

A CSILLAGOK SZÍNKÉPE ÉS A HRD

Belucz Bernadett

Csillagászati Tanszék, Eötvös Lóránd Tudományegyetem
Magyar Napfizikai Alapítvány, Gyula



A CSILLAGOK ÁLLAPOTHATÁROZÓI

- ▶ csillagok mind a Naphoz hasonló óriási (a Földnél 110-szer nagyobb átmérőjű) tűzgömbök
- ▶ vannak a Napnál jóval nagyobb és kisebb csillagok is, attól függően, mekkora kezdeti tömeggel születtek és fejlődésük mely szakaszában vannak
- ▶ a csillagokat olyan fizikai paraméterekkel jellemezhetjük, amelyeket a Földről is képesek vagyunk meghatározni (fényesség, szín, stb.). Ám vannak olyan fizikai jellemzők, úgynevezett állapotjelzők, amelyeket közvetett mérésekkel tudunk meghatározni (pl. sugár, tömeg, stb.).
- ▶ A csillagok élete során ezen jellemzők változnak, értékük nem csak a csillag típusára jellemző, hanem függ annak korától és típusától is.

A CSILLAGOK ÁLLAPOTHATÁROZÓI

A csillagoknak az alábbi 8 állapotjelzőjét tudjuk meghatározni:

- ▶ fényesség (abszolút fényesség)
- ▶ szín (színképtípus)
- ▶ kémiai összetétel (fémtartalom)
- ▶ sugár
- ▶ tömeg
- ▶ forgási periódus
- ▶ felületi hőmérséklet
- ▶ mágneses tér (felszíni átlagos mágneses térerősség)

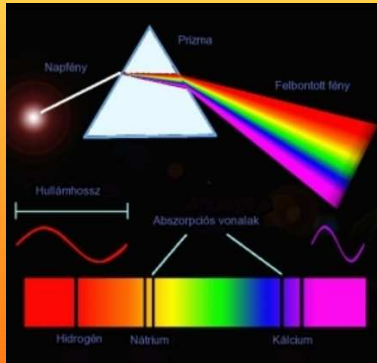
A CSILLAGOK ÁLLAPOTHATÁROZÓI

- ▶ Egy csillagot természetesen számos **egyéb paraméter** is jellemezhet, mint pl. anyagának átlagos sűrűsége, vagy a felszíni nehézségi gyorsulás stb., de ezek a **fenti állapotjelzőkből kiszámíthatóak**.
- ▶ A felsorolásban az **első három állapotjelző** a csillag olyan fizikai paraméterei, melyeket **távcsöves megfigyeléssel** viszonylag egyszerűen meghatározhatunk. A **többi öt állapotjelző** meghatározásához már a **modern technika** (spektrométer stb.) segítségét kell igénybe vennünk.

CSILLAGOK SZÍNE, SZÍNKÉPE

- ▶ **Hőmérsékleti sugárzásnak** nevezzük az **anyag hőmozgása** miatt kibocsátott elektromágneses sugárzást.
- ▶ A testek minden $T > 0 \text{ K}$ hőmérsékleten **elektromágneses hullámokat** bocsátanak ki, a környezet hőmérsékletétől függetlenül.
- ▶ A sugárzás kibocsátásakor (emisszó) lényegében a test belső energiája átalakul elektromágneses energiává, a sugárzás elnyelésekor (abszorpció) pedig az elektromágneses energia alakul belső energiává.
- ▶ Ha folytonos színeképű sugárzás (például a fehér fény) útjába valamilyen anyagot helyezünk, akkor a sugárzásból **az anyagra jellemző, meghatározott frekvenciájú (színű) sugarakat** elnyeli, így a színeképben azok helyén sötét vonalak vagy sávok jelennek meg.

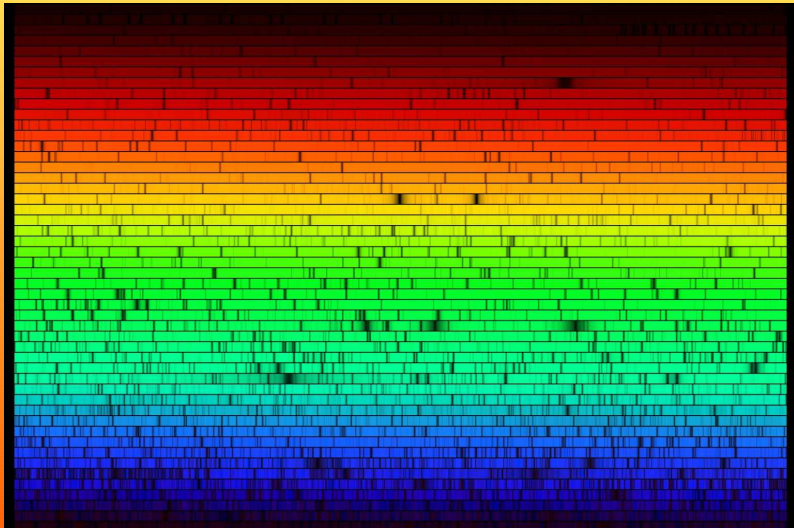
CSILLAGOK SZÍNE, SZÍNKÉPE



CSILLAGOK SZÍNE, SZÍNKÉPE

- ▶ A színeképelemzéssel foglalkozó tudományágat **spektroszkópiának** nevezzük.
- ▶ A csillagászati színeképelemzés során megvizsgálják az egyes hullámhossz-tartományok **intenzitását, erősségét ill. fényességét, továbbá az ún. Fraunhofer-vonalak helyzetét és szélességét.**
- ▶ Ez utóbbiakat $\Rightarrow$ **bizonyos elemeknek és vegyületeknek a csillag légkörében való előfordulására** következtethetünk.
- ▶ A **fényintenzitás** folytonos színeképbeli eloszlása a hőmérséklettől és az anyagi összetételtől függ, így ebből meghatározható a csillagok egyik legfontosabb tulajdonsága, a **felszíni hőmérséklet.**
- ▶ A színeképvonalak **Doppler-eltolódásának vizsgálatával** információt nyerhetünk a **csillag látóirányú (radiális) sebességéről**, majd ebből közvetve – kettős vagy többesrendszer esetén – a rendszer tagjainak **tömegére és egyéb fizikai tulajdonságaira** következtethetünk.

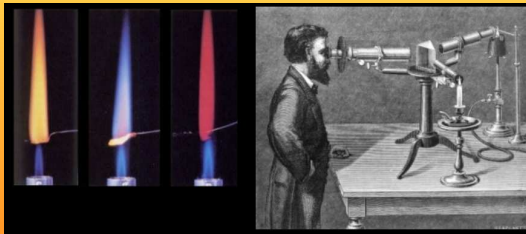
CSILLAGOK SZÍNE, SZÍNKÉPE



CSILLAGOK SZÍNE, SZÍNKÉPE

- ▶ 1822-ben John Herschel megállapította, hogy **színes lángok fényében fényes vonalak** (színkép vonalak) figyelhetők meg, melyek helyzete (hullámhossza) attól függ, hogy **milyen anyagot** vizsgált.
- ▶ 1859-ben Gustav Robert Kirchhoff és Robert Wilhelm Bunsen vizsgálatai felfedték, hogy ha a Nap színképének fényességét csökkentik, akkor a sötét vonalak helyén világos vonalak jelennek meg. $\Rightarrow$ **ha egy anyag atomjaival energiát közlünk, akkor azok a rájuk jellemző vonalas spektrumot bocsátanak ki (emisszió), ezen atomok azonban képesek a kibocsátott fény hullámhosszával megegyező hullámhosszú fény elnyelésére (abszorpció) is.**
- ▶ Az emissziós és abszorpciós vonalak közötti összefüggést felismerve Kirchhoff megállapította, hogy az **azonos hullámhosszúságú sugarak emissziós és abszorpciós vonalainak az aránya azonos hőmérsékleten minden anyagra ugyanolyan.**
- ▶ 1862-re Kirchhoff közel negyven, a Földön ismert elem jelenlétét mutatta ki a Napon.

CSILLAGOK SZÍNE, SZÍNKÉPE

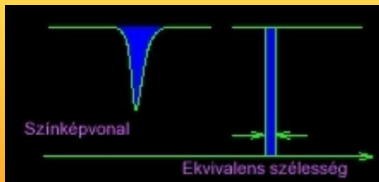


A nátrium (sárga), a kálium (kék) és a litium (piros) különböző színű lánggal ég, mivel eltérő hullámhosszú emissziós spektrumuk van.

A CSILLAGOK KÉMIAI ÖSSZETÉTELE

- ▶ A csillagok kémiai összetétele $\Rightarrow$ a színeképükben megjelenő emissziós és abszorpciós vonalak
- ▶ A kémiai összetétel meghatározásának első lépése, hogy megállapítjuk egy színeképvonal úgynevezett **ekvivalens szélességét**, ami lényegében a vonal alatti terület mérésével lehetséges.
- ▶ Az adott kémiai elemhez tartozó abszorpciós vonal alatti terület alapján megállapíthatjuk **az elem térfogategységenkénti számát, a sugárzás forrásában**.
- ▶ Egy adott abszorpciós vonal számított ekvivalens szélessége természetesen **függ a csillaglégkört leíró modelltől**

A CSILLAGOK KÉMIAI ÖSSZETÉTELE



Egy csillagspektrum abszorpciós vonala intenzitásának hullámhosszfüggése. Jól látható, hogy a vonal szélei világosabbak (nagyobb az intenzitásuk), mint a vonal közepe (itt intenzitásminimum van). **A színképvonalak ekvivalens szélessége, megegyezik egy olyan ideális vonal hullámhossz-szélességével, amelynek intenzitása megegyezik a valódi vonal intenzitásösszegével.**

A CSILLAGOK KÉMIAI ÖSSZETÉTELE

- ▶ A csillagok kémiai összetétele bizonyos mértékig hasonló $\Rightarrow$ (hidrogén és hélium) túlsúlya.
- ▶ A csillagok sugárzása, mint azt Hans Bethe 1935-ben megállapította, a könnyebb elemek nehezebb elemekké történő egyesülése (fúziója) során keletkezik.
- ▶ A fúziós reakcióban keletkező új, nehezebb (nagyobb rendszámú) elem tömege mindig kisebb, mint a reakció kiinduló elemeinek együttes tömege, Albert Einstein speciális relativitáselméletének megalkotása óta tudjuk, hogy ennek a tömegkülönbségnek az energiaként történő felszabadulása lesz a csillag sugárzásának forrása.
- ▶ Azonban e fúziós reakciók csak a vasnál kisebb rendszámú elemek esetén termelhetnek energiát, ugyanis a vasatomok és a vasnál nagyobb rendszámú elemek fúziója esetén már a keletkező új elem tömege nagyobb lesz, mint a fuzionáló magok tömegének összege.

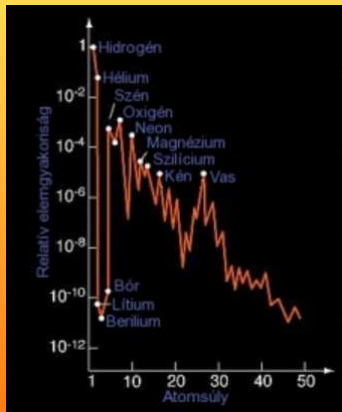
A CSILLAGOK KÉMIAI ÖSSZETÉTELE

- ▶ A Földön is ismert vasnál nehezebb elemek $\Rightarrow$ Vajon ezen elemek hogyan keletkezhettek $\Rightarrow$ a csillagok fejlődésének elmélete $\Rightarrow$ a nagytömegű csillagok (legalább nyolcszoros naptömeget kell elérniük) életük végén felrobbannak, úgynevezett szupernóva-robbanásban $\Rightarrow$ E robbanási folyamatban már olyan fúziós reakciók is létrejöhetnek, melyek eredményeként a vasnál nagyobb rendszámú elemek, például a radioaktív elemek keletkeznek.
- ▶ 1944-ben Bade felfedezte, hogy a csillagok két csoportra oszthatók, melyek alapvetően eltérő kémiai összetételűek. Az egyik csoport csillagaiban nincsenek vason túli elemek (II. populáció), míg a másokban vannak (I. populáció). A két csillagpopuláció evolúciósan kapcsolódik.

