

## Milyen fényes egy csillag?

Az éjjeli égen néhány ezer villódzó fénypontot látunk. Ezek a csillagok. Szinte mindegyik fényessége eltér egymástól. De valójában milyen fényerővel világítanak? A kérdés felvetése azért fontos, mert minden csillag különböző távolságra van tőlünk, de épp ezért nem lehet korrekt módon meghatározni, hogy melyiküknek, milyen a valódi fényereje – hány fotont sugároz ki másodpercenként.

Az ókori görögök (már korábban volt szó erről), érthető módon a látszó fényesség alapján sorolták a csillagokat különböző fényességi osztályokba. *A csillagok fényességét magnitúdóban fejezzük ki. A jele:  $m$ . Pl.:  $2^m$ .*

A görögök besorolása nem volt pontos, ezért a skálát mindkét irányban – a negatív számok és a nagyobb értékű pozitív számok felé is – ki kellett terjeszteni. Így jöttek létre azok a fényességi osztályok, amelyek a nullát, illetve a negatív fényrend értéket mutatják. Pl.:  $-1^m$ , vagy  $6^m$ .

A csillagászok olyan egységrendszert kerestek, amely a csillagok fényintenzitásának pontos mérése által a legjobban idomul a tradicionális osztályozáshoz. A különböző fényrendeket a szemünkkel érzékeljük, ez az *érzet*, melyet a csillag fényének intenzitása, ez *ingert*, kelt a szemünkben. *A Weber—Fechner-féle pszichofizikai törvény szerint az érzet arányos az inger erősségének logaritmusával.*

*Norman Pogson* (1829-1891) angol csillagász azt találta, hogy a klasszikus osztályozással a legjobb egybeesést akkor kapjuk, ha az alábbi összefüggést használjuk:

$$m = -2.5 \log i + B,$$

$m$  a magnitúdót,  $i$  a csillagról érkező fény erősségét, az intenzitást,  $B$  pedig egy állandót (konstanst) jelöl. A negatív előjel azt mutatja, hogy minél kisebb az intenzitás, annál nagyobb pozitív értékű lesz a magnitúdó számértéke.

Ha két különböző csillagra írjuk ezt fel:

