1948 г. Ноябрь Т. XXXVI, вып. 3

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

СРи 101

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕТОВЫХ КВАНТОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ВИЗУАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

С. И. Вавилов

1. «КЛАССИЧЕСКИЕ» И КВАНТОВЫЕ ФЛУКТУАЦИИ СВЕТА

В учении о свете обычно молчаливо предполагается, что источник света вполне характеризован спектром, энергией излучения и состоянием поляризации. В соответствии с этим все физические свойства практически «монохроматического» света должны бы определяться частотой световых колебаний, мощностью светового потока и состоянием поляризации. В действительности это верно только для «макро-оптики», оптики больших размеров источников света, длительных времён наблюдения, значительных мощностей светового потока. При более пристальном изучении становится ясным, однако, что за «макро-оптикой» кроется «микро-оптика», что три перечисленных признака недостаточны для объяснения и описания всех особенностей источника света и «монохроматического» пучка. Интерференционная способность источника зависит очень своеобразно от природы элементарного излучателя, от его мультипольности, от того, имеем ли мы дело на опыте с системой диполей, квадруполей, магнитных диполей и т. д. В явлениях, развёртывающихся в быстро прерывающемся свете, большое значение имеет средняя длительность элементарного излучения и законы затухания свечения. Наконец, при работе с источниками света очень малой энергии начинают проявляться статистические колебания, флуктуации светового потока.

Принципиально (а в известной степени и практически) могут существовать «монохроматические» излучения, с одинаковой частотой, энергией и поляризацией, но отличающиеся друг от друга интерференционной способностью, длительностью свечения и характером флуктуаций.

Световые флуктуации — одна из самых тонких сторон оптических явлений. Для их наблюдения необходимо экспериментировать с крайне

слабыми световыми потоками. В то же время теоретически флуктуации—необходимое свойство естественного светового потока, как в классической, чисто волновой интерпретации, так и с современной квантовой точки зрения.

Обычный источник света (в классическом рассмотрении) состоит из множества излучающих движущихся частиц, взаимодействующих одна с другой, ударяющихся, получающих новые импульсы к излучению, или, наоборот, прекращающих излучать при ударах. Учитывая статистический хаос этих процессов, легко понять, что при относительно малом числе светящихся частиц и при наблюдении их коллектива за очень короткие промежутки времени необходимо ожидать статистических отклонений от среднего значения в световом потоке. Такие флуктуации будут выражением беспорядочности молекулярных движений светящейся среды. Важно, впрочем, отметить следующие особенности этих «классических» световых флуктуаций. Прежде всего они не должны зависеть от мощности светового потока, попадающего в прибор. Можно, например, поставить на пути между источником света и прибором любой светофильтр, во сколько угодно раз ослабляющий свет, но флуктуации должны остаться прежними, так как они определяются только молекулярным движением в самом источнике света. С другой стороны, с классической точки зрения возможно изготовить источник света, лишённый флуктуаций. Представим себе, например, молекулы, растворённые в очень вязком веществе и флуоресцирующие под действием внешнего фактора, свободного от флуктуаций. С классической точки зрения флуоресцирующие молекулы, не подверженные возбуждающему или тушащему действию вязкой среды (в соответствии с опытом), будут излучать свет непрерывно и постоянно, без флуктуаций.

Очевидно, что «классические» световые флуктуации должны в очень большой степени зависеть от физического состояния источника света, и только для условий равновесного температурного излучения абсолютно чёрного тела эти флуктуации могут быть определены независимо от состава и строения этого тела, как функция его температуры.

Квантовая природа излучения в корне меняет характер флуктуационных явлений. Даже в только что рассмотренном случае, когда с классической точки зрения световые флуктуации могут отсутствовать, должны в полной мере проявляться квантовые флуктуации, определяемые спонтанной независимостью актов излучения отдельных молекул. В общем случае, однако, на эти квантовые флуктуации должны накладываться статистические колебания, вызываемые молекулярными движениями и взаимными возмущениями частиц. Например, при вынужденном возвращении возбуждённой молекулы из метастабильного состояния в лабильное с последующим излучением должны проявляться «классические» флуктуации, отражающие статистический беспорядок молекулярных вынуждающих возмущений, и вместе с тем

будут иметь место квантовые отклонения, отвечающие спонтанному характеру возвращения из обычных возбуждённых состояний в нормальные.

Для энергии излучения в замкнутой полости нагретого чёрного тела средний квадрат общих флуктуаций (классических и квантовых) выражается двучленной формулой Эйнштейна, показывающей аддитивный характер обоих родов флуктуаций[1]:

$$\overline{(\Delta E_0)^2} = h\nu E_0 + \frac{c^3}{8\pi\nu^2\Delta\nu}\frac{E_0^2}{v_0}, \tag{1}$$

где (по формуле Планка)

$$E_0 = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\frac{\Delta\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}v_0.$$

v_0 — объём полости, ν — частота излучения, $\Delta\nu$ — рассматриваемый спектральный интервал. Пользуясь написанным значением E_0, формулу Эйнштейна удобно переписать в таком виде:

$$\overline{(\Delta E_0)^2} = h\nu E_0\left(1 + \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}\right). \tag{2}$$

Для видимого света, например, с длиной волны в 5000 Å и для температуры $T \sim 300°$

$$\overline{(\Delta E_0)^2} \approx h\nu E_0, \tag{2[1]}$$

но, например, для $T \sim 3000°$ в выражении флуктуаций должен сказываться и второй член, они будут измеримой функцией температуры. Таким образом флуктуации могут быть, по крайней мере принципиально, применены, например, для измерения температуры очень горячих звёзд, если, конечно, возможно сохранить постоянной среднюю интенсивность излучения звезды во время опыта.

Основное свойство квантовых флуктуаций света, радикально отличающее их от «классических» флуктуаций, состоит в том, что эти флуктуации должны наблюдаться при любом состоянии постоянного источника света, если только достаточно велико разрежение наблюдаемого светового потока. Источник может быть самосветящимся, рассеивающим посторонний свет, накалённым или люминесцирующим телом — во всех случаях должны иметь место квантовые флуктуации, наблюдаемые при достаточном ослаблении светового пучка. Как уже сказано, эти квантовые флуктуации могут при некоторых условиях осложняться «классическими», молекулярными флуктуациями, отражающими природу излучателя.

2. ВОЗМОЖНОСТЬ ВИЗУАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ КВАНТОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ

Теоретическое исследование квантовых флуктуаций до сего времени ограничивалось равновесным температурным излучением абсолютно-чёрного тела. Экспериментально уже давно доступны измерению флуктуации жёстких световых радиаций, лучей Рентгена и γ-лучей при помощи чувствительных ионизационных камер и счётчиков типа Гейгера-Мюллера. Современные фотоэлементы и счётчики фотонов не доведены, однако, до чувствительности и устойчивости, необходимых при исследовании флуктуаций в видимой части спектра. Между тем систематическое изучение флуктуационных явлений в этой области имеет специфический интерес, поскольку основные сведения о других оптических свойствах вещества особенно многочисленны именно для видимого света.

При отсутствии объективных приборов исследование, естественно, должно было снова обратиться к помощи глаза, уже оказавшего в развитии оптики неоценимые услуги. В 1932 г. Бернес и Черни[3] высказали предположение о возможности наблюдения квантовых флуктуаций света при помощи глаза, адаптированного на темноту. Хорошо известна высокая чувствительность глаза, достаточное время (около 1 часа) пробывшего в полной темноте. Эта чувствительность несколько (иногда во много раз) колеблется для разных наблюдателей и для одного и того же наблюдателя в разное время. Она зависит от места сетчатки глаза, на которое падает изображение, и от длины волны применяемого света. Для длин световых волн около 525 mμ порог зрительного ощущения, т. е. минимальная зрительно воспринимаемая энергия при наблюдении светового пятна диаметром около 6′, отбрасывающего изображение на расстоянии 8° от центрального углубления на дне глаза (fovea centralis), составляет, по нашим измерениям, описываемым ниже[11], около 200 фотонов в секунду с относительными колебаниями для четырёх разных наблюдателей в два раза. По измерениям Гехта и его сотрудников[12], для $\lambda = 510$ mμ, для светящегося пятна с угловыми размерами 10′ и при наблюдении областью сетчатки, расположенной в 20° от fovea, минимальное среднее значение световой энергии, вызывающее зрительное ощущение, соответствует приблизительно 100 фотонам, с колебаниями значений примерно в три раза. Указанные числа относятся к энергии, падающей на глаз. Несомненно, что на пути к сетчатке часть энергии теряется вследствие отражений и поглощения в глазных средах. Наконец, в самой сетчатке происходит не полное поглощение света. Поэтому действительное число фотонов, вызывающее минимальное зрительное ощущение в сетчатке, много меньше указанных цифр и должно измеряться немногими десятками или даже единицами фотонов. При таких условиях по законам статистики флуктуации должны быть очень значительными.

Соображение о неизбежности квантовых флуктуаций в порожных условиях наблюдения глазом и было положено в основу работы Барнеса и Черни. Конкретные опыты, поставленные ими, были, однако, совершенно недоказательными и явно ошибочными. Опыты производились при таких условиях, при которых никак нельзя было избежать многочисленных и очень сильных физиологических флуктуаций, хорошо известных физиологам и психологам[2] и много более заметных и резких, чем ожидаемые квантовые флуктуации. Один из таких опытов состоял, например, в том, что круглая поверхность диаметром в 15 *см* с 50 маленькими беспорядочно расположенными на ней зелёными светящимися пятнами наблюдалась на расстоянии в 0,5 *м* простым глазом. Вся картина была видна только в течение 0,1 сек.; 0,9 сек. она закрывалась от наблюдателя вращающимся сектором. Таким образом, адаптированный наблюдающий чрезвычайно подвижной глаз большую часть времени не имел никакой точки опоры («фиксационной точки» физиологической оптики) и, разумеется, не мог оставаться в неизменном положении. Непроизвольное движение глазного яблока во время темновой паузы между вспышками при отсутствии фиксационной точки неизбежно должно было привести к резким колебаниям наблюдаемой яркости в частности потому, что довольно большое поле зрения (около 18°) соответствовало разным местам сетчатки с весьма сильно отличающейся сумеречной чувствительностью.

Другой опыт Барнеса и Черни они сами описывают следующим образом: «Можно воспользоваться лампой для тёмной комнаты с зелёным фильтром, применяемой для проявления панхроматических пластинок. На светофильтр накладывается сначала толстый слой белой бумаги, а затем чёрная бумага с соответствующими дырами. Яркость дыр можно регулировать ламповым реостатом с ползунком или изменением расстояния головы. Флуктуации можно наблюдать только через несколько минут после пребывания в темноте». Если, однако, попробовать повторить этот простой опыт, то легко убедиться, что «флуктуации» вполне заметны не только в условиях зрительного порога, но и при яркостях, в сотни раз превосходящих порожные. Иначе говоря, квантовые флуктуации здесь не при чём, и явление полностью объясняется физиологическими причинами.

Помимо этого, можно утверждать, что если бы все физиологические эффекты были исключены, за исключением одного — именно свойства глаза в течение долей секунды сохранять зрительное впечатление, то всё же квантовые флуктуации в только что описанном опыте не могли бы наблюдаться. Вследствие длительности зрительного впечатления физические флуктуации должны бы в описанных условиях размываться и усредняться так же, как они усредняются при наблюдении порожных яркостей от большой светящейся поверхности. Поверхность, покрытая отдельными светящимися пятнами, не имеет больших преимуществ в этом отношении перед равномерно

светящейся поверхностью тех же размеров. Трудно понять этот опыт Барнеса и Черни, тем более, что те же авторы в других упомянутых опытах применяли метод коротких вспышек.

