

M i y a h a r a J u n j i

INWENCJA I INNOWACJA

Jak powstało białe oświetlenie?



universitas

INWENCJA I INNOWACJA

Jak powstało białe oświetlenie?

M i y a h a r a J u n j i

INWENCJA I INNOWACJA

Jak powstało białe oświetlenie?

przekład

Anna Zalewska

redakcja naukowa

Wiesław Strękowski

Kraków

Publikacja dofinansowana przez Fundację Japońską
This title has been published with the support of the Japan Foundation



Publikacja dofinansowana przez Tecra sp. z o.o.



© 2016 Miyahara Junji
Originally published in Japanese by University of Tokyo Press in 2016

© Copyright for the Polish translation by Anna Zalewska
and Towarzystwo Autorów i Wydawców Prac Naukowych
UNIVERSITAS, Kraków 2019

© Copyright for the Polish edition by Towarzystwo Autorów
i Wydawców Prac Naukowych UNIVERSITAS, Kraków 2019

ISBN 97883-242-3464-6
e-ISBN 97883-242-2946-8
TAiWPN UNIVERSITAS

Opracowanie redakcyjne
Barbara Cabała

Projekt okładki i stron tytułowych
Ewa Gray

www.universitas.com.pl

Imiona i nazwiska japońskie podane są w kolejności japońskiej, czyli nazwisko poprzedza imię. Imiona własne zakończone na -a, -i, -n oraz nazwy geograficzne zakończone na -a są odmieniane zgodnie z zasadami obowiązującymi w języku polskim.

Spis treści

Rozdział I

Białe światło słońca	9
1 Narodziny światła	
Początek kosmosu	10
Pierwsze światło	13
Światło sprzed 13 800 000 000 lat	17
2 Czym jest kolor?	
Odkrycie białego światła	21
Dlaczego widzimy kolory?	27
Teoria dwóch kolorów Landa – złudzenie optyczne	33
3 Stworzyć białe światło	
Białe światło Vermeera	35
Definicja białego światła	39
Stworzenie białego światła – iluminant standardowy	42
4 Wynalazek i innowacja	
Innowacje, które zmieniają społeczeństwo	45
Wynalazek nie zawsze jest innowacją	47
Droga do „innowacji białego światła”	49
Bibliografia	49

Rozdział II

Żółte światło płomienia

– lampy olejowe, świece, lampy gazowe	51
1 Kiedy narodziło się światło ognia?	
Kiedy ludzie wynaleźli ogień?	52

Pierwsze oświetlenie za pomocą ognia	54
Oświetlenie zmieniło społeczeństwo	57
2 Ewolucja oświetlenia za pomocą ognia	
Wynalezienie lamp olejowych i świec	64
Narodziny nowego przemysłu	70
Oświetlenie gazowe jako system	76
3 Blask płomienia nie zdołał przerodzić się w białe światło	
Co to jest palenie się?	83
Dlaczego płomień jest żółty?	85
Pułapka doskonałej techniki	88
Bibliografia	90

Rozdział III

Białe światło płomienia – lampa gazowa żarowa	93
1 Pierwsze białe światło	
Dwa „białe światła” Faradaya	95
Pierwszy wynalazek białego światła	101
Dlaczego światło staje się białe?	104
2 Historia Welsbacha	
Zapomniany wynalazca, Welsbach	108
Porażka pierwszego przedsięwzięcia	112
Lampy gazowe pokonują żarówki	115
3 Los przemysłu wydobywczego – „w jarzmie surowców”	
Stworzenie produktów z metali ziem rzadkich	118
Od zapalek do stopów piroforycznych	120
Problem radioaktywności koszulki Auera	122
Bibliografia	126

Rozdział IV

Białe, gorące światło elektryczne – żarówka	129
1 Powstaje żarówka Edisona	
Wyścig wynalazców	131
Edison, ostateczny zwycięzca	135
Sylwetka Edisona	144
2 Narodziny żarówki	
Od włókna węglowego do włókna metalowego	148

Dążenie do stworzenia żarówki	152
Różne ulepszenia żarówek	156
3 Blask schyłkowych dni przemysłu – „efekt żaglowca”	
Rewolucyjne techniki i ich efekty	160
Pojawiają się parowce	162
Sukcesy żaglowców	165
„Efekt żaglowca” obecnie	168
Bibliografia	170

Rozdział V

Białe światło luminescencji

– świetlówka o białym świetle	173
1 Materiały fluorescencyjne były znane od dawna	
Opowieść o farbach do obrazów, które świeciły w ciemności ...	174
Opowieść o kamieniu bolońskim	178
Doświadczenia Goethego	182
2 Narodziny białej świetlówki	
Wojna wokół wynalazku świetlówki	184
Ku urzeczywistnieniu białej świetlówki	190
Rozwój lampy wyładowczej	196
3 Podstawowa zasada w rozwoju badań – „model liniowy”	
Epoka centralnych laboratoriów badawczych	200
System, który utrzymywał masową produkcję	206
Czego ludzie pragną?	209
Bibliografia	213

Rozdział VI

Białe światło kwantowe – biała dioda	215
1 Światło, które Bóg zapomniał stworzyć – laser	
Co to jest laser?	216
Zapowiedź Einsteina	219
Kto wynalazł laser?	224
2 Powstaje dioda o białym świetle	
Historia diody świecącej	229
Pierwszy sukces – dioda niebieska	234
Klasyfikacja przykład fuzji technologicznej – dioda biała	241

3 Źródło wynalazków – „efekt pogranicza”	
Pogranicze i centrum	245
Przypadki i los – nieodzowne elementy wynalazczości	249
Dwie „przestrzenie” w procesie wynalazczym	253
Bibliografia	257
 Rozdział VII	
Białe światło teraz	259
1 To wydarzyło się w Japonii	
Wyzwanie znad granicy	260
Żarówka a problem globalnego ocieplenia	269
Świetlówka i problemy ochrony środowiska	272
2 Dlaczego przetrwały białe diody LED	
Wysoka energooszczędność	274
Duża swoboda w projektowaniu	276
Duża swoboda w doborze odcieni	278
3 Następną „innowacją białego światła”?	
Innowacje też mają ograniczoną żywotność	284
Wzrost i upadek to stałe cechy tego świata	287
Następny krok w ewolucji oświetlenia?	289
Bibliografia	293
 Zakończenie – ewolucja technologii światła	295
Bibliografia	299
 Posłowie do wydania poprawionego i rozszerzonego	301
Bibliografia	305
 Układ okresowy pierwiastków	309
Spis rycin i tabel	310
Indeks nazwisk	313

Białe światło słońca

Światło wypełnia nasze otoczenie. Podobnie jak powietrze, światło jest dla nas czymś oczywistym. A kiedy ono się narodziło? Skąd przybywa? Być może takie wątpliwości nie mają sensu, gdyż światło od pradawnych czasów było wszędzie. Gdy człowiek zaczyna zwracać uwagę na coś, co istnieje od zawsze, staje się filozofem, badaczem, wyznawcą religii, ale też i dzieckiem.

W świecie nauk przyrodniczych przyjmuje się, że światło zrodziło się wraz z narodzinami wszechświata. Wydarzyło się to 13 800 000 000 lat temu. Około 5 000 000 000 lat temu narodziło się Słońce, a 400 000 000 lat później, czyli jakieś 4 600 000 000 lat temu – Ziemia. W miarę jak uspokajał się chaos związany z narodzinami, wytwarzały się morza, stopniowo zmieniała się atmosfera i około 4 000 000 000 lat temu w świetle Słońca narodziło się życie.

