

# Astrolabium

Konkurs astronomiczny

## Zdolność rozdzielcza



Szkoła średnia  
Klasy I – IV  
Doświadczenie konkursowe 4

Rok 2019

## 1. Wstęp teoretyczny

Każdy, kto interesuje się astronomią zastanawia się nie raz, jak wyglądają gwiazdy widziane przez profesjonalny teleskop. Szczególnie, że fotografie wykonane za pomocą większych teleskopów wyglądają nieco inaczej niż te zrobione przez przydomowy teleskop. Dobrym przykładem jest zdjęcie fragmentu Mgławicy w Kilu zwanego Mistyczną Górą (ang. *Mystic Mountain*) sfotografowanej przy użyciu Kosmicznego Teleskopu Hubble'a:



Rysunek 1. „Mistyczna Góra” fragment Mgławicy w Kilu. Źródło: Wikipedia<sup>1</sup>.

Oprócz obrazu mgławicy w bardzo wysokiej rozdzielczości, na zdjęciu widzimy kilka gwiazd w tle. Mają one charakterystyczny kształt: krążka otoczonego pierścieniami z wystającymi krzyżami, których ramiona są w przypadku każdej z gwiazd skierowane w tę samą stronę.

1

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d4/HH\\_901\\_and\\_HH\\_902\\_in\\_the\\_Carina\\_nebula\\_%28captured\\_by\\_the\\_Hubble\\_Space\\_Telescope%29.jp](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d4/HH_901_and_HH_902_in_the_Carina_nebula_%28captured_by_the_Hubble_Space_Telescope%29.jp)



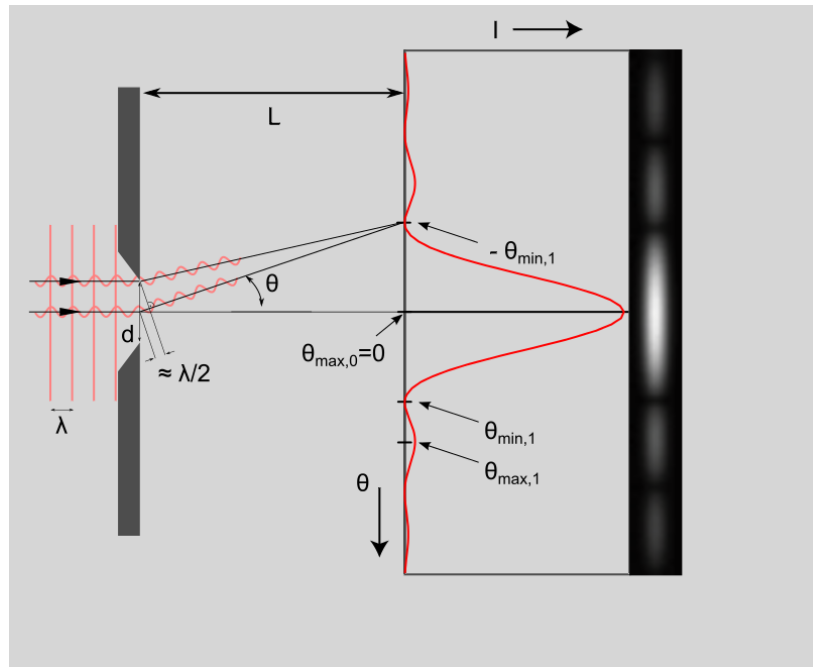
Rysunek 2. Powiększenie poprzedniego zdjęcia ukazujące obraz gwiazdy.

