

Optikai rendszerek szimulációja

Tompa Júlia

1. Bevezetés

Az Önálló projekt II tárgy keretein belül az előző féléves munkámat folytatva továbbra is optikai rendszerek szimulációjával foglalkoztam. A Gauss-féle paraxiális közelítésen túllépve ezúttal olyan modell implementálása volt a célom, amely figyelembe veszi a teleszkópok és objektívek képalkotásának geometriai aberrációit. Ez az implementálás C++-ban történt meg, az általam írt program alkalmas arra, hogy objektívek adatainak megadásával lekövessünk és kirajzoljunk sugármeneteket, valamint ábrázoljuk és kiértékeljük az objektívek leképezésének geometriai hibáit. A program olyan lencsék, lencserendszerek modellezésére is alkalmas, amelyek nem egy közös tengelyre merőlegesen helyezkednek el, hanem bárhogy a térben.

2. Geometriai aberrációk

Ahogy említettem, múlt félévben a Gauss-féle, vagy másképp paraxiális közelítéses modellel foglalkoztam. Ebben a modellben tetszőleges optikai rendszer (melynek elemei egy tengely mentén, arra szimmetrikusan helyezkednek el) leírható két fősík, illetve a bal- és jobboldali fókusztávolság segítségével, és egyszerű geometriai számítások segítségével bármely pontnak kiszámolható a rendszer szerinti képe [3]. Mindez azonban csak akkor ad jó eredményt, ha a rendszert a tengelyhez nagyon közel vizsgáljuk, és a vizsgált szögek kicsik. E feltevés nélkül már nem vehetjük a képalkotást ideálisnak, figyelembe kell vennünk a képalkotás hibáit, amelyek abból adódnak, hogy $\sin(x)$ első rendbeli közelítése nagyobb szögek esetén már nem adna jó eredményt.

Ezen hibák a következőképpen csoportosíthatók [2]:

- kromatikus aberrációk,
- monokromatikus (Siedel) aberrációk:
 - szférikus aberráció,
 - kóma,
 - asztigmatizmus,
 - fókuszfelület-görbülés,
 - torzítás.

Kromatikus aberráció csak abban az esetben lép fel, amennyiben van a rendszerben diszperzív elem. Munkám során monokromatikus aberrációkkal foglalkoztam.

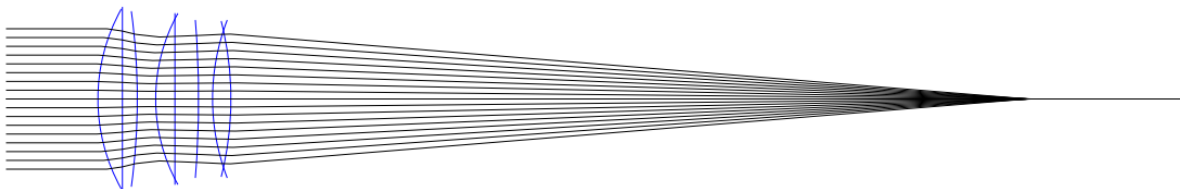
3. A kód felépítése

A létrehozott program legfőbb elemei a sugarakat modellező *Ray* rekord, a felületeket modellező *Surface* osztály és az objektívek leírására alkalmas *Obj* osztály. Mindez a háromdimenziós euklideszi térben értendő, melynek pontjait és vektorait három koordinátával, a *Vec3* rekord segítségével értelmezhetjük. A koordináta-rendszer egységei egy mm-nek felelnek meg.

