

## Фундаментальные константы химии и биологии

Ю. П. Хапачев

*ЮРИЙ ПШИКАНОВИЧ ХАПACHEВ — доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики Кабардино-Балкарского государственного университета (г. Нальчик). Область научных интересов: теория рентгеновской дифракции в системах с пониженной размерностью — гетероструктурах и сверхрешетках. E-mail kharachev@aport.ru*

Достижения естественных наук за последние десятилетия настолько грандиозны, что сама попытка осознать их сегодня превратилась в трудную познавательную проблему. Возрастающая дифференциация — очевидный факт современной науки, который поставил на повестку дня проблему поиска и разработки общих фундаментальных принципов научного знания. Разрешение такой проблемы — задача насущная и отнюдь не тривиальная. Поиски единого фундамента естествознания давно перестали быть делом одних только философов. Сегодня к ее разрешению приобщены ученые из самых различных областей знания: физики, химики, биологи, математики и др.

Основной акцент при поиске обобщающих идей может быть сделан на значении симметрии [1, 2] и роли фундаментальных мировых констант [3]. Распространение этой «физической идеологии» на химию и биологию не только важно с методической точки зрения, но и, что более значимо, позволяет яснее выявить взаимосвязь указанных наук. Кроме того, это дает возможность в ряде случаев сказать *multa paucis* — многое в немногих словах.

При написании статьи отдельные идеи взяты из трудов В. И. Кузнецова [4], Б. М. Медникова [5] и Л. Л. Морозова [6, 7]. При заимствовании из этих работ фрагменты изменены лишь незначительно, разумеется, без искажения смысла.

Современные знания дают следующее представление об иерархической структуре материи. В микромире из кварков «состоят» протоны и нейтроны, которые в свою очередь формируют ядра атомов. Атомы могут объединяться в молекулы. Из них состоят привычные нам макроскопические тела. Если двигаться вверх по шкале масштабов, то попадем в мегамир: планеты и их системы, звездные скопления, затем галактики, которые в свою очередь объединяются в скопления и сверхгалактики.

В рамках статьи нельзя охарактеризовать каждый из этих иерархических уровней, но можно сказать, посредством чего осуществляется та или иная иерархия. Что является своеобразным «клеем»? Оказывается, что в роли такого «клея» выступают определенные константы [3], часто называемые фундаментальными мировыми константами. Их не так много. В настоящее время понятно, что сравнительно небольшое их изменение должно привести к формированию качественно иного мира, в котором, в частности, стало бы невозможным образование ныне существующих микро-, макро- и мегаструктур, а следовательно, и высокоорганизованных форм живой материи [2, 3]. Проблема фундаментальных констант приобретает, таким образом, в концептуальном плане глобальное мировоззренческое значение.

Оставляя за рамками статьи обсуждение важного значения для формирования нашей Вселенной ряда

фундаментальных физических констант, таких, например, как константы гравитационного, электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий, остановимся всего на трех постоянных — Авогадро, Больцмана и Планка. Эти физические константы формируют фундаментальные химическую и биологические константы [8].

В 1811 году Авогадро ввел новое понятие — молекулы как соединения атомов. Гипотеза Авогадро закрепила в науке представление о дискретном строении вещества (хотя официальное признание самой гипотезы состоялось только на I Международном конгрессе химиков в 1860 году, спустя четыре года после смерти автора), а само число  $N_A = 6,0227 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> (в дальнейшем для нас существенно именно значение этой величины, а не ее размерность — моль<sup>-1</sup>) было вычислено впервые Лошмидтом в 1865 году. Важно, что еще в XIX веке возникает новое макроскопическое понятие — *количество вещества*, а в XX веке становится понятно, что *число Авогадро* определяет *достаточное условие макросостояния*. Необходимого условия мы не знаем. Для каких-то объектов это может быть миллион структурных элементов, а для других — всего тысяча, но определенно знаем, чего бы мы не взяли в количестве  $N_A$ , это — всегда макрообъект.

