

# Grant aparaturowy OA UAM

## Uzasadnienie zakupów

Tomasz Kwiatkowski

20 marca 2006 r.

### Streszczenie

W ramach grantu aparaturowego chcemy ulepszyć teleskop spektroskopowy, który powstaje w Borowcu w ramach wcześniejszych projektów. Zakupy dotyczą dwóch zasadniczych części: niskoszumowej kamery CCD do spektrografu oraz nowych lusterek do teleskopu spektroskopowego.

## 1 Zakupy przewidziane w planach

W złożonym projekcie grantu określono zakres rzeczowy zakupów:

L.P.	Nazwa aparatury	Liczba	Plan. nakłady w PLN
1.	<b>Podzespoły do teleskopu 70 cm</b>		
	Lustro paraboliczne 70 cm	1	90 000
	Lustro wtórne hiperboliczne	1	30 000
	Tubus teleskopu	1	20 000
	Adapter do spektrografu	1	20 000
	Autoguider ST-7 XE	1	20 000
	Komputer sterujący + lokalny Ethernet	1	10 000
2.	<b>Kamera CCD do spektrografu</b>		
	Wright Instruments EEV 1k × 1k CCD	1	280 000
	Komputer do akwizycji danych	1	10 000
	RAZEM		480 000

Uzasadnienie naukowe planowanych zakupów niewiele zmieniło się od roku 2000, gdy składano grant po raz pierwszy. Same zakupy jednak uległy dość znaczącej zmianie, pierwotny bowiem plan zakupów (z roku 2000) wyglądał następująco:

Podzespoły do teleskopu 70-cm	
Kamera CCD SITE 1024x1024	13 400 USD
Układ chłodzenia kamery (Neslab)	4 200 USD
Lustro paraboliczne (Nova Optical)	9 800 USD
Lustro wtórne hiperboliczne	4 100 USD
Enkodery do odczytu osi	2 × 1 500 USD
Silniki do otwierania pawilonu	1 000 USD
Komputer do akwizycji i arch. danych	2 500 USD
Podzespoły do teleskopu 40-cm	
Kamera CCD SITE 512x512 z kołem do filtrów (Apogee)	7 500 USD
Układ chłodzenia kamery (Neslab)	4 200 USD
Zestaw filtrów B,V,R,I (Bessel Optics)	950 USD
Program obsługi kamer CCD (Torus)	1 550 USD
Komputer do akwizycji i arch. danych	2 500 USD
RAZEM	54 700 USD
(przy kursie 1 USD = 5 PLN)	273 500 PLN

Pierwszą zmianą jest całkowity koszt inwestycji, który w złotych wzrósł ok. 1.5 razy. Ponadto w planie z roku 2004 pominięto drugi teleskop (który miał służyć fotometrii), teleskop spektroskopowy zaś (o średnicy lustra 0.7 m) zostanie ostatecznie umiejscowiony w widłach kamery SBG, a nie na dużo lepszym (bo gotowym do pracy) montażu dalmierza laserowego. Ostatnia zmiana – decyzja o zakupie znacznie lepszej kamery CCD do spektrogrfu – odzwierciedla nasze negatywne doświadczenia z kamerą Apogee AP8p (której zakup planowaliśmy w roku 2000, a która została kupiona w roku 2002 z grantu Tadeusza Jopka).

Świadomość tej ewolucji planów zakupów jest potrzebna by zrozumieć przyczyny, dla których zamierza się zmienić w pewnych szczegółach ostatecznie kupowane komponenty całego systemu.

Podstawowa zmiana (w stosunku do planów z roku 2004) dotyczyć będzie luster do teleskopu. Planowane lustro 0.7 m będzie dużo droższe od branych pod uwagę luster parabolicznych o tej samej średnicy, przeznaczonych jednak dla teleskopów w systemie Newtona (jest to m.in. opinia optyka, R.F. Royce’a, u którego kupowaliśmy lustro paraboliczne będące kolimatorem w spektrografie echelle). Pierwotne szacunki dotyczyły luster newtonowskich 0.7 m, które w owym czasie były oferowane seryjnie (a nie na specjalne zamówienie) przez kilka amerykańskich firm optycznych. Obecnie tylko Nova Optics oferuje takie lustra; cena z roku 2003 wynosiła 6500 USD. Nova Optics nie jest jednak firmą o odpowiedniej renomie (produkuje lustra praktycznie tylko dla amatorów). Galaxy Optics (która testuje swoje lustra interferometrycznie), za lustro o średnicy 0.62 m żąda 8000 USD. Można szacować, że lustro 0.7 m zamawiane w ramach specjalnego zlecenia kosztowałoby min. 10000 USD.

