



Фото Игоря Литвика / Фотобанк Лори.

## ОГНИ ФЕЙЕРВЕРКА. ЧТО ВНУТРИ?

Кандидат химических наук  
Максим АБАЕВ.

**Разбираемся в цветах праздничных фейерверков, эмиссионных спектрах и нагреваем чёрное тело.**

**К**ак встретить Новый год с пользой? Можно посчитать объём кожуры апельсина и поэкспериментировать с жидкостью в коническом фужере (см. с. 92—93), провести анализ высокомолекулярных соединений в салате

оливье или же попробовать силы в футурологии под бой курантов. Но не менее интересным объектом новогодних исследований могут стать фейерверки — они не только потрясающе красивы, но и весьма интересны с химической точки зрения, и в первую очередь своими восхитительными цветами.

Чтобы фейерверк был виден издали, а город после праздничного салюта не выглядел как зона военных действий, цветные взрывы праздничных салютов проводят высоко в воздухе. Обычно для этого используется энергия пороховых газов, которые поднимают заряд вверх за счёт реактивной тяги, или же выстреливают снарядом из батареи салютов.

И вот тысячи зрителей, оторвавшись от праздничного стола, устремляют взоры в небо в предвкушении красочного зрелища. Что, собственно, мы видим,

### ● КАК ЭТО УСТРОЕНО





когда смотрим на разрывы салютов? Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к наиболее «фееричному» разделу физики — оптике.

Наш глаз — это такой прибор, который способен регистрировать электромагнитное излучение определённой частоты. Из всего спектра, куда входят и радиоволны, и опасное гамма-излучение, мы можем видеть только узкий диапазон, отвечающий длинам волн от 780 до 380 нм. Именно по этой причине он и называется «видимое излучение». С каждым участком видимого спектра мы соотносим определённый цвет; классический пример — радуга. Цвет излучения меняется от красного к фиолетовому по мере уменьшения его длины волны.

Но тут есть один важный момент. Глаз, сколь бы совершенен он ни был с точки зрения эволюции, может ввес-

ти в заблуждение относительно истинного цвета предметов. Вот смотрите вы на фотографию жёлтого лимона на экране вашего смартфона. Думаете, экран светится жёлтым светом? Вовсе нет. Пиксели на экране излучают свет только трёх основных цветов: красного, зелёного и синего. Однако мы всё равно видим жёлтый лимон — почему? Наш глаз имеет три типа фоторецепторов — для красного, зелёного и синего света. Когда свет падает на сетчатку глаза, он возбуждает одновременно фоторецепторы всех трёх типов, но с разной интенсивностью. Каждый из фоторецепторов отправляет в мозг свой собственный сигнал. Например, красный фоторецептор кричит, что «лимон очень красный», зелёный докладывает, что «лимон зелёный», а синий вообще говорит, что ничего не видит и никакого лимона нет. Мозг обобщает всю поступившую от фоторецепторов информацию и даёт заключение — лимон жёлтый.

В этом состоит главный недостаток глаза: если призма, как настоящий спектральный прибор, «раскладывает» цвета по полочкам, то глаз работает как интегральный фотоприёмник, смешивая весь спектр в один «цвет».

Перейдём теперь от лимонно-смартфонного примера к фейерверкам. Для создания яркого снопа искр в пороховой заряд добавляют железную стружку или опилки. Цвет искр при этом может быть от жёлтого до ярко-белого. А если в состав заряда входят соли натрия, то огни

**Фейерверк** (от немецких слов *Feuer* — огонь, *Werk* — работа) — это декоративные огни разных цветов. Они могут гореть на земле, но чаще их запускают в небо. Каждый заряд (они бывают вышибные, воспламенительно-разрывные и звуковые) состоит из дымного или бездымного пороха и пиротехнического состава. Несколько зарядов обычно собирают в один корпус. При выстреле корпус взлетает, и при достижении заданной высоты заряды вылетают из него и вспыхивают. Для воспламенения к каждому из них присоединяют либо огнепроводной шнур, либо электрический запал.



фейерверка окрасятся в ярко-жёлтый цвет. И в первом и во втором случае мы видим одинаковый результат — жёлтый цвет, однако с точки зрения спектрального состава они абсолютно разные.

