

# Х. Рёдерер. Введение в физику и психофизику музыки

2008. 228 р. Перевод с английского Э. М. Эпштейна.}}

Х. Рёдерер

## Наука о музыке и музыка науки. Мультидисциплинарный подход

### 1.1. Взаимодействующие физические системы

Представьте, что вы сидите в концертном зале и слушаете выступление солиста. Посмотрим, какие системы причастны к музыке, которую вы слышите. Прежде всего это, очевидно, исполнитель и инструмент, который «делает» музыку. Во-вторых, это воздух в зале, который разносит звук во все стороны. В-третьих, это вы, слушатель. Другими словами, мы имеем цепочку систем *инструмент* → *воздух* → *слушатель*. Что связывает их при исполнении музыки? Колебания определенного типа и формы, называемые звуком, которые распространяются от точки к точке в виде волн и к которым чувствительно наше ухо. (Существует много других типов и форм колебаний, которые мы воспринимать не можем, либо воспринимаем, но посредством других чувств, таких как осязание или зрение).

Физик для описания этих трех систем использует более общие термины. Он называет их так: *источник* → *среда* → *приемник*. Такая цепочка систем появляется при изучении и других физических процессов взаимодействия, включая свет радиоволны, электрические токи, космические лучи и т. д. Источник излучает, среда проводит, приемник воспринимает, регистрирует или, в общем случае, реагирует каким-то специфическим образом. То, что излучается, распространяется и регистрируется, представляет

собой энергию в одной из многих форм, и эта форма зависит от конкретной ситуации. В случае звуковых волн это упругая энергия, заключенная в колебаниях давления, т. е. быстрое чередование сжатия и расширения воздуха<sup>[1]</sup>. Перенос такой энергии сопровождается переносом акустической информации, при котором возникает связь между структурой колебаний в источнике и откликом на них приемника (также проявляющимся в форме колебаний). Таким образом, можно сказать, что звуковая волна является *носителем* информации, которая может составлять содержание и смысл речи и музыки (при этом переносимая энергия необходима, но не она *определяет* произносимые слова и исполняемую музыку!).

Взглянем более пристально на системы, причастные к созданию музыки. В источнике, т. е. музыкальном инструменте, можно выделить несколько различных физических компонент:

1. *Первичный механизм возбуждения*, который должен быть активирован исполнителем. Примерами могут служить возбуждение скрипичной струны смычком или щипком (пиццикато), поток воздуха, обдувающий клин во флейте, мундштук кларнета, губы играющего на медном духовом инструменте, а также голосовые связки в гортани певца. Этот механизм возбуждения действует как первичный источник акустической энергии.
2. Основной *колеблющийся элемент*, который при возбуждении первичным механизмом способен поддерживать четко определенные моды колебаний нужной частоты; таковым служат струны скрипки, столб воздуха внутри духового инструмента или органной трубы. Этот колеблющийся элемент определяет высоту музыкального тона и, в качестве приятного подарка, добавляет высокие гармоника, необходимые для придания этому тону характерного звучания (тембра). Вдобавок он может служить накопителем колебательной энергии. В духовых инструментах он также управляет первичным механизмом возбуждения посредством обратной связи (сильной в деревянных духовых инструментах, слабой в медных и отсутствующей в фисгармонии и в человеческом голосе).
3. Многие инструменты содержат дополнительный *резонатор* (дека рояля, корпус струнного инструмента, раструб духового инструмента, буккофарингеальная полость), предназначенный для более эффективного преобразования колебаний первичного элемента (струны, столба воздуха)

в звуковые колебания окружающего воздуха и придания тону его окончательного тембра.

Что касается среды, то здесь также необходимо различать *собственно среду*, через которую проходит звук, и ее *границы*, т. е. стены, потолок, пол, публику в зале и т.д., которые сильно влияют на распространение звука вследствие отражения и поглощения звуковых волн и конфигурация которых определяет качество акустики зала (реверберацию, эхо).

Наконец, у слушателя мы выделяем следующие основные компоненты: 1) наружное ухо с *барабанной перепонкой*, которое улавливает колебания давления в звуковой волне и превращает их в механические колебания, которые через связь из трех маленьких косточек передаются в 2) внутреннее ухо, или *улитку*, где колебания сортируются по частотным диапазонам, воспринимаются рецепторными клетками и преобразуются в электрические нервные импульсы. 3) *Слуховая нервная система* передает нервные импульсы в мозг, где акустическая информация обрабатывается и отображается в виде реакций нейронов на слуховые сигналы в определенных участках коры головного мозга, запоминается в памяти и в конечном итоге передается другим центрам мозга для дальнейшего распознавания и аффективной реакции. Эти последние стадии приводят к сознательному восприятию музыкальных звуков.

Заметим, что мы можем заменить слушателя каким-либо записывающим устройством: например, магнитофоном, или цифровым дисковым рекордером, или системой фотоэлектрической записи на пленке. При этом по-прежнему можно распознать по крайней мере три из упомянутых подсистем — механическое детектирование с последующим преобразованием в электрические сигналы в микрофоне, преднамеренное или случайное преобразование или обработку в электрической цепи и запоминание, соответственно, на ленте, диске или пленке. Первую систему, инструмент, можно заменить электронным проигрывающим устройством, в котором мы легко распознаем первичный механизм возбуждения и колеблющийся элемент в громкоговорителе. Итог проведенному обсуждению подводит табл. 1.

Главная цель этой книги состоит в подробном анализе того, что происходит на каждом этапе, отмеченном в этой таблице, и при каждом переходе от одного этапа к следующему при исполнении музыки на реальных инструментах.

## 1.2. Характерные особенности музыкальных звуков

Представители всех культур согласятся в том, что любой отдельно звучащий музыкальный тон обладает тремя первичными характеристиками —

Таблица 1. Физические и биологические системы, участвующие в создании и восприятии музыки

Система	Функция	
Источники <	Механизм возбуждения Колеблющийся элемент Резонатор	Снабжение акустической энергией Задание характеристик основного тона Установление окончательных характеристик музыкального тона Преобразование в колебания давления воздуха
Среда	[ Собственно среда Границы	Распространение звука Отражение, преломление, поглощение
Приемники <	Барабанная перепонка Внутреннее ухо Нервная система	Превращение в механические колебания Первичная сортировка по частотам Преобразование в нервные импульсы Обработка акустической информации Перенос к определенным центрам мозга Процессы распознавания и аффективная реакция

высотой, громкостью и тембром<sup>[2]</sup>. Мы не будем пытаться дать формальные определения этим субъективным характеристикам («психофизическим величинам»), а лишь отметим, что высота тона ощущается как басовитость или визгливость, а громкость — как сила или интенсивность звука. Тембр, или окраска, тона позволяет различать звуки разных инструментов даже при одинаковой высоте и громкости. Эти три характеристики звука отличают *музыкальный тон от шума*; хотя шуму можно приписать вполне определенную громкость, гораздо труднее говорить о какой-то определенной высоте и тембре шума.

