атомной физики. Эти соображения Н. Бора основывались на двух основных положениях. Во-первых, поскольку в организмах имеют место микрофизические процессы, при их изучении должны быть применены новые принципы атомной физики (в первую очередь здесь имеются в виду явления дополнителности и основанная на них статистичность в протекании отдельных элементарных микрофизических процессов). И, во-вторых, как можно было предполагать на основании общих соображений, в тех случаях, когда в биологии анализ доходит до собственных биологических элементарных структур и явлений, по отношению к ним должно обнаружиться влияние сходных с микрофизикой общих принципов. Как известно, эти идеи Бора оказали большое и плодотворное влияние на развитие современного естествознания.

Несмотря на очевидность подобного рода соображений, они, однако, пока еще практически очень далеки от экспериментальной повседневной работы биологов. Объясняется это главным образом тем, что в биологии только в очень немногих случаях научный анализ и эксперимент затрагивают действительно элементарные структуры и явления. Конечно, *принципы микрофизики могут иметь непосредственное применение только в тех случаях, когда биологические элементарные единицы и явления являются таковыми же в смысле микрофизики.*

Одной из немногих областей биологии, в которой это уже имеет место, является анализ механизма мутационного процесса. В дальнейшем изложении мы поэтому будем касаться преимущественно этой области биологии, тем более, что она является сейчас особенно актуальной в связи с развитием в последнее время некоторых общих идей в области кибернетики (Винер, 1948, Ляпунов, 1957) и созданием первых конкретных теорий строения и дупликации генов (Крик, 1956, Гамов, 1957).

Для того чтобы с самого начала избежать возможных недоразумений и неясностей, необходимо указать на следующее. В дальнейшем будет идти речь о влиянии микрофизики и ее принципов в биологии. Но при этом нельзя ни в коем случае упускать из виду, что живые организмы являются макрофизическими объектами, на которые (поскольку мы их изучаем с физической стороны) распространяются принципы классической макрофизики. Мы прекрасно знаем, что целый ряд биологических процессов протекает в рамках обычных представлений классической физики. Только исходя из этого общего положения, можно ставить дальнейший вопрос о значении микрофизических явлений, статистичности и «принципа усиления» в биологии. Или, другими словами, при рассмотрении вопроса о микрофизических явлениях нельзя забывать макрофизические объекты, в которых они протекают.

2. Некоторые существенные черты микрофизики

Перед дальнейшим рассмотрением собственно биофизической проблематики необходимо вкратце напомнить о некоторых особенностях микрофизики.

Классическая макрофизика занимается, как известно, телами, состоящими из очень большого числа одинаковых элементарных частиц,

и явлениями, в которых суммируются очень большое число одинаковых и при равных условиях протекающих элементарных процессов. В качестве общеизвестного и типичного примера макрофизической закономерности можно привести ньютоновский закон ускорений.

В микрофизике, занимающейся явлениями, связанными с отдельными квантами, электронами или атомами, как раз в связи с тем, что она занимается отдельными физическими элементарными частицами и процессами, господствуют своеобразные закономерности. В качестве типичного примера микрофизического явления можно привести радиоактивный распад, в основе которого лежат скачкообразные статистические явления.

Для того чтобы понятие было дальнейшее, нам, однако, необходимо несколько глубже затронуть эту проблему.

Задачей теоретических естественноисторических исследований является создание моделей или схематических представлений, логические следствия из которых наилучшим образом согласуются с природными явлениями реального внешнего мира. Модели и схематические представления, которые мы создаем и употребляем, строятся из понятий, вытекающих из прежнего опыта; именно поэтому они обладают вполне обозримыми и точно определенными свойствами. Так как большая часть нашего опыта в области физики связана с механикой твердых тел, то большинство наших понятий в макрофизике заимствовано из схематических представлений этой области; поэтому они и обладают свойствами, хорошо согласующимися со всем нашим опытом в области макрофизических явлений.

Совершенно новая ситуация создалась, однако, с появлением квантовой теории. Исследования в области физики атомов показали, что в пределах размеров порядка атомных величин мы часто встречаемся со свойствами явлений внешнего мира (или, вернее, соответствующих им понятий), которые никогда не наблюдаются в области макрофизики. Эти особенности микрофизических явлений объединяются обычно в понятие «двойственной природы», или «дуалитета», этих явлений. Под этим разумеется следующее. Описание всех свойств физического явления, протекающего в масштабах атомных величин, требует построения двух, макрофизически взаимно друг друга исключаящих, схематических представлений или моделей. В макроскопическом мире вещь или явление никогда не может обладать каким-либо свойством и одновременно с этим «комплементарным» или дополнительным к нему другим; в микрофизическом же мире это положение об исключении двух взаимно дополнительных свойств не имеет более силы. Макрофизическое явление может, например, быть либо корпускулой, либо волной: летящий снаряд является корпускулой, а производимый им в воздухе процесс является волной. Свойства волны и корпускулы являются взаимно исключаящими друг друга и дополнительными в пределах любых разумных макрофизических понятий. В области же элементарных физических единиц дело обстоит иначе: одно и то же тело или явление вполне может обладать как корпускулярными, так и волновыми свойствами. Конечно, дополнительные свойства атомов не могут быть обнаружены одновременно; появление того или другого из них зависит от характера поставленного эксперимента или, вернее, от употребляемой в эксперименте аппаратуры. Этот принцип двойственности, или дуалитета, атомных явлений основан на опыте микрофизики. Из этого принципа вытекает, что тела и явления атомной физики не могут быть точно описаны в понятиях, вытекающих из опыта макрофизики. Тела и явления микрофизики только частично обладают свойствами, наблюдаемыми нами на телах макрофизики; однако, поскольку через макропроявления мы можем исследовать свойства явления в области атомных величин, классическая физика сохраняет свою полную значимость. Принцип дуалитета, таким

образом, только указывает на максимум того, что вообще может быть установлено по отношению к объекту атомной физики в тех случаях, когда путь классической физики оказывается неприменимым.

