

1. A FÖLD KELETKEZÉSE

Az Univerzum, a csillagok és a bolygók keletkezése a földtudományok egyik legizgalmasabb kérdése. A Föld kialakulására vonatkozó korábbi elképzelések egyik része a Földet a Naptól származtatja, a másik része a Naptól független módon próbálja a kialakulását magyarázni. Mindkét csoporton belül az elképzelések egyik része a Földet igen magas hőmérsékletű anyagból származtatja, a másik része azt feltételezi, hogy hideg anyag koncentrációjaként keletkezett. Vannak olyan elképzelések, amelyek a Nap mozgásától független okot keresnek, mások a bolygók kialakulását a Naprendszerrel független csillaggal hozzák kapcsolatba. Valamennyi modell esetében az egyik legnagyobb probléma a vasnál magasabb rendszámú elemek magas részarányának magyarázata a Földön. A korábbi elképzelések inkább filozófiai eszmefuttatások eredményeként, sok esetben a szükséges fizikai alapismeretek hiányában születtek, ezért ezekkel az alábbiakban nem foglalkozunk. A mai fizikai és természettudományos ismereteink már lehetővé teszik, hogy az eddigiektől eltérő magyarázatot keressünk és komolyabban vizsgáljuk a Föld keletkezésével kapcsolatos kérdéseket. A magyarázat természetesen nem egyszerű, számos kérdés még nyitott, néhány ellentmondás is tisztázást igényel.

A csillagok kialakulása

A Nap, a csillagok, az izzó vasdarab, a forró víz, vagy a gerjesztett atom magára hagyva lehül, spontán sugároz. Az energia szabadulni igyekszik a nyugalmi állapotából, mozgási energiává kíván alakulni. Az elemi részecskék kettő kivétel instabilak, a másodperc parányi része alatt sugárzássá párolognak. A sugárzás a tiszta mozgási energiájával az anyag termodinamikailag legstabilabb állapota. A folyamat mindössze két helyen jut zsákutcába. Az elektromos- és a bariontöltésre vonatkozó megmaradási törvény miatt csupán két nyugalmi tömeggel rendelkező részecske menekülhet meg a széthullástól; csak az elektronoknak és a protonoknak van esélye a stabilabb életben maradásra.

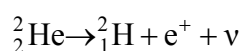
Az azonos elektromos töltésű részecskéket viszont a Coulomb-erő taszítja és szórja szerteszét, – hacsak a protonok pozitív elektromos töltését egyenlő számú elektron negatív töltése nem kompenzálja. Ekkor a részecskék halmaza mégis együtt maradhat, az elemi részecskék sugárzástól megmenekült része hidrogén gázzá egyesül. A galaxisok ősei nagy valószínűséggel óriási hidrogénfelhőként úsztak a térben. A csillagok és csillagközi tér anyaga kétharmad részben ma is hidrogén.

A hidrogénfelhők belsejében az egyensúly rendkívül gyenge, a „rend” könnyen felborul. A gravitációs erő hatására kisebb-nagyobb anyagcsomósodások, ún. globulák jönnek létre. A kezdetben még lassan összesűrűsödő anyag először gyenge gravitációs teret kelt maga körül, amely viszont tovább tömöríti a kezdeti anyagcsomókat. A sűrűség növekedése viszont egyre intenzívebb gravitációs teret kelt, – a folyamat önmagát erősíti. Kezdetben a hidrogénfelhőkben lévő anyag még nagyon hideg, de a tömörödés miatt fokozatosan emelkedik a hőmérséklete. A melegedő hidrogéngáz sugározni kezd, az energia szabadulni igyekszik a tömegtől. A sugárzást a gravitációs energia csökkenése fedezi. Ha ennek a hidrogénfelhőnek az impulzusnyomatéka különös véletlen folytán nem pontosan zérus, a forgási centrifugális erő gátolja a minden határon túli gravitációs tömörödést. Csak olyan kontrakció mehet végbe, amely a tehetetlenségi nyomatékot nem csökkenti és a forgási energiát nem

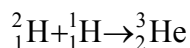
növeli. Így a keletkező galaxisok hidrogénfelhője belapul, spirálkarokba sűrűsödik, kisebb gázgolyókká szakadozik szét, – megszületnek a csillagok.

Mivel a csillagok impulzusnyomatékának döntő része nem a forgásból, hanem a galaktikus centrum körüli keringésből származik, ezért a csillag anyaga tovább tud zsugorodni, egyre nő a sűrűsége és nő a gravitációs erő is. A külső rétegek fokozódó súlya miatt azonban a nyomásnak is növekednie kell, ami a hőmérséklet emelkedését eredményezi. Ezért a fokozatosan összehúzódó csillag a gravitációs energiájának jelentős részét a belső hőmérsékletének növelésére fordítja, és csak a felesleget sugározza ki. A csillag belsejében a hőmérséklet sok ezer, majd millió fokra emelkedik, a protonok hőmozgása, ütközése egyre intenzívebbé válik, – legyőzve a kölcsönös Coulomb-taszítást, egyre többször kerülnek be egymás nukleáris erőterébe. Két proton azonban a Pauli-féle kizárási elv miatt nem tud összekapcsolódni, a termonukleáris fúzió beindulása nem ilyen egyszerű.

