

Podstawy astrofotografii CCD

© Marek Bromirski 2002

1. Wprowadzenie

Astronomia należy niewątpliwie do najstarszych dyscyplin naukowych, zaś jej początki, jak to się ładnie mówi, giną w pomroce dziejów. To, co różni współczesnych miłośników rozgwieżdżonego nieba od naszych protoplastów sprzed tysięcy lat, to paradoksalnie motywacje prowadzenia obserwacji. Kiedyś były one ściśle praktyczne – umożliwiały odliczanie mijającego czasu, a także pozwalały na orientację podczas licznych plemiennych wędrówek. Obecnie uprawiamy astronomię ze względów poznawczych, a także w poszukiwaniu doznań estetycznych.

W rozwoju metod badania Wszechświata wyróżnia się zazwyczaj trzy podstawowe okresy: Pierwszy to etap obserwacji wizualnych realizowanych bez pomocy przyrządów zbierających światło. Słynne Stonehenge, oraz instrumenty Uług Bega, Kopernika i Tycho de Brahe są najbardziej charakterystycznymi wyznacznikami osiągnięć praktycznych tamtej epoki, którą zakończyło wynalezienie teleskopu. To właśnie dzięki jego użyciu całe pokolenia astronomów począwszy od Galileusza i Keplera ukształtowały nową wizję rzeczywistości, dokumentując swoje obserwacje odręcznymi szkicami. Rysunki te, niekiedy naiwne jak wizerunki komet autorstwa Heweliusza, zaś innym razem stanowiące prawdziwe dzieła sztuki, posiadały jednak pewną wspólną cechę – odzwierciedlały w równym stopniu wygląd obserwowanych obiektów, co poglądy i preferencje własne autora (vide kanały na Marsie). Sytuację zmieniło dopiero wynalezienie fotografii, której pierwsze astronomiczne zastosowania datowane są na lata 1839 – 40. To dzięki jej wykorzystaniu, w roku 1959, po raz pierwszy w dziejach poznaliśmy wygląd ciemnej strony Księżyca, a potem powierzchni Marsa i Wenus. Rezultaty misji sond Voyager, Wega i Giotto oraz Clementine, a także kosmiczna epopeja teleskopu Hubble'a stanowią kolejne potwierdzenia dominującego wpływu technik rejestracji i przetwarzania obrazów na kształt współczesnej astronomii.

Obecnie, każdej nocy posiadacze tysięcy małych i dużych teleskopów na całym świecie dołączają kamery do swoich instrumentów i mrużąc pod nosem zakłęcia mające zapewnić doskonały seeing wpatrują się w ekrany komputerów. Rezultaty osiągnięte przez tych, których magiczne formuły okazują się najskuteczniejsze można potem oglądać na stronach Sky & Telescope i innych periodyków, zaś pozostali wciąż poszukują swojej wielkiej szansy. Szał amatorskiej astrofotografii zdaje się omijać kraj między Tatrami i Bałtykiem, zaś obarczanie winą za ten stan rzeczy ogólnej mizerii finansów państwa niewiele wyjaśnia. Wiele znaczący jest natomiast fakt, że niektóre krajowe obserwatoria uniwersyteckie wręcz szczytą się prowadzeniem badań z wykorzystaniem sprzętu, który za granicą nie stanowi rewelacji w rękach amatorów (np. kamer ST-7 i SCT 12"). Ponadto, poza nielicznymi wyjątkami przedstawiciele środowisk naukowych nie wykazują chęci do współpracy z amatorami, chyba że chodzi o angażowanie ich do prowadzenia obserwacji przy użyciu własnych teleskopów. W stanie tym od dawna nie następują żadne zmiany – być może poprawa nastąpi w nadchodzących latach.

Niniejsze opracowanie miało stanowić początkowo materiał używany jedynie do celów własnych, lecz ostatecznie, po przereklamowaniu zostaje upublicznione w celu przybliżenia zainteresowanym zagadnień nowoczesnej astrofotografii realizowanej przy użyciu kamer półprzewodnikowych. Problematyka z tym związana bywa co prawda przedmiotem artykułów w

niektórych czasopismach specjalistycznych, ale są to na ogół opracowania dość ogólnikowe i nie w pełni spełniające wymogów właściwie rozumianej popularyzacji. Większa część przedstawionej w dalszym ciągu treści oparto na osobistych doświadczeniach praktycznych. Pozostaje mieć nadzieję, że prezentowany materiał okaże się pomocny choćby nielicznym z tych, którzy pierwsze eksperymenty w dziedzinie fotografii CDD mają już za sobą, zaś rozważających pytanie: „Czy aby na pewno warto?” zachęci do podążenia naszym śladem.

2. Fale i instrumenty optyczne

2.1 Światło

Jedna z licznych form energii zwana potocznie światłem bywa w zależności od potrzeb opisywana jako wiązka promieni (wyraźne konotacje geometryczne), fala elektromagnetyczna, bądź też strumień cząstek nazywanych fotonami. Żadna koncepcja nie pretenduje przy tym do miana kompleksowej, ponieważ jest w stanie odzwierciedlić jedynie wybrane aspekty procesów optycznych. Równoczesną użyteczność każdego z wymienionych podejść szczególnie docenia współczesna astronomia. Pierwsze z nich stanowi podstawę projektowania przyrządów obserwacyjnych, drugie umożliwia zrozumienie obrazu Wszechświata ewoluującego w wyniku oddziaływania energii z materią, trzecie zaś pozwala opisywać działanie wszystkich typów detektorów.

Związek pomiędzy długością fali świetlnej λ , jej częstością ν i prędkością propagacji c^1 dany jest zależnością:

$$\lambda \nu = c \quad (2.1)$$

Żółtozielone światło, na które szczególnie uczulone jest ludzkie oko cechuje częstotliwość ok. 540 THz (540×10^{12} Hz), a więc długość fali 550 nm (550×10^{-9} m). Wartości te są często używane jako podstawa przybliżonych obliczeń praktycznych.

Zjawiska, w których promień świetlny traktowany jest jako strumień energii mogą być poprawnie opisywane jedynie pod warunkiem uwzględnienia ich kwantowego charakteru. Wszelkie oddziaływanie modelowane jest wtedy jako procesy wymiany indywidualnych cząstek (fotonów), których energię opisuje równanie:

$$E_{\text{fotonu}} = \frac{hc}{\lambda}, \quad (2.2)$$

gdzie h stanowi stałą Plancka o wartości 6.62×10^{-34} Js. Jeśli rozważania dotyczą zagadnień z obszaru fizyki ciała stałego, częstą praktyką jest wyrażanie energii w elektronowoltach ($1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ J) - iloczyn hc przyjmuje wtedy wartość 1240 eVnm. Pojedynczy foton światła o barwie żółtozielonej dostarcza energii ok. 2.25 eV.

2.2 Teleskop

Teleskop jest przyrządem zaprojektowanym i wykonanym w celu odwzorowania odległych obiektów w sposób możliwie zbliżony do ideału. Cel ten może zostać osiągnięty, gdy promienie świetlne spotykające się w ognisku posiadają identyczną fazę. Ich maksymalne tolerowane przesunięcia ustala się zazwyczaj na poziomie $\lambda/4$, gdy dokładność wykonania przekracza $\lambda/5$ dominujące znaczenie zaczynają odgrywać inne efekty.

¹ $c = 2.99 \times 10^8$ m/s

Nawet w perfekcyjnie wykonanym teleskopie ($\lambda/8$ albo lepiej) obraz punktowego źródła światła (np. gwiazdy) posiada skończone wymiary. Za efekt ten odpowiada zjawisko dyfrakcji powodujące powstanie tzw. dysku Airy. Ten pochodzący z Irlandii matematyk i astronom jako pierwszy wykazał, że w przypadku idealnego przyrządu o kolistej aperturze dysk centralny zawiera 84% całkowitej energii promieniowania, zaś pozostałe 16% tworzy koncentryczne pierścienie o coraz większym promieniu i malejącej jasności.

