

Data wpłynięcia do Redakcji: 04/2023
Data akceptacji przez Redakcję do publikacji: 05/2023

2023, volume 12, issue 2, pp. 78-88

Barbara Solecka
Politechnika Śląska, Poland



Streszczenie: Światło w naszym życiu odgrywa fundamentalną rolę. Dostarcza nam informacji nie tylko o naszym otoczeniu, ale przede wszystkim dzięki niemu poznajemy Świat a w obecnych czasach nawet daleki Wszechświat. Dzięki nowoczesnym narzędziom astronomicznym mamy kosmos na „wyciągnięcie ręki”. Obserwowane światła docierają do nas z wielu ciał niebieskich takich jak: gwiazdy, mgławice, galaktyki. Poprzez analizę parametrów widma, fale elektromagnetyczne dostarczają nam wiele informacji o ich budowie, funkcjonowaniu, procesach, które w nich zachodzą. Publikacja ta, przybliży czytelnikowi, na czym polega podstawowa analiza spektralna światła. W jaki sposób określa się temperaturę ciał niebieskich oraz ich skład chemiczny. Wspomina też, jakie są współczesne narzędzia optycznych obserwacji astronomicznych, które dostarczają astronomom coraz bardziej szczegółowych informacji z dalekiego kosmosu oraz niepowtarzalnych obrazów.

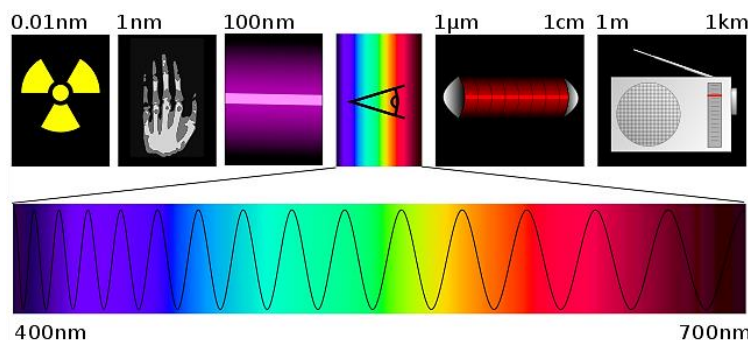
Słowa kluczowe: fotometria, spektrometria, kosmos

ŚWIATŁO WIDZIALNE

W naszym naturalnym środowisku obecne są fale elektromagnetyczne różniące się długością a co za ty idzie częstotliwością i energią. Fale elektromagnetyczne otaczające nas pochodzą z naturalnych źródeł takich jak: promieniowanie kosmiczne, promieniowanie słoneczne, promieniowanie termiczne ciał, ziemskie pole magnetyczne i wyładowania atmosferyczne; występujące we wszechświecie i na Ziemi, w tym związane z obecnością w skorupie ziemskiej i glebie naturalnych izotopów promieniotwórczych. W obecnych czasach mamy bardzo wiele fal elektromagnetycznych pochodzenia sztucznego wytworzone w sposób przypadkowy lub celowy przez człowieka a emitujące je różne urządzenia elektroniczne i instalacje elektryczne.

Ze względu na długość emitowanej fali wyróżnia się fale radiowe, mikrofałe, podczerwień, światło widzialne, ultrafiolet, promieniowanie rentgenowskie i promieniowanie gamma. Szczególnie istotne dla postrzegania otaczającego świata jest światło widzialne o długości fal od 380 nm do około 780 nm (rys. 1).

Światło widzialne jest podstawowym narzędziem pomiarów i obserwacji kosmosu.

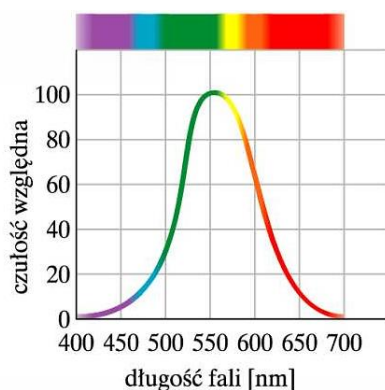


Rys. 1 Spektrum fal elektromagnetycznych. Wąskie pasmo światło widzialnego

Źródło: [1]

