Athletica Galactica csillagászati szakkör

tanári segédlet és példatár
2025

5. Asztrofizika, galaktikus és extragalaktikus csillagászat

Kulcsszavak:
Asztrofizika: Csillagok sugárzása: elektromágneses spektrum, feketetest-sugárzás, emisszivitás, albedó, Wien-féle eltolódási törvény, Stefan–Boltzmann-törvény, fluxus, luminozitás, napállandó. Magnitúdó, csillagok látszó és abszolút fényessége, távolságmodulus, színindex. A csillagfejlődés főbb állomásai, a Hertzsprung–Russell-diagram (HRD) tömeg-fényesség reláció, csillagok fősorozati élettartama. A csillagok energiatermelése (fúzió, proton-proton ciklus). A csillagok végállapotai (fehér törpék, neutroncsillagok, fekete lyukak), Schwarzschild-sugár. Spektroszkópia: színképvonalak, abszorpció, emisszió, vöröseltolódás, nem relativisztikus Doppler-effektus. Csillagok színképtípusai, effektív hőmérséklet. Fedési és spektroszkópiai kettőscsillagok. Radiális sebesség. Exobolygók detektálási módszerei.
Galaktikus és extragalaktikus csillagászat: Csillaghalmazok (nyílt- és gömbhalmazok, HRD). Galaxisok típusai. Hubble–Lemaître-törvény, extragalaktikus távolságmérés.

1. Szükséges fizikai ismeretek

- **Termodinamika alapjai** (állapotjelzők, ideális gáztörvények, I. és II. főtétel)
- **Elektromnágneses spektrum**
- **Atomfizika alapjai** (Bohr-modell, színképvonalak keletkezése)
- **Feketetest-sugárzás**
- **Magfizika alapjai**

Mindez összegyűjtve megtalálható *Dálya Gergely: Bevezetés a csillagászatba* c. könyvének 2. fejezetében (49-86. oldal) is!)

2. Kapcsolódó csillagászati ismeretek

2.1. További ajánlott fejezetek *Dálya Gergely: Bevezetés a csillagászatba* c. könyvéből

5. Csillagok

A 237-285. oldal között: *Csillagfejlődés. A csillagok jellemzői.*

6. Naprendszer és exobolygók

A 420-442. oldal között: *Exobolygók.*

7. Csillagrendszerek

A 443-478. oldal között: *Kettőscsillagok. Csillaghalmazok. Galaxisok. A Tejútrendszer.*

8. Kozmológia és extragalaktikus csillagászat

A 489-492. és 523-527 oldal között: *A táguló Világegyetem és Hubble törvénye. A kozmikus távolságlétra.*

2.2. További ajánlott források

SZTE Csillagászat tananyag, Csillagfejlődés fejezet:
`https://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/7_Csillagfejlodes/csillagfejlodes.htm`

SZTE Csillagászat tananyag, Galaktikus csillagászat, a kozmológia alapjai fejezet:
`https://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/8_Galaktikus_csillagaszat/galaktikus_csillagaszat_indito.html`

Gróf Andrea: Csillagászati feladatok a középiskolai fizika fejezeteihez (online feladatgyűjtemény, **8. fejezet**):
`http://fiztan.phd.elte.hu/files/kiadvanyok/Csillagaszati_feladatok.pdf`

3. Példatár

3.1. Wien-törvény alkalmazása

Számítsuk ki a következő csillagok luminozitását, és hogy milyen hullámhosszon a legintenzívebb a sugárzásuk!

- Nap ($T_\odot = 5780$ K)
- Betelgeuse ($R_B = 1000\ R_\odot,\ T_B = 3500$ K)
- Sirius A ($R_{SA} = 1{,}711\ R_\odot,\ T_{SA} = 9940$ K)
- Sirius B ($R_{SB} = 0{,}0084\ R_\odot,\ T_{SB} = 25200$ K)

Megoldás

A legintenzívebb sugárzáshoz tartozó hullámhosszat (λ_{max}) a Wien-féle eltolódási törvényből számolhatjuk:

$$\lambda_{\mathrm{max}} T = 3 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{mK}, \tag{1}$$

ahol T a forrás hőmérséklete kelvinben.

