Основной психо-физический закон и его современная формулировка.

(Доклад на годичном заседании Института Биологической Физики 17 го декабря 1920 г.)

П. П. Лазарев.

Всякий процесс ощущения слагается из следующих отдельных явлений: во-первых, из проведения внешнего раздражителя до аппаратов, связанных с нервными окончаниями органов чувств (эта часть всего процесса является физикой органов чувств, и для зрения и слуха ее изучение было завершено в гениальных работах Helmholtz'a); за первой стадией процесса следует вторая, когда раздражитель, достигая клеток нервных окончаний, вызывает путем химических реакций их раздражение и далее переносит раздражение через нервную систему вплоть до корковых центров головного мозга, возбуждение которых и переводит определенный физиологический процесс в сознание. Материальные явления в концевых аппаратах органов чувств, в нервах и центрах являются объектом обширной части биологической физики, которую мы назвали ионной теорией возбуждения и которая свела уже, отчасти, процесс в нервных окончаниях к хорошо изученным физико-химическим реакциям. Наконец, третье звено в явлениях ощущения есть процесс чисто психический, изучение которого возможно только при самонаблюдении методами развитыми в психологии.

Физические и физико-химические процессы в ощущающих органах, как уже было указано, являются в настоящее время в общих чертах изученными, и, во всяком случае, метод изучения здесь ясно определился; точно так же в психологии достаточно подробно исследованы субъективные явления, последующие за раздражением органов чувств. Остается установить связь между возможными материальными процессами в возбужденных органах и ощущением, производимым ими, при чем еще сравнительно недавно можно было утверждать, как отметил E. Hering, что „учение о соотношениях между материей и духом, между телом и душой, является областью философского спора без прочного фундамента, без твердых принципов и методов, необходимых для успеха исследований".

Благодаря работам Fechner'a область психо физики получила некоторые научные основы—и дальнейшие работы физиков, физиологов и психологов позволили более прочно установить общие принципы связи науки о материи и науке о духе. Уже в 1870 году в своей за-

мечательной речи „Über das Gedächtniss als eine allgemeine Funktion der organ. Materie“ Hering говорит: „Если физиолог, изучающий нервную систему, стоит между физиком и психологом и если первый ставит твердую причинную непрерывность всех материальных процессов, как основу своего исследования, с другой стороны, если психолог ищет законы сознательной жизни индуктивным методом и при этом делает исходным пунктом своих рассуждений предположение о непоколебимой закономерности, и, наконец, если самонаблюдение учит физиолога, что его сознательная жизнь зависит от переживаний его тела и что его тело в известных пределах подвержено его воле,—то ему остается только допустить, что эта взаимная зависимость между духовной и материальной жизнью является также закономерной и что найдена связь, которая соединяет науку о материи и науку о сознании.

Рассматриваемые с этой точки зрения, явления сознания представляются функцией материальных изменений организованного вещества и чтобы устранить всякое недоразумение, необходимо подчеркнуть (хотя само по себе это и лежит в *понятии функции*), что материальные процессы в коре головного мозга являются функциями сознания, потому что если две переменные в своих превращениях зависят друг от друга определенным образом, так что с изменением одного одновременно наступает изменение второго, то одно, как известно, называется функцией другого. Этим выражается только то, что обе переменные,—материя и сознание,—стоят в отношении причины и действия, основания и следствия“.

Отсюда ясно, что между простейшим психическим актом, напр., ощущением тяжести груза и подействовавшей внешней причиной, в данном случае весом груза, должно быть соотношение выражаемое равенством

$$E = \varphi(J),$$

где E — величина ощущения, J — вес груза. При этом, как понятно, величина $\varphi(J)$, изменяясь с изменением величины J, не должна зависеть от выбора единиц для J.

При установлении связи E и J Fechner мог использовать превосходные опыты Weber'а над мышечным и кожным чувством, при котором прирост величины раздражителя (напр., прирост груза $\triangle J$), деленный на величину раздражителя J при едва заметном приросте ощущений, оставался постоянным, так что

$$\frac{\triangle J}{J} = \text{Const.} = k \; . \; . \; . \; . \; (1) \; ^{1)}$$

[1]) Здесь не безъинтересно отметить, что для оценки музыкальных интервалов имеет значение отношение чисел колебаний звуков, как это впервые обнаружил знаменитый математик-академик Эйлер, являющийся в этой области предшественником Fechner'а. Работа Эйлера по этому поводу напечатана в Петербурге в 1739 году.