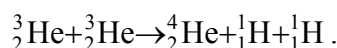
Ha két protont nagy erővel mégis sikerül hosszabb ideig együtt tartunk, akkor az egyik proton neutronná bomlik, amely 2MeV energia felszabadulásával a protonhoz kötődik. Létrejön tehát a:



termonukleáris fúzió, a két protonból egy e^+ pozitron és egy ν neutrínó felszabadulásával “nehéz” hidrogén, deutérium keletkezik. A szokásos jelölés szerint az alsó index a *rendszám* (a protonok száma), a felső index pedig a *tömegszám* (a protonok és neutronok együttes száma). A folyamatot jelentősen nehezíti, hogy két ütköző proton tartósan nem maradhat együtt (a két protonból összekényszerített He mag nem stabil), az ütközésnek mindössze 10^{-20} másodperces időtartama áll rendelkezésre neutronná alakulás számára. Ezért csak rendkívül sok proton ütközése vezethet a fúzióra. A további reakciók már gyorsabban végbemennek, pl. a deutérium kb. 2 másodpercen belül fuzionál hidrogénnel:



és a ${}^3_2\text{He}$ is gyorsan ${}^4_2\text{He}$ héliummá alakul:

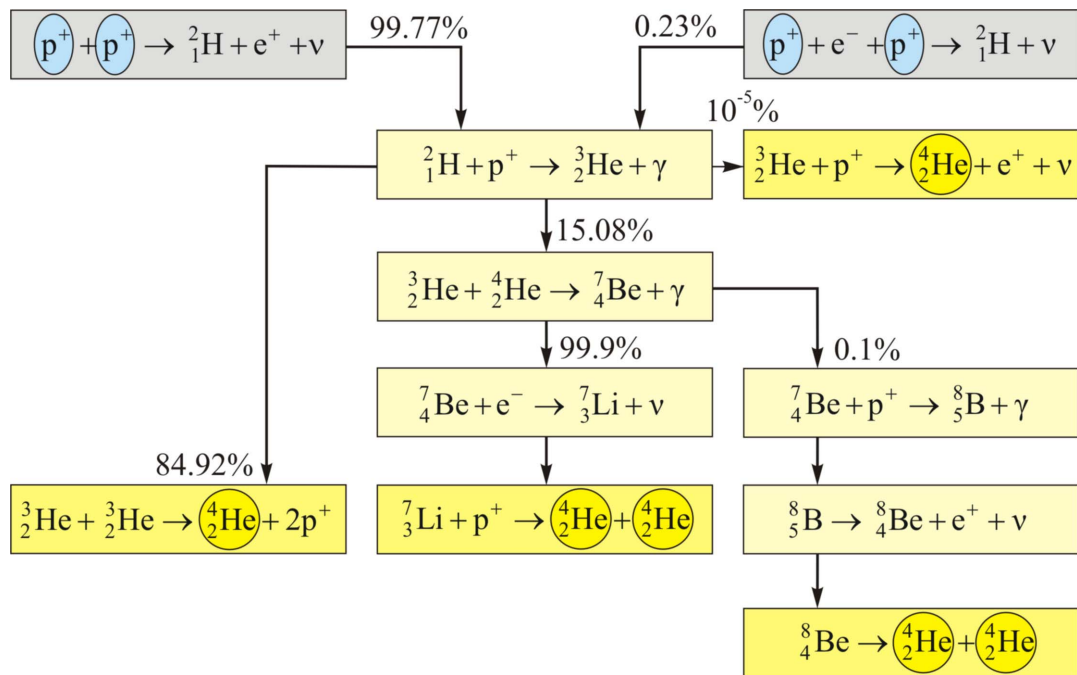


Az 1. és a 2. ábrán a Nap méretű csillagok belsejében lejátszódó proton–proton, illetve CNO (szén \rightarrow nitrogén \rightarrow oxigén) ciklus energiatermelő folyamatát követhetjük nyomon. Az 1. ábrán feltüntettük az egyes reakciók részarányát is. A legelső lépés tehát hihetetlenül lassú, mivel ennek során a gyenge kölcsönhatás alakítja át a protont neutronná. Valójában ez a korlátozó lépés, mivel egy proton átlagosan 10^9 évet vár arra, hogy deutériummá egyesüljön egy társával.