A CSILLAGOK KÉMIAI ÖSSZETÉTELE

- ▶ A fenti csillagkeletkezési elméletet támasztja alá az a tény, hogy a **Galaktikánkban megfigyelt gázködökben** (a csillagok kohóiban már feldúsult, s felrobbant csillagok maradványanyaga) **és a meteoritokban gyakorlatilag azonos a nehéz elemeknek a könnyebbekhez viszonyított aránya.**
- ▶ Ezért beszélhetünk egy **általános kozmikus elemgyakoriságról**, s ezért van az, hogy a csillagok anyagösszetétele olyan általános.
- ▶ Meg kell azonban említeni, hogy vannak olyan különös csillagok, melyekben igen nagy az úgynevezett ritka földfémek aránya, ezeket anomális színképű csillagoknak hívjuk.

A CSILLAGOK KÉMIAI ÖSSZETÉTELE



A csillagokban folyamatosan keletkeznek új elemek, létrehozva az általános kozmikus elemgyakoriságot.

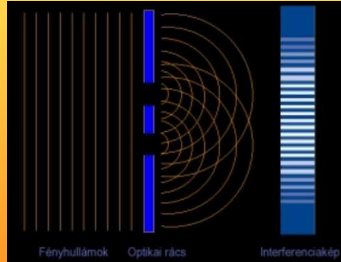
A CSILLAGOK SUGARA

- ▶ Egy a Napéval megegyező csillag sugara egy parsec távolságban csupán öt ezred ívmásodperc szög alatt látszana.
- ▶ Egy 1 méteres tükörátmérőjű távcső szögfelbontása (az a szögtávolság, aminél kisebb szögtávolságú két pontot már csak egy pontként látnánk) minimálisan egy tized ívmásodperc, s ha figyelembe vesszük a földi légkör hatását, ez a szögfelbontás tovább romlik fél ívmásodpercre. $\Rightarrow$ a csillagok képe még a legnagyobb távcsövekben is pontszerűnek látszik

A CSILLAGOK SUGARA

- ▶ Ám a XX. század húszas éveiben **A. A. Michelson** és **F. G. Pease** olyan műszert (interferométert) alkotott, amelynek segítségével — a fény hullámtermészetének köszönhetően — tovább növelhető a távcsövek szögfelbontása.
- ▶ A csillag fényét az interferométerben két egymástól meghatározott távolságban elhelyezett résen keresztül összegezzük, **interferáltatjuk a távcső fókuszpontjában**.
- ▶ A csillag interferált képe **körkörös világos és sötét gyűrűkként** jelenik meg, s ezen gyűrűk intenzitásából és sugarából megállapítható **a csillag két széléről a távcsőbe érkező fénnyalábok szögátávolsága** $\Rightarrow$ kiszámíthatjuk **a csillag sugarát**, ha ismerjük annak távolságát.

A CSILLAGOK SUGARA



Az interferenciakép keletkezése. A fény a hullámhosszával összemérhető résen (optikai rácson) áthaladva olyan interferenciakép alakul ki, melyben a forrásra és a rácstra jellemző geometriai paraméterek, a fényes és halvány sávok helyzetéből és erősségéből megállapítható.

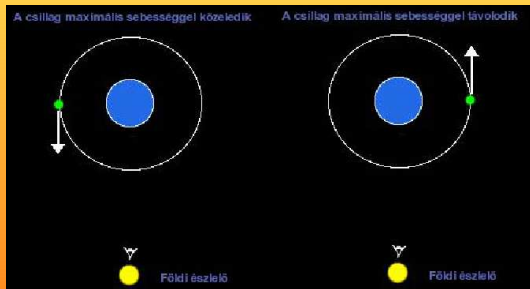
A CSILLAGOK SUGARA

- ▶ Kettős csillagrendszerekben egy központi nagyobb csillag körül egy társcsillag kering (kettős csillagrendszer vagy kettőscsillag).
- ▶ A kísérőcsillag **pályája két ellentétes pontján vagy közeledik vagy távolodik** a Földi megfigyelőhöz képest. A kettős csillagrendszer színképének változását figyelve észrevehetjük, hogy a **kísérőcsillag színképvonalai elmozdulnak a nagyobb főcsillag színképvonalaihoz képest**.
- ▶ Mint ismeretes egy mozgó testről érkező fény, ha **test távolodik, a vörös szín felé**, ha **közeledik, a kék szín felé** a sugárzás hullámhosszával (λ) és a mozgás sebességével (v) egyenes arányban tolódik el (**Doppler-eltolódás**).

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \pm \frac{v}{c}$$

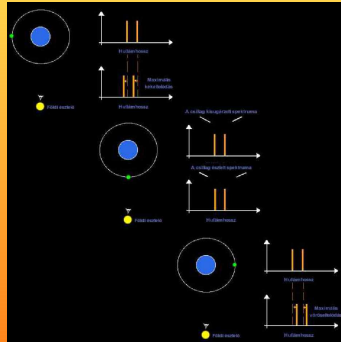
- ▶ Így egy mozgó csillag színképvonalai a **mozgás sebességének arányában** tolódnak el a **kék vagy a vörös hullámhosszak felé**.

A CSILLAGOK SUGARA



A csillagok spektrumában megfigyelhető színképvonal-eltolódás a Doppler-effektus miatt keletkezik.

A CSILLAGOK SUGARA

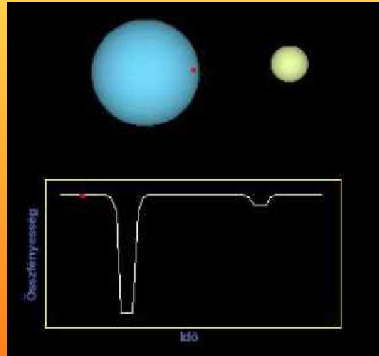


A kettős csillagrendszerekben keletkező periodikus vörös és kék színekpvonál-eltolódások.

A CSILLAGOK SUGARA

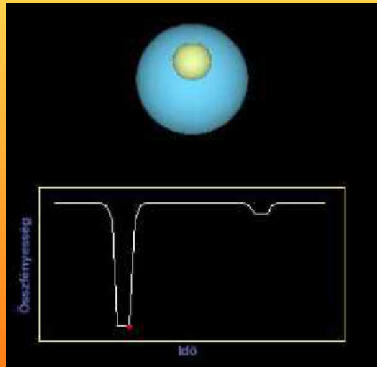
- ▶ A csillagok többsége kettős csillag, mely rendszerek némelyikének pont olyan a helyzete, hogy a Földről éppen a keringési síkban látjuk azokat (fedési kettős).
- ▶ Ebben az esetben a Földről nézve kölcsönösen eltakarhatják egymást pályamenti keringésük során.
- ▶ Ha a kettős rendszer csillagai olyan közel keringenek egymáshoz, hogy külön nem figyelhetjük meg a csillagokat, de méretük vagy fényességük eltérő, akkor úgynevezett fedési kettős rendszerről beszélhetünk.
- ▶ Az ilyen csillagok keringésük során változtatják együttes fényességüket.

A CSILLAGOK SUGARA



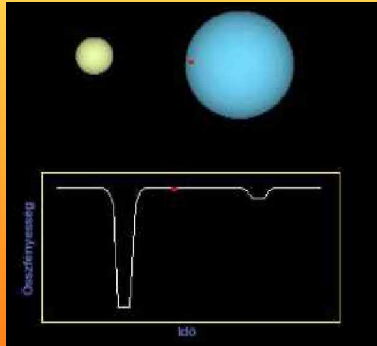
A fedési kettős rendszer keringése során kialakuló fényességváltozás.

A CSILLAGOK SUGARA



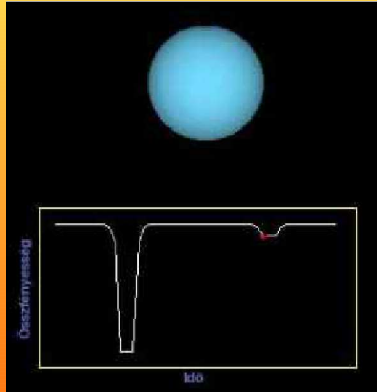
A fedési kettős rendszer keringése során kialakuló fényességváltozás.

A CSILLAGOK SUGARA



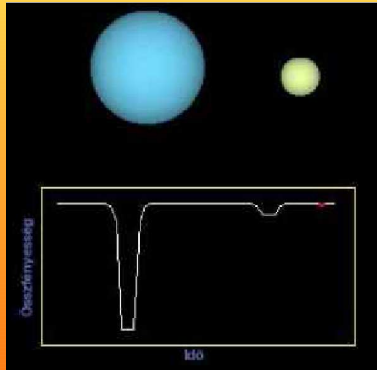
A fedési kettős rendszer keringése során kialakuló fényességváltozás.

A CSILLAGOK SUGARA



A fedési kettős rendszer keringése során kialakuló fényességváltozás.

A CSILLAGOK SUGARA



A fedési kettős rendszer keringése során kialakuló fényességváltozás.

A CSILLAGOK SUGARA

- ▶ Ha a két csillag közötti fényességkülönbség nem jelentős, akkor a közös színeképükben mindkét csillag spektrumvonalai láthatóak.
- ▶ Meghatározzuk a csillagrendszer kísérőcsillagának keringési periódusát a fényesség periodikus változásából $\Rightarrow$ vonalak eltolódása alapján megállapítjuk a kísérőcsillag keringési sebességét $\Rightarrow$ keringési sebesség és periódus ismeretében meghatározhatjuk a pálya sugarát
- ▶ Sajnos a két csillag soha nem kering kör alakú pályán egymás körül, s nagy ritkán láthatjuk a kettős rendszert keringésük síkjában, ám ez csak bonyolítja az eljárást, de lényegében a fentebb leírt módon járhatunk el.

A CSILLAGOK TÖMEGE

- ▶ A csillagok túlnyomó többsége kettős csillag
- ▶ Két csillag között ható F gravitációs erő

$$F \sim \frac{M_1 M_2}{r_{12}^2}$$

ezért a csillagok tömegének meghatározása gravitációs egymásra hatásuk alapján lehetséges.

- ▶ Kettős csillagrendszerben a két csillag közös tömegközéppontjuk körül ellipszis alakú pályákon kering. Keringésük olyan, hogy a csillagokat összekötő egyenes minden pillanatban áthalad a közös tömegközépponton.

A CSILLAGOK TÖMEGE

- ▶ Johannes Kepler mozgástörvényei alapján a **kettős rendszer össztömege** ($M_{\text{össz}}$) egyenesen arányos a csillagok közepes távolságának d_{12} harmadik hatványával, és fordítottan arányos a keringési periódus (T) négyzetével.

$$M_{\text{össz}} \sim \frac{d_{12}^3}{T^2}$$

- ▶ Ha ismerjük a kettős rendszer tőlünk mért távolságát, akkor a keringési pályák átmérőjének, és a keringés idejének meghatározását követően kiszámíthatjuk a két csillag tömegének összegét.
- ▶ Valójában a kettős csillagok pályáját mindig valamilyen szögben látjuk, s **nagy ritkán egyezik meg a pályasík a képsíkkal.**
- ▶ Ezért vetítési eljárással létre kell hoznunk azt a keringési képet, amit akkor látnánk, ha a csillagok keringési síkja pontosan merőleges lenne a látóirányra. Ez jócskán megnehezíti a csillagok tömegének meghatározását. Ezen eljárás segítségével a Naprendszer körüli húsz parsec sugarú gömbben a közel hetven kettős csillagrendszer közül csak húsznak sikerült megállapítani a tömegét.

A CSILLAGOK TÖMEGE

- ▶ Ha a távcsövünkkel a **kettős csillagrendszer keringése észlelhető** (két egymást követő fényképfelvételen észlelhető a kísérőcsillag elmozdulása), akkor a **két csillag keringési pályájának a középponttól mért átlagos távolsága, és így a pályák átmérője** egyenként is meghatározható. Felhasználva, hogy a **keringési pályák átmérőjének aránya (d_1/d_2) megegyezik a csillagok tömegének (M_1 és M_2) fordított arányával.**

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{M_2}{M_1}$$

- ▶ Tehát, ha az előbbi módszer segítségével már meghatároztuk a két csillag **össztömegét ($M_{\text{össz}}$)**, akkor a keringési pályák átmérőjének aránya (d_1/d_2) alapján **könnyen kiszámíthatjuk mindkét csillag (M_1 és M_2) tömegét**

$$M_1 = \frac{M_{\text{össz}}}{\frac{d_1}{d_2} + 1}$$

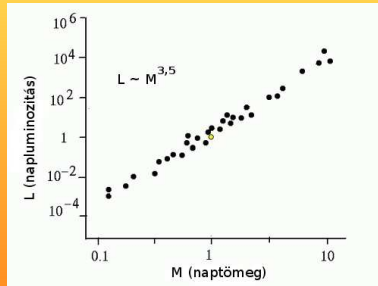
$$M_2 = \frac{M_{\text{össz}}}{\frac{d_2}{d_1} + 1}$$

A CSILLAGOK TÖMEGE

- ▶ A legkisebb csillagok tömege akár 0.08 naptömeg is lehet, míg a legnagyobbak olyan óriásiak, hogy tömegük elérheti a Nap tömegének százszorosát. Azonban a **csillagok túlnyomó része 0.4-4 naptömegű**.
- ▶ Vajon igaz-e az a látszólag ésszerű feltételezés, hogy **a fényes csillagok** (itt nyilván nem a látszólagos fényességet, hanem az abszolút magnitúdót értjük fényességen) **nagyobb tömegűek, míg a halványak kisebb tömegűek**.
- ▶ Bármily meglepő, de ez így van. Ha a Naprendszer közelében levő kettős rendszerekben megállapított **csillagtömegeket felrajzoljuk a fényességük függvényében, akkor észrevehetjük, hogy a fényesebb csillagok tömege mindig nagyobb**.
- ▶ Az ábrát tüzetesen szemügyre véve megállapíthatjuk, hogy **a csillagok fényessége (I_*)** (pontosabban a luminozitása, ami az abszolút fényességének inverz logaritmusával arányos) **a tömegük (M_*) harmadik hatványával arányos**.

$$I_* \sim M_*^{3.5}$$

A CSILLAGOK TÖMEGE



A csillagok tömeg-fényesség összefüggése. Jól látható, hogy a csillagok tömegét logaritmikus skálán megadva azzal egyenesen arányos a luminozitásuk.

