

Értekezés a csillagok születéséről, fejlődéséről, életük utolsó fázisáról és a halálukról

Továbbá a haláluk után született új csillagról,
az őscsillagokról és jövőbeli felhasználásaikról

Illés Gergely Levente¹, Schneider Bálint²

Pécsi Janus Pannonius Gimnázium
Matematika-Informatika tagozat

{¹illes.gergely2021b, ²schneider.balint2021b}@janus-pecs.edu.hu

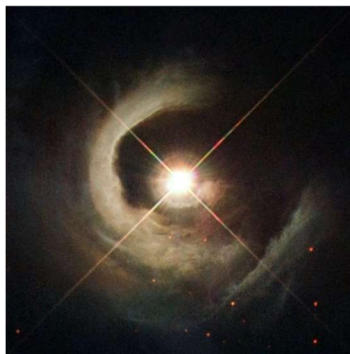
Kivonat – Ezen értekezés a csillagokról, mint égitestekről kíván bemutatást adni. Az értekezés témája a csillagok életciklusa, kezdve a születésüktől egészen a halálukig és az utána következő folyamatokig. A csillagok születése és fejlődése hatalmas és bonyolult folyamatokon alapulnak, melyeket az elmúlt évtizedekben a csillagászok intenzív kutatásokkal vizsgáltak. Az értekezés további részében bemutatjuk a csillagok életének különböző szakaszait, mint például a fehér törpe, a neutroncsillagok és a fekete lyukak. Végül az értekezés összefoglalja a főbb pontokat, és kiemeli a csillagok életciklusának fontosságát a világegyetem és az élet megértésében.

Kulcsszavak – Csillagok életciklusa; Fekete lyukak; Neutron csillagok

I. BEVEZETÉS

Mindenki látta már a napunkat, viszont kevesen gondolkodtak el igazán, mi is az, hogyan működik és, hogy galaxisunkban és az univerzumban hogyan léteznek a többi csillagok. Az értekezés bevezetésében egy alap bemutatást mutatunk a csillagról.

Definíció alapján a csillag, egy saját fénnel rendelkező masszív gáz test [3]. Fényét a belsejében végbemenő nukleáris reakcióknak köszönheti. Kezdetnek bevezetendőül ismertetjük azokat az állapothatározókat, fizikai tulajdonságait, mely alapján le tudunk írni egy csillagot és tudjuk csoportosítani azt.



I.1. ábra: A V1331 Cyg nevű születő csillag a Hattyú csillagképben [4]

A. Fényesség

A csillagászatban az égitesteket fényesség szerint tudjuk csoportosítani. Megkülönböztetünk abszolút fényességet és látszólagos fényességet, hiszen a fény amit a Földön láthatunk különbözik attól, mint ami valójában van. Ennek oka, hogy az általunk látható fényesség függ az égitest távolságától. [5]

Látszólagos fényesség jelölése: m ; mértékegysége: m (magnitúdó)

Abszolút fényesség jelölése: M ; mértékegysége: M (magnitúdó)

A magnitúdó egy logaritmikus mértékegység: ha két csillag látszólagos fényessége között 1 magnitúdó különbség van, akkor az egyik csillag 2,512-szer fényesebb a másikinál.

Mivel a látszólagos fényesség a ténylegesen kibocsátott vagy visszavert sugárzásnak a távolság négyzetével arányosan változó mennyisége, így két egyforma fényesnek látszó objektum fizikailag nagyon különböző lehet. Az égitesteket tehát akkor tudnánk egymással összehasonlítani, ha azonos távolságban lennének. Ezt nevezzük abszolút fényességgnek, ami bármely égitest látszó fényessége és távolsága ismeretében egyszerűen kiszámítható. Pontos definíciója a következő:

DEF Csillagok és galaxisok esetén azt mutatja meg az abszolút fényesség, hogy 10 parszek távolságból milyen fényesnek látnánk, bolygók és más naprendszerbeli égitestek esetén pedig azt, hogy milyen fényesnek látnánk, ha a Földtől és a Naptól is 1 csillagászati egység (CsE) távolságra lenne. [6]

Kiszámítása:

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

ahol M az abszolút fényesség, m a látszólagos fényesség (mindkettő magnitúdóban) és r a csillag távolsága parszekben.

