

Fejezetek az asztrofizika történetéből

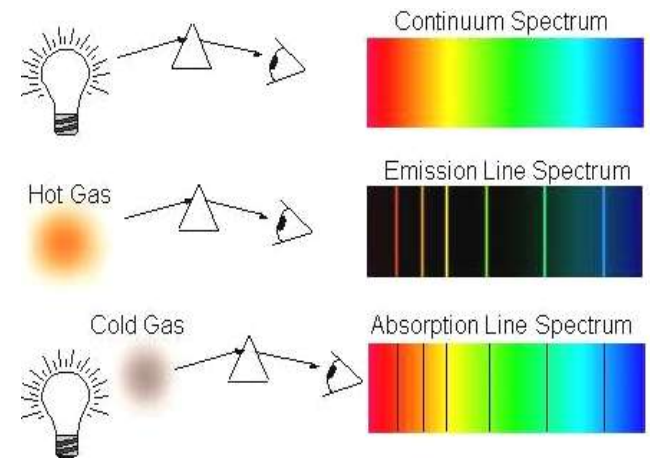
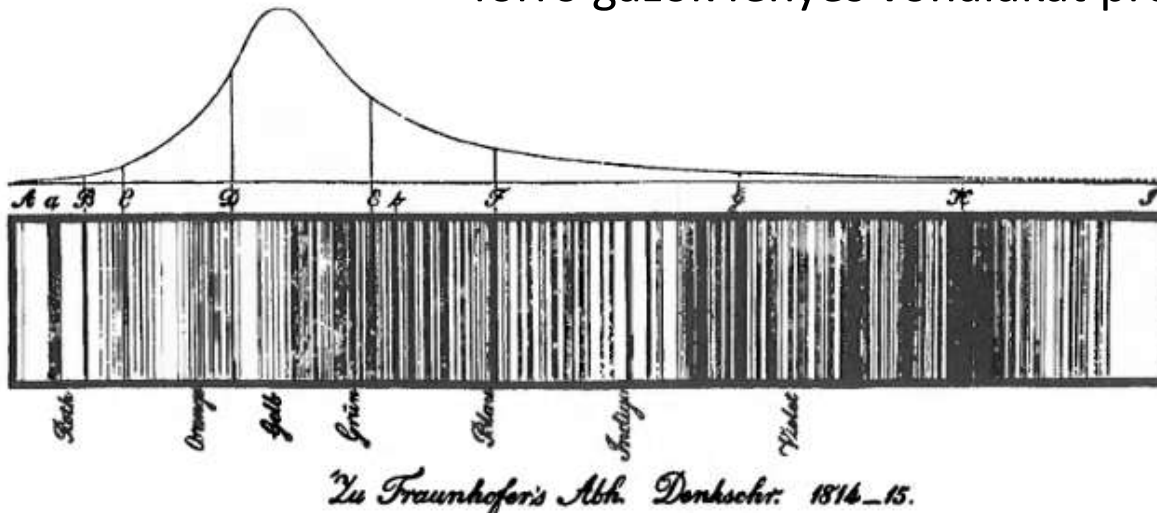
A csillagászat története 2., 2015. április 24.

Csillagászat és fizika

- Arisztotelész, Ptolemaiosz: a fizika (változó anyagi világ) és a csillagászat (változatlan, szabályos égi mozgások) külön terület, nem keveredik
- Kepler: „égi fizika”: a bolygómozgások oka a Nap fizikai hatása („erők”)
- Newton: „matematikai természetfilozófia”: erők és mozgások kapcsolata
- August Comte, 1835:
„A csillagokkal kapcsolatban minden olyan vizsgálódás, amely nem teljesen visszavezethető egyszerű vizuális észlelésre (...), szükségszerűen elérhetetlen a számunkra. Ugyan el tudjuk képzelni, hogy meghatározzuk alakjukat, méreteiket és mozgásukat, de sose válunk képessé arra, hogy bármilyen módon is vizsgáljuk kémiai összetételüket vagy ásványtani szerkezetüket... Úgy vélem, hogy a csillagok igaz átlaghőmérsékletének meghatározása örökre lehetetlen marad.”
- 1895: *The Astrophysical Journal*

Ismétlés: spektroszkópia

- 1666, Newton: a Nap fénye folytonos spektrumra bontható
- 1802, William Hyde Wollaston: fekete vonalak a Nap spektrumában
→ szerinte ezek a természetes színek határai
- 1814-15, Josph von Fraunhofer: kb. 600 sötét vonal a Nap spektrumában
+ ekkoriban: földi gázok is produkálnak hasonló sötét vonalakat
+ forró gázok fényes vonalakat produkálnak

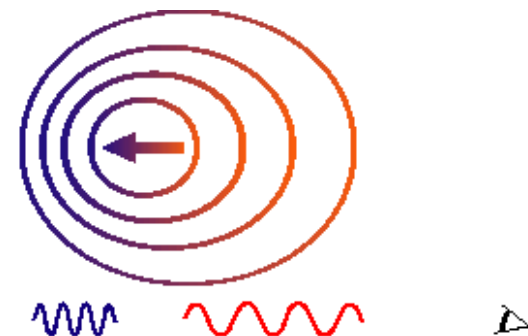


- 1859-62, Gustav Kirchhoff és Robert Bunsen:
adott anyag adott hullámhosszú fényt hajlamos kibocsátani/elnyelni
→ a vonalak a közeg anyagi összetételéről nyújtanak információt:

A Nap korai spektroszkópiája

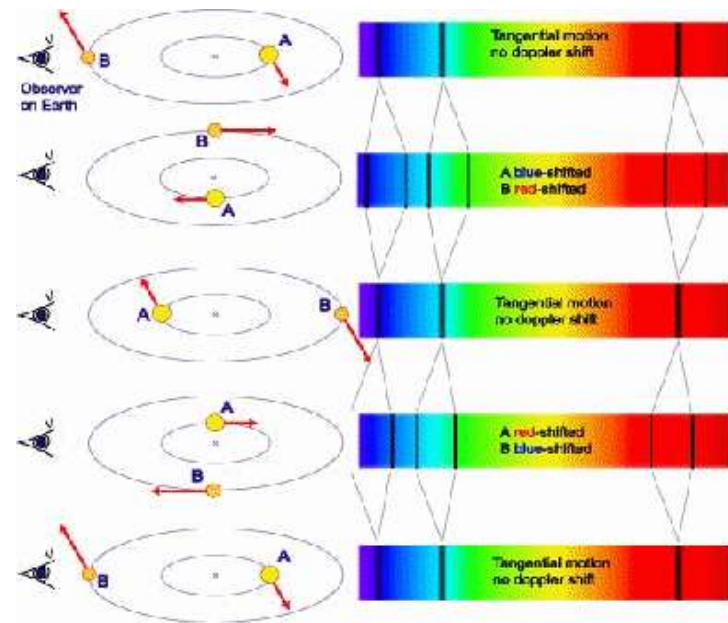
- „szoláris kémia”: a forró Nap fénye hidegebb gázon halad át
- távcsőhöz spektroszkóp: az egyes részek színeképe (foltok, fáklyák)
 - fogyatkozáskor: korona, kromoszféra, protuberanciák
 - fotográfia → gyorsabb, pontosabb, utólag elemezhető
- 1842: (Christian) Doppler-effektus
 - a vonal eltolódása – radiális mozgáskomponens
 - 1868, Norman Lockyer (és mások): napfoltokban, protuberanciákban heves áramlások (több száz km/s)
 - mérhető a fogás sebessége: ellentétes szélek spektrumának eltolódása
- atmoszféra: abszorpciós vonalak: H + fémek (W. Huggins: H, Na, Fe, Mg, Ca)
- fotoszféra: fényes spektrum forrása
 - befelé gyorsan nő a hőmérséklet
 - + kicsi a sűrűség (Földének negyede)
 - + heves kavargások a felszínen

} → többnyire nagyon forró és sűrű gáz
- kívül: fotoszféra → megfordító réteg → kromoszféra → korona



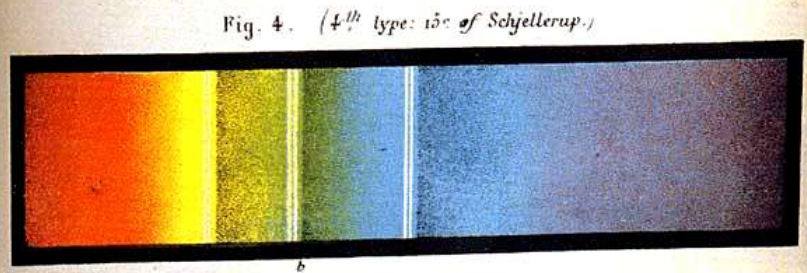
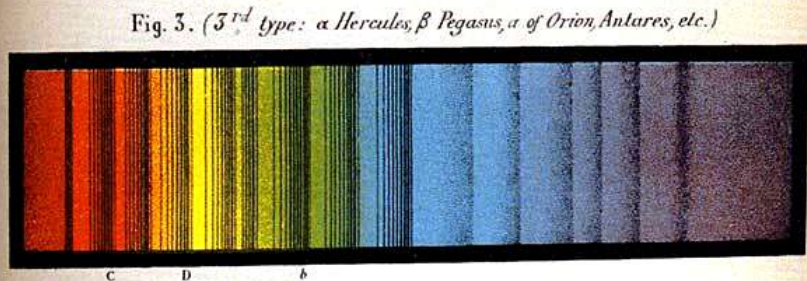
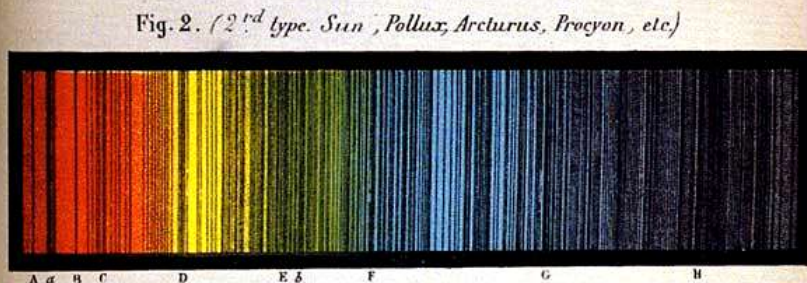
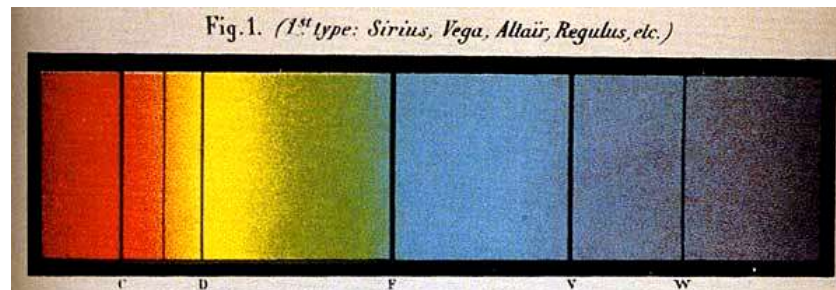
Csillagok és ködök spektroszkópiája