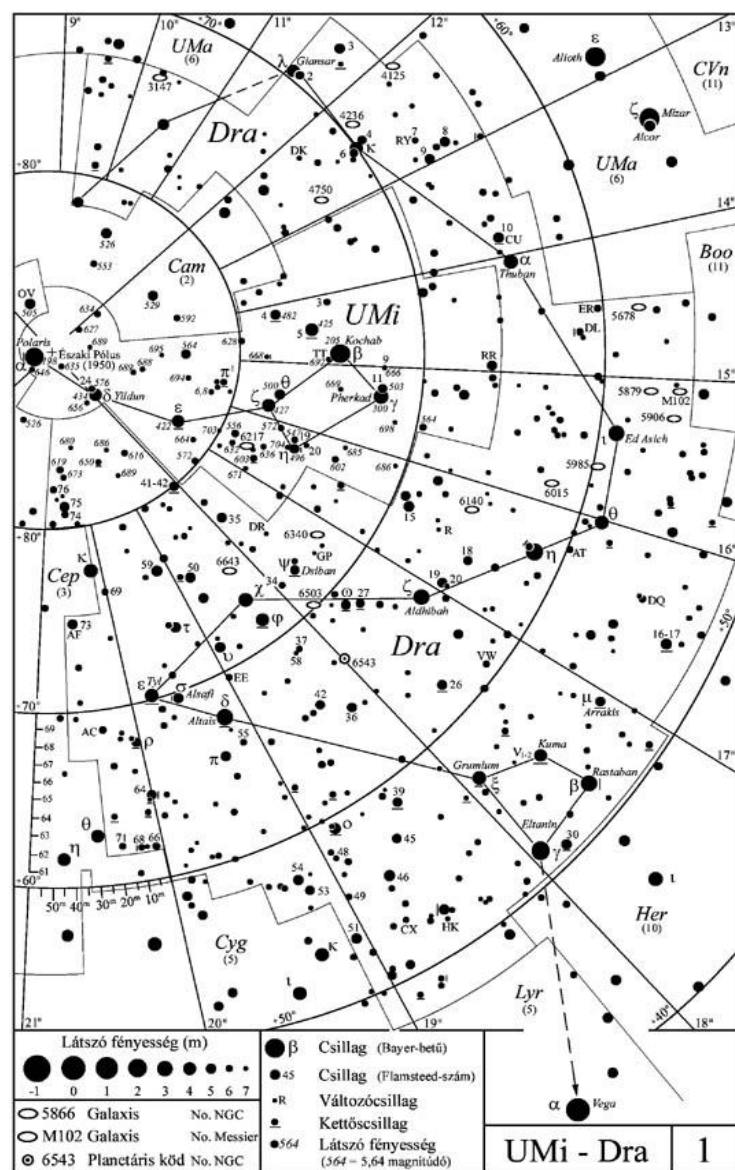
$$m_1 = -2,5 \log i_1 + B,$$

$$m_2 = -2,5 \log i_2 + B.$$

A két egyenletet egymásból kivonva:  $m_1 - m_2 = -2,5 \log i_1/i_2$ , vagy  $i_1/i_2 = 10^{-0,4(m_1 - m_2)}$ . Ebből pedig az következik, hogy, ha  $i_1/i_2 = 2,512$ , akkor  $m_1 - m_2 = 1,0$ . Tehát egy 2 magnitúdós és egy 3 magnitúdós csillag között 2,512-szeres fényerősség különbség van, a 2 magnitúdós javára! Könnyen kiszámítható, hogy az első és a hatodik magnitúdó osztályba tartozó csillagok között 100-szoros fényintenzitás az eltérés. Néhány példa: a Szíriusz látszó fényessége  $-1^m$ , a Napé kb.  $-26^m$ . A közöttük lévő fényintenzitás különbsége nagyjából 10 milliószoros. A telehold fényessége és a Nap között pedig 1 millió a fényerők hányadosa.

Minden csillag magnitúdó értékének megállapításához szükség van egy etalon csillag fényességére. Ez hosszú ideig a *Sarkcsillag* ( $\alpha$  UMi) volt. Látszó fényessége  $2,^m12$ . Ez azonban nem állandó, hanem az időben változik. Így más csillagot kellett keresni. Ezután a környezetében választottak ki néhány olyat, melyekhez a többi csillag látszó fényességét viszonyították.

Sokkal praktikusabbnak bizonyult az, amikor két nyílt csillaghalmaz a Hyadok és a Fiastyúk – mindkettő a Bika csillagképhez tartozik – néhány tagját választották referencia csillagnak. Mindegyik csillaghalmaz égitestjei gyakorlatilag ugyanakkora távolságra vannak tőlünk, így megbízhatóbb skálát adnak, mint a Sarkcsillag körülíek, melyek távolsága egymástól eltérő. Ezután nincs más teendő, mint a meghatározni kívánt csillag fényáramát összemérjük egy ismeretlenével, és máris megállapítható, hány magnitúdós.



Egy csillagterkép lapja. Az Ursa Minoris és a Draco látható rajta. A bal sarokban lévő fekete körök méretei jelzik a különböző látszó fényrendeket.

*Térjünk vissza egy pillanatra a távcsövek fénygyűjtő képességére!* Egy 30 milliméter átmérőjű optika kilencszer annyi fényt gyűjt össze, mint a szemünk. A fenti formula segítségével kiszámítható, hogy már egy  $8^m$ -s csillagot is észre vehetünk, ha feltételezzük, hogy a szemünkkel látható leghalványabb csillag  $6^m$ -s. Egy 10 centiméter nyílású távcsővel már a 11. fényrendbe tartozó objektumok is megpillanthatók.