Из энергетических измерений, проведённых Барнесом и Черни, следует, что их окончательные опыты производились при таких интенсивностях, при которых квантовые флуктуации теоретически должны быть вполне заметными. Условия опытов были, однако, таковы, что физиологические флуктуации также необходимо должны были иметь место и притом в больших размерах, маскирующих квантовые флуктуации. Таким образом Барнес и Черни, правильно указывая на возможность зрительного наблюдения квантовых флуктуаций, не доказали их существования на опыте ни качественно, ни, тем более, количественно.

3. ОСНОВЫ ВИЗУАЛЬНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ КВАНТОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ

Исходное соображение Барнеса и Черни о необходимости заметных флуктуаций в световых потоках, соответствующих зрительному порогу, послужило поводом для серии наших экспериментальных работ 1932—1941 гг., излагаемых ниже[4—11*]).

Из сказанного в § 2 по поводу опытов Барнеса и Черни следует, что наблюдение квантовых флуктуаций при непрерывном световом потоке едва ли возможно вследствие конечной длительности зрительного впечатления и проистекающего отсюда усреднения флуктуаций. Невозможно также наблюдение флуктуаций при больших угловых размерах светящейся поверхности. Далее, для наблюдения квантовых флуктуаций необходимо фиксировать глаз. Наоборот, при соблюдении трёх условий:

1) кратковременности вспышек,
2) небольших размерах изображения на сетчатке,
3) фиксации глаза

физические флуктуации при порожных световых потоках неизбежно должны наблюдаться, если только верны квантовые представления об излучении и поглощении света.

Важно подчеркнуть, что визуальное наблюдение и измерение чрезвычайно облегчается фактом наличия *резкого порога зрительного ощущения*. Зрительный эффект в области порога изменяется прерывно, он сразу падает до нуля при некотором «порожном» значении световой энергии. Если бы такого порога не было и зрительное ощущение только постепенно ослаблялось, то о наличии флуктуаций можно было бы судить только по трудно измеряемым быстрым колебаниям яркости вспышек. Благодаря наличию порога,

---

*) Работы проводились Е. М. Брумбергом, К. Б. Паншиным, З. М. Свердловым, Т. В. Тимофеевой и автором.

вспышки, энергия которых меньше некоторой предельной величины, просто не видны. Имеется, следовательно, очень резкий качественный признак флуктуаций: вспышки либо видны, либо нет. Незначительные же изменения яркости вспышек в области порога практически не заметны [4].

Обозначим через n среднее число монохроматических фотонов с частотой ν, поглощаемых в сетчатке за одну кратковременную вспышку, а через z действительное число фотонов, поглощённых за время данной вспышки. Вследствие наличия резкого порога ощущаться будут только вспышки, для которых

$$z \geqslant n_0. \tag{3}$$

В дальнейшем предполагается, что n_0 — величина постоянная. Если n_0 на самом деле само беспорядочно колеблется от вспышки к вспышке около некоторой средней величины (по физиологическим причинам), то в окончательных формулах (как будет в дальнейшем видно из вывода) n_0 эквивалентно этой средней величине. Возможны также медленные изменения n_0 от одной группы наблюдений к другой, также по физиологическим причинам. Эти последние вариации n_0 должны вызывать отклонения определяемых вероятностей от теоретических и могут вызывать рассеяние экспериментальных точек.

В любом оптическом опыте свойства света могут определяться только по его действиям. Экспериментируя с флуктуациями, мы всегда фактически оперируем в окончательной стадии только с флуктуациями поглощённой энергии. Лишь при условии полного поглощения, когда число вошедших в среду и поглощённых в ней фотонов одинаково, флуктуации в световом потоке и в поглощающей среде должны совпадать. При неполном поглощении характер флуктуаций (в классической статистике, которую мы здесь применяем) должен зависеть только от флуктуаций поглощения. Ясно, например, что если падающий поток вполне регулярен в своей структуре и флуктуаций в нём нет, а существуют только флуктуации поглощения, то окончательный результат будет определяться флуктуациями поглощения. Наоборот, при отсутствии флуктуаций в поглощении окончательные флуктуации определятся таковыми в падающем световом потоке.

В дальнейшем, в соответствии с опытом (§ 2), мы принимаем, что

$$n_0 \gg 1. \tag{4}$$

Для вероятности числа z при среднем n по формуле Пуассона имеем

$$p(z) = \frac{n^z}{e^n z!}. \tag{5}$$

В соответствии с только что сказанным n в этой формуле обозначает среднее число поглощаемых в сетчатке фотонов.

На основании ограничения (4) вероятность P, что z имеет любую величину между n_0 и ∞, можно выразить интегралом:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi n}} \int_{n_0}^{\infty} e^{-\frac{(z-n)^2}{2n}} dz. \tag{6}$$

Введём обозначение

$$y = \frac{z-n}{\sqrt{2n}}. \tag{7}$$

Пользуясь им, можем переписать (6) в таком виде:

$$P = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{y_0}^{\infty} e^{-y^2} dy = \frac{1}{2} - \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{0}^{y_0} e^{-y^2} dy = \frac{1}{2} - \frac{\varphi}{2}; \tag{8}$$

через

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{y_0} e^{-y^2} dy \tag{9}$$

здесь обозначен табличный интеграл Гаусса и

$$y_0 = \frac{n_0 - n}{\sqrt{2n}}. \tag{10}$$

При обработке наших измерений мы ввели упрощение формулы (8), основанное на том, что наиболее важный и практически интересный интервал изменения вероятностей лежит в пределах приблизительно от 0,0 до 0,8. В этом интервале в пределах ошибок опытов φ почти не отличается от y_0, как видно из таблицы 1.

Таблица I

φ	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
y_0	0,00	0,09	0,18	0,28	0,38	0,48	0,60	0,74	0,91

На этом основании можно приближённо выразить вероятность P (8) таким образом:

$$P \approx \frac{1}{2} - \frac{y_0}{2} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{(n_0 - n)}{\sqrt{2n}}. \tag{11}$$

Обозначим

$$\frac{n}{n_0} = x. \tag{12}$$

Пользуясь x, можно переписать (11) в таком виде:

$$P = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{n_0}{2}} \frac{(1-x)}{\sqrt{x}}. \tag{13}$$

Абсолютное значение x удобно определять графически из опытных данных по условию, вытекающему из полной формулы (8):

$$\text{при } x = 1 \quad P = \frac{1}{2}. \tag{14}$$

Находя на опыте значения P соответствующих относительных x, можем графически по условию (14) найти $P = \frac{1}{2}$, для которого $x = 1$. Отсюда определится переводный множитель, позволяющий перейти от относительных значений x к абсолютным.

На основании более точной формулы (8) вероятность должна иметь вид, представленный на рис. 1, где P отложена в функции $\frac{1-x}{\sqrt{x}}$ (пропорциональном y_0). Формула (13), соответствующая прямой линии, совпадает практически со средней прямолинейной частью кривой. Наклон прямолинейного участка

$$k = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{n_0}{2}}. \tag{15}$$

Откуда

$$n_0 = 8k^2. \tag{16}$$

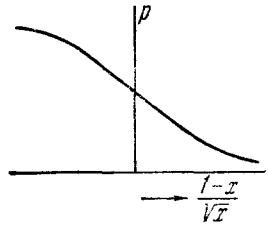

Рис. 1. Вероятность P как функция $\frac{1-x}{\sqrt{x}}$.

Изложенная теория составляет основу метода обработки измерений визуальных квантовых флуктуаций на основании определения P при меняющемся значении x.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ

Условия кратковременности наблюдаемых световых вспышек, достаточная малость изображения на сетчатке и фиксация глаза, необходимые для наблюдения флуктуаций, могут быть легко реализованы. На рис. 2 дана фотография сверху экспериментальной установки наших опытов в 1933 г.[4]. Свет четырёхвольтовой лампы накаливания, питаемой аккумулятором и помещённой в фонаре L_1, проходит через матовое стекло, зелёный фильтр и круглое отверстие диаметром в 1 *мм* в трубу R_1R_2. В обоих концах трубы расположены поляризационные призмы. Поворачивая одну призму относительно другой, можно ослаблять свет без изменения его спектрального состава, в любой степени. Между источником света и трубой помещён диск S с отверстием, который медленно (1 оборот в секунду) вращается синхронным мотором M, периодически пропуская свет в течение 0,1 секунды и задерживая его в течение 0,9 секунды. Свет второй лампы L_2, пропущенный через красный фильтр, отражался небольшим з ркалом m, помещённым перед вращающимся диском. Изображение красного

фиксационного пятна было расположено на таком же расстоянии от глаза (60 *см*), как и зелёное пятно от лампы L_1. В отличие от зелёного пятна красное фиксационное пятно не задерживалось вращающимся диском и находилось всё время в поле зрения глаза. Угловое расстояние красного фиксационного пятна от зелёного равнялось

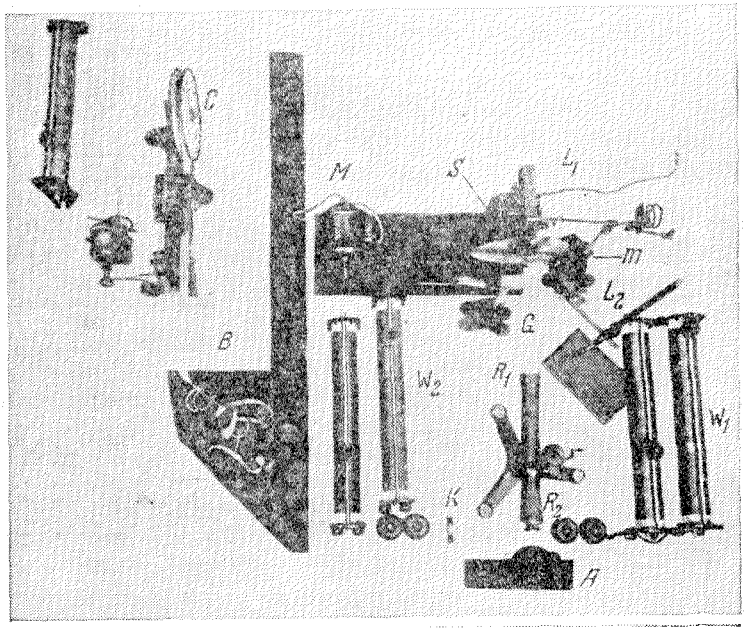

Рис. 2. Фотография первой установки для измерения зрительных квантовых флуктуаций.

в первых наших опытах 4°. Между диском и трубой R_1R_2 помещалась, далее, для ослабления света в определённое известное число раз, стопа из стеклянных пластинок. Каждая пластинка ослабляет свет вследствие двукратного отражения, как показали фотометрические измерения, на 7%. Вводя в путь светового пучка в темноте определённое число стеклянных пластинок, или, наоборот, уменьшая число их, легко количественно ступенями регулировать световой поток вблизи порожных условий.

На втором столе расположен астрономический хронограф *CB* с катушкой телеграфной бумажной ленты и электрически регулируемыми перьями. Эти перья связаны с вращающимся диском *S* таким образом, что каждому обороту диска отвечает отметка на бумажной ленте. При помощи электрического ключа *K* на другом столе наблюдатель может делать свои отметки времени на движущейся ленте.

