

**ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ**

53+57

**ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТЬ, ФИЗИКА И БИОЛОГИЯ\*)**

***М. В. Волькенштейн***

**ВВЕДЕНИЕ**

Вторая половина XX века ознаменовалась мощным ростом интегрализма в науке, объединением ряда ее областей, установлением новых связей между ними. Важнейшее значение для современного естествознания имеет проникновение науки в ранее не рассматривавшиеся основы теоретической биологии. Это проникновение определялось интеграцией биологии, физики и химии. С одной стороны, возникла молекулярная биология, в которой физика атомов и молекул смогла ответить на ряд вопросов, относящихся к природе фундаментальных явлений жизни. С другой стороны, развивается физика диссипативных систем, или синергетика, уже дающая общее понимание явлений жизни, определяемых целостной системой организма, биосферы, биосферы. Оба подхода оказываются тесно связанными с кибернетикой, с теорией информации.

Мы начнем рассмотрение проблемы взаимоотношения физики и биологии со взглядов Нильса Бора. Деятельность Н. Бора в большой степени определила развитие и физики, и философии естествознания нашего времени. Н. Бор был одним из немногих физиков, уделивших серьезное внимание указанной проблеме. Это не случайно.

Для творцов современной науки, для Эйнштейна, Бора, Гейзенберга, Шрёдингера, Дирака характерно стремление решить наиболее общие ее задачи, имеющие философское значение. На этом пути физикам удалось сделать гораздо больше, чем профессиональным философам, что вполне естественно. На долю философов и историков науки выпало прежде всего исследование и осмысление созданного физиками.

Занимаясь общими вопросами науки, Бор обратился к проблеме соотношения физики и биологии. Это было более чем своевременно — последние статьи и доклады Бора, посвященные этой проблеме, появились на начальном этапе построения молекулярной биологии и биокибернетики.

Обращение Бора к биологии отвечало семейной традиции. Его отец Христиан Бор был крупным физиологом. Когда молекулярные биологи и биохимики говорят об эффекте Бора, речь идет об открытии Христианом Бором закономерности влияния рН среды на сродство гемоглобина к кислороду. Христиан Бор активно интересовался философскими, принципиальными вопросами естествознания. Об этом свидетельствует, в частности, обширная выдержка из статьи Х. Бора, приведенная в статье Н. Бора «Физическая

---

\*) Переработанный и дополненный текст доклада на Симпозиуме в честь Н. Бора. Пушино, Московская обл., октябрь 1985 г.

наука и проблема жизни»<sup>1</sup>. Х. Бор обсуждает смысл и содержание применяемого в биологии понятия целесообразности.

Работы Нильса Бора, посвященные соотношению физики и биологии представляют, как и все им созданное, выдающийся интерес. При этом надо иметь в виду, что взгляды Бора на биологию менялись в связи с ее стремительным развитием. Эти изменения сами по себе очень показательны.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТЬ

Широко известно, что главное место в философии Нильса Бора занимает концепция дополнителности. Концепция эта возникла как широкое обобщение открытий квантовой механики. Частными случаями дополнителности являются соотношения неопределенности. Бор говорит «о наличии соотношений нового типа, не имеющих аналога в классической физике, которые удобно обозначить термином *дополнителность*, чтобы подчеркнуть то обстоятельство, что в противоречащих друг другу явлениях мы имеем дело с различными, но одинаково существенными аспектами единого, четко определенного комплекса сведений об объектах»<sup>2</sup>. Далее обсуждаются некоммутативности типа

$$\Delta q \cdot \Delta p = \frac{h}{4\pi},$$

$\Delta q$ ,  $\Delta p$  — погрешности в определении координаты  $q$  и соответствующей проекции импульса  $p$ ,  $h$  — постоянная Планка. Эти соотношения, а также

$$\Delta \epsilon \cdot \Delta t = \frac{h}{4\pi}$$

( $t$  — время,  $\epsilon$  — энергия) выражают дополнителность пространственно-временного ( $q$ ,  $t$ ) и динамического ( $p$ ,  $\epsilon$ ) описания микроскопических систем.

«Дополнительный способ описания в действительности не означает произвольного отказа от привычных требований, предъявляемых ко всякому объяснению; напротив, он имеет целью подходящее диалектическое выражение действительных условий анализа и синтеза в атомной физике»<sup>3</sup>.

Для Бора дополнителность есть выражение диалектики, присущей реальному миру и его познанию. Эта идея неоднократно отмечается и в последующих работах Бора.

Бор подчеркивает смысл строгой, принципиальной дополнителности в квантовой механике: «В атомной физике слово «дополнителность» употребляют, чтобы характеризовать связь между данными, которые могут быть получены при разных условиях опыта и могут быть наглядно истолкованы лишь на основе взаимно исключающих друг друга представлений»<sup>4</sup>. Руководствуясь квантово-механической дополнителностью, Бор с помощью мысленных опытов, тонких и точных рассуждений, опроверг соображения Эйнштейна о неполноте квантовой механики<sup>5</sup>. Л. И. Мандельштам развил далее глубокий анализ этой проблемы и подтвердил концепцию Бора в пяти лекциях по основам квантовой механики, посвященных теории косвенных измерений<sup>6</sup>. Я имел счастье слушать эти лекции, прочитанные в 1939 г. Они были откровением. И. Е. Тамм, В. А. Фок, М. А. Леонтович и другие первоклассные физики слушали эти лекции, сидя рядом со студентами.

Расширительное толкование концепции дополнителности, выходящее за пределы строгой квантомеханической теории, означает, что в самых разных областях естествознания, психологии, социологии, философии мы встречаемся с необходимостью двойственного, диалектического описания и исследования. Мы вынуждены пользоваться несовместимыми, но дополняющими друг друга понятиями. Конечной причиной дополнителности является то, что мы воспринимаем и изучаем реальный мир, материю, буду-

чи сами его частью: «мы сами являемся и актерами, и зрителями драмы жизни»<sup>7</sup>.

Рассмотрим некоторые примеры дополненности, не имеющие прямого отношения к квантовой механике.

В классической физике волновых явлений имеют место соотношения неопределенности. Мандельштам говорил<sup>8</sup>: «Чем резче локализована волна в пространстве, тем менее она монохроматична, тем больший участок захватывает ее спектр. Это относится к распределению волны в пространстве. Аналогичное положение справедливо и для зависимости от времени. Короткий импульс — острая локализация во времени — несовместим с узким спектром частот, и обратно. Это обстоятельство имеет первостепенное практическое значение в радиотелеграфии. Путем настройки, применяя острый резонанс, мы защищаемся от посторонних станций и помех. Чем острее настройка приемника, тем меньше будут мешать посторонние станции. Но такой остроселективный приемник не может принимать короткие сигналы, так как короткий сигнал имеет широкий спектр... Здесь, по существу, играет роль то же соотношение, что и в принципе неопределенности. Поэтому людям, знающим радиотелеграфию, принцип неопределенности бывает легко объяснить».

Эти слова опровергают приведенное выше утверждение Бора об отсутствии аналога соотношений дополненности в классической физике.

Поясним эти положения (см. например<sup>9</sup>).

Плоская монохроматическая световая волна, распространяющаяся вдоль оси  $x$ , может быть представлена формулой

$$E = A \sin [2\pi (vt - kx)],$$

где  $E$  — напряженность электрического поля волны,  $\nu$  — частота,  $k = 1/\lambda$ ,  $\lambda$  — длина волны,  $A$  — амплитуда.

Написав это выражение, мы молча предположили, что световая волна распространяется из бесконечности в бесконечность и на всем протяжении характеризуется одной частотой  $\nu$ , длиной волны  $\lambda = 1/k$  и амплитудой  $A$ . В действительности, волна имеет начало и конец в пространстве и времени. Существует ограниченный световой импульс.