A CSILLAGOK TÖMEGE

- ▶ Tovább vizsgálva a csillagok tömeg-fényesség eloszlását azt mondhatjuk, hogy azon csillagok fényessége, melyek **abszolút fényessége 0 és 7 magnitúdó közé esik**, a tömegük negyedik hatványával **arányos**, míg a halványabb, **7 magnitúdó feletti csillagok fényessége tömegük másfeledik hatványával arányos**.
- ▶ Ezen megállapítások alól csupán az igen kicsi, úgynevezett fehér törpecsillagok és a hatalmas vörös óriáscsillagok kivételek. A csillagok tömege és fényessége között felismert tapasztalati törvényszerűséget (empirikus tömeg-fényesség reláció) felhasználva **már a magányos csillagok tömegét is megbecsülhetjük**.

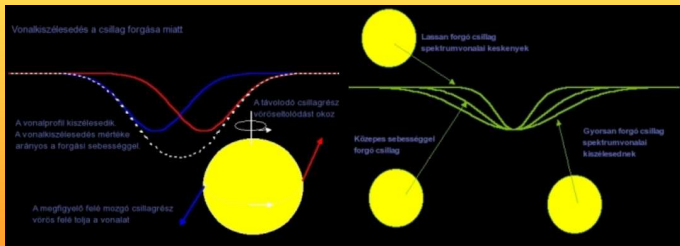
A CSILLAGOK FORGÁSA

- ▶ A XVII. században élt olasz csillagász, Galileo Galilei megfigyelte a Nap foltjait. Ezek a foltok a Nap egyenlítője környékén jelennek meg, s közelítőleg tíz napos időközönként eltűnnek, majd újra megjelennek a Napkorong szélén. Ennek csak az lehet a magyarázata, hogy a Nap tengelye körül forog, melynek periodusideje 27 nap.
- ▶ A Nap korongjának áttellenes széleiről készített színeképeken a vonalak az egyik szélén a kék, míg a másik szélén a vörös színek felé tolódnak el. A Nap forgása miatt a Napkorong egyenlítői oldala az egyik szélén közeledik, a vele ellentétes széle pedig ugyanakkora sebességgel távolodik tőlünk. A vonalak eltolódásának mértékéből meghatározható a Nap forgási sebessége, ami az egyenlítő mentén két kilométer másodpercenként.
- ▶ A XX. század 80-as éveitől kezdve már a csillagok forgási sebességét is megtudjuk határozni. A csillagok esetében is észlelhető a vonalak forgási sebesség miatti eltolódása, de a csillagok színeképét nem tudjuk a csillagkorong két széléről külön-külön felvenni, hiszen azok látszó átmérője igen kicsi, csupán 0.001 ívmásodperc.

A CSILLAGOK FORGÁSA

- ▶ A csillag egészéről készült színekben a **vonalak kiszélesedésének a mértéke alapján következtethetünk forgásukra.**
- ▶ Egy színekpvonalban mind a kék, mind a vörös szín felé történő, a **forgási sebességgel arányos elmozdulást a vonal szélességének növekedéseként észlelhetünk.**
- ▶ Minél gyorsabban forog egy csillag, annál jobban kiszélesednek a vonalak. A vonalak kiszélesedését azonban nem csak a csillag forgása okozhatja, hanem **anyagának hőmérséklete is hasonló hatást eredményez.** Minél melegebb a csillaganyag, a színekpvonalak annál jobban kiszélesednek (termikus vonalkiszélesedés), ezért a forgás vonalkiszélesedés alapján történő meghatározásakor a **csillag hőmérsékletét is ismernünk kell.**
- ▶ A csillag valódi forgási sebességét csak akkor tudjuk meghatározni, ha a **csillag forgástengelye éppen merőleges a látóirányra.** Ez igen ritka eset, s így lényegében a **valós forgási sebességnél mindig kisebbet kaphatunk.**

A CSILLAGOK FORGÁSA



Csillagok rotációs vonalkiszélesedése. A csillag forgása következtében az abszorpciós vonalak megvastagodnak, mivel a csillag két szélé ellentétes irányba tolja el az abszorpciós vonalat. A csillag forgása következtében az abszorpciós vonalak megvastagodnak. Minél nagyobb a csillag forgási sebessége, annál nagyobb mértékben szélesednek ki az abszorpciós színeképvonalak.

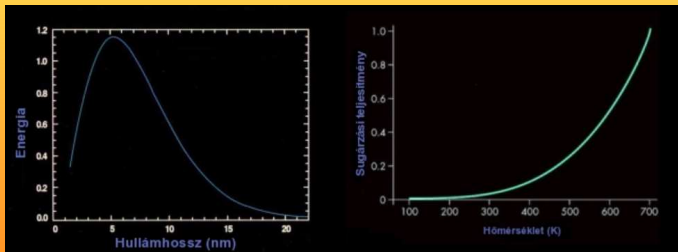
A CSILLAGOK FORGÁSA

- ▶ Annak ellenére, hogy a 80-as évek közepére még csak néhány tucat csillag forgása volt ismert, ezen megfigyelésekből mégis levonhatók általános érvényű következtetések.
- ▶ A fiatal csillagok még gyorsan forognak, forgási sebességük elérheti a 150-200 kilométert másodpercenként. Az öregebb csillagok forgása már lelassult, átlagos nagysága 10-100 kilométer másodpercenként.
- ▶ A csillag forgási periódusa nyilván méretétől is függ, hiszen ugyanakkora egyenlítői sebesség mellett a nagyobb csillagnak hosszabb idő kell, hogy tengelye körül körbeforduljon. Ezért a fiatalabb és viszonylag nagy csillagok forgási periódusa 4-5 nap körüli, megegyezik a késői, de kisebb csillagok forgási periódusával.
- ▶ A csillagok átlagos forgási periódusa fél nap és két nap között van.

A CSILLAGOK HŐMÉRSÉKLETE

- ▶ Gustav Robert Kirchhoff a XIX. század végére kimutatta, hogy a csillagok anyagának **elnyelési (abszorpció) és sugárzási (emisszió) képessége csak a hőmérséklettől és a sugárzás hullámhosszától függ**, és független attól, hogy a sugárzó anyag milyen kémiai összetételű.
- ▶ Az emissziós és abszorpciók képesség arányának meg kell egyeznie egy olyan test emissziós képességével, amely minden hullámhosszú sugárzást képes elnyelni. Az ilyen (minden sugárzást 100%-os abszorpciók képességgel elnyelni képes) testet **fekete testnek** nevezzük.
- ▶ Ennek sugárzását, elméleti úton, a hőmérséklet és a hullámhossz függvényében meg lehet határozni.
- ▶ Ha egy fémből zárt üreget készítünk és falait adott hőmérsékleten tartjuk, és az üreg oldalába olyan kis méretű lyukat fúrunk, amely nem befolyásolja az üreg belsejében kialakuló hőmérsékletet, akkor a lyukon kilépő sugárzás olyan lesz, mint egy ideális fekete testé.

A CSILLAGOK HŐMÉRSÉKLETE



A fekete test sugárzásának intenzitása a hullámhossz függvényében.

A fekete test sugárzás teljesítményének (időben összegzett intenzitás) hullámhossztól való függése.

A CSILLAGOK HŐMÉRSÉKLETE

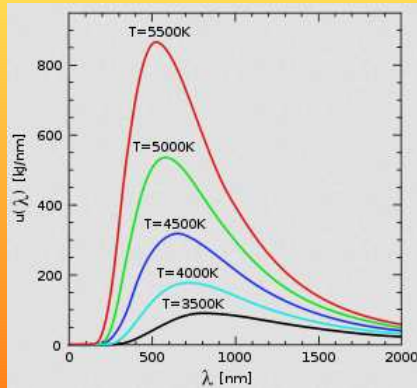
- ▶ A fekete test sugárzásának törvényszerűségét Joseph Stefan és Ludwig Eduard Boltzmann vizsgálta. 1879-ben felismerték, hogy a fekete test sugárzási teljesítménye (I) a hőmérséklet (T) negyedik hatványával arányos (Stefan–Boltzmann-törvény).

$$I \sim T^4$$

- ▶ Később Wilhelm Wien elméleti kutatásainak köszönhetően 1894-ben kimutatta, hogy a sugárzás spektrális eloszlása (adott hullámhosszon mérhető sugárzási intenzitás) szoros kapcsolatban áll a hőmérséklettel. Wien rájött arra, hogy ha a sugárzás intenzitását felrajzoljuk a hullámhossz függvényében, akkor e görbék alakja hőmérsékletfüggő lesz. Minél magasabb a sugárzó test hőmérséklete (T), annál nagyobb lesz a maximális intenzitás értéke (I_{max}), és e maximum egyre kisebb hullámhosszakon (λ_{max}) fog megjelenni (Wien-féle eltolódási törvény).

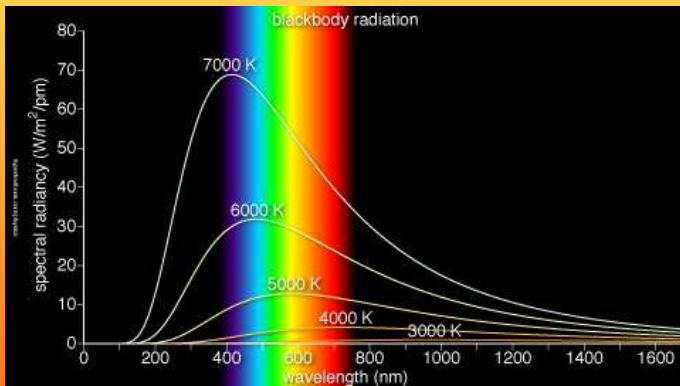
$$I_{max} \sim \frac{T}{\lambda_{max}}$$

A CSILLAGOK HŐMÉRSÉKLETE



A Wien-féle eltolódási törvény értelmében a maximális intenzitás hullámhossza annál kisebb, minél nagyobb a sugárzó test hőmérséklete.

A CSILLAGOK HŐMÉRSÉKLETE



A CSILLAGOK HŐMÉRSÉKLETE

- ▶ A Wien–Planck-féle elmélet a kis hullámhosszakon, míg a Rayleigh–Jeans-féle a nagy hullámhosszakon tudta megmagyarázni a sugárzás hullámhosszfüggő intenzitáseloszlását.
- ▶ A Wien-törvény értelmében a sugárzás intenzitásának ($I(\lambda, T)$) hullámhossztól (λ) és a sugárzó fekete test hőmérsékletétől (T) való függése

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc}{\lambda^3} e^{-hc/\lambda kT}$$

- ▶ míg a Rayleigh–Jeans-törvény értelmében

$$I(\lambda, T) = \frac{2ckT}{\lambda^4}$$

- ▶ De mindkét elmélet hibásan írta le a fekete test sugárzás teljes spektrumát (rendre a nagy illetve kis hullámhosszakon).

A CSILLAGOK HŐMÉRSÉKLETE

- ▶ Az 1900-as év végére Max Planck megtalálta azt a statisztikus fizika alapján kapható képletet, mely jól visszaadta a fekete test teljes spektrumát.
- ▶ Az általa felállított intenzitásspektrum jól leírta a Wien-féle eltolódási és a Stefan–Boltzmann-féle törvényt.
- ▶ A Planck-féle sugárzási törvény értelmében a T hőmérsékletű fekete test sugárzásának intenzitásának ($I(\lambda, T)$) a sugárzás hullámhosszától (λ) és a sugárzó fekete test hőmérsékletétől (T) való függése az alábbi.

