

Tests of the optical system of the 50/70cm Schmidt telescope in Rozhen NAO

Pencho Dimitrov Markishki

Rozhen NAO, Institute of Astronomy, Bulgarian Academy of Sciences.

markishky@mail.bg

Abstract. The procedures performed to verify the adjustment of the optics of the 50/70 cm. Schmidt telescope at Rozhen NAO, Bulgaria, are described. The results, as well as the methods and equipment used are presented. An analysis of the possible reasons for deterioration of the photometric precision of the measurements of faint objects, especially those in the vicinity of bright ones is carried out.

Key words: Schmidt telescope, optical design, adjustment of optics, optical aberrations, curvature of the focal field, auto-collimator, Gauss eyepiece.

Тестове на оптичната система на 50/70см Шмид-телескоп в НАО-Рожен.

Пенчо Димитров Маркишки

В тази статия са описани процедури, извършени с цел проверка на юстировката на оптиката на 50/70см Шмид-телескоп в НАО. Представени са принципните постановки, залегнали в методиките на измерванията, използваната техника и получените резултати. Анализирани са причините, пораждащи нежелани светлинни ефекти в системата, които могат да повлияят неблагоприятно фотометричните измервания на ярки обекти или на слаби такива, проектиращи се в близост до ярки.

Съдържание с препратки:

[1. Проверка на юстировката на оптичните елементи](#)

[1.1 Принципна постановка и използвана техника](#)

[1.2 Особенности и резултати](#)

[2. Проверка за перпендикулярност на CCD-матрицата спрямо главната оптична ос](#)

[3. Анализ на ореолите около звездните изображения](#)

[4. Кривината на фокалното поле и влиянието ѝ върху изображението](#)

Общи данни

Параметри на Шмид-телескопа:

Диаметър на огледалото 700 mm;
Диаметър на пластината: 500 mm;
Фокусно разстояние: 1720 mm;
Относителен отвор: 1:3.44 (f/3.44);

Параметри на CCD-камерата FLI PL 16803:

Матрица 4096x4096 пиксела, 9 μm квадратен пиксел;
Размер на работната област на чипа 36.86 x 36.86mm, диагонал 52.13 mm;
Работно поле с Шмидт телескопа: $1^{\circ}.228 \times 1^{\circ}.228 = 73'.6 \times 73'.6$;
Обхват на 1 пиксел: $1''.08 \times 1''.08$.

1. Проверка на юстировката на оптичните елементи

1.1. Принципна постановка и използвана техника

За този тест бе използвана автоколимационна тръба 430/50 от комплекцията на Оптична скамейка „ОСК-2”, налична в НАО. Устройството на този тип инструменти е описано подробно в статията на автора “Работа с автоколиматор” (<http://f-galleries3.hit.bg/autokolimators.htm>). За изясняване на приложените в теста методи е препоръчително читателят първо да се запознае с разделите 1.1.3. “Отражения от сферични повърхности” и 1.1.4. “Измерване на разстояния с автоколиматор и определяне на радиуса на сферична отразяваща повърхност” в същата статия.

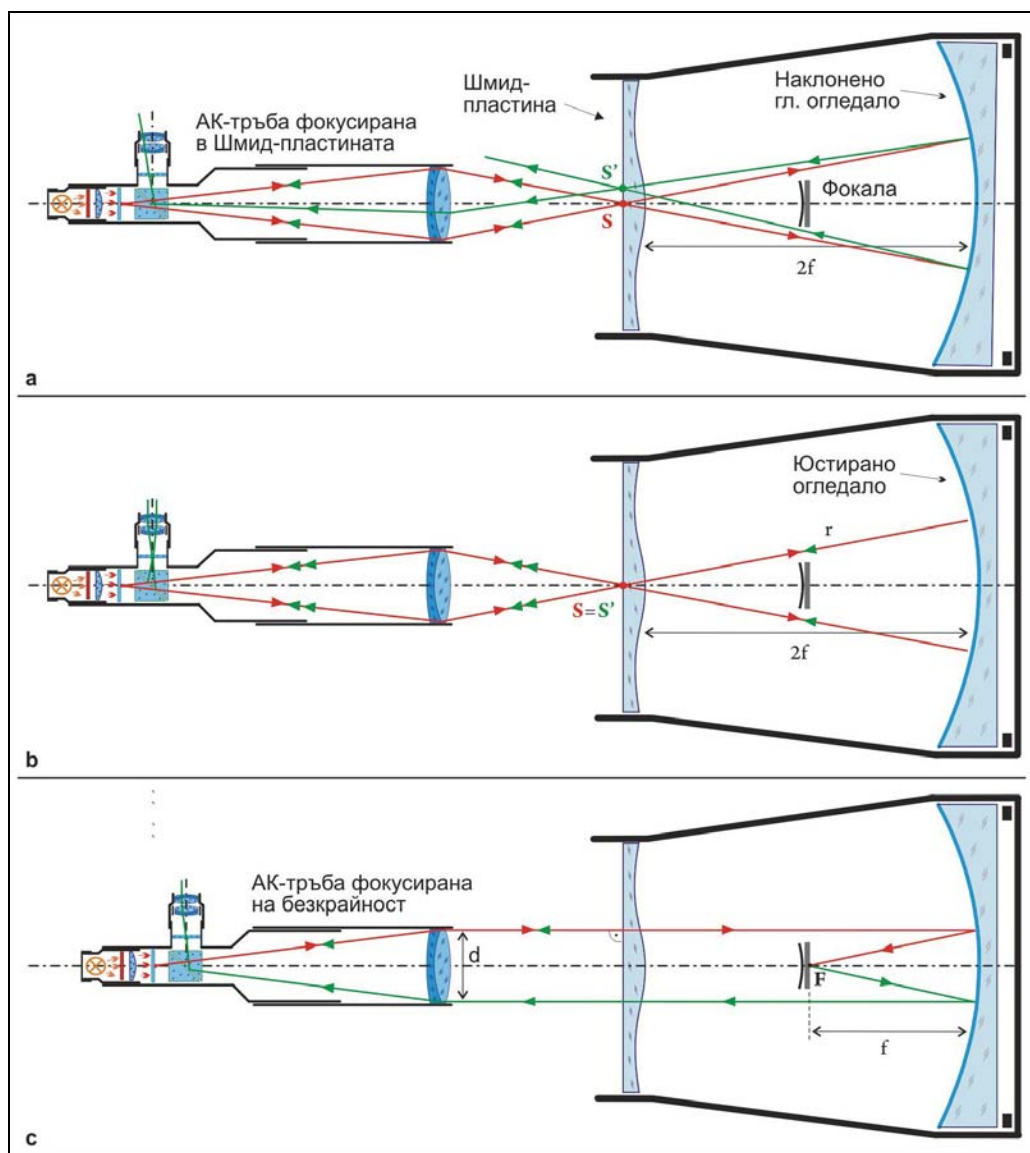
Етапи на работа:

Етап 1:

На известно разстояние пред Шмид-пластината се монтира автоколимационна (АК) тръба, фокусирана на къса дистанция – във фабричният белег S , указващ геометричния център на пластината (примери **a** и **b** от фиг. 1.1 по-долу). Тъй като при класическият Шмид-телескоп, пластината е отдалечена от огледалото на дистанция равна на двойното фокусно разстояние $2f$ на последното (в нашият случай $2f = 3440\text{mm}$ = радиуса r на повърхностната кривина на сферичното огледало), то образът на осветения белег S ще се построи в равнината, в която се намира самият белег – класически случай на автоколимация. Ако АК е фокусирана в белега S , работещият ще види в окуляра също и неговият автоколимиран обърнат образ S' . Ако образа на белега съвпада със самият него т.е. $S=S'$, това означава, че главната оптична ос на огледалото пробощда пластината точно в нейният център. Причините оста на огледалото да не минава през т. S може да са радиално отместване на огледалото или на самата пластина, наклон на огледалото, както и огъване на тубуса на телескопа.

В този случай - при несъосност на огледалото, работещият ще вижда и два автоколимирани образа на светещия маркер на своята АК-тръба (минутна скала, тип „сименсова звезда” или друг светещ тип reticle). Единият от тях е отражение от пластината на телескопа, а вторият – от огледалото зад нея. На фиг. 1.1 това

двойно отражение е указано с двойните зелени стрелки срещу обектива на АК. Ако тези два образа са добре центрирани (т.е. съвпадащи в окуляра) заедно с двата образа на белега S и S' , това е гаранция, че АК е съосна с огледалото и че общата им ос пробощда пластината точно в нейният център. С това обаче не може да се тества перпендикулярността на пластината спрямо оста. За целта се пристъпва към етап 2 (пример c от фиг. 1.1).



Фиг. 1.1. Методи за тестове:

- a** – ход на светлината при наклонено огледало;
- b** – ход при добре юстирано огледало (представените лъчи се движат точно по радиуса r на отиване към огледалото и след отражението в него);

c – проверка на перпендикулярността на пластината. Необходимо е диаметърът **d** на обектива а АК да е по-голям от CCD-камерата или касетата за плаки.