Световые волны изучаются с помощью спектральных приборов. Такой прибор является гармоническим анализатором. Это значит, что призма спектрографа (или дифракционная решетка) разлагает импульс на непрерывную совокупность бесконечных синусоид, характеризуемых своими значениями  $A$ ,  $\nu$ ,  $\lambda$ . Производится разложение импульса в интеграл Фурье. Если в спектрографе попадет волна бесконечной протяженности, то в спектре появится линия с частотой  $\nu$  и длиной волны  $\lambda$ . Если попадет импульс конечной длины, то в спектре появится полоса — непрерывная совокупность линий разной интенсивности в некотором интервале волновых чисел  $\Delta k$ . Это объясняется тем, что любой световой импульс конечной длины может быть представлен набором бесконечных синусоид с различными частотами, амплитудами и фазами, подобранных таким образом, чтобы они гасили друг друга в тех областях пространства, где волны нет, и давали бы правильную картину в области  $\Delta x$ , занимаемой импульсом. Таких синусоид потребуется тем больше и интервал  $\Delta k$  будет тем шире, чем короче импульс, т. е. чем меньше  $\Delta x$ . Можно показать, что выполняется условие

$$\Delta x \cdot \Delta k = 1.$$

Это — соотношение дополненности. Чем уже интервал  $\Delta x$ , тем больше неопределенность в значении  $k$ , т.е.  $\lambda$ , и наоборот.

Проведем два опыта над световым импульсом. В первом из них мы хотим точно определить время прохождения световой волны через данную точку. Для этой цели будем регистрировать световую волну на фотографической пластинке, падающей в плоскости, перпендикулярной лучу света. Если волна

бесконечна,  $\Delta x \rightarrow \infty$ , то поперек всей пластинки пройдет темная черта — след световой волны, и время ее прохождения неопределенно,  $\Delta t' \rightarrow \infty$ . Чем меньше  $\Delta x$ , тем короче след на пластинке и тем меньше интервал времени  $\Delta t$ . Во втором опыте пропускаем свет через призму спектрографа и вновь фотографируем проходящий свет, на этот раз на неподвижной пластинке. При  $\Delta x \rightarrow \infty$  и  $\Delta t \rightarrow \infty$  значение частоты  $\nu$  вполне определено, наблюдается бесконечно узкая спектральная линия,  $\Delta \nu \rightarrow 0$ . Если импульс конечен, то как уже сказано, линия расплывается в полосу. Оказывается справедливым второе соотношение неопределенности, т. е. дополненности,

$$\Delta t \cdot \Delta \nu = 1.$$

Физический смысл этих соотношений состоит в том, что понятия частоты и длины волны имеют при использовании гармонического анализатора точные значения только для бесконечной синусоидальной волны. Квантовая механика не имеет сюда отношения.

Можно формально перейти от этих классических соотношений к квантово-механическим, воспользовавшись выражением длины волны де Бройля. Для микрочастицы

$$k = \frac{1}{\lambda} = \frac{mv}{h} \equiv \frac{p}{h};$$

$m$  — масса,  $v$  — скорость частицы. Подставляя  $\Delta k = \Delta p/h$  в соотношение  $\Delta x \cdot \Delta k = 1$ , получаем

$$\Delta x \cdot \Delta p = h.$$

Аналогичным образом, воспользовавшись выражением для энергии кванта

$$\varepsilon = h\nu,$$

получаем  $\Delta \nu = \Delta \varepsilon/h$ . Из  $\Delta \nu \cdot \Delta t = 1$  следует

$$\Delta t \cdot \Delta \varepsilon = h.$$

Представленные соотношения, справедливые для электромагнитных волн, служат хорошей иллюстрацией принципа дополненности.

#### ДОПОЛНЕННОСТЬ ВНЕ ФИЗИКИ

По мысли Бора дополненность выходит далеко за пределы физики — квантовой и классической. Эти идеи развиты в статье 1954 г. «Единство знаний»<sup>10</sup>. О значении дополненности для понимания биологии речь пойдет дальше. Остановимся на некоторых проблемах психологии, проблемах культуры.

Бор говорит о дополненности интуиции и логики, дополненности искусства и науки, дополненности мысли и действия. «Всякое новое знание является нам в оболочке старых понятий, приспособленной для объяснения прежнего опыта, и всякая такая оболочка может оказаться слишком узкой для того, чтобы включать в себя новый опыт». Это относится не только к знанию, но и к пониманию и поведению. «Особенно ярким примером, — пишет Бор, — является взаимоотношение между теми ситуациями, в которых мы обдумываем мотивы наших действий, и теми, когда мы испытываем чувство решимости». Мысль и действие находятся в соотношении дополненности.

Это ясно понимал Шекспир. В центральном монологе Гамлет говорит:

Так трусами нас делает раздумье,  
И так решимости природный цвет  
Хиреет под налетом мысли бледным,  
И начинанья, взнесшиеся мощно,  
Сворачивают в сторону свой ход,  
Теряют имя действия.

(Перевод М. Л. Лозинского)

В этом смысле Гамлет является выразителем дополнительности. Гете, и вслед за ним Тургенев воспринимали трагедию Гамлета именно как трагедию дополнительности — мысль, рефлексия превращают человека в безвольное существо. Художественное выражение этой идеи — рассказ Тургенева «Гамлет Шигровского уезда». В статье «Гамлет и Дон Кихот» Тургенев, по существу, говорит о дополнительности этих великих образов мировой литературы: Гамлет воплощает мысль без действия, Дон Кихот — действие без мысли.

Однако все это не так просто. Здесь речь идет не о принципиальной, но лишь о практической дополнительности — это не физика. Концепция Тургенева не верна. Гамлет — предельно действенная фигура, но он контролирует свои поступки мыслью. Он проверяет сообщение призрака «мышеловкой», он посылает на смерть стукачей Розенкранца и Гильденстерна, он убивает Полония, думая, что убивает короля, он не убивает короля во время молитвы, дабы он попал в ад, а не в чистилище. Наконец, в финале он короля все-таки убивает. Трагедия Гамлета не в безволии, а в положении человека с умом и сердцем в жестоком, безмысленном окружении.

Тем не менее в целом Бор прав — мысль и действие находятся в соотношении практической дополнительности — их единство диалектично. Эту диалектику понимает и Фауст:

«В начале было Слово». С первых строк  
Загадки. Так ли понял я намек?

Я был опять, как вижу с толку сбит:  
«В начале было Дело» — стих гласит.

*(Перевод Б. Л. Пастернака)*

Оказывается, возможен выбор. Фауст выбирает действие, дело.

Дополнительность существует и между мыслью и словами, ее выражающими:

Мысль изреченная есть ложь.

*(Ф. И. Тютчев)*

На основе концепции дополнительности Бор рассматривает проблему свободы воли. Полный детерминизм такую свободу исключает. Однако «если мы будем пытаться предсказать, как решит поступить другой человек при данных обстоятельствах, то мы не только должны стараться узнать всю его подоплеку..., но, кроме этого, мы должны уяснить себе, что то, к чему мы здесь в конечном счете стремимся — это поставить себя на его место. Конечно, невозможно сказать, хочет ли человек сделать что-то, потому что он это может, или же он может, потому что хочет...»<sup>10</sup>.

Бор говорит о дополнительности серьезности и шутовности, бегло обсуждает взаимоотношения науки и искусства. Приведем в этой связи простой пример: смех дополнителен мысли. Мы смеемся, смотря на репризы клоуна в цирке. Но стоит задуматься о том, почему мы смеемся, как нам уже не смешно. Это относится к элементарной реакции смеха: если речь идет об истинном остроумии, то анализ может усилить ощущение смешного. Это справедливо для эстетики. Распространенная точка зрения состоит в том, что анализ произведения искусства уничтожает его непосредственное эмоциональное восприятие. Иными словами, имеет место дополнительность. Однако это далеко не всегда так. На высоком уровне понимания искусства анализ его созданий может не ослаблять, а усиливать эстетические эмоции.