Опыт производится следующим образом. Процесс адаптации глаза наблюдателя длится полный час. Подбородок наблюдателя опирается на специальную подставку, обычную в опытах по физиологической оптике. Через трубу R_1R_2 глаз видит обе точки L_1 и L_2. Яркость обеих точек регулируется частью поляризационными призмами R_1 и R_2, частью сопротивлениями W_1 и W_2. Глаз всё время фиксирован на красную точку, вследствие чего зелёная точка наблюдается периферически на расстоянии 4° от fovea.

Для наблюдений требуется довольно длительная предварительная тренировка (5—10 сеансов, продолжающихся, по крайней мере, по часу). Цель этой тренировки — приучить глаз к фиксации, к периферическому зрению и вместе с тем к внимательности, требующейся для своевременной регистрации наблюдаемых вспышек нажимом ключа. Наш многолетний опыт с десятком наблюдателей показал, что первые измерения (до тренировки) у всех носят беспорядочный характер, указывая на недостаточную «обученность» глаза. Большую роль играет состояние наблюдателя (усталость, время дня, болезненное состояние и пр.). Очень мешает измерениям так называемый «собственный свет сетчатки», т. е. светлые облака, реющие перед глазом в темноте. Для опытов необходимо выбирать периоды, когда это явление у наблюдателя отсутствует или весьма ослаблено.

Пуская диск S во вращение, наблюдатель, всё время фиксируя глаз на красное пятно, понижает постепенно яркость зелёного пятна (кажущегося в этих условиях бесцветным) до порога.

Первый новый качественный результат этой процедуры, имеющий фундаментальную важность, состоит в том, что при таких условиях резкого порога зрительного ощущения в сущности нет. По мере понижения яркости зелёного пятна наблюдатель замечает сначала, что каждому прохождению отверстия диска отвечает вспышка ослабевающей яркости. Затем, однако, начинается настоящий флуктуационный режим: вспышки, по мере дальнейшего очень незначительного ослабления света перестают соответствовать каждому прохождению отверстия. При некоторых прохождениях вспышек нет. Если свет уменьшать ещё дальше, то вспышки наблюдаются всё реже и реже и, наконец, становятся настолько редкими, что их уже легко пропустить. С качественной стороны это явление с поразительной отчётливостью подтверждает наличие световых квантовых флуктуаций.

Для количественных измерений наблюдатель должен отметить каждую вспышку (в условиях флуктационного режима) нажимом ключа K. После некоторого числа (достаточного для статистических расчётов) таких отметок наблюдатель вводит добавочную стеклянную пластинку в стопу G и снова отмечает вспышки на ленте хронографа. Для получения таких измерений при 4 — 5 различных количествах стеклянных пластинок требуется 1—2 часа времени. Отметки вспышек на бумажной ленте и числа всех прохождений отверстия

диска, автоматически фиксируемых на той же ленте, дают всё, что требуется для определения вероятности появления вспышек. Эта вероятность, очевидно, равна отношению числа наблюдаемых вспышек к числу оборотов диска. С другой стороны, число включённых в путь светового пучка стеклянных пластинок служит мерою относительного значения x, т. е. среднего числа фотонов, соответствующего каждой вспышке.

В наших опытах последующих лет (1938—1941 гг.) установка была несколько изменена[9], сохраняя, однако, все первоначальные существенные части. На рис. 3 дана её схема.

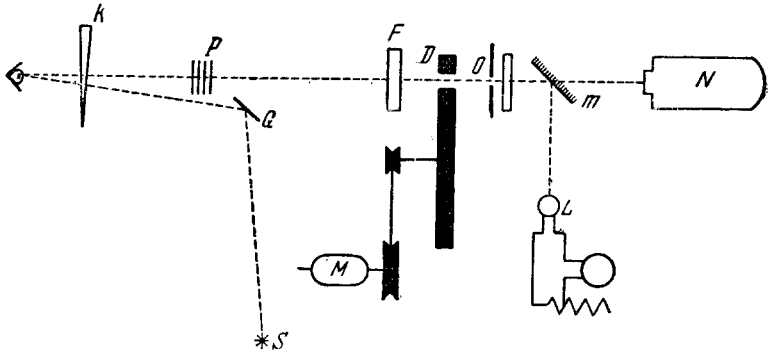

Рис. 3. Схема второй установки для измерения зрительных квантовых флуктуаций.

Голова наблюдателя, как в прежней установке, опирается на подбородник. Глаз фиксирован на красную точку S (ослабляемую по желанию при помощи реостата) посредством стеклянной пластинки G. Меняя наклон этой пластинки и её расстояние от оси установки, можно варьировать угол между fovea и испытуемым местом сетчатки. К этому месту сетчатки свет от источника доходит через диафрагму O, закрытую молочным стеклом, через отверстие в диске D (вращающемся при помощи синхронного мотора M), через светофильтр F и, наконец, через стопу стеклянных пластинок P и фотографический клин K. Диафрагма O освещается лампой накаливания L, питаемой аккумуляторной батареей. Свет направляется в глаз зеркалом m. Для абсолютных измерений энергии, отвечающей зрительному порогу, зеркало m и молочная пластинка перед диафрагмой O убираются и диафрагма освещается «чёрным телом» N.

В этой установке угловые размеры наблюдаемого круглого светового пятна обычно равнялись 6′. Большинство наблюдений производилось на расстоянии 8° от fovea.

Для измерения при различных длинах волн вместо лампы L помещался монохроматор с лампой и с дополнительными фильтрами, защищающими от рассеянного света других длин волн.

Для сравнения числа фотонов N, падающих на зрачок глаза в том случае, когда в сетчатке поглощается n_0 фотонов, необходимо знать абсолютное значение энергии, падающей на зрачок глаза за время вспышки. Для этого служит, как уже указано, чёрное тело N (рис. 3), придвигаемое к диафрагме O (при убранном молочном стекле). Зная температуру чёрного тела Θ, размеры отверстия O, спектральное пропускание фильтра F, расстояние диафрагмы O от зрачка и диаметр зрачка наблюдателя в условиях темновой адаптации, можно на основании законов чёрного излучения определить мощность светового потока, падающего на зрачок. Температура чёрного тела была около 1100° К. Точность приводимых ниже значений энергии N составляет приблизительно 10%. Диаметр зрачка, используемого при полной адаптации, определялся фотографированием глаза при свете блицлампы. К глазу прижимался масштаб, фотографируемый вместе со зрачком.

Ввиду неудобства постоянной работы с чёрным телом лампочка L при определённом режиме горения и при наблюдении через светофильтр F была сравнена с чёрным телом. В дальнейшем она, как вторичный эталон, служила для относительных и для абсолютных измерений. На основании (12) и (14) при $P = \frac{1}{2}$ $n = n_0$. Если помимо флуктуационной кривой $P(x)$ известно абсолютное значение энергии для некоторых x, получаемое указанным способом, то, разумеется, все значения x могут быть переведены в абсолютные и таким образом из x, соответствующего $P = \frac{1}{2}$, определится N. Важно отметить, что, таким образом, в сообщаемых ниже результатах N определялось в тех же самых условиях и из тех же измерений, как и n_0.

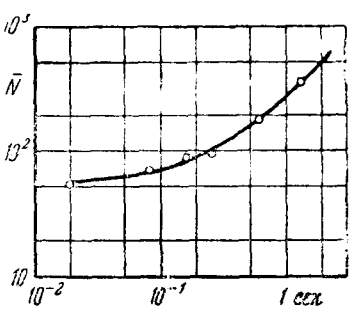

Рис. 4. Среднее число фотонов $\bar{N}$ одной вспышки, создающее впечатление постоянной яркости в функции длительности вспышки (по измерениям Боумана и ван дер Вельден).

Выбор длительности отдельной вспышки в одну десятую секунду в наших опытах определился ориентировочными опытами, показавшими, что при одной и той же энергии вспышки (при условиях, близких к порожным) для любых длительностей вспышки $\leqslant 0{,}1$ секунды яркость остаётся неизменной; при длительностях больше 0,1 секунды яркость уменьшается и требуется большая энергия для поддержания прежней яркости. Эти ориентировочные опыты подтверждаются недавними измерениями Боумана и ван дер Вельден[16].

На рис. 4 воспроизведена из этой работы одна из экспериментальных кривых, дающая число фотонов $\bar{N}$ одной вспышки, соз-

дающее впечатление той же яркости в функции длительности вспышки для поля зрения около 4′. Из рисунка видно, что область постоянной яркости начинается примерно с 0,1 сек., в соответствии с принятой нами цифрой.

В заключение описания процедуры флуктуационных измерений следует указать на способ проверки статистически беспорядочного характера флуктуаций. Такая проверка нужна, так как если это условие не выполнено, то в явление, несомненно, вмешиваются систематические влияния, не имеющие общего с квантовыми флуктуациями.

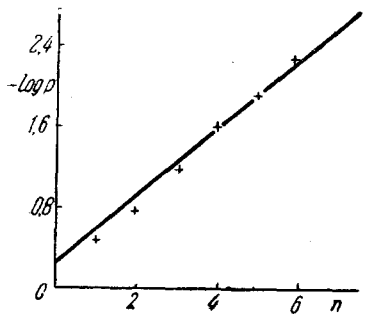

Рис. 5. Контроль статистического беспорядка флуктуаций.

Обозначим вероятность наблюдаемой вспышки при данном прохождении через w. Вероятность p_n того, что после вспышки последует n прохождений без вспышек и затем одно прохождение со вспышкой, будет

$$p_n = (1 - w)^n w$$

или

$$\log p_n = n \log (1 - w) + \log w.$$

Эта формула и может быть использована для контроля беспорядочности флуктуаций. Обозначим через a_n число промежутков, соответствующих n «тёмным» прохождениям на бумажной ленте. Тогда

$$p_n = \frac{a_n}{\Sigma a_n}.$$

Определяя по отметкам бумажной ленты значения p_n по этой формуле и логарифмируя полученные числа, мы должны получить в случае статистического беспорядка прямую линию. В виде примера приведём данные, относящиеся к одной ленте, полученной по измерениям Б. В таблице II сопоставлены значения n, a_n, p_n, а на рис. 5 графически представлена зависимость $\log p_n$ от n. Из наклона по-

Таблица II

n	0	1	2	3	4	5	6	Число прохождений 352
a_n	64	60	28	11	4	2	1	$\Sigma a_n = 170$
p_n	0,38	0,35	0,17	0,06	0,02	0,01	0,005	$w = \frac{170}{352} = 0,48$

лучаемой прямой $w = 0{,}52$, из пересечения этой прямой с осью ординат $w = 0{,}50$, непосредственно вычисленное значение $w = 0{,}48$. Таким образом, отметки на ленте хронографа действительно распределены беспорядочно. Подобные же результаты были найдены на других анализированных указанным способом лентах.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ СИНЕ-ЗЕЛЁНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

За время 1932—1941 гг. в Государственном оптическом институте были проведены сотни серий флуктуационных измерений, в которых принимали участие десять наблюдателей. Измерения анализировались: 1) в отношении выполнения линейной зависимости (13), 2) в отношении абсолютного значения n_0, т. е. числа фотонов, соответствующих порогу на сетчатке.