Ощущение высоты, громкости и тембра музыкального тона возникает в результате действия сложных физических механизмов уха и обработки информации нервной системой. Как будет показано в разд. 1.4, это ощущение субъективно и не поддается непосредственному физическому измерению. Однако каждое из этих первичных ощущений в отдельности можно связать со вполне определенной физической характеристикой исходного

стимула — звуковой волны, которую можно измерить и представить в числовой форме при помощи *физических* методов. Как будет показано, соответственно, в разд. 2, 3 и 4, ощущение высоты тона связано в первую очередь с *основной частотой* (частотой повторения картины колебаний в гармоническом звуке, определяемой числом колебаний в секунду), ощущение громкости — с *интенсивностью* (потоком энергии или амплитудой колебаний давления в звуковой волне, достигающей уха), и ощущение тембра — со *спектром*, т. е. пропорцией, в которой смешиваются между собой другие, более высокие частоты, называемые *гармониками*.

Это слишком упрощенная картина. Во-первых, высота сложного музыкального тона может четко ощущаться даже при отсутствии основной частоты (разд. 2.7), она немного меняется при изменении громкости, и одна и та же нота может в одном ухе вызывать несколько иное ощущение высоты, чем в другом. Во-вторых, ощущение громкости тона постоянной физической интенсивности будет меняться при изменении частоты, так что громкость суперпозиции нескольких тонов различной высоты (например, аккорда) не связана простым образом с суммой потоков звуковой энергии, создаваемых отдельными компонентами; с другой стороны, воспринимаемая громкость последовательности тонов очень короткой протяженности (например, при игре стаккато) также зависит от длительности каждого тона (разд. 3.4). В-третьих, ощущение тембра, необходимое для распознавания музыкальных инструментов, представляет процесс, использующий гораздо больше информации, нежели просто спектр тона, столь же важными оказываются характеристики нарастания и спада (разд. 4.8), это легко проверить, попробовав узнать музыкальные инструменты при воспроизведении магнитной записи в обратном направлении.

Чтобы еще более усложнить картину, заметим, что на реальное музыкальное восприятие оказывают влияние процессы в мозге, связанные с прошлым знанием. Например, тона данного инструмента могут иметь спектральные характеристики, заметно меняющиеся в пределах ближайшего окружения инструмента, так что спектральный состав данного тона может существенно меняться от одной точки концертного зала к другой (разд. 4.7), тем не менее эти тона могут без труда распознаваться как принадлежащие одному и тому же инструменту. Или наоборот, опытный музыкант может испытывать большие трудности при определении точной высоты одиночного тона, порождаемого электронным устройством и лишенного высоких гармоник, который поступает к нему через наушники, поскольку его центральная нервная система не имеет нужной ключевой дополнительной информации, которая обычно приходит вместе с «реальными» знакомыми звуками.

Другой существенной физической характеристикой музыкального тона является пространственное направление, с которого приходит соответствующая звуковая волна. Здесь существенна небольшая разница во времени прихода акустического сигнала в каждое ухо, зависящая от направления распространения звука. Эта временная разность измеряется и кодируется нервной системой, давая ощущение *направленности* тона, стереофоничности или латерализации (разд. 2.9).

Когда два (или более) тона звучат одновременно, наш мозг способен, с некоторыми ограничениями, различить их по отдельности. Новые, менее

определенные, но тем не менее очень важные в музыкальном отношении субъективные ощущения возникают при наложении двух или более тонов, в совокупности приводя к понятию гармонии. Среди других существуют «статические» ощущения *консонанса* и *диссонанса*, связанные, соответственно, с приятным или раздражающим характером определенных сочетаний тонов (разд. 5.2), и «динамическое» ощущение стремления *разрешить* данный диссонансный интервал или аккорд (разд. 5.5), своеобразный эффект биений (разд. 2.4) или различный характер *мажорных* и *минорных* аккордов. В частности, как мы увидим в разд. 5.2, наиболее «совершенный» музыкальный интервал, октава, обладает уникальным свойством: два тона, высота которых различается на одну или большее число октав, воспринимаются как принадлежащие одному и тому же «семейству» тонов. Вследствие этого все ноты, отличающиеся на одну или несколько октав, имеют одно и то же название. Это циклическое свойство музыкальных тонов (возвращение к тому же «семейству» при перемещении на одну октаву вверх или вниз) носит наименование *хрома*, оно возбуждало интерес людей в течение тысяч лет и сегодня находит объяснение в физических, физиологических и нервных процессах, происходящих в слуховой системе. Все эти фундаментальные музыкальные ощущения «высшего порядка» универсальны, они присущи людям всех культур с самого раннего возраста.

Корреляция высоты тона, громкости и статических аспектов тембра со специфическими физическими характеристиками отдельных тонов «универсальна» — она не зависит от культурного окружения данного индивидуума. Это относится к хроме и особой роли октавы и квинты как совершенных консонансов. Такие универсальные субъективные характеристики должны быть естественным следствием механизмов обработки информации в центральной нервной системе и, следовательно, результатом биологической эволюции, а не культуры (см. разд. 5.5 и приложение В). Представляется универсальным даже существование определенных музыкальных шкал. Это действительно подтверждается недавними находками археологов, которые показали, что музыкальные гаммы были в ходу уже во времена верхнего палеолита [35], 27 000-21 000 лет назад (рис. 1).



Рис. 1. Трубы, изготовленные из птичьих костей. Датируется 27 000-21 000 годами до нынешнего времени

Пока, конечно, мы говорим лишь об основных элементах, общей «инфраструктуре» музыки. На самом деле музыка зависит от того, как эта инфраструктура *используется*, как сочетаются мелодия, гармония и ритм. Здесь также существуют некоторые основополагающие правила, связанные с физиологическими и нейробиологическими функциями слуховой системы человека, которые следовало бы рассмотреть в этой книге. Однако этот набор правил непрерывно меняется и усложняется под влиянием «окружения», т. е. развития конкретной музыкальной культуры. Поскольку мозгу предъявляется более новый репертуар, контекстная зависимость этого набора меняется.

### 1.3. Фактор времени в музыке

Непрерывный звук постоянной частоты, интенсивности и спектрального состава быстро надоедает. Более того, спустя некоторое время мы перестаем осознавать его и можем вдруг уразуметь его бывшее присутствие лишь после того, как он прекратился (разд. 2.9). Музыка складывается из тонов, физические характеристики которых меняются со временем по некоторому закону. Именно эта зависимость от времени делает воспринимаемый звук «музыкальным» в истинном смысле. Далее мы будем именовать временную последовательность отдельных тонов или суперпозиций тонов *музыкальным сообщением*. Такое сообщение может быть *смысловым* (его называют также «тональным образом»), если оно несет *информацию*, которая каким-то образом заставляет наш мозг реагировать, не просто замечая наличие сообщения, а инициируя целый ряд действий — анализ, ассоциирование с ранее полученными сообщениями, накопление в памяти и эмоциональный отклик.

*Мелодия* есть простейший пример музыкального сообщения. Некоторые признаки смыслового музыкального послания являются ключевыми элементами западной музыки: тональность и ведущая нота (доминирование одного тона в последовательности), чувство возврата к тонике, модуляция и ритм (разд. 5.5). Основная черта мелодии состоит в том, что последовательность тонов представляет ряд дискретных конечных ступенек высоты звука, и так практически во всех музыкальных культурах. Это означает, что из бесконечного числа всевозможных частот наша слуховая система предпочитает выделять дискретные значения, соответствующие нотам *музыкальной шкалы*, хотя мы способны различать изменения частоты, гораздо меньшие основного шага любой шкалы (разд. 5.3). Другая характерная особенность состоит в том, что нервный механизм, анализирующий музыкальное сообщение, обращает внимание только на *изменения* высоты тона; способность определять «абсолютную» высоту (абсолютный слух) большинство людей утрачивает в раннем возрасте.