Szacunek kosztu zestawu luster do teleskopu w systemie Cassegrain’a (główne 0.7 m plus wtórne, hiperboliczne) jest trudny do wykonania, gdyż nikt takich luster nie oferuje „off the shelf”. Są to zawsze osobne zamówienia z negocjowaną ceną. Można jednak skorzystać z cen luster Cassegrain’a *wraz z tubusem*, podawanych przez Optical Guidance Systems. Ceny te kształtują się następująco:

Nazwa	Parametry optyki i tubusa	Cena w USD
CC10	10" f/15, Mg and Al Combo	12,800.00
CC12.5	12.5" f/16, Magnesium	16,500.00
CC14.25	14.25" f/16, Aluminum	24,200.00
CC16	16" f/14, Aluminum	28,500.00
CC20	20" f/16, Aluminum	45,500.00
CC24	24" f/16, Aluminum	72,300.00
CC32	32" f/10, Aluminum	Pls. Inquire

W wykazie nie uwzględniono luster 0.7 m (28 cali), można jednak oszczędzić ich koszt na minimum 100 tys. USD. W porównaniu z planowaną przez nas ceną zestawu lustro główne 0.7 m, lustro hiperboliczne wtórne, tubus 140 tys. PLN (ok. 31 tys. USD), jest to ponad trzykrotnie więcej. Część oczywiście można zaoszczędzić samemu projektując tubus z układem ogniskowania, zlecając jego wykonanie w jednej z polskich firm i kupując za granicą jedynie zestaw luster. Koszt jednak może okazać się wyższy niż planowane 30 tys. USD, a prace mogą potrwać długo angażując czas kilku osób z OA UAM.

Kolejną kwestią jest też ograniczenie przyznanej kwoty z planowanych 480 tys. PLN do ok. 400 tys. PLN (ASC, private communication). Przy trudnych do zredukowania kosztach pozostałych elementów zestawu, redukcja ta dotknie właśnie luster i tubusa. Z planowanych 140 tys. PLN zostałyby wówczas jedynie ok. 60 tys. PLN. Jest to stanowczo zbyt mało na planowany teleskop Cassegrain'a. Istnieje jednak możliwość takiego wykorzystania tej kwoty, by — przy znacznie zredukowanych pracach konstrukcyjnych — osiągnąć rezultat taki sam, jak w przypadku konstrukcji teleskopu Cassegrain'a 0.7 m.

## 2 Uzasadnienia zakupu dwóch luster 0.5 m

W chwili obecnej w Borowcu, na bazie montażu kamery SBG, postaje dwulustrzany teleskop spektroskopowy. Jego konstrukcja wynika z przyjętego założenia: maksymalny zasięg spektrografu przy minimalnych nakładach finansowych i minimalnych nakładzie pracy. Spektrograf może rejestrować jednocześnie dwa widma, dostarczane mu oprzez dwa światłowody. Widma takie, przy zastosowaniu niskoszumowej kamery CCD, można z powodzeniem zsumować (szum odczytu i szum prądu ciemnego nie rosną w sposób znaczący).

Każdy światłowód można zatem zasilać z osobnego lustra otrzymując rezultat taki, jaki otrzymalibyśmy z pojedynczego zwierciadła o polu powierzchni równym sumie pól powierzchni zastosowanych luster. Stosując w teleskopie dwa lustra paraboliczne o średnicach 0.5 m otrzymujemy wypadkową aperturę lustra o średnicy 0.7 m.

Dodatkową zaletą takiego rozwiązania jest lepsze dopasowanie wiązki światła, zbieranego przez mniejsze lustra, do wejścia światłowodu. Światłowód powinien otrzymywać światło o zbieżności  $F/4.5-5.0$ , przy czym ogniskowa lustra powinna wynosić 1.8-2 m. Ten drugi warunek wynika z tego,

że średnica światłowodu wynosi  $50\mu\text{m}$ , a średnica FWHM gwiazd uzyskiwanych w warunkach Borowca (średni seeing  $3''$ ) w ogniskowej 2 m wynosi  $30\mu\text{m}$ . Zastosowanie pojedynczego lustro 0.7 m w typowej dla układu Cassegrain'a światłosile F/8 spowodowało by konieczność redukcji światłości do F/5. Ogniskowa takiego układu wynosiłaby jednak 3.5 m co oznacza, że na wejściu do światłowodu tracilibyśmy 30% światła gwiazdy. Zwierciadło 0.7 m funkcjonowałoby więc jak lustro 0.6 m, dając gorsze wyniki niż dwa lustra 0.5 m.