Дуалитет в смысле квантовой механики стоит в связи с принципом неопределенности. Этот же последний вносит с собой неизвестную классической физике статистичность. В известном смысле подобная ситуация не является вполне новой и неожиданной и для классической физики. Развитие статистической термодинамики и теория флуктуаций показали, что уже в рамках классической физики могут встретиться случаи статистической закономерности. Классическая статистическая термодинамика учит, что все физические системы, состоящие из многих элементарных частиц, находятся в состоянии пространственных и временных флуктуаций, определяющих данную систему параметров (например, энергии, импульса, плотности и т. д.). Осуществление определенного количественного значения одного из этих параметров, отклоняющегося от средней величины, характерной для данной системы, может быть предсказано только с определенной долей вероятности.

Существование термодинамических флуктуаций можно было бы, на первый взгляд, попытаться объяснить вполне тривиально атомной структурой материи, ибо несомненно, что атомная структура связана с чуждой классической физике природой квантовых сил. Но на самом деле роль квантовой механики в описании этих явлений оказывается значительно более глубокой.

Дело в следующем. В классической физике физическая система поддается описанию при помощи дифференциальных уравнений, с помощью которых, при точном знании исходных величин, может быть однозначно и точно определено состояние данной системы в любой момент времени. В дальнейшем мы под отличительным принципом системы (в макрофизике) будем понимать только указанную возможность точного описания ее состояния в любой момент времени. Упомянутая выше неопределенность явлений флуктуации параметров в классической статистическо-динамической системе хотя и противопоставляется только что сформулированному принципу, но не находится в противоречии с ним, а лишь практически ограничивает его действия: если известна только вероятность тех или иных значений исходных величин, то, конечно, и состояние системы может быть определено лишь с некоторой вероятностью. Существование принципа неопределенности в микрофизике показывает, что в природных явлениях имеется определенный порог неточности исходных данных. В силу этого состояние микрофизических объектов может быть вычислено только с *ограниченной* точностью, благодаря чему в микрофизике придается определенное значение некоторому вероятностному закону.

Необходимость введения статистических принципов в микрофизике связана, с одной стороны, с открытием новых качеств природных явлений в области атомных величин, а с другой—с открытием новых общих принципов в физике. Эта ситуация в настоящее время хорошо известна и во всех деталях разработана в соответствующей специальной литературе, на которую мы и можем теперь сослаться (де Бройль, 1937, 1941; Эддингтон, 1935; Гейзенберг, 1934).

Таким образом, в области физических явлений мы встречаемся с двумя родами статистичности: с «классически-термодинамической» и с «принципиально-квантовой» статистичностью. Надо отметить, что в физике, как известно, они практически редко дают себя знать. Этим, между прочим, объясняется и то, что так долго и с таким большим успехом могла находить неограниченное применение указанная выше классическая возможность точного описания макрофизической системы. Это связано с тем,

что относительные отклонения от средних величин уменьшаются с возрастанием числа элементарных частиц, участвующих в физическом процессе (закон больших чисел). Например, излучение отдельного атома происходит, по теории квантов, в заранее не определимом направлении; излучение же большого количества одинаковых атомов суммируется в сферическую симметрию, при которой все направления равнозначны. Квантовая статистичность в этом случае, таким образом, исчезает по «принципу корреспонденции» (или «соответствия») с возрастанием числа частиц. Таким же образом дело обстоит и во всех других случаях квантовой статистичности: она проявляется лишь тогда, когда наше внимание концентрируется на отдельных элементарных частицах или явлениях. То же самое, по существу, касается и классически-термодинамических флуктуаций. Кинетика химических реакций и физическая химия могут в значительной мере строиться без учета явлений статистичности; только в особых случаях, аналогичных наблюдению броуновских молекулярных движений, статистичность классической термодинамики дает себя знать; но и здесь обычно при достаточном числе элементарных частиц отклонения от средней величины сравнительно невелики.

Мы пришли, таким образом, к следующим, важным для последующего изложения, заключениям. В макрофизике явления могут быть описаны вполне определенно и однозначно. В отличие от этого, для индивидуальных микрофизических явлений типичен принципиальный дуалитет, на котором основывается принципиальная же квантовая «статистичность» явлений и процессов, происходящих при участии отдельных физических элементарных частиц. Наряду с этим мы установили, что и в рамках понятий классической макрофизики может иметь место классическая статистичность в тех случаях, когда статистические (например, термодинамические) процессы протекают при участии недостаточного числа частиц.

3. Различие между объектами в физике и биологии

Для дальнейших рассуждений существенно отдавать себе полный отчет относительно различий между объектами физики и биологии, а также между условиями физического и биологического эксперимента. В физике мы можем с полной уверенностью утверждать, что все атомы определенного изотопа действительно и во всех отношениях, связанных с их изучением, вполне идентичны. Далее можно с такой же уверенностью утверждать, что точно определяемые объекты физики неизменны во времени, т. е. что, например, атом натрия в текущем году обладает всеми теми же свойствами, какими обладал натрий «испокон веков». Наконец, в физике мы располагаем практически бесконечным числом подобных идентичных и константных элементарных частиц. Это имеет особенно большое значение при изучении любых статистических явлений.

