

Н. И. ПИНЕГИН

КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ДНЕВНОГО ЗРЕНИЯ

(Представлено академиком А. Н. Терениным 16 VI 1953)

С. И. Вавилов с сотр. (¹⁻¹²) осуществил классические исследования световых квантовых флуктуаций визуальным методом. Возможность визуального наблюдения квантовых флуктуаций в его опытах определялась чрезвычайно низким значением энергии, соответствующей порогу палочкового зрения в условиях длительной темновой адаптации.

Возникает, однако, вопрос: играют ли роль квантовые флуктуации в процессе дневного зрения и если да, то возможно ли их измерение при высоких уровнях яркости? С. О. Майзель (¹³⁻¹⁵) теоретически показал, что квантовые флуктуации могут проявляться даже при очень высоких яркостях, так как при этом ежесекундно происходит под действием падающих квантов сравнительно небольшое число диссоциаций молекул светочувствительного вещества в колбочках, поскольку мала концентрация последнего. Возможность проявления квантовых флуктуаций при высоких уровнях яркости допускает также Н. Г. Болдырев (¹⁶), который даже выводит уравнение закономерности зрительного восприятия в предположении наличия флуктуаций в условиях дневного зрения. Более осторожную позицию занимает А. В. Луизов (¹⁷⁻¹⁹), допускающий применимость своей флуктуационной формулы при яркостях лишь ниже 10 асб. Впрочем, и он склонен думать, что флуктуации влияют на разрешающую силу глаза в довольно широком диапазоне яркостей.

Хехт с сотр. (^{20, 21}) в работах по видимости объектов различных размеров, формы и контраста в условиях дневного зрения выдвинул теорию, согласно которой для восприятия контраста необходимо, независимо от яркости фона, чтобы одна колбочка на краю изображения объекта поглощала на 4 кванта больше, чем соседняя колбочка поглощает квантов от фона. Как отмечают де Фриз (²²), Боуман (²³), а также А. В. Луизов (¹⁷), средняя статистическая флуктуация числа квантов от фона уже превышает величину 4. Поэтому теория Хехта приводит к абсурдному выводу, что объект будет виден даже при нулевом контрасте. Таким образом, попытка Хехта дать квантовое объяснение явлениям дневного зрения оказалась несостоятельной.

Мы предприняли прямые измерения квантовых флуктуаций при высокой яркости фона. Исходным принципом послужило для нас указание С. И. Вавилова (¹¹) о том, что вследствие неполного поглощения света сетчаткой во флуктуационных явлениях сказывается одновременно квантовая природа и светового потока и поглощающей среды. Однако закономерности квантовых флуктуаций, подчиняющиеся закону Пуассона, таковы, что сами флуктуации зависят лишь от од-

ного параметра, а именно, от среднего числа n поглощаемых фотонов, независимо от того, чем определяется это число: падающим на сетчатку световым потоком или величиной поглощения в ней. Во-вторых, мы руководствовались тем очевидным соображением, что среднее число n поглощаемых фотонов, создающее на фоне контраст $\Delta B/B$,

