

Hidrogén-alfa naptávcső továbbfejlesztése fókusznyújtással, a Nap nagyfelbontású fotózása

Összefoglalás: A Napészlelés, a Nap megfigyelése különleges élmény az amatőr csillagászok számára, mivel egy csillagot kozmikus léptékben szinte közvetlen közről lehet tanulmányozni. Jelenleg a kereskedelemben elérhető naptávcsövek nagy része a hidrogén-alfa vonalában mutatja a Nap képét rendkívül keskeny sávzélességben. A hidrogén-alfa naptávcső legfontosabb eleme az igen precízen megépített hangolható Fabry–Perot-interferométer. Az interferométer keskeny sávzélessége (0,7–0,5 Angström) biztosítja a rendkívül részletgazdag már szinte három dimenziósnek tűnő képet. Mivel az interferométer-szűrő ára az átmérővel növekszik, a távcső felbontása viszont a nagyobb átmérő esetén jobb, így elterjedt az a megoldás, hogy egy kisebb átmérőjű, és ezért olcsóbb szűrőt egy nagyobb lencseátmérőjű de egyszerű, nem drága távcsőbe építenek be. A kapott kép felbontásának növelésére a másik lehetőség, a fókusznyújtás. Mivel a primer fókuszban keletkező kép nagysága a fókusz távolsággal arányos, ezért érdemes egy negatív lencsetagot megfelelő helyre beépíteni a távcsőbe. Ezzel a megoldással fotózás esetén a nagyobb felbontású kép nagyobb méretben jelenik meg az asztrokamera érzékelőjén, így az elkészült fotó a fókusznyújtás arányában részletgazdagabb lesz.

Kulcsszavak: Hidrogén-alfa naptávcső, fókuszintenzitás, nagyobb felbontású kép.

Abstract: The Sun observing is a special experience for amateur astronomers, because a real star can be studied on a cosmic scale almost up close.

Most of the currently commercially available solar telescopes show the image of the Sun in the hydrogen alpha line in an extremely narrow bandwidth. The most important element of the hydrogen alpha solar telescope is the very precisely constructed tunable Fabry-Perot interferometer. The narrow bandwidth of the interferometer (0.7-0.5 Angstrom) provides an extremely detailed image that almost seems three-dimensional.

* *Dunaújvárosi Egyetem, Műszaki Intézet*

Email: hmik@uniduna.hu

ORCID: 0009-0006-1166-1957

Since the price of the interferometer filter increases with the diameter, the resolution of the telescope is higher with a larger diameter, so the solution is widespread to install a smaller diameter, and therefore cheaper filter, in a simple, inexpensive telescope with a larger lens diameter. Another option to increase the resolution, is focus extension. Since the size of the image formed at the primary focus is proportional to the focal length, it is worth installing a negative lens element in the telescope at an appropriate location. With this solution, when taking photos, a larger and higher-resolution image appears on the astrocamera sensor, so the resulting photo will be more detailed in proportion to the focus extension.

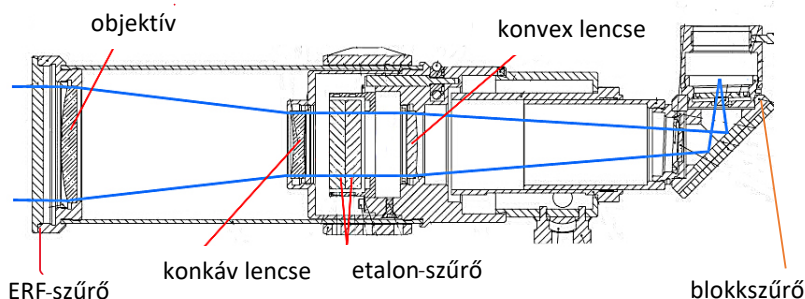
Keywords: Hydrogen alpha solar telescope, focus extension, high resolution photography.