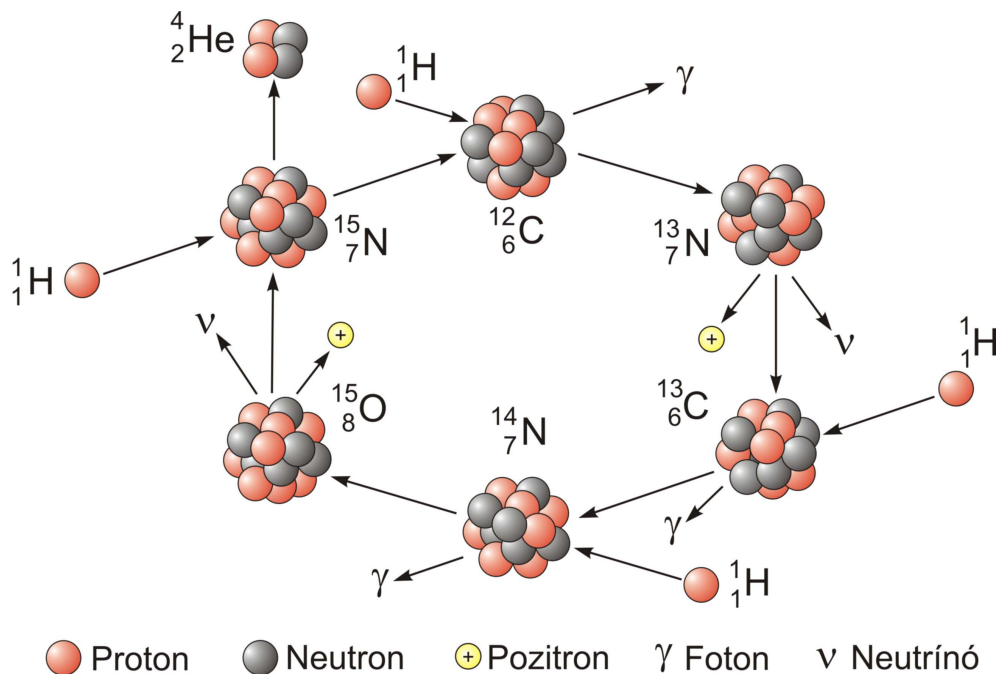
10-20 millió fok hőmérsékleten a héliumnál nehezebb elemek nem alakulhatnak ki, mert a nehezebb magokat nagyobb elektromos töltésük miatt magasabb Coulomb-gát tartja távol egymástól.

A proton-proton és a CNO ciklus során a speciális relativitáselmélet $E=mc^2$ összefüggése szerint anyag alakul át energiává. Négy hidrogénmag héliummaggá alakulásának egyenlege: egy hidrogénmag (proton) tömege 1,008 atomi tömegegység (u), egy héliummagé pedig 4.004 u . Mivel $4 \times 1.008 u = 4.032 u$, ezért 0.028 tömegegységnyi anyag $25 \text{ MeV} = 4 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ energiává alakul. Pontosabban számolva, és figyelembe véve az elektronnal találkozva megsemmisülő pozitronok energiáját is, a felszabaduló energia 26.73 MeV. Ez magyarázza a csillagok sugárzását és hozza létre

azt a belső sugárnyomást, amely a gravitációval szemben egyensúlyban tartja a csillagot.



1. ábra. A proton–proton ciklus energiatermelő folyamata.

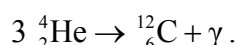


2. ábra. A CNO ciklus energiatermelő folyamata.

A Napunk és az éjszakánként látható valamennyi csillag egy-egy termonukleáris reaktor, amelyek nagy részében a hidrogén ég héliummá, és termeli a fényt. A kisebb tömegű törpecsillagokban kisebb a nehézségi gyorsulás, könnyebbek a külső rétegek,

kisebb a nyomás és alacsonyabb a hőmérséklet is, ezért lassabb a termonukleáris fúzió. Így a törpecsillagok fénye akár százmilliárd évig is változatlanul pislákol. Az óriáscsillagokban a gravitációs erővel csak óriási nyomás tud egyensúlyt tartani, emiatt a magasabb centrális hőmérsékleten nagyobb teljesítménnyel folyik a hidrogén-hélium fúzió. A sárga és fehér óriások a gazdagabb fényükért rövidebb életükkel fizetnek, mivel a ragyogásuk nem tarthat tovább 10 vagy legfeljebb 100 millió évnél.

A csillagok hidrogénkészlete véges – a Napé még kb. hatmilliárd évig eltart, másoké hamarabb kimerül. A hidrogénkészlet megfogyatkozása, kimerülése esetén megszűnik az energiatermelés a csillag belsejében, a gravitációs erővel már nem tud egyensúlyt tartani a belső sugárnyomás, ezért a gravitáció növekedésével tovább növekedik a nyomás és a hőmérséklet. Százmillió fok körül beindul a hélium-szén fúzió:



A hármas ütközés miatt viszonylag lassú reakció ismét stabilizálja a csillagot. A magas belső hőmérséklet miatt a nagy sugárnyomás fellazítja a csillaglégkört, a „felfújódó” csillag vörös óriássá alakul és a megnövekedett felület miatt nagyobb fényességgel ragyog. Így kb. hatmilliárd év múlva a Napunk hidrogénkészletének kimerülését követően a Naprendszerben nem lehűlés, hanem jelentős felmelegedés fog bekövetkezni.

