

## D. OPIS PROJEKTU BADAWCZEGO, METODYKA BADAŃ ORAZ CHARAKTERYSTYKA OCZEKIWANYCH WYNIKÓW

### 1. Cel naukowy projektu

**- jaki problem wnioskodawca podejmuje się rozwiązać, co jest jego istotą, co uzasadnia podjęcie tego problemu w Polsce, jakie przesłanki skłaniają wnioskodawcę do podjęcia proponowanego tematu?**

Ciągłe obserwacje całego nieba z wysoką rozdzielczością czasową stanowią nowy, ważny kierunek współczesnej astronomii. Najbardziej znanym przykładem zjawiska zachodzącego w krótkich skalach czasowych są rozbłyski gamma (GRB) i stowarzyszone z nimi poświaty optyczne. Ponadto, systematyczna obserwacja całego nieba z dużą rozdzielczością czasową pozwala na dokładniejsze niż dotychczas badanie krótkookresowych i kataklizmicznych gwiazd zmiennych a także, po spełnieniu surowych wymagań dotyczących dokładności i powtarzalności pomiarów, poszukiwanie pozasłonecznych planet.

Głównym celem niniejszego wniosku jest skonstruowanie modułu, złożonego z wysokiej jakości kamery CCD zintegrowanej z układem optycznym o stosunkowo dużym polu widzenia, optymalnego z punktu widzenia ciągłych obserwacji całego nieba. Aby pokryć całe widoczne niebo, pełen detektor składać się będzie z około stu takich modułów, co zmusza do optymalizacji kosztów. Wysoka cena takiego detektora realizowanego przy pomocy standardowych kamer CCD i długoogniskowych obiektywów fotograficznych jest najprawdopodobniej, obok problemów z akwizycją i analizą gigantycznego strumienia danych płynących z detektora, główną przyczyną dla której aparatura taka nie została jeszcze zbudowana. Naszym celem jest wykorzystanie dostępnych technologii do budowy w detektora, którego parametry techniczne gwarantują żadaną jakość obserwacji i którego koszt jednostkowy nie przekracza 10 000 Euro.

Drugim problemem, który należy rozwiązać, jest akwizycja i analiza danych. Badanie szybkozmiennych zjawisk, takich jak GRB, wymagają wysokiej rozdzielczości czasowej. Przy założeniu czasu ekspozycji rzędu 10 sekund i czasu odczytu matrycy CCD rzędu 2 sekund (z prędkością 2 Mpixels/sekundę dla matrycy 2000 x 2000 pikseli) oznacza to akwizycję około 3000 klatek czyli 25 GB danych w ciągu nocy przez jeden moduł. Przy pokryciu całego nieba, strumień danych wyniesie więc około 2,5 TB/noc. Przetworzenie takiej ilości danych wymaga zastosowania strategii wielostopniowej analizy on-line (ang. multi-level trigger system) i przechowywania jedynie rezultatów analizy foto- i astrometrycznej (katalogi) oraz starannie wybranych wycinków klatek zawierających znalezione przez system interesujące przypadki.

Obsługa i sterowanie systemem tej wielkości jest także niełatwym zadaniem. Cały układ musi działać w pełni automatycznie. Powinien mieć wbudowane procedury pozwalające na automatyczną diagnostykę stanu systemu i w razie konieczności jego naprawę. Całość powinna być także odporna na awarie pojedynczych części składowych. Awaria systemu operacyjnego, czy nawet dysku, na jednym z komputerów nie powinna zakłócać pracy detektora jako całości. System powinien także bez problemu przetrwać kilkunastogodzinną awarię internetu i być w stanie rozpocząć pracę po przerwie w dostawie energii elektrycznej.

Istnieją co najmniej trzy ważne powody, dla których projekt tego typu powinien być podjęty właśnie w Polsce. Po pierwsze, pomysł wielkoskalowych przeglądów nieba za pomocą niewielkich i stosunkowo niedrogich urządzeń pochodzi w znacznej mierze od profesora Bogdana Paczyńskiego<sup>1</sup>. W konsekwencji, w

---

<sup>1</sup> B.Paczynski, "The future of massive variability searches", astro-ph/9609073

B.Paczynski, "Monitoring All Sky for Variability", astro-ph/0005284

B.Paczynski, "Monitoring Variability of the Sky", astro-ph/0108112

B.Paczynski, "Massive Variability Searches: The Past, Present and Future", astro-ph/0110388

B.Paczynski, "Massive Variability Search and Monitoring by OGLE and ASAS", astro-ph/ 0212144

Polsce dysponujemy unikalnym doświadczeniem w tym zakresie zgromadzonym przez projekty „ASAS”<sup>2</sup>, „Pi of the Sky”<sup>3</sup>, a także w pewnym stopniu przez projekt „OGLE”<sup>4</sup>. „ASAS” zgromadził wieloletnie doświadczenie jeśli chodzi o działanie autonomicznego systemu wyposażonego w kilka kamer, bez udziału człowieka. „Pi of the Sky” rozbudowało sprawdzony w działaniu zestaw procedur do automatycznej diagnostyki i naprawy systemu. Udział w projekcie fizyków cząstek elementarnych pozwolił na adaptację technologii informatycznych przetwarzania dużych danych rozwiniętych na użytek eksperymentów fizyki cząstek. W ciągu letniej nocy w LCO system automatycznie analizuje około 6 000 klatek z dwóch kamer, automatycznie wyszukując zjawiska o kilkusekundowym okresie zmienności. Inny projekt, oparty o spektrograf do automatycznego pomiaru widm gwiazd rozwijany jest obecnie w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu.