Następnie musiał minąć naprawdę długi czas, by wreszcie około 7 000 000 lat temu nasz odległy przodek odłączył się od małpy i zaczął chodzić po ziemi na dwóch nogach. Później, 2 000 000 lat temu pojawił się *Homo erectus*. Gdy powracał wieczorem do ciemnej jaskini, która zapewniała mu schronienie, z pewnością pragnął mieć coś, co służyłoby jako oświetlenie, zdołał je jednak zdobyć dopiero około miliona lat później, czyli 1 000 000 lat temu. Było to żółte światło płonącego ognia.

Już Arystoteles w starożytnej Grecji postrzegał blask słońca jako „białe światło”, odmienne od płomienia ognia, nie wiadano wtedy jednak, że w rzeczywistości składa się ono ze światła o różnych kolorach. Odkrył to dopiero Izaak Newton w Anglii, w XVII wieku.

Nie ma bezwarunkowych podstaw do opisu charakteru barw, w szczególności tych postrzeganych ludzkim okiem. Ich postrzeganie jest zależne od wrażliwości i pamięci, a rodzące się dopiero nauki przyrodnicze nie potrafiły tego zaakceptować. Jednakże pragnienia wielu ludzi, którzy poszukiwali źródła jaśniejszego, białego światła, w połączeniu z pomysłowością tych, którzy starali się urzeczywistnić to dążenie, doprowadziły do stworzenia różnych rodzajów oświetlenia.

Jak wyjaśnię później dokładniej, słowo „innovacja” odnosi się do rewolucji, które wywierają wpływ na ludzi i są siłą napędową zmieniającą społeczeństwa. Czasy żółtego światła świec bądź lamp naftowych trwały całkiem długo, a tymczasem pierwsza „innovacja białego światła” powstała dzięki postępowi nauki i techniki raptem około 150 lat temu. Mamy za sobą trzy innowacje: lampy gazowe, żarówki i białe świetlówki, a ostatnio powstała czwarta innowacja: białe diody LED (dioda świecąca).

1. Narodziny światła

Początek kosmosu

Opowieści o tym, jak narodziło się światło, zostały zachowane jako osobne mity przez różne narody i religie. Pojawiają się w szczególności na początku opisów stworzenia naszego świata.

Opis stworzenia w chrześcijańskim *Starym Testamencie* brzmi tak:

Na początku Bóg stworzył niebo i ziemię. Ziemia zaś była bezładem i pustkowiem; ciemność była nad powierzchnią bezmiaru wód, a Duch Boży unosił się nad wodami.

Wtedy Bóg rzekł: „Niechaj stanie się światłość!”. I stała się światłość [Rdz 1, 1–3].

W tekście wyraźnie jest napisane, że to Bóg stworzył światło.

Z kolei w braminizmie, w *Rygwedzie*, jednym ze świętych tekstów hinduizmu, znajdziemy wprawdzie szczegółowe opisy tego, co nastąpiło po stworzeniu wszechświata, ale nie jest określone, przez kogo i w jaki sposób wszechświat został stworzony. Bogowie pojawiają się już po powstaniu świata, a o samym stworzeniu nic nie wiadomo. Światło było od początku.

W japońskim *Kojiki*, czyli *Księdze dawnych wydarzeń*, od samego początku stworzenia nieba i ziemi istniały trzy światy: kraina bogów – Wysoka Równina Niebios, kraina ludzi – Kraj Pośród Uprawnych Pól, oraz kraina ciemności – Kraj Żółtych Źródeł. Bogini Słońca, Amaterasu (Wielkie Bóstwo Świejące Na Niebie), rodzi się dopiero w wyniku oczyszczenia, którego dokonuje bóg Izanagi. Udał się on do Kraju Żółtych Źródeł, próbując odzyskać swą zmarłą małżonkę, Izanami, potem zaś uciekał stamtąd, ścigany przez nią, i w drodze powrotnej poddał się oczyszczeniu. Później, gdy młodszy brat Amaterasu, Susano (Niebiański Niepohamowany Mąż), swoim gwałtownym zachowaniem wy-czerpał jej miłość i cierpliwość, bogini skryła się w Niebiańskiej Jaskini i podobno świat, który do tej chwili wypełniony był światłem, natychmiast pogrzyżył się w ciemności. Z *Kojiki* zatem nie dowiemy się, kiedy i w jaki sposób zostało stworzone światło. Ono istniało od początku.

Mitów na temat początków światła jest na świecie pewno tyle, ile narodów. Mieszczą się one wszystkie chyba w zakresie, jaki widzieliśmy w *Starym Testamencie*, *Rygwedzie* i *Kojiki*, to znaczy że światło albo zostało stworzone, albo istniało od początku. Będą to opowieści o tym, że bóstwo z własnej woli stworzyło światło, albo że światło powstało nie wiadomo kiedy. W opowieściach tych są widoczne różnice co do poglądów na stworzenie pomiędzy społecznościami wyznającymi monoteizm, czyli religię, w której jest jeden bóg, władca absolutny, i spo-

łecznościami wyznającymi politeizm, w którym wiele bóstw mieszka w pobliżu człowieka.

Nauki przyrodnicze głosiły różne teorie na temat stworzenia wszechświata. Obecnie za najbardziej prawdopodobną z nich uważana jest teoria tak zwanego Big Bangu. Jest to model rozwinięty w latach 40. XX wieku przez wszechstronnie utalentowanego fizyka, George'a Gamow; model ten zbierał w jedną całość wcześniejsze teorie głoszone przez wielu naukowców z Albertem Einsteinem na czele. Słowa „Big Bang” oznaczają „Wielki Wybuch”. Według tej teorii przed owym wybuchem wszechświat nie istniał, zaczął istnieć dopiero od wybuchu i również teraz się rozszerza. Uważa się, że światło też narodziło się wraz z początkiem wszechświata. W modelu tym pytanie, jak wyglądał wszechświat przed Wielkim Wybuchem, nie ma odpowiedzi.

W przeciwieństwie do tego, według tak zwanej teorii stanu stacjonarnego, wszechświat nie ma początku i nawet jeśli przyjąć, że zdarzały się w nim okresy rozkwitu i zniszczenia, postępu i degeneracji, zasadniczo pozostaje niezmienny w czasie. W modelu tym pytanie o to, kiedy narodziło się światło, nie ma odpowiedzi. Wyjaśnia się, że we wszechświecie, który trwa niezmiennie, światło istniało od początku. Tak dwa wielkie modele wszechświata w naukach przyrodniczych odpowiadają dwóm wersjom opowieści o stworzeniu świata w mitach.

W naukach przyrodniczych, dopóki nie pojawi się nowsza teoria, która byłaby w stanie wyjaśnić liczne zjawiska z otaczającej nas natury w sposób jednolity, aktualna teoria istnieje na bazie przyjętych ustaleń, które sprawiają, że jest uznawana za poprawną. Z kolei nowsza teoria jest najpierw hipotezą. Model Wielkiego Wybuchu nie jest wyjątkiem. Podobnie jak istnieją ludzie, którzy, choć minęło 150 lat, nadal nie akceptują teorii ewolucji organizmów Darwina, tak też są specjaliści w tej dziedzinie, którzy nie akceptują Wielkiego Wybuchu jako modelu ewolucji wszechświata. Niezliczone są teorie naukowe, które choć najpierw zostały zaakceptowane, następnie ulegały zapomnieniu i w końcu były porzucane. A z drugiej strony, często zdarzają się też teorie, które wy-

Hipoteza, która pojawiła się zbyt wcześnie – teoria dryfu kontynentów

Tak właśnie było z ogłoszoną przez Alfreda Wegenera w 1912 r. teorią dryfu kontynentów. Wegener przyjął istnienie pradawnego kontynentu, Pangei, który wedle jego teorii rozpadł się na części przesuujące się po powierzchni Ziemi. W ten sposób powstały obecne granice kontynentów i oceanów. Rzeczywiście, rozdzielone Oceanem Atlantyckim wschodnia linia brzegowa Ameryki Północnej i Południowej oraz zachodnia linia brzegowa Afryki i Eurazji doskonale pasują do siebie. Czyż nie składają się one w obrazek z układanki? Ponieważ jednak teoria ta nie była w stanie wystarczająco dobrze wyjaśnić mechanizmu dryfu czy też źródła energii koniecznej do tego, nie została w swoim czasie zaakceptowana. A nawet należałoby powiedzieć, że spotkała się z niedowierzaniem i lekceważeniem. Jej słuszność rozpoznano dopiero w latach 60. XX wieku, gdy zbadany został płaszcz ziemski, powstała teoria wędrówki płyt tektonicznych i stało się możliwe wyjaśnienie rozmaitych zjawisk na powierzchni Ziemi.

przedzały swoje czasy i przez to nie zostały zaakceptowane, jednak te z nich, które docierały do istoty zagadnienia, w odpowiednim czasie odżywały.

