

Szegedi Tudományegyetem
Kísérleti Fizikai Tanszék

Cassegrain spektrográf tervezése a piszkéstetői csillagvizsgáló 1 m-es távcsövére

Készítette: Major Csaba V. éves csillagász hallgató

*Témavezető: Fűrész Gábor csillagász
Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Boston, USA*

Szeged 2004

<i>Bevezetés</i>	- 3 -
<i>A spektroszkópia jelentősége, és kialakulása</i>	- 4 -
<i>Célkitűzések</i>	- 5 -
<i>Optika</i>	- 6 -
Értékmérők számítása	- 6 -
A spektrográf elsődleges fénymenete	- 10 -
Másodlagos fénymenet.....	- 12 -
<i>Mechanika</i>	- 18 -
Kombinált rész – tükör.....	- 18 -
Az első segédtükrök.....	- 20 -
A kollimátor.....	- 22 -
A kameralencse	- 26 -
CCD kamera.....	- 27 -
Objektív-CCD kapcsolat	- 28 -
Távcső interfész.....	- 29 -
Spektrál és wolfrám lámpa becsatolása	- 30 -
Teljes összeállítás	- 32 -
<i>Távcső és spektrográf együttes teljesítőképessége</i>	- 34 -
Transzmisszió	- 34 -
Érzékenység	- 34 -
Hasznos jel számítása.....	- 35 -
A jel/zaj viszony.....	- 35 -
<i>„Blaze” karakterisztika és relatív hatásfok</i>	- 37 -
<i>Elektronika</i>	- 42 -
Digitális hőmérő	- 42 -
A spektrográf fűtése.....	- 43 -
Léptetőmotor vezérlés.....	- 46 -
<i>Irodalomjegyzék</i>	- 48 -

Bevezetés

A XX. század elején még volt magyar kutató a kor ismert és elismert spektroszkópusai között, Konkoly Thege Miklós. Az ő munkássága után azonban hanyatlásnak indult a hazai színeképelemző műszerpark, és ezzel együtt a hazai spektroszkópia is. Az utóbbi években történt ugyan néhány próbálkozás a hazai spektroszkópia felélesztésére, de egyik sem járt túl sok sikerrel. A Bajai Csillagvizsgáló munkatársai próbálkoztak egy üvegszálás műszer megépítésével, de a fény nem megfelelő becsatolása miatt a műszer hatásfoka elmaradt a várt értéktől. A Szegedi Csillagvizsgálóban, 2002-ben Fűrész Gábor épített kis-közepes felbontású, és a mai technológia eszköztárát felvonultató spektrográfot, de az ottani távcső átmérője csak 40 cm és a felbontása viszonylag nagy ($R=(\lambda/\Delta\lambda)\approx 5000$, ahol λ a hullámhossz és $\Delta\lambda$ a legkisebb felbontani kívánt hullámhossztartomány), így a műszer használhatósága limitált és inkább csak oktatási célokra alkalmas. A Magyar Tudományos Akadémia Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutató Intézet Pizskéstetői Observatóriumában készítenek ugyan úgynevezett objektívprizmás felvételeket, de ezen felvételek felhasználhatósága eltérő (limitáltabb) mint egy rés-spektrográffal készített spektrum. Ezért egy réses, kifelbontású műszer megépítése segítséget nyújthatna azon kutatóknak, akik a spektroszkópiának olyan területével foglalkoznak, ahol elegendő a kis felbontás, és az észlelni kívánt objektumok sem túl halványak.

Dolgozatomban először a spektroszkópia jelentőségéről és kialakulásáról, utána a célkitűzéseimről írok néhány sorban. Az **Optika** fejezetben az optikai elemek paramétereinek meghatározásáról illetve a két fénymenet kialakításáról lesz szó. A **Mechanika** fejezet részletes leírást ad a műszer mechanikai alkatrészeinek megtervezéséről, és sok, a megértést segítő, háromdimenziós ábrát tartalmaz az egyes elemek, illetve az összeállított egységek CAD modelljeiről. A várható teljesítőképességről a **Távcső és spektrográf együttes teljesítőképessége** fejezetben van szó.

A spektroszkópia jelentősége, és kialakulása

A Világegyetemben az információ túlnyomó része elektromágneses hullámok, kisebb hányada pedig részecskesugárzás formájában terjed. A megfigyelő csillagászat egyik legfőbb feladata a világról hozzánk érkező elektromágneses sugárzás megfelelő detektálása és a sugárzásban "kódolt" információ kinyerése, amely különböző feltevésekkel és modellekkel összevetve felvilágosítással szolgál a kibocsátó forrás, valamint a forrás és a megfigyelő közötti térrész természetéről, fizikai paramétereiről. Az elektromágneses sugárzás hullámhosszától függően más és más észlelési és detektálási technika szükséges. A csillagászat egyik legfontosabb információgyűjtési technikája az objektumról hozzánk érkező elektromágneses sugárzás hullámhossz szerinti felbontása, és az így nyert színek későbbi feldolgozásra alkalmas rögzítése.

1666-ban *Isaac Newton* Lincolnshire – i birtokán felfedezi a fény részecsketermészetét. Fellelkesülve itáliai tudósok megfigyelésein *Newton* is kísérleteket végez és arra a megfigyelésre jut, hogy a fehér fényt színes fények együttese alkotja, és minthogy az üveg a különböző színű fénysugarakat különböző mértékben törli meg, szivárványszínű spektrum jön létre. *Newton* részecskeelmélete megmagyarázza azt is, hogy miért képes a fény áthatolni a vákumon. Ezzel szemben csődöt mond a már ismert optikai jelenségek magyarázatánál, mint például az interferencia és a polarizáció. *Thomas Young* később magyarázattal szolgál az interferencia jelenségére a fény hullámtermészetével. Diffrakciós rács segítségével megméri a különböző színekhez tartozó hullámhosszakat. 1802-ben *William Wollaston* fölfedez a Nap színekében öt abszorpciós vonalat. 1814-ben *Joseph Fraunhofer* újra fölfedez a Nap színekében több sötét vonalat. Amikor a *Newton* által fölfedezett Nap-színeképet egy nagyítókészülékkel vizsgálja, fölismeri, hogy ezt különböző erősségű sötét vonalak szakítják meg. A Vénusz és más égitestek színekében is talál ilyen vonalakat. Azt is észreveszi, hogy az olajláng színekében ugyanott, ahol a Nap színekében jellegzetes dupla sötét vonal van, egy igen erős világos vonal jelenik meg. *Robert Bunsen* és *Gustav Kirchoff* értelmezik a jelenséget, és három törvényt adnak a spektrálanalízisre:

- Izzó test spektruma folytonos
- Forró, ritka gáz spektruma fényes vonalokból áll (emissziós spektrum)
- Ritka, hideg gázon áthaladó izzó test színekében sötét vonalak jelennek meg

1860-ban *Robert Bunsen* bebizonyította, hogy a Napon ugyanazok az elemek találhatóak, mint a földön és ezzel megalapozta az asztrofizika tudományát.

Célkitűzések

A rögzített spektrumok egyik legfontosabb paramétere a felbontás. A spektrográfok felbontását mindig a felhasználási céloknak megfelelően tervezik meg. Alapvetően három nagy csoportra oszthatóak a műszerek felbontásuk szerint, kis, közepes, és nagyfelbontásúra. A nagy és közepes felbontás esetünkben nem kifizetődő, mert nem csak az objektum detektálhatóságára kell törekedni, hanem a megfelelő jel/zaj viszony elérésére is. Ehhez alapvetően két dolog szükséges, minél nagyobb távcső és minél fényesebb objektum. A piszkési távcső tükörmérete adott, (erre nem lehetünk befolyással), az objektum fényessége szintén nem változtatható meg kedvünk szerint, ezért marad a kis felbontás. De mivel a műszer spektráلكlasszifikációra készülne, nem probléma a kis felbontás, hiszen ilyenkor minél nagyobb hullámhossztartományt érdemes átfogni egy felvételen a szükséges felbontás mellett.

Ezért a kitűzött cél egy $R=2300$ felbontású műszer megtervezése, amellyel elkészíthetővé válna legalább 14^m - 15^m -s objektumok spektruma, minimum 20-as jel/zaj viszony és nem túl hosszú expozíciós idő mellett.

A megépíteni kívánt spektrográf jelentősége abban áll, hogy lehetővé teszi olyan mérések elvégzését, amelyeket korábban Magyarországról nem lehetett megcsinálni. A használni kívánt műszer együttes lehetőség nyílik fényesebb csillagok spektráلكlasszifikációjára. A spektráltípusból pedig kb. ± 150 K pontossággal becslést lehet adni az objektum effektív hőmérsékletére. Lehetővé fog válni továbbá forró O, B színképtípusú csillagok spektrumában erős emissziós vonalak keresése és azonosítása. Főszorozat előtti úgynevezett T Tauri-típusú csillagok légkörében erős lítium és H α abszorpciós vonalak keletkeznek, melyek ezzel a felbontással tanulmányozhatóak. A felbontás elegendő, hogy fényes szupernóvák spektrumában hidrogén vonalakat keressünk, és ezáltal klasszifikáljuk az objektumot, ugyanis I. típusú szupernóvák spektrumában nincs jelen a hidrogén, míg a II. típusúak esetében erős hidrogén vonalakat figyelhetünk meg. Továbbá ha a spektrumban található abszorpciós vonalak mutatnak P Cygni vonalprofil, akkor ennek alapján kb. 200 km/sec pontossággal mérni lehet a ledobott anyag kiáramlási sebességét, aminek tipikus értéke 6000-10000 km/sec. Nóvák esetében ez a sebesség általában 1000-2000 km/sec. Ez azt jelenti, hogy a ledobódási sebességet 15-20 % pontossággal becsülni lehet.

Optika

Értékmérők számítása

A piszkéstetői távcső főtükreinek átmérője 1m, fókusza 13,6 m, így a tükör fényereje $f/13,6$ -os. A tervezett spektrográf spektrálklasszifikációs célokra készülne, ezért a kitűzött cél egy viszonylag kis felbontású - $R \approx 2300$ - műszer megtervezése.

Először a főtükör fókuszában lévő rés minimális méretét határoztam meg. Ehhez ki kellett számolni a távcső által felbontható legkisebb szöget, illetve az ahhoz tartozó méretet a fókuszsíkban (Fűrész, 2002):

$$\Theta_{\min} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} = 0,188'' \implies l_{\min} = \Theta_{\min} \cdot f = 12,35 \mu m$$

Ez azonban csak pontszerű fényforrásra érvényes. A rés fizikai méretét a távcső fókuszsíkjában leképeződő, a légkör által erősen befolyásolt csillagkorong, az ún. seeing disc – hez kell igazítani. Piszkéstetőn az átlagos seeing disc mérete $2''$, rés mérete (Fűrész, 2002):

$$l_{\text{seeing}} = \Theta_{\text{seeing}} \cdot f = 130 \mu m$$

Diszperziós elemként a Richardson Grating Laboratory katalógusából a következő reflexiós rácsokat választottam:

$$1. \text{ rács } \rho = 1200 \frac{1}{mm}; \quad BW = 400 \text{ nm}; \quad BA = 13,9^\circ;$$

$$2. \text{ rács } \rho = 900 \frac{1}{mm}; \quad BW = 650 \text{ nm}; \quad BA = 14,3^\circ;$$

BW a blaze-elt hullámhosszt, BA pedig a blaze-elés szögét jelenti. A rácsok reflexióképességét a gyártó is megadja, azonban „**Blaze**” **karakterisztika és relatív hatásfok** fejezetben leírt számításokkal ezt magam is meghatároztam, a spektrográf teljesítőképességének megadásánál. Azért ezeket a rácsokat választottam, mert megfelelő hatásfokkal lefedik az észlelni kívánt tartományt, betartható velük a kívánt feloldás és a reflexiós görbék illeszkednek a CCD spektrális érzékenységéhez

Ezt követően a kollimátortükör fókuszt kellett meghatározni. Ez függ az elérni kívánt felbontástól. A legkisebb feloldani kívánt hullámhossztartomány (Kannappan, 2002):

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{R} = \frac{400 \text{ nm}}{2300} = 0,175 \text{ nm}$$

Ezt figyelembe véve a kollimátor fókusza (Fűrész, 2002):

$$f_{coll} = \frac{1}{\rho \cdot m} \cdot \cos(BA) \cdot \frac{l}{\Delta\lambda} = 600mm$$

ahol m a használt spektrális rend (jelen esetben $m=1$). A kollimátor által párhuzamosított, majd a diszperzív elem által bontott nyalábot a kameralencse képezi le a detektorra. Az előbbi képletben, a kollimátor fókuszának számolásánál lényeges, hogy a rés nem végtelenül keskeny, hanem kiterjedt mérete van.

1:1-es leképezésnél – vagyis, ha a kameralencse fókusza egyenlő a kollimátor fókuszával – a fókusz síkban 130 mikron felel meg 0,175 nm-nek. Viszont a Shannon-féle mintavételezési tétel értelmében elegendő, ha a 0,175 nm széles tartomány 2 pixelre esik a fókuszban. A használni kívánt detektor pixelmérete 20 mikron, tehát a kameralencse fókusza (Palmer, 1997):

$$f_{cam} = \frac{f_{coll} \cdot 2 \cdot 20\mu m}{130\mu m} = 185mm$$

A kollimátortükör átmérőjét a távcső fényerejéhez kell illeszteni, hogy ne legyen fényvesztés és ne is kelljen túl fényerős kollimátort alkalmazni. Ezt a következő képlet adja meg (Palmer, 1997):

$$D_{coll} = \frac{f_{coll}}{13,6} = 44,2mm$$

A választott rácsok blaze-elt rácsok, azokat megfelelő szögben be kell dönteni, hogy a blaze-elt hullámhossz a kívánt szögben eltérülve haladjon tovább.

A centrális hullámhosszon reflektált sugaraknak a kollimátor optikai tengelyével minden tartományon 28,8°-ot kell bezárniuk, mert csak ekkor paralel a reflektált centrális nyaláb a kameralencse optikai tengelyével, azaz ekkor képeződik le a teljes tartomány vignettálatlanul.

A rácsegyenletet alkalmazva megkapjuk az α szöget, ami egyenlő a rács döntési szögével:

$$\arcsin[\sin(\beta) - m \cdot \rho \cdot \lambda] = \alpha$$

Az alábbi táblázat az egy-egy tartomány központi hullámhosszához tartozó beesési (α), illetve beesési és diffrakciós szögek($\alpha-\beta$) különbségét tartalmazza

Hullámhossztartomány [nm]	α [°]	$\alpha-\beta$ [°]
400-440-480	30,2	28,8
480-530-580	28,7	28,8
570-605-640	30,75	28,8
630-670-710	32,55	28,8

2.1 táblázat; a központi hullámhosszakhoz tartozó beesési illetve eltérítési szögek

A rács minimális méretét a kollimált nyaláb átmérője és a beesési szög határozza meg (Schroeder, 1987):

$$GS = \frac{D_{coll}}{\cos(\alpha)} = 51mm$$

A rácsról visszavert nyaláb a diffrakció miatt táguló az egyik tengelye mentén. Ezt figyelembe kell venni ahhoz, hogy a kameralencse vignettálódásmentesen képezze le az egyszerre átfogott hullámhossztartományt. Mivel 2 pixelre esik 0,175nm, így a CCD chipen egyszerre elfér:

$$\Delta = \frac{1300}{2} \cdot 0,175nm = 113,7nm$$

400 nm – en a rács diszperziója (Schroeder, 1987):

$$\frac{\partial\beta}{\partial\lambda} = \frac{m \cdot \rho}{\cos(BA)} = 1236200 \frac{rad}{m}$$

Ebből közelítőleg kiszámolható a szögeltérés két, egymástól 113,7 nm – rel különböző hullámhossz között:

$$\Delta\beta = \frac{\partial\beta}{\partial\lambda} \cdot \Delta = 0,1405559rad \approx 8^\circ$$

A kameralencse és a rács legkisebb távolsága 150 mm, ugyanis ha a lensze legalább ekkora távolságra van a rácstól, akkor nem lóg bele a kollimált nyalábba, és nem okoz fényvesztést, így a lensze átmérője

$$D_{cam,max} = D_{coll} + t \cdot \text{tg}(\Delta\beta) = 65,2mm$$

A vizsgálni kívánt objektum részre vezetését, illetve résen tartását könnyítendő, szükség van egy másodlagos fénymenetre is, amely az objektum körüli égterületet képezi le

egy másik kamerára, egy késleltető lencsén keresztül (Fűrész, 2002). A késleltető lencsével szembeni követelmények alacsonyak, mert itt nem cél a kép jó minősége. A használni kívánt ST4 – es CCD 192x164 pixel és 13,75 μm a pixelméret. A leképezés 1:1 arányú, így a chip látómezeje:

$$\Delta\Theta = \frac{15\mu\text{m} \cdot 164}{13,6\text{m}} = 1,8088 \cdot 10^{-4} \text{ rad} = 0,01037^\circ \approx 0,62'$$

A kombinált rés – tükör minimális mérete, hogy az előbbi látómezőt vignettálatlanul képezze le:

$$b_{\min} = f_{\text{teleszkóp}} \cdot \Delta\Theta = 2,46\text{mm}$$

Roszbabb légköri viszonyok mellett, amikor a seeing disc nagyobb, mint 2'', szükség lehet a résszélesség megnövelésére, annak érdekében, hogy bár kicsit rosszabb felbontással, de fényvesztés nélkül lehessen használni a műszert. Ennek érdekében a kombinált rés – tükör két, fix távolságú résszel rendelkezne. Az egyik a 2''-hez tartozó 130 mikrométeres, a másik egy 200 mikronos rés, ami 3''-es seeing disc-nek felelne meg. A késleltetőlencse minimális átmérője függ a chip méretétől és a főtükör fényerejétől. A másodlagos fénymenet félkúpszöge:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{0,5}{13,6}\right) = 2,1^\circ$$

A chip mérete egyezik a b_{\min} – nel, ami a fent kiszámolt 2,6 mm. Tehát a lencse minimális átmérője, ami a vignettálatlan leképezéshez szükséges:

$$D_{\min} = 164 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \text{ mm} + 7,35\text{mm} = 9,81\text{mm}$$

A spektrográf elsődleges fénymenete

Az elsődleges fénymenet kialakításánál fontos szempont volt a maximális fényhasznosítás. Ennek egyik oka a távcső viszonylag kis mérete, másik oka, hogy kb. 14-15 magnitúdós objektumok vizsgálatára is készül a műszer. A résnek a távcső optikai tengelyére kell kerülnie. A rés mögött, a kollimátor tengelyén egy 45 fokban bedöntött segédtükör van elhelyezve, aminek a feladata, hogy a kollimátortükörről vetítse a fényt.

