

ОСНОВЫ И КРИТИКА ОСТВАЛЬДОВСКОЙ ТЕОРИИ ЦВЕТОВ ¹⁾.

Клеменс Шеффер, Бреславль.

§ 1. В этой статье я, опираясь на работы Э. Шредингера ²⁾, Кольрауша ³⁾ и свои собственные ⁴⁾, постараюсь в самом сжатом виде показать, что так называемая оствальдовская теория цветов не-правильна в самых своих основаниях и что ее кажущаяся простота покупается ценою истинности.

Для большей ясности изложения я приведу сначала несколько определений и пояснений, на которые и буду ссылаться в дальнейшем.

а. Мы будем рассматривать здесь лишь цвета тела, т. е. цвета совершенно матовых (не глянцевиных) пигментов (например, цветных тканей, окрашенной бумаги и т. п.), освещенных белым солнечным светом. Это последнее условие является необходимым, так как цвет пигментов зависит, разумеется, от рода освещения; выбор же в качестве „нормального света“ белого солнечного света сам по себе является произвольным, хотя и может быть оправдан филогенетически.

б. Подобные пигменты вообще „отражают“ солнечный свет с одинаковой силой в разных участках спектра. В частном случае, когда „отражательная способность“ не зависит от длины волны, т. е. тело отражает свет всех длин волн и с теми же самыми относительными интенсивностями, как в источнике света, мы называем пигмент „белым“, „серым“ или „черным“. Белым в случае, когда весь свет полностью отражается („отражательная способность“ $R=1$), серым, если $0 < R < 1$ и, наконец, черным, когда $R=0$. Такие пигменты мы будем называть „ахроматическими“.

в. В общем случае, когда $R=\psi(\lambda)$, смесь лучей, попадающих после отражения телом в наш глаз, будет, вообще говоря, цветною; мы называем тогда пигмент „хроматическим“.

¹⁾ Zeitschrift für den Phys. und Chem. Unterricht. (Verlag. J. Springer Berlin) 40. 51, 1927. Перевел Н. Т. Федоров.

²⁾ E. Schrödinger, Phys. Ztsch. 26, 349, 1925.

³⁾ K. W. F. Kohlrusch, Phys. Ztsch. 21, 1920.

⁴⁾ Cl. Schaefer, Phys. Ztsch. 26, 58, S. 908; ibidem 27, 343, 1926.

d. Цвет какого-либо хроматического пигмента возникает, следовательно, в результате смешения всех отражаемых им световых волн; если обозначить яркость солнечного света в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ через $f(\lambda) d\lambda$, то яркость отраженного света с длиной волны λ будет равна $f(\lambda)\phi(\lambda) d\lambda$, яркость же всей смеси отраженных лучей определится суммой (интегралом)

$$\int_{\lambda_0}^{\lambda_1} f(\lambda)\phi(\lambda) d\lambda$$

где λ_0 и λ_1 — границы видимого спектра.

e. Следовательно, для того, чтобы определить цвет какого-либо пигмента, нужно во всяком случае исходить из его „кривой отражения“ $R(\lambda)$; без точного знания ее мы ничего не сможем сказать о цвете пигмента.

f. Если пигментный цвет (или смесь спектральных лучей) рассматривается фовеально, т. е. так, чтобы световое раздражение глаза ограничивалось Fovea centralis, и если, кроме того, окружение цвета совершенно темное (например, достаточно малое цветное пятно, лежащее на черной бумаге или рассматриваемое через узкую трубочку или, наконец, свет в щели спектрального аппарата), то, как показали Гельмгольц и Максвелл, цвет пигмента для „нормального“ глаза можно охарактеризовать тремя независимыми параметрами или координатами. В качестве таковых можно, например, по примеру названных ученых, выбрать тон цвета (т. е. указание длины волны такого же или дополнительного цвета в спектре), насыщенность (которая уменьшается с увеличением содержания белого света) и яркость. Выбор именно этих координат не является необходимым: вместо них можно было бы ввести три какие-либо другие независимые между собою характеристики. Существенно лишь одно: всегда должно брать три независимых между собою координаты цвета; отсюда выражение: пространство цветов трехмерно.

