

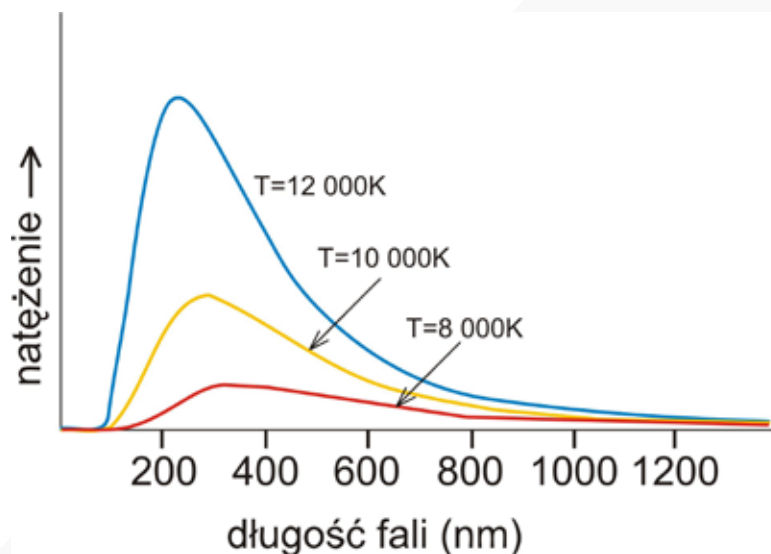


Kolorowy Wszechświat część I

Bartłomiej Zakrzewski

Spoglądając w pogodną noc na niebo, łatwo możemy dostrzec, że gwiazdy (przynajmniej te najjaśniejsze) różnią się między sobą kolorami. Wśród nich znajdziemy takie, które mają odcień czerwony, pomarańczowy, żółty, biały lub białoniebieski. Co jest przyczyną różnicy w kolorach gwiazd?

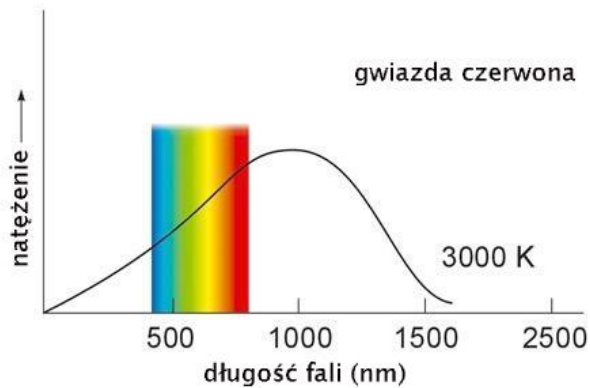
Gwiazda to kula gorącego, częściowo zjonizowanego gazu (plazmy) o temperaturze powierzchniowej pomiędzy około 3000 K a 50 000 K. Związek między natężeniem promieniowania emitowanego z powierzchni gwiazdy a długością fali opisuje prawo Plancka (rys. 1) (w tej części rozważań nie będziemy uwzględniać efektów związanych z obecnością linii absorpcyjnych lub emisyjnych w widmie promieniowania).



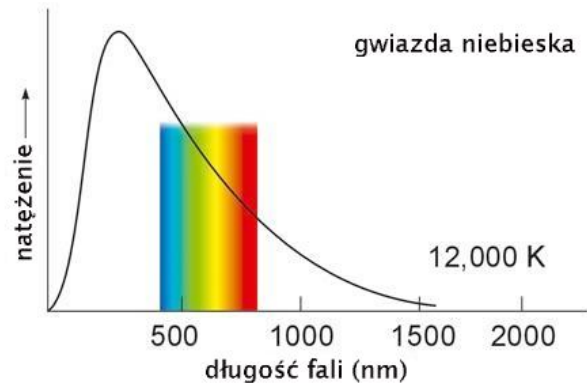
Rys. 1. Krzywe Plancka dla gwiazd o różnych temperaturach