Для пояснения способов анализа измерений приводится таблица III, в которой приведены результаты цифровой обработки одной ленты, полученной Б. в 1932 г. с зелёным фильтром ($\lambda \sim 530$ mμ). В этой таблице G — число выведенных из светового пучка стеклянных пластинок, ослабляющих свет, α — соответствующее пропускание света в относительных единицах, причём начальное значение произвольно избрано равным 1. $\mathfrak{N}$ — число вспышек, N — число прохождений диска.

Для вычисления x можно поступить (как указано в § 4) следующим образом. Табличные значения P наносятся как функция числа пластинок и по интерполяционной прямой находится коэффициент пропускания, отвечающий $P = \frac{1}{2}$. Отсюда получается переводный множитель, позволяющий преобразовать α в x.

Таблица III

G	α	x	$\frac{1-x}{\sqrt{x}}$	$\mathfrak{N}$	N	P
6	1,00	1,24	—0,215	37	38	1,00
5	0,93	1,16	—0,148	26	32	0,81
4	0,86	1,08	—0,077	35	80	0,44
3	0,80	1,00	0,000	48	111	0,43
2	0,75	0,96	0,074	44	142	0,31
1	0,70	0,93	0,139	65	327	0,20

На рис. 6 приведены графически обработанные результаты измерений 1938 г.[9] для четырёх наблюдателей — Б., Св., С. и Э. По рис. 6 можно получить представление о типичном рассеянии экспериментальных точек. Очень большой материал, собранный за много лет работы десятком наблюдателей, полностью подтвердил наличие приблизительной линейной зависимости между P и $\frac{1-x}{\sqrt{x}}$, предусматриваемой теорией, во всех случаях без исключений.

Большинство измерений было произведено в сине-зелёной области спектра 500—550 mμ, в которой, как показал наш опыт, в пределах ошибок опыта нет зависимости флуктуаций от длины волны, и n_0

для одного и того же наблюдателя постоянно. Для разных наблюдателей, как видно из приводимых ниже экспериментальных результатов, n_0 колеблется в весьма широких пределах.

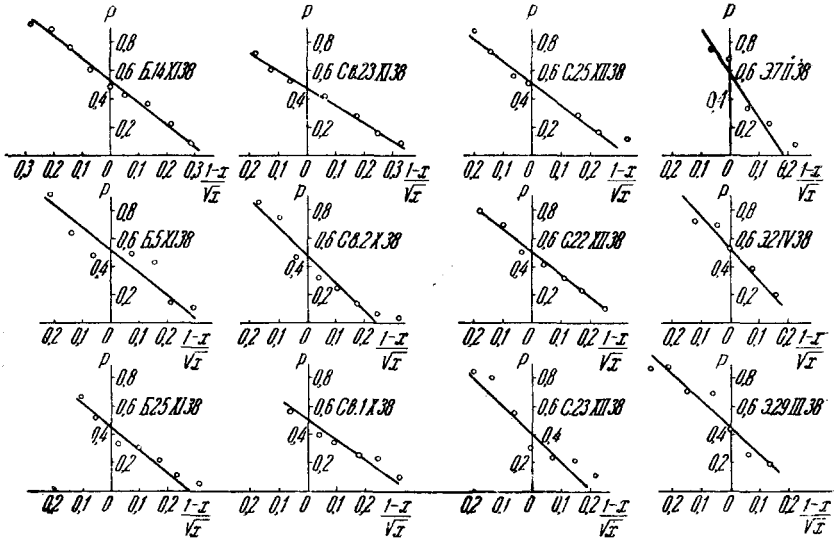

Рис. 6. Результаты флуктуационных измерений четырёх наблюдателей.

В таблице IV дана основная сводка средних результатов, полученных для k и, соответственно, n_0 различными наблюдателями за время от 1933 по 1941 гг. В таблице указаны инициалы наблюдателя, год опытов, ω — периферический угол наблюдения, λ — среднее значение k и n_0, полученное из серии наблюдений (серия охватывает от 3 до 10 рядов наблюдений). Для некоторых наблюдений дано также среднее значение N, определяемое по способу, описанному в § 4. В последней графе приводится отношение $\frac{N}{n_0}$.

О колебании значений k и N для одного и того же наблюдателя в различные дни можно судить по таблице V, в которой приведены значения N и k для двух наблюдателей в разные дни того же года.

Рассмотрение таблиц IV и V при водит к таким выводам:

1) Для одного наблюдателя при соблюдении прочих условий опыта неизмененными k практически постоянно в интервале длин волн 500—550 mμ.

2) Значение k для разных наблюдателей и в разных опытах колеблется более чем в два раза (n_0, пропорциональное квадрату k, меняется соответственно почти в 6 раз).

3) *Для одного и того же наблюдателя в разные дни* k колеблется иногда в 1,4 раза (n_0 соответственно в 2 раза). Однако, ввиду

Таблица IV

Наблюдатель	Год	ω	λ	$\bar{k}$	$\bar{n}_0$	N	$\frac{N}{\bar{n}_0}$
Б.	1932	4°	530	2·4	47	—	—
Б.	1936	10°	510	1,9	30	—	—
Б.	1938	8°	525	1,7	23	168	7,1
П.	1936	10°	500	1,0	8,0	—	—
П.	1936	10°	510	1,0	8,0	—	—
П.	1936	10°	520	1,2	11,0	—	—
П.	1936	10°	540	1,2	12,0	—	—
Сч.	1938	8°	525	1,9	29	231	8,0
Сч.	1940	7°	500	1,8	26	—	—
Сч.	1940	7°	550	1,8	26	—	—
Св.	1938	8°	525	1,5	18	324	18,0
Э.	1938	8°	525	2,0	32	108	3,4
Т.	1940	7°	500	1,9	29	—	—
Т.	1940	7°	550	1,7	23	—	—
Ж.	1941	7°	500	1,3	13	—	—
Ж.	1941	7°	500	1,4	16	—	—
Ж.	1941	7°	550	1,7	23	—	—
См.	1940	7°	500	2,1	35	—	—
См.	1940	7°	550	2,3	42	—	—
Л.	1940	7°	500	1,0	8,0	—	—
Л.	1940	7°	550	1,0	8,0	—	—
Среднее значение	—	—	—	1,6	20	208	9,0

Таблица V

Наблюдатель Сч.			Наблюдатель Св.		
1938 г.			1938 г.		
Дата	N	k	Дата	N	k
16.XII	224	2,0	2.X	333	1,4
20.XII	192	1,8	5.X	324	1,8
22.XII	291	1,8	10.X	323	1,4
23.XII	255	1,9	22.X	335	1,4
25.XII	246	1,5	20.XI	304	1,7
26.XII	228	1,9	23.XI	318	1,4
28.XII	242	2,3	27.XI	333	1,5
29.XII	221	1,6			
30.XII	178	2,2			
Среднее	231	1,9	Среднее	324	1,5

небольшой точности, с которой может быть определён наклон прямых k, нет достаточных оснований считать разброс значений k и, тем более, n_0 у разных наблюдателей и одного и того же наблюдателя в разные дни всегда реальным.

4) Величина N, т. е. числа фотонов в области порога, падающих на зрачок глаза, колеблется в разные дни для одного и того же наблюдателя в значительно меньших пределах, чем n_0, как видно из таблицы V. Вместе с тем для разных наблюдателей N отличается очень сильно, в 3 раза.

5) N всегда значительно больше n_0, в среднем $\frac{N}{n_0}=9{,}0$; для разных наблюдателей отношение $\frac{N}{n_0}$ обнаруживает очень большие вариации, более чем в 5 раз.

Очень значительная разница между n_0 и N на первый взгляд может казаться резко противоречащей нашему основному предположению о квантовом характере наблюдаемых флуктуаций. Такое заключение, однако, совершенно неправильно. Наоборот, сведения об оптических свойствах глазных сред, полученные за последнее десятилетие, с необходимостью требуют, чтобы $\frac{n_0}{N} \ll 1$. Ко времени окончания нашей первой работы можно было только в общей форме говорить о «потерях энергии, вызываемых отражением, поглощением и рассеянием в глазном яблоке», как о причине резкого расхождения N и n_0. В настоящее время имеется ряд физиологических исследований, конкретизирующих эту сторону вопроса.

Не говоря о небольшой потере света вследствие отражения на поверхности глаза, необходимо учитывать значительное поглощение света в глазных средах до сетчатки. По данным Роггенбау и Веттхауэра[17], поглощение света в области около 510 mμ во всех глазных средах до сетчатки составляет около 50%. С другой стороны, палочки, в которых происходит поглощение света, приводящее к зрительному акту, не полностью покрывают поверхность сетчатки, особенно в областях, далёких от fovea. По Остербергу[18], общее число палочек на сетчатке равно приблизительно $1{,}2 \cdot 10^8$. Диаметр палочек составляет около 2 μ. Указанное число палочек распределено на поверхности около 10 *см*², т. е. в среднем палочками занято только около трети всей поверхности сетчатки. В области, соответствующей периферическому расстоянию $\omega = 8^\circ$, на 1 *мм*² сетчатки, по Остербергу, расположено приблизительно $1{,}6 \cdot 10^5$ палочек, следовательно, только 0,5 площади в этом месте покрыто палочками.

Далее, на самой поверхности сетчатки находятся нервные и прочие ткани, в какой-то (повидимому небольшой) степени поглощающие и рассеивающие падающий свет. Наконец, поглощение в самих палочках, в зрительном пурпуре даже в максимуме не полное (в отличие от того, что мы предполагали в первой работе). По данным

Уолда[19] коэффициент поглощения зрительного пурпура в области около 500 mμ на единицу поверхности сетчатки глаза лягушки составляет 33,6%, для кролика 4,2% и для крысы 13,0%.

Обозначим через α долю падающего света, пропускаемого глазными средами до сетчатки, через β — пропускание в слоях самой сетчатки, экранирующих палочки, через γ — долю площади сетчатки, покрытую палочками в исследуемой области глаза, наконец через δ — долю света, поглощаемого в палочках. Тогда очевидно, что

$$n_0 \leqslant N\alpha\beta\gamma\delta. \tag{17}$$

Знак $<$ соответствует здесь той возможности, что выход физико-химического процесса, определяющего зрительный акт, <1.

Пользуясь приведёнными выше цифрами для наших условий опыта, можно написать:

$$n_0 \leqslant N\,\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{2}\,\beta\delta,$$

т. е.

$$\frac{N}{n_0} \geqslant \frac{4}{\beta\delta}.$$

Сравнивая с экспериментальным средним результатом $\frac{N}{n_0} = 9{,}0$, приходим к выводу:

$$\beta\delta \approx \frac{4}{9}.$$

Как сказано, сведений относительно величины β не имеется, во всяком случае вероятно, что β мало отличается от единицы. Что касается δ, соответствующего доле света, поглощаемого зрительным пурпуром в палочках, то для области около 500 mμ, по оценке физиологов, его значение не меньше 0,2 [12]. Таким образом приведённый результат находится в согласии с физиологическими данными. Говорить о количественном согласии в данном вопросе нельзя и не имеет смысла хотя бы потому, что все количественные сведения о глазных средах чрезвычайно колеблются от одного глаза к другому. Нельзя здесь применить и статистические приёмы ввиду очень незначительного числа хорошо изученных случаев.

Несомненно, что все четыре параметра α, β, γ, δ могут в очень широких пределах меняться у разных людей, в то время как их значительные вариации, за короткий промежуток времени, у одного и того же человека мало вероятны. Этот вывод согласуется с опытом, как видно из таблиц IV и V.

