

скими законами. Взаимодействие элементов приводит к *организации* системы, т. е. к пространственной и временной упорядоченности элементов и процессов, развивающихся в системе. Вопреки утверждению Берталанффи, понятие организации естественно возникает и в обычной физике, непосредственно не учитывающей индивидуальности элементов системы. Так, конденсация газа в жидкость, кристаллизация жидкости, спонтанное намагничивание ферромагнетика означают организацию. Другой пример, не относящийся к системе, содержащей большое число элементов, — распределение электронов в атоме по оболочкам. Организующим принципом здесь является принцип Паули. Главное отличие организованной биологической системы от организованной, упорядоченной системы, изучаемой обычной физикой, состоит в том, что биологическая система неравновесна, открыта и гетерогенна. Это создает большие и еще далеко не преодоленные трудности в развитии соответствующих разделов биофизики, рассмотрение которых выходит за рамки этой книги.

## § 1.6. БИОФИЗИКА

Биофизика есть физика живых организмов. Термодинамический и теоретико-информационный анализ явлений жизни снял кажущиеся противоречия между физикой и биологией. Нельзя не согласиться с Эйгеном, когда он утверждает, что современная физика в принципе достаточна для объяснения явлений жизни, для обоснования биологии [13]. Такое обоснование требует введения новых понятий (например, понятия селективной ценности информации), но не построения принципиально новой физики. Новая физика, скажем, квантовая механика или теория относительности, возникала в результате установления границ применимости ранее принятых представлений. В биологии мы пока не встречаемся с такими границами для физики.

Биофизическое исследование начинается с постановки физической проблемы, формулируемой на основе общих законов физики и атомно-молекулярных (т. е. квантовомеханических) представлений. Путь биофизики идет через феноменологию (прежде всего через термодинамику и теорию информации), к атомно-молекулярному исследованию живого тела. Живое тело принципиально макроскопично, состоит из очень большого числа атомов, молекул, звеньев полимерных цепей, обладающих в той или иной мере независимыми степенями свободы. Упорядоченность биологической системы и ее способность к развитию не могли бы существовать, если бы система была микроскопической и, значит, подверженной очень большим флуктуациям [10].

Биологическая проблема может решаться средствами физики (скажем, с помощью электронного микроскопа), но от этого ис-

следование еще не становится биофизическим. И, напротив, физическая задача может решаться биологическими средствами. Так, постановка проблемы генетического кода — соответствия между последовательностью аминокислотных остатков в белковой цепи и последовательностью нуклеотидов в ДНК — есть постановка физической задачи, основанная на физико-химической гипотезе о существовании кода. Решение этой физической задачи было, однако, получено с помощью чисто биологических и химических методов (см. § 9.6).

Постановке физической проблемы всегда предшествует большая работа в области биологии, физиологии, биохимии, цитологии и т. д. Биофизика — обширное поприще новых крупных открытий, решений подлинных загадок природы. Может показаться, что к какой бы биологической проблеме ни обратился физик, он сравнительно быстро придет к такому открытию, ибо мощь его идей и методов очень велика. Однако истинная ситуация оказывается иной. Сложность биологических объектов и явлений затрудняет формулировку физической задачи. Постановка такой задачи возможна лишь после глубокого биологического исследования.

Итак, работа в области биофизики требует от исследователя очень серьезных усилий. На перекрестке наук это неизбежно. Биофизик — это физик, обладающий широкой биологической эрудицией и вместе с тем способный поставить и решить физическую задачу. Биологическая эрудиция подразумевает не только знание специальных областей биологии, непосредственно относящихся к теме работы, скажем, молекулярной биологии или физиологии. Не знает биологии тот, кто чужд живой природе, не знаком с зоологией и ботаникой. Именно знание этих основ биологии (а физики иногда относятся к ним с пренебрежением) формирует биологическое мировоззрение, без которого построение подлинной биофизики невозможно.

Конечные цели биологии и биофизики едины — они состоят в познании сущности жизненных явлений. Едины и прикладные задачи в медицине и фармакологии, в сельском хозяйстве и технике. Но, будучи частью физики, биофизика не должна рассматриваться как вспомогательная биологическая дисциплина. Подчеркнем еще раз, что применение методов физики и математики к решению биологических проблем еще не означает биофизического исследования. Без математического аппарата вообще невозможно никакое точное знание. Современный зоолог прибегает к изощренным математическим приемам при изучении динамики популяций, но от этого он не становится ни математиком, ни, тем более, биофизиком.