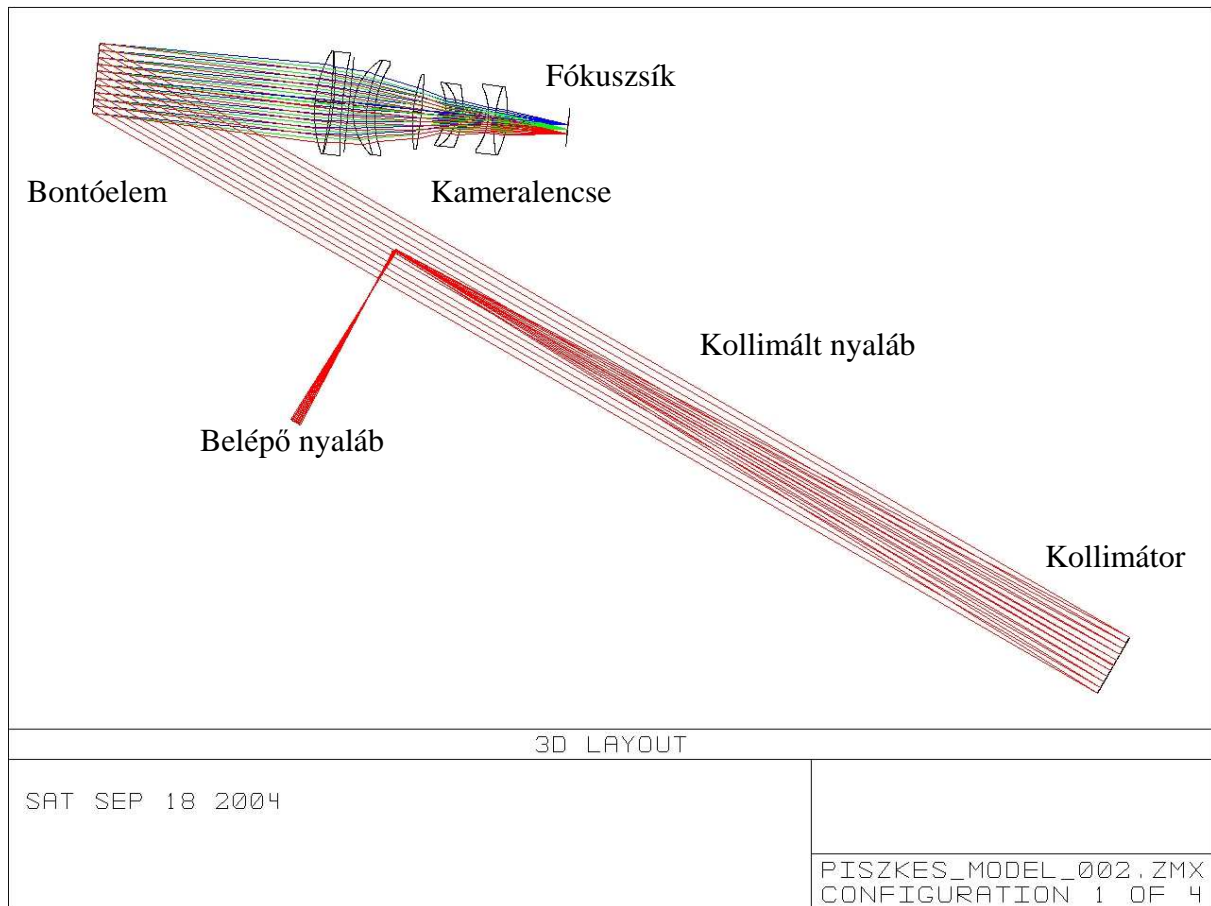
A kollimátor a saját optikai tengelyével párhuzamos, kollimált nyalábot állít elő, mert a rés ennek is a fókuszában van. Az elrendezés teljesen hasonló, mint egy Newton távcsőé, csak itt a fénymenet fordított irányú. Mivel az előbbi segédtükör is a kollimátor tengelyén van, így az kitakar a kollimált nyalábból. Ha a segédtükör a lehető legközelebb kerül a réshez, akkor minimalizálni lehet a kitakarás mértékét. A kollimált nyaláb férlátmérője 22 milliméter, ezért a rést a tükörtől legalább 30 mm-re kell elhelyezni, a tükör 45° - os vetülete pedig 3 milliméternek adódik.

Ezzel a tükör a fény 0,3 % - át takarná ki. Ugyanakkor maga a távcső Ritchey-Crétien rendszerű, azaz rendelkezik központi kitakarással, aminek mértéke nagyobb ennél. A spektrográf segédtükre a távcső segédtükreinek „árnyékában” van, tehát nem okoz további fényvesztést. A spektrográf kis síktükreinek mérete tehát egészen addig növelhető, amíg százalékosan el nem éri a főműszer kitakarásának mértékét. Az összes fényvesztés tehát, amit a segédtükör okoz a spektrográf fénymenetében, mindössze a tartószerkezet kitakarása, ami 1% alatti. Ez megengedhető egyrészt kicsinysége miatt, másrészt, mert ezzel a megoldással elkerülhetőek azok az aberrációk, amiket a fénymenet kollimátor optikai tengelyére nem szimmetrikus elhelyezése okozna.

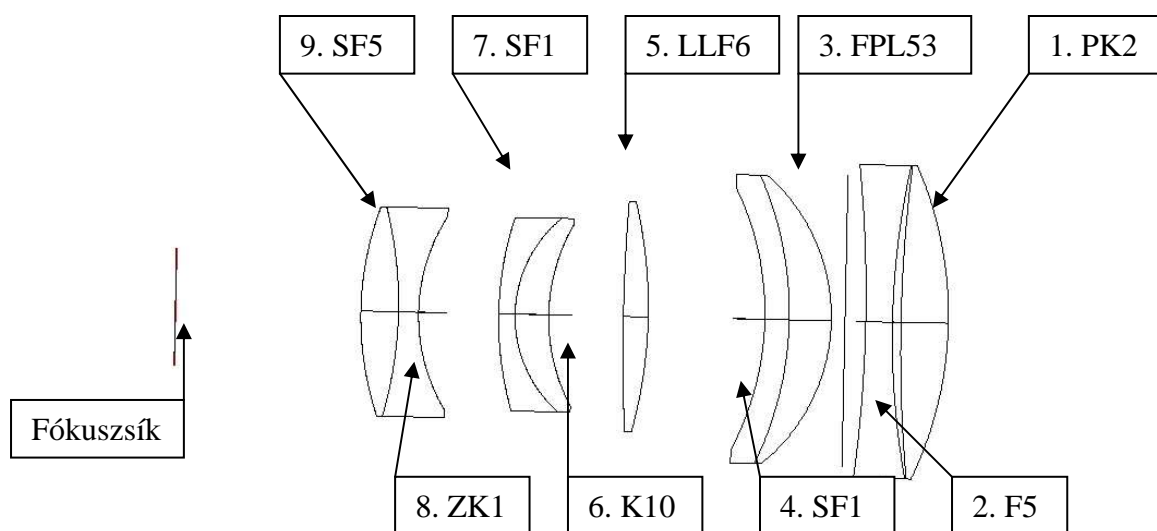
A kollimált nyaláb ezután a bontóelemre esik, aminek normája a kollimátor tengelyével 28,7° -ot zár be, amikor a blaze-elt hullámhossz a chip közepére képeződik le. A rács forgatható, így növelhető az egy ráccsal átfogható hullámhossztartomány.

A rácsot a kameralencse követi. Ezután a CCD kamera jön, ami úgy van elhelyezve, hogy a spektrum a chip közepére essen. Az optika modellezéséhez a ZEMAX nevű optikai tervező programot használtam. Először a műszer sematikus modelljét állítottam össze, kameralencse nélkül, majd a kameralencsét helyeztem el. A kamerával szemben az elvárások magasak, mivel relatíve széles hullámhossztartomány át fogása mellett kell korrigálni a különféle aberrációkat, a fókuszcsík görbületét a detektor sík felületéhez, megtartva a szükséges fényerőt. Ennek elérésére a szakirodalom alapján (Laikin, 1995) egy 9 tagú lencserendszert használtam, melyet optimalizáltam a műszer paramétereire. A fénymenet a

kameralencsével együtt a 3.1 ábrán látható, míg a lencse sematikus rajzát a 3.2 ábrán mutatom be a felhasznált üvegtípusokkal.



3.1 ábra. Az elsődleges fénymenet ZEMAX modellje



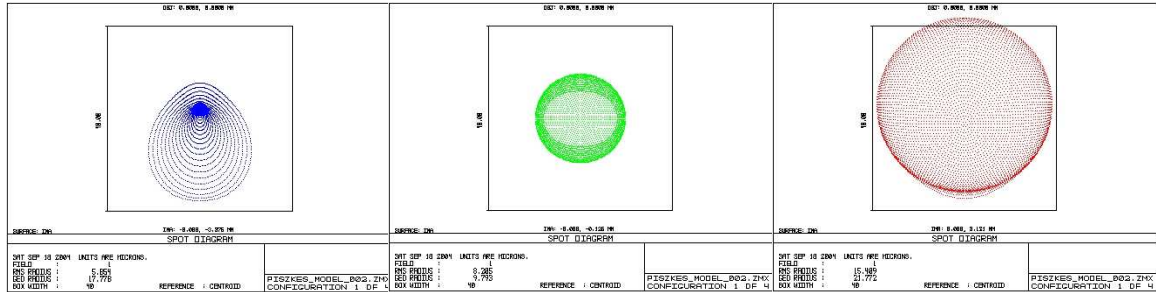
3.2 ábra. Kameralencse sematikus rajza

A 3.3 ábrákon a spot diagramok láthatóak minden tartományban három hullámhosszon. A referencia keret mérete 40 mikron, azaz 2x2 pixel. (hullámhosszak: 1. 2.1-es táblázat)

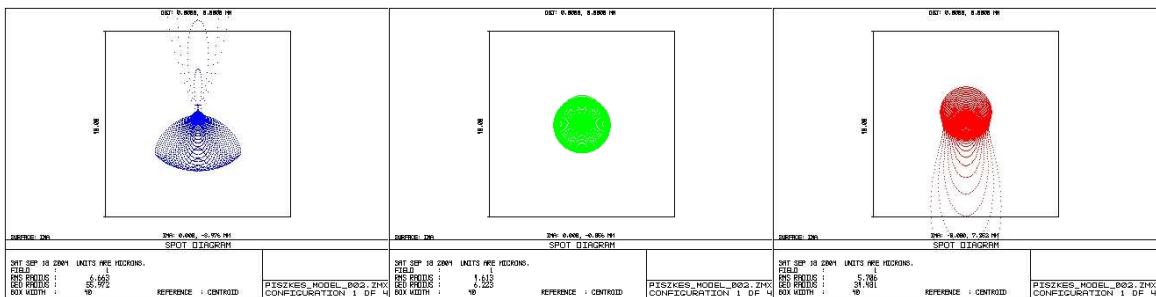
Kék oldal

Közép

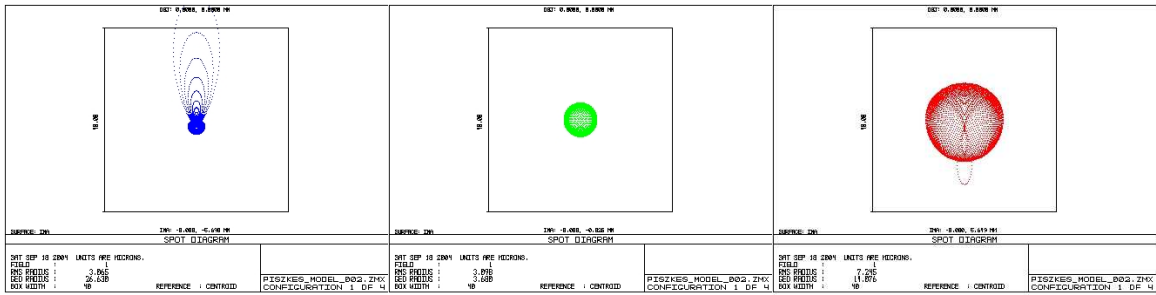
Vörös oldal



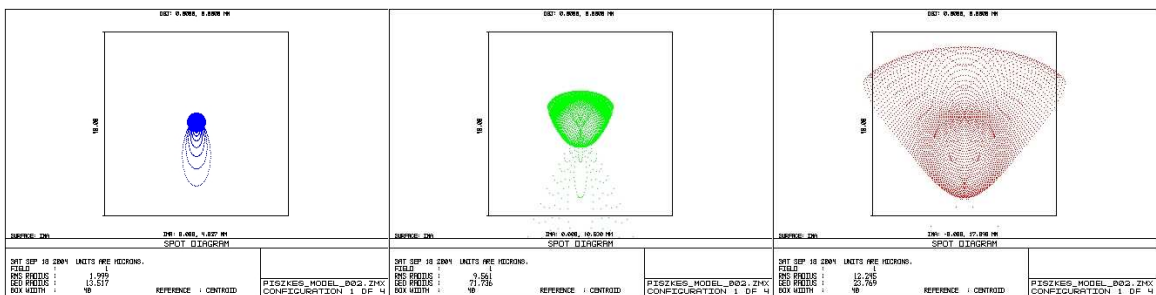
3.3 a ábra. Spot diagramok az 1. tartományról



3.3 b ábra. Spot diagramok a 2. tartományról

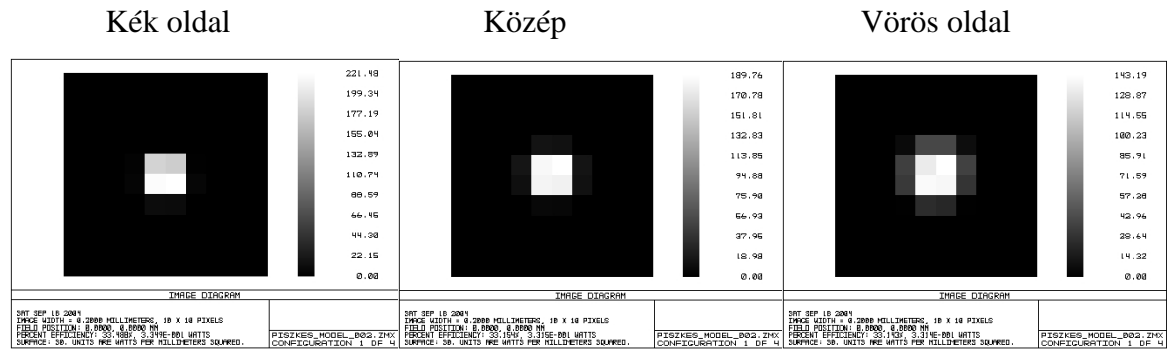


3.3 c ábra. Spot diagramok az 3. tartományról

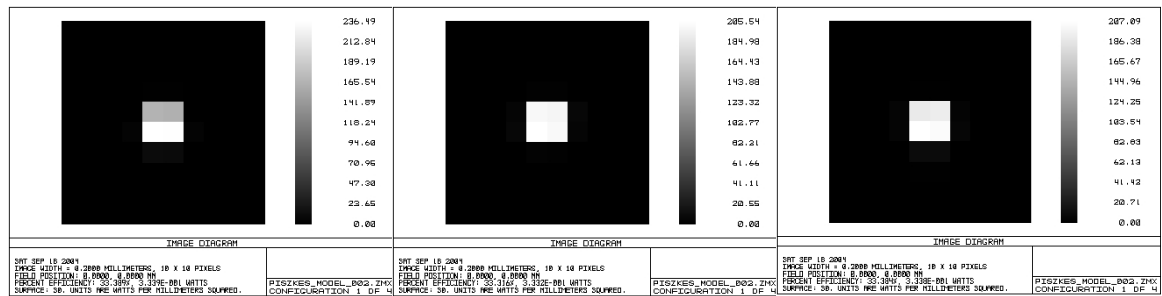


3.3 d ábra. Spot diagramok a 4. tartományról

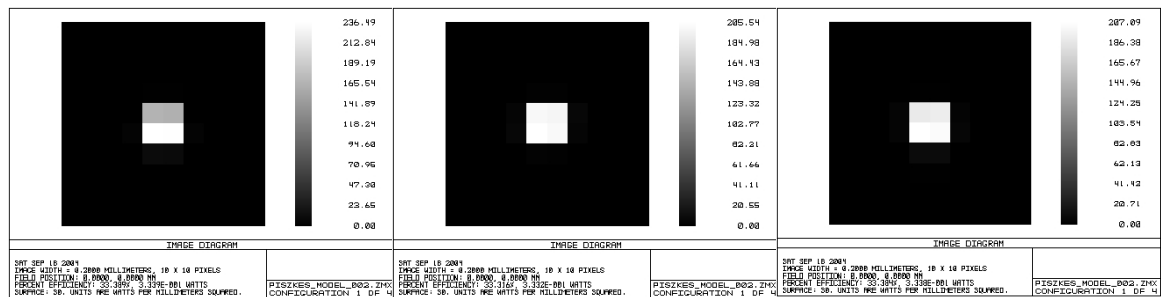
A 3.4 ábra a geometriai képanalízis eredményeit ábrázolja. Ezek egy a távcső által leképezett csillag 130 mikronos Airy korongjának valós képét mutatják be egy-egy diszkrét hullámhosszon a spektrográf képsíkjában, ZEMAX-al modellezve. (referencia keret mérete 10x10 pixel)



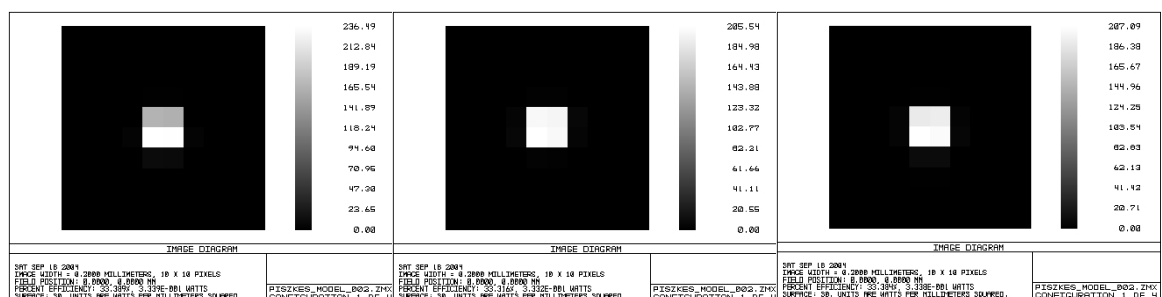
3.4 a ábra. Geometriai képanalízis az 1. tartományról



3.4 b ábra. geometriai képanalízis a 2. tartományról



3.4 c ábra. Geometriai képanalízis a 3. tartományról



3.4 d ábra. Geometriai képanalízis a 4. tartományról

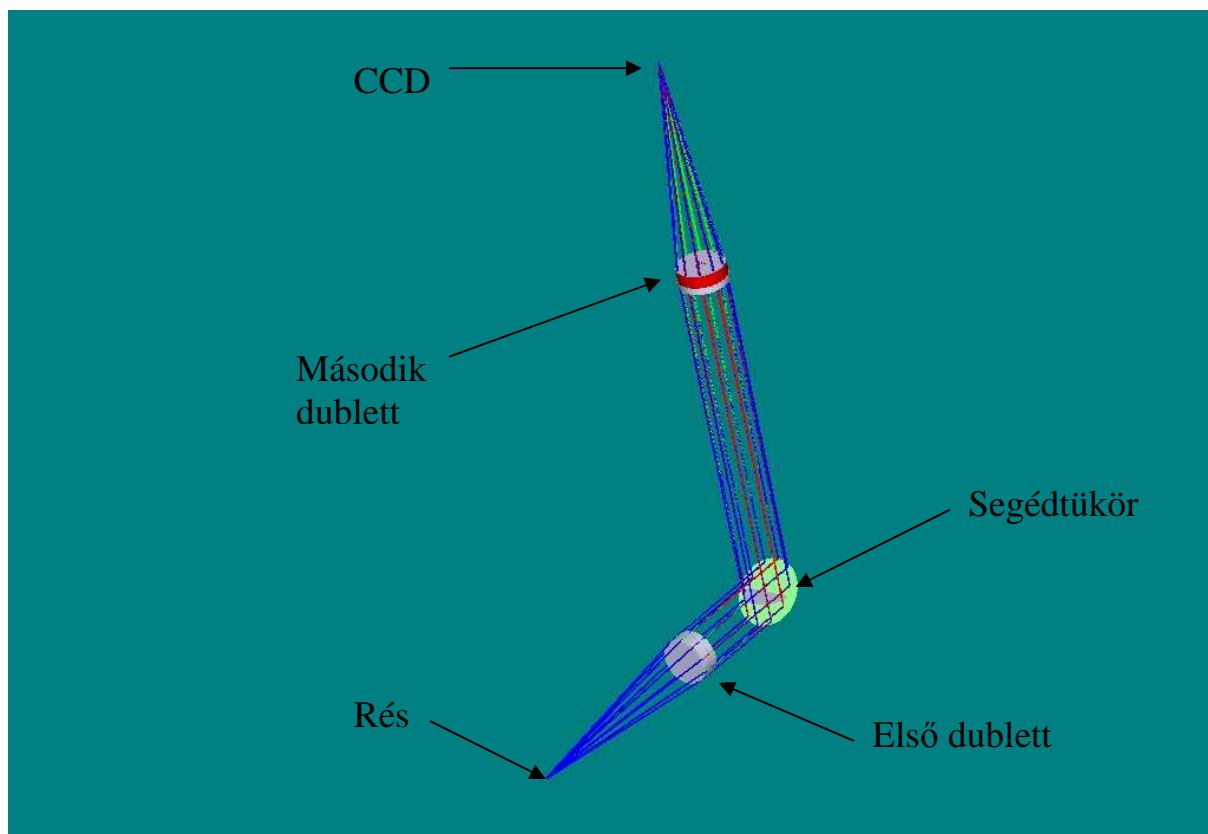
Az optikai paraméterek az alábbi 3.1 táblázatban vannak feltüntetve.