B. Luminozitás

DEF A luminozitás valamely égitest – általában csillag – egy meghatározott időtartam alatt kibocsátott össz sugárzása. Egy csillag luminozitása és abszolút fényessége összefüggenek, és az egyikből a másik kiszámítható. A luminozitás az égitestek egy fizikai állapotátározója.

Jelölése: L ; $[L] = W$ (Watt)

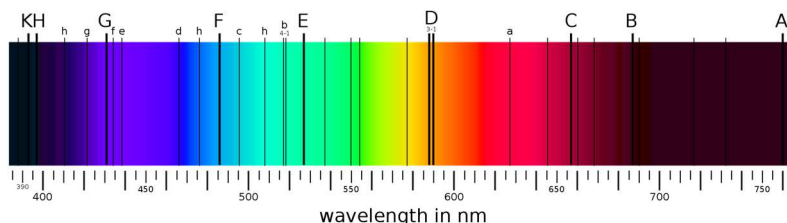
Kiszámítása:

$$L = 4\pi R^2 \cdot \sigma T^4$$

ahol T a felszíni hőmérséklet, R a csillag sugara és σ a Stefan-Boltzmann állandó ($\sigma \approx 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

C. Színkép osztályozás

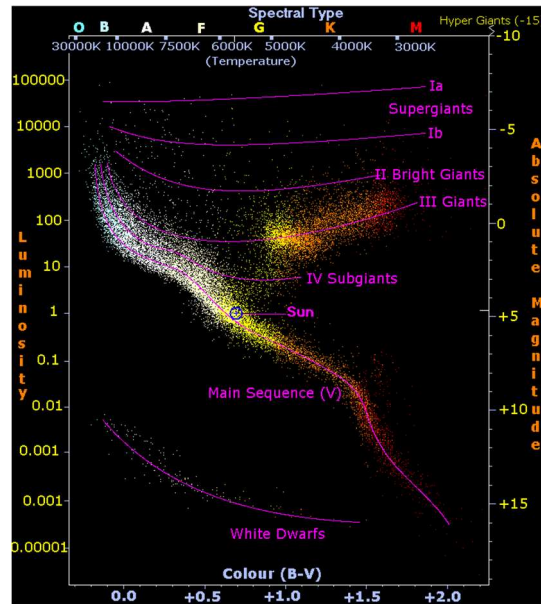
A színképet spektroszkóppal lehet meghatározni. Ez felbontja a beérkező fényt egy színképi sávra, amelyen sötét, ún. Fraunhofer-vonalak jelennek meg. Ezeket az csillag atmoszférájában található alkotóelemek hozzák létre. Például a hidrogén sötét vörös vonalként jelenik meg. Egy csillag színképének vizsgálata minőségi (kvalitatív) elemzésen kívül mennyiségi (kvantitatív) elemzést is lehetővé tesz. Vagyis a légköri elemek által létrehozott színképvonalak alakja és elhelyezkedése a gáz hőmérsékletétől és nyomásától is függ. A későbbiekben beszélni fogunk a különböző osztályú csillagokról.



I.2. ábra Fraunhofer-féle vonalak a Nap színképében

Osztály	Hőmérséklet (K)	A csillag színe	Tömeg	Sugár	Luminozitás
O	30 000 – 50 000	Kék	60	15	1 400 000
B	10 000 – 30 000	Kék	18	7	20 000
A	7500 – 10 000	Kékes-fehér	3,2	2,5	80
F	6000 – 7500	Sárgás-fehér	1,7	1,3	6
G	5000 – 6000	Sárga	1	1	1
K	3500 – 5000	Narancs-sárga	0,8	0,9	0,4
M	2000 – 3500	Narancs-vörös	0,3	0,4	0,04
R	3500 – 5400	Vörös-infravörös			
N	1900 – 3500	Infravörös			
S	2000 – 3500	Infravörös			

I.3. táblázat Az első színképosztályozási rendszer



I.4. ábra Példa a Hertzsprung-Russel diagramra

Minden színképosztálynak 0-9-ig terjedő alosztálya van a felületi hőmérséklet csökkenő sorrendjében, kivétel az O-típus, ahol az osztályozás O5-tel kezdődik. A mi napunk G2 típusú, legtöbb értelemben átlagos csillagnak számít. A csillagokat a Hertzsprung–Russell-diagramon [1] szokás ábrázolni, melynek a két tengelyén az abszolút fényesség és a hőmérséklet (szín) található. A legtöbb csillag, a Napunk is, egy sávban helyezkedik el, ez a fősorozat (angolul *Main Sequence*).