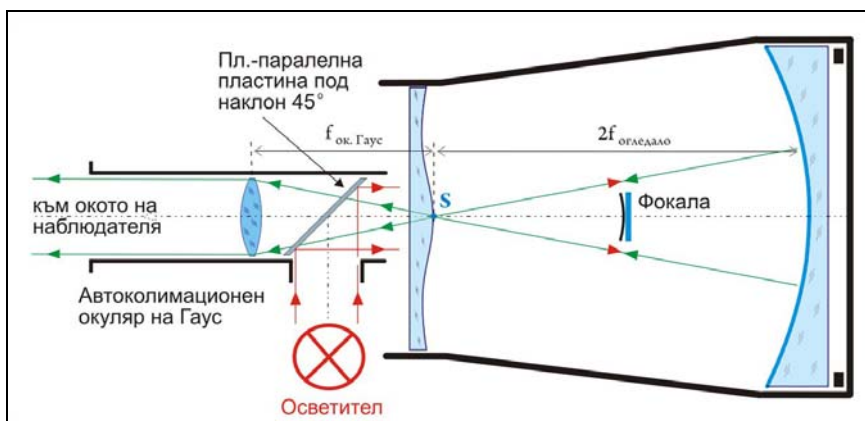
Етап 2:

Ако предната повърхност на пластината е плоска, при фокусировка на АК на безкрайност, в окуляра ще се вижда автоколимираният образ на светещия маркер (reticle) на автоколиматора. За наклона на плоска отразяваща повърхност можем да съдим когато в нея се отразява паралелен светлинен сноп, напускащ и връщащ се в обектива на автоколиматора, но не и когато последният е фокусиран върху самата повърхност, както във фиг. 1.1 **a** и **b**. Самото префокусиране на безкрайност трябва да се извърши без АК да се размества от позицията си, установена в етап 1 на теста. Ако тогава образът на светещия маркер се окаже добре центриран със собственият кръст на окуляра, значи пластината е строго перпендикулярна на общата оптична ос на огледалото и АК, която вече можем да наречем главна оптична ос на телескопа.

Можем да направим тази проверка и чрез използване на две отражения при паралелен сноп, влизащ в телескопа (фиг. 1.1-**c**). Тогава съпоставяме отражението от пластината с отражение, което се получава след като поставим плоско огледало в касетата за плаки или ползваме лъскавата повърхност на самата CCD-матрица. Тогава второто отражение ще се получи по реда: главно огледало - плоско огледало във фокалата - отново главно огледало - обектив на АК. Евентуален лек наклон на огледалото във фокалата няма да повлияе измерването, тъй като върху него ще попада фокусиран сноп (фокусът **F**). Използването на повърхността на някой от светофилтрите пред матрицата е също удачно, стига филтърът да не се окаже прекалено неперпендикулярен спрямо гл. оптична ос. Тогава просто светлината ще се отрази някъде настрани и няма да се върне в обектива на АК. При наблюдение на двете отражения в окуляра, трябва да се провери дали те са центрирани в полето едно с друго.

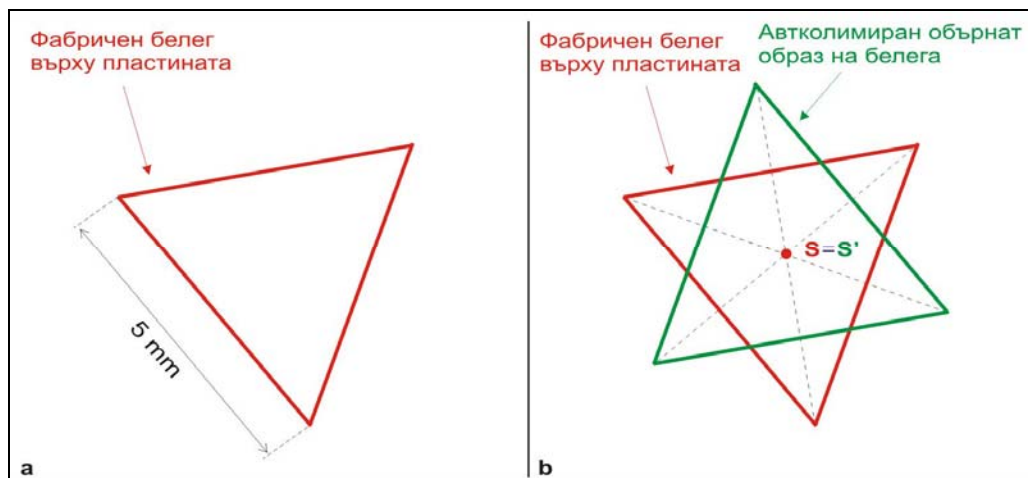
1.2. Особенности при работата и резултати

В конкретния случай с нашият Шмид-телескоп, проблем се оказа невъзможността на никой от двата ни автоколиматора да фокусират на къса дистанция (под 1м). Това наложи автоколиматорите да бъдат заменени с автоколимационен окуляр на Гаус:



Фиг. 1.2. Използване на автоколимационен окуляр на Гаус

Автоколимационният окуляр на Гаус е сравнително дългофокусен еднолецов (или с двueleментна ахроматична леща) окуляр, респ. с голяма работна отсечка. В случая - с $f=41.63\text{mm}$ (24.2 диоптъра, 6х увеличение), като между лещата и предният ѝ фокус (S) е монтирана плоско-паралелна стъклена пластина под наклон 45° . Тя отразява част от светлината от светоизточника напред към тестваната оптика. Работещият вижда както фабричният белег с център S, врязан върху Шмид-пластината (равностранен триъгълник със страна 5mm - фиг. 1.3-a), така и автоколимираният му образ с център S' (пример b). Центърът S на триъгълника обаче не е отбелязан върху стъклото – на следващите фигури той е нанесен геометрично в пресечната на медианите (медицентър).



Фиг. 1.3. Фабричният белег в центъра на пластината:

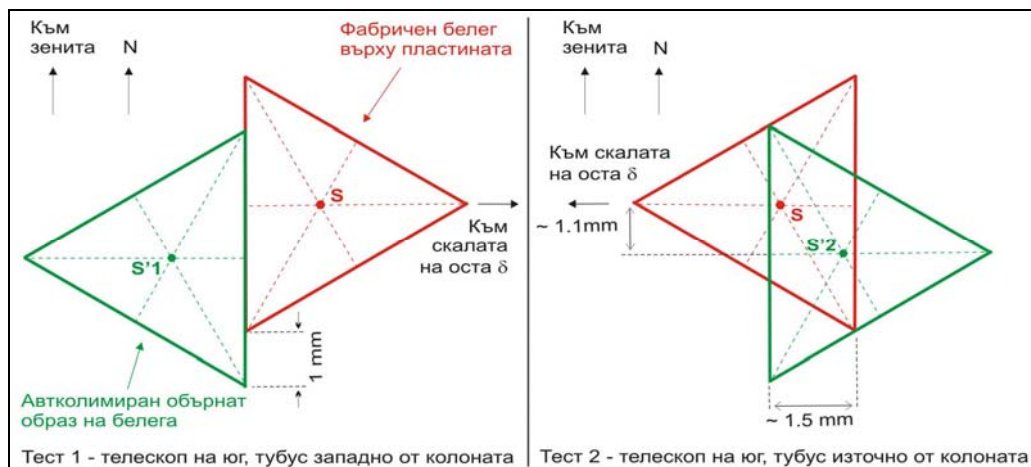
a – равностранен триъгълник със страна 5 mm врязан в стъклото;

b – белегът (в червено) и автоколимираният му от сферичното огледало образ (в зелено). В същите цветове са и на следващите фигури.

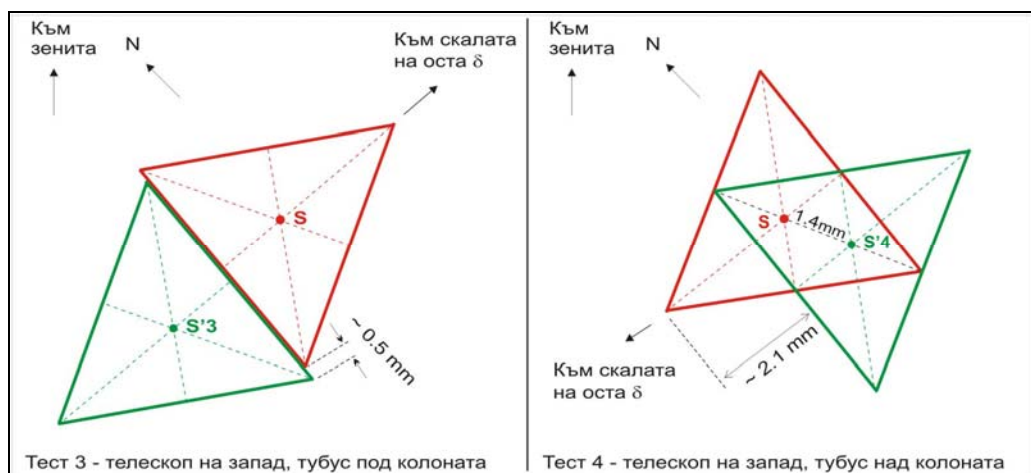
При добра юстировка на оптиката, наблюдателят ще вижда белега и обрнатият му действителен образ насложени правилно във вид на „еврейска звезда” - със съвпадащи медицентрове S и S'. Медицентровете са отбелязани само на фигурите, реално такива не се виждат.