Lencse	Rádiusz [mm]	Vastagság [mm]	Átmérő [mm]	Üveganyag
L1	-83,93684	10,592	70	PK2
	330,4282	1,905	70	
L2	178,15306	5,96	70	F5
	-302,84166	4,6482	70	
Apertúra		3,048	65	
L3	-42,17162	9,398	65	FPL53
L4	-76,19492	5,461	65	SF1
	-65,11036	26,0604	60	
L5	-103,81966	5,5626	51,2	LLF6
	429,6156	16,6878	51,2	K10
L6	42,01922	7,5184	40,6	SF1
L7	28,40736	3,6576	43,8	
	73,914	17,907	43,8	
L8	41,1786	4,4958	43,8	ZK1
L9	88,66124	8,4074	46,8	SF5
	70,13702	41,3766	46,8	

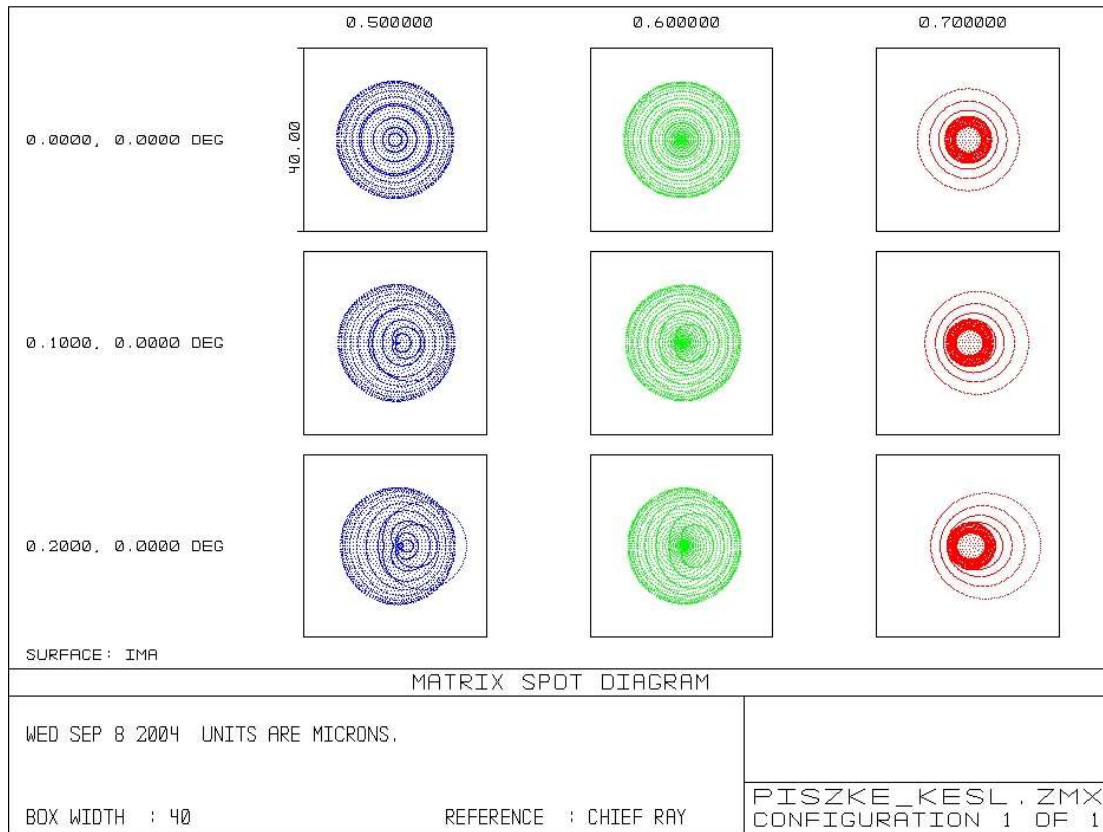
3.1 táblázat. A megtervezett kameralencse paraméterei

Másodlagos fénymenet

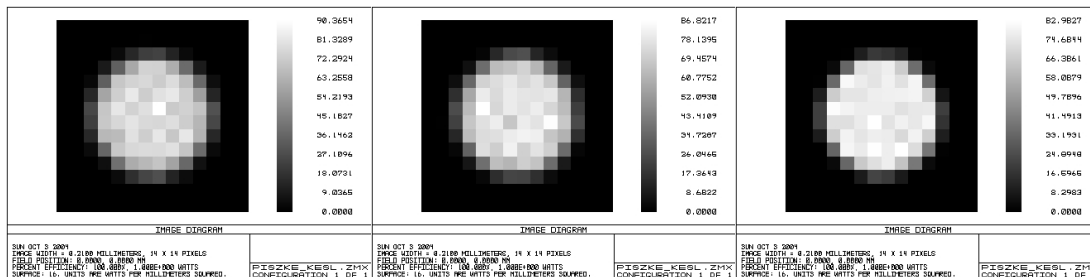
A másodlagos fénymenet feladata, hogy a megfigyelt objektum körüli égterületet leképezze egy másik CCD kamerára. Ezzel jelentősen megkönnyíti az objektum pozicionálását, valamint résen tartását (a távcsőmechanika követési hibáinak korrigálását), ugyanis amikor a csillag képe a résre kerül, akkor eltűnik a második kameráról, vagy jelentősen lecsökken az intenzitása. A feladat érdekében a kombinált rés-tükör kis szögben be van döntve, így a környező égterület egy sík segédtükör segítségével a késleltetőlencsére jut, majd onnan a CCD-re. A rés és a CCD is a késleltetőlencse görbületi középpontjában van, tehát a leképezési arány 1:1. A pontos pozicionáláshoz olyan lencserendszert kell alkalmazni, ami a csillag képét megfelelő minőségben képezi le. Erre a feladatra a ZEMAX programmal terveztem egy lencserendszert, ami két dublettból áll. A tervezésnél szempont volt, hogy a felhasznált üvegyanyagok ne legyenek túl drágák. A 4.2 ábrán az úgynevezett spot diagramok láthatók, ami tulajdonképpen a lencserendszer válasza egy pontszerű forrásra. Látható, hogy a két dublett torzítás- és színezésmentes képet ad. A 4.3a, b, c ábra a geometriai képanalízis eredményét mutatja, ami az 1 méteres távcső által leképezett 130 μm -es Airy korong képe a 15 μm pixelméretű CCD-n. A 4.2 ábrákon a keret mérete 210 μm .



4.1 ábra. A pozicionáló fénymenet elemeinek relatív helyzete



4.1 ábra. Spot diagramok a vezetésre szolgáló képsíkban



4.1a ábra. 500 nm

4.1b ábra. 600 nm

4.1c ábra. 700 nm

A geometriai képanalízis a detektoron majd ténylegesen látható képet illusztrálja.

A optika elemeinek paramétereit a 4.1 táblázatban szerepelnek.

Lencse	Rádiusz [mm]	Vastagság [mm]	Átmérő [mm]	Üveganyag
-	-	97,670418		
L1	78,197307	3,5	20	F2
	30,716087	0,1	20	Q2-3067
L2	30,716087	5,499952	20	BK7
	-92,847066	200	20	
L3	-92,847066	5,499952	20	BK7
	30,716087	0,1	20	Q2-3067
L4	30,716087	3,5	20	F2
	78,197307	97,272331	20	

4.1 táblázat. A vezető fénymenet lencserendszerének paraméterei

Mechanika

Kombinált rés – tükör

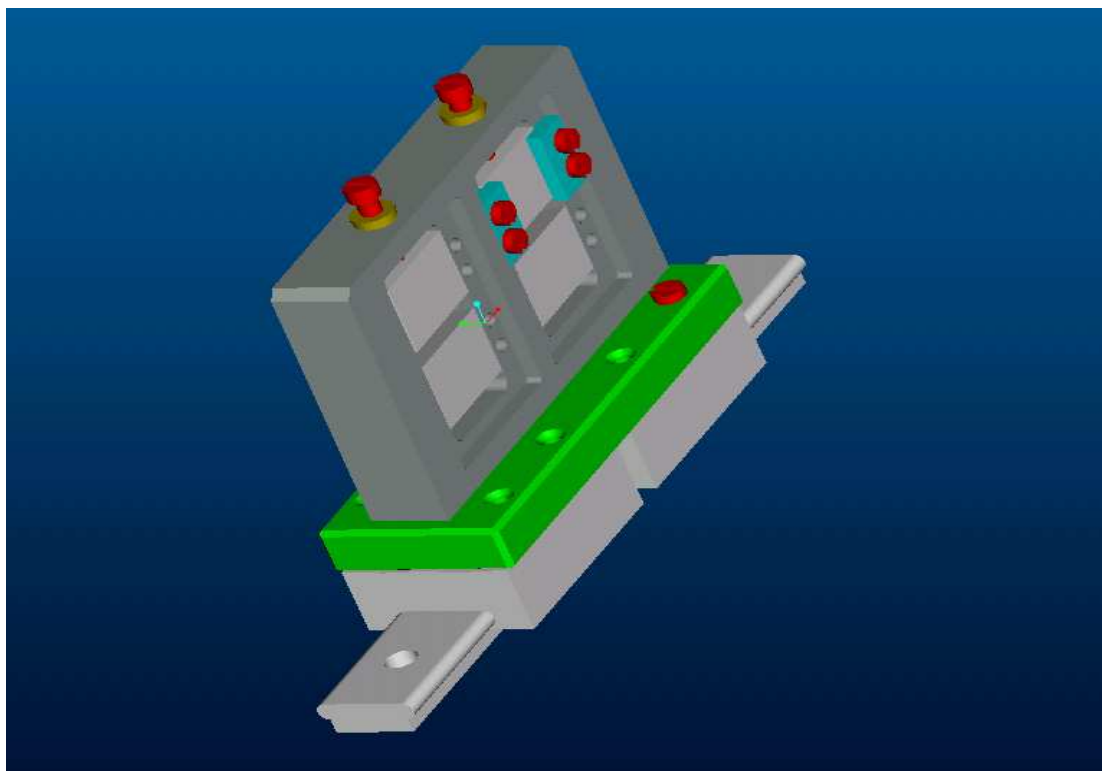
A kombinált rés – tükör négy síktükörből és a köztük lévő két fix szélességű résből áll. A réstartó megtervezésénél két nagyobb probléma merül fel. Az egyik, a rés szélességének pontos beállítása és értéken tartása, a másik a két tükör reflexiós felületének egy síkba hozása. A rés szélességnek beállítására egy finommenetű állítócsavar szolgál. Egy hitelesített mikroszkóp alatt a résszélesség beállítható a pontos értékre és két – két rögzítőcsavarral, két rögzítőfüllel fixálni lehet.

A két alsó tükör rögzített, a két felső állítható és mind a négy egy pontosan kialakított fészekben helyezkedik el, így nem lehetséges a tükrök még csekély mértékű elfordulása sem. A reflexiós rétegek egysíkúságát a hordozók azonos és egyenletes vastagsága és a fészkek aljának egysíkúsága biztosítja. A tükrök két rögzítőfüllel vannak nekifeszítve a fészkek aljának. A megfelelő szorítást az biztosítja, hogy a fészkek mélysége 0,05 milliméterrel kisebb, mint az üveghordozó vastagsága.

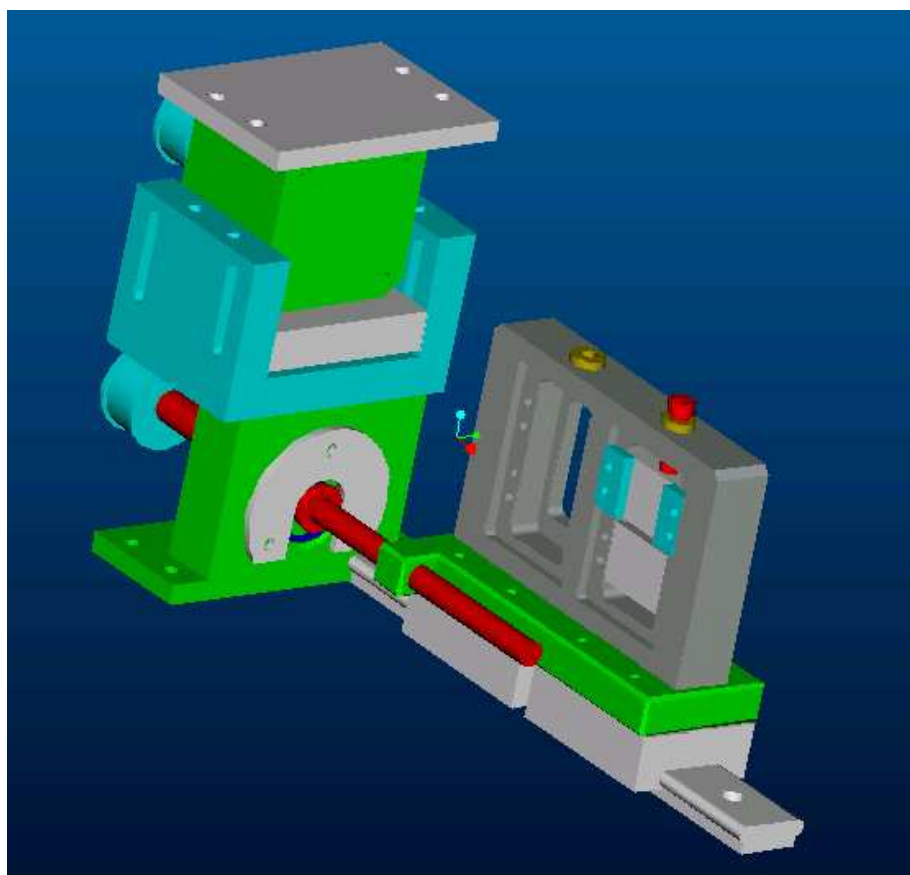
A leszorítófülek anyaga nem készülhet rideg, kemény anyagból, mert leszorításnál eltörhetik a tükröket. Erre a célra műanyag vagy keménygumi felel meg. Az illesztőalkatrész egyik oldala a réstartó kerethez, másik oldala majd egy lineáris csapágyhoz kapcsolódik, amin mozgatva a keretet a rések cserélődnek.

A rések cseréjéhez 35 mm – el kell elmozdítani a tükörtartó szerkezetet. Erre a célra a Pacific Bearing cég Mini – Rail szériájából az MR15-150 jelű csapágyat választottam ki. A csapágyon kettő kocsi lenne, a réstartó biztosabb rögzítése érdekében.

A kocsik a 150 mm – es sínen 61 mm – t mozdulhatnak el lefutás nélkül, ez bőven elegendő a rések cseréjéhez. A tényleges mozgatást M6 – os menetes orsó végezné a réstartó és a csapágy illesztőalkatrészében kiképzett menetes furathoz csatlakozva. Az orsót egy 200 lépéses léptetőmotor forgatná. 1000 Hz – es frekvenciával léptetve a réscsere, figyelembe véve a 0,8 mm – es menetemelkedést, 8 másodperc alatt történne meg, ami elenyésző az expozíciós időkhöz képest. Az 5.1 ábra a csapággal összeszerelt réstartót, és az 5.2 ábra a teljes összeszerelt részmozgató egységet mutatja.