Zastanawiać może, czym są pierścienie i krzyże wokół gwiazd i dlaczego ramiona krzyży są skierowane zawsze w tę samą stronę? Dlaczego gwiazdy są tak duże i niewyraźne, podczas gdy w przypadku mgławicy widzimy znacznie subtelniejsze szczegóły? Gdyby zdjęcie ukazywało rzeczywistą powierzchnię gwiazdy musiałaby być ona bardzo duża, wielokrotnie większa od Słońca czy nawet całego Układu Słonecznego<sup>2</sup>. Gdyby obserwowana gwiazda była wielkości Słońca, powinna być dużo mniejsza - mniejsza niż najdrobniejsze szczegóły obserwowanej mgławicy. Powinna być jedynie jasnym małym punktem na zdjęciu. Mamy zatem powody, by nie ufać w to, że obraz ten przedstawia rzeczywisty wygląd gwiazdy. Co zatem przedstawia?

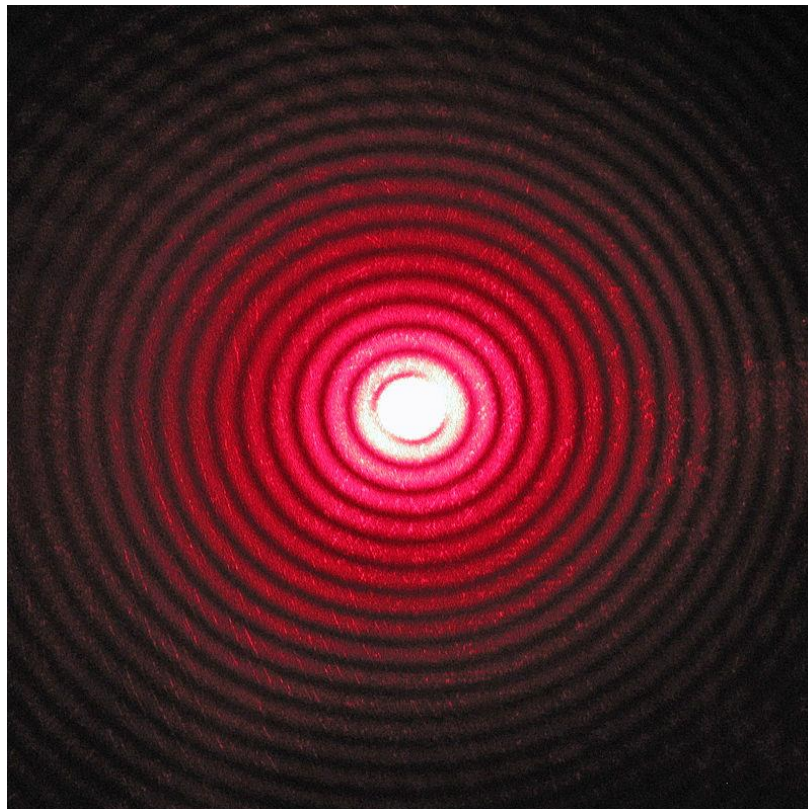
Wyjaśnienie tkwi w falowej naturze światła. Światło jest falą elektromagnetyczną. Jego właściwością jest to, że przy napotykanii na przeszkodę (na przykład na krawędź wlotu teleskopu) ugina się na niej. Tak ugięta fala nakłada się na fale, które rozprzestrzeniają się obok, modyfikując ich amplitudę i tworząc tzw. **obraz dyfrakcyjny**. Jeśli przepuścimy wiązkę światła z jednego punktu (np. od jednej gwiazdy) przez szczelinę (np. otwór teleskopu), wiązka światła ulegnie ugięciu (**dyfrakcji**) na szczelinie. Wiązka ta rzutowana na ekran nie będzie przedstawiała jednego punktu, ale skomplikowaną strukturę z krążkiem centralnym (tzw. **krążek Airy'ego**) i pierścieniami (tzw. **pierścieniami Newtona**). Pierścienie te (coraz słabsze) występują aż do końca ekranu. Im jaśniejsza gwiazda, tym więcej struktur może być zaobserwowanych. W przypadku obrazu Mistycznej Góry gwiazdy zarejestrowane na zdjęciu są tak jasne, że następuje przesylenie detektora ponad maksymalny poziom, dlatego widzimy wyraźny krążek centralny i kilka pierwszych pierścieni.