Dla gwiazd o różnych temperaturach rozkład natężenia promieniowania, opisywany prawem Plancka, wygląda różnie, ale w każdym przypadku funkcja, która go opisuje, przyjmuje dla pewnej długości fali λ_{\max} wartość maksymalną (dla tej długości fali gwiazda emituje największą ilość energii). Dla niskich temperatur maksimum to przypada w długofalowej (podczerwonej lub czerwonej) części widma. Wraz ze wzrostem temperatury maksimum funkcji Plancka przesuwa się w stronę fal krótszych (aż do ultrafioletu). Możemy z tego wyciągnąć prosty wniosek, że gwiazdy „chłodne” powinny mieć kolor czerwony lub pomarańczowy, gorące – żółty, najgorętsze, widoczne w zakresie optycznym – niebieski. Sytuację tę ilustrują rysunki 2a i 2b.

Z porównania krzywej Plancka dla gwiazdy, dla której λ_{\max} przypada w pobliżu 550 nm, z układem barw, jaki oglądamy w tęczy lub w smudze światła białego rozszczepionego przez pryzmat (analogicznie



Rys. 2a. Krzywa Plancka dla gwiazdy czerwonej

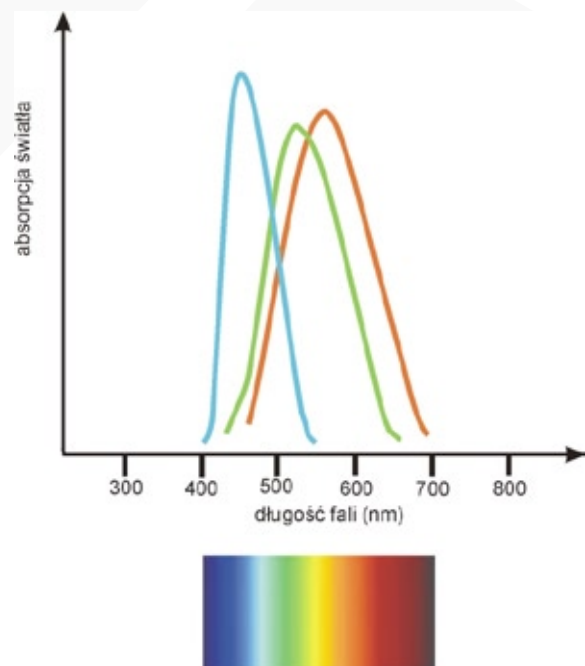


Rys. 2b. Krzywa Plancka dla gwiazdy niebieskiej

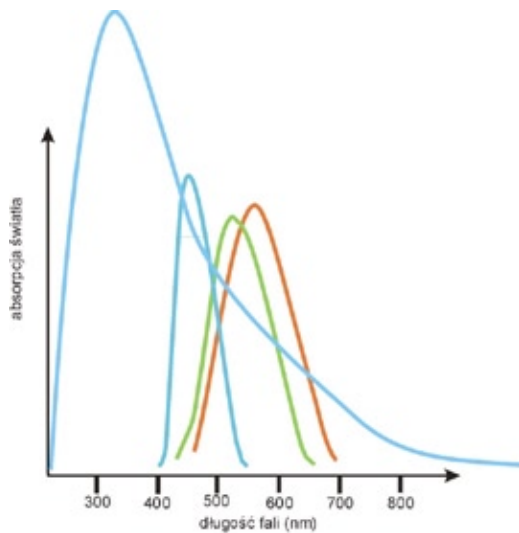
do rys. 2), wynika, że taka gwiazda powinna mieć kolor zielony. Obserwując nocne niebo, łatwo możemy jednak zauważyć, że gwiazd zielonych nie ma, natomiast wiele gwiazd ma kolor biały. Jak można wyjaśnić ten paradoks?