Innen a λ_{max}-ra rendezve kapjuk az alábbi eredményeket:
$\boldsymbol{\lambda_{\mathrm{max},\odot} = 519}$ **nm**
$\boldsymbol{\lambda_{\mathrm{max,Bet}} = 857}$ **nm**
$\boldsymbol{\lambda_{\mathrm{max,SA}} = 302}$ **nm**
$\boldsymbol{\lambda_{\mathrm{max,SB}} = 119}$ **nm**

A luminozitásokat a Stefan–Boltzman-törvény alapján számolhatjuk:

$$L = A\sigma T^4 = 4\pi R^2 \sigma T^4, \tag{2}$$

ahol A a forrás felülete, R a gömb alakú forrás (pl. csillag) sugara, $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K^4}}$ a Stefan–Boltzman-állandó.

Innen az adatokat beírva kapjuk az eredményeket:
$\boldsymbol{L_\odot = 3{,}85 \cdot 10^{26}}$ **W**
$\boldsymbol{L_{\mathrm{Bet}} = 5{,}18 \cdot 10^{31}}$ **W**
$\boldsymbol{L_{\mathrm{SA}} = 9{,}86 \cdot 10^{27}}$ **W**
$\boldsymbol{L_{\mathrm{SB}} = 9{,}82 \cdot 10^{24}}$ **W**

3.2. Szemünkbe érkező sugárzásmennyiség

A $\boldsymbol{\lambda = 600}$ nm hullámhosszúságú, narancssárga fényt az ember szabad szemmel csak akkor képes érzékelni, ha a retinát legalább $\boldsymbol{P = 1{,}7 \cdot 10^{-18}}$ W teljesítményű sugárzás éri. Hány foton érkezik ilyenkor másodpercenként a retinához? Mekkora a másodpercenként beérkező fotonok összimpulzusa?

Megoldás

Ahogy a feladat írja, az emberi szem csak akkor érzékeli az adott $\boldsymbol{\lambda}$ hosszúságú narancssárga fényt, ha adott $\boldsymbol{P}$ teljesítmény halad át rajta 1 másodperc alatt. Az érzékeléshez szükséges energia tehát:

$$\boldsymbol{E = P\Delta t = P \cdot 1\ \mathrm{s} = 1{,}7 \cdot 10^{18}\ \mathrm{J}} \tag{3}$$

Másodpercenként $\boldsymbol{n}$ darab foton érkezik a retinához. Írjuk fel $\boldsymbol{n}$ darab $\boldsymbol{\lambda}$ hullámhosszú foton energiáját:

$$\boldsymbol{E = n \cdot h\frac{c}{\lambda}}, \tag{4}$$

ahol $\boldsymbol{h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}}$ J·s a Planck-állandó, $\boldsymbol{c = 3 \cdot 10^{8}}$ m/s pedig a fénysebesség.

Ezeket egyenlővé téve és rendezve a fotonok számára azt kapjuk, hogy:

$$\boldsymbol{n = 1{,}7 \cdot 10^{18}\ \mathrm{J}\ \frac{600\ \mathrm{nm}}{hc} = 5{,}13} \tag{5}$$

Tehát, legalább **6 fotonra** van szükség másodpercenként ahhoz, hogy a szem érzékelje azt.

3.3. A Föld egyensúlyi hőmérséklete

Számítsuk ki, hogy mennyi lenne a Föld hőmérséklete, ha nem lenne légköre! A Föld albedója: $\boldsymbol{A_{\mathrm{F}} = 0{,}367}$. Az emisszivitás az infravörös hullámhosszakon jó közelítéssel 1.