Drugim ważnym powodem jest ogólna perspektywa fizyki i astronomii w Polsce. Ze względów finansowych niezwykle trudno jest odgrywać naszym fizykom główną rolę w wielkich eksperymentach i fizyki cząstek, podobnie jak w ciągu najbliższej dekady trudno będzie zbudować całkowicie polski duży teleskop, o średnicy lustra rzędu kilku metrów. W konsekwencji, polscy fizycy i astronomowie mają dostęp do nowoczesnych instrumentów w ramach międzynarodowych projektów, ale w nieco ograniczonym zakresie. I choć projekty te mają bez wątpienia wielkie znaczenie naukowe, to wykorzystanie nagromadzonej już w kraju wiedzy i doświadczenia oraz wsparcie rozwoju aparatury takiej jak opisywana w niniejszym wniosku mogłoby uczynić z przeglądów nieba polską specjalność. Wystarczy wspomnieć tutaj wyniki polskich astronomów w dziedzinie poszukiwania rzadkich zjawisk optycznych takich jak mikrosoczewkowanie grawitacyjne i planety pozasłoneczne przez „OGLE” czy gwiazd zmiennych przez „ASAS”. Jeśli chodzi o konieczne nakłady finansowe, to leżą one całkowicie w granicach budżetu nauki i normalnych grantów naukowych przyznawanych przez Ministerstwo Nauki.

Nie wyklucza to możliwości ubiegania się w tej dziedzinie o środki pochodzące ze źródeł zagranicznych. Nieprzypadkowo niniejszy wniosek składany jest w tym właśnie momencie. Konstrukcja optymalnego detektora do pomiaru szybkozmiennych zjawisk optycznych w ciągu najbliższych kilkunastu miesięcy pozwoli o ubieganie się o fundusze na dalszy rozwój projektu pochodzące na przykład z 7 Programu Ramowego Unii Europejskiej.

Praktycznie cała technologia, potrzebna do realizacji projektu, dostępna jest w Polsce i podstawowy problem polega na zaprojektowaniu optymalnego urządzenia na niej bazującego. W rezultacie, projekt może wnieść zupełnie nowe elementy do rzeczywistości badań naukowych w Polsce. Stanie się ważnym i oryginalnym wkładem Polski w dorobek nauki światowej. Pomoże rozwinąć nowoczesne technologie informatyczne i obliczeniowe o istotnym potencjale komercyjnym. Będzie miał także istotny wpływ na kształcenie i rozwój kadry naukowej w placówkach, w których będzie realizowany. Nasze doświadczenia z „Pi of the Sky” wyraźnie wskazują na wielką różnicę pomiędzy udziałem studentów we fragmentach projektów realizowanych w wielkich międzynarodowych ośrodkach a udziałem w projekcie za który całkowitą odpowiedzialność, od projektu do realizacji, ponosi polski zespół. Istnieje więc wiele różnorodnych argumentów wskazujących na to że należy skorzystać z okazji i uczynić wielkoskalowe przeglądy nieba z dużą rozdzielczością czasową prawdziwie polską specjalnością, ze wszystkimi naukowymi, edukacyjnymi i socjologicznymi konsekwencjami.

Po trzecie, rozwój technologii w dziedzinie niewielkich instrumentów naukowych pozwoli na rozpowszechnienie takiej aparatury na wydziałach fizyki i astronomii polskich uniwersytetów. Możliwość własnoręcznego eksperymentowania z aparaturą tej klasy automatycznie podniesie atrakcyjność i poziom studiów na tych kierunkach i z czasem podniesie poziom badań naukowych prowadzonych w ośrodkach dysponujących takim sprzętem. Nic bowiem nie zastąpi w czasie studiów możliwości prowadzenia własnoręcznych obserwacji nowoczesnym sprzętem, przygotowujących studentów do poważnej pracy naukowej.

