

Szegedi Tudományegyetem
Természettudományi és Informatikai Kar

DIPLOMAMUNKA

A Nap koronájának polarimetriája

Készítette: Papp Sándor
Fizikus MSc szakos hallgató

Témavezető: Dr. Hegedüs Tibor

Szeged
2018

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Elméleti háttér	3
2.1. Napfogyatkozás	3
2.2. Polarizáció	4
2.3. Polarizált fény leírása, Stokes-formalizmus	5
3. Eszközök	7
3.1. Kamerák	7
3.1.1. CCD és CMOS érzékelők	7
3.2. Polárszűrők	8
4. Képek feldolgozása	9
4.1. Az IRAF programcsomag	9
4.2. Saját szkriptek	9
5. A napkorona elemzése képalkotó polarimetriával	10
5.1. A 2017-es napfogyatkozás	10
5.1.1. A polarizáció mértéke	11
5.1.2. A polarizáció szöge	12
5.2. A 2006-os napfogyatkozás	13
5.2.1. A Stokes-komponensek hullámhossz-függése	14
5.2.2. A normált Stokes-komponensek hullámhossz-függése	15
5.2.3. A polarizáció mértékének hullámhossz-függése	16
5.2.4. A polarizáció szögének hullámhossz-függése	17
6. További alkalmazások	18
6.1. A $p(\psi)$ diagram	18
6.2. Az $u(q)$ diagram	20
7. Összefoglalás	21
8. Függelék	22
9. Köszönetnyilvánítás	27
10. Nyilatkozat	28

1. Bevezetés

A csillagászok számára hosszú időn keresztül az egyetlen információforrás az elektromágneses sugárzás, a fény volt. Eleinte ennek is csak kis része, az emberi szem által is érzékelhető optikai tartomány volt elérhető. Ma már a teljes spektrumot le tudjuk fedni, sőt az elektromágneses hullámokon kívül gravitációs hullámokat is érzékelünk. A fény vizsgálatánál az intenzitás vagy a fluxus alapján kell valamit mondanunk a kérdéses objektumról, amit fotometriával vagy spektroszkópiával tehetünk meg. Ezekkel a módszerekkel többek között meghatározhatjuk csillagok és galaxisok korát, méretét, tömegét, fémességét is. További információkat is kaphatunk, ha a fény polarizációját is vizsgáljuk a képkötő polarimetria vagy a spektropolarimetria segítségével. A fotometriához hasonlóan, ma már a polarimetriai mérések is kiterjednek a teljes hullámhossz-tartományra.

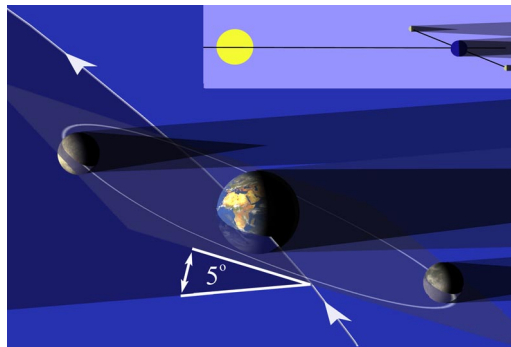
A polarimetria története az 1600-as években kezdődött, amikor a dán Bartholin és a holland Huygens felfedezték a kettős törést. A kristályból távozó két fényaláb tulajdonságainak tárgyalása majd 200 évig fejtörést okozott az akkori tudományos élet képviselőinek. Az első áttörés az 1800-as évek elején történt, amikor Malus felfedezte a fény visszaverődésen alapuló polarizálhatóságát. Később, 1812-ben Arago és Fresnel közös munkájának eredményeként megszületett az első polárszűrő, amivel Arago 1819-ben egy - ma már Tralles néven ismeretes - üstökös csóváján végzett polarimetriát. A későbbiekben Arago, Biot és Pasteur a polarimetria alapvető és gyakorlati felhasználási módjaival bővítették a kémia és biológia módszertanát. Az 1800-as évek végére Faraday, Kerr és Pockels meghatározó elektro- és magneto-optikai felfedezései tovább gazdagították a fizika és az optikai polarizáció világát. 1864-ben Maxwell elektromágneses elmélete lehetővé tette a polarizáció vizsgálatát és leírását a teljes spektrumon. 1896-ban, a Zeeman-effektus felfedezésével pedig újabb ajtó nyílt meg a Nap és a csillagok polarimetriai vizsgálata előtt.[1]

Vizsgálataim során a 2006. március 29-ei és 2017. augusztus 21-ei napfogyatkozások teljes fedéseiről készült képeket dolgoztam fel képkötő polarimetriával, részben az IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) programcsomaggal, részben az általam írt szkriptekkel. A felvételek úgy készültek, hogy felváltva három különböző állásban egy lineáris polarizátor lett a fényútba helyezve. A 2006-os felvételek utómunkával három színszűrőre - vörös, zöld és kék - lettek felbontva.

2. Elméleti háttér

2.1. Napfogyatkozás

Napfogyatkozás alkalmával a Hold pontosan a Nap és a Föld közé kerül, így részben vagy teljesen eltakarja a Nap korongját. Mivel a Hold keringési síkja nem egyezik meg a Föld keringési síkjával (ekliptika), hanem azzal megközelítőleg 5° -ot zár be, a jelenség csak akkor játszódik le, ha a Hold vagy a felszálló, vagy a leszálló csomópontban tartózkodik. Vagyis ahhoz, hogy teljes napfogyatkozást láthassunk, a Holdnak a Földet és a Napot összekötő egyenesen kell elérnie az ekliptika síkját.



1. ábra. A Hold nem az ekliptika síkjában kering, így viszonylag ritkán látható napfogyatkozás. Forrás: Bevezetés a csillagászatba 1. elektronikus tananyaga.[2]

Teljes napfogyatkozás alkalmával megfigyelhetővé válik a Nap koronája. A Hold a Nap korongjának eltakarásával a fotoszférából érkező fotonoknak is útját állja, lehetővé téve a sokkal halványabb korona vizsgálatát. Ez a Nap atmoszférájának legkülső rétege, ami a fotoszféránál sokkal melegebb, sűrűsége viszont sokkal kisebb.

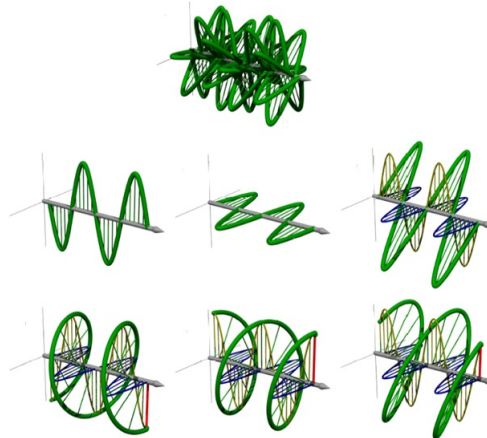


2. ábra. A Nap koronája teljes napfogyatkozásakor. Forrás: Bevezetés a csillagászatba 1. elektronikus tananyaga.[2]

2.2. Polarizáció

Általánosságban véve minden elektromágneses sugárzás polarizált valamilyen mértékben. Ez azt jelenti, hogy van egy olyan kitüntetett sík, melyben a fény elektromos vektora rezeg. Ilyen polarizált fény az úrból is érkezik hozzánk. A természetes fény azonban, mint a csillagok fénye is, polarizálatlan. Ennek okát a sugárzás keletkezése adja meg: egyetlen atomi hullámkibocsátás eredménye ugyan polarizált fény lesz, de a fénykeltési folyamatok számtalan atomból és rendszertelenül származnak. Így statisztikailag minden rezgési sík közel azonos valószínűséggel fordul elő, emiatt a megfigyelt fény polarizálatlan lesz. Asztrofizikai közegekben direkt módon szinkrotron vagy ciklotron sugárzás által keletkezhet polarizált fény, közvetve pedig fény-anyag kölcsönhatás során, mint a szórás vagy a differenciális abszorpció.

Lineárisan polarizált fény esetén csak egyetlen olyan sík létezik, amely mentén az elektromos vektor rezeghet. Cirkuláris polarizációnál amellet, hogy a fény egy adott irányban halad, a rezgési síkje körbefordul. A lineárisan és körben polarizált fény az elliptikusan polarizált speciális esetei. Utóbbi esetén még az is fennáll, hogy az eredő elektromos vektornak a hossza is változik. A nemlineáris esetekben megkülönböztethetünk jobbra és balra cirkuláris vagy elliptikus polarizációt annak függvényében, hogy a rezgési sík az óramutató járásával megegyező, vagy azzal ellentétes irányban fordul el.