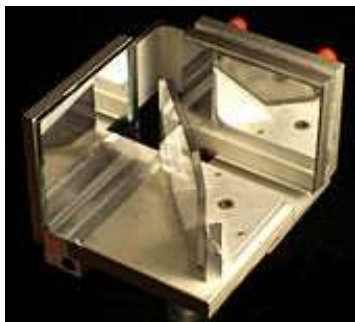
D. Hőmérséklet

A hőmérséklet a csillag magjától a légköréig változik. A csillagászok a légkör effektív hőmérsékletét a színkép és a fekete test (minden sugárzást elnyelő test, amely csak elméletileg létezik) összehasonlításával mérik.

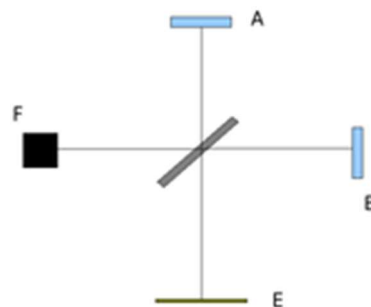
E. Méret

Meg lehet mérni az óriás és szuperóriás csillagok szögátmérőjét egy Michelson-interferométernek nevezett műszerrel. Ez az ívpercekben és ívmásodpercekben mért szögátmérő a távolsággal arányban megadja a csillag lineáris átmérőjét.

A Michelson-interferométer (1887) Albert A. Michelson és Edward Morley által kifejlesztett interferométer, mely rendkívül pontos távolságmérést tesz lehetővé. Michelson később spektroszkópiai kutatásaiért és magáért a készülék kifejlesztéséért 1907-ben Nobel-díjat vehetett át.



I.E.1. ábra Michelson-interferométer

I.E.2 ábra F: fényforrás; A, B: tükrök;
E: fénydetektor

F. Tömeg

A tömeg az egyik legfontosabb állapothatározó. Értéke 0,07 és 100 [8] naptömeg között változhat. Alsó határát a stabil hidrogénfúzió elindításához szükséges maghőmérséklet jelöli ki, az ennél könnyebb égítetek a barna törpék, melyek magjában csak a deutérium fúziója indul be, ami hamar el is fogy. Felső határa az úgynevezett Eddington-határ, az ennél nehezebb csillagok olyan intenzív sugárzást bocsátanak ki, hogy a sugárnyomás lefújná a csillag külső rétegeit (így megkönnyítve).

Minél nagyobb egy csillag tömege, annál gyorsabb ütemben alakítja át az anyagot energiává. Ennek következtében a nagy tömegű csillagok élettartama rövidebb, mint a kisebb tömegűeké. A csillagok – a fősorozaton való tartózkodásuk során - a hélium és hidrogén magjukban végbemenő fúzióból nyerik az energiát. Ez a folyamat a csillag tömegétől függően rövidebb vagy hosszabb. Egy naptömegű csillag élettartama 10 milliárd év, egy három naptömegű csillagé 500 millió év, egy 30 naptömegű csillagé már csak 6 millió év.

$$\text{Naptömeg: } M_{\odot} = (1.98892 \pm 0.00025) \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

G. Kémiai összetétel

A csillagok nagyrészt hidrogént és héliumot tartalmaznak, magjaik azonban nehezebb elemeket, például vasat tartalmaznak, ami magfúzió következménye.

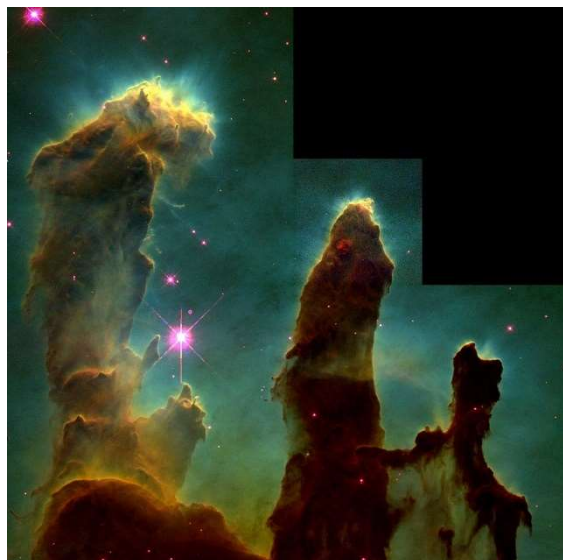
II. CSILLAGKELETKEZÉS

DEF A csillagkeletkezés az a folyamat, melynek során a csillagközi gázfelhőkben, elsősorban a gravitáció összehúzó hatására csillagok jönnek létre.