Рассмотрим фактор времени в музыке несколько подробнее. Существуют три различных шкалы времени, в которых происходят временные вариации, доступные для психоакустического восприятия. Во-первых, это «микроскопическая» временная шкала реальных колебаний в звуковой волне, охватывающая область периодов от 0,00007 до 0,05 с. Далее имеется «промежуточная» область с центром в области одной десятой секунды, в которой происходят изменения, связанные с нарастанием и затиханием тона, представленного изменениями в микроскопической области. Наконец, мы имеем «макроскопическую» временную шкалу, идущую вверх от 0,1 с, соответствующую обычной длительности музыкального тона, чередованиям и ритму. Важно отметить, что каждой такой временной шкале соответствует определенный уровень обработки в слуховой системе со своей особой функцией. 1) Микроскопические колебания принимаются и кодируются *внутренним ухом* (разд. 2.8) и создают в основном первичное восприятие тона (высоту, громкость и тембр). 2) Промежуточные (переходные) изменения влияют в основном на механизмы работы *нервных путей* от уха к слуховым областям мозга (разд. 2.9) и создают дополнительные условия для восприятия качества, идентификации и дискриминации тонов (разд. 4.9). 3) Макроскопические изменения времени обрабатываются на высшем уровне нервной системы — в *коре головного мозга*, они определяют действительное музыкальное сообщение и его познавательные харак

Кора головного мозга представляет складчатый наружный слой, состоящий из белой нервной ткани, в котором происходит основная обработка сенсорной и познавательной информации (см. разд. 5.6). Мы здесь не будем, за немногими исключениями, специально заниматься анатомией и

нейрофизиологией мозга. Имеется много классических и современных книг на эту тему, которые можно найти в медицинских библиотеках [23,65].

теристики (разд. 4.9). Чем выше мы поднимаемся по этим уровням обработки слуховой информации, тем труднее становится определить и выделить те психологические эффекты, к которым приводит эта обработка, и тем сильнее влияние контекста, в котором появляется данный тон, — образования, культурного окружения, а также нынешнего эмоционального и поведенческого состояния индивидуума. Но даже эта контекстная зависимость в значительной степени определяется тем универсальным способом, которым мозг обрабатывает акустическую информацию (разд. 5.6).

Вот уже более 100 лет музыковеды жалуются, что физика музыки и психоакустика занимаются в основном изучением создания и восприятия стационарных, постоянных тонов или непонятных комплексов тонов, производимых лабораторным оборудованием. Эти жалобы вполне оправданны, но столь же оправданными являются и причины таких ограничений. Как уже отмечалось, обработка последовательностей тонов происходит на высшем уровне центральной нервной системы, включающем сложную и пока недостаточно изученную цепочку механизмов. Чтобы дать научное описание всего этого, необходимо иметь ясное представление обо всех основных деталях — фундаментальных простых физических и психоакустических механизмах. Следует однако, отметить, что такие неинвазивные методы, как функциональная магнито-резонансная визуализация и позитронно-эмиссионная томография, действительно приносят новые фундаментальные знания о *нервных коррелятах* «реальной музыки» (разд. 4.9), т. е. о специфической нервной активности и взаимодействиях, участвующих в обработке музыкальной информации.

#### 1.4. Физика и психофизика

Главную цель физики можно сформулировать следующим образом: создание методов, позволяющих делать предсказания количественного характера относительно будущей эволюции данной физической системы (или восстанавливать ее прошлую историю), исходя из тех условий, в которых эта система находится в некоторый заданный момент времени. Например, физика позволяет предсказать, как долго будет двигаться данный автомобиль определенной массы при заданных силах торможения и где он остановится, при условии, что нам известны положение и скорость автомобиля в начальный момент времени. Если заданы масса, длина и натяжение скрипичной струны, физика предсказывает возможные частоты, с которыми она будет колебаться, если дернуть за нее или ударить по ней каким-либо образом (см. разд. 4.3). Если известны форма и размеры органной трубы, а также состав и температура газа (воздуха) внутри нее, физика может предсказать частоты основного тона и обертонов звука, издаваемого ею при прохождении через нее воздуха (разд. 4.5).

В классической физике «предсказать» означает предоставить математический аппарат, ряд алгоритмов, уравнения или «рецепты», которые, будучи основаны на физических законах, управляющих анализируемой системой, устанавливают математические соотношения между значениями физических величин, характеризующих систему в любой данный момент времени (такowymi являются положение и скорость автомобиля, а также частота и амплитуда колебаний в двух приведенных примерах). Эти соотношения затем используются для определения этих величин и их изменения во времени.

Чтобы установить, какие физические законы управляют данной системой, мы должны сначала наблюдать за этой системой и проводить количественные *измерения* соответствующих физических величин, которые позволят экспериментально найти причинные связи между ними. Физический закон выражает определенное соотношение, общее для многих различных физических систем независимо от частных обстоятельств. Например, законы тяготения справедливы и здесь на Земле, и для Солнечной системы, и для звезды, движущейся по орбите в галактике, и всюду во Вселенной. Ньютонские законы движения применимы ко всем телам независимо от их химического состава, цвета, температуры, скорости, размера или положения в пространстве.

Большинство реальных систем, изучаемых в физике, даже простые и знакомые, как те, что фигурировали в приведенных выше примерах, настолько сложны, что точные и подробные предсказания оказываются невозможными. Поэтому приходится вводить приближения и придумывать упрощенные *модели*, которые представляют данную систему только в ее основных чертах. Вездесущая «материальная точка», к которой обычно сводится в начальных учебниках физики реальное тело, будь то планета, автомобиль или молекула газа, — это наиболее простая модель из всех возможных. Аналогично, изучение колеблющихся струн или органных труб начинается с предположения, что эти струны и трубы представляют собой бесконечно тонкие объекты. Далее эта модель уточняется, ей придается более реалистическая цилиндрическая (или коническая) форма (разд. 4). Во многих случаях требуется разбить изучаемую систему на ряд более элементарных подсистем, взаимодействующих между собой, каждая из которых описывается определенным набором физических законов.

Что касается психофизики, то, как и физика вообще, она стремится делать предсказания о поведении данной системы при заданных начальных условиях. Рассматриваемой системой здесь является *сенсорная система* человека (или животного) — рецепторный орган и связанные с ним отделы нервной системы, — условия определяются *физическими входными стимулами*, а отклик выражается в виде возникающих в мозгу *психологических ощущений*, которые человек словесно описывает, а животное проявляет в специфическом поведении. В частности, одна из ветвей психофизики — *психоакустика* связывает звуковые стимулы со слуховыми ощущениями. Опять-таки, как и физика в целом, психофизика требует, чтобы причинная связь между физическим стимулом на входе и психологическим (или поведенческим) откликом на выходе устанавливалась в результате экспериментов и измерений; она также вынуждена вводить упрощающие допущения и конструировать модели для того, чтобы иметь возможность находить количественные математические соотношения и на их основе делать предсказания. На раннем этапе развития психофизики эмпирические связи вход-выход были сведены в так называемые психофизические законы, при этом реагирующий организм рассматривался как черный ящик. Сегодня психофизические модели учитывают психологические функции органов чувств и соответствующих отделов нервной системы.