Barwa obserwowanej przez nas gwiazdy zależy nie tylko od widma (rozkładu natężenia) emitowanego przez nią światła, ale także od sposobu, w jaki oko światło to odbiera. W związku z tym zapoznajmy się nieco bardziej szczegółowo z budową ludzkiego oka. Elementami światłoczułymi w oku są dwa typy receptorów: czopki i pręciki, z których zbudowana jest siatkówka znajdująca się na dnie gałki ocznej. Przy dużym natężeniu oświetlenia główną funkcję pełnią czopki. Istnieją trzy rodzaje czopków. Dla każdego z nich maksymalna czułość przypada w różnych zakresach długości fali (rys. 3). Umożliwia to rozróżnianie barw. Łącząc wykres prezentujący absorpcję światła w czopkach z wykresem krzywej Plancka opisującej emisję światła z powierzchni gwiazdy, można uzyskać odpowiedź na postawione wcześniej pytanie. W widmie gwiazd gorących jest mało światła czerwonego. Z tego powodu czopki aktywne w tym zakresie są nieco „nieoświetlone” i taką gwiazdę widzimy jako niebieskawą (rys. 4a). Odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku obserwacji gwiazdy chłodnej. Niewielka ilość światła w krótkofalowej części widma powoduje, że na czopki „niebieskie” pada mniej światła w porównaniu z pozostałymi. Tego rodzaju gwiazda ma kolor pomarańczowy lub czerwony (rys. 4b).

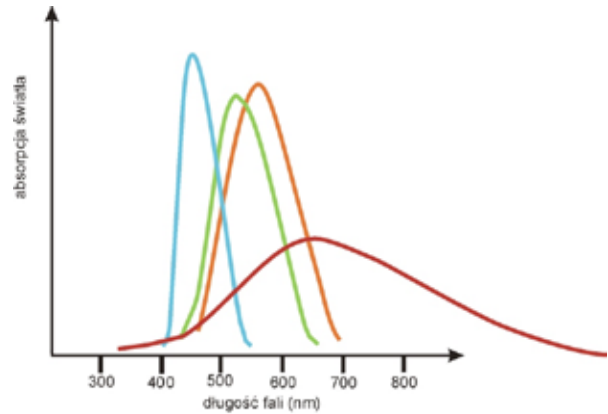
Szczególne sytuacje występują w przypadku gwiazd o temperaturze ok. 6000 K. Wtedy krzywa Plancka obejmuje zakres absorpcji wszystkich trzech rodzajów czopków, co oznacza, że do mózgu będzie docierać informacja o jednakowym oświetleniu siatkówki



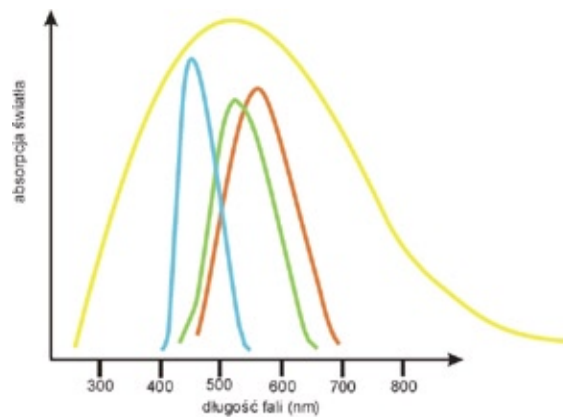
Rys. 3. Krzywe absorpcji światła dla czopków



Rys. 4a



Rys. 4b

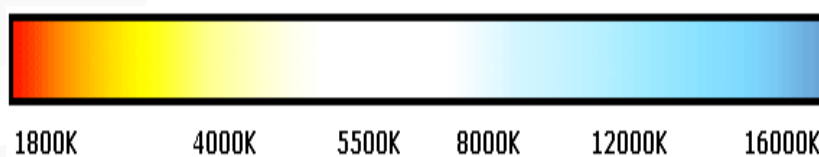


Rys. 4c

Rys. 4. Mechanizm rejestrowania przez oko różnych barw, w zależności od temperatury gwiazdy

światłem w każdej barwie (rys. 4c). Taka gwiazda powinna być widoczna jako biała. Wyniki tych rozważań w pełni zgadzają się z tym, jak odbieramy barwę ciała doskonale czarnego w zależności od jego temperatury. Ilustruje to rysunek 5.