A. Csillagközi felhő

Ezen csillagközi anyag körülbelül $10^4 - 10^6$ részecskét tartalmaznak köbcentiméterenként [11]. Megközelítőleg a felhő tömegének 70%-a hidrogénből áll, a maradék nagyrésze pedig héliumból áll. A közeg nyomokban tartalmaz továbbá egyéb nehezebb elemeket, amelyek halott csillagokból maradványból származnak. Tömegük közel 1%-át grafit-, jég- és szilikátszemcsékből álló por alkotja [7]. A felhők átlagos élettartama kb. 40 millió év. A megfigyelések azt mutatják, hogy a felhőkben sűrű magok vannak.

A sűrű nebulában a hidrogén nagy része molekuláris formában (H_2) van, ezeket molekuláris felhőknek nevezzük. A felhő egyes részei a véletlenszerűség következtében sűrűbbek, mint a többi részei. Ezeket magoknak nevezzük. A nagyobb sűrűségükből következően ezek a magok a körülötte lévő anyagot vonzani kezdik. Ezek a kezdetleges magok lesznek később a csillagok magjai. A megfigyelések azt mutatják, hogy a hidegebb felhők kistömegű csillagot eredményeznek [12]. Az óriási molekula felhők általában melegebbek és mindenféle tömegű csillagot eredményezhetnek. Ezeknek az óriási molekula felhőknek a tipikus sűrűsége 100 részecske per cm^3 , sugaruk elérheti a 100 fényévet ($9.5 \cdot 10^{14} \text{ km}$), tömege elérheti a 6 millió naptömeget is és átlagos belső hőmérséklete 10 K.



II.1. ábra A teremtés oszlopai, a csillagkeletkezés megfigyelhető az űr ezen régiójában (1995, Fotó: NASA, Jeff Hester és Paul Scowen)

B. A felhő összeomlása

A gázfelhő hidrosztatikai egyensúlyban marad addig ameddig a gáz kinetikus energiája egyensúlyban van a gravitációs erő potenciális energiájával. Matematikailag ezt a viriáltétellel lehet kifejezni, miszerint az egyensúly fenntartásához a gravitációs potenciális energiának a belső hőenergiának a kétszeresének kell lennie. Ha egy felhő elég masszív válik, a gáz nyomása nem lesz elég az egyensúly fenntartásához és a gravitáció hatására összeomlik. Ezen tömeg kiszámítására a Jeans-tömeget kell kiszámolnunk.

A Jeans-tömeg megközelítőlegesen értékének levezetését egy egyszerű fizikai megállapításával levezethetjük. Legyen a gömb alakú gáz terület sugara R , tömege M és a gáz hangsebessége c_s . A gáz kismértékben összenyomott és időbe telik

$$t_{hang} = \frac{R}{c_s} \approx 0.5 \text{ Myr} \cdot \frac{R}{0.1 \text{ pc}} \cdot \left(\frac{c_s}{0.2 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-1}$$

hogya a hang hullámok végigmenjenek a területen és kialakítsák a nyomás egyensúlyt. Ugyanakkor, a gravitáció megpróbálja összenyomni a rendszert, amit szabadesés idejében meg is tesz,

$$t_{szabadesés} = \frac{1}{(G\rho)^{\frac{1}{2}}} \approx 2 \text{ Myr} \cdot \left(\frac{n}{10^3 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

ahol G a gravitációs állandó, ρ a gáz sűrűsége a területen és $n = \rho/\mu$ a gáz részecske sűrűsége ($\mu = 3.9 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ a 80% Hidrogén, 20% Hélium rendszerre). Amikor a hang terjedési sebessége kisebb a szabadesés idejénél, a nyomás egy időre legyőzi a gravitációt és a rendszer egy stabil egyensúly állapotba kerül. Azonban amikor a szabadesés ideje kisebb a hang terjedési sebességénél, a gravitáció legyőzi a belső nyomást és a terület összeomlik. Tehát a gravitációs összeomlás feltéte:

$$t_{szabadesés} < t_{hang}$$

Az ebből származó Jeans-hosszúság λ_J megközelítőlegesen:

$$\lambda_J = \frac{c_s}{(G\rho)^{\frac{1}{2}}} \approx 0.4 \text{ pc} \cdot \frac{c_s}{0.2 \text{ km s}^{-1}} \cdot \left(\frac{n}{10^3 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