5.1 ábra. A csapággal összeszerelt réstartó

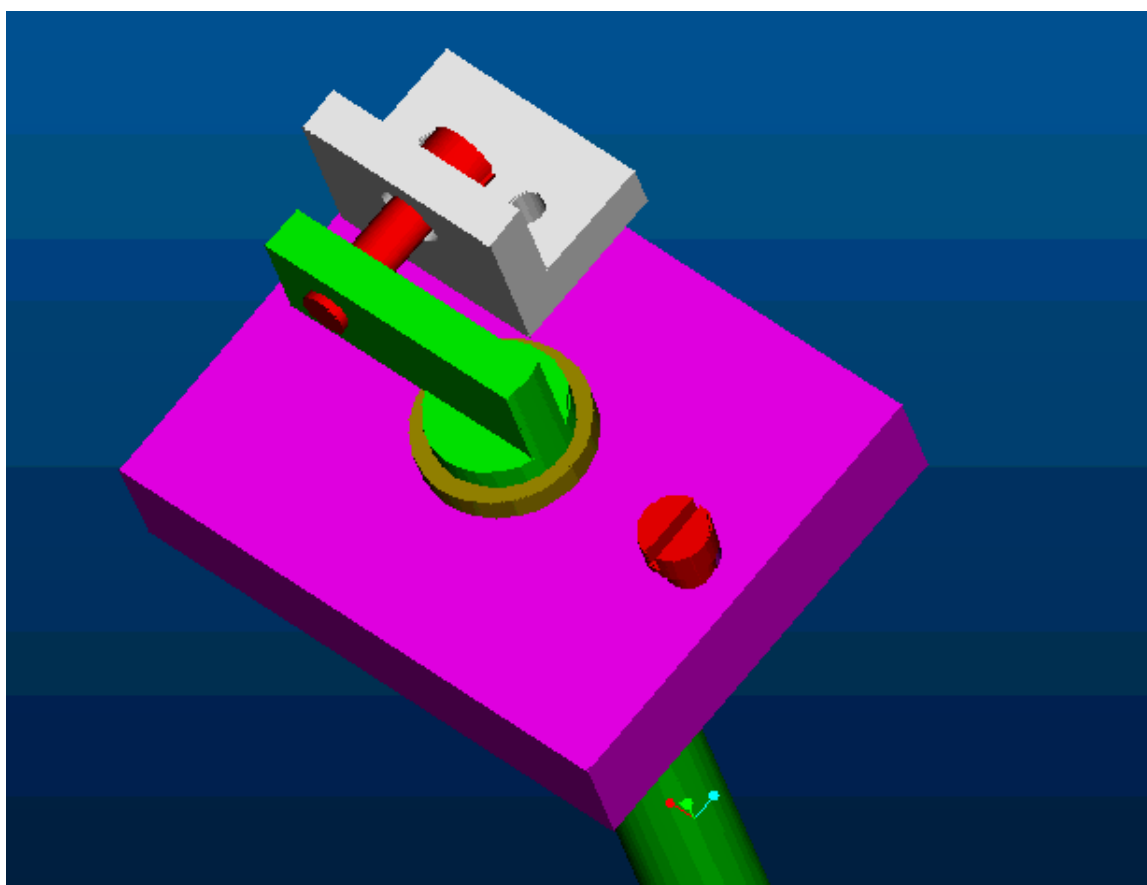


5.2 ábra. A teljes résmozgató egység

Az első segédtükör

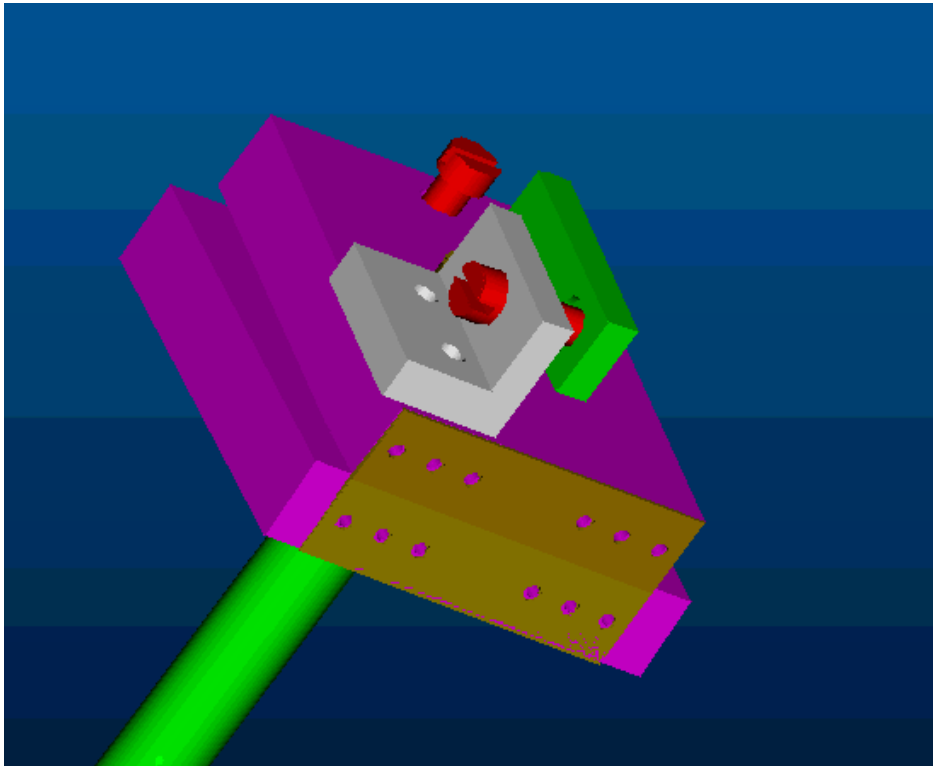
A segédtükör feladata, hogy a rést elhagyó, táguló fénynyalábot pontosan 90° - ban eltérítve, a kollimátortükörré vetítse. A segédtükör 45° - os vetületének mérete az előzőekben kiszámolt 3×3 milliméter. Ezt a tükröt olyan tartóval kell ellátni, amely három szabadsági fokot biztosít, amiből kettő tengely körüli forgás, egy pedig lineáris mozgás. A tengely körüli forgások a nyaláb pontos pozícionálását teszik lehetővé, elkerülve ezzel a fényvesztést, ami akkor lépne fel, ha nem az összes fény esne a kollimátorra, illetve biztosítják, hogy a fénykúp szimmetriatengelye párhuzamos legyen a kollimátor optikai tengelyével. A két forgástengely egymásra merőleges, így az általuk létrehozott mozgások is merőleges irányúak, és viszonylag gyorsan lehet a beállítást elvégezni. A segédtükör tartójának megtervezésekor szempont volt az is, hogy a műszer szétszedése nélkül lehessen beállítani a tükröt. Ezért maga a segédtükör egy rúdon nyúlik be a fényútba.

Ez a megoldás ugyan csak 3 – 4 foknyi elfordulást enged, mielőtt megfeszül a csavar, de kellő pontossággal elkészített alkatrészek mellett ez elegendő. Ez a rúd egy fémlaphoz kapcsolódik siklócsapágyon keresztül, ezt mutatja a 6.1 ábra.



6.1 ábra. A segédtükör tartójának jusztírozásra szolgáló része

A tartó egy rugalmas acéllemezzel egy másik lemezhez kapcsolódik, ez biztosítja merőleges tengely körüli forgatást. A két tartólemez egymással bezárt szögét egy másik állítócsavarral szabályozhatjuk. Az egész, hasonlóan a rés illetve a rácstartóhoz, egy keretben helyezkedik el, amiben szintén állítócsavar segítségével a nyaláb és a kollimátor optikai tengelye egy egyenesre hozható. A keret a vázszerkezethez rögzíthető. A teljes összeállítást a 6.2 ábra mutatja.

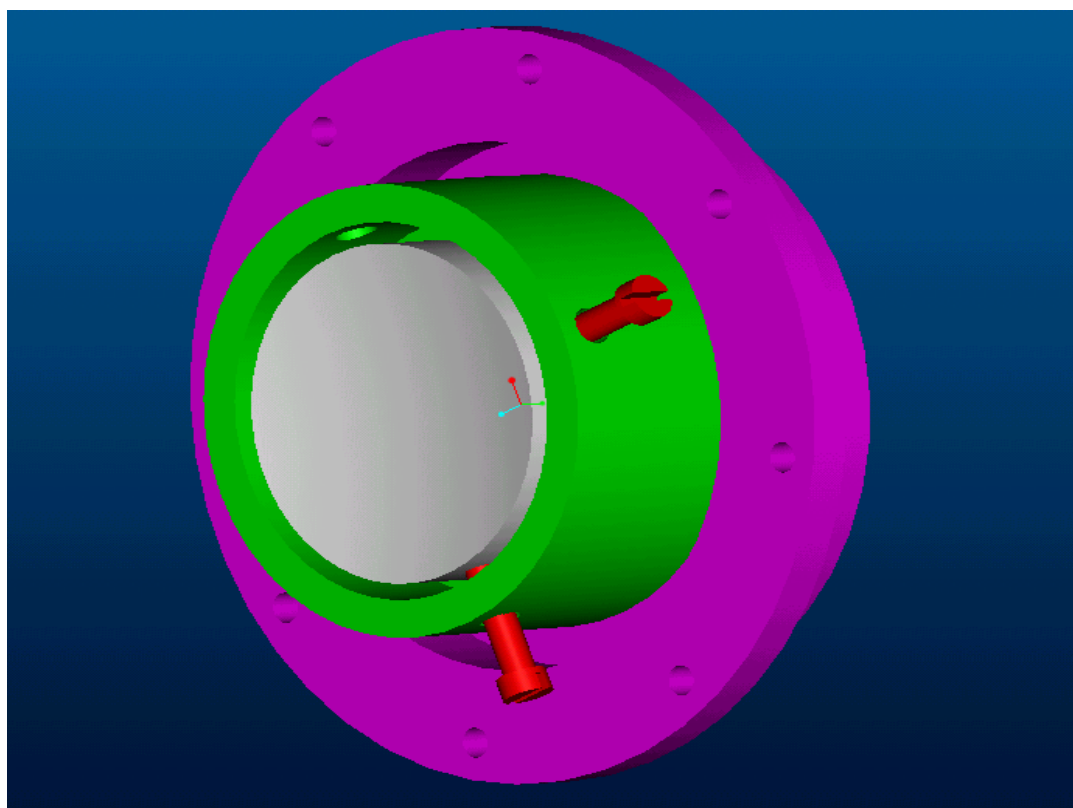


6.2 ábra. A segédtükörtartó egység teljes összeállítása

A kollimátor

A kollimátortükör fókusza az előzőekben kiszámolt 600 mm, átmérője 50 mm, így fényerejére $F = f/12$ adódik. Ilyen kis fényerő mellett alkalmazható gömbtükör, mert a gömbi felületből származó aberrációk elhanyagolhatóak.

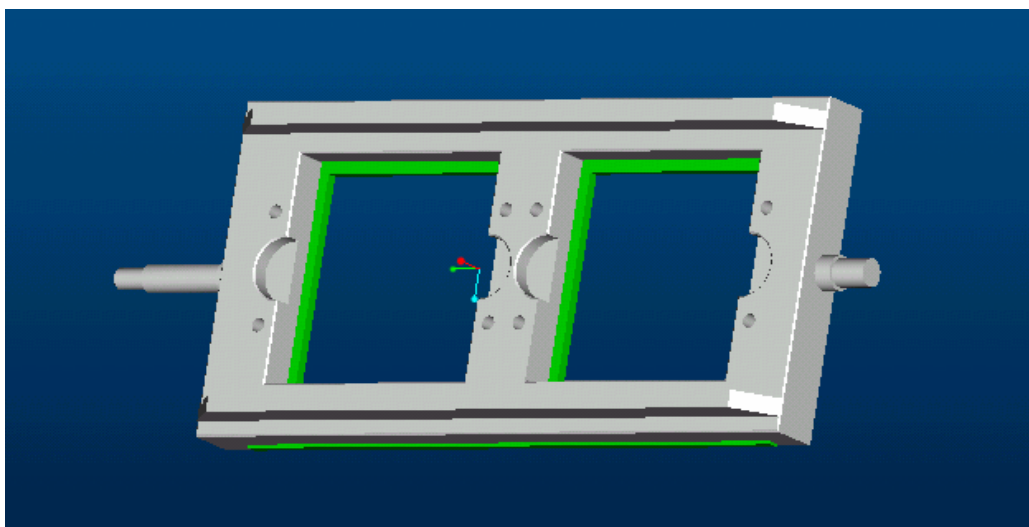
Fontos a kollimátortükör felfogatásánál, hogy jusztírozható legyen. Tehát a tükörtartónak biztosítania kell az optikai tengely döntését és a tengely paralel eltolását, valamint a beállított tükör helyzetben tartását. A tükörtartó alapvetően két részből áll. Az egyik rész magát a tükröt tartja és az optikai tengely paralel eltolását biztosítja. Négy állítócsavarral lehet egytengelyűsíteni az optikai tengelyeket, melyek egymással 90° -ot zárnak be. A csavarok finommenetűek, így pontosabb az állítás. Maga a tartó egy henger, melynek egyik vége zárt és így eléggé merev ahhoz, hogy a tükör helyzete ne változzon, illetve rögzítésnél ne deformálódjon el az alakja. A másik résznek kettős feladata van. Egyik az előbbi tartóhévely rögzítése a vázszerkezethez, másik a tükör optikai tengelyének döntése. A tengely döntését három pár, egymástól 120° -ra elhelyezett csavarpár biztosítja. Páronként az egyik csavar a döntöttséget szabályozza, a másik fixálja a beállítást. A 7.1 ábrán a tükröt rögzítő csavarok közül látható kettő.



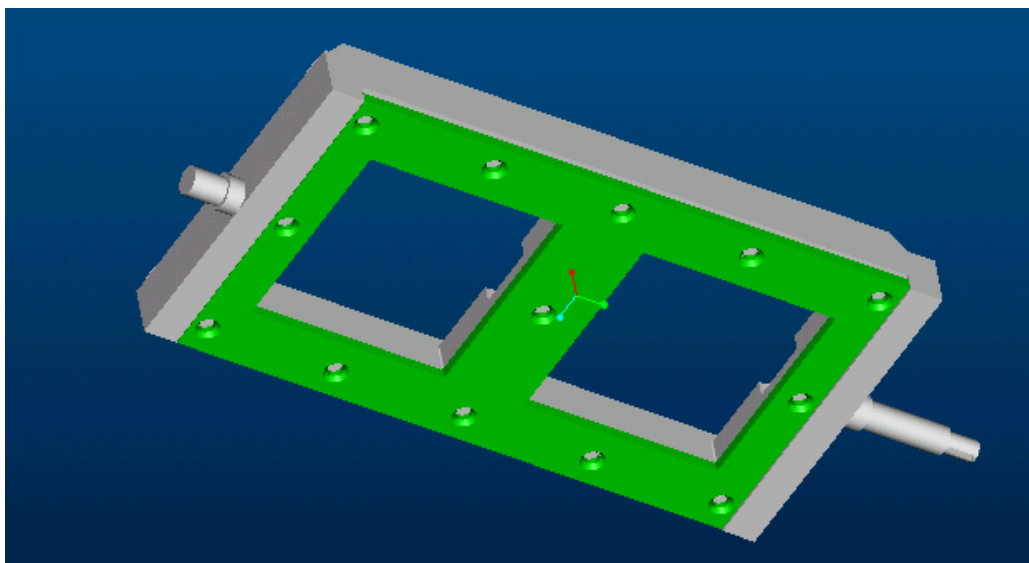
7.1 ábra. A kollimátor tartószerkezete, és a tükröt rögzítő csavarok

A rácstartó

A spektrográfban 2 db rácsnak van helye. A rácstartó feladata összetett. Egyrészt az éppen használt rác helyzetének megtartása illetve megváltoztatása, valamint a rácok cseréje. Fontos még, hogy a rácok reflektáló felületei egy síkba essenek, tehát a tartószerkezetnek a helyzetbiztosítást is meg kell oldania. Ez utóbbit megvalósítandó, a rácok egy keretben helyezkednek el és a keret egyik oldalára egy sík acéllemez, van rögzítve. Ennek a lemeznek nekiütköztetve a rácokat, biztosítva van a két reflektáló felület egysíkúsága. A 8.1a ábrán az üres rácstartó helyek látszanak. A félkör alakú kiképzések a rácok biztos megfogását szolgálják. A kétoldalt elhelyezkedő tengelycsomkokon történik a rácok forgatása. A 8.1b ábrán az acéllemez elhelyezkedése látható.

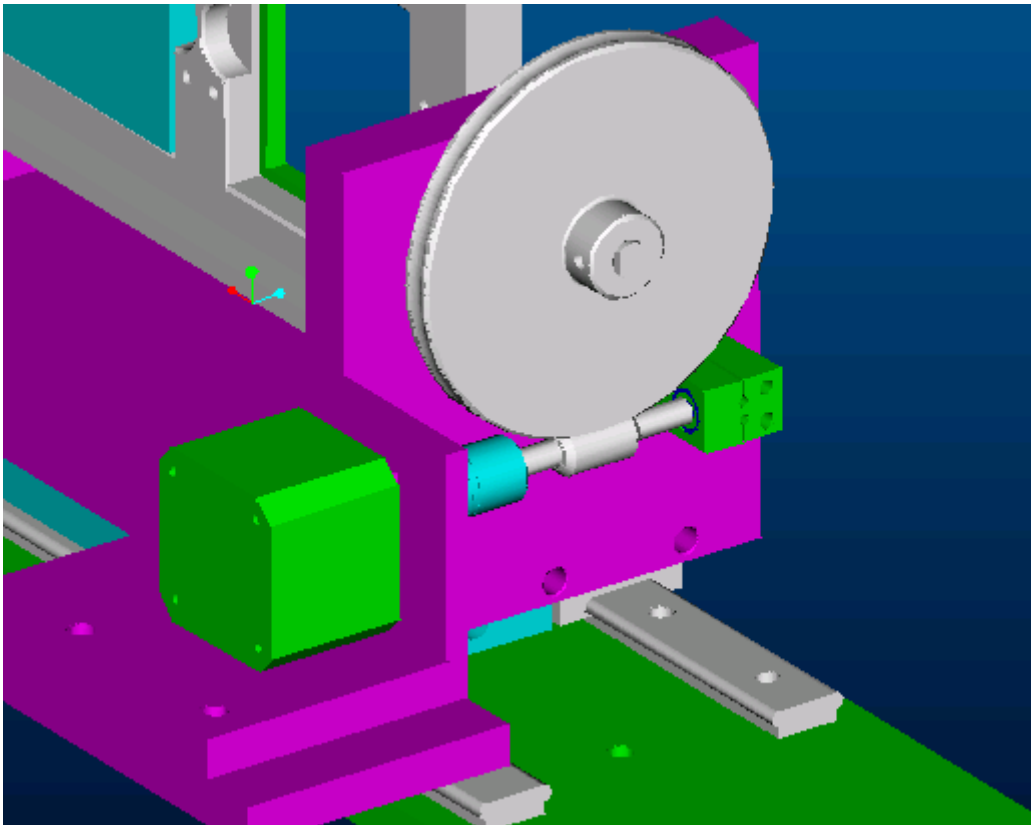


8.1 a ábra. A rácstartó keret hátsó része



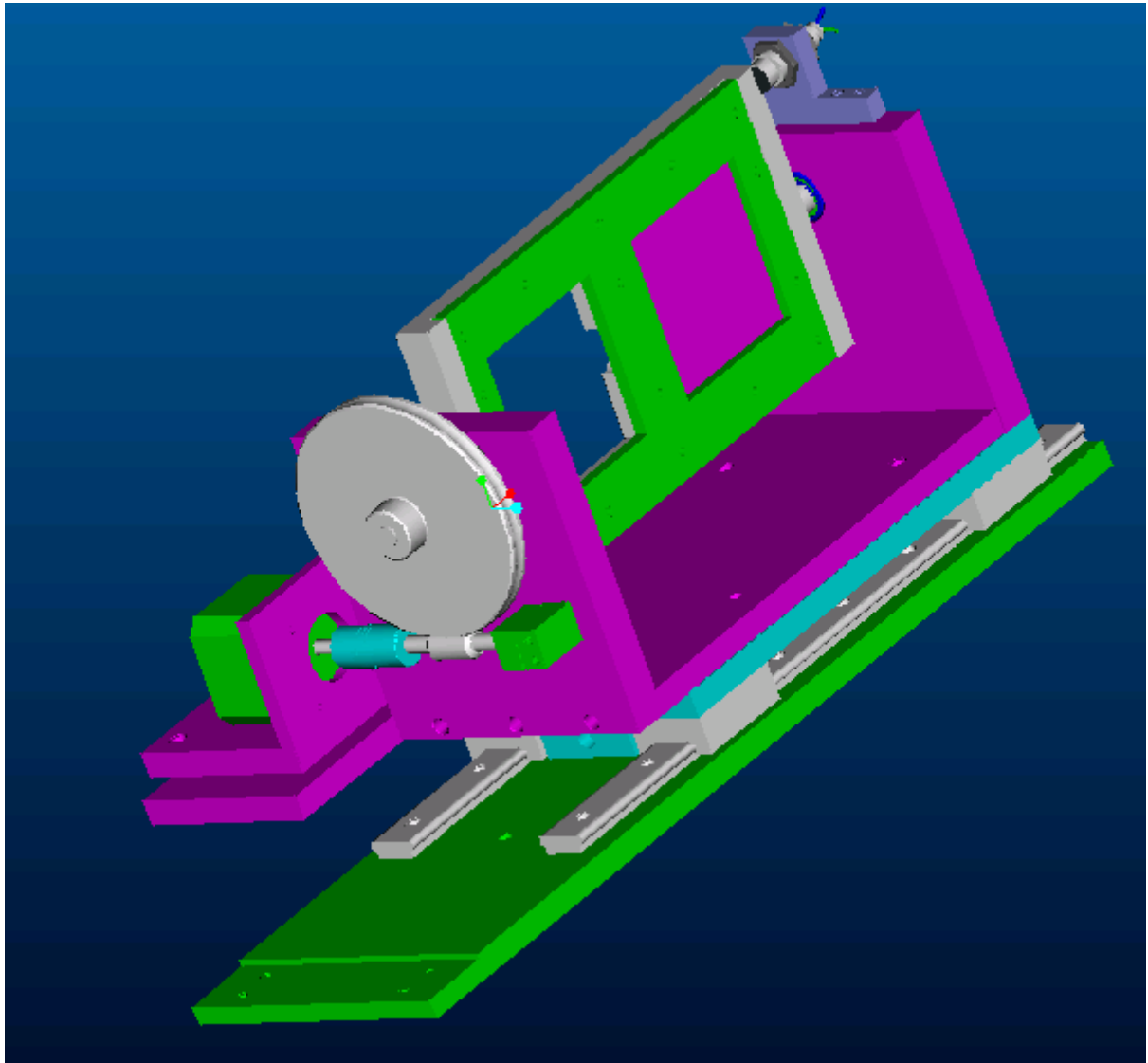
8.1 b ábra. A rácstartó első oldala, ebbe az irányba néznek a rácok karcolatai