W rzeczywistości rozkład natężenia światła w widmie gwiazd nie jest w pełni zgodny z krzywą opisywaną prawem Plancka, więc wyznaczenie wartości λ_{\max} dla widma niektórych gwiazd jest bardzo trudne. Dla gwiazd widocznych jako białe temperatura na powierzchni (wyznaczona z natężenia obserwowanych linii widmowych) wynosi ok. 9000 K. Odpowiadającą jej wartość λ_{\max} równą 320 nm można



Źródło: Wikimedia Commons

Rys. 5. Obserwowana barwa ciała doskonale czarnego dla różnych temperatur



obliczyć, korzystając z prawa Wiena. W przypadku Słońca λ_{\max} wynosi ok. 550 nm, temperatura 6000 K, a jego kolor odbieramy jako jasnożółty.

Przy bardzo słabym oświetleniu rolę czopków przejmują pręciki – receptory rozróżniające jedynie różnice w natężeniu oświetlenia siatkówki. W praktyce oznacza to, że „w wersji kolorowej” można oglądać tylko gwiazdy najjaśniejsze.

Co jednak zrobić, aby zaobserwować kolor słabszej gwiazdy? Nietrudno się domyśleć, że należy tak zwiększyć natężenie światła docierającego do oka, by przekroczony został próg czułości czopków. Możemy to osiągnąć poprzez obserwację za pomocą dużej lornetki lub lunety astronomicznej. Dzięki temu jesteśmy

w stanie dostrzec np. gwiazdy podwójne, w których każda z gwiazd składowych ma wyraźnie inny kolor. Jedną z najbardziej znanych gwiazd podwójnych jest gwiazda β Cygni (Albireo) (fot. 1). W tabeli 1. zaprezentowana została lista najbardziej atrakcyjnych różnokolorowych gwiazd podwójnych.



Źródło: Wikimedia Commons

Fot. 1. Albireo

Nazwa gwiazdy	Jasność [magnitudo]	Odległość kątowa składników	Kolory
β Cyg	3/3.5	34.3	żółto-szafirowy
\circ Dra	4.5/7.5	34.2	pomarańczowo-niebieski
h3945 (CMA)	4.8/6.8	26.6	żółto-niebieski
α CVn	2.7/5.4	19.4	żółto-niebieski
Str 872 (Aur)	6.0/7.0	11.3	żółto-niebieski
γ And	2.3/5.0	9.8	żółto-niebieski
χ Boo	4.8/6.7	6.6	żółto-czerwony
95 Her	5.0/5.0	6.3	zielono-czerwony
α Her	3.0/5.5	4.6	czerwono-zielony
6 Tri	5.0/6.6	3.9	żółto-niebieski
70 Oph	4.3/6.3	3.8	żółto-czerwony

Tab. 1. Jasne gwiazdy wizualnie podwójne ze składnikami o wyraźnie różnych barwach



