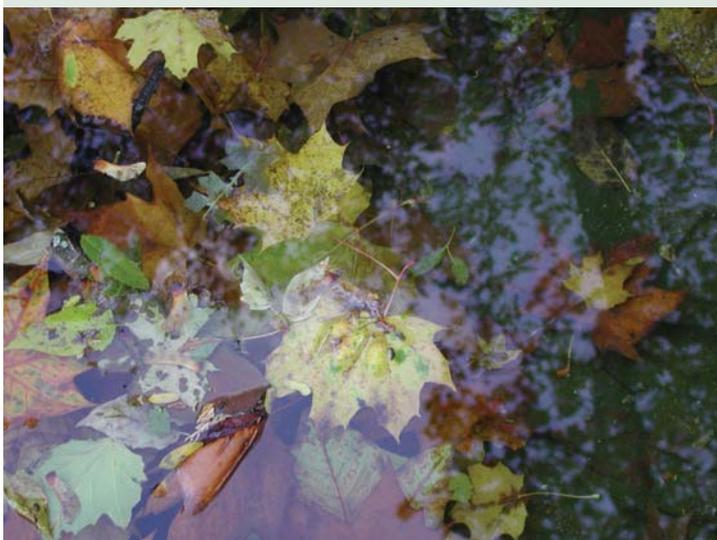


Джон Вернер, Баинджо Пинна и Лотар Шпильман

ЦВЕТОВЫЕ ИЛЛЮЗИИ

и МОЗГ



Взглянув на фотографию осенних листьев и отражений на воде, легко понять, насколько значительна роль цвета в нашем восприятии. Ощущение глубины и многие детали исчезают на черно-белом снимке

Изучение зрительных иллюзий свидетельствует о том, что восприятие цвета мозгом неотделимо от представлений о форме и глубине

Как беден стал бы мир, лишись красок! Цвета не только позволяют нам видеть окружающее более точно, но и порождают качественно новые оттенки восприятия. Например, на цветной фотографии (стр. 72) отчетливо видны осенние листья в спокойной глади фонтана, отражения в воде деревьев и синего послеполуденного неба над ними. А на черно-белом снимке листья менее заметны, голубые небеса отсутствуют вовсе, отражения лишь намечены, сама вода едва угадывается, кроме того, пространство картины совершенно лишено глубины.

Многие люди полагают, что цвет служит определяющей и неотъемлемой характеристикой предметов и зависит исключительно от длины волны отраженного света. Однако

такое мнение неверно. Ощущение цвета рождается в мозге. Если бы воспринимаемые нами оттенки обуславливались только протяженностью световой волны, то предметы имели бы для нас совершенно разную окраску в зависимости от освещения, например на солнце и в тени. На самом деле цвет предметов, «увиденный» мозгом, постоянен и независим от внешних факторов.

Некоторые исследователи, изучающие зрение, скажут, что «раскрашенное» восприятие мира — это излишество, в котором нет реальной необходимости. В конце концов, есть люди и животные, довольствующиеся черно-белым изображением. Например, для того чтобы ориентироваться в пространстве и управлять движениями, цвет не нужен. По всей вероятности, люди, у которых вследствие инсульта развилась цветовая слепота, во всех других отношениях обладают совершенно нормальным зрением. Подобные наблюдения легли в основу представлений о независимой природе обработки цвета, не связанной с восприятием глубины и формы, т.е. о том, что цвет сводится лишь к оттенку, насыщенности и яркости.

Тем не менее, изучение иллюзорных цветов (которые наши глаза видят там, где их нет) показывает, что обработка информации о цвете неотделима от таких представлений, как границы и форма объектов. Уже десять лет мы пытаемся понять, каким образом цвет влияет на восприятие других свойств предметов. В процессе работы мы исследовали множество иллюзий, а некоторые из них сами же и создали. Они помогли нам выяснить, каким образом обработка цвета нервной системой рождает новые качества формы и границ. Однако прежде чем рассказать об иллюзиях, стоит напомнить, как происходит обработка информации о цвете в мозге человека.