Hipotezy na temat stworzenia wszechświata na razie są w trakcie ewolucji. Istnieje silnie zakorzeniona krytyka modelu Wielkiego Wybuchu mówiąca, że coś nie może powstać z niczego, niemniej jednak model ten, zbudowany na podstawie teorii względności i teorii kwantowych, jest obecnie uznawany za najbardziej prawdopodobny, jeśli chodzi o wyjaśnienie narodzin wszechświata i materii, a także różnych innych zjawisk.

Pierwsze światło

Według modelu Wielkiego Wybuchu w pewnej chwili wszechświat zaczął istnieć od jednego punktu, w którym do tego momentu nic wcześniej nie istniało. Był to punkt o tak niezwykle wysokiej temperaturze i gęstości, i tak niezmiernie mały, że nie jesteśmy w stanie sobie tego nawet wyobrazić. I przestrzeń, i czas, i materia – wszystko miało się zacząć w momencie Big Bangu, czyli Wielkiego Wybuchu. Obecnie, na podstawie różnych danych pomiarowych, uznaje się, że narodziny wszechświata nastąpiły prawdopodobnie około 13 800 000 000 lat temu. Przyjmuje się, że światło powstało wraz z elektronami i innymi

cząstkami elementarnymi bezpośrednio po momencie Wielkiego Wybuchu, na etapie plazmy o niezwykle wysokiej temperaturze. Od czasu wybuchu, również dziś, przestrzeń rozszerza się i w tym procesie powstał cały wszechświat, obejmujący kulę ziemską, Układ Słoneczny, Drogę Mleczną, ludzkość, galaktyki...

Gdy wydarzył się Wielki Wybuch i wszechświat zaczął się gwałtownie rozszerzać, jednocześnie jego temperatura zaczęła się też obniżać. Prościej to ujmując, było to tak, jakby z butli gazowej wypuścić do powietrza sprężony dwutlenek węgla; wskutek przemiany adiabatycznej schładza się on gwałtownie i przyjmuje postać stałą suchego lodu. Albo też było to takie działanie, jak klimatyzacji w mieszkaniu, która najpierw spręża parę czynnika chłodzącego, a następnie schładza powietrze przez gwałtowne rozprężenie. I tak też wszechświat, od początku do obecnych czasów, cały czas się schładza.

W tym przypadku światło, które powstało wraz z elektronami i innymi cząstkami elementarnymi, być może lepiej byłoby nazwać fotonami. Czy światło i foton są tym samym, czy się różnią? Kiedy słyszymy słowo „światło” i rozmawiamy o nim, zapewne mamy przed oczami światło w jakimś kolorze. Są to te kolory, które pojawiają się, gdy białe światło słońca przepuści się przez pryzmat. Wiemy o tym, że kolory różnią się w zależności od długości fali światła. Jeśliby posłużyć się słowami zaczerpniętymi z nauk przyrodniczych, nieświadomie zakładamy, że „światło” jest falą, która w postaci drgań podróżuje poprzez przestrzeń. Z drugiej strony, fotony uważa się za pojedyncze cząsteczki, mające pewną energię. Spór o to, czy światło jest falą, czy cząsteczką, był prowadzony od XVII wieku, czyli od czasu sporu między Izaakiem Newtonem, który głosił teorię światła jako cząsteczki, a Christianem Huygensem, zwolennikiem teorii światła jako fali. W XX wieku za pośrednictwem teorii względności Einsteina zostało udowodnione, że spór ten nie ma sensu, gdyż „cząsteczki” i „fale” to różne słowa opisujące te same zjawiska. Można powiedzieć, że używa się ich obu w zależności od tego, które z nich jest bardziej stosowne do prowadzonego dyskursu.

Jeżeli rozważać światło jako falę, jest ono falą elektromagnetyczną, która porusza się jako drgania pola elektrycznego i pola magnetycznego w próżni lub innym środowisku. Podobnie falą czy też promieniowaniem elektromagnetycznym są fale radiowe stosowane do przekazu radiowego i telewizyjnego, promieniowanie gamma lub promieniowanie rentgenowskie. Różnica jest tylko taka, że fale radiowe są dłuższe od „światła”, a promieniowanie gamma to fale krótsze. Światło widoczne dla naszych oczu to tylko mała część promieniowania elektromagnetycznego. W odniesieniu do mechanizmu powstawania fal elektromagnetycznych można powiedzieć, że w pewnych warunkach temperaturowych, pewne formy materii wytwarzają fale elektromagnetyczne o pewnej długości (co oznacza liczbę drgań; można też użyć słowa „energia”). Im wyższa temperatura, tym fala jest krótsza i staje się promieniowaniem gamma, a jeśli temperatura będzie niższa, powstają fale radiowe długie. Jeśli długość fali elektromagnetycznej jest w takim zakresie, że może być postrzegana ludzkim wzrokiem, odbieramy to jako „światło”. Na przykład węgiel drzewny rozgrzewany w grillu stopniowo przybiera kolor czerwony, co oznacza, że powstają fale o długości 700 nanometrów, widoczne dla oka ludzkiego jako czerwone światło. Węgiel drzewny, który rozgrzał się do czerwoności, ma temperaturę około 600–700°C. Wcześniej zaczyna być wydzielane promieniowanie podczerwone, ale chociaż nasza skóra odbiera je jako ciepło, nie jest ono widoczne.

Może nam się to wydawać dziwne, ale i fale radiowe, i promieniowanie gamma czy rentgenowskie, zdarza się nazywać i „światłem”, i „fotonami”, ponieważ są to wszystko fale elektromagnetyczne. Zdarza się też, że opisujemy je nie tylko poprzez długość fali, ale też temperaturę. Można na przykład powiedzieć, że przestrzeń kosmiczna wypełniona jest światłem o wyrażanej w stopniach Kelvina (K = kelwin) temperaturze 2,7.

Fotony powstały wraz z elektronami i innymi cząsteczkami bezpośrednio po Wielkim Wybuchu (10^{-11} sekundy później), na etapie

plazmy o niewyobrażalnie wprost wysokiej temperaturze i równie niewyobrażalnie wysokiej gęstości. Co więcej, zaraz potem (1/10 000 sekundy później) temperatura się znacznie obniżyła i powstały protony oraz neutrony. Protony tworzą jądro atomowe wodoru, dlatego można powiedzieć, że skoro powstały protony, to powstało także jądro atomowe wodoru. Następnie, minutę później, temperatura wszechświata obniżyła się do 1 000 000 000 K i powstały jądra atomowe helu (He), litu (Li) oraz innych pierwiastków lekkich. Tymczasem temperatura 1 000 000 000 K, choć niższa niż początkowa, jest ogromnie wysoka, tak wysoka, że nie mogłaby zaistnieć na powierzchni obecnej Ziemi, dlatego elektrony i jądra atomowe tworzyły swobodnie poruszającą się plazmę. Chciałbym zwrócić uwagę na to, że powstawały jądra atomowe, nie atomy. Atom ma wokół jądra chmurę elektronową i jest elektrycznie obojętny. Aby jądra mogły stać się atomami, konieczne było dalsze rozszerzanie się, a temperatura musiała spaść do 4000 kelwinów.