- 1823, Fraunhofer: a csillagok színeképében is sötét vonalak
 - Castor, Szíriusz: hasonló, de nem ugyanaz a minta, mint a Nap esetén
- 1864, Huggins: ugyanazok az elemek a csillagokban, mint a Naprendszerben
- 1868: 70 köd színeképe → kb. $\frac{1}{3}$ -uk esetében fényes vonalak → gázköd ✓
(de másoknál folytonos spektrum → csillaghalmazok)
- 1868, Angelo Secchi: csillagok osztályozása vonalak szerint (lásd köv. fólia)
→ fejlődési vonalakat, korokat sejtenek
- 1868, Huggins: Doppler-eff. alapján sajátmozgások radiális komponense
- 1889, Edward Pickering: spektroszkópiai kettősök (ζ Ursae Majoris, „Mizar”)
 - nem látszik a kísérő (halvány v. túl közeli), de hatására a főkomponens oszcillál a közös TKP körül: vagy periodikusan mozognak a vonalak (Doppler), vagy bizonyos vonalak periodikusan megkettőződnek



A Secchi-féle osztályozás (1868)

- I. Fehér vagy kék csillagok, nagyon erős H-vonalakkal, és alig észlelhető fémekkel (Szíriusz, Vega)
 - II. Sárga vagy narancssárga csillagok, kevésbé erős H- és erősebb fémvonalakkal (Capella, Aldebaran, Nap)
 - III. Narancsvörös csillagok, sok fémvonalal, H-vonalak nélkül (Betelgeuse, Antares)
 - IV. Vörös csillagok, jelentős szénvonalakkal (R Cygni)
- (+ β Lyrae, γ Cassiopeiae: erős H em. vonalak
↔ ez túl kevés saját kategóriához)
- új szempont a csillagok osztályozásában (pozíció, fényesség, szín mellett), de
→ teljesen fenomenologikus: ennyi kategória tűnik körvonalazódni



A Henry Draper katalógus osztályai (1890)

Pickering: >10 000 csillag átfogó klasszifikációja (-25° deklinációig):

- A. Fehér csillagok erős H abszorpciós vonalakkal (Vega, Szíriusz)
- B. Kékesfehér csillagok H és He vonalakkal (Rigel)
- C. Csillagok kettős vonalakkal (→ ez később tévesnek bizonyul és kiesik)
- D. Fehér vagy kék csillagok emissziós vonalakkal
- E. Sárga csillagok bizonyos H abszorpciós vonalakkal
- F & G. Mint E, csak gyengébb H és erősebb fém vonalakkal (Canopus, Capella, Nap)
- H. Mint F, de a kék hullámhosszakon gyenge vonalakkal
- I. Mint H, néhány plusz vonallal
- K. Narancs csillagok emissziós vonalakkal (Arcturus, Aldebaran)
- L. Csillagok sajátos vonalakkal
- M. narancsvörös csillagok, gyakorlatilag H-vonalak nélkül, komplex spektrummal (Betelgeuse, Antares)
- N. Vörös csillagok erős szénvonalakkal (R Cygni)
- O. Wolf-Rayet csillagok: halványak széles emissziós vonalakkal
- P. Planetáris ködök
- Q. egyéb

A Harvard-klasszifikáció (1912)

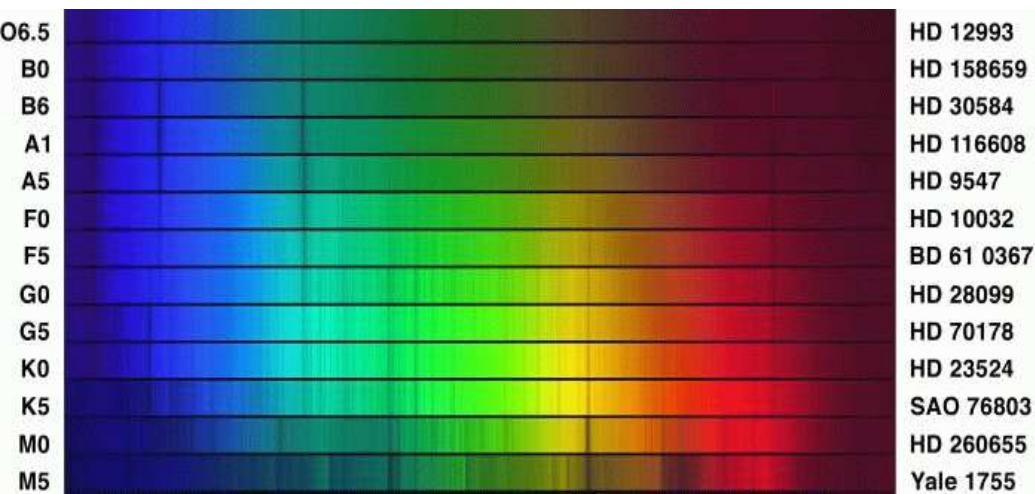
Pickering pontosítani akar → rábízta a „női komputerekre”:

- Antonia Maury: 681 fényes csillag színeképe
→ vonalak élessége alapján saját osztályozási rendszer:
 - a. legkevésbé; b. közepesen; c. legélesebb
 - a c-be csak 18 tartozik, erős fémvonalakkal
→ miért éles? forró? (Lockyer) fényes? (Hertzsprung)
 - az eredeti elképzelés szerint a csillag az ABC mentén haladna előre a fejlődés során, de Maury szerint $O \rightarrow B \rightarrow A$ sorrenddel kezdődik
- Annie Jump Cannon, 1896-1901: 1122 déli csillag osztályozása
 - szerinte a sorrend $O \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow K \rightarrow M$
 - O-t és M-et alosztályokra osztja
- Williamina Fleming: N típusúakat is bevesz a saját katalógusába
- Pickering, 1908: R típus: hasonló absz. vonalak az N típushoz, de sokkal kékebb
- Cannon, 1912: összefoglalás: kb. 5000 csillag részletes elemzése



A Harvard-klasszifikáció mint standard

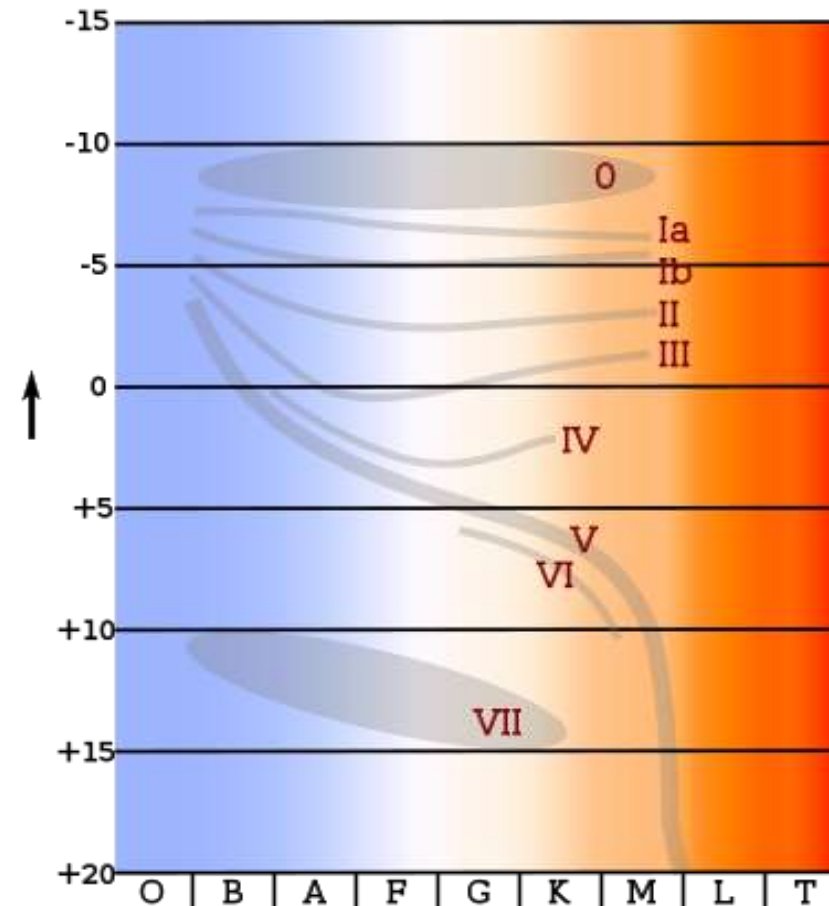
- 1913: a Nemzetközi Napszövetség elfogadja ideiglenes standardként
- 1922: a Nemzetközi Csillagászati Szövetség (IAU, alapítva 1919) hivatalos rendszerként elfogadja
- 1918-24, Cannon: új Henry Draper (HD) katalógus: 225 300 csillag spektruma
→ 9 kötet: 9 mag-ig majdnem teljes felmérés
 - 8. kötetben új típus: S: nagyon komplikált abszorpciós és emissziós vonalak 450-470 nm tartományban
- később kiegészítő kötetek: bizonyos területek még részletesebb felmérése
→ összesen 359 083 csillag



Secchi	Draper	Comment
I	A, B, C, D	Hydrogen lines dominant.
II	E, F, G, H, I, K, L	
III	M	
IV	N	Did not appear in the catalogue.
—	O	Wolf–Rayet spectra with bright lines.
—	P	Planetary nebulae.
—	Q	Other spectra.

Az MKK fényesség-osztályok (1943)

- 1920-30-as évek: intenzitás és színekép közötti összefüggések
→ nem elég az „egydimenziós”, színképen alapuló osztályozás
- William W. Morgan, Philip Keenan, Edith Kellman: fényesség mint dimenzió:
 - Ia: legfényesebb szuperóriások
 - Ib: kevésbé fényes szuperóriások
 - II: fényes óriások
 - III: normál óriások
 - IV: szubóriások
 - V: fősorozati csillagok
 - (+ később:
 - 0: hiperóriások
 - VI: szuptörpék
 - VII: fehér törpék)
- (fényesség: vonalak (ionizált/nem ionizált) intenzitás-arányai alapján)