Пути к иллюзиям

Зрительное восприятие начинается с поглощения света или, точнее, дискретных порций энергии, называемых фотонами, колбочками и палочками,

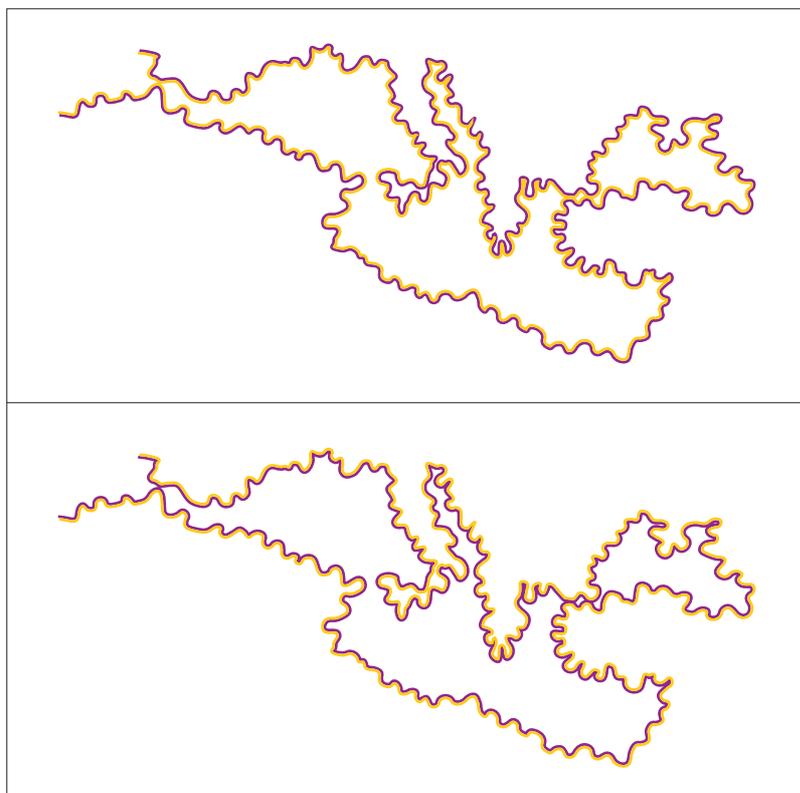
расположенными в сетчатке (стр. 75). Колбочки работают при свете дня, палочки отвечают за ночное зрение. Реакция колбочки определяется количеством попавших на нее фотонов, а затем передается двум другим типам нейронов, называемых биполярными клетками ON- и OFF-типа, которые становятся источником сигнала для ганглиозных клеток, также расположенных в сетчатке.

Ганглиозные клетки обладают рецептивными полями, организованными по типу «центр-периферия». Рецептивное поле любого зрительного нейрона представляет собой область пространства в окружающем физическом мире, которая может воздействовать на данный нейрон. Нейрон с рецептивным полем «центр-периферия» отвечает по-разному в зависимости от соотношения количества света, попадающего в середину поля и на его край.

Ганглиозная клетка ON-типа дает максимальный разряд, когда центр ярче периферии, а минимальный — когда рецептивное поле освещено равномерно. Клетки OFF-типа ведут себя противоположным образом. Такой антагонизм между серединой и краями ведет к тому, что ганглиозные клетки реагируют на контраст и в результате обеспечивают четкую реакцию мозга на границы объектов.

Большая часть аксонов ганглиозных клеток передает сигналы в мозг, а именно, в латеральное колленчатое тело таламуса, расположенное в самой глубине мозга, отсюда же — в зрительную кору (на затылочной поверхности). Разные популяции ганглиозных клеток в неодинаковой степени чувствительны к различным характеристикам стимулов, таким как движение и форма, и их волокна передают импульсы с различной скоростью. Например, сигналы о цвете передаются по медленным волокнам.

