

Csillagászati észlelés gyakorlat I.

2. óra: Távolságmérés

Hajdu Tamás & Skobrák Tibor & Perger Krisztina & Bögner Rebeka

2017. szeptember 28.

A csillagászok egyik legnagyobb problémája a csillagászati objektumok távolságának meghatározása. Miért fontos ez? Mert nem mindegy, hogy egy adott objektum fényes, vagy csak közeli. A világűrben nem helyezhetünk ki méterrudakat, hogy lemérjük 2 égitest távolságát. Más módszereket kell alkalmazni.

Csoportjaik:

- Geometriai módszerek (standard vonalzó: ha ismerem a bázisvonal hosszát, és megmérem, mekkora szög alatt látszik az objektum, megkapom a távolságát)
- Fotometriai módszerek (standard gyertya: ha ismerem a valódi fényességét, és megmérem a látszó fényességét, megkapom a távolságát)
- a kettő kombinációi

1. Trigonometriai parallaxis

Az élőlények zöme ezt a módszert használja. A két szemünk által meghatározott vezérsugarak által bezárt szög adja meg a tárgy távolságát. Minél kisebb a szög, annál messzebb van az adott tárgy tőlünk. A bázisvonal itt a két szem egymástól való távolsága.

A Föld Nap körüli keringése miatt a közeli, Naprendszeren kívüli égitesteket szintén más és más irányból látjuk. Ez a jelenség az évi parallaxis. Egy csillag évi parallaxisa az a szög, mely alatt a körnek feltételezett földpálya sugara merőleges rálátás alatt látszik.

Legyen a Föld pályájának sugara a (jó közelítés a körpálya, mivel a pálya excentricitása mindössze 0,0167), a C csillagtól mért távolsága pedig Δ . Az ábrán látható derékszögű háromszögre felírható:

$$\tan \pi = \frac{a}{\Delta} \quad (1)$$

Mivel a legközelebbi csillag évi parallaxisa is kisebb, mint $1''$, ezért használhatjuk a következő közelítést (átváltás a CSE és a szögmásodperc között: $360 \cdot 60 \cdot 60 / 2\pi \approx 206265$):

$$\pi = \frac{a}{\Delta} \quad (2)$$

Ha a szöget ívmásodpercben adjuk meg és csillagászati egységben számolunk:

$$\pi["] = 206265 \cdot \frac{1}{\Delta} \quad (3)$$

Definiáljunk egy új távolságegységet, a parszeket (pc):

$$1pc = 206265CSE$$

Ekkor:

$$\pi = \frac{1}{\Delta[pc]} \quad (4)$$

A parszek másik, az előbbivel egyenértékű definíciója: „egy parszek távolságban van a Naprendszerrel az az égitest, melyről merőleges rálátás esetén a Nap-Föld átlagos távolság 1" szög alatt látszik”.

1.1. Feladat

A Sirius évi parallaxisa 0,37". Milyen távol van a csillag, CSE-ben?

$$\pi = \frac{a}{\Delta} = \frac{1CSE}{\Delta} = 0,37''$$
$$\Delta = 2,7pc$$

$$\Delta[CSE] = \Delta[pc] \cdot 206265$$

$$\Delta = 557473CSE$$

1.2. Feladat

A HIPPARCOS műhold feladata az volt, hogy a csillagok paramétereit 2-4 mas pontossággal meghatározza. Legfeljebb milyen távolságra levő csillagok parallaxisát tudta kimérni?

$$\pi = \frac{a}{\Delta}$$
$$\pi_1 = \frac{1CSE}{\Delta_{1,max}} = 0,002''$$
$$\pi_2 = \frac{1CSE}{\Delta_{2,max}} = 0,004''$$
$$\Delta_{1,max} = 500pc$$
$$\Delta_{2,max} = 250pc$$

2. Magnitúdóskála, Pogson-képlet

A csillagok fényességének csillagászati mértéke a magnitúdó. A magnitúdó-skála Hipparkhosztól ered, aki i.e. kb. 129-ben elkezdte a csillagokat fényességük szerint osztályozni. Maga a magnitúdó nagyságrendet jelent. Az elsőrendű csillagok voltak a legfényesebbek, a hatodrendűek a leghalványabbak.

A távcsövek megjelenésével viszont egyre nagyobb rendek jelentek meg, míg várható módon a rendszer összeomlott. Egységesíteni kellett. Végül 1856-ban egy oxfordi csillagász, Norman Pogson javasolta, hogy a csillag által kisugárzott fény mennyiség alapján kell a magnitúdót definiálni. A skála nullpontjához referenciacsillagokat választottak ki, az elsőrendű referencia a Vega (0^m) volt.