A hélium kiegészítést újabb gravitációs kontrakció, hőmérsékletemelkedés, majd a keletkezett szén, oxigén, neon, magnézium, kalcium nukleáris meggyulladás és elége követi. A csillagok centrális hőmérséklete akár a milliárd fokot is túllépheti, a fúzió egyre nagyobb atomtömegű elemekkel folytatódik, egészen a szilícium→vas fúzióig. A fajlagos kötési energia legnagyobb a vasatommagokban. Idáig az energiafelszabadító fúziók tartják életben a csillagot, viszont a vas fúziójához már energiára van szükség. Ezért a termonukleáris fúziók sora leáll a vasnál. A csillagok élete azonban itt nem fejeződik be, a történet innen kezd igazából érdekes és izgalmas lenni.

A csillagok fejlődése során az egyre magasabb rendszámú elemek kialakulásával az atommagok száma egyre kevesebb az elektronokéhoz képest, így a

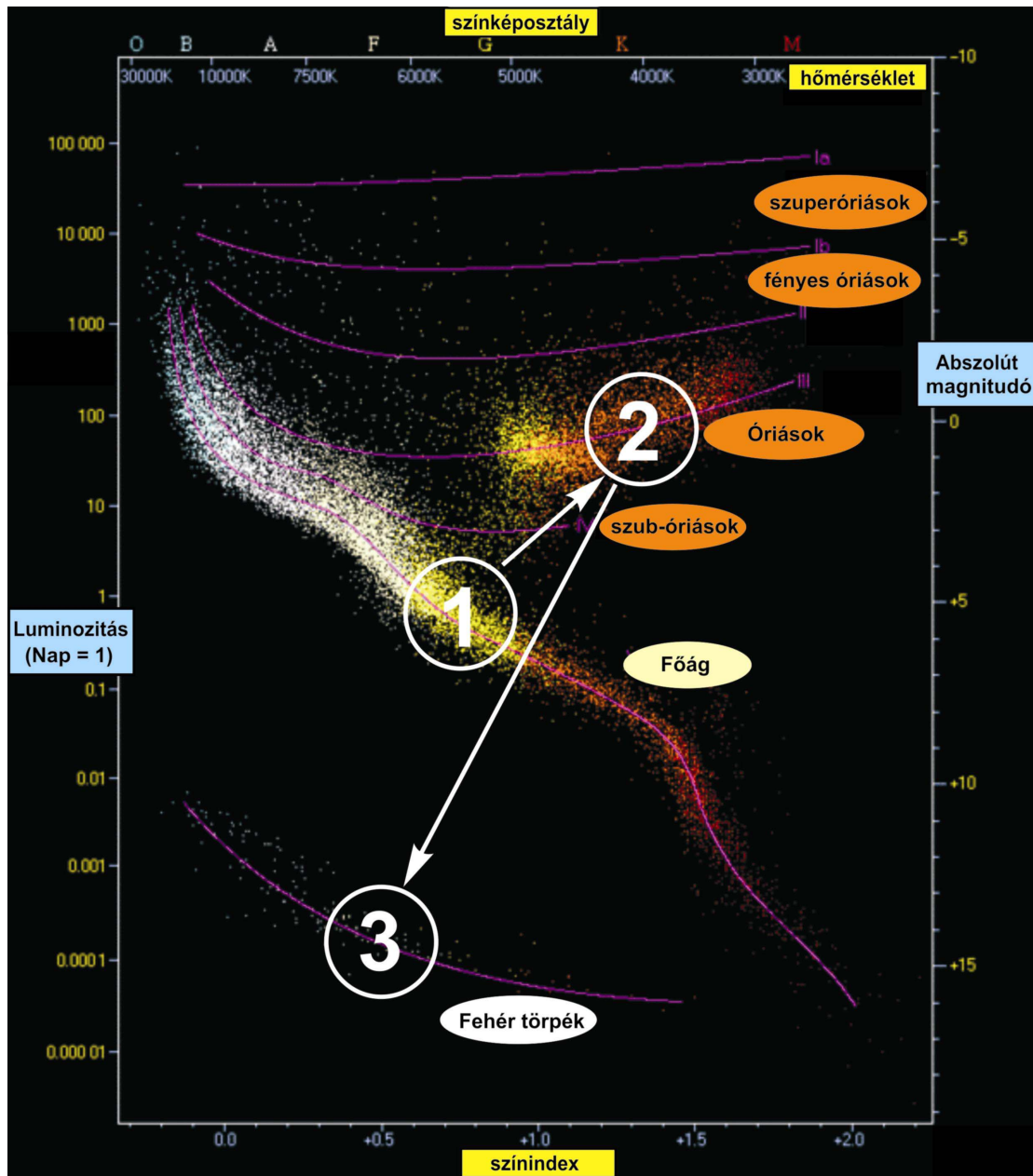
$$p = \rho_e kT \quad (1)$$

nyomás döntően az ideális elektrongáztól származik, ahol ρ_e az elektronok sűrűsége, k a Boltzmann-állandó, T pedig a hőmérséklet. Amint a kontrakció előrehalad, ρ_e elektronsűrűség nő, az elektronok egyre közelebb kerülnek egymáshoz. A közeledésüknek azonban a Pauli-elv szab korlátot, mivel ugyanabba a kvantumállapotba egynél több elektron nem juthat. Ezért az elektronok csak a még üres magasabb impulzusú állapotokba kerülhetnek, vagyis a sűrűség növekedése csupán az egyre magasabb impulzusú állapotok betöltésével lehetséges. A nagy sebességű elektronok Pauli-elv miatt bekövetkező szaporodása viszont ugyanúgy nyomásnövekedést idéz elő, mint a hőmérsékletnövekedés. A

$$T = \frac{8\pi}{15h^3 m_e k} \rho_e^{2/3} \quad (2)$$

elfajulási hőmérséklet felett megbomlik a termikus egyensúly, (h a Planck-állandó és m_e az elektron tömege) a nyomás gyakorlatilag függetlenné válik a hőmérséklettől (az elektrongáz elfajult állapotba kerül), a nyomás már a ρ_e elektronsűrűségnek függvénye:

$$p = 3^{2/3} 20^{-1} \pi^{-2/3} h^2 m_e^{-1} \rho_e^{5/3}. \quad (3)$$



3. ábra. A Nap-méretű csillagok fejlődéstörténete a Hertzsprung-Russell diagramon.
1: főág, 2: vörös óriás, 3: fehér törpe.