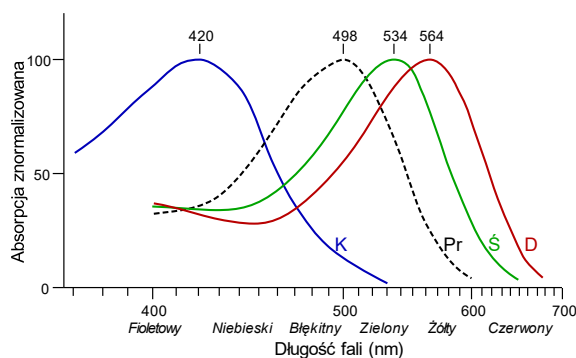
Promień światła rozpatrujemy z punktu widzenia geometrycznego jako wyznaczający kierunek ku ciałom niebieskim. Jednakże ten sam promień dostarcza ponadto wielu informacji o własnościach fizycznych tych obiektów. W pomiarach astrofizycznych badamy zarówno natężenie promieniowania jak i jego własności fizyczne w bardzo wąskich zakresach widm. Badania fotometryczne wraz z pomiarami spektralnymi stanowią główną część obserwacji astronomicznych [2, 3].

Naturalnym i podstawowym odbiornikiem promieniowania widzialnego jest nasze oko (rys. 2, 3).



Rys. 1 Względna czułość przeciętnego oka ludzkiego na fale elektromagnetyczne w zakresie widzialnym

Źródło: [4]



Rys. 2 Przybliżone krzywe czułości względnej trzech rodzajów czopków z pigmentami czułymi odpowiednio na czerwoną, niebieską i zieloną część widzialną widma

Źródło: [5]

Światło wpada do oka przez źrenicę, która zmienia swoją średnicę w zależności od jego natężenia. Następnie, skupione jest na siatkówce, składającej się z zakończeń nerwowych, odprowadzających wrażenia świetlne do mózgu [6]. Zakończenia nerwowe składają się z dwóch grup komórek, są to czopki i pręciki. Czopki są wrażliwe na barwy, silniejsze bodźce świetlne, odpowiedzialne są za tzw. widzenie fotopowe (dzienne). Pręciki natomiast, są mało wrażliwe na barwy jednak reagują na bardzo słabe natężenia światła widzenie skotopowe (nocne) [7]. W drugiej połowie XX wieku eksperymentalnie potwierdzono, że w siatkówce ludzkiego oka znajdują się trzy rodzaje czopków wrażliwych na kolor odpowiadającym detektorom czułym na kolor czerwony, zielony i niebieski (rysunek 3).

W zakresie światła widzialnego, czułość oka zmienia się znacznie przy różnych długościach fal. W warunkach widzenia fotopowego, oko jest około dwadzieścia pięć razy czulsze na światło o długości fali równej 555 nm (rysunek 2), która odpowiada barwie żółtej, niż dla długości fali równej 670 nm głęboka czerwień, lub fioletowo niebieskiej o długości 450 nm. Szczytowa czułość dla widzenia skotopowego jest około 50 nm bliższa niebieskiego, niż maksymalna czułość dla widzenia fotopowego.

Omówione własności oka wpływają na jego przydatność do obserwacji astronomicznych. Oko może oceniać jasność gwiazd oraz ich barwy. W XX wieku oko przestało być przyrządem badawczym, które zostało zastąpione bardziej obiektywnymi i dokładniejszymi przyrządami do obserwacji rozszerzając ją o zakresy widm w zakresie podczerwieni i ultrafioletu.