3. ábra. Az első képen polarizálatlan sugárzás látható több rezgési síkkal. A második sor képei lineáris polarizációra mutatnak példát. Az utolsó sor első és második képe a két ellentétes irányú cirkuláris polarizációt mutatja be. Az utolsó sor harmadik képe az elliptikus polarizációt szemlélteti. Forrás: Optikai alapok az ELI-ALPS tükrében [3], Polarizáció fizikai leírása, elektronikus tananyag.

2.3. Polarizált fény leírása, Stokes-formalizmus

Tekintsünk egy z irányba terjedő monokromatikus elektromágneses síkhullámot. Ekkor az x és y irányú kitérések:

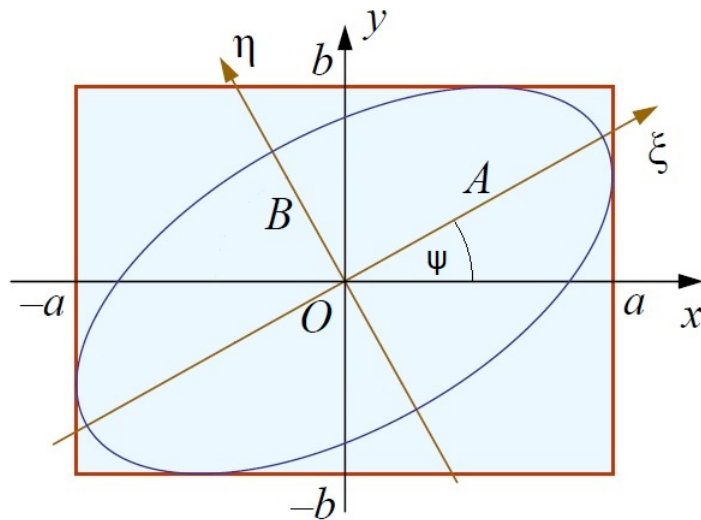
$$E(x, t) = A_x \cos(\omega t + \alpha_x) \quad (1)$$

$$E(y, t) = A_y \cos(\omega t + \alpha_y) \quad (2)$$

Az egymásra merőleges harmonikus rezgések összetevéséből meghatározható a vektor mozgása. A koszinusztétel segítségével és trigonometrikus azonosságok alkalmazásával felírható a polarizációs ellipszis egyenlete:

$$\frac{E_x^2}{A_x^2} + \frac{E_y^2}{A_y^2} - 2\frac{E_x E_y}{A_x A_y} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (3)$$

ahol $\delta = \alpha_y - \alpha_x$ fáziskülönbség.



4. ábra. Polarizációs ellipszis. Forrás: Hullámtan és optika előadás elektronikus tananyag.[4]

Az ellipszishez igazított koordinátarendszerben az ellipszis egyenlete:

$$\frac{\xi^2}{A^2} + \frac{\eta^2}{B^2} = 1 \quad (4)$$

A (3) egyenlet mindkét oldalát megszorozva $4A_x^2 A_y^2$ -tel:

$$4A_y^2 E_x^2 + 4A_x^2 E_y^2 - 8A_x A_y E_x E_y \cos \delta = 4A_x^2 A_y^2 \sin^2 \delta \quad (5)$$

A kitéréseket egy periódusnál sokkal hosszabb időre átlagolva kihasználható, hogy $\langle E_x^2 \rangle = \frac{A_x^2}{2}$, $\langle E_y^2 \rangle = \frac{A_y^2}{2}$ és $\langle E_x E_y \rangle = \frac{A_x A_y}{2} \cos \delta$. Ezekkel felírható, hogy:

$$2A_x^2 A_y^2 + 2A_x^2 A_y^2 - 4A_x^2 A_y^2 \cos^2 \delta = 4A_x^2 A_y^2 \sin^2 \delta \quad (6)$$

Végül a bal oldalhoz hozzáadva és kivonva $(A_x^4 + A_y^4)$ -t teljes négyzeteket lehet kialakítani:

$$(A_x^2 + A_y^2)^2 - (A_x^2 - A_y^2)^2 - (2A_xA_y \cos \delta)^2 = (2A_xA_y \sin \delta)^2 \quad (7)$$

A (7) egyenletből már fel tudjuk írni a Stokes-paramétereket:

$$I = A_x^2 + A_y^2 \quad (8)$$

$$Q = A_x^2 - A_y^2 \quad (9)$$

$$U = 2A_xA_y \cos \delta \quad (10)$$

$$V = 2A_xA_y \sin \delta \quad (11)$$

Ha a fényútba egyetlen lineáris polarizátort teszünk, mint ahogy a felvételek készítésekor is, a kilépő fény intenzitása:

$$\mathcal{I}_\alpha = \frac{1}{2} (I + Q \cos 2\alpha + U \sin 2\alpha) \quad (12)$$

Itt α jelöli a polarizátor állását. A V komponens eltűnése megfelel annak, hogy az alkalmazott polarizátoron átjutó elliptikusan vagy cirkulárisan poláros fénynek csak lineáris komponense halad tovább. A különböző polarizátorállásoknál mért intenzitásokból ki lehet számolni a Stokes-paramétereket.

Ezekon kívül meg lehet határozni az elektromos vektor rezgési síkjának elfordulását egy alapirányhoz képest és a polarizáció mértékét.

A rezgési sík iránya:

$$\psi = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{U}{Q} \right) \quad (13)$$

A lineáris polarizáció mértéke:

$$p = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (14)$$

A (14) egyenletben $0 \leq p \leq 1$. Ezzel jellemezni lehet teljesen polarizált ($p = 1$), teljesen polarizálatlan, természetes ($p = 0$) és részlegesen polarizált ($0 < p < 1$) fényt is. Továbbá be lehet vezetni a q és u normált Stokes-komponenseket, illetve a P polarizációs intenzitást:

$$p = \sqrt{\left(\frac{Q}{I}\right)^2 + \left(\frac{U}{I}\right)^2} = \sqrt{q^2 + u^2} \quad (15)$$

$$P = pI = \sqrt{Q^2 + U^2} \quad (16)$$

3. Eszközök

Fontos megjegyezni, hogy a felvételek nem kifejezetten csillagászati, illetve tudományos munkavégzésre tervezett eszközökkel lettek elkészítve.

3.1. Kamerák

A 2017-es napfogyatkozás alkalmával egy Nikon D90 digitális kamerával, míg a 2006-os napfogyatkozás során egy Fujifilm FinePix S7000 típusú digitális kamerával készültek a felvételek.

	Nikon D90	Fujifilm FinePix S7000
Érzékelő típusa	CMOS	CCD
Érzékelő fizikai méretei (mm)	23,6 x 15,8	7,6 x 5,7
Alkalmazott felbontás (px)	4288 x 2848	2848 x 2136
Pixelek fizikai méretei (μm)	5,50 x 5,54	2,66 x 2,66

1. táblázat. A két kamera fontosabb adatai.

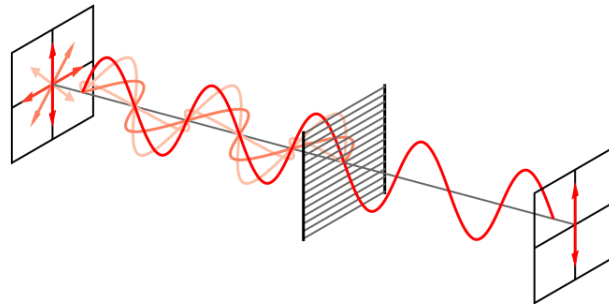
3.1.1. CCD és CMOS érzékelők

A CCD rövidítés az angol Charge-Coupled Device elnevezésből származik, jelentése töltés-csatolt eszköz. Az érzékelőbe érkező foton elektront vált ki a pixel anyagából, ez a belső fotoelektromos effektus. A pixelben felgyülemelő elektronok száma alapján következtetni lehet a beérkező fotonok számára, illetve az intenzitásra vagy a fluxusra. A képek kiolvasása a vezérlő elektródák feszültségeinek változtatásával, oszloponként történik. Az egyes pixelekben levő elektronokat úgy kell továbbléptetni, hogy azok ne kerüljenek át a szomszédos pixelekbe. CCD kamerákat előszeretettel használnak tudományos körökben magas kvantumhatásfokuk miatt. Ez azt jelenti, hogy a beérkező fotonok nagy hányadát érzékelik, hullámhossztól függően akár 80-90%-ukat is. Az emberi szemmel összehasonlítva, annak kvantumhatásfoka csak 1%.