Kiedy od Wielkiego Wybuchu minęło kilkaset tysięcy lat i temperatura osiągnęła poziom około 4000 K, elektrony zostały pochwycone przez jądra komórkowe wodoru, helu itp., i tak powstały elektrycznie obojętne atomy wodoru, helu itd. Ponieważ do tego czasu wzajemne oddziaływanie pomiędzy cząsteczkami mającymi ładunek elektryczny, takimi jak protony czy elektrony (cząsteczki naładowane), było bardzo silne, nie mogły się one poruszać prosto przez przestrzeń. Tymczasem elektrony swobodne i protony, które im w tym przeszkadzały, zniknęły. Wskutek tego mgły okrywające wszechświat uniosły się i zapanowała przejrzystość umożliwiająca widzenie. Wkrótce potem światło zaczęło swą wędrówkę w stronę Ziemi, która jeszcze wtedy się nie narodziła. Wprawdzie fotony powstały bezpośrednio po narodzinach wszechświata, ale przez kilkaset tysięcy lat były zamknięte w pierwotnej przestrzeni. Można powiedzieć, że ta pierwotna przestrzeń była okryta skorupą w kształcie kuli, której nie można było zobaczyć w świetle. Przenikały ją neutrino, cząstki elementarne, które powstały jednocześnie ze światłem. Mówimy tu o neutrinach, gdyż można się spodziewać,

że mogą one być dobrym źródłem wiadomości o niepoznanym jeszcze przez nas jądrze wszechświata.

Tak oto światło zaczęło swą podróż z prędkością nazywaną prędkością światła. Czas, który rozpoczął się wraz z narodzinami wszechświata, również zaczął płynąć na swój sposób. Wraz z upływem czasu przestrzeń rozszerzała się i światło podróżowało przez wszechświat, w którym obniżała się temperatura. Ogromne promieniowanie gamma, które powstało bezpośrednio po narodzinach wszechświata w niewyobrażalnie wysokich temperaturach i niewyobrażalnie wysokiej gęstości, w miarę schładzania się wszechświata stawało się światłem, a gdy ciepłota obniżyła się jeszcze bardziej, stało się falami radiowymi. Fale radiowe to ochłodzone światło.

Światło sprzed 13 800 000 000 lat

W roku 1964 Arno Penzias i Robert Wilson w Bell Laboratories w ramach badań radioastronomicznych starali się dokonać pomiarów odbieranych z kosmosu fal radiowych z jak największą dokładnością. W tym celu konieczne było dokładne odróżnienie szumu tła dobiegającego z przestrzeni kosmicznej. Chociaż wielokrotnie dokonywali pomiarów, niezależnie od ukierunkowania anten zawsze pozostawał szum mikrofalowy. Badacze nie potrafili zrozumieć, jaka jest tego przyczyna. Nie byli specjalistami w dziedzinie kosmologii i nawet nie znali wtedy prac Gamowa, przedstawiających model Wielkiego Wybuchu. Jednakże zgodnie z tym modelem wyniki ich pomiarów pokazały, że światło, które ruszyło w podróż, gdy wszechświat się rozpoczął, na przestrzeni 13 800 000 000 lat stało się promieniowaniem mikrofalowym i dotarło do Ziemi. Odkrycie mikrofalowego promieniowania tła stało się dowodem, że Wielki Wybuch rzeczywiście zaistniał. Za to odkrycie Penzias i Wilson otrzymali Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w roku 1978.

Odkrycie mikrofalowego promieniowania tła było też typowym przykładem *serendipity*, czyli szczęśliwego trafu. Angielskie słowo *serendipity* zostało utworzone od dawnej nazwy Cejlonu – Serendip.

Według opowieści, gdy trzej książęta cejlońscy wyruszyli w podróż, w drodze co rusz spotykały ich nieprzewidziane pomyslnie wydarzenia. Angielski pisarz i polityk, Horace Walpole, w roku 1754 stworzył to słowo na podstawie owej baśni, nadając mu znaczenie przypadkowej możliwości odkrycia czegoś wartościowego w sytuacji, gdy poszukujemy czegoś zupełnie innego – ma więc ono całkiem dawny rodowód. I rzeczywiście, nie tylko wiele wynalazków i odkryć, z odkryciami dokonanymi przez laureatów Nagrody Nobla na czele, ale też i najróżniejsze sytuacje z naszego życia codziennego miały swoje początki właśnie w *serendipity*, czyli szczęśliwym trafie.

Dlaczego światło z czasów powstania wszechświata zostało zaobserwowane i zmierzone jako fale długie po upływie 13 800 000 000 lat? Można to wytłumaczyć tak: ze względu na to, że Ziemia i centrum Wielkiego Wybuchu oddalają się od siebie z prędkością zbliżoną do prędkości światła, fale światła, które powstało na początku wszechświata, wskutek efektu Dopplera wydłużyły się i zostały zaobserwowane jako fale radiowe. Efekt Dopplera polega na tym, że w zależności od relatywnej prędkości ruchu źródła dźwięku lub źródła światła oraz ich obserwatora, pomiar wykazuje zmianę w długości fal. Gdy źródło fal oraz obserwator oddalają się, fale stają się dłuższe, to znaczy częstotliwość staje się niższa, a gdy się zbliżają – fale się skracają, czyli częstotliwość wzrasta. Efekt Dopplera można zaobserwować na przykładzie zmian dźwięku, który słyszymy, gdy mija nas karetka pogotowia. Edwin Hubble potwierdził fakt rozszerzania się wszechświata właśnie dzięki pomiarom efektu Dopplera dla światła gwiazd. Pierwsze światło stało się niewidocznymi dla gołego oka mikrofalamami radiowymi.

Obecnie oświetla nas nie to światło z początków wszechświata, lecz to emitowane przez Słońce, które powstało o wiele później. Kiedy narodziło się światło naszego Słońca? Żeby odpowiedzieć na to pytanie, znów trzeba się cofnąć do Wielkiego Wybuchu.

Materia, która powstała wskutek Wielkiego Wybuchu, to znaczy cząstki elementarne, jądra atomów wodoru, helu i innych oraz elek-

trony, została rozrzucona w przestrzeni kosmicznej, jednak nie w sposób jednolity, gdyż powstały także miejsca większego nagromadzenia. W takich miejscach gęstość była większa niż w ich otoczeniu, a działanie grawitacji powodowało gromadzenie się wokół nich nowej materii. Tak zaczęły powstawać pierwotne gwiazdy. Grawitacja sprawiała, że gwiazdy nabierały gęstości, a z powodu panującego wewnątrz ciśnienia wzrastała temperatura, do tego stopnia, że zachodziła reakcja termojądrowa z udziałem cząsteczek helu i wodoru. W tej niezwykle wysokiej temperaturze powstawały różne jądra atomowe, od jąder pierwiastków lekkich do ciężkich. Gwiazdy ewoluują, utrzymując delikatną równowagę pomiędzy rozszerzaniem wynikającym z niezwykle wysokiej temperatury a kurczeniem się spowodowanym działaniem sił grawitacyjnych związanych z ogromnymi masami materii. Jednakże gdy równowaga ta zostanie naruszona, gwiazda kurczy się czy też zapada się i w wyniku powstaje nowa gwiazda. Wskutek tego wybuchu wodór, hel czy inne, jeszcze cięższe pierwiastki, ponownie zostają rozrzucone, tak jak poprzednio, w przestrzeni kosmicznej. I tak samo jak wcześniej materia ta nie jest rozłożona równomiernie, lecz obszary o wysokiej gęstości stają się jądrem, wokół którego narodzi się gwiazda. Dochodzi do wybuchu supernowej. Supernowa jest niczym silnik, który wytwarza materię. Po Wielkim Wybuchu takich wybuchów supernowych było bez liku. Ludzkość trzy razy odnotowała w historii wybuch supernowej. Były to: Mgławica Kraba w roku 1054, Supernowa Tychona w 1572 i Nowa Keplera w 1604. Trzy razy to zadziwiająco duża częstotliwość jak na tak krótki, w porównaniu z wiekiem kosmosu, wycinek historii. Może i za naszego życia dojdzie kiedyś do takiego wydarzenia w pobliżu Ziemi.