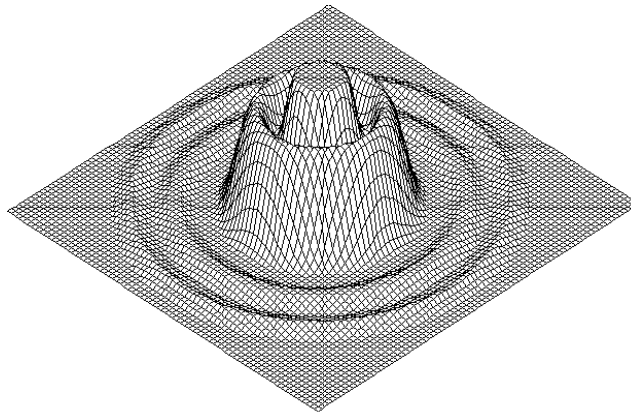


Rys. 2.1. Dysk Airy

Formalny opis odwzorowania obrazu w ognisku rzeczywistego przyrządu jest możliwy dzięki wykorzystaniu tzw. funkcji rozmycia punktu (ang. *Point Spread Function* - *PSF*), na którą nakłada się zazwyczaj warunek unormowania:

$$\iint_{-\infty}^{+\infty} PSF(x, y) dx dy = 1. \quad (2.3)$$

PSF określa rozkład intensywności oświetlenia w płaszczyźnie ogniskowej przyrządu skierowanego na punktowe źródło światła.



Rys. 2.2. Funkcja PSF

Jakkolwiek ze względu na trudności pomiarowe znaczenie funkcji PSF jest czysto teoretyczne, to jednak spełnia ona fundamentalną rolę w procesie powstawania obrazów nie tylko gwiazd, ale i mgławic, galaktyk i innych obiektów rozciągniętych. Teleskop przekształca bowiem każdy z nieprzeliczalnych docierających do niego frontów falowych w pojedynczą PSF, których superpozycja oddziałując na przetwornik generuje ostateczny wynik procesu obserwacji. Dlatego właśnie rzeczywistą wartość użytkową każdego przyrządu odzwierciedla wymiar dysku Airy wyrażony w mierze kątowej (ν_{Airy}), zaś jego rozmiary liniowe (d_{Airy}) limitują jakość rejestrowanych obrazów. Wymienione parametry spełniają następujące zależności:

$$\mathcal{G}_{Airy} = 2.44 \frac{\lambda}{A} \text{ [radiany]} \quad (2.4)$$

$$d_{Airy} = 2.44 \lambda \frac{F}{A} = 2.44 \lambda N, \quad (2.5)$$

w których: λ – długość fali,
 A – rozmiary apertury,
 F – ogniskowa teleskopu,
 N – światłosiła.

Jako wniosek z zależności (2.4) i (2.5) wynika w sposób oczywisty:

$$d_{Airy} = \mathcal{G}_{Airy} F, \quad (2.6)$$

wiążąca liniowo parametry d_{Airy} i ν_{Airy} .

Uwaga:

W celu zamiany miary kątowej w radianach na stopnie wystarczy pomnożyć wynik przez 53.7, zaś odpowiednie współczynniki dla minut i sekund kątowych wynoszą odpowiednio 3438 oraz 206265.

Centralny dysk Airy nie jest tworem jednorodnym, bowiem występuje w nim wyraźnie zaznaczone jądro o podwyższonej jasności. Zawiera ono połowę dostarczonej przez przyrząd energii, zaś jego średnicę wyznacza się z kryterium spadku intensywności oświetlenia do połowy maksymalnej wartości rejestrowanej w centrum. Jest to kolejny istotny parametr określany mianem FWHM (ang. *Full Width at Half Maximum*). Średnica kątowa tak zdefiniowanego rdzenia funkcji PSF wyraża się zależnością:

$$\mathcal{G}_{FWHM} = 1,02 \frac{\lambda}{A} \text{ [radiany]}, \quad (2.7)$$

której prostą konsekwencją jest:

$$d_{FWHM} = \mathcal{G}_{FWHM} F. \quad (2.8)$$

W ostatniej zależności d_{FWHM} stanowi wartość FWHM obrazu idealnego punktu świetlnego. Parametr ten stanowi najbardziej realistyczne odniesienie do najmniejszych szczegółów obserwowanego obiektu, które mogą zostać zarejestrowane przez używany detektor.

Jako przykład ilustrujący praktyczne znaczenie przedstawionych informacji rozważmy obserwację punktowego źródła fal o długości $\lambda = 550 \text{ nm}$, realizowaną z wykorzystaniem teleskopu o średnicy $A = 200 \text{ mm}$ i światłosieli $f/10$. Otrzymujemy kolejno:

$$\mathcal{G}_{Airy} = 2.44 \frac{550 \times 10^{-9}}{200 \times 10^{-3}} \approx 6.7 \times 10^{-6} \text{ radianów} \approx 1.38''$$

oraz:

$$d_{FWHM} = 1.02 \times 550 \times 10^{-9} \text{ m} \times 10 \approx 5.61 \times 10^{-6} \text{ m}.$$

Porównanie otrzymanej wartości ν_{Airy} z rozproszeniem wprowadzanym przez typowy w naszych warunkach seeing (ok. 2'') dowodzi, że to on właśnie decydować będzie najczęściej o odwzorowaniu na obrazie najmniejszych szczegółów. Natomiast wyznaczona średnica d_{FWHM} odpowiada niemal dokładnie wielkości pojedynczego piksela kamery Vesta ($d_{pix} = 5.6 \mu\text{m}$).

3. Detektory promieniowania widzialnego

Rozdział poświęcono trzem zasadniczym rodzajom detektorów wykorzystywanych do rejestracji obrazów. Dwa pierwsze z nich, tj. oko oraz kliszę fotograficzną potraktowano w sposób pobieżny, uwzględniając tylko najważniejsze informacje umożliwiające porównanie z przyrządami CCD. Również charakterystyka tych ostatnich nie pretenduje do miana wyczerpującego opisu – w jej ramach przedstawiono wyłącznie najważniejsze dane techniczne niezbędne dla samodzielnego rozwiązywania problemów obliczeniowych. Bardziej szczegółowe dane dotyczących poruszanych zagadnień dostępne są w licznych pozycjach literaturowych.

3.1 Oko gatunku *Homo Sapiens*

Elementami, które umożliwiają widzenie otaczającego nas świata są: źrenica, soczewka i siatkówka połączone w nierozdzieloną całość przez tzw. ciało szkliste. Proces detekcji, polegający na przemianach chemicznych związku nazywanego rodopsyną, realizuje siatkówka, a ściślej tworzące ją wyspecjalizowane komórki. Finalne produkty wywołanego światłem rozpadu rodopsyny pobudzają zakończenia (synapsy) licznych neuronów, które po wstępnym przetworzeniu dostarczają obraz za pośrednictwem nerwu wzrokowego wprost do mózgu.

Światło dociera do wnętrza oka poprzez źrenicę – element odpowiadający przesłonie obiektywów fotograficznych, którego otwór w zależności od poziomu oświetlenia może zmieniać się od 0.6 do ok. 6 ÷ 8 mm (wartość maksymalna jest cechą osobniczą). Dzięki źrenicy apertura wejściowa oka może zmieniać się w stosunku jak 1:10, co umożliwia wstępne, blisko stukrotne różnicowanie natężenia odbieranego światła. Właściwość ta nazywana jest adaptacją.