---

<sup>2</sup> <http://www.astrouw.edu.pl/~gp/asas/>

<sup>3</sup> <http://grb.fuw.edu.pl>

<sup>4</sup> <http://www.astrouw.edu.pl/~ogle/>

## 2. Istniejący stan wiedzy w zakresie tematu badań

**jaki oryginalny wkład wniesie rozwiązanie postawionego problemu do dorobku danej dyscypliny naukowej w świecie i w Polsce, czy w kraju i w świecie jest to problem nowy czy kontynuowany i w jakim zakresie weryfikuje utarte poglądy i dotychczasowy stan wiedzy?**

Pomimo powszechnego doceniania roli wielkoskalowych przeglądów nieba, na świecie nie ma w tej chwili systemu obserwującego bezustannie całe niebo. Kilka kamer CCD zaopatrzonych w obiektywy typu „rybie oka” pokrywa wprawdzie praktycznie całe widoczne niebo, ale system ten nie sięga dalej niż 5-7<sup>m</sup>. Kilka zespołów używa pojedynczych kamer wyposażonych w obiektywy fotograficzne o  $f = 30-50\text{mm}$  pokrywających pole widzenia około 1/3 steradiana, czyli mniej więcej  $33^\circ \times 33^\circ$  (BOOTES<sup>5</sup>, ASAS,  *$\pi$  of the Sky*) lub poczwórnych układów kamer z obiektywami o  $f = 110-150\text{mm}$  (LOTIS<sup>6</sup>, RAPTOR<sup>7</sup>, ROTSE I<sup>8</sup>). Jedynym w historii astronomii systemem pokrywającym kąt bryłowy  $\frac{3}{4}$  steradiana przy pomocy wielu kamer jest Explosive Transient Camera (ETC)<sup>9</sup>, składający się z 16 kamer wyposażonych w obiektywy o  $f=24\text{mm}$ ,  $f/1.4$  i CCD 390 x 292 pikseli. Ponieważ rozmiar piksela wynosi 22 $\mu\text{m}$ , rozdzielczość kątowna detektora wynosi 2,2 minuty kątowej/piksel.. Pole widzenia kamery wynosi  $20.5^\circ \times 15.3^\circ$ . Zasięg wynosi 11<sup>m</sup> przy 5s ekspozycji. ETC zbudowano w latach 80 ubiegłego stulecia i od tego czasu nikt nie podjął się budowy aparatury umożliwiającej jednoczesną obserwację całego nieba.

Istnieją dwie główne przyczyny takiego stanu rzeczy: duży koszt budowy takiego systemu i olbrzymi strumień danych do przeanalizowania. W niniejszym wniosku proponujemy podjęcie próby rozwiązania obu tych trudności. Problem dużego strumienia danych proponujemy rozwiązać stosując przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym. Koszt systemu proponujemy istotnie obniżyć projektując urządzenie integrujące optykę i elektronikę w jeden moduł, zamiast zestawiać oddzielne kamery ze standardową optyką.

Zainstalowanie systemu obserwującego całe niebo z zasięgiem 15<sup>m</sup> w kilku punktach globu może mieć przełomowe znaczenie w astronomii obserwacyjnej. Astronomowie uzyskają dostęp do rzadkich zjawisk przejściowych, które dotychczas umykały przez nikogo nie zauważone. Można będzie uzupełnić dziś mocno „dziurawe” katalogi gwiazd zmiennych. Stanie się możliwe badanie statystyczne różnych rodzajów gwiazd zmiennych. Historia astronomii pokazuje, że najbardziej przełomowe odkrycia nierzadko dokonywane były za pomocą analizy statystycznej odpowiednio dużych próbek badanych obiektów. Najlepiej znanymi przykładami są diagram H-R, cefeidy i prawo Hubble’a. Nie sposób przewidzieć co będzie tematem następnego odkrycia, ale z pewnością może się do niego przyczynić posiadanie olbrzymiej ilości nowych danych.

---

<sup>5</sup> <http://www.laeff.esa.es/BOOTES>

<sup>6</sup> <http://hubcap.clemson.edu/~ggwilli/LOTIS>

<sup>7</sup> <http://www.raptor.lanl.gov>

<sup>8</sup> <http://www.umich.edu/~rotse>

<sup>9</sup> <http://space.mit.edu/ETC>

### 3. Metodyka badań

**Co stanowi podstawę naukowego warsztatu wnioskodawcy i jak zamierza rozwiązać postawiony problem, na czym będzie polegać analiza i opracowanie wyników badań, jakie urządzenia (aparatura) zostaną wykorzystane w badaniach, czy wnioskodawca ma do nich bezpośredni dostęp i umiejętność obsługi?**

Zacznijmy od specyfikacji parametrów aparatury do masowego poszukiwania szybkozmiennych zjawisk optycznych:

#### POKRYCIE NIEBA

Instrument powinien pokrywać całe niebo aż do odległości zenitalnej w której graniczny zasięg spadnie o 0,5 magnitudo w stosunku do zasięgu w zenicie, co przy założeniu że zasięg aparatury nie jest ograniczony przez seeing odpowiada odległości zenitalnej równej  $70^\circ$ . Pokryty kąt bryłowy wynosi więc  $\Omega = 2\pi (1 - \cos 70^\circ) = 1.32 \pi = 4.13$  steradianów. Zakładając że liczba kamer w całym detektorze nie powinna być większa niż 100, otrzymujemy pole widzenia pojedynczej kamery równe  $11.6^\circ \times 11.6^\circ$  (bez uwzględniania szczegółów takich jak częściowe pokrywanie się pól obserwacji różnych kamer). Osłabiając nieco warunek maksymalnej odległości zenitalnej do  $60^\circ$  otrzymujemy pokrycie  $\pi$  steradianów detektorem złożonym ze 100 kamer o polu widzenia  $10^\circ \times 10^\circ$  każda.