Биологические же объекты даны нам в форме комплексных и иерархически-архитектонических, исторически обусловленных структур: индивидуумов. Для биологических индивидуумов характерна комплексная природа и временная взаимообусловленность протекающих в них реакций. Далее для них характерна ограниченная жизнеспособность; и даже за время своей индивидуальной жизни они подвергаются различным существенным изменениям. Наконец, по сравнению с объектами физики число биологических объектов сравнительно очень ограничено; в особенности таких, которые хотя бы в отношении нескольких признаков могли бы считаться идентичными.

Кроме того, в области биологии следует различать два рода явлений. С одной стороны, мы имеем дело с явлениями, протекающими и отражающими

мися в жизни отдельного индивидуума, т. е. с онтогенетическими процессами. С другой стороны, мы встречаемся с элементарными явлениями и процессами, которые практически не затрагивают физиологического и морфологического состояния индивидуума, в котором они возникли, но которые влекут за собой явные макрофизические изменения в цепи его потомков, т. е. мы имеем здесь дело с процессами, протекающими в филогенетическом плане. Мы должны, таким образом, в биологических явлениях до известной степени различать онтогенетический и филогенетический план. Само собой разумеется, что нельзя упускать из виду наиболее характерную особенность живых организмов, а именно их способность к размножению.

Еще в большей степени проявляется различие между физическими и биологическими элементарными частицами и явлениями по отношению к условиям экспериментирования с ними.

Элементарные частицы физики, смотря по постановке вопроса, определяются как атом, атомное ядро, элементарная частица, квант. Они образуют лишь сравнительно небольшое число архитектурных структур высшего порядка, к тому же в принципе лишь мало друг от друга отличных.

Биологические же элементарные частицы и явления значительно труднее точно определить, и в связи с иерархически-архитектонической структурой биологических индивидуумов их принципиальное разнообразие больше, чем в физике. Далее, они значительно крупнее, чем элементарные частицы в области физических явлений; в большинстве случаев элементарные биологические явления связаны с крупными молекулами или мицеллами. Они обладают способностью конвариантно репродуцироваться либо, также конвариантно или в определенной форме, быть репродуцированными содержащей их биологической архитектурной структурой высшего порядка (например, клеткой). Они, далее, способны прерывисто варьировать (например, мутации генов); при этом ряд таких скачкообразных вариаций благодаря типичной для биологических индивидуумов способности к размножению может дать начало целой цепи соответственно измененных потомков. Кроме того, в большинстве случаев биологические частицы входят в состав структур высшего порядка (например, клеток или многоклеточных индивидуумов) в различных комбинациях; при этом отнюдь не безразлично, в каких комбинациях находятся отдельные элементарные частицы в таких случаях. Благодаря этому число идентичных и тем самым точно и строго сравнимых элементарных частиц, которые можно было бы положить в основу установления статистических закономерностей, еще более понижается.

Мы видим, таким образом, что между объектами физики и биологии наблюдаются существенные и частично принципиальные отличия, с которыми приходится считаться при всех дальнейших рассуждениях.

4. Плюралитет, статистичность и принцип усилителя в биологии

Для микрофизики, как мы видим, характерен дуалитет основных явлений, вызванный наличием у элементарных частиц дополнительных свойств. Мы должны теперь разобраться в том, каково значение новых принципов квантовой механики для интересующих нас здесь биологических проблем.

Надо ожидать, что как раз в области элементарных биологических процессов влияние экспериментального вмешательства должно сильно сказываться; вмешательство физических приемов исследования, несомненно, должно модифицировать элементарные биологические частицы и явления. Поэтому в области элементарных биологических явлений мы

встречаемся с теми же затруднениями, что и в атомной физике. Надо выяснять, к каким следствиям это ведет.

Прежде всего мы должны рассчитывать встретиться в области биологических элементарных явлений с тем же дуалитетом, как и в квантовой физике, поскольку биологические элементарные частицы часто являются таковыми же в физическом смысле; а ряд биологических элементарных частиц и явлений, несмотря на их сравнительно большую величину (большие молекулы), несомненно, относится к области микрофизики.

Далее, надо считаться с тем, что, так же как мы должны использовать два различных, дополнительных представления для полного описания атомных явлений, для описания жизненного процесса мы должны будем использовать две или более моделей. Применение лишь одной, именно физической модели, показывает только физико-химическую сторону биологического процесса, оставляя в стороне, например, историческую. Благодаря этому чисто биологическому дуалитету, в биологии в общей сложности надо считаться с наличием плюралитета явлений. Это становится еще яснее из следующего. Физико-химические закономерности, насколько мы можем проверить, имеют универсальное значение, в том числе и в живой природе. При их изучении мы, однако, не можем одновременно наблюдать биологический процесс в его целом и неизменном виде; в особенности, если дело касается изучения элементарных биологических частиц и явлений. Таким образом, мы принуждены физико-химическое изучение биологических явлений и нормальный общий ход жизненного процесса рассматривать как два дополнительных представления, подобно корпускулярной и волновой моделям микрофизических явлений. Эта биологическая дополнительность не стоит ни в какой связи с виталистическими представлениями; при более глубоком анализе, которого мы здесь касаться не можем, она даже в корне исключает возможность построения виталистических теорий жизненного процесса. Так как в физико-химическом изучении биологического процесса уже содержится микрофизический дуалитет, то прибавление биологической дополнительности ведет к представлению об общем плюралитете в биологии. Надо заметить при этом, что подобные рассуждения пока протекают в сравнительно примитивном плане, основанном на макрофизических представлениях, по которым, например, к определенному понятию обычно создается только одно ему дополнительное; теоретически же вполне возможно, что эта макрофизическая трактовка дополнительности должна быть расширена, как это, например, имеет место уже в математике (вопрос о принципе исключенного третьего). На практике, однако, плюралитет будет обычно упрощаться и сводиться к дуалитету: в тех случаях, когда мы имеем дело с крупными макрофизическими телами, по отношению к которым дуалитет квантовой физики практически сводится к нулю, а также в тех случаях, в которых мы концентрируем свое внимание на физико-химических закономерностях, оставляя в стороне биологическую дополнительность. Наконец, необходимо указать еще на две особенности биологического плюралитета. Физический дуалитет свойствен всем телам, распространяясь и на макрофизические; но здесь он становится практически незаметным благодаря большому числу идентичных частиц, подлежащих рассмотрению. Биологический же принцип дуалитета распространяется отнюдь не на все тела, а, насколько мы можем судить на основании имеющихся данных, он связан с определенными архитектурно-морфологическими предпосылками, имеющимися, например, налицо в живых клетках; распространяются ли эти предпосылки и на некоторые части клеток—решить пока за неимением данных невозможно, и мы лично в этом сомневаемся. С другой стороны, необходимо указать на то, что в то время, как физический дуалитет при переходе из микрофизики