A Hidrogén-alfa naptávcső felépítése működése

A TÁVCSŐ FÉLÉPÍTÉSE, AZ ETALON-SZŰRŐ

Ahhoz hogy a Nap felszínének finomabb struktúráit, a filamenteket, a flereket, vagy a napfoltok szerkezetét részleteiben láthassuk, egy a hagyományos napszűrőknél jóval kifinomultabb technológiára van szükség. Ez a hidrogén-alfa naptávcső (1. ábra).

1. ábra. A hidrogén- alfa naptávcső felépítése

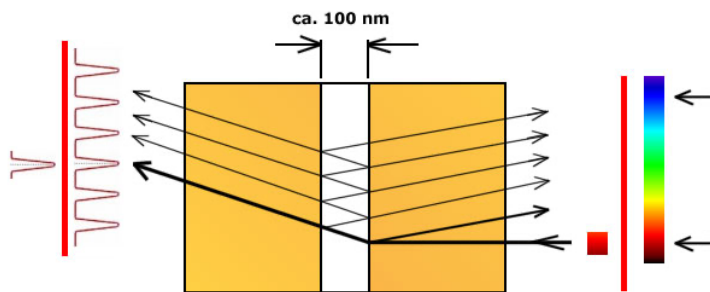


A hidrogén-alfa naptávcsőbe több szűrőt kell elhelyezni egyrészt a biztonságos megfigyelés, és a naptávcső károsodásának megelőzése, másrészt a sávzélesség csökkentése érdekében. A nagy hőterhelés csökkentésére az objektív elé vagy közvetlenül mögé be kell építeni egy energiaelnyelő szűrőt (ERF-szűrő). Az szűrő infravörös tükröződésgátló bevonata blokkolja az infravörös sugárzást, megakadályozza hogy a hő behatoljon a távcsőbe.

A szűrőn áthaladó fényt a távcső objektívje a fókusztávolságnak megfelelően egy szűkülő fénynyalábbá fókuszálja.

A fény ezután az etalon (hidrogén-alfa) -szűrőbe kerül. Az etalon-szűrő egy Fábry-Perot-interferométer, (2. ábra) ami pontosan a Balmer-sorozat hidrogén-alfa vonalára a 656.28 nm hullámhosszra van hangolva. A Nap felszínén ezen a hullámhosszon láthatók a legnagyobb részletességgel és kontraszttal az alakzatok.

2. ábra. Az etalon-szűrő felépítése [1]



Ahhoz hogy az etalon-szűrő jól működjön, a szűrőbe belépő fénynyalábnak pontosan párhuzamosnak kell lennie. Ezért a szűrő előtt a távcsőben egy konkáv lencse párhuzamosítja, majd a szűrő után egy konvex lencse fókuszálja újból a nyalábot. [2] Az etalon-szűrőből kijövő fény még a hidrogén-alfa vonala mellett tartalmazza ennek felharmonikusait is. Emiatt szükség van még egy blokkszűrőre is. A blokkszűrő általában egy olyan többszörös bevonattal ellátott szűrő, amely leválasztja az összes felharmonikust, csak a H-alfa vonalának megfelelő 656.28 nm csúcsot engedi át (3. ábra).

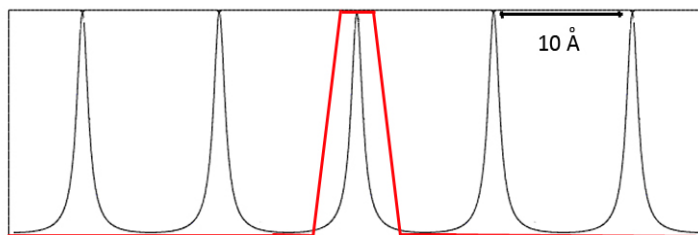
[1] <https://www.bader-planetarium.com/en/blog/first-class-h-alpha-solar-filter-by-solar-spectrum/>

[2] Pápics Péter István-Iskum József (2006): *A Napészlelés kézikönyve*. Budapest: Magyar Csillagászati Egyesület.