Цвета пигментов (или спектральный цвет), рассматриваемые в подобных условиях, Оствальд называет „абсолютными“ (unbezogenen); мы будем здесь придерживаться этой терминологии, хотя само собою ясно, что и эти пигментные цвета являются не „абсолютными“, но относятся к известным нормальным условиям (фовеальное рассматривание, темное бесцветное окружение). Таково это, если угодно, произвольное ограничение, впрочем совершенно того же рода, как упомянутое выше условие освещения белым солнечным светом. Эти ограничения имеют, разумеется, свое совершенно определенное основание, что сделается ясным из дальнейшего.

Приняв эту терминологию, мы скажем точнее: пространство „абсолютных“ пигментных цветов трехмерно.

g. Цвета пигментов, рассматриваемые не в этих „нормальных условиях“ (например, больших пигментов, изображение которых на сетчатке выходит за Fovea, пигменты в произвольно окрашенном освещенном окружении, например, на белом, желтом или зеленом фоне и т. под.), называются по Оствальду „относительными“ (bezogenen). Вследствие особых свойств нашего глаза, особенно вследствие так называемых явлений контраста, подобные „относительные“ цвета кажутся глазу в некоторых случаях совершенно иными, чем тот же самый пигмент в нормальных условиях. Например, — и это один из самых важных случаев, — пигмент, который в „нормальных“ условиях выглядит желтым, взятый в других условиях, может, смотря по роду освещения фона, казаться коричневым или оливковым и принимать всевозможные переходные между ними оттенки.

Отсюда получается, что „относительные“ цвета пигментов зависят от большого числа координат, в общем случае даже от бесконечно большого, так как мы ведь можем как угодно варьировать внешние условия. Пространство „относительных“ пигментных цветов следовательно, не трехмерно, но в общем случае бесконечно большого числа измерений.

Говоря практически, теория цветов тел возможна лишь для так называемых „абсолютных“ цветов, так как лишь эти цвета могут быть определены конечным небольшим числом (3) координат. Это обстоятельство является, конечно, и причиной, почему в основу так называемой теории цветов всегда клали лишь „абсолютные“ цвета.

§ 2. После этих предварительных замечаний обратимся к теории цветов Оствальда; при этом мы будем основываться на его собственной обзорной статье 1).

Отвлекаясь от некоторых несущественных подробностей, мы можем прежде всего констатировать, что и Оствальд также определяет свои цвета тремя данными, которые, правда, отличаются от указанных выше гельмгольц-максвелловских (тон цвета, яркость и насыщенность). У Оствальда эти координаты называются: тон цвета, содержание белого и содержание черного. Как уже подчеркнуто выше, существенным является лишь число координат (три), тот же или иной выбор их, напротив, безразличен. Поэтому по существу не было бы ничего невероятного, если бы оствальдовские определения цвета оказались не только допустимыми, но даже гораздо более пригодными, чем гельмгольц-максвелловские. Тогда, конечно, оствальдовские координаты должны были бы быть однозначными функциями гельмгольцевских и обратно. Прежде чем углубляться в этот основной вопрос, необходимо подчеркнуть, что уже из числа координат сразу следует, что и Оствальд в основу своей теории кладет

1) W. Ostwald. Phys. Ztsch. 17, 322 и 352, 1916.

и может класть лишь „абсолютные“ пигменты (Основание см. § 1, *g*). Сам Оствальд утверждает, правда, противное; по мнению Оствальда, его заслуга как раз в том, что он создал теорию „относительных“ цветов, в которую укладываются, например, коричневый и оливково-зеленый цвета. Это является, однако, очевидной ошибкой; к частному случаю коричневого цвета мы еще вернемся впоследствии.

В качестве первого результата можно, следовательно, записать: оствальдовская теория пигментных цветов также имеет дело лишь с абсолютными цветами.