Megoldás

A Napból származó energiának a Föld által elnyelt hányadát úgy írhatjuk fel, ha a Stefan–Boltzmann-törvényből kiszámított luminozitást megszorozzuk a Föld keresztmetszetének felületével, elosztjuk az 1 CSE sugarú gömb felületével, végül megszorozzuk $\boldsymbol{(1 - A_{\text{Föld}})}$-del. Képlettel:

$$\boldsymbol{L_{\mathrm{be}} = 4R_{\odot}\pi\sigma T_{\mathrm{eff}}^4\,\frac{r_{\text{Föld}}^2\pi}{4d^2\pi}(1 - A_{\text{Föld}})} \tag{6}$$

A Föld által kisugárzott luminozitás pedig (mivel $\boldsymbol{\varepsilon = 1}$):

$$\boldsymbol{L_{\mathrm{ki}} = 4r_{\text{Föld}}^2\pi\sigma T_{\text{Föld}}^4} \tag{7}$$

A hőmérsékleti egyensúly feltétele: $\boldsymbol{L_{\mathrm{be}} = L_{\mathrm{ki}}}$, beírva a két tagot és átrendezve:

$$\boldsymbol{T_{\text{Föld}} = T_{\mathrm{eff}}\,(1 - A_{\text{Föld}})^{1/4}\sqrt{\frac{R_{\odot}}{2d}}} \tag{8}$$

Látjuk, hogy a bolygó sugara kiesett, így ettől nem függ a bolygók egyensúlyi hőmérséklete. Földre kapott érték: $\boldsymbol{T_{\text{Föld}}}$=**248 K** = **-25 °C,** tehát ha a légkör hatását nem vesszük figyelembe, *bolygónk nem esne a "lakhatósági zónába"*.

3.4. Csillagok sugárzása 1.

Két, pontosan egyforma látszó fényességű csillag igen nagy távolságban van tőlünk, és a Földről mindkettő 5 magnitúdósnak látszik. Milyen fényességűnek látnánk a kettőt együtt, azaz ha olyan közel kerülnének egymáshoz, hogy tőlünk egyetlen csillagnak látszódnának?

Megoldás

A magnitúdó definíciója: $\boldsymbol{m = -2{,}5 \cdot log(F/F_0)}$, ahol $\boldsymbol{F}$ az észlelt fluxus, $\boldsymbol{F_0}$ pedig egy referenciafluxus. Két forrás összfényességének kiszámításakor a fluxusok adódnak össze, nem a magnitúdók, így az eredő magnitúdó értéke:
$\boldsymbol{m_{ssz} = -2{,}5 \cdot log(F_1/F_0 + F_2/F_0)}$, ami az eredeti fényességekből (5 magnitúdó) kiszámolva **4,25 magnitúdónak** adódik.

3.5. Csillagok sugárzása 2.

a) Mekkora átmérőjű távcsőre lenne szükségünk, hogy szabad szemmel láthassunk vele egy +18 magnitúdójú csillagot? (*A sötéthez szokott emberi szem pupillaátmérőjét vegyük 6 mm-nek, a szabad szemmel még éppen érzékelhető csillagok fényessége pedig legyen +6 magnitúdó.*)
b) Milyen halvány csillagokat lehet még detektálni ugyanezzel a távcsővel, ha egy CCD-kamerát teszünk rá, amellyel maximum 15 perces expozíciójú felvételeket tudunk készíteni? (*Vegyük a szemünk integrációs idejét 6 másodpercnek, a kamera kvantumhatásfokát 100%-nak*).

Megoldás

a)

Mivel a definíció szerint 100-szoros intenzitásarány 5 magnitúdó fényességkülönbségnek felel meg, ezért a 12 magnitúdó fényességkülönbségnek megfelelő intenzitásarány:

$$\frac{I_1}{I_2} = 100^{0{,}2\cdot 12} \approx 6{,}3\cdot 10^4$$

A D átmérőjű távcsőnek tehát 63 000-szer több fényt kell összegyűjtenie, mint amennyit a d átmérőjű pupillánk képes. Mivel a távcsövek – és a kör alakúnak tekintett emberi pupilla – fénygyűjtő képessége az átmérő négyzetével arányos, ezért a keresett D átmérőre:

$$\frac{D^2}{d^2} = 6{,}3\cdot 10^4 \rightarrow D = \sqrt{6{,}3\cdot 10^4\, d^2}$$