- A *Ray* struktúra két paraméterrel adható meg, egy kiindulóponttal és egy irányvektorral. Legfontosabb hozzá tartozó függvény:
 - *Vec3 intersection(Ray& ray1, Ray& ray2)*: Két sugár metszéspontját adja meg.
- A *Surface* objektumnak két származtatott osztálya van: a *FlatSurface* és a *SphericalSurface* osztályok. Előbbi sík-, utóbbi gömbfelületek modellezésére alkalmas. Egy síkfelületet a következő paraméterekkel lehet megadni: a felület normálvektora, egy pontja, a mérete, valamint az általa elválasztott anyagok levegőhöz mért relatív törésmutatója. Egy gömbfelület megadásához a szükséges paraméterek: gömbi középpont, sugár hossza, a gömbi középpontból a felület középpontja felé mutató vektor ("irány"), nyílásszög, valamint a síkfelülethez hasonlóan a törésmutatók. Mindkét osztályhoz az alábbi függvények tartoznak:
 - *Vec3 intersection(const Ray& ray) const [inline]*: A felület és egy adott sugár metszéspontját adja vissza.
 - *Ray goThrough(const Ray& ray) const [inline]*: Megadja, hogy adott sugár hogyan halad tovább a felületen átmenve.
 - *void draw(cairo_t *cr) const [inline]*: A cairo program segítségével lerajzolja a felületet oldalnézetből. Olyan felületek esetén működik, melyeknek optikai tengelye egybeesik az x tengellyel.
- Az *Obj* osztály lencserendszereket ír le. Tulajdonképpen nem más, mint egymás után pakolt, az x tengelyre merőlegesen és szimmetrikusan elhelyezkedő felületek összessége. Legfontosabb hozzá tartozó függvények:
 - *void readObjective(Obj& obj)*: Számos konkrét objektív adatai álltak rendelkezésemre, ezen eljárás használatával tudtam beolvasni egy lencserendszer adatait egy bizonyos formátumú szövegfájlból, és létrehozni a neki megfelelő modellt.
 - *void drawPaths(std::vector<Ray>& rays, Obj& obj)*: Egy vektorban tárolt sugár-sereg adott lencserendszeren átmenő útjának kirajzolását végeztük ezzel az eljárással egy pdf fájlba.

4. Sugármenetek kirajzolása

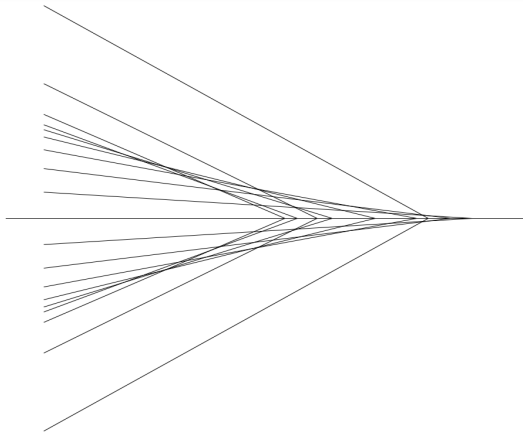
A program segítségével 3 objektívet vizsgáltam: egy Tessar, egy Biotar és egy Biogon típusút. Először az x tengellyel párhuzamosan érkező sugarak meneteit rajzoltam ki (1. ábra).



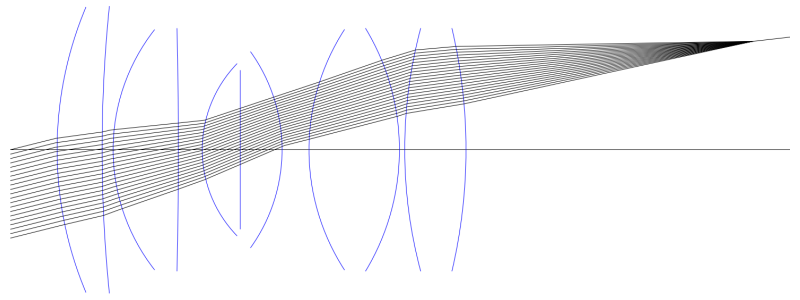
1. ábra. Tessar - sugármenetek

A kinagyított képen (2. ábra) az is látszik, hogy az ideális képalkotással szemben itt nem egy pontban metszik egymást és az x tengelyt a sugarak. Ezt a képalkotási hibát hívják szférikus aberrációnak [1].

Egymással párhuzamos, az x tengellyel kis szöget bezáró sugár-sereg útját is kirajzoltam a programmal, a 3. ábrán a Biotar típusú objektíven áthaladó sugarak menete látható.