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{-hc/\lambda kT} - 1}$$

A CSILLAGOK HŐMÉRSÉKLETE

- ▶ Ha megfigyeljük a fenti képletet, akkor kitűnik, hogy **nagy hullámhosszakon**

$$\frac{hc}{\lambda kT} \ll 1$$

a Planck-féle sugárzási törvény a Rayleigh–Jeans törvényt adja, ugyanis

$$e^{-hc/\lambda kT} \simeq 1 + \frac{hc}{\lambda kT}$$

közelítés használható.

- ▶ Továbbá **kis hullámhosszakon**

$$\frac{\lambda}{c} \ll 1$$

$$e^{-hc/\lambda kT} - 1 \simeq e^{\frac{hc}{\lambda kT}}$$

miatt a Planck-féle sugárzási törvény a Wien-féle törvényt adja vissza.

A CSILLAGOK HŐMÉRSÉKLETE

- ▶ Planck arra az eredményre jutott, hogy a sugárzási folyamatoknál az **energia leadása vagy felvétele nem egyenletesen történik, hanem csak kis adagokban, "kvantumokban" lehetséges.** Ezen kvantumok nagysága az elnyelt vagy kibocsátott sugárzás hullámhosszának és egy univerzális állandónak — ma ezt Planck-állandónak nevezzük — a függvénye.

A CSILLAGOK HŐMÉRSÉKLETE

- ▶ Ha a csillag fekete testként sugározna, akkor annak spektruma (a sugárzás intenzitásának hullámhossz szerinti függése) alapján megállapíthatjuk hőmérsékletét. Pontosabban, a csillag azon tartományának hőmérsékletét, amely az általunk észlelhető sugárzást kibocsátja. Azonban a csillagok nem fekete testként sugároznak, így attól függően, hogy **milyen típusú sugárzó testtel modellezzük a csillagot, különböző típusú hőmérsékleteket definiálhatunk:**

A CSILLAGOK HŐMÉRSÉKLETE

1. **Effektív hőmérséklet:** A csillag effektív hőmérséklete megegyezik annak a fekete testnek a hőmérsékletével (T_{eff}), amely felületegységenként és másodpercenként ugyanannyi F^* energiát sugároz ki.
2. **Wien-féle hőmérséklet:** A csillagok Wien-féle hőmérsékletét a sugárzásuk intenzitása maximumának hullámhossza definiálja. Azaz a csillag Wien-hőmérséklete annak a fekete testnek a hőmérsékletével egyezik meg, amelyiknek ugyanazon a hullámhosszon van a sugárzási intenzitásmaximuma.
3. **Színhőmérséklet:** A színhőmérséklet olyan fekete testnek a hőmérsékletével egyezik meg, amely sugárzásának hullámhossz szerinti eloszlása, a vizsgált hullámhossztartományon, megegyezik a csillag spektrumával.

A CSILLAGOK HŐMÉRSÉKLETE

4. **Kinetikus hőmérséklet:** Ha a csillagok spektrumában látható vonalak kiszélesedéséből meg tudjuk állapítani a gáz részecskéinek átlagos sebességét, akkor ebből az úgynevezett kinetikus hőmérsékletet tudjuk meghatározni. Ha a csillag termodinamikai egyensúlyban van (ugyanannyi energiát termel, mint amennyit sugároz, így nem melegszik vagy hűl), akkor anyaga a klasszikus gázmodellel írható le. Ez esetben a gáz egy részecskéjére eső átlagos kinetikus energia egyenesen arányos a gáz hőmérsékletével.
5. **Gerjesztési és ionizációs hőmérséklet:** Az anyag atomjainak gerjesztettségi állapotára jellemző. Vagy az úgynevezett ionizációs hőmérséklet, amit a Saha-által kidolgozott ionizációs elmélet segítségével szintén a spektrumvonalak tanulmányozásával határozhatunk meg. Ez az ionizációs hőmérséklet az anyag ionizációs állapotára jellemző.

A CSILLAGOK MÁGNESES TERE

- ▶ A napfoltokat először a görög Theophrasztosz vélte látni a Napon, Kr.e 28-ban. 1607-ben Johannes Kepler is megfigyelte, de még nem volt biztos benne, hogy valóban a Napon létrejövő jelenséget látott, s nem a Nap előtt elhaladó égitestet. **Galileo Galilei** volt az első, aki 1607-ben bizonyosan állította, hogy a **Napon foltok figyelhetők meg**.
- ▶ Később két német kutató, Christoph Scheiner és David Fabricius kezdte alaposan vizsgálni e jelenséget, majd 1843-ban Samuel Heinrich **Schwabe megállapította, hogy a napfoltok periodikusan jelennek meg, melynek gyakorisága 11 év**.
- ▶ 1852-ben a francia Armand **Gautier** és a svájci Johann Rudolf **Wolf** felismerik a **napfoltok és a földi mágneses tér zavarai közti kapcsolatot**.
- ▶ 1908-1914-ben Georg **Hale** amerikai csillagász kimutatta, hogy a **napfoltokban sokkal több Fraunhofer-vonal figyelhető meg, mint a foltmentes tartományokon**.
- ▶ Mára világossá vált, hogy a csillagok színképvonalainak többszöröződése valamiképpen kapcsolatban áll a csillag mágneses terével.

A CSILLAGOK MÁGNESES TERE

- ▶ Pieter Zeeman a XIX. század végén, 1897-ben kísérletileg is kimutatta, hogy a mágneses tér hatással van a színeképvonalakra. Ezért a csillagok színeképvonalai mágneses terük jelenlétében felhasadnak.
- ▶ Ha a csillag mágneses pólusa a látóirányba esik, akkor a színeképvonal két vonalra hasad, s az eredeti helyén nem látunk vonalat. Ha a mágneses tér merőleges a látóirányra, akkor három vonalat látunk, az eredeti vonalat, illetve két mellékvonalat, egyet a kisebb, egyet a nagyobb hullámhosszak felé eltolódva.
- ▶ Egy speciális színeképelemző műszer, a magnetográf segítségével megmérhető a felhasadt színeképvonalak intenzitásviszonya. A vonalak felhasadásának mértéke (a mellékvonalak helyének az eredeti vonaltól mért távolsága) arányos a csillag felszíni mágneses terének nagyságával.

A CSILLAGOK MÁGNESES TERE



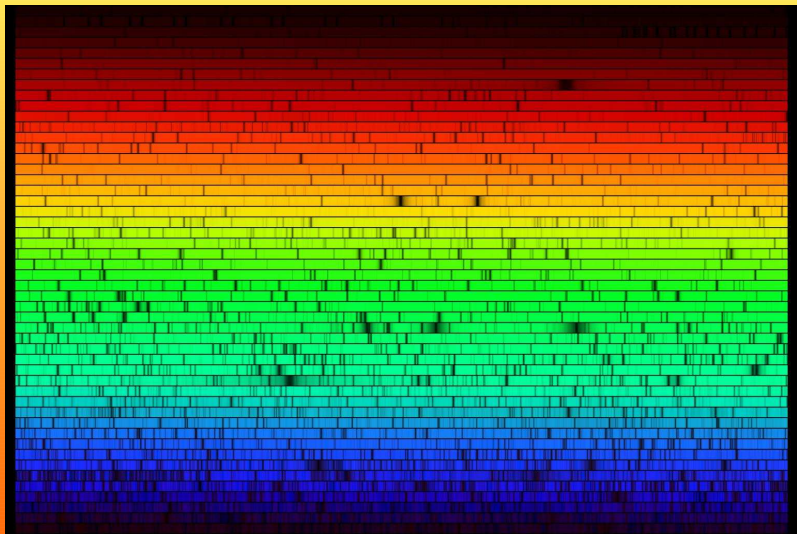
Egy csillag abszorpciós színeképe. Ha a csillag mágneses terének iránya a látóirányunkba mutat, akkor az eredeti vonal helyett két mellékvonalat, míg ha a mágneses tér merőleges a látóirányra, az eredeti vonal mellett látjuk a két mellékvonalat.

A CSILLAGOK MÁGNESES TERE

- ▶ Ha egy csillag felénk forduló korongjának átlagos mágneses térerőssége 0.1 Tesla (a Föld átlagos mágneses tere csupán 60 milliomod Tesla), akkor a mellékvonalak csak egy nanométer távolságra lesznek egymástól. A csillagokban eddig megfigyelt legnagyobb átlagos mágneses tér nagysága 3.4 Tesla volt.
- ▶ A csillagok színképvonalainak felhasadása alapján megtudtuk, hogy **ha a csillag fényessége változik**, akkor ezzel a változással **megegyező periódussal a mágneses tér nagysága is változik**.
- ▶ A Vadászebek (Canis Venaticorum) csillagkép legfényesebb csillaga mágneses terének nagysága közel öt és fél napos periódussal változik -0.14 és 0.16 Tesla között, amit a fényességének 0.2 magnitúdós változása kísér.
- ▶ Ennek az lehet a magyarázata, hogy a csillagok felületén, csak úgy mint a Napon, **sötét foltok jelennek meg**, melyben a mágneses tér erőssége sokszorosa lehet az átlagos terének. Míg a Nap átlagos mágneses tere tízezred Teslánál kisebb, addig a foltokban mért tér nagysága egy Tesla nagyságú is lehet.

CSILLAGOK SZÍNKÉPOSZTÁLYOZÁSA – BEVEZETÉS

- ▶ A csillagok vizsgálatának fő módja, a spektrális tulajdonságaik alapján történik $\Rightarrow$ **Csillagok hőmérséklete, a felszíni gravitáció, különféle fémek gyakorisága**
- ▶ A csillagok színekében többnyire **elnyelési vonalakat** figyelhetünk meg, mivel a fényt kibocsátó fotoszféra fölött helyezkedik el a csillagok igen ritka légköre.
- ▶ A csillagok színekében felismert vonalak helyzetét a kémiai elemek laboratóriumokban kapott **emissziós vonalaival azonosítani** lehet $\Rightarrow$ 1868-ban Pierre Janssen és Sir Joseph Lockyer hélium (Héliosz: Nap, görögül)
- ▶ A kémiai analízis új módja lehetővé tette egyrészt a csillagokat felépítő **kémiai elemek meghatározását**, másrészt a **csillagok színeképosztályokba sorolását**.



SECCHI-FÉLE OSZTÁLYOZÁS

- ▶ Angelo Secchi elsőként javasolta (1863-1867) a csillagok osztályokba való sorolását.
- ▶ Ennek az osztályozási rendszernek a továbbfejlesztésével született meg a Harvard-féle klasszifikáció.
 - ▶ I osztály: fehér vagy kék csillagok, színképükben erős hidrogénvonalak és fémvonalak mutatkoznak. (modern A-osztály)
 - ▶ II. osztály: erősen hidrogénszegény sárga csillagok, fémvonalakat mutatnak. (modern G- és K-osztály)
 - ▶ III. osztály: narancssárga színű csillagok, összetett színképsávokkal. (modern M-osztály)
 - ▶ IV. osztály: vörös csillagok, jelentős mértékben mutatnak szénvonalakat és -sávokat. (szénecsillagok)
 - ▶ V. osztály: emissziós vonalakat mutatnak.

HARVARD-FÉLE KLASSZIFIKÁCIÓ

- ▶ A ma használatos spektrál-klasszifikációs sémát a **Harvard Obszervatóriumban** definiálták a XX. század elején. A Henry Draper által a XIX. század utolsó harmadában elkezdett munkát Annie Jump Cannon folytatta, és 1918 és 1924 között definiálta az alaposztályokat.
- ▶ A színekpek osztályozásának rendszerét Pietro Angelo Secchi dolgozta ki 1863-ban, és a csillagok 5 csoportját különböztette meg felszíni hőmérsékletük csökkenő sorrendjében.
- ▶ Edward Charles Pickering, Alain Maury és Annie Jump Cannon ezt a rendszert **kibővítette** az 1900-as években, ez a ma használatos, Harvard-féle rendszer.