Korai fejlődés-elméletek

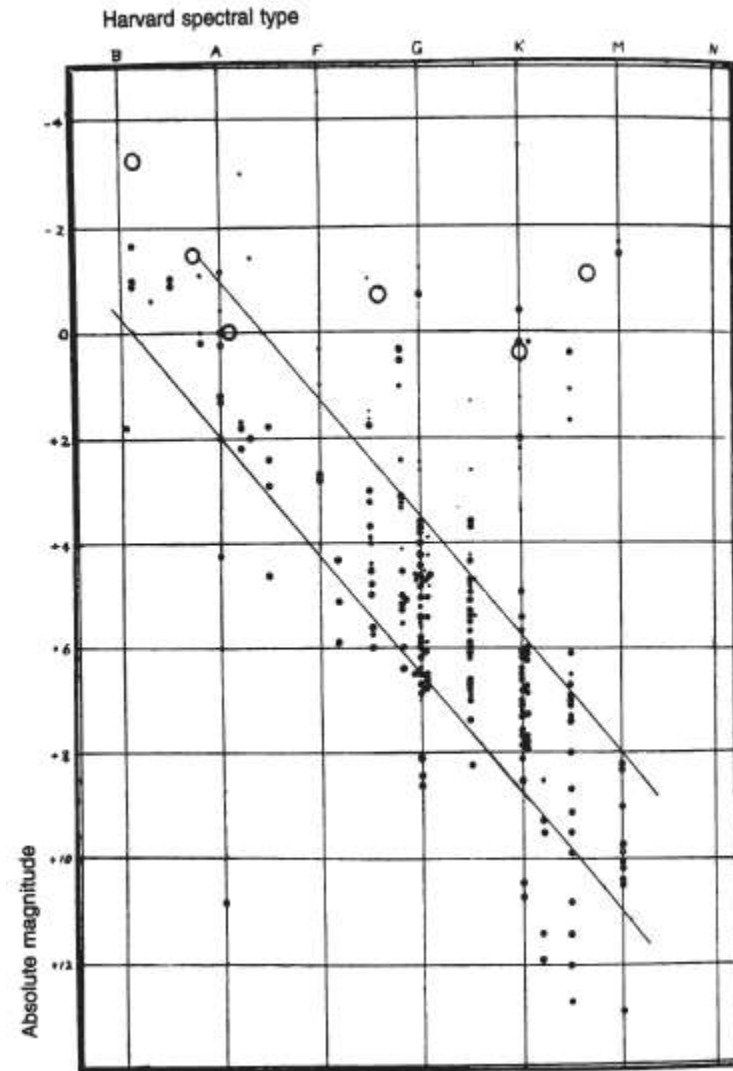
- 1865, J.K.F. Zöllner: planetáris gázköd → **összehúzódás, hűlés** → folyékony mag, szilárd köpeny (töredezett: forró folyadékot enged ki: változócsillagok) → tovább hűl (kék → sárga → vörös) és stabilizálódik
- 1885, Arthur Ritter: + egy kezdeti felmelegedési fázist (gázgömb kontrakciója) → először nagy, hűvös, vörös → majd kicsi kék → sárga → kicsi vörös + a max. hőmérséklet a tömegtől függ
- 1887(-1914), Norman Lockyer: „meteorikus hipotézis”: a világűrben meteorid-áramlatok vonulnak, ezek ütközésekor üstökösök és gázködök jönnek létre, amik kondenzálódnak
 - fejlődés: ugyanaz a színtörténet, mint Ritternél (csak a tömeg nem számít)
 - a felforrósodás során először szétesnek a molekulák atomokra, aztán azok szétesnek „proto-elemekre”: saját vonalaik vannak (→ a Maury-féle éles vonalak) (→ 20. sz.: ionizált atomok vonalai)
 - bár sokan vitatják az elmélet meteorikus részét, mások hasonlóakat dolgoznak ki: P.G. Tait, Lord Kelvin, James Joule, Julius Mayer

Csillagpopulációk

- 1892, W.H.S. Monck: sajátmozgások vizsgálata: átlagban kéktől sárgáig nő, aztán vörösig megint csökken
 - a sárgák (G) a legközelebbiek → nem meglepő: a Nap is → közös csoport
 - a sárgák leghalványabbak → meglepő: a hűlés-elmélet szerint a vörös
 - 1893: talán a fejlődés kék → vörös → sárga ↔ ez igen valószínűtlen
 - 1894: a sárgák **két populációra** oszlanak: kicsi közeliak és nagy távoliak
- 1905, Ejnar Hertzsprung (dán amatőr): a c típusú (éles vonalú) csillagoknak sokkal kisebb a sajátmozgása és parallaxisa, mint az ugyanolyan színű más csillagoknak → távolibbak → fényesebbek
 - így nemcsak sárgából, hanem narancsból és vörösből is két populáció
 - ezek hőmérséklete azonos → a felület méretében kell eltérésnek lennie → „óriások” és „törpék”
 - fejlődés útjai: kék/fehér csillagból vagy vörös óriás, vagy vörös törpe
- 1910, Henry Norris Russell: hasonló, független eredmények (2 pop. G, K, M-re)
 - szerinte a fejlődés végig összehúzódás: az elején hevül, aztán hűl
 - vörös óriás → kék/fehér normál → sárga → narancs → vörös törpe

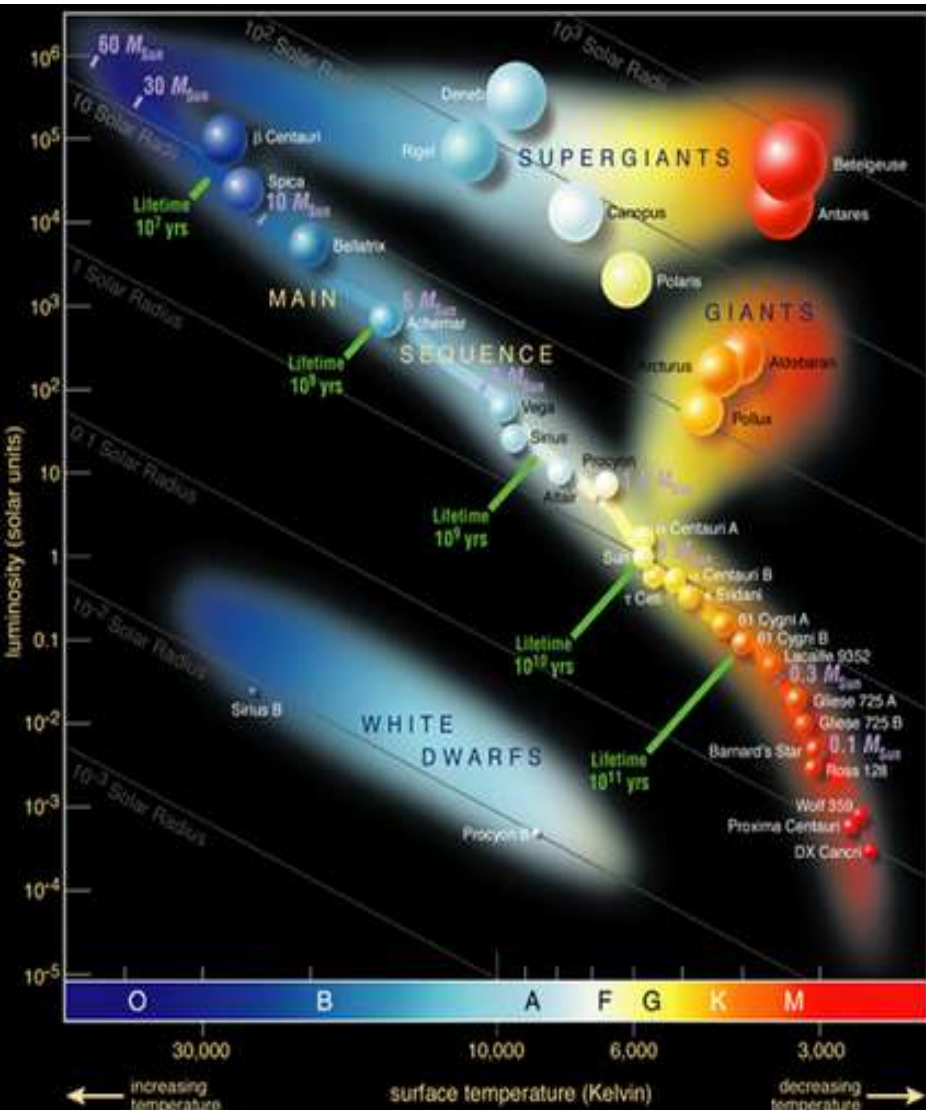
A Hertzsprung-Russell diagram (HRD)

- 1910-es évek: mindketten ábrázolják a színeképtípus-fényesség összefüggéseket
→ főszorozat + óriások
- 1912, Russell: fedési kettősök → a tömeg a főszorozat mentén lefelé csökken
 - vagy sok tömeget veszít a hűlés során, vagy a nagyobbak jobban felforrósodnak
- Megerősítések:
 - 1917, Hale: Michelson-interferométer a 100"-es távcsőre → vörös (szuper)óriások átmérője: több száz millió km (Marsig érne)
 - 1914, Walter Adams, Arnold Kohlschütter: egyes vonalak intenzitása korrelál az abszolút fényességgel (F, G, K csillagoknál)
→ „spektroszkópikus parallaxis”: új távolságmérési módszer (átlagos csillagra 400 fényévig, szuperóriásokra akár 40 000)

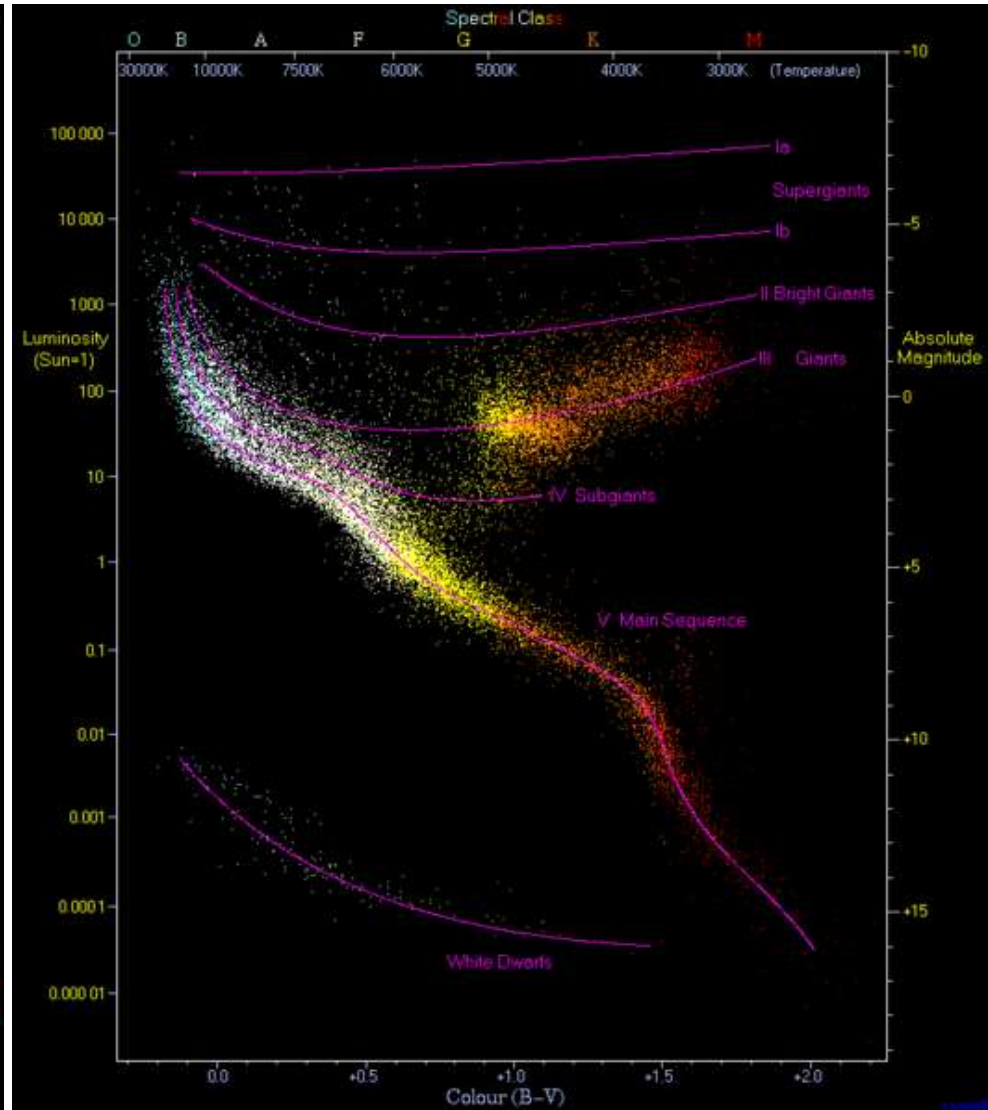


Russell első diagramja
(*Nature*, 1914)