A fényesség fizikai mértéke a sugárzási fluxus. Ez energia/idő/felület = teljesítmény/felület dimenziójú. A magnitúdóskála és a fluxus közti kapcsolatot adja meg a Pogson-képlet:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \cdot \log \left(\frac{F_1}{F_2} \right) \quad (5)$$

Egy tetszőleges csillag fényessége így kiszámítható egy standard csillag fényességének segítségével:

$$m - \overbrace{m_{Vega}}^{0^m} = -2.5 \cdot \log \left(\frac{F}{F_{Vega}} \right) \rightarrow m = -2.5 \cdot \log \left(\frac{F}{F_{Vega}} \right) \quad (6)$$

Így visszakapjuk a Hipparkhosz-féle skálát. (5 magnitúdó növekedés 100-szoros fluxuscsökkenést jelent. $\sqrt[5]{100} \approx 2.5$) A skála logaritmikus. Miért? Weber-Frechner-féle pszichofizikai törvény: Az emberi érzékelés (látás, hallás, ...) logaritmikus skálájú.

Az, hogy egy csillagot milyen fényesnek látunk, az függ attól is, hogy milyen messze van tőlünk, így bevezethetünk egy, csak a csillagtól függő magnitúdót, az abszolút magnitúdót. Ez azt mondja meg, hogy 10 parszek távolságra, "üres" téren át milyen magnitúdójúnak (M) látszik az adott csillag.

A hozzánk eljutó fény intenzitása a távolság négyzetével fordítottan arányos. ($I \sim \frac{1}{d^2}$)

Ha ezeket beírjuk a képletbe, akkor egy tőlünk d távolságra lévő csillag abszolút és látszó magnitúdója közti különbség a következő:

$$M - m = -2.5 \cdot \log \left(\frac{\frac{1}{10^2}}{\frac{1}{d^2}} \right) \quad (7)$$

Átalakítva:

$$m - M = 2.5 \cdot \log \left(\left(\frac{d}{10} \right)^2 \right) = 5 \log \left(\frac{d}{10} \right) = 5 \log d - 5 \log 10 = -5 + 5 \log d \quad (8)$$

Ebből a távolság megkapható [parszekben]:

$$d = 10^{\frac{m-M+5}{5}} \quad (9)$$

2.1. Feladat

Az RR Lyrae csillagokra jellemző abszolút fényesség értéke 0^{mag} . Ha az Androméda galaxisban kimértünk egy $24,5^{mag}$ -os RR Lyrae-t, akkor milyen messze van a csillag?

$$m - M = -5 + 5 \log(d)$$

$$24,5 = -5 + 5 \log(d)$$

$$29,5 = 5 \log(d)$$

$$5,9 = \log(d)$$

$$d = 794328,23pc$$

3. Többes rendszerek fényessége

A többes rendszerben levő csillagok együttes fényessége összeadódik:

$$F_{sszes} = F_1 + F_2 + \dots + F_n \quad (10)$$

Kettőscsillag esetén a két csillag együttes fényessége az alábbi módon számolandó: Legyen $m_0 = 0^m$ -s csillag, amihez képest viszonyítjuk a csillagokat. Ekkor a két csillagot összehasonlítva a standard csillaggal kapjuk:

$$m_1 - m_0 = m_1 = -2.5 \cdot \log\left(\frac{F_1}{F_0}\right) \quad (11)$$

$$m_2 - m_0 = m_2 = -2.5 \cdot \log\left(\frac{F_2}{F_0}\right) \quad (12)$$

A fluxusarányok a következők lesznek:

$$\frac{F_1}{F_0} = 10^{\frac{m_1}{-2.5}} \quad (13)$$

$$\frac{F_2}{F_0} = 10^{\frac{m_2}{-2.5}} \quad (14)$$

Ha ezeket összeadva behelyettesítünk az alapképletünkbe, akkor megkapjuk, hogy a kettős rendszerről mennyire fényes egy 0^m -s csillaghoz képest.

A teljes fluxus:

$$F_{1+2} = F_1 + F_2 \quad (15)$$

A kettős fényessége:

$$m_{1+2} - m_0 = m_{1+2} = m_{1+2} - 2,5 \cdot \log f_{1+2} = -2,5 \cdot \log\left(10^{-\frac{m_1}{2.5}} + 10^{-\frac{m_2}{2.5}}\right) \quad (16)$$

3.1. Feladat

A γ And kettős tagjainak fényességei rendre $2,28^{mag}$ és $5,08^{mag}$. Határozzuk meg a rendszer összfényességét!

$$F_{összes} = F_1 + F_2 = 10^{-\frac{m_1}{2,5}} + 10^{-\frac{m_2}{2,5}} = 10^{-\frac{2,28}{2,5}} + 10^{-\frac{5,08}{2,5}} = 0,1318$$
$$m_{összes} = -2,5 \cdot \log F_{összes} = -2,5 \cdot \log 0,1318$$
$$m_{összes} = 2,2^{mag}$$

4. Cefeida-parallaxis

Néhány csillag abszolút fényességét közvetlenül meg tudjuk határozni: ilyenek a már említett RR Lyrae és a δ Cephei típusú változócsillagok. Ezekre a csillagokra létezik periódus-fényesség reláció: a fényváltozás periódusának ismeretében meghatározható az abszolút fényesség, a látszó fényesség mérésével pedig megkaphatjuk a távolságot.