HARVARD-FÉLE KLASSZIFIKÁCIÓ

- ▶ Az osztályozás tulajdonképpen **empirikus**: minden színképosztályhoz rendel valamilyen felületi hőmérsékletet és az abszorpciós spektrumvonalak egy készletét.
- ▶ A felületi hőmérséklet csökkenő sorrendjében a csillagokat **7 fő- (O, B, A, F, G, K, M)** és **3 mellékosztályba (R, N, S)** soroljuk. Az O típusúak a forró kék, az M típusúak pedig a hideg, vörös csillagok.
- ▶ Később, a finomabb besorolás kedvéért, a színképosztályokon belül még **0-tól 9-ig alosztályokat** is bevezettek. Ez alól kivétel az O típus, ahol az osztályozás O5-tel kezdődik.
- ▶ Henry Draper katalógusa szerint a **8 magnitúdónál fényesebb csillagok 99,78%-a** az O, B, A, F, G, K, M0 típusok valamelyikébe tartozik (ezen belül 17% O típusú). Az R, N, S színképosztályba mindössze a csillagok 0,05%-át sorolják.

REFERENCE GUIDE 001 STAR SPECTRAL CLASSES



SPECTRAL CLASS O
Dark Blue
28,000 - 50,000 K
Ionized Helium, especially helium
Example: Mintaka (O1-3III)



SPECTRAL CLASS B
Blue
10,000 - 28,000 K
Neutral helium, some hydrogen
Alpha Eridani A (B3V-IV)



SPECTRAL CLASS A
Light Blue
7,500 - 10,000 K
Strong hydrogen, some ionized metals
Sirius A (A0-IV)



SPECTRAL CLASS F
White
6,000 - 7,500 K
Hydrogen and ionized metals,
calcium and iron
Procyon A (F5V-IV)

Yellow
5,000 - 6,000 K
Ionized calcium, both neutral and
ionized metals
Example: Sol (G2V)

SPECTRAL CLASS G



Orange
3,500 - 5,000 K
Neutral Metals
Alpha Centauri B (K0-3V)

SPECTRAL CLASS K



Red
2,500 - 3,500 K
Ionized atoms, especially helium
Wolf 359 (M5-8V)

SPECTRAL CLASS M



Non-Main Sequence Types

Class W: Wolf-Rayet Star
Up to 70,000 K
Carbon, nitrogen, or oxygen
Gamma Velorum A (WC)

Class L: Dwarf Star
1,300 - 2,000 K
Methanohydrides and alkali metals
VW H_γ

Class T: Methane Dwarf
700 - 1,000 K
Methane
Epsilon Indi Ba

Class Y: Ammonia Dwarf
<700 K
Ammonia
Not yet observed

Class C: Carbon
Class S: Zirconium Oxide
Classes MS and SC
Class D: Dwarf

(c) James Trexler 2008

HARVARD-FÉLE KLASSZIFIKÁCIÓ

- ▶ Ez a sorrend összhangban van a csillagok színekében található legfontosabb színekvonalak intenzitásaival:
 - ▶ a hidrogén Balmer-sorozata
 - ▶ az ionizált hélium és az ionizált vas vonalai
 - ▶ a kálium abszorpciós vonala (393,3 nm)
 - ▶ az ún. G-sáv (CH-molekula)
 - ▶ a semleges kalcium 422,7 nm-es vonala
 - ▶ 431 nm körüli fémvonalak
 - ▶ A TiO molekula sávjai

O SZÍNKÉPTÍPUSÚ CSILLAGOK

- ▶ A **legritkábban** ez a színeképosztály fordul elő a fősorozati csillagoknál.
- ▶ A csillagok színeképosztályozásában az O típusú csillagok **felszíni hőmérséklete a legmagasabb: 25–40 000 K.**
- ▶ Sugárzási maximumuk az **ultraibolya tartományba** esik, a látható színeképtartományban megfigyelve **kék színűek.**
- ▶ Az O színeképtípusnak (kivételesen) **5 osztálya van**; a számozás O5-től O9-ig tart, ahol O5 az osztályon belüli legforróbb csillagokat jelöli.
- ▶ Domináns vonalak: a **semleges hélium** (O5-től O9-ig erősödik), az **egyszeresen ionizált hélium**, a **kétszeresen ionizált nitrogén**, a **kétszeresen ionizált oxigén**, a **kétszeresen ionizált szén** és a **háromszorosan ionizált szilícium.**

O SZÍNKÉPTÍPUSÚ CSILLAGOK

- ▶ Feltűnők a **hidrogén Balmer-vonalai**, habár a késői alosztályoknál nem olyan erősek. Mivel ezek a csillagok különösen forrók, ezért **egyes vonalaik emissziósnak** mutatkoznak. (Az erős ultraibolya sugárzásuk ionizálja a légkörük külső rétegeit.)
- ▶ Ennek az a magyarázata, hogy a **fősortozatot gyorsan elhagyják**, a rövid élettartamuk miatt.
- ▶ A fősortozati csillagok 0,00003125%-a tartozik ebbe az osztályba - ilyen csillagok például a ζ Puppis, a λ Orionis és a Trapéz-csillagok az **Orion-ködben**.



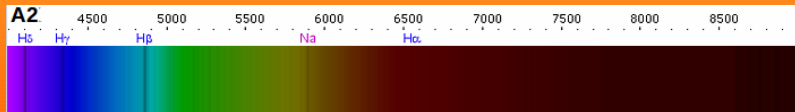
B SZÍNKÉPTÍPUSÚ CSILLAGOK

- ▶ Felszíni hőmérsékletük **12 300–25 000 K** közötti, színük **kékesfehér**.
- ▶ Dominánsak a **hidrogén Balmer-sorozatának vonalai**, ezek a B0 alosztálytól a B9-ig erősödnek. Megjelennek a **semleges hélium vonalai**; ezek a B2 típusban a legerősebbek. Előfordulnak ionizált fémvonalak: **Mg II és Si II**. Az **ionizált oxigén- és szénatomok vonalai** a B3 típusnál erősödnek.
- ▶ A fősorozat csillagainak nagyjából 0,13% tartozik ebbe a színeképosztályba, ilyenek például a **Rigel**, a **Bellatrix**, a **Spica**, az **Orion csillagkép övcsillagai** és a **Pleiadok nyílthalmaz fényesebb csillagai**.



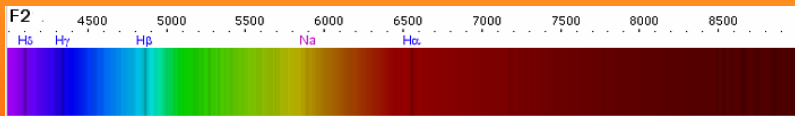
A SZÍNKÉPTÍPUSÚ CSILLAGOK

- ▶ Az A típusú csillagok felszíni hőmérséklete **7900–10 000 K**, **színük fehér**.
- ▶ Spektrumukban erőteljesek a **hidrogén Balmer-vonalai** (legerősebbek az A0 típusnál) és az ionizált fémvonalak: **Fe II**, **Mg II**, **Si II** (legerősebbek az A5 típusnál). Gyengébbek a **hélium és a kalcium vonalai**.
- ▶ A fősorozati csillagok 0,63%-a ebbe az osztályba sorolható, ilyenek például a **Vega**, a **Deneb** és a **Sírius**.



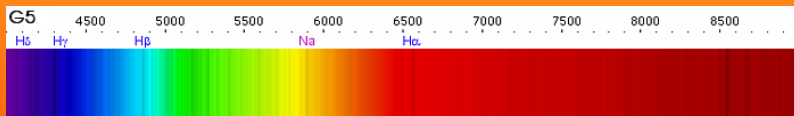
F SZÍNKÉPTÍPUSÚ CSILLAGOK

- ▶ Felszíni hőmérsékletük **6000 és 7500 K** közötti.
- ▶ Színképükben gyenge (F0-tól F9-ig gyengülő) **hidrogénvonalak** mellett a **Fe és a Cr egyszeresen ionizált** (F0-tól F9-ig erősödő) fémvonalait láthatjuk.
- ▶ A legerősebbek a **kalcium H- és K-vonalai**; e csillagok **fehérek vagy sárgák**. A fősorozat csillagainak 3,1%-a tartozik ebbe az osztályba – ilyen például a **Canopus** és a **Procyon**.



G SZÍNKÉPTÍPUSÚ CSILLAGOK

- ▶ Felszíni hőmérsékletük **5-6000 K**. Erről a színképosztályról tudunk a legtöbbet, mivel a **mi Napunk** is ebbe tartozik.
- ▶ A **semleges hidrogén vonalai** gyengülnek, a **semleges fémek vonalai** válnak a legerősebbeké.
- ▶ Az **egyszeresen ionizált kalcium H- és K-vonala** is látható. Rendkívül erős a **G-sáv** (valójában a CH és a Fe vonalainak csoportja).
- ▶ A fősorozat csillagainak 8%-a tartozik ide; a Nap mellett például a **τ Ceti** és a **Capella**.

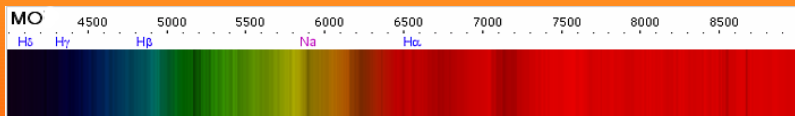


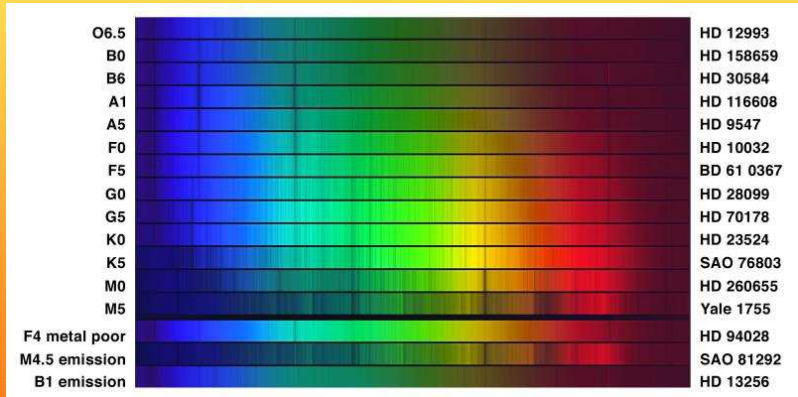
K SZÍNKÉPTÍPUSÚ CSILLAGOK

- ▶ Felületi hőmérsékletük 3000 és 5000 K közötti, színük narancssárga.
- ▶ Néhány közülük óriás vagy vörös óriás, de ide tartozik a fősorozat csillagainak 13%-a is (LeDrew).
- ▶ Bennük felerősödnek Mn I, Fe I, Si I semleges fémvonalai és a molekulasávok (főként TiO); a hidrogénvonalak már kevésbé jelentősek. Gyengülnek az ionizált fémek és az ionizált hidrogén vonalai.
- ▶ Ebbe az osztályba tartozik az Arcturus, az ϵ Eridani, az α Centauri B és az Aldebaran.

M SZÍNKÉPTÍPUSÚ CSILLAGOK

- ▶ Ez a csoport a **Secchi-féle rendszer III. osztályának** felel meg.
- ▶ Felszíni hőmérsékletük **2200–3500 K** közötti.
- ▶ Színképük **abszorpciós** (**CN, CH, CO, TiO, VO, MgH és H₂**) **molekulasávokat** és **semleges fémvonalakat** mutat.
- ▶ A fősorozat csillagainak több, mint 78%-a ebbe az osztályba sorolható - ilyen csillagok például a **Betelgeuse (óriáscsillag)**, a **Barnard-csillag** (törpe), a **Gliese 581** (vörös törpe).





A MELLÉKÁG CSILLAGAI

- ▶ Az R, N és S típusú csillagok a **vörös óriások mellékosztályai**.
- ▶ A Hertzsprung-Russell diagram **aszimptotikus óriáságán** helyezkednek el; magjukban már **nincs hidrogénfúzió**, aktív zónájuk egy, a mag körüli héjba szorul ki.
- ▶ Magjuk gyakorlatilag **forró, degenerált hélium**.
- ▶ A csillagok ezen **kettős héj-égését aszimptotikus óriáság-fázisnak** nevezzük. Ez a fázis a csillagok életében igen rövid, mivel a héliumfúzió – és vele a csillag ideiglenes stabilitása a kettős héjégés állapotában – nem tart sokáig.

R SZÍNKÉPTÍPUSÚ CSILLAGOK

- ▶ A G és az N osztály közötti, **átmeneti jellegűek**.
- ▶ Felszíni hőmérsékletük **3000 K** alatti.
- ▶ Színképük hasonlít a **K osztály csillagaié**hoz, de megfigyelhetők bennük a K osztályra **nem jellemző CN(cían) és CH (etin) ionok sávjai**.