(k есть постоянная).

Fechner допускает далее, что при едва заметном приросте ощущения величина прироста ощущения $\triangle E$ постоянна и не зависит от величины ощущения E, соответствующего раздражению J, так что при определенном выборе единиц для E можно написать

$$\triangle E = \frac{\triangle J}{J} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; (\text{II}).$$

Предполагая, что соотношение (II) верно вплоть до предела, что может быть справедливым лишь приблизительно, и допуская суммацию отдельных приростов ощущений dE, Fechner находит, что

$$dE = \frac{dJ}{J}$$

или

$$E = lg\ J + B \quad . \; . \; . \; . \; . \; (\text{III}).$$

где B постоянная.

Если назвать через J_0 рубежную величину раздражителя, едва воспринимаемую сознанием человека (когда $E = 0$), то предыдущее выражение (III) получает такой вид

$$E = lg \frac{J}{J_0} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; (\text{IV}).$$

В этом виде закон вполне удовлетворяет требованиям независимости E от выбора единиц для J и является общим выражением знаменитого Fechner'овского закона. Закон (I) мы будем называть законом Weber'a.

Соотношение (I) или (IV) имеет огромное приложение в разных областях науки. Fechner'у удалось расширить область применения закона, показав, что он приблизительно выполняется для зрения, слуха и других органов чувств; далее Pffefer обнаружил, что движение бактерий подчиняется Fechner'овскому закону; Loëb'у удалось приложить этот закон к рубежному раздражению одноклеточных организмов растворами солей, наконец, были сделаны неоднократные попытки приложить этот закон к экономическим явлениям. Все это говорит, что в основе закона лежит чрезвычайно общее соотношение, связывающее все явления раздражения в одно общее целое, и естественно было попытаться проверить следствия этого закона точными количественными опытами.

Легче всего и точнее всего эта проверка могла быть выполнена на зрении, и к этой области относятся первые точные эксперименты.

Уже сам Fechner ясно видел, что его закон может быть только приблизительным и что при малых раздражениях должно наступать отклонение явлений от закона. В самом деле, если бы закон был точным, то при отсутствии внешнего раздражения (при $J = 0$) едва заметный прирост раздражителя $\triangle J$ должен представлять рубежное

значение силы света. Между тем если формула (I) верна, то при $J = O$ и $\triangle J = O$, следовательно порог силы света равен нулю. Этого в действительности не наблюдается и, следовательно, формула Weber'a, из которой Fechner вывел свой закон, имеет только приблизительное значение. Fechner попытался исправить этот недостаток, написав формулу психо-физического закона для зрения так:

$$\frac{\triangle J}{J + \alpha} = K = \text{Const.} \quad . \quad . \quad . \quad (V).$$

(здесь α малая положительная постоянная величина). Этот закон при больших значениях раздражителя J, когда α исчезает перед J, совпадает с законом (I) и, только когда α мало, влияние ее значительно. При $J = O$, $\triangle J$ равно рубежному значению раздражителя (равно $K\alpha$).

Разница формул (I) и (V) делается весьма наглядной, если мы представим их графически, откладывая по оси X-ов J, а на оси Y-ов $\triangle J$ (рис. I).

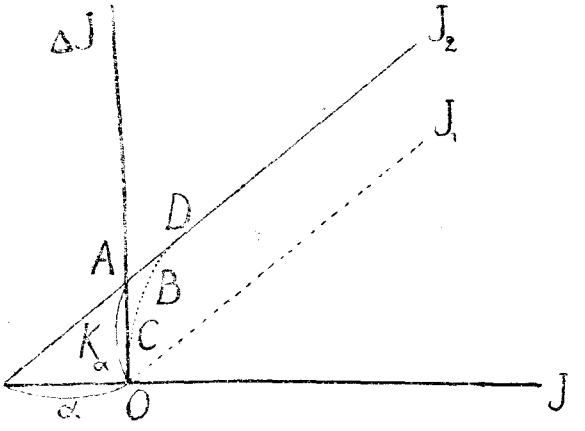

Рис. 1.