Вторая константа необходимая нам, *сопровождает все характеристики и явления физики микромира* и обязана своим «происхождением» Планку. Все началось с его доклада 14 февраля 1900 года об излучательной способности черного тела, где впервые была введена константа  $h = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. В чем же смысл этой фундаментальной величины? Дело в том, что в классической физике такие величины, как например импульс  $p$ , энергия, *действие* (есть и такая величина, ее размерность *энергия × время*), могут принимать любые, сколь угодно малые значения. Однако, как только мы «заходим в микромир», т.е. интересуемся явлениями и объектами с размерами  $\leq 10^{-7}$  см, ситуация в корне меняется. Так, *действие* уже не может сколь угодно мало отличаться от нуля. Первое, самое малое его значение оказывается равным значению именно этой постоянной Планка  $h$ . Следующее по величине будет  $2h$ , затем  $3h$  и так далее. В аналогичной ситуации оказываются и другие физические величины, например спин и т.д. Таким образом, дискретной является не только материя, но и ряд физических характеристик, описывающих ее. Кроме того, в микромире принципиальной становится не детерминистическая картина описания объектов, а *вероятностная*. Непосредственным следствием этого становится то, что при описании явлений в микромире у частиц не существует понятия траектории в обычном макроскопическом смысле. Это и есть по существу сформулированный в 1927 году принцип неопределенности В. Гейзенберга.

Наличие у электрона спина (который тоже определяется посредством  $\hbar$ ) приводит к принципу запрета Паули. Принцип запрета определяет специфические закономерности в заполнении электронами квантовых состояний в атоме, и именно этим обуславливается природа периодичности изменения свойств элементов в таблице Д. И. Менделеева.

Переходим теперь к третьей заявленной константе — константе Больцмана. Второе начало термодинамики, в отличие от первого, не является всеобщим законом природы, оно справедливо только по отношению к изолированным термодинамическим системам. Тем не менее второе начало занимает уникальное место среди других фундаментальных законов. Дело в том, что второе начало говорит о необратимости, односторонности процессов в изолированной системе и тем самым обуславливает отличие будущих процессов от прошедших, выделяет направление времени (стрела времени). Мерой необратимости, как известно, является энтропия. Вероятностную интерпретацию энтропии впервые дал в 1877 году Больцман, используя идею определения наиболее вероятного с термодинамической точки зрения состояния системы. Переход системы из неравновесного состояния в равновесное сопровождается возрастанием энтропии и вероятности состояния  $W$  (характеристика микромира) с энтропией  $S$  (характеристика макромира) определяется формулой

$$S = k \ln W \quad (1)$$

Здесь впервые появляется так называемая константа Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Несмотря на то, что константа  $k$  не определяет элементарных физических процессов и не входит в основные принципы динамики, важным является следующее обстоятельство: константа Больцмана устанавливает связь между микроскопическими динамическими явлениями и макроскопическими характеристиками состояния большого (порядка числа Авогадро) коллектива частиц. Собственно говоря, эту константу впервые ввел опять-таки Планк, как и формулу (1). Тем не менее константа  $k$  носит имя Больцмана «по вполне понятной причине» (слова самого Планка). И причина эта в том, что Больцман впервые не только установил пропорциональность между  $S$  и  $\ln W$ , но и показал, что в итоговом состоянии с максимумом энтропии, в так называемом аттракторе, вероятность распределения частиц по скоростям  $v$  подчиняется распределению Максвелла:

$$W(v) \approx \exp(-mv^2/2kT) \quad (2)$$

где  $m$  — масса частиц,  $T$  — температура.