В отличие от классической физики, но подобно тому, как обстоит дело в квантовой физике, большинство процессов измерения в психофизике оказывает существенное возмущающее действие на наблюдаемую систему (примерами могут служить человек, рассказывающий об ощущениях, вызванных данным физическим стимулом, животное, приучаемое реагировать определенным образом на некоторые стимулы), и такое возмущение не уда

(или, в случае хаотических систем вроде пинбол-машины, физической невозможностью *точно* воспроизводить одни и те же начальные условия). Однако в области атомных и субатомных размеров эта точка зрения становится ненадежной. Природа устроена так, что как бы мы ни старались улучшить наши методы, большинство измерений всегда будет иметь ограниченную точность, и могут быть предсказаны только *вероятности* значений физических величин в атомной области. Например, невозможно предсказать, *когда* распадется данное радиоактивное ядро (даже если ждать невообразимо долгое время) или *где* окажется в данный момент времени электрон с данной энергией, летящий от катода к экрану телевизора, — можно определить лишь вероятности. Для описания атомных и субатомных систем в начале XX века потребовалось создать совершенно новую физику — так называемую *квантовую механику*. Когда мы пытаемся применить к квантовой области тот способ мышления, который наш мозг приобрел во взаимодействии с макроскопическим классическим миром, и пробуем представить, что должно произойти «внутри» квантовой системы, пока она остается ненаблюдаемой, мы вынуждены предполагать парадоксальное, контринтуитивное, а то и вовсе мистическое поведение, чтобы «объяснить» результаты измерения. Тем не менее квантовая механика оказалась исключительно успешной, и мы должны смириться с тем фактом, что мы в принципе не можем знать, что происходит внутри квантовой системы, когда она предоставлена самой себе в промежутках между измерениями; доступна лишь информация относительно гораздо более сложного объекта — квантовой системы *под наблюдением*.

ется устранить полностью. Вследствие этого результат психофизического измерения отражает не состояние системы самой по себе, а более сложное состояние «*наблюдаемой системы*». В отличие от классической физики и в тесной аналогии с квантовой физикой нельзя ожидать, что предсказания психофизики будут точными или однозначными, они указывают только на возможность данного результата, т. е. позволяют определить его вероятность. В отличие от классической физики и подобно квантовой физике здесь один и тот же стимул может привести к различным дискретным выходам, как в случае множественных не вполне определенных ощущений высоты звука, создаваемого некоторой суперпозицией чистых тонов (см. приложение В). В общем случае психофизика требует экспериментировать со многими различными эквивалентными системами (субъектами), поставленными в одинаковые условия, и подвергать результаты статистической обработке.

Совершенно очевидно, что указанные аналогии между физикой и психофизикой имеют свои пределы. В физике процесс, или «рецепт», измерения, определяющий данную физическую величину, например, длину, массу или скорость объекта, можно сформулировать вполне строгим и однозначным способом. Пока мы имеем дело с физиологическим откликом, скажем, скоростью нервного импульса, наведенным эффектом «гусиной кожи» (мурашек) или учащением сердцебиения, психофизические измерения также можно представить в строгой количественной форме. Но как в психоакустике определить и измерить субъективные ощущения высоты тона, громкости, тембра или, если пойти дальше, силу стремления, привести данную мелодию к ее тоническому завершению? Или как провести измерения «внутреннего слуха», т. е. действия, создающего впечатление от музыкального тона по собственной воле, без внешних стимулов? Можно ли это сделать только с помощью функционального магнито-резонансного сканирования или микроэлектродов, вживленных в клетки мозга? Как мы увидим в разд. 5.6, подобные процедуры говорят нам о локализации изучаемых нейropsychологических процессов, но не могут дать какой-либо количественной информации о реальных *ощущениях*, испытываемых субъектом!

Многие ощущения можно *классифицировать*, относя их к более или менее хорошо определенным типам (называемым сенсорными качествами, если они вызываются одним и тем же органом чувств). Примером может служить тот факт, что люди обмениваются мнениями относительно высоты тона, громкости, качества звучания, консонанса и т. д. без взаимного

1

Необходимо подчеркнуть, что это всего лишь *аналогия*. Квантовая физика как таковая не играет заметной роли в работе нервной системы как целого, она определяет лишь химические и электрохимические реакции внутри нейронов и между ними.

непонимания относительно смысла этих понятий. Более того, два ощущения, принадлежащие к одному и тому же типу и испытываемые непосредственно одно за другим, достаточно подготовленный субъект может упорядочить, отметив, что у одного из них данное качество «больше» (или «выше», «сильнее», «ярче» «сильнее выражено» и т. д.), или «такое же», или «меньше», чем у другого. Например, в эксперименте с принудительным выбором при последовательном предъявлении двух тонов испытуемый должен решить, имеет ли второй тон высоту более высокую, такую же или более низкую, чем первый тон (разд. 2.4). Другой пример упорядочения: предъявляются три сложных тона одинаковой высоты и громкости, и требуется объединить их в пары, установив, какие из тонов наиболее близки по тембру, а какие, наоборот, далеки (разд. 4.8). Одной из основных задач психофизики является определение для каждого типа ощущений минимального обнаруживаемого значения (порогового значения) физической величины, ответственной за данный стимул, минимального обнаруживаемого изменения (*дифференциального предела*, или замечаемой разницы) и минимальной дискриминации между двумя одновременными ощущениями одного и того же типа (разд. 2.3 и 3.4). Обычно психоакустические измерения с людьми состоят в предъявлении звуков, создаваемых электронными устройствами и подаваемых в наушники, в условиях звукоизолированной комнаты (безэховой камеры). Испытуемых просят следовать строгому протоколу слушания на предмет оценки услышанных тонов и сравнения их с эталонными тонами с последующим описанием испытанных ощущений по возможности объективным образом.

Способность любого индивидуума классифицировать и упорядочивать субъективные ощущения придает таким ощущениям статус, почти эквивалентный статусу физической величины, и оправдывает введение понятия *психофизическая величина*. При этом мы не должны ожидать априори, что любой человек сможет без предварительной тренировки решить, является ли данное ощущение по отношению к некоторому эталонному ощущению, принятому за единицу измерения, «вдвое большим», или «вдвое меньшим», или вообще отличающимся каким-то другим *численным* коэффициентом. Однако существуют ситуации, в которых можно научить делать количественные оценки психофизических величин на статистической основе, и в некоторых случаях мозг оказывается вполне успешным в этом деле. Примером может служить зрение. При достаточной практике можно с большой точностью оценивать размеры предметов, если имеется достаточно информации о данном объекте. Такие утверждения, как «вдвое длиннее» или «в два раза ниже», делаются без особого труда. Из этого примера вполне ясно, что «единица измерения» и соответствующий психофизический процесс сравнения встраивается в мозг только в результате *приобретения опыта и обучения*, при многочисленных контактах с исходными физическими величинами. Того же можно добиться и в отношении других психофизических ощущений, например, громкости, это достигается путем тренировки способности к сравнению и количественным оценкам. Показательным примером может служить тот факт, что музыканты всего мира используют одинаковые обозначения для уровня громкости (разд. 3.4). И тот факт, что мы можем оценить громкость ослабленного звучания полного органного аккорда, слушая его за пределами церкви, или звуков отдаленного оркестра,

играющего фортиссимо, может служить подтверждением того, что громкость представляет контекстно-зависимую психофизическую величину.