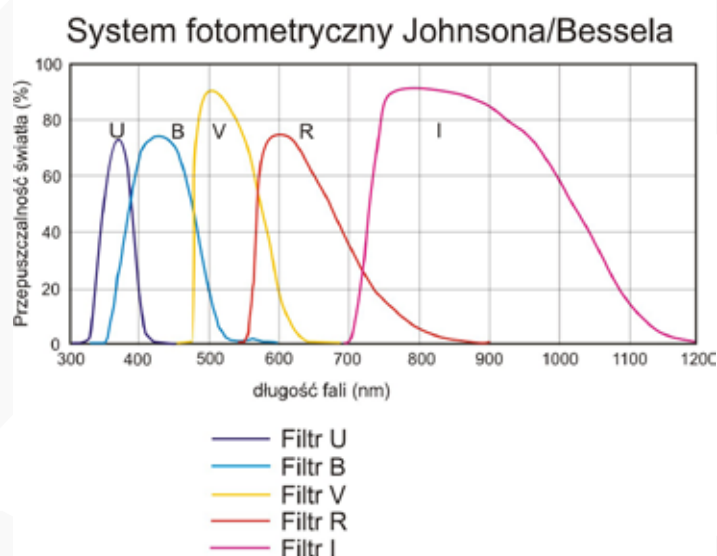
Astronomowie nie obserwują gwiazd za pomocą własnego oka. Obecnie rolę odbiornika światła pełni najczęściej kamera CCD – urządzenie podobne w działaniu do aparatu cyfrowego, ale znacznie bardziej czułe i precyzyjne. Astronomiczna kamera CCD (w przeciwieństwie do zwykłego aparatu) wykonuje zdjęcia czarno-białe, na których można zmierzyć położenie gwiazd oraz ich względne jasności. Na podstawie takich zdjęć nie da się określić koloru gwiazdy. Otrzymanie poprawnego kolorowego obrazu wymaga wykonania trzech zdjęć w różnych barwach: niebieskiej, zielonej i czerwonej, a następnie ich odpowiedniego nałożenia na siebie za pomocą programów komputerowych. Do otrzymania zdjęcia w podstawowych barwach używane są kolorowe filtry szklane, które przepuszczają światło tylko w określonych przedziałach długości fali. W taki sposób powstało zdjęcie gwiazdy podwójnej Albireo, a dzięki użyciu znacznie większego teleskopu zrobiono zdjęcie okolic gwiazdy Proxima Centauri – najbliższej gwiazdy poza Układem Słonecznym (fot. 2).



Źródło: NASA

Fot. 2. Proxima Centauri

Uzyskane w ten sposób kolorowe zdjęcia gwiazd nie dostarczają jednak astronomom zbyt wielu wymiernych informacji. Celem wykonywania zdjęć kamerą CCD z barwnymi filtrami nie jest jednak otrzymywanie kolorowych obrazów, lecz pomiar jasności badanych gwiazd, kolejno dla każdej z barw. Zestaw używanych w tym celu filtrów kolorowych o ustalonych parametrach nosi nazwę systemu fotometrycznego. Najbardziej znany i najczęściej stosowany w astronomii jest tzw. system Johnsona/Bessela UBVRI, w skład którego wchodzi pięć filtrów od ultrafioletu do podczerwieni (rys. 6).



Rys. 6. System fotometryczny Johnsona/Bessela



Nazwy filtrów pochodzą od pierwszych liter angielskich określeń: Ultraviolet, Blue, Visual, Red, Infrared. Zakres przepuszczalności światła przez filtr B jest podobny do zakresu długości fal, w którym jest czuła klisza ortochromatyczna używana dawniej do fotografowania nieba, zaś krzywa czułości spektralnej filtru V jest podobna do analogicznej krzywej dla ludzkiego oka. Dzięki temu jest możliwe porównywanie współczesnych wyników z dawnymi obserwacjami fotograficznymi i wizualnymi. Używanie filtrów zgodnych z systemem pozwala na porównywanie wyników otrzymywanych w różnych obserwatoriach. Różnica jasności gwiazd w dwu różnych barwach (np. B–V) nosi nazwę wskaźnika barwy. Jest to jak gdyby zapis koloru gwiazd za pomocą liczb. Wartość wskaźnika barwy wiąże się jednoznacznie z barwą, a więc także temperaturą gwiazdy.

Przy rozważaniach na temat koloru gwiazd braliśmy pod uwagę wyłącznie tzw. widmo ciągłe (continuum). Inne ciekawe zagadnienia dotyczące barw Wszechświata pojawiają się, jeśli poszerzymy tematykę o problem związany z obecnością w widmie linii widmowych. O tym m.in. będzie mowa w drugiej części artykułu.