(A HRD egyre fontosabb és pontosabb lesz)



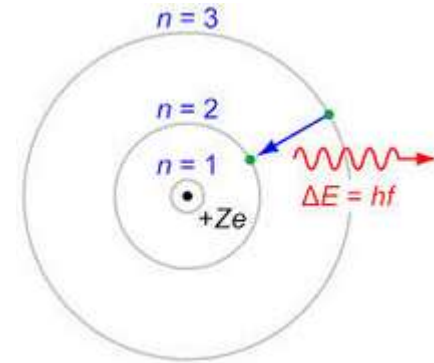
A HRD-n megjeleníthető a méret (ferde vonalak: konstans átmérő)



22 000 csillag a HRD-n (a színeképosztály korrelál a hőmérséklettel ÉS a színindexszel)

A csillagok összetétele

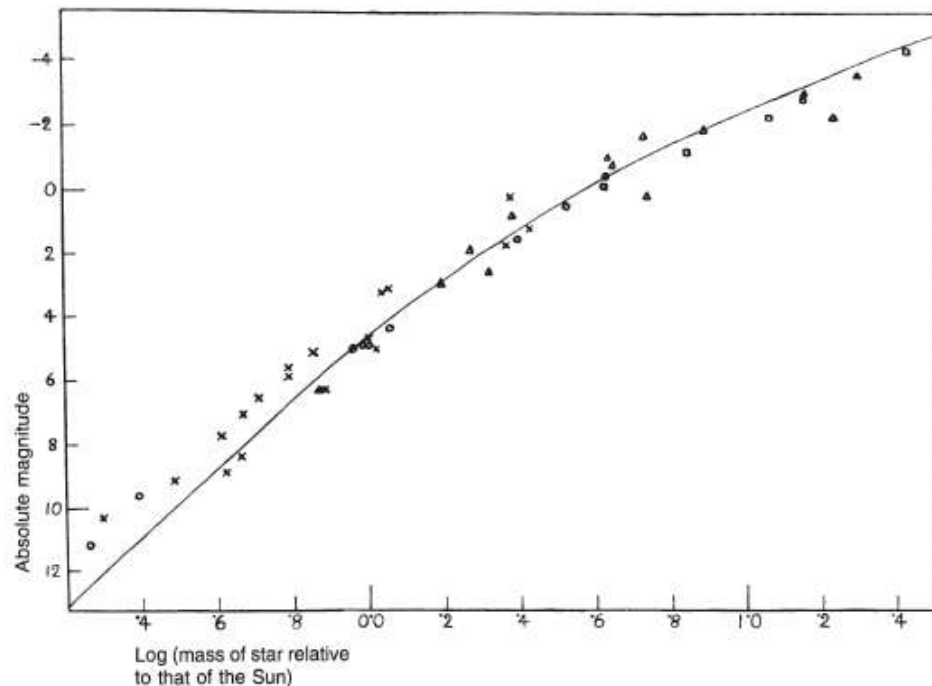
- 1913, Bohr: atommodell + a vonalak keletkezése
→ az O osztály (ionizált He) forróbb a B-nél (nem ionizált He)
- 1920, Megh Nad Saha: az ionizáció foka függ a hőmérséklettől (\uparrow) és a nyomástól (\downarrow)
→ ez megfelel a sejtett sorozatnak: $M < K < G < F < A < B < O$
+ azonos színű (\rightarrow hőm-ű) csillagokban lehet különböző nyomás
→ némelyik nagyon ritka (vörös óriás: akár milliomod Nap-sűrűség)
- 1923: Arthur Milne, Ralph Fowler: hogyan határozható meg az abszorp. vonalakért felelős elemek aránya hőmérséklet és nyomás függvényében
 \Rightarrow 1929, Russell: a csillagokat főleg **H és He** alkotja
 - 1925: Celilia Payne: elemek relatív gyakorisága ezt mutatja
 - Albrecht Unsöld: a legsötétebb vonalak intenzitás-profilja ezt mutatja
 - Donald Menzel: a Nap kromoszférájának átlagos atomsúlya 2
 - Nap: erős a H-vonal, de ezért a H-atomoknak csak kis hányada felelős
- eddig általános nézet volt: a csillagok összetétele megegyezik
 \leftrightarrow hasonló színképű csillagok spektrumában hatalmas különbségek vannak
→ fiatalabb csillagokban több a fém



A csillagok belső szerkezete: Eddington

1916-1924: **csillagbelső-modell**: vörös óriásokra (ideális gázként kezelhető)

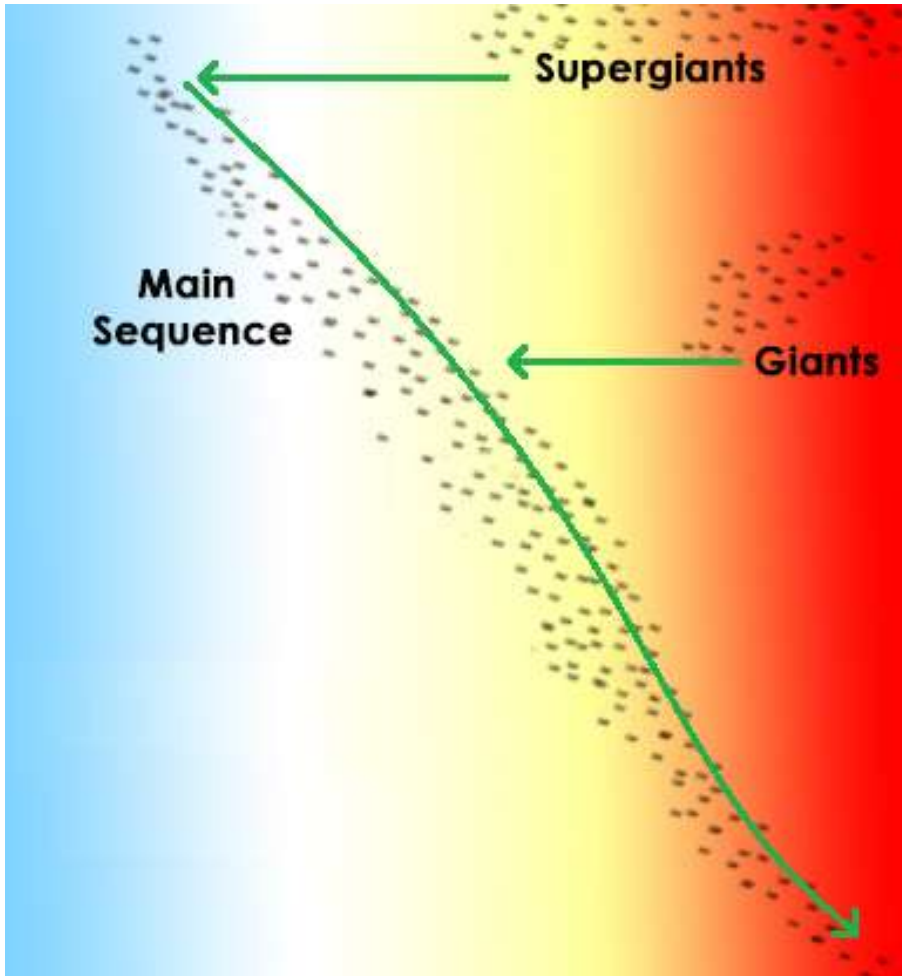
- Karl Schwarzschild, 1906: a radiatív (sugárzási) nyomás hangsúlyozása (Nap)
→ Eddington: ez is egyensúlyt tart a gravitációval (gáznyomás mellett)
- az abszolút fényesség szinte csak a tömegtől függ (vagyis az átmérőtől alig: azonos tömeg mellett a kisebb felszínű csillagnak intenzívebb a sugárzása)
- később: ez főszorozati csillagokra is
→ ideális gáznak vehető, mert belül erősen ionizált, így jóval kisebb helyet foglalnak az atomok
→ nem jó Russell fejlődés-elmélete: az összehúzódó gázoknak a főszorozat mentén is hevülnie kell, ha összehúzódnak
- részletek: *The internal constitution of the stars*, 1926



Eddington ábrája (1924)

Versengő fejlődés-elméletek

- Russell: az ÁRE szerint a tömeg energiává alakulhat (annihiláció)
→ tehát van tömegvesztés: lefelé vándorol a fősorozat mentén



vörös óriás v. szuperóriás:

- kicsi hőmérséklet (pár millió K)
- kicsi annihiláció
- kicsi tömegvesztés
- kicsi sugárzási nyomás

→ gyors összehúzódás, gyors hevülés

→ növekvő annihiláció

→ fehér óriás: a sugárzási nyomás megállítja az összehúzódást

→ lassú tömegvesztés (annihiláció)

→ lassú fényességcsökkenés

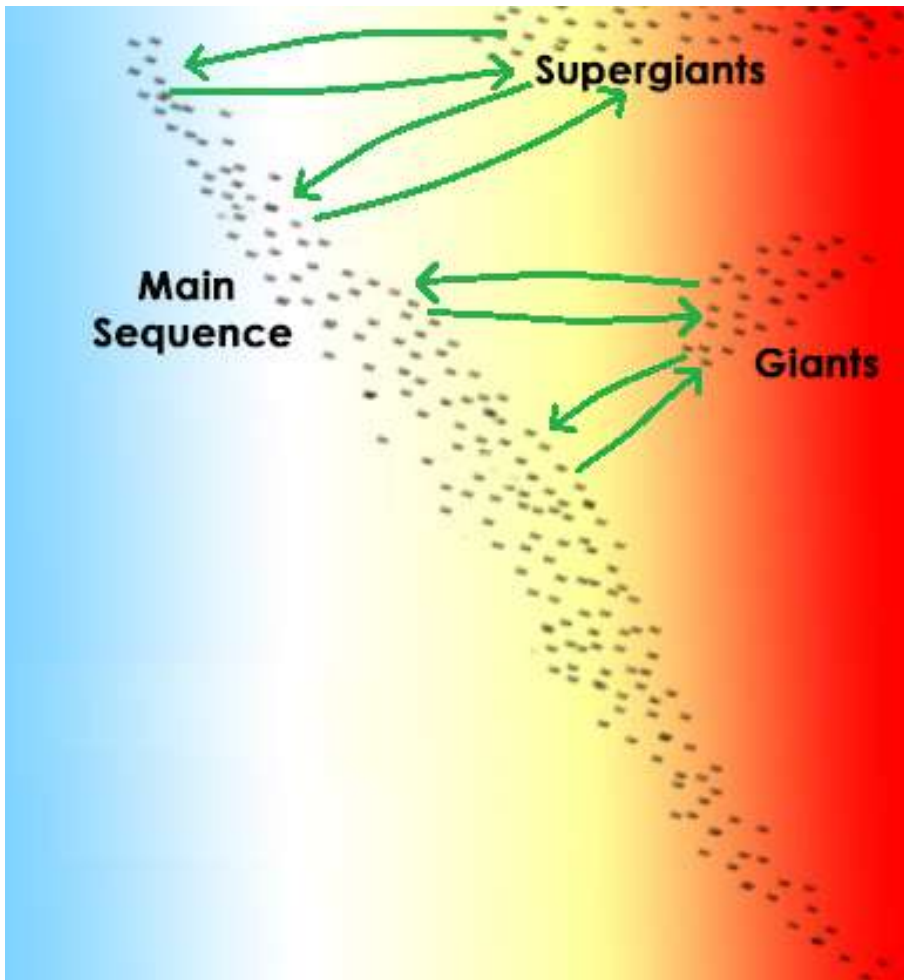
→ lefelé a fősorozat mentén

→ további lassú összehúzódás

→ növekvő sűrűség és opacitás

→ csökkenő felszíni hőmérséklet

→ ?