Дополнительность свойственна до некоторой степени смене стилей искусства. В свое время выдающийся искусствовед Г. Вёльфлин выявил основные черты различия ренессанса и барокко в живописи, скульптуре и архитектуре<sup>11</sup>. Сопоставляя сходные по теме произведения мастеров этих

стилей, Вельфлин указал «дополнительные» их особенности. Они представлены в следующей таблице:

<b>Ренессанс:</b>	<b>Барокко:</b>
Линейность	Живописность
Плоскостное решение	Глубина
Замкнутая форма	Открытая форма
Множественность	Единство
Ясность	Неясность

В самом деле, картина не может быть одновременно линейной и живописной, ясной и неясной. Эта диалектика находит свое косвенное выражение и в смене стилей науки<sup>12</sup>.

Литературовед Л. М. Лотман пишет о дополнительности двух видов информации — специфической (объективной, полной, основанной на анализе) и неспецифической (воспринимаемой эмоционально, непосредственно и субъективно)<sup>13</sup>. Эти два вида информации проходят в мозгу различными путями<sup>14, 15</sup>.

Идея дополнительности в широком смысле слова оказывается основной для понимания целого комплекса явлений, относящихся к человеку, к его творчеству, психологии, чувству и мысли. При этом дополнительность, как правило, не имеет строгого, принципиального характера — это практическая дополнительность.

#### НИЛЬС БОР О БИОЛОГИИ

Опираясь на концепцию дополнительности, Бор неоднократно обсуждал проблему жизни и возможности ее физического исследования. Почти в каждой статье, вошедшей в книгу «Атомная физика и человеческое познание», Бор говорит об этой проблеме<sup>16</sup>. Так как взгляды Бора менялись в соответствии с развитием естествознания, интересно рассмотреть эти статьи хронологически — книга<sup>16</sup> содержит речи и статьи Бора, опубликованные с 1932-го по 1959 г.

В речи «Свет и жизнь» (1932) отмечено несколько основных положений. Во первых, «признание важного значения черт атомистичности в механизме живых организмов само по себе не является достаточным для всестороннего объяснения биологических явлений». Во вторых, «нельзя непосредственно сравнивать условия при биологических и при физических исследованиях, так как необходимость сохранить объект исследования живым налагает на первое ограничение, не имеющее себе подобного в последних». В третьих, «в биологии мы занимаемся материальными системами, сложность которых имеет фундаментальный характер». Отсюда следует принципиальный вывод: «... Самое существование жизни должно в биологии рассматриваться как элементарный факт, подобно тому как в атомной физике существование кванта действия следует принимать за основной факт, который нельзя вывести из обычной механической физики».

В речи «Биология и атомная физика» (1937) те же идеи представлены в более четкой форме. «... Собственно биологические закономерности представляют законы природы, дополнительные к тем, которые пригодны для объяснения свойств неодушевленных тел ... существование самой жизни следует рассматривать как в отношении ее определения, так и наблюдения — как основной постулат биологии, не поддающийся дальнейшему анализу, подобно тому как существование кванта действия вместе с конечной делимостью материи образует элементарную основу атомной физики».

Далее Бор подчеркивает несовместимость своей точки зрения ни с витализмом, ни с механицизмом. Он «отбрасывает как неразумные все попытки ввести какие-то специально биологические законы, несовместные с твердо установленными физическими и химическими закономерностями ... ни один результат биологического исследования не может быть однозначно описан иначе, как на основе понятий физики и химии ...».

Как мы увидим, эти важнейшие положения, едва ли не впервые формулированные Бором, неоднократно искажались. До Бора эти же положения высказывал Л. С. Берг: «Чудес в мире не бывает: природа работает исключительно при помощи законов физики и химии»<sup>17, 18</sup>. Берг был биологом и его аргументация не исходила из глубокого понимания атомной физики, невозможного в 1921 г., когда он писал «Номогенез».

В речи «Единство знаний» (1955) Бор уже целиком основывается на принципе дополнителности. «... Всякая экспериментальная установка, которая позволила бы контролировать такие отправления (биологические. — *М. В.*) с той же степенью точности, какая требуется для четкого их описания на языке физики, будет препятствовать свободному течению жизни». Дополнительность «... существует между практически применяемыми в биологии соображениями физико-химического характера и понятиями прямо связанными с целостностью организма и выходящими за рамки физики и химии ... Только отказавшись от объяснения жизни (объяснения в обычном смысле), мы приобретаем возможность учитывать ее особенности».

В статье «Физическая наука и проблема жизни» (1957) эти идеи развиваются дальше. Бор говорит о почти неограниченном расширении применений физических и химических идей в биологии, но отмечает, что «исчерпывающий в смысле квантовой физики отчет о всех непрерывно обменивающихся атомах живого организма не только невозможен, но, очевидно, потребовал бы таких условий наблюдения, которые несовместны с проявлением жизни».

Отметим сразу, что такой «отчет» вряд ли необходим для решения какой-либо научной проблемы.

Прежде чем рассказать об изменении взглядов Бора, остановимся на цитированных положениях.

Они рассматривались многими как аргументы в пользу так называемой несводимости биологии к физике и химии. Один из крупных физиков эпохи Гайтлер следующим образом излагает взгляды Бора<sup>19</sup>. Мы можем спросить, применимы ли к живой системе те же законы физики, которым подчиняется мертвая материя. Если ответ положителен, то живой организм ничем не отличается от неживой материи и не остается места для самого понятия жизни.

Очевидно, что ничего подобного Бор не говорил. Он не ставил никаких границ атомно-молекулярной физике в применении к биологии и подчеркивал, что помимо физики и химии нет однозначного описания биологического опыта. Умозаключение Гайтлера ложно. Из применимости общих законов физики к живым организмам никак не следует, что лягушка не отличается от камня, на котором она сидит, и нет места для понятия жизни. Последующее развитие естествознания показало, что законы физики действуют в биологии, но проявление, выражение этих законов отлично от свойственного неживой природе.

Далее Гайтлер утверждает, что, согласно Бору, физические измерения, проводимые над организмами с помощью рентгеновских лучей и т. п., неизбежно убивают организмы — эти измерения несовместимы с жизнью. Укажем в связи с этим, что в действительности такие измерения дают богатейшую информацию о жизни. Открытие двойной спирали ДНК, сделанное с помощью рентгеновских лучей, ответило на биологические вопросы о причинах устойчивости генов, о природе удвоения хромосом при делении клеток, о природе мутаций. Сегодня метод ядерного магнитного резонанса применяется к исследованию живых клеток и тканей. Число таких примеров неограниченно.

В сущности Гайтлер повторяет слова Мефистофеля в «Фаусте» Гете<sup>20</sup>:

Кто хочет живое описать и познать,  
Старается дух из него изгнать.  
Все части тела он держит в руках,  
Но связи духовной в них нет — лишь прах  
Encheiresin naturae — химии слово,  
Что над собой посмеяться готова.

*Encheiresin naturae* — повадка природы, способ ее действия. Я привожу свой перевод этого важного отрывка, к сожалению неточно переданного в поэтических переводах Холодковского и Пастернака.

Заметим попутно, что решение задач стихотворного художественного перевода также связано с дополнительностью. Адекватный перевод, сохраняющий все особенности оригинала, невозможен, так как языки разнятся. Передавая одни черты стихотворения — те, которые он считает наиболее важными — переводчик неизбежно не точен в передаче других черт.

Гайтлер утверждает, что Бор говорил о строгой дополнительности живой и неживой материи. Сам факт жизни несовместим с детальным знанием атомной и молекулярной структуры организма. Иными словами, имеется соотношение дополнительности, которое можно условно записать в виде

Атомная структура  $\times$  Жизнь  $\sim$  Константа.

Но, как мы видели, Бор не говорил ничего подобного. В такой же условной записи его утверждение состоит в следующем:

Атомная структура  $\times$  Целостность организма  $\sim$  Жизнь.

Вульгаризация взглядов Бора Гайтлером характерна для отношения ряда физиков к проблеме связи физики и биологии. Многим казалось, что физика и биология несовместимы. Вигнер<sup>21</sup> и Эльзассер<sup>22</sup> декларировали наличие специфических «биотонных» закономерностей в живой природе, противоречащих квантовой механике и статистической физике. При поверхностном восприятии взглядов Бора, они якобы поддерживают эти представления.