[3]: <https://www.ianmorison.com/h-alpha-solar-telescopes-an-in-depth-discussion-and-survey/>

[4] Skomorovsky, V. I.–Kushtal, G. I.–Lopteva, L. S.–Proshin, V. A. (2015): Commercial narrowband Fabry–Perot solar filters, methods and instruments for examination. *Solnechno-zemnaya fizika*, 1., (3.), pp. 72–90.

3. ábra. Az etalon-szűrőn és a blokkuszűrőn (piros vonal) áthaladó fény spektruma [3]

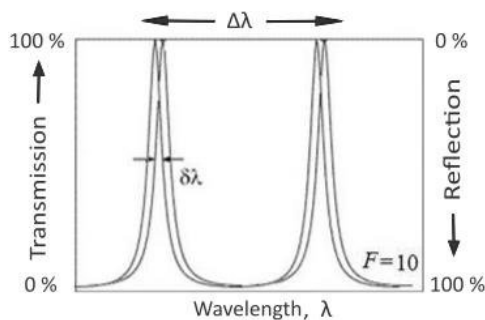


Az okulárba tehát a Nap teljes spektrumából már csak a szigorúan monokromatikus h-alfa vonal fénye jut, és mivel minden más zavaró hullámhosszt kiszűrte a rendszer. Ennek köszönhetően a távcső rendkívül részletgazdag és kontrasztos képet ad a Nap felszínén, a kromoszférában lezajló jelenségekről.

KÉT ETALON-SZŰRŐ HASZNÁLATA (DOUBLE STACKING)

A jó minőségű etalon-szűrő h-alfa vonalának félérték szélessége 0.7–0.8 angström. Ezt tovább lehet csökkenteni úgy, hogy két etalon-szűrőt helyezünk el egymás mögött (double stacking) [4]. Ilyenkor a két szűrő áteresztési tartományának az átfedése lesz az eredmény. A szűrőket megfelelően hangolva, a félérték-szélesség lecsökkenthető 0.5 angström alá is (4. ábra). Ebben az esetben a kép minden eddiginél gazdagabb a részleteket mutat meg a Nap felszínén zajló jelenségekről.

4. ábra. A két etalon-szűrő használatának eredménye (double stacking) [4]



[4] Skomorovsky, V. I.–Kushtal, G. I.–Lopteva, L. S.–Proshin, V. A. (2015): Commercial narrowband Fabry–Pérot solar filters, methods and instruments for examination. *Sol-nechno-zemnaya fizika*, 1., (3.), pp. 72–90.

A két szűrő átfedésének megfelelő rendkívül keskeny hullámhossz-tartomány erősen lecsökkenti a fényerőt, amit nagyobb átmérőjű és fénygyűjtő képességű objektívvel lehet kompenzálni.

A naptávcső átalakítása

AZ OBJEKTÍV ÁTMÉRŐJÉNEK NÖVELÉSE

A csillagászati tácsövek egyik fontos paramétere az objektív átmérője, mivel a távcső felbontása ezzel arányos.

A szögfelbontás egy fizikai határ ami megmutatja, hogy milyen közeli pontszerű fényforrásokat képes egy optikai rendszer még két különálló entitásként érzékelni. A távcső lencséje vagy tükre, méretétől függően, a beérkező fényt egy úgynevezett Airy-koronggá fókuszálja, nem pedig egy tökéletes ponttá. Ez a diffrakció (fényelhajlás) jelenségének következménye, és minden optikai rendszerre jellemző.

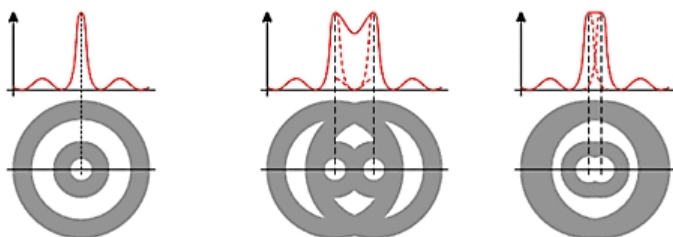
Két elhajlási korongot még elkülönítve veszünk észre, ha egyiknek a maximuma a másik első intenzitás minimumára esik (5. ábra).