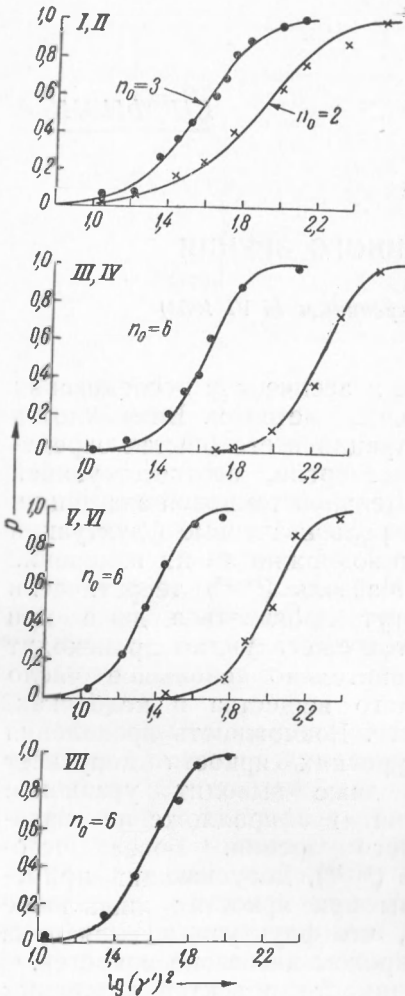


Рис. 1. Квантово-флуктуационная зависимость $P=f(\lg \gamma^2)$ для контраста $\Delta B/B=0,5$. Наблюдатели: I, II — К. В. Ш., III, IV — А. П. Л., V, VI — Н. Ф. С., VII — В. И. С.

кулярном и монокулярном зрении без искусственных зрачков. Для контроля были проведены опыты при монокулярном зрении с искусственным зрачком в 2 мм. Оказалось, что наличие искусственного зрачка практически не изменяет вида зависимости $P=f[\lg(\Delta B/B)^2]$. Правильность опытов при бинокулярном зрении не вызывает сомнений, так как известно, что флуктуационные процессы в каждом глазу совершенно независимы (11, 24). Специальные опыты показали, что вероятность P не изменяется при изменении относительных размеров объекта от 1:1 до 1:9 при условии сохранения площади его неизменной. Это обстоятельство облегчало проведение опытов. Определение зависимостей $P=f(\lg \gamma^2)$ и $P=f[\lg(\Delta B/B)^2]$ оказалось возможным

изменяется пропорционально площади γ^2 изображения объекта на сетчатке, а также контрасту. В-третьих, для наблюдения физических флуктуаций контрастов требовалось выполнение условий С. И. Вавилова (11): кратковременность появления объекта, небольшие размеры его изображения на сетчатке и фиксирование взгляда на место появления объекта.

По соображениям А. В. Луизова (17, 19), соотношение между угловыми размерами и контрастом объекта при постоянной яркости фона должно удовлетворять условию $\gamma(\Delta B/B) = \text{const}$, что, очевидно, эквивалентно условию $\gamma^2(\Delta B/B)^2 = \text{const}$.

Наши опыты сводились к установлению зависимостей $P=f(\lg \gamma^2)$ и $P=f[\lg(\Delta B/B)^2]$, где P — вероятность увидеть объект при указанных выше условиях. Экспериментальная установка была следующей. На расстоянии 2 м от наблюдателя находился белый экран, видимый под углом 2 стеррад. Яркость экрана составляла 750 асб. В центре экрана располагалось тонкое белое кольцо с угловым диаметром около 1° для фиксирования взгляда. В середину этого кольца проектировалось при помощи прибора, находящегося сзади наблюдателя, резкое прямоугольное изображение объекта светлее фона на время 0,013 сек. Площадь и контраст объекта были переменными. Источники света питались переменным током при стабилизированном напряжении. Цветовая температура их была около 2800°K .

В опытах участвовали 6 наблюдателей (4 мужчин и 2 женщины) в возрасте от 20 до 27 лет, обладавших нормальной остротой зрения и контрастной чувствительностью. Опыты проводились при бино-

в силу того, что глаз в данных условиях суммировал действие света в единый зрительный акт.

На рис. 1 и 2 представлены результаты определения $P = f(\lg \gamma^2)$. Сплошными линиями обозначены теоретические кривые Пуассона, белыми кружками — экспериментальные данные при бинокулярном, черными — при монокулярном зрении. В один и тот же день, за 3—4 часа с перерывами, определялась вся кривая $P = f(\lg \gamma^2)$ на основании 100 измерений вероятности P для каждой экспериментальной точки. Затем опыты повторялись в другие дни. Зависимость $P = f(\lg \gamma^2)$ при этом не менялась, что позволяло результаты, полученные за ряд, иногда за 5 дней, усреднять. Поэтому каждая экспериментальная точка на кривых рис. 1 и 2 получена на основании от 10 до 500 определений вероятности P .