Ha a csillaganyag a megismétlődő gravitációs kontrakciók során eléri az elfajult elektrongáz állapotát, a hőmérséklet elveszíti a szabályozó szerepét, a sűrűség olyan értéket vesz fel, amely a (3) Fermi-nyomás szerint a hőmérséklettől függetlenül stabilá teszi a csillag helyzetét, további gravitációs tömörödés nem tud létrejönni. A termonukleáris energiatermelés megszűnik és a csillag fokozatosan elhalványul. Így alakulnak ki az elfajult elektrongázt tartalmazó összezsugorodott ún. *fehér törpe* csillagok. A fehér törpék sok milliárd év alatt lassan kihűlnek, végül sötét megmerevedett égitestként *fekete törpévé* válnak. A feltételezések szerint a galaxisunk mintegy tízmilliárd éve alakult ki, ez még nem volt elég fekete törpék képződéséhez, de a fehér törpék már millió számra láthatók a csillagos égen. A 3. ábrán az átlagos, Naphoz közeli tömegű csillagok fejlődéstörténete látható a Hertzsprung-Russell diagramon. A Hertzsprung-Russell diagram a csillagok abszolút fényességét ábrázolja a színük függ-

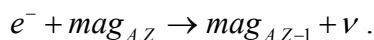
vényében (alul a csillag színindexe, felül a színképosztálya és a hőmérséklete, jobbra az abszolút magnitúdója, balra pedig a Naphoz viszonyított luminozitása látható a tengelyeken. Viszonylag kevés csillag található az alacsony fényesség - forró szín régióban (ezek a fehér törpék), a legtöbb csillag egy vékony sávban helyezkedik el, ezek a *fősorozatbeli* csillagok. A fiatal csillagok a Hertzsprung-Russell diagramon a fősorozat adott pontján helyezkednek el. A kicsi, vörös törpék hidrogénkészletüket lassan használják fel, így akár százmilliárd évig is a fősorozaton lehetnek; míg a nagy, forró szuperóriások már néhány millió év után elhagyják a fősorozatot. A Naphoz hasonló közepes méretű csillagok körülbelül tízmilliárd évig maradnak a fősorozat vonalán. Amint a csillag felhasználja hidrogén készletének döntő részét, kikerül a fősorozatból. A csillagok másik osztálya az óriások: ezek a diagram nagy fényességű részén találhatók. Ezeket a csillagokat a nagy sugárnyomás fújja fel óriási méretűre.