Nasze Słońce narodziło się około 5 000 000 000 lat temu na krańcu galaktyki nazywanej Drogą Mleczną, gdy wskutek wybuchu supernowej materia rozrzucona w przestrzeni kosmicznej zgromadziła się w jednym miejscu. Centrum Słońca stanowią wodór i hel. Jest ono gwiazdą, która płonie w wyniku reakcji termojądrowej. Ponieważ

w jego centrum panują niezwykle wysokie temperatury, wydziela duże ilości promieniowania gamma. Gdy dociera ono do powierzchni Słońca, która oddziela je od przestrzeni kosmicznej, charakteryzującej się skrajnie niską temperaturą, staje się światłem o wartości około 6000 K. Znajdujące się w kosmosie gwiazdy są klasyfikowane w zależności od temperatury powierzchni jako typy widmowe wyrażane literami: O, B, A, F, G, K, M, a Słońce jest zupełnie zwykłą gwiazdą, zaliczaną do gwiazd o nie najwyższych temperaturach¹.

Ziemia narodziła się jakieś 4 000 000 000 lat po powstaniu Słońca, 4 600 000 000 lat temu. Rozrzucona w przestrzeni materia dostawała się w sferę oddziaływania grawitacyjnego Słońca i stopniowo skupiała się, tworząc układ planetarny nazywany Układem Słonecznym. Ziemia powstała jako jedna z planet w tym układzie. Na początku swojego istnienia Ziemia była światem, który trudno byłoby nam sobie teraz wyobrazić: uderzały w nią meteoryty i asteroidy, a magma gwałtownie wrzała. Wraz z upływem czasu ciężkie żelazo obsuwało się ku jądru Ziemi i w miarę jak planeta stygła, na powierzchni stopniowo skały tworzyły jej skorupę. Z pary wodnej, która była głównym składnikiem pierwotnej atmosfery, powstały morza, a w nich rozpuszczał się dwutlenek węgla, który utrzymywał wysoką temperaturę. Czy pierwsze życie na Ziemi przybyło spoza niej, czy też nie – nie wiadomo, tak czy inaczej życie wykształciło się w tym pierwotnym morzu. Doznało niezliczonych przemian i wreszcie 7 000 000 lat temu narodzili się odlegli przodkowie ludzkości, którzy oddzielili się do małp. Zaczęli wędrować po Ziemi w białym świetle Słońca.

¹ Klasyfikację gwiazd opartą na widmie światła wyraża się literami alfabetu w kolejności od najwyższych temperatur na powierzchni gwiazd. Typ O ma ponad kilkadziesiąt tysięcy kelwinów, nasze Słońce jest typu G (5300–6000 K), a typ M ma najniższą temperaturę – 3000 K. Zapamiętanie tej klasyfikacji według typów widmowych często się przydaje. Można to zrobić na różne sposoby, jest chociażby takie zręczne wymyślone zdanie: **Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me**.

2. Czym jest kolor?

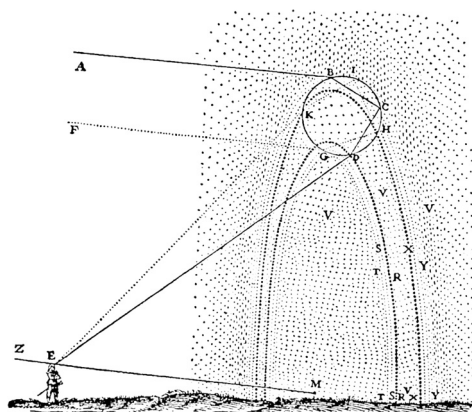
Odkrycie białego światła

Pierwszym oświeceniem, jakim posługiwali się nasi przodkowie, było żółte światło płomienia z palącego się właśnie drewna. Nie było to „białe światło”. Nawet jeżeli dostrzegali różnicę pomiędzy światłem Słońca a światłem płomienia, z pewnością nie myśleli, że chcieliby uzyskać białe światło. Dopiero kiedy ludzie zauważyli, że oprócz „białego światła” istnieje też „światło, które nie jest białe”, czyli światło o różnych barwach, zaczęli je postrzegać w sposób świadomy. Zapewne nasi przodkowie widzieli piękne tęczę zawieszoną na niebie, lecz jeśli nawet zrozumieli, że istnieją różne kolory światła, mogli nie zwrócić uwagi na „białe światło”.

Kiedy w takim razie dostrzegliśmy „białe światło”? Johann Wolfgang Goethe w swojej *Teorii kolorów* pisze, że jako pierwsi mówili o nim pitagorejczycy, około VI wieku p.n.e. Arystoteles, który żył w Grecji w IV wieku p.n.e., uznawał biel i czerni za kolory podstawowe. Rozumiał to w ten sposób, że różne kolory istnieją pomiędzy „białym światłem” a czarną „ciemnością”, i gdy „białe światło” przechodzi przez tę strefę pośrednią, stopniowo ciemnieje i powstają barwy. W konsekwencji, układ kolorów według Arystotelesa nie był zgodny z tym, jak my opisujemy kolory tęczy, to znaczy: fioletowy, niebieski, zielony, żółty, czerwony, tylko przechodził od najjaśniejszego do najciemniejszego: biały, żółty, czerwony, fioletowy, zielony, niebieski, czarny. Nie ma wątpliwości, że zgodnie z jego interpretacją, ówczesni Grecy uznawali blask Słońca za „białe światło”.

Kartezjusz, który był filozofem i matematykiem oraz prekursorem badań w zakresie optyki, w roku 1637 opublikował swoje pierwsze dzieło, *Rozprawę o metodzie*. *Rozprawa o metodzie* została napisana jako wstęp do trzech esejów: *Dioptryka*, *Meteory* i *Geometria*, i w pierwszym z nich poruszany jest temat tęczy. Kartezjusz w doskonały sposób objaśnia tam zagadnienie, dlaczego dwie tęczę o odwróconych kolorach

są zawsze widoczne na takiej samej wysokości, przez wskazanie różnicy między sposobami (kątami) odbicia i załamania światła, w sytuacji gdy promień słońca zderza się z kroplą wody zawieszoną w powietrzu (ryc. 1.1.). Oczywiście, to nie jest tak, że wykonał eksperyment z kroplą wody rzeczywiście unoszącą się w powietrzu. Kartezjusz napełnił wodą okrągłe akwarium i przeprowadził eksperyment i rozumowanie, uznając to akwarium za model kropli wody.



Ryc. 1.1.
Dlaczego widać dwie tęcze?