Несовместимость физики и биологии, вне какого-либо рассмотрения принципа дополнительности, утверждается и сегодня рядом биологов, в том числе и таких крупных теоретиков, как Майр<sup>23</sup>. Изложение и критика этих взглядов приводится дальше. В то же время некоторые философы усиленно страшают физиков и биологов жупелом «несводимости» более сложной биологической формы движения материи к более простой — физической. Об этом мы также скажем дальше.

В то же время (1944) другой основоположник квантовой механики — Эрвин Шрёдингер — в своей книге «Что такое жизнь с точки зрения физики»<sup>24</sup> четко формулировал ряд физических вопросов, относящихся к жизни и сумел частично на них ответить. В отличие от статей Бора, книга Шрёдингера имела прагматическое значение, оказав прямое влияние на развитие биологии.

#### ИЗМЕНЕНИЯ ВЗГЛЯДОВ НИЛЬСА БОРА

Во второй половине века произошли грандиозные события в этом развитии. Была раскрыта молекулярная природа гена, природа наследственности. Молекулярная биология в своем стремительном росте решительно изменила наши представления о фундаментальных биологических явлениях. И произошло это благодаря единению генетики и биохимии с физикой и химией.

Бор, внимательно следивший за развитием естествознания, ранее многих других понял необходимость пересмотреть свои, казалось бы, установившиеся взгляды на соотношение биологии и физики.

В последней статье сборника<sup>16</sup>, называемой «Квантовая физика и биология» (1959), кратко охарактеризованы изменяющиеся взгляды Бора: «Совсем иные перспективы постепенного разьяснения биологических закономерностей на основе прочно установленных принципов атомной физики появились в последние годы. Это произошло благодаря открытию поразительно устойчивых структур специального назначения, несущих генетическую информацию, а также благодаря все более полному проникновению в процессы, которыми эта информация передается».



Речь идет о ДНК — дезоксирибонуклеиновой кислоте, веществе генов. Бор вновь подчеркивает отсутствие каких либо ограничений для применения элементарных физических и химических понятий к анализу биологических явлений. Однако вследствие чрезвычайной сложности биологических систем «нашли себе плодотворное применение в биологии понятия, относящиеся к поведению организма как целого и *как бы* (курсив мой. — М. В.) противостоящие способу описания свойств неодушевленной материи».

В заключение Бор указывает, что строгая квантово-механическая дополнительность уже учтена в применениях в биологии химической кинетики. «Дополнительный» подход в биологии требуется лишь вследствие практической неисчерпаемой сложности организмов.

Здесь характерны это «как бы» и то, что Бор заключает слово «дополнительный» в кавычки.

Привожу свою переписку с Бором, посвященную этой проблеме.

«Дорогой профессор Бор,

Позвольте мне задать Вам несколько вопросов в связи с Вашей блестящей книгой «Атомная физика и человеческое познание», недавно появившейся в русском переводе.

Я работаю в области молекулярной физики и физики полимеров. В последние годы я пытаюсь развить некоторые теоретические исследования в молекулярной биофизике. Я воспользовался моделью Изинга для ферромагнетизма в качестве основы статистико-термодинамической теории репликации ДНК. Сейчас я пишу книгу, которая называется «Молекулы и жизнь. Введение в молекулярную биофизику». Естественно, что она начинается с обсуждения философского вопроса о соотношении физики и биологии. Для меня было бы очень важно узнать Ваше мнение о следующем:

1. Принцип дополнительности в квантовой механике основывается на реальных свойствах микрочастиц. Можем ли мы рассматривать исключительную сложность организмов как достаточное основание для установления дополнительности между биологией и физикой или между целостностью организма и его физико-химической структурой? Выходит ли понимание столь сложной системы как целого за пределы физики и химии?

2. Свидетельствует ли современное состояние молекулярной биологии о необходимости считать жизнь первичным постулатом, аналогичным кванту действия? Исключает ли существование жизни ее объяснение в обычном смысле слова?

3. Мне кажется, что в то время, как в статьях, написанных в 1932, 1937 и 1955 гг. Вы говорили о принципиальной дополнительности в биологии, в Вашей Бристольской речи в 1959 г. Вы имели в виду лишь практическую дополнительность, лишенную какого-либо принципиального характера.

4. Не думаете ли Вы, что Ваша концепция противоположна концепции Шрёдингера («Что такое жизнь с точки зрения физики?»), который рассматривает уже известные принципы физики как достаточные для понимания жизни? Что Вы думаете о книге Шрёдингера?

5. Считаете ли Вы правильной «эпигенетическую» точку зрения, выдвинутую Эльзассером («Физические основания биологии»)?

Я думаю, что принципиальное качественное различие между живой и неживой материей и отсутствие промежуточных случаев не означает каких-либо границ для физико-химического понимания физики как целого в смысле принципа дополнительности. Я не могу согласиться с Гете, чей Мефистофель говорит:

Wer will was Lebendigs erkennen und beschreiben,  
Sucht erst den Geist nderauszutreiben,  
Dann hat er die Teile in seiner Hand,  
Fehlt, leider! nur das geistige Band.  
*Encheiresin naturae* nennt's die Chemie,  
Spottet ihrer selbst, und weisz nicht wie.

(Перевод этих строк приведен выше.)

В то же время я вполне согласен с Барри Коммонером, который подчеркивает, что нельзя рассматривать жизнь просто как химию ДНК и белков.

Я очень сожалею, что, будучи в Ленинграде, не имел возможности встретиться с Вами во время Вашего недавнего визита в нашу страну.

Я был бы очень благодарен, если бы Вы могли написать мне несколько слов об этих проблемах. Простите меня, пожалуйста, за причиненное беспокойство.

С глубочайшим уважением и наилучшими пожеланиями

искренне Ваш

М. Волькенштейн

Ленинград, 6 ноября 1961 г.».

«Дорогой профессор Волькенштейн,

Я хочу поблагодарить Вас за Ваше любезное письмо от 6 ноября и извиниться за то, что из-за моего отъезда из Копенгагена я не ответил на него раньше.

Я с большим интересом узнал о Ваших исследованиях в молекулярной биологии и о Ваших взглядах на эпистемологические вопросы, которые ставит перед нами существование жизни. Как Вам известно, я в течение многих лет размышлял об этих проблемах и я хорошо знаю, что некоторые из моих ранних высказываний вызвали неправильное представление о моем общем к ним отношении. Более современное изложение моих взглядов, которые, насколько я могу судить, находятся в тесном соответствии с Вашими, дано в короткой речи на Международном фармакологическом конгрессе в Копенгагене в 1960 г. и я прилагаю ее оттиск.

В настоящее время я работаю над более полным представлением эпистемологических проблем в физике и биологии и, как только оно будет закончено, я его Вам пошлю. Конечно, я буду благодарен за информацию о развитии Ваших работ и за присылку любых относящихся к ним публикаций.

С приветом и наилучшими пожеланиями

искренне Ваш

Нильс Бор

Копенгаген, 8 декабря 1961 г.».

Речь 1960 г. опубликована в «Успехах физических наук» в 1962 г.<sup>25</sup> В ней говорится об отсутствии каких-либо ограничений или нарушений принципов термодинамики в живой природе, о сходстве живых организмов и автоматов. В то же время отмечается, что в жизни проявляются ресурсы природы, гораздо более богатые, чем применяемые при конструировании машин. Эволюция представляет «картину результатов испробования в природе необъятных возможностей атомных взаимодействий».

Далее сказано: «В биологии основания для дополнительного описания не связаны с проблемами контроля над взаимодействием между объектом и измерительными приборами, ... необходимость дополнительности описания связана там с практически неисчерпаемой сложностью организма... Таким образом, пока слово «жизнь» сохранится (будь то по причинам практического или гносеологического порядка), до тех пор двойственный подход в биологии несомненно сохранится».

