Csillagászati észlelés gyakorlat I.
2. óra: Távolságmérés

Hajdu Tamás & Császár Anna & Perger Krisztina & Bőgner Rebeka

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

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
- Egyebek (pl. Hubble-törvény)

1. Trigonometriai parallaxis

A legtöbb élőlény a parallaxis módszerét alkalmazza a távolságmeghatározásra: a két szem által meghatározott vezérsugarak által bezárt szög adja meg a tárgy távolságát. Minél kisebb ez a szög, a távolság annál jelentősebb. A pontos távolságmeghatározáshoz szükséges a bázisvonalak hosszának (pl. a két szem távolságának) ismerete.

A trigonometrikus éves parallaxis a Föld Nap körüli éves keringésén alapszik: feltesszük, hogy a Föld pályája közel kör alakú (valójában csak nagyon kicsit tér el attól, excentricitása 0,0167). A Naprendszeren kívüli égitesteket a Föld éves mozgása során más és más helyeken láthatjuk (egy, az éggömbre vetített ellipszist írnak le). Ez a szög annyira kicsi, hogy nagyon sokáig lehetetlen volt ezt kimutatni. Még ma is nagy kihívást jelent a csillagászoknak, hogy kellően pontosan meg tudják mérni.

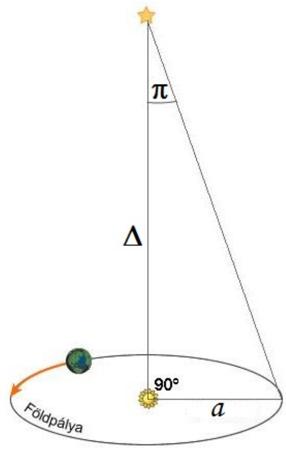
A Föld Nap körüli keringése miatt a közeli, Naprendszeren kívüli égitesteket szintén más és más irányból látjuk. Ez a jelenség az évi parallaxis. Egy csillag évi parallaxisa az a szög, mely alatt a körnek feltételezett földpálya sugara merőleges rálátás alatt látszik.

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:

$$\tan \pi = \frac{a}{\Delta} \tag{1}$$

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

$$\pi = \frac{a}{\Delta} \tag{2}$$



Forrás: http://www.konkoly.hu

Ha a szöget ívmásodpercben adjuk meg és csillagászati egységben számolunk:

$$\pi[''] = 206265 \cdot \frac{1}{\Delta} \tag{3}$$

Definiáljunk egy új távolságegységet, a parszeket (pc):

$$1pc = 206265CSE$$

Ekkor:

$$\pi = \frac{1}{\Delta[pc]} \tag{4}$$

A parszek másik, az előbbivel egyenértékű definíciója: „egy parszek távolságban van a Naprendszertől 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 fénymennyiség 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:

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

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

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

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 ($I \sim \frac{1}{d^2}$). Ezért a luminozitás (energia/idő) és a fluxus (energia/idő/felület) közötti kapcsolat:

$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$

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

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

Átalakítva:

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

Ebből a távolság megkapható [parszekben]:

$$d = 10^{\frac{m-M+5}{5}} \tag{9}$$

Megjegyzés: M-hez tartozó luminozitás értéke:$L = \frac{F}{4\pi(10pc)^2}$

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:

$$F_{összes} = F_1 + F_2 + ... + F_n \tag{10}$$

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:

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

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

A fluxusarányok a következők lesznek:

$$\frac{F_1}{F_0} = 10^{\frac{m_1}{-2.5}} \tag{13}$$

$$\frac{F_2}{F_0} = 10^{\frac{m_2}{-2.5}} \tag{14}$$

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

A teljes fluxus:

$$F_{1+2} = F_1 + F_2 \tag{15}$$

A kettős fényessége:

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

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:

$$M_V = B \cdot \log P + C \tag{17}$$

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?

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

$B = -2,81$ és $C = -1,43$ ha P-t napokban mérjük (HIPPARCOS mérések kalibrálásával: Feast & Catchpole, 1997)

$$M_V = -2,81 \cdot \log 6,25 - 1,43 = -3,67$$
$$m - M_V = -5 + 5 \log d$$
$$\log d = 0,2(m - M_V) + 1$$
$$d = 10^{0,2(m-M_V)+1} = 10^{0,2(7+3,67)+1}$$
$$d = 1359,2pc$$

5. Doppler-effektus és a Hubble-törvény

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.

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. Azaz a Doppler-effektussal egy test radiális sebességét tudjuk megállapítani.

$$\Delta\lambda \sim v \cdot \lambda \rightarrow \Delta\lambda = \frac{v \cdot \lambda}{c} \tag{18}$$

Tehát egy adott sebességgel távolodó galaxis vöröseltolódásának mértéke:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \tag{19}$$

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

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

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)

$$z = \frac{530 - 700}{700} = -0,24 \tag{20}$$

(Tehát ebben az esetben kékeltolódásról beszélünk.)

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot c \tag{21}$$

$$v \approx \frac{1}{4}c \tag{22}$$

Hubble a galaxisok sebessége és távolsága között egyenes arányosságot talált. Azaz minél messzebb van egy galaxis, annál nagyobb a radiális sebessége, mely tőlünk távolodó irányba mutat. Ezt a galaxisok vöröseltolódásából lehetett kitalálni. Ez az összefüggés csak a gravitációsan nem kötött esetben érvényes, azaz az Andromédára például nem igaz. Ahhoz, hogy ezt az összefüggést ki lehessen mutatni, valamilyen más módszerrel először meg kell mérni sok galaxis távolságát.

$$v = H \cdot d \tag{23}$$

ahol $H = 72 km/s/Mpc$.

6. Egyéb standard gyertya elven működő módszerek

- Spektroszkópiai parallaxis (csillag színképe $\rightarrow$ HRD-n elfoglalt helye alapján)
- Ia típusú szupernóva mérések ($M \sim \Delta m_{15}$)
- Tully-Fisher reláció (L $\sim$ spektrumvonalak félértékszélessége)
- Faber-Jackson reláció (elliptipkus galaxisokra $L \sim \sigma^4$)

7. Házi feladatok

1. Van egy kvazár tőlünk $z \approx 6$-ra. Számoljuk ki, hogy a Hα vonal mennyire van eltolódva, és milyen messze lehet tőlünk? (Hα = 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!