A keret csapágyakon keresztül egy villás tartóhoz csatlakozik, melynek két oldala csavarokkal rögzíthető, ezáltal a csapágyak szerelése könnyebbé válik. A 8.1b ábrán látható hosszabb tengelycsonk végére egy csigakerék kerül, ami a csigán keresztül egy léptetőmotorral van összekötésben. A léptetőmotorral forgathatóak a rácsok, így beállítható a kívánt hullámhossztartomány. A 8.2 ábra az összeszerelt csigahajtást mutatja. A csiga és a léptetőmotor tengelye közé egy hengeres, tengelyére merőlegesen bemetszett tengelykapcsoló van beépítve, ami a két tengely szögeltérését hivatott kiegyenlíteni. A csiga másik végén található önbeálló csapágy speciális befogása a csigakerék radiális ütéséből származó holtjátékot küszöböli ki, mert ez a hullámhossztartomány beállításánál komoly problémákat okozhat. A keret teljesen körbeforgatható, ezáltal a rácsok kivételekor elkerülhető a keret kiszerelése.



8.2 ábra. A rácstartó keret csigahajtása, és annak felfüggesztése

A hullámhossztartomány beállítása után kívánatos levenni a motorokról a tartóáramot, mert különben a szabályozott hőmérsékletű belső térbe egy ellenőrizhetetlen hőforrás kerülne, ilyenkor viszont a motornak nincs tartónyomatéka. De mivel a csigahajtás önzáró kapcsolat, ezért ilyenkor sem fordulhat el a tartókeret. Az egész szerkezetet egy lineáris csapágyra szerelve, majd azt a vázszerkezethez rögzítve, egy léptetőmotorral lehetővé válik a rácscseréje. A lineáris csapágy a 8.3, a teljes összeszerelt egység a 8.4 ábrán látható.



8.4 ábra. A teljes összeszerelt rácstartó egység

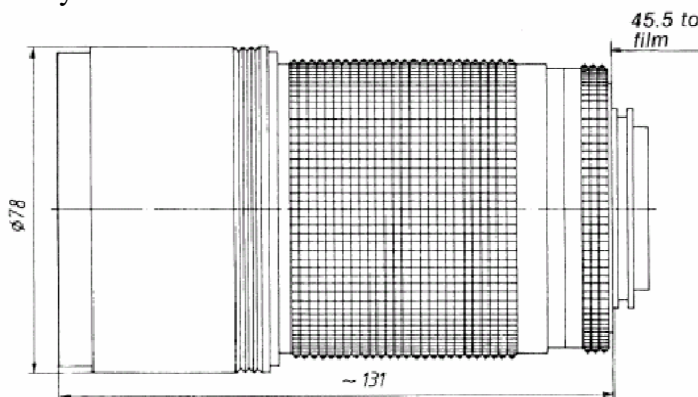
A kameralencse

A kameralencsével szemben támasztott fontosabb követelmények:

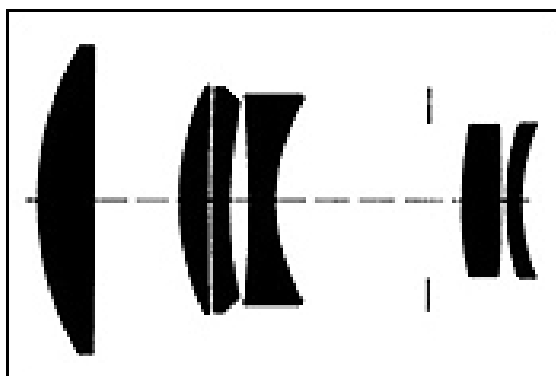
- Megfelelő fényerő a vignettátalan leképezés érdekében.
- A fókusz megfelelő hossza a tervezett felbontás megtartása miatt.
- A tengelytől távolabbi, és viszonylag nagy szög alatt beeső sugarak leképezésekor keletkező aberrációk minimálisak legyenek.
- A lencse fókusza ne változzon számottevően a hullámhosszal.

Mivel a 3. Fejezetben ismertetett, a modellezéshez használt lencserendszer egyedi elkészítése messze meghaladná a projekt megvalósulásakor valószínűleg rendelkezésre álló anyagi keretet, a kameralencse egy fotografikus teleobjektívvel helyettesíthető. Ez képalkotás szempontjából minimálisan, anyagilag azonban jelentősen (pozitívan) befolyásolja a műszert és annak elkészítését.

Erre a célra a Zeiss cég Sonnar T 2.8/180 objektívlencsáját választottam. A lencse hattagú, két színre korrigált, összetett lencse. A fókusza 180 mm, tehát teljesíteni tudja a kívánt felbontást. Az $F=2,8$ -as fényerő miatt az objektív átmérője 65 mm, ami elég nagy a vignettátalan leképezéshez. A 9.1 ábra a lencse befoglaló méreteit mutatja, a 9.2 ábra a lencsék alakját és elhelyezkedését.



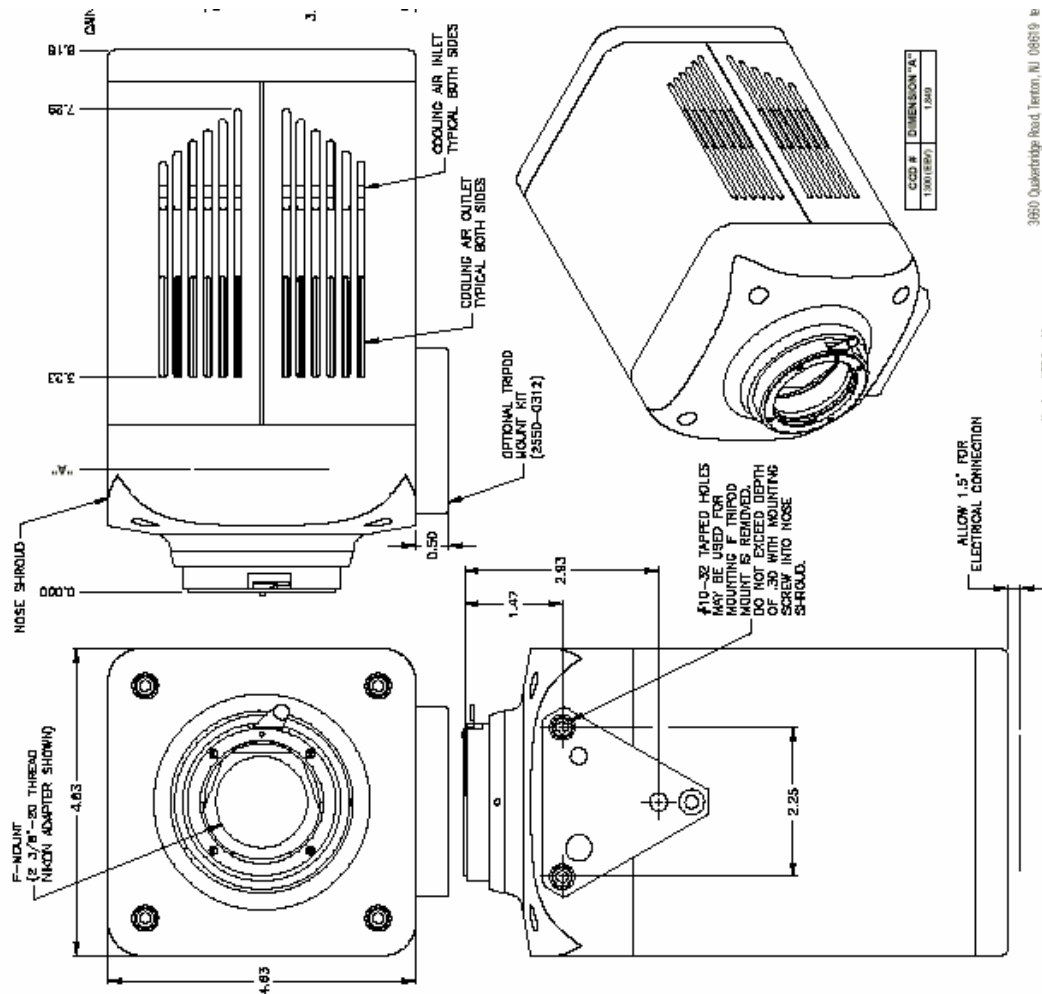
9.1 ábra. A lencse foglalata



9.2 ábra. A lencserendszer sematikus ábrája

CCD kamera

A spektrográf detektoraként egy, a Konkoly Intézet már tulajdonában lévő CCD kameráját tervezzük felhasználni. Az érzékelő ebben egy 1300x1300 pixeles, 20 mikronos pixelméretű CCD chip. A kamerafej 2 3/8 colos, bajonettzáras csatlakozóval szerelt. A befoglaló méretek, a kamerafej kialakítása, illetve méretei a 10.1 ábrán láthatóak.



3650 Quakerbridge Road, Torrington, NJ 08869-1010

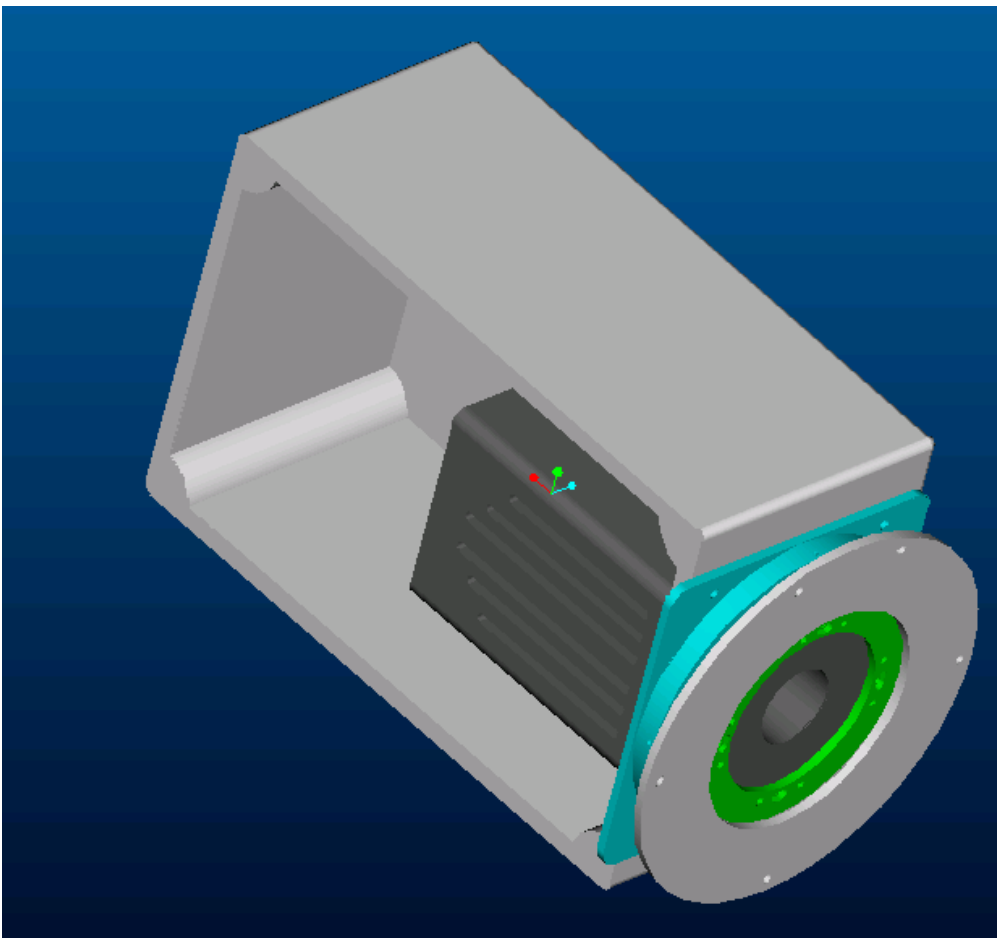
Version 1.0 (Rev. 4/0)

10.1 ábra. A CCD befoglaló méretei

Objektív-CCD kapcsolat

A CCD kamera gyárilag bajonett zárral van ellátva, amihez a Zeiss Sonnar lencse kapcsolható. Ez biztosítja, hogy a lencse optikai tengelye biztosan merőleges legyen a CCD chip felületére, elkerülve ezáltal, hogy a kép a CCD felületének nagy részén defókuszált legyen. A kapcsolóalkatrész tervezésénél szempont volt az is, hogy gyorsan és könnyen lehessen elvégezni a kamerafej le és fel szerelését úgy, hogy az egyszer beállított helyzet reprodukálható legyen, elkerülve ezzel a gyakori jusztírozást. Megoldásként egy ún. fecskefarkat használunk. Ennek segítségével egyetlen csavar meglazításával leszerelhető a kamerafej, és ugyanazon csavar meghúzásával pontosan az előbbi helyzetbe hozható.

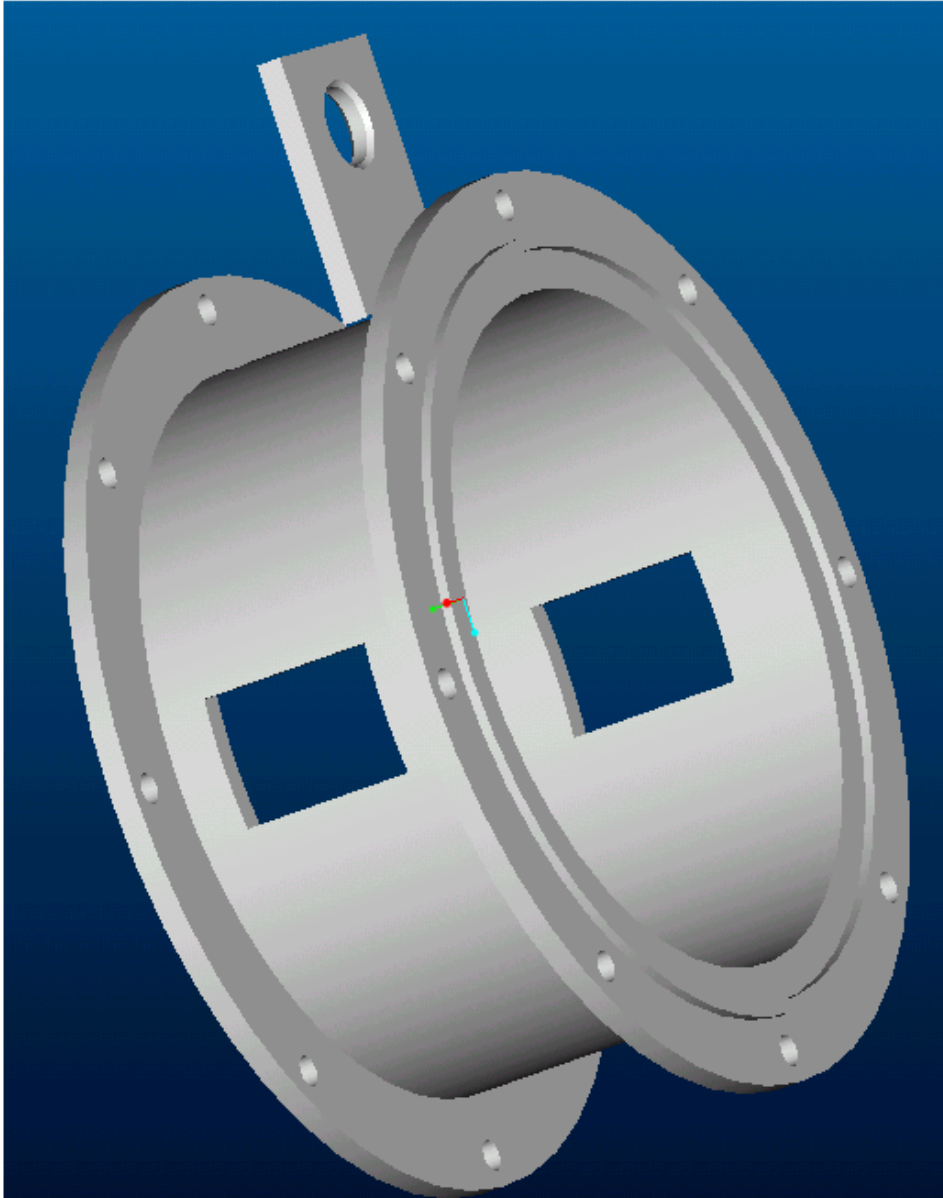
Maga a CCD kamera egy alumínium dobozban van, melyben a hőmérséklet stabilizált, ugyanis a kamera csak bizonyos hőmérsékleten működik megfelelően. Az összeszerelt modul a 11.1 ábra mutatja, a dobozzal és CCD-vel együtt.