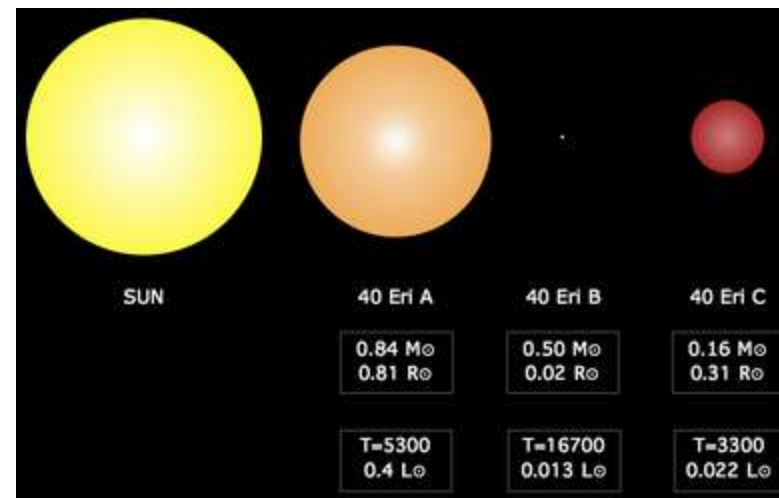


- ez az alternatíva nem számol azzal, hogy *mi* a sugárzás mechanizmusa: egyelőre nem tisztázott...

- általánosan elfogadott alternatíva: nincs tömegvesztés → nem mozog a fősorozat mentén
vörös óriásként ként kezdik
→ összehúzódás, hevülés
→ fősorozati csillag
→ életük végén ismét óriás
- 1927: Russell elveti, hogy a fősorozat fejlődési útvonal: ha ugyanis az annihiláció felelős a sugárzásért, akkor a csillag *nagyon* lassan veszít tömeget
 - James Jeans: ez sok-sok milliárd évet jelentene
 - csakhoggy közben kiderül az univerzum tágulása
→ nincs erre elég idő: nem lehetnének jobbra lent kis fősorozati csillagok

Kitérő: Fehér törpék

- Ismertek csillagok a fősorozattól jobbra:
 - a σ^2 Eridani egyik kísérője, a 40 Eridani B nagyon kis fényességű (Nap/400), de nem olyan kis tömegű (Nap \times 0,4)
→ nem jó rá a tömeg-fényesség összefüggés!
 - Szíriusz B: nagyon halvány, de tömege fele a főkomponensének
→ M-nek hitték
- 1914, Walter Adams: mindkettő A0 → fényes felszín → rendkívül kicsi
 - Eddington: Szíriusz B átmérője kb. háromszorosa a Földnek (intenzitás alapján), így sűrűsége 10 000-szerese
 - Adams, 1925: ekkor relativisztikus vöröseltolódást kell látni a színeképben
→ sikerül kimérni, jó összhangban az elmélettel
- Probléma: ezekre nem jó az Eddington-modell → nem ideális gázok

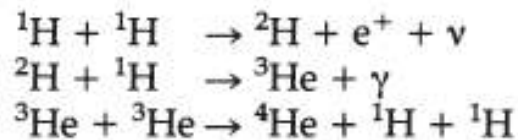


A Nap energiájának forrása

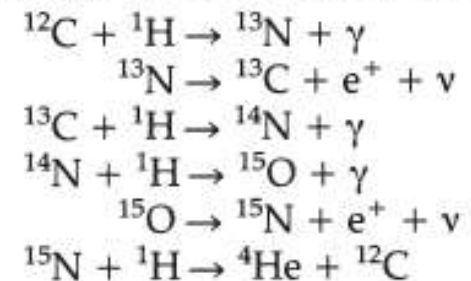
- 1837, John Herschel, Claude Pouillet: mérik a Föld egységnyi felszínére érkező hő mennyiségét → becslés a Nap sugározta összes hő mennyiségére
↔ a légköri elnyelést erősen alábecsülik
- 1860-as évek: energia fogalma + megmaradási tételek → cserefolyamatok
→ mi a forrása a Nap sugárzásának? mióta? meddig?
- különböző időskálák konfliktusa
 - bibliai: becslések leszármazások alapján: kb. 6000 éve volt a Teremtés
 - geológiai: sok-sok millió év kell a formák eróziójához (pl. Grand Canyon)
 - biológiai: sok-sok millió év kell az evolúcióhoz⇒ a fizikusok inkább a kettő közötti állásponton vannak:
 - a Nap sugárzása: az ismert folyamatok (égés) csak ezredévekre elegendők
 - a Föld hője: hosszabb távon már ki kellett volna hűlnie
- 1856, Hermann von Helmholtz: a Nap hője az **összehúzódásból** fakad
→ ez kb. 20 millió évre elég
- 1862, Lord Kelvin (William Thomson): kb. ilyen idős lehet a Föld (hűlés alapján)

- 1905, Einstein: $E = m \cdot c^2 \rightarrow$ Russell: teljes annihiláció
- 1926, Eddington: nem kell teljes annihiláció: $4 \text{ H} \rightarrow \text{He}$
 - 1928, George Gamow: QM α -részecskék és atommag találkozására
 - részletek: 30-as évek: Gamow, Robert Atkinson, Teller Ede
 - 1938, Hans Bethe: kistömegű csillagokra két domináns ciklus: p-p és CNO

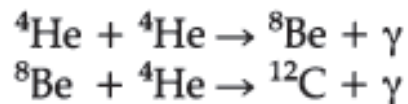
Proton-proton cycle



Carbon-nitrogen-oxygen (CNO) or carbon cycle



- Carl von Weizsäcker:
 - a nehezebb elemek forrása az Ősrobbanás
 - \leftrightarrow 40-es évek: szabad állapotban nem épülhettek fel
- 1956, Edwin Salpeter, Fred Hoyle: három alfa-ciklus (nagyon forró helyen):



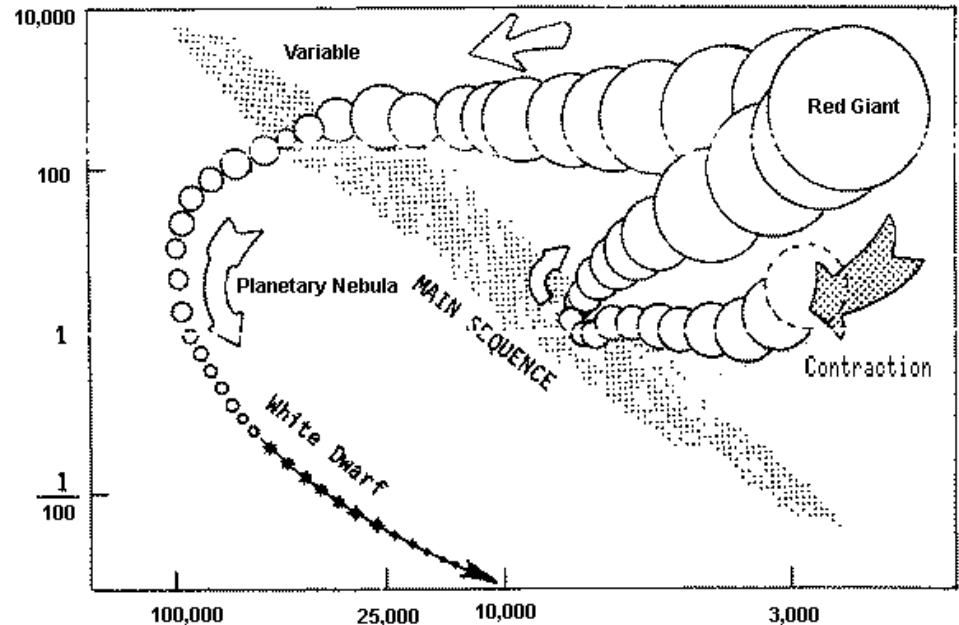
\rightarrow nehezebb elemek is szintetizálódhatnak (számos további ciklussal)

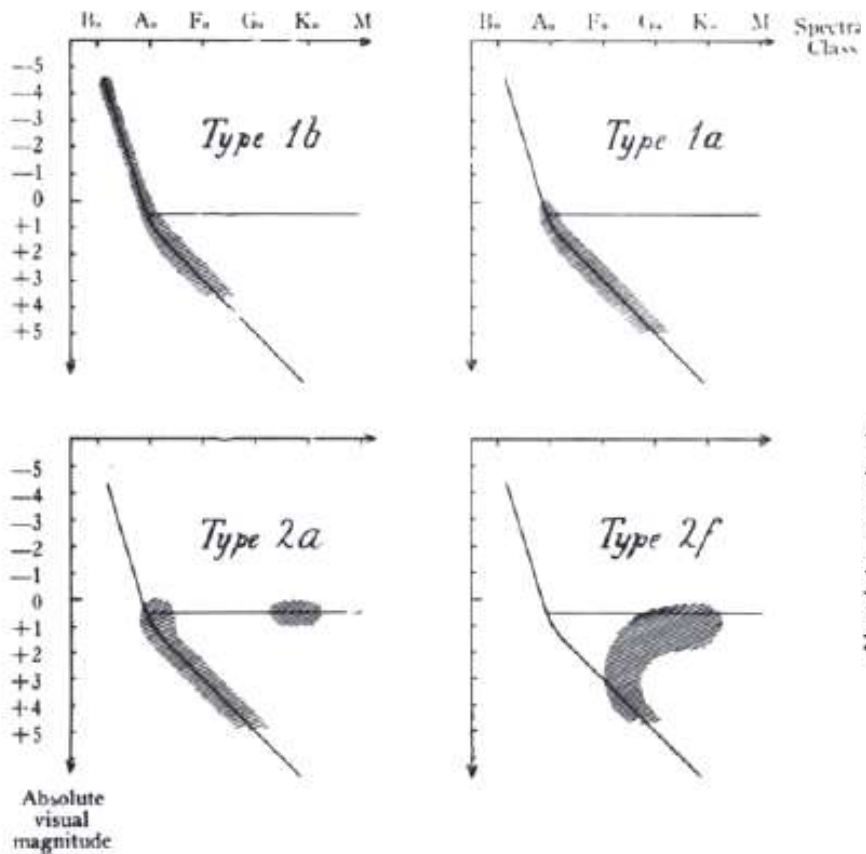
Nuclear Fuel	Nuclear Products	Minimum Ignition Temperature	Main-Sequence Mass Needed to Ignite Fusion	Duration of Fusion in a $25-M_{\odot}$ Star
H	He	4×10^6 K	$0.1 M_{\odot}$	7×10^6 yr
He	C, O	120×10^6 K	$0.4 M_{\odot}$	0.5×10^6 yr
C	Ne, Na, Mg, O	600×10^6 K	$4 M_{\odot}$	600 yr
Ne	O, Mg	1.2×10^9 K	$\sim 8 M_{\odot}$	1 yr
O	Si, S, P	1.5×10^9 K	$\sim 8 M_{\odot}$	~ 0.5 yr
Si	Ni to Fe	2.7×10^9 K	$\sim 8 M_{\odot}$	~ 1 day