N SZÍNKÉPTÍPUSÚ CSILLAGOK

- ▶ Felszíni hőmérsékletük **2000 K alatti**.
- ▶ Az Angelo Secchi által bevezetett osztályozási rendszerben a **IV. osztálynak** felelnek meg.
- ▶ Színképük hasonlít a **K osztály csillagaihoz**, de a **C₂ molekulásávok** is feltűnnek bennük.
- ▶ Az R és N színképtípusú csillagokat korábban a színképükre jellemző **szénmolekulák miatt egy osztályba** sorolták; ez volt a **C osztály** (széncsillagok).
- ▶ Később két különböző osztályra bontották, attól függően, hogy a színképsávjaikat **milyen típusú szénmolekula** okozza.

S SZÍNKÉPTÍPUSÚ CSILLAGOK

- ▶ Az **M csillagok és a szénscillagok közötti**, átmeneti jellegűek.
- ▶ Nevüket a belsejükben lejátszódó, ún. **s-folyamat**ról kapták, ugyanis ezekben a csillagokban nagy számban vannak jelen az s-folyamat végtermékei.
- ▶ Maga a folyamat egy **szabad neutron befogása** és az ezt kísérő **béta-bomlás** (a neutron egy protonra és elektronra bomlik), aminek következtében **eggyel nagyobb rendszámú elem keletkezik**.
- ▶ Az s-folyamat a **vasnál nagyobb tömegszámú elemek** kialakulásának egyik lehetséges mechanizmusa.

S SZÍNKÉPTÍPUSÚ CSILLAGOK

- ▶ Az ilyen csillagok színképében a **titán-oxid (TiO)**, **szkandium-oxid (ScO)** és **vanádium-oxid (VO)** kettős vonalain túl a **Zr (cirkónium)**, **Y (ittrium)** és **Ba (bárium)** vonalai is megtalálhatóak.
- ▶ Domináns még a **neutrális technécium** vonala és jelentős a **LaO molekulásáv**.
- ▶ Az S színképosztályba sorolt csillagok színképük alapján az **M típusú csillagok**hoz hasonlítanak, de spektrumukban igen jellegzetesek a **ZrO**, **YO** és **LaO molekulásávok**, valamint a **Zr**, **Mo**, **Ba**, **Tc** és egyes ritkaföldfémek vonalai.
- ▶ Minden ismert S típusú csillag **óriás vagy szuperóriás** – ilyenek például az S Ursae Majoris és a HR 1105 jelű csillag.

W-OSZTÁLY (WOLF–RAYET CSILLAGOK)

- ▶ A W-osztály a Wolf–Rayet csillagokat (W-R csillagok) foglalja magában.
- ▶ Ezen csillagok leginkább az **O típusúak**hoz hasonlítanak.
- ▶ Színképükben a **hidrogén és az ionizált hélium széles vonalai** dominálnak, de láthatók benne a **C, N és az O abszorpciós vonalai** is.
- ▶ Felszíni hőmérsékletük **70 000 K fölötti**.
- ▶ A napjainkban elfogadott elméletek szerint ezek olyan **kettős rendszerek tagjai**, amelyekben a kísérő "elszippantotta" a Wolf-Rayet komponens külső rétegeit, ezért az észlelt színképben a normál csillagfelszín összetétele helyett a jóval fejlettebb belső részekét (C, N, O vonalak) figyelhetjük meg.

W-OSZTÁLY (WOLF–RAYET CSILLAGOK)

- ▶ A spektrum széles vonalai a **csillagtól távolodó, sebes gázáramban** keletkeznek.
- ▶ Színképük domináns spektrumvonalai alapján három alosztályba sorolhatóak: **WC** (széngazdagok, például a γ Velorum A), **WN** (nitrogéngazdagok, például WR 124), **WO** (színképük emissziós szén-, nitrogén- és oxigénvonalakban gazdag, például WR93B). Mindhárom alosztályban megkülönböztetünk **korai és késői típusokat**, ezeket az alosztály utáni E, illetve L betűkkel jelöljük.
- ▶ Élettartamuk mindössze **néhány millió év**, **luminozitásuk a Napénak 10^5 -szerese**.
- ▶ Tömegük **20 naptömegnél nagyobb**, amiből gyorsan vesztenek a **nagyon erős (2000 km/s-nál nagyobb sebességű) csillagszél** hatására.

W-OSZTÁLY (WOLF–RAYET CSILLAGOK)

- ▶ Amíg a mi Napunk évente 10^{-14} naptömegnyit veszít tömegéből, addi a Wolf-Rayet csillagok esetében az évi tömegvesztés elérheti a 10^{-5} naptömeget.
- ▶ Ezek a csillagok a nagy tömegű csillagok fejlődésének kulcsfontosságú állapotában tartanak: ez a **szupernóva előtti (preszupernóva) fázis**.
- ▶ A Tejútrendszerben körülbelül 230, a Nagy Magellán-felhőben 100, a Kis Magellán-felhőben pedig 12 Wolf-Rayet csillagot ismerünk.
- ▶ A Wolf-Rayet csillagokat 1867-ben egy francia csillagász, **Charles Wolf** (Paris Observatory) fedezte fel spektroszkópiai úton.
- ▶ A legjobban ismert (legkönnyebben látható) Wolf-Rayet csillag a **Gamma Velorum** (γ Vel), ami egy 40° -os deklinációjú fényes csillag.

YERKES-RENDSZER (MKK-RENDSZER)

- ▶ Idővel kiderült, hogy azonos színképosztályú csillagokhoz **többféle tömeg és luminozításérték** is tartozhat, így szükségessé vált, hogy az osztályozásban a felületi hőmérsékleten kívül a **csillagfejlődésben elfoglalt állapotukat** is hozzárendeljék a csillagokhoz.
- ▶ William W. **Morgan**, Philip C. **Keenan** és Edith **Kellman**, a Yerkes Observatórium kutatói, kidolgozták a csillagok **kétdimenziós spektrálklasszifikációját**.
- ▶ A Harvard-féle osztályozáshoz hasonlóan ez is **empirikus rendszer**, itt **római számokkal** jelzett **luminozítási osztályokat** különböztetünk meg.

YERKES-RENDSZER (MKK-RENDSZER)

- ▶ A luminozítás valamely égitest egy meghatározott időtartam alatt kibocsátott össz sugárzása. Igen gyakran a Nap össz sugárzásának egységében fejezzük ki
- ▶ A luminozitást a $L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4$ képletből számíthatjuk ki, ahol L a luminozítás, σ a Stefan–Boltzmann állandó, R a csillag sugara, T_{eff} pedig az effektív felületi hőmérséklete.
- ▶ A tömeg és a luminozítás között a fősorozati csillagoknál durván az alábbi összefüggés áll fenn: $L \approx M^{3.5}$.

YERKES-RENDSZER (MKK-RENDSZER)

Yerkes spektrálklassifikációs rendszer			
Osztály	Alosztályok	Leírás	Példák
0	-	hiperóriások	ϵ Carinae (Ia-0, pekuliális spektrum)
I	Ia, Iab, Ib	fényes szuperóriások	Deneb (A2Ia színekép), Betelgeuse (M2 Ib)
II	IIa, IIab, IIb	fényes óriások	β Scuti vagy HD 173764 (G4 IIa), HR 8752 (G0 Iab), HR 6902 (G9 IIb)
III	IIIa, IIIab, IIIb	(normális) óriások	ρ Persei (M4 IIIa), δ Reticuli (M2 IIIab), Pollux (K2 IIIb)
IV	IVa, IVab, IVb	szubóriások	ϵ Reticuli (K1-2 IVa-III), HR 672 A (G0.5 IVb), AD Leonis (M4 Vae színekép)
V	Va, Vab, Vb	fősorozatbeli csillagok (törpék)	Nap (G2 V)
VI	-	szubtörpék	Kapteyn-csillag (HD 33793), Groombridge 1830, 2MASS J05325346+8246465
VII	-	fehér törpék	Szíriusz B
Kiegészítő jelölések			
jel	példa	értelmezés	
-	G I-II	színeképe alapján a csillag átmenet az I és II osztályok között	
+	O Ia+	Ia színeképtípusnál fényesebb csillagok	
/	M IV/V	a csillag M IV vagy M IV típusú	

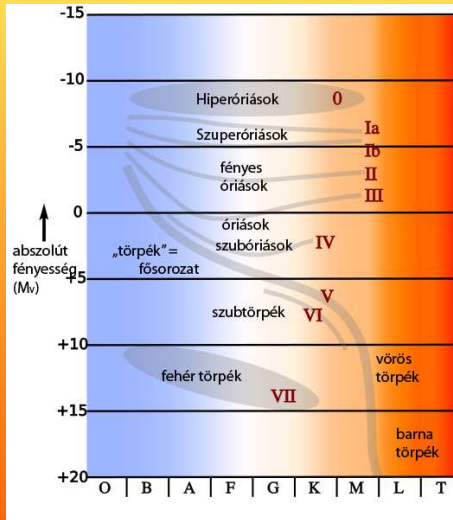
YERKES-RENDSZER (MKK-RENDSZER)

- ▶ A csillagok asztrofizikai állapotára tehát nem csak **színképtípusuk**, de **luminozitási osztályuk** is jellemző.
- ▶ Napunk például G2V típusú csillag, ahol a G2 jel csillagunk sárgás színére utal, a V szám pedig arra, hogy a Nap fősorozati csillag.
- ▶ Az MKK-rendszer további finomítására 1930-ban William Morgan az I. luminozitási osztályon belül bevezette az **Ib, Iab, Ia, Ia-0** **alosztályokat**.
- ▶ Az egyes luminozitási osztályba tartozó csillagok gyakorisága eltérő.
- ▶ A statisztikai vizsgálatokból azt a következtetést vonhatjuk le, hogy minden egyes szuperóriásra jut körülbelül 10^3 óriáscsillag, 10^7 fősorozati törpe, 10^4 szubtörpe, és durva becslések alapján 10^6 fehér törpe.

YERKES-RENDSZER (MKK-RENDSZER)

- ▶ Később, 1953-ban a standard csillagok és az osztályozás kritériumainak többszörös átdolgozása után, a rendszerezési sémát a három asztrofizikusról **MKK-osztályozás**nak nevezték el.
- ▶ A csillagok életútjuk során **mind luminozitásukat, mind színképüket változtatják.**
- ▶ Ezen a lassú változáson kívül, bizonyos köztes fejlődési fázisban, az úgy nevezett változócsillagok, gyors színkép- és luminozitásmódosulást is mutathatnak.
- ▶ A luminozitási osztályok érzékeltetésére a **Hertzsprung-Russell diagramot sematikus sávokra osztották**, amelyekben az egyes luminozitási osztályok képviselői helyezkednek el.

YERKES-RENDSZER (MKK-RENDSZER)

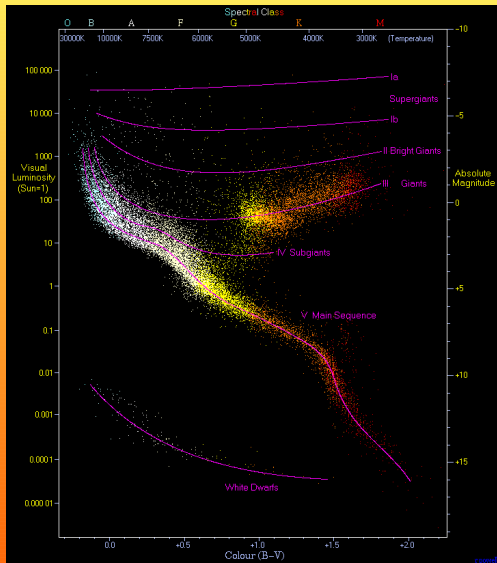


YERKES-RENDSZER (MKK-RENDSZER)

- ▶ Az MMK-féle osztályozásban olyan spektrumvonalakat is figyelembe vesznek, amelyek tulajdonságaiból a **csillag felszíni gravitációjára** lehet következtetni.
- ▶ Egy óriáscsillag felszíni gravitációs gyorsulás a sokkal kisebb, mint egy törpecsillag esetében ($g = \frac{GM}{R^2}$ és az óriáscsillagok esetében a sugár sokkal nagyobb mint a törpék esetében.
- ▶ A **kisebb gravitációs gyorsulás kisebb sűrűséget és gáznyomást** eredményez, ami befolyásolja az adott gázban kialakuló színeképvonalak profilját.
- ▶ Az MKK-osztályozás gyakorlatban a **Yerkes Színeképatlasz standardcsillagaival való összehasonlítás** alapján, becsléssel történik.