<sup>2</sup> W XVII stuleciu stanowiło to jeden z głównych argumentów przeciw teorii heliocentrycznej Kopernika. Na podstawie pomiarów ich tarcz rozmiary gwiazd musiałyby być absurdalnie duże, wielokrotnie większe od Słońca.





Rysunek 3. Schemat powstawania obrazu dyfrakcyjnego w wyniku przejścia fali o długości  $\lambda$  przez szczelinę o średnicy  $d$ . Wykres po prawej stronie przedstawia jasność uzyskanego obrazu dyfrakcyjnego w zależności od kąta padania wiązki  $\theta$ . Źródło: Wikipedia<sup>3</sup>.

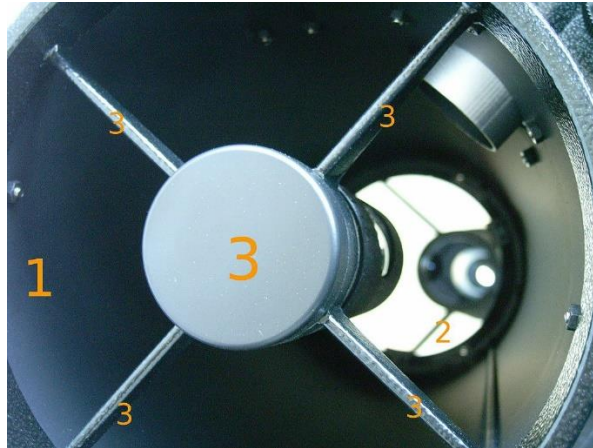


Rysunek 4. Struktura dyfrakcyjna powstała w wyniku przejścia pojedynczej wiązki światła z lasera przez okrągłą szczelinę. Źródło: Wikipedia<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/Single\\_Slit\\_Diffraction\\_First\\_Minimum.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/Single_Slit_Diffraction_First_Minimum.svg)

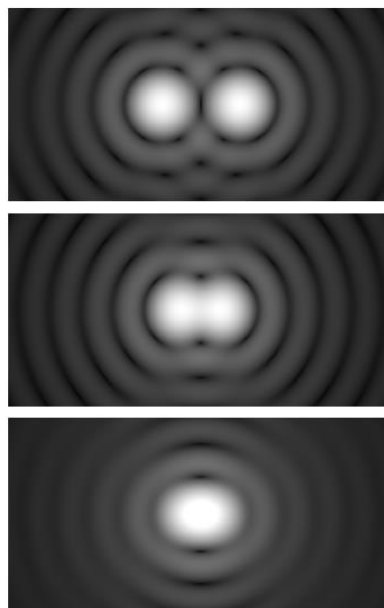
<sup>4</sup> [https://pl.wikipedia.org/wiki/Dyfrakcja#/media/File:Laser\\_Interference.JPG](https://pl.wikipedia.org/wiki/Dyfrakcja#/media/File:Laser_Interference.JPG)

W typowych teleskopach występują elementy krzyżowe, na których następuje dodatkowe ugięcie światła. Jest to właśnie przyczyna powstawania krzyży dyfrakcyjnych z ramionami skierowanymi zawsze w tym samym kierunku wokół jasných obiektów.



Rysunek 5. Wnętrze typowego teleskopu zwierciadlanego: 1) tuba, 2) lustro główne zbierające światło i odbijające je w kierunku lustra wtórnego, 3) lustro wtórne w ognisku lustra głównego wraz z podtrzymującą je krzyżową konstrukcją.  
Źródło: Wikipedia<sup>5</sup>.