Следват резултати, показващи движението на образа на белега в зависимост от посоката на телескопа. Поглед – срещу пластината на телескопа. Центърът на автоколимираният образ е отбелязан с $S'N$, където N е номерът на всеки един от 6-те проведени теста.

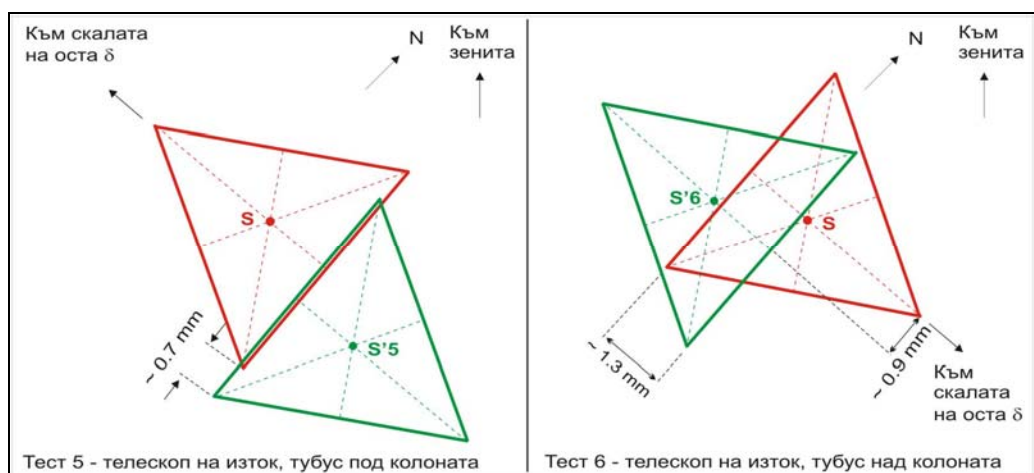
Фотографирането на тези моменти бе особено трудна задача – окулярът на Гаус дава изображения с много бликове. Следващите фигури са въз основа на снимки и скици. В повечето случаи конфигурациите на двата триъгълника се оказаха лесно запомнящи се за скициране - плътно допиращи се или припокриващи се точно на половин или на цяла медиана:



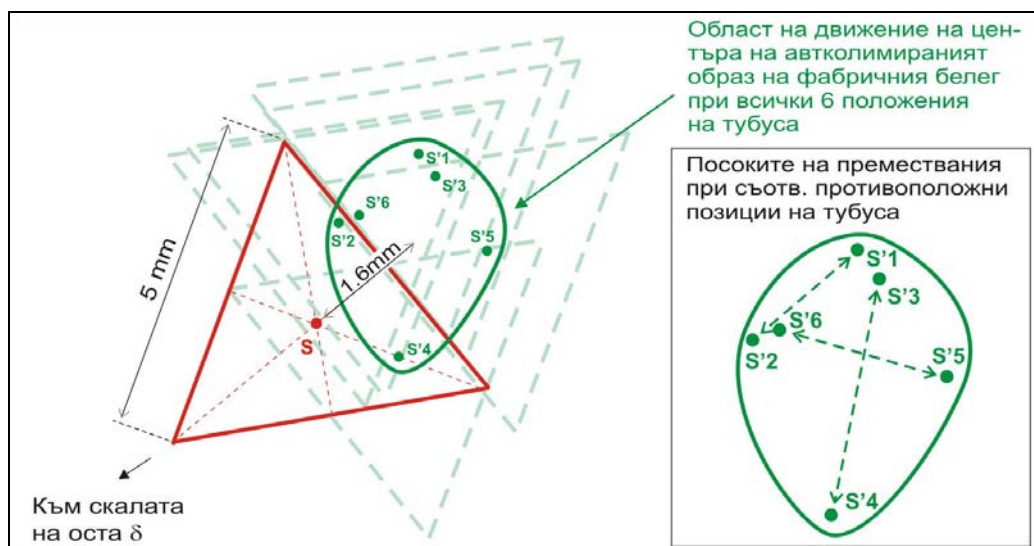
Фиг. 1.4. Изместване на автоколимираният образ при телескоп насочен на юг, алтитуда 15° .



Фиг. 1.5. Изместване на автоколимираният образ при телескоп насочен на запад, алтитуда $\sim 15^\circ$.



Фиг. 1.6. Изместване на автоколимирания образ при телескоп насочен на изток, алтитуда $\sim 15^\circ$.



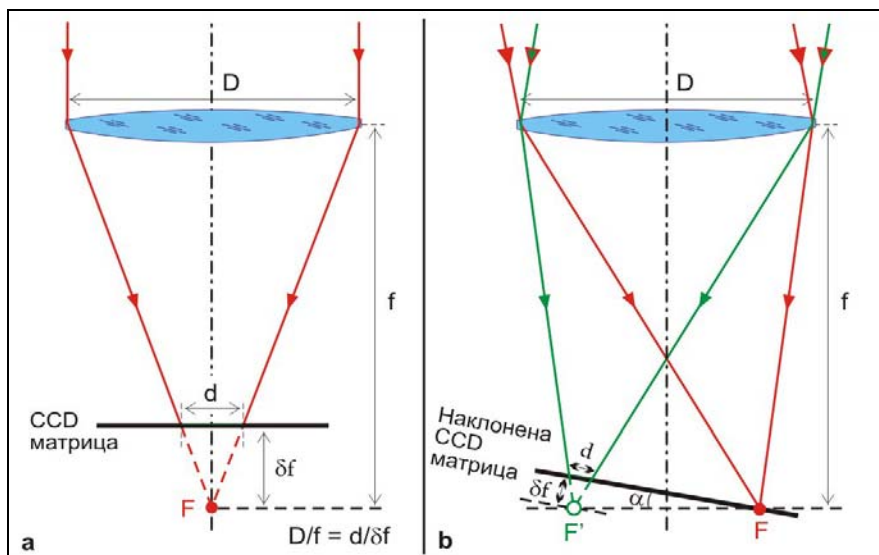
Фиг. 1.7. Обобщен резултат – областта, в която се премества центърът S' на автоколимираният образ при разглежданите по-горе 6 положения на телескопа. Центърът на тази област е на около 1.6 mm от медицентъра S на врязаният в стъклото триъгълник, в посока обратна на посоката към скалата на оста δ . Предвид двойното фокусно $2f = 3440$ mm, ъгловото преместване на образа е средно $0''.026 = 1'.6 = 96''$. Реалният наклон на оста на огледалото е половината от този ъгъл: $48''$.

Забелязва се тенденция при тестовите в различните посоки, центърът S' на автоколимираният образ да остава по-ниско от центъра на оградената със зелена линия област не неговото движение. Това не може да се обясни с провисване на двата края на тубуса на телескопа - тогава би следвало образът да се вдига винаги към горния край на областта. По-логично е накланяне на огледалото надолу в леглото си с около 0.16 mm, при което отразеният образ слиза по-ниско.

2. Проверка за неперпендикулярност на CCD-матрицата спрямо главната оптична ос

Шмид-телескопът в НАО е с относителен отвор $D/f = 50/172\text{см} = 1:3.44$. Това означава, че при дефокус δf , той и диаметърът d на кръгчето - разфокусиран образ на звезда, ще се отнасят по същия начин: $d/\delta f = 1:3.44$ (фиг. 2.1-а по-долу). Ако разфокусираме умишлено телескопа с някакво известно δf (по скалата за фокусиране или сметнато по d на образ на звезда) и ако измерим диаметрите d на образи, проектиращи се близо до четирите ъгъла на кадъра, по евент. разлики в тези диаметри ще можем да съдим за неперпендикулярност на матрицата спрямо гл. оптич. ос.

Ако оптичната система е много широкоъгълна (с обхват поне няколко граду-са), то формите на разфокусираните звездни изображения в краищата на полето вече доловимо ще се отличават от кръг - примерно ще са елипсовидни. В действителност формата им може да бъде по-сложна заради дефекти като комата и астигматизма, но тъй като оптичната система Шмид е 100% свободна от тях, формата им ще е близка до елипса. Ориентацията на тези елипси в кадъра ще бъде функция от позиционният ъгъл. Отношенията между голямата и малката оси на тези елипси пък ще е функция от ъгловото отстояние на образа от центъра на полето. В нашият случай можем да пренебрегнем тези особености и да смята-ме, че разфокусираните образи на всички звезди в полето са кръгли, като измер-ваме тяхното d само по едно и също направление (изток-запад). Така ще избег-нем неудобството от ексцентричната сянка на камерата и филтърният блок, която създава проблем при опити за измерване в посока север-юг.