A periódus-fényesség reláció általános alakja:

$$M_V = B \cdot \log P + C \quad (17)$$

Itt M_V az abszolút fényesség, P a fényváltozás periódusa, B és C az adott változótípusra jellemző konstansok.

4.1. Feladat

Fotometriai méréseket végzünk, kiválasztjuk a klasszikus cefeida változókat a mintából. Meghatározzuk az egyik periódusát, amire $6,25$ napot kapunk, látszó fényessége pedig 7 magnitúdó a Johnson V sávban. Mekkora a távolsága?

$$M_V = B \cdot \log P + C$$

$B = -1,81$ és $C = 1,43$ (HIPPARCOS mérések kalibrálásával: Feast & Catchpole, 1997)

$$M_V = -2,81 \cdot \log 6,25 + 1,43 = -0,8$$

$$m - M_V = -5 + 5 \log d$$

$$\log d = 0,2(m - M_V) + 1$$

$$d = 10^{0,2(m - M_V + 1)} = 10^{0,2(7 + 0,8 + 1)}$$

$$d = 229,04pc$$

5. Doppler-effektus

Amíg a csillagokat fel lehet bontani (látszanak külön-külön egyesével távcső segítségével), addig jól használható ez a módszer. Tehát még akár a közeli galaxisok távolságát is meg tudjuk ezzel határozni.

Viszont, ha már a galaxis annyira távol van, hogy a benne lévő csillagok összemosódnak, akkor ez a módszer már nem használható.

Hubble óta tudjuk, hogy a galaxisok távolodnak egymástól. Ezt a galaxisok vöröseltolódásából lehetett kitalálni. A távolodás sebessége viszont függ a távolságuktól.

$$v = H \cdot d \quad (18)$$

ahol $H = 72 \text{ km/s/Mpc}$.

A laboratóriumban előállított spektrumok alapján tudjuk, hogy melyik spektrumvonalnak hol kell lennie. Amennyiben a spektrumvonalak a rövidebb hullámhossz felé tolódnak el, akkor kékebbnek, ha a hosszabb hullámhossz felé tolódnak el, akkor vörösebbnek "látszik" az objektum. A spektrumvonalak eltolódása arányos a sebességgel és az eredeti hullámhosszal.

$$\Delta\lambda \sim v \cdot \lambda \rightarrow \Delta\lambda = \frac{v \cdot \lambda}{c} \quad (19)$$

Tehát egy adott sebességgel távolodó galaxis vöröseltolódásának mértéke:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \quad (20)$$

ahol $\Delta\lambda = \lambda_{\text{észlelt}} - \lambda$, és λ az adott spektrumvonal „eredeti”, laboratóriumi hullámhossza.

Az egyik legtávolabbi galaxisra $z \approx 6$, a kozmikus mikrohullámú háttérre $z \approx 1089$.

Ibolya	380 - 420
Kék	420 - 490
Zöld	490 - 575
Sárga	575 - 585
Narancs	585 - 650
Vörös	650 - 750

A $z = 1$ -et meghaladó vöröseltolódás értékek nem a fénysebesség átlépését jelentik. Ekkor már kozmológiai vöröseltolódásról beszélünk (a galaxisok közötti tér is megnyúlik, ezáltal a fény hullámhossza még „vörösebb lesz”).

5.1. Feladat

Egy útkereszteződésnél egy rendőr figyeli a szabálytalankodókat. Hirtelen egy autós suhan el a piros lámpánál. Rövid időn belül a rendőr utolérte és megkérdezte, hogy miért ment át a piroson. A sofőr azt állította, hogy ő zöldnek látta. Mekkora sebességgel hajthatott az autós? (Segítség: a vörös fény 650-750 nm, a zöld 490-575 nm)

$$z = \frac{530 - 700}{700} = -0,24 \quad (21)$$

(Tehát ebben az esetben kékeltolódásról beszélünk.)

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot c \quad (22)$$

$$v \approx \frac{1}{4}c \quad (23)$$

6. Házi feladatok

1. Van egy kvazár tőlünk $z \approx 6$ -ra. Számoljuk ki, hogy a $H\alpha$ vonal mennyire van eltolódva, és milyen messze lehet tőlünk? ($H\alpha = 656.28$ nm)
2. A Proxima Centauri tőlünk 1,302 pc-re van. Mekkora szög alatt látszódik a Föld-Nap távolság onnan?
3. A Proxima Centauri abszolút magnitúdója $M = 15.6^m$. Számold ki a látszó fényességét!