Az adatokkal:

$$D = \sqrt{6{,}3\cdot 10^4\cdot (6\,\mathrm{mm})^2} \approx 1500\,\mathrm{mm} = 1{,}5\,\mathrm{m}$$

b)

Ebben az esetben a fénygyűjtő felületek arányán túl az integrációs idők arányát is figyelembe kell venni:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{D^2}{d^2}\cdot\frac{t_1}{t_2} = 63000\cdot\frac{15\cdot 60s}{6s} = 9,45\cdot 10^6$$

Az előző gondolatmenet alapján a keresett fényességkülönbség: $100^{0,2\cdot\Delta m} = 9{,}45\cdot 10^6$, ebből $\Delta m = 17{,}4$; azaz $6 + 17{,}4 = 23{,}4$ magnitúdós csillagokat is tudunk így detektálni.

3.6. Csillagok sugárzása 3.

Határozzuk meg a Deneb ($\boldsymbol{m} = 1{,}25^{\boldsymbol{m}}$, $\boldsymbol{\pi} = \mathbf{2.29}$ mas) luminozitását, ha tudjuk, hogy a Nap luminozitása $3{,}846\ \mathbf{\cdot 10^{26}\ W}$, abszolút fényessége pedig $4{,}83^{\boldsymbol{m}}$!

Megoldás

Első lépésben határozzuk meg a Deneb abszolút fényességét ($\boldsymbol{M}$) a távolság modulus képletével:

$$\boldsymbol{m - M = 5\cdot \log_{10} d - 5,} \tag{9}$$

ahol $\boldsymbol{m}$ a látszó fényesség, $\boldsymbol{d}$ pedig a távolság parszekben mérve.

Átalakítva:

$$\boldsymbol{M = m + 5 - 5 \cdot \log_{10} d} \tag{10}$$

Emellett ismert, hogy a $\boldsymbol{\pi}$ parallaxisszög ismeretében a távolság:

$$\boldsymbol{d[pc] = \frac{1}{\pi['']}} \tag{11}$$

Ezt beírva az $\boldsymbol{M}$-et megadó képletbe:

$$\boldsymbol{M = m + 5 - 5 \cdot \log_{10} \frac{1}{\pi}} \tag{12}$$

Ismert, hogy $\boldsymbol{m = 1{,}25}$ és $\boldsymbol{\pi = 2{,}29\ \mathrm{mas} = 0{,}00229''}$. Ezeket beírva kapjuk az abszolút magnitudót:

$$\boldsymbol{M_D = -6{,}95} \tag{13}$$

Innen a luminozitást a Pogson-képlet segítségével kaphatjuk:

$$\boldsymbol{M_D - M_\odot = -2{,}5 \cdot \log_{10} \frac{L_D}{L_\odot}} \tag{14}$$

Átrendezve kapjuk, hogy:

$$\boldsymbol{L_D = L_\odot \cdot 10^{-0{,}4\cdot(M_D - M_\odot)} = L_\odot \cdot 10^{4{,}71} = 51\,523 \cdot L_\odot} \tag{15}$$

Beírva a Nap luminozitását ($\boldsymbol{L_\odot = 3{,}846 \cdot 10^{26}}$ W):

$$\boldsymbol{L_D = 1{,}98 \cdot 10^{31}\ \mathrm{W}} \tag{16}$$

3.7. Szupernóva-robbanás és neutroncsillag tulajdonságai

A Földtől 250 parszekre lévő, Geminga nevű pulzár (vagyis egy nagyon nagy sebességgel forgó neutroncsillag) egy nagy tömegű csillag magjának gravitációs összeomlása, azaz egy szupernóva-robbanás során jött létre. A robbanásra a becslések szerint kb. 300 ezer évvel ezelőtt kerülhetett sor.