OBSERWACJE ASTRONOMICZNE

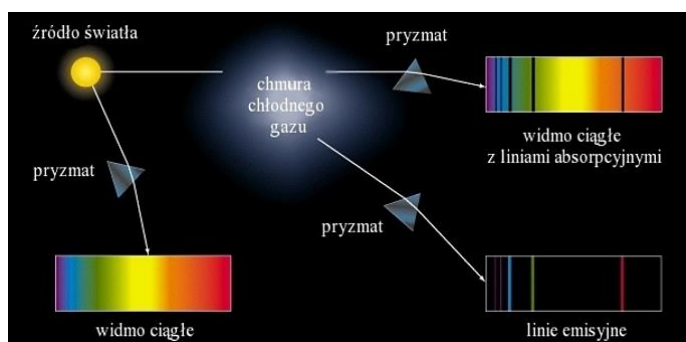
Astronomia i astrofizyka pozyskują wiedzę przede wszystkim poprzez obserwacje astronomiczne naziemne (astronomia optyczna i radioastronomia) i satelitarne np. misje międzyplanetarne [2, 3]. Astronomia obserwacyjna (optyczna) dzieli się na kilka dziedzin: astrometria, fotometria, spektrometria oraz polarymetria. Od niepamiętnych czasów jednym z podstawowych celów obserwacji astronomicznych było wyznaczenie położenia ciał niebieskich w celu wyprowadzenia z tych obserwacji współrzędnych położenia i czasu. Informacje te stanowią podstawę astrometrii. Fotometria zajmuje się wyznaczaniem jasności ciał niebieskich. Obserwacje spektrometryczne pozwalają na badanie widma promieniowania elektromagnetycznego i dostarczają badaczom bardzo szczegółowych informacji, zarówno o źródłach emisji promieniowania elektromagnetycznego jak i o właściwościach ośrodka przenikającego przez promieniowanie po drodze do obserwatora. Polarymetria pozwala na obserwowanie polaryzacji światła badającą rozkład i zmiany kierunku drgań fali elektromagnetycznej docierającej od badanego ciała. W 1892 roku amerykański astronom zaobserwował, że niektóre linie widmowe światła słonecznego ulegają rozszczepieniu na dwa lub trzy składniki. Zjawisko rozszczepienia linii absorpcyjnych w widmach plam zostało wyjaśnione w 1908 roku przez G.E.

Hale'a jako wynik działania pól magnetycznych wewnątrz plam słonecznych. Do tego typu obserwacji stosuje się urządzenia wyposażone w polaryzatory służące do analizy światła spolaryzowanego liniowo i kołowo [2]. Pomiary fotometryczne wraz z pomiarami spektralnymi stanowią główną część obserwacji astronomicznych.

SPEKTROSKOPIA

Białe światło widzialne, wysyłane przez ciała niebieskie jest sumą fal elektromagnetycznych o różnych długościach. Przepuszczając światło przez pryzmat ulega ono dwukrotnemu załamaniu na każdej ze ścian, w wyniku czego zostaje odchylone od pierwotnego kierunku o pewien kąt. Każda długość fali elektromagnetycznej (barwa) załamuje się w pryzmacie pod innym kątem a konsekwencją takiego przejścia jest rozszczepienie wiązki światła na barwy składowe, które nazywamy widmem promieniowania. Dla światła słonecznego podczas przejścia przez pryzmat największemu załamaniu ulega światło fioletowe (najkrótsza fala), a najmniejszemu – czerwone (najdłuższa fala).

Z powierzchni każdej gwiazdy emitowane jest widmo ciągłe, w którym występują szereg długości fal w postaci barwnej wstęgi. Jeśli światło przejdzie przez chłodny gaz, który stanowi atmosferę gwiazdy lub półprzezroczysty obłok międzygwiazdowy, w widmie ciągłym pojawiają się linie absorpcyjne. Atomy gazu pochłaniają światło o konkretnych długościach charakterystycznych dla danego pierwiastka. Jeśli jednak nie patrzymy bezpośrednio na źródło światła tylko wprost na chmurę gazu oświetlaną przez to źródło, wówczas widzimy, że gaz emituje pochłoniętą energię. Obserwujemy wtedy widmo emisyjne (rysunek 4).