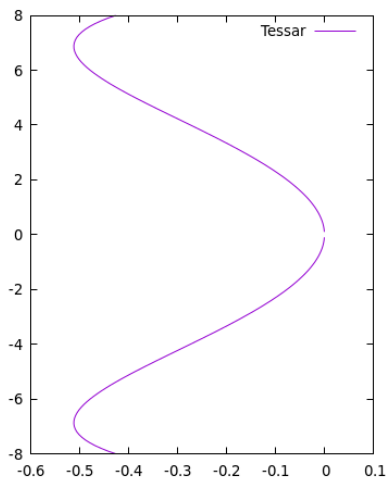
2. ábra. Tessar - szférikus aberráció



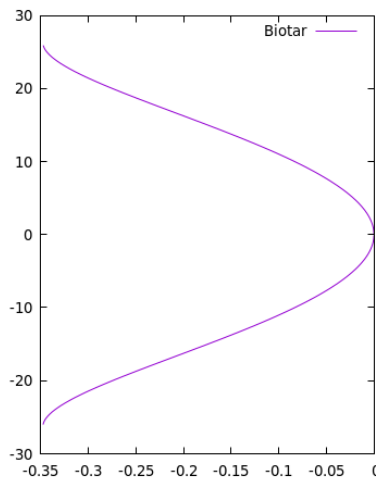
3. ábra. Biotar - ferde sugármenetek

5. Szférikus aberráció

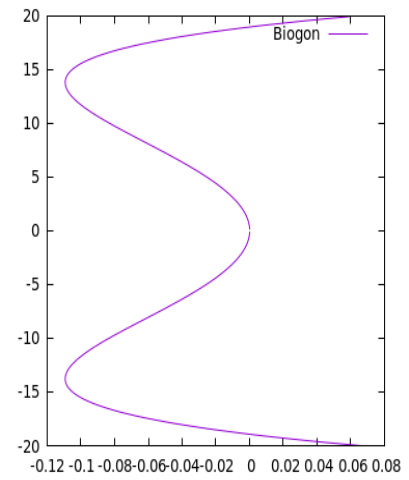
Szférikus aberráció tehát akkor lép fel, ha az optikai tengellyel párhuzamosan, de különböző magasságokban belépő nyalábok eltérő távolságokban fókuszálódnak, azaz eltérő távolságokban metszik az optikai tengelyt [1]. A szférikus aberráció mértékét a következő módon lehet jól szemléltetni: ábrázoljuk egy grafikonon az y tengelyen a sugarak kiinduló magasságát, az x tengelyen a sugár és az optikai tengely metszéspontjának paraxiális fókuszponttól vett távolságát. A grafikonokon megfigyelhető, hogy ha az optikai tengelyhez közel indítunk azzal párhuzamos nyalábokat, akkor azok a várakozásunknak megfelelően közel esnek a paraxiális fókuszponthoz, míg az optikai tengelytől távolodva egy ideig egyre nő a különbség.



4. ábra. Tessar

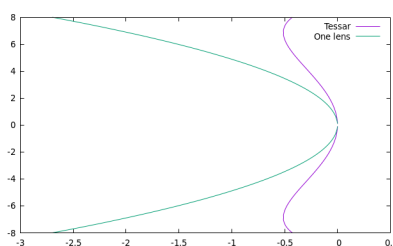


5. ábra. Biotar

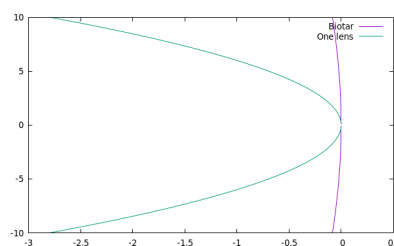


6. ábra. Biogon

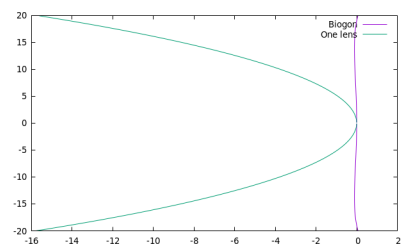
Összehasonlításként érdemes lehet egy, az adott objektívvel megegyező fókusz távolságú szimpla síkdomború lencse szférikus aberrációját is szemléltetni. Mindhárom vizsgált objektív esetében jól látható, hogy e hiba szempontjából jelentősen jobban teljesítenek egy egyszerű lencsénél. Az összehasonlításhoz használt lencsék anyagát ún. rövid flintüvegnek választottam, melynek levegőhöz mért relatív törésmutatója 1.5211.