Soczewka stanowi element o ogniskowej ok. 16 mm, która może zmieniać się podczas obserwacji przedmiotów położonych blisko i w oddali. Działanie to realizują wyspecjalizowane mięśnie modyfikujące promień krzywizny soczewki, stanowiącej w istocie wypełniony cieczą elastyczny pojemnik o przezroczystych ścianach. Możliwość zmian otworu źrenicy oraz ogniskowej soczewki sprawiają, że wypadkowa światłości ludzkiego oka przyjmuje wartości z zakresu od $f/2.3$ do $f/26$.

Bezpośrednia detekcja obrazu zachodzi na wyścielającej dno oka siatkówce. Ponieważ natura nie przewidziała możliwości posługiwania się przyrządami optycznymi, umieszczenie siatkówki bezpośrednio w ognisku głównym teleskopu jest z oczywistych względów niemożliwe. Siatkówki po rozprostowaniu stanowi kolistą strukturę o średnicy zbliżonej do 40 mm, której składnikami są komórki wyspecjalizowane w detekcji światła – ich ilość szacowana jest na ok. 130 milionów. Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje komórek detekcyjnych:

- Czopki – są wrażliwe na barwy, ale funkcjonują poprawnie jedynie przy dużym natężeniu światła. Komórki te prawie wcale nie występują w regionach siatkówki odległych od osi optycznej oka, ponieważ przy silnym oświetleniu dopływ światła do tego obszaru odcina silnie zężająca się źrenica.
- Pręciki – komórki o niskiej wrażliwości na barwy, występujące w liczbie ok. 120 milionów niemal równomiernie na całej powierzchni siatkówki. Ten rodzaj elementów umożliwia rejestrację słabych bodźców świetlnych, co sprawia, że jest niezwykle przydatny w półmroku.

Liczbę czopków ocena się na ok. 7 milionów - w regionie maksymalnie nimi nasyconym są upakowane z gęstością rzędu 1000 w każdym milimetrze kwadratowym. Średnica pojedynczej komórki tego rodzaju posiada wartość ok. 2 μm , a więc jest zbliżona do granicy wyznaczonej przez dyfrakcję fal świetlnych dostarczanych przez soczewkę. Wykorzystanie czopków sprawia, że rozdzielczość oka w optymalnych warunkach wynosi ok. 1 minuty kątowej.

Zarówno czopki, jak i pręciki posiadają niezwykle wysoką, bo sięgającą 100% wydajność przetwarzania pobudzeń świetlnych. Jednakże już na wstępie prawie połowa energii docierającej do oka jest w sposób nieużyteczny pochłaniana przez położone przed detektorami komórki nerwowe. Neurony te są jednak niezbędne ponieważ pełnią istotną funkcję wstępnego przetwarzania sygnału. Informują one jednostki wyższego stopnia hierarchii o wystąpieniu bodźca pod warunkiem, że został zarejestrowany równocześnie przez kilka sąsiednich komórek. Jakkolwiek mechanizm koincydencji redukuje szum wywołany przez przypadkowe pobudzenia termiczne, powoduje on wraz z wspomnianym wcześniej przesłaniem spadek wynikowej wydajności kwantowej siatkówki do ok. 15%. Pomimo to łączne wykorzystanie czopków i pręcików sprawia, że oko jest w stanie rejestrować obrazy przy oświetleniu zmieniającym się blisko 10^7 razy. Finalnie, efekt ten, określany mianem adaptacji siatkówki, w połączeniu ze zmianami otworu źrenicy zapewnia poprawne widzenie obiektów o jasności z zakresu $1:10^9$ minimalnej wartości odniesienia.

Oko reaguje na światło o długości fali od ok. 400 do 700 nm, zaś położenie maksimum jego czułości zależy od poziomu oświetlenia. Przy jasnym świetle najefektywniej wykrywane są fale 550 nm, w półmroku zaś 510 nm. Efektywny czas integracji sygnału świetlnego przez siatkówkę jest relatywnie krótki i nie przekracza 200 ms. Pomimo to, w warunkach pełnej adaptacji wzroku do ciemności oko jest w stanie rejestrować pobudzenie wywołane odbiorem ok. 10 fotonów w czasie jednego cyklu przetwarzania, co odpowiada mocy sygnału 10^{-17} W. Przy słabych oświetleniach jesteśmy w stanie wykryć i poprawnie ocenić 1% zmianę jasności obserwowanego obiektu.

3.2 Klisza fotograficzna

Największe odkrycia astronomiczne dokonane w latach od 1880 do 1970 zawdzięczamy wykorzystaniu różnorodnych detektorów, których wspólną cechą stanowi użycie składnika w postaci emulsji światłoczułej. W wykonaniu profesjonalnym element rejestrujący stanowi płyta szklana pokryta żelatyną zawierającą drobnoziarnistą zawiesinę soli srebra, zaś amatorzy korzystają na ogół z rozwiązań, w których podłożem jest cienka plastikowa folia.

W odróżnieniu od oka, którego czas integracji nie może być kształtowany w sposób dowolny, naświetlanie klisz może trwać przez długi okres. Oznacza to kumulację energii świetlnej, a więc możliwość obrazowania obiektów o ekstremalnie niskiej jasności. Ponadto pojedyncza fotografia zawiera informacje o dużej liczbie obiektów, a także może być przechowywana przez długi okres, co pozwala na rozłożenie procesu opracowywania zarejestrowanych danych w czasie. Choć dokumentacja zdjęciowa uwolniła astronomię od czynnika nieobiektywności wynikającego z właściwości procesu postrzegania zmysłowego, wśród jej wad wymieniane są liczne błędy systematyczne. Są one związane głównie ze słabą powtarzalnością procesów produkcji i finalnej obróbki materiałów światłoczułych. Mimo rozwoju innych technik, renomowane firmy dostarczające światłoczułych materiałów fotograficznych dla potrzeb astronomii ciągle nie rezygnują z rywalizacji o klientów, dla których najważniejsza jest powtarzalność parametrów. Wymagania dotyczą w szczególności optymalnej wielkości ziarna (ok. $1\ \mu\text{m}$) oraz ich właściwego kształtu gwarantującego maksymalną czułość.

Proces rejestracji fotograficznej rozpoczyna się w chwili, gdy foton o energii większej niż ok. 2 eV dociera do ziarna bromku srebra (AgBr) wywołując powstanie subtelnego defektu jego struktury krystalicznej. Defekt ten może się dalej rozwijać obejmując coraz większą liczbę sąsiadujących cząstek, może też zanikać, co skutkuje tzw. „uzdrowieniem” ziarna. Rzecz jasna drugi z wymienionych efektów jest niekorzystny ponieważ oznacza stratę części odebranej energii. Jeśli jednak pojedyncze ziarno rejestruje w ustalonym czasie kilka lub kilkanaście fotonów, sumaryczne oddziaływanie wywołanych tym defektów powoduje powstanie tzw.

centrum wywoławczego, które już nie może zniknąć. Po umieszczeniu naświetlonej kliszy w roztworze wywoływacza, centra wywołują reakcje redukcji soli do czystego srebra. Powstanie pojedynczego ziarna zawierającego ok. 10 miliardów atomów umożliwia odebranie $3 \div 5$ fotonów. Klisza funkcjonuje więc jako specjalnego typu wzmacniacz reakcji fotochemicznych, za którego nieliniową charakterystykę odpowiadają następujące zjawiska:

- Jeśli w danym ziarnie powstało już centrum wywoławcze, to kolejne fotony niezależnie od ich liczby nie są w stanie spowodować zmian w jego stanie końcowym.
- Emulsja jest tworem trójwymiarowym, w którym jedne ziarna przesłaniają inne, uniemożliwiając ich skuteczną aktywację.
- „Uzdrawianie” ziaren sprawia, że klisza bardziej efektywnie rejestruje taką samą ilość fotonów w krótkim czasie niż jeśli docierają w przez długi okres. Rezultatem jest słabsze obrazowanie obiektów o niskiej jasności.
- „Ziarnistość” - powstaje, gdy w procesie produkcyjnym powstają równomierności rozkładu aktywnych drobin na powierzchni płyty.