#### DOKŁADNOŚĆ FOTOMETRYCZNA

Przy pomocy opisywanej aparatury prawdopodobnie będzie dość trudno osiągnąć dokładność pomiarów fotometrycznych wymaganą do poszukiwania gigantycznych planet pozasłonecznych. Typowy pozasłoneczny Jowisz ma średnicę około 10 razy mniejszą niż macierzysta gwiazda, a więc zaćmienie przez planetę powoduje zmniejszenie jasności gwiazdy o mniej więcej 1%. Jeśli efekt ten ma być widoczny w danych na poziomie  $5\sigma$ , to wymagana jest dokładność pomiarów rzędu  $\sigma = 0.002$  magnitudo. Pomimo, że a priori nie możemy zagwarantować osiągnięcia tak dużej dokładności przy pomocy proponowanego układu, to warto zadbać o możliwie dużą precyzję fotometrii, przydatną do badania gwiazd zmiennych.

Obserwacja zjawisk o krótkim czasie zmienności, takich jak błyski optyczne stowarzyszone z rozbłyskami gamma, prowadzi na ogół do innej definicji optymalnej konstrukcji detektora niż wymaganie dużej precyzji fotometrycznej. W szczególności, do poszukiwania błysków nie jest konieczne osiągnięcie dokładności wyznaczonej przez statystykę dochodzących ze źródła (gwiazdy) fotonów. Z drugiej strony warto zauważyć dla gwiazd jaśniejszych niż około  $12^m$  (zależnie od parametrów instrumentu) dokładność fotometrii jest ograniczona przez atmosferyczne scyntylacje a nie przez statystykę fotonów. Sprzeczności można więc uniknąć projektując system, w którym limit statystyczny jest na tym samym poziomie co limit scyntylacyjny. Spełnienie tego warunku może sprawić, że ten sam instrument będzie adekwatnym narzędziem dla obu programów naukowych.

#### CZASOWA ZDOLNOŚĆ ROZDZIELCZA

Dobra zdolność rozdzielcza w czasie jest przydatna w wrywaniu szybkich tranzytów jeżeli tylko spełnione są dwa warunki:

- a) poziom szumu pojedynczej ekspozycji jest zdominowany przez tło nieba
- b) czas martwy wynikający z odczytu CCD jest zanedbywalnie mały.

Wprawdzie w przypadku poszukiwania pozasłonecznych planet lub badań zmienności gwiazd możliwość krótkich ekspozycji nie jest bezpośrednio przydatna, jednak możliwość uzyskania wielu statystycznie niezależnych pomiarów fotometrycznych jest sposobem na pogodzenie wymagań narzucanych przez różne programy badawcze. Potrzeba uzyskania dużej liczby ekspozycji w jednostce czasu prowadzi (poprzez punkt a) do wymagania dużej światłości ( $f/d$ ) zastosowanej optyki. Z kolei wymaganie małego czasu martwego (punkt b) narzuca zastosowanie elektroniki z szybkim odczytem ( $> 1$  MHz/piksel) i/lub zastosowania CCD typu „frame transfer”.

## PRZESTRZENNA ZDOLNOŚĆ ROZDZIELCZA

Kątowa zdolność rozdzielcza (arszec/piksel) jest ograniczona głównie ze względów finansowych, gdyż w praktyce, poprawić ją można tylko zwiększając liczbę kamer. Dlatego nie jest to „parametr swobodny” projektowanego urządzenia – determinuje go w dużym stopniu dostępność odpowiednich sensorów CCD (zob. paragraf „Wybór CCD” poniżej). Wolnym parametrem jest natomiast precyzja próbowania, określona jako szerokość obrazu gwiazdy (PSF FWHM) wyrażona w pikselach.

Do detekcji słabych, szybkich tranzytów korzystne jest skoncentrowanie jak największej ilości światła na pojedynczym pikselu. Jednak czyni to system wrażliwym na fluktuacje pojedynczych pikseli. W przypadku systemu o olbrzymiej liczbie pikseli nie wolno tego czynnika zaniedbać. Ponadto dobre próbkowanie PSF jest przydatne do precyzyjniejszego określenia pozycji zaobserwowanego obiektu, co ma znaczenie, jeśli obserwacje ma następnie podjąć teleskop o bardzo małym polu widzenia.

Poszerzenie obrazu gwiazdy (n.p. przez lekkie rozogniskowanie) może być pożądane dla uzyskania dużej precyzji fotometrii. Jednak jeśli dokonujemy wielu szybkich pomiarów statystycznie niezależnych (a jest tak gdy błąd pojedynczego pomiaru jest zdominowany przez statystykę fotonów lub scyntyłację) to błąd wypadkowy będzie istotnie mniejszy od błędu pojedynczego pomiaru. Podsumowując, wydaje się, że optymalnym wyborem jest próbkowanie z  $FWHM = 2.5$  piksela.