a) Ha éltek volna akkoriban csillagászok a Földön, mekkora látszó fényességűnek mérhették volna a maximális fényesség idején a felbukkanó, „új csillagot”? (A szupernóva-robbanás látható tartományban vett, maximális abszolút fényességét vegyük -17,0 magnitúdónak.) Látszódhatott-e a szupernóva a nappali égen is?

b) A röntgen- és gammatartományban rögzített mérések alapján a Geminga forgási periódusa (a többi pulzáréhoz hasonlóan) rendkívül rövid, mindössze 273 milliszekundum. Milyen fizikai alapelvvel lehet magyarázni ennek a rendkívül gyors forgásnak a meglétét? (Tegyük fel, hogy a csillagmag neutroncsillaggá való összeomlása során a tömege nem változik.)

c) Feltéve, hogy a Gemingát egy „átlagos” neutroncsillag paraméterei jellemzik (tömege legyen 1,5 naptömeg, sugara 20 km), mostani térfogatának hány százalékára kellene „összepréselni”, hogy fekete lyuk váljon belőle?

d) A feltevések szerint részben a Gemingát létrehozó szupernóva-robbanás okozta a Naprendszert is magában foglaló, a környezeténél csillagközi anyagban kicsit ritkább térrész, a Lokális Buborék kialakulását is. A Lokális Buborékban a csillagközi gázt alkotó részecskék koncentrációja átlagosan 0,1 atom köbcentiméterenként. Egy ilyen részecskesűrűségű gázból kiemelve egy Föld méretű gömböt, mekkora lesz annak tömege? (Az egyszerűség kedvéért a csillagközi gáz anyagát vegyük tisztán atomos hidrogéngáznak).

Megoldás

a)

A Geminga távolsága parszekben: d = 250 pc

A távolságmodulus alapján a látszó fényesség: $m = M - 5 + 5 \cdot \log d = -10{,}0\, mag$

Mivel ez csaknem a telehold látszó fényessége, látszódott a nappali égen is.

b)

Az impulzusmomentum (perdület) megmaradása: $MR^2 \omega = áll.$

Ha a csillagmag sugara állandó tömegnél az ezerszeresére csökken, akkor a forgási szögsebesség egymilliószorosára nő!

c)

Fekete lyuk esetén a sugár: $R' = R_{BH} = \frac{2\gamma M}{c^2}$

Ez 1,5 naptömeg esetén: R' = 4,45 km .

Vagyis: $\frac{V'}{V} = \left(\frac{R'}{R}\right)^3 = \left(\frac{4{,}45\,km}{20\,km}\right)^3 = 0{,}01$

d)

A közeg sűrűsége a koncentráció és a H-atommag tömegének szorzata: $\rho = 10^5 \frac{1}{m^3} \cdot 1{,}67 \cdot 10^{-27}\, kg = 1{,}67 \cdot 10^{-22} \frac{kg}{m^3}$

Innen a keresett tömeg: $M = \frac{4}{3} R_F^3 \pi \cdot \rho = 0{,}18\, kg$

3.8. Csillaghalmazok 1.

Két hipotetikus csillaghalmaz tőlünk azonos távolságban helyezkedik el. Az egyik 100 db egyforma, egyenként 15 magnitúdó látszó fényességű csillagból, a másik 400 db 17 magnitúdó látszó fényességű csillagból áll. Melyik halmaz látszó összfényessége nagyobb?

Megoldás

Legyen a tőlünk 15 magnitúdó fényességűnek látszó csillagok intenzitása I_{15}, a 17 magnitúdósaké I_{17}. Az adott darabszámú csillag intenzitása egyszerűen szorzódik, így a magnitúdó-formula egymás utáni használatával:

$$I_{15} = 10^{-\frac{15}{2,5}} = 10^{-6},\ I_{17} = 10^{-\frac{17}{2,5}} = 10^{-6,8}$$

$$m_1 = -2{,}5 \cdot log(100 \cdot I_{15}) = 10{,}0 \text{ mag}$$

$m_2 = -2{,}5 \cdot log(400 \cdot I_{17}) = 10{,}5$ mag

Tekintve, hogy a nagyobb magnitúdóérték halványabb fényességet jelent, tehát a négyszer annyi, de egyenként 2-2 magnitúdóval halványabbnak látszó csillagból álló halmaz kb. **fél magnitúdóval kisebb összfényességű**.