в макрофизику практически сходит на нет, с биологическим плюралитетом этого, по-видимому, не происходит, ввиду ограниченного числа идентичных единиц.

Мы можем рассмотреть вопрос о принципиальных возможностях проявления статистичности в области биологии.

В физике, как мы видели выше, имеются два рода статистичности. Во-первых, мы имеем здесь принципиальную квантовую статистичность, обусловленную дуалитетом элементарных физических явлений; во-вторых, на основе ненасыщенной статистики термодинамических явлений может практически проявляться классическая статистичность.

В биологии дело обстоит несколько сложнее. В физическом анализе биологических явлений следует ожидать проявления обеих вышеупомянутых форм физической статистичности наряду со смешанными случаями. В связи с биологическим плюралитетом надо, кроме того, теоретически ожидать возможности проявления чисто биологической статистичности, эквивалентной квантовой статистичности в микрофизике и основанной на чисто биологическом дуалитете явлений; практически, однако, эта статистичность не будет играть никакой роли во всех случаях, в которых мы концентрируем свое внимание на физико-химических закономерностях. Наконец, особое значение в биологии должна иметь чисто классическая статистичность, эквивалентная классически-термодинамической в физике и основанная на недостаточном числе идентичных биологических объектов в природе. Все виды статистичности в биологии могут, кроме того, проявляться как в онтогенетическом, так и в филогенетическом плане.

Остановимся несколько подробнее на вышесказанном.

С точки зрения статистических закономерностей число идентичных единиц в биологических опытах надо считать незначительным. Это ведет к тому, что в биологии, даже в тех случаях, когда математическое ожидание числа прореагировавших элементарных частиц приближается к единице и когда, кроме того, мы имеем еще дело с одновременным протеканием нескольких конкурирующих реакций, результат опыта является практически неопределенным и не может быть предсказан с достаточной вероятностью. Эта неопределенность распространяется при физическом анализе биологических явлений на обе формы физических статистичностей. На первый взгляд подобная ситуация кажется своеобразной; но нельзя забывать, что и в физике мы встречаемся с подобным же положением вещей, если в опыте внимание концентрируется, например, на судьбе отдельных атомов, находящихся под каким-нибудь внешним воздействием: и здесь результат опыта является неопределенным. Однако в физике в большинстве случаев мы практически имеем возможность исследовать достаточное количество идентичных частиц одновременно или друг за другом, что в биологии обычно представляется невозможным; но с подобными положениями мы несомненно встретимся и в кинетике физико-химических реакций, например в реакциях, протекающих в сильно разреженных газах или в больших комплексных белковых молекулах.

Особенно существенное значение имеет для нас вопрос о том, в каких случаях при физико-химическом изучении биологических процессов мы наряду с классически-термодинамической статистичностью можем рассчитывать встретиться с принципиальной квантовой. По этому поводу можно сказать следующее. Мы, несомненно, будем иметь дело лишь с классически-термодинамической статистичностью во всех тех случаях, в которых изучаемые единицы не являются физически элементарными; например, если изучаются клетки или клеточные ядра как таковые. Но и в тех случаях, когда изучаемые биологические единицы являются элементарными с точки зрения физики (например, гены, вирусы или антитела), классиче-