Nyilvánvalóan nem minden csillag alakul át fehér törpévé. Ettől alapvetően eltérő, többfajta különleges életút rajzolódik ki a nagyobb tömegű csillagok számára. Ha egy csillag tömegét gondolatban növeljük, a gravitációja is egyre növekszik, és előbb-utóbb eléri azt az értéket, amelyet már az elfajult elektrongáz (3) nyomása sem tud tovább ellensúlyozni. Chandrasekhar indiai fizikus számításai szerint a csillagoknak az a kritikus tömege, amelynél nagyobb tömeg esetén már az elektrongáz elfajulása sem képes ellensúlyozni a gravitációs nyomást, többek között függ a csillagot felépítő atomok Z rendszámától és A atomsúlytól. Pl. a hélium ($A = 4, Z = 2$) esetén a kritikus csillagtömeg 1.6 Naptömeg körüli érték. Ennél nagyobb tömegű csillagnál elfajult állapotba jutva a kontrakció nem áll meg fehér törpe állapotban, hanem az tovább folyik. A gravitáció egyre nagyobb és nagyobb sűrűséget hoz létre.

Ha bármilyen kémiai összetételű anyagot folyamatosan összenyomunk, az elektronoknak a Pauli-elvből és a Fermi-statisztikából következő maximális energiája, az

$$E_F^{(e)} = \frac{3^{2/3} h^2}{8 \pi^{2/3} m_e} \rho_e^{2/3} .$$

Fermi-energia egyre növekszik. Annál a sűrűségnél, ahol a Fermi-energia elég nagy lesz ahhoz, hogy az elektronokat atommagok befoghassák, az elektrongáz sűrűségének növekedése megáll. A további összenyomás során az elektrongáz az atommagokba préselődik és a mag protonjai az elektronokkal egyesülve folyamatosan neutronokká alakulnak:



10^{10} g/cm³ sűrűség felett az anyag összetétele teljesen megváltozik, az elektrongázban lebegő atommagok helyett neutrongáz alakul ki, melyben csak itt-ott található egy-egy elektron, proton, ill. nehéz mag. A neutronokra szintén érvényes a Pauli-elv, így azok nyomását a (3)-hoz hasonló összefüggés írja le:

$$p = 3^{2/3} 20^{-1} \pi^{-2/3} h^2 m_n^{-1} \rho_n^{5/3} .$$

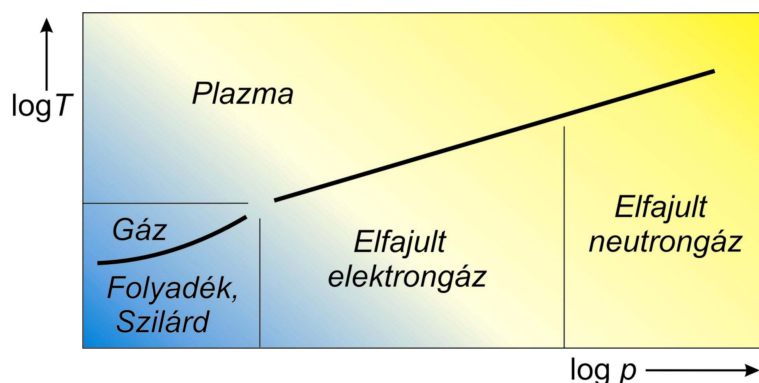
A sűrűséget tovább növelve a neutronok Fermi-energiája egyre nagyobb és nagyobb lesz. Ha olyan magas

$$E_F^{(n)} = \frac{3^{2/3} h^2}{8 \pi^{2/3} m_n} \rho_n^{2/3}$$

Fermi-energiájú neutronok jelennek meg, amelyekre

$$m_n c^2 + E_F^{(n)} > m_\Sigma c^2 + m_e c^2,$$

ezek a neutronok instabillá válnak, $n \rightarrow \Sigma^- + e^+ + \nu$ bomlással Σ -hiperonokká alakulnak át, tehát megindul a neutrongáz átalakulása *hiperongázzá*. A hiperonok ilyenkor stabilak, nem bomlanak el protonná és neutronná, mert a proton- és neutronállapotok mind be vannak töltve. Végül egész nagy sűrűségeknel, ahol a nukleonok Fermi-energiája több száz GeV-ra emelkedik, elképzelhető, hogy az elemi részek nehéz alkotórészeikre bomlanak, és *elfajult kvarkgáz* képződik. A 4. ábrán állapotterületei láthatók a nyomás és a hőmérséklet függvényében.