A CMOS a Complementary Metal-Oxide Semiconductor elnevezésből származik, jelentése kiegészítő fém-oxid félvezető. A ma használatos képrögzítő eszközök többsége is ilyen érzékelőkkel van felszerelve (pl. telefonok, webkamerák, digitális fényképezőgépek). A CMOS-ban nem oszloponkénti léptetgetés után, egyesével történik a töltés/feszültség konverzió, hanem rögtön a pixeleknél, egyszerre. Így a kiolvasás sokkal gyorsabb tud lenni, mint a CCD esetében.

3.2. Polárszűrők

A felvételek készítésekor a fényképezőgépek lencséje elé - nem teljesen tökéletesen - 52 mm-es Zeiss lineáris polárszűrők lettek elhelyezve. Ezek a beérkező fény rezgési síkjából csak egyet engednek tovább. Ezáltal az első polarizációs felvétel elkészítésekor meg lett határozva egy alapirány (például legyen ez a 0°). A továbbiakban ehhez a helyzethez viszonyítva kellett forgatni a szűrőt a megfelelő szöggel (45° , 90° , 120° , 240°). Mivel a szűrő a beérkező sugárzásnak csak kis hányadát engedi át, polarimetriai mérések alkalmával érdemes fényes objektumokat választani. Ez a feltétel a napfogyatkozások alkalmával teljesült.



5. ábra. Lineáris polárszűrő működése. Forrás: Wikipedia.[5]

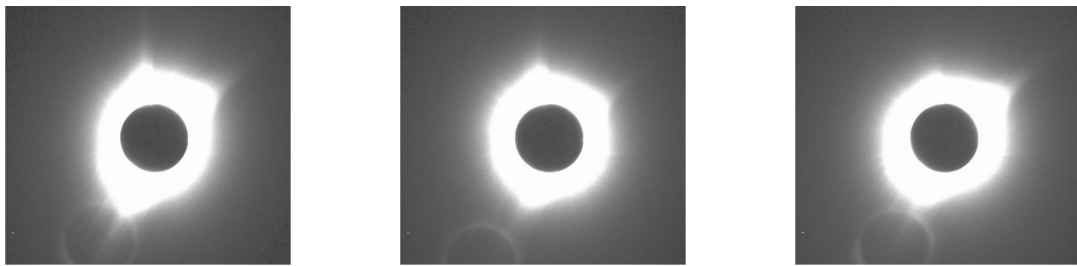
A fotózásban használatos polárszűrőket különböző, polaroidoknak nevezett vékonyrétegek sorozatából állítják elő, amiket két üveglap közé helyeznek el. Ezek a rétegek dikroikusak, ami ebben az értelemben azt jelenti, hogy különböző polarizációs állapotokat különböző mértékben nyelnek el, illetve engednek át. A vékonyrétegben található hosszúkás kristályok a velük párhuzamos síkban rezgő fényt elnyelik, a rájuk merőleges síkban rezgőt átengedik [6]. Ezt szemlélteti az 5. ábra.

Manapság hasonló megoldást alkalmaznak optikai mikroszkópok, napszemüvegek elkészítéséhez is. A moziban használatos 3D szemüvegek egyik lencséje a jobbra, másik lencséje a balra cirkulárisan polarizált fényt engedi át.

4. Képek feldolgozása

4.1. Az IRAF programcsomag

Az IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) képfeldolgozó programcsomag *no-ao.nproto* csomagjában található a *linpol* taszk. Ez 3 vagy 4 bemeneti képből létrehozza az I , Q és U komponenseket, a polarizáció mértékét és a rezgési sík irányát tartalmazó képeket. A bemeneti képek csak olyanok lehetnek, amik egymáshoz képest 45° -kal elforgatott polarizátorokkal készültek. A 2017-es napfogyatkozás során alkalmazott polárszűrők állása: 0° , 45° és 90° . A taszk ezeken kívül egy 135° -os állásnál készült képet is elfogadna lehetséges bemenetként, azonban ilyen felvétel nem készült egyik napfogyatkozás során sem.



6. ábra. A Nap koronája 0 , 45 és 90 fokos polarizátorállásokon keresztül.

4.2. Saját szkriptek

Mivel a 2006-os felvételek készítésekor a polarizátorok állása 0° , 120° , illetve 240° volt, a *linpol* taszk nem használható a szükséges képek előállításához. Ennek érdekében először egy olyan szkriptet írtam a (12) egyenlet alapján, ami a megfelelő képekből ugyanolyanokat állít elő, amilyeneket a *linpol* taszk is. Ennek elsődleges célja saját magam és az alkalmazott formulák ellenőrzése volt. A (12) egyenlet alapján az egyes polarizátorállásoknál készült képek intenzitása a Stokes-paraméterekkel kifejezve:

$$\mathcal{I}_0 = \frac{I + Q}{2} \quad (17)$$

$$\mathcal{I}_{45} = \frac{I + U}{2} \quad (18)$$

$$\mathcal{I}_{90} = \frac{I - Q}{2} \quad (19)$$

$$\mathcal{I}_{120} = \frac{I - \frac{1}{2}Q - \frac{\sqrt{3}}{2}U}{2} \quad (20)$$

$$\mathcal{I}_{240} = \frac{I - \frac{1}{2}Q + \frac{\sqrt{3}}{2}U}{2} \quad (21)$$

Ezen formulák felhasználásával az egyes képekből meghatározhatóak a Stokes-komponensek, illetve a polarizáció mértéke és szöge is.

5. A napkorona elemzése képalkotó polarimetriával

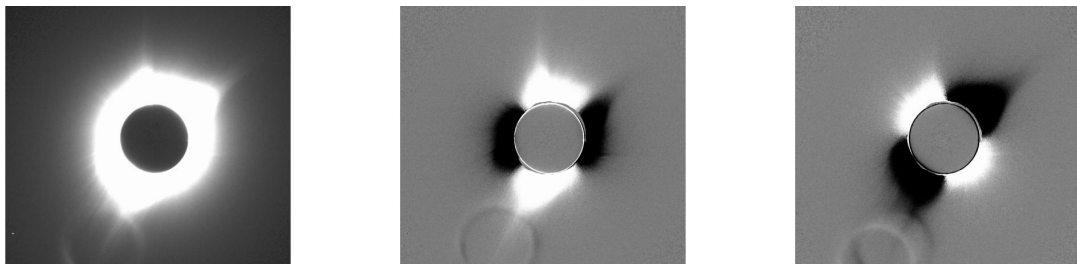
5.1. A 2017-es napfogyatkozás

A (17), (18), (19) képletek alapján az egyes Stokes-paramétereket a következő módon lehet kifejezni a mért intenzitásokkal:

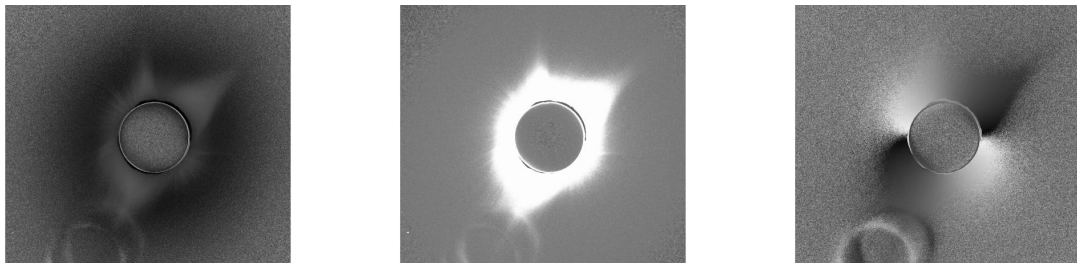
$$I = \mathcal{I}_0 + \mathcal{I}_{90} \quad (22)$$

$$Q = \mathcal{I}_0 - \mathcal{I}_{90} \quad (23)$$

$$U = 2\mathcal{I}_{45} - I = 2\mathcal{I}_{45} - \mathcal{I}_0 - \mathcal{I}_{90} \quad (24)$$



7. ábra. I, Q és U komponensek.

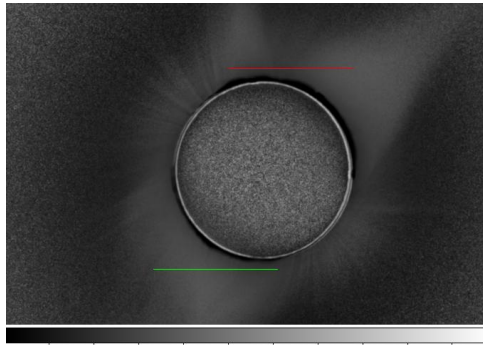


8. ábra. A polarizáció mértéke (p), polarizációs intenzitás (P) és a rezgési sík (ψ) szürkeárnyalatos képe.