HERTZSPRUNG- RUSSELL DIAGRAM

- ▶ Ejnar Hertzprung és Henry Norris Russel 1905-1913
- ▶ A diagram függőleges tengelyén a csillagok abszolút fényességét magnitúdóban mérve, míg a vízszintes tengelyén a csillagok színeképét vagy az ezzel összefüggő felszíni hőmérsékletét (néha az ennek megfelelő színindexet) tüntetik fel.



HERTZSPRUNG- RUSSELL DIAGRAM

- ▶ A HR-diagramon (minden csillag egy ponttal jelzett) a csillagok többsége egy **balra fentről jobbra lefelé tartó vonal**, az úgynevezett **főág** mentén helyezkedik el.
- ▶ **Balra fent** a **nagy tömegű, igen fényes, kékes színű**, **középen** a **Naphoz hasonlatos sárga színű**, **míg jobbra lent** a **vörös színű törpecsillagok** találhatóak.
- ▶ A HRD **jobb felső részén** az úgynevezett **vörös óriáscsillagok**, **balra lent** pedig a **fehér törpecsillagok** tűnnek fel.
- ▶ A diagram **többi része** lényegében **üres**.
- ▶ A **főágon** található **leghalványabb csillagok alkotják a legnépesebb csoportot**, a **vörös óriáscsillagok ritkábbak**, mint a **fehér törpecsillagok**.

HERTZSPRUNG- RUSSELL DIAGRAM

- ▶ 1913-ban Henry Norris Russel amerikai csillagász vizsgálta a csillagok színének és fényességének kapcsolatát.
- ▶ Russel szerint a csillagok abszolút fényessége összefüggésben van színükkel, mégpedig úgy, hogy a már Hertzsprung által is használt szín-fényesség diagramon a csillagok lényegében három ág mentén helyezkednek el.
- ▶ Mára világos lett, hogy ezen ágak a csillagok fejlődésében azon állapotokat jelentik, amelyekben életük során hosszabb ideig tartózkodnak.
- ▶ A csillagok állapothatározói (tömeg, fényesség, felszíni hőmérséklet, spektrum) nem függetlenek, közöttük empirikus összefüggések fedezhetők fel, mint például az empirikus tömeg-fényesség reláció.

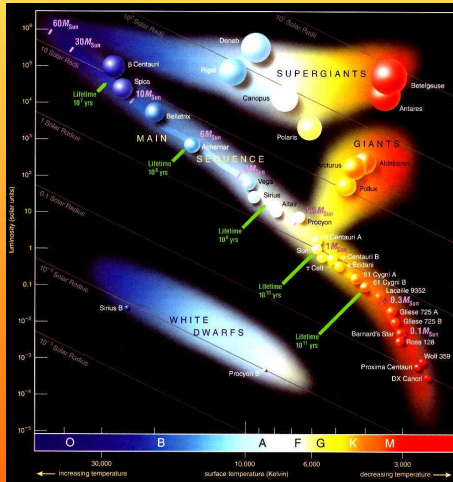
TÖMEG-FÉNYESSÉG RELÁCIÓ

- ▶ A csillagok fényessége, pontosabban a luminozitása, a tömegük három és feledik hatványával arányos.
- ▶ Tovább vizsgálva a csillagok tömeg-fényesség eloszlását azt mondhatjuk, hogy a **0 és 7 magnitúdó közötti** abszolút fényességű csillagok fényereje a **tömegük negyedik hatványával**, míg a halványabb, **7 magnitúdó feletti** csillagok fényessége **tömegük másfeledik hatványával** arányos.
- ▶ Ezen megállapítások alól csupán az igen kicsi, úgynevezett **fehér törpecsillagok és a hatalmas vörös óriáscsillagok** kivételek.
- ▶ A csillagok tömege és fényessége között felismert tapasztalati törvényszerűséget (empirikus tömeg-fényesség reláció) felhasználva **meghatározhatjuk a magányos csillagok tömegét.**

TÖMEG-FÉNYESSÉG RELÁCIÓ

- ▶ A csillagok tömeg-fényesség relációja nem véletlen, ugyanis a csillagok tömege, fényessége és sugara közül már egyetlen paraméter is egyértelműen meghatározza a csillag szerkezetét. Ezt Vogt-Russel tételnek nevezzük a csillagászatban.
- ▶ E tételnek az a fontos következménye, hogy a csillagok a fényesség–felszíni hőmérséklet vagy a fényesség–színképtípus diagramok meghatározott területeit népesítik csak be, attól függően, hogy az adott csillag élete mely fejlődési fázisában van.
- ▶ A csillagok ezen diagramját felfedezőikről Hertzsprung–Russel-diagramnak (HRD) nevezzük.

HERTZSPRUNG- RUSSELL DIAGRAM



HRD FŐÁGA

- ▶ A HRD bal felső sarkától a jobb alsó sarkáig kirajzolódó egyenes mentén az úgynevezett főági csillagokat találhatjuk meg.
- ▶ A HRD ezen ágát nevezzük főágnak.
- ▶ A csillagok születésük pillanatában tömegüktől függő magasságban a HRD főágán jelennek meg, s életük során egyre magasabbra vándorolnak.
- ▶ A főágon elhelyezkedő csillagok sugara a Nap sugarával egy nagyságrendbe esik.

HRD FŐÁGA

- ▶ A fősorozati csillagok abszolút fényessége egyértelműen meghatározza színképosztályukat.
- ▶ Ennek alapján, valamint a csillag látszólagos fényességéből lényegében meghatározható a csillag távolsága is. Ezt nevezzük **spektroszkópiai parallaxisnak**.
- ▶ A HRD főágának **bal felső szakaszán a nagytömegű, igen fényes kékesfehér csillagok**, középpontján a naptípusú sárga csillagok, míg a jobb alsó szakaszán **vörös törpecsillagok** találhatók.
- ▶ A **csillagok életük nagyrésztét** töltik a főág valamely szakaszának megfelelő színű és fényességű állapotban, és ez az oka annak, hogy a **főág igen népes csillagokban**.

HRD VÖRÖS ÓRIÁS ÁGA

- ▶ A csillagok élete során centrális tartományukban magfúziós folyamatok zajlanak, mely biztosítja a csillag energiatermelését.
- ▶ Azonban a fúziós reakciók (a csillagok tömegétől függően) előbb utóbb (minél nagyobb a csillag tömege annál hamarabb) elfogyasztják a reakció alapanyagait.
- ▶ E miatt a csillag kémiai összetétele megváltozik.
- ▶ Ha a csillag magjában elfogy a hidrogén, akkor **elfejlődik a HRD jobb felső tartományában kirajzolódó vörös óriáság felé.**
- ▶ **A csillag óriási méretűre fúvódik.**

HRD VÖRÖS ÓRIÁS ÁGA

- ▶ A vörös óriáságon elhelyezkedő **csillagok sugara a Nap százszorosát** is elérheti.
- ▶ Ugyan centrumuk a hőmérséklete magasabb, mint a főági csillagoké, de a hatalmas mérete miatt a **felszíni hőmérséklet alacsonyabb**.
- ▶ Ez az oka annak, hogy a **csillag színe vörössé** válik.
- ▶ A felfúvódás után a vörös óriáscsillagok hosszabb ideig (amíg a hélium ki nem fogy a magból) újra egyensúlyi állapotba kerülnek.

HRD FEHÉR TÖRPECSILLAGAI

- ▶ A vörös óriás állapotban levő csillag magjában héliumfúzió folyik.
- ▶ Ha a csillag tömege elegendően nagy, a hélium elfogytával, újabb fúziós reakciók indulhatnak be.
- ▶ Ezek során a 40-es tömegszámú kalciumig felépülnek a kémiai elemek.
- ▶ A fúziós reakciók során végezetül vas alakulhat ki a csillag magjában, de ekkor már újabb energiatermelő folyamat nem tud létrejönni, s a csillag elkezdi összehúzódni és fehér törpecsillag alakul ki.

HRD FEHÉR TÖRPECSILLAGAI

- ▶ A csillag ezalatt a Hertzsprung–Russel-diagram (HRD) vörös óriáságáról a fehér törpecsillagok csoportjába, a **diagram bal alsó sarkába fejlődik**.
- ▶ A korábbi vörös óriás állapotban a csillag sok anyagot veszített (igen nagy mérete miatt a csillag felszíni régiója gravitációsan gyengén kötött).
- ▶ Ezért a fehér törpecsillagok tömege már "csak" **nagyjából naptömeg körüli**.
- ▶ Színük a kis méretük miatt kialakuló magas felszíni hőmérséklet következtében válik fehérré.

HRD FEHÉR TÖRPECSILLAGAI

- ▶ A fehér törpecsillagokban energiatermelés híján az összehúzódás addig tart, míg az anyag elfajulttá válik.
- ▶ Ugyanis az energiatermelő folyamatok hiányában csak az **elfajult anyag** nyomása lesz képes megállítani az összehúzódást.
- ▶ A fehér törpecsillagok sugara lényegében a **Föld sugarával esik egy nagyságrendbe**.
- ▶ Gyakorlatilag **minden 8 naptömegnél kisebb csillag fehér törpecsillagként** fejezi be életét, ezért lesz csillagokban **igen népes a HRD-n a fehér törpecsillag csoport**.

CSILLAGFEJLŐDÉS A HRD-N

- ▶ A csillagok az **intersztelláris anyag összetömörülésével** jönnek létre. Ez a folyamat a Tejútrendszerben ma is tart.
- ▶ A csillagok a Tejútrendszerben csoportosan, szinte kizárólag **óriásmolekulafelhőkben keletkeznek**
- ▶ A csillagközi anyag összetömörülését a **gravitáció okozza**.
- ▶ A gravitációt a **turbulencia és a mágneses tér ellensúlyozza**, de nem teljesen, így a sűrűbb felhőmagok lassan összehúzódnak.
- ▶ A felhőmag kollapszusa elsődleges és másodlagos hatásokra is beindulhat
- ▶ A csillagkeletkezés "ragályos", egyik felhőről a másikra terjedhet, spontán vagy indukált módon

CSILLAGFEJLŐDÉS A HRD-N

- ▶ A mag sűrűsödésével **egyre nő annak a tömege**, ugyanakkor a felhő anyagának impulzusomentumának köszönhetően **egyre gyorsabban forog** $\Rightarrow$ **akkréciós korong** alakul ki
- ▶ Amikor a csillag belsejében a hőmérséklet eléri a deutériumégéshez szükséges néhány millió kelvint, majd a fúzió beindulásával láthatóvá válik a csillag
- ▶ Ekkor fejlődik rá a **csillag a születés vonal mentén a fősorozatra**.
- ▶ A fősorozaton a **hidrogén-hélium fúzió termeli az energiát**.
- ▶ Minden csillag az **életének a zömét** a fősorozaton tölti.

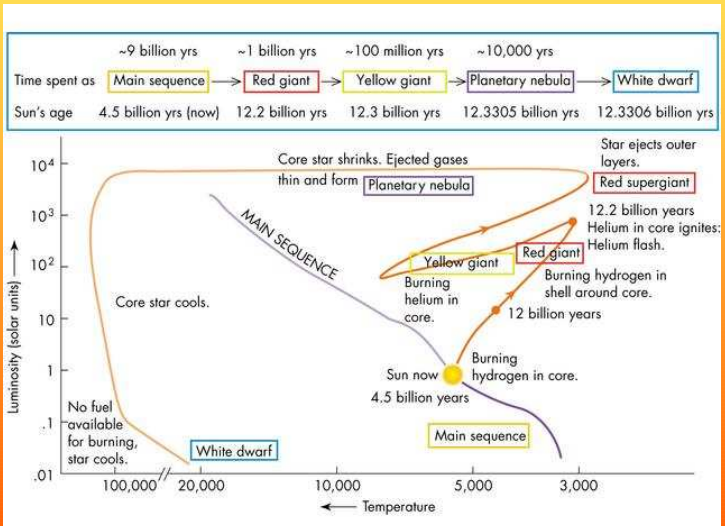
CSILLAGFEJLŐDÉS A HRD-N

- ▶ Ha a magba elfogy a hidrogén, a csillag összehúzódik, és a mag körüli héjba begyullad a hidrogén, egy **héjforrásba** tevődik át a **fúzió** $\Rightarrow$ **szubóriás állapot**.
- ▶ A csillag letér a főágról és **egyre gyorsabban mozog a vörös óriás ág felé**
- ▶ Mindeközben a **csillag külső rétegei hatalmas méretűre fújódnak fel**.
- ▶ Amikor a csillag sugáregyensúlyba jut, akkor éri el a **vörös óriáságot**.
- ▶ Egy idő után a magban begyullad a hélium, és a csillagban ettől kezdve két energiaforrás van jelen: **egy He-égető mag és egy H-égető héj**.
- ▶ A magjukban héliumot égető csillagok a HRD-n a **horizontális ágon helyezkednek el**.