§ 3. Посмотрим теперь, как Оствальд определяет (в принципе) свои новые координаты — содержание черного и белого. Оствальд располагает свои пигментные цвета одинаковой насыщенности (то, что его насыщенность есть не что иное, как соответствующее понятие у Гельмгольца, мы можем, как побочное, здесь оставить без внимания; более точное определение оствальдовской насыщенности дано ниже) в „цветные круги“, которые в общем случае разделены на 100 частей, причем отдельные цветные тона обозначены цифрами от 00 до 100. При посредстве добавленных, не имеющих в спектре, пурпуровых тонов они образуют замкнутый в себе ряд: от лимонно-желтого (00) через зеленый, зелено-голубой, голубой, синий, фиолетовый, пурпуровый, красный, оранжевый обратно к лимонно-желтому (100 = 00). Дополнительные цвета располагаются на концах одного и того же диаметра и лежат поэтому в диаметрально-противоположных точках цветного круга. 00 и 50, 25 и 75 и так далее обозначают, следовательно, дополнительные пары цветов.

Оствальд утверждает далее, что на основании экспериментальных исследований он пришел к заключению, что „наиболее насыщенный“ пигмент — положим, лимонно-желтый 00 — отражает лучи всех цветов внутри симметрично расположенного „цветового полукруга“ — в нашем примере, следовательно, все цвета от 75 через 00 до 25; отсюда он создает понятие „полного цвета“, т. е. идеального насыщенного пигмента, который в симметрично по отношению к номеру цвета расположенном „цветовом полукруге“ все отражает, в другом же полукруге напротив все поглощает. В нашем примере для полного цвета 00 мы имели бы (см. рис. 1):

$$R=1 \text{ от } 00 \text{ до } 25; R=0 \text{ от } 25 \text{ до } 75; R=1 \text{ от } 75 \text{ до } 00.$$

Цветовой полукруг от 25 через 50 до 75 соответствует, как легко видеть, „области поглощения“, а цветовой полукруг от 75 через 00 до 25 „области отражения“.

„Полных цветов“ в природе не существует, а потому Оствальд рассматривает пигменты, которые отличаются от полноцветных тем, что в области отражения отражение не полное, но R несколько меньше 1, и соответственно в области поглощения R не равно 0, но несколько больше

0, причем, однако, как закон о цветовом полукруге, так и предположение о том, что в обеих областях R постоянно, сохраняются. (См. рис. 2, где представлены эти соотношения для лимонно-желтого пигмента 00.) Следовательно, ни в „области отражения“ мы не имеем полного отражения, ни в „области поглощения“ полного поглощения. И то и другое Оствальд объясняет так: при прибавлении к пигменту частиц черной краски в об-

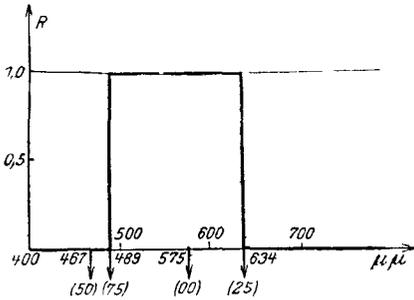


Рис. 1.

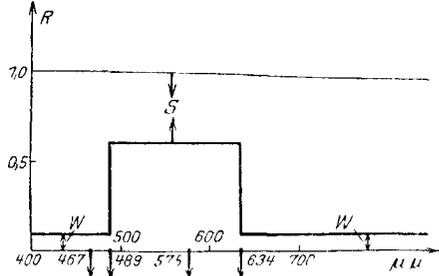


Рис. 2.