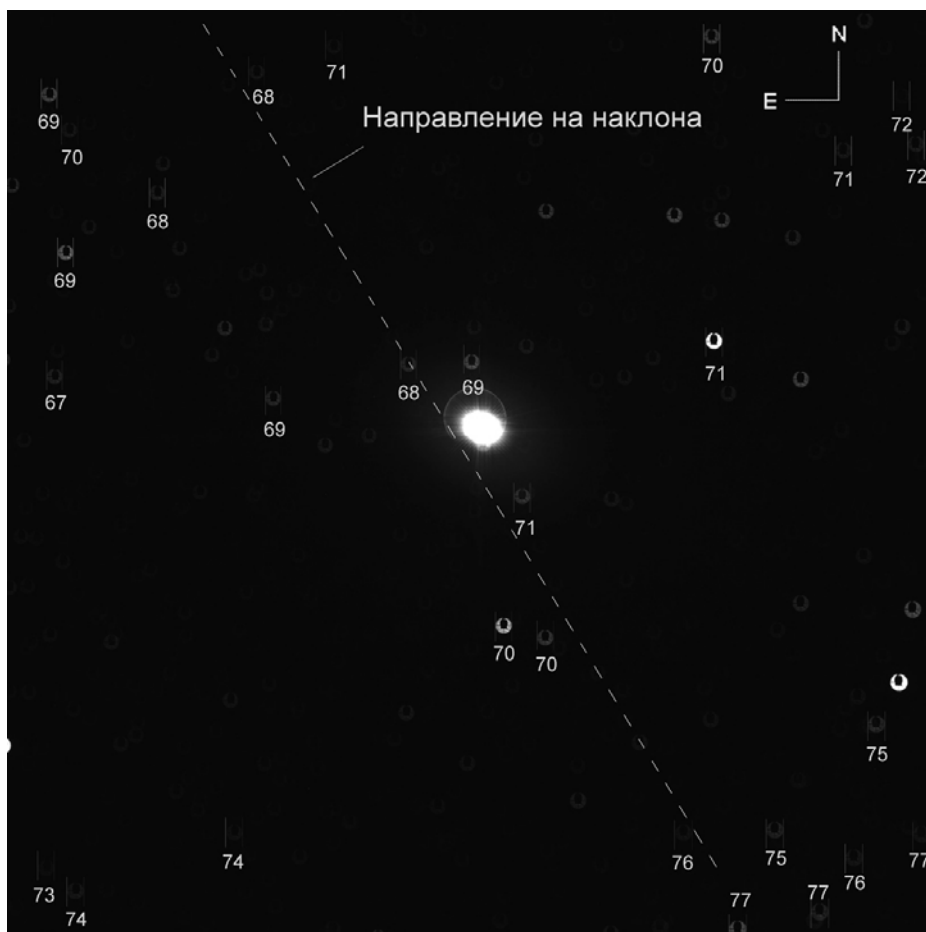
Фиг. 2.1. Разфокусирани звездни изображения:

- a** - зависимост на диаметъра d на разфокусиран образ на звезда от дефокуса δf .
- b** - добре фокусирана звезда във F и диаметър d на разфокусиран образ на звезда пред F' в другия край на матрицата, заради наклонът α .

С най-голям диаметър се оказват образите в ъгъла, в който се проектира юго-западната част на полето: ~ 76 пиксела, с $d = 0.68\text{mm}$, а най-малки – в ъгъла съдържащ североизточната част на полето: ~ 69 пиксела, с $d = 0.62\text{mm}$.

Следва да умножим разликата от 0.06mm по отношението f/D на телескопа ($f/D = 3.44$). Ъгълът, съдържащ североизточната част на полето е по-далеч от огледалото с $0.06 \cdot 3.44 = 0.2\text{mm}$ от срещуположният ъгъл. Предвид обръщането на образа, този ъгъл физически е югозападният на матрицата, при телескоп западно от колоната.

Тъй като направлението на наклона е почти по диагонала NE-SW на матрицата (който е дълъг 52.13mm), при разликата от 0.2mm имаме наклон на матрицата около 0.22° . $\sim 13'$. Ореолите около звездите са винаги изместени на североизток – т.е. към по-отдалечения от огледалото ъгъл на матрицата, но това не значи, че вксцентричността им непременно има връзка с наклона. За анализа на ореолите вижте следващия раздел.



Фиг. 2.2. Диаметрите на разфокусираните звездни образи в пиксели близо до ъглите на матрицата (районът около Вега с разфокусиране 2.14mm към огледалото).

3. Анализ на ореолите около звездните изображения

В ореолите около образите на по-ярките звезди правят впечатление следните особености:

1. Ексцентрични са спрямо звездите - в посока към север-североизток, ако снимките са заснети при телескоп вдясно (западно) от колоната - фиг 3.1 по-долу.

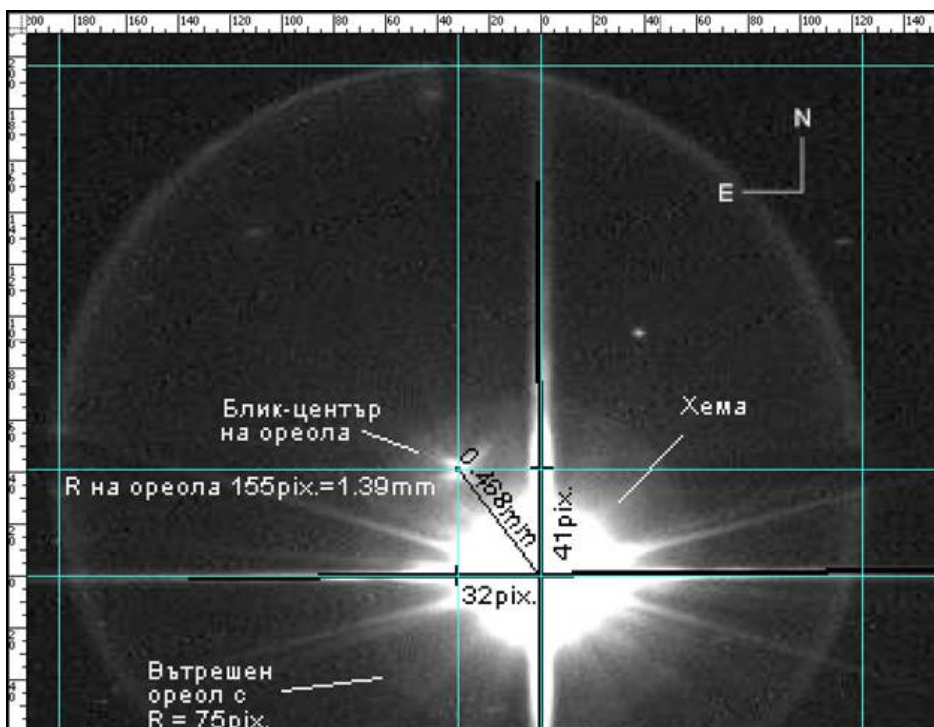
2. Вътрешността на ореолите е запълнена с по-осветено поле от околния фон (фиг. 3.1 и 3.2), което говори, че те не са толкова резултат от дифракция от краищата на Шмид-пластината, а са образувани от плътен светлинен сноп, достигащ матрицата недофокусиран (сходящ), или **вече** преминал през свой собствен фокус, намиращ се някъде **пред** прекия фокус на телескопа (т.е. разходящ сноп – фиг. 3.3). Такъв сноп може да се получи например след вътрешни отражения между двете повърхности на прозрачен оптичен детайл – Шмид-пластината или светофилтър, или дори при сложни отражения в двете посоки между повърхностите на два или повече оптични детайла. В този случай ексцентричността на ореола говори за лек наклон на някои от опт. детайли спрямо главната ос на телескопа;

3. Дифракционната картина, получена от кръста носещ камерата, не разделя ореола на 4 равни площи, заради ексцентричността му, което говори в полза на т. 2 - че ореолите не са дифракционна картина от краищата на пластината;

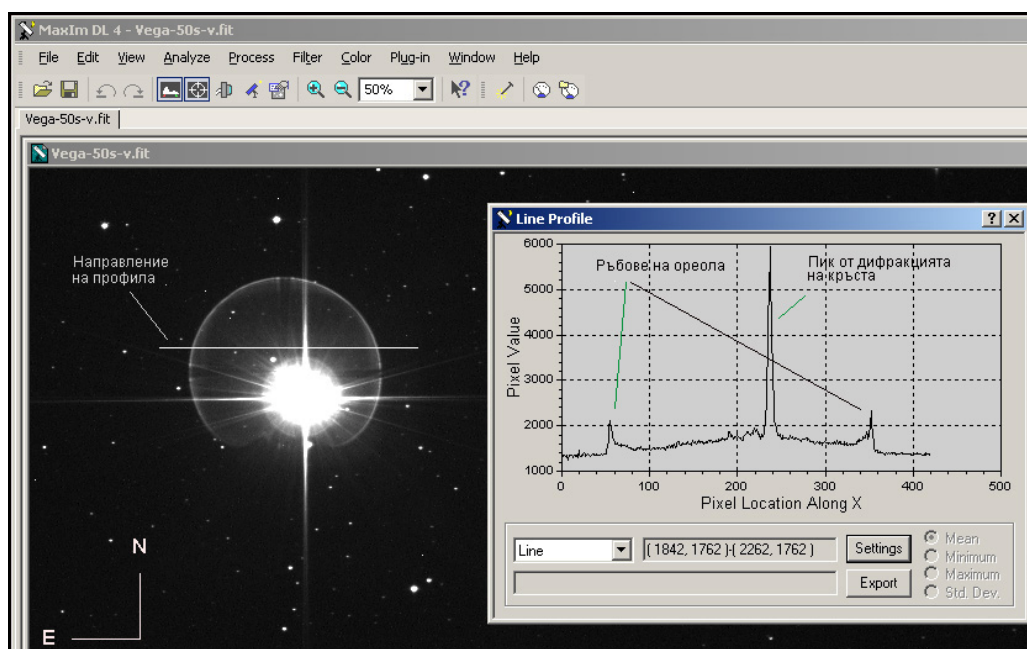
4. Ексцентричността на ореолите е видимо еднаква в цялото поле на кадъра, което значи, че тя не е функция от ъгловото отстояние на звездите от центъра на полето, нито от позиционният ъгъл. Това говори в полза на предположението за леко наклонен оптичен детайл - вижте т. 2.

