

## 4. előadás: A csillagkoordináták kiszámítása

A következőkben a *természetes égitestek*, közülük is főképpen a csillagászati geodéziai feladataink (a hely- és időmeghatározás) szabatos megoldásához használható *csillagok* mérés kori koordinátái kiszámításának módszerét fogjuk megismerni. (Ebben a részben a *mesterséges holdak* koordinátáinak kiszámításával nem foglalkozunk, erre a 3. részben térünk vissza.)

### Égitestek koordináta-változásai

Az égitesteknek a Nemzetközi Égi Vonatkoztatási Rendszerben (ICRS) a  $t_0$  vonatkoztatási időpontra meghatározott és megadott koordinátái közvetlenül nem alkalmasak feladataink megoldásához. Valamely  $t$  időpontban végzett méréskor az égitestet ugyanis nem az ICRS, hanem ettől valamelyest eltérő koordinátákkal jellemzett helyen látjuk. Erre mondjuk azt, hogy az égitestek koordinátái a vonatkoztatási időpont és a mérés között *megváltoztak*. Ezen koordináta-változások egyik része valós, másik része látszólagos, végül a harmadik rész a mérés fizikai körülményeivel függ össze.

A **valóságos koordináta-változások** egyrészt az égitestek, másrészt a Föld forgástengelyének *valós és viszonylagos mozgásából* adódnak.

- Mint már korábban említettük, az égitestek mozgásának (tőlünk nézve) sugár irányú összetevője számunkra érdektelen, míg a rá merőleges (érintő) irányú összetevő az, amit *sajátmozgásként* a  $t-t_0$  időtartam alatt bekövetkezett koordináta-változásként figyelembe kell venni.
- A *forgástengely* és (vele együtt) a *Tavaszpont* (csillagokhoz viszonyított) valóságos mozgása a már megismert *precesszió* (és *nutáció*) eredménye. Mivel ezek koordináta-rendszerünk alapirányai, irányváltásuk a rájuk vonatkoztatott koordináták megváltozását eredményezi (függetlenül attól, hogy az égitestnek saját mozgása is volt-e, vagy sem).

A **látszólagos koordináta-változások** az észlelési hely (és az észlelő) mozgásából származnak. Az *aberráció* az elektromágneses rezgés (a fény)  $c$  terjedési és az észlelő mozgása  $v$  sebességének  $v/c$  véges értékű arányának következtében fellépő látszólagos irányeltérés.

- Az *évi* (vagy *keringési*) *aberráció* a Földhöz kötött észlelőnek a Föld keringési (pályamenti) sebességével mozgásából származó irányeltérés. Ennek nagysága függ a csillag irányától, legnagyobb értéke  $20,48''$ .
- A *napi* (vagy *forgási*) *aberráció* a Föld felszínén lévő észlelőnek a Föld forgási (kerületi) sebességével mozgásából származó irányeltérés. Nagysága függ az észlelési hely földrajzi szélességétől, de legfeljebb  $0,32''$ .

A *parallaxis* a geodéziából ismert *külpontosság*nak megfelelő irányeltérés.

- Az *évi* (vagy *keringési*) *parallaxis* a Föld középpontjában képzeltek észlelőnek a Föld keringése miatt a Nemzetközi Égi Vonatkoztatási Rendszernek (ICRS) a Naprendszer tömegközéppontjába helyezett kezdőpontjához (origójához) viszonyított külpontosságából származó irányeltérés. Nagysága a Naprendszer tagjai esetében igen jelentős lehet, a Napnál távolabbi csillagoknál  $\leq 0,76''$ .
- A *napi* (vagy *forgási*) *parallaxis* a Föld felszínén lévő észlelési helynek a Föld (tömeg-) középpontjához viszonyított külpontosságából származó irányeltérés. Mértéke függ az égitestnek a külpontosság irányához viszonyított helyzetétől, pl.

az égi meridiánsíkban 0, általános helyzetben a Hold esetében  $\leq 57'$  (!), a Nap észlelésekor  $\leq 8,8''$ . A távolabbi csillagok észlelésekor már nincs jelentősége.

Az **észlelés fizikai körülményei** (és változásai) ugyancsak befolyásolják az égitestek látszólagos irányát. Itt első sorban arra kell gondolni, hogy a csillagokról a földfelszíni észlelőhöz érkező fénysugár a teljes légkörön áthaladva *légköri sugártörést (csillagászati refrakciót)* szenved, aminek következtében a csillag a valóságos helyétől eltérő irányban látszik. Alapvetően a zenitszögeket befolyásolja, így hatására a csillag a horizont felett a valóságos irányánál magasabban (kisebb zenitszög alatt) látszik. Nagysága függ a levegő fizikai állapotától (hőmérséklet, légnyomás) és a csillag horizont feletti magasságától; a zenitben 0, míg a horizont közelében a legnagyobb, elérheti a  $35' 24''$ -et. Éppen ezért a horizont közelében zenitszög mérést nem is végzünk. Még  $45^\circ$  körüli zenitszög esetén is a refrakció hatása  $\sim 57''$ . Meghatározása egyszerűbb és összetettebb légköri modellekkel lehetséges, de mivel a teljes légkör pillanatnyi (és gyorsan változó) fizikai állapotáról igen kevés adatunk van, a számítás sok bizonytalanságot rejt magában. Ez a csillagászati geodéziai helymeghatározásaink egyik legveszélyesebb hibaforrása, ami gyakorlatilag behatárolja a elérhető megbízhatóságot. Mérési módszereink megfelelő megválasztásával igyekszünk hatását lehetőleg kiejteni, vagy legalábbis csökkenteni.