Здесь мы приходим, пожалуй, к наиболее существенным различиям между физикой и психофизикой. 1) Повторяющиеся эксперименты одного и того же рода могут *изменять* отклик психофизической системы, подвергнутой наблюдению; мозг обладает способностью к обучению, постепенно изменяющему отклик на один и тот же входной стимул по мере увеличения числа его повторений. 2) Степень *мотивации* обучаемого субъекта и вытекающие отсюда последствия, ментальные или физические, могут влиять на результаты измерений совершенно непредсказуемым образом. 3) Экспериментатор может невольным образом побудить испытуемого сосредоточиться на некоторых отдельных областях или контекстах предъявляемого стимула, что приведет к неопределенности результатов. Вследствие первого из указанных факторов статистическое психофизическое исследование с одним отдельным субъектом, подвергнутым повторяющимся «измерениям», не тождественно статистическому изучению, состоящему в проведении одного измерения на многих различных субъектах (точно так же, как при измерении квантовой системы!). Это расхождение связано не только с различиями между отдельными индивидуумами, но и с теми изменениями, которые производят в них повторные воздействия. И вообще, очень сложные петли обратной связи в нервной системе и стратегия мозга, предсказывающего ближайшие события (и затем вносящего поправки, если предсказание оказалось ошибочным), делают психоакустические измерения особенно трудными для планирования, постановки и интерпретации.

### 1.5. Психофизика и нейрология

Психофизика представляет часть другой, более широкой дисциплины — нейрологии. Например, психоакустика задается лишь вопросом, *почему* мы слышим то, что мы слышим, при предъявлении данного звукового стимула, но она не ставит вопроса о *смысле* данного акустического сигнала, оставляя в стороне все процессы более высокого уровня — распознавание, эмоциональный отклик и поведение. Нейрология, или, более точно, *системная нейрология*<sup>[3]</sup>, — это дисциплина, которая изучает функции нервной системы, связанные с *информацией*, получаемой из внешнего мира и собственного тела, вместе со всеми распознавательными, эмоциональными и поведенческими реакциями. Как и физика, она работает с моделями. Это в основном модели функциональных перекрестных соотношений (например, информационных блок-схем) и, на микроскопическом уровне, модели нервных сетей. Хотя такие модели представляют собой идеализации и приближения, в них реалистически учитываются нейроанатомическая структура и физиологические процессы (разд. 2.8).

Главной системой, подлежащей изучению, разумеется, является мозг. Коротко говоря, наиболее важные функции *мозга животных* (в основном, коры головного мозга) состоят в отображении и предсказании изменений окружающего мира, а также в планировании поведенческого отклика для максимизации шансов на выживание и продолжение вида. Для этого мозг должен в долгосрочной перспективе приобрести необходимую сенсорную информацию, чтобы иметь представление о пространственном окружении и понять причинно-следственные связи во временной череде событий. В краткосрочной перспективе необходимо отслеживать текущее состояние окружающей среды и собственного организма, замечать значимые изменения, делать краткосрочные предсказания, основываясь на жизненном опыте (приобретенная информация) и инстинктах (генетическая информация), и формировать поведенческий отклик, наиболее благоприятный для организма (разд. 4.9). Общее руководство и мотивация к решению этих задач осуществляются *лимбической системой*, филогенетически старым отделом мозга (в популярной литературе его иногда называют «наш мозг ящера»), представляющим группу глубоко расположенных ядер, но в конечном счете связанным с корой мозга. Лимбическая система выдает сигналы, определяющие аффективное состояние организма (удовольствие или боль, страх или смелость, любовь или ненависть, тревога или надежда, радость или печаль, и т. д.). В разд. 4.8 и 5.6 будут подробно рассмотрены функции мозга и их связь с восприятием музыки.

*Человеческий мозг* может «уходить в себя», работать в собственных интересах, планируя поведенческий отклик, полностью независимый от текущего состояния окружающей среды и своего организма и не связанный с проблемами сиюминутного выживания (разд. 5.6). Он может вызывать информацию по своему желанию, без внешней или соматической стимуляции, анализировать ее и запоминать модифицированные таким образом варианты для последующего использования; мы называем это *процессом человеческого мышления*. Кроме того, из-за способности к таким «внутренним командам» мозг может отменять веления лимбической системы (хорошим примером может служить диета!), а также включать в оборот такие процессы обработки информации, для которых он не предназначался изначально, — в качестве примеров можно указать на математику и музыку!

Все функции мозга, связанные с восприятием и познанием, основаны на генерации, распространении и преобразовании *электрических импульсов* нейронами — основными элементами нервной системы (разд. 2.8). Человеческий мозг содержит более десяти миллиардов таких клеток, один нейрон может соединяться с сотнями, даже тысячами других, и каждая мозговая операция, какой бы простой она ни казалась, обычно включает в работу миллионы нейронов. Именно в архитектуре синаптических межсоединений этого конгломерата нейронов и его активации электрическими импульсами скрыты чудеса памяти, сознания, мышления и чувства (разд. 5.6). Любая мозговая операция, будь то узнавание знакомого лица, впечатление от музыкального звука или удовольствие от поедаемого шоколада, определяется совершенно особым *пространственно-временным распределением электрической активности нейронов*. Вышеупомянутое отображение окружающего мира или, коли на то пошло, любое умственное действие, даже вполне абстрактная мысль, — все это не более чем возникновение некоторого распределения нервных импульсов в определенных областях коры, которое, будучи невероятно сложным, имеет структуру, абсолютно *специфическую*, присущую тому, что представляется или отображается (является его *нейронным коррелятом*)<sup>TM</sup>.

Из-за этой сложности нет надежды, по крайней мере в настоящее время, определить полную, подробную нейронную картину экспериментально и представить ее форме, которую можно описать математически. Однако, как мы увидим в разд. 2.8, можно опрашивать отдельные нейроны путем имплантации микроэлектродов, регистрирующих электрические всплески их активности у лабораторных животных и в мозгу человека при нейрохирургических операциях. В то же время можно регистрировать средние

<sup>TM</sup>Отметим особо, что такие структуры, будучи абсолютно специфическими, не имеют никакого «видимого» сходства с тем, что они представляют! Когда мы видим дерево, думаем о дереве или мечтаем о дереве, в нашем мозгу не возникает ничего, напоминающего форму дерева, — только невероятно сложное распределение нейронной активности, которое всегда одно и то же, специфическое для образа дерева (разд. 5.6).

изменения коллективной активности сотен, тысяч или миллионов нейронов при использовании методов неинвазивной томографической визуализации — *функционального магниторезонансного сканирования* и *позитронноэмиссионной томографии* — или более старые методы

электро- или магни-тоэцефалографии (разд. 2.8 и 5.6). Сравнение результатов клинического исследования пациентов с локализованными *мозговыми нарушениями*, впоследствии подробно идентифицированными при посмертном вскрытии, явилось исторически первым методом, использованным для определения функций различных областей мозга.