Последнее выступление Бора, посвященное соотношению физики и биологии 21 июня 1962 г. в Институте генетики в Кёльне, было опубликовано уже посмертно под заглавием «Свет и жизнь — еще раз»<sup>26</sup>. В этой речи Бор уже совсем не говорит о дополнительности в биофизике. Он подчеркивает, что «образование всех макромолекулярных структур ... представляет существенно необратимые процессы, которые определяют устойчивость организма в условиях, задаваемых питанием и дыханием». Бор отказывается от ранее сформулированных представлений, отмечая, что «задача биологии не может состоять в том, чтобы учесть судьбу каждого из бесчисленного числа атомов, постоянно или преходяще присутствующих в организме» (ср. с. 285). Удивле-

ние по поводу жизни сохранится, но происходит смещение — мы обретаем все более глубокое понимание сущности процессов жизнедеятельности. В качестве примеров Бор приводит изучение структуры мышцы, мембранного транспорта в связи с нервной активностью, оценку размеров гена на основе работы Н. В. Тимофеева-Ресовского, Циммера и Дельбрюка.

Таким образом, ранее утверждавшаяся Бором дополнительность атомно-молекулярного и целостного описания жизни более для Бора не существует. Дополнительность упоминается лишь в связи с психикой — дополнительность мысли и чувства. Но об этом мы пока знаем очень мало.

Переход от принципиальной к практической дополнительности знаменует решительное изменение взглядов Бора. Изменение это прошло для многих незамеченным — с двумя последними речами Бора далеко не все ознакомились, а его более ранние взгляды, неоднократно им излагавшиеся, широко известны. В то же время несовместимость биологии и физики на первый взгляд представляется более убедительной, чем современные представления о физических основах жизни, понимание которых требует специальных знаний.

Одним из немногих ученых, отметивших эволюцию взглядов Бора на биологию, является В. Л. Гинзбург<sup>27</sup>. Он подчеркивает, что Бор до последних дней мог изменять свои мнения под влиянием новых фактов — таких, как определившие блестящие успехи молекулярной биологии.

Нильс Бор был чужд какого-либо догматизма. Он смотрел на мир широко раскрытыми глазами и ясно понимал все происходящее в этом мире — и развитие науки и угрозы, вначале фашизма, а затем атомной войны (см. <sup>28</sup>).

Понятие о практической, а не строгой дополнительности не может вызвать никаких возражений. Дополнительность такого рода свойственна любым открытым системам, далеким от равновесия. В этих системах возможно пространственное и временное структурирование — в результате микроскопических флуктуации.

При исследовании структур Бенара или реакции Белоусова — Жаботинского имеется практическая дополнительность между атомно-молекулярным описанием и рассмотрением целостной системы как и в биологии (см. об этом в <sup>29, 30</sup>).

#### О «НЕСВОДИМОСТИ»

В отечественной философской и околонуканой литературе часто фигурируют утверждения о принципиальной несводимости сложного к простому, в частности, о несводимости биологии к физике. Несводимости противостоит редукционизм — «концепция, утверждающая возможность полного сведения высших явлений к низшим, основополагающим»<sup>31</sup>. Далее говорится: «Редукционизм прослеживается в механицизме, стремлении рассматривать психическое только как результат физиологических, информационных и т. п. процессов, биологизировании явлений общественной жизни». О физике и биологии здесь нет речи. В последнем издании философского словаря слова «редукционизм» нет вовсе — есть слово «редукция»<sup>32</sup>.

Не исследуя проблемы в целом, рассмотрим соотношение биологии и физики. Для этого необходимо дать строгое определение названных областей естествознания. Биология есть наука о живой природе. А что такое физика?

Физика есть наука о конкретных видах материи — веществах и полях — и о формах существования материи — пространстве и времени (см., например, <sup>33</sup>). Это определение, против которого трудно что-либо возразить, относится в равной мере и к неживой и к живой природе. Значит ли это, что биология «сводится» к физике, что мы вернулись к античному понятию о физике, как всеобщей науке (Аристотель)? Ни в коей мере. Приведенное определение означает лишь, что физика является конечной, глубинной теоретической основой любой области естествознания. Важная задача науки состоит

в нахождении этой основы и, соответственно, не в «сведении» этой области к физике, но ее выведении из физических основ. Применительно к биологии такие задачи в целом еще далеки от своего решения, хотя на этом пути ведется усиленная работа. В этом отношении биология совершенно отлична от химии, в которой физические основы уже установлены. Не существует теоретической химии, независимой от квантовой и статистической механики, от термодинамики и кинетики. Очевидно, что этим никак не умаляется значимость и самостоятельность великой науки — химии. Напротив, химия получила наиболее глубокое возможное обоснование. И нельзя это считать редукционизмом, ибо физика в целом вовсе не проще химии, химические явления не являются «высшими» по отношению к «низшим» — физическим (ср. <sup>34</sup>).

Соотношение физики и химии показывает, что понятие о несводимости здесь вообще лишено содержания. Оно имеет чисто умозрительный, декларативный характер и ничем не может способствовать дальнейшему развитию химии. Напротив, люди моего поколения помнят, как под знаменем антиредукционизма современная квантовая химия отвергалась и химия искусственно отделялась от физики (дискуссия об электронном резонансе в химии 1951 г.).

Как уже сказано, ситуация в биологии совершенно иная. Это естественно, так как биология имеет дело с чрезвычайно сложными неравновесными системами — с клетками, организмами, биоценозами, биосферой. Поэтому физические основы теоретической биологии лишь начинают формироваться. Мы не располагаем достаточными биологическими знаниями для того чтобы строго формулировать соответствующие физические задачи. Это относится к основным для биологии проблемам эволюции и индивидуального развития, не говоря уже о высшей нервной деятельности. Наши знания о памяти и мышлении далеки от построения количественной физической теории.

Рассмотренные выше речи и статьи Бора создавались в тот период развития науки, когда возникала молекулярная биология, закономерности которой определяются в конечном счете атомно-молекулярной физикой и химией. Бор умер в 1962 г., не дожив до становления новой области физики, посвященной строению и свойствам диссипативных систем, т. е. открытых систем, удаленных от равновесия. Эта область иначе именуется синергетикой. Живые организмы и их сообщества, вплоть до биосферы в целом, представляют собой диссипативные системы. Основы термодинамики живых организмов были впервые формулированы Э. С. Бауэром <sup>35</sup> и проанализированы Шрёдингером <sup>24</sup>, согласно крылатому выражению которого, «организм питается отрицательной энтропией». Бауэр писал: «... Живые системы никогда не бывают в равновесии и исполняют за счет своей свободной энергии постоянную работу против равновесия». Вслед за этими феноменологическими положениями началось построение общей теории диссипативных систем, на которой мы остановимся дальше.

Эти термодинамические представления, эта теория применимы к организмам именно как к целостным системам. Это — физика. Тем самым Боровская практическая дополнительность изучения организма как атомно-молекулярной и как целостной системы вовсе не означает дополнительности физики и биологии. В действительности следует рассматривать практическую дополнительность двух областей физики.

Нападавшие на редукционизм не раз апеллировали к ранним взглядам Бора, усматривая в них аргументацию «несводимости» биологии к физике. При этом игнорировались слова Бора о том, что «ни один результат биологического исследования не может быть однозначно описан иначе, как на основе понятий физики и химии» (с. 284).

И ранние и поздние взгляды Бора совершенно противоположны витализму. Бор никогда не ставил границ физическому исследованию жизни. Последующее развитие науки показало, что границ этих нет, что физические принципы незыблемы и в живой природе, хотя проявления их оказываются своеобразными. Так, например, матричный синтез ДНК и РНК не требует для

своего понимания какой-либо новой физики. В этом смысле ситуация в теоретической биологии и биофизике существенно отлична от имевшей место в физике в начале века. Новая физика — квантовая механика и теория относительности — возникла благодаря тому, что классическая физика встретила границы своей применимости. Повторяем, что в биологии таких границ не видно и нет надобности в создании новой физики.