Считается, что в процессе видения участвует не менее 40% мозга человека. В областях, включающихся на ранних этапах визуальной обработки (поля зрительной коры V1, V2 и V3), нейроны организованы ▶



При акварельном эффекте возникает ощущение, что более светлый из двух цветов распространяется на белую область. Данный пример показывает, насколько важен цвет для восприятия размера и формы фигуры. На нижнем рисунке легко узнаваема карта Средиземного моря, где цвет как бы растекается на территории суши

в карты с поточечным отображением зрительного поля. Отсюда сигналы расходятся в 30 различных областей, которые связывают между собой более чем 300 путей. Каждый участок выполняет свои специфические функции, такие как обработка цвета, движения, глубины и формы, при этом ни один из них не обладает исключительно одним перцептивным качеством. Далее вся информация объединяется

и дает нам целостное восприятие объекта, имеющего конкретную форму и цвет. Нейрофизиологи пока не сумели до конца понять данный механизм.

Интересно, что двустороннее разрушение некоторых зрительных областей ведет к искаженному видению не только формы, но и цвета. Данное наблюдение подтверждает, что чувство цвета неотделимо от других характеристик объекта.

ОБЗОР: ЦВЕТОВОЕ ЗРЕНИЕ

- Исследователи считают, что обработка цвета в мозге происходит независимо от восприятия других параметров, таких как форма и глубина.
- Изучение иллюзорных цветов показывает, что восприятие цвета индуцирует возникновение ощущения формы и глубины.
- Авторы с помощью модифицированной ими иллюзии Эренштейна показали, каким образом цвет, очертания и форма совместно обеспечивают отображение мозгом окружающего мира.

В результате смешения сигналов, несущих информацию об окраске и форме, человек может увидеть то, чего нельзя было бы ожидать на основе анализа длины волны света, отраженного от предмета, что наглядно демонстрируют созданные нами иллюзии.

Акварельный эффект

Один из экспериментов с иллюзорным цветом показывает, насколько велико значение цвета для восприятия размеров и формы фигуры. При определенных условиях окраска предмета меняется в зависимости от оттенка фона, на котором он рассматривается: он может казаться более контрастным или ассимилироваться. До сих пор было описано распространение цвета лишь на относительно небольшие площади, что согласуется с мнением, что связи между зрительными нейронами довольно короткие. Однако мы были удивлены, обнаружив, что если белая область ограничена двумя контурами различного цвета (причем внутренний светлее наружного), то оттенок внутреннего контура как бы растекается на всю поверхность.

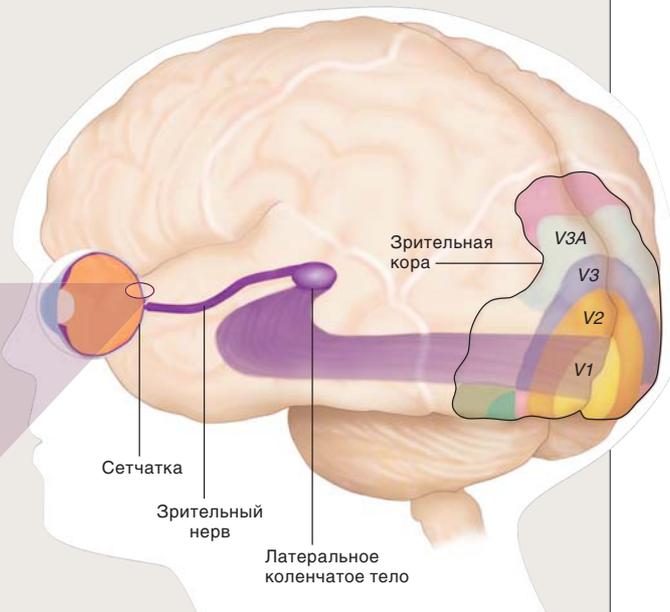
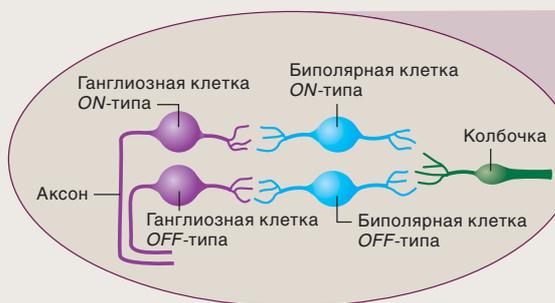
Данную иллюзию мы назвали акварельным эффектом. Мы обнаружили, что цвет распространяется, когда оба контура непрерывны, т.е. наружная темная линия выступает как некий барьер, заключающий цвет внутри себя и не дающий ему выйти наружу. Фигура выглядит плотной и слегка приподнятой. Если поменять цвета контуров, тот же участок покажется абсолютно белым и немного утопленным.