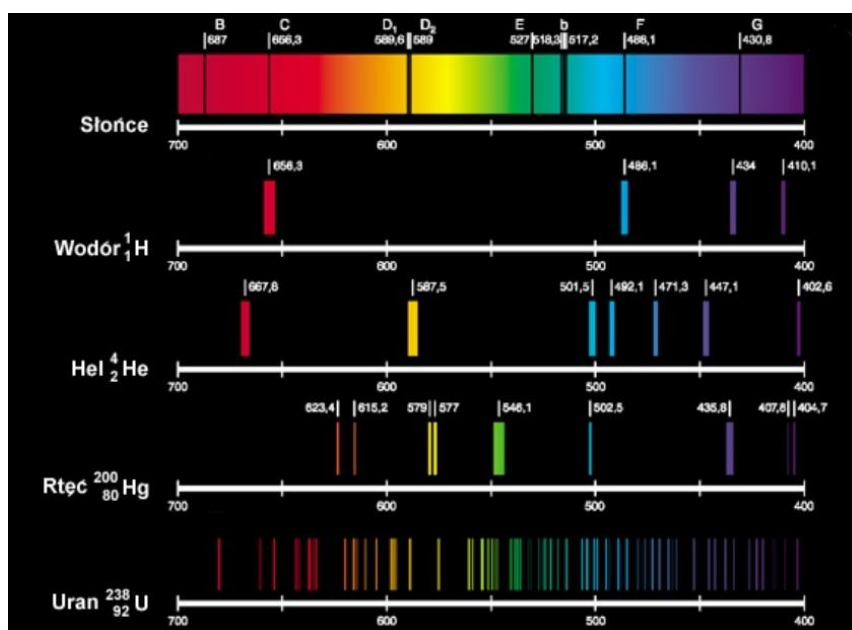


Rys. 4 Warunki obserwacji widma ciągłego, emisyjnego i absorpcyjnego

Źródło: [8]

Widmo ciągłe z liniami absorpcyjnymi dla Słońca pierwszy zaobserwował Fraunhofer [2, 3]. Ciemne linie absorpcyjne, które ogólnie nazywamy liniami Fraunhofera mają różne szerokości i różnorodny rozkład natężenia. W widmie Słońca obserwuje się linie H i K zjonizowanego wapnia (CaII), które są szerokie i bardzo ciemne. Natężenie linii spektralnych jest tym większa im większa jest koncentracja atomów pierwiastka do którego dana linia się odnosi. Z natężeń poszczególnych linii wyciągamy wnioski co do koncentracji atomów

poszczególnych pierwiastków występujących w atmosferze słonecznej. Z badań powyższych wynika, że około 75% ogólnej masy atmosfery słonecznej stanowi wodór, około 24% masy przypada na hel, a tylko 1% to inne pierwiastki. Na szerokość linii absorpcyjnych wpływa wiele innych czynników, co w konsekwencji sprawia, że teoria widma słonecznego lub ogólnie widma gwiazdowego jest bardzo złożona a badania jego dostarczają wielu informacji o stanie atomów i warunkach panujących w atmosferze gwiazdy. Przykładowe widma emisyjne dla wybranych pierwiastków oraz widmo ciągłe z liniami absorpcyjnymi Fraunhofera przedstawia rysunek 5.



Rys. 5 Zestawienie widma ciągłego i linii Fraunhofera dla Słońca z widmem emisyjnym dla Wodoru i Helu. Przykładowe widma emisyjne dla Rtęci i Uranu

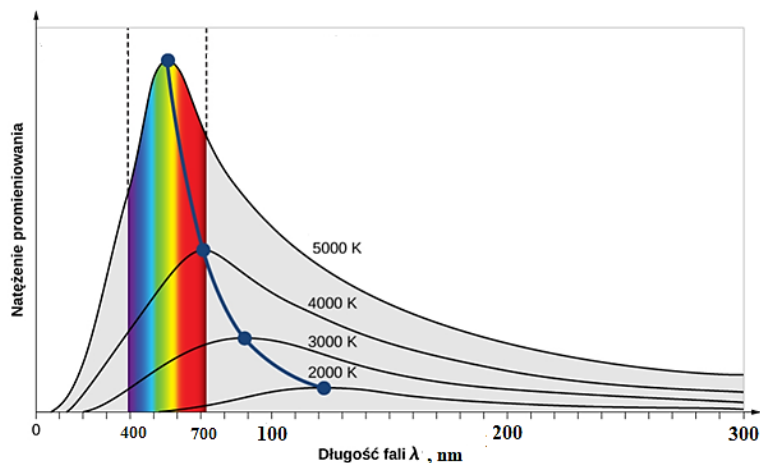
Źródło: [9]

W ciągłym widmie Słońca absorpcyjne linie (ciemne linie) wskazują na obecność wodoru i helu w jej atmosferze.