Существенны не методы, но физические, физико-математические идеи, постановка и решение физических задач,

Современную биофизику разделяют на три области: молекулярную биофизику, биофизику клетки, биофизику сложных систем. Хотя это деление условно, сегодня оно целесообразно.

Молекулярная биофизика — область перекрывания молекулярной физики и молекулярной биологии. Это — молекулярная физика биологических процессов, биологически функциональных молекул.

Молекулярная физика и молекулярная биофизика решают три группы задач. Они исследуют строение молекул, их равновесные взаимоотношения и свойства и кинетику их взаимодействий и превращений. Исследование строения производится с помощью ряда физических методов.

Теория строения электронной оболочки молекулы и явлений, им определяемых, — квантовая механика, квантовая химия. Вся химия — явление химической связи, превращение связей в реакциях — подчиняется квантовомеханическим закономерностям. В биофизике квантовая механика играет ту же роль, что в химии и физике молекул — она является основой понимания структуры молекул, природы их взаимодействий, их электронных (например, спектральных) свойств. Однако во многих случаях проблемы, связанные с электронными свойствами молекул, могут решаться и с помощью полумпирической классической теории, в частности применяющей так называемую валентно-оптическую схему (см. [45, 46]).

Существенная особенность основных биологически-функциональных веществ — их макромолекулярность. Белки и нуклеиновые кислоты — большие молекулы, биополимеры. Поэтому молекулярная биофизика есть преимущественно макромолекулярная биофизика или физика биополимеров. В ней широко применяются методы теоретической и экспериментальной физики, ранее разработанные для изучения макромолекул небиологического происхождения.

Невозможно провести границу между молекулярной биофизикой и биофизической химией, так же как нельзя провести границу между молекулярной физикой и физической химией. Классификация областей знания имеет всегда исторический и не строго определенный характер. Молекулярная физика и соответствующие разделы физической химии различаются не столько объектами и содержанием исследований, сколько идейными подходами, определяемыми до некоторой степени соответствующими традициями.

В тех случаях, когда биофизика изучает биомолекулы *in vitro*, применимы представления равновесной термодинамики, и в этом смысле исследование денатурации белка не отличается от исследования любого физико-химического процесса в нежиз-

вой системе. Экспериментальное изучение и теоретические расчеты равновесий имеют весьма важное значение и для открытой живой системы, давая опорную информацию, без которой нельзя обойтись. Так, изучение репликации ДНК *in vitro*, реализованной в опытах Корнберга (см. § 8.7), необходимо для понимания удвоения ДНК в делящихся клетках, являющихся открытыми системами. Количественные характеристики равновесий, найденные *in vitro*, существенны и для объяснения свойств соответствующих систем *in vivo*.

Те же соображения справедливы для кинетических исследований. Вся кинетика ферментативных процессов, изученная *in vitro*, и в этом отношении не отличающаяся от кинетики любых других химических реакций, служит основой для исследования этих процессов в организме.

Физика ферментов становится одной из центральных областей молекулярной биофизики [47]. Ее задачи — разработка экспериментальных и теоретических методов исследования ферментов и ферментативных процессов, раскрытие физических и физико-химических механизмов ферментативного катализа. Проблемы молекулярной кинетики в биофизике широки и разнообразны — это и активный транспорт, и ионный обмен, и механико-химические процессы.

Возникновение молекулярной биофизики связано с развитием молекулярной биологии. Это — новая область биофизики, о существовании которой еще нельзя было говорить несколько десятилетий тому назад.

Биофизика клетки — условное наименование самой старой, традиционной области биофизики. Это — физика вычлененных процессов в живом организме, контактирующая с физиологией. Вычленение означает мысленный (и экспериментальный) разрыв связей этих процессов с единой живой системой — прием, совершенно необходимый на определенном уровне исследования. Можно указать три наиболее развитых области биофизики клетки — биофизика сократительных систем (прежде всего биофизика мышечной деятельности), биофизика нервной проводимости и биофизика органов чувств. Уже Гельмгольц подверг ряд относящихся сюда проблем строгому физико-химическому анализу. Сеченов говорил, что физиология есть физико-химия живого организма.