Na koniec warto wspomnieć, że budowany obecnie teleskop dwulustrzany, przystosowany do dwóch luster 0.4 m można będzie *bardzo łatwo* dostosować do dwóch luster 0.5 m, wymieniając jedynie tubusy (podstawa, mocowanie światłowodów, mocowanie w widłach teleskopu pozostana te same).

Koszt zakupu dwóch luster parabolicznych 0.5 m do teleskopu Newtona w firmie Galaxy Optics wynosi 37300 PLN plus transport. Mieści się to w zredukowanej kwocie 60 tys. PLN, którą można będzie przeznaczyć na zakup luster. Uzasadnienie takiej zmiany zakupów też nie będzie trudne: w sytuacji redukcji przyznanej kwoty konieczne jest zoptymalizowanie zakupów tak, by uzyskać zamierzony efekt mniejszym kosztem.

### 3 Nowy kosztorys zakupów

Po uwzględnieniu omówionych zmian, kosztorys końcowy grantu aparaturowego OA UAM może wyglądać następująco:

L.P.	Nazwa aparatury	Liczba	Plan. nakłady w PLN
1.	<b>Podzespoły do teleskopu 70 cm</b>		
	Lustro paraboliczne 50 cm	2	50 000
	Tubus do lustra	2	10 000
	Adapter do spektrografu	1	20 000
	Autoguider ST-7 XE	1	20 000
	Komputer sterujący + Ethernet	1	10 000
2.	<b>Kamera CCD do spektrografu</b>		
	Series 600 E2V $2k \times 2k$ CCD	1	280 000
	Komputer do akwizycji danych	1	10 000
	RAZEM		400 000

## 4 Dodatki

### 4.1 Uzasadnienie naukowe z 2000 r.

Przedmiotem niniejszego wniosku jest zakup sprzętu niezbędnego do przystosowania istniejącego w Stacji Obserwacyjnej UAM w Borowcu k. Poznania zaplecza instrumentalnego do obserwacji astronomicznych w trybie szybkiej reakcji na alert internetowy. W chwili obecnej znajduje się tam kupała z reflektorem 40-cm i kamerą CCD, od dwóch lat wykorzystywane w systematycznych obserwacjach fotometrycznych planetoid. Obok, w pawilonie, znajduje się zapasowy montaż dalmierza laserowego, przystosowany do luster o średnicy do 70 cm. Ze względu na specyfikę obserwacji satelitarnych

idealnie nadaje się do automatycznego i szybkiego odnajdywania celów. Po uzupełnieniu o system optyczny Cassegraine'a ze zwierciadłem głównym 70-cm, będzie on największym — pod względem czynnej apertury — teleskopem na terenie Polski. Po uruchomieniu zostanie połączony światłowodem ze stacjonarnym spektrografem CCD, uruchamianym właśnie w OA UAM w oparciu o niewielką dotację prof. Paczyńskiego.

Wg. sugestii prof. Paczyńskiego, w trybie normalnym teleskop 70-cm winien być wykorzystany do służby obserwacji jasnych układów gwiazd zmiennych, w programie kalibracji ich własności. Układy podwójne są odkrywane w bliskich galaktykach (m.i. przez grupę Kałużny, Stanek i in.) i mogą być użyte jako kosmologiczne wskaźniki odległości, pod warunkiem kalibracji na układach bliskich, obecnie zaniedbywanych.

Teleskop 40-cm w trybie normalnym będzie służył do kontynuacji programu obserwacji fotometrycznych planetoid długookresowych, podejrzanych o precesję osi rotacji, układów planetoid podwójnych oraz planetoid obserwowanych radarowo i będących celem misji kosmicznych.

W trybie alarmowym będziemy w stanie reagować w krótkim czasie na internetowe informacje o zjawiskach nagłych, m.in. o jasnych błyskach gamma, których jasność optyczna, jak się okazało, może dochodzić do 8 mag, wybuchach nowych i jasnych nowych karłowatych. W takim przypadku teleskop 40-cm zapewni fotometrię zjawiska, a teleskop 70-cm pozwoli otrzymać jego widmo.

Rozwijanie spektroskopii w oparciu o skromne, ale częściowo istniejące warunki sprzętowe stanowi niezbędny etap przygotowania do właściwego wykorzystania kolosalnej inwestycji jaką jest teleskop SALT. Z jednej strony mamy doświadczenie instrumentalne w rozwijaniu skromnymi środkami fotometrii CCD (na istniejącym teleskopie 40-cm), a z drugiej strony będziemy współpracować z instrumentalnie zaawansowaną stacją laserową CBK PAN w Borowcu. W ramach przygotowań rozwinięliśmy własny system sterowania instrumentami poprzez UNIX/INTERNET, oraz wdramy automatyzację teleskopu 40-cm.