*Eddig a látszó fényességről esett szó, de ebből nem derül ki, hogy melyik csillagnak valójában mekkora a fényereje.* Ezért azt találták ki, hogy minden csillagot – képzeletben – egyforma távolságra helyeznek el a Földtől. Ez pedig egy 10 pc = 32,4 fényév átmérőjű gömb felülete. Így minden égitestről pontosan megállapítható, hogy valójában milyen fényes. Az így meghatározott fényességet abszolút fényességnek nevezzük, és a magnitúdó használata alapján megadott érték neve: abszolút magnitúdó. Ezt  $M$  betűvel jelöljük.

Ebből következik, hogy csak azon égitestek látszó és abszolút fényessége egyezik meg egymással, amelyek pontosan 10 pc távolságra vannak tőlünk! Ezek száma nem sok. Így a két fényességi adat jelentősen eltér egymástól. Például Napunk abszolút fényessége mindössze  $4^m$ . Vagyis 32,6 fényév távolságra helyezve nem számítana a fényesebb csillagok közé. Ezzel szemben az Orion csillagkép Rigel nevű csillagának látszó fényessége  $0^m$ , de abszolút fényessége  $-8^m$ . Ez pedig oly nagy érték, hogy a nappali égen is észrevennénk. Ebből következik, hogy – a számítások mellőzésével – a Rigel 160 000-szer több energiát sugároz ki másodpercenként, mint a Nap!

A látszó és az abszolút fényesség között az alábbi összefüggés érvényes:

$$m - M = -5 + 5 \log r,$$

ahol  $m$  a látszó,  $M$  az abszolút,  $r$  pedig az objektum parsecban kifejezett távolsága. Ez az összefüggés lehetőséget ad a távolság meghatározására is. A látszó fényesség értéke mérhető. Az abszolút fényesség értéke pedig számítható, hiszen a fény intenzitása a távolság négyzetével fordítottan arányos, ti. a fotonok egy gömbfelületen haladnak át. Így a távolság meghatározható.

Ráadásul vannak olyan csillagok, melyeknek az abszolút fényességét ismerjük. Ezek az RR Lyrae típusú változócsillagok, róluk később még lesz szó. Ezek abszolút magnitúdója:  $0^m$ . A szomszédos – a Tejútrendszerhez hasonló – Androméda csillagvárosban sok ilyen típusú csillagot ismerünk, ezáltal meg lehetett határozni a távolságát. Ezeknek a csillagoknak a látszó fényessége  $24^m$ . Ha ezeket az értékeket beírjuk a korábbi formulába, akkor:

$$24 - 0 = 24 = -5 + 5 \log r,$$

$$\log r = 29/5 = 5,8.$$

Így  $r = 630\,000$  parsec, ami kb. 2 millió fényévnek felel meg.



*Az Androméda csillagképben látható galaxis, az Androméda-köd (M31). Éder Iván felvétele.*

Már korábban szó esett az emberi szem szín szerinti érzékenységéről. Ezért alapvető szempont az, hogy a fényforrás (csillag) által kibocsátott elektromágneses sugárzás mely hullámhosszon éri el a maximális energia értéket. Ez a *vizuális fényesség*, de, ha fotografikus módon figyeljük meg a csillagot, akkor más fényességi értéket fogunk kapni. Ezt pedig *fotografikus fényességnek* hívjuk. Egy – ma már klasszikusnak számító fotóemulzió – elsősorban a kék tartományban volt érzékeny, a vörösben kevésbé, a közeli infravörösben pedig egyáltalán nem. Ez a megfigyelési módszer kb.150 évig élte virágkorát. A fotólemez integrálni – egyesíteni – tudta a beérkező fotonokat, míg az emberi szem erre nem képes, hiszen csak a pillanatnyilag beérkező fénykvantumokat érzékeljük. Ezért a *megfigyelésünk szubjektív, tehát az illető személy megítélésétől függ. A fotográfia alkalmazása azonban személytől független, objektív lehetőséget adott.*