Начнём с первого — с железных опилок. Заглянем в кузницу и посмотрим, что происходит с металлом при нагревании. Сначала металл не испускает никакого света, но когда его температура достигает примерно 500°C, в темноте можно заметить слабое тёмно-красное свечение. По мере увеличения температуры, металл будет светиться всё ярче и ярче, цвет от красного станет меняться в сторону жёлтого, а потом и вовсе превратится в белый — как говорится, дойдёт «до белого каления». Теперь отправимся в стеклодувную мастерскую, где стоит газовая горелка, и проведём эксперименты с самой обычной солью — хлоридом натрия. Будем менять температуру пламени и бросать в него крупинки соли или капать солёным раствором — синее пламя мгновенно окрасится в яркий жёлтый цвет. При этом цвет и интенсивность вовсе не будут зависеть от температуры пламени. Если мы внесём в пламя горелки соли других металлов, то сможем окрасить его в самые разные цвета: хлорид меди придаст пламени голубой цвет, хлорид бария — зелёный, а соли стронция — ярко-красный. Почему так происходит?

Все нагретые тела излучают свет. Если температура низкая, то практически всё излучение находится в инфракрасном диапазоне, невидимом человеческому глазу (хотя в природе многие животные освоили «тепловизор» и научились видеть тепловое излучение, — эта способность позволяет змеям охотиться в темноте на мышей). Чем выше становится температура материала, тем шире диапазон, в котором он излучает: сначала это только инфракрасный и красный, потом добавляется жёлтый, зелёный, синий, фиолетовый, и так вплоть до ультрафиолета. Как раз это мы и видим, когда наблюдаем за нагревающимся металлом: сначала он красный, потом становится жёлтым, а

сильно раскалённый объект выглядит белым, хотя на самом деле он в прямом смысле светится всеми цветами радуги, просто наш глаз собирает их все в один белый цвет.

В случае же с натрием мы видим самый настоящий чистый жёлтый свет с длиной волны 589 нм. Так почему же натрий в пламени светится только одним светом, а нагретые железные опилки излучают во всём диапазоне? Как мы уже говорили, объясняется это тем, что мы видим два разных типа свечения. В случае с натрием — это свет, излучаемый отдельными атомами, а в случае с опилками мы имеем дело с излучением вещества, содержащего в себе огромное количество атомов, связанных общей структурой.

Все атомы состоят из ядер и электронов: ядро — центр атома, а вокруг него движутся электроны. От конфигурации электронного облака зависит энергия атома, которая принимает строго определённые значения — это так называемые энергетические уровни. Чтобы перейти с одного уровня на другой, электрону нужно поглотить или отдать соответствующую энергию. Уровни энергии можно сравнить с этажами небоскрёба, где само здание — это атом, а электроны — отважные бейсджамперы, которые взбираются по этажам, а потом прыгают с парашютом. Если нашему электрону-парашютисту сообщить некоторую энергию, то он сможет подняться по лестнице, но только до определённого этажа — выше у него уже просто не хватит сил или, что то же самое, энергии. Добравшись до нужного этажа, электрон может с него спрыгнуть, что соответствовало бы излучению света определённой длины волны. Однако с прыжками не всё так просто. Владелец небоскрёба установил жёсткие правила безопасности и запретил прыгать с большинства этажей, оставив только отдельные подготовленные для этого площадки. Например, в небоскрёбе «Натрий» для прыжков открыт этаж номер 589, и практически все парашютисты вынуждены прыгать именно с него. Как вы уже поняли, это



соответствует излучаемому жёлтому свету. В небоскрёбе «Медь» подготовлены несколько площадок в зелёно-голубой зоне. А в высотке с именем «Стронций» разрешены прыжки только из красной зоны. Кстати, владелец установил ещё одно жёсткое правило: этажи в зданиях считать не снизу, а сверху. Так что красный этаж под номером 650 находится ниже, чем зелёный под номером 520, а синие этажи располагаются выше всех остальных. Это связано с тем, что длина волны обратно пропорциональна энергии, которую несут фотоны. Поэтому, чем выше этаж, тем больше энергия излучения и тем меньше соответствующая ему длина волны.

Конечно, все эти небоскрёбы с этажами и правилами — тот ещё сферический конь в вакууме. В реальности же атомы металлов находятся в составе солей, и когда они попадают в пламя порохового заряда, то с ними могут происходить самые разные химические превращения. В результате мы будем видеть излучение как отдельных атомов, так и молекул или ионов, которые в нашей аналогии можно сравнить с целыми бизнес-центрами, застроенными высотками. Спектры таких частиц устроены сложнее, чем в случае отдельных атомов, но свой «цветной» почерк они, как правило, сохраняют.

Ну а теперь про железные опилки: почему они при нагревании светят во всём спектре, хотя вроде бы состоят из одних только атомов железа?