11.1 ábra. A CCD kamera, a fűthető doboz, és a fecskefark

Távcső interfész

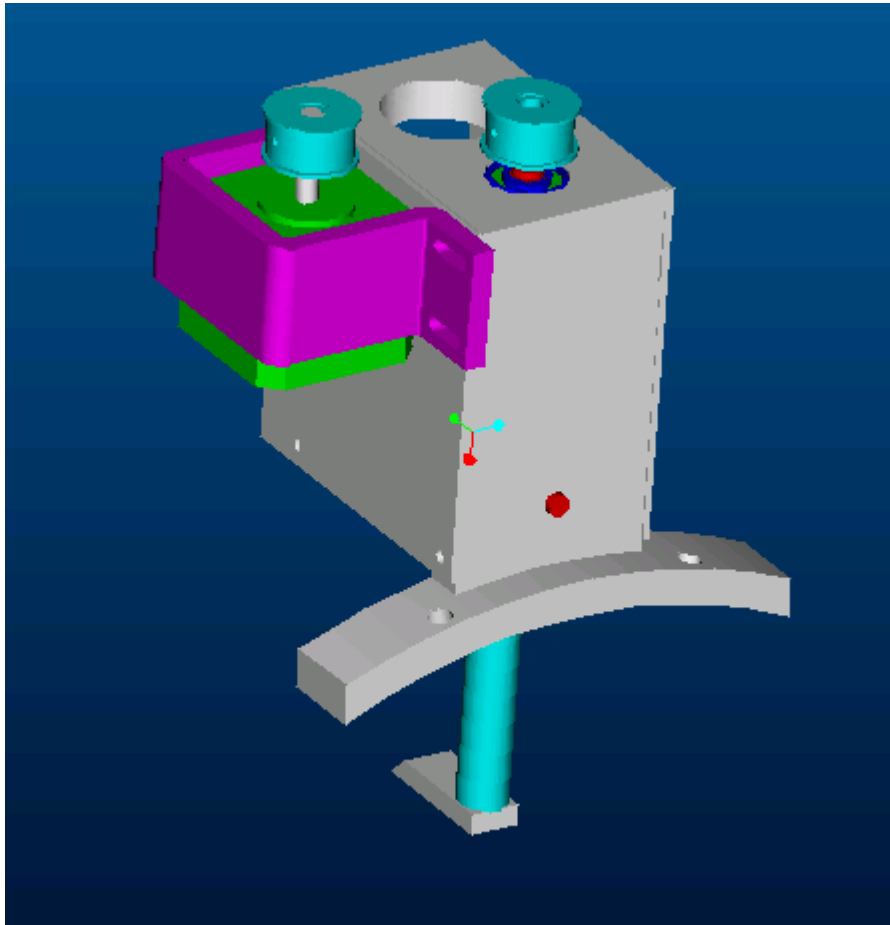
A műszer a teleszkópra egy csőszerű alkatrészsel csatlakozik, amire egyúttal a spektrál és wolfrámlámpa is rá lesz szerelve. A távcső optikai tengelyéhez a műszer optikai tengelyét egy helyzetbiztosító gyűrű illeszti fel. A henger oldalára szerelt, furattal ellátott fül, a műszer távcsőre szerelését segíti. A rögzítést feledatát 8 db M10 – es csavar látja el, ami megfelelő kötési szilárdságot biztosít. Az alkatrészt a 12.1 ábra mutatja.



12.1 ábra. A távcső interfész

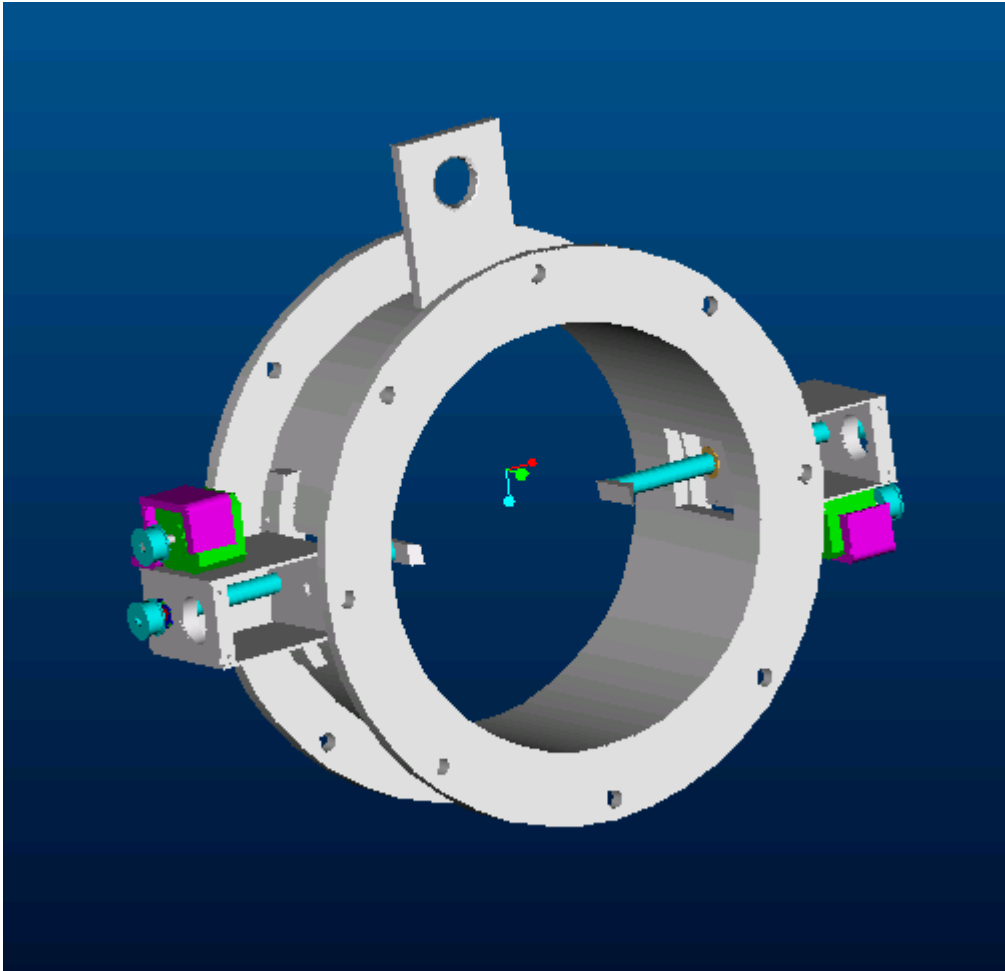
Spektrál- és wolfrám lámpa becsatolása

A rögzített színeképek redukálásához szükség van úgynevezett kalibrációs képekre. Flat képek készítéséhez feketetest sugárzó forrásra van szükségünk, míg hullámhosszkalibrációhoz emissziós, vonalas színeképű forrásra. Mindkét forrás fényét be kell csatolni a spektrográfba, hogy színeképüket rögzíthessük. Megoldásként egy mozgatóegységet terveztem, ami egy 45° -ban bedöntött síktükröt tol be a fényútba, és a tükröt oldalról megvilágítva a lámpa fénye a résre vetül. A felvétel elkészülte után az egység a tükröt kihúzza a fényútból. Két lámpára is szükség van, ezért az illesztőalkatrészen, egymással szemben helyezkedik el a két, egyforma mozgatóegység. Az egyik spektrállámpával, a másik wolfrámlámpával lesz szerelve. A 13.1 ábra magában, a 13.2 ábra pedig interfésszel összeszerelve mutatja a tükrmozgató egységet.



13.1 ábra. A spektrál és wolfrám lámpát becsatoló egység

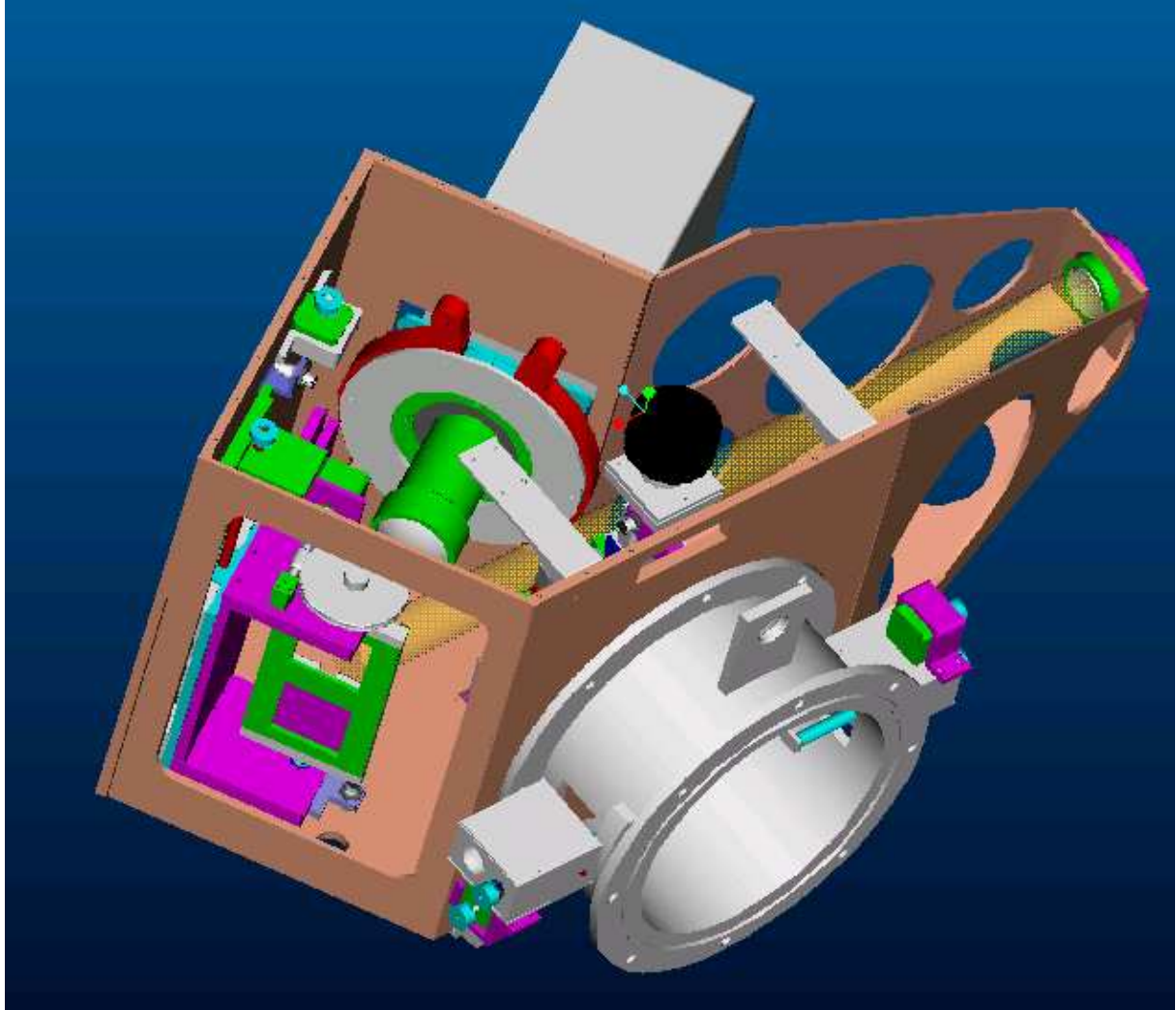
Igaz ugyan, hogy ez a megoldás további mozgó alkatrészeket visz a rendszerbe, de kikerülhető vele a további fényvesztés, ami akkor lépne fel, ha fixen elhelyezett, 45° - ban bedöntött üveglemezek vetítenék a fényt a résre. Ekkor ugyanis a vizsgálni kívánt objektum fényéből az üveglemez két oldala reflektálna 4-4% - ot, így a műszer transzmisszióképessége mintegy 8% - kal csökkenne.



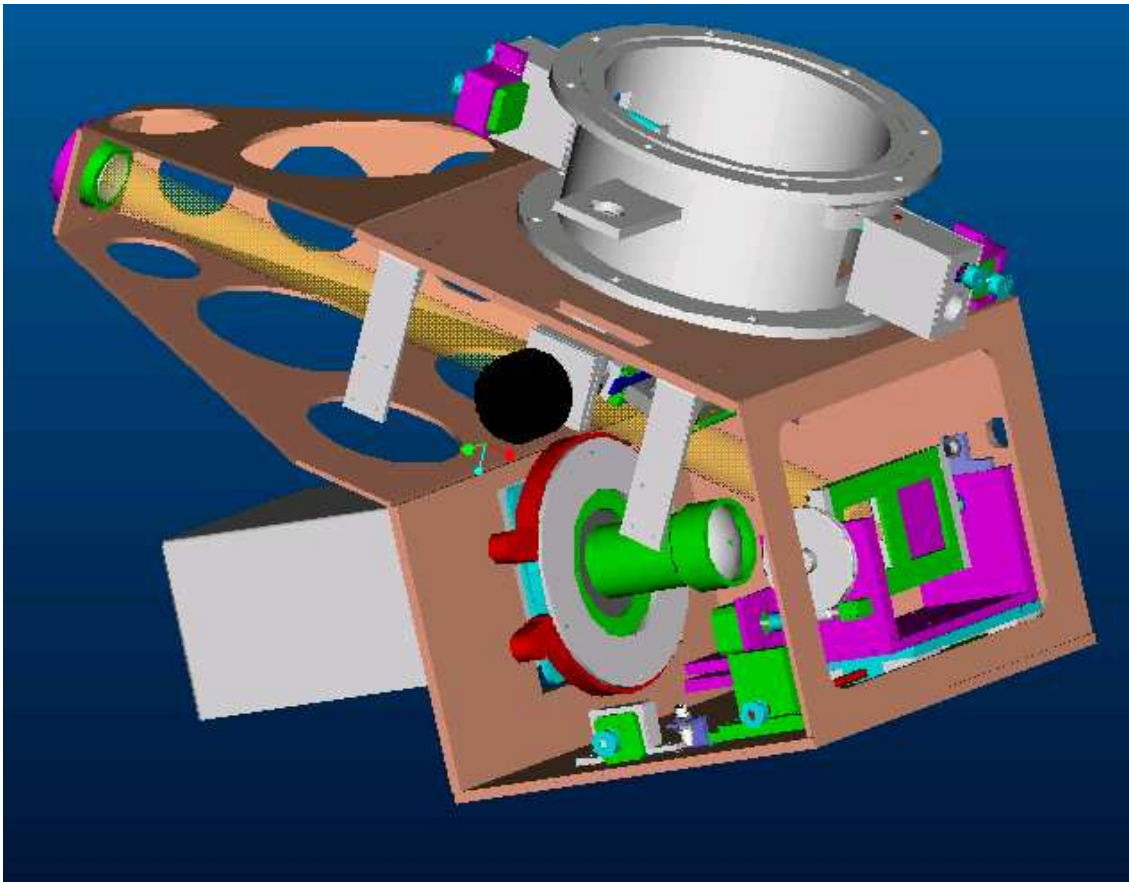
13.2 ábra. A becsatoló egység felszerelve az interfészre

Teljes összeállítás

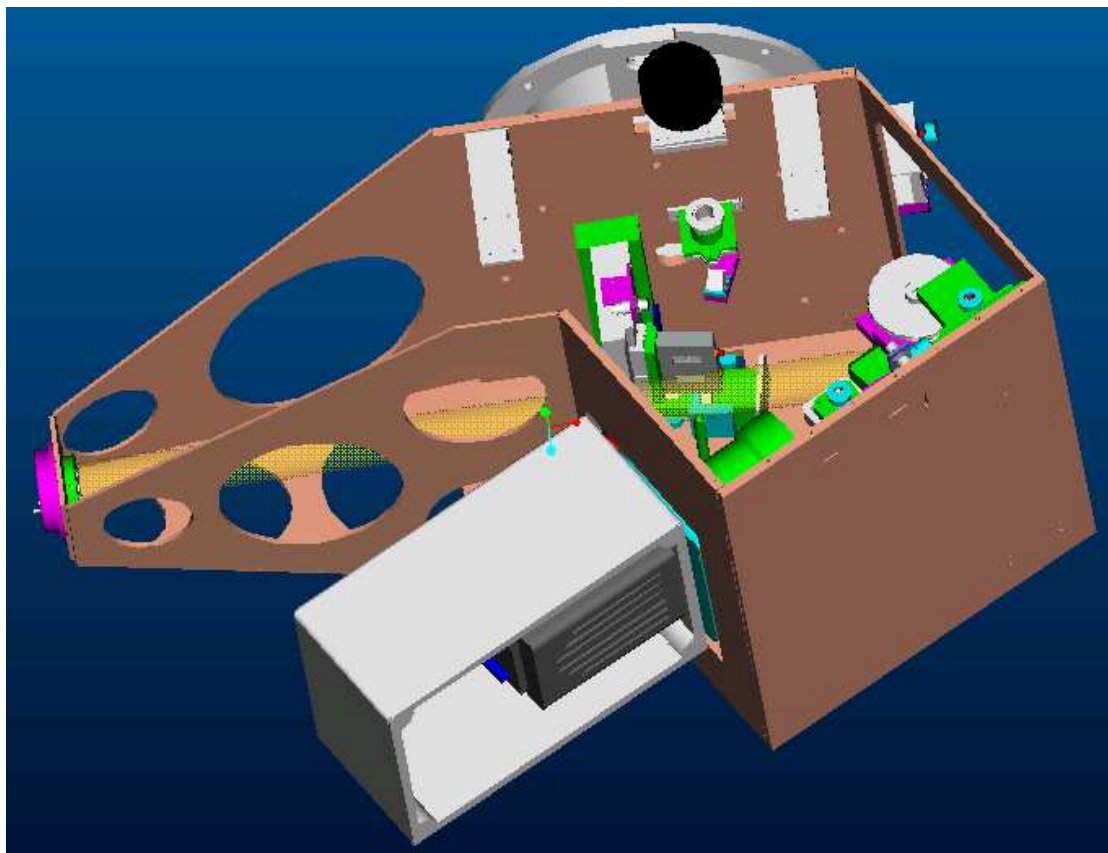
Ebben a fejezetben a műszer összeállított CAD modelljét mutatom be több nézőpontból.



14.1 ábra. Teljes összeállítás



14.2 ábra. Teljes összeállítás



14.3 ábra. Teljes összeállítás

Távcső és spektrográf együttes teljesítőképessége

Transzmisszió

A távcső és a spektrográf optikai elemein történő áthaladáskor illetve visszaverődéskor fényvesztés keletkezik. Ha az egész rendszerre akarjuk kiszámolni a veszteséget, akkor az egyes optikai elemek transzmisszió vagy reflexió képességét össze kell szorozni.