ски-термодинамическая статистичность также может иметь место, она может даже затемнять одновременно наличную квантовую. Рассмотрим в качестве примера химическую реакцию, протекающую по правилу Аррениуса — Вант-Гоффа, при которой скорость реакции зависит от температуры. Скорость реакции при этом определяется статистически термодинамической вероятностью появления энергии активации данной реакции и, с другой стороны, вероятностью перехода из одного состояния в другое (или поперечным сечением удара), определяемой квантовой механикой. При этом надо различать два случая. Если энергия активации мала по отношению к температуре, то достаточная для активации энергия будет появляться достаточно часто; частота действительного реагирования будет тогда практически всецело зависеть от квантовой вероятности перехода из одного состояния в другое. В этом случае решающее значение имеет, таким образом, вероятность, основанная на квантовой теории, и в связи с этим следует ожидать соответственного проявления принципиальной квантовой статистичности. Если же, наоборот, энергия активации по отношению к температуре высока, то ее порог будет достигаться только сравнительно очень редко; если в то же время вероятность перехода из одного состояния в другое тоже высока, то можно принять, что наступление реакции практически зависит от энергии активации. В этих случаях решающую роль будет играть классически-термодинамическая статистичность, хотя каждая отдельная реакция определенной молекулы остается элементарным актом в смысле теории квантов. Отношение между биологическими элементарными единицами носит такой характер, что следует ожидать реализации и тех и других крайних случаев со всеми переходами между ними. С одной стороны, несомненно существуют реакции, связанные с колебаниями термического равновесия между биологической частицей и ее средой. В этих случаях классически-термодинамическая статистичность будет превышать и заглушать принципиально-квантовую. С другой стороны, имеются процессы, в которых участвует очень небольшое число частиц; сюда относится, например, случай взаимодействия между элементарными биологическими частицами и какими-либо излучениями небольшой плотности (рентгеновские лучи, альфа-, бета- и гамма-излучения, нейтроны, протоны и т. д.); сюда же, вероятно, относятся многие случаи действия ядов (именно те, в которых действие сводится к случайному «попаданию» отдельных молекул яда в какие-нибудь существенные элементарные биологические структуры). В этих случаях, как и всюду, где элементарные биологические процессы вызываются микрофизическими факторами малой плотности, следует ожидать доминирующего значения принципиально-квантовой статистичности. При этом совершенно безразлично, локализуется ли причина статистичности в самих биологических элементарных частицах или во влияющих на них факторах, так как интересующее нас конечное явление является следствием взаимодействия тех и других.

В конце этой главы мы должны еще вкратце затронуть вопрос о значении принципа усилителя в биологии.

Процессы усиления в тривиальном смысле этого слова, если их определить очень общо (т. е. что они являются усилением первичных, частично микрофизических явлений до явно макрофизических, ясно отличимых следствий или конечных признаков), встречаются в биологии очень часто. Это вполне понятно, если вспомнить, что особенно характерным для биологического материала является рост и связанный с ним онтогенез, а также размножение и связанный с ним филогенез.

Собственно интересным, основным ядром проблемы о принципе усилителя в области биологии является вопрос о том, в какой мере статисти-

ческие исходные единичные явления усиливаются до макрофизических эффектов (которые, таким образом, являются также в основе своей статистическими) и в какой степени такие процессы играют роль в управлении развитии онтогенеза и филогенеза. Несомненно, значительная часть тривиальных биологических явлений усиления может быть вполне удовлетворительно описана чисто классически, так же как, например, усилитель высокой частоты в технике; несомненно, и здесь встречаются колебания и отклонения от средней, ведущие к некоторой статистичности, но существенной роли они не играют. С другой стороны, поскольку мы должны считаться с частичной статистичностью элементарных биологических явлений, мы должны признать статистичность и ряда усиленных конечных макрофизических эффектов; если мы, например, будем облучать гамма-лучами ряд макрофизически одинаковых индивидуумов, то невозможно предсказать, в каком из этих индивидуумов возникнет определенная мутация, которая в свою очередь может послужить исходным микрофизическим явлением для целой цепи макрофизических следствий—потомков; это будет в полном смысле слова случайным явлением.

Насколько велика роль таких первично-случайных и усиленных, регулирующих биологических процессов в жизни организмов, мы пока еще судить не можем, ибо наши знания об элементарных биологических явлениях, особенно в онтогенетическом плане, еще очень отрывочны и недостаточны. Поэтому мы считаем дискуссии на эту тему в слишком общей форме пока мало плодотворными; с другой стороны, конкретизированные дискуссии, ведущие к поискам биологически-элементарных структур и явлений и их точному физическому анализу, являются, несомненно, весьма полезными для дальнейшего развития исследовательской работы.

5. Роль статистичности в мутационном процессе и в филогенезе

Теперь мы попытаемся рассмотреть подробнее роль статистичности в биологическом процессе на определенном конкретном примере, для которого уже сейчас имеются более или менее достаточные данные. Мы уже ранее упоминали, что в биологии до сих пор только в очень немногих случаях анализ продвинулся до действительно элементарных структур и явлений. Одним из этих немногих случаев является мутационный процесс (появление мутаций генов, локализованных в хромосомах клеточных ядер); мы поэтому сейчас рассмотрим, в какой мере и в каких формах статистичность играет роль в мутационном процессе, а в связи с этим— и в филогенезе.

Вполне ясно положение в области радиационной генетики, т. е. в тех опытах, в которых мутации вызываются излучениями малой плотности (Тимофеев-Ресовский, 1931, 1934, 1937, 1940). Здесь дело идет о взаимодействии между излучениями малой плотности и определенными элементарными биологическими единицами (генами), причем действующий извне фактор (излучение) и реагирующие единицы (гены) являются элементарными образованиями в смысле микрофизики. В связи с приведенными в предыдущей главе соображениями, здесь определенно должна иметь место принципиально-квантовая статистичность отдельных мутационных актов, так как мы здесь всегда имеем дело с взаимодействием сравнительно немногих элементарных единиц, а не тел с достаточной в макрофизическом смысле массой. Мы, следовательно, не можем точно и однозначно предсказать, произойдет ли вообще, и если да, то какая именно, мутация в совершенно определенном индивидуальном гене после соответствующего облучения.