«Редукционизм», физикализация, математизация биологии воспринимаются догматиками как зловредная ересь. В действительности понятия о редукционизме здесь полностью лишены содержания. Речь идет не о редукционизме, но об интегратизме естествознания. Наука изучает целостный материальный мир, его многоуровневую систему. Различные уровни исследования представлены во всех областях естествознания. Глубинный уровень — всегда физический, и именно это положение определяет содержательность и значимость специфических уровней исследования в химии и биологии и перспективы их дальнейшего развития. То, что обычно именуется редукционизмом, не означает никакого «сведения». Это — подлинная наука, начиная с механической теории кровообращения Гарвея и кончая атомно-молекулярной теорией гена, исходящей из модели ДНК Уотсона и Крика. Напротив, «антиредукционистский», виталистический подход всегда был неконструктивным и препятствовал развитию науки. Представления Лысенко исходили из «антиредукционизма», даром что он утверждал, что способность воробья прыгать и при сильном морозе создается за счет атомной энергии.

Сторонники так называемой несводимости в естествознании в действительности глубокие пессимисты, не верящие в мощь науки и радующиеся ее трудностям. Восприятие мира как совокупности явлений, отделенных друг от друга непроницаемыми перегородками, исходит из весьма унылого мировоззрения.

#### ТЕОРЕТИКИ БИОЛОГИИ И ФИЗИКА

Нельзя, однако, сказать, что мосты через глубокие овраги, разделяющие биологию и физику, уже наведены. Соответствующие работы лишь начаты. Многие крупнейшие биологи-теоретики, эффективно развивающие эволюционную биологию, считают физические подходы к биологическим проблемам неадекватными и недостаточными. В этом смысле показательна фундаментальная монография Эрнста Майра — одного из создателей современного эволюционизма<sup>23</sup>. Книга Майра отличается исключительной широтой и глубиной, ее русский перевод весьма желателен. Однако взгляды Майра и других эволюционистов на соотношение физики и биологии требуют критического анализа.

Уже в начале книги говорится, что «ученые — физики стремятся оценивать биологов, пользуясь шкалой ценностей, зависящих от степени, в которой биологи использовали «законы», измерения, эксперименты и другие аспекты научного исследования, которые высоко ценятся в физических науках. В результате суждения о биологии, высказываемые некоторыми историками физических наук, которые можно найти в литературе, настолько нелепы, что вызывают лишь улыбку». (<sup>23</sup>, с. 14). Далее Майр цитирует слова Резерфорда, считавшего, что биология подобна коллекционированию почтовых марок (с. 31). Вспомним в связи с этим, что, говоря о классификации спектральных линий, некоторые физики пренебрежительно называли ее зоологией. Приведенные слова свидетельствуют лишь о том, что они принадлежали физикам, действительно не имевшим понятия о биологии.

Вторая глава труда Майра «Место биологии в науках и ее концептуальная структура» естественно посвящена и соотношению физики и биологии. Майр утверждает, что физика не является подходящим мерилем науки (с. 30). По его мнению, в биологии вообще нет законов в том смысле, в каком

они фигурируют в физике: «единственный универсальный закон в биологии: все биологические законы имеют исключения» (с. 38). «Когда говорят, что белки не переносят информацию обратно в нуклеиновые кислоты, молекулярные биологи рассматривают это как факт, а не как закон» (с. 37). В то же время далее говорится, что этот «факт» окончательно опроверг наследование приобретенных признаков (с. 572).

Рассуждение о факте и законе очевидно несостоятельно. С тем же успехом можно говорить, что сохранение энергии в любой изолированной системе есть факт, а не закон. Майр, в сущности, формулирует именно два закона, не имеющие исключений:

Белки не переносят информацию в нуклеиновые кислоты.

Приобретенные признаки не наследуются.

К этим законам можно добавить множество других, в частности, законы Менделя.

Майр пишет: «Явления жизни имеют гораздо более широкий диапазон, чем относительно простые явления, с которыми имеют дело физика и химия» (с. 52).

Столь же невозможно включить биологию в физику, как включить физику в геометрию» (с. 53).

Заметим, что произошло обратное — теория относительности включила геометрию в физику. Майр об этом, видимо, не знает.

«Редукционизм теории есть заблуждение, так как он путает процессы и концепции» (с. 57).

«Последние 25 лет узрели окончательную эмансипацию биологии от физики» (с. 131).

Майр считает, что физика и химия бесполезны для теории эволюции. Бесполезны они и для теории индивидуального развития:

«Эти проблемы нельзя решить, не рассекая системы на их компоненты. Деструкция систем во время их анализа делает очень трудным понимание природы всех взаимодействий и контрольных механизмов внутри систем» (с. 132).

«Для современного читателя удивительно, что такие физики как Хафтон, Гопкинс и Дженкин полагали, что, применяя мышление физических наук, они могут справиться с такими исключительно сложными явлениями, не имеющими параллелей в неживом мире, как эволюция биологических систем» (с. 514).

«Дарвин более, чем кто-либо другой, показал, сколь сильно формулировка теории в биологии отличается во многих отношениях от таковой в классической физике» (с. 521).

«Лишь с 1859 г. (год издания «Происхождения видов». — М. В.) биологические науки начали освобождаться от доминирования физических наук».

Имеется «множество ситуаций, в которых физикализм оказывал уничтожающее влияние на развитие биологии» (с. 846).

Из всех этих утверждений следует, что Майр не знаком с современной физикой. Для него физика совпадает с ее пониманием у ряда достаточно примитивных мыслителей XIX века (Фохт, Бюхнер, Молешотт). Майр приводит слова Спенсера (с. 386):

«Эволюция есть интеграция материи и сопутствующая диссипация движения, во время которых материя переходит из неопределенной, некогерентной гомогенности к определенной когерентной гетерогенности ...».

Майр с этим не согласен и считает, что Спенсер высказывал «неподходящую физикалистскую интерпретацию типа XVIII века конечных причин в биологических системах, что не имеет ничего общего с реальной биологией».

В этом споре, однако, скорее прав Спенсер, который, в сущности, говорил о возникновении порядка из хаоса, т.е. о процессах, ныне изучаемых синергетикой.

Майр ограничивает физику и химию классической атомно-молекулярной теорией. Даже о молекулярной биологии в его труде сказано мало. Что касается общих термодинамических основ жизни (отток энтропии, т.е. «питание отрицательной энтропией»; см. с. 290), то Майр их не знает. Не знает он и о влиянии теории эволюции на физику. Больцман считал, что XIX век следует назвать веком Дарвина. Дальнейшее развитие физики, начиная со второго начала и его статистической интерпретации, привело к исследованиям открытых систем, далеких от равновесия, и в последние годы позволило физике обратиться к основным представлениям биологии об эволюции и онтогенезе. Майр упоминает о книге Шрёдингера<sup>24</sup> один лишь раз, указывая, что автор создал теорию организма — аperiодического кристалла и вовсе не говоря об истинном содержании этой книги. Между тем никакой теории в этом смысле не существует. Шрёдингер назвал организм аperiодическим кристаллом, желая отметить, что организм есть твердое тело, лишённое периодичности в расположении атомов и молекул. В эти слова можно вложить, однако, более интересный смысл, состоящий в том, что организм содержит большой объем избыточной, ценной информации.

Таким образом, в вопросе о соотношении физики и биологии Майр стоит на позициях достаточно примитивного антиредукционизма, основанного на незнании современной физики.

Более содержательны, пожалуй, слова другого выдающегося эволюциониста Симпсона<sup>36</sup>.

«Утверждение, что исследование организмов требует принципов, добавочным к таковым в физических науках, не подразумевает дуалистического или виталистического взгляда на природу. Жизнь ... не рассматривается как нечто нефизическое или нематериальное. Дело в том, что живые тела подвергались в течение миллиардов лет историческим процессам... Результаты этих процессов суть системы, существенно отличные от любых неживых систем и несравненно более сложные ... Все известные материальные процессы и объясняющие принципы применимы к организмам, но лишь ограниченное их число применимо к неживым системам... Биология есть наука, стоящая в центре всех наук...».