Видно, что в состоянии аттрактора — глобального асимптотического равновесия, в котором система оказалась в конце концов, вероятность встретить частицу с нулевой скоростью максимальна и равна единице, но это есть отличная от нуля вероятность встретить частицы и со скоростями, а значит и с энергиями, не равными нулю. В дальнейшем это обстоятельство будет использовано нами при качественном обосновании одной из аксиом биологии. Таким образом, состояние максимума энтропии — не застывшее, а некоторым образом подвижное состояние хаоса.

Используя смысл приведенных выше физических констант, перейдем к определению химической и биологических констант [8].

### Концептуальные системы химии. Химическая константа

На основе историко-методологического анализа развития химии В. И. Кузнецов установил, что существуют определенные закономерности этого развития. Согласно Кузнецову [4], вся история химии есть процесс развития и появления новых концептуальных систем. Эти системы представляют собой совокупность законов, теорий и взглядов, характеризующих уровень знания химического явления. С возникновением научной химии, с момента появления атомно-молекулярной концепции и до настоящего времени отчетливо просматриваются четыре концептуальные системы.

1. Учение о составе вещества (XVII—XVIII века).
2. Учение о структуре вещества (60-е годы XX века).
3. Учение о химических реакциях (конец XIX века).
4. Учение о химической эволюции (60—70 годы XX века).

На первом этапе центральной проблемой было решение задачи о соотношении состава и свойств; исследователи стремились объяснить свойства химических соединений их элементарным составом. Далее потребовались знания о структуре вещества. При решении этой задачи удалось не только объяснить свойства различных химических соединений, но и открыть путь к синтезу новых веществ. С этого момента появляется новое понятие — *реакционная способность*, которое уже потребовало учета и кинетических факторов. Переход к кинетическим теориям сопряжен с введением понятия *организация*, которое в определенном смысле аналогично понятию *структура* и также является атрибутом, но более сложной кинетической химической системы. Далее логическое завершение схемы приводит к описанию систем еще более высокого уровня организации, таких, например, как самоорганизующиеся каталитические системы. В последнее время появилось новое понятие *поведения*, которое выражает нечто иное по сравнению с понятиями *свойства* и *реакционная способность*. С этим понятием связаны проблемы химии, лежащие в основе четвертой концептуальной системы. Здесь исследуется проблема поведения сложных предбиологических систем и уровня их организации. Последним этапом, пограничным между химией и биологией, является биология искусственных живых систем. На этом этапе возможно создание в XXI веке научно-теоретического и экспериментального базиса для выяснения новых биологических закономерностей и построения теоретической биологии.

Последовательная химическая теория должна объяснять и предсказывать зависимость реакционной способности от строения неизменяющихся молекулярных фрагментов реакции. Квантовомеханическое объяснение реакционной способности основано на теории *активированного комплекса* [9], в дальнейшем сокращенно АК.

Теория АК — простейший и исторически первый вариант статистической теории химических реакций — была разработана в 30-х годах XX века Э. Вигнером, М. Поляни, Г. Эйрингом и М. Эвансом. Эта теория основана на трех предположениях, или трех аксиомах [9].

1. Переход химической системы из начального состояния в конечное связан с образованием *активированного комплекса*, или *переходного состояния*.

2. Существует термодинамическое равновесие между реагентами химической реакции и АК.

3. Скорость химической реакции отождествляется с временем жизни АК.

Все три предположения в рамках химии строго обосновать нельзя, их следует считать **аксиомами химии**.

С учетом знаний о фундаментальных физических константах Планка и Больцмана можно сразу же качественно (без использования строгой теории) с точностью до  $2\pi$  оценить время жизни АК. Действительно, поскольку элементарный акт химической реакции осуществляется на микроуровне, в его описании обязательно должна присутствовать константа Планка  $h$ , размерность которой *энергия  $\times$  время*. Результат химической реакции фиксируется на макроуровне, поэтому обязательно должна быть связь между «микро» и «макро», а значит, в описании должна быть константа Больцмана  $k$ , размерность которой *энергия/температура*. Известно ускорение химической реакции при повышении температуры. Отсюда время жизни АК тем меньше, чем выше температура. Составив единицы измерения констант  $h$ ,  $k$  и температуры  $T$ , получим единственно возможное соотношение с размерностью времени:

$$\tau \approx h/kT \quad (3)$$

При обычных для химических реакций температурах  $\tau \approx 10^{-13}$  с, поэтому наблюдать активированный комплекс пока еще не удалось. Если же это станет возможным, то необходимость в аксиоме 1 отпадет, и ее утверждение станет доказанным фактом.