Акварельный эффект больше влияет на выделение фигуры из фона, чем такие свойства, как близость, непрерывность, замкнутость, симметрия и др., открытые гештальт-психологами в начале XX в. Заполнение цветом происходит со стороны более светлой линии контура, и именно эта область воспринимается как фигура, а то, что расположено со стороны темного контура, становится фоном. Такая особенность восприятия позволяет

JOHN S. WERNER, BAINGIO PINNA AND LOTHAR SPILLMANN

ВИДЕТЬ ЦВЕТ

Восприятие цвета начинается с поглощения света колбочками — фоторецепторами сетчатки (*фрагмент внизу*). Колбочка отвечает на сигнал всегда одинаково, но ее активность передается двум различным типам нейронов, называемым биполярными клетками *ON*- и *OFF*-типа, которые, в свою очередь, соединены с ганглиозными клетками *ON*- и *OFF*-типа, а их аксоны несут сигнал в мозг — сначала в латеральное колленчатое тело, а оттуда далее в зрительную кору



преодолеть двусмысленность изображения. Кстати, Эдгар Рубин (Edgar Rubin), один из пионеров изучения выделения фигуры из фона, утверждал, что граница принадлежит фигуре, а не фону.

С точки зрения нейрофизиологии акварельную иллюзию можно объяснить тем, что сочетание на белом фоне светлого контура с ограничивающим его более темным стимулирует нейроны, реагирующие либо на границы, которые светлее с внутренней стороны, чем с наружной, либо наоборот, но не те и другие одновременно. Принадлежность самого контура кодируется на ранних этапах обработки в зрительной коре, вероятно, в полях *V1* и *V2*. В экспериментах на обезьянах исследователи обнаружили, что приблизительно половина нейронов зрительной коры реагирует на направленность контраста (переход от светлого к темному или наоборот) и таким образом обозначают границу. Те же самые нейроны участвуют в восприятии глубины, которое помогает выделить фигуру из фона.

Результаты наших исследований показали, что волнистые линии дают более сильный акварельный

эффект, чем прямые, возможно потому, что извилистые границы вовлекают в реакцию большее количество нейронов. Далее сигнал о цвете, детектированный такими нейронами, должен распространиться на большие площади поля зрения до тех пор, пока не наткнется на барьер в виде таких же клеток, воспринявших границу на противоположной стороне замкнутого контура. Таким образом, на данном уровне анализа цвет и форма неразрывно связаны.