OJ представляет графически связь $\frac{\triangle J}{J} = K$, AJ_2 связь $\frac{\triangle J}{J + \alpha} = k$, α должно по формуле представлять некоторую яркость света и быть равным яркости субъективного света, который возникает в глазу в результате раздражения сетчатки от внутренних причин. α получило название *собственного света сетчатки*; измеряя $\triangle J$ при $J = O$ и зная из опытов с ярким светом величину K (когда величиной α можно пренебрегать), Volkmann определил величину собственного света сетчатки. Эта величина оказалась равной яркости света, посылаемого в глаз поверхностью черного бархата, освещенного со значительного расстояния свечой.

В виду большого принципиального значения вопроса о приложимости закона Fechner'a, König и Brodhun предприняли систематическое изучение закона Fechner'a для зрения как в белом свете, так и в монохроматических лучах.

Остроумно поставленные и тщательно выполненные исследования доказали, что экспериментальные данные дают более сложный результат, чем его дает закон Fechner'a, и наблюденные точки ложатся на кривую $CBDJ_2$, которая при малых яркостях света J резко отличается от прямой AJ_2, выражающей закон $\frac{\triangle J}{J+\alpha}=K$, и только при значительном J наблюдение совпадает с прямой.

Гениальные работы Heemholtz'a позволили объяснить эти отклонения и дали возможность осуществить дальнейшую проверку психофизического закона для зрения. Идея Helmholtz'a такова: прежде всего, как легко установить самонаблюдением, в полной темноте поле зрения никогда не бывает вполне темным. Если пропусканием постоянного электрического тока определенного направления (чтобы к глазу был приставлен анод тока) ослабить возбудимость глазного нерва, то при замыкании тока легко заметить, что поле зрения делается темнее, чем без пропускания тока, и что при повторном замыкании и размыкании тока явление затемнения поля выступает особенно ярко.

Внимательное изучение поля зрения в абсолютной темноте показало Helmholtz'y, что яркость поля непостоянна и что собственный свет сетчатки α зависит от положения точки на сетчатке. Отсюда Helmholtz следующим образом приходит к обобщенному закону Fechner'a. „Пусть,— пишет Helmholtz,—α есть объективная яркость света, которая была бы необходима, чтобы вызвать на определенном месте сетчатки то же самое раздражение, какое можно найти в собственном свете сетчатки. Так как этот последний является пятнистым, α должна иметь различные значения в разных частях сетчатки. Пусть площадь тех мест сетчатки, у которой собственный свет лежит в интервале от α до $\alpha+d\alpha$, равна $\varphi.d\alpha$, где φ в общем является функцией от α. Мы рассматриваем величину прироста ощущения при изменении яркости $\triangle J$ объективной силы света J, как сумму всех отдельных действий, которые соответствуют отдельным степеням яркости $d\alpha$, и полагаем по закону Fechner'a

$$\triangle E=\triangle J\int_0^a \frac{\varphi.\,d\alpha}{J+\alpha} \quad \ldots\ldots\ldots\text{''} \quad \text{(VI)}\ ^{1)}$$

(здесь o и a пределы собственного света сетчатки).

Выражение VI, как показывает Helmholtz, получит вид после преобразований

$$\triangle E=\triangle J\left[\frac{A_0}{J+J_0}+\frac{A_1}{(J+J_0)^2\,(J+J_2)}+\ \ldots\ldots\right],$$

где A_0, A_1 . . . J_0, J_2 . . . постоянные.

---

[1]) Мы пишем везде $\triangle E$ вместо dE у Helmholtz'a и, кроме того, букву r заменяем через J.

Если ограничиться двумя членами ряда, мы получим гиперболу, весьма близко подходящую к кривой наблюденной König'ом и Brodhun'ом и представленную на рис. 1.

Дальнейшая проверка закона Helmholtz-Fechner'a была сделана нами в ряде работ, которыми удалось прежде всего доказать справедливость предположенной Helmholtz'ем суммации отдельных выражений для $\frac{\varphi d\alpha}{J+\alpha}$ в разных частях поля, *если поле не превышает желтого пятна*; далее удалось количественно обнаружить различие в распределении собственного света в сетчатке и показать, что законы рубежного раздражения также количественно выводятся из уравнения Fechner-Helmholtz'a; так, например, соотношение между величиной освещенной площади S и порогом раздражения $\triangle J$ выражается так $\triangle J.\ S = K$.