A felbontást az Abbe-féle képlet adja meg:

$$\varphi \geq 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

[5] Kulin György–
Róka Gedeon (1980):
A távcső világa. Buda-
pest: Gondolat.

5. ábra. A szögfelbontás magyarázata



Forrás: <https://www.vilaglex.hu>

A Fabry–Perot-interferométert tehát érdemes egy nagyobb átmérőjű objektívvel ellátott távcsőbe beépíteni, ezzel jelentősen megnövelve a távcső szögfelbontását, a lehetséges nagyítást

FÓKUSZNYÚJTÁS

A másik fontos fizikai paraméter a távcső objektívjének fókusz távolsága. A távcső objektívje által előállított valódi képet az okulárral, mint nagyítóval szemlélve alakul ki a látott kép az agyunkban. Az objektív fókusz távolságával arányos a keletkező kép nagysága, ezért érdemes nagyobb fókusz távolságú objektívet használni.

A távcső primer fókuszában (az objektív fókusz síkjában) a Nap képének nagysága [5]:

$$d = 0,9 \cdot \frac{f}{100} \text{ (mm)} \quad (2)$$

Fókusznyújtással megnövelve a primer fókuszban keletkező kép nagyságát, a kamera érzékelőjére eső kép nagyobb lesz, ezzel növeljük az elkészült fotó felbontását. A fókusznyújtást a legegyszerűbben egy konkáv lencsével lehet elvégezni, amit az objektív és az okulár között helyezünk el [5]. A fókusznyújtó lencse fókusz távolságát, átmérőjét és elhelyezését pontosan ki kell számítani és megtervezni, hogy a primer fókuszban keletkező kép optimális legyen.

A naptávcső átalakításának tervezése

Jelen esetben az átalakítás tárgya egy Lunt LS 80 típusú naptávcső, aminek az objektívje 80 mm átmérőjű, és 560 mm-es fókusz távolságú. A távcső két „pressure tuning” rendszerű szűrővel rendelkezik, amivel a távcső sávszélessége 0,5 angström alá csökken. Ez különösen kontrasztos és részletgazdag képet biztosít [6].

Az átépítés során megoldandó problémák:

- Nagy átmérőjű jó minőségű akromát objektív lencse beszerzése.
- Megfelelő konkáv lencse beszerzése a fókusznyújtáshoz.
- A fókusznyújtó lencse fókusz távolságának és helyének pontos megválasztása figyelembe véve:
 - a kívánt fókusznyújtás elérését,
 - a távcső hosszát,
 - a hidrogén-alfa szűrők elhelyezését.

Ezekhez pontos számítások és gondos tervezés volt szükséges.

Két lencséből álló rendszer esetén az eredő fókusz egy f_2 fókusz távolságú korrekciós lencse alkalmazásával [5]:

$$f_e = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2 - d} \quad (3)$$

Ahol f_1 az objektív fókusz távolsága, d az objektív és a fókusznyújtó lencse távolsága. Ebből a két lencse távolsága n -szeres fókusznyújtás esetén:

$$d = f_1 + f_2 - \frac{f_2}{n} \quad (4)$$

Rendelkezésünkre állt:

- Lunt LS80 DS gyári távcső,
- $f_1=1391$ mm $d=133$ mm Fraunhofer akromát + tubus,
- 150 mm szabad nyílású energiaelnyelő szűrő foglalatban,
- f_2 : -100 mm, -150 mm, -170 mm -300 mm, -500 mm konkáv lencsék.

Az adott objektív fókusz távolsága és az egyéb geometriai méretek szűkítették a lehetőségeket így az $f_2=-300$ mm-es fókusznyújtó lencse mellett döntöttünk.