На рис. 1 представлены результаты определения $P = f(\lg \gamma^2)$ при контрасте 0,05 на 4 наблюдателях. Крайние пределы изменения угловых размеров квадратного объекта γ' при этом составляли 3,3—11,6 и лишь у одного наблюдателя при монокулярном зрении 3,3—19,0. Из рис. 1 видно, что пороговое число квантов n_0 , необходимое для различения объектов при контрасте 0,05, оказывается небольшим. Для одного из наблюдателей при бинокулярном зрении $n_0 = 3$, а при монокулярном $n_0 = 2$. Для других наблюдателей как при бинокулярном, так и при монокулярном зрении $n_0 = 6$. На рис. 2 представлены для одного наблюдателя результаты определения $P = f(\lg \gamma^2)$ при различных контрастах, а именно, при 0,05; 0,09 и 0,18. Пределы изменения γ' с увеличением контраста естественно уменьшаются: при $\Delta B/B = 0,18$ для бинокулярного зрения они составляли лишь 2,0—4,7. Мы видим, что пороговое число квантов как при бинокулярном, так и при монокулярном зрении при контрастах 0,09 и 0,18 составляет $n_0 = 6$, т. е. столько же, сколько для других наблюдателей при контрасте 0,05 (рис. 1). Таким образом, $n_0 = 6$ является наиболее типичным пороговым числом квантов, необходимым для различения объектов при контрастах 0,05—0,18. Нет оснований полагать, что оно изменилось бы для $\Delta B/B > 0,18$.

На рис. 3 представлены результаты определения $P = f[\lg (\Delta B/B)^2]$ для 3 наблюдателей. Кривые рис. 3 являются усредненными из 3—5 кривых. Поэтому каждая экспериментальная точка представляет собой результат 300—500 измерений вероятности P . Пределы изменения $\Delta B/B$ были 0,132—0,045. Угловые размеры объекта γ' изменялись от наблюдателя к наблюдателю в пределах от 4,7 до 5,8. В опытах С. И. Вавилова⁽¹¹⁾ $\gamma' = 3,6$, в опытах Хехта⁽²⁵⁾ 10 и в опытах Боумана и ван-дер-Вельдена^(26,27) 3—4. Из рис. 3 видно, что пороговое число квантов, отвечающее зависимости $P = f[\lg (\Delta B/B)^2]$, составляет для 3 наблюдателей как при бинокулярном, так и при монокулярном зрении, соответственно, $n_0 = 6, 4, 5$, т. е. в среднем 5. Мы видим,

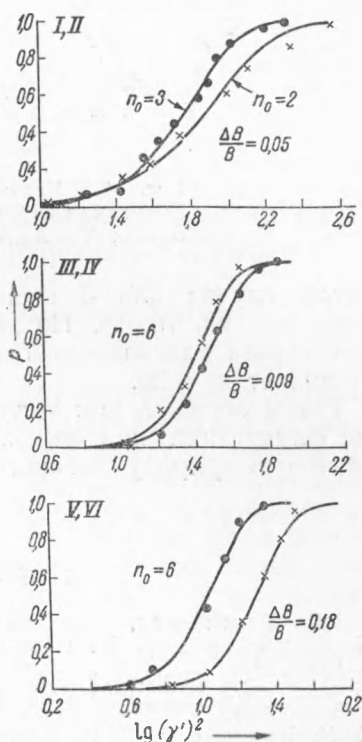


Рис. 2. Квантово-флуктуационная зависимость $P = f(\lg \gamma^2)$ для контрастов: I, II = 0,05, III, IV = 0,09, V, VI = 0,18. Наблюдатель К. В. Ш.

что обе зависимости: $P = f(\lg \gamma^2)$ и $P = f[\lg (\Delta B/B)^2]$ дают практически одно и то же пороговое число квантов, а именно $n_0 = 5-6$. Для сравнения наших данных с данными С. И. Вавилова ⁽¹¹⁾ необходимо перейти от зависимости $P = f[\lg (\Delta B/B)^2]$ к зависимости $P = f[\lg (\Delta B/B)]$.