### Wybór CCD

Wybór odpowiedniego sensora CCD jest sprawą stosunkowo prostą, gdyż jest w dużej mierze zdeterminowany przez dostępną technologię. Z punktu widzenia osiągow aparatury, CCD powinno być możliwie duże aby zgromadzić możliwie dużo światła i pokryć jak największe pole widzenia. Przy ustalonej powierzchni CCD, matryca powinna się składać z możliwie dużej liczby pikseli, aby zapewnić jak najlepszą zdolność rozdzielczą i precyzyjne próbkowanie. Stosunek osiągow do ceny jest wyraźnie najlepszy dla matryc  $2000 \times 2000$  pikseli przy rozmiarach piksela  $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ . Szczegółowe parametry wybranych sensorów zawiera Tabela 1. Podane ceny są jedynie orientacyjne.

**Table 1.** Parametry wybranych sensorów CCD

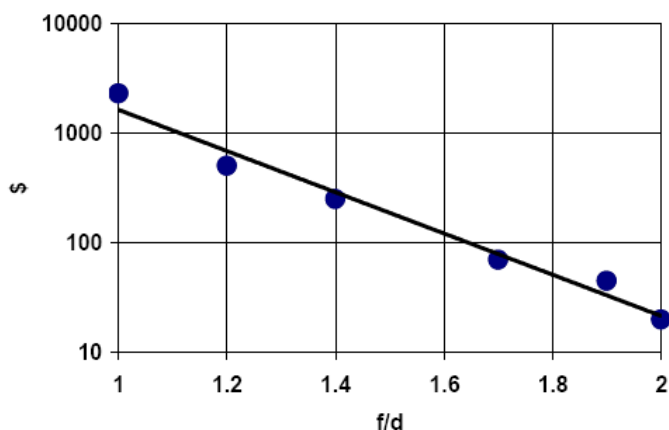
CCD		KAF-4202	KAF-16801	KAI-4000M	THX7899M	CCD42-40	STA0820	CCD442A	CCD447
vendor		Kodak	Kodak	Kodak	Atmel	Marconi	STA	Fairchild	Fairchild
x-pix		2032	4096	2048	2048	2048	2048	2048	2048
y-pix		2044	4096	2048	2048	2048	2048	2048	2048
pix size	$\mu\text{m}$	9	9	7.5	14	13.5	15	15	15
CCD size	mm	18	37	15	27	28	31	31	32
price	k\$	4.2	11.8	3.8	2.5	12	1.7-2.5	1.5	4
framing		full frame	full frame	interline	full frame	full frame	full frame	full frame	full frame
finishing		front illum.	front illum.	$\mu$ -lenses	front illum.	back illum.	front illum.	front illum.	back illum.
QE 450-900 nm	%	30	30	25	30	60	30	30	65
outputs		1	2	4	4	2	2	1	2
range	1:		6310		12600	50000	35000	10000	10000
range	dB		76		82	94	91	80	80
noise	e	15	15		5	3	2	7	4
	at k pix/s		2000		1000	20	250	250	50
	at r/o time				1	105	8	17	42
dark signal	e/s	15	18			45000			
dark current MPP	pA/cm <sup>2</sup>	3.5	3.5		25		25	25	25
dark current BC	pA/cm <sup>2</sup>			200	600		2000	2000	2000
	at *C	25	25		25	20	25	25	25
full well MPP	ke	100	120						100
full well BC	ke			40			150		400
conversion	$\mu\text{V/e}$	10	12	12	7	4.5	5	3	2.5
max r/o freq	MHz	15	15	20	20	3	10	3	3

W tym momencie nie rozstrzegamy czy CCD powinno być „front-illuminated” czy „back-illuminated”. Decyzja ta nie ma istotnego wpływu na konstrukcję urządzenia. Można zaprojektować tani system z matrycą „front-illuminated” a później, jeśli pojawią się nowe fundusze, wymienić ją na „back-illuminated” o 2-3 krotnie lepszej efektywności kwantowej.

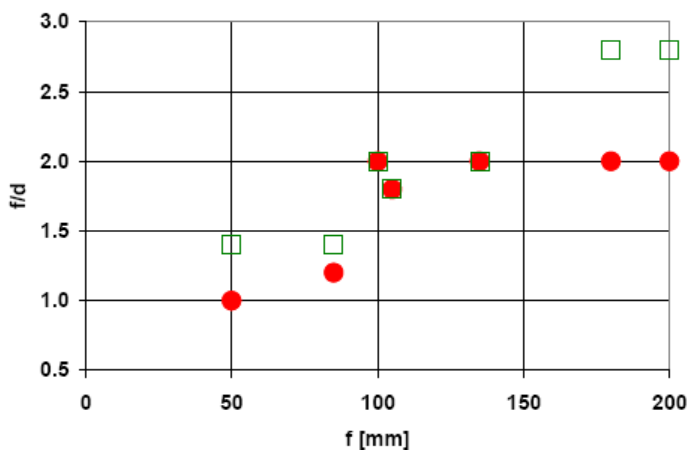
## Układ optyczny

Najważniejszą decyzją do podjęcia przy projektowaniu układu optycznego jest wybór między refraktorem a reflektorem. Przekątna matrycy  $2000 \times 2000$  pikseli o rozmiarach piksela  $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$  jest niemal taka sama jak klatki filmu małoobrazkowego. Dlatego takie CCD może być używane w połączeniu ze standardowymi obiektywami fotograficznymi. To, rzecz jasna, nie wyklucza możliwości zaprojektowania specjalnego obiektywu, ale nawet pobieżny przegląd rynku może dać orientację o możliwościach takich obiektywów.