7. ábra. Tessar

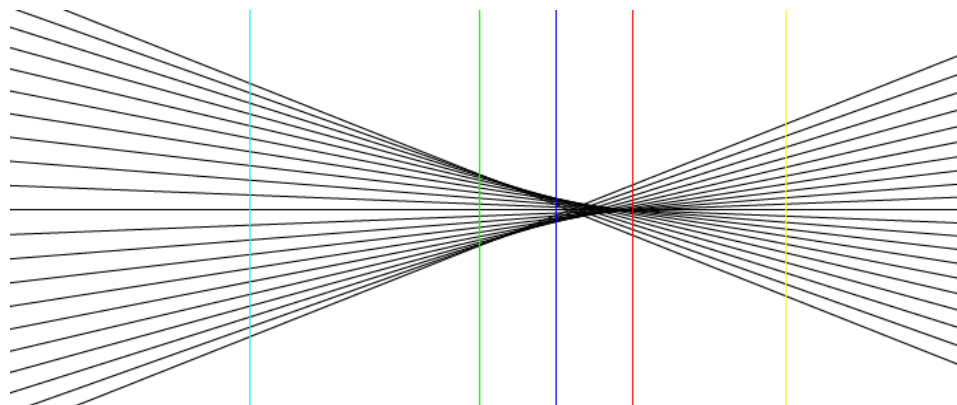


8. ábra. Biotar

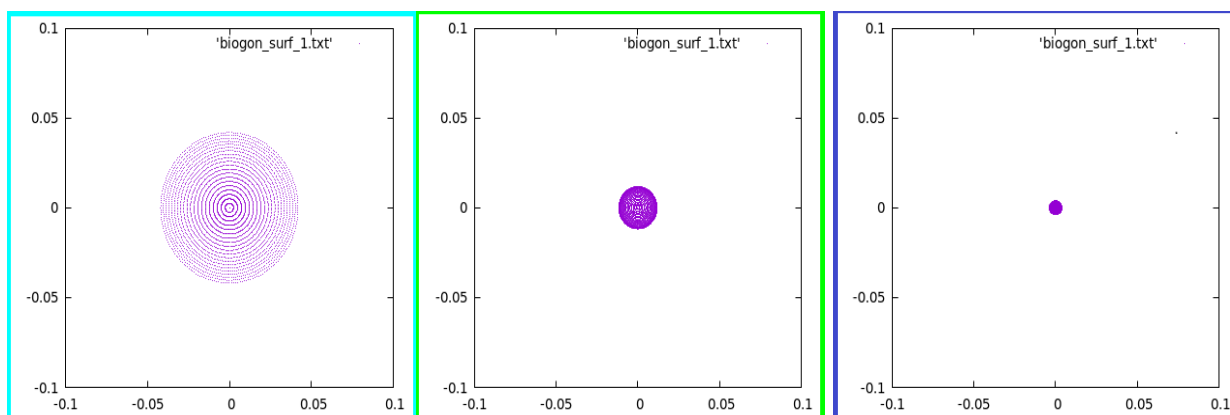


9. ábra. Biogon

Más módon is szemléltethetjük a szférikus aberrációt: helyezünk az optikai tengelyre merőleges síkokat a paraxiális fókusz közelébe, és vizsgáljuk meg, hogy az objektíven áthaladó sugarak hol metszik el ezeket. Ezen szemléltetés bemutatására a Biogon típusú objektívet használtam. A 10. ábrán az egyes síkok elhelyezkedése látható, a 11-15. ábrák mutatják, hogy az optikai tengellyel párhuzamosan, körkörösén indított sugárnyalábok hol metszik el az adott síkot.



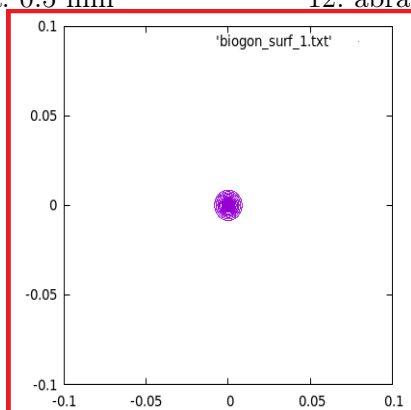
10. ábra. A síkok elhelyezkedése. Cián: 0.5 mm-rel, zöld: 0.2 mm-rel, kék: 0.1 mm-rel a paraxiális fókusz előtt, piros: a paraxiális fókusz sík, citromsárga: 0.2 mm-rel mögötte.