## **4.2 Uzasadnienie naukowe z 2004 r.**

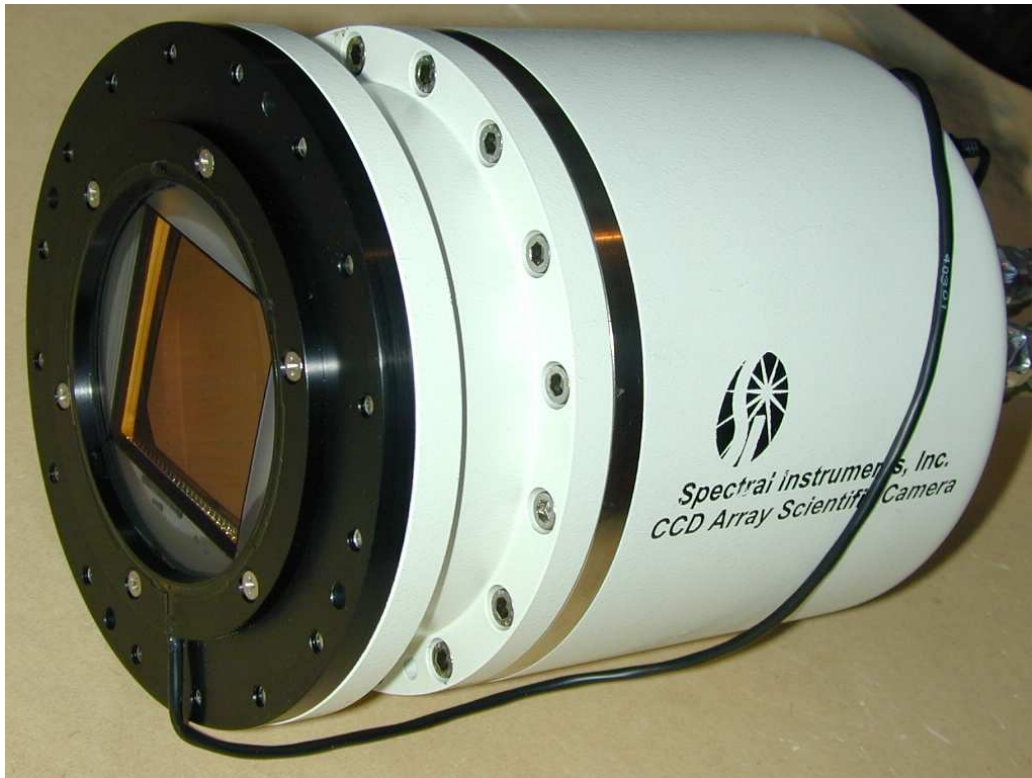
Przedmiotem niniejszego wniosku jest zakup sprzętu niezbędnego do przystosowania istniejącego w Stacji Obserwacyjnej UAM w Borowcu k. Poznania zaplecza instrumentalnego do obserwacji spektroskopowych w trybie szybkiej reakcji na alert internetowy. W chwili obecnej znajduje się tam kupa z reflektorem 40-cm i kamerą CCD, od siedmiu lat wykorzystywane w systematycznych obserwacjach fotometrycznych planetoid. Obok, w pawilonie, znajduje się montaż kamery satelitarnej SBG, przystosowany do luster o średnicy do 70 cm. Aktualnie montaż ten wyposażony jest w nowoczesny system sterowania komputerowego, który docelowo (przy pomocy programu TPOINT) powinien pozwolić na nastawianie teleskopu na dowolny cel na niebie w ciągu kilkadziesiąt sekund czasu, z dokładnością ok. 15 sekund łuku. Na montażu tym, tymczasowo, zostanie umieszczony tubus z dwoma zwierciadłami o średnicy 40cm, które umożliwią szybkie rozpoczęcie obserwacji fotometrycznych i spektroskopowych w celu przetestowania całego systemu.