Ezen hosszúság a Jeans-hosszúság. Minden méret ami a Jeans-hosszúságnál nagyobb instabil a gravitációs összeomláshoz, ellentétben a kisebb méretekkkel, ahol stabil. Tehát a Jeans-tömeg valójában az a tömeg, ami a gömb R_J sugarában van ($R_J = \frac{1}{2}\lambda_J$, a Jeans-hosszúság fele):

$$M_J = \frac{4\pi}{3} \rho R_J^3 = \frac{\pi}{6} \cdot \frac{c_s^3}{G^{\frac{3}{2}} \rho^{\frac{1}{2}}} \approx 2M_{\odot} \cdot \left(\frac{c_s}{0.2 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \left(\frac{n}{10^3 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

Megállapítottuk tehát a kritikus tömeget amely felett a gázfelhő összeomlik. Összeomlásokkor tucatjára omlanak össze, csillagokat létre hozva. A végterméke egy mag összeomlásnak egy nyitott csillag klaszter.

Ahogy összeomlanak a molekuláris felhő kisebb és kisebb darabokra esik szét addig, amíg a töredékek csillag tömeget nem érnek el. Az összeomló darabok energiát sugároznak, amit a gravitációs potenciális energia leadásával történik. Ahogy a sűrűség növekszik, a töredékek úgy válnak egyre átlátszóbbá, és ezzel kevésbé hatékonyabbá az energiájuk sugárzásában. Ez megnöveli a felhő hőmérsékletét, ezzel meggátolva a további tördelést. A töredékek összesűrűsödnek egy forgó gáz gömbbő, amelyek tulajdonképpen csillag embriók.



II.2. ábra Felhő összeomlása. (Fotó: Atacama Large Millimeter Array)

C. Protocsillag

A protocsillag fázis egy molekulafelhő gravitációs kontrakciója során akkor kezdődik, amikor már létezik egy, a környezetéről tökéletesen izolálódott mag, amely soha többé nem tud már a környező felhőbe visszatárgulni. Ebben az értelemben ez az objektum még nem protocsillag (semmilyen csillagszerű nincsen benne), jobb elnevezés az "első mag" [14]. Ahogyan a sűrűség nő, a központi rész átlátszatlanná válik saját, összehúzódásból származó infravörös sugárzására. Ahogy a mag lassan összehúzódik, a hőmérséklet nő, ami a mag tágulásához kellene, hogy vezessen. Ezzel szemben a termikus nyomás nem elegendő ahhoz, hogy tágulást okozzon a gravitációval szemben, ezért a mag továbbra is összehúzódik. A mag tömege még igen kicsiny, kb. $5 \cdot 10^{-2} M_{\odot}$, de a mag sugara igen nagy egy csillaghoz képest, kb. 5 CsE. Az, hogy a mag nagy része molekuláris hidrogénből áll önmagában is biztosítja az első mag összeomlását.

A belső hőmérséklet, bár nagyon alacsony a valódi csillagokhoz képest, jóval magasabb, mint a stabil molekulafelhőkben, ahogyan magasabb az átlagos sűrűség is, ami most körülbelül $10^{-10} \text{ g cm}^{-3}$. További tömeg hozzáadásával (a mag gravitációs hatása miatt a környezetből anyag áramlik a magba) és a mag további összehúzódásával könnyen elérhetjük a 2000K-es hőmérsékletet, ahol megindul a H_2 ütközéses ionizációja. Emiatt a hőmérséklet növekedése jelentősen lelassul, további hőmérséklet növekedés helyett az összehúzódás a hidrogén molekulák nagyobb hányadának disszociációját okozza, s így kifelé terjed az a tartomány, ahol a hidrogén már atomos formában van jelen. Mivel a sűrűség, s ezzel együtt a gravitációs energia kis növekedése nem ellensúlyozható a hőmérséklet, s ezzel a nyomás emelésével (csak további molekulák disszociálnak) a mag gravitációsan instabillá válik. A gravitációs instabilitás megjelenése jelenti az első mag állapot végét.