Wykres zaprezentowany na Rysunku 3 tłumaczy fakt, że w teleskopie obraz punktu na niebie wcale nie odwzorowuje się w punkt, ale na bardzo rozbudowaną strukturę zwaną **funkcją rozmycia punktu** (ang. *Point Spread Function*, PSF). W przypadku dwóch blisko położonych na niebie punktów ich funkcje rozmycia będą się na siebie nakładały. Z tego powodu rozdzielenie obrazu dwóch bliskich obiektów jest utrudnione, a czasami niemożliwe. **Zdolność rozdzielcza** instrumentu jest parametrem, który mówi nam o tym, w jakiej minimalnej odległości kątowej na niebie mogą znajdować się punkty, by ich obraz nie zlewał się w jeden.



Rysunek 6. Ilustracja koncepcji zdolności rozdzielczej. Krążki Airy’ego wygenerowane przez dwa punktowe źródła światła widziane przez instrumenty o różnych zdolnościach rozdzielczych. Źródło: Wikipedia<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction\\_spike#/media/File:Newtonianscope-inside.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/Diffraction_spike#/media/File:Newtonianscope-inside.JPG)

<sup>6</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Angular\\_resolution#/media/File:Airy\\_disk\\_spacing\\_near\\_Rayleigh\\_criterion.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Angular_resolution#/media/File:Airy_disk_spacing_near_Rayleigh_criterion.png)

Zdolność rozdzielcza zależy od wielkości i kształtu szczeliny oraz długości fali świetlnej. Dla kołowej szczeliny, a taki zazwyczaj kształt ma wlot teleskopu, zdolność rozdzielcza (wyrażona w radianach) określona jest wzorem:

$$\vartheta = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D}$$

Zatem im krótsza długość fali  $\lambda$  i większa średnica (**apertura**) teleskopu  $D$ , tym kąt  $\vartheta$  jest mniejszy, a więc zdolność rozdzielcza większa.

Teoretycznie można by zbudować tak duży teleskop, że jego zdolność rozdzielcza byłaby wystarczająca do obserwowania szczegółów powierzchni planet pozasłonecznych. Jednak na przeszkodzie stoi ziemska atmosfera, która wpływa negatywnie na zdolność rozdzielczą naziemnych teleskopów. Turbulencje powietrza zaburzają obraz widoczny przez teleskop, rozmywając dodatkowo obraz obiektów punktowych. Teoria turbulencji atmosferycznych pozwala obliczyć maksymalną zdolność rozdzielczą w danych warunkach, ale jest dość skomplikowana. W praktyce wygodnym parametrem jest tzw. **seeing**, czyli maksymalna zdolność rozdzielcza możliwa w danych warunkach atmosferycznych określana w sposób doświadczalny. *Seeing* zależy od lokalizacji i warunków atmosferycznych, które mogą zmieniać się w ułamku sekundy. Najmniejszy seeing, jaki uzyskano z powierzchni Ziemi wynosił około 0,5 sekundy łuku. Co prawda istnieją pewne techniki pozwalające obserwatoriom naziemnym uzyskać jeszcze lepszą rozdzielczość, jednak są one kosztowne i możliwe do zastosowania tylko w specyficznych okolicznościach<sup>7</sup>.

## 2. Cel doświadczenia

Celem doświadczenia jest zbadanie wpływu zdolności rozdzielczej na możliwości badań astronomicznych, w szczególności badań powierzchni planet.

## 3. Opis wykonania doświadczenia

Doświadczenie konkursowe polega na wykonaniu kilku krótkich zadań rachunkowych oraz wyciągnięciu wniosków z otrzymanych wyników. Dla wszystkich zadań przyjmij długość fali świetlnej jako 500 nm (1 nm =  $10^{-9}$  m). Dla małych kątów, wartości funkcji sinus i tangens są w przybliżeniu równe argumentom:  $\sin \vartheta \approx \tan \vartheta \approx \vartheta$ , gdzie kąt  $\vartheta$  jest mierzony w radianach.