Таким образом, описанные опыты, помимо подтверждения основного предположения о квантовом характере наблюдаемых флуктуаций, дают результаты, весьма существенные для исследования свойств глаза. Одновременное определение n_0 и N по изложенному методу даёт возможность измерить на живом глазе в отдельности чувствительность сетчатки и долю света, активно проявляющегося в зрительном акте.

6. ФЛУКТУАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ З. ГЕХТА И ЕГО СОТРУДНИКОВ

В 1941 г. появилось сообщение о визуальных флуктуационных измерениях З. Гехта, С. Шлера и М. Пиренна[13], выполненных в Нью-Иорке. Эти опыты производились по схеме, вполне совпадающей с нашей, отличаясь не принципиальными деталями и значительно меньшим объёмом. Измерения привели к количественным результатам относительно n_0, совпадающим с результатами, полученными некоторыми из наших наблюдателей, и значительно расходящимися с результатами других.

Схема установки американских исследователей изображена на рис. 7. Свет лампы накаливания, питаемой аккумуляторной батареей, фокусируется на щели двойного монохроматора M_1M_2 и, наконец, на диафрагме P около глаза. Голова наблюдателя опирается на подбородник, причём, как это иногда делается в опытах по физиологической оптике, зубы наблюдателя стискивались на некотором предмете. Глаз фиксирован на пятно FP на угловом периферическом расстоянии 20°. Свет грубо ослабляется нейтральным фильтром F и тонко нейтральным клином W. Световой поток, соответствующий $\lambda = 510$ mμ, открывается на 0,004 сек. при помощи специального устройства S, позволяющего давать отдельные импульсы этой длительности через любой промежуток времени при нажиме кнопки. Экспериментатор изменяет интенсивность света перемещением клина W. Наблюдатель нажимом ключа производит вспышку и сообщает, видел ли он её или нет. Обычно производилось около 50 вспышек одной и той же интенсивности. На полную серию наблюдений требуется около $1^1/_2$ часа. Независимо от флуктуационных измерений, при помощи термоэлемента с гальванометром производились измерения числа фотонов, падающих на зрачок (N). Короткая длительность вспышки в 0,004 сек. выбиралась «для большей гарантии».

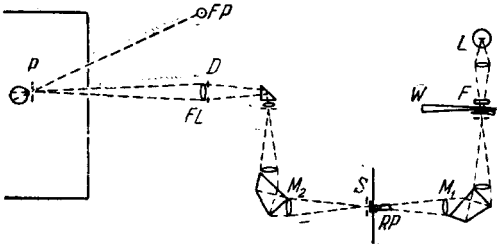

Рис. 7. Схема установки для измерений зрительных квантовых флуктуаций Гехта, Шлера и Пиренна.

Обработка флуктуационных данных, принципиально не отличаясь от нашей, была формально несколько иной. Значение вероятности P по формуле (8) наносилось по таблицам Фрэя[20] как функция логарифма среднего значения числа фотонов за вспышку. Для каждого n_0 при этом получается своя кривая и вся плоскость $(P, \log n_0)$ непрерывно может быть покрыта семейством таких кривых для непрерывно меняющегося параметра n_0 (рис. 8). Преимущество применения ло-

гарифмической шкалы по абсциссе состоит в том, что, отложив на экспериментальном графике измеренные значения P как функцию логарифмов относительных значений n, можно затем перемещением этого графика, нанесённого, например, на кальке по сетке (рис. 8), отыскать теоретическую кривую, ближе всего подходящую к экспериментальным данным. Недостаток этого приёма, по нашему мнению, по сравнению с изложенным в § 3, состоит в том, что он рассчитан на весьма точное определение P. В нашем методе интерполяция при помощи прямой линии сглаживает случайные ошибки.

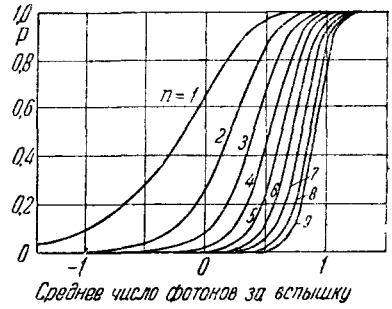

Рис. 8. Сетка P (log n) для различных значений n_0, применённая Гехтом, Шлером и Пиренном для обработки флуктуационных измерений.

В опубликованной работе приведены результаты для трёх наблюдателей (повидимому, соответствующие одной серии измерений). В таблице VI эти результаты сопоставлены с цифрами N фотонов, падающих на сетчатку на пороге.

Сравнивая таблицу VI с таблицей IV, видим, что для двух наших наблюдателей П. и Л. значения $n_0 = 8$ близки к значениям, полученным американскими наблюдателями. Близость значений n_0 у всех трёх американских наблюдателей, повидимому, случайна *). Как видно из таблицы IV, разброс значений n_0 при большем числе опытов и наблюдателей становится очень большим. Различия в средних значениях N в таблицах IV и VI объясняются работой под разными периферическими углами (8° и 20°). Угол в 20° соответствует значительно большей чувствительности сетчатки, чем угол 8°.

Таблица VI

Наблюдатель	ω	λ	$\overline{n_0}$	N	$\frac{N}{\overline{n_0}}$
S. H.	20°	510	6	115	19
S. S.	20°	510	7	78	11
M. H. P.	20°	510	5	100	20
Среднее значение		—	6	96	17

Таким образом американские данные согласуются с нашими измерениями **).

*) В работе Пиренна [15], одного из сотрудников Гехта, упоминается, в отличие от основного сообщения [11], что n_0 колебалось в пределах от 5 до 14 фотонов.

**) Первое сообщение Гехта и его сотрудников о флуктуационных измерениях не содержало упоминания о наших работах 1933—1938 гг.[4—8]. Печатая наши новые измерения 1938—1941 гг. по флуктуациям в 1942 г., мы указали на то, что наши публикации прежних лет, повидимому, остались неизвестными американским авторам, так как в их сообщении они не упоминаются.

В 1943 г. один из участников американской работы, Пиренн, опубликовал в Англии[15] результаты флуктуационных измерений при бинокулярном и монокулярном наблюдении. Известно, что абсолютный порог при наблюдении двумя глазами несколько (примерно вдвое) ниже, чем с одним глазом. Естественно предположение, что это происходит потому, что вероятность получения достаточного числа фото-

---

Однако, по более подробной статье Гехта и его сотрудников, напечатанной в 1942 г. в Journal of Physiology, выяснилось, что наши работы авторам известны. Притом они коротко упоминаются в настолько искажённом виде по сравнению с действительным их содержанием, что мы вынуждены привести здесь полную цитату из соответствующего места американской статьи: «Барнес и Черни (1932), — пишут авторы, — а вслед за ними Брумберг и Вавилов (1933) констатировали, что в энергии, необходимой для видения, должны существовать флуктуации, и обе группы исследователей стремились их найти. Но те и другие не заметили места, где находится источник флуктуаций, предполагая, что его надо искать в энергии, падающей на роговицу. Брумберг и Вавилов ожидали даже различия во флуктуациях для различных длин волн вследствие большей энергии, необходимой для видения красного света, например по сравнению с сине-зелёным, в соответствии с сумеречной кривой видности».

В этих строках прежде всего удивляет утверждение, что наша первая работа продолжает работу Барнеса и Черни. Из § 2 ясно, что эта работа с экспериментальной стороны была ошибочной, правильным в ней было только теоретическое указание на необходимость существования квантовых флуктуаций. О принципиальном отличии нашей экспериментальной работы свидетельствует хотя бы то обстоятельство, что все основные части нашего метода и установки (как ясно из сравнения § 3, 4 и 5 с § 6) воспроизведены Гехтом и его сотрудниками. Наши измерения были не продолжением работы Барнеса и Черни, а её полным отрицанием в экспериментальной части.

Американские авторы, далее, совершенно искажают содержание нашей работы, утверждая, что мы предполагали, что флуктуирует энергия, падающая на зрачок. На стр. 938 нашей первой работы 1933 г.[4] они могли прочесть следующее: «Единственный метод получить n_0 дают лишь статистические измерения вроде применённых нами. Таким образом, с другой стороны, можно надеяться получить всю кривую сумеречной чувствительности глаза, притом с тем преимуществом, что будет найдено действительное число фотонов, поглощаемое сетчаткой у порога раздражения. Все потери энергии, которые возникают в глазном яблоке вследствие отражения, поглощения и рассеяния и которые неизбежно влияют на любые энергетические методы, отпадают при статистических измерениях автоматически. По этому методу можно, вероятно, решить интересный вопрос об истинной чувствительности живой сетчатки в длинноволновой ультрафиолетовой части спектра. Известно, что ультрафиолетовые лучи в области от 400 до 310 mμ видны при больших интенсивностях и остаётся открытым вопрос, вызывается ли малая чувствительность глаза в этой области действительной нечувствительностью ретины, или же поглощением в средах глазного яблока». Приведённые строки не нуждаются в дальнейших пояснениях.

Американские исследователи инкриминируют нам, наконец, ожидание различий во флуктуациях для различных длин волн. В следующем параграфе показано, что это не ожидание, а факт, доказанный рядом измерений многих наблюдателей. Гехт и его сотрудники почему-то ограничились априорным утверждением независимости n_0 от λ, не приведя ни одного измерения, несмотря на то, что в их установке был включён монохроматор, позволявший легко переходить в любую область видимого спектра.

нов, большего n_0, возрастает, если смотреть двумя глазами. Эта гипотеза, необходимо вытекающая из предположения о квантовых флуктуациях, проверялась Пиренном. Установка была приблизительно такой же, как представлено на рис. 8. Круглое светящееся пятно угловых размеров 10′ наблюдалось на периферическом расстоянии в 20°. Длительность вспышки была 0,004 сек. Оба глаза фиксировались на одну и ту же фиксационную точку. В каждом опыте определялась в отдельности вероятность P для правого и левого глаза P_l и P_r и вероятность для обоих глаз P_{lr}.

Если P_l и P_r соответствуют совершенно независимым флуктуационным процессам, то можно написать:

$$P_{lr} = 1 - (1 - P_r)(1 - P_l) = P_r + P_l - P_l P_r.$$

В таблице VII приведены результаты опытов. Приведённое соотношение вероятностей хорошо подтверждается, т. е. флуктуационные процессы в каждом из глаз совершенно независимы. Это необходимое, но ещё недостаточное условие физического характера флуктуаций, так как, вообще говоря, можно представить себе физиологические причины статистического типа, независимые для каждого глаза.

Таблица VII

№ опыта	P_l	P_r	P_{lr}	Вычисленные P_{lr}
1	0,40	0,46	0,75	0,68
2	0,04	0,10	0,13	0,136
3 log яркости 1,1	0,44	0,32	0,56	0,62
3′ log яркости 1,4	0,84	0,88	1,00	0,98
4	0,24	0,37	0,48	0,52
5	0,198	0,258	0,378	0,405

В 1944 г. метод зрительных квантовых флуктуаций был ещё раз «открыт» в Утрехте ван дер Вельденом [25] *). Задача, метод наблюдений и обработка результатов с принципиальной стороны совпадают с описанными в нашей первой работе 1933 г. Источником света служила лампа накаливания (банд-лампа). Основное ослабление света производилось двумя опаловыми стёклами. Размер светового пятна ограничивался диафрагмами. Цветность ($\lambda \sim 530$ mμ) определялась соответствующим светофильтром (Шотт UG2). Положение головы наблюдателя фиксировалось стискиванием зубами некоторого закреплённого предмета. Перед правым глазом находилась диафрагма, ограничивавшая зрачок. Вспышки производились при помощи фотографического затвора «компур». Интенсивность вспышек тонко регулировалась реостатом в цепи лампы. Нововведение установки ван дер Вельдена состояло в расположении фиксационной точки. Она могла наблюдаться только левым глазом, в то время как правый глаз мог видеть

*) Первая публикация ван дер Вельдена 1944 г. не содержит никаких указаний на советские и американские работы. В последующих публикациях разбираются только американские исследования.