Человеческий мозг представляет наиболее сложную информационную систему во Вселенной, насколько мы ее знаем сегодня. Поэтому неудивительно, что любой ученый, не говоря о людях, далеких от науки, испытывает наибольшие трудности, пытаясь понять, почему, несмотря на эту сложность, функция нашего собственного мозга представляется нам такой «простой» и в виде «единого целого», которым мы вроде бы можем полностью управлять (это называют, соответственно, «естественной простотой мыслительной функции» и «унитарным характером сознательного опыта»). Аналогично, вполне понятно, что мы сталкиваемся с наибольшими трудностями, признавая тот факт, что для научного описания человеческого мозга в современной нейрологии нет необходимости привлекать какие-либо физически неопределимые и неизмеримые понятия, такие как «ум» или «душа»!

## 1.6. Нейрология и информатика

В предыдущих разделах несколько раз в разных контекстах упоминалось понятие «информация». Например, музыкальное сообщение, по самому смыслу этого слова, представляет собой информацию (разд. 1.3). Но *что такое информация?* Сама постановка этого вопроса представляется абсурдной. Разве мы не живем в Век Информации? Информация формирует человеческое общество. И это не только в нынешнее время — так было с самого начала существования человеческой расы, именно способность к обработке информации отличает нас от животных. Много позже в ходе эволюции человека появились великие изобретения, облегчающие распространение информации, — древние петроглифы, книгопечатание Гутенберга, фотография, звукозапись, радиосвязь, телевидение, компьютер и Интернет стали причиной взрывного, революционного развития. Информация, полезная, ошибочная или умышленно ложная, образовательная, художественная, развлекательная или эротическая, в настоящее время представляет бизнес, оцениваемый в триллионы долларов.

Устройства для обработки информации становятся все быстрее, лучше, дешевле и меньше по размерам. Как уже упоминалось в предыдущем разделе, наиболее сложной, наиболее хитроумной, наиболее совершенной информационной машиной, которая использовалась в ее более или менее современной форме в течение десятков тысяч лет и будет оставаться таковой еще долгое время, является человеческий мозг. Любая задача, решаемая мозгом, — это задача переработки информации, простая или сложная. Наше самосознание, без которого мы не были бы людьми, связывает в реальном времени информацию из прошлого (инстинкты и приобретенный опыт), из настоящего (состояние организма и окружающего мира) и относительно будущего (желания и цели). Эта связь настолько сложна и в то же время взаимосогласована, что она предстает перед нами как единый процесс осознания собственной единственной личности и чувства возможности полного управления ею безо всяких усилий.

Это обстоятельство само по себе представляет большую проблему для ученых при попытке подлинно объективной интерпретации понятия информации. Поскольку «информация — это мы», из-за такой предвзятости нам труднее всего отделить себя от нашего опыта обращения с информацией всякий раз, когда мы пытаемся подойти к этому понятию с научной точки зрения. Подобно порнографии, «мы узнаем ее, когда видим ее», но затрудняемся дать точное определение!

В повседневной речи слово «информация» используется как синоним многих разных слов: «сообщение», «новости», «данные», «инструкция», «объявление», «ответ», «знание», «характеристика» и т. п. Но в науке под информацией обычно понимается сообщение, которое дает ответ на заранее поставленный вопрос (например, «какова масса данного объекта?») или определяет реализацию некоторого ожидаемого исхода (например, результат бросания игральных костей). В физике такими альтернативными вариантами часто служат возможные состояния физической системы (например, многочисленные устойчивые моды колебаний струны или органной трубы), и информация обычно выступает как сообщение о результате некоторого измерения (например, «эта мода является третьей гармоникой»). В технике связи альтернативы обычно имеют вид сообщений, выбранных из данного известного набора возможностей (букв алфавита, слов языка). Мы будем пользоваться термином *информатика* применительно ко всем аспектам информации<sup>[4]</sup>.

В 1940-х годах Клод Шеннон [150] разработал *классическую теорию информации*, которая имеет дело с математическими выражениями, коли-

чественно описывающими такие понятия, как «степень новизны» одной определенной альтернативы<sup>[5]</sup>, «ожидаемый средний прирост информации»

## 13

в процессе, допускающем различные возможные исходы, или степень неопределенности некоторого набора возможных исходов. Сегодня каждый знает, что ответ на вопрос «да или нет?» или решение в пользу одной из двух равновероятных альтернатив содержит один *бит* информации (это есть сокращение от «binary unit» — двоичная единица).

Традиционная теория информации не интересуется смыслом передаваемой информации, целью, с которой ее посылают, мотивацией ее приобретения и действием, которое она может произвести на получателя (реципиента). Поэтому она не дает универсального и объективного определения понятия информации, пригодного для *всех наук*. Она занимается в основном системами связи, системами управления и компьютерами и в общем случае имеет дело с математическими ожиданиями, определяющими *количество* информации, содержащееся в данном сообщении. Это представляет серьезную проблему при использовании понятия информации в биологии, науке о мозге, социологии, — а также и в музыке!

Так что же представляет собой то «неуловимое», что содержится на компакт-дисках или в музыкальной партитуре, переносится звуковыми волнами, воспринимается нашими органами чувств, изменяет наше настроение, — или заключено в геноме, определяющем устройство и функции организма? Это *не* углубления на компакт-диске, *не* знаки на нотном стане, *не* колебания давления воздуха в звуковой волне, *не* нейронная активность мозга и *не* химическая основа молекулы ДНК — все это *носители* информации, но *не* сама информация. Стоит слегка нарушить порядок в этих носителях, и мы можем получить шум, бессмыслицу или исчезновение того эффекта или функции, для выполнения которой они предназначались. С другой стороны, информация может принимать множество форм и тем не менее оставаться самой собой; в конечном счете имеет значение, что *делает* информация, а не то, как она выглядит или звучит, насколько

она велика или из чего состоит. Информация всегда имеет *цель*, и эта цель всегда, без исключения, состоит в том, чтобы где-то и когда-то вызвать определенное *изменение*, которое в противном случае не возникло бы или произошло лишь случайно.

Фундаментальное свойство информации состоит в том, что именно *форма или структура чего-нибудь*, а не энергия или сила, вызывает такое определенное изменение и может делать это еще много раз (конечно, силы и энергия необходимы для того, чтобы реализовать изменение, но они лишь содействуют информации в достижении цели). Важно еще раз подчеркнуть, что сама такая структура или материал, из которого она сделана, — это *не* информация как таковая, хотя часто мы склонны забывать об этом. Имеет значение однозначная причинно-следственная связь между данной структурой и определенным физическим откликом на нее. Не существует *информации самой по себе* в изолированном виде.

Информация всегда требует наличия *источника* или *отправителя* (где располагается или создается исходная структура) и *реципиента* (где происходит нужное изменение). Она должна *передаваться* от одного к другому. Для того, чтобы необходимое изменение произошло, должен существовать и быть задействованным некоторый определенный механизм. Это последнее действие обычно называют *обработкой информации*. Информацию можно *накапливать* и *воспроизводить* как в виде первоначальной структуры, так и в несколько преобразованном виде. В конечном счете информацию определяет производимый ею эффект. Коротко говоря, информация есть обобщающее понятие, определяющее однозначное *соответствие* между определенной структурой в источнике и требуемым изменением у реципиента; это называют *прагматическим аспектом информации* [89]. Определенная таким образом информация играет роль только в *живых системах* с их уникальной способностью устанавливать *информационное взаимодействие* с окружающей средой и между собой, чтобы противостоять «нормальному» (часто неблагоприятному) ходу физических событий. В чисто физическом, неживом, макроскопическом мире изменения происходят под действием сил, возникающих в результате индивидуальных актов взаимодействия между частицами и полями; информация появляется, только когда вмешивается живое существо, например, человек (и связанные с ним проявления в виде книг, компьютеров, роботов и т. д.). Если теперь вернуться к первым абзацам этого раздела и табл. 1, должно стать ясно, что *музыка* — это *информация*, информация совершенно особого рода (разд. 5.8), связывающая весьма специфические структуры физических колебаний с весьма специфическими откликами нейронов мозга.