Po wymianie starego tubusa na nowy, ze zwierciadłem o średnicy 70cm w systemie Cassegrain'a instrument ten będzie największym — pod względem czynnej apertury — teleskopem na terenie Polski. Po uruchomieniu zostanie połączony podwójnym światłowodem ze spektrografem echelle typu MUSICOS ( $R=35000$ ), zbudowanym w OA UAM oraz małym spektrografem siatkowym ( $R = 500-1000$ ), otrzymanym od prof. Paczyńskiego. Możliwości zestawu teleskop 70cm + MUSICOS najlepiej ocenić przez porównanie z podobnym zestawem w SAAO w RPA (teleskop 1.9m + MUSICOS). Obserwacje w SAAO pokazały, że przy użyciu lustra 1.9m, w ciągu 30 minutowych ekspozycji można uzyskać widma gwiazd o jasności 12 mag z  $S/N=10$ . Dla lustra o średnicy 0.7m z praktycznie identycznym spektrografem zasięg ten zmniejszy się do 10 mag. Oznacza to jednak konieczność zastosowania w spektrografie niskoszumowej kamery CCD o wymiarach sensora 1k x 1k. Wg. sugestii prof. Paczyńskiego, w trybie normalnym teleskop 70-cm winien być wykorzystany do służby obserwacji jasnych układów gwiazd zaćmienionych, w programie kalibracji ich własności. Układy podwójne są odkrywane w bliskich galaktykach (m.i. przez grupę Kałużny, Stanek i in.) i mogą być użyte jako kosmologiczne wskaźniki odległości, pod warunkiem kalibracji na układach bliskich, obecnie zaniebywanych. W trybie alarmowym będziemy w stanie reagować w krótkim czasie na internetowe informacje o zjawiskach nagłych, m.in. o jasnych błyskach gamma, których jasność optyczna, jak się okazało, może dochodzić do 8 mag, w wybuchach nowych i jasnych nowych karłowatych. W takim przypadku teleskop ze spektrografem niskiej rozdzielczości pozwoli szybko otrzymać widma obiektów o jasnościach do 12 mag. Rozwijanie spektroskopii w oparciu o skromne, ale częściowo istniejące warunki sprzętowe stanowi niezbędny etap przygotowania do właściwego wykorzystania kolosalnej inwestycji jaką jest teleskop SALT.

### 4.3 Jaka kamera do spektrografu?

Doświadczenia z wykorzystania kamery AP8p w spektrografie pozwalają nam stwierdzić, że pełne wykorzystanie tego instrumentu wymaga profesjonalnej, niskoszumowej kamery CCD. Starania, by schłodzić kamerę AP8p do temperatury  $-70^{\circ}$  C bez gwarancji, że wewnątrz nie wydzieli się szron, problemy z migawką kamery (umieszczoną nie wiedzieć czemu niedaleko sensora CCD i ogrzewającą schładzaną komorę) wskazują jasno, że praca tej i podobnych niej kamer firmy Finger Lake Instruments, *poza* zakresem temperatur przewidzianym przez producenta jest ryzykowana. Kamery CCD firm Wright Instruments (WI), o których myślano początkowo przy planowaniu zakupów nie są już dostępne w sprzedaży.

Kamery CCD Spectral Instruments (SI) i Princeton Instruments (PI) chłodzone termoelektrycznie mają sensor CCD umieszczony w próżni, jednak pozwalają na jej schłodzenie jedynie do  $-60^{\circ}$  C. Co prawda SI eksperymentuje ze schładzaniem kamer do  $-70^{\circ}$  C, jednak nazywa te modele *eksperymentalnymi* i nie gwarantuje osiągnięcia takich temperatur w ostatecznych wersjach. Inne modele kamer tych firm pozwalają na termoelektryczne schładzanie sensorów do temperatur  $-80^{\circ}$  C, a nawet — ostatnio — do  $-100^{\circ}$  C (nowe modele PI), jednak w każdym z tych przypadków chodzi o sensory o wymiarach



Rysunek 1: Kamera CCD 600 Series firmy Spectral Instruments

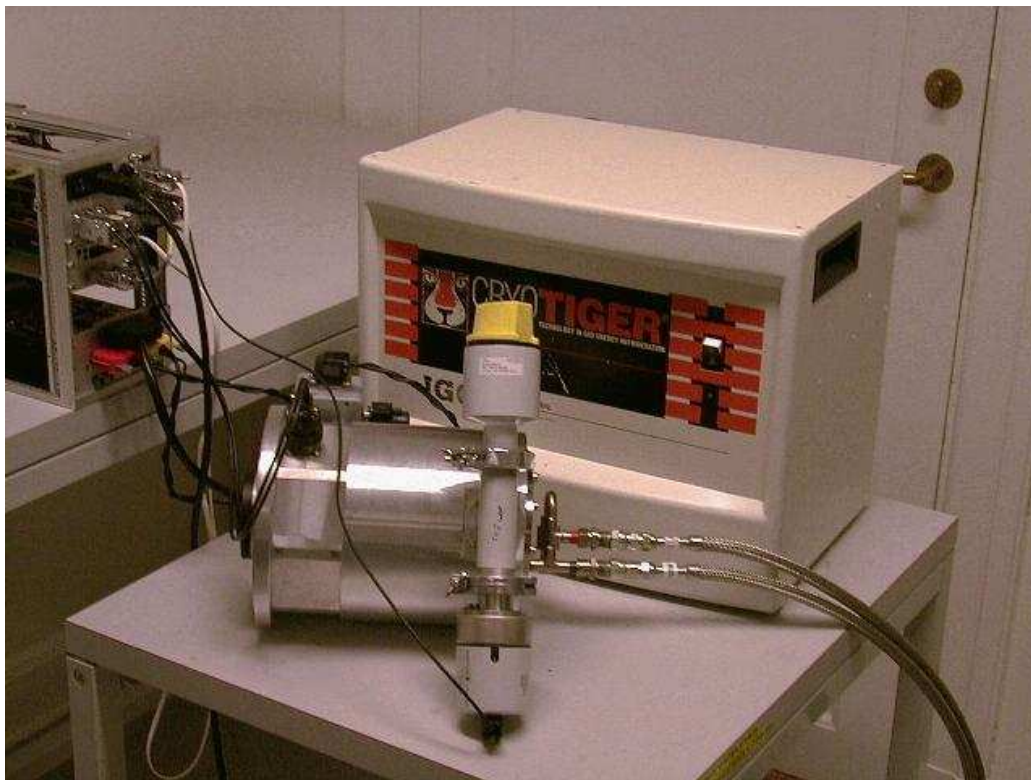
ok.  $12 \times 12\text{mm}^2$ , a my potrzebujemy sensor o rozmiarach  $24 \times 24\text{mm}^2$ . W przypadku tak dużych powierzchni sensora żadna z wymienionych firm nie oferuje układów TE pozwalających na zejście do  $-70^\circ\text{C}$  (poza wspomnianym, eksperymentalnym modelem Spectral Instruments Series 850).