### Csillagkatalógusok, csillagászati évkönyvek

A csillagászok évezredek óta folyamatosan, egyre növekvő megbízhatósággal határozzák meg az égitestek helyzetét (asztrometria, pozíciós csillagászat). Munkájuk eredményeként egyre több csillagnak ismerjük egyre pontosabb koordinátáit. Mivel a csillagok tőlünk látszó helyzete az előbbieken megismert hatások következtében az időben folytonosan változó, ezért, ha a koordinátáikat „időtálló” jegyzékbe (adatbázisba) akarjuk foglalni, akkor ki kell választanunk egyrészt azt a  $t_0$  *vonatkoztatási időpontot*, másrészt a koordináta-rendszernek azt a térbeli helyzetét, amelyre vonatkozó csillagkoordinátákat meg akarunk adni (*vonatkoztatási rendszer* vagy *csillagászati alaprendszer*).

Az ismert csillagok ilyen értelemben vett koordináta-jegyzéke (adatbázisa) a **csillagkatalógus**, ami az ismert csillagoknak valamely kerek „epochára”, a  $t_0$  vonatkoztatási időpontra megadott  $\tilde{\alpha}(t_0)$ ,  $\tilde{\delta}(t_0)$  *közepes égi egyenlítői koordinátáit* és a csillagok 100 évre vonatkozó *saját mozgását* tartalmazza. Ilyen katalógus az idő folyamán több száz is készült. Közülük most csak azokat említjük, amelyeket a kozmikus geodézia az utóbbi évtizedekben használt és jelenleg is használ.

A kozmikus geodéziában alapvető jelentőségű a Német Csillagászati Társaság által készített és rendszeresen kiadott alapkatalógus, a *Fundamental Katalog (FK)* sorozat. Az **FK4** alapkatalógus az 1535 *alapsillagnak*  $t_0$  1950,0, ill. 1975,0 vonatkoztatási időpontra meghatározott közepes égi egyenlítői koordinátáit (*középhelyét*) és saját mozgásukat tartalmazza. A magyarországi csillagászati geodéziai munkákban 1962. január 1.-től használtuk.

1984. január 1.-től vezették be nemzetközi megegyezéssel, a korábbinak a továbbfejlesztésével az **FK5** alapkatalógust, amely a  $t_0 = J 2000,0$  vonatkoztatási időpontra adja meg az 1535 alapsillag középhelyét. Ezek a csillagkoordináták valósítják meg (jelölik ki a csillagokhoz viszonyítva) az [1.2.1.]-ben megadott megbízhatósággal a Nemzetközi Égi Vonatkoztatási Rendszer (ICRS) alapirányait (koordináta-irányait). Ebben az értelemben ez az 1535 alapsillag képezi a Nemzetközi Égi Vonatkoztatási

Keretpontjait (csillag ICRF). Az FK5 *kiegészítése* további, mintegy 3500 csillag adatait tartalmazza.

Csillagászati űrkutató programok, különösen a HIPPARCOS asztrometriai mesterséges hold mérési eredményeinek a felhasználásával készítették el az 1990-es években a közel 120 000 csillagot tartalmazó **HIPPARCOS katalógust** ([www.rssd.esa.int/Hipparcos/](http://www.rssd.esa.int/Hipparcos/)). A benne foglalt csillagok koordinátái a nagy pontosságú rádióforrás ICRF által megvalósított koordináta-rendszer alapirányaira vonatkoznak. Ezeket tekintjük a továbbiakban *ICRS koordinátáknak*. Ilyen értelemben az FK5-ben foglalt csillagkoordináták az ICRS koordinátáknak  $\pm 0,05''$ -nél alacsonyabb megbízhatósági szintű megvalósulásai.

A földi észlelések eredményeiből alkotott FK5 és a HIPPARCOS mesterséges hold méréseinek együttes feldolgozásával készült az **FK6** katalógus, amely 878 alapszillag és 3272 további csillag nagy pontosságú koordinátáit tartalmazza ([www.ari.uni-heidelberg.de/datenbanken/fk6/index.php.en](http://www.ari.uni-heidelberg.de/datenbanken/fk6/index.php.en)).

A szatellita geodéziában kiterjedten használt a **SAO** (Smithsonian Astrophysical Observatory) **csillagkatalógus**, amelyet 10 korábbi katalógus alapján készítettek. Ez összesen csaknem 260.000 csillag 1950,0-ra vonatkozó FK4 rendszerbeli adatait tartalmazza mintegy  $\pm 0,2''$ -  $1,5''$  középphibával. Ezek az egész égboltot lefedik mintegy 4 csillag/ $1^\circ \times 1^\circ$  sűrűséggel.