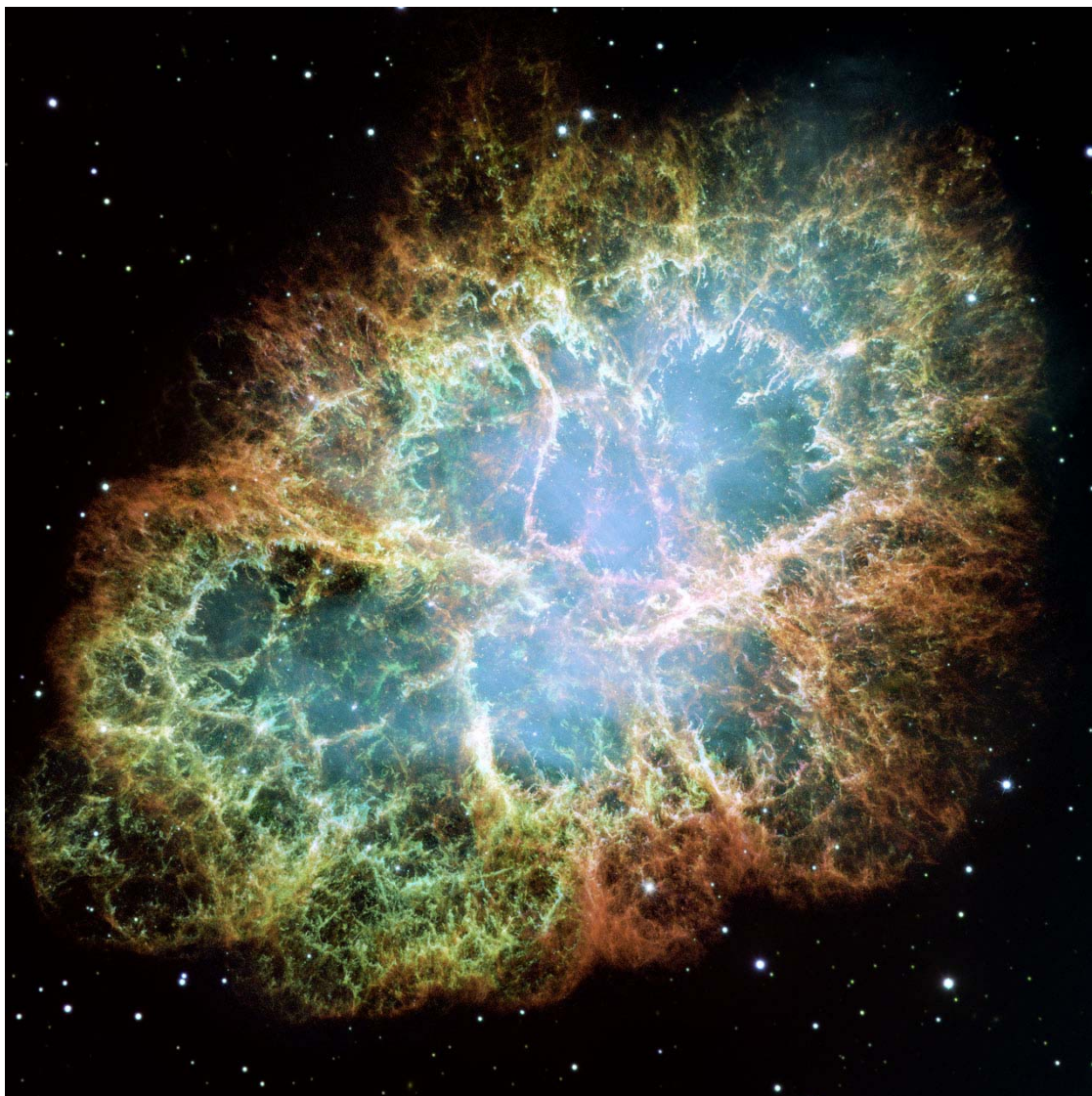


4. ábra. Az anyag állapotterületei a nyomás és a hőmérséklet függvényében.

Egyelőre nem biztos, hogy ilyen módon valóban kialakulnak neutroncsillagok, hiszen a csillag zsugorodása a Chandrasekhar-határ alatti tömeg esetén fehér törpe állapotban stabilizálódik.

A Chandrasekhar-határ feletti tömeg viszont neutroncsillag állapotban sem stabilizálódhat. Gondolatban kövessük végig egy 10 vagy 100 Nap-tömegű csillag fejlődésmenetét. Ebben a fehér óriáscsillagban a hidrogén néhány száz millió év alatt kiég, mert a centrális hőmérsékletének igen magasnak kell lennie ahhoz, hogy a nyomás megakadályozza a csillag összeroppanását. Idővel a csillag fehér óriásból vörös óriássá alakul, a hélium, majd az ezt követő többi elem fúziója során. A magas hőmérséklet, nagy gáz- és sugárnyomás miatt e csillagok anyaga még a centrumban is olyan ritka, hogy az elfajulás nem következik be. A csillaganyag akadály nélkül éri el akár a többmilliárd fok centrális hőmérsékletet, a fúzió egyre magasabb atomszámú elemekkel folytatódik, egészen a vasig. A vas-állapotban viszont leáll a termonukleáris energiatermelés, hiszen a vas a legnagyobb fajlagos kötési energiájával a végállomás. Újabb gravitációs kontrakció következik, a növekvő súlyt most már csak a csillag hőmérsékletének további emelkedése képes ellensúlyozni. Kb. 6 milliárd fok környékén az egyre intenzívebb hőmozgás megfordítja az anyagfejlődés útját, a magas hőmérsékleten megindul a vasatommagok felaprózódása, a törmelék neutronok pedig vasba befogva egyre nehezebb atommagokat építenek fel. A gravitációs energiát most már a vas szétbomlásához szükséges energia és a csillag sugárzása is fogyasztja. A csillag fejlődésének legutolsó szakasza másodpercek alatt leperog, a csillag a sokirányú veszteséget gravitációs összeomlással fedezi, a csillagmag szinte szabadeséssel roskad össze. A csillagmag neutroncsillaggá történő összeomlásakor felszabaduló gravitációs energia arra fordítódik, hogy a csillagtömeg külső rétegeit, a tömeg akár 90 %-át a világűrbe repíti szét. A szétrobbanó forró anyag óriásira növeli a csillag sugárzó felületét. A csillag átmenetileg, néhány hét vagy hónap alatt annyi fényt sugároz ki, mint a Nap akár egymilliárd év során. Ezeket a csillagkatasztrófákat a szupernó-