ласти поглощения ничего не изменяется, так как там и без того отражение равно нулю, в области же отражения отражение делается меньшим. Расстояние S кривой отражения в области отражения от 1 (см. рис. 2) есть, следовательно, так наз. „содержание черного“. Обратно, когда к „полноцветному“ пигменту примешиваются белые частицы, то в области отражения ничего не изменяется, так как там и без того отражение равно 1, в области же поглощения кривая поднимается над 0; расстояние от оси абсцисс измеряет, следовательно, „содержание белого“ в пигменте. Разницу $1 - (S + W)$ Оствальд называет „содержанием цвета“ F и получает таким образом уравнение: $F + S + W = 1$, которое он считает

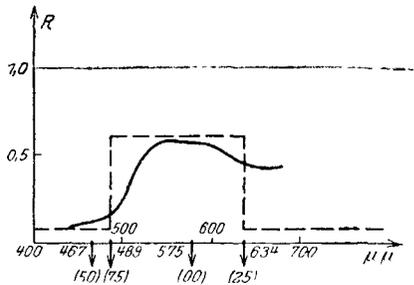


Рис. 3

основным. Цвета одинаковой насыщенности по Оствальду, следовательно, такие, для которых или $F = \text{const}$ или $S + W = \text{const}$. Однако и таких пигментов, которые имели бы кривую отражения, подобную изображенной на рис. 2, в природе не имеется. Пигмент лимонно-желтого цвета 00 имеет в действительности приблизительно следующую кривую отражения (сплошная кривая рис. 3) и совершенно аналогично во всех случаях. Оствальд поэтому заменяет наблюдаемую в действительности кривую отражения кривую, подобную изображенной на рис. 2, строя эту прямоугольную кривую, изображенную штрихами на рис. 3, так, что наинизшая точка действительной кривой отражения

определяет приблизительно содержание белого, а наивысшая — содержание черного, причем, кроме того, сохраняется в силе „закон цветового полукруга“. Это значит, что Оствальд утверждает: две окрашенные пластинки, одна из которых имеет кривую отражения, изображенную сплошной линией на рис. 3, а другая — изображенную на этом же рисунке штрихами, будут казаться для глаза одинаковыми, неразличимыми.

§ 4. Мы займемся теперь критикой этой попытки Оствальда характеризовать пигментные цвета, кроме цветового тона, содержанием белого W и черного S .

Предварительно еще одно замечание. Из всего вышеизложенного следует, что Оствальд по существу также исходит из кривой отражения пигмента, что, согласно § 1, *c*, является безусловно необходимым. Но он схематизирует ее так, как это изображено на рис. 2 и 3 для того лишь, чтобы получить возможность применять удобные, не требующие много времени методы определения W и S .

Но сразу видно, что замена действительной кривой отражения рис. 3 прямоугольной кривой в общем случае — почему лишь в общем, будет сказано ниже — недопустимо, так как при этом изменяются ведь и относительные количества смешиваемых цветов, а следовательно, в общем случае, и цвет смеси. Если мы отвлечемся таким образом от исключенных ограничением „в общем случае“ возможных частных случаев, которые мы обсудим ниже, мы можем сказать: уже одно схематическое изображение действительной кривой отражения при помощи прямоугольной кривой недопустимо. К этому присоединяется еще то, что содержание белого и черного у Оствальда рассматривается как нечто совершенно равноценное и равнозначное, что очевидно вытекает из его соображений о белых и черных частицах (§ 3), по которым, действительно, механическая примесь белых и черных частиц к цветным совершенно равнозначаща. На самом же деле примесь черного к хроматическому пигменту (при помощи или непосредственного примешивания черных частиц, или введения черного сектора на вертушке для смещения цветов) есть нечто совершенно иное, чем соответствующая примесь белого. Ибо, как показывает опыт ¹⁾, прибавление черного производит лишь потемнение пигмента, которое всегда может быть полностью компенсировано более сильным освещением (разумеется, белым солнечным светом). Другими словами, данный пигмент и тот же самый пигмент с примесью черного могут быть сделаны неразличимыми для глаза, если последний освещен сильнее. Совершенно иначе обстоит дело с прибавлением белого.

¹⁾ F. Exner, Sitz. Ber. d. Wien. Akademie, Abt. II a, 127, S. 1829, 1910 -- Cl. Schaefer, Phys. Ztsch. 27, 343, 1926.