[5] Kulin György–
Róka Gedeon (1980):
A távcső világa. Buda-
pest: Gondolat.

[6]: <https://luntsolar-systems.com/>

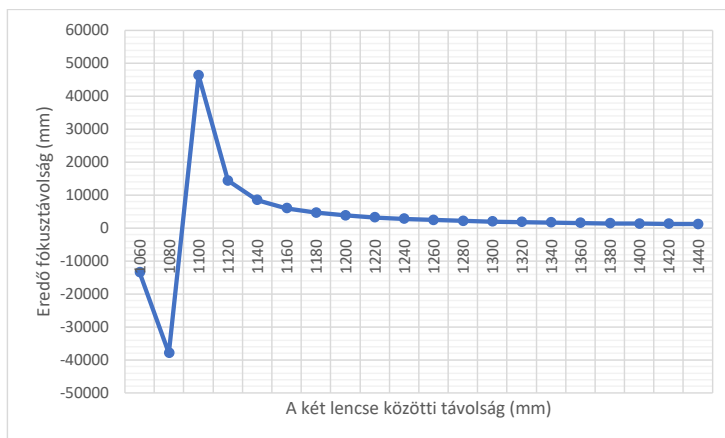
A lencse helyének meghatározásában az alábbi szempontokat kellett figyelembe vennünk:

- a lencse és az új eredő fókuszpont közé el kell helyeznünk a 35 cm hosszú DS-szűrőrendszert,
- a fókusznyújtás elegendően nagy legyen,
- a távcső végleges hossza nem lehet túl nagy.

A fókusznyújtó tag optimális helyének megválasztásához a fenti szempontok alapján készültek az alábbi grafikonok.

A 6. ábrán az eredő fókusz távolságot látjuk a lencsék közötti távolság függvényében. Itt megcélzottuk a 2800–3500 mm közötti eredő fókusz távolságot, ami 1210–1240 mm közötti lencsetávolságra szűkítette a lehetséges értékeket.

6. ábra. Eredő fókusz távolság a két lencse közötti távolság függvényében



7. ábra. A fókusznyújtás aránya a két lencse közötti távolság függvényében

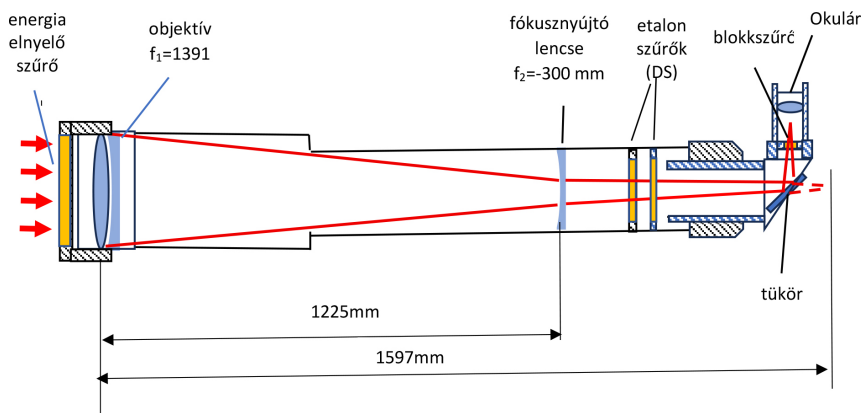


Itt 2–3 közötti értéket terveztünk beállítani.
Az optimális értékek mindent figyelembe véve:

Az objektív:	$f_1=1391$ mm $d=133$ mm
A fókusznyújtó lencse:	$f_2= -300$ mm
A két lencse távolsága:	$d= 1225$ mm
Az eredő fókusz távolság:	$f_e=3114$ mm
A fókusznyújtás aránya:	$n=2,239$

Az átépített távcső szerkezete a 8. ábrán látható.

8. ábra. Az átalakított naptávcső elrendezése



Az átalakított naptávcső a 9. ábrán látható.