Если мы пожелали бы, не ограничиваясь fovea centralis, дать законы для раздражений и в периферической части поля, то обнаружили бы, что уравнение VI должно быть обобщено далее, причем суммация должна быть отдельно применена как к области занятой в освещенном участке палочками, так и к области занятой колбочками, и общее выражение закона получает вид, предложенный нами,

$$\triangle E = \triangle J K_1 \int_0^a \frac{\varphi\, d\alpha}{J+\alpha} + \triangle J K_2 \int_0^b \frac{\psi\, d\beta}{J+\beta} \quad . \ . \ . \ (\text{VI a});$$

α и β обозначают собственный свет в колбочках и палочках, φ и ψ соответствующие площади, занятые собственным светом с яркостью, лежащею между α и $\alpha + d\alpha$ или β и $\beta + d\beta$; K_1 и K_2 постоянные. Закон (VI a) может дать объяснение всем явлениям прироста ощущений и на периферии сетчатки.

Если для света мы получаем таким образом выражение (VI a), которое достаточно хорошо передает закон раздражения для слабых и средних яркостей, то при сильных яркостях требуется еще дальнейшая поправка, попытки ввести которую были впервые сделаны Helmholtz'ем; далее закон (VI), выведенный для зрения, может оказаться неверным для слуха, вкуса и т. д. Наконец, из формулировки закона Fechner'a неясно с самого начала, что мы должны считать за раздражение для температурного чувства, чувства давления, для электрического тока и т. д. В самом деле за раздражение тела в последнем случае можно принять или силу тока i или энергию пропорциональную i^2. Все это таким образом устраняет общность связи для всех раздражений, общность закона выраженного формулой Fechner'a. Поэтому нами были сделаны попытки ближе подойти к анализу основного психо-физического закона и дать такую его формулировку, которая была бы применима ко всем органам чувств и ко всем видам раздражений. Исходные соображения были таковы. Чтобы дать общий закон, связывающий величины ощущения и раздражения, нужно за раздра-

жение принимать не внешние раздражители, а те одинаковые для всех раздражаемых органов общие процессы в первных окончаниях, которые ведут к первичному возбуждению нервов и последующему переносу возбуждения вдоль волокна. Такими первичными возбудителями мы должны в настоящее время считать ионы, и их концентрация может явиться величиной первичного раздражителя для нерва. Внешние, вне организма находящиеся раздражители, как свет, тепло, звук, электричество могут лишь постольку создавать раздражение, поскольку они будут влиять на содержание ионов в органе. А так как чувствительные к раздражителям органы внутри себя имеют всегда ионы, то достаточно считать за величину раздражения в Fechner'овском законе концентрацию ионов и считать, что раздражение различных раздражаемых элементов суммируется, чтобы получить общее выражение для психофизического закона.

Мы его напишем по аналогии с Fechner'овским законом в виде:

$$\sum_{0}^{n} \frac{\triangle C_1'}{C_1'} = K = \triangle E \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (VII)$$

где C_1' есть концентрация ионов в органе, $\triangle C_1'$ – едва заметный для ощущения прирост этой концентрации. Суммирование от o до n производится по всем возбужденным элементам, и каждое слагаемое $\frac{\triangle C_1'}{C_1'}$ есть элементарное возбуждение или ощущение $\triangle e$. Этот закон, выраженный в самой общей форме и не заключающий специфических раздражителей, должен быть приложимым ко всем видам раздражения, и мы покажем в дальнейшем, как он действительно в этих случаях прилагается.

Прежде всего мы остановимся на приложении закона к зрению. Фотохимический процесс в зрении разъяснен нашими работами, и концентрация раздражающих ионов, полученная на свету, равна

$$C_1'' = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} k J C$$

где α_1 и α_2 коэффициенты реакций прямой световой и обратной темновой, k коэффициент поглощения и C концентрация светочувствительного пигмента.