vákkal azonosíthatjuk. Az első kínai, japán és arab csillagászoktól származó hiteles feljegyzés szupernóva-kitörésről 1054-ből származik. A Bika csillagképben új csillag fellángolását jegyezték fel, amelynek fénye a Nap és Hold kivételével minden égitestét felülmúlt. A csillag hónapok múltán megfigyelhetlenné halványult, de ennek a helyén fedezték fel később a Rák-ködöt, a 3000 fényév távolságban levő, két fényév átmérőjű, 1300 km/s sebességgel táguló objektumot. Ha a robbanást időben visszafelé extrapoláljuk, ennek kezdetét éppen a XI. század adódik. Az 5. ábrán látható Rák-köd tehát minden bizonnyal az SN 1054 maradékának tekinthető.



5. ábra. Az SN 1054 maradéknya: a Rák-köd

Még nem teljesen tisztázott, hogy egy-egy szupernóva robbanás során valójában milyen mechanizmusok játszódnak le vagy, hogy pontosan mi marad az eredeti csillagból. Ez utóbbit illetően két végállapot feltételezhető: a robbanás centrumában vagy egy *neutroncsillag* marad vissza, vagy pedig ún. *fekete lyuk* képződik.

Ismeretes, hogy néhány szupernóva esetén a gravitáció olyan erős, hogy az atomok elektronjait az atommagba préseli, ahol azok a protonokkal kombinálódva neutronokká alakulnak és a csillag maradék anyagából egy csupa neutronokból álló rendkívül sűrű tömeg, tulajdonképpen egyetlen hatalmas atommag jön létre. Ezek a

neutroncsillagok rendkívül kis méretűek, az átmérőjük mindössze néhányszor 10 km. A forgási periódusuk a csillag zsugorodásával az impulzusnyomaték megmaradása miatt drasztikusan rövidül, másodpercenként akár több száz fordulatot tehetnek meg.

Nagyon valószínű, hogy nem minden szupernóva robbanás vezet neutroncsillag keletkezéséhez. Amennyiben a csillag tömege megfelelően nagy, akkor maguk a neutronok is összepréselődnek és a csillag összeroskadása megállíthatatlanul folytatódik. Ha a csillag mérete a Schwarzschild-sugár alá csökken, a csillag ún. *fekete lyukká* változik. Az elképzelhetetlen méretű hatalmas gravitációs tér semmiféle információt nem enged ki a külső megfigyelő felé. Az általános relativitáselmélet által megjósolt fekete lyukak létezését ma már megfigyelésekkel is sikerült igazolni, bár ezzel kapcsolatosan még bőven vannak megoldásra váró problémák.

A bolygók keletkezése

Láthatjuk tehát, hogy a csillagok fejlődése során létezik egy mechanizmus, amely képes legyártani és a világtérbe szórnival azokat a vasnál nehezebb elemeket, amelyeket a csillagok a termonukleáris fúziójuk során nem képesek előállítani, ugyanakkor Földünkön és a Naprendszer bolygóin is igen nagy mennyiségben megtalálhatók. A csillagok halálából, a szupernóva robbanásból, a szétszóródó csillagtörmelékekből születnek a bolygók. Földünk nehéz elemei is ilyen szupernóva kitörés által születhettek, az akkor elindult radioaktív órák mai mutatóállása szerint kb. 4.5 milliárd évvel ezelőtt.

Az ólom, az uránium és a sok nehéz elem a szupernóva-katasztrófa pillanataiban pár perc alatt épült fel a neutron-törmelékekből. A Föld ma is őrzi azoknak a kozmikus eseményeknek az emlékét, amelyekben hidrogénből kialakult a periódusos rendszer Földünkön megtalálható 88 különböző eleme.