Как видно из (3), время жизни АК не зависит от участвующих в реакции реагентов и конечных продуктов реакции, т.е. для любой реакции величина  $\tau$  не меняется. Поэтому **время жизни АК следует рассматривать как своеобразную фундаментальную химическую «константу»**.

#### Аксиомы биологии. Биологические константы

Основная задача биологии как науки состоит в том, чтобы понять все явления живой природы, исходя из научных законов с учетом того, что свойства организма как целого отличаются от свойств его отдельных частей. Мы не можем пока дать строгого определения жизни и не можем сказать точно, как и когда она возникла. Максимум того, что пока возможно, — это перечислить и описать те признаки, которые отличают ее от неживой природы, и высказать научные гипотезы о ее происхождении и эволюции. Наряду с общеизвестными признаками жизни [5], которые не нуждаются в комментариях, существуют и другие, не менее важные. Приведем один пример, который мы называем «нулевой аксиомой биологии». Нулевой — потому, что в свое время Б. М. Медников предложил биологическую аксиоматику, состоящую из четырех аксиом [5]. Эти аксиомы мы, следуя Медникову, изложим позже нулевой.

В 1847 г. Пастер сделал фундаментальное открытие, которое долгое время не находило объяснения и по достоинству было оценено фактически в последние годы. Пастер обнаружил, что в живых организмах аминокислоты и сахара являются оптически активными. Более того, в процессе дальнейших исследований Пастер сделал исключительно важный вывод — молекулярная основа жизни не только хиральна, но и асимметрична [10].

При искусственном синтезе этих биохимических соединений образуются оптически неактивные смеси (в них равно количество лево- и правовращающих молекул), что является с термодинамической точки зрения наиболее выгодным состоянием. Поэтому открытие Пастера представляет собой не только один из важных признаков, отличающих живое от неживого, но и требует объяснения указанной асимметрии. Другими словами, любая научная гипотеза, пытающаяся объяснить происхождение жизни, должна включать в себя и объяснение условий, при которых из первоначально симметричной системы возникла **хирально асимметричная система — система с нарушенной зеркальной симметрией**.

Существуют два принципиально разных подхода к объяснению хиральной асимметрии биоорганического мира [11, 12]: 1) хиральная асимметрия — следствие эволюции структур и функций химического уровня сложности; 2) следствие эволюции структур и функций биологического уровня сложности.

Различные аспекты нарушения зеркальной симметрии биоорганического мира рассмотрены В. А. Аветисовым и В. И. Гольданским в [11, 12]. Одно из возможных объяснений первой гипотезы принадлежит Л. Л. Морозову [6, 7]. Его вывод вкратце следующий. Формирование системы с нарушенной (пониженной) симметрией происходит в результате самоорганизации [1]: вдали от состояния термодинамического равновесия симметрия макроскопического состояния системы может спонтанно нарушаться при переходе точки бифуркации. Таким образом, по Морозову, возникновение жизни следует рассматривать как «благоприятную» катастрофу, происшедшую в точке бифуркации. Для нас здесь несущественно, какая из двух гипотез (химическая или биологическая) осуществляется в действительности. Важно следующее: как в первом, так и во втором случае объяснение жизни должно перейти в область физики конденсированного состояния и кооперативных явлений (и с неизбежностью зависеть от констант Больцмана и Планка). Кроме того, самовоспроизведение на молекулярном уровне хирально чистых систем, являясь проблемой физической теории, становится еще одним признаком живого.