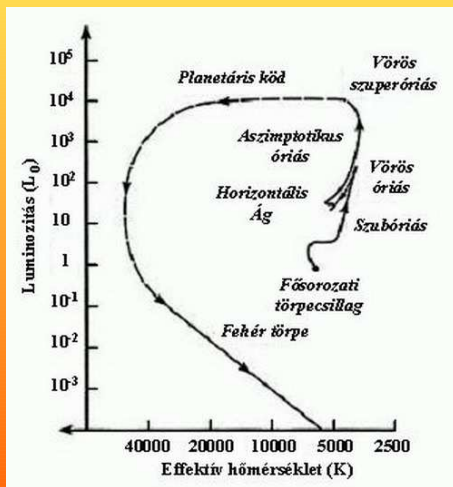
CSILLAGFEJLŐDÉS A HRD-N

- ▶ Amikor a magban elfogy a hélium, és a héliumégés a mag körüli héjba tevődik át (**kettős héj égés**), akkor van a csillag az **aszimptotikus óriáságon**
- ▶ A kis tömegű csillagok levetik külső burkukat $\Rightarrow$ **planetáris köd**
- ▶ Először **forró fehér törpe**, majd ahogy hűl, lassan fekete törpévé válik
- ▶ A nagytömegű csillagok életük végét **szupernóvaként** fejezik be.

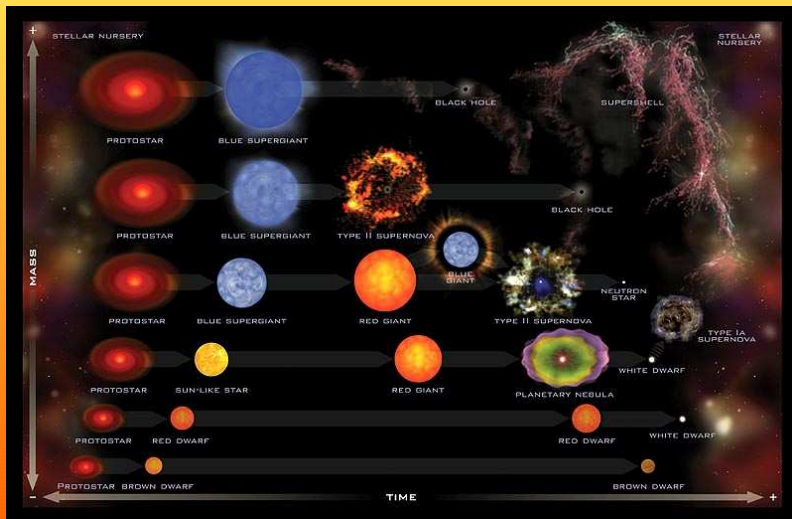
CSILLAGFEJLŐDÉS A HRD-N



CSILLAGFEJLŐDÉS A HRD-N



CSILLAGFEJLŐDÉS A HRD-N



GÖMBHALMAZOK HRD-JE

- ▶ A szabadszemmel csupán **köralakú ködfoltoknak látszó csillagtársulások** az úgynevezett gömbhalmazok.
- ▶ A **centrális tartomány felé egyre sűrűbben** láthatók csillagok, a középpontban a csillagsűrűség olyan nagy, hogy még a legjobb felbontóképességű távcsövekkel sem bomlanak csillagokra.
- ▶ A gömbhalmazokban **50 ezer és 50 millió közötti** a csillagok száma.
- ▶ Egy átlagos gömbhalmaz **átmérője 30 parsec**, de elérheti akár a 100 parsecet is.
- ▶ A Nap környezetében mérhető csillagsűrűséghez képest a gömbhalmazok csillagai igen sűrűn helyezkednek el egymáshoz képest.
- ▶ Míg egy gömbhalmaz szélein a **csillagsűrűség tízszerese**, addig a centrumban már akár **ezerszerese** is lehet a **Nap környezetében tapasztaltnál**.

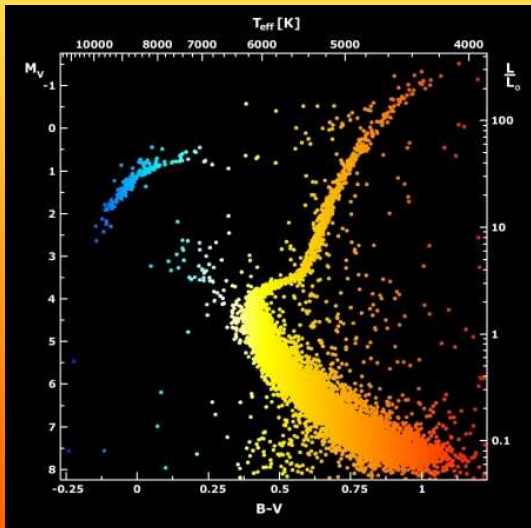
GÖMBHALMAZOK HRD-JE

- ▶ A Tejútrendszer körülölelő, úgynevezett **galaktikus haloban**, a galaxis centruma körül **gömbszimmetrikus eloszlásban** elhelyezkedő gömbhalmazok sokkal meszebb vannak tőlünk, mint a nyílthalmazok.
- ▶ A gömbhalmazok **dinamikailag zárt rendszert** alkotnak, és a halmazbeli csillagok igen nagy száma miatt (egy gravitációsan kötött rendszer annál tovább tud kötött maradni, minél nagyobb tömegű, azaz minél több csillag van benne) élettartamuk elérheti a 10 milliárd évet is.
- ▶ A gömbhalmazok HRD-jén **jól látható mind a főág, mind a vörös óriáság** is.
- ▶ Azonban a $M_V \sim 0$ mag-nál egy úgynevezett **horizontális ág** is **látható**, amely csak a gömbhalmazok HRD-jére jellemző.

GÖMBHALMAZOK HRD-JE

- ▶ Mivel a **gömbhalmazok idősek**, bennük számos, fejlődésük késői állapotában lévő csillagok figyelhetők meg.
- ▶ A **horizontális ág egy tartományán sokkal kevesebb csillag** van, mint tőle balra vagy jobbra.
- ▶ Ezt **RR Lyrae** **űrnek** nevezzük, mert itt helyezkednek el az RR Lyrae típusú változócsillagok.
- ▶ Az RR Lyrae csillagok olyan periódikus változócsillagok, melyek **periódusuk meghatározása segítségével meghatározhatjuk a gömbhalmaz távolságát**.
- ▶ Ugyanis ezen csillagok abszolút fényessége egyenes arányban áll a megfigyelt fényváltozási periódusuk nagyságával.

GÖMBHALMAZOK HRD-JE



NYÍLTHALMAZOK HRD-JE

- ▶ A nyílthalmazok **tíz vagy legfeljebb néhány ezer csillagot** tartalmazó csillagcsoportosulások.
- ▶ A Tejútrendszer síkjában található nyílthalmazok **számát mintegy 15 ezerre becsüljük.**
- ▶ E csillagtársulások **átmérője átlagosan 3-4 parsec-nyi**, de a legnagyobbak elérhetik a 20 parsec-et is.
- ▶ A nyílthalmazok **dinamikailag zárt rendszert alkotnak, de nem olyan erősen kötött**, mint a gömbthalmazok.
- ▶ Ennek az az oka, hogy a nyílthalmazokban jóval kevesebb csillag van, mint a gömbthalmazokban.
- ▶ Így a nyílthalmazok átlagosan **százmillió, de legfeljebb 3 milliárd év alatt felbomlanak.**
- ▶ A nyílthalmazokat empirikus módon **háromféleképpen klasszifikálhatjuk.**

NYÍLTHALMAZOK HRD-JE

- ▶ A nyílthalmazok **csillagsűrűségük** szerint négy külön csoportba sorolhatók:
 - ▶ I. Erős csillagkoncentráció a nyílthalmaz centruma felé
 - ▶ II. Gyengébb, de még jól észrevehető koncentráció
 - ▶ III. Feltűnő csillagkoncentráció nélküli, de a háttérsillagok közül még kiemelkedik a halmaz
 - ▶ IV. Véletlenszerű csillagszámnövekedés látható csupán

NYÍLTHALMAZOK HRD-JE

- ▶ A halmaztag csillagok **látszófényessége** alapján három nyílthalmaz osztályt különböztethetünk meg:
 - ▶ Minden csillagnak nagyjából azonos a fényessége
 - ▶ A csillagok fényesség szerinti eloszlása egyenletes
 - ▶ Néhány igen fényes csillag mellett vannak sokkal halványabbak, nagyobb fényességtartományban egyenletes eloszlás látható
- ▶ A nyílthalmazbeli **csillagok száma** szerint három csoportot szokás elkülöníteni:
 - ▶ p (poor): 50-nél kevesebb csillagot tartalmazó
 - ▶ m (moderately): 50 és 100 közötti csillagot tartalmazó
 - ▶ r (rich): 100-nál több csillagot tartalmazó

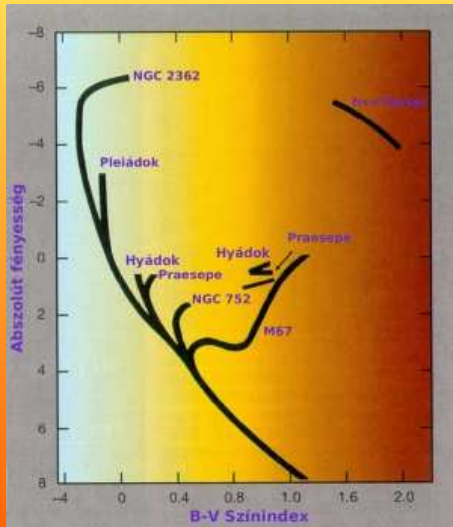
NYÍLTHALMAZOK HRD-JE

- ▶ A **legismertebb** nyílthalmaz a Bika csillagképben található **Pleiádok** (klasszifikációja **I13r**), melynek csillagait már szabadszemmel is elkülöníthetjük.
- ▶ Ugyancsak a Bika csillagképben látható a Pleiádoknál kisebb **Hyádok** (klasszifikációja **I13m**).
- ▶ Végezetül megemlítjük a Rák csillagképben található **Praesepe** (**M44**) nyílt halmazt, mely szabad szemmel csupán elmosódott ködfoltként látható (klasszifikációja **I2r**)
- ▶ A nyílt halmazok csillagainak Hertzsprung-Russel diagramjai összehasonlítása igen érdekes eredményre vezet. (A nyílthalmazok HRD-jén szokás az abszolút magnitúdó helyett a vizuális látszó fényességet feltüntetni, ugyanis a halmaz tagjai tőlünk közel azonos távolságra vannak.)

NYÍLTHALMAZOK HRD-JE

- ▶ A nyílt halmazok HRD-jét szemügyre véve a halmazt alkotó csillagok jól kirajzolják a főágot valamint a főágról leágazó vörös óriáságot.
- ▶ A Pleiádok és a Hyadok nyílthalmazok HRD-je abban különbözik egymástól, hogy a Pleiádok csillagai nem rajzolják ki olyan egyértelműen a vörös óriás ágot, mint a Hyadok csillagai.
- ▶ Ha megfigyeljük e két nyílthalmaz HRD-jét az is feltűnik, hogy a Pleiádok csillagai sokkal nagyobb fényeségekig (hosszabban) rajzolják ki a főágot.
- ▶ Azt a fényesség értéket, melynél a főág véget ér és a vörös óriáság kezdődik lekanyarodási magasságnak nevezzük.
- ▶ Ha több nyílthalmaz HRD-jét is összehasonlítjuk szembetűnik, hogy minden egyes nyílthalmaz lekanyarodási magassága más.

NYÍLTHALMAZOK HRD-JE



NYÍLTHALMAZOK HRD-JE

- ▶ Mivel a nyílthalmazok csillagai gyakorlatilag **egyszerre** keletkeztek, azok **azonos korúak**nak vehetők, ezért a **különböző** korú nyílthalmazok HRD-je **eltérő** lesz.
- ▶ Minél idősebb a halmaz, annál nagyobb fényességértékeknél (kisebb abszolút magnitúdóknál, azaz lejjebb) történik meg a főág óriáságra történő lekanyarodása.
- ▶ A fiatal nyílthalmazok csillagai olyan fiatalok, hogy azok még mind a HRD főágán helyezkednek el, nincs vörös óriáscsillag a halmazban.
- ▶ Azonban a már **öregebb nyílthalmazokban** a legnagyobb tömegű csillagok (mivel gyorsabban égetik el hidrogénkészletüket) már vörösórássokká fejlődtek, így a **halmaz HRD-jén** kivehető a **vörös óriáság**.

KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!