Przy ustalonej ogniskowej obiektywu, cena istotnie zależy od apertury. Pokazuje to Rys.1. Cena okazuje się zależeć od apertury niemal wykładniczo. Najlepsze obiektywy mają ceny dużo wyższe od nieco tylko gorszych. Dlatego wydzieliśmy dwie klasy: „ultimate” – zawierającą najjaśniejsze obiektywy o danej ogniskowej, i „econo” – także najjaśniejsze, ale o cenie nie przekraczającej 1000 dolarów. Wyniki poszukiwań prezentujemy w tabeli 2 oraz na rysunkach 2 i 3. Widać, że postawione wyżej wymagania najlepiej spełniają obiektywy o ogniskowych  $f=180\text{mm}$  i  $200\text{mm}$  i światłosile  $f/d=2$ . Cena 4000\$ nie jest niska, ale ciągle ma szansę zmieścić się w granicach założonej ceny modułu 10 000 euro.



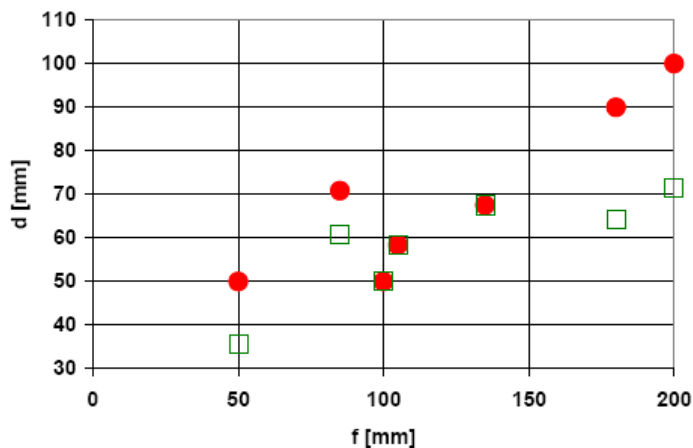
Rys. 1. Cena w funkcji światłosily obiektywu ( $f/d$ ) dla obiektywów o  $f=50\text{mm}$ .



Rys. 2. Światłosila obiektywu ( $f/d$ ) vs długość ogniskowej  $f$  dla najlepszych obiektywów komercyjnych (czerwone kropki) i dla obiektywów poniżej \$1000 (zielone kwadraty).

f [mm]	FOV	f/d	d [mm]	\$	firma	ultimate	econo
50	33°	1.0	50	2300	Zeiss	+	
50	33°	1.4	36	275	Canon		+
85	20°	1.2	71	1430	Canon	+	
85	20°	1.4	61	870	Zeiss		+
100	17°	2.0	50	370	Canon	+	+
105	16°	1.8	58	670	Nikon	+	+
135	13°	2.0	68	750	Nikon	+	+
180	10°	2.0	90	4000	Olympus	+	
180	10°	2.8	64	730	Nikon		+
200	9°	2.0	100	3800	Nikon	+	
200	9°	2.0	71	620	Canon		+

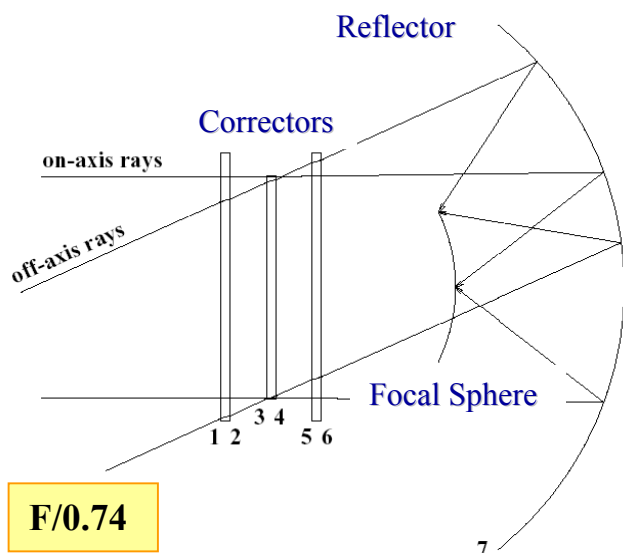
Tabela 2. Przykłady komercyjnych obiektywów. Ultimate – najlepszy na rynku. Econo – najlepszy poniżej \$1000.



Rys. 3. Apertura obiektywu  $d$  vs długość ogniskowej  $f$  dla najlepszych obiektywów komercyjnych (czerwone kropki) i dla obiektywów poniżej \$1000 (zielone kwadraty).