W sytuacji, gdy chcemy uzyskiwać w kamerze dwa widma jednocześnie i sumować je wraz z szumem aparatury, musimy mieć kamerę o szumie odczytu  $3\text{e}^-$  i prądzie ciemnym  $< 10\text{e}^-/\text{pix}/\text{h}$ . Takie parametry dla sensorów CCD o pikselach  $24 \times 24\mu\text{m}^2$  osiąga się jedynie w temperaturach ok.  $-100^\circ\text{C}$ .

Tradycyjnie temperatury tego rzędu uzyskiwano przy pomocy chłodzenia kamery ciekłym azotem (LN). Pojawiają się jednak urządzenia wykorzystujące efekt Joule'a-Thomsona (schładzanie gazu przy jego rozprężaniu przez dyszę o niewielkim przekroju – tak działa zwykła lodówka sprężarkowa). W kamerach takich sensor CCD izolowany jest od otoczenia próżnią. Jego tylna ścianka styka się z płytką miedzianą, której drugi koniec chłodzony jest rozprężającym się gazem. Cała obudowa kamery utrzymywana jest w temperaturze pokojowej – co więcej, przednia szybka przez którą światło wpada do kamery jest *ogrzewana* w celu zapobieżenia pojawianiu się na niej szronu.

Do kamery dołączany jest kompresor, dostarczający do jej głowicy gaz roboczy pod ciśnieniem ok. 370 psi (pounds per square inch). Normalne ciśnienie atmosferyczne wynosi 1000 hPa, co odpowiada 14.5 psi. Jeśli kompresor nie będzie często odłączany i dołączany do kamery, gaz roboczy nie będzie wymagał uzupełniania. Próżnia w kamerze musi być odtwarzana średnio raz na rok (gdy – po ogrzaniu kamery do temperatury pokojowej – ciśnienie wewnątrz wzrośnie do poziomu 2 torów, czyli 260 Pa). Pompa próżniowa powinna umożliwiać odpompowanie komory do ciśnienia co najmniej  $10^{-2}$  tora.

Jest to wartość osiągana rutynowo przez wiele laboratoryjnych pomp. Najlepiej byłoby pompę taką wypożyczyć, by uniknąć odłączania przewodów kompresora od kamery.



Rysunek 2: Cryotiger w laboratorium w Danii, podłączony przewodami do kamery CCD (na pierwszym planie). W tle po lewej kontroler kamery.

Całe urządzenie do chłodzenia CCD produkowane jest przez APD CryoTiger i jest używane w wielu obserwatoriach od końca lat 90-tych (Rys. 2). Ten sposób chłodzenia CCD zastosowano także w podobnym do naszego projekcie Stella.

CryoTigery działają bardzo sprawnie, zdarzało się, że były na chodzie trzy miesiące bez wyłączenia (do ich budowy wykorzystuje się sprawdzone technologie z przemysłu chłodniczego). Producent podaje, że wymiana zużytych części powinna nastąpić po ok. 5 latach pracy. Jedyne kłopoty spowodowane są: nieprzestrzeganiem instrukcji obsługi, częstym odłączaniem i podłączaniem przewodów, związanym z przenoszeniem kamery CCD między ogniskami teleskopu, jak również niską temperaturą zewnętrzną w pomieszczeniu (pod kopułą teleskopu jest zimno). Nasze warunki nadają się wprost idealnie dla CryoTigera: osobne pomieszczenie, temperatura pokojowa, a przede wszystkim praca bez rozłączania. Wibracje powstające w głowicy chłodzącej na skutek przepływu gazu są praktycznie eliminowane przez stosowanie głowicy w wersji Low Vibrations.