TEMPERATURA GWIAZD

Oprócz światła widzialnego gwiazdy wysyłają również promieniowanie w zakresie krótszych i dłuższych fal elektromagnetycznych, które są poza zakresem widzialnym dla oka ludzkiego. Widmo fal elektromagnetycznych rejestrowane w zakresie dłuższych fal nazywamy podczerwienią a w zakresie krótszych fal ultrafioletem. Obserwacja szerokiego zakresu widma emitowanego przez gwiazdy jak i jego natężenie pozwala nam nie tylko określić atomy jakiego pierwiastka występują w atmosferze gwiazdy. Możemy na tej podstawie określić również jej temperaturę. Temperaturę gwiazd wyznaczamy przy założeniu, że do promieniowania gwiazd można stosować prawa odnoszące się do promieniowania ciała doskonale czarnego. Tak zwane substancje czarne (np. sadza), pochłaniające całą energię promieniowania padającego na nie a najwyższą

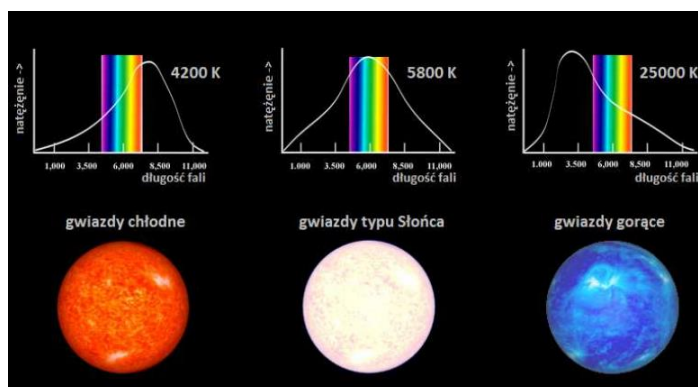
zdolność wysyłania promieniowania mają, gdy zostaną grzane do odpowiednio wysokiej temperatury. Do analizy promieniowania ciała doskonale czarnego stosujemy prawo Stefana Boltzmanna, mówiące o tym, że całkowita moc promieniowania proporcjonalna jest do czwartej potęgi temperatury oraz prawo Wiena, temperatura ciała doskonale czarnego jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali odpowiadającej maksimum emitowanego natężenia (rysunek 6).



Rys. 6 Rozkład natężenia w widmie promieniowania ciała doskonale czarnego w różnych temperaturach

Źródło: [10]

Charakter własności widmowych gwiazd przypominają w przybliżeniu krzywe promieniowania ciała doskonale czarnego w różnych temperaturach. Widoczne na rysunku 7 kolory gwiazd są efektem różnych temperatur ich powierzchni.



Rys. 7 Rozkład natężenia promieniowania trzech gwiazd o różnych temperaturach ich powierzchni

Źródło: [11]

Chłodne gwiazdy (około 4000 K) promieniują w czerwonej części widma, tymczasem maksimum emisji przypada w zakresie podczerwieni. Gwiazdy typu Słońca o temperaturze powierzchni około 6000 K, promieniują w zakresie światła widzialnego, co potwierdza ich widmo emisyjne. Gwiazdy gorące o temperaturze powierzchni powyżej 25000 K promieniujące głównie w ultrafiolecie a przez nas są widziane jako niebieskie.

FOTOGRAFIA KOSMOSU

Prowadząc obserwacje astronomiczne za pomocą teleskopu naziemnego nie jesteśmy w stanie dostrzec koloru obiektów obserwowanych. Nawet te najjaśniejsze to tylko szare plamki na tle ciemnego kosmosu. Niestety, oko ludzkie słabo sobie radzi w trudnych warunkach oświetleniowych przez co w rezultacie widzimy w odcieniach szarości. Wielogodzinna rejestracja fotograficzna dalekich obiektów ujawnia, że Wszechświat jest niesamowicie kolorowy. Kolory mgławic, galaktyk czy gwiazd to wynik emitowanego promieniowania światła. Mgławice emisyjne najczęściej świecą poprzez silnie zjonizowane gazy takiej jak wodór i tlen. W normalnej dziennej fotografii zawsze dla idealnego odwzorowania koloru możemy użyć tak zwanej szarej karty, służącej do prawidłowego odwzorowania barw fotografowanego obiektu lub różnego rodzaju narzędzi do precyzyjnego odwzorowania i profilowania koloru. W przypadku urządzenia rejestrującego obrazy o monochromatycznej matrycy, żeby zrobić kolorowe zdjęcie musimy wykonać serię zdjęć przez trzy różne filtry: czerwony, niebieski, zielony. Otrzymany obraz to złożone zdjęcia RGB (Red Green Blue) nałożone na monochromatyczny kanał L który określa jasność z zakresu od 0 do 100, gdzie 0 oznacza czerń a 100 biel (rysunek 8). W astrofotografii używamy jeszcze jednej ekspozycji z filtrem blokującym promieniowanie z zakresu ultrafioletu oraz podczerwieni.