II.1.3. ábra Protocsillag (művész ábrázolása)

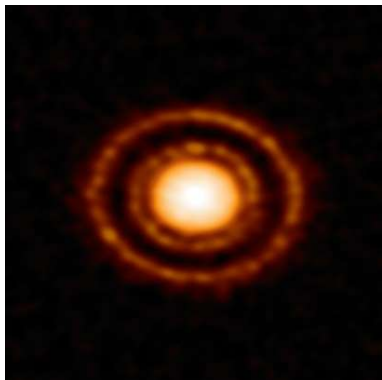
Az anyagnak az a része, amely jelentős impulzusmomentummal, lendülettel rendelkezik, a bezuhanás során egyre gyorsabban fog a centrum körül keringeni. Mozgása végül annyira felgyorsul, hogy nem is tud a protocsillag felszínére hullani, hanem akörül fog mozogni. A folyamat révén egy korong alakul ki - ez alapul szolgálhat a bolygórendszerkeletkezéséhez. A protocsillag összehúzódása a szabadesés fázisa után jelentősen lelassul. A zsugorodás hatékonyabb energiatermelő folyamat, mint a magfúzió, ekkor energiakibocsátása jelentősen meghaladja későbbi, fősorozati energiakibocsátását. Fénye azonban nem távozik el szabadon, az őt körülvevő por- és gázburok következtében erősen elvörösödik. A szabadesés szakasza után nagyságrendileg néhány millió évvel kerül a fősorozatra.

A protocsillagnak abban a fejlődési szakaszában, amikor sűrű anyagkoronggal rendelkezik, gyakran lehet megfigyelni a csillag forgástengelyének két pólusából kifelé irányuló, ún. bipoláris anyagkilövelléseket. Ez a protocsillag erős anyagkibocsátásának következménye lehet, amely a vastag korong miatt csak a két pólus irányába talál magának szabad utat. (A jelenségben valószínűleg elektromágneses hatások is közrejátszanak.) A protocsillag nagy energiakibocsátása lassanként elpárologtatja az őt körülvevő felhő porszeméit és annak gázanyagát is elkezdí kisöpörni - kivéve az addigra összeállt nagyobb testeket, bolygócsírákat. Ezt a szakaszt nevezzük T Tauri stádiumnak. Ennek során jelentős a protocsillag tömegvesztesége, az anyagkibocsátás a felszínről erős csillagszél formájában az évi 10^{-7} naptömeget is elérheti.

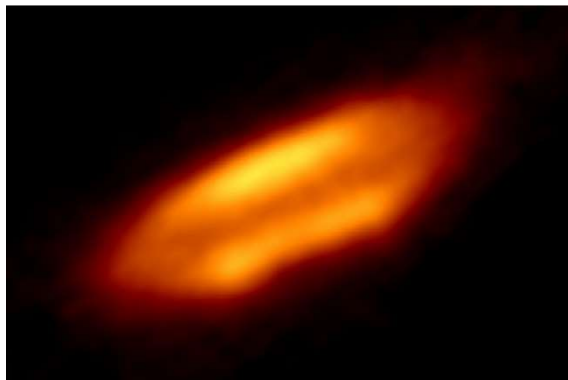
A kialakuló csillagnak rendkívül gyorsan kellene pörögnie, amennyiben ősi felhőjének teljes impulzusmomentumát megőrizte volna. Ennek azonban jelentős részét elvesztette, valószínűleg az alábbi két folyamat révén. Összehúzódása korai szakaszában erővonalak segítségével a környezetébe vezette el lendülete egy részét (valamint elképzelhető, hogy a korongba), később pedig erős csillagszél segítségével szabadult meg tőle. Ugyancsak impulzust veszíthet a túlságosan gyorsan pörgő protocsillag, ha két vagy több részre válik szét, ekkor forgási energiájának egy része keringési energiává alakul. (Ez magyarázatot ad a szoros kettős és többszörös rendszerek keletkezésére.) Amikor a zsugorodó protocsillag belsejében a hőmérséklet eléri a néhány millió fokot, egy-két könnyebb elem (Li, Be, B) fúziója megindul, ez azonban még nem tudja megállítani az összehúzódást. A zsugorodás egészen addig folytatódik, míg meg nem kezdődik a centrumban a hidrogénfúzió, és míg olyan intenzív nem lesz, hogy képes legyen egyensúlyba hozni a csillagot [15].