Такие процессы, как вызывание мутаций рентгеновскими или подобными лучами, происходят, однако, в природе сравнительно редко. Мы поэтому рассмотрим вопрос о так называемых «спонтанных» мутациях, возникающих у всех живых организмов без нашего экспериментального вмешательства. Соответствующие опыты и расчеты показали (Тимофеев-Ресовский, 1931, 1935, 1940; Раевский и Тимофеев-Ресовский, 1939; Тимофеев-Ресовский и Циммер, 1941), что явление спонтанных мутаций не связано с космическими лучами или какими-либо другими сходными факторами, которые можно было бы назвать дискретными процессами в смысле квантовой физики; расчеты показали, что не более одной тысячной всех мутаций (спонтанных) может быть обусловлено воздействием «природных ионизирующих излучений». С другой стороны, процент спонтанных мутаций пропорционален времени и зависит от температуры, следуя правилу Аррениуса—Вант-Гоффа. Мы имеем здесь, таким образом, дело с мутациями, вызываемыми термическими флуктуациями. И в этом случае, несомненно, статистичность играет известную роль. Но эта статистичность не обязательно должна быть принципиально-квантовой, ибо, как было показано в предыдущей главе, в данном случае она должна быть замаскирована классически-термодинамической (так как в случае спонтанных мутаций энергия активации, по-видимому, сравнительно высока по отношению к температуре). С другой стороны, у нас нет никаких данных предполагать, что квантовые вероятности перехода из одного состояния в другое, с которыми связаны изменения, ведущие к определенной мутации, в данном случае особенно малы. В таком случае частота возникновения спонтанных мутаций в значительной степени должна зависеть от статистически-термодинамической частоты появления энергии активации, и, следовательно, классически-термодинамическая статистичность должна здесь играть соответственно большую роль. Но наряду с частотой реакций большое значение имеет и качество реакции (т. е. в данном случае характер возникающих мутаций). Это же в свою очередь зависит от того, какова величина энергии активаций различных конкурирующих процессов и их поперечное сечение ударов, т. е. от типично квантовых величин. В этом смысле и спонтанный мутационный процесс подлежит воздействию принципиально-квантовой статистичности. Это может быть кратко выражено так, что в спонтанном мутационном процессе самый факт мутирования определяется по преимуществу классически-термодинамическими, а то, что при этом получается, — квантовыми факторами. В спонтанном мутационном процессе, таким образом, известную роль должна играть как классически-термодинамическая, так и квантовая статистичность. И в некоторых других биологических процессах, по-видимому, придется встретиться с подобными смешанными случаями, в которых термические флуктуации (в смысле случайного достижения оптимального состояния) и квантовый механизм реакции действуют совместно как факторы, вызывающие интересующие нас реакции.

Спонтанные мутации образуют, как известно, элементарный материал для эволюционного процесса, служа, так сказать, кирпичиками (элементарными единицами наследственной изменчивости) для процессов видовой дифференциации и явлений адаптации (Бауэр и Тимофеев-Ресовский, 1943; Добржанский, 1937; Тимофеев-Ресовский, 1939, 1940). Мы выше установили, что мутационный процесс является в основе своей случайным. Можно сказать, что в связи с этим и элементарный материал эволюционного процесса является в основе своей случайным. Интересно, что мы, таким образом, совершенно иными и новыми путями возвращаемся к классическому утверждению Дарвина о случайности и ненаправленности вариаций, служащих материалом для естественного отбора и связанного с ним эволюционного процесса. При ближайшем специальном рассмотрении

будет также, несомненно, установлено, что и в протекании самого эволюционного процесса, связанного с действием ряда элементарных эволюционных факторов (волны жизни и связанные с ними генетико-автоматические процессы, изоляция, естественный отбор), биологическая статистическая начальных данных играет значительную роль в связи с недостаточным для осуществления статистических закономерностей числом идентичных объектов (Четвериков, 1926; Дубинин, 1931; Бауэр и Тимофеев-Ресовский, 1943; Тимофеев-Ресовский, 1939, 1940; Фишер, 1930); но здесь мы не будем подробнее касаться этих вопросов, так как рассмотрению их посвящена отдельная статья.

В заключение этой главы мы теперь вкратце рассмотрим некоторые общие положения, связанные с отношением квантовых закономерностей физики к некоторым вопросам биологии.

Ген может, как известно, в результате какого-либо энергетического воздействия мутировать, т. е. изменять свою структуру. С физической точки зрения такая мутация заключается, на основании наших современных данных, по-видимому, в переходе одной определенной стабильной молекулярной структуры в другую. Биологически при этом один или несколько определенных признаков организма заменяются другими. Число аллелей определенного гена (т. е. различных, возникших в результате мутаций форм одного и того же гена) может, как известно, быть сравнительно очень велико; но число это в каждом отдельном случае вполне определено. Наследственная изменчивость, несомненно, дискретна (прерывиста) и не образует континуума (непрерывного ряда); наблюдается только конечное, ограниченное число наследственных вариаций. Это обстоятельство указывает на то, что в основе различных аллелей лежат различные состояния образующих их гигантских молекул. Это положение подкрепляется также тем, что процент спонтанных мутаций следует правилу Аррениуса—Вант-Гоффа и что самый процесс мутации, следовательно, является переходом от одного определенного квантового состояния к другому. Конечному и дискретному числу состояний молекул должно, таким образом, соответствовать такое же число определенных аллелей; так как число возможных структурных изменений определенной молекулы конечно и ограничено, то таковым должно быть и число аллелей. Практически число аллелей даже сравнительно очень невелико, что, по-видимому, связано как со свойствами образующих их молекул (приобретенными в результате длительного естественного отбора), так и с ограничением вариационных возможностей летальным эффектом и потерей способности к конвариантной редупликации. Наблюдаемая часто непрерывная изменчивость признаков должна поэтому быть связана с модифицирующим влиянием среды; таким образом, и с физической точки зрения становится понятным различие между мутационной и модификационной изменчивостью.