Nie sprawdzaliśmy jakości podanych obiektywów i trudno z góry powiedzieć czy dają jakość obrazu wystarczającą do zastosowań astronomicznych. Aby to stwierdzić, konieczne byłyby dedykowane testy. Można też rozważyć zaprojektowanie własnego refraktora, ale teleskop zwierciadlany wydaje się być rozwiązaniem bardziej obiecującym.

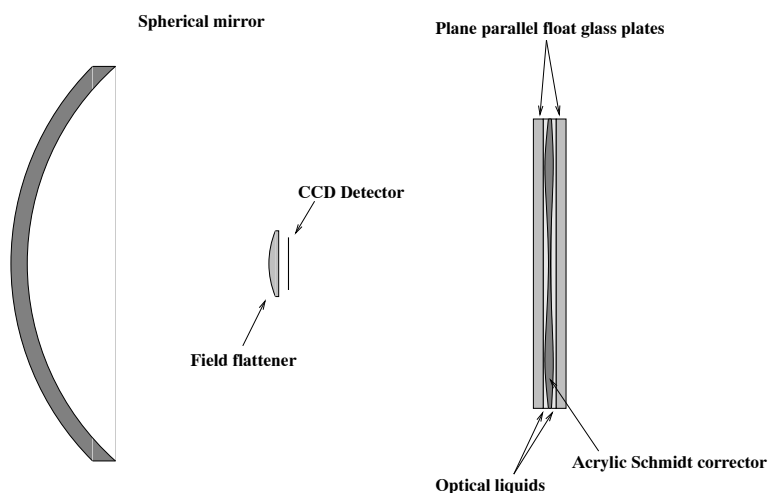
Ciekawym przykładem teleskopu zwierciadlanego jest układ optyczny projektu ASHRA<sup>10</sup>. Jest to nieco zmodyfikowana optyka typu Baker-Nunn ze zwierciadłem sferycznym i trzema płytami korekcyjnymi. Schemat i główne parametry podano na Rys.4. Ogniskowa tego układu jest zbyt długa do naszych zastosowań i konieczna byłaby jego reoptymalizacja.



**Rys. 4.** Układ optyczny typu Baker-Nunn (zmodyfikowany) projektu ASHRA.

- Apertura efektywna: 1000 mm
- Ogniskowa: 740 mm
- Światłosiła: 0.74
- Pole widzenia: 50°
- Średnica lustra: 2000 mm
- PSF FWHM: : 1 arcmin

Wstępne studia doprowadziły nas do układu optycznego kamery Schmidta, pokazanego na Rys.5. Projekt wykonano przy pomocy programu ZEMAX. Układ składa się ze zwierciadła sferycznego, pojedynczej płyty korekcyjnej i układu soczewek „field flattener”.



**Rys. 5.** Proponowana kamera z optyką Schmidta:

- Apertura efektywna: 175 mm
- Ogniskowa: 160 mm
- Światłosiła: 0.9
- Pole widzenia: 11°
- Średnica lustra: 235 mm
- PSF FWHM: 50 arcsec
- Matryca CCD: 2032 × 2032
- Rozmiar piksela: 15 μm
- Pokrycie piksela: 19.3 arcsec

Najtrudniejszą do wykonania częścią diskutowanego układu optycznego jest asferyczna płyta korekcyjna Schmidta, która musi być wykonana z dużą precyzją. Aby sprostać tym wymaganiom proponujemy zastosowanie nowatorskiego rozwiązania polegającego na zanurzeniu płyty w cieczy o odpowiednich własnościach umieszczonej między dwoma płaskimi szybami. Przy takim rozwiązaniu tolerancja mechaniczna jest na tyle duża, że można rozważyć wykonanie płyty w formie odlewu z tworzywa sztucznego. Aby jeszcze bardziej obniżyć koszt modułu warto rozważyć umieszczenie cieczy optycznej między wysokiej jakości szybami okiennymi, odpowiednio wyselekcjonowanymi. Zastosowanie takich

<sup>10</sup> <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~ashra/index-e.html>

tanich elementów stwarza szansę masowej produkcji tanich modułów o gabarytach jeszcze większych niż podane na Rys.5.

Krótką ogniskowa rozważanego układu optycznego powoduje, że matryca CCD musi być umieszczona na drodze wiązki światła. Ma to dwie konsekwencje. Po pierwsze, moduł Peltiera chłodzący CCD sam nie może być chłodzony powietrzem, gdyż to spowodowałoby niepożądane falowanie powietrza. Zamiast tego rozważamy chłodzenie cieczą. Po drugie elektronika „front-end” (przedwzmacniacz etc.) musi być ukryta w cieniu CCD. Elektronika cyfrowa powinna być umieszczona oddzielnie, poza obszarem wiązki światła. Oznacza to konieczność zaprojektowania elektroniki specjalnie pod tym kątem.