Сформулируем теперь эту «нулевую» аксиому в следующем виде.

**Аксиома 0. Естественное происхождение жизни связано с появлением хиральной асимметрии ее основных носителей (информационных и функциональных).**

В такой формулировке утверждение аксиомы функционально, т.е. не зависит от того, на основе каких носителей устроена жизнь (это может быть и не земная жизнь). Важно, что если жизнь возникла в процессе самоорганизации, то с необходимостью возникает хиральная асимметрия. При искусственном возникновении этого может и не быть.

Перейдем теперь к цитированию по [5] остальных аксиом биологии, из которых, впрочем, нам непосредственно потребуются только две последние.

**Аксиома 1. Все живые организмы должны быть единственным фенотипа и генотипа (программы для построения фенотипа), передающегося по наследству из поколения в поколение.**

**Аксиома 2. «Наследственные» молекулы синтезируются матричным путем. В качестве матрицы, на которой строится ген будущего поколения, используется ген предыдущего поколения.**

Чтобы вызвать единичную мутацию — наследственное изменение генетической программы, — требуется подвести к ДНК *минимальную энергию*  $E_{\min} \approx 2,5 \div 3$  эВ. Средняя энергия теплового движения молекул, окружающих ДНК при обычных для живого организма температурах, составляет примерно 0,025 эВ, т.е. при физиологических температурах ДНК оказывается достаточно стабильной. Однако скорости молекул при хаотическом движении неодинаковы даже в состоянии термодинамического равновесия. Существует определенный разброс их значений, аналогичный распределению Максвелла (2) для идеальной системы. Каким бы не было это распределение, дисперсия его зависит от постоянной Больцмана. Следовательно, всегда существуют молекулы с такими скоростями, энергия которых достаточна для того, чтобы нарушить структуру гена и вызвать мутацию. Такие изменения генетических программ случайны, непредсказуемы и ненаправлены. Поэтому эти мутации только случайно могут оказаться адаптированными, приспособительными.

Естественно, не температура является доминирующим фактором в процессе мутагенеза. Гораздо сильнее сказывается действие квантов жесткого излучения (ультрафиолет, рентгеновские лучи, гамма-кванты), быстрых элементарных частиц и молекул веществ, способных реагировать с ДНК (химические мутагены).

Если мутацию вызывает квант или частица, начинает проявлять себя принцип неопределенности Гейзенберга, т.е. проявляется квантовая природа взаимодействия частиц или излучений с информационным носителем. В этом случае важен так называемый *радиус эффективного обмена* (размер области, до которой необходимо довести энергию для мутации гена), впервые измеренный Н. В. Тимофеевым-Ресовским и К. Циммерманом,  $R_{\text{эфф}} \approx 10^{-7}$  см. Размеры области известны (это микромир), поэтому импульс известен лишь с неопределенностью порядка константы  $\hbar$ , следовательно, процесс мутагенеза и в этом случае также вероятностен. Аналогичная вероятностная картина возникает и при рассмотрении других мутагенов, поскольку описание процессов взаимодействия в микромире вероятностное. Подводя итог этим качественным рассуждениям, Медников формулирует в виде аксиомы следующий принцип.

**Аксиома 3.** *В процессе передачи от поколения к поколению генетические программы, в результате многих причин изменяются случайно и ненаправленно и лишь случайно эти изменения оказываются приспособительными.*

Таким образом, эта аксиома основана на важнейших принципах статистической физики и принципе неопределенности Гейзенберга. Получается, что третья аксиома напрямую зависит от физических принципов и констант Больцмана и Планка. Для нас важно следующее. Существование этой аксиомы обусловлено наличием двух характерных параметров  $E_{\min}$  и  $R_{\text{эфф}}$ , которые и являются своеобразными фундаментальными биологическими константами. Здесь важно понять, что эти параметры — фундаментальные константы, но не числовые (как в физике), а смысловые. Иными словами, для случайного и ненаправленного изменения генетических программ важно не их числовое значение (для форм жизни не на ДНК, а на каком-либо другом информационном носителе, числовые значения этих констант наверняка другие), а смысловое:  $E_{\min}$  — *минимальная энергия для осуществления мутации* и  $R_{\text{эфф}}$  — *эффективное расстояние для осуществления мутации*.