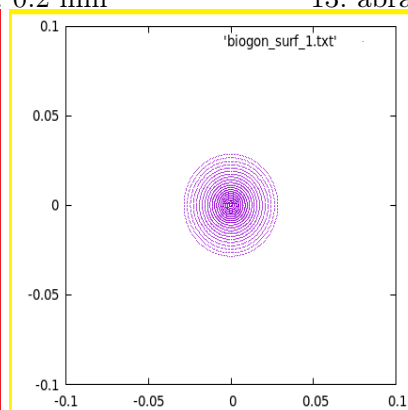
11. ábra. 0.5 mm

12. ábra. 0.2 mm

13. ábra. 0.1 mm



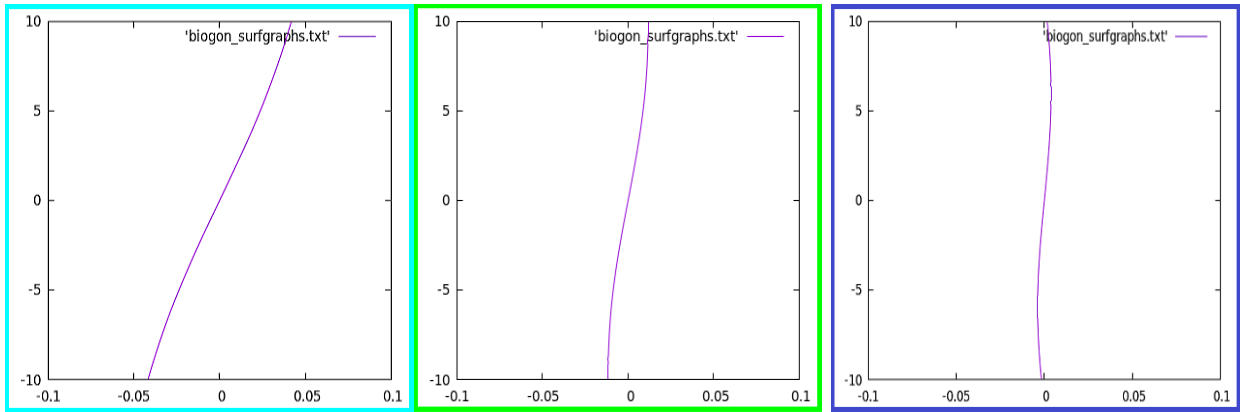
14. ábra. 0.0 mm



15. ábra. 0.2 mm

A 16-20. grafikonokon az y tengelyen a sugarak kiindulási magasságát, az x tengelyen az optikai tengelytől való távolságát ábrázoltuk, amikor a sugár az egyes síkokat átfúrja.

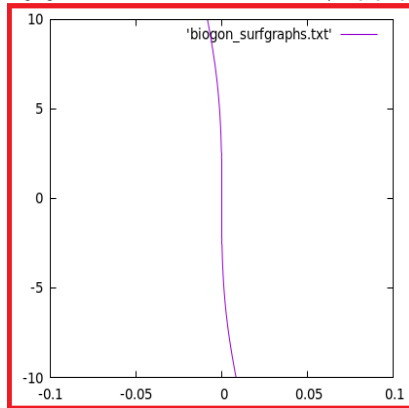
A szemléltetési módok mindegyike jól láttatja, hogy az optikai tengellyel párhuzamos sugárnyalábok nem a paraxiális fókuszpontban, hanem valamivel előtte fókuszálódnak a legjobban.