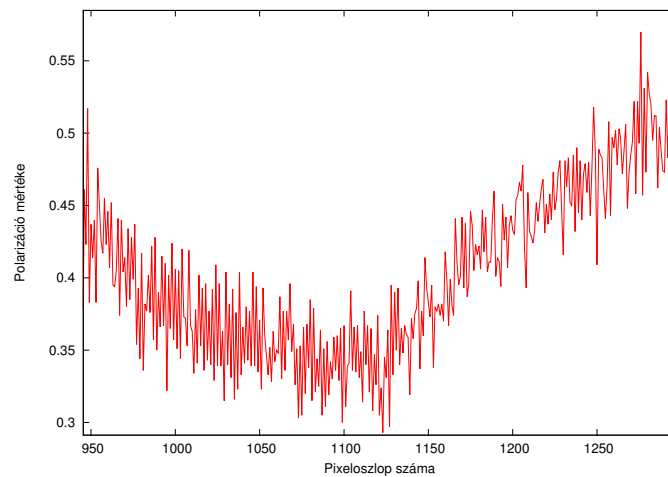
A képalkotó polarimetria a mért adatokat az elkészített képeken a pozíció függvényében ábrázolja, jelen esetben ez a pixelkoordinátákat jelenti.

5.1.1. A polarizáció mértéke

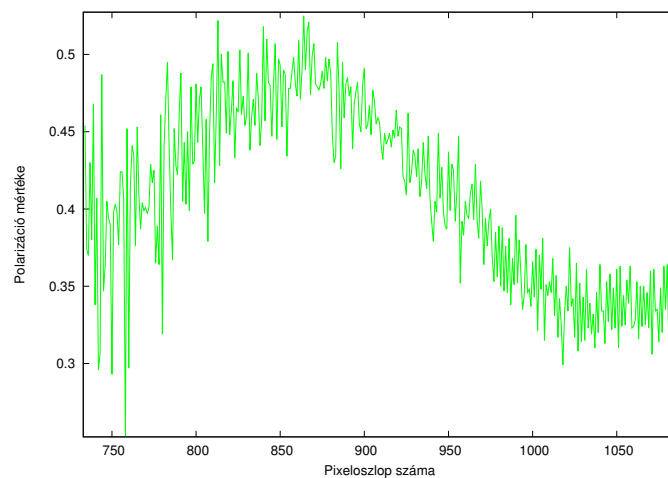
A polarizáció mértékét véletlenszerűen kiválasztott pixelsorokból mintavételeztem.



9. ábra. A polarizáció mértéke. A szürkeárnyalatos skála 0-tól (fekete) 1-ig (fehér) terjed. A vörös és zöld egyenesek jelölik a kiválasztott tartományokat.



10. ábra. Polarizáció mértéke az 1270. pixelsorban (a 8. ábrán vörös színnel jelölve)

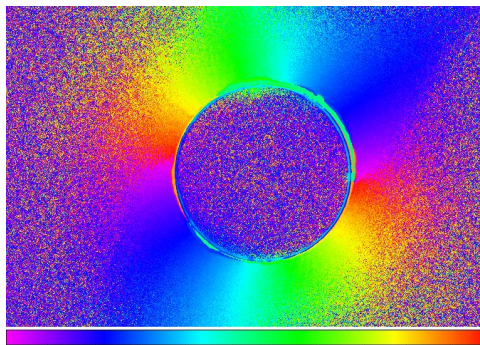


11. ábra. Polarizáció mértéke a 708. pixelsorban (a 8. ábrán zöld színnel jelölve)

A két kiválasztott tartományon a lineáris polarizáltság mértéke 25% és 55% között mozog, vagyis a koronából érkező fény részlegesen polarizált. Ennek oka a Thomson-szórás. A korona erősen ionizált gáz, azaz plazma. Ebben a formában az atomokat alkotó atommagok és elektronok az óriási hőmérséklet miatt már nem tudnak kötésben maradni, így szabaddá válnak. Ezeket a szabad elektronokat a beérkező fény elektromos komponense gyorsítja. A részecskék az elektromos mező által meghatározott irányban fognak rezegni, dipólsugárzást létrehozva. Az így mozgó töltött részecske a beérkező sugárzás irányára merőlegesen fog a legerősebben sugárzást kibocsátani úgy, hogy az a rezgési irányának megfelelően poláros lesz. Így a megfigyelő helyzetétől függően, egy adott pontból kiszórt sugárzás polarizáltsága változhat.

5.1.2. A polarizáció szöge

A (13) egyenlet alapján számolt polarizációs szög, vagyis az elektromos vektor rezgési síkja elfordul. A szabad elektronok, melyek részt vesznek a Thomson-szórásban, a Nap mágneses erővonalai mentén csapdába esnek, hasonlóan mint a Föld körüli Van Allen sugárzási övezetek esetén. Ez alapozta meg azt a feltételezést, hogy a polarizációnak ugyanúgy radiális szimmetriát kell mutatnia, mint a mágneses mezőnek (Ney és mtsai, 1960) [7]. A 12. ábra ezt mutatja:



12. ábra. A polarizáció szöge. A színkódolás -90° -tól (lila) 90° -ig (vörös) tart.

5.2. A 2006-os napfogyatkozás

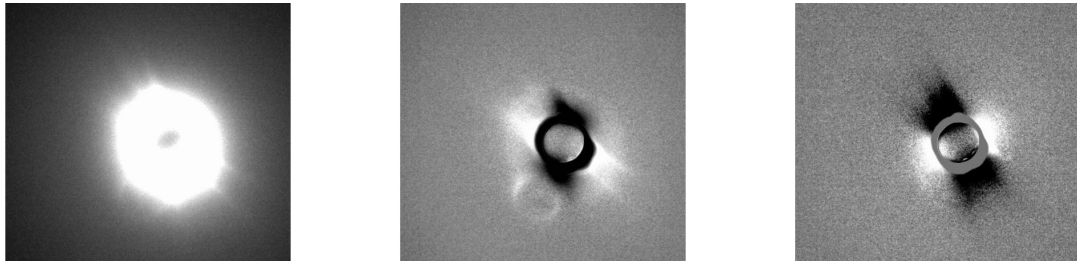
A (17), (20), (21) képletek alapján az egyes Stokes-paramétereket a következő módon lehet kifejezni a mért intenzitásokkal:

$$I = \frac{2}{3} (\mathcal{I}_0 + \mathcal{I}_{120} + \mathcal{I}_{240}) \quad (25)$$

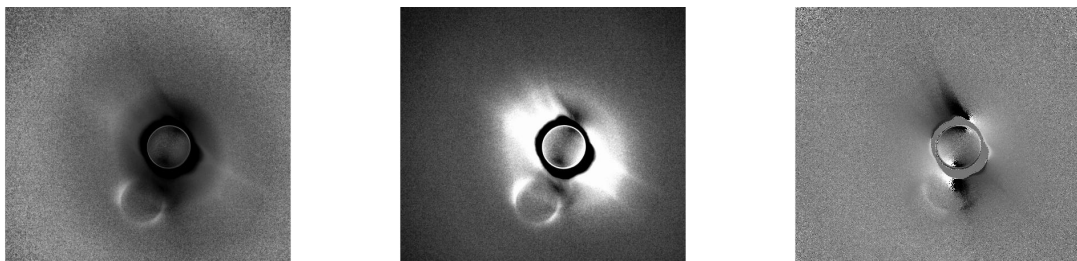
$$Q = \frac{2}{3} (2\mathcal{I}_0 - \mathcal{I}_{120} - \mathcal{I}_{240}) \quad (26)$$

$$U = \frac{2}{\sqrt{3}} (\mathcal{I}_{240} - \mathcal{I}_{120}) \quad (27)$$

A törökországi felvételek szín szerint három csatornán lettek megörökítve: R, G és B. Ezáltal meg lehet figyelni a Stokes-komponensek esetleges hullámhossz-függését is.