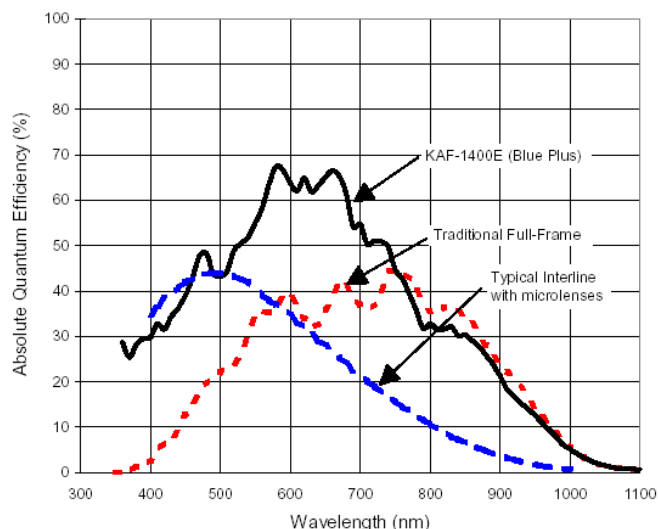
Zwykła klisza używana w astrofotografii (tzw. nieuczulona) reaguje na światło o długościach fal mniejszych niż 550 nm, zaś maksymalną efektywność uzyskuje w pobliżu 430 nm. Poszerzenie zakresu roboczego do ok. 600 nm zapewniają klisze ortochromatyczne, zaś osiągnięcie progu 700 nm staje się możliwe dzięki wersji określanej mianem panchromatycznej.

Pomimo licznych wad, a w tym relatywnie niskiej efektywności kwantowej o wartościach z przedziału od 0.5 do 4%, materiały fotograficzne pozostają jednym z głównych narzędzi współczesnej astronomii. Sprawia to w pierwszym rzędzie ich duża powierzchnia robocza ułatwiająca realizację systematycznych przeglądów nieba oraz innych zadań, w których ważna jest wielkość pola obserwacji. Dość powiedzieć, że klatka filmu 35 mm posiada rozmiary 24×36 mm, zaś jej rozdzielczość wynosi $5 \div 20 \mu\text{m}$. Łatwo obliczyć, że pojedyncze zdjęcie tego formatu w postaci elektronicznej zawiera ok. 10 milionów elementarnych pikseli obrazowych.

3.3 Przyrządy CCD

Typowa matryca obrazowa CCD (ang. *Charge Coupled Device*) stanowi regularną strukturę złożoną z kondensatorów MOS (ang. *Metal Oxide Semiconductor*), których podłożem jest pojedynczy płatek czystego krzemu. Przed rozpoczęciem ekspozycji, czyli procesu rejestracji, każda komórka otrzymuje pewien ładunek dodatni, a następnie wprowadza się ją w stan elektrycznej izolacji od otoczenia. Rejestrowane fotony oddziałują z siatką krystaliczną podłoża przenosząc elektrony z niskoenergetycznego pasma walencyjnego na wyższe poziomy odpowiadające przewodnictwu. W każdym takim akcie kondensator traci część pierwotnego ładunku, zaś finalny poziom jego rozładowania zależy liniowo od liczby otrzymanych fotonów. Po zakończeniu ekspozycji ładunki pozostałe w komórkach matrycy są sekwencyjnie przesyłane na wejście odpowiedniego wzmacniacza, skąd trafiają do przetwornika A/C. Cyfrowa reprezentacja obrazu uzyskanego w procesie rejestracji może być dalej przetwarzana i przechowywana w formie elektronicznej.

Parametry użytkowe detektorów CCD wynikają bezpośrednio z ich technicznej konstrukcji. Przerwa energetyczna krzemu pomiędzy pasmami walencyjnym i przewodnictwa wynosi ok. 1.1 eV, stąd matryca może rejestrować jedynie fotony o długościach fal mniejszych od 1100 nm. Z drugiej strony pasma czułość komórek matrycy ogranicza fakt, że zdolność refleksyjna krzemu rośnie proporcjonalnie do częstotliwości promieniowania. Powoduje to, że fotony o zbyt dużych energiach nie wnikają w materiał podłoża, co uniemożliwia ich rejestrowanie. Przyrządy CCD wykazują największą efektywność w zakresie długości fal od ok. 500 do 900 nm, fakt ten potwierdzają wykresy przedstawione na poniższym rysunku:



Rys. 3.1. Absolutna efektywność kwantowa w funkcji długości fali

Istotną właściwość elementów rejestrujących CCD stanowi liniowa zależność sygnału wyjściowego od liczby zarejestrowanych fotonów. Prosta proporcjonalność obowiązuje do momentu, w którym ładunek kondensatora zostaje zmniejszony do ok. połowy pierwotnej wartości.

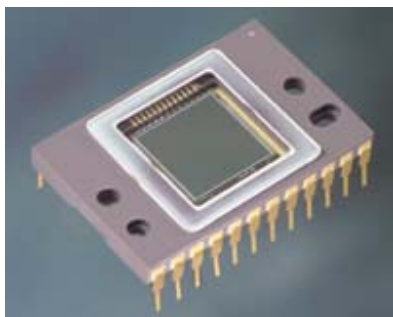
Typowe rozmiary komórek zawierają się w zakresie od 5 do 25 μm . Dolną granicę wyznaczają trudności technologiczne oraz fakt, że kondensatory o małej powierzchni czynnej nie otrzymują w jednostce czasu zbyt wielu fotonów, a także nie są w stanie przechowywać dużego ładunku. Oznacza to, że detektory tej klasy (a należy do nich przetwornik Vesty) szybko wchodzi w stan nasycenia co uniemożliwia swobodne wydłużanie czasu ekspozycji. Natomiast głównym ograniczeniem na górną granicę wielkości komórki jest rosnąca powierzchnia matrycy, a więc powiększająca się szansa na występowanie defektów. Zmniejsza to istotnie tzw. uzysk struktur w procesie produkcyjnym. Wybrane parametry techniczne detektorów niektórych kamer astrofotograficznych zawiera zestawienie:

Tablica 3.1. Parametry techniczne kamer CCD

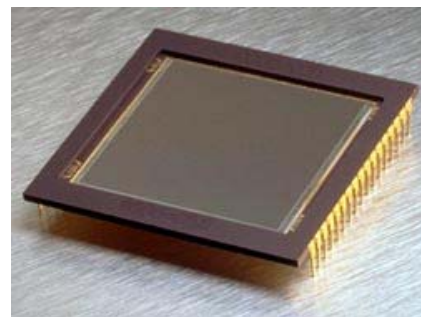
Model	CCD	Wiersze	Kolumny	Piksele	Piksel [μm]	Temp. pracy	A/D
ST-4	TI TC211	192	165	31680	13.75 x 16	-25	8
ST-5C	TI TC255	320	240	76800	10 x 10	-25	16
ST-7	Kodak KAF-400E	765	510	390150	9 x 9	-25	16
ST-6B	TI TC241	375	241	90375	23 x 27	-55	16
ST-8	Kodak KAF-1600E	1530	1020	1560600	9 x 9	-25	16
MX5	Sony ICX055	500	290	145000	9.8 x 12.6	-30	16
MX5	Sony ICX055	500	290	145000	9.8 x 12.6	-30	12
HX5	Sony ICX084AL	659	494	325546	7.4 x 7.4	-30	16
MX916	Sony ICX083AL	376	290	109040	23.2 x 22.4	-30	16
AP1	Kodak KAF-0400	768	512	393216	9 x 9	-40	14
KX1E	Kodak KAF-0400E	768	512	393216	9 x 9	-35	14
KX14E	Kodak KAF-1400E	1300	1028	1336400	6.8 x 6.8	-35	14