Радиальные линии

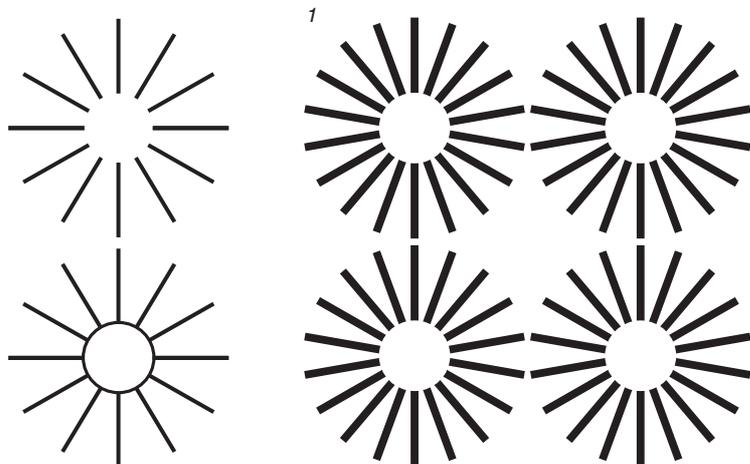
Иллюзия с радиальными линиями также подтверждает, что цвет участвует в выделении фигуры из фона. В 1941 г. немецкий психолог Вальтер Эренштейн (Walter Ehrenstein) продемонстрировал, что на участке, заключенном между концами радиально расходящихся линий, возникает иллюзорный яркий круг, как будто расположенный немного впереди лучей. Однако ни самой фигуры, ни ее границы в реальности не существует.

Выраженность данного феномена зависит от длины, ширины, количества и контрастности веерообразных отрезков. Видимо, в основе

иллюзии лежит работа нейронов, реагирующих на концы линий. Такие клетки, называемые нейронами с концевым торможением, были обнаружены в зрительной коре. Сигналы от них объединяются и подаются на другой нейрон более высокого порядка, благодаря которому центральная область изображения кажется яркой.

Изучая иллюзию Эренштейна, мы меняли количество, длину и ширину радиальных линий (*пронумерованные иллюстрации, стр. 76-77*). Для усиления эффекта паттерн повторен четыре раза на каждом рисунке. Определив параметры лучей, обеспечивающих возникновение самого яркого круга в центре (*1*), мы начали экспериментировать с хроматическими свойствами промежутка в центре между отрезками. Сначала мы добавили к иллюзии Эренштейна черное кольцо, и яркость центрального кружка совершенно исчезла: иллюзия разрушилась. Дело в том, что окружность подавляет активность нейронов, реагирующих на концы линий.

Однако если кольцо имеет цвет, оно может активизировать другие клетки. Стоило сделать его цветным, ►



Иллюзия, созданная немецким психологом Вальтером Эренштейном в 1941 г., послужила основой для создания новых оптических обманов. Добавление окружности (слева внизу) разрушает иллюзорное видение яркого круга в центре.

1) Яркие круги заполняют промежутки в центре между линиями в иллюзии Эренштейна, которая модифицирована нами для усиления эффекта

как белый круг внутри него не только стал выглядеть намного ярче, чем в иллюзии Эренштейна, но и приобрел некоторую плотность, как будто на поверхность бумаги была нанесена белая паста (2). Мы были удивлены, поскольку иллюзорные свечение и фактура поверхности обычно не возникают одновременно и даже считаются взаимоисключающими. Мы назвали наблюдаемое явление аномальной индукцией яркости. Как и при акварельном эффекте, виновниками иллюзии были клетки кортикальных полей, задействованных на ранних этапах зрительной обработки.

Далее в промежутках между радиальными линиями в иллюзии Эренштейна мы поместили серый

круг (3). Возникло новое впечатление, которое мы назвали мерцающим глянец. Оно проявлялось при каждом движении глаз или перемещении самого паттерна. Такой эффект может возникать из-за конкуренции между ON- и OFF-системами: линии вызывают иллюзорное ощущение повышения яркости, которому противостоит реальное снижение сияния серого круга. Когда мы заменили белый диск в центре цветного кольца на черный и сделали фон того же цвета (4), то круги стали выглядеть темнее, чем идентичный им черный фон. В отличие от белых кругов, казавшихся светящимися, чернота создает своего рода пустоту, черную дыру, которая поглощает весь свет.