5. Ореолите имат ярък контур, който в югозападната си част е „сърцевидно” вдлъбнат, като изглежда, че там сякаш контурът „се стреми да се свърже със звездата” (фиг. 3.4). Такъв контур може да е аберационна картина - при наличие на положителна сферична аберация в светлинният сноп. Подобна картина лесно може да се получи с плоско-изпъкнала или с менискова събирателна леща – фиг. 3.5 по-долу.

Положителна сферична аберация се наблюдава примерно в пространството между единична (проста) събирателна леща и нейният фокус, където по периферията на сходящия сноп се образува ярък контур от застигащи се нееднакво пречупени лъчи. След фокуса аберацията е отрицателна – тогава вече няма застигане с пресичане на лъчи и съответно – периферен контур. Но положителна сферична аберация се получава и след пречупване на светлината през Шмид-пластина – на голямо разстояние след нея, където централните лъчи като сходящи **вече** са преминали своя фокус и биват застигани по периферията на снопа от по-слабо пречупените лъчи, минали далеч от центъра на пластината. Тогава също имаме светъл контур. Логично подобен ход би имала и светлината след двукратно вътрешно отражение в повърхностите на пластината.

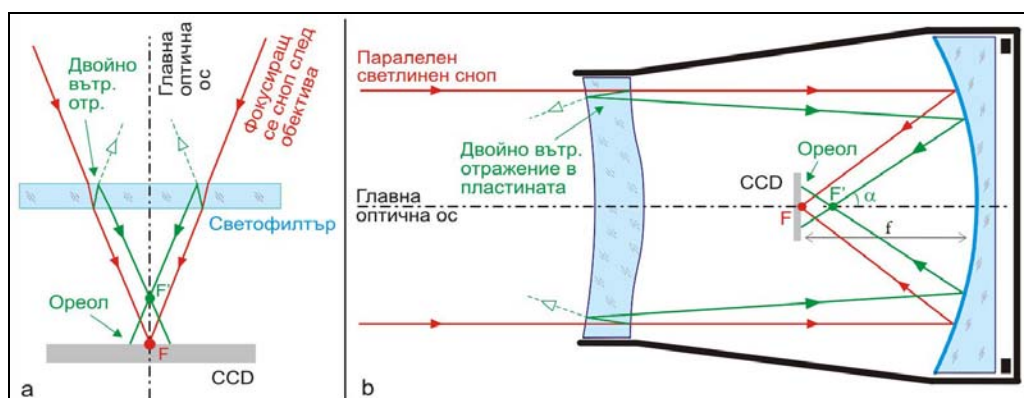


Фиг. 3.1. Ореолът около Хема, α CVg. Диаметър на ореола 2.79mm. Разстояние от блика-център до звездата 0.468mm, с отместване на североизток т.е. към по-отдалечения от огледалото ъгъл на матрицата. Това навежда на мисълта, че ореолът може да се образува след вътрешни отражения между повърхностите на филтъра. Предвид отношението $f/D = 3.44$ на телескопа, върхът на разсейващия се сноп (светлинният конус), образуващ ореола, би следвало да се намира на 9.5mm пред матрицата, което е много близо до удвоената дебелина на светофилтъра. Но при наклон на цялата камера (заедно с филтъра) на 0.22° би следвало центърът на ореола да бъде отместен от звездата на около 0.04mm, а в действителност отместването е 0.468mm. Това отместване зависи само от наклона на филтъра и от дебелината му, но не и от разстоянието филтър-матрица (все пак при подобни измервания е добре и то да се знае). Това предположение не обяснява наличието на ярък контур на ореола, както и «сърцевидното» му вдлъбване от юг. Освен това при вътрешни отражение в плоско-паралелна пластина (филтър), аберационна картина не се получава.



Фиг. 3.2. Интензивност в рамките на ореола в 50s експозиция на Вега, V-филтър, телескоп западно от колоната.

Профилът е взет по линията, пресичаща ореола като хорда. Вижда се, че вътрешността е с повдигнат интензитет спрямо околния фон. Това значи, че ореолът е образуван от светлинен сноп, попадащ недофокусиран върху матрицата, или вече преминал през свой фокус (т.е. разсейващ се). В следващата фигура се разглеждат две възможни причини за възникване на ореол.



Фиг. 3.3. Възможни причини за възникване на ореол: двойно вътрешно отражение в светофилтъра пред матрицата (а) или в Шмид-пластината (б). След двукратното си отражение от задната и предната повърхност на филтъра или пластината, част от светлината продължава като фокусиращ се сноп, но фокусът ѝ F' е някъде пред прекия фокус F на телескопа (в пример а фокусът F' е отдалечен от матрицата на дистанция 2 пъти дебелината на филтъра). Така до матрицата достига разсейваща се светлина, вече преминала през фокуса F' , която създава слаб ореол около звездата.

Ако филтърът или пластината на телескопа се леко неперпендикулярни на опт. ос, ореолът ще се окаже ексцентричен на звездата.

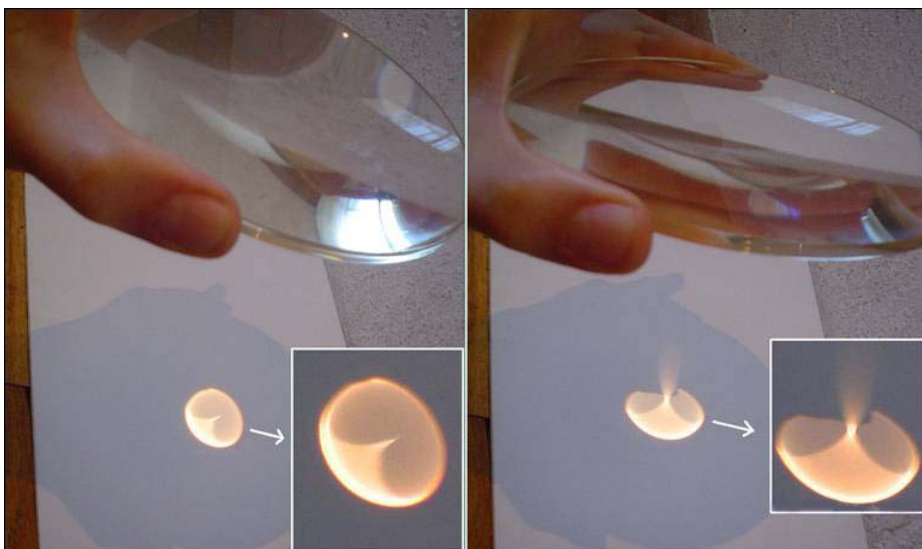


Фиг. 3.4. Алтаир - α Орел, експозиция 50s във V, сниман 30 мин. след кулминация.

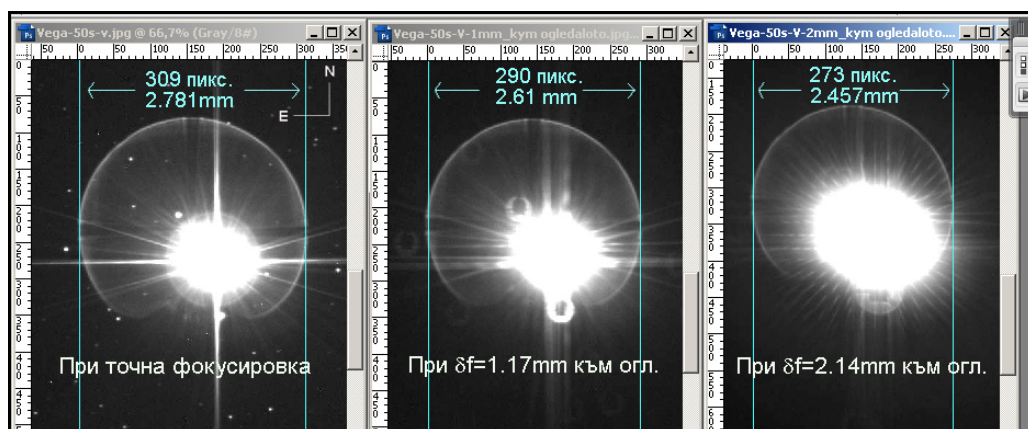
Телескоп - западно от колоната. Особенности в структурата на ореолите около звездата:

1. Контурът на външния ореол има сърцевидно вдлъбване в южната си част, наподобяващо картина, получена от недофокусиран или вече преминал фокус разсейващ се сноп при наличие на сферична аберация от леко наклонен оптичен елемент. Подобна картина лесно може да се симулира с плоско-изпъкнала леща – следващата фигура.
2. Наблюдава се и малък вътрешен ореол, който за разлика от външния е концентричен на звездата.
3. И тук на североизток от звездата се вижда блик, който съвпада с центъра на големият външен ореол.