Физиология издавна применяет физические методы. На этом основании ряд физиологических исследований зачастую отождествляется с биофизическими. В силу сказанного выше такое отождествление незаконно, пока решаемая задача формулируется как физиологическая, а не физическая. Так, изучение полета насекомых, количественная регистрация нервных импульсов, взмахов крыльев и т. д. остается чисто физиологическим, пока не

поставлена задача выяснения механизма соответствующего автоколебательного процесса.

Вычленение объекта исследования из организма — мышцы или нервного аксона — позволяет установить основные закономерности, сохраняющие свое значение и в целостной системе. Кальмар *Loligo*, из которого извлечен аксон, мертв, но, изучая этот аксон, можно понять процессы, протекающие в живом кальмаре и в конечном счете в организме любого животного.

Сегодня биофизика клетки смыкается с молекулярной биофизикой. Знание надмолекулярной и молекулярной структур мышцы, нерва и т. д. является необходимым для молекулярного истолкования соответствующих процессов. Проблемы биофизики клетки значительно сложнее проблем молекулярной биофизики, так как они относятся к изучению гетерогенных надмолекулярных систем, а не отдельных молекул и их взаимодействий.

Современная биофизика сложных систем посвящена исследованию физических основ поведения организма или некой его функциональной подсистемы как целого. Здесь иа первый план выступают те особенности, от которых практически полностью отвлекается молекулярная биофизика и почти полностью — биофизика клетки. Это — свойства организма как открытой системы, саморегуляция и самовоспроизведение. Сложной системой в этом смысле является не только организм, но и популяция, и биогеоценоз, и биосфера в целом. Биофизика сложных систем объединяется с теоретической биологией.

Центральная проблема теоретической биологии и биофизики сложных систем — проблема развития (филогенеза и онтогенеза). Дифференциация клеток, возникновение сложного организма из зиготы ставят перед наукой множество нерешенных вопросов. Их решение будет иметь громадное теоретическое и практическое значение (проблема рака!).

Методы исследования в биофизике сложных систем специфичны. Сегодня они состоят в экспериментальном и теоретическом моделировании, в разработке адекватного математического аппарата, позволяющего интерпретировать сложные явления регуляции, и т. д. Сложная биологическая система изучается в ее динамике, во взаимоотношениях с окружающей средой. Такая система существует, сохраняя неравновесное стационарное состояние или необратимо изменяясь. Надо думать, что исследование периодических процессов, изучение «биологических часов» может очень помочь пониманию внутренних связей в сложной системе. Считая некое радиоэлектронное устройство черным ящиком, мы испытываем его в различных колебательных режимах и в результате раскрываем его внутреннюю структуру.

Таким образом, сегодня биофизика сложных систем — феноменологическая область физики, широко применяющая пред-

ставления кибернетики, математическое моделирование. Математическая биофизика Рашевского [48] полностью относится к этой области.

Соотношение между биофизикой сложных систем и другими разделами биофизики, охарактеризованными выше, подобно соотношению между феноменологической термодинамикой и молекулярной физикой. В основе поведения сложной биологической системы лежат свойства биологических молекул и образуемых ими структур. Дальнейшее развитие биофизики должно привести к ее интеграции — к общему молекулярному истолкованию свойств таких систем. Уже сегодня мы говорим о молекулярных основах эволюции [13, 49]. Однако ряд биологических явлений возникает только на уровне сложной системы. Так, высшая нервная деятельность, в основе которой лежат молекулярные процессы, реализуется лишь в сложной системе.

О возможности молекулярного истолкования поведения подобных систем уже свидетельствуют некоторые результаты исследования молекулярных регуляторных систем, например оперона в молекулярной генетике или биохимических реакций, катализируемых аллостерическими ферментами (см. ниже гл. 7).

Очевидно, что необходимо именно общее молекулярное истолкование сложной системы и ее поведения. Описание и объяснение ее конкретного функционирования, естественно, должно проводиться на основе физико-математического моделирования, кибернетики, теории регулирования. Так, зная электронные основы работы транзистора, мы не прибегаем к квантовой теории твердого тела при расчете радиоэлектронных схем.