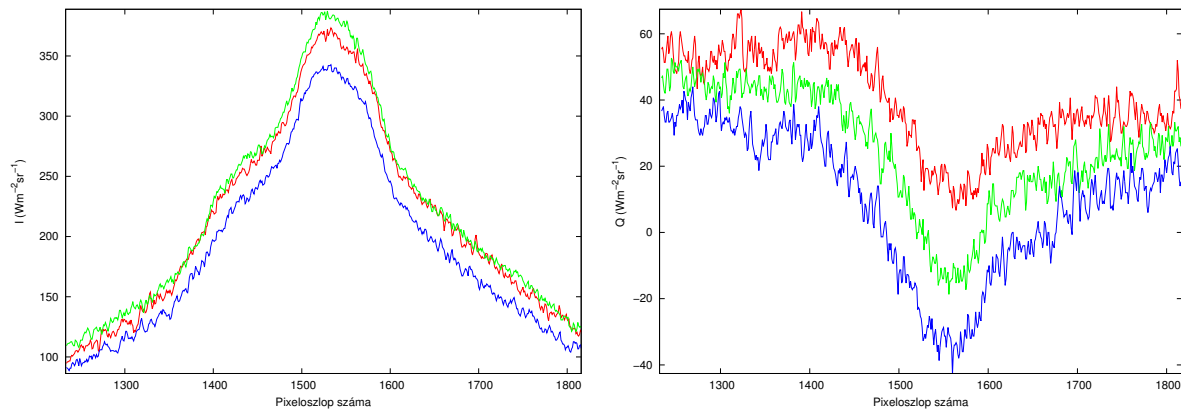
13. ábra. I, Q és U komponensek a B (kék) csatornán keresztül.



14. ábra. A polarizáció mértéke (p), polarizációs intenzitás (P) és a polarizációs sík (ψ) szürkeárnyalatos képe a G (zöld) csatornán keresztül.

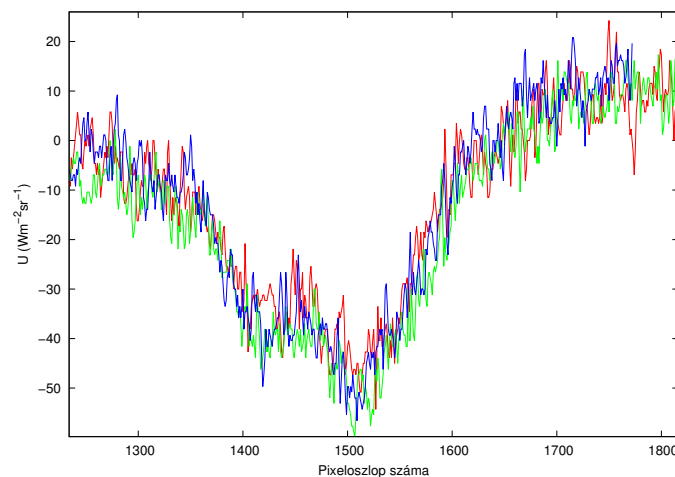
5.2.1. A Stokes-komponensek hullámhossz-függése

Az I, Q és U komponenseket mindhárom színcsatornán ugyanazon a szakaszon vizsgáltam. Ez a képek 1251. pixelsorában az 1234. és 1816. pixeloszlop közötti rész volt. Mivel a *linpol* taszk leírásában nincs feltüntetve, hogy a kimenetként kapott I, Q és U komponenseket milyen mértékegységben prezentálja, a függőleges tengelyen a radiancia SI mértékegységét tüntettem fel. A következő ábrák grafikonjain az egyes csatornák a nekik megfelelő színnel lettek ellátva: R - vörös, G - zöld, B - kék.



15. ábra. Az I és Q komponens az R, G és B csatornákon, az 1251. pixelsorban.

A 15. ábra két grafikonján jól látszódik, hogy az I és Q komponensek hullámhossz-függők, utóbbi esetében egyértelműbben látszódnak a különbségek.



16. ábra. Az U komponens az R, G és B csatornákon, az 1251. pixelsorban.

Az U komponensnél a három csatorna között nincs jelentős különbség. Egyértelműen nem lehet kimondani, hogy független a hullámhossztól, de a többi komponensnél kisebb mértékben függ tőle. Ez azt is jelenti, hogy az I, Q és U komponensekből származtatott egyéb mennyiségek és mérőszámok, mint a lineáris polarizáció mértékének és a polarizáció szögének hullámhossz-függését a Q komponens fogja jelentősebb mértékben befolyásolni.

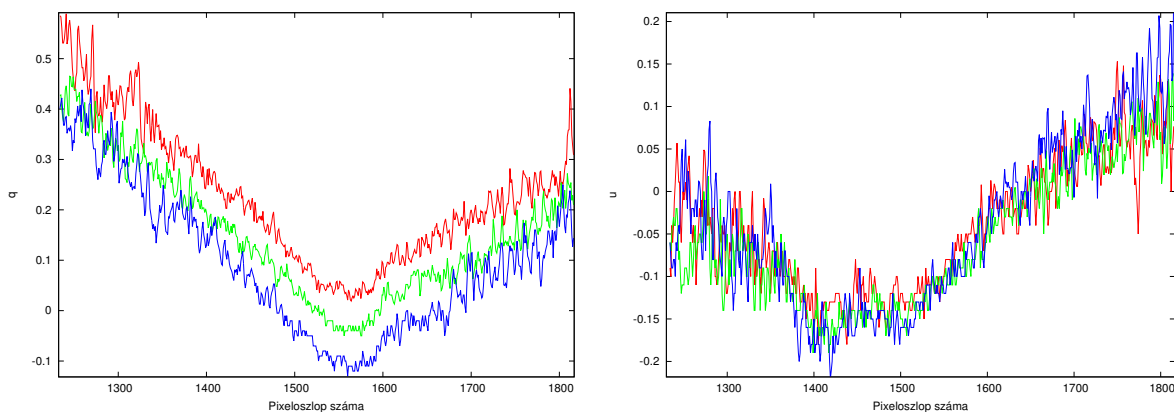
5.2.2. A normált Stokes-komponensek hullámhossz-függése

Tekintettel léve az I komponens hullámhossz-függésére, ellenőrzés gyanánt ábrázoltam a q és u komponenseket. Mivel az I, Q és U komponenseknek azonos a dimenziója, az I-vel való normálással skalárokat kapunk.

A (15) egyenlet alapján a lineáris polarizáció mértéke közvetlenül felírható a normált q és u komponensekkel. A polarizáció szögét pedig nem változtatjuk meg a (13) egyenlet átírásával:

$$\psi = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{u}{q} \right) = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{U/I}{Q/I} \right) = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{U}{Q} \right) \quad (28)$$

A q és u komponenseket mindhárom színsatornán ugyanazon a szakaszon vizsgáltam, mint az I, Q és U komponenseket. A következő ábrák grafikonjain az egyes csatornák a nekik megfelelő színnel lettek ellátva: R - vörös, G - zöld, B - kék.

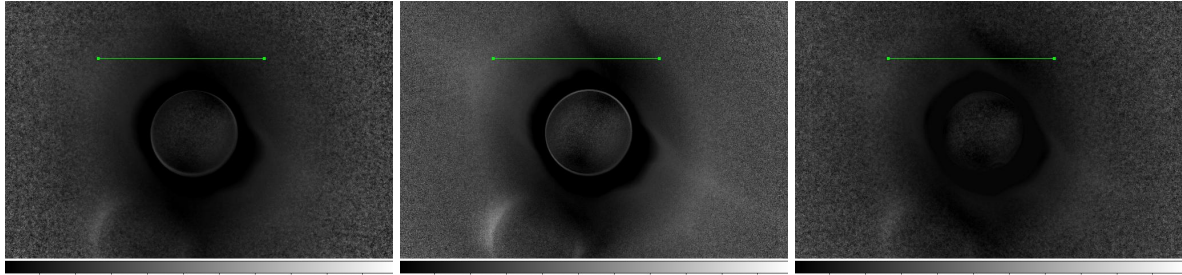


17. ábra. A q és u normált komponens az R, G és B csatornákon, az 1251. pixelsorban.

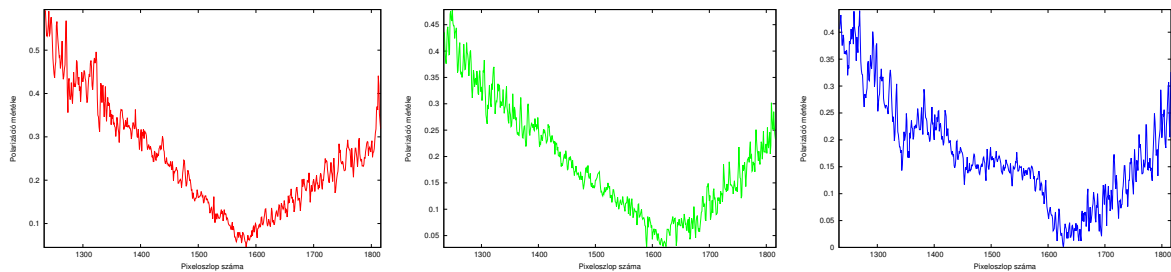
Látható, hogy a Q és q , illetve U és u párosok között nincs jelentős különbség.

5.2.3. A polarizáció mértékének hullámhossz-függése

Mindhárom csatornán ugyanazt a szakaszt választottam, amit az egyes Stokes-komponensek vizsgálata során is.