Для объяснения этого феномена в физике существует модель — «абсолютно чёрное тело». Так называют объект, который поглощает любой падающий на него свет, поэтому со стороны он должен казаться абсолютно чёрным. Думаете, что шанс найти в тёмной комнате абсолютно чёрное тело равен нулю? А вот и нет! Физики придумали другую модель, которую назвали «излучение абсолютно чёрного тела». То есть, с одной стороны, если на чёрное тело посветить фонариком, то мы не увидим ничего, кроме чёрной черноты, поскольку чёрное тело не отражает. Но, с другой стороны, чёрное

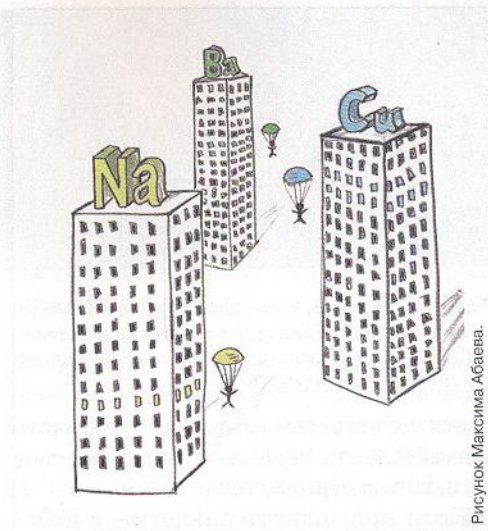


Рисунок Максима Абаева.

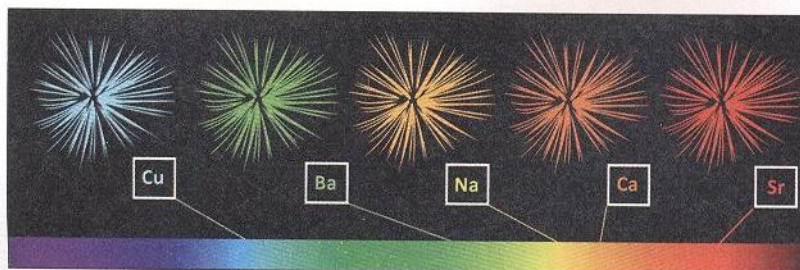
*Когда электрон в атоме переходит с высокого уровня энергии на низкий, он может излучить свет определённой длины волны. От энергии уровня зависит цвет видимого излучения.*

тело может само излучать свет, — и тогда мы будем видеть его «цвет». Чтобы заставить чёрное тело светиться, физики его нагревают, попутно измеряя излучаемый спектр.

Мы уже выяснили, что если атом сильно нагреть, то он начнёт излучать свет определённой длины волны. Но если этот атом входит в состав чёрного тела, то его излучение тут же поглощается им, потом снова излучается и снова поглощается, и так до бесконечности. Поскольку процессы поглощения-излучения протекают очень много раз, то первичное излучение в силу вероятностных причин постепенно меняется. В результате получается, что чёрное тело излучает и само поглощает свет с широким спектром длин волн.

Так почему же чёрное тело светится, если оно поглощает всё, что излучает? Тут надо вспомнить, что это всё-таки теоретическая модель, а не реальный физический объект. Абсолютно чёрных тел не бывает, и какую-то часть излучения чёрное тело всё равно отпустит наружу. Модель правильно описывает состав спектра и его зависимость от температуры, в то время как неидеальность реального мира позволяет нам видеть это излучение. Вот почему





*Разные химические элементы, попадая в пламя, окрашивают его в свой характерный цвет, по которому можно установить примерный химический состав фейерверка.*

светятся нагретые металлы, — они хоть и не абсолютно чёрные, но излучают свет по законам чёрного тела.

Если продолжить аналогию с небоскрёбами, то такая модель соответствовала бы множеству электронов-экстремалов, которые поднимаются и

спускаются по зданию, выпрыгивают из окон и запрыгивают обратно несколькими этажами ниже, испытывая самые невероятные пути. Глядя на это безумие со стороны, мы не смогли бы определить, кто с какого этажа и когда выпрыгнул. Но одно мы могли бы сказать точно — выше какого этажа прыжки не наблюдаются. Если энергии, то есть температуры, не хватает, чтобы подняться выше красного этажа, то прыжков с зелёных и голубых этажей мы наблюдать не будем, а увидим в результате красное свечение. Если же температуру поднять ещё, то

## ОТ ПОТЕШНОГО ОГНЯ ДО ФЕЙЕРВЕРКА

Алексей РЕНКЕЛЬ.

Чудо пиротехники — фейерверки изобрели в Древнем Китае задолго до того, как появился порох. Если верить легенде, их делали из побегов молодого бамбука, которые бросали в костёр. Нагреваясь на открытом огне, сок растения превращался в пар, который создавал давление в достаточно плотно закупоренных полостях стеблей, и те начинали взрываться. Несколько столетий китайцы использовали «взрывающийся бамбук» для увеселения во время праздников и религиозных ритуалов.