KX-260E	Kodak KAF-0260	512	512	262144	20 x 20	-35	14
AP2	Kodak KAF1600	1536	1024	1572864	9 x 9	-40	14
KX2E	Kodak KAF1600	1536	1024	1572864	9 x 9	-35	14
AP7b	SITe SIA502AB	512	512	262144	24 x 24	-55	16
AP7p	SITe SIA502AB	512	512	262144	24 x 24	-55	16
AP4	Kodak KAF-4200	2048	2048	4194304	9 x 9	-40	14
KX4	Kodak KAF-4200	2048	2048	4194304	9 x 9	-35	14
AP6	Kodak KAF-1000	1024	1024	1048576	24 x 24	-40	14
AP8	SITe SIA003AB	1024	1024	1048576	24 x 24	-55	16
AP9	Kodak KAF-6300	3072	2048	6291456	9 x 9	-40	16
AP10	Thom THX7899M	2048	2048	4194304	14 x 14	-40	16
Vesta	zależnie od wersji	640	480	307200	5.6 x 5.6	otoczenia	8

Maksymalne rozmiary dostępnych obecnie rynkowo przetworników CCD wynoszą 8192×8192 piksele, a wielkość ta systematycznie rośnie. Niefortunnie tak się składa, że koszt matrycy z jej wielkością wiąże zależność wykładniczą, stąd cena największych przyrządów osiąga nierzadko poziom 20 000 \$. Różnice pomiędzy przetwornikami profesjonalnymi i przeznaczonymi do zastosowań ogólnych nie ograniczają się zresztą jedynie do ich wielkości i ceny. Podczas, gdy rozwiązania stosowane w popularnych aparatach cyfrowych mogą być odczytywane z częstotliwością ok. 50 Hz, matryce wysokiej jakości są w stanie dostarczać wyników w tempie nie większym niż 10 000 odczytów pojedynczych komórek na sekundę. Relatywnie niska szybkość pozyskiwania danych (transfer całego obrazu może trwać nawet 45 s) jest w tym przypadku związana z potrzebą osiągania wysokiej dokładności. Wygląd typowych wykorzystywanych w astrofotografii układów CCD firmy Kodak przedstawiają poniższe fotografie:



KAF-0261E (512x512)



KAF-16801E (4096 x4096)

Jakkolwiek komórki rejestrujące nowoczesnych przyrządów półprzewodnikowych cechuje wysoka jednolitość parametrów użytkowych, nie istnieje proces technologiczny mogący zapewnić całkowitą uniformizację ich parametrów. W efekcie ilość elektronów generowanych przez poszczególne piksele pod wpływem identycznego oświetlenia jest różny w zależności od egzemplarza, a tym samym proces próbkowania posiada charakter losowy.

Liczba wolnych elektronów n_e generowana przez pojedynczą komórkę pobudzoną określoną ilością kwantów promieniowania n_f stanowi parametr określany mianem efektywności kwantowej Q , którą definiuje formalnie zależność:

$$Q = \frac{n_e}{n_f} \quad (3.1)$$

Parametr Q stanowi również zmienną losową, zaś w katalogach podawana jest jego wartość średnia \bar{Q} wyznaczona dla dużej liczby aktów generacji. Jeżeli na pojedynczą komórkę matrycy CCD przypada średnio w ciągu jednej sekundy strumień np. 1000 fotonów, to ich liczba rejestrowana w kolejnych przedziałach czasowych przez 68% czasu ekspozycji będzie wartością z przedziału $1000 \pm \sqrt{1000}$, a więc 1000 ± 32 . Znajomość średniej efektywności kwantowej \bar{Q} pozwala oszacować ilość wygenerowanych elektronów jako należącą do przedziału:

$$1000 \times \bar{Q} \pm \sqrt{32 \times \bar{Q}}$$

Jeżeli zatem wartość $\bar{Q} = 40\%$, to uzyskana na wyjściu ilość elementarnych ładunków będzie wynosić 40 z niepewnością ± 13 elektronów.

Statystyczne fluktuacje procesów generacji ładunków nie są jedynymi przyczynami nieprzewidywalnych zmian sygnału wyjściowego, bowiem w ogólności obraz odczytany w formie elektronicznej z wyjścia przetwornika CCD tworzą następujące składniki:

- stałe napięcie podkładowe (ang. *bias voltage*);
- systematyczne i losowe zmiany napięcia podkładowego;
- temperaturowa, systematyczna i losowa składowa prądu spoczynkowego (ang. *dark current*);
- losowy sygnał zakłócający wprowadzany przez wzmacniacz odczytu;
- sygnał użytkowy wygenerowany w procesie detekcji rejestrowanych fotonów.

Mimo, że poza ostatnią wszystkie składowe stanowią sygnały zakłócające, możliwość wielokrotnego korzystania z tego samego elementu rejestrującego pozwala na skuteczną eliminację szumów o charakterze stałym i systematycznym. W efekcie, po odpowiedniej kalibracji, przetwornik CCD dostarcza informacji ściśle odzwierciedlających właściwości obserwowanego obiektu.

4. Parametry obrazu

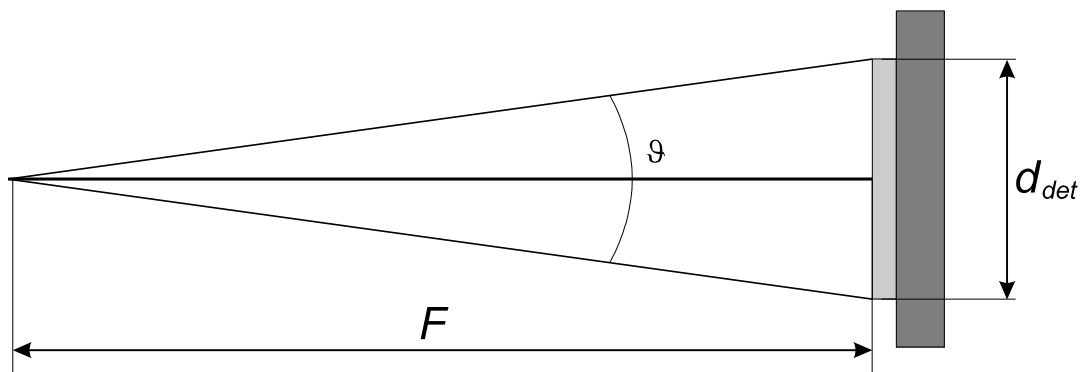
Czynnikami, które w decydującym stopniu wpływają na ostateczny efekt każdej sesji zdjęciowej są rozmiary pola widzenia oraz pojedynczego piksela matrycy CCD wyrażone w mierze kątowej. Pierwszy z wymienionych parametrów musi odpowiadać wielkości fotografowanego obiektu, tak by optymalnie zmieścić go w pojedynczym kadrze, drugi wyznacza minimalny rozmiar rejestrowanych szczegółów.