Migawka także nie może być umieszczona w pobliżu CCD. Listki umieszczone równoległe do CCD zasłaniałyby w pozycji otwartej sporą część światła. Listki otwierające się prostopadle nie zmieściłyby się między CCD a soczewką. Jednym z rozwiązań jest wykonanie odpowiednio dużej migawki i umieszczenia jej przed płytą korekcyjną. Można także rozważyć zrezygnowanie z migawki. W takim przypadku pożądanym byłoby użycie matrycy CCD typu „frame transfer”, ale rozwiązanie takie ma dwie wady. Po pierwsze, część matrycy wykorzystywana jako pamięć przesłaniałaby sporą część wiązki światła. Po drugie, ceny tego typu CCD są znacznie wyższe. Warto spróbować wykorzystać zwykle „full frame” CCD. Zakładając odczyt matrycy  $2000 \times 2000$  z prędkością 2 MHz/piksel, ładunek pozostaje w jednym pikselu przez 1 ms. Stanowi to ułamek  $10^{-4}$  ekspozycji trwającej 10s czyli nieco więcej niż zakres dynamiczny lepszych CCD. Można poprawić sytuację stosując szybszy odczyt lub używając matrycy z kilkoma wyjściami. W każdym przypadku efekt byłby widoczny tylko dla nasyconych gwiazd i w pewnej mierze można by go wyeliminować na etapie analizy danych.

Zaprojektowana koncepcja oczywiście nie jest ostateczna. Jeśli fundusze na ten projekt zostaną przyznane, optymalizacja proponowanego systemu będzie kontynuowana. Konieczne będą konsultacje z potencjalnymi wykonawcami poszczególnych elementów optycznych. Może się okazać, że możliwy do wykonania w ramach założonych środków system będzie całkiem odległy od rozważanego tutaj przykładowego rozwiązania. Nie można nawet wykluczyć a priori powrotu do koncepcji refraktora. Istotne jest przede wszystkim osiągnięcie zamierzonego celu, t.j. zaprojektowanie instrumentu spełniającego postawione wyżej wymagania.

### **Kwalifikacje uczestników projektu**

Uczestnicy przedstawianego projektu posiadają bogate doświadczenia z pracy nad systemami „ASAS” i „ *$\pi$  of the Sky*”. Rzec można, że prezentowany projekt jest bezpośrednim wynikiem wniosków wyciągniętych z funkcjonowania tamtych instrumentów. Zrozumienie napotkanych problemów i wykorzystanie sprawdzonych tam rozwiązań naprowadziło autorów wniosku do jasnej wizji naszkicowanego tutaj instrumentu nowej generacji.

Naukowe zapotrzebowanie na systemy obserwujące całe niebo z dobrą rozdzielczością czasową jest tak oczywiste, że prędzej czy później ktoś taki system zbuduje. Dotychczas to nie nastąpiło, gdyż taki projekt wpada w pustkę między dwoma możliwościami. Z jednej strony liczba modułów do pokrycia całego nieba jest zbyt duża, aby mogła być wykonana przez pojedyncze laboratorium naukowe. Z drugiej, jest zbyt mała do produkcji przemysłowej po rozsądnej cenie. Instytut Badań Jądrowych w Świerku znajduje się w tej szczęśliwej sytuacji, że posiada zarówno laboratoria naukowe jak i własny zakład produkcji aparatury. Dobrym przykładem jego możliwości są akceleratory przeznaczone do terapii onkologicznej. (<http://www.zdaj.com/>) Urządzenia zaprojektowane w Instytucie produkowane są w Zakładzie Aparatury Jądrowej (ZdAJ) i sprzedawane do szpitali w liczbie od kilku do kilkudziesięciu na rok. Jeśli prezentowany projekt uzyska finansowanie i zakończy się sukcesem, IPJ może stać się producentem opracowanych instrumentów.



#### **4. Co będzie wymiernym, udokumentowanym efektem podjętego problemu**

**Zakładany sposób przekazu i upowszechnienia wyników (publikacje naukowe oraz referaty na konferencjach w kraju i za granicą, monografie naukowe, rozprawy doktorskie i habilitacyjne, nowe patenty i “know-how”, nowe metody i urządzenia badawcze)?**

Planowanym wynikiem opisanych wyżej prac jest projekt modułowego systemu obserwacji całego nieba. Pojedynczy moduł integrujący kamerę CCD i układ optyczny powinien być zoptymalizowany z myślą o taniej produkcji w liczbie dziesiątków egzemplarzy. Planuje się wykonanie i przetestowanie prototypowego modułu. Projekt systemu zawierać też będzie koncepcję akwizycji i analizy danych zarówno w warstwie sprzętowej jak i programistycznej.

Wyniki prac będą opublikowane w prestiżowych czasopismach recenzowanych i przedstawiane na międzynarodowych konferencjach. Części prac wykonane przez zaangażowanych w projekt studentów będą udokumentowane w ich pracach magisterskich i doktorskich.

Zbadane będą także możliwości produkcji opracowanych urządzeń w szerszej skali. Instytucje zainteresowane posiadaniem takiej aparatury zostaną poinformowane o szczegółach.