Если мы допустим, что зрительный пигмент разлагается не только от света, но и от тепла, и что последнее разложение даст концентрацию ионов γ, то общая концентрация $C'_1 = C''_1 + \gamma = \frac{\alpha_1 k J C}{\alpha_2} + \gamma$; отсюда находим по основному психо-физическому закону (VII)

$$\triangle E = \sum_{o}^{n} \triangle e = \triangle J \sum_{o}^{n} \frac{1}{J + \frac{\gamma \alpha_2}{\alpha_1 k C}} \quad . \; . \; . \; . \quad (VIII)$$

т. е. получаем уравнение, которое, как это легко показать, представляет то же соотношение, как и Helmholtz'овское уравнение VI, и в котором роль a играет величина $\frac{\gamma a_2}{a_1 k C}$. Разница соотношений только в том, что Helmholt'zовское соотношение предполагает отдельные воспринимающие элементы сетчатки бесконечно малыми, в нашей же формуле они допускаются конечных размеров, и этим об'ясняется, почему вместо знака интеграла стоит у нас знак суммы.

Все следствия, которые подтверждены опытами König'a и Brodhun'a и нашими, выполняются в нашей формуле (VIII), выведенной из обобщенного психофизического закона. Исходя из формулы $\sum_{0}^{n} \frac{\triangle C_1'}{C_1'} = K$, легко показать, что величина $\triangle J$ при возрастании J должна увеличиться, отступая от линейности; в этом и состоят отступления, зависящие от ослепления. В самом деле, если свет настолько ярок, что практически почти все зрительное вещество разложено, то дальнейшее увеличение силы света, не влияя практически на изменение концентрации раздражающих веществ, не дает никаких новых ощущений, так как $\triangle J$ не достаточно, чтобы вызвать прирост разложения и связанный с ним прирост ощущения.

Чтобы перейти от обобщенного закона Fechner'a к той форме, которую он должен иметь для слуховых ощущений, мы должны помнить, что при слуховых ощущениях, в противоположность зрительным, раздражение уха тоном определенной высоты вызывает всегда заметное колебание только одной кортиевой нити во внутреннем ухе, нити настроенной в резонанс с падающим тоном; — при чем вместе с нитью приходят в колебание и кортиевы клетки лежащие на нити, в то время как остальные нити, находящиеся по-соседству, остаются практически в покое. Движение нити по нашей теории вызывает разложение звукочувствительных веществ в клетках кортиева органа и вызывает появление раздражающих ионов, действующих на окончание слухового нерва. При этом каждый простой тон (без обертонов) дает таким образом раздражение только одному нервному волокну, что для зрения должно бы было соответствовать раздражению одной из колбочек или палочек.

В формуле VII в этом случае остается только один член, и, называя через U силу звука и через постоянную β величину $\frac{\gamma a_2}{a_1 k C}$, мы находим для звукочувствительных реакций в ухе, совершенно аналогичных со светочувствительными реакциями, соотношения идентичные по форме с раздражением одного зрительного элемента

$$\triangle E = \triangle e = \frac{\triangle U}{U + \beta} = \text{Const} = K \quad . \; . \; . \; . \; (\text{IX})$$

связь между $\triangle U$ и U для слуха, по теории, линейная (см. рис. 1)

между тем как J и $\triangle J$ для зрения имеют связь гиперболическую. Опыт подтвердил это отличие слуха от зрения. Причина этой разницы закона Fechner'a для зрения и слуха лежит в том, что при слухе возможно и почти постоянно встречается раздражение только одного элемента, одной клетки и одного нервного волокна; мы назовем это раздражение точечным, между тем как при зрительных восприятиях мы имеем дело с раздражениями плоскостными, с раздражениями охватывающими целую поверхность сетчатки. Как видно из формулы IX в ухе должно наблюдаться при полном покое органа постоянное раздражение, зависящее от разложения звукочувствительных веществ от тепла и ощущаемое как очень слабый тон. Этот тон мы назовем собственным тоном улитки. Работами нашей лаборатории удалось доказать полную справедливость формулы IX.