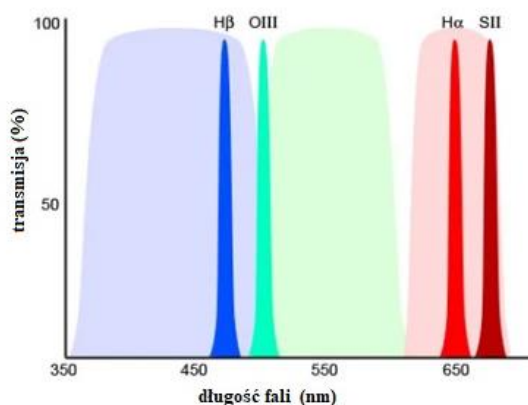


Rys 8 Obraz złożony ze składowych RGB

Źródło: [1, 2]

Nowa era obserwacji astronomicznych rozpoczęła się wraz z umieszczeniem w 1990 roku na orbicie okołoziemskiej Kosmicznego Teleskopu Hubble'a (HST) [13]. Umieszczenie go poza atmosferą ziemską stanowi o jego przewadze nad teleskopami naziemnymi. Teleskop ten ujawnił nam ciała niebieskie, które ukazały nieznaną dotąd szczegółowe obrazy oraz takie, które do tej pory nie były obserwowane. Ciągły strumień informacji z teleskopu Hubble'a wciąż rozszerza nasze spojrzenie na Wszechświat i jego historię. Wiedzę tą dostarczają nam niezwykle atrakcyjne zdjęcia. Najczęściej są to zdjęcia wykonane w pasmach emisyjnych pierwiastków takich jak wodór, tlen i siarka. Monochromatyczna

kamera wykonuje wielogodzinne ekspozycje przez wąskopasmowe filtry, a następnie tworzy się z nich niesamowicie ekspresyjne zdjęcia. Kolor powstaje po złożeniu zdjęć z trzech kanałów, ale zamiast szerokopasmowych filtrów RGB użyto filtrów H α pasmo świecenie zjonizowanego wodoru zastępuje kolor zielony, O III pasmo świecenie zjonizowanego tlenu – zastępuje kolor niebieski oraz S II pasmo świecenie zjonizowanej siarki – zastępuje kolor czerwony (rys. 9).



Rys. 3 Zestawienie wąskopasmowych filtrów H α , H β , O III, S II, z szerokimi filtrami RGB

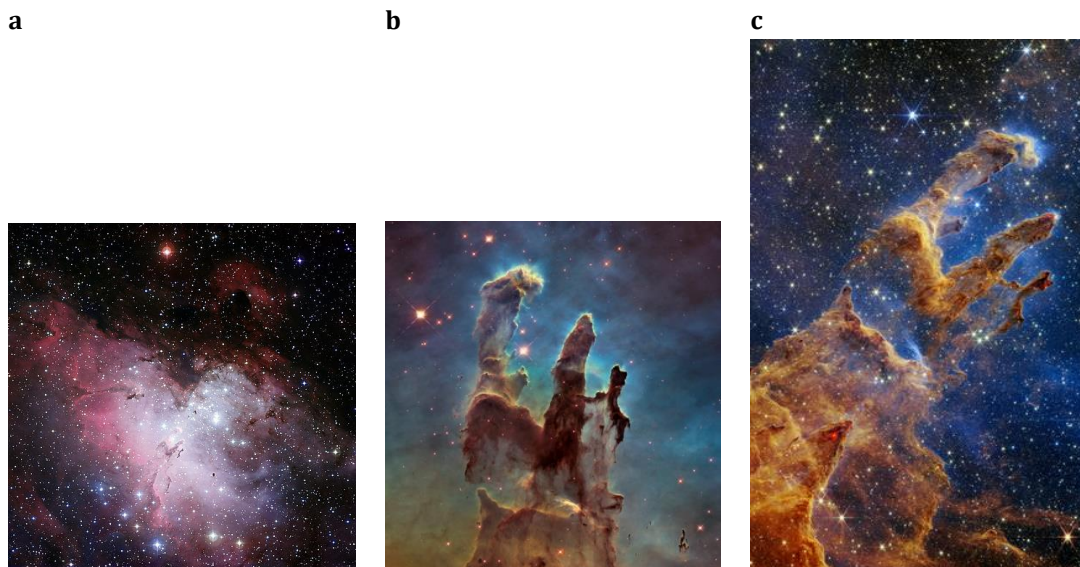
Źródło: [12]