A feladataink megoldásához felhasznált (észlelt) csillagoknak a katalógus-koordinátáiból, az előzőekben említett koordináta-változások figyelembe vételével ki kell számítani a *méréskori látszó helyük* [1.2.3.3.] koordinátáit.

Ezt könnyíti meg az, hogy egyes csillagászati számítóközpontok rendszeresen, minden naptári évre, egyenlő (1, ill. 10 napos) időközökre, előre kiszámítják az 1535 alapszillag *látszó helyének a valódi égi egyenlítői* koordinátáit. Ezeket és a megadott értékek közötti további számításokhoz (interpoláláshoz) szükséges adatokat, segéd táblázatokat tartalmazza a **csillagászati évkönyvek**. A leggyakrabban használt ilyen évkönyv az *Apparent Places of Fundamental Stars* (=APFS, <http://www.ari.uni-heidelberg.de/ariapfs/index.htm>), amit a hazai csillagászati geodéziai gyakorlat is alkalmaz. Jól használható még pl. a <http://space.univ.kiev.ua/ephem/> ugyancsak elektronikus úton elérhető csillagászati évkönyv. Megemlítendő még a földmérő gyakorlatban használt közelítő, gyors módszerekhez készült egyszerűsített (kisebb megbízhatóságú) *The Star Almanac for Land Surveyors*, amely a Nap és a Hold koordinátáit is tartalmazza.

### A méréskori látszó hely koordinátáinak kiszámítása

Mivel a megismert különböző okokból [1.2.3.1.] a csillagok koordinátái az időben folyamatosan változnak, a katalógusban a  $t_o$  vonatkoztatási időpontra megadott közepes égi egyenlítői koordinátákból ki kell számítani a csillag *méréskori* ( $t$  időpontbeli) *látszó helyének valódi égi egyenlítői* koordinátáit. A csillag *látszó helyén* azt (az irányt) értjük, ahol a Nap körül keringő Föld középpontjába képzeltek észlelőt, a légkör hatása nélkül, a csillagot látná. Ezt a következő lépésekben számítjuk ki.

A csillagnak a  $t_o$  vonatkoztatási időpontra, az  $\tilde{\omega}(t_o)$  közepes forgástengelyre és  $\tilde{\gamma}(t_o)$  közepes Tavaszpontra, valamint a Naprendszer  $Bc$  tömegközéppontjára vonatkozó, a csillagkatalógusból nyert baricentrikus  $\tilde{\alpha}(t_o)$ ,  $\tilde{\delta}(t_o)$  közepes égi egyenlítői (ICRS) koordinátáihoz hozzáadjuk a csillagnak a  $(t-t_o)$  idő alatti *sajátmozgását*, a

forgástengelynek az ugyanezen idő alatti *precessziós mozgását*, valamint a  $t$  észlelési időpontra számított *nutációját*. Eredményként kapjuk a csillag mérés kori valódi helyének az  $\omega(t)$  valódi forgástengelyre és a  $\mathcal{V}(t)$  valódi Tavaszpontra vonatkozó (baricentrikus, valódi égi egyenlítői) koordinátáit, ahol a csillagot a *baricentrumba* képzelt észlelő a  $t$  időpontban látná.

A csillag *valódi helyének* így kiszámított koordinátáihoz hozzáadjuk a Föld keringéséből származó *évi* (vagy *keringési*) *aberrációnak* és (közeli csillagok, valamint a Naprendszer tagjainak esetében) az *évi* (vagy *keringési*) *parallaxisnak* a  $t$  időpontbeli hatását. Eredményül kapjuk a csillag  $t$  időpontbeli *látszó helyének* az  $\omega(t)$  valódi forgástengelyre és a  $\mathcal{V}(t)$  valódi tavaszpontra vonatkozó *geocentrikus valódi égi egyenlítői* koordinátáit, ahol a csillagot a Föld tömegközéppontjába (a *geocentrumba*) képzelt észlelő a  $t$  időpontban látná (a légkör nélkül). Ezek a koordináták (a csillag mérés kori látszó helyének a koordinátái) azok, amiket kozmikus geodéziai feladataink megoldása során a mérés kori *ismert csillagkoordinátáknak* tekintünk.

Valójában a méréseinket (a csillagészleléseket) a (forgó) Föld felszínén, a forgástengelyhez viszonyítva általában „külponos” helyzetben, a Föld légkörén keresztül végezzük. Az így kapott **mérési eredményeket** az említett hatásokat számba vevő javításokkal ellátva alakítjuk át úgy, mintha a *Föld tömegközéppontjából* (a geocentrumból) *mértünk volna* (forgás és légkör nélkül) a *csillag látszó helyére*. Ennek érdekében a mérési eredményekhez hozzáadjuk a *napi*(forgási) *parallaxis*, a *napi* (forgási) *aberráció* és a *csillagászati refrakció* hatását kiküszöbölő javításokat. Az így átszámított mérési eredményekkel és az észlelt csillag látszólagos helyének koordinátaival tudjuk hely- és időmeghatározási feladatainkat megoldani.