- egyre nehezebb elemek szintetizálása egyre magasabb hőmérsékletet igényel
 → egyre nagyobb tömegű csillagokban lehetséges
 + egyre kevesebb a termelt energia → egyre gyorsabban elégnek
- egyéb folyamatok: B²HF (G. és M. Burbidge, W. Fowler, F. Hoyle), 1957
 - e-folyamat: elektron elnyelése és újrakibocsátása
 - s-folyamat: neutron lassan középnehéz elemekhez
 → bomlanak a következő neutron érkezése előtt
 - r-folyamat: neutron gyorsan középnehéz elemekhez
 → nincs idő bomlani a következő neutron érkezése előtt
 - p-folyamat: proton adódik az r és s folyamatok által előállított elemekhez
 - x-folyamat: ismeretlen: hogyan lesz a Li, Be és B stabil?
 (→ később: csillagközi térben, kozmikus sugarak és H, He ütközésekor)
- vasnál nehezebbek csak s és r folyamatokban keletkezhetnek, s nehéz csillagokban működik, r csak szupernóva-robbanásokban

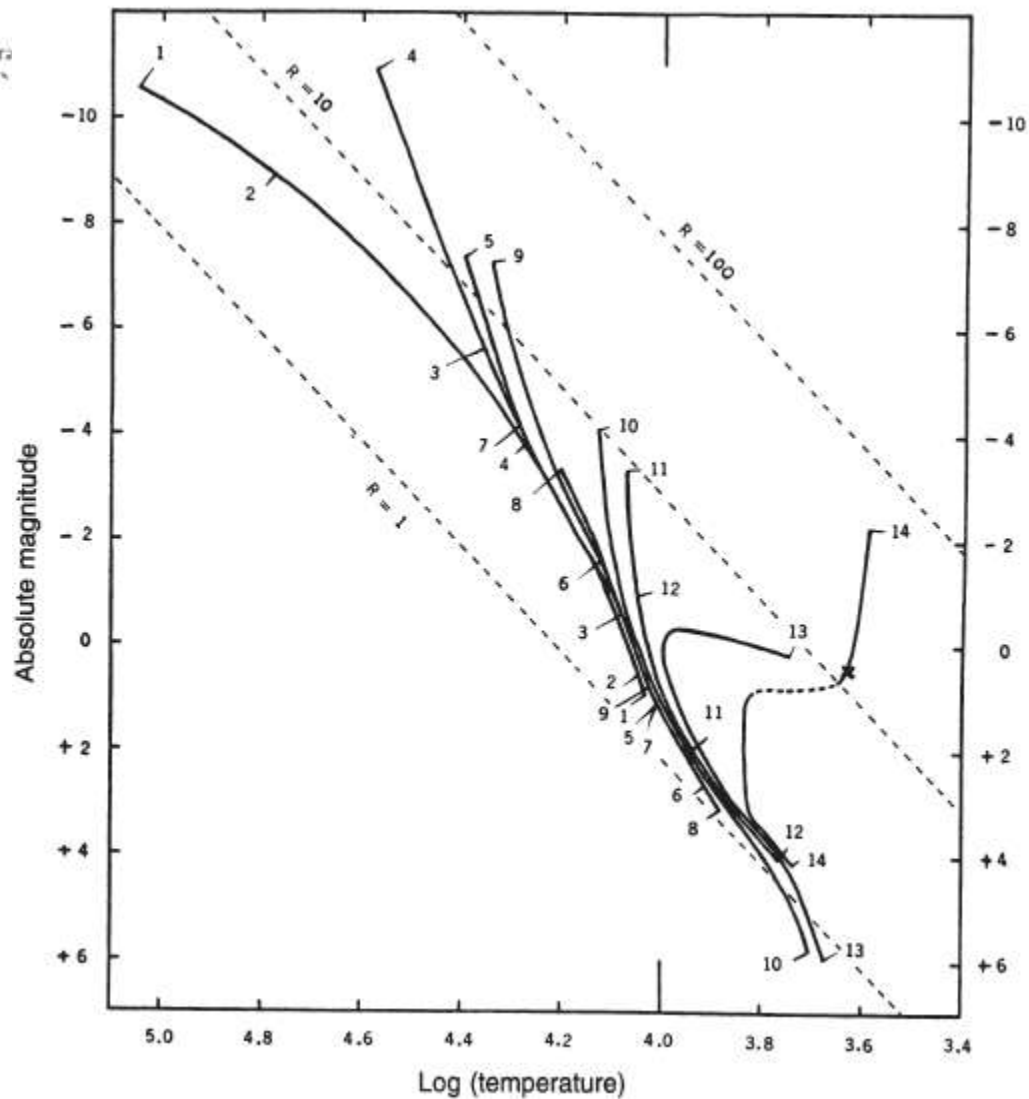
Későbbi fejlődés-elméletek

- 1925, Robert J. Trumpler: nyílthalmazok színeképelemzése
 - vannak színeképtípus-határok (pl. nincs F5-nél hidegebb, F0-nál forróbb)
 - tehát egykorúak a csillagok + vannak tipikus tömegek egyes halmazokban
- 1937, Gerard Kuiper: nyílthalmazok HRD-je
 - a kapott vonalak megegyeznek a konstans H-tartalom vonalaival
 - a halmazok korával csökken a H-tartalom
- 50-es évek: gyors kontrakció a fősorozatig → hosszú ideig itt (kb. ezerszeres)
→ vörös óriás vagy szuperóriás
(He utáni elemek: gyors szintézis)
→ ha elfogy a muníció: fehér törpe
→ $1,4 M_{\odot}$ felett további összeesés
- 50-es évek: populációk
 - I. fiatal csillagok (Nap környéke, nyílthalmazok, spirálkarok)
 - II. idős csillagok (gömbhalmazok, spirálgalaxisok centruma, elliptikus galaxisok)





Trumpler HRD-i nyílthalmazokra
(1925)



Kuiper HRD-je 14 nyílthalmazra
(1937)

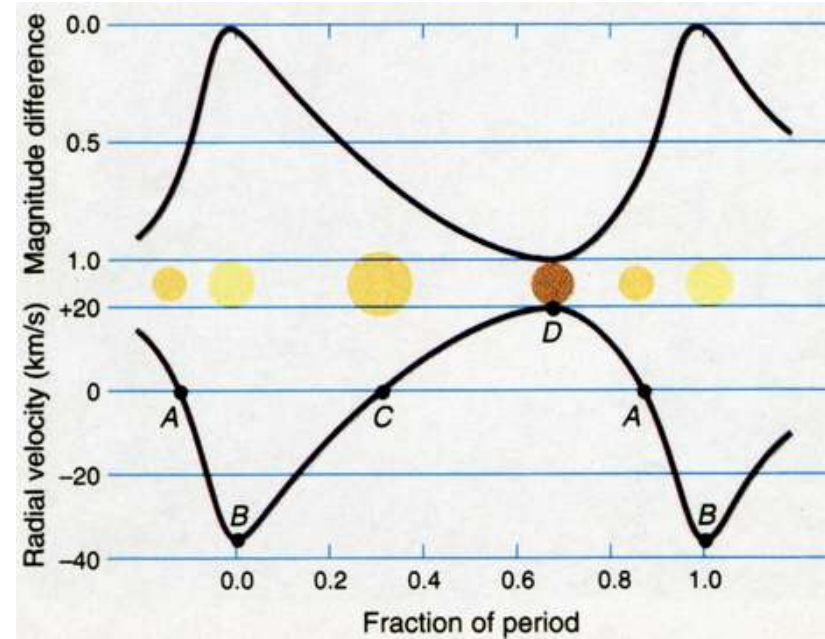
→ eléggé gyors a fejlődés (az asztrofizika aranykora)

Változócsillagok

- 19. sz. vége: >200 változó ismert
- típusok:
 - fedési kettősök (pl. Algol)
(→ sokan sokáig azt hiszik, mind ilyen: világos magyarázat)
 - hosszú periódusú változók (pl. Mira)
 - rövid periódusú változók (pl. δ Cephei)
 - szabálytalan változók (pl. η Carinae, γ Cassiopeiae)
 - egyébek: félig szabályos, félig szabálytalan (R Coronae Borealis, U Geminorum)
- nevezéktan:
 - 1844, Argelander: R, S, ... Z + csillagkép neve \leftrightarrow hamar kevés lesz
 - 1881, Ernst Hartwig: RR ... RZ, SR ... SZ, stb.
 - később: bármilyen dupla betű (kivéve J) \rightarrow csillagképenként 334

Rövid periódusú változók

- érvek amellet, hogy a változás fizikai:
 - 1894, Aristarkh Belopolskii: a sebességprofil (pl. δ Cephei: $-19 - + 24$ km/s) és a fényesség maximumának fázisai nem stimmelnek
 - 1899, Schwarzschild: különböző tartományokban eltérő a változás amplitúdója \rightarrow változik a hőmérsékletük
- lehetséges magyarázatok:
 - sötét kísérő árapály-hatása \leftrightarrow nincs igazán sikeres magyarázat
 - Robert Emden (1906), Forest Moulton (1909): szappanbuborékként oszcilláló alak
 - \leftrightarrow a fényesség és radiális sebesség egyszerű korrelációja ezt kizárja
- 1902, Solon Bailey: 500 r.p. változó 17 gömbhamlazban
 - mind 1 napnál rövidebb periódusú \rightarrow külön típus: „halmazváltozók”
 - Carl C. Kiess, 1912: továbbiak a csoportban (pl. RR Lyrae) \rightarrow **cefeidák** közé tartoznak