Оно изменяет качество цвета и никогда не может быть компенсировано изменением интенсивности освещения. Итак, две совершенно различные вещи рассматриваются в „теории“ Оствальда как равнозначные.

Для Оствальда учение о содержании черного и белого имеет исключительное значение. Ибо, как указано выше, он думает и утверждает, что его систематика охватывает также и „относительные“ цвета, что, как мы уже пояснили выше, является неправильным. Оствальд считает, что примесь черного к желтому делает его коричневым и что, следовательно, он может характеризовать также и коричневые пигменты, чего не в состоянии сделать ни одна другая теория. Но это ошибка по двум причинам. Во-первых, содержание черного в желтом пигменте само по себе ничего не имеет общего с коричневой окраской у пигментов рассматриваемых в „нормальных“ условиях при примеси черного никогда не возникает коричневый цвет, который является типичным примером „относительного“ цвета. И, во-вторых, теория Оствальда относится тоже к „абсолютным“ цветам.

§ 5. Хотя уже и эти возражения достаточно вески, вопрос этим еще не исчерпан.

Рассмотрим еще пигменты, имеющие один и тот же тон цвета, но разные кривые отражения, максимумы и минимумы которых совпадают, как это показано на рис. 4. Все эти пигменты — число которых можно увеличить как угодно — имеют по Оствальду одинаковое содержание черного и белого и, следовательно, в его системе занимают одно и то же место, являются идентичными. И все же для глаза они в общем случае будут казаться различными, так как каждый из них представляет собою иную, чем остальные, смесь цветов. По измерениям Оствальда все эти различные пигменты не отличались бы друг от друга, имея одно и то же численное обозначение. В известном смысле верно и обратное. В оствальдовской системе возможно, что один и тот же пигментный цвет может быть представлен бесконечно разнообразными сочетаниями численных характеристик. Чтобы понять это, вспомним, что пространство цветов лишь трехмерно, совокупность же спектров бесконечно большого числа измерений. А это означает, что имеется бесконечно много различных смесей цветов, которые для глаза являются неразличимыми. Например, два любых дополнительных цвета дают тот же самый белый: в оствальдовском круге цветов, напр., пары 00 и 50; 01 и 51;... 25 и 75... 49 и 99. Это же справедливо и для всех цветов. Каждый из них в общем случае может быть получен при помощи бесконечно большого

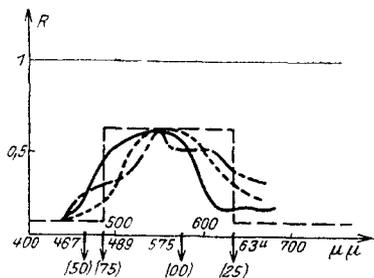


Рис. 4

числа различных смесей спектральных лучей, что в пигментных цветах соответствует бесконечно большому числу пигментов, имеющих различные кривые отражения. По Оствальду каждая из этих кривых отражения имела бы вообще и иное содержание белого и черного, вследствие чего одни и те же пигментные цвета фигурировали бы в бесконечно многих местах его системы и, будучи неразличимыми для глаза, имели бы различные оствальдовские обозначения.

Оба эти обстоятельства являются смертельными для оствальдовской системы.

§ 6. Последнее из них, а именно, что один и тот же сложный цвет может быть получен вообще бесконечно большим числом различных способов, есть альфа и омега учения о смешении цветов; это, так сказать, „нормальный феномен“ этого учения. И тем более кажется удивительным то, что Оствальд, повидимому, не знал о его существовании, так как он открывает его заново и снабжает названием, которое одно лишь является здесь новым — „метамерия“. „Метамерными пигментами“ являются по Оствальду такие, которые, несмотря на различные кривые отражения, неразличимы для глаза. Как уже указывалось выше, это обстоятельство является смертельным для оствальдовской систематики, разрушая однозначность расположения цветов. Оствальд и его ученики сами прекрасно это чувствуют, но устраняют со своего пути решение этого затруднения, ссылаясь на то, что — и это по отношению к нормальному явлению! — еще не имеется достаточного опытного материала. Тем временем явление метамерии могло бы, вероятно, пригодиться для того, чтобы дать оствальдовской систематике такое направление, которое сделало бы ее приемлемой. — Ибо в § 4 мы должны были, критикуя замену кривой отражения определенной прямоугольной кривой, прибавить ограничение „в общем случае“. „В общем случае“, так говорили мы, замена сплошной действительной кривой отражения на рис. 3 штриховую кривую того же рисунка недопустима, так как „в общем случае“ этим кривым отражения соответствуют различные цвета. Только в том случае, когда обе кривых отражения принадлежат метамерным пигментам — и это есть вышеупомянутое возможное исключение — оствальдовский способ был бы допустим.