Az egyes optikai elemek áteresztő, illetve visszaverő képessége:

a távcső főtükrének reflexiója $t_1 = 0,94$

a távcső segédtükrének reflexiója $t_2 = 0,94$

az elsődleges segédtükör reflexiója $t_3 = 0,94$

a kollimátor reflexiója $t_4 = 0,94$

az elsődleges segédtükör kitakarása $t_5 = 0,97$

a rácsok minimális reflexiója, bármelyik működési tartományban $t_6 = 0,65$

a kameralencse transzmissziója $t_7 = 0,8$

a detektor optikai ablakának áteresztése $t_8 = 0,99$

Számoljuk ki a teljes transzmissziót ezekkel az értékekkel.

$$T = t_1 \cdot t_2 \cdot t_3 \cdot t_4 \cdot t_5 \cdot t_6 \cdot t_7 \cdot t_8 = 0,39$$

Ez azt jelenti, hogy a műszer a bejutó fénynek legalább a 39 %-át hasznosítja, bármelyik hullámhosszon.

Érzékenység

Az érzékenység megadja, hogy ha a távcső belépő apertúrájánál a fluxus F , a távcső fénygyűjtő felülete A , a detektor kvantumhatásfoka QE , és $\Delta\lambda$ az egy pixel által lefedett spektrális tartomány, akkor hány elektron keletkezik pixelenként és másodpercenként a detektorban. Számoljuk ki az érzékenységet a hidrogén Balmer-alfa vonalának közelében.

$$F = 1 \frac{\text{foton}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{Å}^\circ}$$

$$A = 7854 \text{ cm}^2$$

$$QE = 0,65$$

$$\Delta\lambda = 0,875 \text{ angström}$$

Ezekkel a paraméterekkel az érzékenység:

$$S = T \cdot A \cdot QE \cdot \Delta\lambda = 1742 \frac{\text{elektron}}{\text{pixel} \cdot \text{másodperc}}$$

Tehát, ha 1 foton érkezik angströmönként és négyzetcentiméterenként a távcsőtükör felületére minden másodpercben, akkor egy pixelben egy másodperc alatt 1742 elektron keletkezik.

Hasznos jel számítása

A jel nagyságát elektronban fejezzük ki, ami tulajdonképpen az NxM pixeles területen begyűlt elektronok számát jelenti. Egy csillagspektrum felvételekor ez függ az adott színképtípusú csillag mért fluxusától az atmoszféra fölött, ezt jelöljük E-vel. Függs az előbb számolt érzékenységtől, az atmoszféra transzmissziójától ez legyen T_A , és a gyűjtő felület dimenzióitól pixelben. Ezek legyenek N és M. Számoljunk egy A0V színképtípusú és 0 magnitúdós csillagra.

$$E = 700 \frac{\text{foton}}{\text{cm}^2 \cdot \text{másodperc} \cdot \text{angström}}$$

$$T_A = 0,7 \text{ átlagosan a tengerszinten}$$

$$N = 2$$

$$M = 2$$

$$C = E \cdot S \cdot T_A \cdot N \cdot M = 3414320 \text{ elektron}$$

Azaz 3414320 elektron keletkezik az előbbieken számolt érzékenység mellett másodpercenként 4 összeolvasott pixelben.

Ha a csillag látszó fényessége nem 0^m , akkor C értéke a következőképpen módosul:

$$C_m = C_0 \cdot 10^{-0.4m}$$

A jel/zaj viszony

A spektrumok kiértékelhetőségének egyik fontos kritériuma a megfelelő jel/zaj viszony. Ennek az értéknek a gyakorlatban legalább 20-nak kell lennie. A viszonzszám számításához szükséges paraméterek:

az expozíciós idő I

a hasznos jel C

az égi háttér értéke az adott helyen B

a sötétzaj D

a diszperziós tengelyen összevont pixelszám N

a diszperziós tengelyre merőlegesen összevont pixelszám M

az integrációs idő eléréséhez összegzett képek száma n

a detektor kiolvasási zaja elektronban megadva s

A piszkástetői égi háttér mintegy 18 magnitúdó/négyzetív másodperc, ami körülbelül megfelel 20 elektron/pixel/másodperc jelnek. A detektor sötétzaja -40°C -on $0,03\text{e}^-/\text{pixel}/\text{secundum}$, N és M értéke kettő. A detektor kiolvasási zaja 3e^- .

A jel/zaj viszony számítása az alábbi szerint történik:

$$\frac{Jel}{Zaj} = \frac{C \cdot I}{\sqrt{C \cdot I + N \cdot I \cdot (B + D) + \left(\frac{N}{M}\right) \cdot n \cdot s^2}}$$

Ezt I -re rendezve megkapjuk az integrációs időt egy képre:

$$I_{1,2} = \frac{\left(\frac{Jel}{Zaj}\right)^2 \cdot (C + N \cdot (B + D)) \pm \sqrt{\left(\frac{Jel}{Zaj}\right)^4 \cdot (C + N \cdot (B + D))^2 + 4 \cdot C^2 \cdot \left(\frac{N}{M}\right) \cdot n \cdot s^2 \cdot \left(\frac{Jel}{Zaj}\right)^2}}{2 \cdot C^2}$$

A fenti képletet használva a 15.1 táblázat ad tájékoztatást egy A0V színképtípusú csillag spektrumának elkészítéséhez szükséges expozíciós időkről, különböző jel/zaj viszonyok mellett szekundumban, a hidrogén Balmer alfa vonalának környezetében. A táblázat csak tájékoztató jellegű, természetesen más színképtípusnál, és más hullámhossztartományban eltérnek az eredmények.

Jel / Zaj	Fényesség [mag]	11	12	13	14	15
	20		4	13	53	265
30		9	29	120	596	
40		16	52	213	1059	
50		24	81	332		
60		35	116	478		

15.1 táblázat. Különböző jel/zaj viszonyhoz szükséges expozíciós idők

„Blaze” karakterisztika és relatív hatások

Ha fény esik egy optikai rács felületére, akkor a rács karcolatain diffraktálódott fény az alábbi jól ismert rácsegyenletet elégíti ki

$$\sin(\alpha) + \sin(\beta) = \rho \cdot m \cdot \lambda$$

A diffraktált fény eloszlásának α ill. β függése a következő (Bottema, 1980):

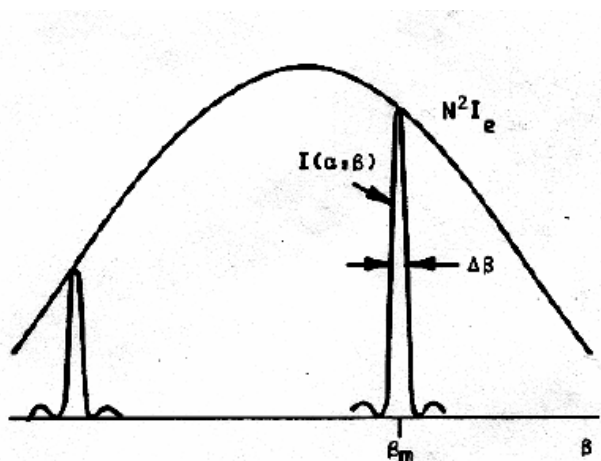
$$I(\alpha, \beta) = I_e \cdot \sin^2\left[\frac{1}{2} N \cdot k \cdot d(\sin(\alpha) + \sin(\beta))\right] / \sin^2\left[\frac{1}{2} k \cdot d(\sin(\alpha) + \sin(\beta))\right]$$

ahol I_e a diffrakciós függvény egy részre, és k a körhullámszám. A diffraktált fény egy keskeny spektrumvonalba koncentrálódik, aminek $N^2 I_e$, és a félértékszélessége

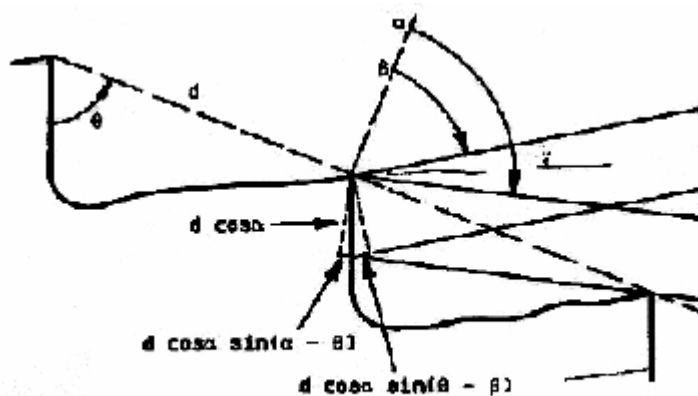
$$\Delta\beta = \frac{\lambda}{N \cdot d \cdot \cos(\beta_m)}$$

és az ebbe integrált fluxus

$$I_{\text{int}}(\alpha, \beta_m) = I_e \cdot \left[\frac{N \cdot \lambda}{d \cdot \cos(\beta_m)} \right]$$



16.1 ábra. Burkológörbe és spektrális elemek



16.2 ábra. Rácsprofil, és a beeső illetve diffraktált nyaláb ($\alpha > \beta$)

A spektrográf áteresztésének a jelentése az, hogy milyen arányban van az egy adott hullámhosszon a spektrális képbe integrált fluxus a beeső nyaláb fluxusával ugyanazon a hullámhosszon.

Esetünkben az optika minden tervezett kondíciójában $\alpha > \beta$ (16.2 ábra), és a beeső valamint a diffraktált nyaláb is a diffrakció síkjában vannak.

Az abszolút hatásfokot megkapjuk a következő egyenletről

$$E_a(\alpha, \beta) = R \cdot \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\beta)} \cdot \frac{\sin^2 \left[\frac{1}{2} \cdot k \cdot d \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(\alpha - \Theta) + \sin(\beta - \Theta)) \right]}{\left[\frac{1}{2} \cdot k \cdot d \cdot \cos(\alpha) \cdot (\sin(\alpha - \Theta) + \sin(\beta - \Theta)) \right]}$$

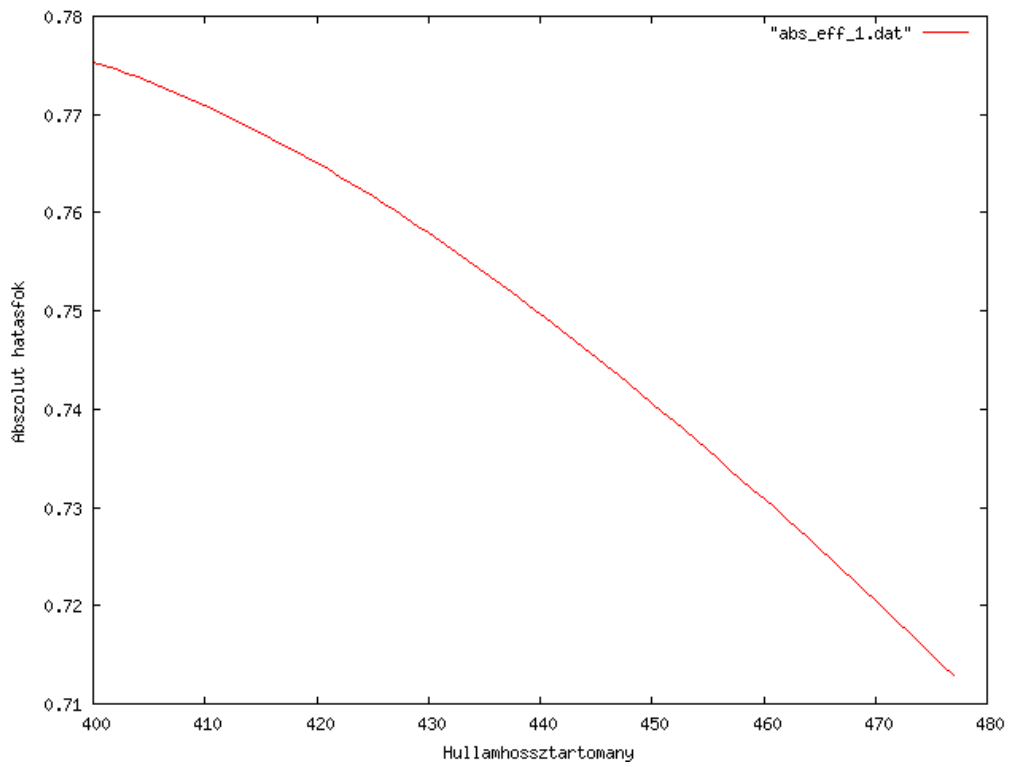
ahol R a rácsfelület reflexiója, k a körhullámszám, d a rácsállandó, Θ pedig a blaze-elés szöge. Ha λ -t és β -t elimináljuk a fenti egyenletről, valamint leosztunk a rács reflexiójával, akkor megkapjuk a relatív hatásfokot, mint α , β , és m függvényét

$$E_r(\alpha, \beta, m) = \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\beta)} \cdot \frac{\frac{\sin^2 \left[m \cdot \pi \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin \left(\frac{1}{2} (\alpha + \beta) - \Theta \right) \right]}{\sin \left(\frac{1}{2} (\alpha + \beta) \right)}}{\left[\frac{m \cdot \pi \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin \left(\frac{1}{2} (\alpha + \beta) - \Theta \right) \right]^2}{\sin \left(\frac{1}{2} (\alpha + \beta) \right)}}$$

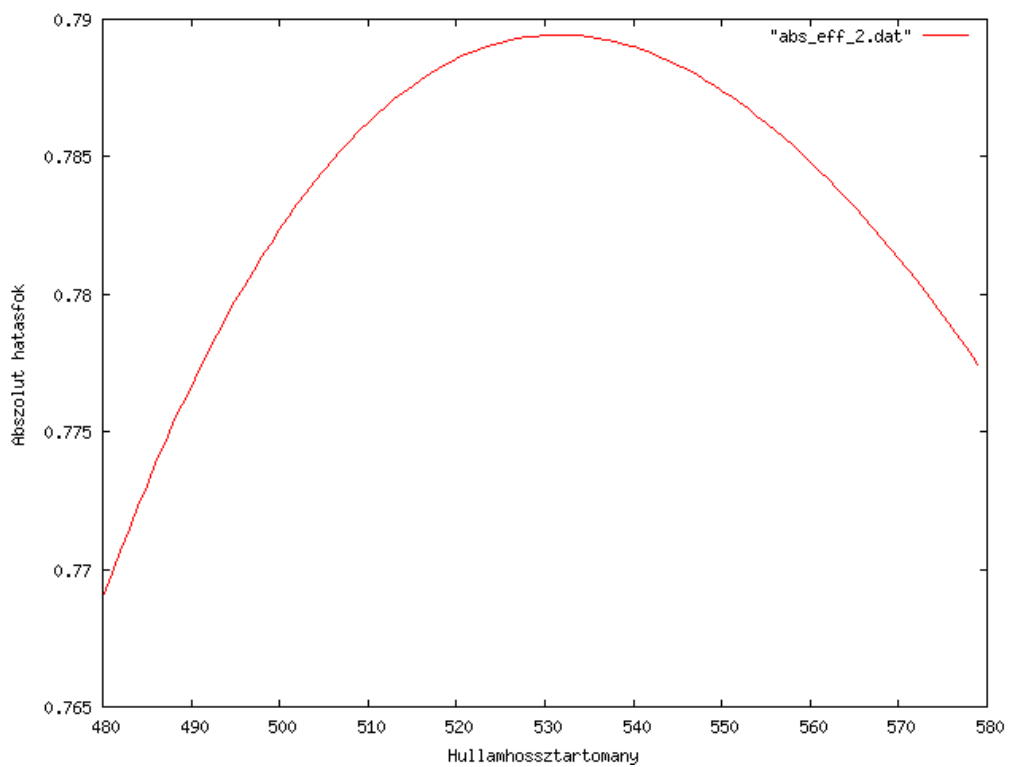
Az abszolút és relatív hatásfok ábrázolásához írtam egy egyszerű pascal kódot, ami mind a négy használni kívánt tartományban nanométerenként kiszámolta mindkét értéket. Az alábbi ábrákon ezeket mutatom be, a 16.1 táblázatban pedig az ábrákhoz tartozó beállítási paramétereket foglalom össze.

	16.3 ábra	16.4 ábra	16.5 ábra	16.6 ábra
α [°]	24	30,4	28,685	37,5
Blaze szög Θ [°]	13,9	14,3	14,3	14,3
Hullámhossz tartomány [nm]	400-480	480-580	570-640	630-710

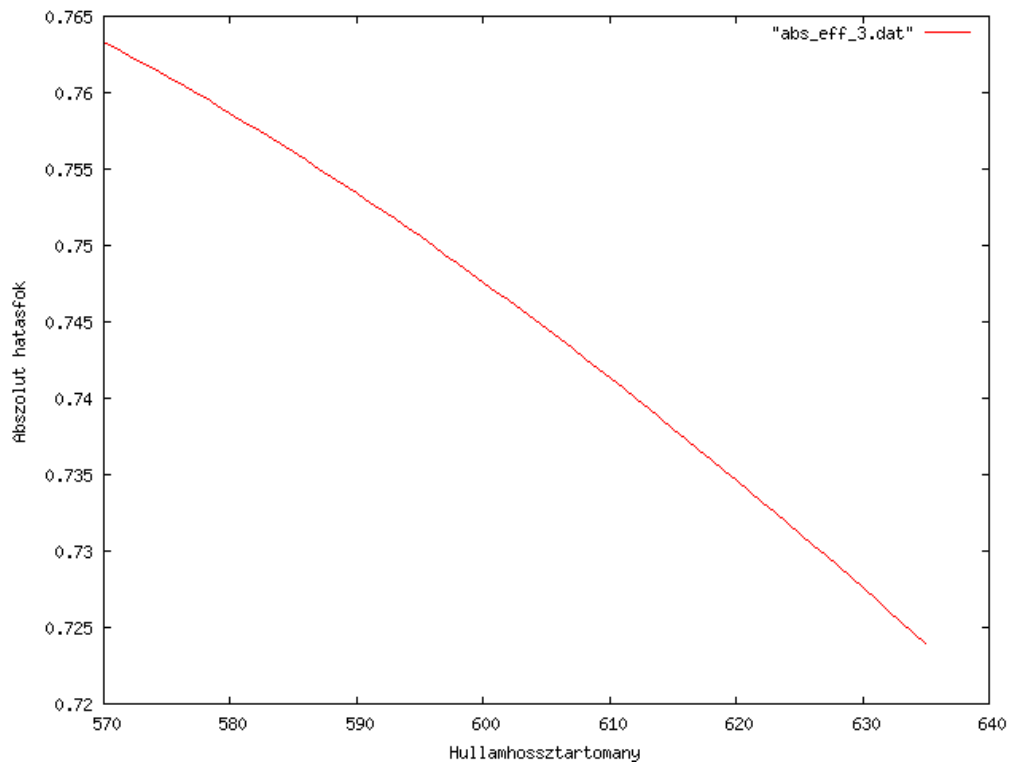
16.1 táblázat. A hullámhossztartományokhoz tartozó beesési szögek