1) Kosmiczny Teleskop Hubble'a posiada lustro główne o średnicy 2,4 m. Oblicz teoretyczną maksymalną zdolność rozdzielczą tego teleskopu. Następnie oblicz, jakiej wielkości struktury w Mgławicy w Kilu (gdzie znajduje się „Mistyczna Góra”) można rozdzielić za jego pomocą. Mgławica w Kilu odległa jest o około 2300 parseków od Ziemi (1 parsek to  $3,087 \cdot 10^{16}$  m).

<sup>7</sup> Do takich technik należą: *lucky imaging* - wykonywanie wielu zdjęć na sekundę w celu znalezienia takich, w których *seeing* jest możliwie najmniejszy (możliwe tylko w przypadku jasnych obiektów); optyka aktywna - modyfikacja kształtu lustra tak, by pokrywała się z przebiegiem czoła fali zaburzonej przez turbulencje; optyka adaptacyjna - określenie parametrów turbulencji na podstawie sztucznego źródła kalibracyjnego (bardziej zaawansowana forma optyki aktywnej).

2) Jak duży musi być teleskop naziemny, by jego teoretyczna zdolność rozdzielcza była równa maksymalnemu praktycznemu *seeingowi*, czyli 0,5 sekundy łuku?

3) Dane na temat satelitów szpiegowskich zwykle są tajne. Z nieoficjalnych informacji wynika jednak, że amerykańskie satelity z serii *Keyhole* są bliskimi krewnymi teleskopu Hubble'a. Dysponują podobnymi instrumentami, z tą różnicą, że są zwrócone w kierunku Ziemi. Załóżmy, że taki satelita krąży na wysokości 200 km nad Ziemią. Jak duże szczegóły może on dostrzec, wykorzystując maksymalną zdolność rozdzielczą?

4) Minimalna odległość Marsa od Ziemi podczas tzw. Wielkiej Opozycji wynosi około 56 milionów km. Średnica Marsa ma zaś ok. 6800 km. Z ilu „punktów” (pikseli) składałby się obraz Marsa widziany przez teleskop naziemny, zakładając, że obserwujemy przy minimalnym możliwym *seeingu*? Które struktury można by dostrzec na powierzchni Marsa przez taki teleskop? Porównaj wyniki z wielkościami następujących struktur na Marsie: Doliną Marinerów (znaną wcześniej jako kanał Coprates), która jest olbrzymim kanionem o długości 4000 km i szerokości 200 km oraz wulkanem Olympus Mons (znanym wcześniej jako Nix Olympica) o średnicy około 600 km. Są to, obok czap polarnych, największe pojedyncze struktury na powierzchni Marsa.

5) Jowisz porusza się po orbicie w średniej odległości 780 mln km od Słońca. Orbita Ziemi oddalona jest zaś o 1 jednostkę astronomiczną, czyli około 150 mln km od naszej dziennej gwiazdy. Cztery największe księżyce Jowisza (zwane księżycami galileuszowymi od ich odkrywcy) to: Io (średnica 3643 km), Europa (średnica 3122 km), Ganimedes (średnica 5262 km) i Kallisto (średnica 4821 km). Z ilu pikseli składałby się obraz ich tarcz, jeśli obserwujemy je przez Bardzo Duży Teleskop (ang. *Very Large Telescope*, VLT) o średnicy 8,2 m? Jak zmieni się sytuacja po uruchomieniu Ekstremalnie Wielkiego Teleskopu (ang. *Extremely Large Telescope*, ELT), którego lustro pierwotne planowane jest na 39 m.

6) Z ilu pikseli składa się obraz Plutona obserwowany przez Kosmiczny Teleskop Hubble'a? Pluton krąży w średniej odległości 5,9 mld kilometrów od Słońca i ma średnicę ok. 2400 km.

Na podstawie własnych obliczeń wyciągnij wnioski na temat możliwości astronomii w zakresie kartografii planet Układu Słonecznego przed epoką sond kosmicznych i eksploracji kosmosu.