4.1 Pole widzenia

Zakładając, że liniowy rozmiar detektora CCD w rozpatrywanej osi wynosi d_{det} , zaś jego środek pokrywa się z osią optyczną teleskopu, można zapisać wyrażenie na rozciągłość kątową pola widzenia \mathcal{F}_{FOV} w postaci:

$$\mathcal{F}_{FOV} = 2 \arctan\left(\frac{d_{det}}{2F}\right) \quad (radiany), \quad (4.1)$$

której uzasadnienie przedstawiono na poniższym rysunku:



Rys. 4.1. Geometria układu rejestracji

Posiadacz teleskopu oraz kamery może wykorzystać zależność (4.1) w celu wyznaczenia rozmiarów pola widzenia zestawu w obydwu osiach. I tak np., zakładając, że dysponujemy przyrządem o ogniskowej $F = 1$ m i kamerą, której matryca posiada rozmiary 6.4×4.8 mm, można ustalić, że pojedynczy kadr obejmuje (w przybliżeniu) obszar $22' \times 16'30''$. Wynik porównany z danymi, jakich dostarczy dowolny atlas nieba pozwoli zorientować się, których z uwzględnionych w nim obiektów mogą być zarejestrowane w pojedynczym kadrze. Zależność (4.1) może być bez żadnych zmian wykorzystana również do wyznaczenia kątowych rozmiarów pojedynczego piksela matrycy rejestrującej. Obliczenia upraszcza reguła, w myśl której należy podzielić rozmiar piksela wyrażony w mikrometrach przez ogniskową w milimetrach i pomnożyć wynik przez 206.

4.2 Reguły próbkowania

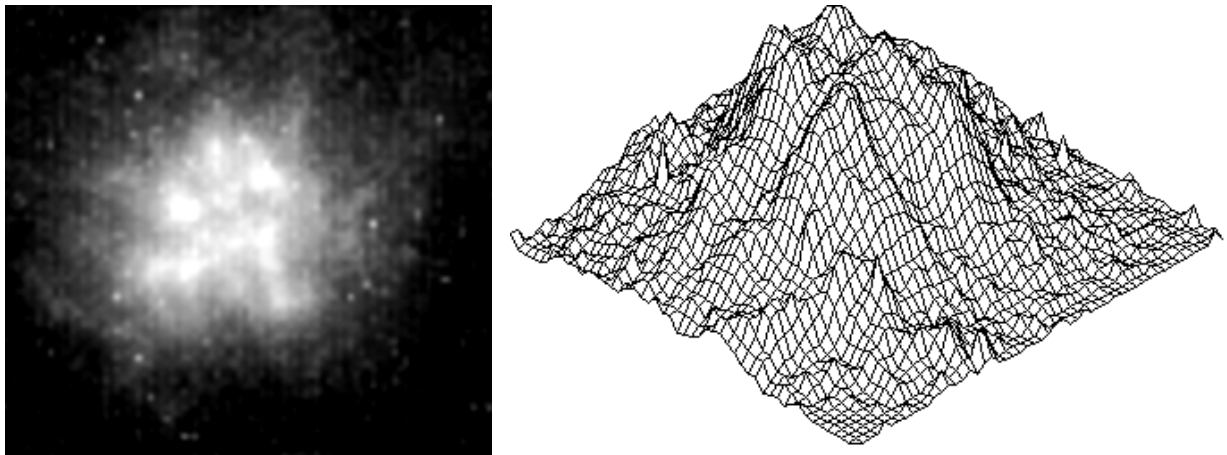
Dowolny z używanych detektorów nie tworzy obrazów obiektu lecz jedynie dokonuje ich próbkowania. Szczególnie prosto działanie to realizuje matryca CCD – pojedynczy element obrazu czyli piksel jest reprezentowany przez liczbę elektronów wyzwolonych przez fotony zarejestrowane w trakcie ekspozycji. Wynika stąd, że obraz tworzy regularna macierz liczb odzwierciedlających intensywność oświetlenia każdej komórki. W zależności od rodzaju użytego przetwornika A/C wartości te są zapisywane przy użyciu odpowiedniej liczby bitów, należącej zwykle do przedziału $8 \div 16$.

Oznaczenie przez n średniej liczby elektronów generowanych w rozpatrywanej komórce pod wpływem oświetlenia o ustalonej intensywności pozwala określić przedział, w którym standardowo znajdzie się wynik pojedynczej integracji - wartość ta wynosi $n \pm \sqrt{n}$. Ponieważ pojedyncza komórka matrycy CCD może maksymalnie przechować (zależnie od rodzaju przetwornika) od 30 000 do 500 000 elementarnych ładunków, największa niepewność jaką obarczony jest pojedynczy pomiar przyjmuje wartości od ok. 173 do 707 elektronów. Trzeba również uwzględnić, że źródłem dodatkowego szumu jest proces odczytu – powiększa on zwykle niepewność o wartość z przedziału $6 \div 50$ elektronów.

Charakterystyczny wymiar najmniejszych szczegółów widocznych na uzyskanym obrazie definiuje wprowadzona wcześniej funkcja PSF, która w przypadku poprawnej kolimacji przyjmuje postać dysku Airy. Jednakże samo uzyskanie doskonałego obrazu to dopiero połowa sukcesu. W trakcie procesu próbkowania realizowanego przy wykorzystaniu dowolnego przetwornika należy bowiem zapewnić wypełnienie tzw. kryterium Nyquista. Orzeka ono, że całkowite odtworzenie pierwotnej treści jest możliwe pod warunkiem, że częstość próbkowania jest co najmniej dwukrotnie większa od maksymalnej częstości zawartej w przekazie.

Powyższe kryterium odniesione do fotografii oznacza, że piksel matrycy CCD powinien posiadać rozmiary liniowe dwa razy mniejsze niż średnica dysku Airy (d_{FWHM}) uzyskiwanego na wyjściu teleskopu. Proces rejestracji prowadzony w tych warunkach określany jest mianem próbkowania krytycznego, dla podkreślenia faktu, że dowolnie małe powiększenie wielkości piksela doprowadzi do utraty części obserwowanych szczegółów, czyli tzw. niedopróbkowania. Efekt ten jest niekiedy wprowadzany celowo np., kiedy wymaga się objęcia kadrem większego obszaru. Jeśli natomiast parametr d_{FWHM} przyjmuje wartości większe niż łączny rozmiar dwóch pikseli matrycy występuje zjawisko nadpróbkowania. W przypadku rejestracji jasnych obiektów gwarantuje ono, że żaden szczegół nie zostanie pominięty nawet jeśli niektóre komórki rejestrujące nie funkcjonują poprawnie, ale gdy natężenie światła jest ekstremalnie niskie prowadzi do nieefektywnego rozproszenia cennej energii pomiędzy wiele pikseli.

Gdyby nasz teleskop funkcjonował np. na Księżycu przedstawione dotąd uwarunkowania stanowiłyby jedyne ograniczenia jakości rejestrowanych obrazów. Jednakże w warunkach ziemskich oddziaływanie atmosfery powoduje występowanie złożonych efektów uwzględnianych zbiorczo jako tzw. seeing. Jego występowanie nie tylko totalnie rozmywa pierwotny kształt PSF ale również utrudnia poprawne ustawienie ostrości, ponieważ obraz gwiazdy zmienia chaotycznie swoje położenie w sposób przedstawiony na poniższej ilustracji:



Rys. 4.2. Rzeczywisty obraz gwiazdy w złych warunkach obserwacyjnych

Niekorzystne efekty sprawiają, że średnica rzeczywistego dysku dyfrakcyjnego d_{PSF} staje się wielokrotnie większa niż idealna, matematycznie wyznaczona struktura Airy'ego (d_{FWHM}). Spostrzeżenie to zapisujemy formalnie:

$$d_{PSF} \geq d_{FWHM} \quad (4.2)$$

Ponieważ krytyczne próbkowanie wymaga pokrycia obrazem dyfrakcyjnym d_{PSF} dwóch pikseli o rozmiarze d_{pix} każdy, czyli:

$$2d_{pix} = d_{PSF}, \quad (4.3)$$

możliwe jest obecnie wyznaczenie właściwej ogniskowej F :

$$F \leq \frac{Ad_{pix}}{0.51\lambda}, \quad (4.4)$$

lub np. odpowiedniej światłości N :

$$N \leq \frac{d_{pix}}{0.51\lambda}, \quad (4.5)$$

Wartości otrzymane w wyniku użycia zależności (4.4) lub (4.5) są „właściwe”, czy też „odpowiednie” w tym sensie, że umożliwiają dopasowanie parametrów posiadanego zestawu tj. kamery i teleskopu do wymogów konkretnej obserwacji.