A XIX. században olyan felvételek láttak napvilágot, amelyeket először hitetlenkedve fogadott a vizuális megfigyelésen felnőtt szakma. Egy híres magyar felvétel, melyet *Gothard Jenő* (1857-1909) a Lyra (Lant) csillagképben lévő gyűrűsködről készített. Ezen az látható, hogy az „égi füstkarika” közepén egy csillag van.



*A Hubble űrtávcső egyik látványos felvétele a ködről. Jól látható a központi csillag, melyet Gothard Jenő fedezett fel. (APOD, MASA, ESA.)*

A fotografikus eljárás lehetővé tette, hogy órákon vagy akár napokon keresztül lehessen ugyanarra a fotólemezre (üveglemezeket használtak) felvételt készíteni. Ezáltal olyan részleteket tudtak feltárni, és oly halvány égitesteket megörökíteni, melyeket a szemünkkel sohasem tudtunk volna felismerni. *Ez a módszer, a szó valódi értelmében, forradalmi változást hozott.*

A lemezre készült képeket elő kellett hívni, hosszú ideig tartó tárolást kellett biztosítani, hiszen a feldolgozásuk nem egy pillanatig tartó munka volt. A csillagok által okozott feketedések elkenődtek a légköri nyugtalanság miatt. Mindezen kényelmetlenségek ellenére hosszú időn át használták a csillagászok ezt a megfigyelési módszert.

Az eltelt néhány évtizedben viharos gyorsasággal fejlődött a számítástechnika. Ez a módszereket és a hozzá való eszközöket is magába foglalta. Így a fényképezési eljárást felváltotta az elektronikus megfigyelés. Ennek alapja a töltéscsatolt érzékelők – *CCD – alkalmazása*. (CCD = Charge Coupled Device.) Az első chip 1973-ban készült az Egyesült Államokban.

Ez az elektronika az emberi színlátáshoz hasonlóan működik. A természetes színek között három alapszín ismerünk: vörös (R), zöld (G) és kék (B). Ennek a három színnek a keveréke lesz bármely olyan hullámhosszú foton színének látása, amelyet pl. sárgának, rózsaszínnek, stb. érzékelünk. Ha a három alapszín egyenlő mértékű, akkor a forrásból érkező fényt fehérnek érzékeljük. Ez a fehéregyensúly. A szemünkben lévő csapok erre a három alapszínre érzékenyek, és mindezek összegzése (additív módszer) képezi a színlátásunk alapját.

A CCD-érzékelőket – ebből háromféle van -- szintén erre a három alapszínre tették érzékennyé. (Ezért lehet a hétköznapi használatban lévő kamerák oldalán ezekre utaló kis emblémát látni. Mielőtt pedig felvételt készítenénk, be kell állítani a fehéregyensúlyt – wb – a white balanc-ot. Ha ezt nem tesszük meg, akkor nem kapunk színhelyes képet.)

Így egy ilyen érzékelő rendszer minden hullámhosszon egyformán érzékeny. (Ma már hozzá lehet jutni ilyen kamerákhoz, amellyel bárki megkapó képeket tud készíteni a különböző égi objektumokról.) Természetesen lehet olyan elektronikát készíteni, amely a kívánt megfigyelési hullámhossz tartományban a legérzékenyebb. Mindig a cél az, ami meghatározó. A másik új lehetőség pedig a rögzített képek feldolgozási módszere. Olyan számítógépre készült célprogramok állnak a rendelkezésünkre, amelyek segítségével kiszűrhető pl. a légkör okozta nyugtalanság. Ez a digitális képfeldolgozás. Így jönnek létre a világhálón megnézhető ámulatba ejtő égi felvételek. Már egy amatőr megfigyelésre alkalmas kamerával és feldolgozó programmal szenzációs képek állíthatók elő.