Мы видим, что биофизика сама является сложной системой знаний. Как и физика неживой природы, она содержит феноменологические и атомно-молекулярные разделы.

В литературе приходится встречаться с односторонним определением содержания биофизики. Биофизика отождествляется с физической химией [50], с физиологией [51], с теорией сложных систем [52]. В ряде монографий и курсов биофизики можно найти глубокое изложение отдельных проблем [52—56], но в этих трудах, зачастую имеющих хрестоматийный характер, отсутствует последовательно развитая физическая концепция. Сегодня остро ощущается необходимость построения биофизики как неотъемлемой части физики.

Надо сказать несколько слов о радиобиологии. Воздействие коротковолновой радиации на организм, клетки, надмолекулярные биологические структуры и биологические молекулы подлежит физическому истолкованию. Однако радиобиология изучает жизнь в аномальных условиях (если отвлечься от фона космической радиации). Это — специальная область, чрезвычайно развившаяся за последние десятилетия вследствие громадного ее

практического значения, в частности медицинского. Радиобиология требует специального монографического рассмотрения. В этой книге радиобиологические проблемы не затрагиваются.

В конечном счете обоснование биофизики следует искать в атомно-молекулярной структуре и функциональности. Эта книга посвящена физике главных для жизни веществ — белков и нуклеиновых кислот. Построение и стремительное развитие молекулярной биологии, происходившее в тесной связи с физикой, привели к тому, что молекулярная биофизика стала сегодня хорошо разработанной областью науки. На основе молекулярной биофизики должна строиться физика надмолекулярных систем, физика процессов развития, физика жизни в целом.

### Литература

1. Ф. Энгельс, Диалектика природы, Госполитиздат, М., 1955.
2. Н. Helmholtz, *Über sich selbst*, Teubner, 1966.
3. L. von Bertalanffy, *General System Theory*, George Braziller, 1968.
4. Э. С. Бауэр, Теоретическая биология, изд. ВИЭМ, 1935.
5. Б. П. Токин, Теоретическая биология и творчество Э. С. Бауэра, изд. ЛГУ, 1965.
6. Н. Бор, Атомная физика и человеческое познание, ИЛ, 1961.
7. А. Meyer-Abich, *Acta Biotheor.* 11, 11 (1955).
8. Н. Бор, УФН 76, 21 (1962).
9. М. В. Волькенштейн, Перекрестки науки, «Наука», 1972.
10. Э. Шредингер, Что такое жизнь с точки зрения физики, ИЛ, 1947; 2-е изд., Атомиздат, 1972.
11. W. Elsasser, *The Physical Foundation of Biology*, Pergamon Press, 1958.
12. Е. Вигнер, Этюды о симметрии, «Мир», 1971.
13. М. Эйзен, Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул, «Мир», 1973; УФН 109, 545 (1973).
14. J. Monod, *Le hasard et la nécessité*, Seuil, 1971.
15. А. М. Ляпунов, Общая задача об устойчивости движения, Гостехиздат, 1950.
16. Н. Г. Четаев, Устойчивость движения, Гостехиздат, 1946.
17. А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин, Теория колебаний, Физматгиз, 1959.
18. L. Onsager, *Phys. Rev.* 37, 405; 38, 2265 (1931).
19. Н. Casimir, *Rev. Mod. Phys.* 17, 343 (1945).
20. И. Пригожин, Введение в термодинамику необратимых процессов, ИЛ, 1961.
21. П. Глансдорф, И. Пригожин, Термодинамическая теория структуры, стабильности и флуктуаций, «Мир», 1973.
22. С. де Гроот, Термодинамика необратимых процессов, ИЛ, 1956.
23. К. Денбиг, Термодинамика стационарных необратимых процессов, ИЛ, 1954.
24. Р. Хаазе, Термодинамика необратимых процессов, «Мир», 1967.
25. A. Katchalsky, P. Curran, *Nonequilibrium Thermodynamics in Biophysics*, Harvard Univ. Press, 1965.
26. И. Пригожин, Г. Николис, УФН 109, 517 (1973).
27. L. Szillard, *Z. Phys.* 53, 840 (1929).
28. Л. Бриллюэн, Наука и теория информации, Физматгиз, 1960.
29. Г. Кастлер, Возникновение биологической организации, «Мир», 1967.