Только что сказанное приводит к заключению, что, несмотря на ранее нами подчеркнутую историчность и индивидуальность биологических объектов (связанную со сравнительно незначительным числом индивидуумов по сравнению с числом возможных комбинаций элементарных единиц), они в то же время в большей степени, чем это можно было бы ожидать на первый взгляд, оказываются сравнимыми с объектами физики. Может быть, с этим обстоятельством связана вообще возможность количественного биофизического изучения биологических явлений. В этом можно также усмотреть некоторую параллель с квантовыми состояниями атома, и тем самым с основами всей химии. Наличие дискретных групп среди живых организмов во всяком случае является своеобразным, грубым и в то же время ярким отражением квантовой природы структуры вещества.

6. Заключительные замечания

В заключение мы можем высказать несколько общих замечаний, связанных со всем вышеизложенным.

Мы видели, что, несомненно, в ряде элементарных биологических явлений статистичность должна играть большую роль. Мы также постарались показать, что в области биологии надо ожидать наличия нескольких различных форм статистичности. В то же время нами было указано, что до сих пор в связи с недостаточной изученностью биологических элементарных явлений и структур мы пока еще совершенно не можем судить об относительной роли статистичности, особенно в регуляционных онтогенетических процессах. Но на основании, правда отдельных, фрагментарных данных, как будто бы намечается довольно любопытное общее явление. Оно заключается в том, что, по-видимому, у живых организмов имеются специальные приспособления, исключающие «чрезмерную чувствительность» к отдельным случайным элементарным актам. Этим, по всей вероятности, объясняется трудность экспериментального обнаружения отдельных элементарных биологических явлений и влияний отдельных квантовых факторов на живые организмы. Любопытно, например, что человеческий глаз, по-видимому, способен регистрировать воздействие отдельных квантов света; но для того, чтобы в центральном зрении сознательно улавливать световые явления, необходимо суммарное действие довольно значительного числа квантов. Подобные возникшие в результате естественного отбора приспособления имеют целью изолировать индивидуум от излишних случайных, «мешающих» ему и нарушающих координированное развитие внутренних микрофизических процессов внешних воздействий. Но мы особенно подчеркиваем, что это предположение подлежит дальнейшей проверке.

Роль статистичности в мутационном процессе и в связи с этим в филогенезе была нами с достаточной ясностью показана выше. Следует, может быть, еще подчеркнуть, что нормальная для генов стабильность, а в связи с этим и относительная роль статистичности, подобно всем другим свойствам организмов, регулируется историческим фактором естественного отбора.

Что касается описанного нами в одном из предыдущих параграфов биологического плюралитета, то можно дополнительно сделать следующие замечания.

Примером дуальных подходов к изучению биологических объектов может служить, с одной стороны, изучение истории развития индивидуума, а с другой стороны—изучение общих черт сходства и различия для большой группы элементарных объектов, из которых могли бы развиваться индивидуумы (при этом изучении соответствующие элементарные объекты приходится уничтожать). Последнее позволяет нам с помощью физико-химических представлений и понятий глубоко проникать в биологические процессы; понятие же исторической индивидуальности объектов необходимо для конкретного описания самого хода жизненного процесса на Земле. Оба эти понятия не исключают друг друга, но совместно необходимы для полного описания биологических феноменов. Они в этом смысле также дополнительны друг к другу, как и понятия корпускулы и волны в квантовой физике; описание физических процессов с помощью только одного из этих понятий будет неполным. Так же не полно будет представление о биологических явлениях, если мы объекты биологии будем рассматривать либо только как исторические индивидуальности, либо только в качестве внеиндивидуальных и идентичных вариантов определенных групп.