Aktualnie kamery o powyższych parametrach oferują obie wspomniane wyżej firmy (SI i PI). W przypadku SI jest to model 600 Series z sensorem E2V 42-40 (2048 × 2048 pikseli, Rys.1), w przypadku PI: VersArray 2048B z sensorem E2V 42-40 oraz VersArray 1300B z sensorem E2V 36-40 (1340 × 1300 pikseli). Fizyczne rozmiary obu sensorów są podobne, E2V 42-40



możemy używać w trybie łączenia pikseli (binning  $2 \times 2$ ).

Oferty cenowe, otrzymane z SI i PI są następujące (1 USD=3.1 PLN, 1 EUR=4.0 PLN, VAT, cło):

Nazwa kamery CCD	Cena producenta	Cena brutto w PLN
600 Series	60 000 USD	244 000
VersArray 2048B	66 800 EUR	326 000
VersArray 1300B	60 800 EUR	300 000

Ceny wyraźnie wskazują na kamerę 600 Series.

## 5 Porównanie dwóch możliwych wersji

### 5.1 Kamera SI-600, CryoTiger

Podobny instrument (jeśli chodzi o sensor CCD i moduł chłodzący) stosowany jest w Stella Robotic Observatory na Wyspach Kanaryjskich. Stella składa się z dwóch teleskopów, z których większy (1.2 m) dostarcza światło do spektrografu echelle. Przy zastosowaniu światłowodu o średnicy  $50 \mu\text{m}$  spektrograf ten daje widmo o rozdzielczości  $R=50000$ .

Testy kamery u producenta wykazały, że w temperaturze  $T = -120^\circ$  w ciągu sześciu półgodzinnych ekspozycji prąd ciemny był niemierzalny. Pozostaje to w zgodzie specyfikacją Spectral Instruments dla modelu SI-600. W temperaturze  $T = -105^\circ$  kamera SI-600 ma mieć prąd ciemny  $d = 0.0002 \text{ e/pix/s}$ , co w czasie sześciu półgodzinnych ekspozycji dałoby  $2.16 \text{ e/pix}$  — wielkość trudną do wykrycia przy szumie odczytu  $\sigma_R = 3 - 4 \text{ e/pix}$ .

### 5.2 Kamera PI VersArray1300B, Peltier

Testy kamery VersArray1300B w Lulin Observatory (Taiwan) pokazały, że w temperaturze  $-50^\circ$  prąd ciemny wynosił średnio  $d = 0.064 \text{ e/pix/s}$ , a szum odczytu  $\sigma_R = 4.5 \text{ e/pix}$  (przy wzmocnieniu 2 e/AU i wolnym odczycie). PI oferuje nam kamerę z chłodzeniem termoelektrycznym, pozwalającym na osiągnięcie temperatury  $T = -60^\circ$  (jak już wspomniano wcześniej, dalsze jej obniżanie jest bardzo trudne z uwagi na duże rozmiary sensora CCD).

Biorąc pod uwagę, że producent w temperaturze  $T = -40^\circ$  przewiduje prąd ciemny  $d = 0.1 \text{ e/pix/s}$  możemy oszacować, że w temperaturze  $T = -60^\circ$  prąd ciemny wynosić będzie  $d = 0.03 \text{ e/pix/s}$ , a szum odczytu  $\sigma_R = 4 \text{ e/pix}$ .

### 5.3 Nowa oferta: Andor DZ436

Dyskutowane wcześniej kamery CCD wymagały nadzworu nad układem chłodzenia (uzupełnianie zapasu LN2, serwis kompresora w CryoTigerze). By

uczynić instrument bardziej autonomicznym poszukiwaliśmy kamery z chłodzeniem termoelektrycznym.

Przy stosunkowo dużych fizycznych rozmiarach wymaganego przez nas chipu CCD (ok.  $24 \times 24 \text{mm}^2$ ), trudno było odnaleźć producenta stosującego wystarczająco wydajne układy Peltiera. W końcu Andor Technologies zaproponował nam zmodyfikowany na specjalne zamówienie model swojej kamery CCD z serii iKon. Dołożenie dodatkowego stopnia Peltiera do dotychczas stosowanego układu czterostopniowego spowodowało obniżenie temperatury pracy kamery z  $-75^\circ$  do akceptowalnego przez nas poziomu  $-100^\circ$ . W temperaturze tej chip E2V 4240 o rozmiarach  $2048 \times 2048$ , wielkości piksela  $13.5 \mu\text{m}$  i szumie odczytu  $2.1 \text{e}^-/\text{pix}$  posiada prąd ciemny o wartości  $0.1 \text{e}^-/\text{pix}/\text{h}$ . Całość znakomicie nadaje się do rejestracji widm echelle.