Утверждение об историчности всех организмов безусловно правильно. Однако Симпсон формулирует два несомненно ошибочных положения. Во-первых, историчность никак не противоречит физике. Во-вторых, далеко не все известные материальные процессы фигурируют в живой природе. Организмы представляют собой принципиально макроскопические системы (это было показано уже Шрёдингером<sup>24</sup>). Соответственно квантово-механические представления существенны лишь для биологически функциональных молекул, но не для организмов или клеток в целом. В биологии, по крайней мере в темновой, нет полупроводниковых явлений и тем более сверхпроводимости, — белки и нуклеиновые кислоты суть честные диэлектрики. Жизнь не связана с ядерной физикой. Что касается биологического патриотизма Симпсона, то он понятен. Впрочем, не ясно, что такое центр всех наук. Но в глубине биологии находится физика.

Интересно, что ни Симпсон, ни Майр не касаются взглядов Бора, не употребляют понятия дополнительности. Эти крупнейшие биологи весьма далеки от физики. Их взгляды изложены здесь, так как они очень показательны.

#### ОТ БЫТИЯ К СТАНОВЛЕНИЮ

Биология отличается от обычной физики историзмом. Живой организм проходит путь индивидуального развития и несет память о предшествующей эволюции. Любой вопрос, обращенный к живой природе, имеет эволюционный смысл.

В обычной физике «памяти» нет. Мы изучаем строение и свойства электрона, молекулы, кристалла независимо от истории их возникновения.

Сказанное не означает, однако, что в физике неживой природы нет исторических разделов. Так, астрофизика, космология есть область, идейно наиболее близкая к биофизике.

Причины исторического развития реальных систем состоят в их неравновесности. Состояние системы меняется вследствие его неустойчивости. Как уже сказано, вдали от равновесия микроскопические флуктуации могут возрасти до макроскопических величин. Возникает специфическая пространственная и временная упорядоченность, отличная от равновесной. Феноменологической причиной такого структурирования является отток энтропии в окружающую среду.

Историческая физика, изучающая кооперативное поведение неравновесных открытых систем, процессы упорядочения в них, имеющие характер фазовых переходов, представляет собой физику диссипативных систем (Пригожин) или синергетику (Хакен). Развитие этой области знаменует переход от изучения бытия к изучению становления, от статики к динамике. Соответствующие подходы к явлениям природы универсальны — они эффективны и в космологии и в биологии. С единых позиций оказывается возможным рассмотреть образование звезд и галактик, излучение лазера, возникновение периодичности в перистых облаках, периодические химические реакции, процессы биологического развития и эволюции.

Основная идея синергетики — возникновение порядка из хаоса. Впервые в естествознании такого рода идея появилась в гипотезе Канта и Лапласа о происхождении солнечной системы. Основа теоретической биологии — эволюционная теория Дарвина — имеет тот же характер. Из хаотической, случайной изменчивости благодаря естественному отбору возникает упорядоченное, направленное развитие биосферы.

Этот новый этап физики описан сегодня в ряде книг и статей (см., в частности, <sup>29, 30, 37-41</sup>).

Фундаментальные проблемы биологии, связанные со свойствами и строем целостных биологических систем, в результате стали предметом исследований, проводимых на основе теоретической физики. Это относится к теории эволюции и к теории индивидуального развития — онтогенеза.

Среди физиков, далеких от биологии, получило известное распространение представление о том, что дарвинизм устарел, что эволюционная теория не в состоянии объяснить возникновение и разнообразие биосферы. Не могло хватить ни материала, ни времени.

При этом молча предполагается, что материал для эволюции создается лишь в результате мутаций, частоты которых, т. е. числа мутаций на один геном за одно поколение имеют порядки величин от  $10^{-4}$  до  $10^{-9}$ . Иными словами это события весьма редкие. Тем самым и скорость эволюции должна быть очень малой и действительно непонятно, как современная биосфера могла возникнуть за  $3,5 \cdot 10^9$  лет.

Рассуждения эти, однако, ошибочны. Число мутантных генотипов в данной популяции составляет десятки процентов в результате рекомбинаций родительских геномов. Эволюция не происходит путем перебора всех вариантов в каждом поколении. Эволюция направлена в том смысле, что на возможности естественного отбора наложены серьезные ограничения уже сложившимися организмами и допустимыми способами их изменения. Никакая эволюция не создаст наземное позвоночное с числом конечностей, не равным четырем.

Теория пока не в состоянии дать количественную оценку времени создания биосферы, но качественно очевидно, что при указанной направленности эволюции, времени было достаточно.

Физические подходы к биологической эволюции изложены в книге <sup>42</sup> и в статьях <sup>43-46</sup>. Показано, в частности, что видообразование может иметь характер неравновесного фазового перехода первого или второго рода. Этим объясняются важные закономерности эволюционного процесса.



Индивидуальное развитие, включающее морфогенез, т. е. формирование надмолекулярной клеточной, тканевой и организменной структуры, также получает сегодня физическое истолкование (см. <sup>47</sup>). В этих очень сложных процессах реализуются взаимодействия автокаталитических реакций с диффузией функциональных молекул и, что особенно важно, с механохимией — с прямыми превращениями свободной энергии специфических химических реакций в механическую работу. Не так давно мы говорили, что клетка состоит из ядра и протоплазмы. Позднее, благодаря электронному микроскопу, была открыта гетерогенность клеточного содержимого, наличие в цитоплазме ряда сложных органоидов, выполняющих различные функции. В последнее время установлена важнейшая структурная и динамическая роль цитоскелета — систем, построенных из белков, подобных мышечным.

Благодаря физическим и химическим исследованиям, мы понимаем сейчас, что организм, клетка представляет собой сложные «химические машины», работающие на основе тонких диффузионных и реакционных градиентов. В отличие от машин, сделанных руками человека, в живой природе передача, преобразование и рецепция сигналов имеют молекулярный, химический характер. Соответственно в таких «машинах» существуют значительные допуски, люфты, позволяющие этим системам приспособляться к изменяющимся условиям.

Речь идет, конечно, лишь об общем понимании. Перед биофизикой, на всех уровнях, начиная с молекулярного, простирается безграничная неисследованная территория.

Историческая физика практически дополнительна к атомно-молекулярной. Дополнительность здесь в сущности не отличается от дополнительности любых феноменологических и атомно-молекулярных аспектов физических явлений. Конечно, изучение одного аспекта не создает ограничений исследованию другого.

Без зоологии и ботаники биологии быть не может. Разнообразие видов очень велико и их индивидуальные особенности представляют прямой интерес. Однако множество явлений имеет общий, фундаментальный характер. Во всех организмах законодательная власть принадлежит нуклеиновым кислотам, исполнительная — белкам. Генетический код един. Для изучения различных проблем биологии можно выбрать наиболее удобные организмы, но выводы, полученные в работе с ними, оказываются универсальными. Условные рефлексы изучены главным образом на собаках, передача нервного импульса — на нервных волокнах (аксонах) кальмара, мышечное сокращение — на икроножных мышцах лягушки, законы генетики — на плодовой мушке дрозофиле, а затем — на кишечной палочке. И. П. Павлов поставил в Колтушах памятник собаке. С не меньшим основанием можно было бы поставить памятник мухе и бактериям.

Физика и химия сыграли определяющую роль в создании молекулярной биологии. Двойная спираль ДНК была открыта в физическом исследовании с помощью рентгеноструктурного анализа. Проблема генетического кода была впервые сформулирована физиком-теоретиком Г. А. Гамовым. Сам код был расшифрован химическими методами.

Соответственно на первом этапе развития молекулярной биологии возникло тесное сотрудничество физиков и биологов, которое привело ко многим крупным успехам.

В дальнейшем молекулярная биология стала все более «биологизироваться». Она перешла от изучения молекул и одноклеточных — бактерий — к надмолекулярным структурам, клеткам и тканям многоклеточных. Возникла генная инженерия и другие разделы биотехнологии. Физика в этой области, казалось бы, уже не нужна.