Но тогда сейчас же возникает вопрос: нельзя ли для каждого данного пигмента так „метамерно“ деформировать его действительную кривую отражения, чтобы она перешла в оствальдовскую прямоугольную? Если бы на этот вопрос можно было ответить утвердительно, то этим были бы устранены все затруднения и содержание белого и черного совместно с тоном цвета действительно однозначно определяли бы пигмент. В этом случае можно было бы все еще спорить о том, целесообразно ли название: содержание белого и черного, но по существу все было бы в порядке и тогда должно было бы также

оказаться, что W и S находятся в простой связи с гельмгольцевскими координатами: яркостью и насыщенностью. К сожалению: исследование ¹⁾ показывает, что на этот вопрос следует ответить отрицательно. Для того, чтобы действительная и оствальдовская схематизированная кривые отражения принадлежали метамерным пигментам, должно, очевидно, быть выполнено некоторое определенное условие ²⁾, что ясно и без вычислений. Условие это выполняется, если отбросить или модифицировать закон Оствальда о цветовом полукруге, самое гениальное творение Оствальда, по мнению его сторонников. Но этим снова все разрушается, так как лишь в случае сохранения этого закона оствальдовская схематизация кривой отражения будет установлена действительно однозначно.

§ 7. Во избежание недоразумений следует прибавить еще одно замечание. Мы вовсе не хотим отрицать (но также и не утверждаем), что оствальдовская систематика в иных случаях может оказаться с известным приближением пригодной. Это было бы тогда, когда указанное выше (§ 6) условие случайно и приблизительно выполняется. Критика наша является прежде всего критикой по существу. Точные основы теории смешения цветов, точное знание спектров отражения оствальдовская систематика подменяет грубой схемой и притом до известной степени просто из удобства. Она отказывается в пользу кажущейся простоты изложения и методов измерения от необходимон точной формулировки. Ее притязание на то, что она впервые охватывает с количественной стороны цвета тел, недопустимо по двум причинам. Во-первых, потому, что фактически она этого не делает, и, во-вторых, потому, что это уже давно сделано в методе, ведущем свое начало от Ньютона и развитом Гельмгольцем и Максвеллом, который характеризует цвета их тоном, яркостью и насыщенностью.

Наша уверенность в том, что оствальдовская теория означает собою значительный шаг назад по отношению к тому, что было сделано до нее, и что вследствие неясности своих основных понятий может причинить прямо невероятный вред, определило выбор рассмотренных здесь пунктов этой теории. Если бы даже все остальные пункты теории были безукоризненными, изложенного здесь, по нашему мнению, достаточно, чтобы отвергнуть теорию, которая вследствие ее кажущейся простоты (и энергичной пропаганды ее создателя) может проникнуть в еще более широкие круги. В своей автобиографии ³⁾ Оствальд придерживается, правда, другого мнения: „Я подчеркиваю уже здесь, что я считаю создание измерительного учения о цветах наивысшим достижением, которое мне удалось совершить“. Но это — к счастью — ошибка.

¹⁾ Cl. Schaefer, Phys. Ztschr., 27, S. 351, 1926.

²⁾ Равенство нулю некоторого определенного детерминанта. *Ирил. перев.*

³⁾ W. Ostwald. Lebenslinien, 1, S. 30. Berlin, 1926.