Существует множество акустических структур, не вызывающих какого-либо специфического отклика за пределами низших слуховых отделов (т. е. не вызывающих ничего, кроме ощущения, что «что-то звучит»); они не создают никакого специфически информационного взаимодействия и не переносят никакой прагматической информации. Но многие акустические структуры способны на это, примером могут служить звуки речи при условии, что вы знаете данный язык, или звуки окружающего мира, если вам известно, чем они вызываются. Существует, однако, один класс акустических структур, которые могут вызывать определенный отклик нейронов в высших отделах мозга без какого-либо предварительного обучения, будучи связанными с врожденными механизмами обработки информации, — это суперпозиции и последовательности периодических тонов, образующие *музыку* во всех культурах (разд. 5.8). Таким образом, вопрос о том, какая информация участвует в создании музыки, сводится к определению соответствующих структур нервного отклика, возникающих в мозгу человека, с последующими поведенческими следствиями. На принятом в этой книге языке информатики это означает, что мы будем изучать те акустические *структуры*, которые создают «музыкальные» звуковые волны, физические механизмы, посредством которых они генерируются и распространяются, и *соответствие* между характеристиками таких структур и вызываемыми ими *изменениями* в системах обработки информации уха и мозга слушателя, в результате которых возникают ощущения и чувства.

### 1.7. Информатика и музыка. Почему существует музыка?

Предыдущее обсуждение может вызвать раздражение у некоторых читателей. Музыка, скажут они, — это «чистая эстетика», проявление врожденной возвышенной способности человека к постижению красоты, а вовсе не просто результат воздействия «холодной информации», заключенной в некоторых волнах давления воздуха, на сложную сеть миллиардов нервных клеток. Однако, как уже отмечалось в разд. 1.5, даже эстетические чувства связаны с нейронной обработкой информации (разд. 5.6). Характерная смесь регулярных упорядоченных структур, чередующихся с элементами удивления и неопределенности, характерными для всех сенсорных впечатлений, оцениваемых как «эстетические», может быть проявлением любопытной, хотя и фундаментальной склонности людей использовать свою сложную нервную сеть для биологически несущественных операций обработки информации с изменяющейся или чередующейся сложностью. В самом деле, восприятие искусства — это, пожалуй, наиболее человеческая из всех интеллектуальных способностей; хотя познание и способность к общению у человека развиты сильнее, чем у животных, тем не менее художественное творчество и восприятие искусства присущи исключительно

14 человеческим существам .

И действительно, как показывают исторические и археологические изыскания, музыка неизменно присутствовала в человеческом обществе в течение очень долгого времени (см. рис. 1 и разд. 5.6). Подобно утверждению, сделанному в первом абзаце предыдущего раздела, что мы живем в информационном обществе, можно заявить, что мы обитаем и в «музыкальном обществе»! Обработка музыкальной информации отличает нас от животных; музыка, нравится она нам или нет, окружает нас повсюду; музыка стала многомиллиардным бизнесом; мы посвящаем музыке заметную часть нашего свободного времени, и музыка всегда находилась на переднем крае техники — от изготовления допалеолитических флейт (рис. 1) к сложной системе труб и рычагов органов эпохи Возрождения и к цифровой электронике для современных систем синтеза и воспроизведения звука. Тем не менее, вряд ли можно сомневаться в том, что самым первым «музыкальным инструментом» был человеческий голос (см. ниже), и, с антропологической точки зрения, разумно предположить, что пение предшествовало изготовлению инструментов в течение сотни тысяч лет или более того.

Но знаем ли мы на самом деле, что такое музыка? Как и в случае информации, мы знаем, что это такое, но затрудняемся дать определение! Когда животное слушает звуки внешнего мира, оно делает это в силу врожденного стремления получить представление о том, что его окружает (разд. 1.5). Когда мы говорим, мы передаем сообщения, которое запускают определенные реакции в мозгу реципиента, даже если переносимая информация представляет вполне абстрактные понятия. Цель речи состоит в том, чтобы произвести определенное изменение *состояния информированности* реципиента. В целом слух повышает шансы выживания всех высших животных, а интерпретация звуковой информации, передаваемой с помощью речи, имеет первостепенное биологическое значение для человеческих существ. Да, но какую информацию переносит музыка? Как отмечалось в разд. 1.2, почти во всех культурах музыка состоит из организованных, структурированных, ритмических последовательностей и наложений тонов, выбранных из весьма ограниченного набора дискретных звуков некоторой музыкальной гаммы. Типичные звуки окружающей среды не предлагают эквивалентных структур<sup>[6]</sup>, и имитация таких звуков вряд ли когда-нибудь была основной движущей силой в развитии музыкальной



культуры, за исключением, может быть, самых ранних стадий развития (например, в целях успешной охоты). Но если музыка вроде бы не несет биологически ценной информации, *почему* она действует на нас? Плачущий ребенок затихает при звуках простой мелодии колыбельной песни, которую поет ему мать, прекрасные пассажи могут вызывать мурашки по коже, возбуждающая музыка может привести в неистовство. Военная музыка может вызвать гордость за страну или покорность жестокому диктатору. Почему так происходит? *Почему существует музыка?*

Как мы обсудим в разд. 5.8, музыка, возможно, является естественным побочным продуктом эволюции *человеческого языка*. В ходе этой эволюции, которая, несомненно, стала важным фактором становления вида *homo sapiens*, появилась нервная сеть, способная обрабатывать чрезвычайно сложную акустическую информацию, проводить операции по ее анализу, запоминанию и восстановлению, необходимые для распознавания фонем, идентификации голоса, осмысления речи и понимания содержания. Язык подарил людям возможность неизмеримо расширить свою память и связанную с этим способность к обработке информации путем сведения сложных картин окружающего мира, объектов и сложных связей между ними к коротким символическим представлениям. В ходе этой эволюции произошло наиболее замечательное разделение задач между двумя полушариями мозга (разд. 5.8). Левое полушарие (у 97% всех людей) заведует в основном коротковременными операциями, которые требуются, например, для понимания словесной информации, и другими подобными операциями, играющими важную роль в мышлении. Правое полушарие управляет пространственной интеграцией и долговременными представлениями. Целостные операции правого полушария определяют зрительные представления и восприятие музыки. Как мы увидим далее, восприятие музыки включает решение задач целостного характера — от анализа пространственных картин возбуждения слухового рецепторного органа, создаваемых музыкальными тонами и суперпозициями тонов, до анализа долговременных картин мелодических линий.