## 6 Oczekiwany zasięg budowanego instrumentu

### 6.1 Wyniki dotychczasowych testów

Obserwacje spektroskopowe gwiazdy podwójnej V454 Aur, przeprowadzone 2004-01-23 w Borowcu na teleskopie 0.4 m z kamerą AP8p, schłodzoną do temp.  $-53^\circ\text{C}$  dały dobrej jakości widma na dwóch ramkach CCD, przy czasie naświetlania 1800 s.

Pomiar średniego poziomu continuum w odległości ok. 250 pikseli od środka łuków dały wyniki 2650 ADU i 2670 ADU odpowiednio na pierwszej i drugiej ramce. Średni poziom tła między rzędami wynosił na obu ramkach 2450 ADU (nie odejmowano tu światła rozproszonego). Sygnał, przypadający na jeden piksel, wynosił więc ok 200 ADU, co przy współczynniku konwersji  $5.3 \text{e}^-/\text{ADU}$  oznacza ok.  $1000 \text{e}^-$ . Wartość tę należy odnosić do środkowego piksela w poprzecznym przekroju widma.

Szum odczytu można oszacować z różnicy dwóch ramek offsetowych. Wynosił on  $\sigma_r = 11 \text{e}^-$  (w przeliczeniu na jedną ramkę). W podobny sposób szum prądu ciemnego można oszacować z różnicy dwóch ramek ciemnych, naświetlanych 1800 s. Otrzymana wartość  $5 \text{ADU} = 26 \text{e}^-$  odnosi się jednak do sumy dwóch szumów prądu ciemnego i dwóch szumów odczytu. W przeliczeniu na jedną ramkę, szum prądu ciemnego wynosił  $\sigma_d = 14.5 \text{e}^-$ . Dodatkowym sprawdzianem może być szum odczytu, oszacowany z overscanów obu ramek ciemnych. Wynosił on również  $\sigma_r = 11 \text{e}^-$ , w przeliczeniu na jedną ramkę.

Z szumu prądu ciemnego można obliczyć jego wartość (przy założeniu rozkładu Poissona). Wynosiła ona  $d = 0.12 \text{e}^-/\text{pix}/\text{s}$ .

Ostatecznie otrzymujemy oszacowanie  $S/N = 27$ . Możemy teraz oszacować jasność gwiazdy, która dałaby  $S/N = 10$  (musi ona dawać sygnał równy  $S = 270 \text{e}^-$ ). Gwiazda taka musiałaby być  $1^{\text{m}}55$  słabsza, czyli jej jasność powinna wynosić  $V = 9^{\text{m}}3$ .

### 6.2 Szacowany zasięg z nowymi instrumentami

Po wznowieniu obserwacji na teleskopie o dwóch lustrach 0.4 m, z kamerą Andor DZ 436, zasięg spektroskopii ulegnie wyraźnemu polepszeniu. Możemy

wstępnie założyć, że w temp.  $-100^{\circ}\text{C}$  prąd ciemny kamery DZ 436 wyniesie (po połączeniu czterech pikseli w jeden)  $3.6 e^-/\text{pix}$ , a szum odczytu  $\sigma_r = 3 e^-/\text{pix}$ . Skalując wyniki uzyskane w czasie dotychczasowych testów (6.1) dochodzimy do następujących wyników:

Teleskop	Czas eksp.	Sygnal $S$	Zasięg
0.4 m	900 s	220	$9^{\text{m}}5$
0.4 m	1800 s	113	$10^{\text{m}}2$
0.4 m	3600 s	58	$11^{\text{m}}0$
$2 \times 0.4$ m	900 s	119	$10^{\text{m}}2$
$2 \times 0.4$ m	1800 s	61	$10^{\text{m}}9$
$2 \times 0.4$ m	3600 s	31.5	$11^{\text{m}}6$
$2 \times 0.5$ m	900 s	76	$10^{\text{m}}7$
$2 \times 0.5$ m	1800 s	39	$11^{\text{m}}4$
$2 \times 0.5$ m	3600 s	20.3	$12^{\text{m}}1$

gdzie  $S$  jest sygnałem w elektronach w przeliczeniu na półgodzinną ekspozycję z pojedynczym lustrem 0.4 m.