лишь изучаемые вспышки. Наблюдатель сам открывал затвор через любые промежутки времени. Наблюдения производились двумя лицами. Длительность вспышек была около 0,01 сек., размеры наблюдаемого пятна $< 4'$*). Угловое расстояние от fovea $\sim 7°$. Обработка статистических измерений производилась на основе формулы Пуассона по способу, не отличающемуся от практического приёма, применённого Гехтом и его сотрудниками.

Результаты ван дер Вельдена решительно отличаются с количественной стороны от цифр, полученных нами и американскими исследователями. На основании измерений двух наблюдателей, а впоследствии[26] ещё третьего следует, что $n_0 = 2$ во всех трёх случаях. По нашим наблюдениям (а также и американским) n_0 сильно колеблется для разных глаз (по нашим наблюдениям наименьшее значение $n_0 = 8$, по американским $n_0 = 5$). В одной из наших работ 1936 г. приводятся (ср. рис. 9) эпизодические наблюдения К. Б. Паншина (по причине этой эпизодичности не включённые в таблицу IV) для $\lambda = 500\,m\mu$. Точный расчёт по формуле Пуассона даёт в этом случае для $k = 1{,}2$ и для $n_0 = 1{,}4$. Особенность этих наблюдений состояла в том, что периферический угол, т. е. расстояние между фиксационной точкой и наблюдаемым пятном был очень большим, $\omega = 26°$.

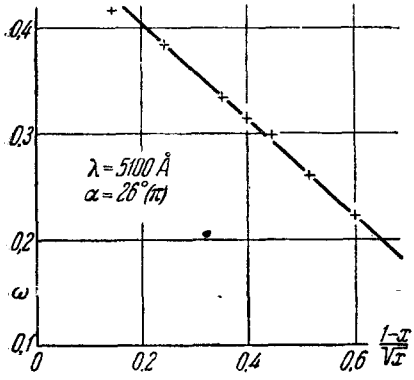

Рис. 9. Флуктуационные измерения К. Б. Паншина (1936 г.).

Боуман и ван дер Вельден[26] пытались объяснить расхождение своих измерений тем, что в опытах прочих исследований один и тот же глаз применялся для фиксации и для флуктуационных наблюдений. Фиксационное пятно как бы «засвечивало» исследуемое место сетчатки. По этому поводу необходимо заметить следующее.

В наших наблюдениях с самого начала учитывалось возможное влияние света фиксационной точки, для чего производились сравнительные измерения с фиксационными красными пятнами разной яркости. Значительные изменения последней не влияли, однако, в заметной мере на флуктуационные измерения.

Если бы, далее, указанное объяснение было справедливым, то необходимо следовало бы ожидать, что величина обычного зрительного порога (для падающей энергии), определяемого при наличии фиксационного пятна в поле зрения, всегда была бы больше, чем в от-

*) Де Фрис[27], разбирающий работу ван дер Вельдена, пишет о размерах $12''$, т. е. в 20 раз меньших.

сутствии фиксационного пятна. Это однако, расходится с известными до сих пор измерениями.

Кроме того, можно привести опыты, произведенные нами в связи с зависимостью n_0 от λ[11], разбираемой в следующем параграфе.

Глаз при периферическом зрении и наличии красной фиксационной точки естественно аккомодирован на последнюю. Вследствие хроматической аберрации глаза исследуемое световое пятно (с размерами около 3′) будет дефокусировано в большей или меньшей степени в зависимости от различия преломления света данной λ, по сравнению с преломлением света фиксационной точки.

Если угловые размеры светового пятна таковы, что они лежат в пределах выполнимости закона Рикко *), то размытие изображения пятна не будет сказываться на измеряемой величине порога, так как при этих условиях величина порога не зависит от размеров изображения на сетчатке. Наоборот, вне области выполнимости закона Рикко естественно ожидать некоторой зависимости измеряемого порога от цвета фиксационной точки.

На основании этих соображений мы измерили относительные величины темнового порога с фиксационными точками разного цвета; угловые размеры исследуемого светового пятна равнялись 3′, $\omega = 7^\circ$. Свет получался через стеклянный монохроматор, окраска фиксационной точки менялась пропусканием света лампы накаливания через три фильтра со средним пропусканием около 430, 525 и 650 mμ. Глаз адаптировался на темноту в течение около часа, установка на порог производилась при помощи серого клина. В таблице VIII приведены средние результаты двух серий опытов для одного наблюдателя в сине-зелёной области спектра. В пределах точности измерений можно утверждать, как ясно из таблицы, в которой приведены относительные значения порога, что величина последнего в заметной мере не зависит от цветности, а следовательно, и вообще от фиксационной точки.

Таблица VIII

λ \ λ_f	430 mμ	525 mμ	650 mμ
500 mμ	23	22	25
550 mμ	23	21	24

Таким образом вышеприведённое объяснение Боумана и ван дер Вельдена сомнительно.

Другие факторы, на которые указывают те же авторы, как на важную причину расхождения[2b, 6], это — длительность вспышек и угловые размеры наблюдаемого пятна Длительность вспышек в основных

*) При очень слабых мощностях падающего света воспринимаемая яркость прямо пропорциональна площади изображения на сетчатке (в некоторых пределах площади, тем меньших, чем больше мощность света) В этом состоит закон Рикко. Как известно, при больших мощностях воспринимаемая яркость не зависит от площади изображения.

голландских опытах была около 0,02 сек., в то время как в американских измерениях применялась длительность 0,004 сек. Размеры пятна в голландских опытах были 3′, в американских 10′. Насколько можно понять, однако, из собственных измерений Боумана и ван дер Вельдена, один пример которых дан на рис. 4, значения порога для вспышек, длительность которых $\tau \leqslant 0{,}1$ сек., мало зависит от τ. Влияние угловых размеров наблюдаемого пятна, с другой стороны, начинает заметно сказываться только при значениях $> 10'$, снова по собственным измерениям голландских авторов.

Боуман и ван дер Вельден, начиная с первой работы [25], придают своему результату $n_0 = 2$ универсальное значение, предполагая, что два фотона соответствуют минимальному возможному зрительному раздражению, связанному с некоторым минимальным элементом оптического изображения и разрешающей силы. На основании этого предположения они делают разнообразные теоретические подсчёты о влиянии длительности вспышки и размеров наблюдаемого пятна на флуктуационные измерения, сравнивая их со своими измерениями.

До сего времени нет, однако, объяснений резкого расхождения основного вывода голландских исследователей об универсальности $n_0 = 2$ по сравнению с прочими существующими многочисленными измерениями, свидетельствующими об очень сильных колебаниях значений n_0 у отдельных наблюдателей.

Повторение опытов Боумана и ван дер Вельдена с привлечением большого числа наблюдателей поэтому совершенно необходимо.

Независимо от интерпретации этих опытов можно с несомненностью сказать, что и они ещё раз подтверждают предположение о возможности визуального наблюдения квантовых флуктуаций светового потока и правильность нашей методики. Вариации n_0 в разных установках и в разных условиях опыта естественно сопоставить с фактом изменения самого порога в разных условиях. Здесь этот вопрос, как имеющий чисто биологический характер, не дискутируется. Некоторое отношение к нему имеют наши измерения, излагаемые в § 8.

7. ЗРИТЕЛЬНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТЯХ СПЕКТРА

В первых сериях наших опытов обнаружилось различие n_0 по спектру.

В таблице IX приведены спектральные измерения двух наблюдателей Б. и П., выполненные в 1936 г. [6,7].

В пределах больших ошибок таких измерений, выполняемых в разные дни, т. е. в условиях, когда для одного и того же наблюдателя k и тем более n_0 может колебаться весьма значительно, можно утверждать, в соответствии со сказанным ранее, что в сине-зелёной области, примерно от 450 до 550 mμ, k практически одно и то же, оно возрастает в синем конце и начинает снова падать в видимой ультрафиолетовой области, достигая минимального значения (по измерениям П.) около 380 mμ, где k и n_0 имеют такое же значение,

Наблюдатель Б. Таблица IX

λ (mμ)	400	430	450	475	510	525	550	600
k	3,2	3,5	3,1	2,4	2,1	2,4	3,0	3,8
n_0	81	93	79	47	32	46	72	115

Наблюдатель П.

λ (mμ)	340	360	380	400	420	440	460	480	510	540	580	620	640	660
k	2,3	1,5	1,0	1,7	3,5	2,4	1,5	1,2	1,0	1,2	2,2	3,5	5,0	6,0
n_0	42	18	8	23	93	46	18	12	8	12	39	97	200	280

как в области 510 mμ. Высокая чувствительность сетчатки в этой части ультрафиолетового спектра подтвердилась позднее наблюдениями спектральной чувствительности глаза, лишённого хрусталика[8].

В оранжево-красном конце спектра k и n_0 возрастают очень сильно.

В наших начальных флуктуационных исследованиях, не располагая экспериментальными сведениями об оптических свойствах сетчатки, мы предполагали, что свет поглощается в ней практически полностью. Это приводило к гипотезе о пропорциональности N и n_0 и давало нам основание ожидать, что спектральная зависимость n_0 будет приблизительно того же вида, как и сумеречная кривая видности.

Новые физиологические данные опровергают эти предположения. Прямые измерения количества зрительного пурпура в сетчатке различных животных показывают, что даже в максимуме поглощения, около 510 mμ, полное поглощение не достигается[19] и, следовательно, в синей и красной областях оно очень мало. Далее, спектральная кривая для коэффициента поглощения родопсина, по крайней мере в её центральной части, совпадает с сумеречной кривой видности[21]. Вместе с тем выцветание родопсина, составляющее, повидимому, основное начальное звено процесса сумеречного зрительного восприятия, одинаково в различных частях спектра при одном и том же количестве поглощённых фотонов[22]. Все эти факты, вопреки нашему начальному предположению, заставляют ожидать, что для палочного аппарата n_0 не должно зависеть от λ.

Для согласования этого вывода с флуктуационными измерениями понадобился новый, более обширный опытный материал, так как флуктуационные измерения по самой природе своей не могут достигнуть большой точности.

Новые опыты[10] производились с установкой, описанной в § 4. Источником света попрежнему служила лампа накаливания, свет которой пропускался через стеклянный монохроматор. Для защиты от паразитного света применялись добавочные светофильтры. Для контроля постоянства условий опытов измерения велись сначала при уменьшении светового потока, а затем, после того как вероятность вспышек становилась очень малой, в обратном направлении.

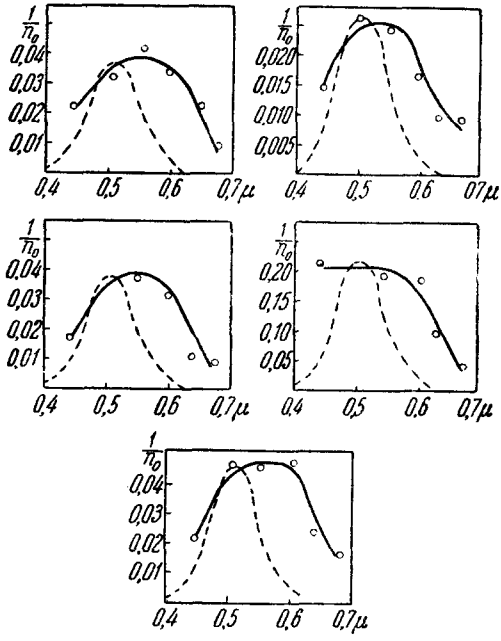

Рис. 10. Зависимость чувствительности ретины на пороге от длины волны по флуктуационным измерениям.