3.9. Extragalaktikus csillagászat 1.

A 2017. augusztus 17-én a LIGO és a Virgo berendezések által detektált gravitációs hullámot keltő esemény – két neutroncsillag összeolvadása – a gravitációshullám-mérések és az azokat követő, az elektromágneses színkép minden tartományában elvégzett megfigyelések szerint az NGC 4993 katalógusjelű galaxisban következett be.
a) A Hubble-űrtávcső mérései szerint a galaxis látszó mérete körülbelül 60 ívmásodperc. Határozd meg a galaxis fizikai méretét!
b) Színképi mérések alapján a galaxis távolodási sebessége 3000 km/s. Határozd meg a távolságát! A Hubble-állandó értéke legyen 70 km/s/Mpc!
c) Becsüld meg, hogy az előző részfeladat alapján kb. mekkora hibával tudjuk meghatározni a galaxis távolságát, hogyha a távolodási sebességét ± 250 km/s, a Hubble-állandó értékét pedig ± 2 km/s/Mpc bizonytalansággal ismerjük!

Megoldás

a)

A kicsiny α (radiánban adott) szög alatt látszó, r távolságban lévő galaxis D átmérője:

$$D = r\alpha$$

Az adatokkal:

$$D = 43\,\mathrm{Mpc} \cdot \frac{2\pi}{360} \cdot \frac{60''}{3600''} = 0{,}013\,\mathrm{Mpc} = 13\,\mathrm{kpc} \approx 42\,000 \text{ fényév}$$

b)

Az Univerzum általános tágulása miatt a galaxisok közötti távolság folyamatosan nő, azaz a galaxisok egymástól távolodnak. A Hubble-törvény szerint minél messzebb van tőlünk egy galaxis, annál nagyobb sebességgel távolodik, az arányossági tényező a Hubble-állandó:

$$v = Hr \rightarrow r = \frac{v}{H},$$

ahol H a Hubble-állandó, r a galaxis távolsága, v pedig a távolodási sebessége.

Az adatokkal:

$$r = \frac{3000\,\mathrm{km/s}}{70\,\mathrm{km/s/Mpc}} = 43\,\mathrm{Mpc}$$

c)

A bizonytalanság korrekt értéke a hibaterjedés módszerével határozható meg, de ehelyett a távolság hibája becsülhető a v és H értékek hibával mövelt, illetve csökkentett értékeinek felhasználásával:

$$\Delta r = r' - r = \frac{v + \Delta v}{H - \Delta H} - r = \frac{3250\,\mathrm{km/s}}{68\,\mathrm{km/s/Mpc}} - 43\,\mathrm{Mpc} = 47,8\,\mathrm{Mpc} - 43\,\mathrm{Mpc} = 4,8\,\mathrm{Mpc}$$

3.10. Extragalaktikus csillagászat 2.

Az M58 galaxist észlelve azt tapasztaljuk, hogy az ionizált magnézium színképvonala 2813,26 angströmnél (Å) látható. Ugyanezen vonal laboratóriumi hullámhossza 2799,1 Å. Mekkora a galaxis látóirányú sebessége? Becsüljük meg az M58 távolságát is! Milyen galaxishalmaz tagja lehet ez alapján az M58?

Megoldás

Az észlelt és laboratóriumi hullámhosszakból kiszámíthatjuk a z vöröseltolódást az alábbi képlettel:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}, \tag{17}$$

ahol $\Delta\lambda$ az észlelt és laboratóriumi hullámhosszak különbsége, λ_0 pedig a laboratóriumi hullámhossz, jelen esetben 2799,1 Å.

A hullámhosszkülönbség a megadott adatok alapján $\Delta\lambda$ = 14,16 Å. Így a vöröseltolódásra $z = 0,00506$ adódik.