W przypadku, kiedy celem jest Słońce, Księżyc albo któraś z bliskich planet, najbardziej interesujące są szczegóły o możliwie niewielkich rozmiarach. Przyjmując na podstawie doświadczeń praktycznych, że uzyskanie akceptowalnego obrazu np. Saturna jest możliwe pod warunkiem, że jego tarcza zajmuje obszar nie mniejszy niż 100×100 pikseli, otrzymujemy natychmiast dopuszczalny zakres zmienności rozmiarów kątowych pojedynczego elementu matrycy CCD - wartość ta powinna należeć do przedziału $0.25 \div 0.5''$.

Inne uwarunkowania dotyczą fotografowania mgławic, gromad gwiazdnych oraz galaktyk. Tutaj poza oczywistym wymaganiem by cały obiekt zmieścił się w kadrze, szczególnie istotny jest możliwie krótki czas naświetlania, podczas gdy wierne oddanie najdrobniejszych szczegółów stanowi czynnik drugorzędny. W efekcie przyjmuje się, że kątowe rozmiary piksela w rejestracjach typu „*deep sky*” powinny posiadać wartości zbliżone do $2''$.

4.3 Przykłady obliczeń

Obecnie czas na ćwiczenia praktyczne. Wyobraźmy sobie, że posiadamy kamerkę Vesta ($d_{pix} = 5.6 \mu m$) oraz jeden z wymienionych w poniższej tabeli teleskopów:

Tablica 4.1. Parametry przykładowych teleskopów

Teleskop	Średnica	Ogniskowa	Światłosiła	Rozdzielczość
I	114 mm	500 mm	1:4.4	1.1"
II	150mm	1200 mm	1:8	0.8"
III	200 mm	2000 mm	1:10	0.6"
IV	330 mm	1500 mm	1:4.5	0.4"

Dysponując tak świetnym zestawem zamierzamy korzystając z wyjątkowo ładnej pogody (seeing niezauważalny) zrealizować serię doskonałych fotografii Jowisza, dla którego maksimum promieniowania przypada na zakres fal o długościach zbliżonych do $\lambda = 550 \times 10^{-9}$ m. W celu upewnienia się co do odpowiedniej wartości ogniskowej wykorzystujemy zależność (4.4). Wyniki obliczeń zawiera poniższa tabela:

Tablica 4.2. Parametry rzeczywiste i wymagane

Teleskop	Średnica	Ogniskowa rzeczywista	Ogniskowa wymagana
I	114 mm	500 mm	2280 mm
II	150mm	1200 mm	3000 mm
III	200 mm	2000 mm	4000 mm
IV	330 mm	1500 mm	6600 mm

Jak wynika z zestawienia, w celu uzyskania zamierzonego efektu wszystkie zestawy muszą zostać uzupełnione o dodatkowy element optyczny „wydłużający” ogniskową. Funkcję tą realizują z powodzeniem tzw. soczewki Barlowa, które są dostępne w krotnościach $\times 2$, $\times 3$ i $\times 4$. I tak, posiadacze teleskopów I i IV powinni wykorzystać wersję $\times 4$, właścicielowi II niezbędny jest element $\times 3$, zaś w przypadku III wystarczy krotność $\times 2$. Forsowanie powiększenia wiąże się co prawda ze zmniejszeniem jasności, ale w przypadku jasnego Jowisza efekt ten nie posiada znaczenia. Zdjęcia rozsyłamy przyjaciółom i rozpoczynamy poszukiwanie nowych celów.

Najbardziej oczywistym pomysłem na kolejny, teraz już bardziej zaawansowany projekt, jest powtórzenie z pomocą Vesty fragmentu pionierskich prac zrealizowanych czas jakiś temu przez niejakiego Charlesa Messiera. Nasz minimaraton zamierzamy rozpocząć (a jakże by inaczej) od słynnej M31, której dłuższa oś zajmuje na sferze niebieskiej ponad 3° . Uwzględniając, że pole obrazowe Vesty posiada wymiary ok. 4×3 mm i wykorzystując (4.1) otrzymujemy kolejno:

Tablica 4.3. Pole widzenia i stopień pokrycia

Teleskop	Ogniskowa	Pole widzenia (dłuższa oś)	Stopień pokrycia (kątność odniesienia $3^\circ = 180'$)
I	500 mm	27.5'	15 %
II	1200 mm	11.5'	6 %
III	2000 mm	6.9'	4 %
IV	1500 mm	9.2'	5 %

Jak widać tylko użycie najmniejszego z teleskopów stwarza pewne szanse na realizację zamierzonego celu. Jednak i w tym przypadku wymagać to będzie zestawienia mozaiki 7 zdjęć, co choć możliwe nie jest rozwiązaniem najlepszym. Bardziej efektywne jest użycie obiektywu o krótszej ogniskowej, która jak łatwo wykazać powinna posiadać wartość ok. 75 mm.

Na koniec spróbujemy określić jaki zasięg wyrażony w wielkościach gwiazdowych pozwala uzyskać każdy z rozważanych zestawów. Po formalnej redakcji problem ten przyjmuje następującą postać:

Zadanie

Jaki jest zasięg teleskopu o średnicy A przy użyciu kamery Vesta o wydajności kwantowej $Q = 40\%$, jeśli czasie ekspozycji wynosi 1.5 minuty.

Ponieważ problem należy do gatunku niedookreślonych, na wstępie niezbędne jest poczynienie odpowiednich założeń. Przyjmujemy zatem kolejno że:

- Obliczenia zostaną dokonane dla fali świetlnej o długości $\lambda_0 = 662 \times 10^{-9}$ m.
- Piksele matrycy „skierowane” na ciemne niebo rejestrują w ciągu sekundy $n_t = 5$ fotonów.
- Parametry zestawu teleskop/kamera są tak dobrane, że całość promieniowania gwiazdy pada na pojedynczą komórkę matrycy CCD.
- Pomijamy efekty wprowadzające dodatkowy szum oraz oddziaływanie seeingu.
- Gwiazda zostanie wykryta pod warunkiem, że w czasie ekspozycji t_e dotrze od niej o $n_p = 500$ więcej fotonów niż „dostarczy” tło (ciemne niebo).

Obliczenia prowadzone będą przy użyciu następujących stałych:

prędkości światła $c = 3 \times 10^8$ m

wielkości gwiazdowej Słońca $m_s = -26.7^m$

stałej słonecznej¹ $k = 1.36 \times 10^3$ Jm⁻²s⁻¹

stałej Plancka $h = 6.62 \times 10^{-34}$ Js

¹ Jest to ilość energii docierającej do 1 m² powierzchni Ziemi w ciągu 1 s.