Большие ряды спектральных флуктуационных измерений были выполнены пятью наблюдателями. Для каждой λ каждым наблюдателем было осуществлено от 5 до 15 серий наблюдений. Угловые размеры наблюдаемого светового пятна для всех λ равнялись 3′, исследуемая область сетчатки находилась на угловом расстоянии $\omega = 7°$ от fovea. Длительность вспышек составляла попрежнему 0,1 сек. В таблице X дана сводка средних значений k, полученных пятью наблюдателями для различных длин волн в 1940 и 1941 гг. Под каждым значением k в скобках отмечены минимальное и максимальное значение k, которое находил наблюдатель для указанной длины волны за время измерений, простиравшееся иногда на неделю и даже месяц. В последнем столбце даны средние значения $\bar{n}_0$, вычисленные из k по формуле (16). На рис. 10 графически представлены значения $\frac{1}{n_0}$, которые можно назвать спектральной чувствительностью, для каждого наблюдателя. Из таблицы и рисунка видно, что: 1) резкое увеличение k или соответственно n_0 в сторону длинных волн найдено всеми наблюдателями в согласии с прежними нашими измерениями; 2) возрастание k и n_0 в сторону коротких волн найдено четырьмя наблюдателями и отсутствует у одного; 3) в центральной части спектральной кривой, примерно от 500 до 600 mμ,

Таблица X

	Наблюдатель						
λ (mμ)	Т.	См.	Л.	Сч.	Ж.	Средн. k	Средн. n_0
442	2,3 (1,5–3,8)	2,9 (2,8—3,0)	0,9 (0,7—1,2)	2,4 (2,2—2,7)	2,0 (1,2—3,1)	2,1	35
500	2,0 (1,3–3,2)	2,1 (2,1—2,3)	1,0 (0,6–1,1)	1,8 (1,4—1,9)	1,7 (0,9—2,6)	1,7	23
550	1,7 (1,2—1,9)	2,3 (1,7—2,5)	1,0 (0,7–1,1)	1,8 (1,1—2,4)	1,7 (1,3–1,9)	1,7	23
605	1,9 (1,1—3,2)	2,7 (2,1—3,2)	0,8 (0,7—1,2)	1,9 (1,6—2,2)	1,6 (1,3—1,8)	1,8	25
635	2,3 (1,7—3,4)	3,2 (2,3—3,9)	1,3 (1,1—1,6)	3,4 (2,2—4,7)	2,3 (1,9—2,5)	2,5	50
670	3,1 (2,0–5,8)	3,4 (3,1—4,0)	2,0 (1,3—2,7)	3,8 (2,3—5,3)	2,8 (2,3–3,2)	3,0	72

k и n_0 практически постоянны. Эти выводы особенно ясны из рис. 11, графически изображающего среднее значение $\overline{n}_0$ для всех пяти наблюдателей как функцию λ.

На рис. 10 пунктиром нанесена сумеречная кривая видности. Ясно, что о количественном совпадении этой кривой и флуктуационных кривых говорить нельзя.

Объяснение изложенных результатов, по крайней мере в интервале от 500 до 700 mμ, следует искать прежде всего во взаимодействии двух воспринимающих аппаратов сетчатки, палочного и колбочного.

Прежде всего нужно принять во внимание, что перечисленные выше в настоящем параграфе обстоятельства: 1) параллелизм поглощения родопсина и кривой сумеречной видности и 2) постоянство квантового выхода выцветания родопсина в зависимости от λ, экспериментально установлены примерно только в интервале от 500 до 600 mμ, но здесь, как показывает вся сумма наших опытов

(ср. рис. 11), n_0 постоянно и, следовательно, флуктуационные результаты согласуются с прочими сведениями о глазе.

В длинноволновой части спектра ($\lambda > 600$ mμ) чувствительность палочек, вследствие малого поглощения родопсина, очень мала и с ними заметно должны начать конкурировать колбочки. Качественным признаком этого служит хорошо известный факт сохранения ощущения цвета при порожном зрении в длинноволновой части спектра. По старым измерениям Шарпантье[23], отношение величин хроматического порога к ахроматическому (т. е. порога колбочек к порогу палочек) для крайней красной части спектра составляет 3,6, оранжевой — 5,5 и жёлтой — 9,6. По измерениям Вентворта[24], это отношение для $\lambda = 672$ mμ и $\omega = 4°$ составляет 3,0 для 5° — 3,7, для 10° — 4,0. Таким образом несомненно, что в длинноволновой части спектра, $\lambda > 600$ mμ, помимо палочек в зрительном восприятии вблизи порога также в очень заметной доле принимают участие колбочки.

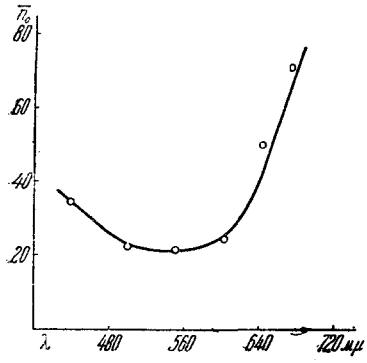

Рис. 11. Среднее число фотонов n_0 для порога на сетчатке в зависимости от λ.

Характер взаимодействия палочек и колбочек в порожных условиях не изучен, в частности неизвестно, можно ли говорить об аддитивности этого действия. Поэтому для количественного статистического расчёта этого случая нет ещё необходимых данных. Из найденного факта возрастания n_0 в длинноволновой части спектра можно во всяком случае заключить, что для возбуждения колбочек требуется поглощение значительно большего числа фотонов, чем для возбуждения палочек.

В коротковолновой части спектра для $\lambda < 500$ mμ параллелизм поглощения света в родопсине и кривой сумеречной чувствительности резко нарушается, причём обычным объяснением служит предположение об очень большом неактивном поглощении как вне сетчатки, так и в самих палочках. Флуктуационные измерения показывают, что здесь, кроме того, в зрительном процессе, помимо выцветания родопсина, начинают играть роль и другие, пока ещё невыясненные факторы. При общей малой изученности механизма зрительных восприятий в коротковолновой части спектра флуктуационные измерения в этой области приходится временно рассматривать как эмпирический материал, тем более, что, как видно из кривых на рис. 10, встречаются случаи постоянства n_0 и в этой области. Чувствительность сетчатки в ближайшей ультрафиолетовой области может достигать, далее, такой же величины, как и в сине-зелёном спектре (см. таблицу IX).

8. ФЛУКТУАЦИИ В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННО ПОВЫШЕННОГО ПОРОГА

Возможность наблюдения зрительных квантовых флуктуаций определяется чрезвычайно низким значением энергии, соответствующей темновому порогу, достигаемому после длительной адаптации. Если процесс адаптации протекает не в полной темноте («световая адаптация»), то также достигается порог, но он значительно выше, чем темновой порог. Это обстоятельство может быть проверено измерением флуктуаций. Мы видели выше [формула (17)], что

$$n_0 \leqslant N\alpha\beta\gamma\delta,$$

где n_0 — минимальное число фотонов, которое должно поглотиться в палочках сетчатки для получения зрительного ощущения на пороге (при данных условиях), N—минимальное число фотонов, падающих на зрачок при тех же условиях, α — доля света, пропускаемого глазными средами к сетчатке, β — доля света, пропускаемого слоями самой сетчатки, γ — доля площади сетчатки, покрытая палочками в исследуемой области, и δ — доля света, поглощаемого палочками.

Несомненно, что при переходе от темновой к световой адаптации N увеличится, приобретая некоторое значение N', возрастающее по мере усиления освещения, с другой стороны, δ может при этом несколько уменьшаться вследствие бо́льшего выцветания зрительного пурпура в колбочках. Если бы выцветание сопровождалось только уменьшением концентрации родопсина, то следовало бы предполагать, что n_0 останется при переходе к световой адаптации неизменным. В действительности при световой адаптации меняются химические условия в палочках вследствие накопления продуктов разложения родопсина, в результате чего возможно изменение самого n_0. Этот вопрос может быть решён методом флуктуаций.

Опыты [11] производились в монохроматическом свете $\lambda = 500$ mμ; $\omega = 7°$ от fovea, угловые размеры наблюдаемого светлого пятна — около 3′. Наблюдатель производил в течение дня две сравнительные серии флуктуационных измерений, — при полной темновой и при некоторой световой адаптации, уровень которой менялся в разных опытах. Световая адаптация достигалась освещением помещения очень слабым источником света (электрическая лампа, питаемая аккумулятором). Перед наблюдениями глаз подвергался действию этого освещения в течение около 15 минут. Во время самих измерений, когда глаз прижимался к трубке прибора с фотографическим клином K (рис. 3), адаптационный световой режим несколько нарушался. Для уменьшения искажающего влияния этого фактора наблюдатель возможно чаще отводил глаз от трубки, подвергая его снова действию установленного светового потока.

Помимо флуктуационных опытов, после и перед каждой серией измерений, определялся «статический» порог при остановленном

моторе M (рис. 3); глаз при этом попрежнему был фиксирован на красную точку, и свет, видимый периферически ($\omega = 7°$), гасился клином до порога. В таблице XI дана сводка результатов измерений. В первом столбце указана дата опыта, во втором — наклон флуктуационной прямой k для темновой адаптации, в третьем — наклон k' для световой адаптации, в четвёртом — отношение светового порога к темновому $\frac{N'}{N}$, в пятом отношение:

$$r = \frac{N'}{N}\left(\frac{k}{k'}\right)^2. \tag{18}$$

Сравнение значений k и k' в таблице XI с несомненностью показывает, что при переходе от темновой адаптации к световой n_0

Таблица XI

Наблюдатель Т.

Дата	k	k'	$\frac{N'}{N}$	r
1940				
30.XI	1,5	2,6	1,7	0,57
1.XII	1,6	2,7	2,0	0,70
13.XII	2,5	2,7	1,5	1,27
19.XII	2,2	8,2	11,0	0,79
30.XII	2,5	2,7	1,5	1,27
1941				
4.I	1,7	3,2	2,6	0,73
9.I	1,7	3,4	[illegible],4	0,60
13.I	1,7	3,1	2,1	0,63
16.I	1,8	3,0	3,3	1,18
Среднее	1,9	—	—	0,87

Наблюдатель Ж.