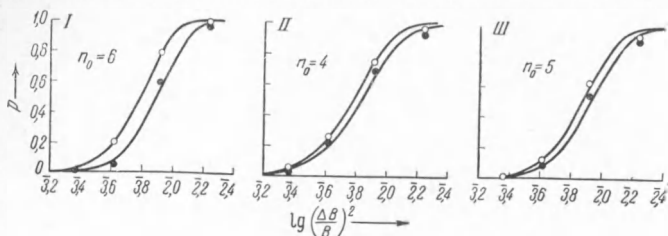


Рис. 3. Квантово-флуктуационная зависимость $P = f[\lg (\Delta B/B)^2]$. Наблюдатели: I — К. В. Ш., $n_0 = 6$; II — А. А. С., $n_0 = 4$; III — Н. А. В., $n_0 = 5$

В этом случае для 3 наших наблюдателей, соответственно, будем иметь $n_0 = 20, 15, 18$. По данным же С. И. Вавилова, средняя величина порога для палочкового зрения в сине-зеленой области [спектра составляет $n_0 = 20$.

Таким образом, нам удалось визуально измерить световые квантовые флуктуации при высокой яркости фона и тем самым доказать квантовую природу дневного зрения.

Поступило
16 VI 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Е. Брумберг, С. Вавилов, Изв. АН СССР, ОМОН, 919 (1933).
- ² Е. Брумберг, С. Вавилов, ДАН, 3, 322 (1934). ³ С. И. Вавилов, Тр. 1-й конфер. по физиол. оптике, 332 (1936). ⁴ С. И. Вавилов, Изв. АН СССР, сер. физ., № 1/2, 176, (1936); Усп. физ. наук, 16, 872 (1936). ⁵ С. И. Вавилов, ДАН, 21, № 8 (1938). ⁶ С. И. Вавилов, Изв. АН СССР, сер. физ., 6, № 1/2, 74 (1942).
- ⁷ Е. М. Брумберг, С. И. Вавилов, З. М. Свердлов, ЖЭТФ, 12, 92 (1942).
- ⁸ С. И. Вавилов, Т. В. Тимофеев, ЖЭТФ, 12, 105 (1942). ⁹ С. И. Вавилов, Т. В. Тимофеева, ЖЭТФ, 12, 109 (1942). ¹⁰ С. И. Вавилов, Усп. физ. наук, 36, 3, 247 (1948). ¹¹ С. И. Вавилов, Микроструктура света, изд. АН СССР, 1950.
- ¹² С. И. Вавилов, Глаз и Солнце, изд. АН СССР, 1950, стр. 99. ¹³ С. О. Майзель, Сборн. матер. Всесоюз. научно-технич. сессии по светотехнике, М., 1948, стр. 5.
- ¹⁴ С. О. Майзель, ДАН, 66, № 6, 1085 (1949). ¹⁵ С. О. Майзель, Проблемы физиол. оптики, 9, 5 (1950). ¹⁶ Н. Г. Болдырев, Тр. сессии, посвящ. памяти акад. С. И. Вавилова, М., 1953, стр. 266. ¹⁷ А. В. Луизов, Природа, № 7, 12 (1951).
- ¹⁸ А. В. Луизов, Сборн. памяти Сергея Ивановича Вавилова, изд. АН СССР, 1952, стр. 278. ¹⁹ А. В. Луизов, Тр. сессии, посвящ. памяти акад. С. И. Вавилова, М., 1953, стр. 277. ²⁰ E. S. Lamer, S. Hecht, S. Schlaer, C. D. Hendley, J. Opt. Soc. Amer., 37, 531 (1947). ²¹ E. S. Lamer, S. Hecht, S. Schlaer, C. D. Hendley, J. Opt. Soc. Amer., 38, 741 (1948). ²² Hl. de Vriess, ibid., 39, 201 (1949). ²³ M. A. Bouman, ibid., 40, 825 (1950). ²⁴ M. Pirenne, Nature, 152, 698 (1943). ²⁵ S. Hech, S. Schlaer, M. Pirenne, J. Opt. Soc. Amer., 39, 42 (1942). ²⁶ H. A. van der Velden, Physica, 11, 179 (1944). ²⁷ M. A. Bouman, H. A. van der Velden, J. Opt. Soc. Amer., 37, 908 (1947).