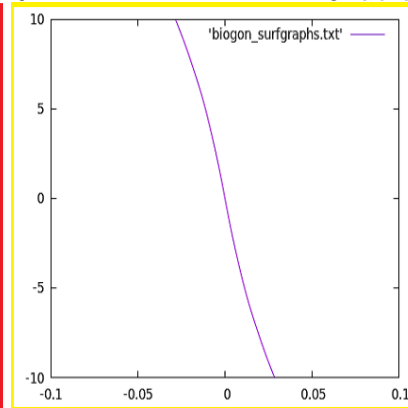
16. ábra. 0.5 mm

17. ábra. 0.2 mm

18. ábra. 0.1 mm



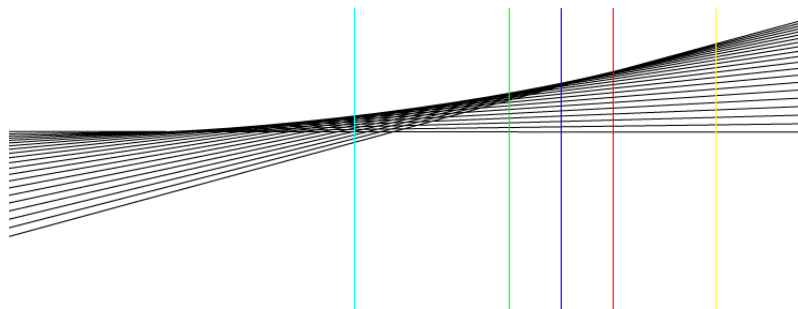
19. ábra. 0.0 mm



20. ábra. 0.2 mm

6. Kóma

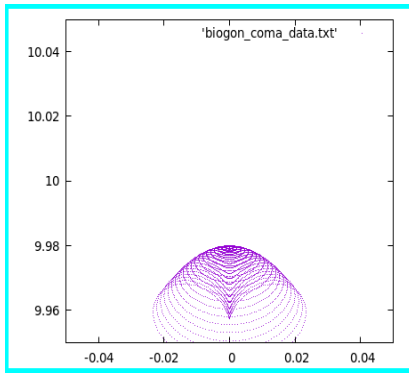
Kóma akkor léphet fel, amikor az optikai tengellyel szöget bezáró sugarak lépnek be az apertúrán. Az objektív szélein belépő ún. tengelyen-kívüli vagy off-axis sugarak más magasságban metszik a fókuszfelületet, mint az apertúra közepén belépők. Ennek eredményeként egy pontforrás képének intenzitáseloszlása nem lesz szimmetrikus, hanem elnyúlt, üstökösszerű alakot ölt [2]. A kóma vizsgálatának szemléltetéséhez szintén a Biogon objektívet használtam - a fentiekhez hasonlóan vettem 5 síkot, melyek a paraxiális fókusz közelében, az optikai tengelyre merőlegesen helyezkednek el, és megvizsgáltam, hogy az optikai tengelyhez képest kis szögben induló sugarak hol döfnek ezeket a síkokat.



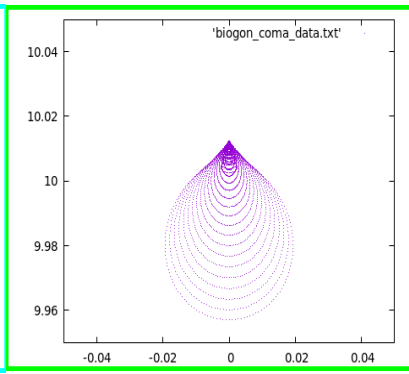
21. ábra. A síkok elhelyezkedése. Cíán: 0.5 mm-rel, zöld: 0.2 mm-rel, kék: 0.1 mm-rel a paraxiális fókusz előtt, piros: a paraxiális fókusz sík, citromsárga: 0.2 mm-rel mögötte.

A 22-26. ábrákon jól látszik az üstökösszerű alak, amit az egyes síkokat elmetező sugarak rajzolnak ki. A sugarakat koncentrikus körök mentén, 10 mm-rel az objektív első lencsefelszíne előttől, nagyjából 5.71°-os emelkedéssel indítottam - ezek az adatok véletlenszerűek, a kóma illusztrálásához választottam őket.

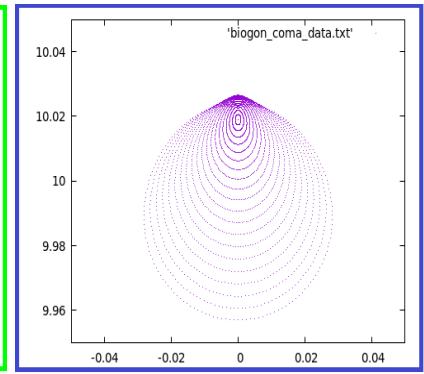
A 27-31. grafikonok a fentiekhez hasonlóan szemléltetik a kóma mértékét: az y koordináta mutatja a sugárnyalábok magasságát, az x koordináta pedig az optikai tengelytől való távolságot.