В результате многие биологи, в частности молекулярные, сегодня утратили интерес к физике. Этот интерес и ранее был в основном платоническим —

биологу труднее войти в курс физических идей, чем физику в курс биологии. Но сейчас брешь между физикой и биологией заметно возросла — во всяком случае, у нас.

Между тем дальнейшее развитие любых областей биологии, кроме чисто описательных, невозможно без активного взаимодействия с физикой и, конечно, с химией. В довоенное время в результате объединения классического дарвинизма с генетикой возникла синтетическая теория эволюции. Сегодня стала очевидной необходимость инкорпорации в эту теорию представлений молекулярной биологии, синергетики, теории информации, т. е. физики. Теоретическая биология настоятельно нуждается в физико-математическом моделировании наиболее важных биологических явлений и процессов — эволюции, онтогенеза, канцерогенеза, иммунитета. Во всех этих направлениях ведется усиленная работа и кое-что стало проясняться (см., в частности, <sup>29,30,42</sup>).

Впервые физические основания теоретической биологии были сформулированы сорок лет назад Шрёдингером <sup>24</sup>. В недавней статье Макс Перутц, удостоенный нобелевской премии за исследование структуры гемоглобина, показал, что идеи Шрёдингера были стимулированы работой крупнейшего биолога Н. В. Тимофеева-Ресовского, сделанной совместно с Дельбрюком и Циммером <sup>48</sup>. Статья Перутца называется «Физика и загадка жизни». Приведем важное положение, содержащееся в этой статье:

«Очевидные противоречия между жизнью и статистическими законами физики могут быть разрешены включением науки, которую Шрёдингер игнорировал. Эта наука — химия. Когда Шрёдингер писал: «Регулярный ход событий, управляемый законами физики, никогда не является следствием одной высокоупорядоченной конфигурации атомов, если только эта конфигурация не повторяется многократно, он не представлял, что в точности так работают химические катализаторы. Если имеется источник свободной энергии, высокоупорядоченная конфигурация атомов в одной молекуле фермента может направить образование упорядоченного стереоспецифического вещества со скоростью  $10^7$  —  $10^5$  молекул в секунду, создавая порядок из беспорядка в конечном счете благодаря солнечной энергии».

Непонимание химии — матричной каталитической репликации ДНК — свойственно и более поздней работе Вигнера <sup>21</sup>.

«Биологизация» молекулярной биологии в действительности требует ее дальнейшей и более глубокой «физикализации». Для современной молекулярной биофизики характерен переход от структуры к динамике конформационных превращений, ответственной и за ферментативный катализ и за биологические функции нуклеиновых кислот. Сейчас разработан ряд тонких физических экспериментальных методов, позволяющих получать необходимую информацию. Ведутся широкие теоретические исследования, но подлинной физической теории указанных явлений еще нет.

Именно «физикализация» молекулярной биологии обещает ее важнейшие практические приложения. Генная инженерия создана ради изготовления необходимых белков в результате воздействий на геномы. Так, кишечная палочка оказывается способной производить инсулин и интерферон. Но исследования физики белков, их эволюции, их структуры и динамики должно привести к созданию новых белков, еще не существовавших в природе.

Повторим в заключение основной вывод из всего изложенного. В основу будущей теоретической биологии должна лечь физика. Физика в широком смысле слова, включающая как атомно-молекулярное рассмотрение, так и теорию целостных открытых систем, далеких от равновесия. Нет и не предвидится каких-либо границ для физических исследований живой природы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бор Н. Избранные научные труды. — М.: Наука, 1971. — Т. 2. С. 519.
2. Бор Н. // *Ibidem.* — С. 393.
3. *Ibidem.* — С. 397.
4. *Ibidem.* — С. 287.
5. *Ibidem.* — С. 399.
6. Мандельштам Л. И. Полное собрание трудов. — М.: Изд-во АН СССР, 1950. — Т. 5. С. 347.
7. Бор Н. //<sup>1</sup>. — С. 398.
8. Мандельштам Л. И. //<sup>6</sup>. — С. 54.
9. Волькенштейн М. В. Структура и физические свойства молекул. — Л.: Изд-во АН СССР, 1955.
10. Бор Н. //<sup>1</sup>. — С. 481.
11. Вельфлин Г. Проблема эволюции стиля в новом искусстве. — М.; Л.: Academia, 1930.
12. Волькенштейн М. В. // *Знание — сила.* 1987. № 2. С. 81.
13. Лотман Л. М. Реализм русской литературы 60-х годов XIX века. — Л.: Наука, 1974. — С. 101—103.
14. Симонов П. В. Эмоциональный мозг. — М.: Наука, 1981.
15. Симонов П. В. Мотивированный мозг. — М.: Наука, 1987.
16. Бор Н. Атомная физика и человеческое познание. — М.: ИЛ, 1961.
17. Берг Л. С. Труды по теории эволюции. — Л.: Наука, 1977. — С. 113.
18. Волькенштейн М. В. // *Молек. биол.* 1987. Т. 21. С. 630.
19. Heitler W. // *Albert Einstein: Philosopher, — Scientist/Ed. Schlipp.* — New York: Tudor, 1951. — P. 196, 197.
20. Гете И.-В. Фауст. Ч. I, Разговор Мефистофеля со студентом, строки 1936—1941.
21. Вигнер Ю. Этюды о симметрии. — М.: Мир, 1980. — С. 176.
22. Elsasser W. // *The Physical Foundation of Biology.* — London: Pergamon Press, 1958.
23. Маур Е. // *The Growth of Biological Thought: Diversity, Evolution and Inheritance.* — Cambridge, Mass.; London: The Belknap Press of Harvard Univ. Press, 1982.
24. Шрёдингер Э. Что такое жизнь с точки зрения физики. — М.: ИЛ, 1947; М.: Атомиздат, 1972.
25. Бор Н. // *УФН.* 1962. Т. 76. С. 21.
26. Bohr N. // *Naturwissenschaften.* 1963. Bd 50. S. 21.
27. Гинзбург В. Л. // *Нильс Бор: Жизнь и творчество/Под ред. Б. Г. Кузнецова.* — М.: Наука, 1967. — С. 26.
28. Данин Д. С. Нильс Бор. — М.: Молодая гвардия, 1978.
29. Волькенштейн М. В. Общая биофизика. — М.: Наука, 1978.
30. Волькенштейн М. В. Биофизика. — М.: Наука, 1988.
31. *Философский словарь.* — М.: Политиздат, 1981. — С. 315.
32. *Философский словарь.* — М.: Политиздат, 1987. — С. 408.
33. Прохоров А. М. *Физика/БСЭ.* — 3-е изд. — 1977. — Т. 27. С. 337.
34. Волькенштейн М. В. // *Физическая теория.* — М.: Наука, 1980. — С. 53.
35. Бауэр Э. С. *Теоретическая биология.* — Л.: ВИЭМ, 1935.
36. Simpson G. *This View of Life.* — New York: Harcourt, Brace, World, 1964.
37. Пригожин И. *От существующего к возникающему.* — М.: Наука, 1985.
38. Пригожин И., Стенгерс И. *Порядок из хаоса.* — М.: Прогресс, 1986.
39. Хакен Г. *Синергетика.* — М.: Мир, 1985.
40. Волькенштейн М. В. *Физика и биология.* — М.: Наука, 1980.
41. Волькенштейн М. В. *Энтропия и информация.* — М.: Наука, 1986.
42. Ebeling W., Feistel R. *Physik der Selbstorganisation und Evolution.* — Berlin: Akademie-Verlag. 1982. 1986.
43. Белинцев Б. Н., Волькенштейн М. В. // *ДАН СССР.* 1977. Т. 235. С. 205.
44. Волькенштейн М. В. // *УФН.* 1984. Т. 143. С. 429.
45. Волькенштейн М. В. // *Изв. АН СССР. Сер. биол.* 1986. № 3. С. 325.
46. Волькенштейн М. В. // *Вестн. АН СССР.* 1986. № 10. С. 99.
47. Белинцев Б. Н. // *УФН.* 1983. Т. 141. С. 55.
48. Perutz M. // *Nature.* 1987. V. 326. P. 555.