Paleta taka nosi nazwę palety Hubble'a. Poza tym, spora część obserwacji prowadzonych przez astronomów wykonywana jest w podczerwieni, ultrafiolecie oraz w paśmie rentgenowskim.

Kolejnym krokiem w obserwacji kosmosu było wprowadzenie na orbitę okołozemską Kosmicznego Teleskopu Jamesa Webba (JWST), który w przyszłości całkowicie zastąpi teleskop Hubble'a. Teleskop ten może wykonywać obserwacje astronomiczne w zakresie światła widzialnego, ale przede wszystkim w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni. Na jego pokładzie zamontowano szereg urządzeń pomiarowych, które sprawiają, że stopniem zaawansowania JWST znacznie przewyższa możliwości teleskopu Hubble'a. Przekłada się to na lepszą jakość zdjęć, które wykonuje i przesyła na Ziemię.

Prawdziwą *magię światła* możemy podziwiać na zdjęciach „Filarów Stworzenia” w obszarze emisyjnej Mgławicy Orzeł należącej do gwiazdozbioru Węża [12]. Zdjęcie (rys. 10a), zostało wykonane przez ESO (European Southern Observatory) europejskie obserwatorium za pomocą teleskopu naziemnego i przedstawia duży obszar Mgławicy Orzeł. Na podstawie tego zdjęcia astronomowie stwierdzili, że są to mgławice absorpcyjne na tle mgławicy emisyjnej, która stanowi tylko drobna część wielkiego obłoku molekularnego. Kolejne zdjęcie (10b) wykonano za pomocą Kosmicznego Teleskopu Hubble'a (HST) w zakresie światła widzialnego w przedziale od 502 nm do 673 nm. Zdjęcie przedstawia niewielki, środkowy fragment mgławicy, który został nazwany Filarami Stworzenia. Trzy słupy gazu i pyłu rozciągają się na około cztery lata świetlne, w których powstają setki gwiazd.

W rejonach gwiazdotwórczych prawie zawsze można znaleźć wielkie obszary świecącego wodoru i innych gazów, dlatego takie mgławice nazywamy emisyjnymi (rys. 10b) Najnowsze zdjęcie (rys. 10c) Filarów Stworzenia wykonał Kosmiczny Teleskop Webba (JWST) przy użyciu kamery NIRCam (Near-Infrared Camera) w zakresie od 900 nm do 4700 nm wykorzystującej promieniowanie podczerwone.



Rys. 10a – Mgławica Orzeł w gwiazdozbiornie Węża – zdjęcie wykonane z Ziemi,
10b – zdjęcie z Kosmicznego Teleskopu Hubble’a,
10c – Zdjęcie z Kosmicznego Teleskopu Jamesa Webba

Źródło: [14]

Dzięki temu udało się uchwycić szczegóły, których wcześniej nie można było znaleźć na żadnej innej fotografii. Rodzące się gwiazdy na zdjęciu widoczne są jako jasne i czerwone obiekty otoczone tzw. spawkami czyli promieniami dyfrakcyjnymi, znajdujące się poza słupami pyłowo-gazowymi. W porównaniu do zdjęcia z Kosmicznego Teleskopu Hubble’a zachwyca niezwykle wielka szczegółowość obrazu, wynikająca przede wszystkim z obserwowanego zakresu widma. Fotony z bliskiej podczerwieni łatwiej przenikają przez obłoki pyłu niż w widzialnym zakresie fal.