Оказва се, че при разфокусиране на телескопа с приближаване на матрицата към огледалото (чрез въртене на фокус-ръкохватката надясно), диаметрите на ореолите намаляват, което значи, че предизвикващата ги светлина достига матрицата като разсейващ се сноп, вече преминал през собствен фокус F' (фиг. 3.3-b), намиращ се пред прекия фокус F на телескопа. С няколко измервания на диаметъра d на ореола при различни известни разфокусирания δf можем да определим ъгълът α при върха F' на светлинния конус, образуващ ореола и съответно да определим височината на този конус, т.е. разстоянието $F-F'$. Докато обаче не е изяснен механизмът на поява на ореолите, не бива да допускаме уверено, че диаметърът на ореола d се отнася към височината $F-F'$ на конуса така, както отношението D/f на телескопа, т.е. 1:3.44.



Фиг. 3.5. Аналогия между ореолите около звездите с предфокусни изображения на ярък точков светоизточник, получени с плоско-изпъкнала леща, имаща силно изразена сферична aberация. При различна неперпендикулярност на лещата спрямо опт. ос, яркият контур на ореола придобива различно вдлъбнати сърцевидни форми, достигайки до силно изразена кома.



Фиг. 3.6. Промяна на диаметъра на ореола при различно разфокусиране δf в посока към огледалото. Докато разфокусирият образ на Вега расте по диаметър с увеличаване на δf , то диаметърът на ореола намалява.

Следват диаметрите $d_{1,2}$ на ореола (в пиксели и в милиметри) при точна фокусировка на телескопа и при разфокусирано положение с $\delta f = 2.14 \text{ mm}$. Измерването на диаметрите е в посока изток-запад, за да се избегне сърцевидното вдлъбване на ореола в южната му част. Размерът на пиксела е 0.009 mm :

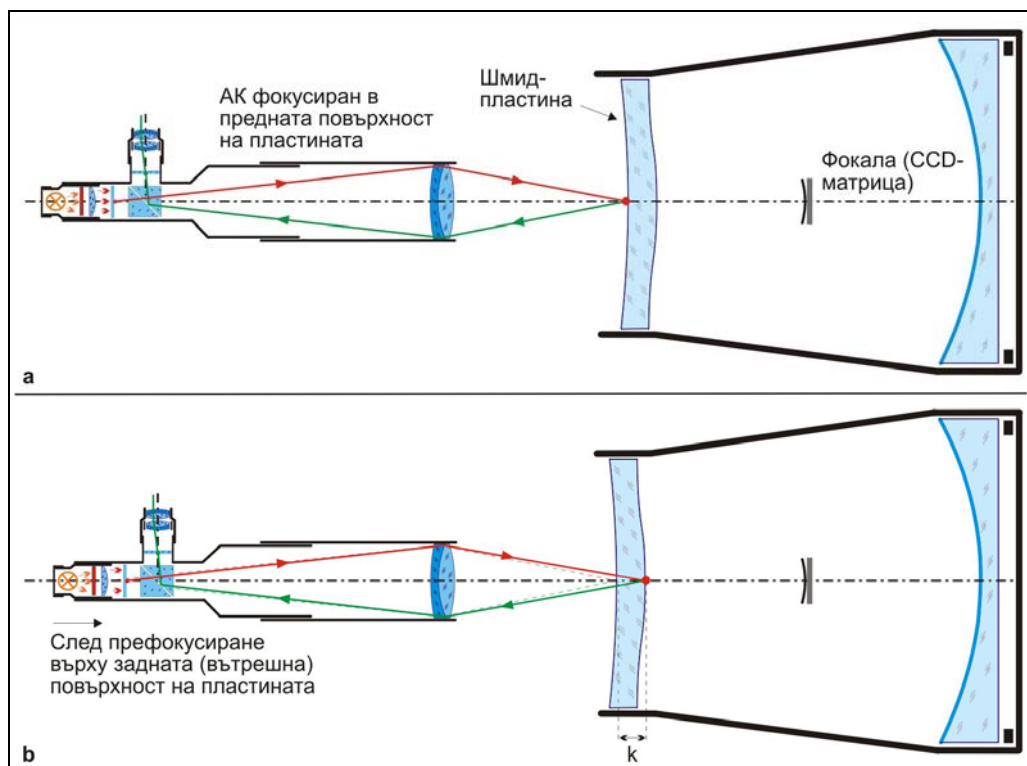
d_1 при точна фокусировка: $309 \text{ пиксела} = 2.781 \text{ mm}$;

d_2 при дефокус $\delta f = 2.14 \text{ mm}$: $273 \text{ пиксела} = 2.457 \text{ mm}$;

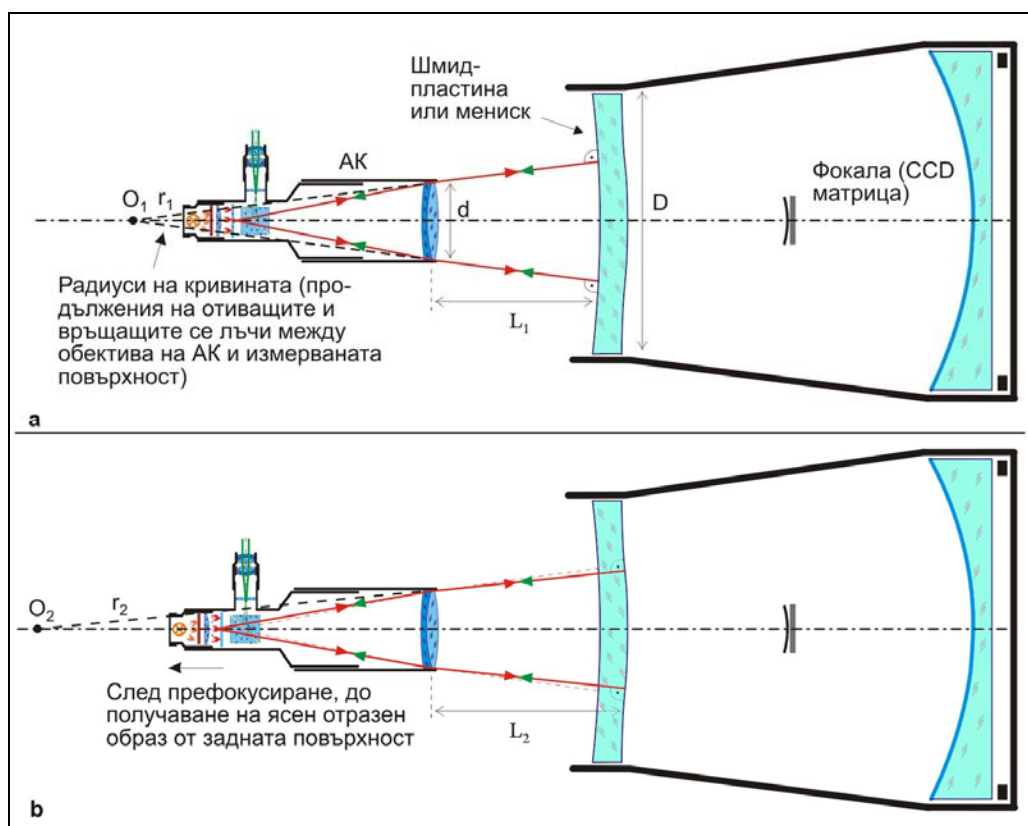
$d_1 - d_2 = 0.324 \text{ mm}$ = на намаляването на диаметъра на ореола за това δf .

Тъй като $(0.5(d_1-d_2))/\delta f = 0.162/2.14 = \operatorname{tg}\alpha$, където α е ъгълът при върха F' на конуса - между оста му и периферен лъч, попадащ в края на ореола (фиг. 3.3-b), то за α получаваме 4.329° .

За височината на конуса $F-F'$ ще имаме $(0.5 d_1)/\operatorname{tg}\alpha = 18.37\text{mm}$, т.е. доста повече от 2 пъти дебелината на световилтъра пред матрицата (той е дебел 5mm), което показва, че причината за големият ореол не е двойно вътрешно отражение в повърхностите на филтрите. Освен това по сърцевидната аберационна картина на контура на ореолите, можем да предположим, че причината за тях е вътрешно отражение между повърхностите на прозрачен оптичен детайл с поне една неплоска повърхност, т.е. Шмид-пластината. Това налага опит за сваляне на геометрията на пластината, за да се проследят по-точно тези отражения.



Фиг. 3.7. Измерване на дебелината k на пластината чрез две последователни фокусирувания в първата (а) и във втората (б) повърхност, при които в окуляра се наблюдават ясно фокусирани първо и второ отражение на минутната скала на АК. Освен в средата, е нужно да се направят възможно повече такива измервания по протежение на радиуса на пластината. При това е нужно особено стабилно закрепване на АК пред телескопа (това бе голям проблем, който попречи за точното сваляне на профила на пластината). При тази процедура са необходими чести проверки за перпендикулярността на АК спрямо първата повърхност на пластината. Това става чрез префокусиране на АК около безкрайност, при което се наблюдава отражение на паралелен (или почти паралелен) сноп от първата повърхност (предвид факта, че първата повърхност се оказва вдлъбната, с голям радиус на кривината). Бяха измерени дебелини на пластината 20.7mm около средата на радиуса и 20.86mm в периферията. За точното отчитане на позицията на АК пред пластината е нужно радиално плъзгане на АК по паралели с разграфена скала – такава установка е невъзможно да се инсталира пред телескопа, в тясното пространство между него и стената на залата.