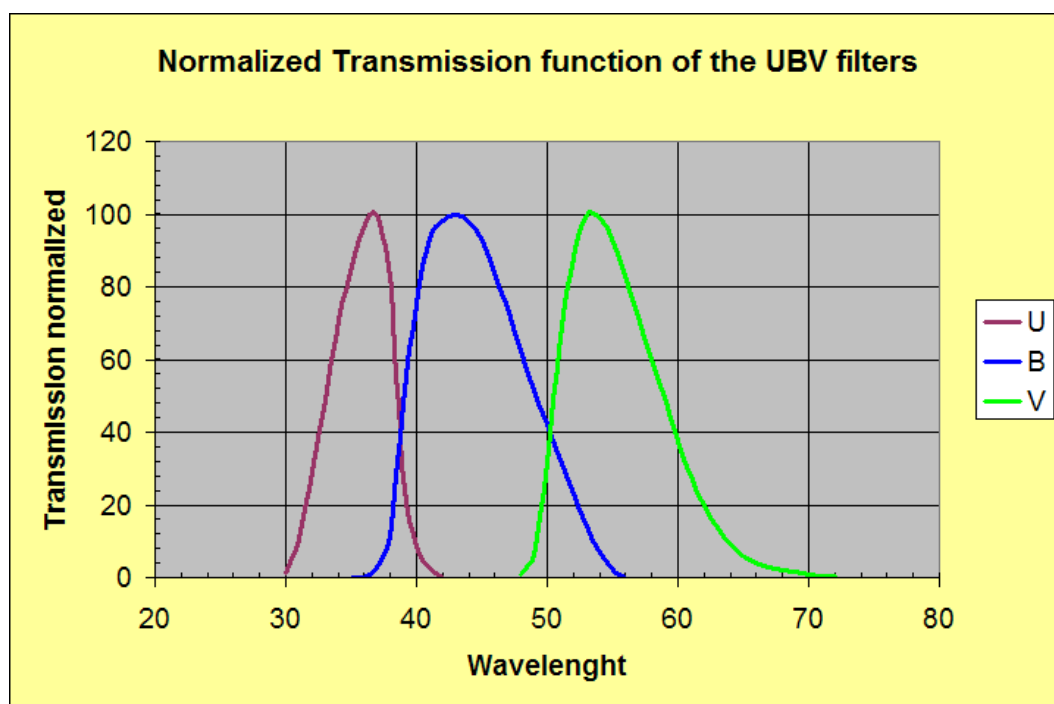
*A Lupus-3 molekuláris felhő Éder Iván felvételén. A látványos kép digitális rögzítésű és több feldolgozó szoftver felhasználásával lett ilyen.*

A csillagászati megfigyelések során különféle *színszűrőket* is használnak, melyek csak a megfigyelési célnak megfelelő hullámhosszú fényt eresztik át. Mivel a csillagok által kisugárzott energia értéke függ a hullámhossztól (lásd korábban), így egy ilyen felvételen a hasonló energia eloszlást mutató csillagok fognak főszerepet játszani. Ezzel a módszerrel a csillagok bizonyos csoportokba rendezhetők, melyek alapvető szerepet játszanak néhány fontos jellemzőjük, pl. kor meghatározásához. (Erről a későbbiekben lesz szó.)