9. ábra. Az elkészült naptávcső



Eredmények

1. A távcső fókusz távolsága megnőtt: $f_e = 3114$ mm.

A Nap képe a primer fókuszban 28 mm (az eredeti távcsőben: $d = 5,04$ mm).

2. Javult a távcső szögfelbontása.

Az eredeti távcső szögfelbontása $\varphi = 10^{-5} \text{ rad}$ ($5,729 \cdot 10^{-4} \text{ fok}$).

Az átalakított távcső szögfelbontása: $\varphi = 6 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$ ($3,44 \cdot 10^{-4} \text{ fok}$).

A felbontás tehát 67%-kal nőtt a nagyobb objektív átmérőnek köszönhetően.

A Napfotózás alkalmával a lehető legjobb kép elérése érdekében az asztrokamera felbontását érdemes a távcső felbontásával összehangolni.

Az általunk használt asztrokamera érzékelője 13,2 mm-es oldala 5496 képpontból áll a felbontása 20 Mp.

Az CMOS érzékelő mérete: $13,2 \times 8,8 \text{ mm} = 0,00011616 \text{ m}^2$

A kamera érzékelőjén két képpont távolsága (pixel méret):

$$y = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 2,4 \mu\text{m}$$

Fontos paraméter, hogy hány képpontra bontja a kamera a Nap képét. A Nap képe az új távcső primer fókuszában: $d = 28$ mm.

Az asztrokamera érzékelőjének hosszabbik oldala $a = 13,2$ mm ez $n = 5496$ pixelből áll.

A teljes napkorong képét az átmérő irányában a kamera

$$N = \frac{d}{a} \cdot n = 11658 \quad (5)$$

képpontra bontja.

Ez a szám az eredeti távcső esetében:

$$N' = 2098$$

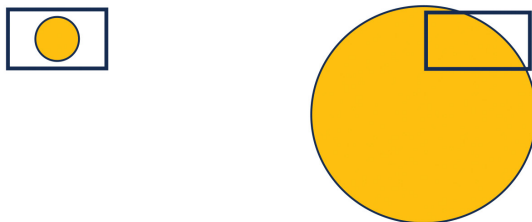
Az új és az eredeti felbontás aránya:

$$N/N' = 5,56 \quad (6)$$

A távcső felbontása ezzel a kamerával fotózás szempontjából tehát 5,56-szorosára nőtt.

Azonban amíg az eredeti távcső primer fókuszában a teljes napkorong ráfért az asztrokamera érzékelőjére, az átalakított távcső jóval nagyobb képének csak egy része kerül rá a CMOS-érzékelőre, így ezzel a kamerával csak a napkorong egy részéről lehet fényképet készíteni (10. ábra).

10. ábra. Az eredeti és az átalakított távcső Nap képének aránya az asztrokamera érzékelőjén

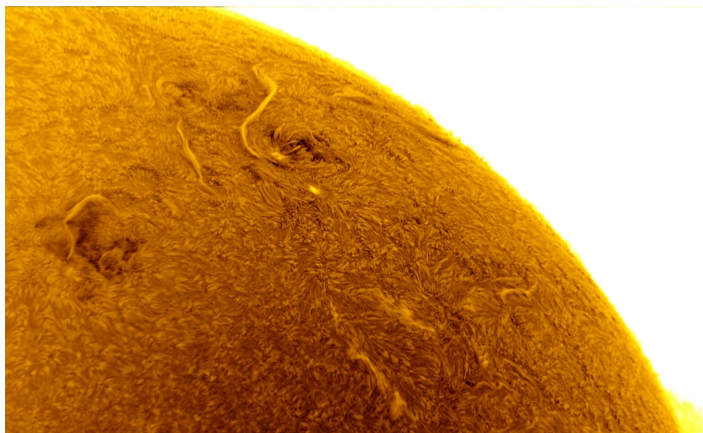


Ilyenkor a megoldás lehet egyrészt az, hogy vagy mozaik képet készítünk a Napról: a nagy felbontásban készült részleteket egymáshoz kell illeszteni, így a teljes napkorongot nagy láthatjuk nagy felbontásban. Másik megoldás az, hogy nagy felbontású fullframe (36x24 mm) asztrokamerát kell beszerezni, ami viszont a magas ára miatt nem könnyen érhető el az amatőr csillagászoknak.