Innen a $z = v/c$ képlettel kiszámolhatjuk az M58 radiális sebességét, amire az alábbi értéket kapjuk:

$$\mathbf{1517{,}6\,\frac{km}{s}} \tag{18}$$

Innen a galaxis távolságát a Hubble-törvény alapján becsülhetjük meg, miszerint: $v = H \cdot d$, ahol v a galaxis látóirányú sebessége, $H = 67{,}8\,\frac{\mathrm{km/s}}{\mathrm{Mpc}}$ a Hubble állandó, d a galaxis távolsága.

Innen a galaxis távolságára **22,4 Mpc** adódik. Ezen távolság alapján a Virgo-halmaz jöhet szóba mint az M58 halmaza, mivel annak távolsága nagyjából 17 Mpc. És tényleg igaz, az M58 a Virgo-halmaz egyik legfényesebb galaxisa.

3.11. Extragalaktikus csillagászat 3.

Az 1950-es években zajló rádióteleszkópos felmérések során találtak egy olyan objektumot, melyet a későbbi képalkotási felmérések során egy nem-felbontható csillagközi objektumhoz kapcsoltak. Az objektumról később kiderült, hogy több milliárd fényévre van tőlünk, így a csillagászokat egyre jobban érdekelte, vajon milyen objektummal találhatták szembe magukat.
Mivel az objektum nagy távolsága ellenére nagyon fényes volt, első közelítésben többen feltették, hogy egy nagyon nagy luminozitású csillagról lehet szó. Vizsgáljuk meg ezt az Eddington-határluminozitás segítségével!
Az Eddington-határluminozitás az a maximális luminozitás, melyet egy olyan asztrofizikai objektum elérhet, melyben egyensúly van a kifele ható sugárzási nyomás és a befele ható gravitációs erő között (ezt nevezik hidrosztatikai egyensúlynak). Ha a csillag luminozitása meghaladja az Eddington-limitet, a külső burkait egyszerűen lefújja az erős csillagszél, vagyis minden csillagtömeg esetére van egy felső luminozitási határ. Az Eddington-határluminozitás képlete a Nap értékeivel kifejezve:

$$L_{\mathrm{Edd}} = 3.2 \cdot 10^4 \left(\frac{\mathcal{M}}{\mathcal{M}_\odot}\right) L_\odot.$$

Tegyük fel, hogy az objektum egy csillag. Mekkora lenne ekkor a tömege? Valóban csillagról lehet szó? Számítsd ki az objektum Schwarzschild-sugarát! Adatok: $d = 749$ Mpc, $m_V = 12.9$ mg.
Megjegyzés: a kérdéses objektum tényleg létezik, katalógusszáma 3C 273

Megoldás

Első lépésként kiszámítjuk az objektum luminozitását, ehhez a távolságmodulus képletéből kiszámoljuk az abszolút magnitúdóját, majd ezt írjuk be a Pogson-formulába:

$$M_V = m_V + 5 - 5\log_{10} d = -26{,}47^{\mathrm{m}}$$

$$M_V - M_{V,\odot} = -2{,}5\log_{10}\frac{L}{L_\odot}$$

amiből

$$L = 1{,}2 \cdot 10^{39}\mathrm{W}.$$

Ezt visszaírva az Eddington-határ képletébe azt kapjuk a tömegre, hogy

$$\mathcal{M} = \frac{1}{3.2 \cdot 10^4}\left(\frac{L}{L_\odot}\right)\mathcal{M}_\odot \approx 2{,}07 \cdot 10^38 \text{ kg}$$

Ez óriási tömeg, ekkorával csillagok nem rendelkezhetnek, ez egy szupernagy tömegű fekete lyuk tömegének felel meg. Tehát az objektum nem egy csillag, hanem egy óriási fekete lyuk, egy kvazár (nagy tömegű fekete lyuk akkréciós koronggal, utóbbi kisugárzása okozza az objektum hatalmas luminozitását).

A Schwarzschild-sugarat a már korábban ismert formula alapján számolhatjuk:

$$R = \frac{2G\mathcal{M}}{c^2} = 3{,}07 \cdot 10^6 \text{ m}.$$