18. ábra. A polarizáció mértéke R, G és B színcsatornákon, zöld egyenesel jelölve a kiválasztott tartományt. A szürkeárnyalatos skála 0-tól (fekete) 1-ig (fehér) terjed.

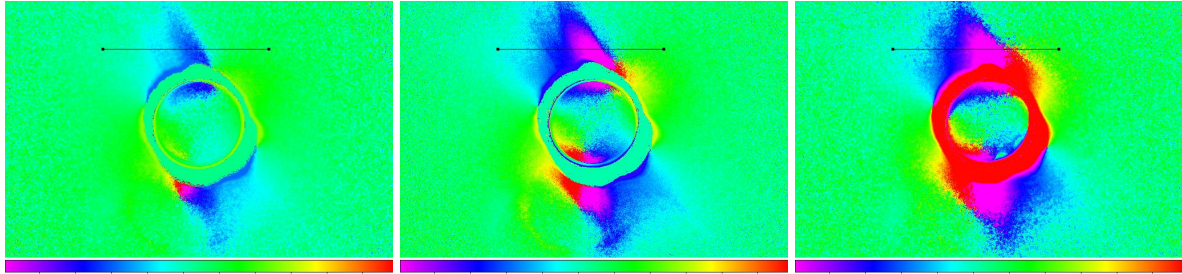


19. ábra. Polarizáció mértéke R, G és B színcsatornákon, az 1251. pixelsorban

A 19. ábra grafikonjain jól látszódik, hogy a vöröstől a kék felé, vagyis a nagyobb hullámhossztól a kisebb felé haladva a polarizáció mértéke csökken. Ugyanezt lehetett megfigyelni a q komponens esetében is. Ebben a sorrendben haladva csatornáról csatornára körülbelül 5%-ot csökken a polarizáció mértéke. Míg a vörösön az 50%-ot is meghaladta, addig a zölden az 50%-ot sem éri el a maximum, a kéken pedig 45%-nál olvasható le.

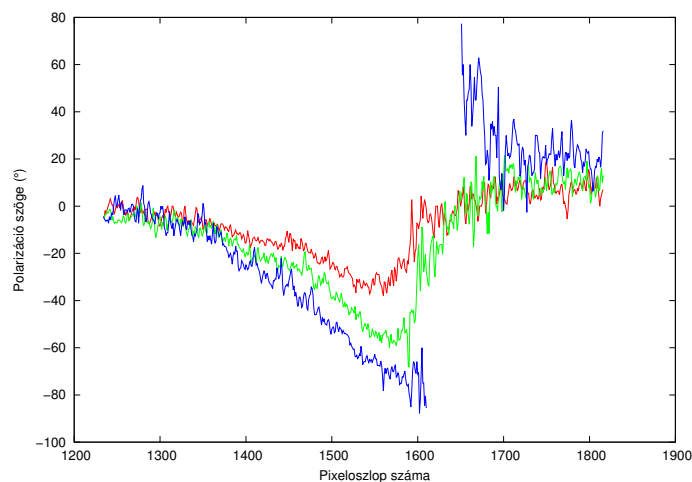
5.2.4. A polarizáció szögének hullámhossz-függése

Ennek a mennyiségnek a vizsgálatához is ugyanazokat a pixelkoordinátákat választottam, mint a Stokes-komponensek és a polarizáció mértékének esetében is.



20. ábra. A polarizáció szöge R, G és B színcsatornákon, fekete egyenesel jelölve a kiválasztott tartományt. A színskala -90° -tól (lila) 90° -ig (vörös) terjed.

A polarizáció szögének mindhárom színcsatornán felvett értékeit egy grafikonon ábrázoltam. Az előző ábrákhoz hasonlóan itt is az egyes színek a nekik megfelelő csatornákat reprezentálják:



21. ábra. A polarizáció szöge (ψ) az 1251. pixelsorban.

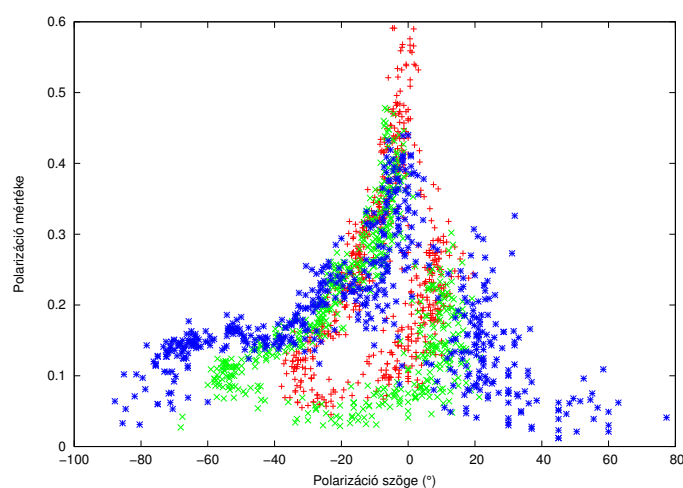
A 21. ábrán jól látszódik, hogy a nagyobb hullámhossztól a kisebb felé haladva a polarizációs ellipszis egyre jobban elfordul, $|\psi|$ egyre nagyobb értékeket vesz fel a -90° és $+90^\circ$ közé eső tartományon. A kék csatorna adatsorában a hirtelen és nagy mértékű váltás miatti zajos átmenetet nem tüntettem fel, illetve ezt a részt a későbbiekben sem használtam fel.

6. További alkalmazások

A következő alfejezetekben bemutatok további két diagramot, amelyeket használnak a polarimetriai elemzések során, azonban ezek vizsgálati tárgya nem a Nap, hanem főként csillaghalmazok.

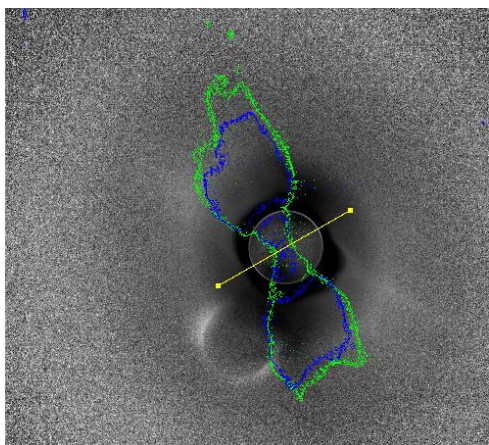
6.1. A $p(\psi)$ diagram

A 2006-os felvételekből kinyert adatsorok alapján ábrázolni lehet a polarizáció mértékét a polarizáció szögének függvényében. Ezt a módszert fotometriai mérésekkel kiegészítve előszeretettel alkalmazzák csillagok halmaztagságának megállapítására, emellett a mágneses tér irányára vonatkozó megfontolásokat is lehet tenni [9]. Utóbbi a Nap esetében is meghatározható.



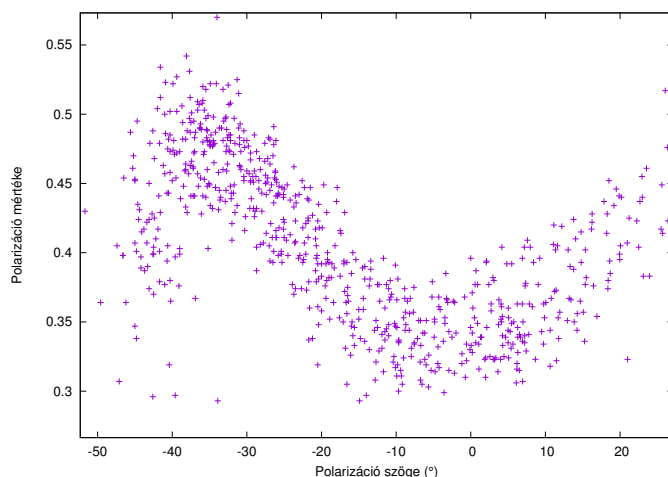
22. ábra. A Nap koronájának $p(\psi)$ diagramja, mindhárom színcsatornán, az 1251. pixelsorban.

Ez a diagram a 19. és 21. ábra grafikonjait egyesíti, kiejtve a pixelkoordinátákat. A 21. ábrához hasonlóan itt is megfigyelhető a polarizáció szögének hullámhossz-függése. Ami az eddigiekhez képest új információt hordoz, hogy mindhárom színcsatornán a polarizáció mértéke $\psi = 0^\circ$ -nál veszi fel maximumát, majd annál kisebb lesz, minél jobban elfordul a rezgési sík. Ebből meg lehet állapítani, hogy hol helyezkednek el azok a Thomson-szórásban részt vevő elektronok, amik a mi látóirányunkban sugároznak a legerősebben. Ezek az elektronok a zárt mágneses erővonalak mentén helyezkednek el, ami alapján meghatározható a mágneses tengely iránya. A következő ábrán látható a polarizáció mértékét mutató kép a zöld csatornán, amelyre a kék és zöld csatornához tartozó $\psi = 0^\circ$ kontúrokat igazítottam. Ez alapján pedig közelítőleg megbecsültem a mágneses tengely irányát (sárga vonal).