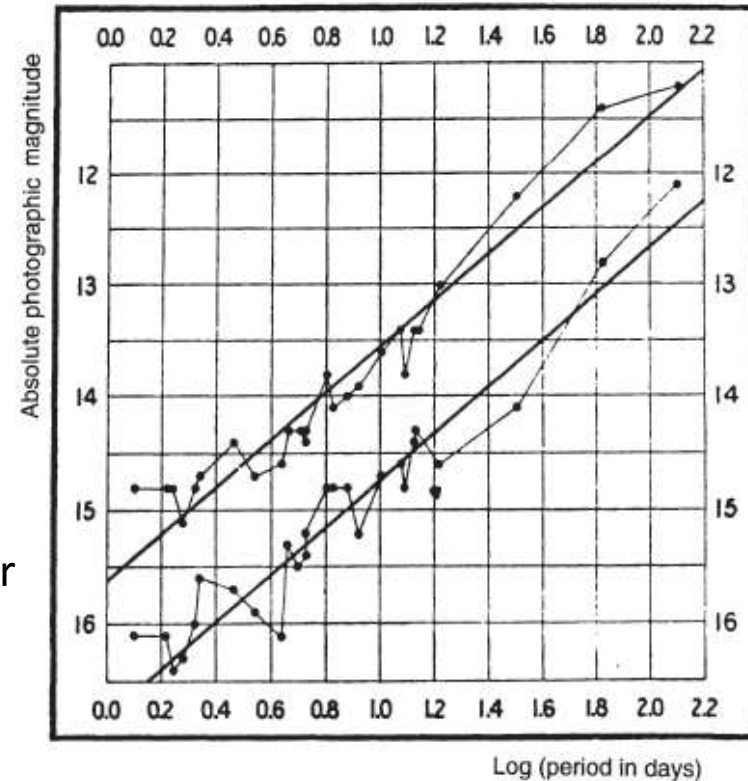


Periódus-fényesség összefüggés



1907, Henrietta Swan Leavitt: 1777 r.p. változó a Magellán-felhőkben

- 1912: 25 cefeida esetén a periódus és a fényesség között összefüggés van
→ a távolságok kb. azonosak (messzi felhő), így a látszó fényességek arányosak az abszolút fényességgel
- Hertzsprung: ha a legközelebbi cefeidák abszolút fényességét mérjük (parallaxis), akkor kalibrálható egy igen pontos távolságmérési rendszer
→ kiméri 13 közeli példány sajátmozgását
→ Kis Magellán-felhő: 37 000 fényév
- 1918, Harlow Shapley: pontosít (több csillag)
 - szerinte 95 000 fényév (valójában 199 000)
 - közeli halmazok legfényesebb csillagai kb. tízszer fényesebbek a legfényesebb cefeidáiknál
→ távolabbi halmazok távolsága becsülhető
 - gömbhalmazok: ezek alapján kb. egyformák
→ még messzebbre lehet távolságot becsülni



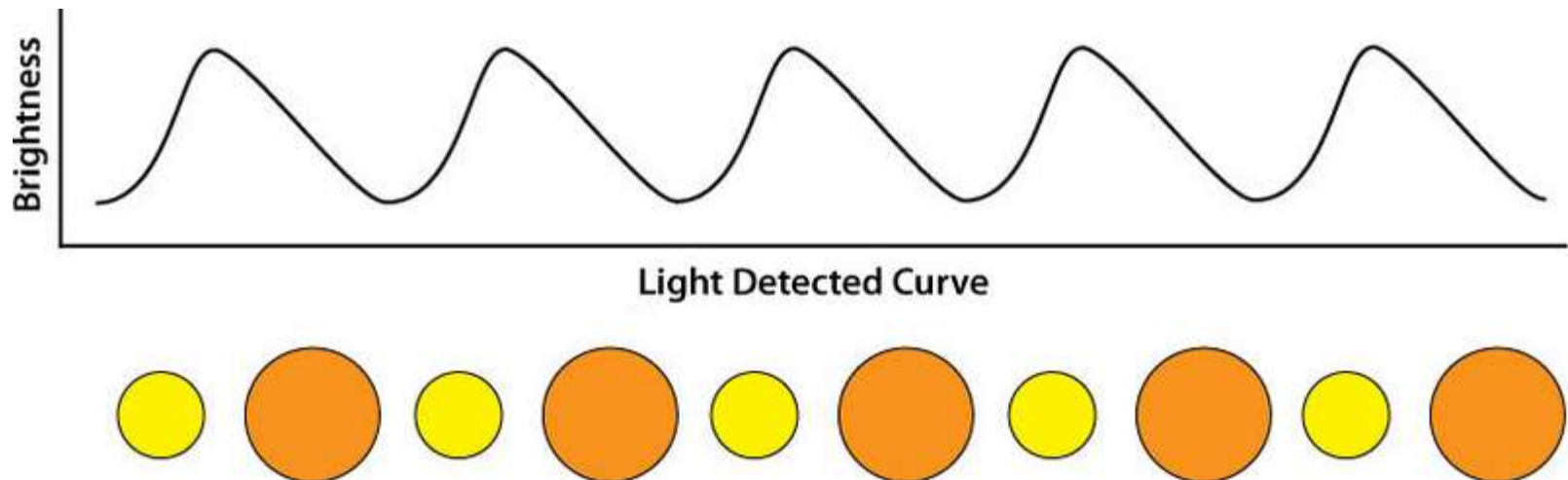
Leavitt első ábrája (1912)

Hamarosan fontos eredmény:

- 1924, Edwin Hubble: cefeidákat mér az Androméda-ködben és az M33-ban
→ ez a fő bizonyítéka annak, hogy azok Tejúton kívüli objektumok...

Elmélet:

- Shapley, Eddington (1910-es évek): ezek pulzáló csillagok
Mert: nagyobbak, mint annak a (gyors keringésű) kísérőnek a pályája lenne, ami a korábbi elméletek szerint a változást okozza
→ saját magukban van a változás oka
- probléma: nem pont akkor a legfényesebbek, amikor éppen a legkisebbek (tehát leforróbbak), hanem amikor tágulnak:
→ 1938, Schwarzschild: magyarázat a fáziskésésre: a mag és a felsőbb rétegek közti eltérés (a felszín fáziskéséssel követi a magot)



Hosszú periódusú változók

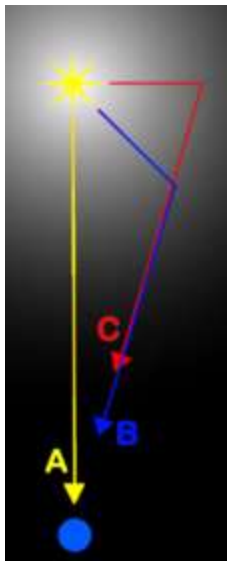
- 19. sz. végére kb. 100 ismert, 90 és 600 napos periódus között
 - szabálytalanabb periódus, mint a r.p. változóknál
 - mind hűvös és vörös: Secchi III (Harvard M)
 - maximum fényesség környékén erős H emissziós vonalak
 - 1904, Alfred Fowler: sötét sávok: titán és a titán-oxid
 - 1918, Henry Russell: ritka anyagú vörös óriások
 - elméletek:
 - 19. sz. közepe, Rudolf Wolf: csillagfoltok okozzák
 - 1908, A. Berster: a csillagot övező gázfelhőn lyukak dinamikája okozza
 - 1916, P. Merrill: ugyanez, csak a külső atmoszféra hideg és sűrű gázaival
 - periódus és más paraméterek:
 - 1924, Hans Ludendorff: a vörösebbek hosszabb periódust és nagyobb ingadozást mutatnak → ezek fiatalabbak: még kevésbé stabilak
 - 1928, Boris Gerasimovic: a nem annyira hosszú periódusúak (100-200 nap) határozottan fényesebbek, mint a hosszabbak + melegebbek is
- ⇒ még összehúzódó, a fősorozat felé tartó csillagok

Nóvák

- 19. sz. végéig: kb. egy tucat „új csillag” (két legfényesebb: Tycho, Kepler)
 - hirtelen felfénylés, majd lassú halványodás
 - versengő magyarázatok: felrobbanó csillag vs. csillagütközés
- 1866, Nova T Coronae Borealis: első spektroszkópiusan megfigyelt (Huggins)
 - tipikus Secchi III csillag, plusz erős H emissziós vonalak
- 1876: Nova Cygni
 - eleinte fényes H (és He?) vonalak + erős absz. vonalak → halványodnak
 - kb. egy év múlva újra megjelenik, egészen más színek: planetáris köd
- 1892: Nova T Aurigae: az első nóva színeképfotóval
 - Doppler-mérések: az emissziós vonalak távolodnak (300 km/s), az abszorpciós vonalak közelednek (500 km/s)
 - felkapott magyarázat: két csillag nagyon közel ment el egymás mellett ↔ a színeképük azonos, csak az egyik emissziós, a másik abszorpciós
 - pár hónap múlva itt is megjelenik egy planetáris köd színeképe
 - újabb magyarázat: a csillag belép egy sűrű gázfelhőbe és felfűtik egymást

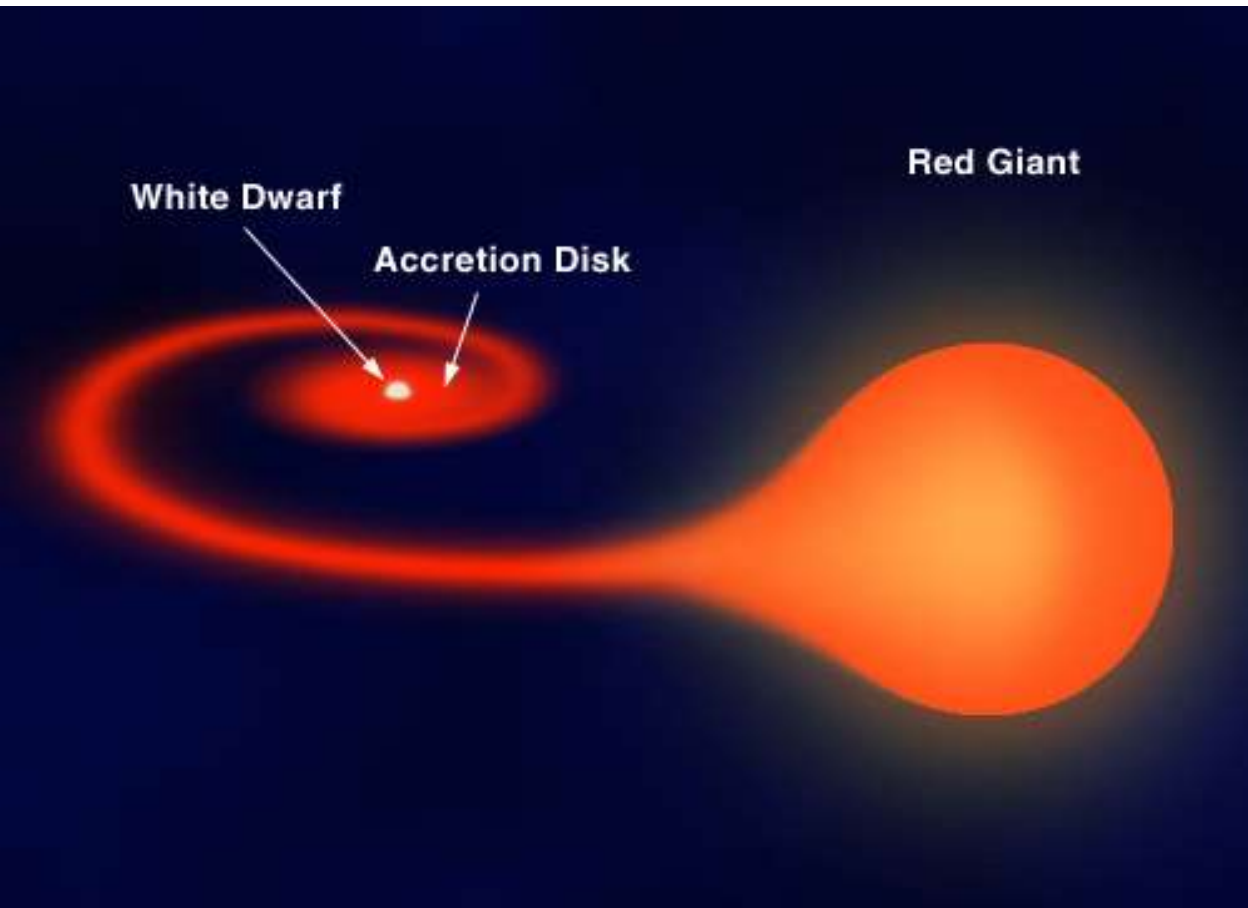
Nova (GK) Persei (1902)

- változó színekép: B (felfedezés) → A (maximum) → fényes H vonalak (később)
- a H vonalak stacionáriusak, de a sötét vonalak 1200 km/s-mal közelednek
 - tehát az elnyelő anyagréteg tágul
 - később szétszakad sok vonalra: különbözőképpen táguló rétegek
- később elkezd oszcillálni (kb. 1 mag) (absz. és em. vonalak ellentétes fázisban)
- később: táguló fénykör
 - gyorsan növekszik: a becslés alapján fénysebességgel
 - Kapteyn: mert nem a gáz tágul, hanem a fény, amely poron szóródik
 - ez alapján: a távolság 660 fényév
- 1916, W.H. Steavenson: halvány gyűrű
 - a tágulás sebessége Doppler-méréssel ismert
 - a látszó tágulás alapján a nóva távolsága 1500 fényév
 - a korábbi becslés hibája: nem a nóva körüli fáz verte vissza a fényt, hanem a közte és köztünk lévő gáz → gyorsabbnak látszott (fényvisszhang)



Nóvák magyarázata

- 1950-es évek: a nóvák szoros kettősökben: fehér törpe + normál csillag
- 1960-as évek, röntgen: kimutatják a forró akkréciós korongot
→ anyagátadás miatt kritikus tömeg a fehér törpe felszínén...