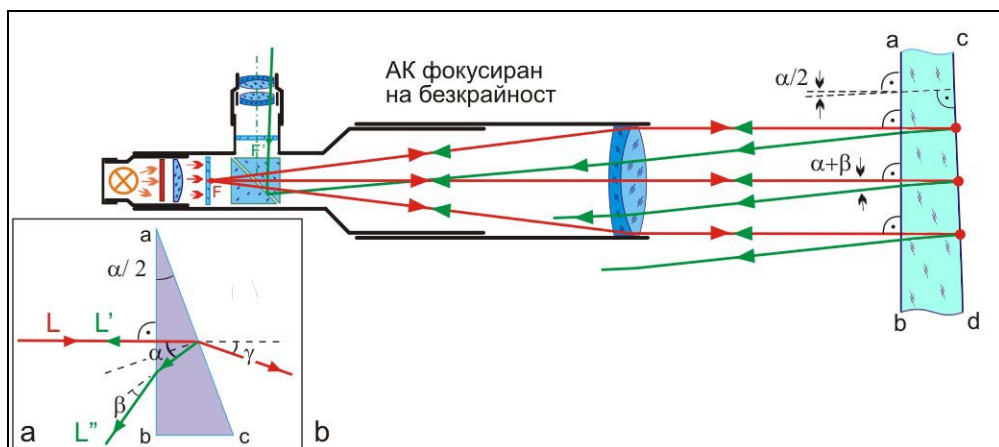


Фиг. 3.8. Измерване на радиусите на кривините r_1 и r_2 , съответно на предната (а) и на задната (б) повърхности на мениск или (грубо) на Шмид-пластина. Разстоянията L_1 и L_2 принципно се знаят от предното измерване ($L_2 = L_1 + \text{дебелината } k$).

Поради неплоският профил на мениска/пластината, необходимо е диаметърът d на обектива на автоколиматора да е много по-малък от диаметъра D на пластината, за да се получи усредняване от по-малка част от повърхността на последната. За целта може обективът на автоколиматора да се задиафрагмира.

Измерени бяха доста големи радиуси на кривините на двете повърхности за централната част на пластината (с добро приближение за асферичната ѝ повърхност) - и двете повърхности се оказаха вдлъбнати навътре (като при мениск) с радиуси 9.38м и 8.98м. Това че първата повърхност не е плоска, както и силно ограниченият диапазон на фокусиране на двете АК-тръби усложни доста задачата. При такива измервания е трудно да се разбере кое отражение е от първата повърхност и кое - от задната. По принцип, в подобни случаи се практикува намокряне на задната повърхност, при което качеството на отражението от нея се влошава. Тази мярка не е приложена в случая заради трудният достъп до пространството зад пластината.

При всички тези измервания обаче е нужно да се има предвид факта, че светлината отразена от задната повърхност на пластината се пречупва при преминаването си в двете посоки през първата повърхност – на границата стъкло-въздух (фиг. 3.9).

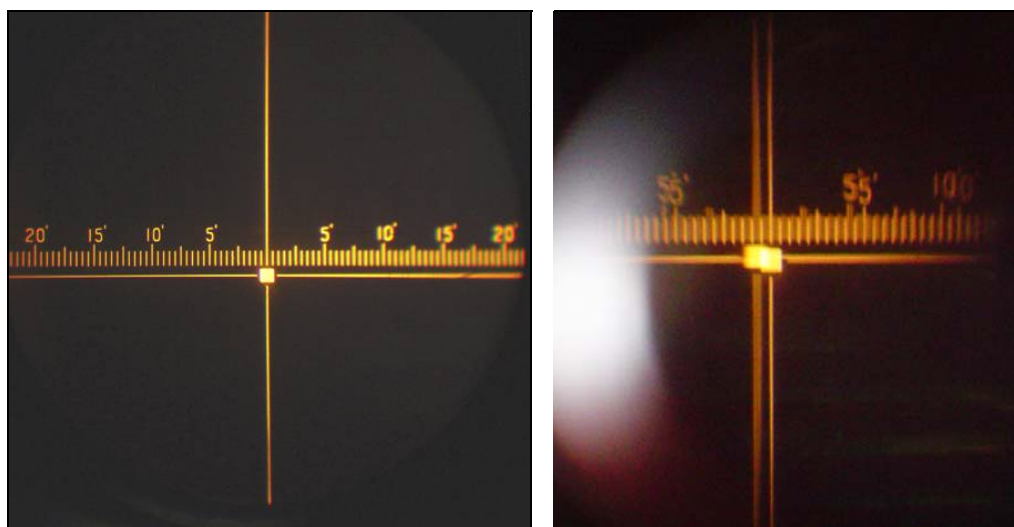


Фиг. 3.9. Съображения при измерване на ъгъла между повърхностите на призма (клин):

а – лъчът L среща перпендикулярно първата повърхност на призмата. В обратна посока се движи отразеният от същата повърхност лъч L' . Отраженият от задната повърхност лъч L'' се пречупва при напускане на призмата на ъгъл β . Така общият ъгъл на този изходящ лъч е равен на сумата α от ъглите на падане и отражение, плюс ъгълът на пречупване β .

б – с автоколиматор може да бъде измерен сумарният ъгъл $\alpha + \beta$ между лъчите L' и L'' , но от него трябва да се изчисли и извади ъгъл β като се знае показателят на пречупване n на стъклото за използваната λ , примерно n_D .

Шмид-пластините и менисковите лещи при катадиоптричните телескопи обикновено се изработват от нискодисперсни кронови стъкла (BAK-4, UBK-7 и др.) с $n_D \sim 1.51$.

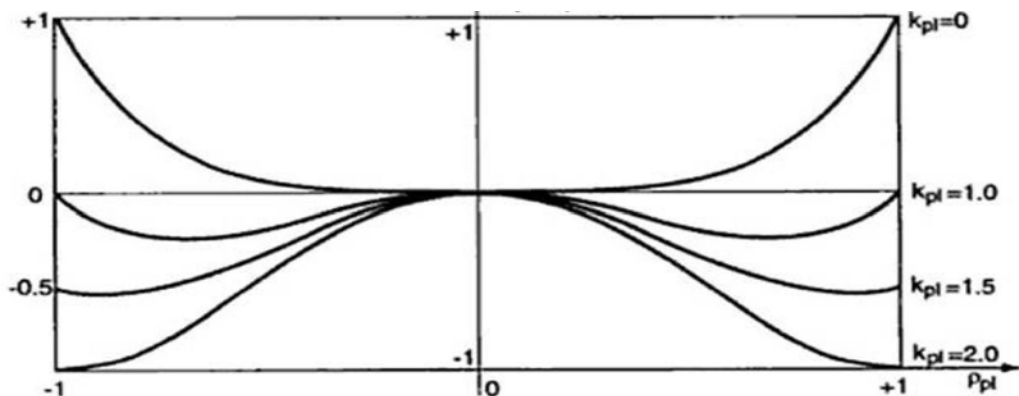


Фиг.3.10. Отражения от двете повърхности на Шмид-пластината:

Вляво - нормален вид на минутната скала на автоколиматора: 1 деление е през $0.5''$. Централният квадрат е със страна $1''$;

Вдясно - двойно отражение на същата скала от двете повърхности на пластината (логично едното не е на фокус, заради различната кривина на повърхностите). Отраженията се разминават с около $0.7''$, т.е. под такъв ъгъл са двете повърхности в мястото на измерването - в средата на радиуса на пластината. Ако се знае точната геометрия на едната (сферична или плоска) повърхност, по нея

може да се построи профилът на другата - асферична с нелошо приближение. В случаят първата повърхност е вдлъбната.



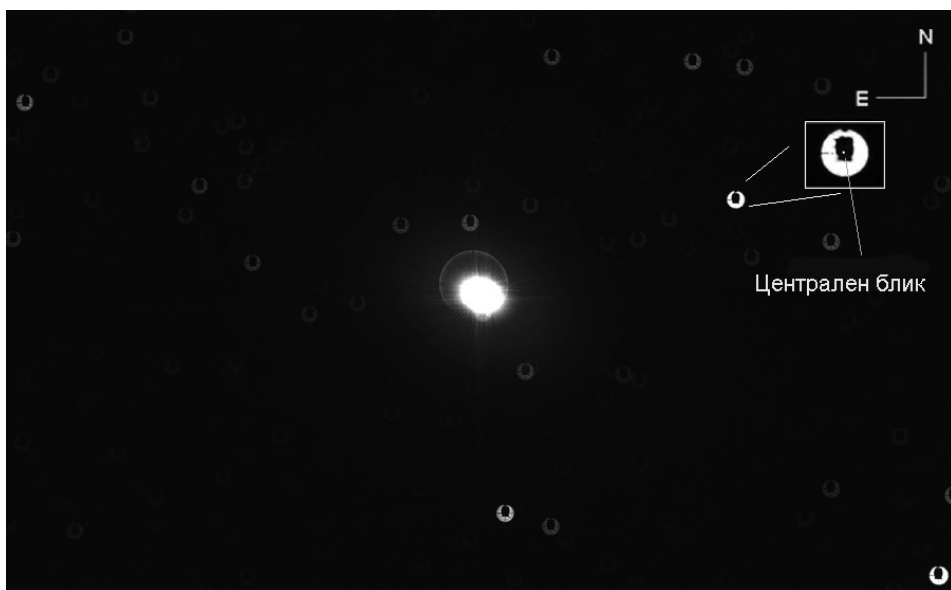
Фиг. 3.11. Възможните профили при Шмид-пластините.

