

Почему небо голубое?

Как смотрел всегда человек в небо, так с самой глубокой древности перед ним вставал вопрос о его голубом цвете, равно как все сопутствующие проблемы анализа цветов и цветовых композиций.

В средние века считалось, что голубой цвет образуется от смешения чёрного и белого оттенков, но затем выяснилось, что таким путём можно получить только серый цвет.

После изобретения спектрального анализа и обнаружения явления интерференции света в тонких плёнках Исаак Ньютон высказал предположение, что голубой цвет неба образуется на поверхности капелек воды, летающих в воздухе.

В 18 веке, после открытия в химии многих отдельных газов, учёные полагали, что голубой цвет присущ самим составляющим атмосферного воздуха. Впоследствии даже оказалось, что жидкий кислород действительно имеет голубой оттенок, а жидкий озон – даже синий цвет, но это относится только к соответствующим жидкостям, а не газам. Сами же газы, входящие в состав воздуха, являются полностью бесцветными.

Первым Араго в 1809 г. открыл и исследовал такую важнейшую характеристику рассеянного света неба, как его поляризация.

В дальнейшем, на протяжении всего 19 века были проведены многочисленные опыты по рассеянию света в различных жидкостях, растворах и газах для того, чтобы в лаборатории смоделировать и воспроизвести голубой цвет неба. Как было установлено, голубой цвет образуется главным образом именно за счёт механизмов рассеяния света, но не на многочисленных примесях и аэрозолях, присутствующих в воздухе, а непосредственно на газовых молекулах.

После своей первой работы в 1871 г. лорд Рэлей почти 30 лет создавал строгую математическую теорию атмосферного рассеяния на основе электромагнитной природы света, и только в 1899 г. вышел его обобщающий труд «О свете от неба, его поляризации и цвете».

Правильное разрешение проблемы цвета неба состоит в том, что в случае рассеивающих частиц малого размера ($\lambda/10$) коэффициент рассеянного света σ обратно пропорционален 4 степени длины волны света: $\sigma = C \cdot F(N)/\lambda^4$, где $C = \text{const}$, $F(N)$ – определённая функция числа частиц N в единице объёма. Это означает, что один и тот же объём воздуха будет существенно сильнее рассеивать коротковолновую часть света, чем длинноволновую.

Свет	Длина волны λ , мкм	$1/\lambda^4$, мкм ⁻⁴	Коэффициент рассеянного света σ_n	Коэффициент проходящего света ($1 - \sigma_n$)
Красный	0,76-0,62	4,41	0,123	0,877
Оранжевый	0,62-0,585	7,59	0,213	0,787
Жёлтый	0,585-0,57	8,99	0,252	0,748
Зелёный	0,57-0,51	11,76	0,329	0,671
Голубой	0,51-0,48	16,66	0,466	0,534
Синий	0,48-0,45	21,39	0,599	0,401
Фиолетовый	0,45-0,39	32,14	0,900	0,100

Здесь σ_n — коэффициент рассеяния, условно нормированный для фиолетового света (90%).

Из данной таблицы ясно видно, что если падающий от Солнца свет первоначально имел одинаковые интенсивности всех цветов спектра (такой свет мы бы воспринимали как чисто белый), то после прохождения даже совершенно чистой атмосферы значительная часть голубых и синих лучей будет рассеяна и окрасит небосвод в соответствующий цвет, а само Солнце (в проходящем свете) станет при этом жёлтым.

Если мы в дневное время станем подниматься вверх и уменьшать тем самым толщину атмосферы над своей головой, то механизм рассеяния света будет слабеть, и Солнце будет восстанавливать свой первоначальный белый цвет и свою первоначальную яркость. Этот эффект «отбеливания» Солнца и Луны хорошо наблюдается при наборе высоты 7-10 км во время типичного полёта на самолёте. Небосвод при этом также заметно изменяет свой вид: вверху он потемнеет и станет гораздо более синим, а внизу, у земли, напротив, будет ярким и голубовато-белёсым. Вид синего неба типичен и высоко в горах. В свою очередь космонавты, летая полностью за пределами атмосферы, любят одновременно ярко-белым и жгучим (в присутствии ультрафиолета) Солнцем, звёздами на абсолютно чёрном небе, и ярко-голубой планетой Земля внизу.

Вечером, глядя с поверхности Земли, толщина атмосферного слоя, через который проходят лучи Солнца на его заходе, значительно увеличивается, и Солнце около горизонта из жёлтого становится сначала оранжевым, а затем и всё более и более красным. Толщина рассеивающего слоя у нас над головой при этом, естественно, не изменяется, но за счёт ослабления общего светового потока небосвод, также как при подъёме вверх, темнеет и становится синим, а затем на восточной, теневой стороне горизонта фиолетовым и чёрным.

Описанное рассеяние света для частиц, с размерами $< \lambda/10$, с тех пор называется рэлеевским или молекулярным.

В процессе дальнейших физических исследований уже в 20 веке оказалось, что действительными «рассеивателями» являются даже не сами молекулы газов, а их мелкие случайные сгущения (флуктуации) за счёт теплового (броуновского) и турбулентного движения воздуха.

Теория флуктуационного рассеяния света в атмосфере, которую создали М. Смолуховский и А. Эйнштейн, полностью соответствует и прежним выводам теории Рэля.

Существенные изменения, однако, начинаются в том случае, когда происходит поступление в атмосферу частиц с большими размерами. Это могут быть как твёрдые аэрозольные частицы (песчинки, пыль, дым, сажа, кристаллики льда), так и жидкие (капельки воды). При увеличении размера рассеивающих частиц больше, чем $\lambda/10$, рассеяние уже не может считаться чисто рэлеевским.

Обобщённую теорию аэрозольного рассеяния света для частиц произвольного размера создал Г. Ми в 1908 г. В зависимости от соотношения размера частицы α и длины волны падающего света λ , коэффициент рассеяния в теории Ми сначала повторяет закон Рэля, затем заметно замедляет свой рост, при $\lambda = \alpha$ начинает уменьшаться, и после некоторых вариаций выходит для больших α на некоторое постоянное значение. Соответственно, при наличии в воздухе частиц большого размера (относительно λ) рассеяние света уже не зависит от длины волны и называется, поэтому нейтральным.

Таковыми большими частицами являются чаще всего капельки воды, поэтому облака днём имеют нейтральный, т. е. белый цвет. Небо у горизонта по этой же причине выглядит более белёсым, чем в зените.

Аэрозольное рассеяние света ответственно за многие необычные цветовые эффекты в небе. Например, во время пыльных бурь в пустынях Солнце может приобретать ... зелёный оттенок. А иногда, после сильных вулканически извержений или лесных пожаров, на восходе наблюдается Солнце или Луна ... голубого цвета! Кстати, по фотографиям, переданным «Викингими», на Марсе цвет вечерней зари тоже зелёный.