Na wstępie należy ustalić ile fotonów dociera do 1 m² powierzchni Ziemi w czasie 1 s. Energia pojedynczego kwantu promieniowania E_k wynosi:

$$E_k = \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{6.62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{662 \times 10^{-9}} \approx 3 \times 10^{-19} \text{ [J]},$$

stąd poszukiwana liczba n_s :

$$n_s = \frac{k}{E_k} = \frac{1.36 \times 10^3}{3 \times 10^{-19}} \approx 45 \times 10^{20} \left[\frac{\text{fotonów}}{\text{m}^2 \times \text{s}} \right].$$

Rezultat stanowi intensywność oświetlenia słonecznego traktowanego jako strumień elementarnych kwantów. Warto również zauważyć, że otrzymany wynik stanowi jedynie przybliżenie, ponieważ energię uwzględnioną podczas wyznaczania stałej słonecznej mierzy się ponad warstwą atmosfery, a dostarczają jej również fotony pasm innych niż optyczne.

Kolejnym krokiem jest wyznaczenie natężenia światła n_g docierającego od poszukiwanej gwiazdy - wartość ta również musi być wyrażona w fotonach/m²/s. Fakt, że kamera zarejestrowała w czasie jednej sekundy n_k kwantów promieniowania oznacza (uwzględniając znaną efektywność procesu detekcji Q), że w czasie tym przez pole apertury przechodzi n_k/Q fotonów. Pole to można wyznaczyć z elementarnej zależności $\pi A^2/4$, co ostatecznie pozwala zapisać:

$$n_g = \frac{\frac{n_k}{Q}}{\frac{\pi A^2}{4}} = \frac{4 \times n_k}{\pi \times Q \times A^2}.$$

Uwzględniony w założeniach warunek „wykrywania” poszukiwanego obiektu (500 fotonów ponad poziom tła) nakłada na wartość n_k ograniczenie, które wyrażone formalnie przyjmuje postać:

$$n_k = n_t + \frac{500}{t_e}.$$

Wykorzystując łącznie dwie ostatnie zależności otrzymujemy ostatecznie:

$$n_g = \frac{4(n_t t_e + 500)}{\pi Q t_e A^2}.$$

Po podstawieniu znanych wartości liczbowych, poszukiwaną wartość n_g wyraża zależność:

$$n_g = \frac{33.6}{A^2} \left[\frac{\text{fotonów}}{\text{m}^2 \times \text{s}} \right].$$

Wyniki obliczeń przeprowadzonych z jej wykorzystaniem zawiera tabela:

Tablica 4.4. Minimalna wymagana liczba fotonów/m²/s w funkcji rozmiaru apertury

Teleskop	Średnica	n_g
I	114 mm	2585
II	150mm	1493
III	200 mm	840
IV	330 mm	308

W kolejnym kroku wykorzystujemy definicyjną zależność Pogsona w celu związania natężeń promieniowania Słońca (n_s) oraz gwiazdy (n_g) z ich wielkościami widowymi (odpowiednio m_s i m_g):

$$m_g - m_s = 2.5 \times \log\left(\frac{n_s}{n_g}\right)$$

Podstawiając m_s i wyznaczoną wcześniej wartość n_s otrzymujemy po elementarnych przekształceniach:

$$m_g = 27.4 - 2.5 \times \log(n_g)$$

Wyniki stanowiące finalne rozwiązanie problemu zestawiono w tabeli:

Tablica 4.5. Obserwowalne wielkości gwiazdowe

Teleskop	Średnica	m_g
I	114 mm	18.9 ^m
II	150mm	19.5 ^m
III	200 mm	20 ^m
IV	330 mm	21.2 ^m

Jakkolwiek uzyskane rezultaty zdają się sugerować, że dzięki internetowej kamerce posiadacz teleskopu o średnicy 10 cm jest w stanie włączyć się aktywnie do poszukiwań niewielkich asteroid mogących stanowić zagrożenie dla życia na Ziemi, to rzeczywistość wcale nie wygląda tak różowo. Sprawia to w szczególności nierealistyczne założenie o możliwości uzyskania i utrzymania stanu, w którym cała energia promieniowania skupia się przez cały czas trwania ekspozycji na pojedynczym pikselu matrycy CCD. Szanse na to są znikome i w praktyce następuje rozproszenie sygnału na dużym obszarze, co redukuje znacząco możliwość uzyskania wymaganego progu detekcji. Ostatecznie, rzeczywiste osiągi teleskopów są o ok. 2.5^m gorsze od wartości podanych w tabeli, zaś przyczynami tego stanu rzeczy są kolejno: seeing, a także niedokładności kolimacji, ustawienia ostrości i prowadzenia teleskopu.

Jednakże nawet po skorygowaniu rzeczywiste zasięgi zestawu z kamerą CDD pozostają większe od uzyskiwanych w trakcie obserwacji wizualnych o ok. 2.5÷3^m. W rezultacie, choć poszukiwanie nowych obiektów pasa Kuipera za pomocą teleskopu marki Optisan nie jest zapewne najlepszym z pomysłów, to przyjrzenie się za pomocą Vesty ich najsłynniejszemu reprezentantowi jakim jest Pluton może być całkowicie realne. I nie jest to jeszcze koniec dobrych wiadomości. Oto bowiem, na wynik obserwacji wizualnych w znacznym stopniu wpływa nie tylko charakterystyka używanego sprzętu, ale również i układu oko-mózg. Dzieje się tak ponieważ komórki nerwowe oka prowadzą wstępne przetwarzanie rejestrowanych obrazów uwzględniając m. in. poziom oświetlenia tła. W efekcie zanieczyszczone światłem otoczenie (a w nim z konieczności dokonywana jest znaczna część obserwacji) stanowi środowisko, w którym o spostrzeżeniu słabych obiektów można tylko marzyć. Przedstawione uwarunkowania nie dotyczą jednak przetwornika CCD, który z racji ściśle liniowej charakterystyki przetwarzania jest w stanie z łatwością rejestrować obiekty niedostępne dla ludzkiego oka. Dzięki wtórnej integracji wielu krótkich ekspozycji możemy zatem obserwować z własnego balkonu, a więc bez potrzeby wyjazdu za miasto, nie tylko Plutona czy planetoidy, ale również niektóre galaktyki i mgławice. Przykładem możliwych do uzyskania rezultatów jest poniższa fotografia wykonana w okolicy jasno oświetlonej lampami placu budowy mostu przez Narew w miejscowości Zegrze.



Rys. 4.3. Mgławica M42 w gwiazdozbiorze Oriona

Możliwość funkcjonowania przy znacznym poziomie oświetlenia tła stanowi jak się zdaje jedną z najważniejszych zalet kamer półprzewodnikowych w zastosowaniach amatorskich.

5. Podsumowanie

W ramach posumowania dokonano zestawienia najważniejszych parametrów uwzględnionych w opracowaniu przetworników obrazowych. Zawiera je poniższa tablica:

Tablica 5.1. Porównanie wybranych parametrów przetworników obrazowych

	Okno	Kliska fotograficzna	Kamera CCD
Liczba komórek recepcyjnych	130×10^6	10×10^6	max. 67×10^6
Efektywność kwantowa Q	15%	4%	max. 90%
Widmowy zakres rejestracji [nm]	400 ÷ 700	< 700	400 ÷ 900
Max. czas ekspozycji t_e	0.2 s	kilka godzin	kilka godzin
Max. powierzchnia [cm ²]	12.5	900 i więcej	25
Współczynnik akumulacji ($Q \times t_e$)	0.03	720	16200
Koszt	niewyobrażalny	niski	wysoki

Jak wynika z przedstawionego porównania, naturalny przetwornik jakim jest ludzkie oko zdecydowanie wygrywa z pozostałymi jedynie w kategorii rozdzielczości oraz kosztu (wszakże dar wzroku uznajemy za bezcenny), zaś wartości pozostałych parametrów wskazują na wyraźną przewagę wytworów technologii przemysłowej. Jako usprawiedliwienie Natury warto uwzględnić fakt, że gatunek *Homo Astronomicus* do tej pory nie mieści się w jej planach kreacyjnych.