*Ezért a csillag magnitúdójának értéke eltérő lesz, ha vizuálisan, fotografikusan vagy elektronikusan figyeljük meg. A legpontosabb fényesség értéket akkor kapnánk meg, ha az égitest által kisugárzott valamennyi hullámhosszon érkező energiát figyelembe vennénk. Ezt bolometrikus fényességnek nevezzük. Ezt csak a légkörön kívüli méréssel lehet korrekt módon meghatározni.*

*A szakmában használt fénymérő eszköz neve: fotométer. Ez a pontszerű csillagról érkező fényáram erősségét méri. Az eljárás neve: fotometria.*

Harold L. Johnson (1921-1980) amerikai csillagász nevéhez fűződik az egységes mérési rendszer kidolgozása. Három kiemelt hullámhossz tartományt vett figyelembe. Az egységes mérési eredmények érdekében leírta, hogy milyen sáv szélességű szűrőket kell használni, ezek az U, a B, és a V. Az *U az ultraibolya, a B a kék, a V a vizuális (sárga) tartományokat jelöli.* Ezt több szín fotometriaként szokás emlegetni, amely alapvető szerepet játszik a csillagok fizikai jellemzőinek meghatározásában.



*A három szűrő normalizált átteresztő képességét a függőleges, míg a hullámhosszt a vízszintes tengelyen láthatjuk. 30 = 300 nm, stb. (Forrás: Spectroscopy and Photometry.)*

A különböző színszűrőkön át mért fényintenzitásokat, ha kivonjuk egymásból, a *színindexeket* kapjuk meg. *U-B* és *B-V* létezik. Ez pedig olyan *alapinformáció*, amely a *csillagok fizikájával, az asztrofizikával foglalkozó tudományterület egyik sarkalatos megfigyelési pontja*.

De térjünk vissza egy másik távolságmérési eljáráshoz! Már szó volt az RR Lyrae típusú változó fényű csillagokról. Ezek pulzáló csillagok, vagyis átmérőjük periodikusan változik. Van egy másik népes csoport, amely szintén pulzációt mutat, ezek a *cefeidák*. Névadójuk a  *$\delta$  Cephei jelű csillag*.

*Henrietta Leavitt* (1868-1921) amerikai csillagász nő 1912-ben a Kis Magellán Felhő (SMC), amely a Tejútrendszer egyik kísérő galaxisa, változó fényű csillagait figyelte meg.



*A Kis Magellán Felhő, mely Magellán portugál hajóskapitány nevét őrzi. A részlet dús felvétel jól mutatja a csillagait. (Bogdan Jarzyna, APOD.)*



*Arra az alapvető megállapításra jutott, hogy egy cefeida átlagos látszólagos fényessége és fényváltozási periódusa között összefüggés van. Nevezetesen: minél hosszabb egy ilyen csillag fényváltozásának periódusa, annál nagyobb az átlagos látszó fényessége!*

Idézzük fel a korábbi összefüggést:  $m - M = -5 + 5 \log r$ . De ez egy állandó értékkel kell, hogy egyenlő legyen. Azért írhatunk ide állandót, mert a Kis Magellán Felhő csillagainak tőlünk számított távolságát ugyanakkorának tételezhetjük fel. A feladat: találni kell egy olyan ismert távolságú cefeidát, melynek fényváltozási periódusa megegyezik a Kis Magellán Felhőben lévő társával. Így a két csillag abszolút fényessége ugyanakkora lesz. (Az ismert távolságú csillagét már meghatározták.) Ezáltal  $m - M = \text{állandó érték}$  már ismert lesz! Miután megmértük a Kis Magellán Felhőben lévő cefeida látszó fényességét, már pontosan fogjuk ismerni az abszolútét is. Ettől a pillanattól kezdve „gyerekjáték” a távolságok megállapítása. Egy megfigyelt csillagcsoportban találni kell egy cefeida változót, meg kell határozni a fényváltozás periódusát, és meg kell mérni a látszó fényességét. Máris megkapjuk, hogy milyen messze van tőlünk.

*Az összefüggés neve: periódus-fényesség reláció.* 1948-ban felismerték, hogy a cefeidák két, különböző korú csoportot alkotnak (lásd később). Ez azonban nem befolyásolta a távolságok meghatározását, mivel külön lehetett választani egymástól az eltérő korú változócsillagokat.