(Megjegyzés:

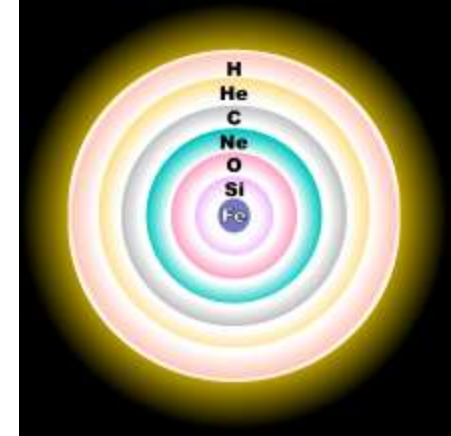
2007: fényes vörös nóvák
→ csillagok összeolvadása?
→ az ütközés-elmélet
visszatér)



Szupernóvák

- Pickering, 1911: megkülönbözteti a rendes nóvákat a ködben lévő nóváktól
 - Nova S Andromedae (Androméda-köd, 1885), Nova Z Centauri (NGC 5253, 1895)
 - egymáshoz hasonlítanak, de semmi máshoz (S And színeképe: Konkoly-Thege Miklós)
- 20. század eleje: elkezdenek ezekre vadászni ködök fotóin
 - ha a ködök „szigetuniverzumok”, akkor a nóvák nagyon fényesek (10 mag-val a normálnál)
 - Shapley: ez irreális: azt jelenti, hogy a ködök a Tejútrendszer részei
 - viszont egy csomó halványabb (10 mag-val) nóvát is felfedeznek az Androméda-ködben → mégis messze van (megerősítés: Hubble, 1924 (cefeidák))
 - így kétféle nóva van: normál (gyakoribb) és „szuper-nóva” (név: 1931, Fritz Zwicky)
- 1936: fotó spektrográffal → nagyon széles vonalak: gyors tágulás (6000 km/s)
- 1936-39, Walter Baade és Zwicky: módszeres keresés – 12-t találnak
- 1941, Rudolph Minkowski: két típus
 - I. -16 mag [ma: 19.5], széles emissziós sávokkal, H emissziós vonalak nélkül (Baade: ilyen volt Tycho és Kepler vendégcsillaga)
 - II. -14 mag [ma: 17,5], normál nóvához hasonló, csak fényesebb

A szupernóvák elmélete



- 1920-as évek: még népszerűek az ütközés-elméletek
 - A.W. Bickerton: két csillag ütközése \leftrightarrow ez valószínűtlen
 - Pickering: csillag és bolygó ütközése
 - Hugo von Seeliger: csillag és sűrű köd ütközése
- \leftrightarrow probléma: miért kb. azonos az abszolút fényesség + felfénylés mértéke?
- Eddington elmélete + a megfigyelések a robbanást támasztják alá
- 1926, Ralph Fowler: a degenerált anyag elmélete \rightarrow a fehér törpék ilyenek
- 1930, Arthur Milne: a normál csillagok belsejében is van ilyen anyag
 - \rightarrow ha kifogy az üzemanyag, összeroppan \rightarrow ledobja a külső rétegeket
- 1931, Subrahmanyan Chandrasekhar: fehér törpék elmélete: bizonyos tömeg fölött az elektronok degenerációs nyomása nem tart ellent a gravitációnak (1,44 (ha tiszta He) és 1,76 (ha tiszta Fe) naptömeg)
- 1933, Baade és Zwicky: ekkor szupernóva-robbanás történik \rightarrow neutroncsill.
- 1939, Robert Oppenheimer, George Volkoff: egy neutroncsillag tömege max. 3,2 naptömeg, különben a neutron degenerációs nyomása sem elég
 - \rightarrow maradvány: fekete lyuk (ÁRE-ből következő elméleti entitás)

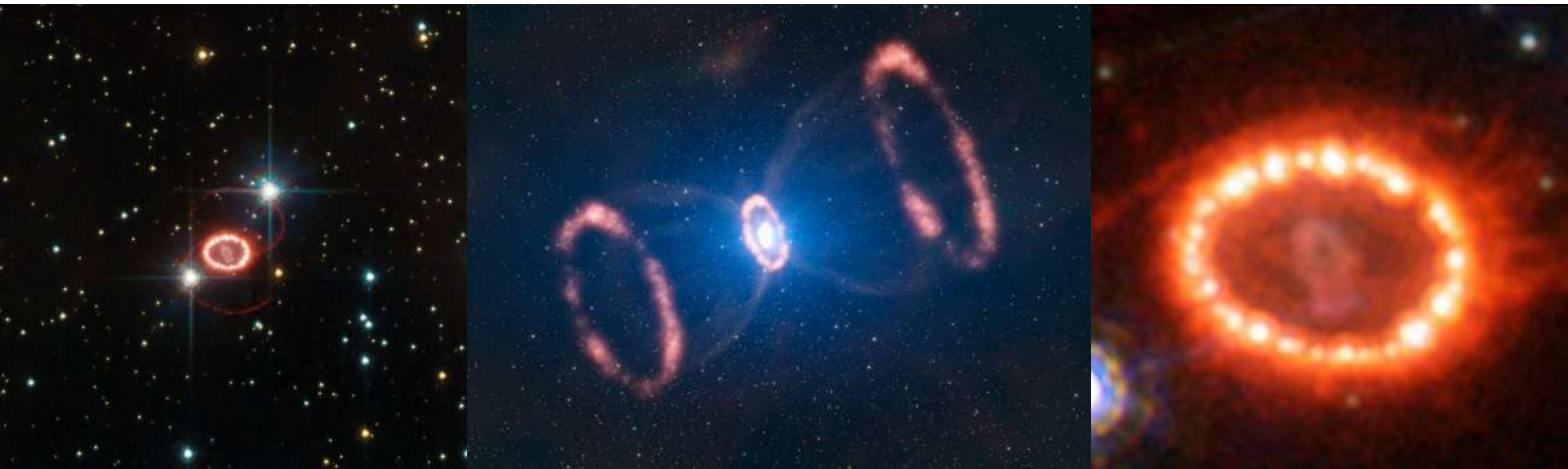
A szupernóvák későbbi kutatása

- 1954-75: második Palomar szupernóva-keresés: 281 felfedezés
- pontosodó elméletek (pl. anyagvesztés miatt korrigált tömeghatárok)
- további típusok és altípusok: teljesen különböző mechanizmusok

Cause of collapse	Progenitor star approximate initial mass	Supernova Type	Remnant
Electron capture in a degenerate O+Ne+Mg core	8–10	Faint II-P	Neutron star
Iron core collapse	10–25	Faint II-P	Neutron star
	25–40 with low or solar metallicity	Normal II-P	Black hole after fallback of material onto an initial neutron star
	25–40 with very high metallicity	II-L or II-b	Neutron star
	40–90 with low metallicity	None	Black hole
	≥40 with near-solar metallicity	Faint Ib/c, or hypernova with GRB	Black hole after fallback of material onto an initial neutron star
	≥40 with very high metallicity	Ib/c	Neutron star
	≥90 with low metallicity	None, possible gamma-ray burst (GRB)	Black hole
Pair instability	140–250 with low metallicity	II-P, sometimes a hypernova, possible GRB	No remnant
Photodisintegration	≥250 with low metallicity	None (or luminous supernova?), possible GRB	Massive black hole

SN 1987A

- Nagy Magellán-felhő → Kepler óta a legközelebbi észlelt (160e fényév)
- az érkező neutrínókat is detektálták 2-3 órával korábban (19 db)
→ megerősíti az elméleteket
- ismert volt korábban a csillag, ami felrobbant (de az B3, nem pedig vörös szuperóriás → kisebb intenzitás (kisebb felület))
- max. fényesség 88 nappal a kitörés után → a keletkező radioaktív elemek bomlása fűtötte tovább
- jelentős röntgen-sugárzás volt észlelhető, amikor ki tudott szabadulni



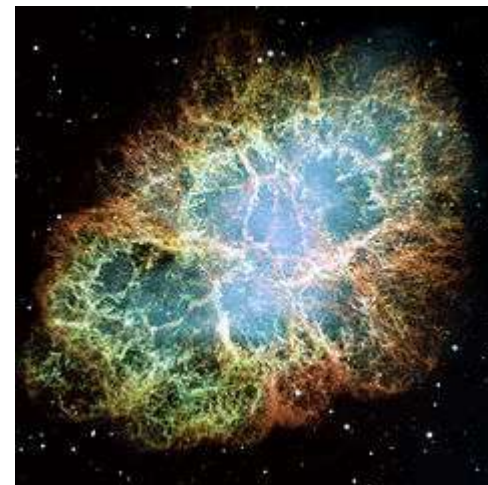
Történelmi szupernóvák maradványai



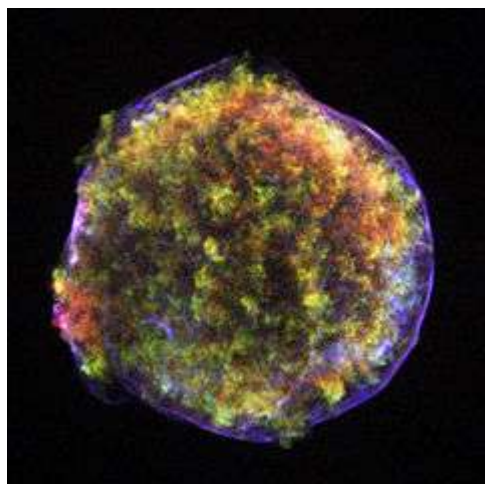
SN 185



SN 1006



SN 1054 (Rák-köd)



SN 1572 (Tycho)



SN 1604 (Kepler)



SN 1680 (Cassiopeia A)