Есть и другая легенда, согласно которой изобретение фейерверков приписывают китайскому монаху по имени Ли Тянь. Случилось это 1000 лет назад, и с тех пор каждый год 18 апреля народ Китая воздаёт хвалу Ли Тяню и даже построил в его честь храм.

Из Китая фейерверки начали распространяться в другие азиатские страны и на Ближний Восток. Считается, что в Европу их привёз в конце XIII века венецианский купец и путешественник Марко Поло. В XIV—XVI веках на европейском континенте образовались две пиротехнические школы: одна — в Италии, другая — в Германии. Итальянцы делали акцент на создании сложных по конфигурации фейерверков, а немцы занимались усовершенствованием их свойств и химического состава. В XV веке фейерверки стали очень популярными и в Великобритании, особенно во время правления Елизаветы I, которая утвердила титул «Мастер фейерверков Англии».

На Руси мастера фейерверков, или, как тогда говорили, мастера художе-

ственного поджигания неба, появились в 1545 году. Тогда при Стрелецком полку была учреждена должность «порохового заведующего», который сам придумывал, изготовлял и запускал фейерверки.

Первые масштабные фейерверки были устроены в России в 1674 году в Устюге и в 1683 году в Москве на Воробьёвых горах. Особенно запомнился фейерверк 26 февраля 1690 года в честь восемнадцатилетия Петра I. Пушки трижды дали по 56 залпов. Фейерверки нарисовали в небе Геркулеса, раздирающего пасть льва (кстати, один залп фейерверков стоил тогда 10 тысяч рублей, а корова — всего 3 рубля).

Петра I вполне заслуженно именуют первым русским пиротехником. Он превратил потешные огни в непре-



«прыгунам» хватит сил забраться по лестнице выше, и тогда мы бы уже наблюдали, как к красному свечению добавляется жёлтое, потом зелёное, синее и фиолетовое, хотя для нашего глаза это выглядело бы как белый цвет — смесь всех цветов.

Так что же в итоге можно узнать о фейерверке, наблюдая его со стороны и не имея под рукой спектрометра? Основную информацию несёт конечно же цвет. Если искры ярко-белые или серебристые, то, скорее всего, это сгорающая стружка магния или алюминия; правда, такой же эффект даёт порошок титана. Золотые искры, особенно если они меняют цвет на более красный, говорят о вероятном присутствии железа или железной окалины; жёлтый цвет — о наличии солей натрия, притом его

цвет настолько сильный, что скрывает за собой другие; красный цвет связан с солями, содержащими стронций или литий, — в основном с карбонатами; оранжевый цвет придают соли кальция: хлориды и сульфаты; зелёный цвет — соли бария, а голубой — соединения одно- и двухвалентной меди. Фиолетовый цвет может давать смесь соединений стронция (красный) и меди (голубой). Только имейте в виду, что фиолетовый цвет фейерверка — «не настоящий», просто наш глаз так видит сочетание красного и голубого цветов, в то время как настоящий фиолетовый свет с длиной волны 400 нм из них никак не получится.

Теперь, вооружившись основами спектральных знаний, вы сможете смотреть на праздничные фейерверки с чуть-чуть другой, химической, точки зрения.

менный атрибут придворных торжеств, празднования Масленицы, Нового года и воинских побед.

1 января 1700 года (по старому стилю) самодержец решил устроить в Первопрестольной небывалое празднество. Накануне вечером во всех церквах прошло полночное бдение, а вслед за ним улицы Москвы и её крепостные стены озаарились невиданным прежде фейерверком.

Начинание императора прижилось. Фейерверки становятся частью больших торжеств в царствование Анны Иоанновны, Елизаветы Петровны, Петра III, Екатерины II. Одно из самых грандиозных «огненных игрищ» в честь первой годовщины восшествия Екатерины II на престол было устроено 28 июня 1763 года в Санкт-Петербурге. В небо были запущены тысячи фейерверков, создающих аллегорические композиции, а

#### ● ПОДРОБНОСТИ ДЛЯ ЛЮБОЗНАТЕЛЬНЫХ



«Палладин остров» — фейерверк в Санкт-Петербурге в честь первой годовщины восшествия на престол Екатерины II. 1763 год.

на Неве для императрицы была построена специально к празднику деревянная галерея. В 1892 году в честь 400-летия открытия Колумбом Америки в Нью-Йорке устроили мега-фейерверк, который осветил Бруклинский мост так, что ночь превратилась в день. А самым масштабным

признан фейерверк в честь встречи 2014 года в Дубае (Объединённые Арабские Эмираты). Тогда в небе зажгли 450 тысяч фейерверков, выпущенных из 400 точек, расположенных на протяжении 100 км вдоль береговой линии и очертаний искусственных островов.