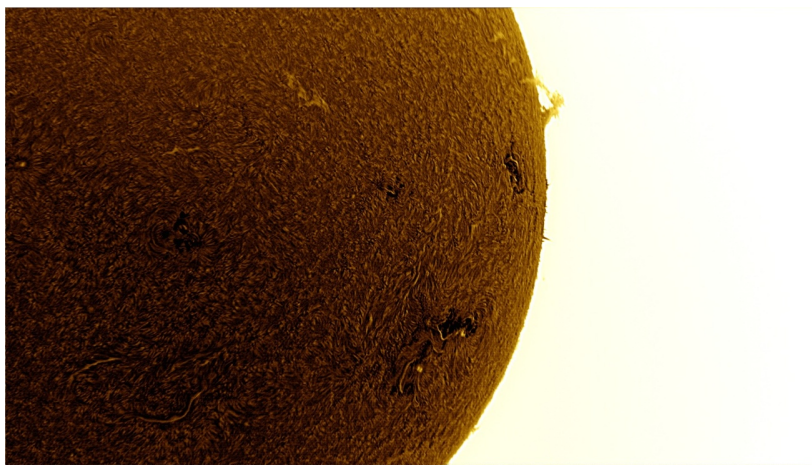
A Napot fényképezve speciális asztrokamerával jól látszik a protuberanciák szálas szerkezete, kivehetők a felszíni granulációk, és a filamentek, és a rövidebb idejű felfényesedések a flerek. Az alábbi fényképek az átalakított naptávcsővel és egy ZWO ASI 183 MM asztrokamerával készültek. A 11. és a 12. ábrán a Nap egy részletét látjuk.

A 11. ábrán két napfolt is azonosítható. A 12. ábrán a napkorong szélén egy a Földméreténél többször nagyobb protuberancia látható.

11. ábra. A Nap felszíni részlete az átalakított naptávcsővel fényképezve



12. ábra A Nap felszíne az átalakított naptávcsővel fényképezve



Konklúzió, összefoglalás

A hidrogén-alfa naptávcső átépítése több tanulsággal szolgált. Kiindultunk egy közepes teljesítményű, de jó minőségű hidrogén-alfa naptávcsőből és egy közepes minőségű olcsó 133 mm-átmérőjű akromatikus távcsőből, valamint egy -300 mm-es fókuszú konkáv lencséből. A cél nagyobb felbontás, és jóval nagyobb primer fókuszban megjelenő kép elérése volt.

Pontos számítások és tervezés után sikerült megépíteni az új naptávcsövet.

A távcső átépítése gondos tervezést és precíz megmunkálást igényelt, esetenként több új ötletre is szükség volt a megvalósításhoz.

A munka eredménye egy jobb felbontású és nagyobb fókuszú, ugyanakkor megfelelő fényerejű távcső lett. Az első bepillantáskor meglepően szép, részletgazdag kép tárult elénk a Napról.

Bár a megnövelt fókuszú távcsővel a kamera a napkorongnak csak egy részletét tudja rögzíteni, a kép felbontása több mint ötszörösére nőtt az eredetihez képest. A nagyobb kép az asztrokamera felbontását jobban kihasználva sokkal részletgazdagabb, lenyűgöző fotók készítését tette lehetővé.

Érdemes volt tehát belevágni a naptávcső átalakításába, mert mind a használhatóság, mind a képalkotás terén egy lényegesen jobb, szebb képű távcsövet sikerült építeni, a kereskedelemben kapható hasonló paraméterekkel rendelkező naptávcsövek árához képest jóval kisebb befektetéssel.