23. ábra. A polarizáció mértéke G csatornán. A zöld és kék kontúrok $\psi = 0^\circ$ -hoz tartoznak. A sárga vonal a mágneses tengely közelítő iránya.

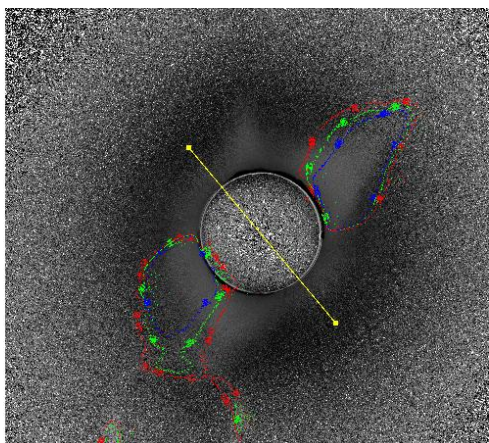
Ehhez hasonlóan a 2017-es napfogyatkozás $p(\psi)$ diagramját is elő lehet állítani, és ugyanúgy meghatározni a mágneses tengely irányát. Ebben az esetben a maximális polarizáció $\psi = -36^\circ$ -nál található. Ezt függvény illesztésével határoztam meg.



24. ábra. A 2017-es napfogyatkozás $p(\psi)$ diagramja. Itt egyszerre szerepelnek a 9. ábrán vörös és zöld színnel jelölt egyenesekből származó adatok.

Mivel a polarizáció mértéke egy viszonylag széles, 10° -os tartományon a maximális érték közelében marad, 5° -onként vettem fel három kontúrt. A mágneses tengely meghatározását ebben az esetben még az is segítette, hogy a 9. ábrán jól láthatóak az erővonalak a pólusok közelében.

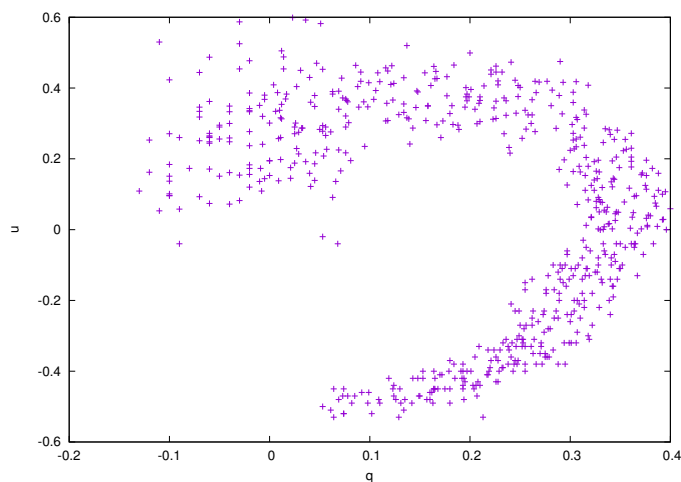
Érdeemes észrevenni, hogy a sárga vonallal jelzett mágneses tengely a 7. és 13. ábra képein egyaránt megegyezik a Q komponens negatív és pozitív (fekete és fehér) értékeinek határvonala által kijelölt egyenessel, illetve az U komponens pozitív (fehér) tartományát félbeszelő egyenessel.



25. ábra. A polarizáció mértéke a 2017-es napfogyatkozás során. A vörös, zöld és kék kontúrok rendre a következő szögekhez kapcsolódnak: -31° , -36° és -41° . A sárga vonal jelöli a mágneses tengely irányát.

6.2. Az $u(q)$ diagram

Az $u(q)$ diagramot szintén a halmaztagság eldöntésére használják. Az egyes csillaghalmozatok tagjai ezen a diagramon általában egy pont köré tömörülnek, míg a halmazon kívüli csillagok szétszórtan helyezkednek el [10]. A Nap esetében ez a diagram már nem szolgáltat új információkat.



26. ábra. A 2017-es napfogyatkozás normált q és u komponensei az 1270. pixelsorból.

7. Összefoglalás

Dolgozatom célja a képző polarimetria megismerése, egyes módszereinek alkalmazása és bemutatása volt a témavezetőm által 2006-ban és 2017-ben teljes napfogyatkozásokról készített felvételeken. A kapott eredmények az elvárásoknak megfelelőek lettek: a polarizáció mértéke eléri az 50%-ot, amit a szakirodalom is megemlíti (Badalyan és mtsai, 1993) [8]. Emellett a polarizáció szögét ábrázoló képek nem csak az IRAF, de az általam írt szkriptek kimeneteiként is mutatják a radiális szimmetriát ([7]). Ezen kívül sikerült meghatározni a Nap mágneses tengelyének irányát is.

Fontos megemlíteni, hogy több, figyelmen kívül hagyott tényező is befolyással lehet az eredményekre. A Nap sugárzását nem csak a korona polarizálhatja, hanem a bolygóközi térben levő por és a Föld légköre is (például Rayleigh-szórással). Ennek megfelelően a Stokes-komponensek bemutatott hullámhossz-függését is ennek megfelelően, fenntartásokkal kell kezelni.

A további célok között szerepel fiatal nyílthalmazok polarimetriai vizsgálata, illetve megfelelő eszközökkel felkészülni a következő teljes napfogyatkozásra.

8. Függelék

Munkám során a következő szkripteket írtam, illetve használtam fel. Ezeket két csoportra osztom: a Stokes-paramétereket tartalmazó képeket előállító és az adatokat kinyerő szkriptekre. Előbbiek bemutatására a napfogyatkozások képeit veszem példaként:

A 0, 45 és 90 fokos állásnál készült képek feldolgoása:

```
string a
string b
string i0="DSC_0633_3.fit"
string i45="DSC_0636_3.fit"
string i90="DSC_0630_3.fit"
# I komponens:
imexpr ( expr="a+b", output="I.fit", a=i0, b=i90)
# Q komponens:
imexpr ( expr="a-b", output="Q.fit", a=i0, b=i90)
# U komponens:
imexpr ( expr="2*a-b", output="U.fit", a=i45, b="I.fit")
# pszi:
imexpr ( expr="0.5*atan2(a,b)", output="PSZI.fit", a="U.fit",
b="Q.fit")
imexpr ( expr="deg(a)", output="pszi.fit", a="PSZI.fit")
# u, q :
imexpr ( expr="a/b", output="Qm.fit", a="Q.fit", b="I.fit")
imexpr ( expr="a/b", output="Um.fit", a="U.fit", b="I.fit")
# DoLP:
imexpr ( expr="sqrt(a*a+b*b)", output="DoLP.fit", a="Qm.fit",
b="Um.fit")
# polar int:
imexpr ( expr="a*b", output="pol_int.fit", a="DoLP.fit",
b="I.fit")
cp Qm.fit q.fit
cp Um.fit u.fit
!rm PSZI.fit Qm.fit Um.fit
```

Ez a szkript a három különböző polarizátorállásnál készült képből előállítja az I, Q és U komponenseket, az u és q normalizált komponenseket, a lineáris polarizáció mértékét, a polarizált intenzitást és a polarizáció szögét. Az IRAF *linpol* taszkjának használatakor dönthetünk, hogy a Q és U komponensek normalizáltak legyenek vagy sem. A szkript előnye a taszkkal szemben, hogy mindkét változatot egyetlen futtatással előállítja, míg a *linpol*-nak ennek érdekében kétszer kell lefutnia.