Дата	k	k'	$\frac{N'}{N}$	r
1941				
26.II	1,9	2,7	2,0	0,99
28.III	1,2	1,9	2,6	1,06
29.III	1,7	2,4	2,7	0,60
31.III	1,3	2,9	5,0	1,41
1.IV	0,9	2,2	5,4	0,89
2.IV	1,8	2,6	2,0	0,96
3.IV	1,1	2,4	5,2	1,00
8.IV	1,7	2,8	2,9	1,14
10.IV	1,1	3,0	6,4	0,78
Среднее	1,3	—	—	0,98

значительно увеличивается. С другой стороны, r приблизительно равняется единице, как видно из последнего столбца таблиц. Поэтому в среднем

$$\frac{n_0'}{n_0} \approx \frac{N'}{N}. \tag{19}$$

Пользуясь формулой (17), отсюда найдём:

$$\alpha\beta\gamma\delta \approx \alpha'\beta'\gamma'\delta', \tag{20}$$

но α, β, γ, как мало изменяющиеся оптические постоянные глазных

сред, не могут меняться при переходе от темновой адаптации к световой и, следовательно,

$$\delta \approx \delta',$$

т. е. суммарное поглощение родопсина в палочках в наших опытах при переходе от темновой адаптации к световой практически не менялось, т. е. выцветание было относительно небольшим. Естественно ожидать, что при переходе к значительно бо́льшим освещённостям, чем в наших опытах, такое простое положение дела должно нарушиться. Однако измерение флуктуаций при больших освещённостях и соответственном увеличении n_0 едва ли осуществимо.

Возрастание k при переходе от темновой адаптации к световой даёт важное новое доказательство физической квантовой природы наблюдаемых флуктуаций. Трудно представить себе физиологический процесс, который мог бы приводить к такой зависимости флуктуаций от высоты порога, притом имеющей количественный характер (19). Можно, с другой стороны, заметить, что возрастание k при переходе от темновой адаптации к световой с точки зрения квантовой вполне объяснимо, но не необходимо. Можно представить себе, например, переход от одного состояния к другому как выцветание родопсина и соответствующее понижение его концентрации.

При сохранении прочих условий среды n_0 при этом могло бы оставаться неизменным при темновом и световом пороге.

9. НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ВИЗУАЛЬНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изложенный в предыдущих параграфах разнообразный экспериментальный материал с полной несомненностью во всей совокупности доказывает квантовую природу изученного явления.

Вместе с тем флуктуационные измерения, получив своё физическое объяснение, открывают новый путь к глубокому исследованию живого глаза. Мы видели, что этим методом впервые удалось определить истинную чувствительность сетчатки на пороге зрительного ощущения. Изучение флуктуаций в различных областях спектра указывает новые особенности в зрительном аппарате в оранжево-красном и в фиолетовом концах спектра. В § 8 описаны измерения при световой адаптации, раскрывающие поведение зрительного пурпура в этих условиях. Надо надеяться, что многие особенности зрительного восприятия будут вскрыты при исследовании зависимости флуктуаций от периферического угла восприятия.

Едва ли, вместе с тем, подлежит сомнению большое физическое значение метода флуктуаций, как метода, буквально воочию делающего ощутимой квантовую природу явлений. Выше уже отмечалось, что вследствие неполного поглощения сетчатки, во флуктуационных явлениях сказывается одновременно квантовая природа и светового потока и поглощающей среды. Если бы поглощение в сетчатке было

полным, явление «само по себе» определялось бы только флуктуациями светового потока, доходящего до зрительного пурпура. Однако вследствие свойства закона Пуассона (5), определяющего статистику, флуктуации зависят только от одной переменной, среднего числа n поглощаемых фотонов, независимо от того, чем определяется это число, падающим световым потоком или значением коэффициента поглощения. Поэтому зрительные квантовые флуктуации с полной определённостью могут применяться для изучения процессов, связанных с основными особенностями и природой света.

В наших первых опытах[4] флуктуационный метод был применён для исследования когерентных лучей. Хорошо известно, что интерференционные полосы можно фотографировать при крайне слабых интенсивностях (многосуточные экспозиции). С волновой точки зрения это само собой разумеется, с точки зрения корпускулярной это непостижимо, так как в интерферирующих пучках в этих условиях всегда отсутствует один партнер.

Опыты, описываемые дальше, показывают, однако, воочию, что интерференция при малых интенсивностях не более понятна и с волновой точки зрения.

Для опытов была использована установка, изображённая на рис. 2, с одним лишь различием, что между вращающимся диском S и трубой R_1R_2 была помещена Френелева бипризма с преломляющим ребром, направленным горизонтально. Таким образом в поле зрения были видны два когерентных зелёных пятна, симметрично расположенных по отношению к красной фиксационной точке (рис. 12).

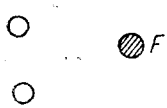

Рис. 12. Расположение светящихся пятен в опытах с когерентными лучами и двойным преломлением.

При достижении порожной яркости обе точки совершенно отчётливо флуктуировали одна относительно другой и весьма редко они были видны в одно и то же время. Это явление объективных относительных колебаний когерентных лучей имеет катастрофическое значение для волновой теории, если пытаться её защищать и в данном случае. Опыт допускает единственное толкование: каждый из лучей интерферирует «сам с собою».

Явление изучалось количественно, определялась вероятность p одновременного появления обоих когерентных пятен. Обоим пятнам, очевидно, соответствует одинаковое значение n_0, поэтому, считая флуктуации в обоих пятнах независимыми, по теореме произведения вероятностей найдём:

$$p = P^2$$

или, пользуясь (13),

$$\sqrt{p} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{n_0}{2}}\,\frac{(1-x)}{\sqrt{x}}. \tag{21}$$

На рис. 13 даны результаты одной серии измерений, выполненной Б. в 1933 г. По оси ординат отложен $\sqrt{p}$. В согласии с (21) получается кривая с наклоном $k=2{,}3$, что соответствует $n_0=43$ (ср. таблицу IV для наблюдателя Б.). Эти измерения доказывают, что флуктуации в обоих когерентных лучах происходят независимо и имеют квантовую природу.

Подобный же опыт был сделан с поляризационной призмой Волластона, на которую из источника падал естественный свет. Два зелёных пятна (рис. 12) были в этом случае поляризованы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Как и в предыдущем опыте, оба пятна флуктуировали совершенно независимо. Из этого наблюдения следует, что

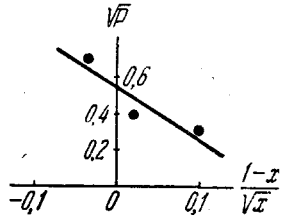

Рис. 13. Результаты опыта с когерентными пучками.

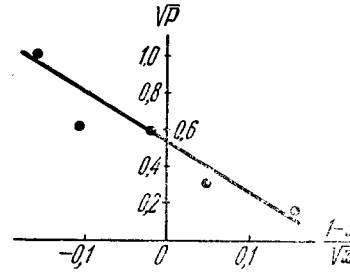

Рис. 14. Результаты опыта с двойным преломлением.

естественный свет при достаточно малых интенсивностях поляризован в каждый момент различным образом (флуктуации состояния поляризации). Нужно подчеркнуть, что этот факт несколько отличен от возможной с точки зрения волновой теории «элементарной поляризации», которая должна существовать только в течение чрезвычайно короткого времени. В нашем опыте состояние определённой поляризации естественного света продолжается по крайней мере 0,1 сек. Отличие кроется в крайней разрежённости светового пучка в наших условиях. Большая длительность компенсируется малым средним числом фотонов.

И в этом случае измерялась вероятность p одновременной вспышки обоих пятен в зависимости от x. Результаты графически изображены на рис. 14 ,где по оси ординат снова отложено $\sqrt{p}$ в соответствии с формулой (21). Наблюдения производились Б. Здесь снова имеется прямолинейная зависимость, наклон прямой $k=2{,}5$, что соответствует 50 фотонам.

Очевидно, что после доказанных основных фактов о флуктуациях любого светового пучка достаточно малой мощности подобных же результатов следует ожидать и в других аналогичных опытах. Можно

было бы, например, наблюдать относительные флуктуации обоих симметрических спектров первого порядка с дифракционной решёткой. Это означало бы, что при малых интенсивностях дифракционная картина возникает не сразу всюду, но вырисовывается постепенно, статистически.

Едва ли есть надобность умножать такого рода опыты, так как они логически вытекают из одного и того же доказанного на опыте флуктуационного принципа, который можно формулировать так:

Каждый изолированный каким угодно способом световой пучок при достаточно малой мощности обнаруживает флуктуации мощности, происходящие вполне самостоятельно и независимо от колебаний в каком-либо другом пучке.

Можно, несомненно, надеяться, что в недалёком будущем удастся осуществить фотоэлементы, обладающие в видимой части спектра не меньшей чувствительностью, чем глаз. С ними, конечно, можно будет повторить все описанные физические опыты. Преимущество визуального метода состоит в том, что он одновременно даёт новое, весьма тонкое средство для исследования глаза.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. Einstein, Phys. Zeits. **10**, 185, 817 (1909); W. Heisenberg, Ber. d. sächsischen Ak. d. Wis. 83 (1931); M. Born u. K. Fuchs, Proc. Roy. Soc. A **170**, 252 (1939); **172**, 465 (1939).
2. Ср., например, C. E. Ferree, Journ. of Psychology **24**, 378 (1913).
3. B. B. Barnes u. M. Czerny, Zeits. f. Physik **79**, 436 (1932).
4. Е. Брумберг и С. Вавилов, Изв. Ак. Наук СССР (ОМЕН), 919 (1933).
5. Е. Брумберг и С. Вавилов, ДАН **3**, 1 (1934).
6. С. И. Вавилов, Труды 1-й конференции по физиол. оптике, 1936.
7. С. И. Вавилов, Изв. Ак. Наук СССР (серия физ.), № 1/2, 176 (1936). Также Успехи физ. наук, **16**, 872 (1936).
8. С. И. Вавилов, ДАН **21**, № 8 (1938).
9. Е. М. Брумберг, С. И. Вавилов и З. М. Свердлов, ЖЭТФ **12**, 93 (1942).
10. С. И. Вавилов и Т. В. Тимофеева, ЖЭТФ **12**, 105 (1942).
11. С. И. Вавилов и Т. В. Тимофеева, ЖЭТФ **12**, 109 (1942).
12. S. Hecht, S. Shlaer and M. H. Pirenne, The Journal of General Physiology **25**, 819 (1942).
13. S. Hecht, S. Shlaer and M. H. Pirenne, Science, стр. 585, June 20 (1941), также J. of Opt. Soc. of America, **32**, 42 (1942).
14. S. Hecht, Energy and vision. Сборник, Science in Progress, Fourth Series, стр. 75 (1945).
15. M. Pirenne, Nature, **152**, 698 (1943).
16. M. A. Bouman a. H. A. Van der Velden, J. Opt. Soc. of America **38**, 231 (1948).
17. C. Roggenbau u. A. Wetthauer, Klinisches Monatsblatt der Augenheilkunde **78**, 762 (1927), **79**, 456 (1927).
18. G. Osterberg, Topography of the layer of rodes and cones the human retine (Acta ophtalmologica, Suplementum VI, Copenhagen, 1935).

19. G. Wald, Journ. of General Physiology 21, 795 (1938).
20. T. C. Fry, Probability and its engineering use. New York, 1928.
21. R. J. Lythgoe, Journ. of Physiology 89, 331 (1937); H. J. A. Dartnall and C. F. Goodeve, Nature 139, 409 (1937).
22. H. J. A Dartnall, C. F. Goodeve and R. J. Lythgoe, Proc. Roy. Soc. London A 164, 216 (1938).
23. A. Charpentier, La lumière et ses couleurs. Paris, 1888.
24. H. d. Wenthworth, Psychological Monographs 40, 3 (1930).
25. H. A. van der Velden, Physica 11, 179 (1944), Англ. перевод Ophtalmologica 3, 321 (1946).
26. M. A. Bouman and H. A. van der Velden, Journ. of the Opt. Soc. of America 37, 1908 (1947).
27. H. de Vries, Experientia 4, 205 (1948).