III. A FIATAL CSILLAG

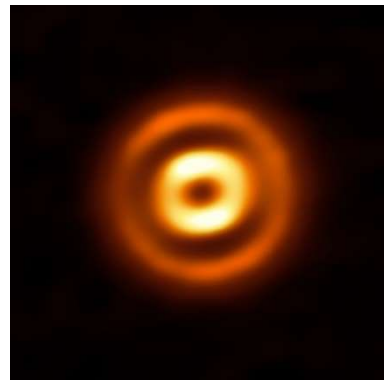
Mint azt már az előző részben kifejtettük, a protocsillag körüli burok egy része az impulzusmegmaradás törvénye értelmében a forgássíokban egy korongban halmozódik fel. (Ilyen anyagkorongot már sok fiatal, a fősorozati állapot felé fejlődő protocsillag körül sikerült kimutatni.) A korong anyaga az impulzusmegmaradás törvénye értelmében beljebb, a protocsillag felé nem tud hullani, saját gravitációs tere hatására azonban forgássíkjára merőleges irányban összehúzódhat. A folyamat eredménye egy relatíve vékony anyagkorong lesz, amelyben a később kialakuló égitestek egy adott irányban, a korong forgási irányában fognak keringeni, még hozzá egy síkban [15].



III.1. ábra Protoplanetáris korong
(AS 209)

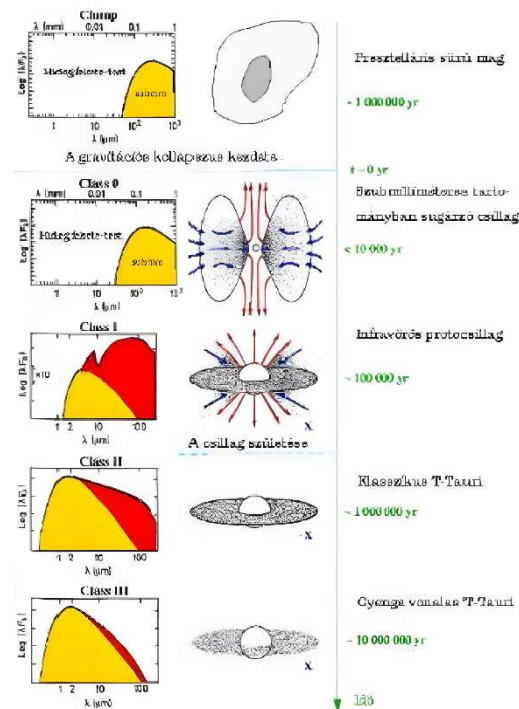


III.2. ábra Protoplanetáris korong (HH 212)



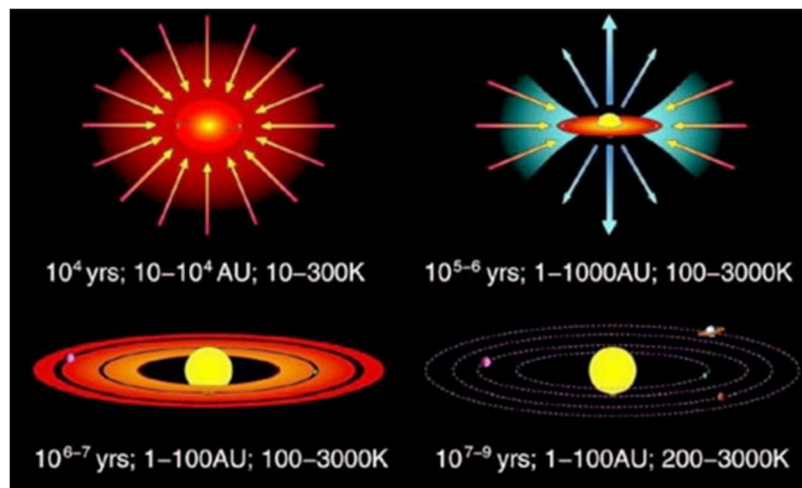
III.3. ábra Protoplanetáris korongok
megfigyelésével kutatható a bolygók
keletkezésének hogyanjai