A 0, 120 és 240 fokos állásnál készült képek feldolgozása:

```
string a
string b
string c
string i0="R_0_4761_2.fit"
string i120="R_120_4758_2.fit"
string i240="R_240_4760_2.fit"
# I komponens:
imexpr ( expr="2*(a+b+c)/3", output="I.fit", a=i0, b=i120,
c=i240)
# Q komponens:
imexpr ( expr="(4*a-2*b-2*c)/3", output="Q.fit", a=i0, b=i120,
c=i240)
# U komponens:
imexpr ( expr="2*(a-b)/sqrt(3)", output="U.fit", a=i240,
b=i120)
# u, q :
imexpr ( expr="a/b", output="Qm.fit", a="Q.fit", b="I.fit")
imexpr ( expr="a/b", output="Um.fit", a="U.fit", b="I.fit")
# pszi:
imexpr ( expr="0.5*atan2(a,b)", output="PSZI.fit", a="U.fit",
b="Q.fit")
imexpr ( expr="deg(a)", output="pszi.fit", a="PSZI.fit")
# DoLP:
imexpr ( expr="sqrt(a*a+b*b)", output="DoLP.fit", a="Qm.fit",
b="Um.fit")
# polar int:
imexpr ( expr="a*b", output="pol_int.fit", a="DoLP.fit",
b="I.fit")
cp Qm.fit q.fit
cp Um.fit u.fit
!rm PSZI.fit Qm.fit Um.fit
```

Ez a szkript olyan bemenő képekkel dolgozik, amiket a *linpol* taszk már nem tud kezelni, az eredmény fals lenne. Ezért a 2006-os törökországi képek feldolgozásához nem tudtam az IRAF-et használni, azokat kizárólag a magam által írt programmal dolgoztam fel.

A szkriptek második csoportjába az adatokat kinyerő programokat sorolom. Ezek bemutatására a 11. ábra grafikonjának elkészítésének folyamatát veszem alapul:

Kurzorfájl előállítás:

```
#!/bin/bash
for ((i=739;i<=1090;i=i+11)); do echo "$i"; done > x.dat
for ((i=739;i<=1090;i=i+11)); do echo "708"; done > y.dat
for ((i=739;i<=1090;i=i+11)); do echo "1"; done > wcs.dat
for ((i=739;i<=1090;i=i+11)); do echo "z"; done > btn.dat
rm cursor.cur
paste x.dat y.dat wcs.dat btn.dat > cursor.cur
rm x.dat y.dat wcs.dat btn.dat
```

Ez a szkript egy 4 oszlopból álló fájlt hoz létre. A vízszintes tengelyen a két szélső pixeloszlop megadásával kiválasztjuk a kívánt tartományt, jelen esetben 739 és 1090 között. Ehhez a függőleges tengely koordinátáját is megadjuk, ami itt 708. A harmadik oszlopban szinte mindig 1-es szerepel, ez a DS9 képmegjelenítő szempontjából fontos. Végül az utolsó oszlopba a *z* kerül. Ennek "lenyomásával" kapjuk meg az intenzitásértékeket a kurzort körülvevő 5x5-ös területen. Ezért nem egyesével, hanem 11 pixelenként toljuk el a kurzort. Az utolsó 3 sor az esetleges előző munkából származó kurzorfájlt törli, létrehozza az újat, majd a feleslegessé vált fájlokat törli.

Adatok kinyerése:

```
imexamine LP.fit 1 imagecur="cursor.cur" > int_matrix.dat
```

Az IRAF-ben a kurzorfájl használatával pillanatok alatt hozzá lehet jutni a megfelelő információkhoz, megspórolva sok időt és fáradozást. Ebben az esetben a lineáris polarizáció mértékét megadó képről (LP.fit) nyerjük ki az intenzitásértékeket és írjuk bele egy új fájlba. Ebbe egy 5 pixel széles, és a meghatározott tartománynak megfelelő hosszúságú sáv értékei kerülnek. A következő szkript ezt szűkíti le egy 1 pixel széles vonallá.

```
#!/bin/bash
awk '/708/ {print $2,$3,$4,$5,$6,$7,$8,$9,$10,$11,$12}'
int_matrix.dat > matrix.dat
awk '!/708/ {print $0}' matrix.dat > matrix2.dat
awk 'BEGIN {ORS=" "} {print}' matrix2.dat > x.dat
sh transpose.sh
for ((i=734;i<=1085;i++)); do echo "$i"; done > y.dat
paste y.dat xT.dat > LP_708.dat
rm int_matrix.dat matrix.dat matrix2.dat xT.dat x.dat y.dat
```

Ez a szkript a megfelelő (708.) sorhoz tartozó oszlopokat veszi ki, és írja új fájlba. Ezután az esetlegesen nem odavaló oszlopot ki kell belőle törölni. A `transpose.sh` transzponálja az `x.dat` tartalmát, vagyis felcseréli a sorokat az oszlopokkal. Ez fogja tartalmazni az intenzitásértékeket. A szkriptek közül ez az egyetlen, amit külső forrás-

ból szereztem [11]. Az `y.dat` fogja tartalmazni a vízszintes tengely elemeit, a pixeloszlopokat. A kettőt egy fájlba másolva `gnuplot`-ban ábrázolhatjuk a lineáris polarizáció mértékét a 708. sorban, ahogy az a 11. ábrán látható. Az utolsó sor a feleslegessé vált fájlokat törli ki.

Transzponáló szkript:

```
#!/bin/sh
awk '{for (f=1;f<=NF;f++) {a[NR,f]=$f} }
NF > nf {nf=NF}
END {for (f=1;f<=nf;f++) {for (r=1;r<=NR;r++)
{printf a[r,f] (r==NR ? RS : FS)}}}' x.dat > xT.dat
```

Függvényillesztés:

A 22. ábra adatsorára negyedfokú függvényt illesztettem a `gnuplot` grafikus program segítségével. A szélsőértékek megkereséséhez ennek deriváltját egyenlővé tettem 0-val, és az illesztésből származó paraméterek behelyettesítésével megoldottam az egyenletet.

Az illesztés folyamata:

```
f(x)=a*x**4+b*x**3+c*x**2+d*x+e
fit f(x) 'p_psz_i.dat' u 3:2 via a,b,c,d,e
```

Az első sor definiálja az illesztendő függvényt, a második pedig a `p_psz_i.dat` nevű fájl adatsorára a lehető legpontosabban kiszámolja a megadott paramétereket és illeszti a függvényt.

A megoldandó egyenlet: $4ax^3+3bx^2+cx+d = 0$, ahol az illesztésből kapott paraméterek a következők:

$$\begin{aligned}a &= -1,07302 \cdot 10^{-7} \\b &= -1,40599 \cdot 10^{-6} \\c &= 0,000216634 \\d &= 0,00100147\end{aligned}$$

Ennek egyik megoldása $x = -36$.

Hivatkozások

- [1] R. M. A. Azzam (February 2011), "The intertwined history of polarimetry and ellipsometry", *Thin Solid Films*, 519 (9): 2584-2588
- [2] <http://astro.u-szeged.hu/oktatas/tembevez.html>
- [3] [http://titan.physx.u-szeged.hu/tamop411c/public_html/HU%20-%20Optikai%20alapok%20az%20ELI-ALPS%20t%C3%BCkr%C3%A9ben%20I.%20-%20Msc%20\(e-learning\)/polarizci_fizikai_lersa.html](http://titan.physx.u-szeged.hu/tamop411c/public_html/HU%20-%20Optikai%20alapok%20az%20ELI-ALPS%20t%C3%BCkr%C3%A9ben%20I.%20-%20Msc%20(e-learning)/polarizci_fizikai_lersa.html)
- [4] http://titan.physx.u-szeged.hu/~opthome/optics/oktatas/Hull_opt/ea_01.pdf
- [5] <https://en.wikipedia.org/wiki/Polarizer>
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/Polaroid_\(polarizer\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Polaroid_(polarizer))
- [7] Ney, E. P.; et al. (March 1961), "Polarization and intensity studies of the eclipse of October 2, 1959", *Astrophysical Journal*, 133: 616
- [8] Badalyan, O. G.; et al. (June 1993), "Polarization of the white-light corona and its large-scale structure in the period of solar cycle maximum", *Solar Physics*, 145 (2): 279-290
- [9] Eswaraiah, C.; et al. (January 2012), "Broad-band optical polarimetric studies towards the Galactic young star cluster Berkeley 59", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419 (3): 2587-2605
- [10] Eswaraiah, C.; et al. (March 2011), "A multiwavelength polarimetric study towards the open cluster NGC 1893", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 411 (3): 1418-1434
- [11] <https://ideone.com/F1TJm>

9. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, Dr. Hegedüs Tibornak, hogy rendelkezésemre bocsátotta a napfogyatkozásokról készített felvételeit, és azt, hogy egy olyan úton indított el, amilyenre kezdetekben magam sem gondoltam volna.

További köszönet illeti Jäger Zoltánt, aki tanácsaival és éles meglátásaival sokat segített a dolgozat elkészítésében.

10. Nyilatkozat

Alulírott **Papp Sándor** Fizikus MSc hallgató (ETR azonosító: PASUACT.SZE, Neptun azonosító: W36LWA) az "*A Nap koronájának polarimetriája*" című diplomamunka szerzője fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések általános szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Szeged, 2017. május 14.

.....
Papp Sándor