ОБ АВТОРАХ

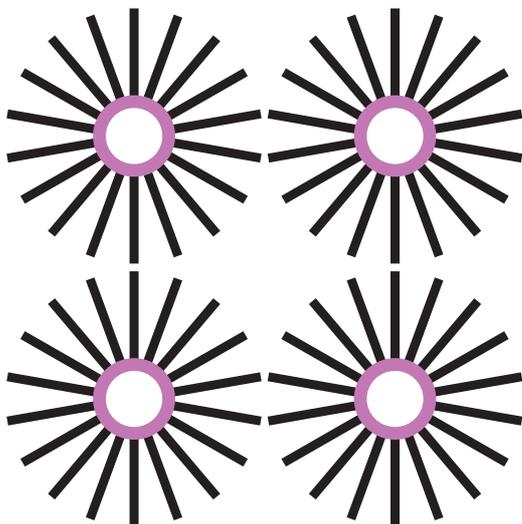
Джон Вернер (John S. Werner), **Баинджи Пинна** (Baingio Pinna) и **Лотар Шпильман** (Lothar Spillmann) изучали иллюзии, описанные в настоящей статье, на протяжении последних десяти лет. Вернер получил докторскую степень по психологии в Университете Брауна и проводил исследования в Институте перцепции Нидерландской организации прикладных научных исследований. В настоящее время он профессор Калифорнийского университета в Дэвисе. Пинна, профессор университета Сассари в Италии, окончил Падуанский университет. Шпильман, возглавляющий Лабораторию зрительной психофизики во Фрайбургском университете в Германии, проработал два года в Массачусетском технологическом институте и пять лет в Фонде сетчатки и Массачусетской клинике глаза и уха.

Когда круг в центре цветного кольца был серым, то казалось, что в нем присутствует дополнительный оттенок: в нашем примере он воспринимался как желтовато-зеленый, когда кольцо было фиолетовым (5). Более того, при каждом движении глаз или при перемещении рисунка круг как будто мерцал. Мерцающий аномальный цветовой эффект зависит от свойств радиальных линий и цветного кольца так же, как и остальные иллюзии, но в данном случае присутствуют и некоторые уникальные особенности, которые, видимо, нельзя считать простой комбинацией других известных оптических обманов. В описываемой иллюзии индуцированный цвет был одновременно как светящимся, так и мерцающим. Удивительно, но он кажется еще и парящим над остальной частью картинка.

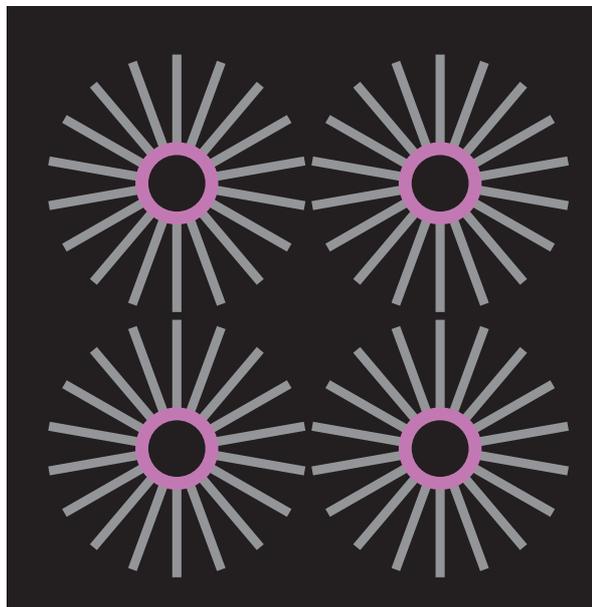
Возможно, в создании данной иллюзии задействованы нейроны с концевым торможением, активированные радиальными линиями, однако только этим нельзя объяснить одновременное возникновение мерцания и дополнительного цвета. Не ясно, влияют ли радиальные линии непосредственно на цветовой контраст, или же яркость цвета возникает косвенно как следствие глянца и мерцания, рождающихся при сочетании расходящихся отрезков и серого цвета.