Tęcza występuje na określonej wysokości i widoczne są dwie: tęcza główna jest od wewnątrz jasna i wyraźna, a tęcza wtórna ma zewnętrzną część nieostrą. Ponadto kolory w tęczy głównej i w pobocznej pojawiają się w odwrotnej kolejności. Aby wyjaśnić przyczynę tego zjawiska, Kartezjusz wykonał doświadczenie z użyciem szklanego, okrągłego naczynia wypełnionego wodą. Gdy promień słońca przechodzi przez zawieszoną w powietrzu okrągłą kroplę wody i tylko raz dochodzi do odbicia, z punktu widzenia obserwatora, który ma słońce za plecami, na wysokości około 42 stopni od linii horyzontu widoczna jest główna tęcza, a gdy dochodzi do odbicia dwa razy, na wysokości około 52 stopni powinna być widoczna wtórna tęcza, z odwrotnym układem kolorów — tak to interpretował z punktu widzenia dioptryki. Okazało się to zgodne z rzeczywistymi pomiarami.

Kartezjusz uważał, że różne kolory światła powstają w związku z przemianami w białym świetle. Dlatego też można przyjąć, że uznawał światło słoneczne, które wywołuje zjawisko tęczy, właśnie za białe światło. Z drugiej strony, nie przeprowadził dowodu na podstawie doświadczenia, że połączone ze sobą kolory tęczy dają w sumie białe

światło. Autorem decydującego eksperymentu stał się dopiero Izaak Newton.

Już w tamtych czasach powszechnie było wiadome, że jeśli promienie słoneczne przechodzą przez szklany pryzmat, ulegają rozszczepieniu na różne kolory. W roku 1666 Newton postanowił osobiście przeprowadzić jeszcze raz eksperyment z pryzmatem. W zaciemnionym laboratorium na uniwersytecie Cambridge nakierował promienie słoneczne na pryzmat, a wtedy „białe światło” słońca rozszczepiło się na różne barwy, od czerwonej do fioletowej. Było ich siedem: czerwona, pomarańczowa, żółta, zielona, niebieska, indygo i fioletowa. Newton stwierdził też, że pomiędzy nimi znajdują się niezliczone wariacje kolorów. Ale skoro rozumiał, że kolory płynnie przechodzą jeden w drugi, dlaczego wyodrębnił tylko siedem konkretnych?

Z pomocą asystenta obdarzonego bardzo dobrym wzrokiem Newton uważnie przyjrzał się krawędziom barw, jakie odbiły się na kartce białego papieru położonego pod pryzmatem, i zaznaczył kreskami miejsca, które uznał za graniczne. Kiedy zmierzył ich szerokości, dostrzegł w nich takie same proporcje jak te, które rządzą oktavami w pięknej, kojącej muzyce.

W skali stosowanej w muzyce zachodniej w oktawie: *do re mi fa sol la si do* pierwszym stopniem jest *do*; jako ósme z kolei po raz drugi pojawia się *do*, wyższe o jedną oktavę. Inaczej mówiąc, jest to estetyka, w której siedem dźwięków: *do re mi fa sol la si* tworzy jedną grupę. A czyż w kalendarzu chrześcijańskim nie został stworzony piękny porządek, w którym siedem dni: poniedziałek, wtorek, środa, czwartek, piątek, sobota, niedziela, tworzy jedną grupę, a jako ósmy następuje początek nowego tygodnia? Newton wierzył, że natura została stworzona przez Boga na podstawie takiego pięknego porządku. Być może dlatego właśnie uznał za naturalne to, że kolory światła należy podzielić na siedem, podobnie jak jest w muzyce. Liczba siedem ma szczególną wartość.

Z tego też powodu Newton najpierw dopasował kolejno nazwy pięciu kolorów znanych wówczas w Anglii, a następnie do dwóch obszarów pomiędzy nimi dodał dwie nowe, które wcześniej jako nazwy kolorów nie były używane. Były to: pomarańczowy, od przywożonych z kolonii owoców pomarańczy, i nazwa barwnika, indygo. I tak powstał spójny układ siedmiu barw.

Przy okazji, w muzyce, dźwięk oddalony od innego dźwięku o jedną oktawę, z punktu widzenia fizyki ma częstotliwość drgań dokładnie dwa razy większą lub mniejszą; częstotliwość drgań i długość fal są do siebie odwrotnie proporcjonalne, dlatego jeśli chodzi o długość fal, dźwięki takie różnią się o połowę długości. Takie zasady rządzą oktavami. Wśród siedmiu kolorów, jakie ustalił Newton, na dwóch końcach zakresu widzialnego dla ludzkiego oka (spektrum widzialne) są czerwony i fioletowy. Długość fal światła odbieranego jako czerwone to 780, a fioletowego – 390 nanometrów (nm). Oznacza to, że różnica długości fal pomiędzy tymi kolorami jest dwukrotna, jeśli zaś wyrazić to częstotliwością drgań, różnią się o połowę. A skoro tak, można powiedzieć, że te dwa kolory są oddalone od siebie o jedną oktawę. Newton głosił korpuskularną teorię światła i w związku z tym należy się spodziewać, że nie myślał o świetle w kategoriach długości fal czy częstotliwości drgań. Jednakże, jeśli przyjąć, że postrzegał związek między widzialnymi dla ludzkiego oka kolorami jako oparty na oktavie, podobnie jak między dźwiękami, można mieć wrażenie, że działał pod wpływem boskiej inspiracji.

Co do zasady funkcjonowania oktawy, później odkryto fakt, że jeśli uporządkuje się pierwiastki zgodnie z ich masą atomową, co ósmy wykazuje zbliżone cechy. Na przykład pierwiastkiem wykazującym podobne właściwości chemiczne do litu (Li) jest ósmy z kolei od niego sód (Na); podobne cechy do neonu (Ne) wykazuje ósmy z kolei od niego argon (Ar), podobnie jak neon należący do gazów szlachetnych. Jest to tak zwane prawo oktav, sformułowane w roku 1864 przez angielskiego chemika, Johna Newlandsa. Prawo to pomogło w sformuło-

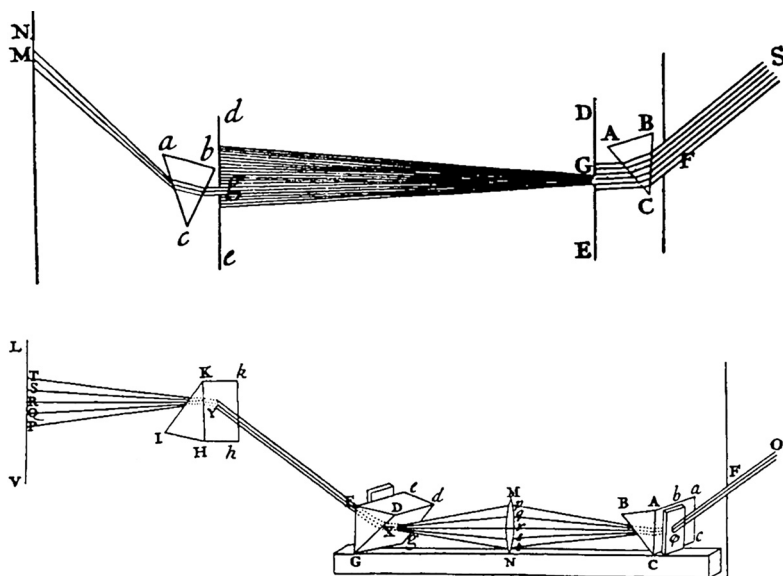
waniu z kolei prawa okresowości, które stało się wskazówką dla odkrywania nieznanymi wcześniej pierwiastków (por. *Układ okresowy pierwiastków* na końcu książki, s. 309). Jego oparcie na oktawach nie wynika z muzycznej harmonii, jak u Newtona, lecz z tego, że konfigurację elektronową w atomie cechuje cykliczność oparta na wartościach 2, 4, 8, 18, 32, i Newlands odkrył powtarzanie się wartości 8.