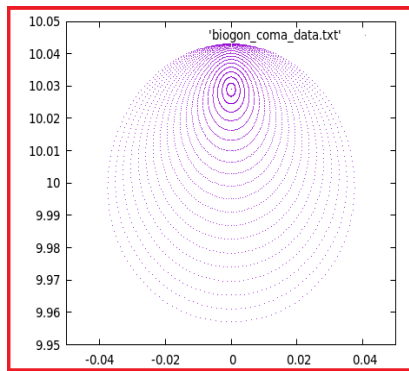
22. ábra. 0.5 mm



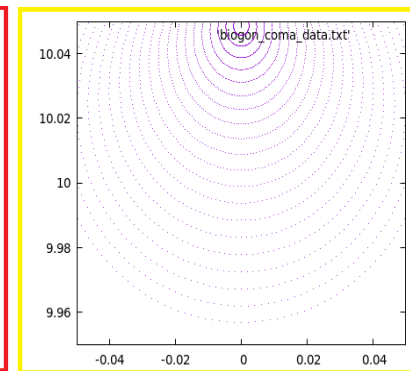
23. ábra. 0.2 mm



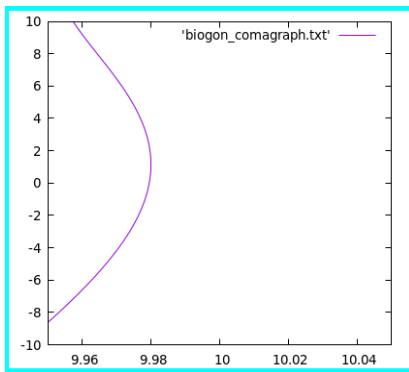
24. ábra. 0.1 mm



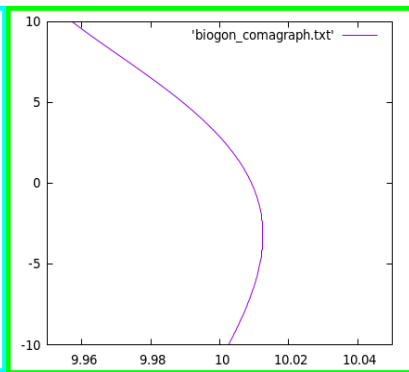
25. ábra. 0.0 mm



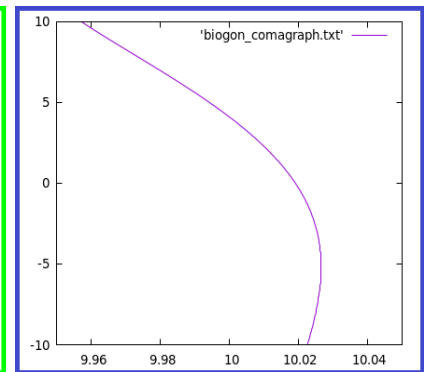
26. ábra. 0.2 mm



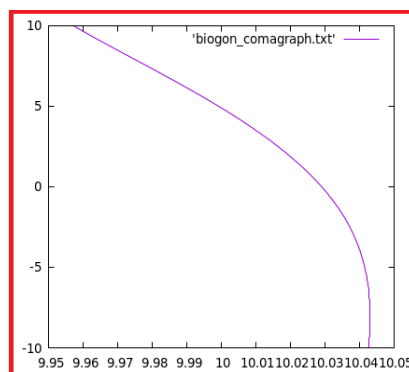
27. ábra. 0.5 mm



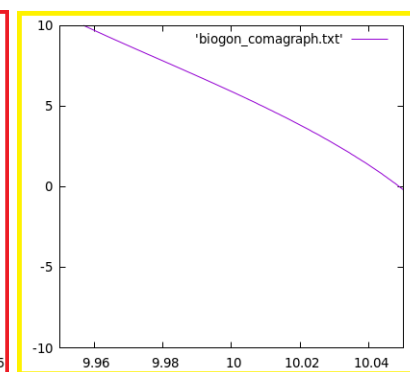
28. ábra. 0.2 mm



29. ábra. 0.1 mm



30. ábra. 0.0 mm



31. ábra. 0.2 mm

Hivatkozások

- [1] *Amateur Telescope Optics*. URL: <https://www.telescope-optics.net/>.
- [2] *Csillagászati műszertechnika online jegyzet*. URL: https://titan.physx.u-szeged.hu/~pierre/muszertech_1/I-02/.
- [3] Dr. Bernolák - Dr. Szabó - Szilas. *A mikroszkóp zsebkönyv*. Műszaki Könyvkiadó, 1979. ISBN: 9631024555.