К сожалению, пока мы не можем понять причины возникновения данной иллюзии. Она столь сложна, что вряд ли порождается каким-то одним простым процессом. Скорее всего она представляет собой попытку мозга примирить противоречащие друг другу сигналы в различных специализированных путях. Исследователям предстоит еще многое узнать о том, как мозг воспринимает физический мир. Работа над иллюзорными цветами продолжается и обещает указать нам путь к постижению сложного устройства зрительной системы человека. ■

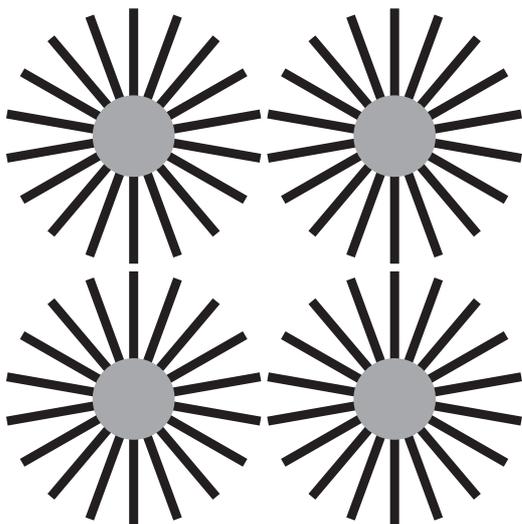
Перевод: Б.В. Чернышев



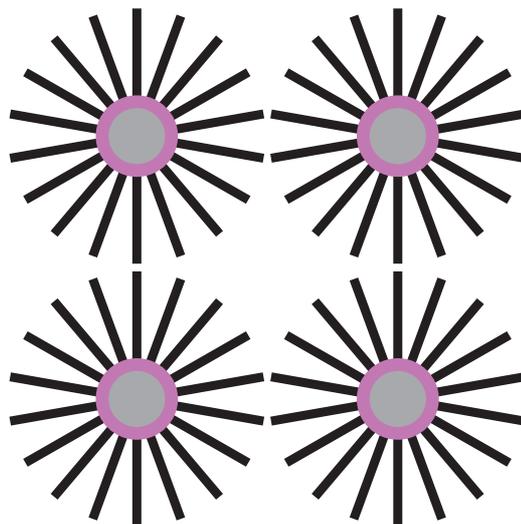
2) Аномальная индукция яркости: добавление цветных колец заставляет иллюзорные круги казаться еще белее



4) Аномальная индукция черноты: черные круги внутри цветных колец кажутся намного темнее, чем физически идентичный им фон



3) Мерцающий глянец: серые круги создают эффект мерцания



5) Мерцающий аномальный цветовой контраст: серые круги, окруженные фиолетовыми кольцами, при перемещении взгляда или рисунка кажутся зеленовато-желтыми и светящимися

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Sensory Experience, Adaptation and Perception. Edited by Lothar Spillmann and Bill R. Wooten. Lawrence Erlbaum Associates, 1984.
- Visual Perception: The Neurophysiological Foundations. Edited by Lothar Spillmann and John S. Werner. Academic Press, 1989.
- Neon Color Spreading: A Review. P. Bressan, E. Mingolla, L. Spillmann and T. Watanabe in Perception, Vol. 26, No. 11, pages 1353–1366; 1997.

- The Watercolor Effect: A New Principle of Grouping and Figure-Ground Organization. B. Pinna, J. S. Werner and L. Spillmann in Vision Research, Vol. 43, No. 1, pages 43–52; January 2003.
- The Visual Neurosciences. Edited by L.M. Chalupa and J.S. Werner. MIT Press, 2004.
- Figure and Ground in the Visual Cortex: V2 Combines Stereoscopic Cues with Gestalt Rules. F. T. Qiu and R. von der Heydt in Neuron, Vol. 47, No. 1, pages 155–166; July 7, 2005.

JOHN S. WERNER, BAINGIO PINNA AND LOTHAR SPILLMANN