Tymczasem ostatnio coraz silniej dochodzi do głosu pogląd, że choćby nie wiadomo jak się przyglądać tęczy – nie sposób dojrzeć w niej siedem kolorów. Z pewnością dostrzeżenie ich nie jest niemożliwe, niemniej jednak każdy z poglądów ma wielu zwolenników. Są też kraje, w których uczy się, że tęcza ma sześć kolorów (np. Stany Zjednoczone). Newton był świadom tego, że kolorów jest niezliczona liczba, ale zgodnie ze swoim poczuciem estetyki podzielił tęczę na siedem barw i chyba nie przejmował się tym, że później może to być inaczej ocenione.

Cokolwiek dziś o tym wiemy, to Newton podzielił światło słoneczne na siedem barw, widzianych nawet przez dziecko. Należy go podziwiać za to, że przeprowadził prosty eksperyment rozstrzygający. „Eksperyment rozstrzygający” (lub eksperyment krzyżowy) w nauce to taki eksperyment, który w sytuacji, gdy konkurencyjne teorie w różny sposób starają się wyjaśnić jedno zjawisko, potwierdza słuszność jednej z nich, a odrzuca inne. W historii nauki zdarza się czasem, że ktoś poprzez naprawdę zręczny eksperyment obala konkurujące ze sobą, sprzeczne teorie, i doprowadza do uznania jednej, prawdziwej. Eksperyment Newtona do takich właśnie należał.

W pierwszym eksperymencie Newton osiągnął rozszczepienie światła słonecznego na siedem kolorów, a następnie za pomocą szczytliny wyodrębnił tylko jeden kolor i gdy skierował go na pryzmat, przekonał się, że nie da się już rozdzielić go na dalsze siedem. Oznaczało to, że kolor czerwony jest czerwony, niebieski jest niebieski, i przy użyciu pryzmatu nie można było ich dalej rozdzielić. Newton przemyślał to i przeprowadził drugi eksperyment. Przy użyciu soczewki zebrał sie-

dem kolorów, rozszczepionych za pomocą pryzmatu, i tak otrzymał „białe światło”, po czym gdy znów skierował je na pryzmat, przekonał się, że ponownie wróciło ono do wyjściowych siedmiu barw (ryc. 1.2.).



Ryc. 1.2. Odkrycie białego światła

U góry: Newton używając soczewki, wyodrębnił jeden kolor spośród siedmiu rozdzielonych za pomocą pierwszego pryzmatu, a następnie sprawdził, że po przepuszczeniu go przez drugi pryzmat kolor ten nie dzieli się dalej.

U dołu: W następnym etapie eksperymentu sprawdził, że siedem barw wyodrębnionych w pierwszym pryzmacie po zebraniu w jeden promień za pomocą soczewki i przepuszczeniu przez drugi pryzmat ponownie się dzieli. Dzięki temu eksperymentowi krzyżowemu zostało odkryte białe światło.

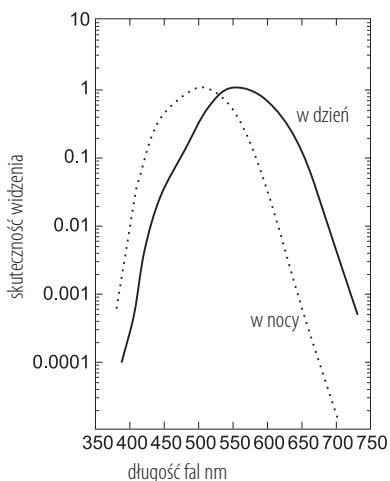
W naukach przyrodniczych zdobywa się nową wiedzę przeprowadzając eksperymenty, na podstawie tej wiedzy tworzy się hipotezy, a poprzez kolejne eksperymenty potwierdza się poprawność lub nie owych hipotez. Taką jest powszechnie uznawana metodologia tych nauk. Dzięki dwóm eksperymentom Newtona, których nikt przed nim nie podjął się, zostało odkryte białe światło. Jednocześnie Newton wyszedł obronną ręką z wyczerpujących debat z Robertem Hookiem i Christia-

nem Huygenssem, i po 2 tysiącach lat obalił istniejącą od czasów Arystotelesa teorię, że białe światło tak samo jak czerwone czy zielone składa się z jednego koloru. Czyż nie jest to niezwykle osiągnięcie?

Dlaczego widzimy kolory?

Najwięcej informacji odbieranych przez człowieka w środowisku pochodzi z wrażeń wzrokowych, takich jak postrzeganie koloru czy kształtu. Szacuje się, że liczba informacji dostarczanych przez zmysł wzroku sięga 10^6 bitów na sekundę (bit to najmniejsza jednostka informacji), informacji pochodzących z dźwięków czy głosów, to znaczy dostarczanych przez zmysł słuchu – 10^4 bitów na sekundę, a odbieranych przez dotyk i skórę – 10^2 bitów na sekundę. To znaczy, że liczba informacji odbieranych wzrokiem stukrotnie przekracza ilość informacji odbieranych przez słuch. Słowa „jeden obraz wart jest tysiąca słów” mówią właśnie o tym. Są też dane, według których 87% informacji odbieranych przez człowieka stanowią wrażenia wizualne, a 7% – wrażenia słuchowe. Oczywiście, zmysły słuchu, dotyku, smaku i węchu dostarczają niezwykle ważnych informacji, niemniej jednak w swoim życiu człowiek polega w największym stopniu na zmyśle wzroku.

W siatkówce w ludzkim oku znajdują się komórki nazywane „pręcikami”, które cechuje światłoczułość, oraz nazywane „czopkami”, które odpowiadają za widzenie barwne. Pręciki to receptory o wysokiej czułości, które umożliwiają postrzeganie nawet bardzo słabego światła, ale nie odbierają barw. Czopki natomiast mają słabszą czułość niż pręciki, ale za to trzy rodzaje ich receptorów są w stanie postrzegać trzy podstawowe kolory światła: czerwony, zielony i niebieski. Ponieważ w ciągu dnia jest jasno, czopki wykonują więcej pracy niż pręciki i umożliwiają rozróżnianie barw. Wśród czopków te odpowiadające za widzenie zieleni reagują z największą czułością, która może nawet ponaddziesięciokrotnie przewyższać czułość czopków odpowiadających za widzenie kolorów czerwonego i niebieskiego (ryc. 1.3.).



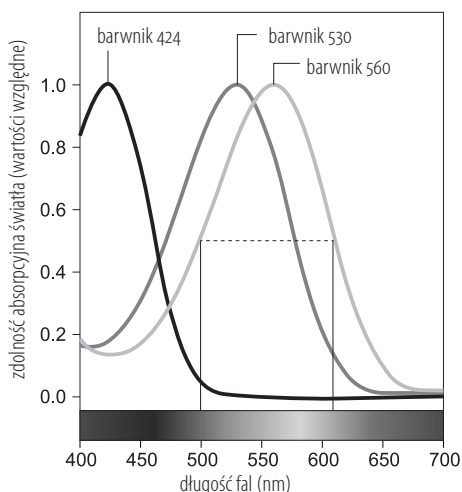
Ryc. 1.3.
Czułość widmowa oka

Do komórek wzrokowych należą czopki, które działają kiedy jest jasno i umożliwiają postrzeganie barw, oraz czubki, które umożliwiają widzenie światła, kiedy jest ciemno. Czułość czopków różni się w zależności od barwy (czyli od długości fal światła). Najwyższa jest czułość konieczna do postrzegania zieleni (555 nm), a do postrzegania czerwieni i niebieskości wystarczy czułość 10 razy słabsza. Linia ciągła odpowiada światłu dziennemu, kiedy jest jasno, a linia przerywana – porze nocnej. Im jest ciemniej, tym bardziej spada wrażliwość na barwę czerwoną, a wzrasta wrażliwość na niebieską. To zjawisko nazywane jest „zjawiskiem Purkyniego”.