Четвертая аксиома обязана своим происхождением выдающемуся генетику Н.В. Тимофееву-Ресовскому и

носит название *принципа усиления*. Понять этот принцип легче всего из примера В.А. Ратнера, приведенного в [5].

Пусть существует оплодотворенная яйцеклетка — носительница мутации гена, кодирующего важный для жизни *функциональный носитель* — фермент, без которого живой организм не может выжить. В процессе роста и развития организма яйцеклетка превратилась в  $10^{15}$  клеток, соответственно умножились и гены. Каждый ген продуцирует 100 молекул м-РНК, на каждой из которых синтезируется 100 молекул фермента. Каждая молекула фермента осуществляет  $10^4$  актов своей (важной для жизни организма) реакции. В итоге имеем  $10^{15} \cdot 10^2 \cdot 10^2 \cdot 10^4 = 10^{23}$ , т.е. число, сопоставимое с числом Авогадро, а значит, мы вышли уже на макроуровень. Вот на какую величину усилились результаты одного квантового скачка, одной мутации на микроуровне. На макроуровне уже работает естественный отбор. Важно именно то, что отбору подвергаются не генетические программы, а фенотип, в котором каждое изменение усилено в  $10^{23}$  раз. Соответственно, принцип усиления можно сформулировать следующим образом.

**Аксиома 4.** *Случайные изменения генетических программ (микроуровень) при становлении фенотипа (макроуровень) многократно усиливаются и подвергаются отбору условиями внешней среды.*

\*\*\*

Таким образом, фундаментальные физические константы Авогадро, Больцмана и Планка формируют не только химические (в теории активированного комплекса) и биологические аксиомы, но и своеобразные характеристики, которые следует рассматривать как химическую и биологические константы.

При написании статьи использованы лекции автора на пленарных заседаниях конференции Соросовских учителей, прочитанные им в 1998 г. — «Самоорганизация и перестройки (частный случай теории катастроф) на физическом, химическом, биологическом и социальном уровне» и в 1999 г. — «Влияние фундаментальных физических констант на химические и биологические процессы».

Автор благодарен профессору Г.В. Лисичкину за стимулирование данной работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пригожин И.Р. От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985.
2. Моисеев Н.Н. Человек и ноосфера. М.: Молодая гвардия, 1990. 352 с.
3. Спиридонов О.П. Фундаментальные физические постоянные. М.: Высшая школа, 1991. 238 с..
4. Кузнецов В.И. Диалектика развития химии. М., 1973.
5. Медников Б.М. Аксиомы биологии. М.: Знание, 1982, с. 136.
6. Morozov L.L. Origins of Life, 1981, № 9, p. 187.
7. Морозов Л.Л. Природа, 1984, № 2.
8. Хапачев Ю.П. и др. Концепции современного естествознания. Изд. 3-е, Нальчик: изд. Каб.-Балк. ун-та, 1997, 272 с.
9. Химическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия. Т. 1, 1988.
10. Пастер Л. Избранные труды. М.: изд-во АН СССР, 1960.
11. Аветисов В.А., Гольданский В.И. Успехи физ. наук, 1966, т. 166, № 8, с. 873.
12. Аветисов В.А., Гольданский В.И. Рос. хим. ж. (ж. Рос. хим.об-ва им. Д.И.Менделеева), 1996, т. 40, № 2, с. 131.