Pierwsze zdjęcie uzyskane za pomocą teleskopu Webba (rys. 11), ukazuje ogromną ilość ciał niebieskich, które okazują się być galaktykami.

Wiele z nich udało się zobaczyć po raz pierwszy dopiero w podczerwieni. Taki zbiór galaktyk nazwano gromadę galaktyk SMACS 0723a obraz obserwowany pochodzi sprzed 4,6 miliarda lat. Chociaż obszar ten zawiera tysiące obiektów w rzeczywistości jest małym punktem wszechświata. Obszar obserwacji ciemnego fragmentu nieba było wielkości ziarenka piasku na wyciągniętej dłoni.

„Zobaczyć świat w ziarenku piasku”(William Blake) – idealnie wpisuje się w możliwości współczesnych badań kosmosu.



Rys. 11 Pierwsze zdjęcie z Kosmicznego Teleskopu Jamesa Webba

Źródło: [14]

PODSUMOWANIE

Głównym celem nauki, techniki i sztuki jest analiza i poznanie świata zewnętrznego. Dziedziny te wzajemnie się inspirują i uzupełniają, zgodnie ze sobą koegzystują. Obserwacje i badanie kosmosu są najlepszym przykładem sukcesu na polu nauki i sztuki. Dzięki dążeniom ku gwiazdom pogłębiamy wiedzę, rozwijamy technikę i dostarczamy niepowtarzalnych wrażeń estetycznych. Dzięki tej wiedzy skłonni jesteśmy do refleksji nad naszym miejscem we wszechświecie zarówno w czasie jak i przestrzeni. Wiedza o Wszechświecie, a właściwie ten mały wycinek, o którym informuje nas światło odgrywa ważną rolę w postrzeganiu świata, w którym żyjemy, skąd pochodzimy i dokąd zmierzamy.

LITERATURA

- [1] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/fc/Spectre.svg/1920px-Spectre.svg.png>
- [2] E. Rybka, *Astronomia ogólna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1983
- [3] J.M. Kreiner, *Astronomia z astrofizyką*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1992
- [4] http://stareaneksy.pwn.pl/podstawy_fizyki/?id=767
- [5] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9a/Cone-response-pl.svg>
- [6] M.W. Levine, J.M. Shefner, *Fundamentals of Sensation and Perception*, Addison-Wesley Publishing Company, 1981
- [7] J.K. Bowmaker, H.J. Dartnall, Visual pigments of rods and cones in a human retina., „*The Journal of Physiology*”, 298 (1), 1980, s. 501–51
- [8] <http://astronomianova.org/pdf/Spektroskopia.pdf>
- [9] <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/widmo-optyczne;3995492.html>
- [10] <https://openstax.org/books/fizyka-dla-szkol-wyzszych-tom-3/pages/6-1-promieniowanie-ciala-doskonale-czarnego>
- [11] <http://www.wygasz.edu.pl/index.php/filtry-w-astronomii.html>

- [12] <https://astrofotografia.pl>
- [13] S. Clark, „Wszechświat w obiektywie”, RTW 1997
- [14] NASA, ESA, CSA, STScI; Joseph De Pasquale (STScI), Anton M. Koekemoer (STScI), Alyssa Pagan (STScI)

The Magic of Light

Abstract: Light plays a fundamental role in our lives. It provides us with information not only about our surroundings, but, above all, thanks to it we learn about the world and, these days, even the distant universe. Thanks to modern astronomical tools we have the cosmos at our "fingertips". The observed lights reach us from many celestial bodies such as stars, nebulae, galaxies. By analyzing the parameters of the spectrum, electromagnetic waves provide us with a lot of information about their structure, functioning, processes that occur in them. This publication, introduces the reader to what the basic spectral analysis of light is. How the temperature of celestial bodies and their chemical composition are determined. It also mentions what are the modern tools of optical astronomical observations, which provide astronomers with increasingly detailed information from the distant cosmos and unique images.

Keywords: photometry, spectrometry, cosmos

Barbara Solecka

Instytut Fizyki CND

Politechnika Śląska

ul. Konarskiego 22B, 44-100 Gliwice, Poland

e-mail: barbara.solecka@polsl.pl