Наличие конечного числа дискретных групп в биологии является, как выше было указано, своеобразным отражением квантовой природы явлений нашего мира. Эта ситуация не объясняется с помощью одной лишь классической физики; ведь классическая физика была также не в состоянии объяснить соответствующие ситуации в химии; например, только открытием насыщенных состояний электронных оболочек в квантовой физике было объяснено наличие определенных валентностей. По-видимому, роль теории квантов в биологии сравнима с ее ролью в химии; а именно, она заключается в том, что только теория квантов делает понятным дискретный характер макрофизических структур и явлений среди бесчисленного множества возможных комбинаций элементарных частиц, и тем самым объясняет существование определенных дискретных вариаций и их относительную стабильность. Но и здесь мы хотели бы подчеркнуть, что подобного рода общие теоретические соображения и вся проблема взаимоотношений между физикой, химией и биологией отнюдь не может считаться ясной и решенной, а подлежит дальнейшему тщательному анализу.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Борн М., Альберт Эйнштейн и его световые кванты, УФН, т. 59 (1956).
- [2] Борн М., Физическая реальность, УФН, т. 62 (1957).
- [3] Гамов Г., Рич А., Икас М., Проблемы передачи информации от нуклеиновых кислот к протеинам, Химическая наука и промышленность, № 4.
- [4] Дубинин Н. П., Генетико-автоматические процессы и их значение для механизма эволюции, Ж. эксп. биол. 7 (1931).
- [5] Кольцов Н. К., Физико-химические основы морфологии, М., 1929.
- [6] Кольцов Н. К., Роль генов в физиологии развития, Биол. журн. № 4 (1935).
- [7] Кольцов Н. К., Наследственные молекулы. Наука и жизнь, 1935.
- [8] Крик Ф., Структура наследственного вещества. Химическая наука и промышленность, № 4 (1956).
- [9] Ляпунов А. А., О некоторых проблемах кибернетики. Сб. «Проблемы кибернетики», вып. 1, М., Физматгиз, 1958.
- [10] Соболев С. Л. и Ляпунов А. А., Кибернетика и естествознание, Вопросы философии, № 5 (1958).
- [11] Тимофеев-Ресовский Н. В., Соматические геновариации определенного гена в разных направлениях под влиянием рентгенизации. Труды Всесоюз. съезда ген. сел. 2 (1929).
- [12] Тимофеев-Ресовский Н. В., Развитие и современное состояние радиационной генетики, Юбил. сб. УФАН, 1957.
- [13] Тимофеев-Ресовский Н. В., Микроэволюция. Ботанич. журн. 43, № 3 (1958).
- [14] Фок В. А., Философские проблемы квантовой механики, УФН, 1957.
- [15] Четвериков С. С., О некоторых моментах эволюционного процесса с точки зрения современной генетики, Ж. эксп. биол. 2 (1926).
- [16] Шредингер Э., Что такое жизнь с точки зрения физики. М., ИЛ, 1947.
- [17] Alexander J. and Briges C., Some physicochemical aspects of life, mutation and evolution, Coll. Chem., 2 (1928).
- [18] Bauer H. und Timofeeff-Ressovsky N., Genetik und Evolutionsforschung bei Tieren. Die Evolution der Organismen, Jena, 1943.
- [19] Bohr N., Atomtheorie und Naturbeschreibung. Berlin, 1931.
- [20] Bohr N., Licht und Leben, Naturwiss. 21 (1933).
- [21] Born M., Niels Bohr and the development of physics, Pergamon Press, London New York, 1953.
- [22] Born M., Physics in my generation, Pergamon Press, London—New York, 1956.
- [23] de Broglie L., Matière et lumière, Paris, 1937.
- [24] de Broglie L., Continu et discontinu dans la physique moderne, Paris, 1941.
- [25] Darlington G., Recent advances in cytology, London, 1937.
- [26] Dobzhansky Th., Genetics and the origin of species. New York, 1937.
- [27] Eddington A., New paths in science, Cambridge, 1935.
- [28] Fisher R., The genetic theory of natural selection. Oxford, 1930.

- [29] Haldane J., The causes of evolution, London, 1932.
- [30] Heisenberg W., Physikalische Prinzipien der Quantenmechanik, Leipzig, 1934.
- [31] Koltzoff N., Les molécules héréditaires, Paris, 1939.
- [32] Möglich F., Rompe R. und Timofeeff-Ressovsky N., Bemerkungen zu physikalischen Modellvorstellungen über Energieausbereitungsmechanismen im Treffbereich bei strahlenbiologischen Vorgängen, Naturwiss. 30 (1942).
- [33] Möglich F., Rompe R. und Timofeeff-Ressovsky N., Über die Indeterminiertheit und die Verstärkererscheinungen in der Biologie, Naturwiss. 32 (1944).
- [34] Muller H., The gene as the basis of life, Proc. 4. Cong. Plant sci. Itaca, 1929.
- [35] Muller H., Radiation and genetics, Amer. Nat. 64 (1930).
- [36] Muller H., The effect of X-rays upon the hereditary material, The Science of Radiology, Springfield, 1934.
- [37] Muller H., The need of physics in the attack on the fundamental problems of genetics, Sci. Monthly 44 (1935).
- [38] Muller H., The biological effects of radiation with special reference to mutation, Réu. Int. Phys. Chim. Bi. Paris, 1937.
- [39] Riehl N., Timofeeff-Ressovsky N. und Zimmer K., Mechanismus der Wirkung ionisierender Strahlen auf biologische Elementareinheiten, Naturwiss. 29 (1941).
- [40] Schmidt W., Der molekulare Bau der Zelle, Nova Acta Leopoldina, Halle, 1939.
- [41] Stanley W., The reproduction of virus proteins, Amer. Nat. 72 (1938).
- [42] Timofeeff-Ressovsky N., The experimental production of mutations, Biol. Rev. 9, Cambridge (1934).
- [43] Timofeeff-Ressovsky N., Über die Wirkung von Temperatur auf den Mutationsprozess bei Drosophila, Z. ind. Abst. Vererbgslehre. 70 (1935).
- [44] Timofeeff-Ressovsky N., Le mécanisme des mutations et la structure du gène, Paris, 1939.
- [45] Timofeeff-Ressovsky N., Genetik und Evolution, Z. Ind. Abst. Vererbgslehre. 76 (1939).
- [46] Timofeeff-Ressovsky N., Mutations and geographical variation. The New Systematics, Oxford, 1940.
- [47] Timofeeff-Ressovsky N., Eine biophysikalische Analyse des Mutationsvorganges, Nova Acta Leopoldina, Halle, 1940.
- [48] Timofeeff-Ressovsky N. und Zimmer K., Strahlengenetik, Strahlenther. 74 (1944).
- [49] Wright S., Evolution in mendelian populations, Genetics. 16 (1931).
- [50] Wright S., The roles of mutation, inbreeding and selection in evolution, Proc. 6. Internation. Congr. Genet. Ithaca 1 (1932).
- [51] Zimmer K. und Timofeeff-Ressovsky N., Über einige physikalische Vorgänge der Auslösung von Genmutationen durch Strahlung, Z. Ind. Abst. vererbgslehre 80 (1942).
- [52] Wiener N., Cybernetics or control and communication in the animal and machine, New York, 1948. [Русский перевод: Н. Винер, Кибернетика, М., «Советское радио», 1958.]

Поступило в редакцию 19 IX 1957