Функцията на профила на Шмидт корекционни пластини ($\rho_{pl}^4 - k_{pl}\rho_{pl}^2$) за различни стойности на параметъра k_{pl}

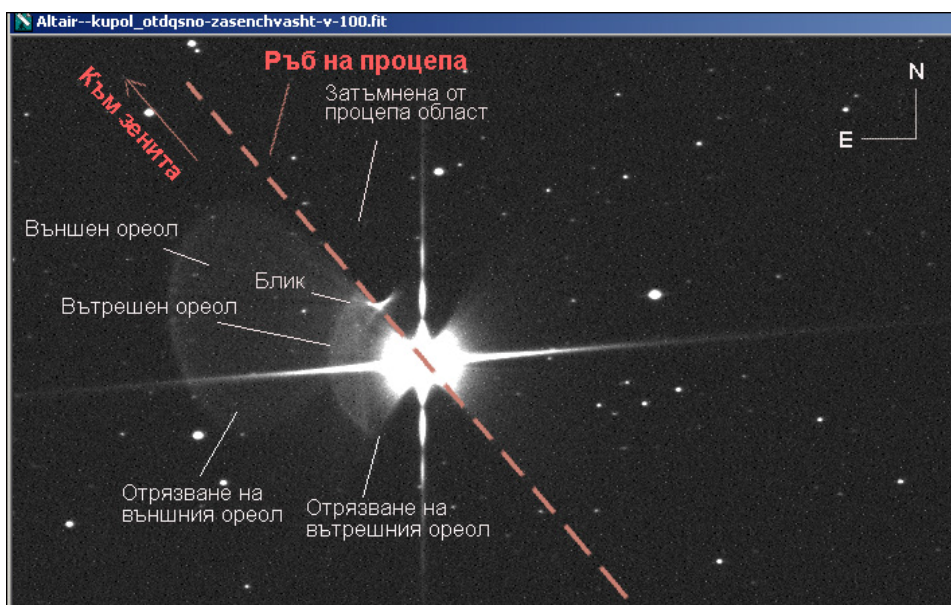
Повече за тази фигура можете да видите в [Google-книги](#), в книгата “Reflecting Telescope Optics”, § 3.6.2 „The Shmidt-telescope” и по-точно в § 3.6.2.2 „Corrector plate profile and spherochromatism”.

Задължително в средата пречупващата сила е по-положителна отколкото в периферията:
 при -1 - положителна (събирателна) в средата и намаляваща до 0 към периферията;
 при 0 - положителна в средата и отрицателна в периферията, нулева (план) по средата на радиуса;
 при +1 - нулева (план) в средата и отрицателна в периферията.
 Възможни са всякакви междинни варианти, като при -0.5.

При експериментите с разфокусиран телескоп се забелязва сянката на камерата, чийто филтърен блок е изнесен южно от центъра на кръста (при телескоп западно от колоната) и логично хвърля сянка в северните краища на разфокусираните звездни образи, при предфокусно положение на матрицата.



Фиг.3.12. Сянката на CCD-камерата в разфокусираните образи на звездите (района около Вега при разфокусиране с 2.14mm, в посока към огледалото). В увеличеното изображение се вижда малък блик там, където би следвало да е светофилтъра – може би отражение от него. Трудно е да се обясни връзка между разположението на камерата и формата на ореола около Вега. Ореолът изглежда ориентиран обратно на „подковообразните“ образи на звездите, но ексцентричността му спрямо звездата няма лесно обяснение ако се допусне, че не е поради наклонен оптичен детайл.



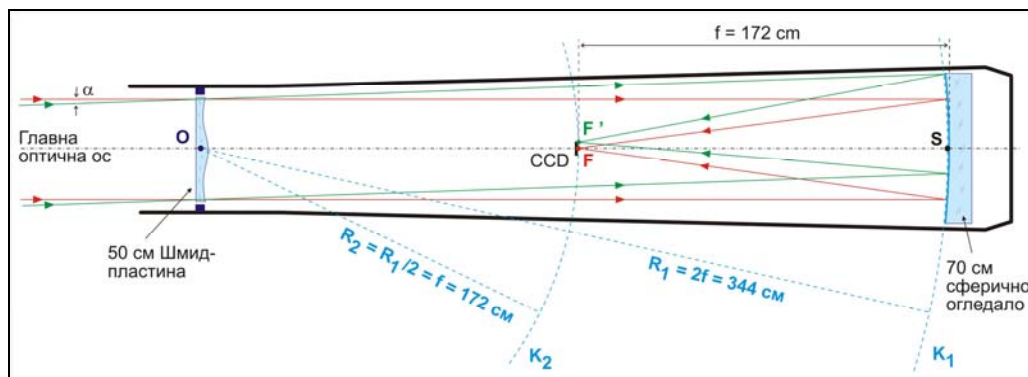
Фиг. 3.13. Един труден за обяснение ефект: Алтаир около 3 часа след кулминация, експозиция 100s във V, телескоп западно от колоната с умишлено наполовина засенчен отвор от десният ръб на процепа (от към W). Логично е да се очаква половината от ореола да липсва, но картината е сложна:

На мястото на липсващата част се появява по-слабо експониран симетрично обърнат образ (особено за вътрешния по-малък ореол). Вертикалната ивица на дифракционната картина от кръста е като поредица отслабващи към краищата интерференчни максимуми. Ореолите са отрязани на неочаквани места - от тях са останали сектори широки малко над 90° , очевидно определящи се от наклона на ръба на процепа спрямо дифракционната картина от кръста.

4. Кривината на фокалното поле и влиянието ѝ върху изображението

В изследванията по-горе не споменахме нищо за кривината на фокалното поле, която също би повлияла диаметрите на разфокусираните звездни образи. Тава влияние обаче би било функция на разстоянието от последните до образния център и трябва да се прави разлика между него и ефекта от наклонената матрица. С други думи, кривината на полето не може да предизвика разлика в диаметрите на разфокусираните звездни образи в ъглите на кадъра, освен ако не приемем, че огледалото е с фрапиращо нарушена юстировка и оптичната му ос минава твърде далеч от центъра на матрицата. Такъв голям наклон обаче не бе регистриран в [резултатите от проверката на юстировката на оптиката](#).

Знаейки оптико-геометричните параметри на телескопа, можем теоретично да опишем кривната на полето без нужда да я изследваме практически по метода, подобна на описаната в раздел 2 [“Проверка за перпендикулярност на матрицата”](#). Следващата фигура илюстрира основните оптико-геометрични параметри и зависимостта между тях:



Фиг. 4.1. Особенности при оптичната система на Шмид-телескопа:

O – център на пластината и също - проекционен център на системата;

S – върхна точка на сферичното огледало;

F – главен фокус (образен център) т.е. фокус за лъчите от звезда, проектираща се в центъра на полето (в червено). Тези лъчи осветяват централна област от огледалото, с диаметър близък до този на Шмид-пластината;

F' – фокус на лъчите от звезда, проектираща се в края на полето (в зелено). Тези лъчи също осветяват област от огледалото с диаметър близък до този на пластината, която обаче не е концентрична на огледалото, т.е. т. S не е в средата на осветената област;

f – фокусно разстояние на огледалото: $f = SF = 172$ cm;

K₁ – сфера, част от която е отразяващата повърхност на огледалото;

R₁ – радиус на тази сфера, т.е. на повърхностната кривина на огледалото: $R_1 = OS = 2f$;

K_2 - сфера, част от която е огънатото фокално поле на телескопа;

R_2 – радиус на тази сфера: $R_2 = R_1/2 = f = OF$;

α – половината от ъгловият обхват на телескопа ($2\alpha = 1.228^\circ$ по страната на CCD-матрицата, $\alpha = 0.614^\circ$).

Повече за някои особености на системата Шмид, читателят може да прочете в статията на автора „Как да избягваме оптичните aberации” (<http://f-galleries.hit.bg/Aberacii.htm>), в темата „Проблеми – плоското фокално поле”.

От фигурата става ясно, че радиусът OF на кривината на фокалното поле е равен на фокусното разстояние f (SF) на телескопа. Като знаем това и диагонален на CCD-матрицата (той е 52.13mm), можем да определим теоретично дефокуса за краищата (в ъглите) на полето, при условие че сме фокусирали добре в центъра. Пресмятаме правоъгълния триъгълник OFF' , в който FF' е половината от диагонала на матрицата ($FF'=26.065\text{mm}$). После сравняваме получената дължина на хипотенузата OF' ($OF'=720.197\text{mm}$) и дългият катет OF ($OF=SF=f=1720.0\text{mm}$). Имаме разлика (дефокус) от близо 0.2mm в ъглите на кадъра. Предвид относителния отвор на телескопа $1:3.44$ и размерът на пикселите от $9\mu\text{m}$, диаметърът на разфокусираните звездни изображения в ъглите на кадъра поради кривината на полето ще бъде около 6 пиксела (защото $0.2/3.44 = 0.058\text{mm}$ диаметър на разфокусираният звезден образ, който покрива 6.4 пиксела, имащи страна 0.009mm).