W miarę jak mija południe i stopniowo nastaje wieczór, światła słonecznego jest coraz mniej i robi się coraz ciemniej. Chociaż niewyraźnie, ale odróżniamy wtedy kształty, tymczasem kolory stają się coraz słabiej widoczne. W tym, co możemy dostrzec przy świetle księżyca, informacje o kolorach zostały utracone i odbieramy obraz niemalże czarno-biały. To często przez nas doświadczane zjawisko zostało nazwane „zjawiskiem Purkyniego”, dla uczczenia czeskiego anatoma i fizjologa, Jana Evangelisty Purkyniego, który w roku 1825 opisał je jako pierwszy.

Naturalnie, wszystko co się dotąd działo na powierzchni Ziemi, działo się w świetle słonecznym. W tym „białym świetle” człowiek w drodze ewolucji wykształcił umiejętność odbierania trzech barw: czerwonej, zielonej i niebieskiej (tzw. widzenie trójbarwne), których

nie są w stanie postrzegać inne ssaki. Być może myślimy, że zwierzęta, które towarzyszą nam w życiu codziennym, takie jak psy czy koty, widzą pełną gamę barw tak samo jak my, jednak jest inaczej. One zatrzymały się na widzeniu dwubarwnym, a ich świat jest pozbawiony koloru czerwonego. W zamian za to zwierzęta posiadły szczególne umiejętności związane ze zmysłami węchu i słuchu. My tymczasem rozwinęliśmy zdolności związane ze zmysłem wzroku i można powiedzieć, że dzięki widzeniu trójbarwnemu, które umożliwia nam przyswojenie więcej najróżniejszych informacji związanych z barwami niż są w stanie zdobyć rywalizujące z ludźmi zwierzęta, zwyciężyliśmy w surowej walce o przetrwanie (ryc. 1.4.).



Ryc. 1.4.
Widzenie trójbarwne

Człowiek należy do nielicznych ssaków, które mają zdolność widzenia trójbarwnego. Dzięki zdobyciu tej umiejętności ludzie zdołali przetrwać zacieklą walkę o przetrwanie. Spośród trzech rodzajów czopków w siatkówce oka, tylko „barwnik wzrokowy 560” wykazuje taką reakcję na fale o długości 500 i 610 nm, dlatego mózg nie jest w stanie rozróżnić tych kolorów. „Barwnik wzrokowy 530” dla takiej samej długości fal wykazuje różną reakcję i mózg jest w stanie odróżnić barwy.

Źródło: T.H. Goldsmith, *Toritachi ga miru irozayakana sekai* (Barwny świat, jaki oglądają ptaki), „Nikkei Science”, 2006, nr 10, s. 44–55.

Białe światło słońca to kolor światła odbierany, gdy czerwone, zielone i niebieskie światło w odpowiednich proporcjach pada na czopki

reagujące na te trzy barwy, ale chociaż przez nas jest odbierane jako białe, przez organizmy, które rozwijały się w innym środowisku, może być postrzegane inaczej. Wyobraźmy sobie, że istnieje gwiazda, która ma inne temperatury powierzchni niż Słońce i emituje światło o odmiennych barwach (długości fal). Niech w pobliżu tej gwiazdy znajdują się planety, a na jednej z nich żyją istoty rozumne. Światło padające na tę planetę zapewne miałoby inną długość fal (czyli inne kolory) niż światło padające na Ziemię. A w takim razie światło odbierane przez zmysł wzroku owych istot rozumnych różniłoby się od tego, jakie my postrzegamy. Być może one postrzegałyby tylko promieniowanie ultrafioletowe albo podczerwone. A teraz wyobraźmy sobie, że istoty te przybyły na Ziemię. Czy doznałyby wrażenia, że naszą planetę wypełnia białe światło? A może widziałyby dziwny świat zalany zielonym światłem? A może...?

W istocie, żeby ludzkie oko postrzegało światło jako białe, wcale nie jest konieczne zmieszanie trzech kolorów podstawowych: czerwonego, zielonego i niebieskiego. Wystarczy światło któreś z pary barw dopełniających. Para barw dopełniających oznacza dwie barwy, które połączone w odpowiednich proporcjach dają kolor biały (a dokładniej, brak barwy). Na przykład, białe światło można otrzymać, jeśli zmiesza się światło żółte i niebieskie albo zielone i magentę [kolor niebieskawoczerwony], a i z połączenia czerwonego i niebieskiego też można uzyskać białe. Możliwości kombinacji barw wyjściowych są niezliczone.

A z drugiej strony, kiedy postrzegamy światło żółte, może być tak, że widzimy po prostu żółte światło, ale też, że widzimy żółte uzyskane z połączenia czerwonego z zielonym albo że widzimy białe światło pozbawione pasma niebieskofioletowego, i we wszystkich tych przypadkach oko ludzkie widzi tylko żółty kolor.

Zapewne każdemu z nas zdarzyło się, że w zależności od światła oświetleniowego odbity kolor jednej i tej samej rzeczy wydawał się różny. Zjawisko postrzegania światła o odmiennym spektrum jako takiej samej barwy nazywane jest metameryzmem.

Z barwami dopełniającymi wiązą się ciekawe wydarzenia. Newton stwierdził, że jeśli połączy się siedem kolorów, powstanie białe światło. Ale jego oponent, Huygens, dociekliwie pytał: a dlaczego białe światło może powstać z połączenia żółtego i niebieskiego? Ponieważ Newton nie umiał na to odpowiedzieć, musiał uznać, że białe światło dotyczy tylko światła słonecznego. Tymczasem Huygens wiedział o istnieniu par barw dopełniających, o czym nie wiedział Newton. Mogło to wynikać z tego, że Holandia w owych czasach była krajem bardziej rozwiniętym niż Anglia i gromadziła najnowsze technologie oraz wiedzę. Huygens był wieloletnim przyjacielem Kartezjusza, który wcześniej niż Newton wyjaśnił, czym jest naprawdę tęcza, oraz synem Constantijna Huygensa, który tak serdecznie zajmował się Kartezjuszem w czasie jego pobytu w Holandii – co też mogło mieć znaczenie.

Ale nie jest tylko tak, że nasze widzenie kolorów może się różnić w zależności od stopnia oświetlenia. Ludzki wzrok jest zdolny do „adaptacji chromatycznej”. Jest to naturalna funkcja, polegająca na tym, że kiedy w oświetleniu jest więcej czerwieni, zostaje obniżona wrażliwość wzroku na kolor czerwony, a gdy jest więcej niebieskiego – na kolor niebieski. Ponieważ żółtawe światło żarówek i niebieskawe światło świetlówek wyraźnie różni się od słonecznego światła dziennego, rzeczy oświetlane tymi różnymi rodzajami światła też powinny różnie wyglądać, kiedy jednak przyzwyczajamy się do tego, przestajemy zwracać uwagę na te różnice. Oznacza to, że z punktu widzenia fizyki rzeczy w różnym oświetleniu powinny inaczej wyglądać, ale ze względu na sposób funkcjonowania naszych zmysłów rzeczy te wydają się zawsze tej samej barwy, gdyż regulacja wzroku dokonuje się automatycznie.

W dalszych częściach tej książki, poczynając od rozdziału II, będą się pojawiać różne formy oświetlenia: Słońce, świece, lampy gazowe, żarówki, świetlówki, białe diody LED i inne. Wszystkie te źródła światła emitują białe światło, ale jego spektrum fizycznie się różni w każdym z nich (ryc. 1.5.). Choć spektrum fizycznie się różni, człowiek się przyzwyczaja do tego, i każde z nich odbiera jako źródło światła białego.