Почему человек реагирует на музыку *эмоционально*, почему музыка вызывает выброс эндорфинов, которые возбуждают центры удовольствия в мозгу человека (разд. 5.6), и что побуждает нас *создавать* музыку? Другими словами, какое значение имеет (или имела в прошлом) музыка для биологического выживания, из которого и развилась любовь к музыке в ходе эволюции человека? Каково было биологическое *предназначение* изготвления древних инструментов, изображенных на рис. 1? Не так уж трудно строить гипотезы относительно возникновения мотивации к совершению действий, не имеющих вроде бы непосредственной биологической цели, таких как восхождение на горы (инстинкт исследования), игра в футбол (отработка ловких движений, инстинкт лидерства и победы) или радость при виде заката солнца (предвкушение отдыха под покровом темноты). Но какие генетические преимущества для первобытных людей могли заключаться в сочетаниях «абстрактных» музыкальных тонов и форм? Конечно, этот вопрос следует рассматривать как часть более общего вопроса, связанного с возникновением эстетической мотивации, аффективных реакций и творческой активности.

Мотивация к слушанию музыки могла бы возникнуть как врожденная потребность, в дальнейшем подкрепленная лимбической системой, в обучении с раннего возраста сложным операциям анализа слуховых ощущений, необходимым для восприятия речи и использования языка (разд. 5.8). Это похоже на игры животных, которые являются проявлением врожденной мотивации к развитию и совершенствованию сложных движений, необходимых для нападения и защиты. Дети, рожденные без способности внимательно слушать или родившиеся у матерей, не склонных напевать простые музыкальные звуки при общении с ребенком, должны были испытывать трудности при общении и иметь меньше шансов выжить в первобытном людском сообществе. Не является ли убедительным аргументом универсальность первых звуков речи у детей и колыбельных песен во всем мире? Восприятие языка развивается спонтанно, без всяких усилий, и то же относится к восприятию музыкальных форм — практически в том же возрасте. Поразительные эксперименты, проведенные с грудными детьми (рис. 2), дают убедительные свидетельства в пользу врожденной предрасположенности к обработке музыкальных сообщений (раздел 5.8).

Однако в вопросе о совместной эволюции языка и музыки нет единодушия. Больше всего возражений исходит от антропологов и специалистов по физиологии поведения. Однако большое количество основных универсальных музыкальных характеристик, которые могут быть связаны со специфическими операционными режимами систем обработки сенсорной и церебральной информации, делает крайне маловероятным, что «музыка — это просто счастливая эволюционная случайность», как утверждают некоторые оппоненты.

Логично предположить, что после начальной стадии эволюции музыки идентификация более или менее сложных тональных сообщений, степень успеха и соответствующие поощрения со стороны лимбической системы при операциях предсказания, проводимых мозгом для ускорения этого про-



Рис. 2. «Проволочный» ребенок со 126 электроэнцефалографическими электродами для изучения влияния различных звуков на активность нейронов

цесса идентификации, а также ассоциации, вызываемые сравнением с ранее накопленной информацией, — все это вносило свой вклад в возникновение музыкальных впечатлений от данного музыкального послания. Если это так, то должно быть ясно, что наш эмоциональный отклик на музыку определяется как врожденными нервными механизмами (операциями первичной обработки), так и культурными наслоениями (накопленными впечатлениями и операциями обработки, приобретенными в результате обучения) (разд. 5.6 и 5.8). И, наконец, эти культурные наслоения могли подкрепляться эффективностью музыки в достижении согласованного поведения больших масс людей; это проявляется в той роли, которую она издавна играет в религиозных и свадебных обрядах, идеологическом прозелитизме, пробуждении милитаристских настроений и даже в антисоциальном поведении.

Приблизительно 90 % этого раздела было посвящено восприятию, хотя половина этой книги относится к физике музыки — звуковым волнам, генерации звука музыкальными инструментами и распространению звука. Причина такого тематического дисбаланса в этом введении очень проста. Физическая акустика — наука древняя [25], она появилась 2 600 лет назад и связывается с именем Пифагора. Со многими из ее современных отраслей, от основных представлений о принципах действия музыкальных инструментов до сложностей электроакустики, знакомы многие непрофессионалы. Психоакустика, наоборот, наука молодая, ей всего 160 лет, изучение музыкального восприятия стало энергично развиваться лишь в последние несколько десятилетий<sup>[7]</sup>, и результаты лишь сейчас начинают становиться известными неспециалистам и широкой публике. Я лишь хотел изобразить науку о музыке в должной перспективе — как *музыку науки*

[1] Звук, конечно, может распространяться также в жидкостях и твердых телах. 2 Для полноты описания сюда следовало бы добавить следующие «компоненты» исполнителя: фронтальные доли его мозга, побуждающие моторную кору посылать команды определенным мышцам, которые активируют музыкальный инструмент или вокальный тракт певца; обратную связь от ушей и мышц, которая позволяет контролировать качество исполнения, и т. д. Однако в этой книге исполнителя как такового мы исключаем из рассмотрения.

[2] Иногда употребляются характеристики «объем» и «плотность» (или «яркость»), представляющие составные понятия, которые можно «разложить» на комбинацию эффектов высоты и громкости (понижение высоты с одновременным увеличением громкости приводит к ощущению увеличения объема, повышение высоты тона с одновременным увеличением громкости приводит к увеличению плотности, или яркости). В этой книге мы не будем пользоваться этими понятиями.

[3] 2 Используемый автором термин *neuroscience* пока не имеет установившегося русского аналога. При переводе мы используем термин *нейрология* (не путать с *неврологией* — разделом медицины, занимающимся нервными болезнями!). — Прим, перев.

[4] В Соединенных Штатах этот термин не завоевал такой популярности, как в Европе и остальном мире.

[5] Например, при бросании двух игральных костей имеется лишь один способ получить в сумме 12 очков (выпадение двух шестерок), в то время как 6 очков можно получить пятью различными способами, поэтому для выпадения 12 очков степень новизны должна быть выше, чем для 6 очков. Чем менее вероятен данный исход, тем выше степень новизны при его реализации. 2 Например, для набора вариантов, в котором все варианты, кроме одного, имеют нулевой шанс реализоваться, ожидаемый средний прирост информации равен нулю (поскольку мы уже знаем, что произойдет!); для утяжеленной монеты этот прирост информации меньше, чем для правильной монеты (потому что мы можем угадывать результат бросания с большими шансами на успех), в случае правильной монеты неопределенность результата максимальна, поэтому, узнав результат, мы получаем максимальный прирост информации (один бит).

[6] Мы не разделяем мнения, что растения, коровы или цыплята под влиянием музыки того или иного рода повышают свою продуктивность вследствие эстетического воздействия! 2

[7] Автор имел честь активно способствовать развитию такого мультидисциплинарного подхода, что засвидетельствовано всемирно известным специалистом в области психологии музыки Дианой Дейч в ее редакционной статье, посвященной 20-летию международного журнала *Music Perception* [39]: ... «Ряд междисциплинарных рабочих совещаний по физическим и нейропсихологическим основам музыки, организованных Хуаном Редерером, был проведен в Оссиах (Австрия) (между 1973 и 1985 годами во время Каринтийских летних фестивалей). Именно во время этих совещаний многие из нас впервые узнали, с большим воодушевлением, об исследовании музыки, проводимом специалистами в других областях. Стало ясно, что междисциплинарное изучение музыки с участием теоретиков музыки, композиторов, психологов, лингвистов, специалистов в области нейрологии, компьютерной техники и т. д. не только возможно, но и необходимо для нашего продвижения в понимании музыки».