Прежде всего оказалось возможным обнаружить, что когда очень сильный звук подействовал на ухо и вызвал сильный распад веществ в слуховых клетках, давая последовательный субъективный звук в ухе, длившийся в течение нескольких недель, то в то же время возрастала и величина β, представляющая собственный звук улитки, зависящий от химических процессов, которые возникают в ухе и которые накладываются на процессы, вызываемые в данный момент звуком. Таким образом получилось прекрасное подтверждение теории опытом и установлено существование собственного звука улитки. У отдельных людей связь U и $\triangle U$ выражалась иногда не линейной связью, а приближалась к той связи, которая наблюдалась и при световых ощущениях. Это можно было объяснить только тем, что нити Кортиева органа настолько тесно связаны друг с другом, что колебание одной из них вызывает совместное колебание соседних с ней нитей. В этом случае звуковое раздражение, относящееся, вообще говоря, к типу точечных раздражений, переходит в плоскостное, и соответственно этому и линия представляющая связь $\triangle U$ и U переходит из прямой в гиперболу (см. рис. 1).

Как легко понять у лиц, имеющих Кортиевы нити тесно связанные между собой, различение близко друг около друга лежащих тонов должно быть понижено.

Это и наблюдается в действительности, как показали наши исследования; при чем при упражнении наблюдается переход гиперболы, связывающей $\triangle U$ и U в прямую, соответственно улучшению различения высот близко лежащих звуков.

Мы в этом последнем случае как бы обыгрываем ухо подобно тому, как обыгрываем деревянные доски струных инструментов.

Переходя ко вкусу мы должны указать, что как более старыми работами, так и нашими исследованиями установлено прежде всего, что имеется 4 вида воспринимающих аппаратов, дающих ощущение кислого, соленого, сладкого и горького вкуса. Эти аппараты независимы друг от друга и могут быть раздражены в отдельности. При действии соответственных раздражителей сразу на всю поверхность

языка, мы получим плоскостное раздражение, и, следовательно, связь концентрации раздражающих веществ и ее прироста, как этого требует ионная теория, должна быть гиперболической. Это обнаружено опытами нашей лаборатории.

Наконец пользуясь формулой обобщенного психо-физического закона (VII) легко показать, что при достаточной силе раздражения электрическим током поверхности кожи отношение $\frac{\Delta i}{i}$ должно быть постоянным, как это и обнаружено ранее А. В. Леонтовичем.

Мы рассмотрели только одну сторону явлений в раздражении, именно, или только следование двух раздражителей разной силы один за другим (слух, вкус) или их одновременное действие на орган чувства (зрение), причем мы подбирали едва различающиеся по силе ощущения раздражители. Но возможно один и тот же раздражитель постепенно усиливать (увеличивать, например, силу света) и установить такую скорость его изменения, когда мы будем едва ощущать процесс изменения; как удалось показать нам в этом случае для зрения, мы имеем

$$\frac{dJ}{dt} \cdot \frac{1}{J} = \text{Const} = K.$$

Можно поставить и более сложные задачи, где ΔE будет зависеть от ряда факторов, напр., от плоскостного распределения, от цвета и т. д., в этом случае E будет функцией всех этих отдельных факторов и задачей общего изучения обобщенного закона Fechner'a является исследование этих факторов.

Предполагая, что первоначальное раздражение равно нулю, мы найдем рубежное раздражение, которое в случае действия ионов непосредственно приводится к Loëb'овскому закону

$$\frac{C_1'}{C_2 + a} = \text{Const}.$$

Как частный случай этого последнего является Nernst'овский закон раздражения

$$C_1' = \text{Const}.$$

Таким образом все предложенные до сих пор законы раздражения объединены новым обобщенным психо-физическим законом.

Обобщая закон далее, его можно распространить на воздействие одних органов чувств на другие, как это было сделано нами для влияния органа зрения и слуха, причем в полном согласии с опытом мы находим, что

$$\Delta E = k_1 \frac{\Delta J}{J} + k_2 \frac{\Delta U}{U}$$

где k_1 и k_2 постоянные.

Остаются неизученными законы мышечного чувства, чувства температуры и сложные явления чувства равновесия и общего чувства с точки зрения обобщенного психо-физического закона. Это и составляет ближайшую и важнейшую задачу психо-физики.

В заключение нам хотелось бы отметить одно обстоятельство, сближающее результаты полученные при изучении основного психофизического закона с итогами современной атомистики.

Мы видели, что величина прироста ощущения ΔE всегда является конечной, строго определенной величиной, известным образом зависящей от величины раздражителей. Полное ощущение слагается таким образом из элементов конечных размеров, аналогичных квантам энергии, и мы можем благодаря закону Fechner'a с полным правом говорить об атомах или квантах ощущения, как это и было отмечено нами еще в 1913 году.