II.1 ábra A csillagok fősorozat előtti fejlődésének főbb állomásai



Ezek kialakulása a csillagkeletkezés első fázisa. A második fázis az, mikor a mag a saját gravitációja hatására kezd összehúzódni. Az összehúzódás elején a mag anyaga még annyira ritka, hogy a felszabaduló gravitációs energia szabadon kisugárzódik, ezért a mag hőmérséklete nem emelkedik. A folyamat először egy sűrűbb mag kialakulásához (protocsillag) vezet, melyre kevésbé sűrű anyag hullik

A felhőnek kezdetben volt valamennyi impulzusmomentuma (perdület). Összehúzódáskor a sugara jelentősen csökken, ami az impulzusmomentum megmaradás törvénye miatt a forgási sebesség megnövekedésével jár. Ez azt eredményezi, hogy az összehúzódó felhő belapul. Kialakul a csillagmag és egy körülötte lévő anyagkorong, az ún. akkréciós korong. Ekkor a csillag anyaga már olyan sűrű, hogy a sugárzás nem tud akadálytalanul kijutni belőle, ezért a felszabaduló gravitációs energia melegíti a protocsillagot, így az láthatóvá válik.



II.2. ábra A fiatal csillag körüli korong az impulzusmomentum megmaradása révén alakul ki; ez a megmaradási törvény érvényes a bolygórendszer kialakulása után is (F. H. Shu nyomán)

Mikor a protocsillag belsejének hőmérséklete eléri a $10-15$ millió Kelvint, akkor megnő a hidrogén héliummá való átalakulásának valószínűsége és beindulnak a fúziós reakciók. Ezen a ponton az összehúzódás leáll, mivel a csillagban uralkodó nyomás ki tudja egyenlíteni a gravitáció hatását. A csillag megérkezik a fősorozatra. A csillagkörüli anyagkorong egy része ráhullik a csillagra. Másik részéből pedig a por- és gázrészecskék összeolvadása révén bolygócsírák, majd bolygók keletkeznek.

Ezért mire a csillag eléri a fősorozatot, az akkréciós korong nagy része eltűnik. Ilyen módon alakult ki a Naprendszerünk is.

A csillagok többnyire csoportosan keletkeznek. Ennek az oka, hogy a felhő összehúzódás közben általában feldarabolódik, és az egyes darabok egymástól függetlenül fejlődnek tovább. A csoportos csillagkeletkezés eredményeként jönnek létre az asszociációk (laza csoportok) és a nyílthalmazok (kötöttebb csoportok).



II.1.4. ábra Egy tipikus nyílthalmaz, a Fiastyúk. Területén az együtt született csillagok még nem szóródtak szét az űrben.

HIVATKOZÁSOK ÉS FORRÁSOK

- [1] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Csillag>
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/Star> (angolul)
- [3] <https://www.britannica.com/science/star-astronomy> (angolul)
- [4] <https://www.spacetelescope.org/images/potw1509a/> A young star takes centre stage, spacetelescope.org (angolul)
- [5] https://hu.wikipedia.org/wiki/Égitestek_fényessége
- [6] https://hu.wikipedia.org/wiki/Abszolút_fényesség
- [7] http://astro.u-szeged.hu/oktatas/csillagaszat/7_Csillagfejlodes/csilagfejlodes.htm
- [8] http://hirek.csillagaszat.hu/csillagok_fejlodese/20080724-legnehezebb-csillagok-ngc3603.html, Székely, Péter: Megtalálták a legnagyobb tömegű csillagokat?
- [9] https://web.archive.org/web/20080201141449/http://hirek.csillagaszat.hu/csillagok_szuletese/20080131-protocsillag-novekedes-kozben.html
- [10] https://www.physicsoftheuniverse.com/topics_blackholes_stars.html
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Star_formation
- [12] Zhang, Guo-Yin; André, Ph; Men'shchikov, A.; Wang, Ke (2020 Október). "Fragmentation of star-forming filaments in the X-shaped nebula of the California molecular cloud". *Astronomy and Astrophysics*. **642**: A76.
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Free-fall_time
- [14] https://web.archive.org/web/20110606141031/http://astro.elte.hu/icsip/csil_elete/csilagkeletkezes/protocsillagok_in.html
- [15] Kereszturi Ákos: *Csillagászat tankönyv*, <https://mek.oszk.hu/00500/00556/00556.pdf>, 60-64
- [16] https://web.archive.org/web/20080621061626fw_/http://astro.elte.hu/icsip/csil_elete/csilagkeletkezes/korongok.html