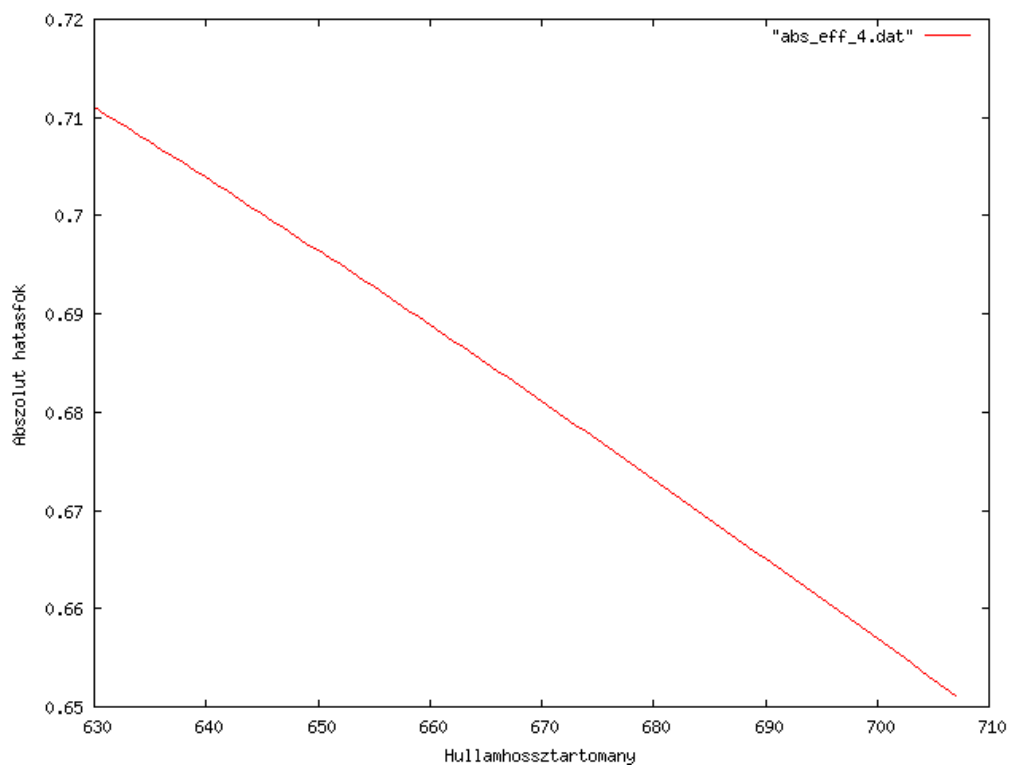
16.3 ábra. Az 1. hullámhossztartomány abszolút hatásfoka



16.4 ábra. A 2. hullámhossztartomány abszolút hatásfoka



16.5 ábra. A 3. hullámhossztartomány abszolút hatásfoka



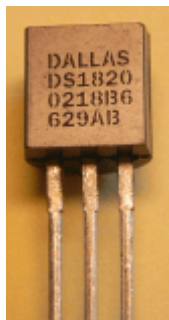
16.6 ábra. A 4. hullámhossztartomány abszolút hatásfoka

Az ábrákon jól látszik, hogy a rácsok blaze-elési hullámhosszának környezetében az érzékenység a maximumon van, míg távolodva ettől a hullámhossztól az érzékenység meredeken csökken. A hatásfokra, mint az a fenti egyenletekből is látszik, nagy hatással van a beeső és a diffraktált szögek koszinuszainak aránya, valamint a rácsfelület reflexiós tényezője. A rácsok reflexiós tényezőjét 0,9-ra állítottam. A 16.6-os ábrán látszik, hogy a 600-750 nm tartományban a hatásfok elég kicsi, mindössze 0,65-0,55 közötti. Ez a 16.1 táblázatban feltüntetett nagy α szög miatt van, amivel természetesen változott a diffrakció szöge is. Viszont a műszer eredetileg spektrálklasszifikációs célokra készül, és a számunkra fontos vonalakhoz elég vizsgálni az 560-680 nm-es tartományt. Ehhez az α szöget kisebbre lehet állítani: Ennek eredményeképpen a hatásfok az adott tartományon megnő átlagosan mintegy 10%-al.

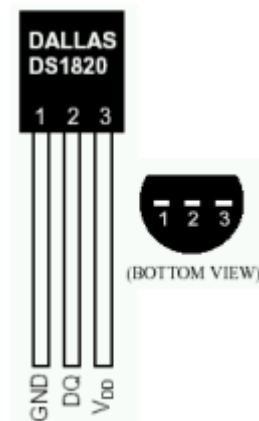
Elektronika

Digitális hőmérő

Éjszakai használat során a külső környezet hőmérséklete akár 20 °C–ot is változhat. Ez, ha figyelembe vesszük a 600 mm–es kollimátor fókuszát és az alumínium hőtágulási együtthatóját, akár 0,21 mm-es változást, erős defókuszálódást is eredményezhet. Ezt elkerülendő stabilizálni kell a műszer elemeinek hőmérsékletét. Ehhez szükség van egy hőmérőre, egy fűtőrendszerre, és egy kontrolláló szoftverre. Hőmérőnek a DALLAS DS1820 félvezető szenzorát (17.1 a és b ábra) választottam ki. Ennek működési tartománya -55°C – 125°C között van, ami tökéletesen megfelelő, mert a mérendő hőmérsékleti tartomány beleesik.



17.1 a ábra.



17.1 b ábra.

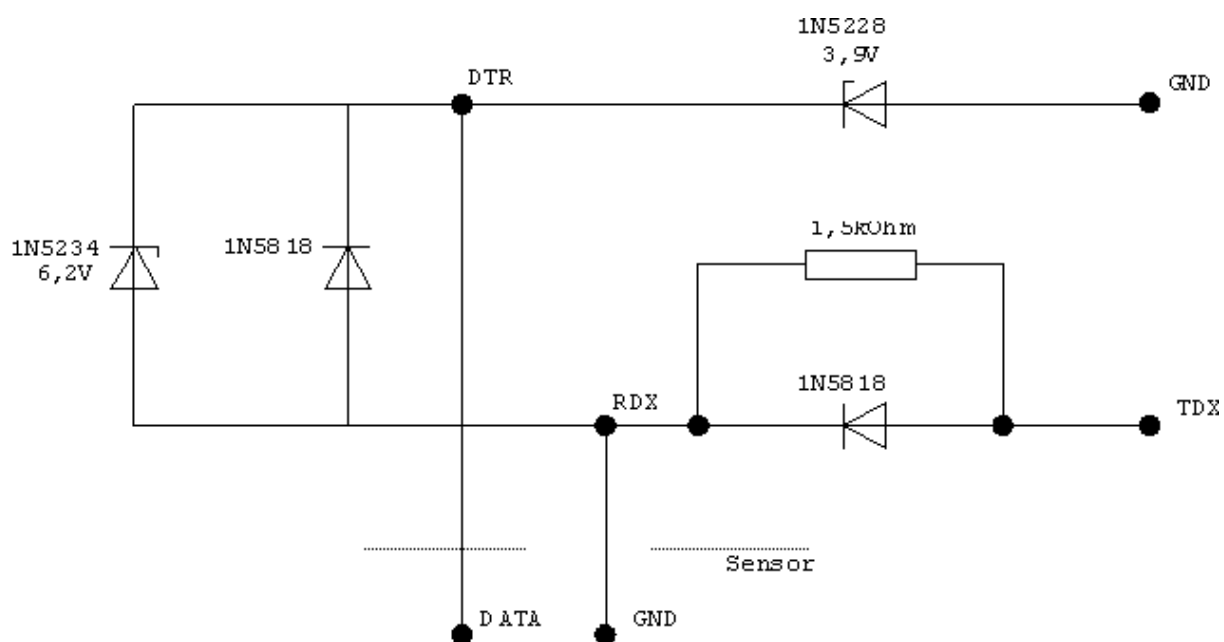
A digitális hőmérő szenzora

A DS1820 kilenc bittel méri a hőmérsékletet, ami lehetővé teszi, hogy a -10°C és +85°C közötti tartományon $\pm 0,5^\circ\text{C}$ fokos pontossággal mérjen, ami megfelel a kívánalmaknak. Minden DS1820-nak van egy egyedi 64 bites azonosító kódja, valamint a DS1820 mindössze 1 adatvonalon kommunikál a processzorral, ezért 1 processzorral, 1 adatvonalon megoldható a kommunikáció akár 100 db DS1820-al. További lehetőség, hogy az energiaellátást is az adatvonalról kapja, kizárva ezzel egy külső energiaforrás szükségességét. Hogy kommunikálni tudjunk a szenzorral, további elemekre van szükségünk, ezeket foglalja össze a 17.1 táblázat.

Darabszám	Megnevezés	Típus	Másik típus
1	Ellenállás	1.5 k Ohm	---
2	Schottky dióda	1N5818	BAT 43
1	Zener dióda	1N5228	ZPY 3.9V
1	Zener dióda	1N5234	ZPY 6.2V
1	Szenzor	DS1820	---
1	Foglalat	RS232C/9	---
1	Csatlakozó	SUB-D/9	---
1	Alaplap	NYÁK fólia	---

17.1 táblázat. A hőmérő elektronikai alkatrészei

A 17.2 ábrán egy sematikus kapcsolási rajzot láthatunk, az előbb felsorolt áramköri elemekkel.



17.2 ábra. A hőmérő kapcsolási rajza

A vezérléshez letölthető egy LINUX-os szoftver, ami a hőmérsékleti adatot beírja egy file-ba. Ezek után a spektrográfot vezérlő programmal ki lehet olvasni az aktuális hőmérsékleti értéket, és annak megfelelően korrigálni azt.

A spektrográf fűtése

A fűtés több módon oldható meg. Használhatunk fűtőszálat, fűtőtranzisztort vagy fűtőfóliát. A fűtőszál alkalmazása nagy fűtési teljesítményt tesz lehetővé, de a nagy teljesítményhez magas hőmérsékletre kell fűteni a viszonylag kis felületű szálat. Magas hőmérsékleten viszont közeli infrában vagy akár vörösben is sugárzóvá válik. Ez gyakorlatilag egy fényforrást jelentene a műszer belsejében, ami egyértelműen megghiúsítaná a felvételek elkészítését. Fűtőtranzisztor esetében, ha a teljesítmény kicsi, akkor nagyon lassan fűti fel a szerkezetet. Ha viszont a teljesítmény nagy, akkor a vázszerkezethez erősített tranzisztorok a vázszerkezetben nagy hőmérséklet különbségeket okoznának, ami a vázszerkezet deformációjához, a műszeren belüli seeing (légköri nyugodtság) leromlásához vezetne. Ezért a fűtőfólia alkalmazása mellett döntöttem. Ez egy viszonylag nagy felületű, és viszonylag alacsony hőmérsékleten működő eszköz, megfelelő fűtési teljesítménnyel. Így mindössze annyit kell tenni, hogy amikor a hőmérséklet az adott érték alá csökken egyetlen vezérlőbit felhasználásával be kell kapcsolni a fűtőáramot. Fűtőfóliákat több cég is kínál, én a CONRAD elektronikai cégtől választottam ki a fóliákat. Az általam használni kívánt fólia típuszáma 532878-50. Ez 110mm x 77mm-es területű, 12V-os, 35W teljesítményű eszköz, amit a 18.1 ábra mutat.



18.1 ábra. A fűtőfólia

A spektrográf tömege előzetes számítások szerint $m=35$ kg lesz, ebbe nincs benne a CCD kamera tömege, mert azt egy külön áramkör fűti, illetve tartja állandó hőmérsékleten.

Tegyük fel, hogy a külső hőmérséklet fölé $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$ -al akarjuk fűteni a műszert, és hat fóliát használunk. Az alumínium fajhője $900 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$, ehhez

$$Q = C \cdot m \cdot \Delta T = 472500 \text{ J}$$

hőmennyiséget kell közölnünk a rendszerrel. Ha ezt hat fóliával, azaz 210W-os teljesítménnyel tesszük, akkor az 2250 másodpercig tart, ami 37,5 perc. Ha figyelembe vesszük, hogy a hőszigetelés ellenére lesz kb. 5%-os hőveszteség, akkor is maximum 40 perc alatt felfűthető lesz a műszer.

Mivel egy, a kupolatérben elhelyezett, a környezeténél melegebb műszer erősen ronthatja a távcső képalkotását, így gondoskodni kell az egész műszer hőszigeteléséről. Ez a kupola-seeing romlásának megelőzése mellett segít abban is, hogy a műszer hőmérséklete állandóan tartható legyen, relatíve kevés beavatkozással, kis fűtőtelsítménnyel.

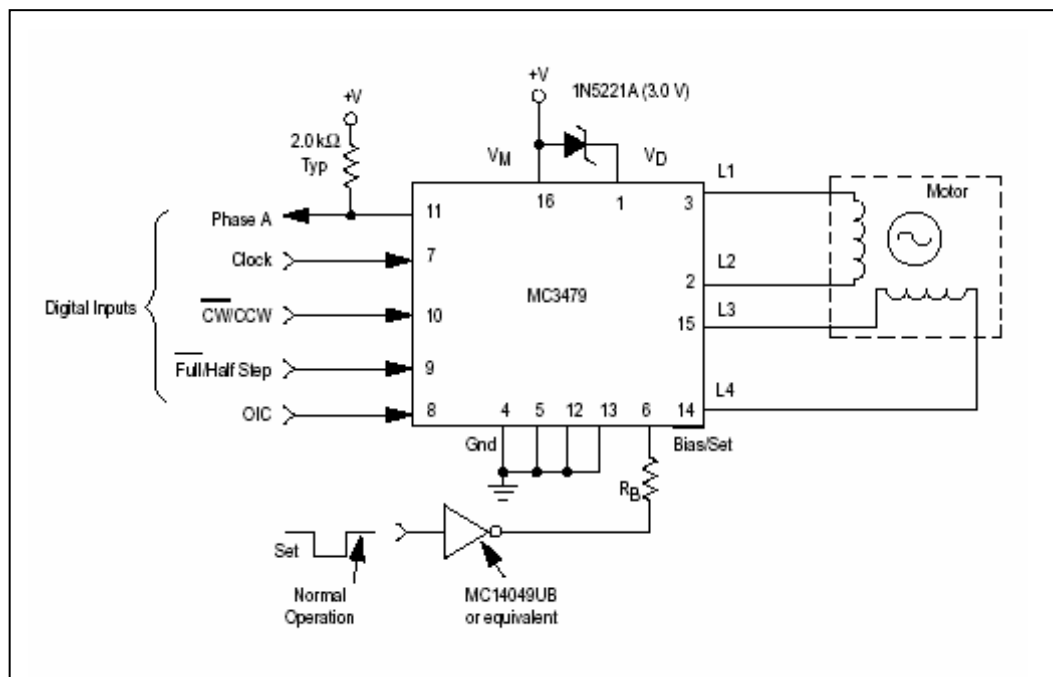
Léptetőmotor vezérlés

A spektrográfban a használat során szükséges több optikai elem, illetve alkatrész pozíciójának megváltoztatása. Ezt célszerű léptetőmotorokkal megoldani. A megvalósítandó mozgások:

- A seeing-hez igazodó rés kiválasztása
- A megfigyelni kívánt hullámhossztartományhoz szükséges rács kiválasztása
- A hullámhossztartomány beállítása a rács forgatásával
- Az objektívlencse fókuszálása
- A spektrál és wolfrám lámpa mozgatása

Ezen feladatok megoldására kétfázisú, 400 lépéses motorokat választottam, mivel ezek egyrészt viszonylag olcsón beszerezhetőek, másrészt a kellő felbontással mozgatják az alkatrészeket. A léptetéshez szükséges jel előállítását a Motorola MC3479 integrált áramkör végzi majd. Az áramkör néhány jellemzője:

- TTL / CMOS kompatibilis bemeneti vezérlőjelek
- Választható egész vagy fél lépéses üzemmód
- A forgás iránya változtatható
- A tekercsekről levehető az áram
- 350 mA/tekercs meghajtási kapacitás



19.1 ábra. A léptetőmotor vezérlő kapcsolási rajza

A léptetőmotorok működéséhez felhasználni kívánt kimeneti vezérlőbitek száma:

- A motorok áram alá helyezése történhet egyszerre, egy bit felhasználásával
- A forgásirány változtatására mind a hat motornál szükség van, de mivel egyszerre csak egy elem fog mozogni a műszerben, ezért ehhez is elegendő egy bit
- Az egész/fél lépés motoronként rögzíthető az áramkörben
- Az órajelet minden motornak külön kell biztosítani, tehát ez újabb hat bit

A bemeneti vezérlőbitek száma azonos a motorok számával, mivel mindegyik mozgáshoz rendelni kell egy alappozíciót, így összesen hat bemeneti bitre van szükség.

Összefoglalás

Dolgozatomban először a spektrográf értékmérőit határoztam meg úgy, hogy teljesíteni tudja a kívánt felbontást. Utána a fénymenetek és az optikai elemek elrendezését, a kameralencse illetve a vezető fénymenet lencséinek felépítését terveztem meg a ZEMAX optikai tervezőprogrammal, amihez a bostoni Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics intézetben jutottam hozzá. Az egyes optikai elemek mozgatásához, megtartásához szükséges mechanikai alkatrészek tervezése következett. Ezután modellszámításokat végeztem a távcső-műszer együttes várható teljesítőképességéről, és a beállítani kívánt rács kondíciók várható hatásfokáról. Dolgozatom végén a műszer működtetéséhez szükséges elektronikával (digitális hőmérő, fűtés, léptetőmotor vezérlés) foglalkoztam. Sikerült tehát megtervezni egy körülbelül $R=2300$ felbontású Cassegrain spektrográfot a piszkéstetői obszervatórium 1m-es Ritchey-Crétien rendszerű távcsövére, amivel a számítások szerint lehetővé válna maximum 15^m látszó fényességű objektumokról spektrumot készíteni.

Jelenleg a műszer megépítéséhez az anyagi feltételek részben megvannak, és további pályázatokból tervezzük a befejezéshez szükséges pénz előteremtését. Az alkatrészek megépítése és a tesztelések előreláthatólag a Konkoly intézetben dr. Rácz Miklós segítségével történnek majd 2005 nyarán, a megvalósítást, pedig 2005 év végére tervezzük.

Ez a műszer nagyban segítené azon magyarországi csillagászok munkáját, akik a csillagászat olyan területével foglalkoznak, amelyhez kis felbontású spektrumok is elegendőek, és az objektumok sem túl halványak, mert jelenleg hazánkban nincs használatban ilyen műszer.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Fűrész Gábornak, és dr. Andrew Szentgyorgyinek szakmai és erkölcsi támogatásukért, dr. Kun Máriának és dr. Szatmáry Károlynak, hogy anyagilag támogatták munkámat. Köszönöm Mészáros Szabolcs PhD hallgatónak a dolgozat megírásánál nyújtott segítségét.

Külön köszönet illeti az SZTE TTK Kísérleti Fizikai Tanszéket, a Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics intézetet, és az MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézetet a munkafeltételek biztosításáért.

Irodalomjegyzék

- Bottema M. 1980, Echelle efficiency and blaze characteristics, SPIE 240, 171
- Fűrész G. 2002, Cassegrain spektrográf tervezése és építése a Szegedi csillagvizsgáló 40 cm-es távcsövére, diplomamunka, Szegedi Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszék
- Kannappan S. Fabricant J. Daniel G, & Hughes, Charles B. 2002, Building a CCD Spectrograph for Educational or Amateur Astronomy, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 114, 577
- Laikin M. 1995, Lens Design 3rd edition
- Palmer C. 1997, Diffraction Grating Handbook (New York: Richardson Grating Laboratory)
- Schroeder D. J. 1987, Astronomical Optics (San Diego: Academic Press Inc.)